

ISSN 2189-7557

# 年次研究報告

ANNUAL REPORT OF DIVISION OF PHYSICS  
THE UNIVERSITY OF TSUKUBA

2016（平成28）年度

筑波大学数理物質系物理学域

## 目 次

### — 研究活動 —

I	素粒子理論グループ	1
II	素粒子実験グループ	3 3
III	宇宙物理理論グループ	7 1
IV	宇宙観測グループ	9 9
V	原子核理論グループ	1 0 8
VI	原子核実験グループ	1 3 5
VII	物性理論グループ	
VII-1	量子物性理論グループ	1 7 0
VII-2	ナノ量子物性グループ	1 7 9
VII-3	表面界面物性グループ	1 8 4
VII-4	ナノ構造物性グループ	1 8 9
VII-5	量子輸送研究グループ	1 9 9
VIII	生命物理グループ	2 0 5
IX	物性実験グループ	
IX-1	磁性物性グループ	2 1 7
IX-2	ナノフォトニクスグループ	2 2 2
IX-3	強相関物性グループ	2 2 8
IX-4	光ナノ物性グループ	2 3 7
IX-5	低温物性グループ	2 4 2
IX-6	構造科学グループ	2 5 7
X	プラズマ研究グループ	2 6 2

### — 教育活動 —

XI	物理教育および物理教育の研究	3 0 5
	【1】 物理教育	
	(1) 学類教育	
	(2) 大学院教育	
	【2】 体験学習	
	【3】 カリキュラム関係	

### — 補足資料 —

大学院資料	3 1 1
物理学域資料	3 2 0



## I. 素粒子理論グループ

教授 石橋 延幸、金谷 和至、藏増 嘉伸

准教授 石塚 成人、谷口 裕介、山崎 剛、吉江 友照、根村 英克

助教 伊敷 吾郎、大野 浩史、佐藤 勇二、毛利 健司

計算科学研究センター客員研究員 青木 慎也（京都大学基礎物理学研究所）

研究員 浮田 尚哉、齋藤 華、佐々木 健志、滑川 裕介、村木 久祥、吉村 友佑

大学院生 （9 名）

### 【人事異動】

佐々木健志博士が基研研究員に転出した。（2016 年 4 月 30 日）。

齋藤華博士が民間企業に転出した。（2016 年 6 月 30 日）。

村木久祥博士が研究員として着任した（2016 年 8 月 1 日）。

吉村友佑博士が計算科学研究センター研究員として着任した（2016 年 10 月 1 日）。

根村英克博士が RCNP 研究員に転出した（2017 年 3 月 31 日）。

### 【研究活動】

素粒子理論グループにおいては、本年度も、格子場の理論と超弦理論の 2 つの分野で活発な研究活動が行なわれた。

格子場の理論グループは、計算科学研究センターと密接な連携のもと、格子 QCD の大型シミュレーション研究を推進している。格子場の理論グループの研究者の大半が参加する主要プロジェクトであった HPCI 戦略プログラム分野 5 研究開発課題 1「格子 QCD による物理点でのバリオン間相互作用の決定」は、2015 年度で終了した。2016 年秋からは、JCAHPC（最先端共同 HPC 基盤施設：筑波大学と東京大学両機関の教職員が中心となり設計するスーパーコンピュータシステムを設置し、最先端の大規模高性能計算基盤を構築・運営するための組織）において Oakforest-PACS（略称「OFP」：ピーク演算性能 25PFLOPS の超並列クラスタ計算機、「京」を超える国内最高性能システム）が稼働を開始した。本年度は、筑波大学を中心とした PACS Collaboration を組織し、OFP を用いた新たなプロジェクト研究を開始した。これと並行して、有限温度・有限密度 QCD の研究、 $K \rightarrow \pi\pi$  崩壊におけるハドロン行列要素計算、テンソルネットワーク形式に基づく格子ゲージ理論の研究、標準理論を超える物理の探求など、活発な研究活動を行った。さらに、格子 QCD 配位やその他のデータを共有する為のデータグリッド ILDG/JLDG の構築・整備を推進した。

国内の計算科学全体の動向として、2015 年度で終了した HPCI 戦略プログラムの後継として、「ポスト「京」で重点的に取り組むべき社会的・科学的課題」に関

するアプリケーション開発・研究開発が始まっている。現在9つの重点課題が設定されており、9番目の課題である「宇宙の基本法則と進化の解明」が素粒子物理・原子核物理・宇宙物理分野が対象とする基礎科学的研究課題である。その活動は、<http://www.jicfus.jp/jp> に詳しい。また、重点課題と並行して、2016年度から4つの萌芽的課題が設定され、1番目の課題である「基礎科学のフロンティア－極限への挑戦」は基礎科学における分野横断的な研究課題であり、本グループも分担機関として参加している。

超弦理論グループは弦の場の理論、行列模型、ゲージ重力対応という3つの関連するテーマを中心として研究を進めている。弦の場の理論と次元正則化、弦の場の理論の古典解の研究、重力理論/ゲージ理論双対性とグルーオン散乱振幅、弦理論の非幾何学的背景時空、行列模型における古典極限と幾何学の関係、ゲージ重力対応の数値的検証等の超弦理論に関連する様々な分野についての研究を行った。

## 【1】 格子場の理論

(金谷 和至、藏増 嘉伸、石塚 成人、谷口 裕介、山崎 剛、吉江 友照、根村 英克、浮田 尚哉、斎藤 華、佐々木 健志、滑川 裕介、吉村 友佑)

### (1) PACS Collaboration による Oakforest-PACS を用いた大規模シミュレーション

2016年秋に JCAHPC において Oakforest-PACS(OFP) が導入され、稼働を開始した。OFP はピーク演算性能が 25PFlops であり、「京」コンピュータを抜いて現在日本最速のスーパーコンピュータである。本年度は、筑波大学を中心とした PACS Collaboration を組織し、OFP を用いた新たなプロジェクト研究を開始した。

過去30年以上にわたり、格子 QCD は主にハドロン単体の諸性質解明を目指して来た。現在の世界的な状況においては、2つの大きな問題点が存在する。まず、物理点直上でのシミュレーションが可能になったことは事実だが、実際には物理点のみで物理量の評価を行えるほどの精度を得るレベルには至っていない。次に、現在の格子 QCD シミュレーションに置ける物理量計算は” テーラーメイド ” であると評されている。これは、目的とする物理量計算に応じて、適当と思われる物理パラメータ (クォーク質量や空間体積など) を選んでシミュレーションすることを意味している。この場合、例えば、同じゲージ配位を用いた計算であっても、ある物理量に対しては良く実験値と合うが、他の物理量に関しては実験値を再現しないということが起こりうる。OFP を用いたプロジェクトでは、複数の格子間隔において物理点直上で  $(10\text{fm})^3$  超の大空間体積を持つシミュレーションを行うことによって、上記2つの課題を克服した計算を実現する。

2016年度前半は、OFP での大規模計算へ向けて主に Wilson クォーク作用における改良係数の決定と物理点のチューニングを行った。秋以降に OFP の試験運用が開始されたことに合わせて、格子カットオフ  $=2.33\text{GeV}$  で  $(10\text{fm})^3$  超の空間体積を持つ 2+1 フレーバー QCD のゲージ配位生成を開始した。物理量の本格計算は 2017年度以降になる見込みである。

## (2) チャームクォーク系の研究

滑川は、京コンピュータにて生成されたゲージ配位を用いて、チャームクォーク系のシミュレーションを行った。Smearing と呼ばれるゲージ場の平滑化操作により、特に繰り込み因子の誤差が大きく削減されることを確認できた。この結果、 $\eta$  c 崩壊定数及びチャームクォーク質量を高精度で計算可能になった。他方、チャーモニウムの超微細構造では、有限格子間隔誤差が 10 % 程度と予想に反して大きいことが判明した。格子間隔がゼロの連続極限值を求める必要性が定量的に明らかとなった。

## (3) 有限温度・有限密度 QCD の研究 (WHOT-QCD Collaboration)

有限温度・有限密度 QCD の相構造と、高温高密度相における QGP の性質の精密な理解は、初期宇宙の物質進化や物質創成メカニズムの解明への重要なステップだが、終状態に数千個以上の粒子を含む複雑な重イオン衝突実験データから QGP 生成の明確な証拠とその熱力学特性を引き出すためには、格子 QCD による QCD 第一原理からの理論計算が不可欠である。格子 QCD の大規模シミュレーションによる有限温度・有限密度 QCD の研究を行い、相構造の解明とクォーク物質の熱力学的性質の計算を遂行し、またそのための計算手法開発を進めた。

### 格子 QCD シミュレーションによる有限温度・有限密度 QCD の研究

金谷、谷口らは、有限温度・有限密度 QCD 相構造とクォーク物質の熱力学的諸性質を、ウィルソン型格子クォークを用いた格子 QCD シミュレーションにより導くことを目的として、新潟大学江尻信司准教授、広島大学梅田貴士准教授、九州大学鈴木博教授、大阪大学北沢正清助教らとの共同研究を引き続き推進した。2016 年度は、グラジエントフロー法を応用した研究を大きく進展させた。また、多重点再重み付け法とヒストグラム法を使った手法開発も進め、その応用として、QCD のグルオン部分である SU(3) ゲージ理論で 1 次相転移点における潜熱の研究や、 $N_F = 2$  QCD のカイラル相転移転動帽のスケーリングの研究を行った。並行して、次の段階の研究にむけて、改良 Wilson クォークによる  $N_F = 2 + 1$  QCD の物理点における有限温度配位生成を進めた。

### Gradient flow を用いた有限温度 (2+1)-flavor QCD の研究

グラジエントフロー法に基づく鈴木法によるエネルギー運動量テンソルと状態方程式の計算を、動的クォークを含む QCD で初めて実行した。その為に、改良ウィルソン型クォーク作用による  $N_F = 2 + 1$  QCD シミュレーションを遂行した。最終的には現実のクォーク質量による評価を目指しているが、第一段階の研究として、計算時間を抑えるために、s クォーク質量は現実の値に近いが u, d クォークは現実より重い場合 ( $m_\pi/m_\rho \simeq 0.74$ ) を扱い、格子間隔が  $a \simeq 0.07\text{fm}$  1 つだけの固定格子間隔法による計算を実行した。

我々の研究により、状態方程式の評価が動的クォークを含む場合でも精度良く遂行可能であることが示された。図 1 に状態方程式の結果を示す。赤丸がグラ

ジェントフロー法による評価の結果で、黒三角は、同じ配位上で T-積分法を用いて評価した先行研究の結果である。 $T < 300\text{MeV}$  ( $N_t > 8$ ,  $N_t$  は温度軸方向の格子点の数) で従来の方法による結果をよく再現することが示された。他方、この格子間隔では、 $N_t$  が 8 程度より小さいと ( $T > 300\text{MeV}$ )、 $O(aT)$  の格子化誤差が大きく、両者が一致しなくなることもみてとれる。グラジエントフロー法による評価は、従来の方法で必要であった、非摂動的ベータ関数の評価などが不要で、全体的計算コストを大きく抑えられる可能性がある。この結果は、計算コストの高い物理点での評価を推進する上で、グラジエントフロー法が大きな役割を担うことを示唆している。(論文 11, 15)

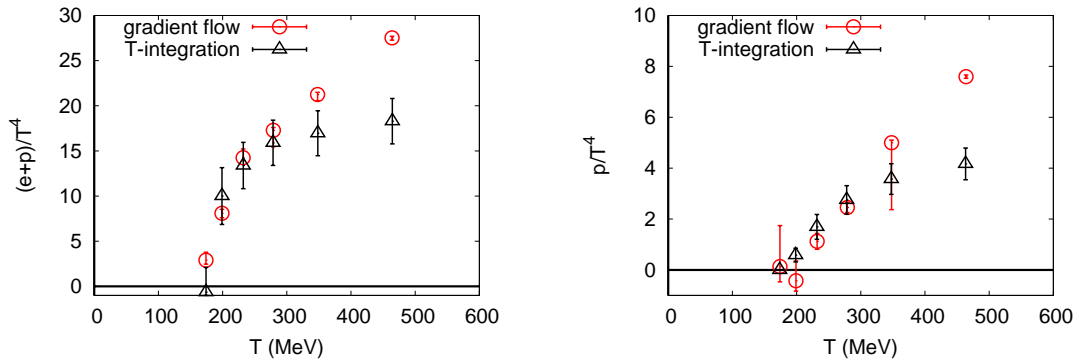


図 1: グラジエントフロー法による有限温度 (2+1)-flavor QCD の状態方程式の研究。左図: エントロピー密度  $\epsilon + p$ 。右図: 圧力  $p$ 。赤丸がグラジエントフロー法による評価の結果で、黒三角は、同じ配位上で T-積分法を用いて評価した先行研究の結果。横軸は温度  $T$ 。(論文 15)

さらに、同じ有限温度配位を用いて、グラジエントフロー法を用いたカイラル凝集と位相感受率の評価も行った。格子 QCD ではこれらの物理量に複雑なくりこみが要求されるが、鈴木法を用いればくりこまれた量を直接評価可能となり、計算コストを大きく抑えられる可能性がある。図 2 の左図にカイラル感受率の結果を示す。我々は、カイラル感受率がクロスオーバー温度  $T \sim 190\text{MeV}$  でピークを示すことを示した。また、s クォークよりも、軽い u, d クォークのカイラル感受率の方がより強い特異性をしめしており、これも理論的期待と一体する。格子上でカイラル対称性を陽に壊してしまうウィルソン型クォークでこれらが示されたのは初めてである。

さらに、位相電荷と位相感受率の評価も実行した。位相感受率はアクシオン質量と関係しており、アクシオンが冷たい暗黒物質の候補となるかを判定する上で、その温度依存性が重要な情報となる。位相感受率には、ゲージ場を用いた定義による評価とクォークを用いた定義による評価の 2 種類の計算方法がある。両者は連続理論では一致すべきであるが、格子上では、カイラル対称性などの破れにより、しばしば大きなズレを示し、結果の信頼性に問題を投げかけている。鈴木法を用いればこれらの量も物理的評価を直接行うことができる。図 2 の右図に我々の位相感受率の結果を示す。赤丸はゲージ場を用いた定義の結果で、黒三角はクォークを用いた定義の結果である。両者の

一致が格子上で直接示されたのは初めてである。赤と黒の曲線は高温側かつ  $N_t > 8$  を充たす 3 点を  $T$  の冪関数でフィットした結果で、希薄インスタントンガス模型 (DIGA) から予想される冪をよく再現することを示した。(論文 12, 14)

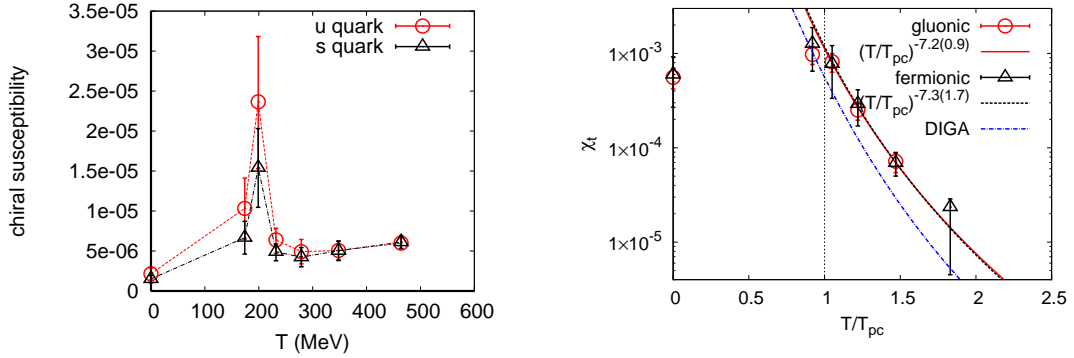


図 2: グラジエントフロー法による (2+1)-flavor QCD の熱力学特性の研究。左図: カイラル感受率。赤丸は u,d クォークのカイラル感受率で、黒三角は s クォークのカイラル感受率。(論文 15)  
右図: 位相感受率。赤丸はゲージ場を用いた定義による評価の結果で、黒三角はクォークを用いた定義による評価の結果。(論文 14)

これらはまだ格子間隔 1 点だけの結果であり、今後異なる格子間隔で同様の計算を行い、連続極限を取る必要がある。また、物理点での研究も同時に推進する計画である。

### SU(3) ゲージ理論の潜熱

QCD でクォークを取り除いた SU(3) ゲージ理論は、低温の閉じ込め相と高温の非閉じ込め相との間が弱い 1 次相転移であることが知られている。有限密度 QCD でも 1 次相転移が現れることが理論的に予想されており、その位置や性質をシミュレーションで効率良く評価する手法の開発は重要である。我々は、これまで、多重点再重み付け法とヒストグラム法を組み合わせ、1 次相転移やその端点の簡便な検出方法の開発を進めてきた。この研究では、SU(3) ゲージ理論の 1 次相転移点での潜熱を研究した。

状態方程式 (エネルギー密度と圧力) を評価する方法として、この論文では「微分法」を採用した。相転移点はポリアコフープ感受率の極大点として定義できるが、多重点再重み付け法を使って、非等方結合定数空間  $(\beta_s, \beta_t)$  におけるポリアコフープ感受率 (図 3 の左図を参照) を計算することにより、感受率の極大線の傾きから、微分法に必要な非等方係数の評価を実行した。次に、シミュレーションヒストリーを高温相と低温相に分離し、状態方程式の 2 相間の差として潜熱の評価を行った。同じ評価を 2 種類の空間体積と、 $N_t = 6, 8, 12$  の 3 種類の格子間隔で実行し、空間体積依存性を確認しつつ、連続極限外挿を実行した。調べた格子間隔の範囲では、体積依存性は小さく、図 3 右図のように連続極限外挿を行って、 $\Delta\epsilon/T^4 = 0.75(17)$  と  $\Delta(\epsilon - 3p)/T^4 = 0.623(56)$

を得た。圧力のギャップは、期待どおり、誤差の範囲でゼロと矛盾しない。(論文 7, 10)

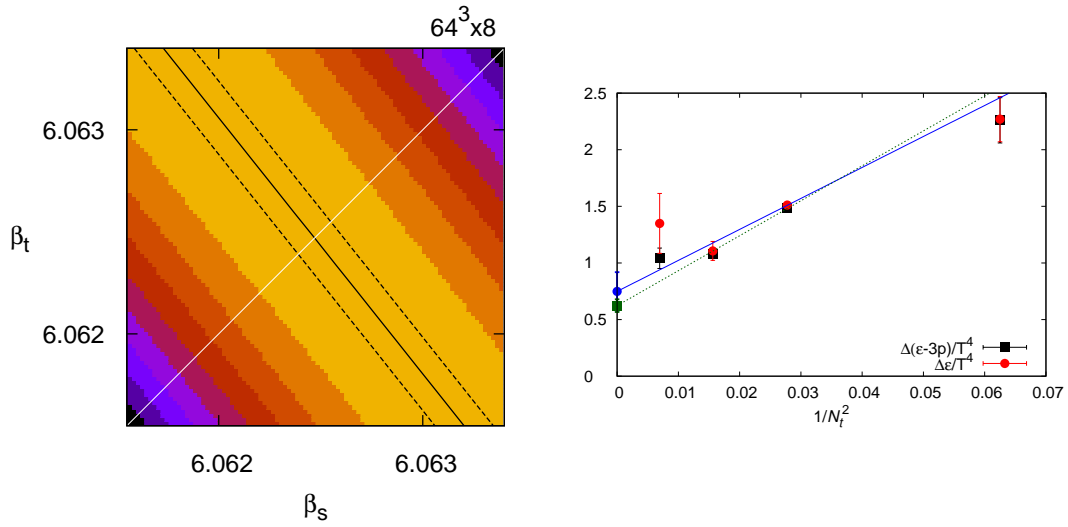


図 3: SU(3) ゲージ理論における潜熱の研究。 左図: ポリアコフループ感受率の  $(\beta_s, \beta_t)$  依存性。等高線図で、明るい色ほど感受率が大きい。  $64^3 \times 8$  格子の結果。 右図: 潜熱の連続極限外挿。(論文 7)

これらの研究と並行して、次の段階の研究にむけて、改良 Wilson クォークによる  $N_F = 2 + 1$  QCD の物理点における有限温度配位生成を進めた。また、有限温度・有限密度 QCD におけるスケーリングの試験研究も進めた。

#### (4) 有限バリオン化学ポテンシャルでの QCD 状態方程式の計算

QCD の状態方程式は、強い相互作用をする物質の熱平衡状態の性質を特徴づける最も基本的なものである。現在、米国 Brookhaven 国立研究所の RHIC 加速器では、QCD 臨界点を見つけることを目的として Beam Energy Scan 実験が行われており、実験結果を理解する上で、有限バリオン化学ポテンシャルでの状態方程式が必要となる。

大野は、Frithjof Karsch 氏を中心とする BNL-Bielefeld-CCNU Collaboration に参加し、2+1 フレーバーの Highly Improved Staggered Quark 作用を用いた格子 QCD シミュレーションを行い、Taylor 展開法により有限バリオン化学ポテンシャルでの QCD 状態方程式を計算した (図 4)。この際、Taylor 展開の 6 次のオーダーまで計算し、その結果を 4 次のオーダーまでの計算結果と比較することで、展開の打ち切り誤差を調べた。その結果、温度の 2 倍程度の化学ポテンシャルまで打ち切り誤差が十分小さいことを示した。また、温度-化学ポテンシャル平面における、圧力、エネルギー及び、エントロピー一定線を計算し、クロスオーバー線や実験結果から求められた freeze-out パラメータとの比較を行った。更に、QCD 臨界点の位置を見積もり、調べることができたパラメータ領域には存在しないことを示唆する結果を得た (論文 17)。

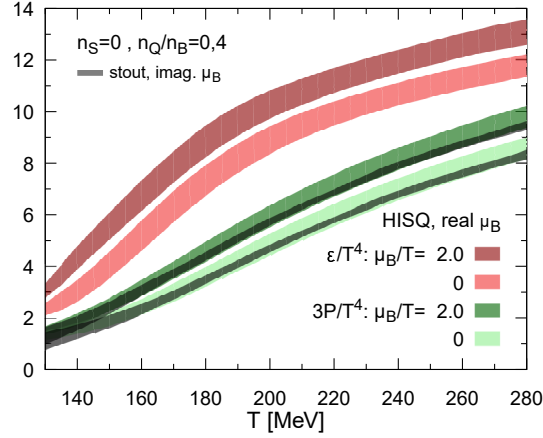


図 4: ストレンジネス中性条件下での、バリオン化学ポテンシャル  $\mu_B/T = 0$  及び 2 におけるエネルギー密度（上 2 つ）及び圧力（下 2 つ）。他のグループにより計算された、異なるフェルミオン作用及び、計算方法に基づく圧力の結果も暗色の線で示す。

#### (5) 3 フレーバー有限温度 QCD における臨界終点（藏増）

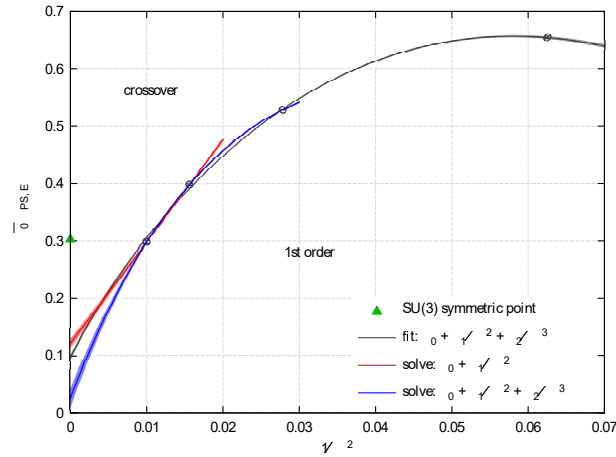


図 5:  $m_{\pi,E}$  の格子間隔依存性。横軸は  $1/N_T^2$  ( $N_T$  は「時間方向」の格子サイズ)。

温度  $T$  とクォーク化学ポテンシャル  $\mu$  を関数とする QCD の相図を確定させることは、格子 QCD シミュレーションにおける最大の目標の一つである。藏増は、理研計算科学研究機構（AICS）の宇川副機構長、中村研究員、金沢大学武田助教および米国アルゴンヌ国立研究所の Jin 研究員らとの共同研究のもと、 $O(a)$  改良を施した Wilson-Clover クォーク作用と Iwasaki ゲージ作用を用いて、 $T$ 、 $\mu$ 、クォーク質量  $m_q$  のパラメータ空間における 3 フレーバー QCD の臨界終線の決定に取り組んできた。まず、最初のステップとして 2015 年に  $\mu = 0$ （密度ゼロ）における 3 フレーバー QCD における臨界終点における  $\pi$  中間子質量 ( $m_{\pi,E}$ ) を決定した（論文発表済）。われわれが用いた方法は、尖度 (kurtosis) 交叉法と呼ばれる有限サイズスケーリング解析手法の一種であり、一次相転移領域における物理量分布の尖度とクロスオーバー側の対応物が、異なる空間体積依存性を持つ性質を利用している。本研究において、世



界で初めて3フレーバーQCDにおける臨界終点の決定に成功した。その後、 $m_{\pi,E}$ の精度向上を目指し、更に細かい格子間隔で計算を行った。図5は、 $m_{\pi,E}$ を $1/N_T^2$ ( $N_T$ は「時間方向」の格子サイズ)の関数としてプロットしたものである。格子間隔が小さくなるにつれて( $1/N_T^2 \rightarrow 0$ )、 $m_{\pi,E}$ が加速度的に小さくなっていることが見て取れる。これは、連続極限において $m_{\pi,E}$ の値が非常に小さい、あるいはゼロになる可能性を示唆しているが、従来の理論的予想とは異なっており、大変興味深い。現在、更に細かい格子間隔の計算を実行し、連続極限における $m_{\pi,E}$ の値がゼロになる可能性の検証に取り組んでいる。

#### (6) 有限密度QCDの研究

鈴木と谷口はカノニカル法を用いた有限密度QCDの研究を行った。有限密度格子QCDには複素作用の問題があり、単純なモンテカルロ計算は不可能である。この複素作用の問題を避ける方法として、カノニカル分配関数の導出を主なターゲットとするカノニカル法が有力視されている。カノニカル法を用いると確かに有限密度QCDが数値計算可能となり、具体的な熱力学量としてカノニカル分配関数を求められるようになる。ところが、物理的には実かつ正定値となるべきカノニカル分配関数が複素数になってしまうという形で符号問題が現れることがわかってきた。これはカノニカル法が克服すべき問題であるが、位相それ自体の性質についてはあまりよく知られていない。そこで鈴木と谷口は、以下の2つの点を目標に研究を行った。

- (a) カノニカル分配関数の位相の温度依存性と粒子数依存性の調査
- (b) 位相が現れるメカニズムとその対策

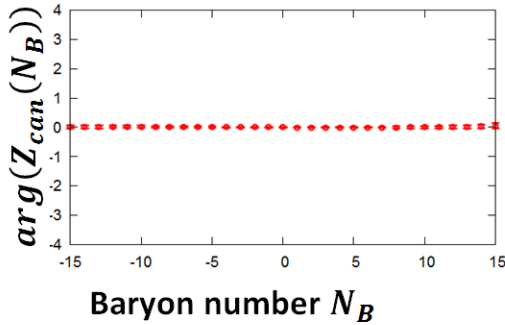


図 6: 高温  $T = 1.68T_c$  における分配関数の位相。結果は0と等価で位相は十分制御されている。

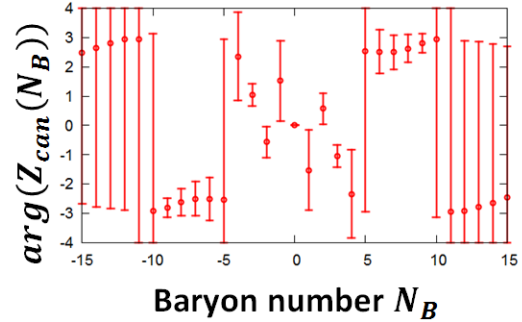


図 7: 低温  $T = 0.81T_c$  における分配関数の位相。位相が $\pi/2$ を超えてしまう。カノニカル分配関数は実で正になるべき量である。

高温側の結果では位相は0と等しく問題はないことがわかるが、低温側の結果では位相は $\pi/2$ を超えており符号問題が強く現れていることが示唆される。また、位相がバリオン数NBにおおよそ比例して大きくなっていることが確か



められた。この位相を減らすため、そのもっとも素朴な方法として統計数を上げた計算を試みた。統計が少ない場合は位相が激しく現れるが、統計を上げた場合は $\pi/2$ を超えない領域もあることが見て取れる。この結果から、統計を上げることによってバリオン数が少ない領域ではある程度位相を抑えることができるということがわかった。(論文 18-21, 国際会議発表 20-22, 国内学会発表 14, 16)

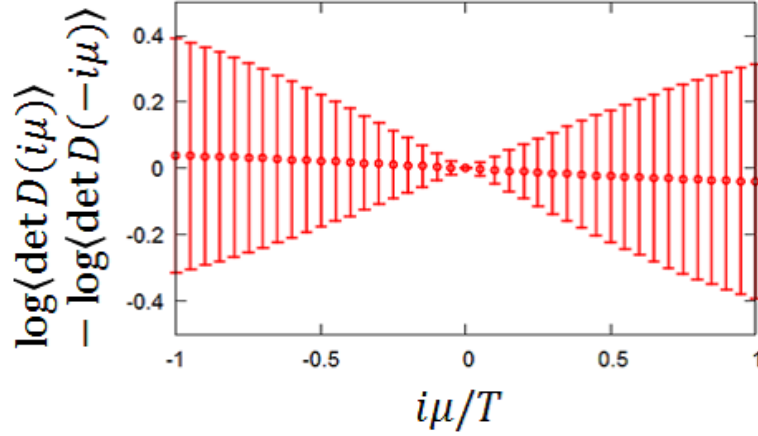


図 8:  $\langle \det D(i\mu) \rangle$  と  $\langle \det D(-i\mu) \rangle$  の対数同士の差をとった。図は低温  $T = 0.81T_c$  での結果。これは 0 になるべき量であるが、モンテカルロ計算においては破れている。

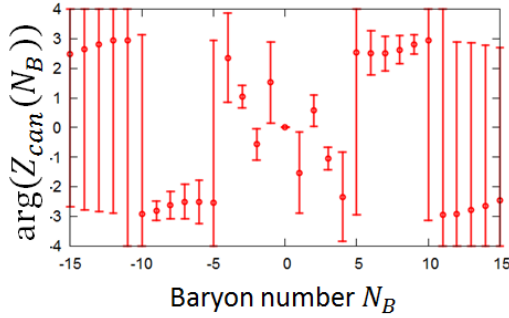


図 9: 低温  $T = 0.81T_c$  で配位数 100 で計算を行った結果。

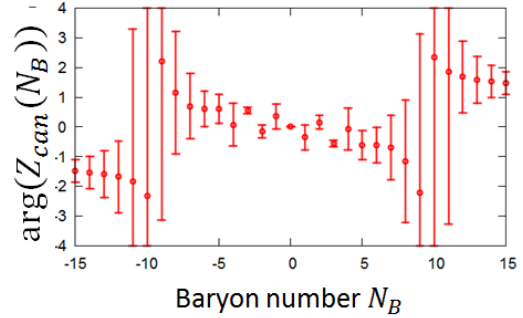


図 10: 低温  $T = 0.81T_c$  で配位数 900 で計算を行った結果。

#### (7) Gradient flow を用いた Kaon B パラメーターの計算

Kaon B パラメーター  $B_K$  は K 中間子の  $K^0 - \bar{K}^0$  混合に対す QCD の寄与を抽出した量であり、QCD の非摂動的な効果が主として聞いてくる量である

ため格子上の数値計算による測定が必須となる量である。この  $B_K$  を Wilson fermion を用いて計算しようとする、カイラル対称性の破れからくる余計な演算子混合に邪魔されて精度の良い測定が困難となる事情があった。このカイラル対称性の破れからくる余計な演算子混合の問題に対する解決策として、gradient flow を用いる方法が有力視されている。gradient flow は一種のくりこみ変換であり、あらゆる演算子に対して非常に簡単に変換を実行することができる。gradient flow の優れた美点として flow を課した演算子には紫外発散が現れないという点が挙げられる。そのため格子上のいかなる対称性の破れにも悩まされることなく、連続極限を単純な操作として取ることができるのである。gradient flow を課した演算子は繰り込まれた演算子を含む有限な量となっているのであるが、鈴木と谷口は研究の第一歩として gradient flow を課した 4 fermi 演算子から、高エネルギー物理学で一般的に用いられる  $\overline{\text{MS}}$  scheme で繰り込まれた演算子を取り出すための変換係数の計算を行なった。(国内学会発表 15)

#### (8) テンソルネットワーク形式に基づく格子ゲージ理論の研究

格子 QCD 計算では、近年の計算機能力の向上や新規アルゴリズムの開発・改良の結果、自然界の  $u$ 、 $d$ 、 $s$  クォーク質量上でのシミュレーションや、更には軽原子核の束縛エネルギー計算までもが可能となりつつある。その一方で、解決すべき長年の課題がそのまま残されていることも事実である。最も重要な課題は、フェルミオン系を扱う際の負符号問題および複素作用を持つ系のシミュレーションである。これらは、軽いクォークのダイナミクス、Strong CP 問題、有限密度 QCD、格子 SUSY の研究において避けて通れない問題である。われわれは、近年物性物理分野で提案されたテンソルネットワーク形式に基づく分配関数の数値計算手法を格子ゲージ理論へ応用し、モンテカルロ法に起因する負符号問題および複素作用問題を解決し、これまでの格子 QCD 計算が成し得なかった新たな物理研究の開拓を目指している。なお、本研究課題は、ポスト「京」で重点的に取り組むべき社会的・科学的課題における 4 つの萌芽的課題のうち、1 番目の課題である「基礎科学のフロンティア – 極限への挑戦」に含まれており、本グループも分担機関として参加し、テンソルネットワーク法の素粒子物理学への応用に取り組んでいる。

2014 年、藏増と理研計算科学研究機構 (AICS) の清水特別研究員は、テンソル繰り込み群をグラスマン数も扱えるように拡張し (グラスマンテンソル繰り込み群)、世界で初めてフェルミオン入りのゲージ理論への応用に成功した。具体的には、グラスマンテンソル繰り込み群を用いて、 $\theta$  項が有る場合と無い場合の 1 フレーバーの 2 次元格子 Schwinger モデル (2 次元格子 QED) における相構造を調べた (論文発表済)。この研究により、グラスマンテンソル繰り込み群が、現在の格子 QCD 計算が抱える負符号問題や複素作用問題を解決していることを示すことに成功した。今後は、最終目標である 4 次元 QCD への応用に向け、(i) 非可換ゲージ理論への拡張、(ii) 高次元モデルへの応用、(iii) 物理量計算のための手法開発、という 3 つの課題に取り組む必要がある。2016 年度に於いて特に進展があった研究は、グラスマン高次テンソル繰り込

み群の開発である。高次テンソル繰り込み群は、高次元 (3 次元以上) モデルに応用可能なアルゴリズムとして考案された方法であるが (テンソル繰り込み群は 2 次元モデル限定)、これまでその対象はボゾン系のみに限られていた。しかしながら、素粒子物理において興味深いモデルはフェルミオンを含んでおり、グラスマン数を扱えるようにすることは必須要件である。藏増と吉村は、高次テンソル繰り込み群をグラスマン数も扱えるように拡張し、アルゴリズムの正しさと数値精度を確かめるために、3 次元自由 Wilson フェルミオン系の自由エネルギー計算を行った。図 11 は、 $128^3$  格子サイズにおける自由エネルギーの解析解との相対誤差の絶対値  $\delta$  を Wilson フェルミオンの質量パラメータの関数  $m$  としてプロットしたものである。 $D_{\text{cut}}$  はグラスマン高次テンソル繰り込み群において計算精度をコントロールするパラメータであり、原理的に  $D_{\text{cut}}$  が大きいほど数値精度が向上する。図 11 では、 $D_{\text{cut}} = 6, 10, 14$  の結果が示してあるが、いずれも現在の標準的なクラスター計算機 (演算加速機構なし) において 1 ノード・日で計算可能なレベルの計算コストである。 $m \geq 0$  の範囲において相対誤差 1% 未満の精度を達成できており、アルゴリズムの正しさと高精度計算の可能性を確認することができた。なお、現在はフェルミオンの Green 関数を計算するための手法開発に取り組んでいる。

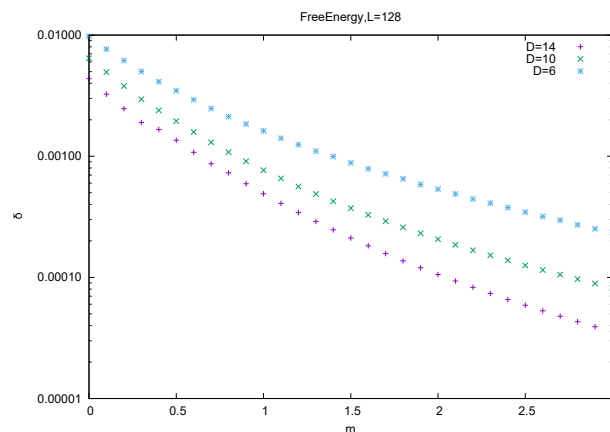


図 11:  $128^3$  格子サイズにおける 3 次元自由 Wilson フェルミオン系の自由エネルギー計算。横軸は Wilson フェルミオンの質量パラメータ。

#### (9) 格子 QCD によるクォークを自由度とした原子核の直接構成

藏増、山崎は理研計算科学研究機構 (AICS) の宇川副機構長との共同研究により、2010 年世界で初めて格子 QCD によるヘリウム原子核の構成に成功し、そのうち 2 核子系の束縛状態である重陽子の構成にも成功した。これらの計算は、計算コストを抑えるためにクエンチ近似かつ重いクォーク質量を用いた試験的なものであった。その後、広島大学 石川健一准教授を共同研究者に加え、真空偏極効果を取り入れた 2+1 フレーバー QCD シミュレーションを行い、近似を排したより現実世界に近い状況でのヘリウム原子核および 2 核子系の束縛エネルギー計算に成功した。この計算は  $\pi$  中間子質量 0.5 GeV と 0.3

GeV のクォーク質量を用いたものであり、物理点 ( $\pi$  中間子質量 0.14 GeV に相当) よりもかなり重いものを用いていた。この成果を踏まえ、「京」で生成された  $96^4$  格子サイズのゲージ配位を用いた物理点近傍での軽原子核束縛エネルギー計算を行なっている。現段階では統計的に有意な結果は得られていないが、今後統計誤差を小さくするために計算を継続している。

また、これまでの計算に含まれる可能性のある励起状態からの系統誤差について、重いクォーク質量を用いて調査を行った (論文 22)。図 12 には、指数型演算子とウォール型演算子を用いて計算した、有効核子質量の二倍 ( $2m_N^{\text{eff}}$ ) と有効二核子エネルギー ( $E_{NN}^{\text{eff}}$ ) を示した。異なる演算子の結果は、小さな虚時間の領域では異なる値を取るが、それぞれの結果が虚時間に依らなくなる領域では一致している。この結果から、異なる演算子から求められた結果は一致すること、つまり励起状態の系統誤差は、 $2m_N^{\text{eff}}$  と  $E_{NN}^{\text{eff}}$  の両方が虚時間に依らなくなる領域まで精度良く計算できれば十分抑えられるを示した。これまでの計算で用いた演算子は図の指数型演算子に対応するため、相対的に小さな虚時間領域から励起状態の系統誤差が抑えられた結果が得られていたと考えられる。

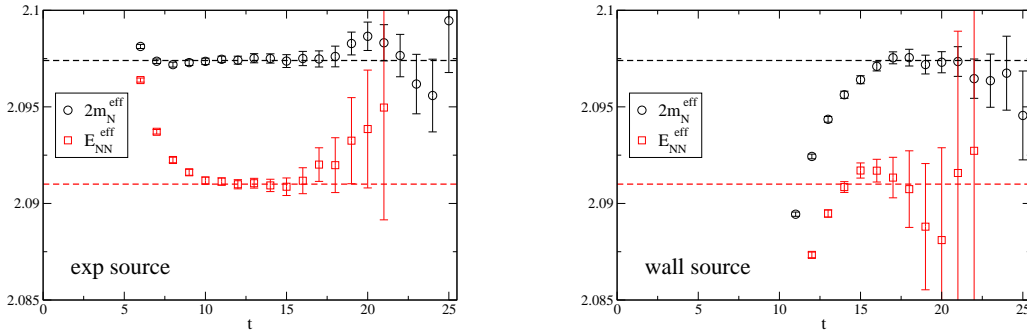


図 12: 指数型演算子 (左) とウォール型演算子 (右) を用いた有効核子質量の二倍 ( $2m_N^{\text{eff}}$ ) と有効二核子エネルギー ( $E_{NN}^{\text{eff}}$ )。横軸は虚時間。破線は指数型演算子から得られた値を示す。

#### (10) 格子 QCD を用いた核子構造研究

陽子と中性子 (核子) はクォークの束縛状態であり、その構造を詳細に調べるためには、強い相互作用の第一原理計算である格子 QCD を用いた計算が必要である。これまでに格子 QCD を用いて、核子構造に関する核子形状因子の研究が行われてきたが、非常に良い精度で測定されている実験値を再現できていない。この実験値との不一致の主な原因は、計算に用いられたクォーク質量が現実のものよりも大きいためであると考えられている。

藏増、山崎は、広島大学 石川健一准教授、東北大学 佐々木勝一准教授、理研計算科学研究機構 (AICS) 宇川副機構長とともに、PACS Collaboration において、この原因を取り除いた計算である、現実のクォーク質量に極めて近いパラメータ ( $\pi$  中間子質量 145MeV) での核子形状因子計算を行なった (論文 23)。

図 13 は 200 配位での Dirac 核子形状因子の結果である。クォーク質量が大きくなこれまでの計算結果とは異なり、特に小さな運動量移行の領域で実験値に良く一致した結果が得られている。当初の目標であった 200 配位の計算が終了したので、今後軸性カレントに関係する形状因子の解析などを行い、必要なデータを揃え、論文としてまとめる予定である。

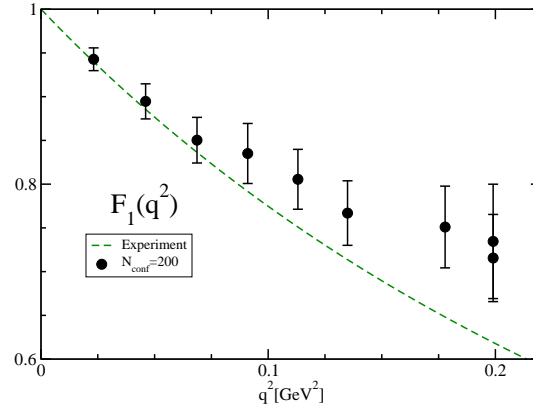


図 13: Dirac 核子形状因子。横軸は運動量移行、破線は実験値を表す。

#### (11) 格子 QCD を用いた $\pi$ 中間子形状因子の計算

山崎は、大学院生 (博士後期課程 1 年) 賀数とともに、PACS Collaboration において、現実的なクォーク質量での  $\pi$  中間子電磁形状因子の計算を行った。この形状因子からは  $\pi$  中間子の平均二乗荷電半径を見積もることができ、 $\pi$  中間子の構造を解明するためには、非常に重要な物理量である。しかし、これまでの多くの  $\pi$  中間子電磁形状因子の計算では、現実よりも大きなクォーク質量を用いていたため、実験値を再現できていなかった。

現実的なクォーク質量を用いた本計算から、実験値を再現する形状因子の結果が得られた (論文 24)。さらに、この結果にカイラル摂動論の公式を使った解析を行い、平均二乗荷電半径も見積もった。今後、系統誤差の見積りなどを行った後、研究成果を論文としてまとめる予定である。

#### (12) 素粒子標準模型を超えた理論の探索

ウォーキングテクニカラー模型は素粒子標準模型を超えた理論の有力な候補である。この模型は、強結合ゲージ理論のダイナミクスにより、素粒子標準模型では手で与えられていた電弱対称性の自発的破れの起源を説明できる可能性がある。しかし、この模型を構築するために必要な強結合ゲージ理論には、近似的共形対称性を持つなど、特殊な条件が課されている。山崎は、名古屋大学素粒子宇宙起源研究機構 (KMI) を中心とした LatKMI Collaboration の研究者、名古屋大学 山脇幸一名誉教授、KEK 青木保道特任准教授らと共に、格子ゲージ理論を用いた数値計算から、そのような条件を満たすゲージ理論が存在

するかの探索を行っている。これまでの4、8、12フレーバーSU(3)ゲージ理論の研究から、8フレーバー理論がそれら条件を満たす可能性がある事を示した。今年度は、これまでに行った計算よりも、大きな体積、軽いフェルミオン質量のデータを加え、さらに核子や $a_0$ 中間子などの様々なハドロンについて解析を行った。その結果、これまでの研究で見えていた近似的共形対称性らしき性質が様々なハドロンでも見えることを示した(論文25)。

#### (13) スパースモデリングを用いた格子QCDデータの解析

山崎は、大学院生(博士前期課程2年)佐久間とともに、近年、画像処理、機械学習の分野を中心に様々な分野で応用され始めた、スパースモデリングを格子QCDデータ解析に応用するための基礎研究を行った。格子QCDで計算されるハドロン2点相関関数は、様々な状態の指数関数の和として表せる。励起状態を解析するには、この指数関数の和から特定の状態の寄与を取り出さなくてはならないため、数値的に不安定になりやすく、解析が非常に難しい。この解析にスパースモデリングを用いる試験的解析を行い、指数関数の個数を固定しないスパースモデリングの解析では、データから指数関数の数を決めることができ、その解析から得られた質量などの結果は、事前にデータに最適な個数に指数関数を固定した解析結果と一致することを示した。スパースモデリングの解析は、うまく機能する場合もあるが、そうでない場合もあるため、格子QCDの解析に応用するには様々な課題が残されており、今後も研究が必要である。

#### (14) QCDのカイラル相転移の数値的研究

QCDのクォーク・グルーオン相(高温相)の性質や、高温相からハドロン相(低温相)への相転移の性質の解明は、初期宇宙の進化に係わる重要な課題である。今日まで多くの研究が行われてきているが、この有限温度相転移の次数についてさえ、結論が得られていない。WMFQCD Collaboration(岩崎(筑波)、石川(広島)、中山(Kavli IPMU)、吉江)は、QCDのカイラル相転移(クォーク質量ゼロの有限温度相転移)を調べる、従前の手法と異なる新しい手法を提案し、フレーバ数2のQCDに対する数値シミュレーションを行い、2次相転移を強く示唆する結果を得た(論文26)。

新手法では、まず、相転移の次数が2次であると仮定し、繰り込み群に基づき、『中間子伝搬関数のスケーリング則』

$$G(\tau; g(N), N) = \left( \frac{N'}{N} \right)^{-2\gamma} G(\tau; g(N'), N')$$

を導出する。 $G$ はクォーク質量ゼロの中間子伝搬関数で、格子サイズが異なる2つの伝搬関数(時間方向の格子サイズ $N, N'$ )を比較したものである。 $\tau$ は格子サイズで規格化した時間スライス $\tau = n_t/N, n'_t/N', g(N), g(N')$ は、そのサイズの格子でのカイラル相転移結合定数であり、 $\beta$ 関数で関係付けられ、 $\gamma$ は異常質量次元である。基本的な考え方は、我々が多フレーバQCDの赤外固

定点を同定するのに用いたものと同じである。このスケーリング則から、有効質量  $m(\tau) = -\partial_\tau G(\tau)$  のスケーリング則

$$m(\tau; g(N), N) = m(\tau; g(N'), N')$$

が導かれる。つまり、有効質量は、格子サイズで規格化した時間スライス関数としてみると、格子サイズには依存しない。同様のスケーリング則は、空間方向の伝搬関数についても成り立つ。

RG 改良したゲージ作用と Wilson フェルミオン作用を用いた格子 QCD のシミュレーションを 3 つの格子サイズ  $16^3 \times 8$ ,  $24^3 \times 12$ ,  $32^3 \times 16$  で行い、(空間方向の) 有効質量を規格化した距離関数としてプロットすると、格子サイズに依らないユニバーサルな曲線に乗っている事がわかった。この事は、相転移が 2 次であることを示唆している。さらに、得られた曲線は、我々が提唱し、数年間調べてきた『有限の IR cutoff を持つコンフォーマル理論』のコンフォーマル領域での伝搬関数の特徴である、巾変形 Yukawa 型関数となっている事も示された。これは、有限の時空内の QCD には、コンフォーマル領域が存在することの傍証である。

#### (15) 格子 QCD 研究用データグリッド JLDG/ILDG の運用

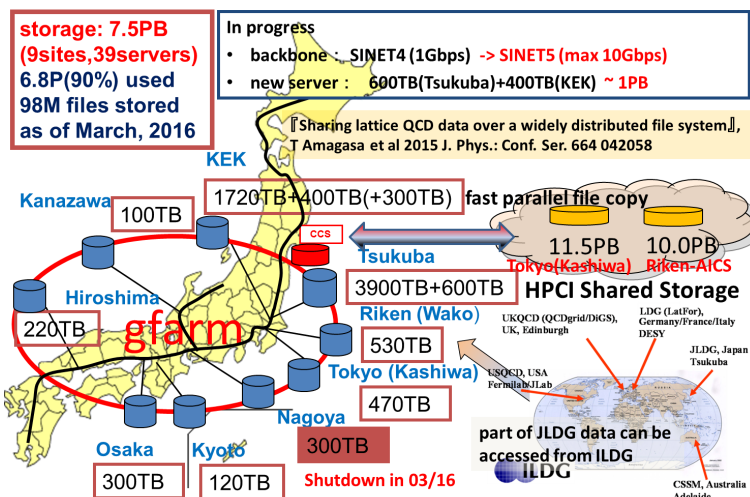
JLDG (Japan Lattice Data Grid) は、国内の計算素粒子物理研究グループが日々の研究データを管理・共有する為のデータグリッドである。主システムは、国内の主要な格子 QCD 研究拠点 7 箇所に設置したファイルサーバを国立情報学研究所が提供する SINET VPN で接続し、グリッドファイルシステムソフトウェア Gfarm で束ねたファイルシステムである。どの拠点からアクセスしても同一のファイルシステムが見えるので、「ある拠点のスパコンで生成したデータ（格子 QCD 配位など）を JLDG に投入・蓄積し、別拠点で読み出して、その拠点のスパコンで再解析（物理量の計算）をおこなう」といったデータ共有を、容易におこなう事ができる。また、サブシステムとして、HPCI 共用ストレージとの連携システムと ILDG (International Lattice Data Grid) との接続システムを備えている。JLDG の運用は、各拠点の代表者、研究グループの代表者、システム開発者、管理運用支援の委託先の業者の担当者、をメンバーとする JLDG チームが行っており、筑波大からは、建部、天笠（システム情報）と山崎、吉江が参加している。

JLDG は 2005 年に開発を開始し、2007 年に運用を開始した。現在、国内の複数の大きな研究グループが研究インフラとして使用している。JLDG は実用システムとして、一定の完成の域に達しており、数年前から、システムの改良や新機能の実装よりも、システムの増強・安定運用に主眼が移ってきている。図に、現在のシステム状況と、ディスク使用量の推移を示した。

今年度は、以下のシステム増強と安定運用の為の活動をおこなった。

- ファイルサーバの増強: 前年度 39 サーバ 7.5PB から 43 サーバ 9.0PB へ
- 体制変更 (HPCI 戦略分野終了、名古屋大学拠点廃止) に伴う作業





- ソフトウェア更新 (gfarm 2 回、zabbix 1 回、HPCI-SS 連携方式改良)
- 管理機器更新
  - ー 管理サーバ 7 台を仮想化して 2 台の物理ホストに集約
  - ー 古い OS を一掃し、バックアップも容易になった。
- データ化け対応
  - ー 大容量のファイルシステムでは、種々の理由により、ユーザーや管理者が気づかないまま、データが化ける (silent data corruption) 可能性がある。JLDG では、ファイル作成時に on-the-fly で md5sum を計算し、データベースに登録したり照合する機能を導入している。
  - ー 今年度は、さらに、ファイル作成直後 (6 時間後) に再度読み出し検証する仕組みを導入した。
  - ー O(20) ファイルのデータ化けを検出し、不正ファイルを削除した。全てのケースで、正しい複製がありユーザーの影響はなかった。
- 公開アンサンブルへの DOI 登録
  - ー ILDG は 5 つの地域グリッドを、『格子 QCD 配位の国際規模での共有』を目的として相互運用する仕組みであり、JLDG は ILDG の日本の地域グリッドである。ILDG には、「公開されている格子 QCD 配位アンサンブルの利用状況を把握する仕組みが無い」事が問題であった。論文の引用・被引用の記録とは別に、データの引用・被引用関係の記録を蓄積する目的で、ILDG に公開する QCD アンサンブルに DOI (Digital Object Identifier) 登録を行う事が提案され、米国地域グリッドでは、実施済である。
  - ー JLDG では、天笠、松古 (KEK)、吉江が中心となって、DOI 登録の体制面の検討と各関係機関との調整を行って、DOI 登録は JicFus (計算科学連携機構) の活動として位置付けること、筑波大計算科学研究



センターが、DOI 登録機関の会員となり、実際の登録業務とデータへのアクセスを保証する仕組みに責任を持つこととなった。

- － 今年度は、DOI 登録に必要なソフトウェア回りの開発（登録フォーム、ILDG QCDml ensemble xml と補足情報からの landing page の生成）を行なった。また、登録の規約や手続き（登録作業のフロー）についても検討を行い、JicFus で検討する叩き台がほぼ完成した。

#### (16) 格子 QCD 共通コード開発

昨年度に引き続き、格子 QCD 共通コード Bridge++ の開発を進めた。格子 QCD 共通コード Bridge++ は、QCD を含む格子ゲージ理論シミュレーションのための汎用コードセットである。様々な格子作用やアルゴリズムを適用可能で、ノート PC から超並列計算機まで幅広いアーキテクチャに対応している。2012 年 7 月に Bridge++ ver.1.0.0 を公開して以降、継続してコードの改善、拡張を行っている (<http://bridge.kek.jp/Lattice-code/>)。素粒子理論グループからは、金谷、滑川、根村、谷口、浮田が参加している。

本年度は、ライブラリ化向けコード構造への変更、パラメータのコンテナ化、ヘッダー相対化といったシステム面での強化が図られた。また、ゲージ場テンソル追加、中間子系演算子追加など物理量測定を機能拡張した。これらの変更を含めた Bridge++ ver.1.4.0 へのメジャーアップデートが 2017 年 3 月に実施された。その後も、コードの細かい改定、改良が進められている。最新版は ver.1.4.1 である。また、共通コードを使用した研究論文が、今年度新たに 10 本追加された。通算 23 本の論文が共通コードを元に発表されている。

## 【2】 超弦理論

(石橋 延幸、伊敷 吾郎、佐藤 勇二、毛利 健司)

### (1) 弦の場の理論の次元正則化とループ振幅

超弦理論は散乱振幅の摂動論に紫外発散がないことが知られているが、超弦の場の理論においてはコンタクトタームの問題と呼ばれる問題があり、tree 振幅でさえ見かけ上発散してしまうため、正則化を与えなければ定義することが出来ない。また、D-ブレーンの影響等の散乱振幅とは異なる量を計算する際には、弦の理論のうまい正則化の方法を与えることが必要不可欠になる。

石橋は村上（釧路高専）らとのこれまでの研究で、次元正則化を用いた計算により、tree 振幅については第一量子化の計算と一致する結果を得ることができていることを示している。今年度は超弦の場合にこの結果を拡張するため、非臨界次元の超弦に現れる世界面上の理論の相関関数の計算を行った（論文 27）。点粒子の場の理論の場合と同様に、時空の次元を変化させると、カイラルフェルミオンを扱う際に様々な問題がある。弦の場の理論の次元正則化においては時空の次元を変化させる代わりに、世界面上の理論の central charge を変化させることによって正則化を実現できる。この方法により、散乱振幅を有限にでき

ることを示した。(論文 28)。これらの結果を用いて、外線が NS sector に属し、even spin structure の世界面に対応する振幅の場合、次元正則化を用いた超弦の場の理論から計算される結果が第一量子化の結果を再現することを示した。(論文 29)。

## (2) ゲージ-重力双対性と可積分性に基づく強結合ゲージ理論の研究

重力理論とゲージ理論の双対性により、planar 極限での 4 次元極大超対称ゲージ理論の強結合散乱振幅は、反ドジッター時空中の光的境界を持つ極小曲面の面積で与えられる。この散乱振幅は光的経路からなるウィルソンループの真空期待値と等価である。これまでの研究により我々は、双対性の背後に現れる可積分模型を用いて強結合散乱振幅を解析的に求める方法を定式化してきた。

佐藤は Z. Bajnok, J. Balog, G.Z. Toth (Wigner Research Centre), 伊藤 (東京工業大学) と共に、量子可積分系を解析する新たな手法を開発し、2 次元的な運動量を持つ粒子の 10 点強結合散乱振幅を与える可積分模型である  $su(3)_2/u(1)^2$  等質サインゴルドン模型の厳密な質量-結合関係式を導いた。これは、複数のスケールを持つ量子可積分模型に対する初めての結果であり、当該分野の 20 年来の問題を解決するものである。また、この質量-結合関係式により、強結合散乱振幅を解析的に評価する我々の定式化が (対応する 10 点振幅の場合に) 完結した (論文 30, 31)。

## (3) M 理論の行列模型による定式化についての研究

M 理論の行列模型を用いた定式化において、M 理論の基本的物体の一つである M5-brane の記述法はこれまで分かっていなかった。伊敷は、浅野 (DIAS)、島崎 (慶応大)、寺嶋 (京大基研) らとともに、局所化の方法を行列模型に適用し、この問題を議論した (論文 32)。その結果、M5-brane が行列模型の低エネルギー領域における固有値分布によって構成されていることが初めて示された。

## (4) Sine-square deformation と共形場の理論

一次元スピン系において、隣のスピンとの相互作用を位置のサイン関数の 2 乗に比例するようにとった場合、その基底状態は相互作用が位置に寄らない場合と一致することが桂 (東大) らの研究によってわかっている。石橋は多田 (理研) とともに、この現象を共形対称性がある場合について調べ、この理論に現れる演算子・状態の性質を調べた (論文 33)。

## (5) 弦理論における非幾何学的背景時空と宇宙項問題

弦理論の対称性である弦双対性により、リーマン幾何学的な時空とは異なる非幾何学的な時空も弦理論の背景時空として可能となる。このような背景時空 (T-fold など) は典型的には真空のモジュライが弦スケールの場合に可能となる。

佐藤は菅原、和田、上床 (立命館大学) と共に、弦の世界面の共形場理論に基づき、弦スケールでも有効な非幾何学的背景時空の解析を進めた。まず、T-fold

タイプの非幾何学的背景時空中の弦に対して、ボソン場の運動量格子を用いてモジュラー不変な分配関数を系統的に構成する方法を提示した (論文 34)。これは、一般にモジュラー不変量を構成する際に用いられる、自由フェルミオンによる構成を拡張するものともなっている。また、同様の非対称オービフォルド模型により、超対称性を破るが対応する円筒振幅が消える D-ブレーンが容易に構成できることを示した (論文 35)。これらの結果に基づき、超対称性を破るが小さな宇宙項を持つ興味深い弦の真空を得ることが可能となる。

#### (6) ゲージ/重力対応の数値的検証

伊敷は、超弦理論と対応すると期待される 1 次元のゲージ理論の数値計算を行い、ゲージ/重力対応の数値的検証を行った。特に、理論の内部エネルギー等の熱力学量に注目し、数値計算で得られた結果を超弦理論から解析的に計算される結果と比較し、対応関係を検証した。論文 36, 37 において伊敷は、Berkowitz、Rinaldi、Vranas (LLNL)、花田 (京大基研)、島崎 (慶応大) らとともに、ゲージ群のランクが無限大の極限における検証を行った。また、論文 38 において伊敷は、花田 (京大基研)、百武 (茨城大)、西村 (KEK、総研大) らとともに、ゲージ群のランクが比較的小さい場合における検証を行った。どちらの場合においても、超弦理論から期待される内部エネルギーの振る舞いが、ゲージ理論側からも再現されることが示された。

#### (7) constant magnetic field に対応した弦の場の理論の古典解の研究

弦の場の理論の運動方程式の厳密解は、Schnabl によるタキオン真空解の発見以来活発に研究されている。特に、最近 Erler と Maccaferri は、時間に依らない運動方程式の解の場合、任意の BCFT に対応する厳密解を書き下すことができることを示した。石橋は、岸本 (新潟大)、高橋 (奈良女子大) らとともに、Erler と Maccaferri の方法を用いて constant magnetic field に対応した弦の場の理論の厳密解を構成した (論文 39)。この解は、非可換幾何学等と関係があり、様々な応用が期待される。

#### (8) コヒーレント状態を用いた行列幾何の研究

超弦理論の非摂動的定式化として期待されている行列模型では、弦や D ブレーンといった物体は、行列幾何と呼ばれる離散的な幾何の枠組みにより記述される。この行列幾何の性質を理解するために、伊敷、村木は大学院生の松本とともに、量子力学のコヒーレント状態を用いた新たな解析手法を応用した。この方法を用いることで、行列幾何に対しても、計量やシンプレクティック構造といった従来の微分幾何において定義される幾何学量に対応付けられることを示した。この結果により、行列幾何をよく知られた微分幾何の言葉で特徴づけることが可能となった。また、特別な条件を満たす行列幾何にはこれらの幾何学量がケーラー構造を与えることを示した。

#### (9) Poisson 構造を尊重した新しい重力理論の構成

アインシュタインの一般相対性理論は、時空の様子を記述する物理理論として成功を収めている。一般相対性理論には、理論の適用限界となるスケール

(プランクスケール) が含まれている。そのスケールよりもミクロなスケールでは一般相対性理論はもはや通用せず、時空の様子は、今日までに我々が知るものとは違ったものになるだろうと考えられている。非可換空間は、そのような新たな時空描像の一つの可能性として研究されている。非可換空間とは、その名の示す通り、空間座標同士が非可換な演算子として捉えられるような対象のことである。このような対象の研究は、量子力学の出現以来、空間座標と共役運動量とが非可換な演算子として捉えられたことを契機に、多くの研究者によって取り組まれてきた。そのような文脈における非可換座標の一つの見方として、Poisson 括弧の量子化として捉えるという視点がある。村木は、金児、綿村（東北大学）らとともに、Poisson 括弧を指導原理として構成された幾何学、及びそれに基づく重力理論を議論し、アインシュタインの一般相対性理論との比較を与えた（論文 43）。この成果により、非可換空間上の重力理論と、アインシュタインの一般相対性理論とをつなぐ理論的枠組みの一つの可能性を示すことができた。

## 〈論文〉

1. Y. Kuramashi, N. Nakamura, S. Takeda, and A. Ukawa, Critical endline of the finite temperature phase transition for 2+1 flavor QCD around the SU(3)-flavor symmetric point, Phys. Rev. D94 (2016) ref. 114507.
2. PACS Collaboration: K.-I. Ishikawa, Y. Kuramashi, N. Tsukamoto, S. Sasaki, T. Yamazaki, and A. Ukawa, Nucleon form factors near the physical point in 2+1 flavor QCD, Proceeding of Science (LATTICE 2016) 158.
3. PACS Collaboration: J. Kakazu, K.-I. Ishikawa, N. Ishizuka, Y. Kuramashi, Y. Nakamura, Y. Namekawa, Y. Taniguchi, N. Ukita, T. Yamazaki, and T. Yoshié, Electromagnetic pion form factor near physical point in  $N_f = 2 + 1$  lattice QCD, Proceeding of Science (LATTICE 2016) 160.
4. PACS Collaboration: T. Yamazaki, K.-I. Ishikawa, Y. Kuramashi, and A. Ukawa, Nucleon form factors near the physical point in 2+1 flavor QCD, Proceeding of Science (LATTICE 2016) 108.
5. S. Takeda, X.-Y. Jin, Y. Kuramashi, N. Nakamura, and A. Ukawa, Update on  $N_f = 3$  finite temperature QCD phase structure with Wilson-Clover fermion action, Proceeding of Science (LATTICE 2016) 384.
6. T. Boku, K.-I. Ishikawa, Y. Kuramashi, L. Meadows, M. D’Mello, M. Troute, and R. Vemuri, A performance evaluation of CCS QCD Benchmark on the COMA (Intel<sup>®</sup> Xeon Phi<sup>™</sup>, KNC) system, Proceeding of Science (LATTICE 2016) 261.

7. Mizuki Shirogane, Shinji Ejiri, Ryo Iwami, Kazuyuki Kanaya, Masakiyo Kitazawa, "Latent heat at the first order phase transition point of SU(3) gauge theory", Phys. Rev. D 94, No.1 (2016) ref.014506, pp.1-14
8. S. Motoki, S. Aoki, T. Aoyama, K. Kanaya, H. Matsufuru, T. Miyamoto, Y. Namekawa, H. Nemura, Y. Taniguchi, S. Ueda, and N. Ukita, "Lattice QCD code Bridge++ on arithmetic accelerators", PoS (LATTICE 2015) 040 (2016) 1-7
9. T. Umeda, S. Ejiri, R. Iwami, K. Kanaya, "Towards the QCD equation of state at the physical point using Wilson fermion", PoS (LATTICE 2015) 209 (2016) 1-7
10. Shinji Ejiri, Ryo Iwami, Mizuki Shirogane, Naoki Wakabayashi, Kazuyuki Kanaya, Masakiyo Kitazawa, Hiroshi Suzuki, Yusuke Taniguchi, Takashi Umeda, "Determination of latent heat at the finite temperature phase transition of SU(3) gauge theory", PoS (LATTICE 2016) 058 (2017) 1-7
11. Kazuyuki Kanaya, Shinji Ejiri, Ryo Iwami, Masakiyo Kitazawa, Hiroshi Suzuki, Yusuke Taniguchi, Takashi Umeda, Naoki Wakabayashi, "Equation of state in  $(2 + 1)$ -flavor QCD with gradient flow", PoS (LATTICE 2016) 063 (2017) 1-7
12. Yusuke Taniguchi, Shinji Ejiri, Kazuyuki Kanaya, Masakiyo Kitazawa, Hiroshi Suzuki, Takashi Umeda, Ryo Iwami, Naoki Wakabayashi, "Temperature dependence of topological susceptibility using gradient flow", PoS (LATTICE 2016) 064 (2017) 1-7
13. T. Umeda, S. Ejiri, R. Iwami, K. Kanaya, H. Ohno, A. Uji, N. Wakabayashi, S. Yoshida, "O(4) scaling analysis in two-flavor QCD at finite temperature and density with improved Wilson quarks", PoS (LATTICE 2016) 376 (2017) 1-7
14. Yusuke Taniguchi, Kazuyuki Kanaya, Hiroshi Suzuki, Takashi Umeda, "Topological susceptibility in finite temperature  $(2 + 1)$ -flavor QCD using gradient flow", Phys. Rev. D 95, No.5 (2017) ref.054502, pp.1-8
15. Yusuke Taniguchi, Shinji Ejiri, Ryo Iwami, Kazuyuki Kanaya, Masakiyo Kitazawa, Hiroshi Suzuki, Takashi Umeda, and Naoki Wakabayashi (WHOT-QCD Collaboration), "Exploring  $N_f = 2 + 1$  QCD thermodynamics from gradient flow", arXiv:1609.01417[hep-lat], submitted
16. F. Karsch, A. Bazavov, H.-T. Ding, P. Hegde, O. Kaczmarek, E. Laermann, Swagato Mukherjee, H. Ohno, P. Petreczky, C. Schmidt, S. Sharma, W. Soeldner, P. Steinbrecher, M. Wagner, Conserved Charge Fluctuations from Lattice QCD and the Beam Energy Scan, Nucl. Phys. A 956 (2016) ref. 352

17. A. Bazavov, H.-T. Ding, P. Hegde, O. Kaczmarek, F. Karsch, E. Laermann, Y. Maezawa, Swagato Mukherjee, H. Ohno, P. Petreczky, H. Sandmeyer, P. Steinbrecher, C. Schmidt, S. Sharma, W. Soeldner, and M. Wagner, The QCD Equation of State to  $\mathcal{O}(\mu_B^6)$  from Lattice QCD, Phys. Rev. D 95, No. 5 (2017) ref. 054504
18. A. Nakamura, S. Oka and Y. Taniguchi, QCD phase transition at real chemical potential with canonical approach, Journal of High Energy Physics, 2016(2), 1-19
19. A. Nakamura, S. Oka and Y. Taniguchi, Study of high density phase transition in lattice QCD with canonical approach, PoS LATTICE **2015** (2016) 165.
20. A. Nakamura, S. Oka, A. Suzuki and Y. Taniguchi, Calculation of high-order cumulants with canonical ensemble method in lattice QCD PoS LATTICE **2015** (2016) 168.
21. R. Fuluda, A. Nakamura, S. Oka, S. Sakai, A. Suzuki and Y. Taniguchi, Beating the sign problem in finite density lattice QCD PoS LATTICE **2015** (2016) 208.
22. Takeshi Yamazaki, Ken-Ichi Ishikawa, Yoshinobu Kuramashi, Akira Ukawa for PACS Collaboration, Systematic study of operator dependence in nucleus calculation at large quark mass, Proceedings of Science(LATTICE2016) 108.
23. Y. Kuramashi, K.I. Ishikawa, N. Tsukamoto, S. Sasaki, T. Yamazaki, and A. Ukawa for PACS Collaboration, Nucleon form factors near the physical point in 2+1 flavor QCD, Proceedings of Science(LATTICE2016) 158.
24. J. Kakazu, K.I. Ishikawa, N. Ishizuka, Y. Kuramashi, Y. Nakamura, Y. Namekawa, Y. Taniguchi, N. Ukita, T. Yamazaki, T. Yoshie for PACS Collaboration, Electromagnetic pion form factor near physical point in  $N_f = 2 + 1$  lattice QCD, Proceedings of Science(LATTICE2016) 160.
25. Yasumichi Aoki, Tatsumi Aoyama, Ed Bennett, Masafumi Kurachi, Toshihide Maskawa, Kohtaroh Miura, Kei-ichi Nagai, Hiroshi Ohki, Enrico Rinaldi, Akihiro Shibata, Koichi Yamawaki, Takeshi Yamazaki (LatKMI Collaboration), Light flavor-singlet scalars and walking signals in  $N_f = 8$  QCD on the lattice, arXiv:1610.07011.
26. K.-I. Ishikawa, Y. Iwasaki, Yu Nakayama, T.Yoshie, RG scaling relations at chiral phase transition in two-flavor QCD arXiv:1704.03134 [hep-lat]
27. N. Ishibashi and K. Murakami, Worldsheet theory of light-cone gauge noncritical strings on higher genus Riemann surfaces, JHEP 1606087 (2016).

28. N. Ishibashi, Light-cone gauge superstring field theory in a linear dilaton background, PTEP 2017 033B01 (2017).
29. N. Ishibashi and K. Murakami, Multiloop amplitudes of light-cone gauge NSR string field theory in noncritical dimensions, JHEP 1701 034 (2017).
30. Zoltán Bajnok, János Balog, Katsushi Ito, Yuji Satoh and Gábor Zsolt Tóth, Exact mass-coupling relation for the homogeneous sine-Gordon model, Phys. Rev. Lett. 116 (2016) 181601.
31. Zoltán Bajnok, János Balog, Katsushi Ito, Yuji Satoh and Gábor Zsolt Tóth, On the mass-coupling relation of multi-scale quantum integrable models, JHEP 1606 (2016) 071.
32. Y. Asano, G. Ishiki, S. Shimasaki and S. Terashima, On the transverse M5-branes in matrix theory, arXiv:1701.07140 [hep-th]
33. N. Ishibashi and T. Tada, Dipolar quantization and the infinite circumference limit of two-dimensional conformal field theories, International Journal of Modern Physics A31, 160170 (2016).
34. Yuji Satoh and Yuji Sugawara, Lie algebra lattices and strings on T-folds, JHEP 1702 (2017) 024.
35. Yuji Satoh, Yuji Sugawara and Takahiro Uetoko, Non-supersymmetric D-branes with vanishing cylinder amplitudes in asymmetric orbifolds, preprint UTHEP-702, arXiv: 1704.05262 [hep-th].
36. E. Berkowitz, E. Rinaldi, M. Hanada, G. Ishiki, S. Shimasaki and P. Vranas, Precision lattice test of the gauge/gravity duality at large- $N$ , Phys. Rev. D 94, no.9, 094501 (2016)
37. E. Berkowitz, E. Rinaldi, M. Hanada, G. Ishiki, S. Shimasaki and P. Vranas, Supergravity from D0-brane Quantum Mechanics, arXiv:1606.04948 [hep-th], LLNL-JRNL-694846, UTHEP-690, YITP-16-74
38. M. Hanada, Y. Hyakutake, G. Ishiki and J. Nishimura, Numerical tests of the gauge/gravity duality conjecture for D0-branes at finite temperature and finite  $N$ , Phys. Rev. D 94, no.8, 086010 (2016)
39. N. Ishibashi, I. Kishimoto and T. Takahashi, String field theory solution corresponding to constant background magnetic field, PTEP 2017 013B06 (2017).
40. G. Ishiki, T. Matsumoto and H. Muraki, Kähler structure in the commutative limit of matrix geometry, JHEP 1608, 042 (2016)

41. G. Ishiki, Matrix Geometry and Coherent States, PoS CORFU 2015, 113 (2016).
42. G. Ishiki, Matrix Geometry and Coherent States, PoS LATTICE 2015, 295 (2016).
43. Y. Kaneko, H. Muraki, S. Watamura, Contravariant gravity on Poisson manifolds and Einstein gravity, Class.Quant.Grav. in press.

## 〈学位論文〉

[修士論文]

1. 荻野 孝浩  
「ゲージ/重力対応に動機付けられた弦的ハドロン模型」
2. 佐久間 弘基  
「スパースモデリングを用いた格子 QCD における相関関数の解析」
3. 藤井 拓也  
「行列模型における回転するメンブレーションの構成」

## 〈非常勤講師・集中講義〉

1. 藏増 嘉伸、神戸大学システム情報学研究科客員教授  
2016 年 4 月から 2016 年 9 月まで。  
「計算科学特論」(集中講義)を担当。
2. 村木久祥、「力と運動」 茨城大学工学部 2017 年 4 月 1 日～9 月 31 日
3. 村木久祥、「物理学」 茨城県立つくば看護専門学校 2017 年 4 月 1 日～9 月 31 日

## 〈研究成果発表（講演）〉

[国際会議]

1. Kazuyuki Kanaya 「Recent results of particle physics simulations at Tsukuba」, Collaboration workshop between Tsukuba and Edinburgh universities (Univ. Edinburgh, Edinburgh, UK, June 16-17, 2016)
2. Kazuyuki Kanaya, Shinji Ejiri, Ryo Iwami, Masakiyo Kitazawa, Hiroshi Suzuki, Yusuke Taniguchi, Takashi Umeda, Naoki Wakabayashi 「Equation of state in (2+1)-flavor QCD with gradient flow」, The XXXIV International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2016) (Univ. Southampton, Southampton, UK, July 24-30, 2016)



3. Yusuke Taniguchi, Shinji Ejiri, Ryo Iwami, Kazuyuki Kanaya, Masakiyo Kitazawa, Hiroshi Suzuki, Takashi Umeda, Naoki Wakabayashi 「Temperature dependence of topological susceptibility using gradient flow」 ,  
The XXXIV International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2016)  
(Univ. Southampton, Southampton, UK, July 24-30, 2016)
4. Takashi Umeda, Shinji Ejiri, Ryo Iwami, Kazuyuki Kanaya, Hiroshi Ohno, Atsushi Uji, Naoki Wakabayashi, Shinsuke Yoshida 「O(4) scaling analysis in two-flavor QCD at finite temperature and density with improved Wilson quarks」 ,  
The XXXIV International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2016)  
(Univ. Southampton, Southampton, UK, July 24-30, 2016) (poster)
5. Shinji Ejiri, Ryo Iwami, Kazuyuki Kanaya, Masakiyo Kitazawa, Hiroshi Suzuki, Mizuki Shirogane, Yusuke Taniguchi, Takashi Umeda, Naoki Wakabayashi 「Determination of latent heat at the finite temperature phase transition of SU(3) gauge theory」 ,  
The XXXIV International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2016)  
(Univ. Southampton, Southampton, UK, July 24-30, 2016)
6. Kazuyuki Kanaya, Shinji Ejiri, Ryo Iwami, Masakiyo Kitazawa, Hiroshi Suzuki, Yusuke Taniguchi, Takashi Umeda, Naoki Wakabayashi 「Topological susceptibility in finite-temperature (2+1)- flavor QCD with gradient flow」 ,  
The 14th International workshop on QCD in eXtreme conditions (XQCD 2016)  
(Plymouth Univ., Plymouth, UK, Aug. 1-3, 2016)
7. Yusuke Taniguchi, Shinji Ejiri, Ryo Iwami, Kazuyuki Kanaya, Masakiyo Kitazawa, Hiroshi Suzuki, Takashi Umeda, Naoki Wakabayashi 「QCD energy momentum tensor at finite temperature using gradient flow」 ,  
The 14th International workshop on QCD in eXtreme conditions (XQCD 2016)  
(Plymouth Univ., Plymouth, UK, Aug. 1-3, 2016)
8. K. Kanaya 「Thermodynamics in (2+1)-flavor QCD with gradient flow method」 ,  
Phase structure of lattice field theories, Japanese-German Seminar 2016 (Niigata Univ., Niigata, Japan, Sept. 26-28, 2016) (invited)
9. Y. Taniguchi 「Temperature dependence of topological susceptibility using gradient flow」 ,  
Phase structure of lattice field theories, Japanese-German Seminar 2016 (Niigata, Japan, Sept. 26-28, 2016) (invited)
10. Yoshinobu Kuramashi, 「Tensor Network Scheme for Lattice Gauge Theories」  
(招待講演) ,  
Phase structure of lattice field theories - Japanese-German Seminars 2016 -  
(Niigata University, Niigata, Japan, September 26-28, 2016).

11. Yoshinobu Kuramashi, 「Nucleon form factors near the physical point in 2+1 flavor QCD」,  
34th International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2016) (University of Southampton, Southampton, UK, July 24-30, 2016).
12. H. Ohno, 「A stochastic method to reconstruct spectral functions and its application to quarkonium spectral functions」 (招待講演) , Advances in transport and response properties of strongly interacting systems (ECT\*, Trento, Italy, May 2-6, 2016).
13. H. Ohno, 「Quarkonia at  $T_c$  and Heavy Quark Diffusion from Lattice QCD」 (招待講演) , RHIC & AGS Annual Users' Meeting 2016 (BNL, NY, USA, June 7-10, 2016).
14. H. Ohno, 「Stochastic reconstruction of charmonium spectral functions at finite temperature」 , 34th International Symposium on Lattice Field Theory (University of Southampton, Southampton, UK, July 24-30, 2016).
15. H. Ohno, 「Charmonium and bottomonium spectral functions and the heavy quark diffusion coefficient from lattice QCD」 , 38th International Conference on High Energy Physics (Sheraton Grand Hotel, Chicago, USA, August 3-10, 2016).
16. H. Ohno, 「Quarkonium spectral functions at finite temperature with stochastic reconstruction methods」 , Phase structure of lattice field theories - Japanese-German Seminar 2016 - (Niigata University "Tokimate", Niigata, Japan, September 26-28, 2016).
17. H. Ohno (BNL-Bielefeld-CCNU Collaboration), 「The QCD Equation of State at  $\mu_B \neq 0$  from Lattice QCD」 , 7th Workshop of the APS Topical Group on Hadronic Physics (Marriott Wardman Park Hotel, Washington DC, USA, February 1-3, 2017).
18. H. Ohno, 「Quarkonium spectral functions and heavy quark diffusion of charm and bottom quarks from lattice QCD at finite temperature」 , The XXVI international conference on ultrarelativistic heavy-ion collisions (Hyatt Regency Chicago, Chicago, USA, February 5-11, 2017).
19. H. Ohno (BNL-Bielefeld-CCNU Collaboration), 「The QCD Equation of State at non-vanishing chemical potential from Lattice QCD」 (招待講演) , QCD in Finite Temperature and Heavy-Ion Collisions, 'BNL, NY, USA, February 13-15, 2017).
20. R. Fukuda, A. Nakamura, S. Oka, A. Suzuki and Y. Taniguchi 「Study of sign problem in canonical approach,」 The 34th International Symposium on

Lattice Field Theory (LATTICE2016), University of Southampton, UK, 24-30 July 2016

21. R. Fukuda, A. Nakamura, S. Oka, A. Suzuki and Y. Taniguchi, 「Study of the sign problem in canonical approach」, (Monte Carlo methods in computer simulations of complex systems, 2016.11.9)
22. Asobu Suzuki, 「Complex phase problem in the canonical approach」 Phase structure of lattice field theories Japanese-German Seminar 2016, Niigata University, 26-28 September, 2016
23. Takeshi Yamazaki for PACS Collaboration 「Light nuclei and nucleon form factors from  $N_f=2+1$  lattice QCD」 (招待講演), CCS-LBNL Collaborative Workshop 2016 (Center for Computational Sciences, University of Tsukuba, Japan, May 12-13, 2016)
24. Takeshi Yamazaki, Ken-ichi Ishikawa, Yoshinobu Kuramashi, Akira Ukawa for PACS Collaboration 「Systematic study of operator dependence in nucleus calculation at large quark mass」, The 34th International Symposium on lattice field theory (Lattice 2016) (University of Southampton, UK, July 24-30, 2016)
25. J. Kakazu, K.I. Ishikawa, N. Ishizuka, Y. Kuramashi, Y. Nakamura, Y. Namekawa, Y. Taniguchi, N. Ukita, T. Yamazaki, T. Yoshie for PACS Collaboration 「Electromagnetic pion form factor near physical point in  $N_f = 2 + 1$  Lattice QCD」, The 34th International Symposium on lattice field theory (Lattice 2016) (University of Southampton, UK, July 24-30, 2016)
26. Takeshi Yamazaki for PACS Collaboration 「Direct calculation of light nucleus from lattice QCD」 (招待講演), Phase structure of lattice field theories – Japanese-German Seminar 2016 – (Tokimate, Japan, September 26-28, 2016)
27. J. Kakazu, K.I. Ishikawa, N. Ishizuka, Y. Kuramashi, Y. Nakamura, Y. Namekawa, Y. Taniguchi, N. Ukita, T. Yamazaki, T. Yoshie for PACS Collaboration 「Electromagnetic pion form factor near physical point in  $N_f=2+1$  Lattice QCD」 (ポスター発表), Phase structure of lattice field theories – Japanese-German Seminar 2016 – (Tokimate, Japan, September 26-28, 2016)
28. Takeshi Yamazaki for PACS Collaboration 「Direct calculation of light nucleus from lattice QCD」 (招待講演), First Tsukuba-CCS-RIKEN joint workshop on microscopic theories of nuclear structure and dynamics (RIKEN/Center for Computational Sciences, University of Tsukuba, Japan, December 14-16, 2016)
29. Nobuyuki Ishibashi, 「Light-cone gauge superstring field theory in linear dilaton background」 (招待講演)

VIII Workshop on String Field Theory and Related Aspects, (ICPT-SAIFR, Sao Paulo, Brazil, May 31-June 3, 2016).

30. Nobuyuki Ishibashi, 「Light-cone gauge superstring field theory and dimensional regularization」 (招待講演)  
Recent Developments on Light Front, (Arnold Sommerfeld Center for Theoretical Physics, Munich, Germany, March 14-16, 2017).
31. Yuji Satoh 「Conformal field theories for non-geometric backgrounds in string theory」 (招待講演),  
New trends in low dimensional physics: Quantum integrability and applications (Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, China, September 1 – 15, 2016).
32. Goro Ishiki, 「Spherical transverse M5-branes from the plane wave matrix model」 Workshop on String and M-theory in Okinawa (招待講演) (Okinawa Institute of Science and Technology Graduate University (OIST), 6-9 Mar, 2017)
33. Goro Ishiki, 「Spherical transverse M5-branes from the plane wave matrix model」 6th Bangkok workshop on high-energy theory (招待講演) (Chulalongkorn University, Bangkok, Thailand, 9-13 Jan, 2017)
34. Goro Ishiki, 「Matrix Geometry and Kähler Structure」 NORDITA conference in Stockholm 「Aspects of Membrane Dynamics」 (招待講演) (NORDITA, Stockholm, Sweden, 13-17 Jun, 2016)
35. Hisayoshi Muraki, 「Contravariant Gravity on Poisson Manifolds and Einstein Gravity」 Progress in Quantum Field Theory and String Theory II (Osaka City University, Osaka, Mar. 27-31 2017 )
36. Hisayoshi Muraki, 「On the Geometry of Hermitian Matrices」 KEK Theory Workshop 2016 (High Energy Accelerator Research Organization, Tsukuba, Dec. 6-9 2016)
37. Hisayoshi Muraki, 「Kähler Structures in Matrix Geometry」 String and Fields 2016 (Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto, Aug. 8-12 2016)
38. Takaki Matsumoto, 「Kähler Structure in Matrix Geometry」 , String Theory in Greater Tokyo (The University of Tokyo, Tokyo, Japan, Apr. 12, 2016)
39. Takaki Matsumoto, 「Kähler structure of perturbed fuzzy sphere」 Strings and Fields 2016 (YITP, Kyoto, Japan, Aug. 8-12, 2016)
40. Takaki Matsumoto, 「Information metric for the matrix geometry」 KEK Theory Workshop 2016 Dec. (KEK, Tsukuba, Japan, Dec. 6-9, 2016)

41. Takaki Matsumoto, 「Information metric for the matrix geometry」 Progress in Quantum Field Theory and String Theory II (Osaka City University, Osaka, Japan, Mar. 27-31, 2017)

[国内学会、研究会]

1. 金谷 和至 「Gradient flow 法で探る  $N_f=2+1$  QCD 熱力学」 ,  
熱場の量子論とその応用 2016 (TQFT 2016) (理化学研究所 iTHES, 和光, 8.22-24, 2016)
2. 白銀瑞樹, 江尻信司, 石見涼, 金谷和至, 北沢正清, 鈴木博, 谷口裕介, 梅田貴士, 若林直輝 「gradient flow による  $SU(3)$  ゲージ理論の 1 次相転移点付近での状態方程式」 ,  
日本物理学会 (宮崎大学木花キャンパス, 宮崎, 9.20-24, 2016)
3. 金谷和至, 石見涼, 梅田貴士, 江尻信司, 北沢正清, 鈴木博, 谷口裕介, 若林直輝 「Gradient flow による  $(2+1)$ -flavor QCD 状態方程式」 ,  
日本物理学会 (宮崎大学木花キャンパス, 宮崎, 9.20-24, 2016)
4. 谷口裕介, 石見涼, 梅田貴士, 江尻信司, 金谷和至, 北沢正清, 鈴木博, 若林直輝 「Gradient flow で探る topological susceptibility の温度依存性」 ,  
日本物理学会 (宮崎大学木花キャンパス, 宮崎, 9.20-24, 2016)
5. 若林直輝, 谷口裕介, 石見涼, 梅田貴士, 江尻信司, 金谷和至, 北沢正清, 鈴木博 「有限温度クエンチ QCD における微分法による状態方程式の研究」 ,  
日本物理学会 (宮崎大学木花キャンパス, 宮崎, 9.20-24, 2016)
6. 石見涼, 江尻信司, 金谷和至, 大野浩史, 宇治敦史, 梅田貴士, 若林直輝, 吉田信介 「 $O(4)$  スケーリングを用いた有限温度・密度 QCD の相転移線の曲率」 ,  
日本物理学会 (宮崎大学木花キャンパス, 宮崎, 9.20-24, 2016)
7. 谷口裕介, 石見涼, 梅田貴士, 江尻信司, 金谷和至, 北沢正清, 鈴木博, 若林直輝 「Gradient flow を課したら中間子相関関数はどうなる?」 ,  
日本物理学会第 72 回年次大会 (大阪大学, 大阪, Mar. 17-20, 2017)
8. 石見涼, 江尻信司, 金谷和至, 大野浩史, 宇治敦史, 梅田貴士, 吉田信介 「クロスオーバースケーリングを用いた有限温度・密度 QCD の相構造」 ,  
日本物理学会第 72 回年次大会 (大阪大学, 大阪, Mar. 17-20, 2017)
9. 白銀瑞樹, 江尻信司, 石見涼, 金谷和至, 北沢正清, 鈴木博, 谷口裕介, 梅田貴士, 若林直輝 「Gradient flow を用いた  $SU(3)$  ゲージ理論における相転移近傍の熱力学量の研究」 ,  
日本物理学会第 72 回年次大会 (大阪大学, 大阪, Mar. 17-20, 2017)
10. 若林直輝, 江尻信司, 石見涼, 金谷和至, 北沢正清, 鈴木博, 谷口裕介, 梅田貴士, 白銀瑞樹 「 $SU(3)$  格子ゲージ理論における相転移点での二相共存状態」 ,  
日本物理学会第 72 回年次大会 (大阪大学, 大阪, Mar. 17-20, 2017)

11. 藏増 嘉伸, 「テンソルネットワーク法の素粒子物理学への応用」(招待講演), ポスト「京」萌芽的課題「基礎科学の挑戦 – 複合・マルチスケール問題を通じた極限の探求」キックオフミーティング(東北大学, 仙台, 2016年9月9日).
12. 大野浩史「Stochastic法を用いたクォークoniumスペクトル関数の解析」, 理研シンポジウム・iTHES研究会「熱場の量子論とその応用」(理化学研究所, 和光, 2016年8月22日-24日).
13. 大野浩史「Stochastic法を用いたクォークoniumスペクトル関数の研究」, 日本物理学会 第72回年次大会(大阪大学豊中キャンパス, 大阪, 2017年3月17日-20日).
14. 鈴木遊, 岡将太郎, 谷口裕介, 中村純「カノニカル法における符号問題の研究」日本物理学会 2016年秋季大会, 宮崎大学, 2016年9月21日-24日
15. 鈴木遊, 谷口裕介, 「Gradient Flowを用いたK中間子のBパラメータの計算」, (日本物理学会第72回年次大会, 2017.3.17)
16. 鈴木遊, 岡将太郎, 谷口裕介, 中村純, 「カノニカル法における分配関数の位相の研究」理研シンポジウム・iTHES研究会「熱場の量子論とその応用」, 理化学研究所, 2016年8月22日-24日
17. 賀数 淳平、石川 健一、石塚 成人、藏増 嘉伸、中村 宜文、滑川 裕介、谷口 裕介、浮田 尚哉、山崎 剛、吉江 友照 for PACS collaboration, 「格子QCDによるパイオンの形状因子の研究」2016年度原子核三者若手夏の学校(黒姫ライジングサンホテル, 長野, 2016年7月31日-8月5日)
18. 山崎 剛, 石川 健一, 藏増 嘉伸, 宇川 彰 for PACS Collaboration, 「重いクォークを用いた軽原子核直接計算の系統的研究」日本物理学会 2016年秋季大会(宮崎大学, 宮崎, 2016年9月21-24日)
19. 賀数 淳平、石川 健一、石塚 成人、藏増 嘉伸、中村 宜文、滑川 裕介、谷口 裕介、浮田 尚哉、山崎 剛、吉江 友照 for PACS collaboration, 「 $N_f = 2 + 1$  格子 QCD による物理点質量近傍での  $\pi$  中間子形状因子の研究」日本物理学会 2016 年秋季大会(宮崎大学, 宮崎, 2016 年 9 月 21-24 日)
20. 山崎 剛, 「格子 QCD を用いた原子核直接計算」(招待講演) 第 8 回学際計算科学による新たな知の発見・統合・創出シンポジウム(筑波大学, 茨城, 2016 年 10 月 17-18 日)
21. 山崎 剛, 佐々木勝一, 藏増 嘉伸, 石川 健一, 浮田 尚哉, 「格子 QCD を用いた原子核構造計算へ向けた基礎研究」, 第 3 回「京」を中核とする HPCI システム利用研究課題成果報告会(コクヨホール, 東京, 2016 年 10 月 21 日)
22. 山崎 剛, 石川 健一, 藏増 嘉伸, 宇川 彰 for PACS Collaboration, 「大きなクォーク質量での軽原子核直接計算の演算子依存性の研究」, 日本物理学会第 72 回年次大会(大阪大学, 大阪, 2016 年 3 月 17-20 日)

23. 賀数 淳平、石川 健一、石塚 成人、藏増 嘉伸、中村 宜文、滑川 裕介、谷口 裕介、浮田 尚哉、山崎 剛、吉江 友照 for PACS collaboration, 「strange mass reweighting を考慮した物理点質量近傍での格子 QCD による  $\pi$  中間子形状因子の研究」日本物理学会第 72 回年次大会 (大阪大学, 大阪, 2016 年 3 月 17-20 日)
24. 吉江 友照 「HEPnet-J/sc 報告」2016 年度 HEPnet-J ユーザー会、(新潟大学, 新潟、2017 年 3 月 27-28 日)
25. 石橋 延幸、「Light-cone gauge superstring field theory in linear dilaton background」,  
日本物理学 2016 年秋季大会 (宮崎大学木花キャンパス、宮崎、2016 年 9 月 21 - 24 日).
26. 佐藤勇二、菅原祐二、上床隆弘、「Non-SUSY D-branes with vanishing cylinder amplitudes in asymmetric orbifolds」,  
日本物理学 2016 年秋季大会 (宮崎大学木花キャンパス、宮崎、2016 年 9 月 21 - 24 日).
27. 佐藤勇二、菅原祐二、「Lie algebra lattices and strings on T-folds」,  
日本物理学会第 72 回年次大会 (大阪大学豊中キャンパス、豊中、2017 年 3 月 17 - 20 日).
28. 佐藤勇二、菅原祐二、上床隆弘、「Non-SUSY D-branes with vanishing cylinder amplitudes in asymmetric orbifolds II」,  
日本物理学会第 72 回年次大会 (大阪大学豊中キャンパス、豊中、2017 年 3 月 17 - 20 日).
29. 金子幸雄、村木久祥、綿村哲「Construction of gravity theory on Poisson manifolds」日本物理学会年会 (大阪大学、豊中、2017 年 3 月 17-20 日)
30. 金子幸雄、村木久祥、綿村哲「Contravariant gravity on Poisson manifold and Einstein gravity」日本物理学会年会 (大阪大学、豊中、2017 年 3 月 17-20 日)
31. 伊敷吾郎、松本高興、村木久祥「行列幾何における情報計量について」日本物理学会年会 (大阪大学、豊中、2017 年 3 月 17-20 日)
32. 伊敷吾郎、松本高興、村木久祥「非可換球空間上の Dirac 演算子について」日本物理学会秋季大会 (宮崎大学、宮崎、2016 年 9 月 21-24 日)
33. 伊敷吾郎、松本高興、村木久祥「摂動を加えた非可換球面における Kähler 構造の解析」日本物理学会秋季大会 (宮崎大学、宮崎、2016 年 9 月 21-24 日)

#### 〈国際会議・研究会の実施〉

1. 筑波大学計算科学研究センター主催,  
Advanced Summer School on Lattice Gauge Theories,  
2016 年 9 月 12-14 日, 筑波大学計算科学研究センター, つくば.
2. 日本物理学会第 72 回年次大会シンポジウム (世話人: 川島直輝・藏増嘉伸),  
テンソルネットワーク法とその可能性,  
2017 年 3 月 18 日, 大阪大学豊中キャンパス, 大阪.
3. 格子ゲージ理論に関する Advanced Summer School 2016 年 9 月 12-14 日, 筑波大学計算科学研究センター, つくば世話人: 浮田尚哉 (連絡責任者), 石塚成人, 大野浩史, 金谷和至, 藏増嘉伸, 谷口裕介, 山崎剛, 吉江友照

#### 〈国内外の共同組織への参加および顕著な学会の委員活動〉

1. 計算基礎科学連携拠点  
<http://www.jicfus.jp/jp/>
2. 理化学研究所計算科学研究機構 (AICS)  
<http://www.aics.riken.jp/>
3. International Lattice Data Grid (ILDG)  
<http://ildg.sasr.edu.au/Plone>
4. Japan Lattice Data Grid (JLDG)  
<http://www.jldg.org/jldg/>, <http://ws.jldg.org/QCDArchive/index.jsp>
5. 山崎 剛, 日本物理学会 素粒子論領域 領域運営委員
6. 山崎 剛, 計算科学ロードマップ 素粒子分野執筆者
7. 石橋延幸, 日本学術振興会学術システム研究センター専門委員
8. 石橋延幸, PTEP 編集委員
9. 石橋延幸, 日本物理学会若手奨励賞 素粒子論領域 選考委員
10. 佐藤勇二, 欧州の学際研究教育ネットワーク「Gauge Theory as an Integrable System (GATIS)」(<http://gatis.desy.eu/>) のグローバルネットワークへの参加
11. 佐藤勇二, Hungarian Academy of Sciences (HAS) との二国間交流事業 (共同研究) 「ゲージ-重力双対性と可積分性に基づく強結合ゲージ理論ダイナミクスの展開」(代表)



## II. 素粒子実験グループ

教 授	金 信弘, 受川 史彦
准教授	原 和彦, 武内 勇司
講 師	佐藤 構二
助 教	大川 英希
研究員	武政 健一
教 授	Soo-Bong KIM (海外教育研究ユニット招致)
教 授	吉田 拓生 (クロスアポイントメント教員)
准教授	池上 陽一 (クロスアポイントメント教員)
大学院生	15 名
学群 4 年次生	1 名

素粒子実験グループは高エネルギー粒子衝突型加速器を用いた国際共同実験 CDF および ATLAS に参加し、エネルギー・フロンティアでの素粒子実験研究を遂行している。CDF は 2011 年度に運転終了、ATLAS は 2009 年秋より衝突実験を開始した。本年度もそれぞれにおいて様々な研究活動が行われた。また、宇宙背景ニュートリノの崩壊探索実験 COBAND とそのための高分解能光検出器 STJ の開発、SOI 技術を用いた次世代粒子検出器の開発、および宇宙線ミュー粒子を用いた大規模構造物の透視を行っている。

当グループの教員は数理物質融合科学センター (CiRfSE) 宇宙史国際研究拠点に所属し、国内外機関との連携を深めて研究を強力に推進するための組織整備を行っている。平成 28 年度には、3 名の研究者を本学教員として招き、より密接な共同研究の体制を構築した。

### 【1】 陽子・反陽子衝突実験 CDF

CDF 実験は、米国フェルミ国立加速器研究所のテバトロン加速器を用いた陽子・反陽子衝突実験であり、日本をはじめアジア、北米、欧州の計 14ヶ国の研究機関・大学からなる国際協力により行なわれている。2001 年度より Run II 実験が遂行されてきたが、2011 年 9 月 30 日に加速器・検出器ともにその運転が終了した。最終的に CDF 検出器により記録されたデータ量は約  $10 \text{ fb}^{-1}$  である。この全データを用いた物理解析も多くが終了し、最終結果を論文として公表する段階にある。2016-17 年には 10 篇の原著論文が公表された。以下に成果の主なものを記す。

CDF 実験による 1995 年のトップクォーク発見から 20 年が経過し、Run II 実験においては高統計のトップクォーク事象を用いてその様々な性質が詳細に研究されている。テバトロンでのトップクォーク生成は、クォーク・反クォーク対を始状態とする対生成が主である。

トップクォーク質量の測定は、素粒子標準理論のパラメータの決定として、また、輻射補正を通して関係づけられる  $W$  ボソンおよびヒッグス粒子の質量との整合性の検証の点で、極めて重要である。CDF 実験では様々な終状態を用いてトップクォーク質量の測定を行ってきた。2016 年度には、Run-II 実験の全データを用いた結果を  $D\bar{D}$  実験と統合し、 $M_{\text{top}} = 174.30 \pm 0.35 \pm 0.54 \text{ GeV}/c^2$  を得た (図 1 左)。相対精度は 0.37% であり、実験開始当初の予測を大きく上回る高精度を実現した。

トップクォーク対の生成機構の解明と標準理論を超える新物理の探索のため、 $t\bar{t}$  対の前後

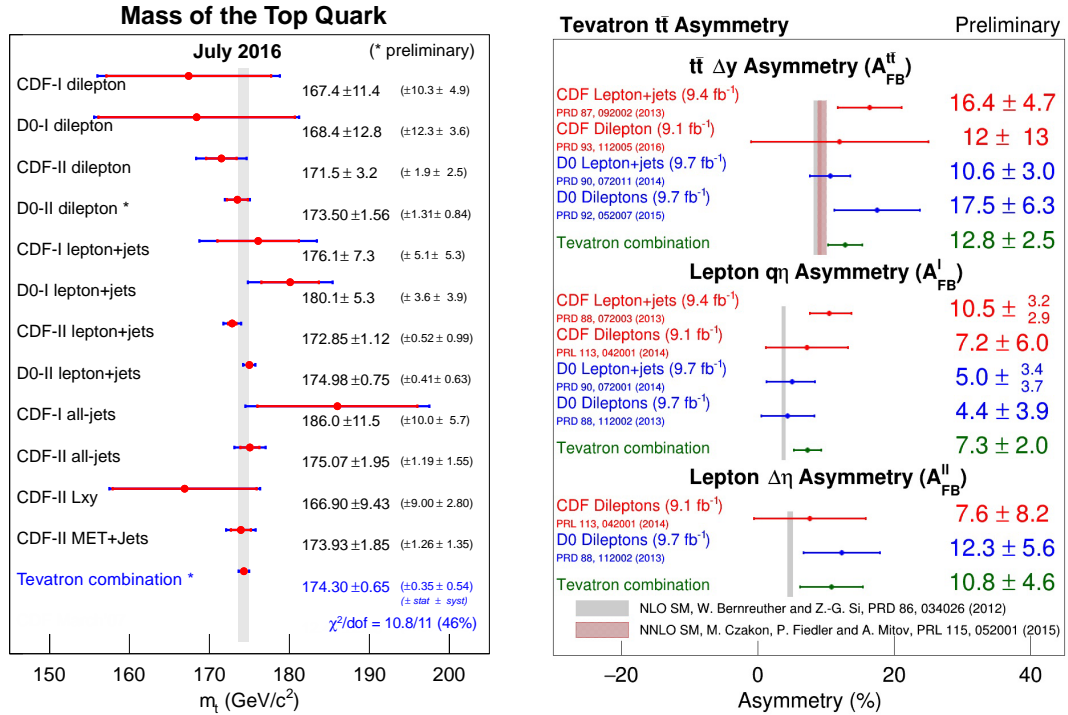


図 1: CDF および D0 実験でのトップクォークの性質の測定。(左) 質量, (右) 対生成の前後方非対称度。

方非対称度に着目し, 2010 年度には 5.1 fb<sup>-1</sup> 相当のデータを用いて dilepton チャンネルにおける初めての測定を行った。2016 年度には, CDF 実験と D0 の実験の結果を総合した最終結果を得た (図 1 右)。非対称度が 0 でないことはパリティの破れを意味する。強い相互作用 (QCD) はパリティを保存するが, 素過程の摂動最低次の項と高次の項との干渉により 6% 程度の非対称度が予言される。実験値はそれを若干上回り, さらなる高精度の検証が求められるが, LHC 実験は陽子陽子衝突であるので非対称度の測定は容易ではない。

## 【2】 LHC ATLAS 実験

欧州 CERN 研究所の Large Hadron Collider (LHC) 加速器は, 2012 年までの Run-1 実験を経て 2013-2014 年度には重心系エネルギーを 13-14 TeV に増強するための改良が行われた。2015 年度からは Run-2 実験が始まった。2015 年度の LHC 運転では, ATLAS 実験は 3.9 fb<sup>-1</sup> の陽子・陽子衝突データを取得した。続く 2016 年度の運転では, さらに 35.6 fb<sup>-1</sup> のデータを取得している。Run-1 で 7-8 TeV であった重心系エネルギーが, Run-2 では 13 TeV に上昇したことにより, ヒッグス粒子の生成断面積が増大し, より精度の高い測定が期待できる。同時に, 重い粒子を生成しやすくなるため, 重い新粒子を伴う新しい物理に対しても, 飛躍的に高い感度で探索解析が行える。

LHC は, 当初の設計値を超えた高輝度実験を実現するため, 2026 年ころに HL-LHC 加速器へと増強される予定である。放射線レベルも現在の検出器設計の 10 倍に達するため, それに伴う新しい内部飛跡検出器の開発研究を行っている。

## (1) 本学グループの物理解析への取り組み

ヒッグス粒子は発見されたばかりの粒子であり、その性質を精密に測定して理解することは重要である。ヒッグス粒子が標準理論の予言するとおりの性質なのか、標準理論からずれがあるのかをはっきりさせ、標準理論を超える物理の発見へのヒントにつなげる意味で、ヒッグス粒子の精密測定は大変意義がある。また、ヒッグス粒子が標準理論を超える物理現象と結合している可能性を積極的に探すことも大切である。

標準理論は単一のヒッグス粒子を予言しているが、超対称性理論など、多くの有望視されている標準理論を超える素粒子理論では、ヒッグス粒子は複数存在すると考えられている。そこで、すでに見つかっているヒッグス粒子のほかにもヒッグス粒子があるのかどうかをはっきりさせることも、標準理論を超える物理を探る上で大変重要である。

LHC 加速器は、世界最高エネルギーでの素粒子反応を起こす実験であり、重い新粒子を伴う新しい物理現象が直接観測できる可能性も高い。ATLAS 実験では、新しい物理の直接探索も積極的に行っている。

本学グループは、ヒッグス粒子の既知の粒子への結合の測定、ヒッグス粒子の未発見の物理現象との関わりを探る物理解析、第二のヒッグス粒子の探索、新しい物理の積極探索の分野で、さまざまな解析研究を行ってきた。

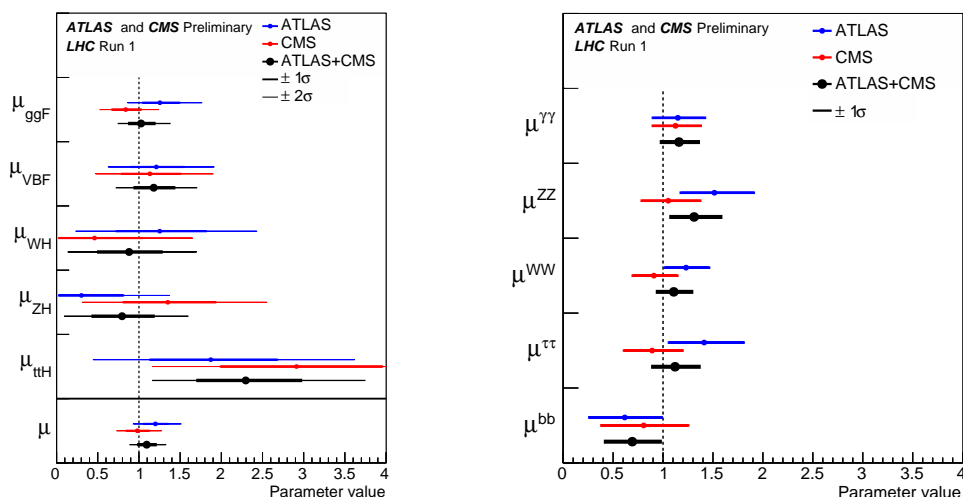


図 2: ATLAS および CMS 実験の Run-1 での測定結果を複合して得られた (左) ヒッグス粒子の様々な生成過程での信号の強さ  $\mu$  (生成断面積を標準理論の予言値で規格化したもの)。(右) ヒッグス粒子の様々な崩壊過程での信号の強さ  $\mu$  (崩壊分岐比を標準理論の予言値で規格化したもの)。

## (2) ヒッグス粒子の崩壊と種々の粒子との結合

素粒子の標準理論において質量の起源を担うヒッグス粒子は 2012 年夏に発見された。現在は、その精密測定を通して、標準理論の枠組みどおりヒッグス粒子はすべての素粒子に質量を与えるのか (あるいはそうでないのか)、発見された他にヒッグス粒子はあるのか、などについて研究を進めている。

ヒッグス粒子と他の粒子との結合は質量に比例することが予言されるが、ヒッグス粒子の様々な粒子対への崩壊を観測することにより、その検証が行える。

LHC Run-1 での ATLAS および CMS 両実験で種々の終状態を用いて測定したヒッグス粒子の信号の強さ  $\mu$  (生成断面積および崩壊分岐比を標準理論の予言値で割ったもの) を図 2 に示す。両実験で個々の測定結果について矛盾は認められず、統合することで測定精度が向上した。

発見に使われた様式  $H \rightarrow \gamma\gamma$ ,  $H \rightarrow Z^0 Z^{*0}$ ,  $H \rightarrow W^\pm W^{*\mp}$  において予言との一致度はよい。ヒッグス粒子が  $W/Z$  粒子 (ゲージ粒子) と結合することは発見時に確立した。2014 年度には ATLAS 実験で初めてレプトン ( $\tau$ ) とも結合することが高い精度で判明していたが、2015 年度の CMS 実験との統合により  $H \rightarrow \tau\tau$  崩壊の信号の有意度は  $5\sigma$  に達した。

ヒッグス粒子が  $W/Z$  粒子に質量を与えることはヒッグス機構の定義であり、 $\tau$  レプトン対への崩壊が確認されたことで同じヒッグス粒子が湯川結合によりレプトンにも質量を与えることはここまでで確認できたといえる。残った物質粒子 (フェルミ粒子) であるクォークに対して同様に結合しているのか否かは、標準理論の最も重要な検証のひとつである。

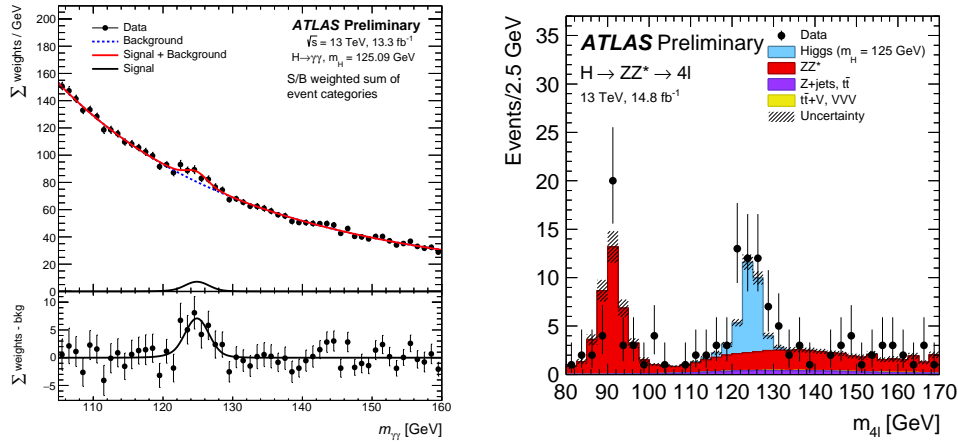


図 3: ATLAS 実験の Run-2 のデータを用いた、(左) 二光子崩壊事象および (右) 4 レプトン崩壊事象におけるヒッグス粒子の「再発見」。

### (3) Run-2 における 2 光子および 4 レプトンに崩壊するヒッグス粒子の測定

LHC Run-2 の 2016 年夏までの  $13.3 \text{ fb}^{-1}$  のデータを用いて、二光子崩壊事象と、4 レプトン崩壊事象の両チャンネルにおいて、ヒッグス粒子を「再発見」した (図 3)。また、二光子崩壊事象においては、ヒッグス粒子の横運動量分布や、ジェット数分布などの微分断面積の測定を行い、摂動 QCD (量子色力学) の精密検証及び、標準理論を超える新物理の兆候を探索した (図 4)。現時点では、各ヒッグス粒子生成過程におけるシグナル強度も含めて、標準理論からの逸脱は見られない (図 4)。

### (4) 弱ボソンとの随伴生成によるヒッグス粒子のボトムクォーク対への崩壊の探索

標準理論どおりであれば、ヒッグス粒子は 58% の崩壊分岐比で  $H \rightarrow b\bar{b}$  のモードで崩壊する。この崩壊モードは、もっとも崩壊分岐比が大きい。

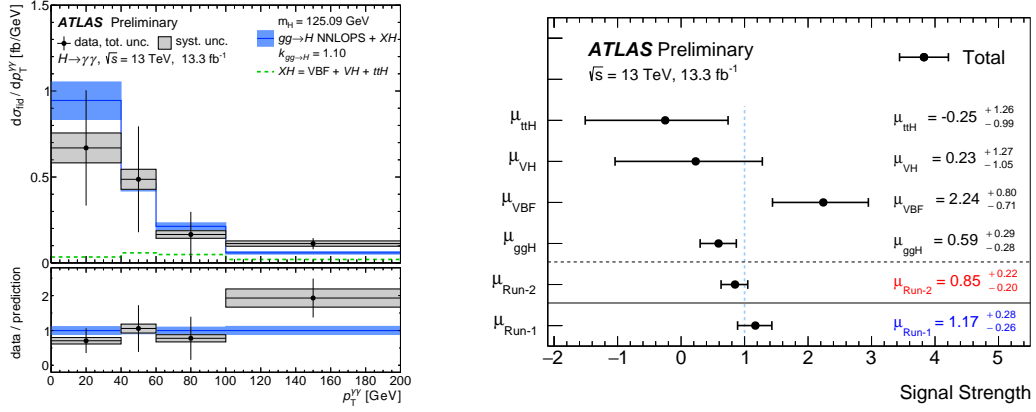


図 4: ATLAS 実験の Run-2 のデータを用いた、二光子崩壊事象におけるヒッグス粒子の横運動量についての微分断面積 (左) と各生成過程についてのシグナル強度の測定。

ATLAS 実験では、ヒッグス粒子が  $W$  または  $Z$  ボソンと随伴して生成され、それらが  $W \rightarrow \ell\nu$  または  $Z \rightarrow \ell\ell/\nu\nu$ , および  $H \rightarrow b\bar{b}$  へと崩壊する事象を探してきた。

Run-1 実験で得られた  $\sqrt{s} = 7$  および  $8$  TeV のデータを用いた 2015 年の解析結果では、測定された信号の強さ (事象の頻度の標準理論による予言値との比) は  $\mu = 0.53 \pm 0.32$  (stat)  $\pm 0.24$  (syst) であり、信号の統計的有意度は  $2.6\sigma$  の予想に対して  $1.4\sigma$  であった。CMS 実験と Run-1 解析を統合した結果では、 $3.7\sigma$  の予想に対して  $2.6\sigma$  であった。

ATLAS 実験では、 $\sqrt{s} = 13$  TeV のデータ  $13.2 \text{ fb}^{-1}$  を解析した結果を 2016 年夏に発表した。Run-1 の解析と同様に、 $W$  または  $Z$  ボソンと随伴してヒッグス粒子が生成され、 $W \rightarrow \ell\nu$  または  $Z \rightarrow \ell\ell/\nu\nu$ , および  $H \rightarrow b\bar{b}$  と崩壊する事象を探索した。荷電レプトン (電子またはミュー粒子) が終状態に 0, 1, または 2 個存在し、ヒッグス粒子が崩壊したボトムクォークを起源とする  $b$  ジェットを 2 つ以上含む事象を解析した。解析感度をあげるため、2 つの  $b$  ジェットの不变質量をはじめとするさまざまな測定量を使って多変数解析により信号・バックグラウンド事象間の分離を最適化した。図 5 に、荷電レプトンを 0, 1, 2 個含む終状態での、多変数解析の出力分布を示す。

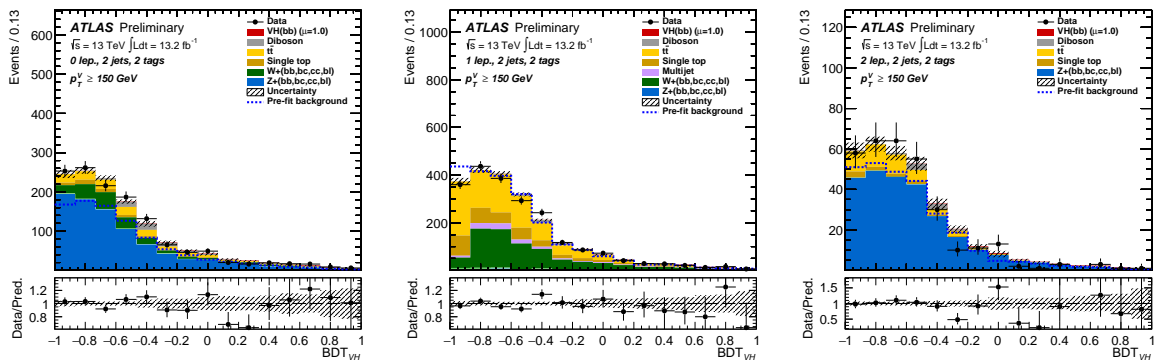


図 5:  $(Z/W)H \rightarrow (\nu\bar{\nu}/\ell\nu/\ell\ell)b\bar{b}$  事象の探索解析での多変数解析の出力分布。 $b$  タグされたジェットを 2 つ含む事象に対するもの。左からそれぞれ、電子またはミュー粒子を 0, 1, 2 個含む終状態での分布を示す。この出力を、信号・バックグラウンドの識別変数として用いた。

本解析では、ヒッグス粒子の質量  $m_H = 125 \text{ GeV}/c^2$  としたときに、95% の信頼度で、 $pp \rightarrow (W/Z)(H \rightarrow b\bar{b})$  信号の強さ（生成断面積と崩壊分岐比の積の標準理論の予言値との比）に対して、1.2 の上限値を得た。また、信号の強さを  $\mu = 0.21^{+0.36}_{-0.35} (\text{stat}) \pm 0.36 (\text{syst})$  と測定した (図 6)。期待された信号の有意度は  $1.94\sigma$  であったが、観測された有意度は  $0.42\sigma$  であった。

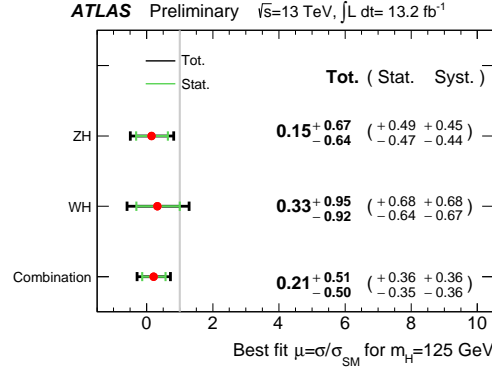


図 6:  $(Z/W)H, H \rightarrow b\bar{b}$  過程の信号の強さ  $\mu$ （生成断面積と崩壊分岐比の積、標準理論の予言値で規格化したもの）。

## (5) トップクォーク対を伴うヒッグス粒子生成過程の探索

トップクォークは質量は  $m_t = 173.34 \pm 0.76 \text{ GeV}/c^2$  で、2 番目に重い物質粒子である  $b$  クォークと比べても 35 倍ほども重い。湯川結合が物質粒子の質量に比例するため、トップクォークは電弱対称性の破れのなかで特に重要な役割りを担う。クォークの中でもトップクォークがどのようにヒッグス粒子と結合するかは大変興味深く、重要な測定テーマのひとつである。

トップクォークとヒッグス粒子の結合の強さを測るには、ヒッグス粒子がトップクォーク対を伴って生成する  $t\bar{t}H$  事象の生成断面積を測定する。2015 年度には、ATLAS 実験では Run-1 データを解析し、はじめての  $t\bar{t}H$  過程の探索結果を発表した。その結果を CMS 実験と統合した探索結果では、信号の有意度は、 $4.4\sigma$  に達していた。標準理論通りの場合に予想された  $2.0\sigma$  よりも高い有意度が結論されたことは大変興味深い。

Run-2 で取得するデータを解析することで、 $t\bar{t}H$  生成過程の観測を確立し、標準理論通りなのか、あるいはトップクォークが電弱理論の対称性の破れの中で予想されなかった特別な役割を担っているのかをはっきりさせて行く。

ATLAS 実験では、2016 年夏には、Run-2 で得られた  $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$  でのデータ  $13.3 \text{ fb}^{-1}$  を用いて、 $t\bar{t}H$  過程で生成されたヒッグス粒子が、 $b\bar{b}$ 、 $\gamma\gamma$  または、 $WW/ZZ/\tau\tau$  から複数のレプトンに崩壊する過程を探索した。

図 7 に、 $t\bar{t}H, H \rightarrow b\bar{b}$  チャンネルでの探索の様子を示す。この探索チャンネルでは、ヒッグス粒子と一緒に生成されたトップクォーク対が電子またはミュー粒子 1、または 2 個を含む終状態に崩壊した事象を解析した。さらに解析に用いる事象サンプルを、ジェットおよび  $b$  タグされたジェットの数によって細分化することで信号に対する解析の向上し、さらには多変数解析を応用することで信号・バックグラウンドの分離を最適化している。



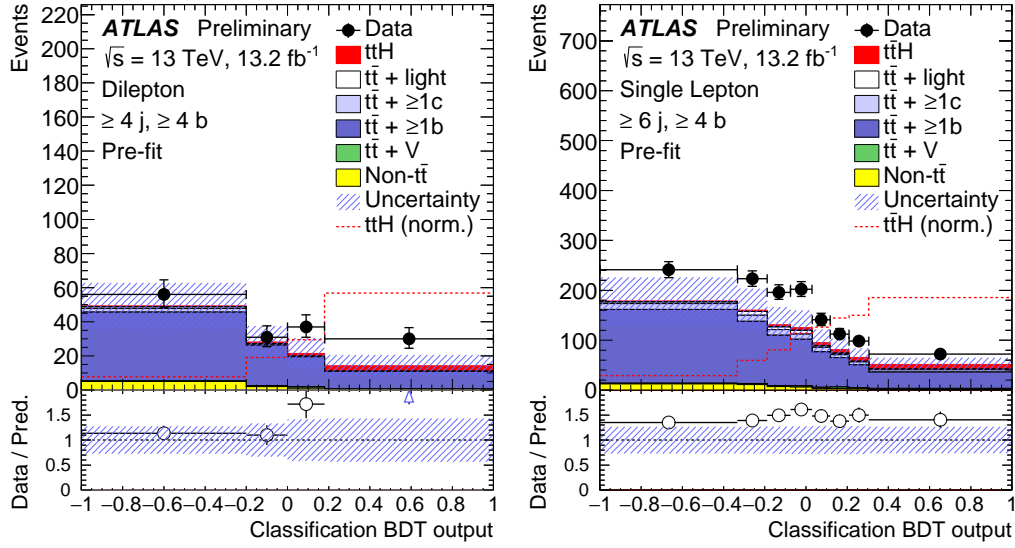


図 7:  $t\bar{t}H, H \rightarrow b\bar{b}$  事象の探索解析における、多変数解析の出力の分布。(左) 終状態に電子またはミュー粒子が 2 個あり、 $b$  タグしたジェットが 4 つ以上ある事象に対する分布。(右) 終状態に電子またはミュー粒子が 1 個、ジェットが 6 個以上、 $b$  タグしたジェットが 4 つ以上ある事象に対する分布。

ATLAS 実験の Run-2 での  $b\bar{b}$ ,  $\gamma\gamma$ ,  $WW/ZZ/\tau\tau$  崩壊チャンネルおよびこれらを統合した場合の  $t\bar{t}H$  過程の探索における信号の有意度を表 1 にまとめる。また、それぞれのチャンネルで測定された信号強度（生成断面積と崩壊分岐比の積の標準理論による预言値との比）を図 8 に示す。

Channel	Significance	
	Observed [ $\sigma$ ]	Expected [ $\sigma$ ]
$t\bar{t}H, H \rightarrow \gamma\gamma$	-0.2	0.9
$t\bar{t}H, H \rightarrow (WW, \tau\tau, ZZ)$	2.2	1.0
$t\bar{t}H, H \rightarrow b\bar{b}$	2.4	1.2
$t\bar{t}H$ combination	2.8	1.8

表 1:  $t\bar{t}H$  過程の探索解析での観測および予想された、バックグラウンドのみの仮定に対する信号の有意度。

今回の解析結果でも有意度が十分でないため、 $t\bar{t}H$  過程の観測を確立したとはいえない。とはいえ、観測された有意度がふたたび、標準理論どおりの信号がある仮定の元での予想を上回ったことは興味深い。

## (6) ヒッグス粒子の稀崩壊の探索

ヒッグス粒子の稀崩壊事象の探索は、湯川結合と標準理論の検証を行う上で、極めて重要である。ヒッグス粒子のミューオン粒子対への崩壊は、第 2 世代粒子との結合を、クリーンなイベントトポロジーで測定することを可能にする。図 9 は、2015・2016 年の全データを

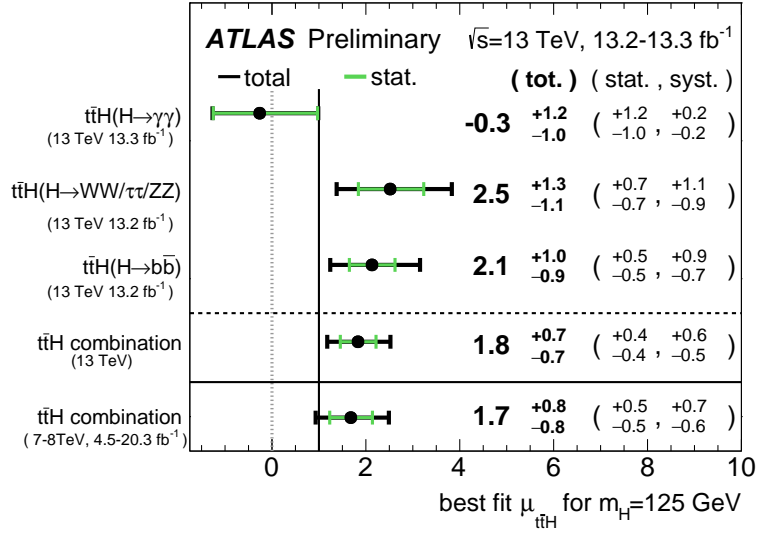


図 8:  $t\bar{t}H$  生成過程の生成断面積の測定結果。

用いた、ベクターボソンプュージョン生成過程における、ミューオン対の不変質量分布である。現時点では、ヒッグス粒子のミューオン粒子対への崩壊は、観測されず、標準理論から予測される生成断面積の 3.0 倍を、95%の信頼度で棄却した。

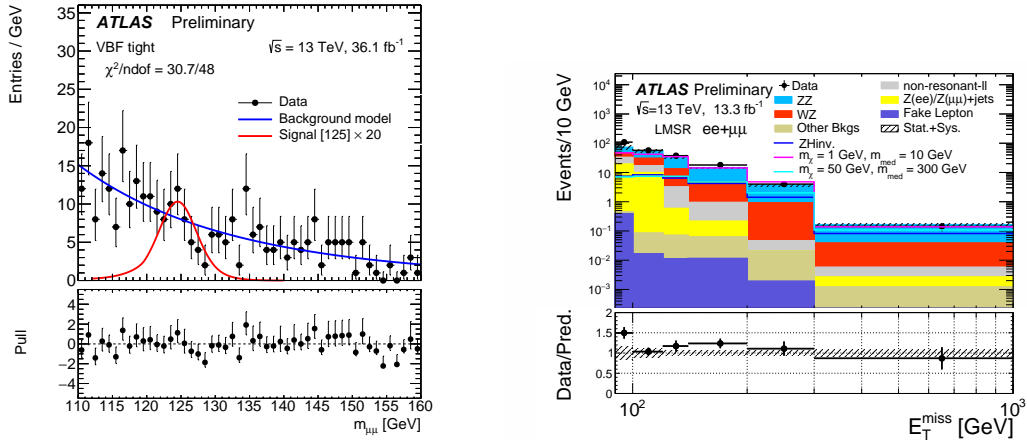


図 9: ATLAS 実験の Run-2 のデータを用いた、ヒッグス粒子の (左) ミューオン対崩壊事象および (右) 非可視崩壊事象の探索。

ヒッグス粒子の非可視崩壊の探索は、暗黒物質とヒッグス粒子の全崩壊幅の観点から非常に重要な研究である。暗黒物質が、ヒッグス粒子のみと相互作用するという、ヒッグスポータルモデルは、数多くある暗黒物質モデルの中でも最有力で、繰り込み可能であり、又、現在の暗黒物質の直接探索実験の結果とも整合する。

Run-2 のデータを用いて、Z ボソン随伴生成過程を用いた探索を行った。ニュートリノや暗黒物質などの、弱い相互作用をする粒子の横運動量の間接測定である、消失横運動量分布



において、標準理論からの有意な逸脱は見られなかった (図 9)。非可視崩壊比への制限は、95%の信頼度で、98% (期待感度 65%) であり、Run-1 からの制限には至らなかった。より高統計での追跡調査が待たれる。

## (7) 標準理論を超えたダイボソン共鳴事象の探索

標準理論を超えた物理の多くのモデルにおいて、複数のヒッグス粒子が存在することが示唆されている。その中でも、 $ZZ$  モードへの崩壊は、多くのモデルで予測されるため、探索チャンネルとして重要である。Run-2 のデータを用いて、 $ZZ$  共鳴事象の探索を行った。その際には、 $Z$  ボソンの崩壊モードに対応して、 $4l$ ,  $ll\nu\nu$ ,  $llqq$ ,  $\nu\nu qq$ ,  $4q$  というように多様なチャンネルについて、探索を行った。現時点では、標準理論からの有意な逸脱は、観測されなかった。 $ll\nu\nu$  チャンネルでは、bulk Randall-Sundrum Graviton について、 $\kappa/M_{\text{Pl}} = 1.0$  の条件下で、1.03 TeV の質量域を、95%の信頼度で棄却した (図 10)。 $llqq$ ,  $\nu\nu qq$  チャンネルからも、同程度の質量域が棄却されている。

$llqq$ ,  $\nu\nu qq$ ,  $4q$  チャンネルは、 $ZZ$  だけでなく、 $WW$  や  $WZ$  の共鳴事象にも感度がある。図これらのチャンネルに加えて、 $lvqq$  から、 $W'$  粒子の探索が行われ、Heavy Vector Triplet モデルにおいて、ベクターボソンとの結合  $g_V$  が 1 の場合に、2 TeV を超える質量域が棄却された (図 10)。

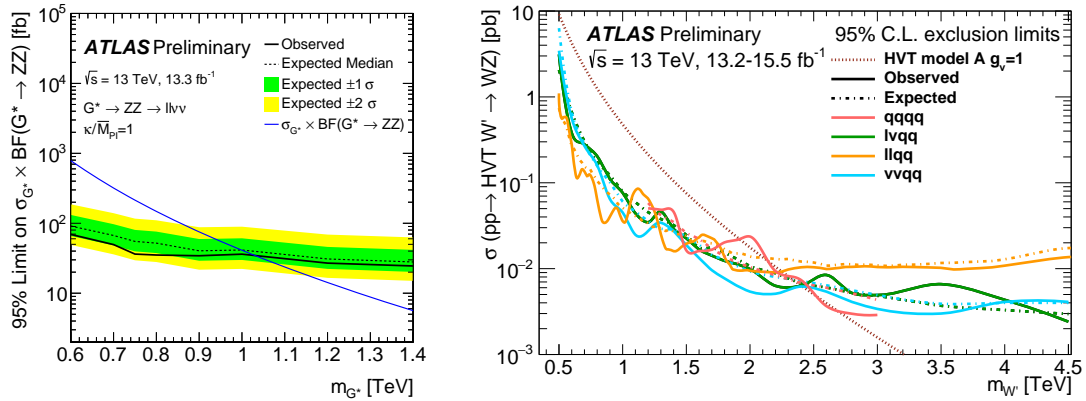


図 10: ATLAS 実験の Run-2 のデータを用いた、(左)  $ll\nu\nu$  チャンネルでの  $ZZ$  共鳴事象の探索における、bulk Randall-Sundrum Graviton モデルへの制限と、(右)  $WZ$  共鳴事象に対する  $W'$  の質量域への制限。

## (8) トップクォークとボトムクォークに崩壊する荷電ヒッグス粒子の探索

標準理論では、単一の中性電荷のヒッグス粒子が予言されていた。一方で、有力視されている超対称性理論をはじめ、標準理論を超えるさまざまな素粒子理論で、複数の種類のヒッグス粒子の存在が提唱されている。荷電を持ったヒッグス粒子の存在も、多くの理論で示唆されている。とくに、200 GeV/ $c^2$  以上の質量の場合、荷電ヒッグス粒子はトップクォークとボトムクォークへの崩壊分岐比が大きくなると予想されている。

2016 年夏には、トップクォークとボトムクォークに崩壊する荷電ヒッグス粒子を Run-2 データ 13.2 fb $^{-1}$  を使って探索した。図 11 に、300 および 800 GeV/ $c^2$  の質量を持つ荷電ヒッ

グス粒子を探索したときの、Boosted Decision Tree 出力の分布を示す。Boosted Decision Tree は、仮定する荷電ヒッグス粒子の質量ごとにトレーニングしなおしている。

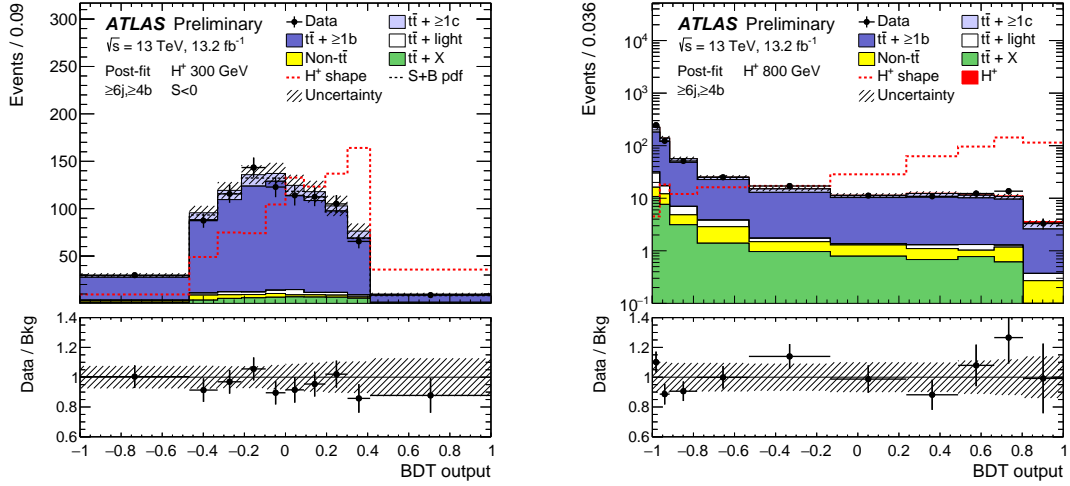


図 11: 質量 300  $\text{GeV}/c^2$  (左) および 800  $\text{GeV}/c^2$  (右) の荷電ヒッグス粒子信号のバックグラウンドからの分離を最適化した Boosted Decision Tree 出力の分布。信号とバックグラウンドの大きさは、データへのフィットの結果で規格化してある。信号の形をバックグラウンドと比較するために、赤線で示している。

データがバックグラウンドの予想とよく一致しており、信号事象の有意な超過を観測しなかった。図 12 に、荷電ヒッグス粒子の生成断面積とトップクォークとボトムクォークへの崩壊分岐比の積に対して本研究が与えた上限値、および、本解析が棄却した MSSM の  $m_h^{\text{mod-}}$  シナリオでのパラメータ領域を示す。

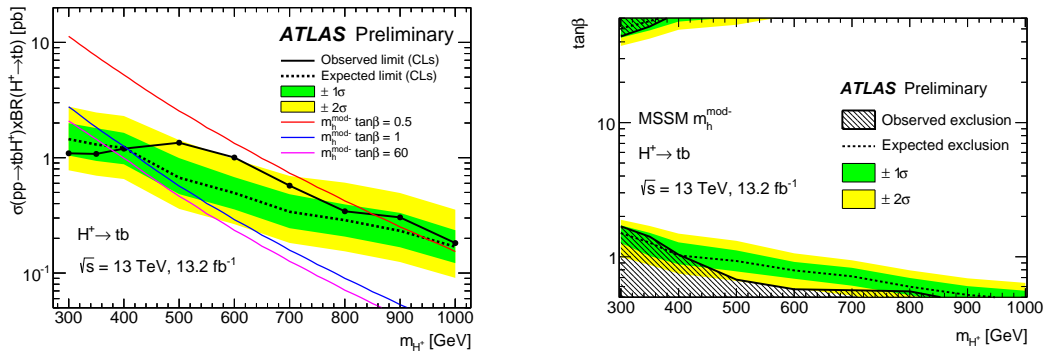


図 12: (左) 荷電ヒッグス粒子の生成断面積とトップクォークとボトムクォークへの崩壊分岐比の積に対して、本研究が与えた上限値。荷電ヒッグス粒子の質量の関数としてプロットしている。(右) 本解析により得られた、MSSM の  $m_h^{\text{mod-}}$  シナリオに対する制約。

### 【3】 HL-LHC に用いる p 型シリコン検出器の開発

LHC 加速器は、継続して最大限の物理成果を生み出すために、2026 年から当初設計値を超え  $3000 \text{ fb}^{-1}$  のデータ量をめざす高輝度 LHC (HL-LHC) 加速器に増強される。放射線レ

ベルも現在の検出器設計を超え、また、粒子数密度も増大する。我々は HL-LHC で使用できる放射線耐性に優れたシリコン半導体検出器を用いた新しい内部飛跡検出器の開発研究を継続して行っている。

ATLAS は 2016-17 年に内部飛跡検出器の技術設計書をまとめ、衝突点に近い最内層には電極サイズが  $50\ \mu\text{m} \times 250\ \mu\text{m}$  のピクセル型、外層は  $74\ \mu\text{m} \times (2.4\text{ または } 4.8)\text{ cm}$  のストリップ型のシリコン半導体検出器を配置する。

我々は、HL-LHC でも使用可能な高放射線耐性のセンサーとして n 型電極、p 型基板を用いたセンサー ( $n^+$ -on-p) を提案し、実際に陽子線や中性子を照射し、HL-LHC の高放射線線量でも使用可能な検出器を設計をしてきた。p 型基板を用いることは高速な電子を収集することで収集電荷量が放射線により影響を受けにくく、また、従来から放射線耐性に優れるとされた  $n^+$ -on-n 型設計に比べ、 $n^+$ -on-p の設計では片面プロセスが可能であるため製造コストが低減でき、よりも広い領域を半導体検出器で覆う HL-LHC 用には特に有利であることを示してきた。

2016 年度は、エンドキャップ部に用いるストリップ型センサーの設計と試験、ピクセル型センサーモジュールの試作と  $50\ \mu\text{m} \times 50\ \mu\text{m}$  サイズのピクセル検出器設計評価、さらに内部増幅機能をもつ LGAD 検出器の開発を行った。

## (1) エンドキャップ部ストリップ型センサー

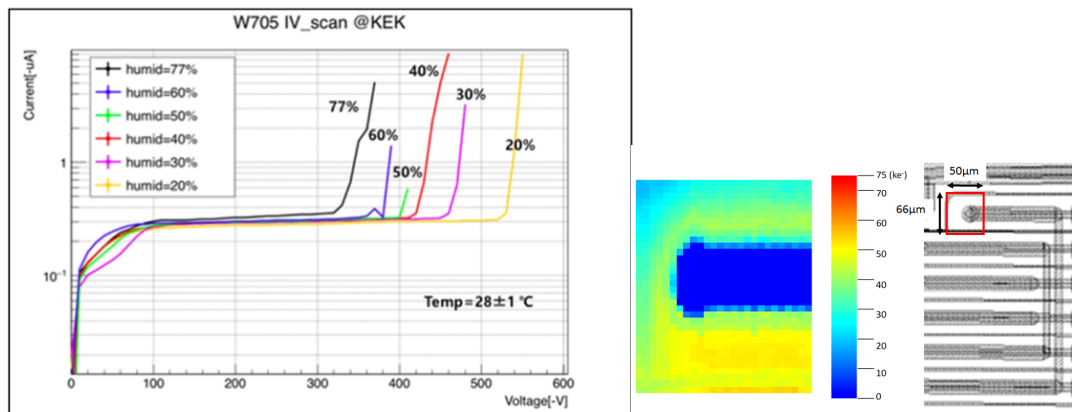


図 13: (左) 実機センサーの電流-バイアス電圧依存性を湿度を変えて測定。(右) ギャングした電極まわりの収集電荷一様性。信号は反対側 (左側) の端から読み出す。

ストリップ型センサーの実機を試作評価したところ、一部に暗電流の不安定性が見られた。この評価はイギリス、ドイツなどのグループとともに協力して進めているが、その原因を系統的に探り、湿度が影響を与えていること、暗電流発生がガードリング外側のポイントにあることを逸早く解明した。図 13 (左) は湿度を変えながら、電圧-電流特性を実機センサーに対して測定したもので、湿度が高いほどブレイクダウン電圧が下がることを示す。この結果から、湿度ゼロで稼働させる ATLAS 環境では動作に問題は発生しないが、製造元と協議して被膜製法を最適化する対策を進めている。

エンドキャップ用の最初の実機 (R0) を試作し、東北大学 CYRIC の 70 MeV 陽子ビームによる照射評価を進めている。また、暗電流の湿度依存性も引き続き評価し、以前のサンプルよりも安定性が向上したことを示した。

エンドキャップセンサーの設計によっては、扇型に広がるセンサー形状とステレオ角を持たせるための電極配置の兼ね合いから一部のストリップが読み出し端まで届かない場合が生じ、これらの電極は近傍の電極にギャングさせることで信号を読み出す。1  $\mu\text{m}$  角に絞った赤外レーザーでこれらの電極周辺を走査し電荷収集一様性の評価を行った。大きな電荷収集の劣化のないことを示した（図 13（右））。

## (2) ピクセル型センサー

ピクセル検出器は読み出しチップである FE-I4 の仕様からピクセルサイズ 50 $\times$ 250  $\mu\text{m}$  が基本設計である。2 cm 角の FE-I4 読み出しチップ 4 枚に対し 4 cm 角のピクセルセンサー 1 枚を金属バンプで接合したモジュール (4-chip module, 図 14 左) や 2-chip module を試作した。特に 2016 年度は実機への実装を念頭に、フレックス基板を用い、機械強度等の温度サイクル試験の後に、CYRIC で陽子線の照射をし、CERN の陽子ビームで未照射のサンプルと比較して検出器性能を評価した。昨年度までの試験から、照射後には各ピクセルに配線するバイアス抵抗の経路で検出効率が低下することが判明し、経路をピクセル電極の内側に配置することで照射後も 98%以上の検出効率の目標を達成した。フレックス基板での金属バンプ形成の機械的安定性について評価を重ね、十分に仕様に満たすモジュールが製作できることを確立した。

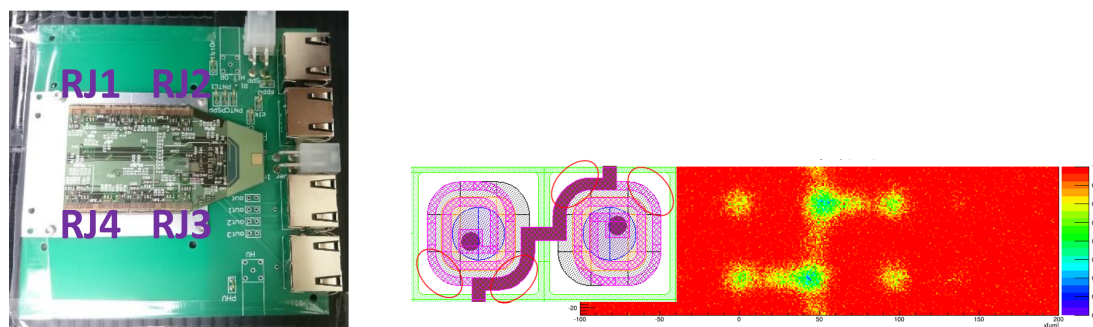


図 14: (左) 4-chip flex module. 中央 4cm 角のセンサーをフレックス基板で読み出す。この形状では信号はさらに 4 つの RJ 端子をもつ基板を介して出力されるが、実機ではこの部分はシリンドラ部に実装される。(右) は  $3 \times 10^{15} \text{ n/cm}^2$  を照射した 50 $\times$ 50  $\mu\text{m}$  ピクセルに相当するセンサーのピクセル内位置での検出効率の分布。左には隣接する 2 つのピクセル電極と低抵抗のバイアスライン（濃い実線部）と高抵抗のバイアス抵抗の経路を示す。丸で囲った部分で検出効率が低下し、設計変更により低下が抑えられる見込みが得られた。

2016 年度は、ピクセルサイズの小さなセンサーに移行することを見越して、同じ FE-I4 で対応できる 50 $\times$ 50  $\mu\text{m}$  と 50 $\times$ 450  $\mu\text{m}$  ピクセルの組み合わせにし、50 $\times$ 50  $\mu\text{m}$  ピクセルを隣接させることで 50  $\mu\text{m}$  角センサーの検出効率を評価した。ピクセル面積が狭いのでバイアス抵抗の占める面積比が高くなり、図 14 右に示すように照射後の検出効率は目標値を達成できない。しかしこの詳細な検出効率のマップから、バイアス抵抗を細くしピクセル電極の内側に経路を取ることで 98%以上の効率を達成できることが見込めることを初めて示した。

実際に 50 $\times$ 50  $\mu\text{m}$  ピクセルにするには読み出しチップも対応させる必要がある。CERN グループにより 65 nm CMOS プロセスによる FE65-p2 チップが使えるようになり、実際に 50 $\times$ 50  $\mu\text{m}$  ピクセルモジュールと 25 $\times$ 100  $\mu\text{m}$  ピクセルモジュールを試作し、FNAL でテストビーム試験を行った。テストビームでは FE-I4 モジュールを前後に配置し、中央に FE65



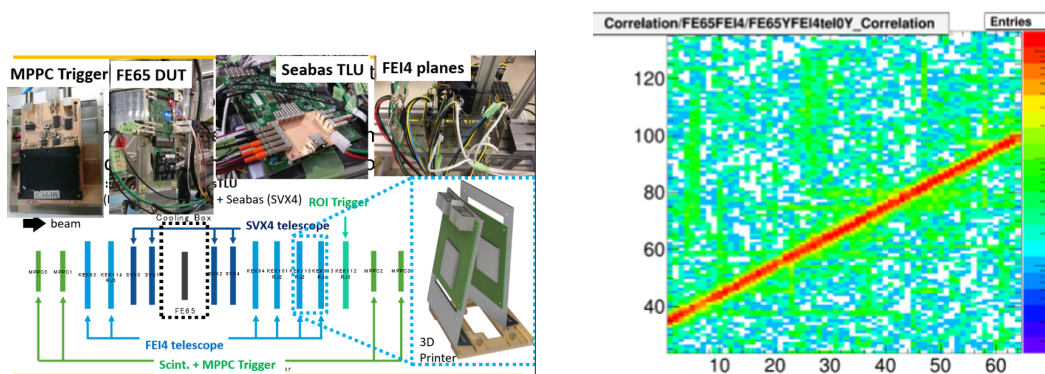


図 15: (左)FNAL でのビーム試験に用いたモジュールと配置。(右)FE-I4 モジュール（縦軸）と FE65 モジュール（横軸）のヒットチャンネルの相関。

モジュールを設置することで 120GeV 陽子を用いて評価した（図 15 左）。解析は進行中であり、図 15 右には、FE65 からのヒットチャンネル番号と FE-I4 のヒットチャンネル番号の相関を示す。FE-I4 はビームに対して意図的に傾けることで位置分解能を向上させているため、 $y = x$  からはやや外れるがビームによる強い相関が確認できる。FE65 チップはさまざまな機能も試す試作段階の読み出しチップであるが、ピクセルモジュールとして実際に信号を読み出すことに成功した初めてのデータである。

### (3) LGAD センサー

LGAD (low-gain avalanche diode) は増幅機能を持たせたシリコン検出器であり、現在 ATLAS 実験に応用するために精力的な開発研究が行われている。読み出しの  $n^+$  電極の直下に高濃度の  $p^+$  層を形成することで、アバランシェ増幅を起こさせる。信号量が増えることに加え増幅率が 10 倍程度の低ゲインでは SN 比も向上する。信号形成が薄い pn 接合部で局所的に起きるため時間分解能が飛躍的に向上し、ATLAS では飛行時間測定装置や衝突点からの飛跡を精度よく 4 次元情報をもとに再構成することでルミノシティ測定装置への応用を目指している。従来のシリコン検出器は電荷収集に 10 ns 程度を要するが LGAD では 10 ps の時間分解能が可能であると考えている。

浜松ホトニクスで試験用 LGAD ピクセルを試作し、ガンマ線、中性子線、陽子線を照射し LGAD の機能がどう保たれるかの評価を行った。図 16 左は、増幅機能のない場所とある場所にレーザーを入射した場合にバイアス電圧を変えて得られる電荷量を測定した結果である。増幅機能のない場所では一定の電荷分布を示すのに対して増幅機能のある場所では 100 V を超えると増幅される。図 16 右は陽子線により  $1 \times 10^{15}/\text{cm}^2$  照射した後の結果である。増幅に必要な電圧は上がるが増幅機能が保持されていることが分かる。さらに元々増幅機能がない場所でも増幅が確認される。これは陽子線照射によりシリコンバルクがより濃い p 型に変わるためであり、あたかも  $p^+$  層を  $n^+$  電極直下に形成したのと同様な特性を示すからである。

今後は LGAD 機能の最適化とモジュール化の研究に加えて、時間分解能の研究を進める。

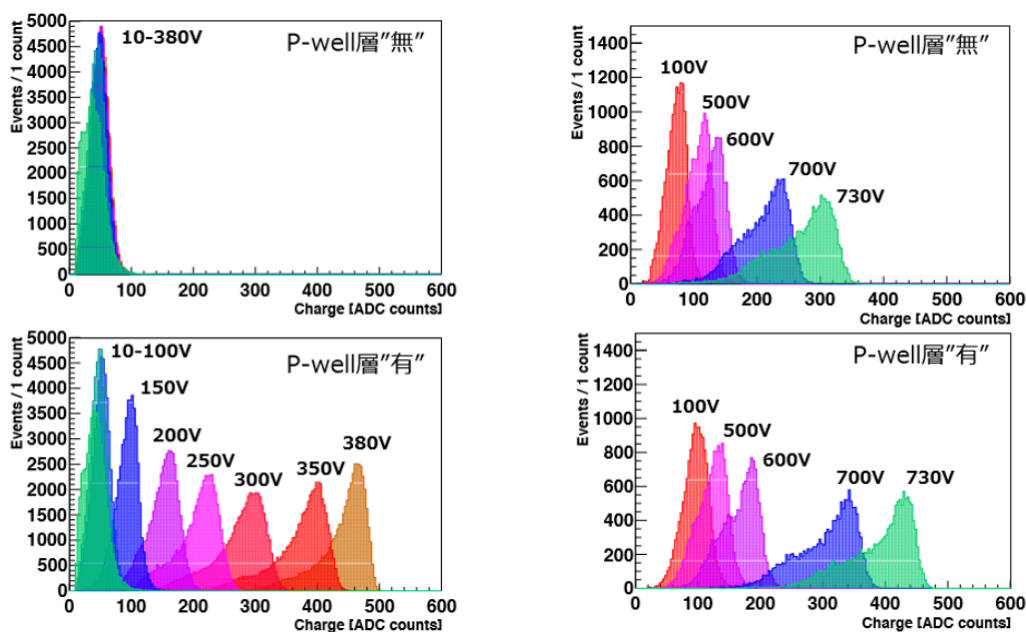


図 16: (左) 増幅機能のない場所 (上) とある場所 (下) に赤外レーザーを入れた場合の得られる電荷分布のバイアス電圧依存性。未照射サンプル。(右) 増幅機能のない場所 (上) とある場所 (下) に赤外レーザーを入れた場合の得られる電荷分布のバイアス電圧依存性。  $1 \times 10^{15}/\text{cm}^2$  照射サンプル。

#### 【4】 SOI を用いたモノリシック型ピクセル検出器の開発

Silicon-On-Insulator (SOI) は、埋め込み酸化膜 (BOX) 層をシリコン基板中に形成し、表層の薄いシリコン層に電子回路を作製した素子である。BOX 層下のシリコン基板を高抵抗の粒子検出部とした読み出し回路一体型ピクセルセンサーを実現する全く新しいタイプの検出器である。我々は Lapis セミコンダクター社の  $0.20 \mu\text{m}$  SOI プロセスを用いて KEK の先端検出器開発室と共同で、将来の加速器実験に用いることのできるピクセル検出器の開発研究を行っている。

SOI はトランジスタ各素子が酸化膜で覆われているために、漏れ電流が少なく高速応答が期待できるが、一方、正孔を酸化膜に蓄積しやすく、電離性放射線線量 (TID) が増えると蓄積正電荷の影響を受けて近傍のトランジスタ特性が大きく変化することを明らかにしてきた。そこで SOI の素粒子実験への適用を可能にするため、埋め込み酸化膜 2 層からなる 2 層 SOI 基板を世界で初めて製作し、評価を継続している。粒子センサー基板の上に 2 層の埋め込み酸化膜層を形成し、その中間シリコン層 (SOI2) に TID 損傷による劣化に応じて負の電荷を加えることで TID 損傷を補償することを目指している。

昨年度までの放射線損傷の研究の成果を示すために FPIX (fine-pixel detector) を用いて実証研究を進めた。SOI の特長のひとつは金属バンプを用いないためにピクセルサイズを微小にできることである。FPIX はピクセル回路に増幅用、出力スイッチ用、リセット、保護回路用の FET 6 個をのせ、各列の信号を順次外部 ADC に送るピクセル回路であるが、SOI 素子としては最小の  $8 \mu\text{m}$  角のピクセルを実現している。昨年度までに FPIX2 で、ピクセル部、デコーダー部、IO 部で個別の SOI2 電圧を設定できるものを作製し、500 kGy までの放射線耐性があることを示した。2016 年度はピクセル部とデコーダー部はさらに NMOS と PMOS で個別の設定ができるようにした。また、懸案であった LDD (Lightly doped drain)

の濃度を調整し PMOS に対する放射線耐性をあげた FPIX3 を作製した。コバルト 60 による試験で、最低 1 MGy までの放射線耐性があることを示すことに成功し、1 MGy を超える測定は計画中である。

SOI 素子は当初は数 kGy で全く使い物にならなくなったが、我々の研究により TID に対して通常の CMOS 素子と同等の放射線耐性がある素子が作製できる事を示し、さらに優れた SEE 耐性を考慮すると、SOI は素粒子実験に極めて適した素子であるといえる。

FPIX2 の微小ピクセルの特長を直接検証するために、FNAL の 120 GeV 陽子ビームを用いた試験を行った。ビームテストでは FPIX2 を 4 枚ビームラインに配置し、特定の FPIX2 の位置分解能を評価するために自分以外の 3 枚で直線飛跡を再構成し自分のヒット位置との残差分布を求めた。図 17 は 4 枚の FPIX2 での残差分布を示す。また 1 ～ 4 枚目までの相対位置関係も示した。大きく外挿する 4 枚目では広い残差分布になるが内挿できる 2 枚目、3 枚目では残差は小さく、それぞれ位置分解能 0.93, 0.89  $\mu\text{m}$  を達成した。この残差分布は飛跡再構成の不確かさも含まれるために、4 枚の FPIX2 の固有位位置分解能が等しいと仮定すると残差分布から飛跡および固有位位置分解能が評価できる。4 つの分布からはいずれも 0.75 から 0.78  $\mu\text{m}$  が得られ、半導体検出器としては世界で初めて 1  $\mu\text{m}$  より優れた位置分解能をもつ検出器であることを示すことができた。

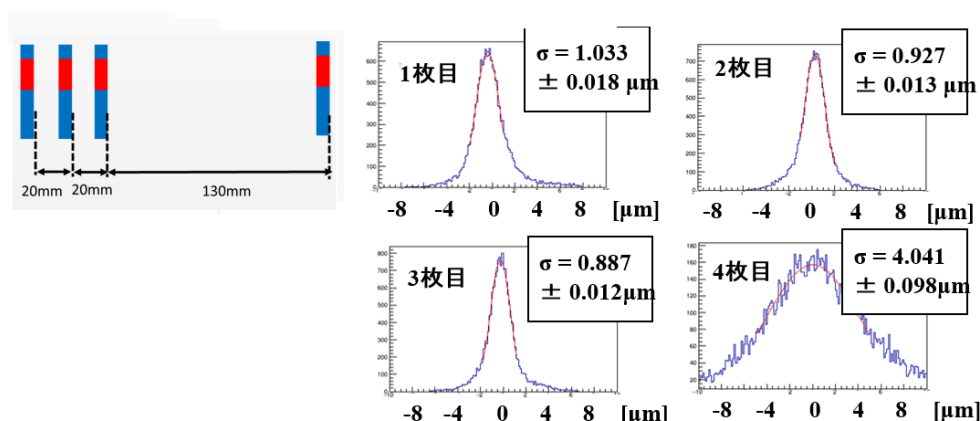


図 17: ビームテストで評価した FPIX2 検出器 4 枚のヒット位置の残差分布。左は 4 枚の相対位置を示す。

我々は、100 kGy の放射線耐性があることを実証した段階で、国際リニア衝突器 ILC に使用できるピクセル素子 SOFIST の開発を KEK らと共同で推進している。FNAL のビーム試験では FPIX2 で飛跡を再構成し、20  $\mu\text{m}$  角ピクセルの SOFIST で残差を評価したところ 1.7  $\mu\text{m}$  の位置分解能を示した。これは ILC では十分な性能である。SOFIST には試験した素子の機能に加え、ヒット時刻の情報も必要であり、これらの機能も統合して 20  $\mu\text{m}$  角ピクセルに実現するために 3D 積層する研究を進めている。

## 【5】 COBAND 実験

COBAND 実験は、宇宙背景ニュートリノ崩壊探索を目的とした、筑波大学素粒子実験室を中心とする国際共同実験である。宇宙初期に生成されたニュートリノの名残とされる宇宙背景ニュートリノは、現在温度 1.9 K、各質量固有状態の世代ごとに数密度 110 個/ $\text{cm}^3$  で

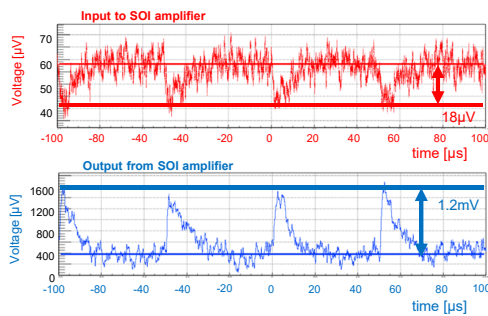


図 18: SOI 極低温アンプによる Nb/Al-STJ 信号の冷凍機内増幅。産総研 CRAVITY 製  $20\ \mu\text{m}$  角 Nb/Al-STJ の可視光パルス (波長  $465\text{ nm}$ ) に対する応答信号を同じく冷凍機内に配置された SOI 極低温増幅回路によって増幅信号を読み出すことに成功した。

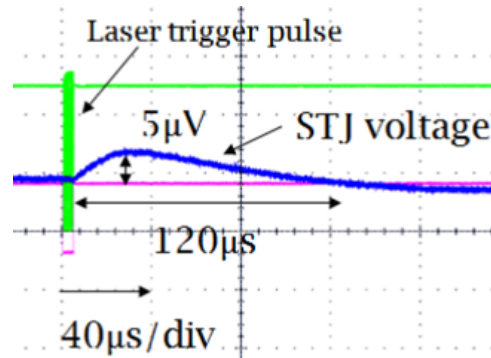


図 19: ハフニウムを用いた超伝導トンネル接合素子によるパルス応答の確認。ハフニウム酸化層の上に薄いアルミニウム層を用い、従来の Hf-STJ よりリーク電流密度を約  $1/16$  に低減に成功。このサンプルで可視光パルス (波長  $465\text{ nm}$ ) 応答を確認。

宇宙全体にわたって存在していると予想されている。最も重い質量固有状態のニュートリノは、軽い質量固有状態に波長約  $50\ \mu\text{m}$  の光子を放出して崩壊することが可能であり、我々 COBAND 実験では、現在観測値として与えられているニュートリノ寿命下限値  $10^{12}$  年を超える感度で宇宙背景ニュートリノの崩壊に伴う光子を観測する実験を計画中である。実験に使用される光検出器は、波長  $50\ \mu\text{m}$  (エネルギー  $25\text{ meV}$ ) の光子を分解能 2% の精度で一光子ずつ測定可能な性能である。我々のグループでは、観測ロケット実験での使用予定であるニオブ (超伝導ギャップエネルギー  $\Delta = 1.55\text{ meV}$ ,  $T_c = 9.23\text{ K}$ ) と準粒子トラップ層としてアルミニウム ( $\Delta = 0.172\text{ meV}$ ,  $T_c = 1.20\text{ K}$ ) を用いた Nb/Al-STJ (超伝導トンネル接合素子 STJ, Superconducting Tunnel Junction) や、更に衛星実験での使用を念頭に置いた  $\Delta$  の小さいハフニウム ( $\Delta = 0.020\text{ meV}$ ,  $T_c = 0.165\text{ K}$ ) を超伝導体として用いた Hf-STJ を光検出器の候補として研究開発を続けている。

Nb/Al-STJ 単体では、 $25\text{ meV}$  の光子に対して十分なエネルギー分解能は期待できないが一光子検出が実現できれば、格子状に並べた Nb/Al-STJ ピクセルと回折格子の組み合わせによって分解能 2% 以下の一光子分光が可能となる。我々のグループでは産総研との共同研究による漏れ電流の少ない Nb/Al-STJ の開発、並びに STJ 信号極低雑音読み出し系として KEK, JAXA 等との共同研究による FD-SOI (Fully Depleted Silicon On Insulator) プロセスによる極低温増幅器の開発を行っている。産総研の超伝導デバイス作製施設である CRAVITY で作製された Nb/Al-STJ 試料は、遠赤外一光子検出に要求される低漏れ電流性能をほぼ達成した。極低温増幅器の開発については、FD-SOI プロセスによる MOSFET を用いた増幅器の試作および測定を行い、 $300\sim 400\text{ mK}$  の極低温での動作を確認している。更に、昨年度においては、この試作増幅器を用い、極低温で動作させた STJ のパルス光応答信号の極低温ステージ上での増幅に成功した (図 18)。STJ のパルス光応答速度および STJ 測定系の静電容量を考慮すると、より低い入力インピーダンスへの改善が必要であることから、低入力インピーダンスの電荷積分型増幅器の試作を行い、現在、極低温における測定を行っている。

Nb/Al-STJ の開発と並行して、KEK 測定器開発室のプログラムの一つとして、KEK, 理研との共同研究によって Hf-STJ の開発を進めてきた。これまで、Hf 成膜、Hf 膜のパターン加工方法を確立し、2010 年度には、Hf-HfO<sub>x</sub>-Hf による SIS 構造の作製に成功してジョセフソン電流を確認した。また、2012 年度には Hf-STJ 試作サンプルでの可視域連続光入射に



対する応答（トンネル電流増加）を確認した。実用化に向けた重要なステップとして、漏れ電流の改善、および可視パルス光入射に対するパルス応答の確認が挙げられる。昨年度、絶縁層 HfO<sub>x</sub> の上に薄いアルミニウム層 (< 10 μm) を追加することで漏れ電流密度を従来の 1/16 という大幅な改善に成功した。この Hf/Al-STJ サンプルを用い、可視域 (波長 465nm) レーザーパルス光照射試験により、Hf/Al-STJ からのパルス応答を得た (図 19)。

## 【6】 福島第一原発燃料デブリの宇宙線ミュオンによる観測

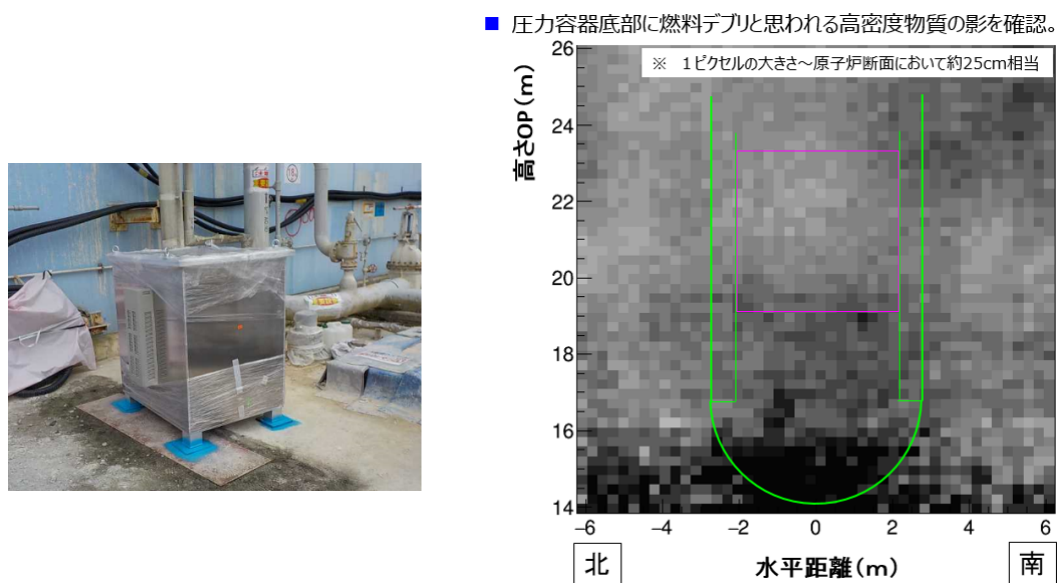


図 20: (左) 福島第一原発 2 号炉の観測に用いられた検出器。高さ約 1 m。(右) 2 号機燃料装荷位置周辺のミュオン計数。

ミュオン粒子が建物などを透過しやすい性質を利用し、宇宙線ミュオン粒子の飛来数分布を大規模構造物の背後で測定することで、構造物内部の様子を透視するミュオンラジオグラフィに取り組んでいる。2011 年夏から福島第一原子炉事故で溶け落ちた燃料デブリの位置を測定することを最終目標にして KEK のグループと共同で技術設計を開始し、2015 年には国際廃炉機構 (IRID) の支援を受けて福島第一原発 1 号機を観測し、2016 年度は東京電力の事業委託を受けた KEK に協力する体制で 2 号機の観測をした。

2 号機の観測用に検出層面のサイズを 1 辺 0.5 m とし、2 組の XY 層を 0.5 m 離す構造にすることで、装置全体をおよそ 1 m 立法に小型化した。これにより建屋直近に設置することが可能となった (図 20 左)。ミュオン粒子の検出は従来通り断面 1 cm × 1 cm のシンチレータバーが基本単位であるが、これを 2 層 0.5 cm ずらして位置座標の測定面にするすることで、小型化しても 1 号機と同性能のミュオン飛来方向の測定精度を確保した。

1 号機の観測では燃料デブリは燃料装荷位置にはほとんどないことが分かったが、測定装置を建屋からやや離れた位置に設置する必要があったため、圧力容器の下部は視野に入らず、デブリの存在に対する情報は得られなかった。

2 号機の観測では測定器を一層建屋に近づけることで図 20 右のような透視画像を得ることに成功した。画像で濃淡は宇宙線ミュオン計数を物質がないときの計数結果で規格化し

たものに相当するが、燃料装荷位置（高さ 19.5 – 23.5 m, 左右 2 m の枠内）は燃料以外の物質による吸収量でほぼ説明でき燃料デブリはほとんどないことが分かる。圧力容器の底部（U 字部）はそれに対して過剰な吸収があり、背景となる原子炉の構造体を定量的に評価した結果、底部に残る燃料デブリ量は溶け落ちる前の燃料集合体とほぼ等しい量になることが判明した。この結果は燃料デブリの存在位置に対する初めての観測結果となった。

2号機での成果を受けて、現在、同じ装置を3号機のタービン建屋内に設置する計画を進めている。

## 【7】 外部資金

1. 科学研究費 新学術領域研究「ニュートリノフロンティアの融合と進化」2013 – 2017 年度  
計画研究 B02：「宇宙背景ニュートリノの崩壊探索に用いる超伝導赤外線検出器の開発」，研究代表者：金 信弘，研究分担者：吉田拓生，武内勇司  
13,910 千円（直接経費 10,700 千円，間接経費 3,210 千円）（2016 年度）
2. 科学研究費 挑戦的萌芽研究「半導体 SOI 回路と超伝導検出器 STJ の融合による革新的な高感度検出器の開発」2016 – 2018 年度，研究代表者：武内勇司  
910 千円（直接経費 700 千円，間接経費 210 千円）（2016 年度）
3. 科学研究費 新学術領域研究「ヒッグス粒子発見後の素粒子物理学の新展開～LHC による真空と時空構造の解明～」2016 – 2021 年度  
計画研究 B01：「ヒッグス粒子で探る真空と世代構造」，研究分担者：受川史彦  
9,750 千円（直接経費 7,500 千円，間接経費 2,250 千円）（2016 年度）
4. 科学研究費 新学術領域研究「3次元半導体検出器で切り拓く新たな量子イメージングの展開」2013 – 2017 年度  
計画研究 C01：「高輝度加速器実験のための素粒子イメージング」，研究分担者：原和彦  
2,340 千円（直接経費 1,800 千円，間接経費 540 千円）（2016 年度）
5. KEK 大学等連携支援事業「筑波大 – 加速器科学に関する大学院教育プログラム等の高度化」  
共同代表者：守友 浩，金 信弘  
物品費・旅費等：280 千円（宇宙史一貫教育プログラム向け配分額）

## 【8】 研究発表

### (1) 原著論文

1. T. A. Aaltonen, K. Hara, S. H. Kim, K. Sato, Y. Takeuchi, F. Ukegawa *et al.* [CDF Collaboration], “Measurement of the  $WW$  and  $WZ$  production cross section using final states with a charged lepton and heavy-flavor jets in the full CDF Run II data set,” *Phys. Rev. D* **94**, 032008 (2016).

2. T. A. Aaltonen, K. Hara, S. H. Kim, K. Sato, Y. Takeuchi, F. Ukegawa *et al.* [CDF Collaboration], “Measurement of  $\sin^2 \theta_{\text{eff}}^{\text{lept}}$  using  $e^+e^-$  pairs from  $\gamma^*/Z$  bosons produced in  $p\bar{p}$  collisions at a center-of-momentum energy of 1.96 TeV,” *Phys. Rev. D* **93**, 112016 (2016).
3. T. A. Aaltonen, K. Hara, S. H. Kim, K. Sato, Y. Takeuchi, F. Ukegawa *et al.* [CDF Collaboration], “Measurement of the forward-backward asymmetry of top-quark and antiquark pairs using the full CDF Run II data set,” *Phys. Rev. D* **93**, 112005 (2016).
4. T. A. Aaltonen, K. Hara, S. H. Kim, K. Sato, Y. Takeuchi, F. Ukegawa *et al.* [CDF Collaboration], “Measurement of the forward-backward asymmetry in low-mass bottom-quark pairs produced in proton-antiproton collisions,” *Phys. Rev. D* **93**, 112003 (2016).
5. T. A. Aaltonen, K. Hara, S. H. Kim, K. Sato, Y. Takeuchi, F. Ukegawa *et al.* [CDF Collaboration], “Measurement of the  $B_c^\pm$  Production Cross Section in  $p\bar{p}$  Collisions at  $\sqrt{s} = 1.96$  TeV,” *Phys. Rev. D* **93**, 052001 (2016).
6. T. A. Aaltonen, K. Hara, S. H. Kim, K. Sato, Y. Takeuchi, F. Ukegawa *et al.* [CDF Collaboration], “Search for a Low-Mass Neutral Higgs Boson with Suppressed Couplings to Fermions Using Events with Multiphoton Final States,” *Phys. Rev. D* **93**, 112010 (2016).
7. T. A. Aaltonen, K. Hara, S. H. Kim, K. Sato, Y. Takeuchi, F. Ukegawa *et al.* [CDF Collaboration], “Measurement of vector boson plus  $D^*(2010)^+$  meson production in  $p\bar{p}$  collisions at  $\sqrt{s} = 1.96$  TeV,” *Phys. Rev. D* **93**, 052012 (2016).
8. T. A. Aaltonen, K. Hara, S. H. Kim, K. Sato, Y. Takeuchi, F. Ukegawa *et al.* [CDF Collaboration], “Updated Measurement of the Single Top Quark Production Cross Section and  $Vtb$  in the Missing Transverse Energy Plus Jets Topology in  $p\bar{p}$  Collisions at  $\sqrt{s} = 1.96$  TeV,” *Phys. Rev. D* **93**, 032011 (2016).
9. T. A. Aaltonen, K. Hara, S. H. Kim, K. Sato, Y. Takeuchi, F. Ukegawa *et al.* [CDF Collaboration], “Measurement of the inclusive leptonic asymmetry in top-quark pairs that decay to two charged leptons at CDF,” *Phys. Rev. Lett.* **113**, 042001 (2014), Erratum: [*Phys. Rev. Lett.* **117**, 199901 (2016)].
10. T. A. Aaltonen, K. Hara, S. H. Kim, K. Sato, Y. Takeuchi, F. Ukegawa *et al.* [CDF Collaboration], “Measurement of the leptonic asymmetry in  $t\bar{t}$  events produced in  $p\bar{p}$  collisions at  $\sqrt{s} = 1.96$  TeV,” *Phys. Rev. D* **88**, 072003 (2013), Erratum: [*Phys. Rev. D* **94**, 099901 (2016)].
11. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “A measurement of material in the ATLAS tracker using secondary hadronic interactions in 7 TeV  $pp$  collisions,” *JINST* **11**, P11020 (2016).
12. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Luminosity determination in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 8$  TeV using the ATLAS detector at the LHC,” *Eur. Phys. J. C* **76**, 653 (2016).

13. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of  $W^+W^-$  production in association with one jet in proton–proton collisions at  $\sqrt{s} = 8$  TeV with the ATLAS detector,” *Phys. Lett. B* **763**, 114 (2016).
14. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for dark matter produced in association with a hadronically decaying vector boson in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector,” *Phys. Lett. B* **763**, 251 (2016).
15. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Study of hard double-parton scattering in four-jet events in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 7$  TeV with the ATLAS experiment,” *JHEP* **1611**, 110 (2016).
16. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for Minimal Supersymmetric Standard Model Higgs bosons  $H/A$  and for a  $Z'$  boson in the  $\tau\tau$  final state produced in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS Detector,” *Eur. Phys. J. C* **76**, 585 (2016).
17. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Dark matter interpretations of ATLAS searches for the electroweak production of supersymmetric particles in  $\sqrt{s} = 8$  TeV proton-proton collisions,” *JHEP* **1609**, 175 (2016).
18. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the  $b\bar{b}$  dijet cross section in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 7$  TeV with the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **76**, 670 (2016).
19. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for new phenomena in different-flavour high-mass dilepton final states in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **76**, 541 (2016).
20. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of top quark pair differential cross-sections in the dilepton channel in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 7$  and 8 TeV with ATLAS,” *Phys. Rev. D* **94**, 092003 (2016).
21. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the total cross section from elastic scattering in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 8$  TeV with the ATLAS detector,” *Phys. Lett. B* **761**, 158 (2016).
22. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for squarks and gluinos in events with hadronically

decaying tau leptons, jets and missing transverse momentum in proton-proton collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV recorded with the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **76**, 683 (2016).

23. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of exclusive  $\gamma\gamma \rightarrow W^+W^-$  production and search for exclusive Higgs boson production in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 8$  TeV using the ATLAS detector,” *Phys. Rev. D* **94**, 032011 (2016).
24. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for high-mass new phenomena in the dilepton final state using proton-proton collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector,” *Phys. Lett. B* **761**, 372 (2016).
25. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for Higgs and  $Z$  Boson Decays to  $\phi\gamma$  with the ATLAS Detector,” *Phys. Rev. Lett.* **117**, 111802 (2016).
26. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for supersymmetry in a final state containing two photons and missing transverse momentum in  $\sqrt{s} = 13$  TeV  $pp$  collisions at the LHC using the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **76**, 517 (2016).
27. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of jet activity in top quark events using the  $e\mu$  final state with two  $b$ -tagged jets in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 8$  TeV with the ATLAS detector,” *JHEP* **1609**, 074 (2016).
28. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for bottom squark pair production in proton-proton collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **76**, 547 (2016).
29. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for the Higgs boson produced in association with a  $W$  boson and decaying to four  $b$ -quarks via two spin-zero particles in  $pp$  collisions at 13 TeV with the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **76**, 605 (2016).
30. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “The performance of the jet trigger for the ATLAS detector during 2011 data taking,” *Eur. Phys. J. C* **76**, 526 (2016).
31. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for heavy long-lived charged  $R$ -hadrons with the ATLAS detector in  $3.2 \text{ fb}^{-1}$  of proton-proton collision data at  $\sqrt{s} = 13$  TeV,” *Phys. Lett. B* **760**, 647 (2016).

32. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Searches for heavy diboson resonances in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector,” JHEP **1609**, 173 (2016).
33. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for pair production of Higgs bosons in the  $b\bar{b}b\bar{b}$  final state using proton–proton collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector,” Phys. Rev. D **94**, 052002 (2016).
34. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the  $W^\pm Z$  boson pair-production cross section in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS Detector,” Phys. Lett. B **762**, 1 (2016).
35. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for new resonances in events with one lepton and missing transverse momentum in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector,” Phys. Lett. B **762**, 334 (2016).
36. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for top squarks in final states with one isolated lepton, jets, and missing transverse momentum in  $\sqrt{s} = 13$  TeV  $pp$  collisions with the ATLAS detector,” Phys. Rev. D **94**, 052009 (2016).
37. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for resonances in diphoton events at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector,” JHEP **1609**, 001 (2016).
38. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the  $t\bar{t}$  production cross-section using  $e\mu$  events with  $b$ -tagged jets in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector,” Phys. Lett. B **761**, 136 (2016).
39. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the Inelastic Proton-Proton Cross Section at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS Detector at the LHC,” Phys. Rev. Lett. **117**, 182002 (2016).
40. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS and CMS Collaborations], “Measurements of the Higgs boson production and decay rates and constraints on its couplings from a combined ATLAS and CMS analysis of the LHC  $pp$  collision data at  $\sqrt{s} = 7$  and 8 TeV,” JHEP **1608**, 045 (2016).
41. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for TeV-scale gravity signatures in high-mass final states with leptons and jets with the ATLAS detector at  $\sqrt{s} = 13$  TeV,” Phys. Lett. B **760**, 520 (2016).

42. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for the Standard Model Higgs boson produced by vector-boson fusion and decaying to bottom quarks in  $\sqrt{s} = 8$  TeV  $pp$  collisions with the ATLAS detector,” JHEP **1611**, 112 (2016).
43. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the top quark mass in the  $t\bar{t} \rightarrow$  dilepton channel from  $\sqrt{s} = 8$  TeV ATLAS data,” Phys. Lett. B **761**, 350 (2016).
44. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the photon identification efficiencies with the ATLAS detector using LHC Run-1 data,” Eur. Phys. J. C **76**, 666 (2016).
45. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the double-differential high-mass Drell-Yan cross section in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 8$  TeV with the ATLAS detector,” JHEP **1608**, 009 (2016).
46. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Charged-particle distributions at low transverse momentum in  $\sqrt{s} = 13$  TeV  $pp$  interactions measured with the ATLAS detector at the LHC,” Eur. Phys. J. C **76**, 502 (2016).
47. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the angular coefficients in  $Z$ -boson events using electron and muon pairs from data taken at  $\sqrt{s} = 8$  TeV with the ATLAS detector,” JHEP **1608**, 159 (2016).
48. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for pair production of gluinos decaying via stop and sbottom in events with  $b$ -jets and large missing transverse momentum in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector,” Phys. Rev. D **94**, 032003 (2016).
49. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the relative width difference of the  $B^0$ - $\bar{B}^0$  system with the ATLAS detector,” JHEP **1606**, 081 (2016).
50. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Transverse momentum, rapidity, and centrality dependence of inclusive charged-particle production in  $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$  TeV  $p + \text{Pb}$  collisions measured by the ATLAS experiment,” Phys. Lett. B **763**, 313 (2016).
51. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for scalar leptoquarks in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS experiment,” New J. Phys. **18**, 093016 (2016).

52. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for gluinos in events with an isolated lepton, jets and missing transverse momentum at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **76**, 565 (2016).
53. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for squarks and gluinos in final states with jets and missing transverse momentum at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **76**, 392 (2016).
54. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the inclusive isolated prompt photon cross section in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 8$  TeV with the ATLAS detector,” *JHEP* **1608**, 005 (2016).
55. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for new phenomena in final states with an energetic jet and large missing transverse momentum in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV using the ATLAS detector,” *Phys. Rev. D* **94**, 032005 (2016).
56. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurements of the charge asymmetry in top-quark pair production in the dilepton final state at  $\sqrt{s} = 8$  TeV with the ATLAS detector,” *Phys. Rev. D* **94**, 032006 (2016).
57. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurements of  $Z\gamma$  and  $Z\gamma\gamma$  production in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 8$  TeV with the ATLAS detector,” *Phys. Rev. D* **93**, 112002 (2016).
58. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for metastable heavy charged particles with large ionization energy loss in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV using the ATLAS experiment,” *Phys. Rev. D* **93**, 112015 (2016).
59. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Study of the rare decays of  $B_s^0$  and  $B^0$  into muon pairs from data collected during the LHC Run 1 with the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **76**, 513 (2016).
60. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for the Standard Model Higgs boson decaying into  $b\bar{b}$  produced in association with top quarks decaying hadronically in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 8$  TeV with the ATLAS detector,” *JHEP* **1605**, 160 (2016).
61. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of fiducial differential cross sections of gluon-fusion production of Higgs bosons decaying to  $WW^* \rightarrow e\nu\mu\nu$  with the ATLAS detector at  $\sqrt{s} = 8$  TeV,” *JHEP* **1608**, 104 (2016).



62. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for new phenomena in events with a photon and missing transverse momentum in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector,” JHEP **1606**, 059 (2016).
63. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of  $W^\pm$  and  $Z$ -boson production cross sections in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector,” Phys. Lett. B **759**, 601 (2016).
64. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for charged Higgs bosons produced in association with a top quark and decaying via  $H^\pm \rightarrow \tau\nu$  using  $pp$  collision data recorded at  $\sqrt{s} = 13$  TeV by the ATLAS detector,” Phys. Lett. B **759**, 555 (2016).
65. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Beam-induced and cosmic-ray backgrounds observed in the ATLAS detector during the LHC 2012 proton-proton running period,” JINST **11**, P05013 (2016).
66. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for resonances in the mass distribution of jet pairs with one or two jets identified as  $b$ -jets in proton–proton collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector,” Phys. Lett. B **759**, 229 (2016).
67. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Muon reconstruction performance of the ATLAS detector in proton-proton collision data at  $\sqrt{s} = 13$  TeV,” Eur. Phys. J. C **76**, 292 (2016).
68. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Identification of high transverse momentum top quarks in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 8$  TeV with the ATLAS detector,” JHEP **1606**, 093 (2016).
69. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Charged-particle distributions in  $pp$  interactions at  $\sqrt{s} = 8$  TeV measured with the ATLAS detector,” Eur. Phys. J. C **76**, 403 (2016).
70. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurements of  $W^\pm Z$  production cross sections in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 8$  TeV with the ATLAS detector and limits on anomalous gauge boson self-couplings,” Phys. Rev. D **93**, 092004 (2016).
71. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of total and differential  $W^+W^-$  production cross sections in proton-proton collisions at  $\sqrt{s} = 8$  TeV with the ATLAS detector and limits on anomalous triple-gauge-boson couplings,” JHEP **1609**, 029 (2016).

72. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for supersymmetry at  $\sqrt{s} = 13$  TeV in final states with jets and two same-sign leptons or three leptons with the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **76**, 259 (2016).
73. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of event-shape observables in  $Z \rightarrow \ell^+ \ell^-$  events in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 7$  TeV with the ATLAS detector at the LHC,” *Eur. Phys. J. C* **76**, 375 (2016).
74. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for new phenomena in final states with large jet multiplicities and missing transverse momentum with ATLAS using  $\sqrt{s} = 13$  TeV proton-proton collisions,” *Phys. Lett. B* **757**, 334 (2016).
75. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for single production of a vector-like quark via a heavy gluon in the  $4b$  final state with the ATLAS detector in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 8$  TeV,” *Phys. Lett. B* **758**, 249 (2016).
76. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for single production of vector-like quarks decaying into  $Wb$  in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 8$  TeV with the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **76**, 442 (2016).
77. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Test of CP Invariance in vector-boson fusion production of the Higgs boson using the Optimal Observable method in the ditau decay channel with the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **76**, 658 (2016).
78. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Charged-particle distributions in  $\sqrt{s} = 13$  TeV  $pp$  interactions measured with the ATLAS detector at the LHC,” *Phys. Lett. B* **758**, 67 (2016).
79. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the charged-particle multiplicity inside jets from  $\sqrt{s} = 8$  TeV  $pp$  collisions with the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **76**, 322 (2016).
80. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “A search for top squarks with R-parity-violating decays to all-hadronic final states with the ATLAS detector in  $\sqrt{s} = 8$  TeV proton-proton collisions,” *JHEP* **1606**, 067 (2016).
81. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “A search for an excited muon decaying to a muon and two jets in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 8$  TeV with the ATLAS detector,” *New J. Phys.* **18**, 073021 (2016).

82. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Probing lepton flavour violation via neutrinoless  $\tau \rightarrow 3\mu$  decays with the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **76**, 232 (2016).
83. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the CP-violating phase  $\phi_s$  and the  $B_s^0$  meson decay width difference with  $B_s^0 \rightarrow J/\psi\phi$  decays in ATLAS,” *JHEP* **1608**, 147 (2016).
84. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the charge asymmetry in highly boosted top-quark pair production in  $\sqrt{s} = 8$  TeV  $pp$  collision data collected by the ATLAS experiment,” *Phys. Lett. B* **756**, 52 (2016).
85. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Reconstruction of hadronic decay products of tau leptons with the ATLAS experiment,” *Eur. Phys. J. C* **76**, 295 (2016).
86. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for new phenomena with photon+jet events in proton-proton collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector,” *JHEP* **1603**, 041 (2016).
87. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the  $ZZ$  Production Cross Section in  $pp$  Collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS Detector,” *Phys. Rev. Lett.* **116**, 101801 (2016).
88. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Combination of searches for  $WW$ ,  $WZ$ , and  $ZZ$  resonances in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 8$  TeV with the ATLAS detector,” *Phys. Lett. B* **755**, 285 (2016).
89. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for charged Higgs bosons in the  $H^\pm \rightarrow tb$  decay channel in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 8$  TeV using the ATLAS detector,” *JHEP* **1603**, 127 (2016).
90. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the differential cross-sections of prompt and non-prompt production of  $J/\psi$  and  $\psi(2S)$  in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 7$  and 8 TeV with the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **76**, 283 (2016).
91. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of  $D^{*\pm}$ ,  $D^\pm$  and  $D_s^\pm$  meson production cross sections in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 7$  TeV with the ATLAS detector,” *Nucl. Phys. B* **907**, 717 (2016).

92. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for strong gravity in multijet final states produced in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV using the ATLAS detector at the LHC,” JHEP **1603**, 026 (2016).
93. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the transverse momentum and  $\phi_\eta^*$  distributions of Drell-Yan lepton pairs in proton-proton collisions at  $\sqrt{s} = 8$  TeV with the ATLAS detector,” Eur. Phys. J. C **76**, 291 (2016).
94. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for new phenomena in dijet mass and angular distributions from  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector,” Phys. Lett. B **754**, 302 (2016).
95. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Performance of  $b$ -Jet Identification in the ATLAS Experiment,” JINST **11**, P04008 (2016).
96. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the dependence of transverse energy production at large pseudorapidity on the hard-scattering kinematics of proton-proton collisions at  $\sqrt{s} = 2.76$  TeV with ATLAS,” Phys. Lett. B **756**, 10 (2016).
97. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for the Standard Model Higgs boson produced in association with a vector boson and decaying into a tau pair in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 8$  TeV with the ATLAS detector,” Phys. Rev. D **93**, 092005 (2016).
98. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Evidence for single top-quark production in the  $s$ -channel in proton-proton collisions at  $\sqrt{s} = 8$  TeV with the ATLAS detector using the Matrix Element Method,” Phys. Lett. B **756**, 228 (2016).
99. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “A search for prompt lepton-jets in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 8$  TeV with the ATLAS detector,” JHEP **1602**, 062 (2016).
100. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurements of top-quark pair differential cross-sections in the lepton+jets channel in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 8$  TeV using the ATLAS detector,” Eur. Phys. J. C **76**, 538 (2016).
101. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Dijet production in  $\sqrt{s} = 7$  TeV  $pp$  collisions with large rapidity gaps at the ATLAS experiment,” Phys. Lett. B **754**, 214 (2016).

102. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the correlations between the polar angles of leptons from top quark decays in the helicity basis at  $\sqrt{s} = 7\text{TeV}$  using the ATLAS detector,” *Phys. Rev. D* **93**, 012002 (2016).
103. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for dark matter produced in association with a Higgs boson decaying to two bottom quarks in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 8\text{ TeV}$  with the ATLAS detector,” *Phys. Rev. D* **93**, 072007 (2016).
104. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Identification of boosted, hadronically decaying W bosons and comparisons with ATLAS data taken at  $\sqrt{s} = 8\text{ TeV}$ ,” *Eur. Phys. J. C* **76**, 154 (2016).
105. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Performance of pile-up mitigation techniques for jets in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 8\text{ TeV}$  using the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **76**, 581 (2016).
106. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the differential cross-section of highly boosted top quarks as a function of their transverse momentum in  $\sqrt{s} = 8\text{ TeV}$  proton-proton collisions using the ATLAS detector,” *Phys. Rev. D* **93**, 032009 (2016).
107. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for anomalous couplings in the  $Wtb$  vertex from the measurement of double differential angular decay rates of single top quarks produced in the  $t$ -channel with the ATLAS detector,” *JHEP* **1604**, 023 (2016).
108. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the production cross-section of a single top quark in association with a W boson at 8 TeV with the ATLAS experiment,” *JHEP* **1601**, 064 (2016).
109. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for the production of single vector-like and excited quarks in the  $Wt$  final state in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 8\text{ TeV}$  with the ATLAS detector,” *JHEP* **1602**, 110 (2016).
110. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for magnetic monopoles and stable particles with high electric charges in 8 TeV  $pp$  collisions with the ATLAS detector,” *Phys. Rev. D* **93**, 052009 (2016).
111. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurements of four-lepton production in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 8\text{ TeV}$  with the ATLAS detector,” *Phys. Lett. B* **753**, 552 (2016).

112. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for the electroweak production of supersymmetric particles in  $\sqrt{s}=8$  TeV  $pp$  collisions with the ATLAS detector,” *Phys. Rev. D* **93**, 052002 (2016).
113. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of jet charge in dijet events from  $\sqrt{s} = 8$  TeV  $pp$  collisions with the ATLAS detector,” *Phys. Rev. D* **93**, 052003 (2016).
114. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for new phenomena in events with at least three photons collected in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 8$  TeV with the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **76**, 210 (2016).
115. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for direct top squark pair production in final states with two tau leptons in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 8$  TeV with the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **76**, 81 (2016).
116. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “A new method to distinguish hadronically decaying boosted  $Z$  bosons from  $W$  bosons using the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **76**, 238 (2016).
117. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Observation of Long-Range Elliptic Azimuthal Anisotropies in  $\sqrt{s} = 13$  and 2.76 TeV  $pp$  Collisions with the ATLAS Detector,” *Phys. Rev. Lett.* **116**, 172301 (2016).
118. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the charge asymmetry in top-quark pair production in the lepton-plus-jets final state in  $pp$  collision data at  $\sqrt{s} = 8$  TeV with the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **76**, 87 (2016).
119. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for a high-mass Higgs boson decaying to a  $W$  boson pair in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 8$  TeV with the ATLAS detector,” *JHEP* **1601**, 032 (2016).
120. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for single top-quark production via flavour-changing neutral currents at 8 TeV with the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **76**, 55 (2016).
121. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for invisible decays of a Higgs boson using vector-boson fusion in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 8$  TeV with the ATLAS detector,” *JHEP* **1601**, 172 (2016).

122. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurements of fiducial cross-sections for  $t\bar{t}$  production with one or two additional  $b$ -jets in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 8$  TeV using the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **76**, 11 (2016).
123. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for flavour-changing neutral current top-quark decays to  $qZ$  in  $pp$  collision data collected with the ATLAS detector at  $\sqrt{s} = 8$  TeV,” *Eur. Phys. J. C* **76**, 12 (2016).
124. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Searches for scalar leptoquarks in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 8$  TeV with the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **76**, 5 (2016).
125. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Constraints on non-Standard Model Higgs boson interactions in an effective Lagrangian using differential cross sections measured in the  $H \rightarrow \gamma\gamma$  decay channel at  $\sqrt{s} = 8$  TeV with the ATLAS detector,” *Phys. Lett. B* **753**, 69 (2016).
126. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the centrality dependence of the charged-particle pseudorapidity distribution in proton-lead collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$  TeV with the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **76**, 199 (2016).
127. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Study of the  $B_c^+ \rightarrow J/\psi D_s^+$  and  $B_c^+ \rightarrow J/\psi D_s^{*+}$  decays with the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **76**, 4 (2016).
128. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for an additional, heavy Higgs boson in the  $H \rightarrow ZZ$  decay channel at  $\sqrt{s} = 8$  TeV in  $pp$  collision data with the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **76**, 45 (2016).
129. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurements of the Higgs boson production and decay rates and coupling strengths using  $pp$  collision data at  $\sqrt{s} = 7$  and 8 TeV in the ATLAS experiment,” *Eur. Phys. J. C* **76**, 6 (2016).
130. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Centrality, rapidity and transverse momentum dependence of isolated prompt photon production in lead-lead collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$  TeV measured with the ATLAS detector,” *Phys. Rev. C* **93**, 034914 (2016).
131. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “ATLAS Run 1 searches for direct pair production of third-generation squarks at the Large Hadron Collider,” *Eur. Phys. J. C* **75**, 510 (2015), Erratum: [*Eur. Phys. J. C* **76**, 153 (2016)].

132. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Study of the spin and parity of the Higgs boson in diboson decays with the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **75**, 476 (2015), Erratum: [*Eur. Phys. J. C* **76**, 152 (2016)].
133. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for massive supersymmetric particles decaying to many jets using the ATLAS detector in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 8$  TeV,” *Phys. Rev. D* **91**, 112016 (2015), Erratum: [*Phys. Rev. D* **93**, 039901 (2016)].
134. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the  $t\bar{t}$  production cross-section using  $e\mu$  events with  $b$ -tagged jets in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 7$  and 8 TeV with the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **74**, 3109 (2014), Addendum: [*Eur. Phys. J. C* **76**, 642 (2016)].
135. T. Miyoshi, K. Hara, Y. Ikegami *et al.*, “Advanced monolithic pixel sensors using SOI technology”,  
Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A824, 438-442 (2016) .
136. S. Ohmura, K. Hara *et al.*, “Reduction of cross-talks between circuit and sensor layer in the Kyoto’s X-ray astronomy SOI pixel sensors with Double-SOI wafer”,  
Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A831, 61-64 (2016).
137. Y. Unno, Y. Ikegami, K. Hara, K. Sato *et al.*, “Development of n+-in-p planar pixel sensors for extremely high radiation environments, designed to retain high efficiency after irradiation”,  
Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A831, 122-132 (2016).
138. K. Kimura, K. Hara, Y. Ikegami, K. Sato *et al.*, “Test beam evaluation of newly developed n-in-p planar pixel sensors for use in a high radiation environment”,  
Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A831, 140-146 (2016).
139. L. B. A. Hommels, Y. Ikegami, K. Hara, K. Sato *et al.*, “Detailed studies of full-size ATLAS12 sensors”,  
Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A831, 167-173 (2016).
140. K. Hara, Y. Ikegami, K. Sato *et al.*, “Charge collection and field profile studies of heavily irradiated strip sensors for the ATLAS inner tracker upgrade”,  
Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A831, 181-188 (2016).
141. M. Miestikova, Y. Ikegami, K. Hara, K. Sato *et al.*, “Study of surface properties of ATLAS12 strip sensors and their radiation resistance”,  
Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A831, 197-206 (2016).
142. R. Mori, Y. Ikegami, K. Hara *et al.*, “Evaluation of the performance of irradiated silicon strip sensors for the forward detector of the ATLAS Inner Tracker Upgrade”,  
Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A831, 207-212 (2016).



143. M. Ullan, Y. Ikegami, K. Hara *et al.*, “Embedded pitch adapters: A high-yield interconnection solution for strip sensors”,  
Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A831, 221-228 (2016).
144. K. Todome, Y. Ikegami, K. Hara, K. Sato *et al.*, “Noise evaluation of silicon strip super-module with ABCN250 readout chips for the ATLAS detector upgrade at the High Luminosity LHC”,  
Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A831, 229-234 (2016).
145. M. Asano, K. Hara *et al.*, “Characteristics of non-irradiated and irradiated double SOI integration type pixel sensor”,  
Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A831, 315-321 (2016).

## (2) 学会・研究会での講演（国内）

1. 原和彦：素粒子実験用細密ピクセル検出器の開発，  
新学術研究領域研究「3次元半導体検出器で切り拓く新たな量子イメージングの展開」  
第6回研究会 (2016年6月28-29日)，北海道大学.
2. 八木俊輔：LDD濃度改良後のSOI-FET極低温環境下で異常特性の改善，  
新学術研究領域研究「3次元半導体検出器で切り拓く新たな量子イメージングの展開」  
第6回研究会 (2016年6月28-29日)，北海道大学.
3. 伊藤史哲：LHC-ATLAS実験Run-2における $WH \rightarrow \ell\nu b\bar{b}$ 崩壊過程を用いたヒッグス粒子の探索－多変量解析による信号感度の向上－，  
日本物理学会 2016年秋季大会 (2016年9月21-24日)，宮崎大学木花キャンパス.
4. 本多俊介：LHC-ATLAS実験Run2におけるヒッグス粒子 $b\bar{b}$ 崩壊モードでの $t\bar{t}H$ 生成過程探索のための信号領域最適化の研究，  
日本物理学会 2016年秋季大会 (2016年9月21-24日)，宮崎大学木花キャンパス.
5. 佐藤和之：HL-LHC実験ATLAS検出器のアップグレードに向けたピクセル検出器の放射線損傷の評価，  
日本物理学会 2016年秋季大会 (2016年9月21-24日)，宮崎大学木花キャンパス.
6. 鈴木淳貴：HL-LHC実験ATLAS検出器のアップグレードに向けたピクセル検出器の磁場中での性能評価，  
日本物理学会 2016年秋季大会 (2016年9月21-24日)，宮崎大学木花キャンパス.
7. 青柳航：2層埋込酸化膜SOI素子におけるTID補償の系統的評価II，  
日本物理学会 2016年秋季大会 (2016年9月21-24日)，宮崎大学木花キャンパス.
8. 関川大介：2層埋込酸化膜構造をもつSOIピクセル検出器の粒子線応答，  
日本物理学会 2016年秋季大会 (2016年9月21-24日)，宮崎大学木花キャンパス.
9. 八木俊輔：ニュートリノ崩壊光探索のためのSOI-STJの研究開発V，  
日本物理学会 2016年秋季大会 (2016年9月21-24日)，宮崎大学木花キャンパス.

10. 武政健一：COBAND 実験のための Hf-STJ 研究開発 I,  
日本物理学会 2016 年秋季大会 (2016 年 9 月 21-24 日), 宮崎大学木花キャンパス.
11. 武内勇司：宇宙背景ニュートリノ崩壊探索実験 COBAND に向けた SOI-STJ 開発 (招待講演),  
超伝導エレクトロニクス研究会 (2016 年 10 月 26-27 日), 東北大学電気通信研究所.
12. 原和彦：宇宙線ミュー粒子を用いた大構造物の透視 (一般講演),  
第 2 回 TIA 光・量子計測シンポジウム (2016 年 11 月 10 日), つくば国際会議場.
13. 原和彦：宇宙線ミュー粒子を用いた大構造物の透視 (ポスター発表),  
第 2 回 TIA 光・量子計測シンポジウム (2016 年 11 月 10 日), つくば国際会議場.
14. 金信弘：超伝導トンネル接合素子 STJ を用いた光・量子計測 (一般講演),  
第 2 回 TIA 光・量子計測シンポジウム (2016 年 11 月 10 日), つくば国際会議場.
15. 武政健一：可視～遠赤外域単一光子検出のための超伝導トンネル接合素子検出器 (STJ) の開発 (ポスター発表),  
第 2 回 TIA 光・量子計測シンポジウム (2016 年 11 月 10 日), つくば国際会議場.
16. 若狭玲那：ニュートリノ崩壊光探索に向けた極低温増幅器の開発と現状 (ポスター発表),  
新学術領域研究「ニュートリノフロンティアの融合と進化」研究会 2016 (2016 年 11 月 28-30 日), 石川県加賀市ゆのくに天翔.
17. 武内勇司：Development of Far-infrared Spectrophotometers based on Superconducting Tunnel Junction (STJ) for COBAND Experiment,  
新学術領域研究「ニュートリノフロンティアの融合と進化」研究会 2016 (2016 年 11 月 28-30 日), 石川県加賀市ゆのくに天祥.
18. 武内勇司：超電導検出器によるニュートリノ質量+暗黒物質 (パネルディスカッション),  
新学術領域研究「ニュートリノフロンティアの融合と進化」研究会 2016 (2016 年 11 月 28-30 日), 石川県加賀市ゆのくに天祥.
19. 武政健一：R&D status of Hf-STJ,  
新学術領域研究「ニュートリノフロンティアの融合と進化」研究会 2016 (2016 年 11 月 28-30 日), 石川県加賀市ゆのくに天祥.
20. 八木俊輔：R&D Status of Nb/Al-STJ with SOI cryogenic preamplifier,  
新学術領域研究「ニュートリノフロンティアの融合と進化」研究会 2016 (2016 年 11 月 28-30 日), 石川県加賀市ゆのくに天祥.
21. 武内勇司：冷却エレクトロニクスー S T J 読み出し用 SOI 極低温アンプー,  
TIA かけはし事業「簡単・便利な超伝導計測」ミニ研究会 (2017 年 1 月 4 日), つくば市物質・材料研究機構 (NIMS).
22. 萩原睦人：LHC-ATLAS 実験 Run-2 における  $t\bar{t}$  へ崩壊する荷電ヒッグス粒子の探索,  
日本物理学会第 72 回年次大会 (2017 年 3 月 17-20 日), 大阪大学豊中キャンパス.

23. 大川英希：LHC-ATLAS 実験 Run-2 における Z+Missing ET 終状態を用いたヒッグスセクターでの新物理探索，  
日本物理学会第 72 回年次大会（2017 年 3 月 17-20 日），大阪大学豊中キャンパス.
24. 本多俊介：LHC-ATLAS 実験 Run2 における  $H \rightarrow b\bar{b}$  崩壊過程でのヒッグス粒子  $t\bar{t}H$  生成過程探索のための発見感度向上の研究，  
日本物理学会第 72 回年次大会（2017 年 3 月 17-20 日），大阪大学豊中キャンパス.
25. 鈴木淳貴：HL-LHC 実験 ATLAS 検出器のアップグレードに向けた新型 ASIC 搭載 50  $\mu\text{m}$  角ピクセル検出器のビーム試験，  
日本物理学会第 72 回年次大会（2017 年 3 月 17-20 日），大阪大学豊中キャンパス.
26. 佐藤和之：HL-LHC 実験 ATLAS 検出器のアップグレードに向けた 50  $\mu\text{m}$  角ピクセル検出器の開発，  
日本物理学会第 72 回年次大会（2017 年 3 月 17-20 日），大阪大学豊中キャンパス.
27. 和田冴：内部増幅機能付き検出器 (LGAD) の放射線耐性の評価，  
日本物理学会第 72 回年次大会（2017 年 3 月 17-20 日），大阪大学豊中キャンパス.
28. 青柳航：放射線耐性の向上に向けた SOI ピクセル検出器の開発と評価，  
日本物理学会第 72 回年次大会（2017 年 3 月 17-20 日），大阪大学豊中キャンパス.
29. 関川大介：高精細 SOI ピクセル検出器 FPIX2 のビーム試験，  
日本物理学会第 72 回年次大会（2017 年 3 月 17-20 日），大阪大学豊中キャンパス.
30. 八木俊輔：COBAND 実験のための SOI-STJ の研究開発 I，  
日本物理学会第 72 回年次大会（2017 年 3 月 17-20 日），大阪大学豊中キャンパス.
31. 若狭玲那：COBAND 実験のための SOI-STJ の研究開発 II，  
日本物理学会第 72 回年次大会（2017 年 3 月 17-20 日），大阪大学豊中キャンパス.
32. 受川史彦：素粒子構造部門 成果報告，  
第 3 回 CiRfSE ワークショップ（2017 年 1 月 23-24 日），筑波大学.
33. 武内勇司：COBAND 実験概要，  
第 3 回 CiRfSE ワークショップ（2017 年 1 月 23-24 日），筑波大学.
34. 八木俊輔：COBAND 実験における SOI-STJ 開発 1，  
第 3 回 CiRfSE ワークショップ（2017 年 1 月 23-24 日），筑波大学.
35. 若狭玲那：COBAND 実験における SOI-STJ 開発 2，  
第 3 回 CiRfSE ワークショップ（2017 年 1 月 23-24 日），筑波大学.
36. 武政健一：Hf-STJ 開発，  
第 3 回 CiRfSE ワークショップ（2017 年 1 月 23-24 日），筑波大学.
37. 佐藤構二：ATLAS 実験の概要，  
第 3 回 CiRfSE ワークショップ（2017 年 1 月 23-24 日），筑波大学.
38. 大川英希：ATLAS 実験におけるヒッグス・電弱セクターでの新物理探索，  
第 3 回 CiRfSE ワークショップ（2017 年 1 月 23-24 日），筑波大学.

39. 永田和樹：ATLAS 実験における重心系衝突エネルギー 8 TeV での陽子-陽子衝突のデータを用いたトップクォークとボトムクォークに崩壊する荷電ヒッグス粒子の探索, 第3回 CiRfSE ワークショップ (2017 年 1 月 23-24 日), 筑波大学.
40. 伊藤史哲：LHC ATLAS 実験における b クォークの湯川結合の測定, 第3回 CiRfSE ワークショップ (2017 年 1 月 23-24 日), 筑波大学.
41. 笠原宏太：CNew physics searches in Z + MET events, 第3回 CiRfSE ワークショップ (2017 年 1 月 23-24 日), 筑波大学.
42. 萩原睦人：Charged Higgs in Run 2, 第3回 CiRfSE ワークショップ (2017 年 1 月 23-24 日), 筑波大学.
43. 池上陽一：HL-LHC 内部飛跡検出器増強 全体像, 第3回 CiRfSE ワークショップ (2017 年 1 月 23-24 日), 筑波大学.
44. 佐藤和之：HL-LHC へ向けたピクセル検出器のビームテスト解析, 第3回 CiRfSE ワークショップ (2017 年 1 月 23-24 日), 筑波大学.
45. 岩渕周平：HL-LHC ATLAS 実験用シリコンストリップセンサーの放射線耐性評価, 第3回 CiRfSE ワークショップ (2017 年 1 月 23-24 日), 筑波大学.
46. 和田冴：Measurements of LGAD, 第3回 CiRfSE ワークショップ (2017 年 1 月 23-24 日), 筑波大学.
47. 大川英希：HL-LHC に向けた HV-CMOS センサーの開発, 第3回 CiRfSE ワークショップ (2017 年 1 月 23-24 日), 筑波大学.

### (3) 国際会議・研究会での口頭発表

1. Y. Takeuchi, “The COBAND project to search for the cosmic background neutrino decay”, Seminar at Fermilab, Aug. 11, 2016, Fermilab, Illinois, USA.
2. K. Hara, “Long-term stability of ATLAS12 main sensors”, ATLAS ITk Workshop, Sept 12 – 16, 2016, Valencia, Spain. (一般講演)
3. S. B. Kim, “Neutrino Physics”, Tsukuba Global Science Week 2016 (TGSW2016), Sep. 17 – 19, 2016, EPOCHAL Tsukuba, Tsukuba-shi, Japan. (招待講演)
4. H. Okawa, “Searches for Diboson Resonances at the ATLAS Experiment”, Tsukuba Global Science Week 2016 (TGSW2016), Sep. 17 – 19, 2016, EPOCHAL Tsukuba, Tsukuba-shi, Japan. (招待講演)
5. Y. Takeuchi *et al.*, “Development of Far-infrared Spectrophotometers based on Superconducting Tunnel Junction for the Cosmic Background Neutrino Decay (COBAND) Experiment”, Tsukuba Global Science Week 2016 (TGSW2016), Sep. 17 – 19, 2016, EPOCHAL Tsukuba, Tsukuba-shi, Japan. (招待講演)

6. K. Takemasa *et al.*, “Development of Superconducting Tunnel Junction Detector and Cold Amplifier for COBAND experiment”,  
International Workshop on Superconducting Sensors & Detectors (IWSSD2016),  
Nov. 14 – 16, 2016, AIST Tsukuba Campus, Tsukuba-shi, Japan
7. H. Okawa, “Measurements and BSM Searches in the Higgs Sector at the LHC”,  
3rd International Workshop on Higgs as a Probe of New Physics (HPNP2017), March  
1 – 5, 2017, University of Toyama, Toyama, Japan. (招待講演)
8. H. Okawa, “Quark-Gluon Tagging at the LHC-ATLAS Experiment”,  
Theoretical and Experimental Issues on Jet Structure at Hadron Colliders, January  
12 – 13, 2017, Kavli-IPMU, University of Tokyo, Kashiwa, Japan. (招待講演)

#### (4) 学位論文

##### 博士論文

大学院 数理物質科学研究科 物理学専攻

1. 永田 和樹 : Search for charged Higgs bosons in the  $H^\pm \rightarrow tb$  decay channel in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 8$  TeV with the ATLAS detector (ATLAS 実験における重心系衝突エネルギー 8 TeV での陽子-陽子衝突のデータを用いたトップクォークとボトムクォークに崩壊する荷電ヒッグス粒子の探索)  
2016 年 12 月
2. 笠原 宏太 : Search for Physics beyond the Standard Model in Events with a  $Z$  Boson and Missing Transverse Momentum in  $pp$  Collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV (重心系エネルギー 13 TeV での陽子陽子衝突における  $Z$  ボソンと消失運動量を含む事象を用いた標準模型を超える物理の探索)  
2017 年 2 月

##### 修士論文

大学院 数理物質科学研究科 物理学専攻, 2017 年 2 月

1. 青柳 航 : MGy 放射線耐性を持つ 2 層埋込酸化膜構造 SOI ピクセル検出器の開発研究
2. 岩渕 周平 : HL-LHC へ向けたマイクロストリップセンサーの電荷収集効率の評価
3. 佐藤 和之 : HL-LHC 実験に向けた ATLAS 検出器増強用ピクセル検出器のテストビームによる性能評価
4. 関川 大介 : サブミクロンスケールの位置分解能を持つ高精細 SOI ピクセル検出器の開発研究
5. 八木 俊輔 : COBAND 実験のための超伝導トンネル接合素子光検出器及び極低温増幅器の性能評価

6. SUBEDI, Bipin : Basic research on SOI pixel detectors with internal gain based on avalanche multiplication (アバランシュ増幅に基づく内部ゲイン付き SOI ピクセル検出器の基礎研究)

### **【構成員の異動】**

- 2016 年 7 月 : Soo-Bong KIM 教授が着任 (海外教育研究ユニット招致 PI) .  
2016 年 10 月 : 吉田拓生教授が着任 (クロスアポイントメント教員) .  
2016 年 12 月 : 池上陽一准教授が着任 (クロスアポイントメント教員) .  
2017 年 3 月 : 金信弘教授が定年退職.

### Ⅲ 宇宙物理理論グループ

#### 1. メンバー

教授	梅村 雅之
教授	相川 祐理
准教授	森 正夫
講師	吉川 耕司
助教	古家 健次
助教	Wagner, Alexander
研究員	安部 牧人(CREST)
	高水 裕一(CCS)
	田中 賢(ポスト京重点課題 9)
	三木 洋平(CREST)
	道越 秀吾(CCS)
学生	大学院生 16 名, 学類生 2 名

#### 2. 概要

本年度、当グループは、数値シミュレーションによる研究として、3次元輻射流体力学による球状星団形成の研究、高密度ガス中のブラックホール合体過程の研究、Cold dark matter halo における cusp-core 問題、アンドロメダ銀河のステラーハロー形成過程、重元素の超微細構造線を使った銀河間物質の観測可能性、Vlasov-Poisson シミュレーションによる大規模構造における有質量ニュートリノの影響の研究、活動銀河中心核 (AGN: Active Galactic Nuclei) フィードバックの輻射流体シミュレーション、初期宇宙における泡宇宙モデルの研究、原始惑星系円盤の多孔質ダストの力学と重力不安定、スイング増幅による渦状腕形成の物理機構、ケンタウルス族カリクローの実スケール大域シミュレーション、原始惑星系円盤乱流中のダスト成長と微惑星形成の研究、原始惑星系円盤形成期の分子組成進化、原始惑星系円盤内での重水素濃縮反応、分子雲コアから原始惑星系円盤への水の輸送過程、分子雲における重水素分別および窒素同位体分別過程の研究、を行った。宇宙・生命分野間連携として、星間ダストにおけるアミノ酸生成、惑星大気多重散乱を扱う輻射輸送モデルを用いた生命の痕跡の示唆の研究を進めた。また、数理物質融合科学センターの「宇宙史国際研究拠点」と連携し、宇宙の構造の起源、力と物質の起源、時空の起源、物質と質量の起源に関する研究を協働して推進する体制を構築した。新たな計算コード開発としては、再結合放射を考慮した輻射流体シミュレーションコードの開発、高次精度移流スキームの開発、GPU を用いた重力多体計算コード GOTHIC の開発、銀河の多成分力学平衡分布生成コード MAGI の開発、回転するブラックホール時空での一般相対論的輻射輸送シミュレーションコード

ARTIST の開発, SPH 粒子データを直接利用した Lyman alpha 光子輻射輸送計算コード SEURAT の開発を行った。

### 3. 研究成果

#### 【1】 3次元輻射流体力学による球状星団形成の研究

球状星団は、宇宙初期に形成されたと考えられ、高い速度分散を持つコンパクトな天体である。最近の観測から、宇宙は赤方偏移  $z > 6$  で電離していることが分かっており、大部分の球状星団が形成された時期には強い電離光源が存在していたと考えることができる。紫外線は、光電離・光加熱過程によってガスの重力成長を妨げ、さらに初期宇宙で重要な冷却剤である水素分子の形成を阻害する。我々は、先行研究で1次元球対称の輻射流体計算を行い (Hasegawa & Umemura 2009), ガス雲の収縮と紫外線輻射輸送を同時に解くことで、紫外線過熱を受けながら超音速で収縮するガス雲がコンパクトな星団形成につながることを示した。しかし、背景紫外線輻射場中の天体形成で重要となる自己遮蔽効果はガス密度の2乗平均に依存し、ガス雲の3次元的な非一様性に影響される。また背景輻射場が非等方的な場合は遮蔽領域も非等方的になる。そこで我々は、非一様密度構造を持つ  $10^{6.7} M_{\odot}$  ( $M_{\odot}$ は太陽質量) の低質量ガス雲を生成し、ガスの自己重力流体力学 (SPH 法), 分子の非平衡化学反応, 輻射輸送, ダークマターの重力を同時に解く3次元の輻射流体力学計算によって、等方輻射場・片側照射中でのガス雲の収縮過程, 自己遮蔽に至る過程を正確に解いた。更に紫外線を遮蔽し十分冷却したガス粒子を星粒子とみなし、重力多体計算をすることで形成された星団のダイナミクスを評価した。その結果、星形成の大半は輻射場の非等方性にあまりよらずに系の中心から $\sim 10$  pc程度のコンパクトな領域で行われることが分かった。また、星粒子の運動を追跡した結果、電離ガスの超音速落下によって形成される星団は、半質量半径, mass-to-light ratio, 速度分散-光度関係それぞれが球状星団の観測と矛盾しないコンパクトな星団となることが示された (Abe, Umemura, Hasegawa, 2016)。

#### 【2】 高密度ガス中の力学的摩擦によるブラックホール合体過程の研究

銀河中心には  $10^6 \sim 10^9 M_{\odot}$  を持つ超巨大ブラックホール(BH)が存在すると考えられているが、その質量獲得過程や形成過程は未だに解明されていない。その種として初代天体起源のBHが考えられているが、これまでそれらのBHが合体する条件は明らかにされてこなかった。我々は、一般相対論効果を入れたポストニュートニアンN体計算によって、高密度ガスによる力学的摩擦を考慮して、 $30 M_{\odot}$ と $10^4 M_{\odot}$ の10体のBHの合体過程のシミュレーションを行った。その結果、高密度ガス内での力学的摩擦の効果を取り入れると、100 Myrで10個全てのBHが合体できるパラメータがあることを示した (Tagawa, Umemura, et al. 2015)。さらに、この研究を発展させ、ガス降着を伴う $30 M_{\odot}$  BH多体系の計算を行った。



2016 年になって、LIGO によって重力波の直接検出が報告され (GW150914) , この重力波は  $36^{+5.4}_{-4} M_{\odot}$  と  $29^{+4.4}_{-4} M_{\odot}$  のブラックホールの合体によって放出されたものであることが示された。これは、我々が想定したブラックホール質量に極めて近く、シミュレーションと突き合わせたところ、GW150914 イベントのブラックホール合体が起きるのは、密度が  $10^6 \text{cm}^{-3}$  以上のガスの中で 3 体相互作用が起きる場合であること、また合体が起こるまでに数  $M_{\odot}$  のガス降着があることがわかった (Tagawa, Umemura, Gouda, 2016) 。さらにこの研究を発展させ、BH と中性子星の合体条件を求めた (Tagawa & Umemura, 2017) 。

### 【3】 Cold dark matter halo における cusp-core 問題

現在の標準的な構造形成理論である cold dark matter (CDM) モデルは宇宙の大規模構造の統計的性質を説明することに成功した反面、1Mpc 以下の小さなスケールの構造においていくつかの問題が指摘されている。Dark matter halo (DMH) の中心質量密度は CDM 理論では、発散する cusp 構造を预言するが、観測的には中心質量密度が一定となる core 構造が多数発見されている。また、質量の中心集中度が高い DMH を持つ大質量衛星銀河が見つからない (Too-big-to-fail 問題) 等がある。本研究ではこれら二つの問題を、DMH とバリオンの力学的相互作用に起因した DMH の中心密度分布の進化過程に関わる問題として捉えて解析を行っている。活発な星形成活動が発生する以前の原始銀河の DMH は cusp 構造を持っているが、銀河形成期に発生する周期的な超新星爆発フィードバックによって core 構造へと遷移する、cusp-core 遷移過程の解析を行っている。本年度は特に、ガスの振動がランダウ共鳴を介してダークマターハローの中心部分を加熱する加熱効率について詳細な線形解析及び N 体シミュレーションによる非線形解析を行った。その結果、振動の高波長モードが予想より高いエネルギー輸送効率を示すことを見出し、共鳴半径より内側の領域においても十分な加熱が起こることが分かった。

### 【4】 アンドロメダ銀河のステラーハロー形成過程

近年、ハッブル宇宙望遠鏡やすばる望遠鏡に代表される大型望遠鏡を最大限活用した近傍宇宙の大規模探査により、現在も続く銀河進化の過程を垣間見ることができるようになってきた。近傍のアンドロメダ銀河においては、おびただしい数の暗い矮小銀河が発見されるとともに、それら矮小銀河の衝突によるものと思われるステラーストリームやステラーシェル、あるいは銀河円盤上で見られるリング構造等、銀河衝突の痕跡が続々と明らかにされてきている。本研究では、銀河衝突の重力多体計算及び流体力学計算による銀河衝突過程のみならず、アンドロメダ銀河に付随するダークマターハローの構造や、銀河円盤の構造、銀河ハロー中を徘徊するブラックホールの存在可能性について議論している。本年度は、アンドロメダ・ジャイアント・ストリーム及びノースウェスト・ストリームについて大規模な数値シミ

ュレーションを行い、幅広いパラメータサーベイを行って、その母銀河の性質とその生成過程について制限をつけることに成功した。

#### 【5】 重元素の超微細構造線を使った銀河間物質の観測可能性

宇宙のバリオンのエネルギー密度は宇宙全体の 5%程度であることが、宇宙背景放射 (CMB: Cosmic Microwave Background) や遠方クエーサーの吸収線系の観測からわかっているが、現在の宇宙において実際に観測的に存在が同定されているバリオンは、銀河内の中性ガス・分子ガス・銀河団内の高温プラズマガスなどを足し合わせても、全宇宙のエネルギー密度の 5%と比較して有意に少ないことが知られており、ミッシングバリオン問題・ダークバリオン問題と呼ばれている。数値シミュレーションによる研究では、現在の宇宙のバリオンの半分程度は宇宙大規模構造のフィラメントや銀河・銀河団の外縁部に希薄な高温 ( $10^5\text{K} \sim 10^7\text{K}$ ) ガスとして存在していると考えられており、Warm-Hot Intergalactic Medium (WHIM) と呼ばれている。この WHIM の観測的な検出を目指して、これまで軟 X 線・紫外線領域での重元素の輝線や吸収線の観測が行われてきた。我々は、重元素の超微細構造線での WHIM の検出可能性について調査した。超微細構造線を持つ元素の中で、Hydrogen-like または Lithium-like の窒素イオンが WHIM の観測には適していることを明らかにし、Green Bank Telescope 程度の電波望遠鏡で明るいクエーサーを背景光源とした吸収線系中に、WHIM 中の窒素イオンの超微細構造線が吸収線として検出可能であることを示した。

#### 【6】 Vlasov—Poisson シミュレーションによる大規模構造における有質量ニュートリノの影響の研究

宇宙大規模構造シミュレーションにおいて、有質量ニュートリノの効果を入れることが本研究の目的である。近年、スーパーカミオカンデによるニュートリノ振動の発見などによりニュートリノにも質量があることが示されており、また、宇宙初期のビッグバン直後に大量のニュートリノが生成されることがわかっている。有質量ニュートリノは、宇宙の構造形成においてコールドダークマターに比べて絶対質量は少ないながらも重力源として働くため、無視することはできない。しかしながら、ニュートリノの質量は非常に小さく、速度分散が大きい従来宇宙論的計算で行われている N 体シミュレーションでは、無衝突減衰の扱いが難しく、物理量にショットノイズが混在するなど数値的にニュートリノを計算することが困難であった。そこで我々のグループではそのような問題が原理的に発生しない Vlasov 方程式を元に、高次精度宇宙論的 Vlasov-Poisson シミュレーションコードを開発し、有質量ニュートリノが及ぼす影響の計算を行った。この手法は速度分散が大きい有質量ニュートリノは Vlasov-Poisson シミュレーションで計算し、速度分散が非常に小さいコールドダークマターは N 体シミュレーションで計算するハイブリッド計算である。二つの手法を組み合わせる

ことにより、N 体シミュレーションの高解像度を維持しつつ、ニュートリノの無衝突減衰を考慮した計算が可能となる。計算の結果、有質量ニュートリノがある場合は無衝突減衰により、細かい密度構造がかき消され、ボイド領域にもある程度質量が供給されることがわかった。密度パワースペクトルを見ると、線形理論では再現できない振る舞いが小スケールで起こることがわかった。将来的には観測結果と比較し、より正確なニュートリノの質量を宇宙論の立場から決定することを目指す。

## 【7】 Radiation-hydrodynamical Simulations of AGN Feedback

We performed radiation-hydrodynamical simulations of radiation-driven winds in high-redshift, gas-rich galaxies. The simulation setup was idealised to test maximal coupling of radiation in a multi-phase interstellar medium. Radiative transfer was solved with the M1 scheme for 5 photon groups spanning from infrared to UV and we used a sub-grid treatment for infrared scattering on dust. We found that the mechanical advantage of the outflow generated by the radiation can reach  $L/c \sim 20$ , as seen in many recent observations by Maiolino, Ciccone et al. (2016). The outflows evolved according to optical depth of the photon groups and depended strongly on the properties of the interstellar medium. We found that all photon groups played an important role in the momentum transfer, but that the principal agent that generates the large mechanical advantage was the multiply-scattering infrared photons.

## 【8】 初期宇宙における泡宇宙モデルの研究

「宇宙史国際研究拠点」として、初期宇宙における泡宇宙モデルの考察を行った。これは重力定数、宇宙項が泡宇宙それぞれで異なる宇宙モデルである。重力と結合するスカラー場が実質的な重力定数となるので、その真空相転移により、様々な物理定数を取る宇宙が再現されるモデルとなっている。自然界には、様々な物理定数と呼ばれる基礎定数が存在し、重力や電磁気、強、弱の全ての力の大きさを決定している。例えば、宇宙生成時に、これらの物理定数がランダムな値を取る機構が存在し、ある領域において我々の定数に近い値を取った場合にだけ、似たような宇宙の構造形成、元素や分子、さらには生物の発生が許されると考えたとき、その他の領域(宇宙)では、例えば銀河などの構造ができず、そこにはある種の観測者がいない状況になるので、そもそもそのような宇宙を我々は観測し得ない(人間原理)。宇宙の進化と、そこに付随する異なる物理定数の系という世界観は、様々な真空期待値が存在する超弦理論的宇宙観においても重要となる。

本研究で得られた成果として、重力定数の異なる泡宇宙モデルの研究に進展があった。泡宇宙モデルとして、泡の内(我々の宇宙)と外で重力定数が異なっているものを考える。これを実現するために、スカラー場がアインシュタイン曲率と結合したジョルダン-ブランス

ディッケ理論を用いた。この際、内と外の時空を分けるスカラー場が泡の壁をつくり、これが内外の時空の膨張則の影響により広がる。解析ではまずこの泡の壁の軌跡がどのようになるかを調べた。さらに内側の宇宙での初期密度揺らぎはこの壁に反射されるモードと、外宇宙からの透過モードの総和によって、通常のBunch-Davis真空モードから変更を受ける。とくに外宇宙からの透過モードは、より短波長側への揺らぎの大きな変更を与える。これらの研究成果に基づき、2016年10月に開催された国際会議 第26回「一般相対論と重力」研究会(大阪市立大学にて開催)で口頭発表を行った。また12月に筑波大学で行われた宇宙史サロンでも講演を行った。

### 【9】 原始惑星系円盤の多孔質ダストの力学と重力不安定

惑星形成の初期段階において氷ダストの付着成長により非常に物質密度の低い多孔質ダストが形成されることが近年指摘されている。多孔質ダストの成長が効率的であるため、ダストの落下問題を回避しながら成長を続け、付着成長により微惑星が形成される可能性がある(Okuzumi et al. 2012, Kataoka et al. 2013)。しかし、このような多孔質ダストが乱流中においてどのような力学的な性質をもつのか詳しく検討されていなかった。そこで、乱流やダスト間の重力や衝突などを考慮してダストのランダム速度の時間発展方程式を導いた。そして、その定常解を求めてダストのランダム速度から重力不安定の指標である Toomre の  $Q$  値を計算した。その結果、乱流が強くなければ、付着成長により微惑星が形成される前に重力不安定が発生することがわかった。重力不安定が発生した場合、微惑星形成が飛躍的に加速される可能性がある。重力不安定が発生するための乱流の強さを円盤の強さの関数として解析的に導いた。その結果、標準的に考えられる妥当なパラメータ範囲において重力不安定が発生することがわかった。

### 【10】 スィング増幅による渦状腕形成の物理機構

原始惑星系円盤、土星の環、銀河円盤など様々なスケールの円盤で渦状腕が見られるが、それらの起源を説明するメカニズムの1つにスィング増幅がある。これは、円盤中の密度パターンが速度シアによってリーディングからトレーリングに回転していく際に、自己重力の影響で密度振幅が飛躍的に増幅する現象である。Julian and Toomre (1966) や Toomre (1981) などの研究においてその物理機構の存在は示されていたが、このメカニズムにより具体的にどのような性質の渦状腕が形成されるか調べられていなかった。そこで、まず Julian and Toomre (1966) による無衝突ボルツマン方程式を基にした理論モデルを用いて、スィング増幅で形成される腕の波長やピッチ角、密度などのパラメータ依存性を検討し、フィッティング公式を導いた。そして、それらが無衝突系の  $N$  体シミュレーションで検証したところ非常によく一致することがわかった。このことから無衝突系の  $N$  体シミュレーションで形成された腕は確かにスィング増幅によって形成されているといえる。次に、スィング増幅の物

理的理解を深めるために Toomre (1981) の理論モデルを再検討した。その結果、Toomre (1981) の理論モデルはシアレイトが大きい場合に数値的取扱いが破綻することがわかったため、修正された理論モデルを提案した。それを用いてスイング増幅中の粒子のエピサイクル振動の位相を調べた。すると増幅前に異なる位相を持っていた粒子が増幅中に位相が揃うことがわかった。このことから、スイング増幅の物理的解釈を与えた。

### 【11】 ケンタウルス族カリクローの実スケール大域シミュレーション

2014 年にケンタウルス族の小惑星カリクローで環が発見された。その光学的厚さは土星の環に匹敵するほど高く非常に高密度の環であると考えられる。しかし、その起源や構造、進化についてはまだ検討されていない。そこで、小惑星カリクローの環の N 体シミュレーションを行った。従来の土星の環のシミュレーションではシアリングボックスによる局所近似か非現実的な大きな粒子を用いるなど現実とは異なるシミュレーションとなっていたが、カリクローの系の小ささのため実スケール大域シミュレーションが可能となった。シミュレーションの結果、粒子密度がカリクロー本体の密度の 50 % 以上の場合、環が分裂することがわかった。このことから環の粒子とカリクロー本体の物質組成が異なることがわかる。しかし、粒子密度がカリクロー本体の密度の 50 % 以下の場合でもウェイク構造とよばれる微細構造が形成されることがわかった。この構造は環の拡散を飛躍的に早め、およそ 1 年から 100 年程度で環は拡散するという見積もりになる。もしカリクローの環が巨大惑星との近接遭遇の起きた 1000 万年前に形成されたとすると、環を長持ちさせるメカニズムが必要である。近傍に衛星がある場合は環の拡散が抑えられることから、環の近傍には未発見の衛星が存在する可能性がある。

### 【12】 原始惑星系円盤乱流中のダスト成長と微惑星形成の研究

原始惑星系円盤のガス乱流中のダストは円盤内で衝突・合体を繰り返して成長し、km サイズの微惑星、そして惑星が形成されると考えられている。しかし、その過程には微惑星形成を妨げる障壁（中心星への落下問題や衝突破壊問題など）が存在し未解決である。障壁の一つである衝突破壊問題は、岩石ダストが高速衝突するため合体できずに破壊してしまい、成長できないというものである。微惑星形成過程の衝突破壊問題の解決のためには、 $St = \tau_p/T = 10^{-3} \sim 1$  ( $\tau_p$ : 粒子の制動時間,  $T$ : 乱流中の最大渦の時間スケール) のダストの乱流中の衝突速度や衝突頻度の正確な評価が必要である。近年、Pan et al. (2015) は圧縮性流体の近似計算を用いて、乱流中のダストの衝突速度等の評価を行い、惑星科学分野で従来採用されている Völk-type モデルの検証を行った。結果は、中間サイズ ( $Re^{1/2} < St < 1$ ) で、Völk-type モデルの予測が衝突速度を若干過大評価 (2 倍程度) するというものであった (ここで  $Re$  はレイノルズ数)。しかし、Pan らの計算は  $Re = 10^3$  相当の近似計算で慣性領域も狭いため、正確な検証ができている保証はない。そこで本研究では、非圧縮ナビエ・ストークス方程

式の大規模な直接数値計算 (DNS) を用いて、慣性領域がより広い高解像度な乱流場 ( $Re > 10^4$ ) 中で粒子追跡を行い、 $St \approx 0.01 \sim 0.1$  のダストの衝突速度などの評価を行い、それらの  $Re$  数依存性を調べた。DNS では、 $St \approx 0.01 \sim 0.1$  の粒子間の相対速度、衝突速度、衝突頻度因子(相対速度と動径分布関数の積)が Pan らの結果と比較してどれも大きくなるという結果を得た。また、 $Re$  が大きいほど衝突頻度因子が大きくなる傾向があった。動径相対速度の確率分布関数 (PDF: Probability Distribution Function) は  $St$  が大きいほど裾野が広がるが、衝突限界速度以下の粒子も多く存在していることも確認できた。

さらに、限界付着速度条件 (Wada et al, 2013) など考慮に入れた、簡易な衝突付着成長モデルを導入することにより、岩石ダストを想定した乱流中での慣性粒子の成長の数値実験を行った。その結果、ある密集領域に存在する慣性粒子が、周りの慣性粒子を巻き込み、局所的かつ急激に成長すること、また一旦急激に成長した粒子は、その後成長が緩やかになることが分かった。

### 【1 3】 原始惑星系円盤形成期の分子組成進化

理論モデルによると原始惑星系円盤と星は同時に形成される。しかし円盤の形成と成長は磁場とガスの相互作用に依存することも指摘されており、Class 0-I 程度の若い原始星での円盤形成過程の観測は現在盛んに行われている。また円盤形成期はエンベロープからの質量降着などによって比較的高温になり、星間物質から惑星物質への物質進化においても重要な段階であると考えられる。そこで、我々は Tsukamoto et al. (2015) による円盤形成の輻射流体モデルを用いて、円盤形成時のガスと氷の組成進化のシミュレーションを行った。その結果、 $H_2O$ ,  $CH_4$ ,  $NH_3$ ,  $CH_3OH$  など分子雲ですでに存在量の高い安定分子はそのまま円盤に取り込まれるが、炭化水素や大型有機分子は形成期の円盤内で多く生成されることが分かった。硫黄はコアの収縮段階では  $H_2S$  として多く存在するが、円盤内では壊され、 $SO$ ,  $H_2CS$  などに変化することを示した。また ALMA での原始星コアや原始惑星系円盤の観測に共同研究者として加わり、理論モデルと観測結果の比較を行った。

### 【1 4】 原始惑星系円盤内での重水素濃縮反応

彗星・隕石などの太陽系資源物質や地球の水は重水素／水素比が元素存在度( $10^{-5}$ )よりも高い。これは重水素濃縮と呼ばれ、低温での化学反応に由来すると考えられている。水素を重水素で置換された分子はもとの分子よりもゼロ点エネルギーが高く、低温下ではいくつかの交換反応によって重水素濃縮が起こるのである。濃縮が起こる場としては分子雲のほかに原始惑星系円盤が考えられる。近年円盤を  $DCO^+$  などの重水素化分子の輝線で空間分解観測することが可能となった。その結果、重水素化分子が従来の予想よりも円盤の内側まで分布していることや分布が円盤毎に異なることもわかった。我々は円盤内での重水素化分子の存在

量を数値計算で調べ、円盤では分子雲での主要反応とは異なる重水素化反応が効くこと等を明らかにした。

### 【15】 分子雲コアから原始惑星系円盤への水の輸送過程

太陽系内の水が持つ著しい特徴として重水素(D)に富むことが挙げられる。この事実は、太陽系の水が極めて低温な環境下(せいぜい数十ケルビン以下)で生成されたことを意味する。具体的な水の生成の場として、原始太陽系の母体となった分子雲コア、あるいは原始太陽系星雲外縁部の2つが考えられているが、未だ活発に議論が行われている。もし前者であれば、原始太陽系物質は母体分子雲コアの情報を保持していることになる。後者であれば、原始太陽系星雲において大規模に分子組成がリセットされたことになる。そのため両者の区別は、原始太陽系の物質進化を理解する上で重要である。

我々は、分子雲コアの自己重力収縮による円盤形成の2次元軸対称モデルと化学反応ネットワークモデルを用いて、形成される円盤にどの程度分子雲コア起源の水が含まれるかを調べた。円盤への輸送過程において、一部の水は中心星からの紫外線により破壊されるが、円盤に含まれる水の大部分(>50%)は分子雲コア起源であることが分かった。この結果は、彗星中のD<sub>2</sub>O, HDO, H<sub>2</sub>Oを観測することで検証可能であることを示した。

### 【16】 分子雲における重水素分別および窒素同位体分別過程の研究

隕石や彗星などの原始太陽系始原物質の起源を探るうえで、安定同位体は強力な研究手段である。隕石中には重水素(D)と<sup>15</sup>Nに富んだ同位体的ホットスポットが存在する。個々のホットスポットにおいて、有機分子中のDと<sup>15</sup>Nの濃集の程度は必ずしも相関していない。Dと<sup>15</sup>Nの濃集が、いずれも低温環境下でのイオン-分子反応に起因するならば、この非相関は説明できない。近年、<sup>15</sup>Nの濃集に窒素分子(N<sub>2</sub>)の同位体選択的光解離が重要である可能性が指摘されている。そこで我々は、低温下でのイオン-分子反応とN<sub>2</sub>の同位体選択的光解離を考慮した反応ネットワークモデルを構築し、分子雲におけるDと<sup>15</sup>Nの同位体分別過程を整合的かつ定量的に調べた。その結果、Dの濃集はイオン-分子反応、<sup>15</sup>Nの濃集はN<sub>2</sub>の同位体選択的光解離で主に引き起こされることが分かった。NH<sub>3</sub>やHCNなどの分子においてDと<sup>15</sup>Nの濃集の程度は相関しないことを示した。この結果は太陽系始原物質の分子雲起源説を支持する。

### 【17】 星間ダストにおけるアミノ酸生成

地球上の生命の起源はいまだに明らかにされていないが、これまで生命の起源は原始地球での化学進化であるとする説が有力視されてきた。しかしながら、1969年オーストラリアに落下したMurchison隕石からアミノ酸が検出され、生命は宇宙から飛来した物質を起源と考える「宇宙起源説」が浮上した。さらにMurchison隕石以外の炭素質コンドライトからもア

ミノ酸が検出され、2009年にはNASAの探査機スターダストにより彗星の塵からアミノ酸の一つであるグリシンが見つかった。2010年には、1200～1300 Kの高温環境を経験したAlmahata sitta隕石からアミノ酸が検出され、非常に高温の小惑星が冷える過程で生じる反応でアミノ酸が生成される可能性のあることがわかった。さらに2016年には欧州の彗星探査衛星ロゼッタによって、火星と木星の間にある67P/チュリュモフ・ゲラシメンコ彗星でグリシンが検出された。我々は、宇宙由来のアミノ酸がどのように生成される可能性があるのか明らかにすることを目的に、分子雲から見つかっている分子から隕石や分子雲から検出された前駆体を経由するグリシン生成経路について、量子化学計算(密度汎関数理論)を用い詳細な反応機構を求めた。アミノ酸前駆体としては、Murchison隕石から検出されたヒダントインと分子雲から検出されたアミノアセトニトリルに注目した。ヒダントインとアミノアセトニトリルは加水分解によりグリシンとなる。まず、すでに判明している実験室系での生成過程に対し、反応物及び中間体の生成エネルギーから安定性を評価し、低密度かつ低温の宇宙環境で反応が起こりうるか検討した。さらに反応経路中の各反応の気相反応の遷移状態探索を行い、反応のエネルギー障壁を求めた。さらに、氷で覆われた星間ダスト表面での反応を模擬するために、水分子による触媒反応を考慮した遷移状態探索を行った。その結果、生成エネルギーの評価よりアミノ酸はほとんど発熱反応で生成されることがわかった。次に、各反応の遷移状態探索を行った結果、真空中では最大で70 kcal/mol程度の反応障壁が見つかった。水分子による触媒反応では最大55 kcal/mol程度と反応障壁が低くなった。よって、分子雲中に豊富な水は触媒として重要であることがわかった。しかしながら現実的には、50～70 kcal/molほど反応障壁があると低温の分子雲のタイムスケールでは反応が起きない。ヒダントインが隕石から検出されていることから、隕石母天体でアミノ酸生成が起きる可能性もある。そこで、惑星形成時の天体衝突による $T \sim 10^3$  K程度の温度上昇を仮定すると、70 kcal/mol程度の反応障壁でも超えることができる。また、分子雲のような低温環境での反応障壁の上限は約12 kcal/mol程度であった。水分子の触媒効果だけではなく、反応場としての氷の効果を考慮すると、より一層反応障壁が低下し反応が進む可能性もある。近傍での星形成があれば、紫外線による光化学反応を含む反応経路によるアミノ酸生成も考えられる。

### 【18】 惑星大気の多重散乱を扱う輻射輸送モデルを用いた生命の痕跡の示唆

系外惑星の観測が進み、地球以外の惑星にも生命が存在する可能性が示唆され、その探査に興味を持たれるようになった。唯一生命の存在が確認されている地球をもとに、大気分子や植生などが生命の痕跡である"バイオマーカー"として挙げられており、系外惑星において分光によるそれらの検出可能性が調べられている。本研究では、バイオマーカーの検出可能性について定量的な解析を行った。系外惑星の観測状況を模擬したモデルを作成し、地球型惑星において、輻射輸送計算によってバイオマーカーとなる大気分子や地表面の環境の観測予測をして評価した。地表面の環境の特定において、近赤外域では海、短波長側では雪・氷



の地表面で、その他の環境との違いが見られた。ハビタブルな惑星の興味である植生の環境において、レッドエッジに相当する、 $0.67\mu\text{m}$  と  $0.72\mu\text{m}$  あたりの波長域は、その特徴よりも  $\text{O}_2$ 、 $\text{O}_3$  の吸収の寄与の方が勝っていた。紫外域( $\sim 0.35\mu\text{m}$ ) は、大気中の分子のうち、 $\text{O}_2$  の吸収がほとんどである。これらの見積もりは、将来の観測計画を立てる際に重要であり、本研究の結果は、紫外域の観測が行われれば、散乱と  $\text{O}_2$  と  $\text{O}_3$  の量とを結びつけて議論できることを示している。

### 【19】 再結合放射を考慮した輻射流体シミュレーションコードの開発

輻射輸送シミュレーションやそれを流体力学シミュレーションとカップルさせた輻射流体シミュレーションは、天体形成の数値シミュレーションで多く用いられるようになってきたが、電離領域からの再結合放射などの空間的に広がった光源からの輻射輸送は計算コストが膨大であるため、これまでは無視されることが多かった。我々は、輻射輸送計算を GPU やマルチコア・メニーコアアーキテクチャに基づくプロセッサで効率的に実行するアルゴリズムを開発し実装した。このコードは、点源からの輻射輸送を解く ARGOT 法と再結合放射などの広がった領域からの輻射輸送を解く ART 法を GPU やマルチコアプロセッサにおいて実装したものである。このコードを使い、自己重力と圧力の釣り合った等温平衡球であるボナー・エバート球に一樣平行光線を入射した結果、平行光線の輻射強度と球の質量に依るが、再結合放射を考慮した計算では考慮していないものに比べ、比較的早い段階で構造が壊される傾向にあることがわかった。これは、高密度の電離水素領域が形成され、そこが新たな再結合放射源として振る舞い、再結合放射がない場合に比べ加熱されるためである。

### 【20】 高次精度移流スキームの開発

Vlasov 方程式を直接数値シミュレーションする Vlasov シミュレーションでは 6 次元位相空間を離散化してメモリに載せるため、一般的に大量の記憶容量が必要となり、数値シミュレーションの分解能を向上させるためにメッシュ数を増やすことは現実的ではない。そこで、メッシュ数を増やすかわりに、計算スキームの空間精度を向上させることで Vlasov シミュレーションの高精度化を達成することが必要である。Vlasov シミュレーションでは、位相空間の各次元方向に 6 本の移流方程式を時間発展させるため、空間高次精度の移流スキームを開発することが必要となる。また、Vlasov 方程式の物理的な要請として、数値解の単調性・正值性を保証することが重要である。このような背景をもとに、我々は、空間 5 次精度及び 7 次精度で単調性・正值性を保証する高次精度移流スキームを開発した。また、時間発展スキームについても従来から使われている TVD-Runge-Kutta スキームだけではなく、より計算コストが小さく高精度の semi-Lagrange スキームも採用することで、より Vlasov シミュレーションに適した移流スキームを開発した。

## 【2 1】 GPU を用いた重力多体計算コード GOTHIC の開発

宇宙物理学の研究で広く用いられている重力多体計算に用いるための Tree コード (GOTHIC: Gravitational Oct-Tree code accelerated by Hierarchical time step Controlling) を実装し, GPU を用いて高速化した。GOTHIC の実装に当たっては, block time step を採用することで全体の計算量を削減し, また複数の関数の実行時間を監視しながら動的な最適化を施すという自動最適化も実装した。特に自動最適化の採用により, 粒子分布の時間発展に応じて実行構成が自動的に更新されていくため, 実際の宇宙物理学の研究に適用しやすい実装となっている。Fermi, Kepler, Maxwell 世代を代表する GPU を用いて性能評価を行った結果, 先行研究でも採用されている一般的な実装に比べて 5-10 倍程度の高速化が確認できた。特に高速化の効果が大きかったのは block time step の採用であり, 一般的に採用されている shared time step と比較して 3-5 倍程度の高速化が達成できた。上記の成果は学術論文誌 New Astronomy 誌に採録済みである (Miki & Umemura 2017)。

## 【2 2】 銀河の多成分力学平衡分布生成コード MAGI の開発

銀河どうしの衝突・合体や銀河円盤中の渦状腕の形成などの力学進化過程を詳細に調べるために, N 体シミュレーションを用いた研究が精力的に進められている。こうした計算を行うためには適切な初期条件を生成する必要がある。しかしながら, 一般に銀河はバルジ・ハロー・円盤からなる多成分系であり, これを力学平衡状態にある粒子分布として表現することは容易ではなく, 現在も初期条件の生成方法に関する研究が続けられている。また, 天の川銀河のような円盤銀河では厚さの異なる複数の円盤成分が見つかることが多いため, 複数成分の円盤モデルを生成できることが望ましい。さらに, 銀河の質量やサイズ, 各成分の質量分布に対する依存性を調べるためには, これらを手軽に変更できることも重要であるが, こうした性質を全て備えた初期条件生成コードは存在しない。また, 得られた粒子分布は観測データのフィッティングやガス入りの計算にも利用可能であるが, 特にフィッティングに用いるためには手軽に粒子分布を変更できる必要がある。

そこで我々は, 複数の球対称成分と軸対称成分を粒子系として表現する初期条件生成コード MAGI (MAny-component Galaxy\_INITIALIZER) を開発した。球対称成分については, 等方的な速度分布を仮定し Eddington formula を用い分布関数を作成, この分布関数に従う粒子分布を生成することで, Burkert, Einasto, Hernquist, King, Moore, NFW, Plummer model などの多様なモデルやその重ね合わせを力学平衡状態にある粒子分布として表現できる。また円盤成分については, potential-density pair を数値的に解くことでその分布を生成し, 厚さの異なる複数の円盤成分の生成にも対応した。生成された粒子分布の長時間の安定性についての数値実験を行ったところ, 長時間に渡る安定性も確認できた。また, MAGI の公開についても準備を進めた。

### 【23】 回転するブラックホール時空中の一般相対論的輻射輸送シミュレーションコード ARTIST の開発

ブラックホール周囲の降着流・噴出流での物理過程を理解するためには、曲がった時空中での輻射輸送の効果を正確に把握する必要がある。輻射の効果は降着流・噴出流の力学的構造や熱力学的構造に重要な影響を与えることがある上に、観測量からブラックホール近傍で起こっている物理過程を明らかにする際には輻射場の相対論効果が無視することができないためである。本研究では、回転するブラックホール時空中での輻射輸送方程式を直接数値計算することで、一般相対論的な光子輻射場を正確に解くことが可能な数値シミュレーション・コード(ARTIST)を開発した。この数値コードでは、位相空間中で定義される不変輝度を直接数値計算することで、光子の放射・吸収・散乱の全ての過程を因果律を厳密に保って解くことが可能である。また、ART 法の一般化により、測地線に沿った長特性線法を用いて計算しているため、数値的な拡散がない。光学的に厚い状況では光子散乱の効果を無視することができないが、本コードでは光子の運動量空間積分を直接数値計算することで散乱過程の in-coming 光子と out-going 光子を計算した。また、光学的に薄い状況では光子球の近傍やエルゴ領域内で起こる一般相対論効果が無視することができないが、本コードは過去の一般相対論的レイ・トレーシング計算の結果を全て正確に再現することが可能である。ブラックホール近傍で光が放出される場合には、光子球近傍を回り続ける光子軌道があるために、輻射衝突が起こり続けるが、本コードではこれらの輻射衝突も計算することができることを確認した。

### 【24】 SPH 粒子データを直接用いた Lyman alpha 光子輻射輸送計算コード SEURAT の開発

Lyman alpha 輝線 (Ly $\alpha$ ) で非常に明るい高赤方偏移銀河 (Lyman alpha emitters, LAEs) の理論モデル化に向けて、流体力学計算と Monte Carlo 法を用いた Ly $\alpha$  輝線輻射輸送計算を組み合わせたシミュレーションが行われてきている。銀河形成シミュレーションの流体計算には、広いダイナミックレンジを取り扱う事ができる SPH 法が広く用いられるが、その一方で従来の Ly $\alpha$  輻射輸送コードは mesh ベースで開発されてきた。そのため、Ly $\alpha$  輻射輸送計算の際に SPH 計算データを mesh へ割り当てる必要があり、高密度領域を高解像度で分解している SPH 計算の情報を人工的に落としてしまうことが問題であった。そこで本研究では、ray-tracing の際の SPH 粒子探索法を工夫することで、SPH 粒子自身を輻射輸送計算の際のグリッドとして用いる meshfree の Ly $\alpha$  輻射輸送計算コード SEURAT を開発した。テスト計算の結果、本コードが一様ガス球からの Ly $\alpha$  光子脱出スペクトル、dusty slab からの Ly $\alpha$  光子脱出確率といった問題の解析解をよく再現することを確認し、さらに密度勾配が非常に大きな系に対しても meshfree で Monte Carlo 計算が可能である事を確かめた。

## 4. 教育

### 【学位論文】

#### <博士論文>

1. 五十嵐 朱夏

Transonic analysis of galactic outflows and its application

(銀河風の遷音速解析とその応用)

2. 桐原 崇亘

Numerical study of internal structure of galaxies via minor merger events in M31

(M31 におけるマイナーマージャー現象を用いた銀河の内部構造の数値的研究)

#### <修士論文>

1. 久喜 奈保子

A Radiative Diffusion and Transfer Scheme for Lyman alpha Line Scattering

(ライマン  $\alpha$  ライン散乱の輻射拡散・輸送計算スキーム)

2. 楠 尚久

銀河衝突シミュレーションで探るアンドロメダ銀河のダークマターハロー外縁部構造と衝突軌道の探査

3. 佐々木 さゆり

初期宇宙における構造形成に対するダークマター・バリオン相対速度の影響

4. 柴野 祥平

M31 の銀河進化における星間ガスと恒星風の相互作用

5. 古谷 眸

原始惑星系円盤における圧縮性乱流場中のダスト粒子運動

6. 石原 駿

惑星大気 of 多重散乱を扱う輻射輸送モデルを用いた生命の痕跡の示唆について

7. 横村 尚子 (神戸大学, H27.9-H28.8 筑波大学依託学生)

モンテカルロ法を用いた星間化学の数値計算

#### <学士論文>

1. 福原 葉月

重力波 GW150914: 巨大分子雲における BH 合体の可能性

2. 宮川 銀次郎

Plane of Satellites の力学安定性について

### 【集中講義】

- 相川祐理

「理論天文学特別講義 I」 (2016 年 7 月 13 日～15 日, 東京大学大学院理学系研究科天文学専攻)

## 5. 受賞, 外部資金, 知的財産権等

### 【受賞】

- 1) 筑波大学 BEST FACULTY MEMBER2016, 梅村雅之, 2017 年 2 月 20 日
- 2) 筑波大学 BEST FACULTY MEMBER2016, 相川祐理, 2017 年 2 月 20 日

### 【外部資金】

<代表者>

#### ■基盤研究 (B) (一般) H27 年度～H30 年度: 梅村雅之

「一般相対論的輻射流体によるブラックホール超臨界降着流と超大質量星の研究」  
(H28 年度 120 万円／全体 540 万円)

#### ■科学技術試験研究委託事業, H28 年度～H32 年度: 梅村雅之

「ポスト京で重点的に取り組むべき社会的・科学的課題に関するアプリケーション開発・研究開発」萌芽的課題, 「太陽系外惑星 (第二の地球) の誕生と太陽系内惑星環境変動の解明 (生命を育む惑星の起源・進化と惑星環境変動の解明)」 (サブ課題 D 原始太陽系における物質進化と生命起源の探求)  
(H28 年度 1,250 万円／全体 4,874 万円)

#### ■基盤研究 (C) (一般) H26 年度～H29 年度: 森正夫

「輻射流体シミュレーションによる銀河系統樹の構築」  
(H28 年度 104 万円／全体 520 万円)

#### ■基盤研究(C) (一般) H23 年度～H28 年度: 相川祐理

「星・惑星系形成過程における揮発性物質の組成, 同位体比, 気相・固相分配」  
(H28 年度 150 万円)

#### ■新学術領域「宇宙分子進化」公募研究, H28 年度～H29 年度: 相川祐理

「星・惑星系形成過程における気相と固相の化学: 天体構造の観測指標と物質進化」  
(H28 年度 180 万円)

■挑戦的萌芽研究, H28 年度～H30 年度：相川祐理

「計算科学によるアストロバイオロジーへの理論的挑戦」

(H28 年度 130 万円)

<分担者>

■基盤研究 (A) (一般) H27 年度～H31 年度：梅村雅之 (代表者：大内正巳)

「すばる HSC と SDSS で探る宇宙論的スケールの物質循環」 (2.5 万円)

(H28 年度分担金 2.5 万円／分担金全体 12.5 万円)

■基盤研究 (C) (一般) H28 年度～H31 年度：梅村雅之 (代表者：高橋労太)

「一般相対論的 ART 法による超巨大ブラックホール形成と成長過程の研究」

(H28 年度分担金 10 万円／分担金全体 20 万円)

■基盤研究 (A) (一般) H27 年度～H31 年度：森正夫 (代表者：大内正巳)

「すばる HSC と SDSS で探る宇宙論的スケールの物質循環」

(H28 年度分担金 2.5 万円／分担金全体 12.5 万円)

■戦略的創造研究推進事業 CREST, H24 年度～H29 年度：梅村雅之 (代表者：朴泰祐)

「ポストペタスケール時代に向けた演算加速機構・通信機構統合環境の研究開発」

(H28 年度分担金 1,700 万円／分担金全体 4,980 万円)

■科学技術試験研究委託事業, H27 年度～H32 年度：吉川耕司 (代表者：吉田直紀)

「ポスト京で重点的に取り組むべき社会的・科学的課題に関するアプリケーション開発・研究開発」, 重点課題 9 「宇宙の基本法則と進化の解明」 (サブ課題 C 大規模数値計算と広域宇宙観測データの融合による宇宙進化の解明)

(H28 年度分担金 820 万円)

■挑戦的萌芽研究, H28 年度～H30 年度：古家健次 (代表者：相川祐理)

「計算科学によるアストロバイオロジーへの理論的挑戦」

(H28 年度分担金 32.5 万円)

【知的財産権】

なし

## 6. 研究業績

### (1) 研究論文

#### A) 査読付き論文

- 1) Takahashi, R., Umemura, M., 2017, “General Relativistic Radiative Transfer Code in Rotating Black Hole Spacetime: ARTIST”, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 464, 4567-4585
- 2) Tagawa, H., Umemura, M., Gouda, 2016, “Mergers of accreting stellar-mass black holes”, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 462, 3812-3822
- 3) Namekata, D., Umemura, M., 2016, “Subparsec-scale dynamics of a dusty gas disk exposed to anisotropic AGN radiation with frequency dependent radiative transfer”, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 460, 980-1018
- 4) Abe, M., Umemura, M., Hasegawa, K., 2016, “Formation of globular clusters induced by external ultraviolet radiation II: Three-dimensional radiation hydrodynamics simulations”, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 463, 2849-2863
- 5) Momose, R., Ouchi, M., Nakajima, K., Ono, Y., Shibuya, T., Shimasaku, K., Yuma, S., Mori, M., Umemura, M., 2016, “Statistical properties of diffuse Ly $\alpha$  haloes around star-forming galaxies at  $z \sim 2$ ”, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 457, 2318-2330
- 6) Miki, Y., Umemura, M., 2017, “GOTHIC: Gravitational oct-tree code accelerated by hierarchical time step controlling”, New Astronomy, 52, 65-81
- 7) Miki, Y., Mori, M., Rich, R.M., 2016, “Collision tomography: Physical properties of possible progenitors of the Andromeda stellar stream”, The Astrophysical Journal, 827, 82, 11 pp
- 8) Kirihaara, T., Miki, Y., Mori, M., Kawaguchi, T., & Rich, R. M. 2017, “Formation of the Andromeda Giant Stream: Asymmetric Structure and Disc Progenitor”, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 464 (3): 3509-3525
- 9) Sakai, Nami, Oya, Yoko, López-Sepulcre, Ana, Watanabe, Yoshimasa, Sakai, Takeshi, Hirota, Tomoya, Aikawa, Yuri, Ceccarelli, Cecilia, Lefloch, Bertrand, Caux, Emmanuel, Vastel, Charlotte, Kahane, Claudine, Yamamoto, Satoshi, 2016, “Subarcsecond Analysis of the Infalling-Rotating Envelope around the Class I Protostar IRAS 04365+2535”, The Astrophysical Journal Letters, 820, L34, 6 pp
- 10) Walsh, Catherine, Loomis, Ryan A., Öberg, Karin I., Kama, Mihkel, van 't Hoff, Merel L. R., Millar, Tom J., Aikawa, Yuri, Herbst, Eric, Widicus Weaver, Susanna L., Nomura, Hideko, 2016, “First Detection of Gas-phase Methanol in a Protoplanetary Disk”, The Astrophysical Journal Letters, 823, L10, 7 pp
- 11) Shimonishi, Takashi, Onaka, Takashi, Kawamura, Akiko, Aikawa, Yuri, 2016, “Detection of a hot molecular core in the Large Magellanic Cloud with ALMA”, The Astrophysical Journal, 827, 72, 20 pp

- 12) Walsh, C., Juhasz, A., Meeus, G., Dent, W.R.F., Maud, L., Aikawa, Y., Millar, T.J., Nomura, H., 2016, “ALMA reveals the anatomy of the mm-sized dust and molecular gas in the HD 97048 disk”, *The Astrophysical Journal*, 831, 200, 15 pp
- 13) Nishimura, Y., Shimonishi, T., Watanabe, Y., Sakai, N., Aikawa, Y., Kawamura, A., Yamamoto, S., 2016, “Spectral Line Survey toward a Molecular Cloud in IC10”, *The Astrophysical Journal*, 829, 94, 8 pp
- 14) Imai, M., Sakai, N., Oya, Y., López-Sepulcre, A., Watanabe, Y., Ceccarelli, C., Lefloch, B., Caux, E., Vastel, C., Kahane, C., Sakai, T., Hirota, T., Aikawa, Y., Yamamoto, S., 2016, “Discovery of a Hot Corino in the Bok Globule B335”, *The Astrophysical Journal Letters*, 830, L37, 7 pp
- 15) Yoneda H., Tsukamoto, Y., Furuya, K. & Aikawa, Y. 2016, “Chemistry in a forming protoplanetary disk: main accretion phase”, *The Astrophysical Journal*, 833, 105, 17 pp
- 16) Ziurys, L. M., Halfen, D.T., Geppert, W. & Aikawa, Y., 2016, “Following the Interstellar History of Carbon: From the Interiors of Stars to the Surfaces of Planets”, *Astrobiology*, 16, 997
- 17) Harada, N., Hasegawa, Y., Aikawa, Y., Hirashita, H., Liu, H. B., Hirano, N. 2017, “Effects of Grain Growth on Molecular Abundances in Young Stellar Objects”, *The Astrophysical Journal*, 837, 78, 17 pp
- 18) Oya, Y., Sakai, N., Watanabe, Y., Higuchi, A. E., Hirota, T., López-Sepulcre, A., Sakai, T., Aikawa, Y., Ceccarelli, C., Lefloch, B., Caux, E., Vastel, C., Kahane, C., Yamamoto, S., 2017, “L483: Warm Carbon-chain Chemistry Source Harboring Hot Corino Activity”, *The Astrophysical Journal*, 837, 174, 15 pp
- 19) Michikoshi, S., Kokubo, E., 2017, “Simulating the Smallest Ring World of Chariklo”, *The Astrophysical Journal Letters*, 837, Issue 1, article id. L13, 7 pp
- 20) Huang, J., Oberg, K.I., Qi, C., Aikawa, Y., Andrews, S., Furuya, K., Guzman, V.V., Loomis, R.A., van Dishoeck, E.F., Wilner, D.J., 2017, “An ALMA survey of DCN/H<sup>13</sup>CN and DCO<sup>+</sup>/H<sup>13</sup>CO<sup>+</sup> in protoplanetary disks”, *The Astrophysical Journal*, 835, 231, 29 pp
- 21) Yamauchi, D., Ichiki, K., Kohri, K., Namikawa, T., Oyama, Y., Sekiguchi, T., Shimabukuro, H., Takahashi, K., Takahashi, T., Yokoyama, S., Yoshikawa, K., 2016, “Cosmology with the Square Kilometre Array by SKA-Japan”, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 68, id.R2 19 pp
- 22) Bieri, R., Dubois, Y., Rosdahl, J., Wagner, A. Y., Silk, J., & Mamon, G. A. 2017 “Outflows Driven by Quasars in High-Redshift Galaxies with Radiation Hydrodynamics” *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 464, 1854–1873,
- 23) Drozdovskaya, M. N., Walsh, C., van Dishoeck, E. F., Furuya, K., Marboeuf, U.,



- Fakultat, P., Thiabaud, A., Harsono, D., Visser, R., 2016, “Cometary ices in forming protoplanetary disc midplanes”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 462, 977-993
- 24) Michikoshi, S., Kokubo, E., 2016, “Galactic Spiral Arms by Swing Amplification”, *The Astrophysical Journal*, 821, 35
- 25) Michikoshi, S., Kokubo, E., 2016, “Swing Amplification of Galactic Spiral Arms: Phase Synchronization of Stellar Epicycle Motion”, *The Astrophysical Journal*, 823, 121
- 26) Michikoshi, S., Kokubo, E., 2016, “Planetesimal Formation by Gravitational Instability of a Porous-Dust Disk”, *The Astrophysical Journal Letters*, 825, 28
- 27) Michikoshi, S., Kokubo, E., “Dynamics of Porous Dust Aggregates and Gravitational Instability of Their Disk”, *The Astrophysical Journal*, in press
- 28) Mukherjee, D., Bicknell, G. V., Sutherland, R., Wagner, A., 2016, “Relativistic jet feedback in high-redshift galaxies – I. Dynamics,” *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 461, 1, 967–983
- 29) Furuya, K., Drozdovskaya, M. N., Visser, R., van Dishoeck, E. F., Walsh, C., Harsono, D., Hincelin, U., Taquet, V., 2017, “Water delivery from cores to disks: Deuteration as a probe of the prestellar inheritance of H<sub>2</sub>O”, *Astronomy and Astrophysics*, 599, A40
- 30) Akamatsu, H., Fujita, Y., Akahori, T., Ishisaki, Y., Hayashida, K., Hoshino, A., Mernier, F., Yoshikawa, K., Sato, K., Kaastra, J.S. “Properties of the cosmological filament between two clusters: A possible detection of a large-scale accretion shock by Suzaku”, *Astronomy & Astrophysics*, in press
- 31) Kitayama, T., Ueda, S., Takakuwa, S., Tsutsumi, T., Komatsu, E., Akahori, T., Iono, D., Izumi, T., Kawabe, R., Kohno, K., Matsuo, H., Ota, N., Suto, Y., Takizawa, M., Yoshikawa, K., “The Sunyaev-Zel'dovich Effect at Five Arc-seconds: RXJ1347. 5-1145 Imaged by ALMA”, *Publications of Astronomical Society Japan*, in press.
- 32) Taquet, V., Furuya, K., Walsh, C., van Dishoeck, E. F., “A primordial origin for molecular oxygen in comets: A chemical kinetics study of the formation and survival of O<sub>2</sub> ice from clouds to disks”, accepted by *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*

## B) 査読無し論文

- 1) Tagawa, H., Umemura, M., 2017, “Rapid Mergers in a Mixed System of Black Holes and Neutron Stars”, 14th International Symposium on Nuclei in the Cosmos (NIC2016) 020803
- 2) Kirihaara, T., Miki, Y., Mori, M., Kawaguchi, T., & Rich, R. M. “Multilateral Study of the Andromeda Giant Stream: Implications for the progenitor, its MBH, and the M31 halo”, 2016, accepted to proceedings of IAU Symposium 321

- 3) Igarashi, A., Mori, M., Nitta, S., “A new concept of transonic galactic outflows and its application to the Sombrero galaxy”, accepted to Proceedings of IAU Symposium 321 "Formation and evolution of galaxy outskirts"
- 4) Furuya, K., Drozdovskaya, M. N., Walsh, C., van Dishoeck, E. F., “Water transport from collapsing prestellar cores to forming disks: evolution of the HDO/H<sub>2</sub>O ratio”, EAS publication series, 75-76, 259-263 (2016)

## (2) 国際会議発表

### A) 招待講演

- 1) Umemura, M., “HPC at CCS and Latest Outcomes in Computational Astrophysics”, Edinburgh EPCC-Tsukuba CCS Collaboration Workshop, June 16-17, 2016, Edinburgh, UK
- 2) Furuya, K., “Formation and isotope fractionation of interstellar ices, and their delivery to a forming disk”, Workshop on Interstellar Matter 2016, October 19-21, 2016, Hokkaido, Japan
- 3) Aikawa, Y. “Chemical modelling of protoplanetary disks”, European Conference on Laboratory Astrophysics ECLA2016 “Gas on the Rocks”, November 21 - 25, 2016, CSIC, Madrid, Spain
- 4) Furuya, K. “Water delivery from cores to disks”, ISSI meeting “From qualitative to quantitative: Exploring the early solar system by connecting comet composition to protoplanetary disk models”, December 5-9, 2016, Bern, Switzerland
- 5) Furuya, K. “Isotopic fractionation in interstellar molecules”, IAU symposium 332 Astrochemistry VII-Through the Cosmos from Galaxies to Planets”, March 20-24, 2017, Puerto Varas, Chile
- 6) Umemura, M., "Novel Challenge for Radiative Transfer Solver in Astrophysics", Inverse Problems and Medical Imaging, Feb 13-17, 2017, University of Tokyo, Japan
- 7) Wagner, A. Y., “Triggering Star-formation” 2016 Oort Workshop: AGN Feedback, May 30 – June 1. 2016 Leiden Observatory, Leiden, Netherlands

### B) 一般講演

- 1) Miki, Y., “GOTHIC: Gravitational Oct-Tree code accelerated by Hierarchical time step Controlling”, Perspectives of GPU computing in Science, September 26-28, 2016, Rome, Italy
- 2) Michikoshi, S., “Planetesimal Formation by Gravitational Instability of a Porous Dust Disk”, Japan-Germany Planet and Disk Workshop, September 25-30, 2016, Okinawa, Japan

- 3) Yoneda, H., Tsukamoto, Y., Furuya, K., Aikawa, Y. "Chemistry in a forming disk: main accretion phase", Workshop on Interstellar Matter 2016, October 19-21, 2016, Hokkaido, Japan
- 4) Tanaka, S., "Higher order advection scheme for Vlasov Simulation", The 7th East Asian Numerical Astrophysics Meeting, October 24-28, 2016, Beijing, China
- 5) Kobayashi, N., Enohata, K., Ishihara, T., Shiraishi, K., Umemura, M. "Rapid Dust Coagulation expedited by Turbulent Clustering in Protoplanetary Disks", Formation of the Solar System and the Origin of Life, Feb 20-24, 2017, Leiden, Netherlands
- 6) Sato, A., Shigeta, Y., Shoji, M., Kamiya, K., Shiraishi, K., Yabana, K., Umemura, M. "Ly alpha Irradiation in the Early Phase Milky Way Galaxy Responsible for Initiating Homochirality", Formation of the Solar System and the Origin of Life, Feb 20-24, 2017, Leiden, Netherlands

### (3) 国内学会・研究会発表

#### A) 招待講演

- 1) 相川祐理「ALMA 観測でとらえた原始星コアと原始惑星系円盤の揮発性物質」, 日本地球惑星科学連合 2016 年大会／アルマによる惑星科学の新展開(2016 年 5 月 22 日, 幕張メッセ)
- 2) 相川祐理「星・惑星系形成領域の分子進化：星間物質から惑星物質へ」, 日本地球惑星科学連合 2016 年大会 スペシャルレクチャー（西田賞受賞記念講演）（2016 年 5 月 24 日, 幕張メッセ）
- 3) 森正夫, "Numerical simulations of galaxy formation and evolution", Tsukuba CCS-LBNL Collaboration Workshop (2016 年 6 月 12～13 日, 筑波大学計算科学研究センター)
- 4) 梅村雅之, 「Mergers of Accreting Stellar Mass Black Holes and Implications for GW150914」, 新学術領域「重力波天体の多様な観測による宇宙物理学の新展開」研究会 (2016 年 7 月 30 日, 広島大学, 東広島)
- 5) 相川祐理「デブリ円盤での化学反応」(招待講演) ALMA ワークショップ：デブリ円盤から太陽系へ」研究会 (2016 年 8 月 8～9 日, 千葉工大東京スカイツリータウンキャンパス)
- 6) 梅村雅之「巨大ブラックホール起源と重力波観測」, 企画セッション「重力波初検出の意義と重力波天文学の幕開け」, 日本天文学会 2016 年秋季年会 (2016 年 9 月 14-16 日, 愛媛大学, 松山)

- 7) 相川祐理「星・惑星系形成領域の星間化学」, シンポジウム「ダスト形成から惑星の多様性へ: 宇宙の物質進化における物理と化学のカップリング」(2017年3月8日～9日, 東京大学小柴ホール)
- 8) 吉川耕司「「多次元ブラソフソルバーの開発」, JICFuS シンポジウム「素粒子・原子核・宇宙「京からポスト京に向けて」」(2017年2月16～17日, 筑波大学東京キャンパス文京校舎)

## B) その他の発表

- 1) 相川祐理「原始惑星系円盤の化学組成: 最近の ALMA 観測の成果」宇宙生命計算科学連携拠点第2回ワークショップ(2016年4月27～28日, 筑波大学計算科学研究センター)
- 2) 古家健次「星・惑星系形成領域における水の重水素比」宇宙生命計算科学連携拠点第2回ワークショップ(2016年4月27～28日, 筑波大学計算科学研究センター)
- 3) 安部牧人, 3次元輻射流体力学による球状星団形成モデルの研究, 第三回銀河進化研究会(2016年6月1～3日, 東北大学)
- 4) 藤原隆寛, 銀河形成シミュレーションに向けて: SPH法の性能比較, 第三回銀河進化研究会(2016年6月1～3日, 東北大学)
- 5) 相川祐理「惑星系形成領域の有機物進化」, 日本地球惑星科学連合2016年大会/計算科学による惑星形成・進化・環境変動研究の新展開(2016年5月24日, 幕張メッセ)
- 6) 相川祐理「Molecular evolution in a forming disk」新領域「宇宙分子進化」研究会(7月11～12日, 北海道大学低温科学研究所)
- 7) 道越秀吾, 小久保英一郎, 「低密度ダストの重力不安定による微惑星形成」, 日本惑星科学会2016年秋季講演会(2016年9月12～14日, ノートルダム清心女子大学, 岡山)
- 8) 古家健次, Water deuteration as a probe of the origin of H<sub>2</sub>O in protoplanetary disks, 日本天文学会2016年秋季年会(2016年9月14～16日, 愛媛大学, 松山)
- 9) 道越秀吾, スイング増幅による渦状腕構造の形成とエピサイクル運動の位相同期, 日本天文学会2016年秋季年会(2016年9月14～16日, 愛媛大学, 松山)
- 10) 五十嵐朱夏, 遷音速銀河風モデルによる星形成率と銀河風速度の関係, 日本天文学会2016年秋季年会(2016年9月14～16日, 愛媛大学, 松山)

- 11) 桐原崇亘, M31 North-Western ストリームの母矮小銀河の軌道探査, 日本天文学会 2016 年秋季年会 (2016 年 9 月 14~16 日, 愛媛大学, 松山)
- 12) 加藤一輝, Cusp-core 問題における周期的な SN フィードバックによる重力場変動と DMH の中心密度分布の関連性, 日本天文学会 2016 年秋季年会 (2016 年 9 月 14~16 日, 愛媛大学, 松山)
- 13) 藤原隆寛, MUSCL 法を用いた Godunov SPH 法の高次精度化, 日本天文学会 2016 年秋季年会 (2016 年 9 月 14~16 日, 愛媛大学, 松山)
- 14) 高橋芳太, 梅村雅之, 「ARTIST コードによるブラックホール時空での一般相対論的 輻射輸送シミュレーション」, 日本天文学会 2016 年秋季年会 (2016 年 9 月 14~16 日, 愛媛大学, 松山)
- 15) 小林直樹, 江野畑圭, 石原卓, 白石賢二, 梅村雅之, 「微惑星形成過程解明のための乱 流の大規模直接数値計算と粒子追跡」, 日本天文学会 2016 年秋季年会 (2016 年 9 月 14~16 日, 愛媛大学, 松山)
- 16) 濱端航平, 江野畑圭, 石原卓, 白石賢二, 梅村雅之, 「乱流の直接数値計算を用いた原 始惑星系円盤ダストの衝突付着成長シミュレーション」, 日本天文学会 2016 年秋季 年会 (2016 年 9 月 14~16 日, 愛媛大学, 松山)
- 17) 郷田直輝, 小林行泰, 辻本拓司, 矢野太平, 上田暁俊, 宇都宮真, 鹿島伸悟, 亀谷收, 浅利一善, 山田良透, 吉岡諭, 穂積俊輔, 梅村雅之, 西亮一, 浅田秀樹, 長島雅裕, 石 村康生, 中須賀真一, 酒匂信匡, ほか JASMINE ワーキンググループ一同, 「Nano-JASMINE と小型 JASMINE の進捗状況概要」, 日本天文学会 2016 年秋季 年会 (2016 年 9 月 14~16 日, 愛媛大学, 松山)
- 18) 藤原隆寛, 森正夫, 「MUSCL-Godunov-SPH 法への流速制限関数の実装」, 日本流 体力学会 2016 年会 (2016 年 9 月 26~28 日, 名古屋工業大学, 名古屋)
- 19) 梅村雅之, 「CCS におけるポスト「京」重点課題・萌芽的課題について」, 第 8 回「学 際計算科学による新たな知の発見・統合・創出」ー発展する計算科学と次世代の計算 機ー, 2016 年 10 月 17 日~18 日, 筑波大学 大学会館, つくば市
- 20) 高水裕一, 前田恵一, Bubble universe, 第 26 回一般相対論および重力」研究会 (2016 年 10 月 24 日~28 日, 大阪市立大学, 大阪)
- 21) 櫻井 幹記, 古谷 眸, 岡本 直也, 石原 卓, 圧縮性乱流直接数値シミュレーショ ン手 法の検討, 第 30 回数値流体力学シンポジウム(2016 年 12 月 12~14 日, タワーホール 船堀, 東京)

- 22) 五十嵐朱夏, 星形成銀河からのアウトフローの理論モデル, Galaxy-IGM 研究会(2016 年 12 月 5~7 日, 信州大学, 長野)
- 23) 梅村雅之, 久喜奈保子, 安部牧人, Ken. Czaprynski, 「Hybrid Scheme of Ly $\alpha$  Radiative Diffusion and Transfer」, Galaxy-IGM 研究会 (2016 年 12 月 5~7 日, 信州大学, 長野)
- 24) 安部牧人, SEURAT: SPH scheme extended with UV line radiative transfer, Galaxy-IGM 研究会 (2016 年 12 月 5~7 日, 信州大学, 長野)
- 25) 田川寛通, 梅村雅之, 「多重 BH の合体による GW150914 の説明」, 理論懇シンポジウム(2016 年 12 月 20~22 日, 東北大学, 仙台)
- 26) 桐原崇亘, 「M31 におけるマイナーマージャー現象を用いた銀河の内部構造の研究」, 理論懇シンポジウム(2016 年 12 月 20~22 日, 東北大学, 仙台)
- 27) 吉川耕司「重元素の超微細構造線によるダークバリオンの観測可能性」, 第 4 回「銀河進化と遠方宇宙」研究会, (2017 年 1 月 7 日~9 日, アーデンホテル阿蘇, 熊本)
- 28) 道越秀吾「Chariklo の二重環の構造と衛星との相互作用による長期進化」, 第 5 回衛星系研究会: 冥王星系の起源 (2017 年 1 月 25~26 日, 東京工業大学, 東京)
- 29) 道越秀吾, 小久保英一郎, 「ケンタウルス族 Chariklo の環の構造」, 日本天文学会 2017 年春季年会 (2017 年 3 月 15~18 日, 九州大学, 福岡)
- 30) 五十嵐朱夏, 森正夫, 新田伸也, 「銀河風の遷音速モデルと星形成銀河への応用」, 日本天文学会 2017 年春季年会 (2017 年 3 月 15~18 日, 九州大学, 福岡)
- 31) 渡邊歩, 吉川耕司, 岡本崇, (「重元素の超微細構造線を用いた中高温銀河間ガスの観測可能性について」, 日本天文学会 2017 年春季年会 (2017 年 3 月 15~18 日, 九州大学, 福岡)
- 32) 藤原隆寛, 森正夫, 「Integral Approach による, Density Independent SPH 法と Godunov SPH 法の改良」, 日本天文学会 2017 年春季年会 (2017 年 3 月 15~18 日, 九州大学, 福岡)
- 33) 井上昭雄, 長谷川賢二, 石山智明, 矢島秀伸, 清水一紘, 梅村雅之, 今野彰, 播金優一, 澁谷隆俊, 大内正己, 「宇宙再電離期のライマン  $\alpha$  輝線銀河シミュレーションとすばる Hyper Suprime-Cam 探査結果の比較」, 日本天文学会 2017 年春季年会 (2017 年 3 月 15~18 日, 九州大学, 福岡)
- 34) 安部牧人, 「高赤方偏移宇宙の Ly $\alpha$  輝線銀河と Ly $\alpha$  光子の輻射輸送」, 第 2 回宇宙史サロン (2017 年 3 月 21 日, 筑波大学, 茨城)

#### (4) 著書, 解説記事等

- 1) 梅村雅之, 福江純, 野村英子著, シリーズ<宇宙物理学の基礎>「輻射輸送と輻射流体力学」, 日本評論社, P1-P396, 2016 年 12 月 25 日
- 2) 梅村雅之, 「超巨大ブラックホール」, Newton 別冊シリーズ, 2016, 8 月 25 日
- 3) 相川祐理, 「水素の科学 第 1 回水素とは何か?」, Newton 11 月号, 2016 年 9 月 26 日
- 4) 田中賢, 「宇宙の大規模構造の謎に迫る「宇宙論的ブラソフシミュレーション」の高精度化に挑戦」月刊 JICFuS, 2016 年 11 月 22 日
- 5) 相川祐理, 「ALMA による原始惑星系円盤の観測」, 天文月報 4 月号, 2016 年 3 月 20 日

#### 7. 異分野間連携・国際連携・国際活動等

##### 【宇宙生命計算科学連携 (CAB)】

##### 1) 星間アミノ酸部会

宇宙・生命分野間連携により, 星間空間におけるアミノ酸前駆体ならびにアミノ酸の生成過程についての量子力学計算を進めた。

##### 2) 宇宙乱流部会

名古屋大学工学研究科乱流グループとの協働により, 原始惑星系円盤におけるダストと乱流の相互作用による微惑星形成過程を, ナビエ・ストークス方程式の直接計算により探究した。

##### 【国際連携】

- 1) CCS-LBNL Lawrence Berkeley National Laboratory Joint Meeting 2016, CCS, University of Tsukuba, Tsukuba, Japan (May 12-13, 2016) (Umemura, Mori)
- 2) Edinburgh EPCC-Tsukuba CCS Collaboration Meeting 2016, EPCC, University of Edinburgh, Edinburgh, UK (June 16-17, 2016) (Umemura)

#### 8. シンポジウム, 研究会, スクール等の開催実績

- 1) 「宇宙生命計算科学連携拠点 第 2 回ワークショップ」, 2016 年 4 月 27 日, 28 日, 筑波大学計算科学研究センターワークショップ室, つくば
- 2) ポスト京・萌芽的課題「惑星科学」キックオフ WS  
2016 年 9 月 19 日, 神戸大学 先端融合研究環境統合研究拠点, 神戸

3) 「天体形成研究会」

2016 年 10 月 21 日～22 日，つくば国際会議場 小会議室 303，つくば



4) “Workshop on Interstellar Matter 2016”, 2016 年 10 月 19 日～21 日

北海道大学低温科学研究所，札幌

5) 「銀河・銀河間物質に関するワークショップ」

2016 年 12 月 5 日～7 日，信州大学，松本

6) 「初代星・初代銀河研究会 2016」

2016 年 10 月 25 日～27 日，金沢歌劇座，金沢市

7) 「超巨大ブラックホール研究推進連絡会」第 4 回ワークショップ

2016 年 12 月 9 日～10 日，東京大学天文学教育研究センター，三鷹市

8) ポスト「京」萌芽的課題・計算惑星 第 1 回 公開シンポジウム

「惑星の起源・進化と環境変動の解明を目指して」

2017 年 3 月 9 日，神戸大学 先端融合研究環統合研究拠点，神戸

## 9. 管理・運営

組織運営や支援業務の委員・役員の実績

・梅村雅之

【本部】

教育研究評議会委員



人事企画委員会委員  
任用部会委員  
研究推進会議委員  
情報環境委員会委員  
全学年俸制教員評価実施委員会委員

【系・センター】

計算科学研究センター センター長  
計算科学研究センター 運営委員会委員長  
計算科学研究センター 人事委員会委員長  
計算科学研究センター 宇宙物理研究部門主任  
計算科学研究センター 運営協議会委員  
計算科学研究センター 研究企画室委員  
数理物質系人事委員会総会委員  
物理学域 運営委員会委員  
物理学域 宇宙物理理論グループ長

・相川祐理

【系・センター】

計算科学研究センター 運営委員会委員  
計算科学研究センター 人事委員会委員  
物理学域 運営委員会委員

・森正夫

【全学】

ハラスメント防止対策委員

【系・センター】

計算科学研究センター 共同研究委員会学内委員  
計算基礎科学連携拠点企画チーム  
学際計算科学連携室  
JCAHPC 技術審査委員会委員  
PPX システム調達仕様策定委員  
物理学域図書委員会委員

## 10. 社会貢献・国際貢献

・梅村雅之

竹園東小学校講演会「宇宙の旅」，2016 年 11 月 29 日  
日本天文学会欧文研究報告編集顧問

国立天文台理論専門委員会委員長

・相川祐理

日本天文学会代議員

日本天文学会欧文研究報告編集員

IAU Organizing Committee Member of Commission H2 Astrochemistry

“Early Phase of Starformation 2016” Scientific Advisory Committee

“Water in the Universe” SOC

## 11. その他

海外長期滞在，フィールドワークなど

## IV. 宇宙観測グループ

教 授	中井直正、久野成夫
助 教	新田冬夢
研究員	永井 誠、斎藤弘雄
大学院生	15 名（数理物質科学研究科後期課程 2 名、前期課程 12 名、教育研究科 1 名）
卒 研 生	3 名

大学院数理物質科学研究科物理学専攻の修士課程 1 年に 6 名（うち 1 名は中国からの留学生で、他の 1 名は教育研究会）が入学してきた。10 月にはインドからの留学生 1 名が博士後期課程 1 年生として入学してきた。理工学群物理学類 4 年の卒研究生は 3 名であった。10 月に数理物質融合科学センターの研究員として斎藤弘雄が着任し、宇宙航空研究開発機構の西堀俊幸氏が客員准教授として着任した。大学院博士後期課程 3 年の 1 名が博士の学位を取得し修了した。前期課程の 7 名が修士を取得して修了した。また物理学類卒研究生の 3 名が卒業した。長く研究室でつくば 32m アンテナの開発や保守、VLBI 観測、南極望遠鏡の推進等に貢献してきた永井誠研究員が年度末で退職した。

長く観測に使用してきた国土地理院つくば 32m 鏡が運用を停止し、解体された。南極天文学の推進においては、南極望遠鏡の技術開発を継続するとともに、10m テラヘルツ望遠鏡の概算要求を行ったが認められるまでには至らなかった。また 30m 級テラヘルツ望遠鏡計画の技術的検討を行うとともに計画書の作成に向けた準備を行った。

国立天文台野辺山 45m 電波望遠鏡やアルマ等の既存の共同利用望遠鏡にも観測提案を行い、系外銀河や銀河系星形成領域等の観測を行った。

### 【1】国土地理院つくば 32m アンテナ

#### （1）観測 (VLBI 観測)

X 帯および K 帯の大学連携 VLBI 観測を 9 回実施した。

#### （単一鏡観測）

銀河系における典型的な大質量星形成領域のひとつである W3 領域の分子雲のアンモニア観測を行い、温度、密度等の分子ガスの物理量を求めた。

天の川銀河の銀河面におけるダスト連続波源のアンモニア観測を継続し、温度、密度等の分子ガスの物理量を求めた。

#### （2）アンテナの運用停止・解体

2017 年 1 月 3 日の夕方まで W3 および銀河面のアンモニア観測を行ったあと、20GHz 帯冷却受信機の冷凍機を停止した。1 月 4 日の朝から受信機フロントエンド部および K 帯シェルター内の中間周波数部の撤去、およびアンテナ雨除けカバーの撤去を行った。そして 1 月 5 日から業者によるアンテナの解体作業が始まり、3 月末には完全にアンテナは無くなった。基礎と AZ レールおよび観測局舎は残っている。これにより、研究室として観測システムを立ち上げ、長く観測に使用してきた 32m アンテナの幕が閉じた。



図1. 左から 2017 年 1 月 4 日（解体前日）、1 月 22 日（解体中）、4 月 14 日（解体後）

## 【2】南極天文学の推進

### (1) 南極 10m テラヘルツ望遠鏡

主鏡面形状を含めた望遠鏡光学系全体の鏡面形状測定について、複数の手法を検討した。Phase-retrieval holography 法によるアンテナ鏡面測定に及ぼす雑音の影響を研究した。点回折干渉計を用いた鏡面測定法の開発に関しては、望遠鏡の光学系内にピンホールを置いて偏波により試験波と参照波を分離したのち、それぞれを焦点面検出器で受信し位相を人工的にずらしたものをあとから干渉させるという電波望遠鏡としては新しい方法を検討し、計算により測定精度が望遠鏡として必要な精度（誤差が波長の 10 分の 1 =  $20\mu\text{m}$  以下）を十分に達成することができることを明らかにした。

平成 29 年度概算要求について文部科学省と交渉したが、認められるには至らなかった。

南極望遠鏡計画について一般の人の理解と支持を得るために全国で講演会と署名集めを行った。

宇宙電波懇談会から推薦され、筑波大学長が申請していた当該望遠鏡計画は、日本学術会議において審議と審査が行われたのち大型研究計画マスタープラン 2017 に採択された（2017 年 2 月 8 日）。

### (2) 超伝導電波カメラの開発

南極望遠鏡に向けた電波カメラの実機 1 号機として、野辺山 45m 電波望遠鏡に搭載する 100-GHz 帯超伝導電波カメラの開発を進めている。焦点面アレイはダブルスロットアンテナを結合した力学インダクタンス検出器とシリコンレンズアレイから構成されている。望遠鏡光学系と焦点面アレイを結合する伝送光学系はシリコンレンズを用いた屈折式光学系となっているが、レンズ表面の反射損失を低減するサブ波長構造を利用した反射防止コーティングの開発も進めた。2016 年 12 月末から 2017 年 1 月上旬にかけて、37 素子プロトタイプカメラの 45m 電波望遠鏡への搭載試験を行った。結果、焦点面温度は 100 mK 以下を達成した。新月の観測も行い、検出器とバックエンドが正常に動作することを確認しソフトウェアの整備も進めることができた。一方、ビーム幅が予想値と一致しない等の課題も見つかったため、引き続き素子数の拡大とともに開発を進めていく。

### (3) 南極 30m 級テラヘルツ望遠鏡計画

研究会「南極 30m テラヘルツ望遠鏡によるサイエンス」を、平成 28 年度国立天文台研究集会として国立極地研究所にて開催した (2017 年 3 月 2 日 - 3 日)。極地研関係者も含め合計 47 名が参加し、南極 30m 望遠鏡計画のプロジェクトブック作成に向けて、惑星大気、星惑星系形成、星間化学、銀河面サーベイ、近傍銀河、銀河形成進化、時間変動天体の各分野で検討を進めてきた結果を報告し合い、今後の進め方について議論を行った。

### 【3】銀河等の観測的研究

#### (1) 銀河系中心部のアンモニア観測

銀河系中心部のおよそ銀経  $l = -0.5^\circ \sim +1.3^\circ$ 、銀緯  $b = -0.1^\circ \sim +0.1^\circ$  の領域のアンモニア輝線(J,K)=(1,1)-(6,6)を国土地理院 32m アンテナでマッピングした結果を出版した。これらの輝線間の強度比から回転温度を求めた結果、典型的には低温 ( $\sim 20\text{K}$ ) と高温 ( $\sim 100\text{K}$ ) の 2 成分の分子ガスから成り立っていることがわかった。(論文 4)

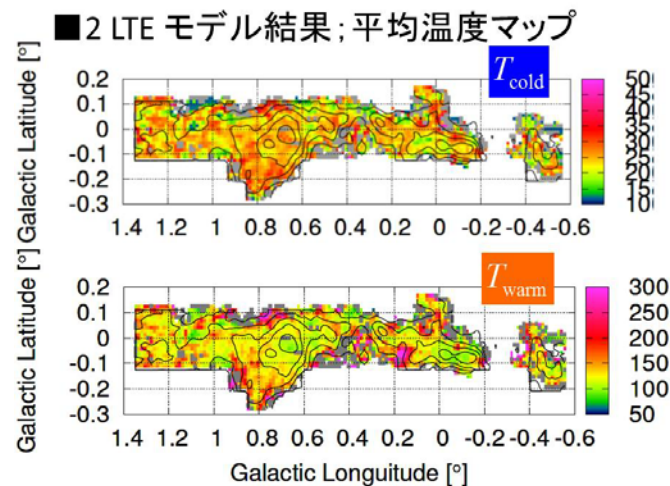


図 2. 2 温度成分に分けて求めた回転温度の分布。

#### (2) 渦状銀河 NGC 628 と NGC 7793 における分子ガスと星形成率の関係

南米チリの ASTE 望遠鏡を用いて、NGC 628 と NGC 7793 の CO(3-2)輝線によるマッピングを行った。これらの銀河では、CO(3-2)強度と星形成率の間に線形関係が成り立つことを明らかにした。また、他の銀河とも比較し、この関係が近傍銀河から遠方の赤外線で見える銀河を含めても成り立つことを示した。(論文 7)

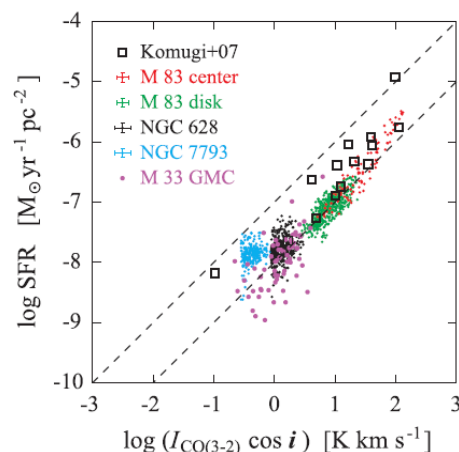


図 3. いくつかの銀河における CO(3-2)積分強度と星形成率の関係。点線は線形関係。

## < 論文 >

(査読論文)

1. De Looze, Ilse; Baes, Maarten; Cormier, Diane; Kaneko, Hiroyuki; Kuno, Nario; Young, Lisa; Bendo, George J.; Boquien, Médéric; Fritz, Jacopo; Gentile, Gianfranco; Kennicutt, Robert C.; Madden, Suzanne C.; Smith, Matthew W. L.; Wilson, Christine D., “The interstellar medium in Andromeda's dwarf spheroidal galaxies - II. Multiphase gas content and ISM conditions”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 465, p.3741-3758, (2017).
2. Sekiguchi, S; Sugimoto, M; Shu, S; Sekimoto, Y; Mitsui, K; Nishino, T; Okada, N; Kubo, K; Takahashi, T; Nitta, T, "Broadband Corrugated Horn Array with Direct Machined Fabrication", *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 7(1), pp.36-41 (2017)
3. Muraoka, Kazuyuki; Sorai, Kazuo; Kuno, Nario; Nakai, Naomasa; Nakanishi, Hiroyuki; Takeda, Miho; Yanagitani, Kazuki; Kaneko, Hiroyuki; Miyamoto, Yusuke; Kishida, Nozomi; Hatakeyama, Takuya; Umei, Michiko; Tanaka, Takahiro; Tomiyasu, Yuto; Saita, Chey; Ueno, Saeko; Matsumoto, Naoko; Salak, Dragan; Morokuma-Matsui, Kana, “CO Multi-line Imaging of Nearby Galaxies (COMING). I. Physical properties of molecular gas in the barred spiral galaxy NGC 2903”, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 68, id.89 14 pp (2016).
4. Arai, Hitoshi; Nagai, Makoto; Fujita, Shinji; Nakai, Naomasa; Seta, Masumichi; Yamauchi, Aya; Kaneko, Hiroyuki; Hagiwara, Kenzaburo; Mamyoda, Koh-ichi; Miyamoto, Yusuke; Horie, Masa-aki; Ishii, Shun; Koide, Yusuke; Ogino, Mitsutoshi; Maruyama, Masaki; Hirai, Katsuaki; Oshiro, Wataru; Nagai, Satoshi; Akiyama, Daiki; Konakawa, Keita; Nonogawa, Hiroaki; Salak, Dragan; Terabe, Yuki; Nihonmatsu, Yoshiki; Funahashi, Fumiyoshi, “A multi-line ammonia survey of the Galactic center region with the Tsukuba 32 m telescope. I. Observations and data”, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 68, id.76 12 pp. (2016).
5. Yonekura, Yoshinori; Saito, Yu; Sugiyama, Koichiro; Soon, Kang Lou; Momose, Munetake; Yokosawa, Masayoshi; Ogawa, Hideo; Kimura, Kimihiro; Abe, Yasuhiro; Nishimura, Atsushi; Hasegawa, Yutaka; Fujisawa, Kenta; Ohya, Tomoaki; Kono, Yusuke; Miyamoto, Yusuke; Sawada-Satoh, Satoko; Kobayashi, Hideyuki; Kawaguchi, Noriyuki; Honma, Mareki; Shibata, Katsunori M.; Sato, Katsuhisa; Ueno, Yuji; Jike, Takaaki; Tamura, Yoshiaki; Hirota, Tomoya; Miyazaki, Atsushi; Niinuma, Kotaro; Sorai, Kazuo; Takaba, Hiroshi; Hachisuka, Kazuya; Kondo, Tetsuro; Sekido, Mamoru; Murata, Yasuhiro; Nakai, Naomasa; Omodaka, Toshihiro, “The Hitachi and Takahagi 32 m radio telescopes: Upgrade of the antennas from satellite communication to radio astronomy”, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 68, id.74 16 pp. (2016).
6. Salak, Dragan; Nakai, Naomasa; Hatakeyama, Takuya; Miyamoto, Yusuke, “Gas Dynamics and Outflow in the Barred Starburst Galaxy NGC 1808 Revealed with

- ALMA”, *The Astrophysical Journal*, 823, id. 68, 28 pp. (2016).
7. Muraoka, Kazuyuki; Takeda, Miho; Yanagitani, Kazuki; Kaneko, Hiroyuki; Nakanishi, Kouichiro; Kuno, Nario; Sorai, Kazuo; Tosaki, Tomoka; Kohno, Kotaro, “CO(J = 3-2) on-the-fly mapping of the nearby spiral galaxies NGC 628 and NGC 7793: Spatially resolved CO(J = 3-2) star-formation law”, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 68, id.18, 13 pp. (2016).
  8. Baba, J.; Morokuma-Matsui, K.; Miyamoto, Y.; Egusa, F.; Kuno, N., “Gas velocity patterns in simulated galaxies: observational diagnostics of spiral structure theories”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 460, p.2472-2481 (2016).
  9. Dominion, Agnes; Sekine, Masakazu; Karatsu, Kenichi; Noguchi, Takashi; Sekimoto, Yutaro; Shu, Shibo; Sekiguchi, Shigeyuchi; Nitta, Tom, "Study of Superconducting Bilayer for Microwave Kinetic Inductance Detectors for Astrophysics", *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 26(3), pp. 2400206 (2016).
  10. Karatsu, K; Dominjon, A; Fujino, T; Funaki, T; Hazumi, M; Irie, F; Ishino, H; Kida, Y; Matsumura, T; Mizukami, K; Naruse, M; Nitta, T; Noguchi, T; Oka, N; Sekiguchi, S; Sekimoto, Y; Sekine, M; Shu, S; Yamada, Y; Yamashita, T, "Radiation Tolerance of Aluminum Microwave Kinetic Inductance Detector", *Journal of Low Temperature Physics*, 184(3), pp.540–546 (2016).

(国際研究集会集録等)

1. Makoto Nagai ; Hiroaki Imada. "Transmission and reception properties of non-reciprocal antennas", *IEEE Xplore Digital Library*, 2017 11th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP), 10.23919/EuCAP.2017.7928252, pp2988-2992 (2017)
2. Okumura, Taishi; Imada, Hiroaki; Nagai, Makoto; Nitta, Tom; Nakai, Naomasa; Kuno, Nario, “Point-diffraction interferometer for radio telescopes”, *Proceedings of the SPIE*, 9906, id. 990641, 8 pp. (2016).
3. Minamidani, Tetsuhiro; Nishimura, Atsushi; Miyamoto, Yusuke; Kaneko, Hiroyuki; Iwashita, Hiroyuki; Miyazawa, Chieko; Nishitani, Hiroyuki; Wada, Takuya; Fujii, Yasunori; Takahashi, Toshikazu; Iizuka, Yoshizo; Ogawa, Hideo; Kimura, Kimihiro; Kozuki, Yuto; Hasegawa, Yutaka; Matsuo, Mitsuhiro; Fujita, Shinji; Ohashi, Satoshi; Morokuma-Matsui, Kana; Maekawa, Jun; Muraoka, Kazuyuki; Nakajima, Taku; Umemoto, Tomofumi; Sorai, Kazuo; Nakamura, Fumitaka; Kuno, Nario; Saito, Masao, “Development of the new multi-beam 100 GHz band SIS receiver FOREST for the Nobeyama 45-m Telescope”, *Proceedings of the SPIE*, 9914, id. 99141Z, 10 pp. (2016).
4. Matsuo, Mitsuhiro; Minamidani, Tetsuhiro; Umemoto, Tomofumi; Nishimura, Atsushi; Nakanishi, Hiroyuki; Kuno, Nario; Fujita, Shinji; Tosaki, Tomoka; Tsuda, Yuya; Yamagishi, Mitsuyoshi; Kohno, Mikito; FUGIN Team, “A survey of molecular clouds in the outer Galaxy with the highest spatial resolution”, *Proceedings of the International Astronomical Union, IAU Symposium*, 321, pp. 44-44. (2016).
5. Morokuma-Matsui, Kana; Koda, Jin; Takekoshi, Tatsuya; Saito, Masao; Nakanishi,

Hiroyuki; Boissier, Samuel; Madore, Barry F.; Boselli, Alessandro; Gil de Paz, Armando; Thilker, David; Yagi, Masafumi; Sorai, Kazuo; Kuno, Nario, “Search for molecular gas in XUV disk of M83”, Proceedings of the International Astronomical Union, IAU Symposium, 321, pp. 268-268. (2016).

<学会等発表>

1. 栗木美香, 久野成夫, 永井誠, 佐野栄俊, 稲葉哲大, 山根悠望子, 吉池智史, 福井康雄, 瀬田益道「超新星残骸Kes 79 に付随する星間ガス」、日本天文学会2017年春季年会、2017年3月18日、九州大学
2. 齋藤弘雄, 土橋一仁, 齋藤正雄「W3 Mainにおける分子ガス構造と星団形成との関係の解明3」、日本天文学会2017年春季年会、2017年3月18日、九州大学
3. 伊佐見薫, 中井直正, 山内彩「高感度VLBI観測から探る2型セイファート銀河IC2560中心核の回転メーザー円盤」、日本天文学会2017年春季年会、2017年3月16日、九州大学
4. 米倉覚則, 杉山孝一郎, 齋藤悠, 青木健悟, 山口貴大, 足立弘, 大橋拓人, 佐藤宏樹, 柴田裕輝, 宮本祐輔, 百瀬宗武, 小川英夫, 藤沢健太, 高羽浩, 中井直正, 面高俊宏, 本間希樹, 小林秀行, 他大学間連携VLBI group「高萩/日立32 m 電波望遠鏡の整備状況(15)」、日本天文学会2017年春季年会、2017年3月17日、九州大学
5. 奥村大志, 今田大皓, 永井誠, 新田冬夢, 中井直正, 久野成夫「電波点回折干渉計(II)」、日本天文学会2017年春季年会、2017年3月17日、九州大学
6. 栗木美香, 久野成夫, 永井誠, 藤田真司, 佐野栄俊, 稲葉哲大, 山根悠望子, 吉池智史, 西村淳, 河野樹人, 福井康雄, 瀬田益道, 梅本智文, 南谷哲宏, 鳥居和史, 松尾光洋, ほか FUGIN チーム「NRO銀河面サーベイプロジェクト(FUGIN): 超新星残骸に付随する星間ガスに関する研究」、日本天文学会2016年秋季年会、2016年9月16日、愛媛大学
7. 中西康一郎, 中井直正, 久野成夫, 河野孝太郎, 安藤亮, 徂徠和夫, 松林和也, 菅井肇「Ionized gas properties in the starburst region of NGC 253 uncovered by ALMA high spatial resolution millimeter observations」、日本天文学会2016年秋季年会、2016年9月14日、愛媛大学
8. Dragan Salakl, Yuto Tomiyasu, Naomasa Nakai, Yusuke Miyamoto, Nario Kuno, Hiroyuki Kaneko「Circumnuclear gas torus and star-forming regions in the starburst galaxy NGC 1808 imaged by ALMA」、日本天文学会2016年秋季年会、2016年9月14日、愛媛大学
9. 宮本祐介, 瀬田益道, Dragan SALAK, 中井直正, 永井誠, 金子紘之「ALMAによる近傍銀河NGC 613 中心領域の多輝線観測」、日本天文学会2016年秋季年会、2016年9月14日、愛媛大学
10. 徂徠和夫, 久野成夫, 村岡和幸, 中井直正, 宮本祐介, 金子紘之, 中西裕之, 柳谷和希, 田中隆広, 富安悠人, 齊田智恵, 上野紗英子, 諸隈佳菜, 松本尚子, Dragan SALAK, 武田美保, 畠山拓也, 岸田望美, 江副聡一, PAN, Hsi-An, 他COMING メンバー、「NROレガシープロジェクトCOMING (7): プロジェクトの進捗状況報告」、日本天文学会2016年秋季年会、2016年9月15日、愛媛大学
11. 村岡和幸, 武田美保, 柳谷和希, 岸田望美, 徂徠和夫, 畠山拓也, 田中隆広, 富安悠人, 久野成夫, 中井直正, 齊田智恵, 上野紗英子, 中西裕之, 金子紘之, 宮本祐介, 諸隈佳菜, 松本尚子, Dragan SALAK, 他COMING メンバー、「NRO レガシープロジェクトCOMING (8): 棒渦巻銀河NGC 2903 における分子ガス密度と星形成効率の関係」、日本天文学会2016年秋季年会、2016年9月15日、愛媛大学
12. 田中隆広, 久野成夫, 畠山拓也, 富安悠人, 中井直正, 徂徠和夫, 岸田望美, 村岡和幸, 武田美保, 柳谷和希, 中西裕之, 齊田智恵, 上野紗英子, 江副聡一, 金子紘之, 宮本祐介,



- 諸隈佳菜, 松本尚子, Dragan SALAK, PAN Hsi-An, 他COMING メンバー、「NRO レガシープロジェクトCOMING(9): 棒渦巻銀河NGC 4088 における分子ガスの分布と運動」、日本天文学会2016年秋季年会、2016年9月15日、愛媛大学
13. 新田冬夢, 中井直正, 久野成夫, 永井誠, 村山洋佑, 関本裕太郎, 福嶋美津広, 三ツ井健司, 都築俊宏, 野口卓, 松尾宏, Agnes Dominjon, Wenlei Shan, 長谷部孝, 関口繁之, Shibo Shu, 清水貴之, 成瀬雅人, 伊藤和雅, 増田聖, 川崎繁男, 宮地晃平, 岡田則夫、「野辺山45m 電波望遠鏡搭載に向けた90/150-GHz 帯MKIDカメラの開発」、日本天文学会2016年秋季年会、2016年9月15日、愛媛大学
  14. 中井直正, 久野成夫, 新田冬夢, 永井誠, 瀬田益道, Dragan SALAK, 関本裕太郎, 徂徠和夫, 南極天文コンソーシアム、「南極10m テラヘルツ望遠鏡計画: 建設場所」、日本天文学会2016年秋季年会、2016年9月15日、愛媛大学
  15. 瀬田益道, 中川直登, Dragan SALAK, 中井直正, 久野成夫, 永井誠, 新田冬夢, 関本裕太郎, 今田大皓 (ISAS/JAXA), 南極天文コンソーシアム、「南極10m テラヘルツ望遠鏡ヘテロダイン受信機系の基本設計」、日本天文学会2016年秋季年会、2016年9月15日、愛媛大学
  16. 村山洋佑, 新田冬夢, 中井直正, 久野成夫, 永井誠, 関本裕太郎, 都築俊宏, 関口繁之, Shibo Shu, 今田大皓, 瀬田益道, 成瀬雅人, 「南極10 mテラヘルツ望遠鏡搭載用超伝導電波カメラの機械熱設計」、日本天文学会2016年秋季年会、2016年9月15日、愛媛大学
  17. 永井誠, 今田大皓, 「相反とは限らないアンテナの送受信特性の定式化」、日本天文学会2016年秋季年会、2016年9月15日、愛媛大学
  18. 久野成夫, 中井直正, 新田冬夢, 永井 誠, 瀬田益道, 関本裕太郎, 徂徠和夫, ほか南極天文コンソーシアムメンバー、「南極30mテラヘルツ望遠鏡計画」、日本天文学会2016年秋季年会、2016年9月15日、愛媛大学
  19. 米倉覚則, 齋藤悠, 青木健悟, 山口貴大, 足立弘, 大橋拓人, 佐藤宏樹, 柴田裕輝, 宮本祐輔, 杉山孝一郎, 澤田-佐藤聡子, 百瀬宗武, 吉田龍生, 小川英夫, 藤沢健太, 高羽浩, 徂徠和夫, 中井直正, 面高俊宏, 本間希樹, 小林秀行, 他大学間連携VLBI group, 「高萩/ 日立32 m 電波望遠鏡の整備状況(14)」、日本天文学会2016年秋季年会、2016年9月15日、愛媛大学
  20. 梅本智文, 南谷哲宏, 鳥居和史, 水野範和, 本間希樹, Muller, E., 亀谷和久, 井上剛志, 廣田明彦, 諸隈佳菜, 久野成夫, 藤田真司, 栗木美香, 半田利弘, 面高俊宏, 中西裕之, 新永浩子, 松尾光洋, 小澤武揚, 小出風人, 松本尚子, 大西利和, 徳田一起, 高橋諒, 濤崎智佳, 小林幸典, 小野寺幸子, 津田裕也, 立原研悟, 西村淳, 佐野栄俊, 服部有祐, 吉池智史, 河野樹人, 樋口あや, 大朝由美子, 大橋聡 史, 桑原翔, 祖父江義明, 坪井昌人, 山岸光義, Chibueze, J., 「NRO 銀河面サーベイプロジェクト (FUGIN): 2015 年度進捗」、日本天文学会2016年秋季年会、2016年9月16日、愛媛大学
  21. 鳥居和史, 南谷哲宏, 梅本智文, 藤田真司, 栗木美香, 久野成夫, 松尾光洋, 服部有祐, 西村淳, 河野樹人, 立原研悟, 福井康雄, 濤崎智佳, 津田裕也, 大橋聡史, FUGIN チーム, 「NRO 銀河面サーベイプロジェクト(FUGIN): SpitzerバブルN18における分子雲衝突と大質量星形成」、日本天文学会2016年秋季年会、2016年9月16日、愛媛大学
  22. 永井誠, 金高義, 今井大皓, 中井直正, 久野成夫, 瀬田益道, 「南極10m級テラヘルツ望遠鏡の設計 —風荷重の計算—」, 第32回寒地技術シンポジウム, 2016年11月17日, 札幌コンベンションセンター
  22. Kuno, Nario, "Activities of the Observational Astronomy Group at University of Tsukuba", Chile-Japan Academic Forum 2016 at Patagonia.

## <学位論文>

(博士論文)

数理物質科学研究科・物理学専攻

1. 藤田真司

「Observational study of physical properties of giant molecular clouds in W51  
(W51 巨大分子雲の物理状態に関する観測的研究)」

(修士論文)

数理物質科学研究科・物理学専攻

1. 伊佐見薫

「活動銀河核の水蒸気メーザーおよびアンモニアの観測特にセイファート銀河 IC2560  
の中心核の構造と運動の研究」

2. 奥村大志

「点回折干渉計を用いた南極電波望遠鏡の鏡面測定法の開発」

3. 栗木美香

「超新星残骸 Kes79 に付随する星間ガスに関する研究」

4. 田中隆広

「棒渦巻銀河 NGC4088 における分子ガスと星形成の関係についての研究」

5. 周 斌

「The study of the noise influence on phase retrieval holography measurement for the  
Antarctic 10-m THz telescope  
(Phase-retrieval holography 法による南極 10m テラヘルツ望遠鏡の鏡面測定に及ぼす  
雑音の影響に関する研究)」

6. 上西広弥

「南極 1.2m 電波望遠鏡の主鏡面精度に関する研究」

(卒業論文)

理工学群・物理学類

1. 知名奏美

「水蒸気メーザーのデータ解析による活動的銀河中心核の巨大質量ブラックホールとメ  
ーザー円盤の研究」

2. 佐藤雄登

「南極サブミリ波望遠鏡の 500GHz 帯輝線同時観測受信機の開発」

3. 保田敦司

「近傍矮小銀河 NGC2976 における分子雲の性質」

## <外部資金>

1. 科学研究費補助金(基盤研究 A) : 中井直正(研究代表者)、久野成夫、永井誠

「大規模電波カメラによる「あかり」北極域の掃天観測」  
(交付額 90 万円)(3/5 年)

2. 科学研究費補助金(若手研究 B) : 永井誠(研究代表者)

「焦点面における位相差を用いた電波望遠鏡の鏡面形状測定法の開発」

- (交付額 90 万円) (2/2 年)
3. 日本学術振興会「研究成果の社会還元・普及事業（ひらめき・ときめきサイエンス）」：  
中井直正（実施代表者）、久野成夫、永井誠  
(交付額 34.4 万円)
  4. 自然科学研究機構国立天文台：中井直正（研究代表者）  
「大学間連携 V L B I 観測事業に係る研究—高精度 VLBI 観測による銀河系の構造及び  
進化の解明」  
(交付額 518.2 万円)

**<共同研究・受託研究>**

1. 「大学間連携 V L B I 観測事業に係る研究」  
大学共同利用機関法人自然科学研究機構（2016 年 4 月 1 日～2017 年 3 月 31 日）
2. 「AR溝付レンズの最適な形状の研究」  
株式会社雄島試作研究所（2016 年 4 月 1 日～2016 年 9 月 30 日）

## V. 原子核理論グループ

### 1. メンバー

教授	矢花一浩、中務 孝
講師	橋本幸男
助教	日野原伸生（国際テニュアトラック）
研究員	温 凱（2017.1 転出）、鷲山広平、野村昂亮（PD 学振）、佐藤駿丞（PD 学振）、植本光治、Guillaume Scamps（2016.10 着任）
学生	大学院生 5 名（うち特別研究学生 1 名）、学類生 1 名

### 2. 概要

核子（陽子・中性子）の多体系である原子核の構造・反応・応答などの多核子量子ダイナミクスの研究を推進している。安定線（ハイゼンベルグの谷）から離れた放射性アイソトープの原子核の構造と反応、エキゾチックな励起状態の性質、様々な集団運動の発現機構など、未解決の謎の解明に取り組んでいる。原子核の研究は、フェルミ粒子の量子多体系計算という観点で、物質科学や光科学、冷却原子系の物理と密接なつながりをもつ。また、クォーク・グルーオンのダイナミクスを記述する格子 QCD に基づく核力の計算、軽い原子核の直接計算などが進展する中、素粒子物理学との連携も重要性が増している。ニュートリノの解明に向けたニュートリノレス二重ベータ崩壊の観測実験や、素粒子標準模型のテストに関わる実験などにも原子核理論の精密計算が不可欠とされている。また、元素の起源や星の構造にも原子核の性質は深く関わり、宇宙物理学とも密接に関係している。本部門・原子核物理分野のメンバーは、このような幅広い課題に取り組み、分野の枠を超えた研究を推進している。

### 3. 研究成果

#### 【1】大振幅集団運動理論を用いた核反応ダイナミクスの記述（温、中務）

線形領域を超える大振幅集団運動を扱う理論として、断熱自己無撞着集団座標法（Adiabatic Self-consistent Collective Coordinate Method: ASCC 法）を我々は提唱しており、この理論では、少数自由度の集団空間（座標）の自己無撞着な抽出が可能である。この理論に基づいて、低エネルギーの多核子反応ダイナミクスを記述する最適な反応経路を導出する研究を実施した。虚時間発展法と有限振幅法を組み合わせた反復法を用いて、今年度は、アルファ粒子と酸素（融合核：ネオン）と、酸素・酸素（融合核：硫黄）の散乱・融合過程を記述する集団座標をミクロに決定した。図に前者の融合反応に対して求められた密度分布の変化を示す。核反応の集団運動を支配するポテンシャルと質量パラメー

タを完全微視的に決定し、低エネルギー・サブバリア領域における融合断面積を計算することに成功した。

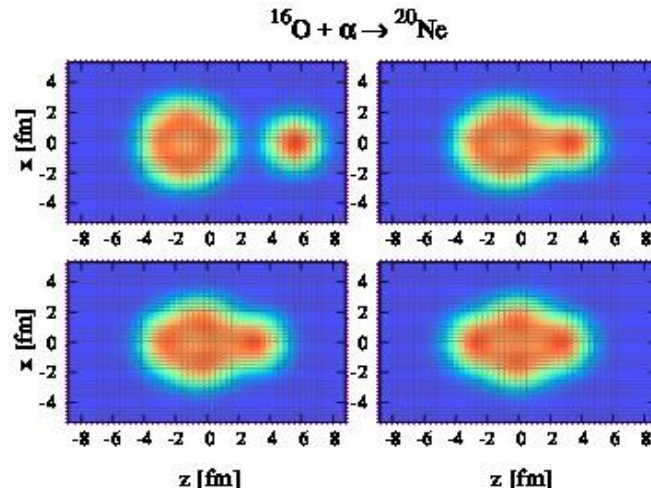


図 1:  $^{16}\text{O} + \alpha \rightarrow ^{20}\text{Ne}$  の核融合経路上の 4 点における密度分布 (x-z 平面)

## 【 2 】アイソスピン不変なエネルギー汎関数とアイソスピン対称性の破れ (中務、佐藤 (大阪市大)、Dobaczewski (ワルシャワ大)、Satula (ワルシャワ大))

現在主流となっている原子核のエネルギー密度汎関数は、Skyrme 形式、Gogny 形式、共変形式 (相対的) の 3 つに大別されるが、どれも陽子と中性子の密度の汎関数としてエネルギーが与えられている。しかし、陽子や中性子はアイソスピンの第 3 成分の固有状態であり、アイソスピン空間における回転に対して不変ではなく、一般にはアイソスピンが任意の方向を向いた状態、すなわち陽子と中性子が混合した状態に拡張する必要がある。これを実行するため、昨年度までに、陽子・中性子を区別せずに「核子」として扱う新しい

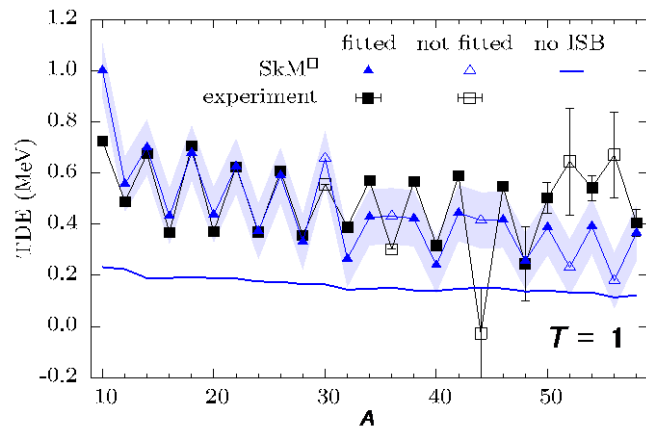


図 2 : Triple displacement energy (TDE) と呼ばれるアイソスピン対称性の破れの指標。明示的に破る項を入れない場合が実線、入れた結果が三角で示されている。

Kohn-Sham 方程式と、それに対応する非対角要素を含むエネルギー汎関数を構築し、その計算コード開発を実施した。今年度は、アイソスピン対称性の破れに関する昨年の解析をさらに詳細に実施し (図 2)、破れを記述するために新たに導入したエネルギー汎関数が、核子・核子散乱の散乱長における対称性の破れの大きさと無矛盾であることを明らかにし

た。また、いくつかの実験で測定された原子核質量のデータについて、理論計算の値と大きなズレが見つかり、再測定の必要性を提唱した。

### 【 3 】対振動状態における集団座標(中務、倪(D1))

原子核の励起状態の中で、スピン・パリティが $0^+$ の状態には対振動状態と解釈される状態が存在する。これは、ゲージ対称性を破る秩序パラメータであるエネルギー・ギャップの大きさが揺らぐ(振動する)集団的状态であると解釈されてきた。しかし、その性質にはまだまだ未解決な点が多い。

我々は、対相関がもたらす集団的ダイナミクスを記述するため、厳密解を求めることができる対相関模型(リチャードソン模型)に対して、ASCC法を用いて集団座標を微視的・非経験的に決定した。これにより、これまで仮定されていたギャップ・パラメータを集団座標として扱うことには問題が多く、それとは全く異なる集団座標が導出されることを示した。これは、過去の多くの解析の問題点を指摘するものであり、重要な成果であると言える。

### 【 4 】中性子星内殻における1次元周期構造の密度汎関数計算(中務、柏葉(M2))

中性子星の内殻(インナー・クラスト)と呼ばれる表面に近い領域では、中性子の海の中に原子核が周期的に配置された構造を取ると予想されている。中心に近づいていくと、やがて一様な核物質になると考えられるが、その直前には、パスタ相と呼ばれる奇妙な形の原子核が現れると考えられている。その中でも、スラブ相(ラザーニャ相)と呼ばれる板状の原子核が現れる領域があると予想されており、今回、このスラブ相に対して、厳密な境界条件を考慮した完全自己無撞着な密度汎関数計算を実行することに成功した。周期的なポテンシャルに対するブロッホ波動関数は固体のバンド計算で良く知られているが、これと同じ計算を中性子星物質スラブ相について行った。固体のバンド計算では、原子核(イオン)によって作られた周期的ポテンシャル中の電子の波動関数を求めるわけだが、原子核では周期的ポテンシャル自体、核子(陽子・中性子)の自己無撞着ポテンシャルとして与えられ、核子運動の自由度だけから自発的に現れた周期性である。これまで、このような計算を自己無撞着に行った例はなく、世界初の成果である。

### 【 5 】対相関の精密化(日野原)

平均場近似では対相関はゲージ対称性の自発的破れをもたらし、対回転モードと呼ばれる対称性を回復させるゼロエネルギーの南部=Goldstone(NG)モードが、超伝導原子核の準粒子乱雑位相近似(QRPA)解として現れる。昨年度に我々は対回転の慣性モーメントが原子核の対相関の性質を反映する指標として優れていることを指摘した。従来の対相関の指標は対ギャップであり、これを奇核と偶核の束縛エネルギー差(OES)の実験値に対応させ、対相関の性質を議論してきた。しかし、対ギャップが実験観測量ではないことや、対ギャッ

ブ、OES それぞれの定義が一意ではないこと、OES に含まれる時間反転に対して符号を変える項の理解が進んでいないことにより、対相関の詳細な性質のみを OES から抜き出すのは難しく、それゆえに対密度汎関数としては最も簡単な形と密度依存性しか考慮されておらず、対密度汎関数の精密な議論は進んでいなかった。対回転の慣性モーメントを指標に用いることで、これらの問題を回避し、理論と観測値の直接的な比較が可能となり、対密度汎関数の理解も深めることが可能となる。まずは、Skyrme 型の有効相互作用には存在するが、通常対相互作用では考慮されていない対密度の空間微分項(運動量依存項)依存性を調べた。錫と鉛同位体で対密度の空間微分項の結合定数を変えながら対回転の慣性モーメントを系統的に計算し、実験値を系統的に再現するためには、この対密度の空間微分項が重要であることを示した。将来、原子核密度汎関数の結合定数を、実験データを用いて最適化する際には、対回転の慣性モーメントが有用であると言える。

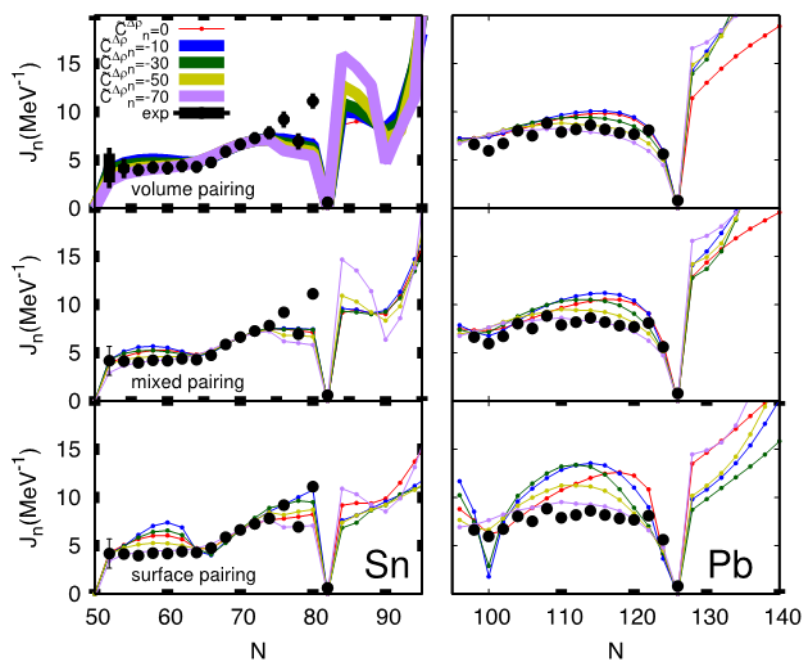


図 3：錫と鉛同位体での対回転の慣性モーメントの対密度の空間微分項依存性。

## 【 6 】一般化された原子核密度汎関数での Thouless の定理の証明（日野原）

エネルギー重率和則に関する Thouless の定理ではハミルトニアンと遷移演算子の二回交換関係によって、本来すべての励起状態の足し上げが必要となる和則を基底状態の期待値と結びつけることができるため、QRPA の計算コードのチェックや、巨大共鳴の情報の抽出に大変有用である。原子核密度汎関数理論でも Thouless の定理は有効であることは広く知られていたが、従来の定理の証明ではハミルトニアンを用いるため、ハミルトニアンが存在しない原子核密度汎関数理論の場合には厳密には定理の適用の範囲外であった。ハ



ミルトニアンとは対応がない一般化された原子核密度汎関数の場合において、Thouless の定理をハミルトニアン演算子を使うことなく証明し、定理の証明を行った。汎関数の局所ゲージ不変性が保たれている場合は従来の Thouless の定理が適用可能であるが、これが破れている場合は対称性の破れに起因する項が発生することを示した。また有限振幅法の複素積分の方法によって和則を計算し、局所ゲージ対称性が破れている場合においても拡張された定理が有効であることを数値的に示した。

## 【 7 】 超流動原子核の衝突における摩擦係数の評価（橋本）

原子核内に存在する核子（陽子・中性子）の間には、対相関と呼ばれる、2つの核子に対に組むような相関が存在することが知られている。対相関を考慮して微視的に原子核の反応を記述するために時間依存密度汎関数法（TDHFB）が用いられる。これまでに、ラグランジュ格子と調和振動子基底を組み合わせたハイブリッド基底を用いた TDHFB コードを開発し、その有効性を実証した。今回、その計算コードを超流動球形原子核  $^{20}\text{O}$  同士の正面衝突  $^{20}\text{O}+^{20}\text{O}$  に応用し、微視的な計算である TDHFB 法から巨視的な摩擦項に用いられる摩擦係数を抽出し、その初期衝突エネルギー依存性を明らかにした。先行研究として TDHF に基づいた計算があるが、対相関を含んだうえでの摩擦係数の導出は本研究の結果が初めてとなる。一連の計算によって以下の結果を得た：摩擦係数は、クーロン障壁近傍 1 MeV くらいのエネルギーでの衝突の際には他のエネルギー領域に比べて大きく、同時に、移行エネルギー量も大きくなる。一方、この近傍領域を越えて衝突のエネルギーを 10 MeV にわたって増加させると、摩擦係数は急速に小さくなり衝突のエネルギーにあまり依存しないようになる。摩擦係数についての、この衝突エネルギー依存性は、定性的には以下のように理解できる：クーロン障壁近傍においては衝突速度が低下するので核間のエネルギー移動が（比較的）長い時間にわたり行われるので、強い摩擦となって現れる。一方、衝突エネルギーの増加に伴い、エネルギー移動に関わる時間が減少するので、摩擦は弱くなる。実際には、どの衝突エネルギー領域でも衝突直後から対相関エネルギーが急速に減少するので、その効果を明らかにするために、さらに精密な計算が必要である。

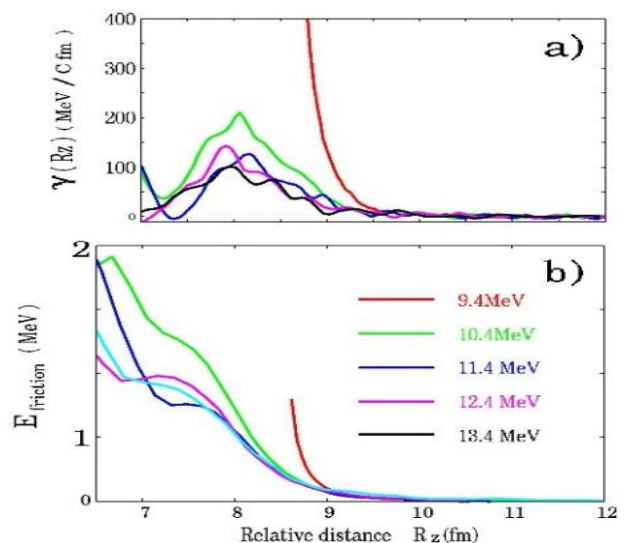


図 4 : a):酸素  $^{20}\text{O}$  原子核間の相対距離と摩擦係数、図 b):散逸したエネルギーと相対距離の関係をそれぞれ示す。



### 【 8 】 3 次元空間上の有限振幅法の開発（鷲山、中務）

質量数 100 前後の原子核では、低励起エネルギー領域で複数の変形状態が共存したり、陽子数・中性子数の変化に対し基底状態や低励起状態が急激な構造変化を示したりすることが知られている。このような原子核を大振幅集団運動の観点から理解するために我々は自己無撞着な密度汎関数法による四重極集団模型の構築を目指している。その集団ハミルトニアンに現れる集団質量を密度汎関数法に基づく準粒子乱雑位相近似(QPRA)法で評価するには非軸対称変形核に対する QRPA 計算が必要である。これが大規模数値計算となるため、これまでの QRPA 計算は軸対称原子核への応用に限られてきた。近年、大規模数値計算の要因である残留相互作用の計算及び大次元の QRPA 行列要素の計算と対角化を回避して QRPA 計算を実行できる有限振幅法が提案された。有限振幅法では、大規模数値計算となる残留相互作用の計算と QRPA 行列の対角化を露わに行なうことなく、外場に対する原子核の線形応答モードを記述する。

本研究では、昨年度に引き続き 3 次元空間上での有限振幅法 QRPA 計算の数値計算コードの開発を行なった。まず、有限振幅法より得られた強度関数と和則の分析から数値計算コードの修正を行ない、和則を満たすようにコードの改良を行なった。次に、一粒子波動関数の保持する対称性の分析からコードの計算量の削減を行い、およそ 30 % 程度数値計算量を減らすことが出来た。また、非軸対称原子核  $^{110}\text{Ru}$  ( $\beta=0.31$ ,  $\gamma=20^\circ$ ) の単極応答、及び、アイソスカラー四重極応答に応用し、強度関数と和則の計算を行ない、強度関数が和則を満たすことを示し、四重極演算子のそれぞれの  $z$  成分に対する強度関数の分離を得た。今後は大振幅集団運動に対する質量パラメータ計算を行ない、集団ハミルトニアンの構築を目指す。

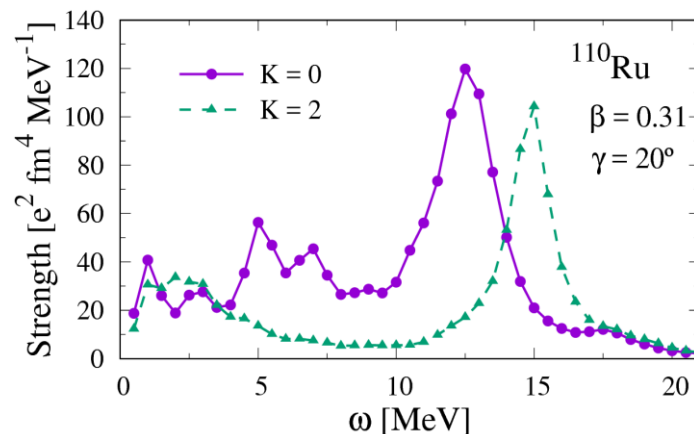


図 5：非軸対称核  $^{110}\text{Ru}$  の四重極振動に対する強度関数

### 【 9 】 重陽子—原子核全反応断面積の公式化（鷲山、養茂（阪大）、緒方（阪大））

重陽子—原子核弾性散乱は様々な分野で重要な基礎的反応過程であり、断面積評価のための汎用公式がいくつかある。それらは巨視的な反応模型を基に比較的狭いエネルギー領域に適用範囲が限られている。本研究では、広範囲のエネルギーにおける断面積の微視的な評価及びその少数パラメータによる公式化を行なった。さらに、放射線施設や医療機関などで広く用いられる粒子輸送コード PHITS にこの公式を提供する目的で研究を行な

った。全反応断面積の計算には重陽子の分解反応を考慮した連続状態離散化結合チャンネル法を採用し、重陽子—原子核間ポテンシャルは微視的な畳み込み模型を用い、原子核の密度分布は微視的な密度汎関数法で評価した。そして、この方法で得られた15の原子核に対する全反応断面積を重陽子の入射エネルギー( $10\text{MeV} < E < 1000\text{MeV}$ )、原子核の陽子数、核子数の関数で公式化した。この関数は既存の実験データを再現し、以前に提案された汎用公式よりも高精度で広範囲に適用可能な反応断面積公式を得た。この公式は粒子輸送コード PHITS にも既に組み込まれており、広く使われ始めている。

# 【 10 】 奇核の分光学的性質に関する研究 (野村、Vretenar (ザグレブ大学)、Niksic (ザグレブ大学) )

エネルギー密度汎関数理論と *particle-core coupling* の枠組みに基づいて、陽子・中性子いずれかが奇数の核種 (奇核) の分光学的性質を計算するための方法を新たに開発した。この方法では、偶偶核コアのポテンシャルエネルギー面、*unpaired particle* の *single-particle energy* と *occupation probability* を相対論的密度汎関数に基づいた平均場模型で計算し、それらを微視的インプットとして *particle-boson-core coupling* のハミルトニアンを決定した。軸対称変形した奇核種 Eu および Sm 同位体にこの方法を適用し、低エネルギー励起スペクトルおよび電磁遷移強度の実験値を再現することができた。希土類領域の偶偶核では、中性子数 90 近傍において球形から軸対称変形への形状相転移が良く知られているが、本研究において、*unpaired fermion* の形状相転移に与える影響を解析した。変形、励起エネルギー、電磁遷移などの物理量を計算し、それらの値が中性子数の増減によって急激に変化することを示すことで、偶偶核において見られるのと同様の形状相転移が奇核系でも発現することを明らかにした。

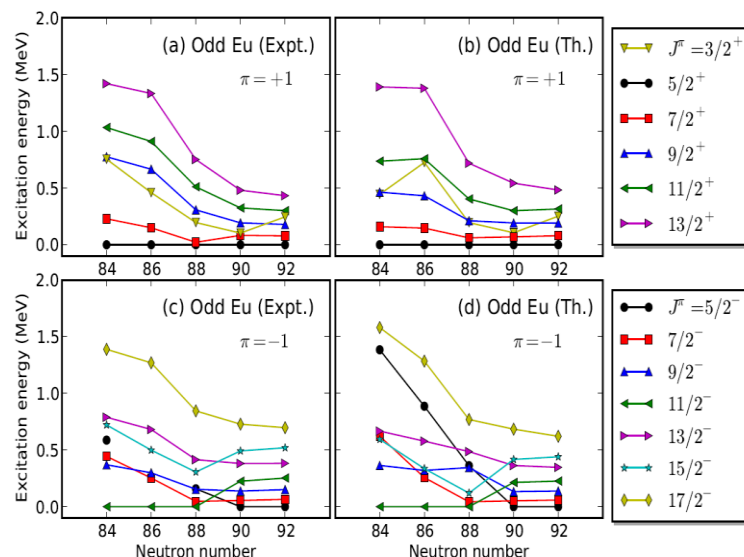


図 6 : 奇核 Eu 同位体の正負パリティ低エネルギー励起スペクトルの遷移

【 11 】 質量数 100 近傍の中性子過剰核における形状相転移と変形共存（野村、Rodriguez-Guzman（クウェート大学）、Robledo（マドリード自治大学））

Gogny 型密度汎関数に基づいて相互作用するボソン模型ハミルトニアンを導く方法を用いて、近年実験的理論的に大きな注目を集めている、質量数 100 近傍の中性子過剰 Ru, Mo, Zr, Sr 同位体における形状進化の記述を行った。この方法では、Gogny-D1M HFB 計算でまず 4 重極変形空間でのポテンシャルエネルギー面を計算し、それをボソン模型ハミルトニアンの内部固有状態での期待値に写像することで、これらの原子核の集団励起状態を記述するためのボソンハミルトニアンのパラメータを決定した。主要な結果として、Ru および Mo 原子核において gamma 不安定な構造が多く見られること、Zr および Sr においてプロレートオブレート変形共存を示唆したことである。励起エネルギーや電磁遷移強度などの分光学的性質の実験値との良い一致が得られ、実験に先駆けた理論的予言も行った。

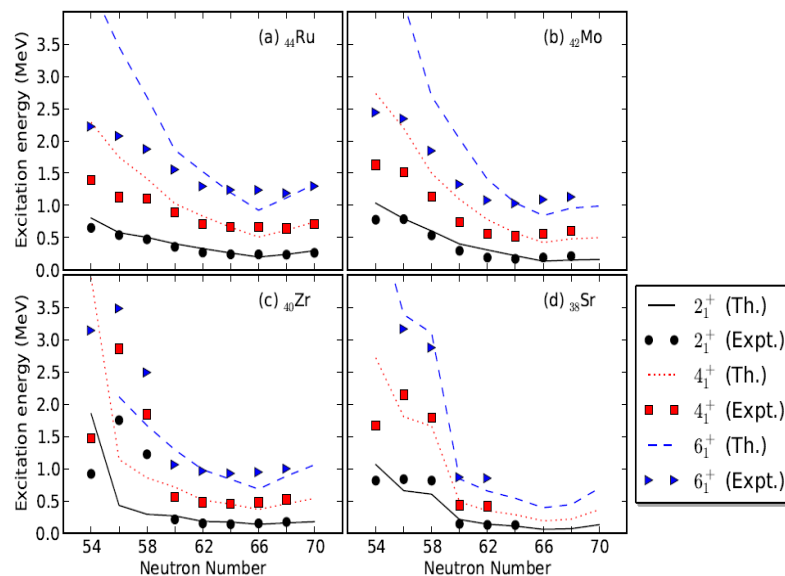


図 7：偶偶核 Ru, Mo, Zr, Sr 同位体の低励起 yrast 状態の遷移

【 12 】 Pair transfer probabilities obtained by projection method (Scamps, 橋本)

We developed a projection method to determine the transfer probabilities in reactions at energies lower than the barrier. This method works also for Time-dependent Hartree-Fock Bogoliubov method with two superfluid fragments. In that case, both fragments break the particle number symmetry, then we have to project on the good number of particles in both fragments. We tested this method on a simple toy model. This model improves the comprehension of the nuclear Josephson effect and the fluctuation of the fusion barrier in collisions between two superfluid fragments. One article is in preparation on that subject.

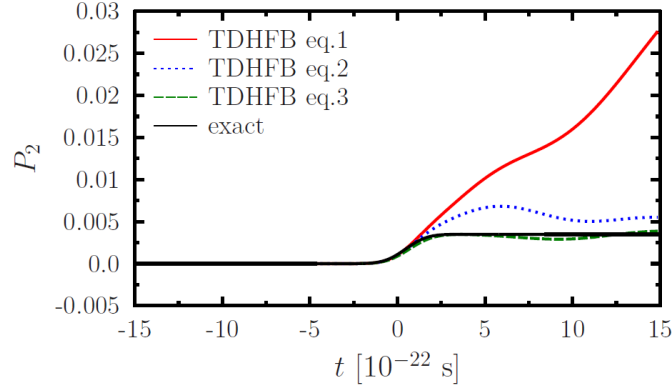


図 8 : Pair transfer probability as a function of time with several prescriptions of the TDHFB equations compared to the exact solution

**【 13 】 Effect of pair transfer on fusion reactions using coupled channel methods (Scamps、萩野 (東北大))**

We improved the phenomenological description of the transfer and fusion reaction with the coupled channel method. In a precedent study, it was shown that it was not possible to simultaneously describe the fusion cross section and the transfer probabilities. By taking into account different collective states after the neutron pair transfer in the coupling scheme, We improved the simultaneous description of the  $40\text{Ca}+96\text{Zr}$  and  $40\text{Ca}+64\text{Ni}$  experimental data.

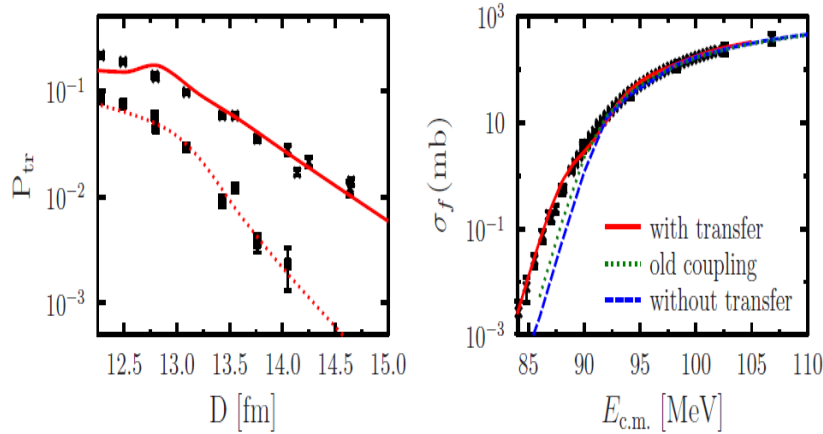


図 9 . (Left) Transfer probabilities for the reaction  $40\text{Ca}+96\text{Zr}$ , the experimental data for one-neutron (crosses) and two-neutron (square) are compared to coupled-channels calculations (solid line for 1n and dotted line for 2n). (Right) : fusion cross section from the experimental data (dashed blue line) compared to the coupled-channels calculation of ref. [G. Scamps and K. Hagino, Phys. Rev. C 92, 054614 (2015)] (dotted green line) and the present calculation (solid red line)

【 14 】 Description of the excitation energy using the time-dependent Hartree-Fock + BCS theory (Scamps, Lacroix (IPNO, CNRS/IN2P3), Rodriguez (GANIL) and Farget (GANIL))

In collaboration with an experimental group, C. Rodriguez and F. Farget at Ganil, We developed a method to determine the excitation energy as a function of the center of mass energy in a given transfer channel. We used is the Time-dependent Hartree-Fock+BCS method to determine the transfer probabilities and the average excitation energy. The method is applied to the reaction involving a  $^{238}\text{U}$  beam on a  $^{12}\text{C}$  target, which has recently been measured at GANIL. It is shown that the excitation energy calculated with the microscopic theory compares well with the experimental observation, provided that the competition with fusion is properly taken into account.

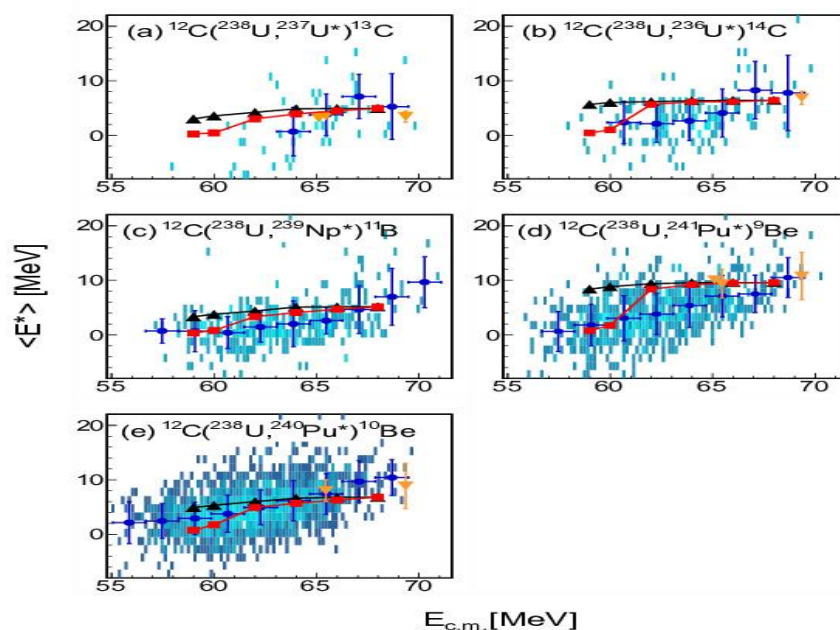


図 10: Average excitation energy as a function of the center- of-mass energy for the main channels observed experimentally: experimental data (blue dots), TDHF + BCS results (black triangles), TDHF + BCS results where the excitation energy has been shifted by 3 MeV (red squares), and the HIPSE results (orange down triangles). In the latter case, error bars correspond to the widths of the calculated distributions. The superimposed blue (gray) areas correspond to the experimental event-by-event distributions of the excitation energy.

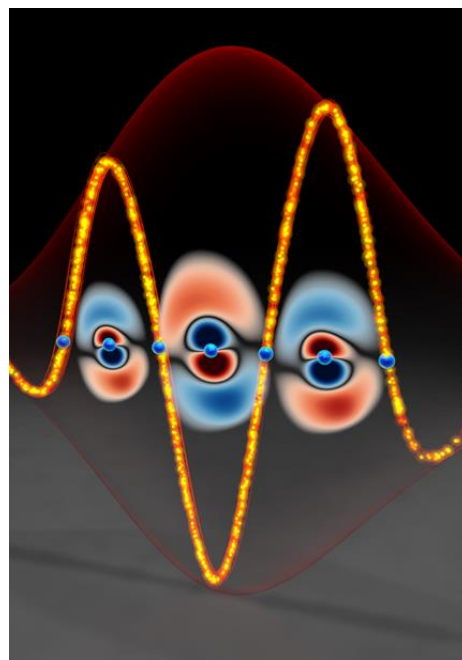
【 15 】 パルス光からガラスへの超高速エネルギー移行 (佐藤、矢花、A. Sommer、 M. Schultze、 F. Krausz 他 (マックスプランク量子光学研究所アト秒実験グループ) )

我々のグループでは、時間依存密度汎関数理論 (TDDFT) に基づく電子ダイナミクスの第一原理計算と、パルス光の電磁場を記述するマクスウェル方程式を多階層で連結したシミュレーション法を独自に開発し、高強度超短パルス光と物質の相互作用に関する先端の光科学研究を展開している。本研究は、高強度超短パルスレーザーから透明物質の電子へ、



光の1周期よりも短い時間スケールでエネルギーが移行する過程を、マックスプランク量子光学研究所のアト秒科学実験グループと協力して解明したものである。

実験はFused Silica、計算は $\alpha$ クォーツ（共に $\text{SiO}_2$ ）の $10\ \mu\text{m}$ の薄膜に対して、平均振動数 $1.55\text{eV}$ の数サイクルの高強度超短パルスレーザーを照射する。測定と計算を直接比較することのできる量の一つは、薄膜を透過したパルス光の波形そのものである。実験的にはアト秒ストリーキングの方法を用いて計測され、計算では直接透過波の波形を求めることができる。破壊閾値に近い強度のパルスレーザーに対して、測定と計算は共にパルス波形の変化は小さく、両者で変化の傾向（包絡形状と位相）は定性的に一致することが示された。実験で得られたパルス波形変化から、薄膜の中央においてパルス光から物質電子へのエネルギー変化を得ることができ、これをシミュレーションの結果と比較した。その結果、ある強度領域の極めて小さい強度の範囲で、パルス光から物質電子へのエネルギー移行が急激に増大することが示された。その域値は、実験と計算で良く一致している。この結果は透明材料のレーザー加工初期過で起こる光から物質へのエネルギー移行を初めて直接捉えたものとして、注目される。



本研究の成果を含む論文 A. Sommer et.al, Nature 534, 86-90 (2016)の出版時にプレスリリースを行なった（平成28年5月20日）。

図11：左から来る黄色い光が二酸化ケイ素の原子に照射し、各原子の周りにいる電子を振動させる。この電子の動きが光波のエネルギーを吸収する。パルス光の終わりで、電子による吸収されたエネルギーは再び光波に戻る。この物質を通過した後の光波の時間波形を正確に測定し、アト秒の速さで変化する固体の電子の運動を、実時間観測することが可能になった。

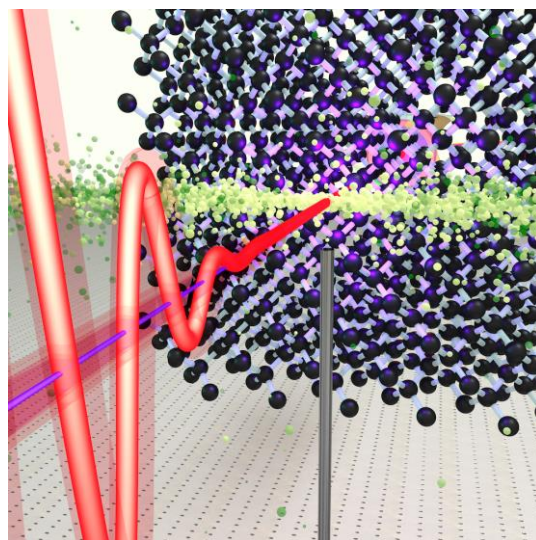
#### 【16】光サイクル以下の時間スケールで起こるダイヤモンド光応答の超高速変化（佐藤、矢花、M. Lucchini、U. Keller 他（チューリッヒ工科大学アト秒実験グループ））

電子ダイナミクスに対するTDDFT計算と光電磁場に対するマクスウェル方程式を組み合わせた第一原理計算を用い、チューリッヒ工科大学のアト秒実験グループと協力して、ダイヤモンドに数サイクルのパルス光を照射した時に、光の1サイクルよりも短い時間スケールでダイヤモンドの光応答（誘電関数）が変化することを示した。

実験と第一原理シミュレーションはともに、 $50\text{nm}$ の厚さを持つダイヤモンド薄膜に平均振動数 $1.55\text{eV}$ 、数サイクルの高強度パルス光をポンプ光として照射し、それと時間差を制御した平均振動数が $40\text{eV}$ 程度のアト秒プローブパルス光を照射して、ポンプ光電場がダイヤ

モンドの 40eV 近傍の領域に引き起こすプローブ光吸収率の変化を調べた。測定とシミュレーションにより、光電場の大きさに依存して吸収が変化する様子を明らかにすることができた。

シミュレーションの内容を分析することにより、この吸収率の変化が動的フランチ・ケルディッシュ効果によることがわかった。フランチ・ケルディッシュ効果は、バンドギャップを持つ誘電体に静電場を印加した時に、電子のトンネル効果によりバンドギャップ以下のエネルギーで光吸収が起こる現象である。本研究は数フェムト秒で振動する電場を照射した場合でも、それに起因する電子運動が誘電率の超高速変化をもたらすことを示したものであり、この結果は将来の光波を用いた新たなエレクトロニクスの実現に向けて、重要な基礎的知見を与えるものである。



本研究の成果を含む論文 M. Lucchini et.al, Science 353, 916-919 (2016) の出版時にプレスリリースを行なった（平成 28 年 8 月 26 日）。

図 12：ダイヤモンドの薄膜にレーザーパルスを照射する様子。

#### 【 17 】電子ダイナミクス計算コード ARTED の開発（植本、佐藤、矢花、廣川、朴（計算科学研究センター）、信定、野田（分子科学研究所））

我々のグループで独自に開発を進めてきた時間依存密度汎関数理論に基づく第一原理電子ダイナミクス計算コード ARTED (Ab-initio Real-Time Electron Dynamics simulator) が多様な計算機において高速に動作するよう、アプリ開発者とシステム研究者との密接な協力によるチューニングを進めた。ARTED は、平成 26 年度の HPCI による京コンピュータの一般利用において、最も高い実効性能を持つアプリと認定され表彰された。また、筑波大学と東京大学が共同で運用を開始したメニーコアスパコン Oakforest-PACS を高効率で利用できるよう、Intel Xeon Phi の Knights Landing プロセッサに対するチューニングを進めた。

ARTED を始めとする電子ダイナミクス計算コードを整備して、光科学分野において有用な第一原理ソフトウェアを開発・応用することを目指す CREST 研究「光・電子融合第一原理計算ソフトウェアの開発と応用」（代表：矢花一浩）が、平成 28 年 10 月よりスタートした。この課題は、分子科学研究所の信定グループとの密接な協力を予定しており、分子研ではナノ構造体における電子ダイナミクスを計算するコード GCEED を開発している。CREST 研究の開始を機会に、ARTED と GCEED を統合し、固体からナノ構造までを対象とするソフトウェア SALMON (Scalable Ab-initio Light-Matter simulator for Optics and Nanoscience)を開発することを決め、準備作業を進めた。

**【 18 】光電磁場と電子ダイナミクスを結合した超大規模計算の試み（植本、佐藤、矢花、廣川、朴（計算科学研究センター））**

Oakforest-PACS の試験期間に、同スパコンの全ノードを用いて ARTED による光・電子ダイナミクス超大規模計算を行う機会を得た。これまで光電磁場のマクスウェル方程式と TDDFT による電子ダイナミクス計算では、電子ダイナミクスは常に 3 次元であるが光伝播に関しては 1 次元計算に限られていた。この全ノードを使用できる機会を利用して、光電磁場を記述するマクスウェル方程式が 2 次元及び 3 次元となる場合について計算を行った。2 次元の場合には光渦を伴う入射パルス光とグラファイト、シリコン表面の相互作用を、3 次元の場合にはシリコンからなるナノピラーや平面状に配置したナノ球体とパルス光の相互作用に関する計算を行った。両者の場合とも、多数のノードを用いた場合にも高いスケールリングを示し、高効率な計算が行えることを確認した。

**【 19 】グラファイト薄膜の非線形光応答計算（植本、矢花、蔵田、河口（IHI 株式会社））**

グラファイトに超短パルス光を照射した際に起こる、光から電子へのエネルギー移行を調べた。グラファイトの単層からなるグラフェンでは 2 次元バンド構造を反映し、非線形光応答の一種である可飽和吸収が顕著に現れることが知られており、すでに超短パルスレーザー発振に応用されている。我々はグラファイトに対して時間依存密度汎関数理論に基づく第一原理計算を行い、パルス電場から電子へのエネルギー移行の様子を調べた。その結果、 $10^{10}$ – $10^{12}$  W/cm<sup>2</sup> 程度の限られた強度範囲で、パルスの時間長を増してもエネルギー移行が増大しないことが見出された。このエネルギー移行の飽和現象を理解するため、印加した電場と誘起された電流の関係を調べたところ、半金属であるグラファイトでは通常はオームの法則が成立するが、飽和が起こる強度ではパルス電場が照射する途中で、オームの法則の成り立つ領域から反オーム応答へと変化すること、またより高い強度では絶縁体応答へと変化する様子が見出された。これらは、可飽和吸収現象のメカニズムの理解や、炭素材料に対する非熱レーザー加工の初期過程を理解する上で有用な知見を与えるものである。

**【 20 】固体非線形光応答の実時間・実空間分析（植本、佐藤、矢花）**

物質の摂動的な非線形応答を調べる第一原理計算手法として、時間依存密度汎関数理論の実時間計算に基づく方法を、昨年度に引き続き検討した。結晶の単位セルに、波形が等しく強度のみ異なるパルス電場を複数照射した時の電流や電子密度変化を求め、数値的な差分により 2 次、及び 3 次の非線形応答を得る方法である。

#### **4. 教育**

1. 柏葉優、修士（理学）、「中性子星内殻におけるスラブ相に対する完全自己無撞着計算」

#### **5. 受賞、外部資金、知的財産権等**



## 受賞

1. 平成 27 年度 HPCI 優秀成果賞。「京」の一般利用課題「極限的パルス光と物質の相互作用を記述するマルチスケール第一原理計算」（研究代表：矢花）が、一万ノード以上の大規模計算において「京」の実効性能を最も引き出した課題と認定された。

## 外部資金

1. 日本学術振興会科学研究費・基盤研究(B)、中務孝、代表、2013-2015 年[期間延長]、1,763,592 円 (H28 年度直接経費)、「原子核の低エネルギー集団励起と核融合・核分裂機構の解明」
2. 科研費・新学術領域研究(研究領域提案型)、中務孝、分担、2012-2016 年、1,000,000 円 (H28 年度直接経費)、「冷却原子を用いた中性子過剰な低密度核物質の状態方程式」
3. JST ImPACT「核変換による高レベル放射性廃棄物の大幅な低減・資源化」、中務孝、課題責任者、2014-2018 年、6,000,000 円 (H28 年度)、「核構造計算による核反応モデルの高精度化」
4. 日本学術振興会科学研究費・若手研究(B)、日野原 伸生、代表、2016-2019 年、2016 年度直接経費 900,000 円、「中性子—陽子対相関・対凝縮の解明」
5. 科研費基盤研究(B)「第一原理計算に基づく極限パルス光と物質の相互作用の解明」、矢花一浩、代表、H27-30 年度、3,300,000 円 (H28 年度直接経費)
6. ポスト京重点課題 7「次世代の産業を支える新機能デバイス・高性能材料の創成」サブ課題 B「光・電子融合デバイス」、矢花一浩、分担、H28-32 年度、7,469,000 円 (H28 年度直接経費)。
7. JST CREST「光・電子融合第一原理計算ソフトウェアの開発と応用」、矢花一浩、代表、H28-33 年度、7,500,000 円 (H28 年度直接経費)
8. 共同研究経費、株式会社 IHI、「時間依存第一原理解析によるフェムト秒レーザと物質との相互作用に関する研究」、450,000 円 (H28 年度直接経費)

## 6. 研究業績

### (1) 研究論文

#### A) 査読付き論文

1. A. Sommer, E. M. Bothschafter, S. A. Sato, C. Jakubeit, T. Latka, O. Razskazovskaya, H. Fattahi, M. Jobst, W. Schweinberger, V. Shirvanyan, V. S. Yakovlev, R. Kienberger, K. Yabana, N. Karpowicz, M. Schultze and F. Krausz, "Attosecond nonlinear polarization and light-matter energy transfer in solids", Nature 534, 86 (2016).
2. M. Lucchini, S. A. Sato, A. Ludwig, J. Herrmann, M. Volkov, L. Kasmi, Y. Shinohara, K. Yabana, L. Gallmann, U. Keller,

- "Attosecond dynamical Franz-Keldysh effect in polycrystalline diamond",  
Science 353, 916 (2016).
3. K. Sekizawa, K. Yabana,  
"Time-dependent Hartree-Fock calculations for multinucleon transfer and  
quasifission processes in the Ni64 +U238 reaction",  
Phys. Rev. C **93**, 054616 (2016)
  4. 廣川祐太、朴泰祐、佐藤駿丞、矢花一浩、  
"電子動力学シミュレーションのステンシル計算最適化とメニーコアプロセッ  
サへの実装"、  
情報処理学会論文誌コンピューティングシステム (ACS) Vol.9, No.4, pp.1-14  
(2016)
  5. K. Matsuyanagi, M. Matsuo, T. Nakatsukasa, K. Yoshida, N. Hinohara, and K. Sato,  
"Microscopic derivation of the Bohr– Mottelson collective Hamiltonian and its  
application to quadrupole shape dynamics",  
Phys. Scr. 91 (2016) 063014 [Invited paper].
  6. T. Nakatsukasa, K. Matsuyanagi, M. Matsuzaki, and Y. R. Shimizu  
"Quantal rotation and its coupling to intrinsic motion in nuclei",  
Phys. Scr. 91 (2016) 073008 [Invited paper].
  7. T. Nakatsukasa, K. Matsuyanagi, M. Matsuo, and K. Yabana,  
"Time-dependent density-functional description of nuclear dynamics",  
Rev. Mod. Phys. 88, (2016) 045004 [Invited paper].
  8. K. Wen and T. Nakatsukasa,  
"Self-consistent collective coordinate for reaction path and inertial mass",  
Phys. Rev. C. 94 (2016) 054618.
  9. G. Watanabe, S. Yoon, F. Dalfovo, and T. Nakatsukasa,  
"Multiple period states of the superfluid fermi gas in an optical lattice",  
J. Phys. Conf. Ser. 752 (2016) 012002.
  10. Y. Kashiwaba and T. Nakatsukasa,  
"Density functional calculations for the neutron star matter at subnormal density",  
JPS Conf. Proc. 14, (2017) 020801.
  11. K. Wen, F. Ni, and T. Nakatsukasa,  
"Nuclear reaction path and inertial mass in the self-consistent collective coordinate  
method",  
PoS(INPC2016) 211 (2017).
  12. S. Ebata, and T. Nakatsukasa  
"Octupole deformation in the nuclear chart based on the 3D Skyrme Hartree-Fock  
plus BCS model",  
Phys. Scr. in press.
  13. K. Wen and T. Nakatsukasa,  
"Adiabatic self-consistent collective path in nuclear fusion reactions",

- Phys. Rev. C, in press.
14. N. Hinohara, W. Nazarewicz,  
“Pairing Nambu-Goldstone Modes within Nuclear Density Functional Theory”,  
Phys. Rev. Lett. 116, 152502 (2016)
  15. Y. Hashimoto and G. Scamps,  
Gauge angle dependence in time-dependent Hartree-Fock-Bogoliubov calculations of  
 $^{20}\text{O}+^{20}\text{O}$  head-on collisions with the Gogny interaction,  
Phys. Rev. C 94, 014610(2016)
  16. K. Minomo, K. Washiyama, K. Ogata,  
"Deuteron-nucleus total reaction cross sections up to 1 GeV",  
J. Nucl. Sci. Technol. 54, 127 (2017)
  17. K. Nomura, T. Niksic, and D. Vretenar,  
"Beyond-mean-field boson-fermion model for odd-mass nuclei",  
Phys. Rev. C 93, 054305 (2016)
  18. K. Nomura, R. Rodriguez-Guzman, and L. M. Robledo,  
"Structural evolution in  $A \sim 100$  nuclei within the mapped  
interacting boson model based on the Gogny energy density functional",  
Phys. Rev. C 94, 044314 (2016)
  19. T. Grahn, S. Stolze, D. T. Joss, R. D. Page, B. Saygi, D.  
O'Donnell, M. Akmal, K. Andgren, L. Bianco, D. M. Cullen, A. Dewald,  
P. T. Greenlees, K. Heyde, H. Iwasaki, U. Jakobsson, P. Jones, D. S. Judson, R. Julin,  
S. Juutinen, S. Ketelhut, M. Leino, N. Lumley, P. J. R. Mason, O. Moller, K. Nomura,  
M. Nyman, A. Petts, P. Peura, N. Pietralla, Th. Pissulla, P. Rahkila, P. J. Sapple,  
J. Saren, C. Scholey, J. Simpson, J. Sorri, P. D. Stevenson, J. Uusitalo, H. Watkins,  
and J. L. Wood,  
"Excited states and reduced transition probabilities in  $^{168}\text{Os}$ ",  
Phys. Rev. C 94, 044327 (2016)
  20. K. Nomura, T. Niksic, and D. Vretenar,  
"Signatures of shape phase transitions in odd-mass nuclei",  
Phys. Rev. C 94, 064310 (2016)
  21. T. Daniel, S. Kisyov, P. H. Regan, N. Marginean, Zs. Podolyak, R.  
Marginean, K. Nomura, M. Rudigier, R. Mihai, V. Werner, R. J. Carroll, L. A. Gurgi,  
A. Oprea, T. Berry, A. Serban, C. Nita, C. Sotty, R. Suvaila, A. Turturica, C.  
Costache, L. Stan, A. Olacel, M. Boromiza, and S. Toma,  
"γ-ray Spectroscopy of Low-lying Excited States and Shape Competition in  $^{194}\text{Os}$ ",  
Phys. Rev. C 95, 024328 (2017).
  22. G. Scamps, VV Sargsyan, GG Adamian, NV Antonenko, D Lacroix,  
“Extraction of pure transfer probabilities from experimental transfer and capture  
data”,

- Phys. Rev. C **94**, pages 064606 (2016). 4 pages
23. G. Scamps, D. Bourgin, K. Hagino, F. Haas and S. Courtin,  
 “Coupled-channels description of the  $^{40}\text{Ca}+^{58,64}\text{Ni}$  transfer and fusion reactions, II”  
 Nuovo Cimento C 39 06.
24. G. Scamps, C. Rodríguez-Tajes, D. Lacroix, F. Farget,  
 “Time-dependent mean field determination of the excitation energy in transfer  
 reactions: application to the reaction  $^{238}\text{U}$  on  $^{12}\text{C}$  at 6.14 MeV/A”,  
 Phys. Rev. C **95**, 024613 (2017). 7 pages
25. S. A. Sato, K. Yabana,  
 ”First-principles calculations for initial electronic excitation in dielectrics induced by  
 intense femtosecond laser pulses”,  
 Proc. SPIE 10014, Laser-Induced Damage in Optical Materials 2016, 100141A (2017).

B) 査読無し論文

1. 矢花一浩、  
 “第一原理計算によるフェムト秒レーザ加工初期過程の解明”、  
 第 85 回レーザ加工学会講演論文集、pp. 126-129 (2016)。
2. 廣川祐太、朴泰祐、佐藤駿丞、矢花一浩、  
 “電子動力学シミュレーションのステンシル計算に対するメニーコアプロセ  
 ッサ向け最適化”、  
 2016 年ハイパフォーマンスコンピューティングと計算科学シンポジウム  
 (HPCS2016) 論文集、2016。
3. K. Yabana,  
 “First-principles simulation for strong and ultra-short laser pulse propagation in  
 dielectrics”,  
 Proceedings, SPIE9835, Ultrafast Bandgap Photonics, 983504
4. T. Nakatsukasa,  
 “Time-dependent density-functional calculation of nuclear response functions”,  
 Proceedings of the International Conference on Nuclear Theory in the  
 Supercomputing Era - 2014 (NTSE-2014) (Pacific National University, 2016) pp.  
 15-22.
5. 柏葉 優、中務 孝、  
 “低密度領域における中性子星核物質の密度汎関数計算”、  
 原子核研究, Vol. 61 Supplement 1, 2016 年夏の学校特集号, pp. 35-36.

(2) 国際会議発表

A) 招待講演

1. K. Yabana,  
“Maxwell + TDDFT Multiscale Simulation for Attosecond Spectroscopy”, 10th  
International Conference on Computational Physics,  
Cotai District, Macao, China, Jan. 16-20, 2017.
2. K. Yabana,  
“Maxwell + TDDFT multiscale description for interactions of intense pulsed light with  
dielectrics”,  
7th Time-Dependent Density-Functional Theory: Prospects and Applications,  
Benasque, Spain, Sept. 11-23, 2016.
3. K. Yabana,  
“Time-dependent density functional theory for interactions of intense pulsed light with  
dielectrics”,  
KAIST Frontiers in DFT & Beyond Workshop,  
KAIST, Daejeon, Korea, Aug. 16, 2016.
4. K. Yabana,  
“First-principles simulation for strong and ultra-short laser pulse propagation in  
dielectrics”,  
SPIE Defence+Security, Ultrafast Bandgap Photonics workshop,  
Baltimore, USA, April 17-21, 2016.
5. T. Nakatsukasa,  
“Time-dependent density-functional theory and linear response theory”,  
Lecture in SERC School on Modern Microscopic Approaches in Nuclear Physics,  
Srinagar, India, May 17-June 6, 2016.
6. T. Nakatsukasa,  
“Microscopic determination of reaction path, potential, and inertial mass”,  
ECT\* workshop on Towards consistent approaches for nuclear structure and reactions,  
Trento, Italy, June 6 - 10, 2016.
7. T. Nakatsukasa,  
“Nuclear reaction path and inertial mass in the self-consistent collective coordinate  
method”,  
International Nuclear Physics Conference (INPC2016),  
Adelaide, Australia, Sep. 11 – 16, 2016.
8. T. Nakatsukasa,  
“Nuclear reaction as large-amplitude collective motion”,  
Heavy-Ion Accelerator Symposium on Fundamental and Applied Sciences  
(HIAS2016),  
Canberra, Australia, Sep. 18 - 20, 2016.

9. K. Nomura,  
"Shape coexistence in the microscopically guided interacting boson model",  
8th Workshop on Quantum Phase Transitions in Nuclei and Many-Body Systems,  
Prague, Czech Republic, 6-9 June 2016.
10. K. Nomura,  
"Nuclear shapes and excitations in the microscopically-guided algebraic theory",  
Shapes and Symmetries in Nuclei: from Experiment to Theory,  
Gif-sur-Yvette, France, 7-11 November 2016.
11. K. Wen,  
"The Inertial Mass and Collective Path in Nuclear Fusion/Fission Reactions",  
International Conference Nuclear Theory in the Supercomputing Era – 2016  
(NTSE-2016),  
Pacific National University, Khabarovsk, Russia, September 19–23, 2016.
12. G. Scamps  
"Gauge angle dependency in fusion and transfer reactions, restoration of broken  
symmetries in dynamical calculation",  
IPNO, Orsay, France, 16 March 2017.
13. G. Scamps  
"Microscopic description of the transfer and fusion reactions including pairing  
correlations",  
FUSION17 conference,  
Hobart, Australia, 20-24 February 2017.
14. G. Scamps  
"Simultaneous description of multi-nucleon transfer and fusion reactions with the  
coupled channel method",  
LENRT workshop,  
Canberra, Australia, 15-17 February 2017.
15. G. Scamps  
"Josephson effect in nuclear reactions, effect of the restoration of the gauge angle  
symmetry in mean-field dynamics",  
CCS-RIKEN joint workshop,  
Tsukuba, Japan, 12-16 December 2016.
16. G. Scamps  
"Microscopic description of the transfer reaction including pairing correlations",  
HIAS Symposium,  
Canberra, Australia, 18-20 September 2016.

17. G. Scamps

“Description of multi-nucleon transfer and fusion reactions with the coupled channel method”,

INPC conference,

Adelaide, Australia, 11-16 September 2016.

18. S. A. Sato ,

"First-principles simulation for attosecond spectroscopy of solids",

EMN Meeting on Ultrafast 2016 ,

Melbourne, Australia, Oct. 10-14, 2016

B) 一般講演

1. T. Nakatsukasa,

“Microscopic determination of reaction path and inertial mass”,

International workshop on Recent Progresses in Nuclear Structure Physics 2016 (NSP2016),

Kyoto, Japan, Dec. 5-23, 2016.

2. N. Hinohara,

“FAM Applications Towards EDF Optimization”,

NUCLEI SciDAC 2016 Project Meeting, Argonne National Laboratory,

Argonne, IL, USA, Jun. 6-9, 2016.

3. N. Hinohara,

“Nuclear collective excitation modes within finite-amplitude method” (poster presentation) ,

14th International Symposium on Nuclei in the Cosmos XIV (NIC-XIV),

Toki Messe, Niigata, Japan, Jun. 19-24, 2016.

4. N. Hinohara and W. Nazarewicz,

“Pairing rotations in ground states of open-shell even-even deformed nuclei”,

Direct Reactions with Exotic Beams (DREB2016),

Saint Mary’s University, Halifax, Canada, Jul. 11-15, 2016.

5. N. Hinohara and W. Nazarewicz,

“Binding energy differences of even-even nuclei as pairing indicators”,

Nuclear Structure 2016 (NS2016),

Knoxville, TN, USA, Jul. 24-29, 2016.

6. N. Hinohara,

“Neutron-proton superfluid DFT”,

DOE topical collaboration meeting “Nuclear Theory for Double-Beta Decay and Fundamental Symmetries”,

Facility for Rare Isotope Beams, Michigan State University,

- East Lansing, MI, USA, Aug. 1-2, 2016.
7. N. Hinohara and W. Nazarewicz,  
 “Pairing Nambu-Goldstone modes and binding-energy differences of even-even nuclei”  
 (poster presentation),  
 International Nuclear Physics Conference (INPC2016),  
 Adelaide Convention Center, Adelaide, Australia, Sep. 11-16, 2016.
  8. N. Hinohara,  
 “New pairing observable: binding energy differences of even-even nuclei”,  
 First Tsukuba-CCS-RIKEN joint workshop on microscopic theories of nuclear structure  
 and dynamics,  
 RIKEN Nishina Center and Center for Computational Sciences,  
 Tsukuba, Japan, Dec. 12-16, 2016.
  9. N. Hinohara,  
 “Recent theoretical developments of finite-amplitude method for QRPA”,  
 Recent Progresses in Nuclear Structure Physics (NSP2016),  
 Kyoto, Japan, Dec. 5-23, 2016.
  10. Y. Hashimoto,  
 “Gogny-TDHF calculation of  $200 + 200$  head-on collision”,  
 First Tsukuba-CCS-RIKEN joint workshop,  
 Tsukuba, Japan, Dec. 12-16, 2016
  11. K. Washiyama, Takashi Nakatsukasa,  
 "Multipole modes of deformed superfluid nuclei with the finite amplitude method in  
 three-dimensional coordinate space",  
 SSNET Workshop 2016,  
 Gif-sur-Yvette, France, Nov.7-11, 2016
  12. K. Washiyama, Takashi Nakatsukasa,  
 "Finite amplitude method for QRPA in three-dimensional coordinate",  
 First Tsukuba-CCS-RIKEN joint workshop on microscopic theories of nuclear  
 structure and dynamics,  
 Wako & Tsukuba, Japan, Dec.12-16, 2016
  13. K. Washiyama,  
 "Fusion hindrance in heavy systems with time-dependent Hartree-Fock",  
 International Conference on heavy-ion collisions at near-barrier energies  
 (FUSION17),  
 Hobart, Australia, Feb. 20-24, 2017
  14. K. Washiyama,  
 "Present status of three-dimensional finite-amplitude-method QRPA",



2nd workshop on many-body correlations in microscopic nuclear model,  
Sado, Japan, Aug.21-23, 2016.

15. Shunsuke A. Sato , Kazuhiro Yabana, Yasushi Shinohara, Kyung-Min Lee,  
Tomohito Otake, George F. Bertsch,  
"First-principles calculations for initial electronic excitations in dielectrics induced by  
intense femtosecond laser pulses",  
SPIE Laser Damage 2016,  
Boulder, Colorado, United States, Sep.25-28, 2016
16. F. Ni, T. Nakatsukasa,  
"Self-consistent Collective Coordinate in Richardson model",  
First Tsukuba-CCS-RIKEN joint workshop,  
Tsukuba, Japan, Dec. 12-16, 2016.
17. F. Ni,  
"Pairing dynamics in Richardson model",  
NIC-XIV School 2016,  
Niigata, Japan, June 13-17, 2016
18. F. Ni,  
"Collective coordinates in Richardson model",  
2nd workshop on many-body correlations in microscopic nuclear model,  
Sado, Japan, Aug.21-23, 2016.
19. Y. Kashiwaba, T. Nakatsukasa,  
"Density functional calculations for the neutron star matter at subnormal density",  
2nd workshop on many-body correlations in microscopic nuclear model,  
Sado, Japan, Aug.21-23, 2016.
20. T. Saito,  
"Numerical calculation of giant quadrupole resonance",  
2nd workshop on many-body correlations in microscopic nuclear model,  
Sado, Japan, Aug.21-23, 2016.
21. K. Yaoita,  
"Coriolis effect for vibrational bands in transitional nuclei",  
2nd workshop on many-body correlations in microscopic nuclear model,  
Sado, Japan, Aug.21-23, 2016.

(3) 国内学会・研究会発表

A) 招待講演

1. 矢花一浩、  
“パルス光と物質の相互作用に対する第一原理計算：プログラム開発と応用”、  
第3回材料系ワークショップ～計算物質科学を拓く第一原理計算とその機能モジュール～、  
秋葉原 UDX、2017 年 2 月 23 日
2. 矢花一浩、  
“極限的パルス光と物質の相互作用を記述するマルチスケール第一原理計算”、  
第3回「京」を中核とする HPCI システム利用研究課題 成果報告会、  
東京、2016 年 10 月 21 日
3. 矢花一浩、  
“第一原理計算によるフェムト秒レーザ加工初期過程の解明”、  
第85回レーザ加工学会講演会、  
大阪大学吹田キャンパス、2016 年 6 月 9-10 日
4. 中務 孝、  
“原子核の形と対称性の破れ”、  
日本物理学会科学セミナー、  
東京大学駒場キャンパス、東京、2016 年 8 月 20-21 日

#### B) その他の発表

1. 矢花一浩、  
“JST-CREST 研究課題の目標と計画”、  
JST-CREST 研究課題キックオフ+ポスト「京」サブ課題進捗報告合同ミーティング  
「光・電子融合系の第一原理計算」、  
三宮、2017 年 1 月 4-5 日
2. K. Yabana,  
”TDDFT in solids for electron dynamics induced by ultrashort laser pulses”,  
Seminar at Max-Planck Institute for the Structure and Dynamics of Matter ,  
Hamburg, Germany, November 4, 2016
3. 中務 孝、  
“核構造計算による核反応モデルの高精度化”、  
ImPACT 藤田プログラム全体会議、  
JST 別館、東京、2016 年 10 月 13-14 日
4. 中務 孝、  
“核構造計算による核反応モデルの高精度化”、  
ImPACT 藤田プログラム全体会議、  
JST 別館、東京、2017 年 3 月 24-25 日
5. 日野原 伸生、  
“偶々核の束縛エネルギー差と対回転モード”、  
日本物理学会 2016 年秋季大会、  
宮崎大学、2016 年 9 月 21-24 日.

6. 日野原 伸生、  
“二重ベータ崩壊の原子核行列要素と中性子陽子対の非線形ゆらぎ”、  
千葉大学原子核理論セミナー、  
千葉大学西千葉キャンパス、2016 年 11 月 24 日.
7. 日野原 伸生、  
“対相関と二重束縛エネルギー差”、  
研究会「クラスター・平均場の両側面からみる原子核構造の多様性とそのダイナミクス」、  
大阪市立大学杉本キャンパス、2017 年 1 月 19-20 日.
8. 日野原 伸生, Markus Kortelainen, Witold Nazarewicz,  
“原子核エネルギー密度汎関数の最適化に向けた巨大共鳴の効率的評価”、  
日本物理学会第 72 回年次大会、  
大阪大学豊中キャンパス、2017 年 3 月 17-20 日.
9. 橋本幸男、  
“Gogny-TDHF 法による  $200+200$  の計算における摩擦係数について”、  
日本物理学会第 72 回年次大会、  
大阪大学豊中キャンパス、2017 年 3 月 17-20 日.
10. 鷺山広平、中務孝、  
“3 次元有限振幅法 QRPA の非軸対称原子核への応用”、  
日本物理学会秋季大会、  
宮崎大学、2016 年 9 月 21-24 日
11. 鷺山広平、中務孝、  
“3 次元 QRPA に対する有限振幅法の開発と応用”、  
日本物理学会年次大会、  
大阪大学豊中キャンパス、2017 年 3 月 17-20 日
12. 植本光治、佐藤駿丞、矢花一浩、  
“Maxwell+TDDFT マルチスケール第一原理計算による二次元光伝播シミュレーションの試み”、  
日本物理学会第 72 回年次大会、  
大阪大学豊中キャンパス、2017 年 3 月 17-20 日
13. 佐藤 駿丞、篠原康、矢花一浩  
“固体に対するアト秒過渡吸収分光の第一原理計算”、  
日本物理学会 第 72 回年次大会、  
大阪大学豊中キャンパス、2017 年 3 月 17-20 日
14. 倪放、中務孝、

“対相関ダイナミクスを記述する集団座標”、  
クラスター・平均場の両側面からみる原子核構造の多様性とそのダイナミクス、  
大阪市立大学、2017 年 1 月

15. 倪放、中務孝、  
“0+対励起状態を記述する集団座標と四重極相関”、  
日本物理学会 2016 年秋季大会、  
宮崎大学、2016 年 9 月
16. 柏葉 優、中務 孝、  
“中性子星内殻におけるスラブ相に対する完全自己無撞着計算”、  
日本物理学会春季第 72 回年次大会、  
大阪大学、2017 年 3 月 17-21 日
17. 八百板 恭介、中務 孝、  
“5 次元四重極集団ハミルトニアンを用いた回転バンド間 E2 遷移の研究”、  
日本物理学会第 72 回年次大会、  
大阪大学豊中キャンパス、2017 年 3 月 17-20 日

#### (4) 著書、解説記事等

1. 矢花一浩、佐藤駿丞、篠原 康、乙部智仁、  
“高強度超短パルスレーザーと誘電体の相互作用を記述する第一原理計算”、  
固体物理 Vol. 52 (2017).
2. 矢花一浩、“第一原理計算によるレーザー加工初期過程解明”、レーザー研究  
Vol.44 No.12 pp.789-793 (2016)
3. Noboru Takigawa, Kouhei Washiyama,  
"Fundamentals of Nuclear Physics",  
Springer Japan (2017)

## 7. 異分野間連携・国際連携・国際活動等

### 【国際連携】

1. ドイツマックスプランク量子光学研究所のアト秒科学実験グループと、高強度パルスレーザーと固体の相互作用に関する共同研究（矢花）
2. スイスチューリッヒ工科大学のアト秒科学実験グループと、高強度パルスレーザーと固体の相互作用に関する共同研究（矢花）
3. オーストリアウィーン工科大学の理論グループと、電子ダイナミクスの計算科学的研究に関する共同研究（矢花）
4. ポーランド・ワルシャワ工科大学の原子核理論グループと共同で、実空間 TDHFB 計算（中務）

5. 米国ノースカロライナ大学の Engel 教授と二重ベータ崩壊の核行列要素に関する共同研究 (日野原)。
6. 米国ミシガン州立大学 Nazarewicz 教授およびフィンランド・ユバスキュラ大学の Kortelainen 研究員と原子核密度汎関数の諸問題に関する共同研究 (日野原)
7. 米国 SciDAC project "Nuclear Computational Low-Energy Initiative (NUCLEI)", 外国人共同研究者として参加 (日野原)
8. クロアチア・ザグレブ大学の理論グループと、奇核の構造に関する共同研究(野村)
9. スペインマドリッド自治大学およびクウェート大学と、形状相転移と変形共存に関する共同研究(野村)
10. 英国サリー大学、ドイツケルン大学をはじめとした、欧州の複数の研究機関の実験グループと、中重核分光に関する共同研究 (野村)

## 8. シンポジウム、研究会、スクール等の開催実績

1. 国際会議 Nuclear Structure 2016 (NS2016) Conference (Knoxville, TN, USA, July 24-29, 2016) の国際諮問委員を務めた (中務)。
2. 国際ワークショップ Tsukuba-CCS-RIKEN joint workshop on microscopic theories of nuclear structure and dynamics (Wako and Tsukuba, December 12-16, 2016) の組織委員を務めた (矢花、中務、橋本、日野原 (委員長))。

## 9. 管理・運営

矢花一浩

計算科学研究センター 量子物性研究部門 部門主任  
 計算科学研究センター 運営委員会委員  
 計算科学研究センター 人事委員会委員  
 計算科学研究センター 運営協議会委員  
 計算科学研究センター 共同研究主幹  
 計算科学研究センター 先端計算科学推進室長  
 数理物質系物理学域 運営委員会委員

中務孝

計算科学研究センター 原子核物理研究部門 部門主任  
 計算科学研究センター 運営委員会委員  
 計算科学研究センター 人事委員会委員  
 計算科学研究センター 運営協議会委員  
 計算科学研究センター 共同研究委員会委員  
 計算科学研究センター 学際計算科学連携室員  
 数理物質系物理学域 運営委員会委員  
 数理物質系物理学域 原子核理論グループ長  
 数理物質系物理学域 評価委員

## 10. 社会貢献・国際貢献

矢花一浩

京都大学基礎物理学研究所運営協議会委員

テニユアトラック普及・定着事業委員会委員

核理論委員会委員

高エネルギー加速器研究機構大型シミュレーション研究推進委員会委員

中務 孝

高校生対象模擬授業、2016. 8. 1、筑波大学計算科学研究センター

JAEA タンデム専門委員会委員

JAEA 黎明研究評価委員会委員

Editor for Journal of Physical Society of Japan

Editor for International Journal of Modern Physics E

核理論委員会委員

日本物理学会 理論核物理領域・領域代表

高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・運営会議議員

雑誌「原子核研究」編集委員

計算基礎科学連携拠点運営委員（ポスト京重点課題）

## 11. その他

海外長期滞在

1. 日野原 伸生, National Superconducting Cyclotron Laboratory,  
Michigan State Univ., East Lansing, MI, USA, 2016 年 4 月 1 日～8 月 30 日
2. 野村昂亮  
University of Zagreb, Croatia, 2016 年 4 月 1 日 ～ 2017 年 3 月 31 日

## VI. 原子核実験グループ

教授	三明康郎、小沢顕
准教授	江角晋一、笹公和
講師	中條達也
助教	Oliver Busch、坂井真吾、森口哲朗、鈴木伸司
研究員	松中 哲也
技官	加藤純雄
大学院生	福岡翔太 (D3)、木村創大 (D3)、向井もも (D3)、 中込宇宙 (D3)、田中直斗 (D3)、横山広樹 (D3)、 新井郁也 (D2)、野中俊宏 (D2)、細川律也 (D2)、 Murad Ahmed(D1)、青山遼 (D1)、杉浦哲郎 (D1)、李準一 (D1)、 伊藤喬一郎 (M2)、金秉徹 (M2)、小山亮平 (M2)、 工藤咲子 (M2)、松永一成 (M2)、福田悠裕 (M2)、 天野将道 (M1)、黒尾奈未 (M1)、細谷青児 (M1)、 佐藤 一輝 (M1)、レバザ義美 (M1)
卒業研究生	上岡大起、市沢太地、加藤浩樹、川名大地、川村陽太、 鈴木刀真、中川和也、西松巧矢、ジョン ホジュン

### 【1】低エネルギー原子核実験グループ

(小沢顕、笹公和、森口哲朗、鈴木伸司)

#### (1) 稀少 RI リング

稀少 RI リング (R3) は、約 10 年間の開発研究の末、平成 27 年 3 月に完成した。これまで 3 回のコミッションング実験を行なっている。平成 28 年度は、3 回目のコミッションング実験として、不安定核  $^{78}\text{Ge}$  周辺の質量既知核の質量測定を試みた。 $^{238}\text{U}$  の一次ビームから核分裂破断片として、 $^{78}\text{Ge}$  周辺の不安定核を生成した。生成直後に、エネルギー吸収板により、不安定核を約 180 A MeV まで減速させた。 $^{78}\text{Ge}$  を基準とし、 $^{78}\text{Ge}$  が R3 の入射ラインである BigRIPS、SHARAQ の中心軌道を通るように、ビームラインの磁場を設定した。さらに、個別入射のためのキッカー磁石のタイミングも、 $^{78}\text{Ge}$  に調整した。これらの調整により、 $^{78}\text{Ge}$  及び、その周辺の 4 つの不安定核 ( $^{79}\text{As}$ 、 $^{77}\text{Ga}$ 、 $^{76}\text{Zn}$ 、 $^{75}\text{Cu}$ ) を R3 に入射させ、さらに出射させることができた。質量測定のためには、R3 は等時性になければならない。基準となる  $^{78}\text{Ge}$  (約 180 A MeV) に対して等時性が成り立つように R3 内のトリムコイルを調整した。 $^{78}\text{Ge}$  に対する運動量と R3 内の飛行時間の相関を図 1 に示した。図 1 より、 $^{78}\text{Ge}$  では運動量の違いに対して、飛行時間の差はほとんどなく、等時性が実現できていることがわかる。入射ラインでは、各不安定核の速度も測定しており、イベントごとに、速度の補正が可能である。速度補正を施すことにより、 $^{78}\text{Ge}$  を質量の基準として、飛行時間の測定から  $^{79}\text{As}$  などの不安定核の質量が導出できる。質量導出については解析中である。平成 28 年 10 月には、重元素合成過程解明に関連して、R3 による Ni 同位体の質量測定のプロポーザルを理研 RI ビームファクトリーに提出した。プロポーザルは、12 月の PAC で審査され、採択された。平成 29 年度以降、Ni 同位体の質量測定を予定している。

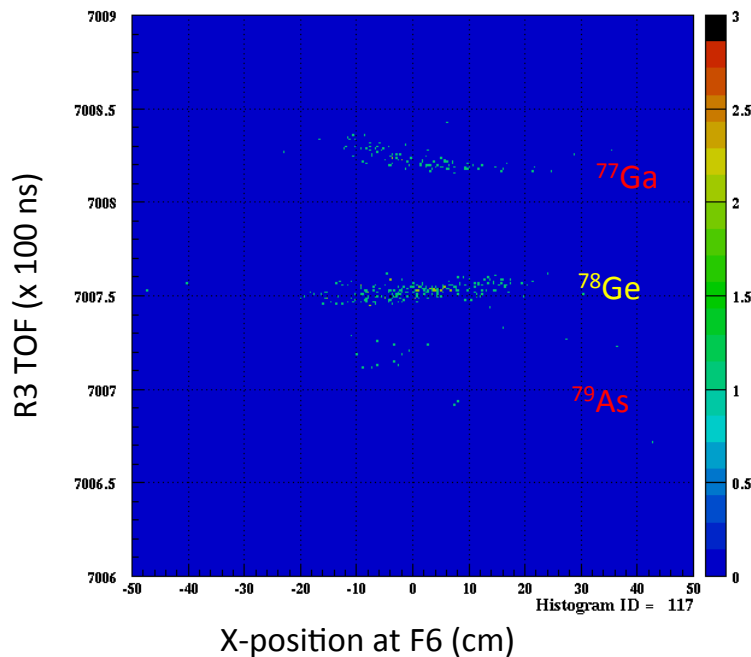


図1 R3での全飛行時間(R3 TOF)と運動量との相関。BigRIPSのF6焦点は、運動量分散を持っており、X方向の位置は運動量に対応している。

## (2) 飛行時間検出器の開発

稀少 RI リングを用いた質量測定実験では、飛行時間の測定から速度とリング内周期をそれぞれ決定して質量を求める。飛行時間測定に用いる検出器に求められる性能は、(1) 100 ps 以下の時間分解能、(2) 検出器通過による速度変化が  $10^{-4}$  以下であること、(3) 100% の検出効率、(4)  $\phi 30$  mm 以上のアクセプタンスを有することである。これらの要請を満足する飛行時間検出器の開発を行なっている。開発中の検出器は、荷電粒子が薄膜を通過した時に前方と後方に放出される二次電子を、電場と磁場を用いてマイクロチャンネルプレート (MCP) 検出器へと導き、荷電粒子を検出する。この検出器は、電磁場による二次電子の等時性輸送と薄膜を用いるため、所望の速度誤差に抑えることが原理的に可能である。重イオンの薄膜通過においては十分な量の二次電子が生成されるため、理想的な検出効率も見込める。

昨年度までは、 $\phi 25$  mm 以下の薄膜と  $\phi 15$  mm の MCP を使用した小型試作機を用いて開発を進めてきた。膜から発生した二次電子は放出角度や初期エネルギーに依らず等時性を持って MCP に到達するが、厳密には初期エネルギーの違いがわずかに影響し時間分解能に上限を与える。この効果を小さくするため、電場をこれまでよりも大きく約 700 V/mm 程度まで印加可能にした。MCP への輸送方向と垂直な方向には電磁力が働かないので二次電子の垂直方向の運動は発散し、MCP の検出領域から逃れる二次電子が存在する。この影響を小さくして検出効率を改善するため、磁場を約 180 Gauss まで大きくして早い二次電子の収集を図った。重イオンビームを用いた性能試験では、炭素薄膜 (厚さ  $50 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ ) を用いて時間分解能 40 ps 以下と検出効率 99% を記録し、アクセプタンス以外の性能は要求を満足した。

小型試作機での経験を生かし、今年度は、RIBF での質量測定実験に用いる大型実機の作成を行なった。大型実機では、電場と磁場の大きさは小型試作機と同程度に保ち、 $\phi 45$  mm の薄膜と  $\phi 42$  mm の MCP を備えることにより有効領域を拡大した (図 2)。重イオンビームを用いた性能試験では、炭素薄膜 (厚さ  $30 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ ) を用いた場合、前方放出と後方放出のどちらも時間分解能は  $\sigma \sim 60$  ps であり、検



出効率は最大 99% を得た。しかしながら二次電子の輸送時間は約 180 ps の位置依存性があり、満足できる性能ではなかった。今後は、電磁場の均一度を上げて二次電子の輸送時間が薄膜位置に依らないよう改善し、質量測定に使用できるよう完成を目指す。

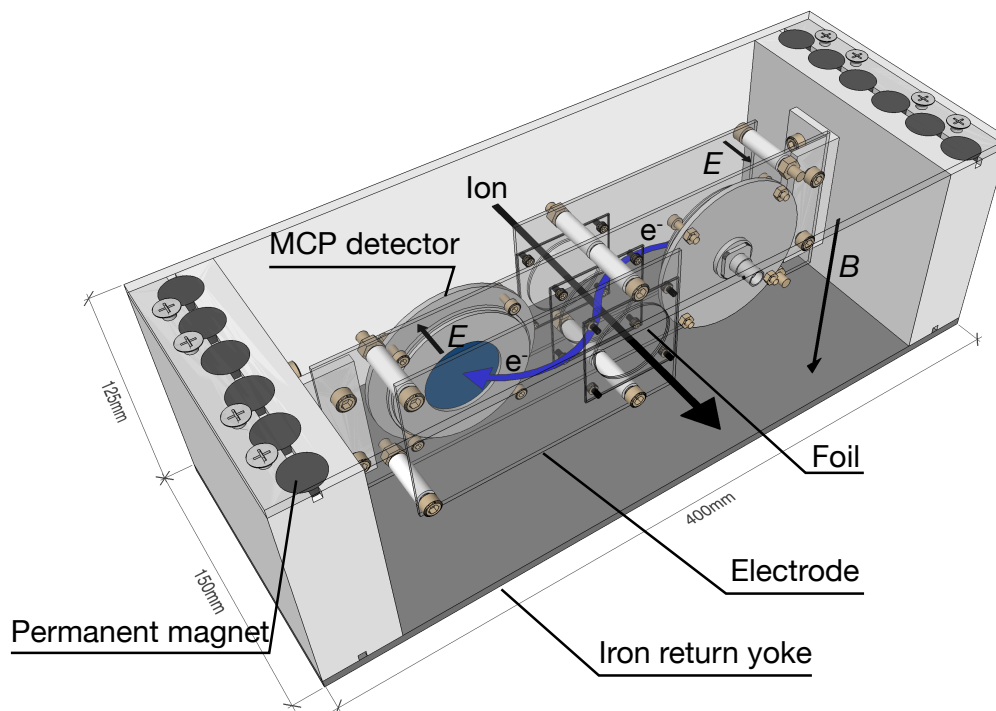


図 2 飛行時間検出器の大型実機の模式図。中心電極の薄膜から発生した二次電子を検出する。外側の電極の薄膜は、均一な電場の生成のために用いる。

### (3) 陽子吸収反応による不安定核の生成

我々は、不安定核の核モーメント測定を目標として、偏極陽子ビームによる陽子吸収反応による核偏極した不安定核の生成を試みている。これまで、1 MV タンデトロンにおいて Mg と Si 標的を使用して、陽子共鳴吸収反応により不安定核の生成を試みた。Ge 検出器での  $\gamma$  線測定から、それぞれの標的に不安定核  $^{25}\text{Al}$  ( $T_{1/2}=7.1$  s) と  $^{30}\text{P}$  ( $T_{1/2}=150$  s) が生成できていることが確認できた。平成 28 年度は、平成 28 年 3 月から供用が開始された 6MV タンデム加速器に移行して、実験を行なった。平成 28 年度は、無偏極陽子ビームを使って実験を行なった。6MV タンデム加速器により 3 MeV に加速された陽子ビームを、A6 コースに置かれたチェンバー内に設置した厚さ 0.5mm の Si 標的に照射した。Si は 3 つの安定同位体を持つ ( $^{28}\text{Si}$  : 存在比 92.2%,  $^{29}\text{Si}$  : 4.7%,  $^{30}\text{Si}$  : 3.1%)。陽子ビームは、Si 標的中で止まるまでに、共鳴反応を含む陽子吸収反応を起こす。陽子吸収反応で生成され得る  $^{29}\text{P}$ 、 $^{30}\text{P}$ 、 $^{31}\text{P}$  のうち、 $^{29}\text{P}$  ( $T_{1/2}=4.1$  s)、 $^{30}\text{P}$  は不安定核であり  $\beta$  崩壊する。 $\beta$  崩壊に伴う  $\beta$  線を測定するために、標的上部に 2 枚のプラスチックシンチレーターを設置した (厚さはそれぞれ、1mm と 2mm)。2 枚のシンチレーターの信号のコインシデンスを  $\beta$  線と判断する。陽子ビーム (強度、約 50 nA) を 100 秒間照射後に観測した  $\beta$  線の時間スペクトルを図 3 に示した。 $\beta$  崩壊の早い成分と遅い成分が観測された。 $^{29}\text{P}$  と  $^{30}\text{P}$  の半減期を仮定してフィットした結果を実線で示した。フィットした結果より評価した  $^{29}\text{P}$  と  $^{30}\text{P}$  の  $\beta$  線生成量は、それぞれ、0.12 cps/nA、0.30 cps/nA となった。今後は、偏極陽子ビームを使用して、生成した

不安定核 ( $^{29}\text{P}$  と  $^{30}\text{P}$ ) の核偏極量を測定するとともに、Mg を含む標的でも実験して  $^{25}\text{Al}$  の生成量評価と核偏極生成を行う。有意な核偏極が観測できれば、 $^{30}\text{P}$  および  $^{25}\text{Al}$  などの核モーメント測定を行う。

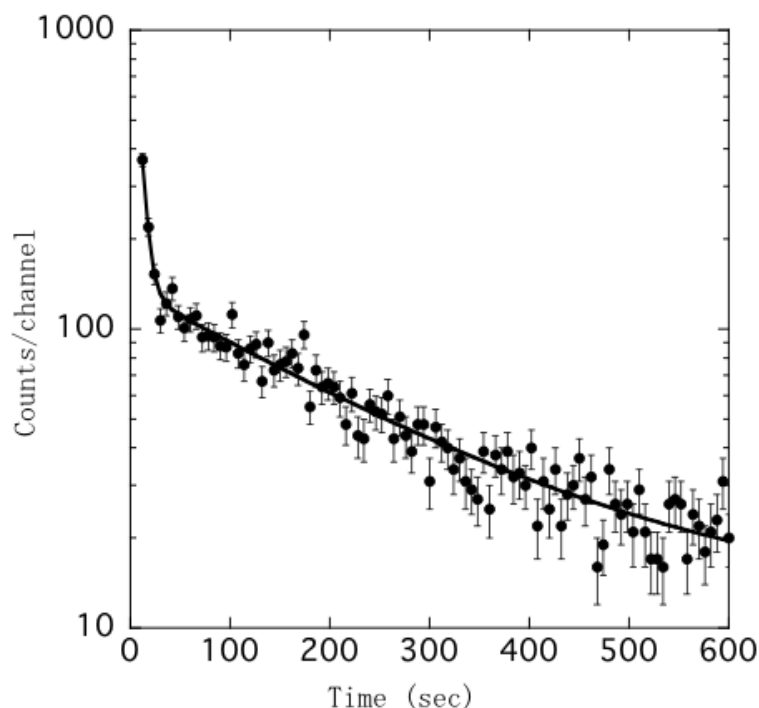


図3 3MeV 陽子、Si 標的における  $\beta$  線の時間スペクトル。実線は  $^{29}\text{P}$  と  $^{30}\text{P}$  の半減期を仮定してフィットした結果。

#### (4) KISS の開発・研究状況

KISS は天体核物理の興味から中性子数  $N = 126$  周辺核の  $\beta$  崩壊核分光を行うために、KEK により開発されている元素選択型質量分離器である。KISS ではアルゴンガス捕集型レーザーイオン源と質量分離装置を用いて、多核子移行反応による生成物から単一核種だけを引き出すことが可能である。引き出した単一核種について  $\beta$  線検出器と線検出器からなる検出器系で  $\beta$  崩壊核分光を行う。

これまでは、一次ビームが通過する薄膜内での発熱のために、20pA 以上の一次ビーム強度を使用することができなかった。未知の中性子過剰核の  $\beta$  崩壊核分光のためには、一次ビーム強度の増強が不可欠であり、このために、回転標的/エネルギー減衰板、ドーナツ型ガスセルが導入された。ドーナツ型ガスセルでは、一次ビームが貫通口を通過することにより、ガスセル内への一次ビームの影響を抑えることが可能である。9月に行ったオンライン試験では100pAまでのビームを入射することができ、不安定核  $^{199}\text{Pt}$  をこれまでの10倍の収量で引き出すことに成功した。

KISS から中性子過剰核の引き出しレートは数 cps 以下であるため、有意で効率の良い  $\beta$  崩壊核分光のためには、低バックグラウンド・高効率な  $\beta$  線検出器が必要である。KISS では新たに複数分割型のガス検出器を開発した。複数に分割した検出器のヒットパターンを解析することで、バックグラウンド事象と埋め込み位置からの  $\beta$  線とを区別できる。 $\beta$  線検出器として以前に KISS で使用していたプラスチックシンチレータと比較すると、エネルギー閾値を  $1/4$  程度に抑えることができ、検出効率は約2倍 ( $Q_\beta = 1\text{MeV}$ ) になる見込みである。本検出器の立体角は80%で、オフラインで測定した固有効率は

95% だった。実際の検出器位置で、宇宙線のための VETO カウンターによる VETO を有効にし、鉛シールドを設けた状態で測定したバックグラウンドレートは 0.1cps だった。標的周辺の核種について十分に  $\beta$  崩壊分光が行うことができる。オンライン試験で本検出器を用いて複数の核種について半減期測定を行い、先行研究の値と一致することを確認した。

KISS では、励起用レーザーの波長走査と  $\beta$  線検出器での  $\beta$  線計数を組み合わせることで、レーザー共鳴イオン化法による超微細構造測定が可能である。平成 28 年度に行われたオンライン試験では、 $^{199}\text{Pt}$ 、 $^{199\text{m}}\text{Pt}$ 、 $^{196-198}\text{Ir}$  について超微細構造測定を行った。図 4 に  $^{196}\text{Ir}$  の測定結果を示す。超微細構造と同位体シフトから、核磁気モーメントと荷電半径の変化を導出する。結果を理論計算と比較し、これらの核種の基底状態及びアイソマー状態の核構造を明らかにする。

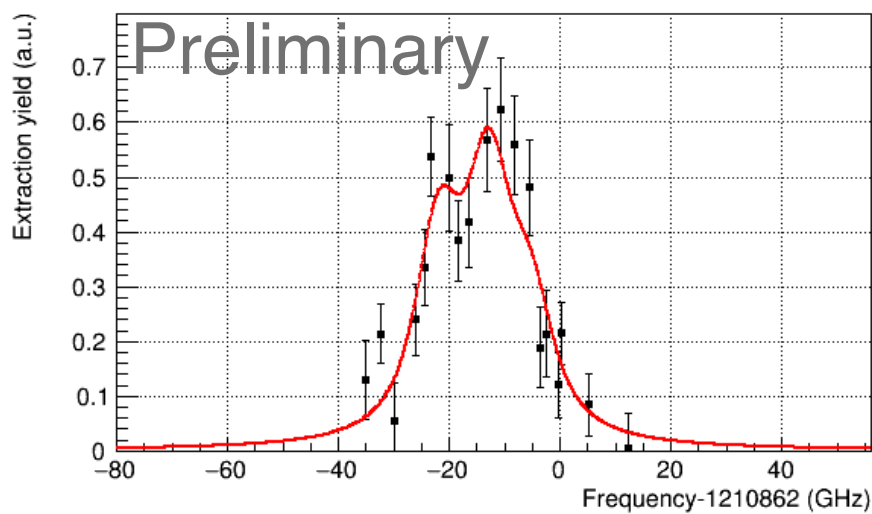


図 4  $^{196}\text{Ir}(I^\pi = (0, 1)^{-1})$  の超微細構造測定結果。赤線は  $I = 1$  を仮定した場合のフィッティング結果

#### (5) MRTOF を用いた中性子欠乏核の精密質量測定

陽子過剰側な原子核の質量は I 型 X 線バーストを駆動する早い陽子捕獲過程 (rp 過程) において重要な役割を演じており、高精度 ( $\delta m/m < 10^{-7}$ ) の質量データが求められている。そこで現在理化学研究所で開発が進められている多重反射型質量測定器 MRTOF とガス充填型反跳核分離装置 GARIS-II を組み合わせた SHE-mass facility を用いての中性子欠乏な中重核の精密質量測定を行なった。実験は理研重イオンリニアックより供給された  $3\ \mu\text{A}$  の高強度  $^{36}\text{Ar}$  ビームを用い、標的については Ti バッキングサポートの  $\text{Mo}^{\text{nat}}\text{S}_2$  標的を使用した。質量測定は二つの融合蒸発反応、 $^{\text{nat}}\text{S}(^{36}\text{Ar}, \text{X})$  および  $^{\text{nat}}\text{Ti}(^{36}\text{Ar}, \text{X})$  の反応生成物に対して行い、質量数  $A=65-67$  および  $A=79-81$  の範囲で計 25 種類のイオンについて測定を行なった。質量決定にはシングルリファレンス法を採用した。図 5 に本実験の測定結果を示す。本実験の測定精度は  $\delta m/m \sim 10^{-8} - 10^{-7}$  の範囲にわたり、最も高精度で測定された  $^{65}\text{Ga}$  の場合  $1.9 \times 10^4$  イベントで  $\delta m/m = 3.5 \times 10^{-8}$  ( $\delta m = 2.1\ \text{keV}$ ) の相対質量精度を持って質量を決定した。また従来間接的手法を用いて質量が評価されてきた  $^{67}\text{Ge}$  および安定核である  $^{81}\text{Br}$  について初めて直接測定を行い従来の値からそれぞれ  $-17\ \text{keV}$  および  $+22\ \text{keV}$  異なっていることを示した。

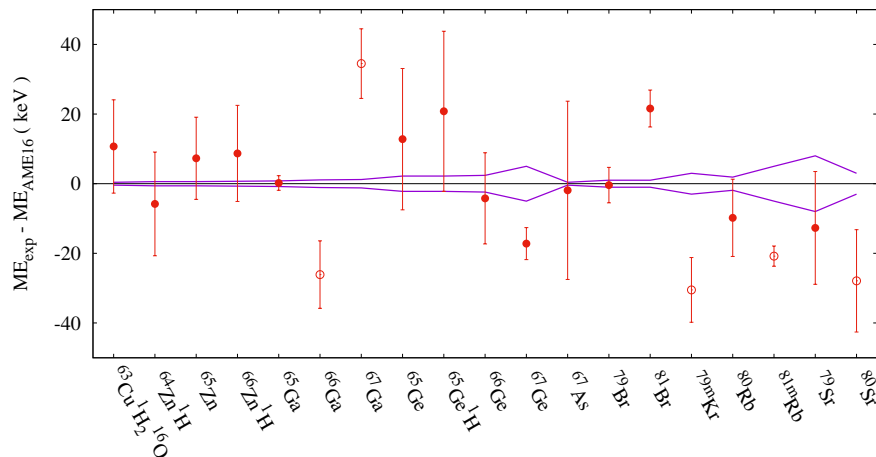


図5 測定された質量超過値と文献値の差。紫の実線は文献値、The 2016 Atomic Mass Evaluationの誤差を表している。解析から得られた質量超過値の確度が低いと判断したものについては白丸で示している。

#### (6) 宇宙用素子照射試験装置の開発

宇宙用機器や原子力施設及び原発の廃炉作業等で使用する機器に搭載する民生用半導体素子について、放射線耐性試験の需要が高まっている。筑波大学では、JAXA との共同研究により、宇宙用素子照射試験装置の開発を進めている。

放射線環境におけるデバイスのシングルイベント発生頻度は、LET の低い数  $10 \text{ MeV}/(\text{mg}/\text{cm}^2)$  以下の領域に閾値があり、タンデム加速器による加速粒子エネルギー範囲と一致する。開発した宇宙用素子照射装置は、筑波大学 6 MV タンデム加速器の L2 コース ( $\text{ME}/q^2 = 176 \text{ amu MeV}$ ) に設置しており、ビーム拡散用の散乱体を導入可能な微弱ビーム形成部と直径 1,020 mm の真空槽からなる照射試験部、集中制御・計測部と真空排気系システム部から形成されている。照射試験部には、遠隔操作で XY の 4 軸が駆動する A5 版サイズ (148 × 210 mm) の試料ホルダーが設置されている (図 6)。半導体素子への照射では、照射粒子を均一に分散させる必要がある。また、照射量としては微弱な  $10^2\text{-}10^4 \text{ ions}/\text{cm}^2/\text{s}$  程度であり、現在、大面積の均一照射野を形成するイオン照射技術の開発を実施している。イオン照射試験では、加速電圧 5 MV を用いて、 $\text{C}^{4+}$ 、25 MeV での照射試験を実施した。2  $\mu\text{m}$  の Au 散乱体を用いて、57 × 57 mm のほぼ正方形のビーム照射野が得られた。Au 散乱体と集束用四重極電磁石のビーム拡散調整により、ビーム均一度は約 90% を達成した (図 7)。本照射装置は、民生用半導体素子を宇宙転用できるかの一次評価試験において、有用な設備になると期待されている。

#### (7) 構造材料計測用マイクロビーム分析装置の開発

産業イノベーション創出において重要な航空機等で使用される構造材料の革新的開発推進において、未活用情報を明らかにする先端計測技術の開発が求められている。2016 年 3 月より稼働を開始した筑波大学 6 MV タンデム加速器において、構造材料計測用マイクロビーム分析装置の開発整備を進めている (図 8)。マイクロビーム形成用レンズとして Oxford Microbeams 社製 OM-2000 を用いており、ビーム収束径としてサブミクロンの MeV 級イオンビームの形成を目指している。マイクロビーム分析装置

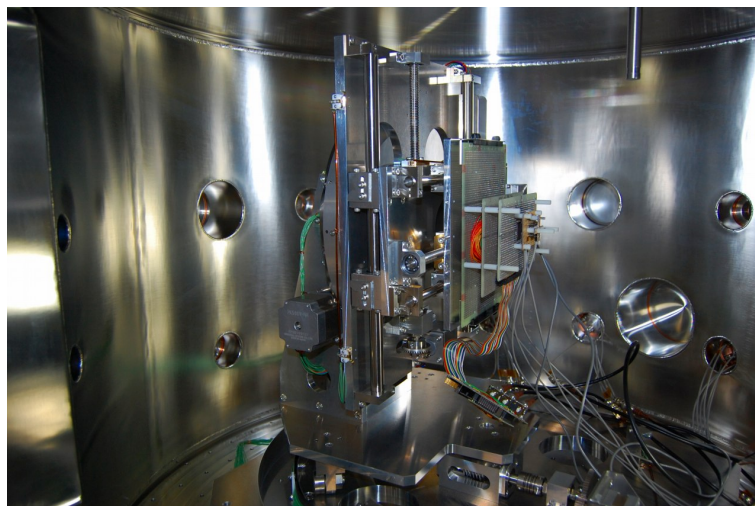


図6 宇宙用素子照射装置の試料照射台。

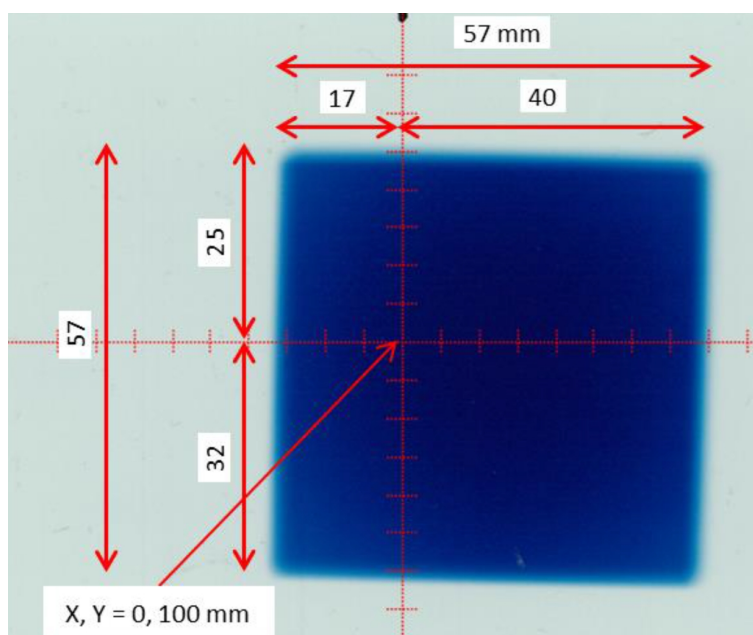


図7 ガフクロミックフィルムを用いたビーム照射面内形状の測定（JAXA 共同研究）。

では、BGO 検出器を用いた NRA による水素分析の他に、PIXE を用いた構造材料中の軽元素と微量添加元素の分析及び元素分布イメージング測定を実施する。ホウ素・炭素等の軽元素の特性 X 線を計測できる検出器としては、シリコンドリフト型検出器を導入している。また、より高い検出効率を目指して、産業技術総合研究所において超伝導トンネル接合 (STJ) 検出器の開発も進めている。その他、標的のビーム照射野に対して、ビーム軸に沿って正面から試料を観察可能な実験真空槽の設計と開発も実施した。

現在、マイクロビーム分析装置は調整試験を実施しており、ビーム径として  $2\mu\text{m}$  までのビーム収束に成功している。また、2 次元イメージング試験測定にも成功しており（図 9）、今後、サブミクロンのビーム収束径の形成を図り、構造材料中の水素・軽元素及び添加微量元素のイメージング測定を実施す



る予定である。

本研究は、内閣府総合科学技術・イノベーション会議の SIP「革新的構造材料」の支援により実施している。

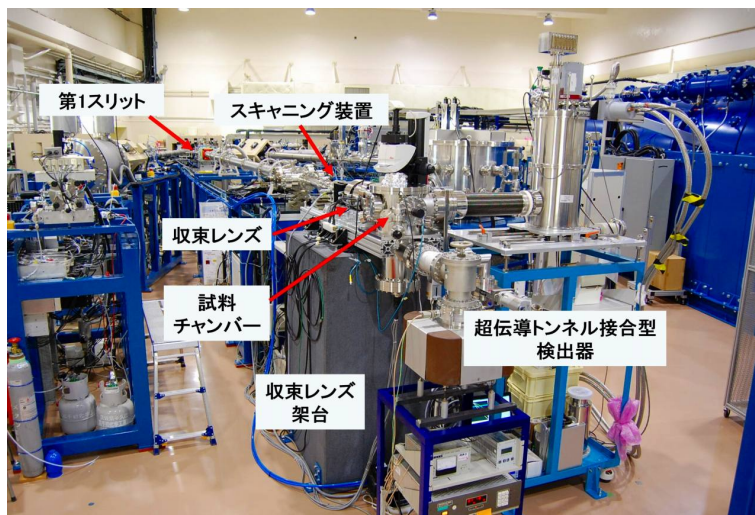


図 8 構造材料計測用マイクロビーム分析装置。

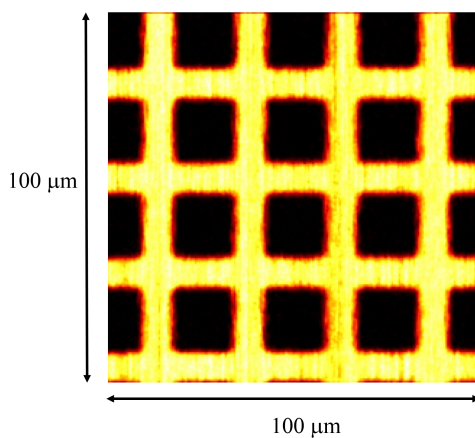


図 9 銅メッシュ（1000 メッシュ/インチ）の STIM 測定で得られた画像（100  $\mu\text{m}$   $\times$  100  $\mu\text{m}$ ）

#### (8) 加速器質量分析法による長寿命放射性核種 $^{41}\text{Ca}$ の超高感度検出

加速器質量分析法 (AMS) は同位体  $10^{-16}$  程度まで検出可能な超高感度分析手法である。 $^{41}\text{Ca}$  (半減期:  $1.03 \times 10^5$  年) は長寿命放射性核種であり、主に  $^{40}\text{Ca} (n, \gamma) ^{41}\text{Ca}$  で生成される。他にも Fe, Ni, Ti などの核破砕反応で生成される場合もある。つまり、 $^{41}\text{Ca}$  は宇宙線生成核種であるので、隕石や地表岩石の表面照射年代、落下年代の測定に用いられる。また生体トレーサーや原子力施設の廃棄物におけるクリアランス対象核種としても重要な核種である。しかし、 $^{41}\text{Ca}$  は同重体  $^{41}\text{K}$  が検出に影響する。また、Ca は電子親和力が低いいため単原子負イオンではビームが取り出せないという問題が存在する。そのため、国内では測定手法が確立されていない核種であり、測定手法が確立されれば放射化学、地球環境科

学などの幅広い分野での発展が期待できる。そこで、筑波大学 6MV タンデム加速器における AMS システムを用いて  $^{41}\text{Ca}$  の AMS 測定開発を行った。まず、同重体  $^{41}\text{K}$  については重イオン粒子輸送計算コード (PHITS) を用いて、5 枚電極型電離箱内での荷電粒子の挙動を再現し、 $^{41}\text{Ca}$  と  $^{41}\text{K}$  のスペクトルの分離が最大になる条件を検討した。PHITS の計算結から、入射膜は窒化シリコン膜 75 nm を用いて、検出器にイソブタンガスを 25 Torr を封入することによって 2 核種のスペクトル分離が最大になる結果を得た。また、ビーム引き出しの問題に対しては  $\text{CaF}_2$  試料から  $\text{CaF}_3$  を引き出すことによって最大 500 nA のビーム電流を得た。また、タンデム加速器における荷電変換分布の測定を行い、最も多く生成される  $^{41}\text{Ca}^{5+}$  を選択することによって、測定効率の向上と検出限界を引き下げる試みを行った。以上の試みによって、検出限界は  $^{41}\text{Ca}/^{40}\text{Ca} \sim 3 \times 10^{-15}$  を達成し、3 % の測定精度を得た。 $^{41}\text{Ca}$  の AMS 測定は国内初であり、国外の他施設とも比較しても高い電流値、低い検出限界を達成した。

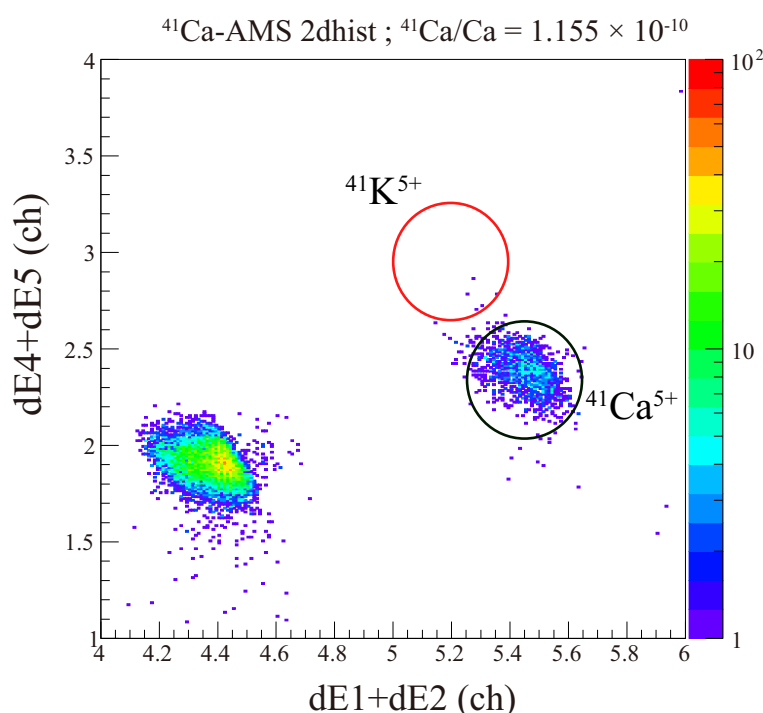


図 10  $^{41}\text{Ca}$ -AMS における標準試料 ( $^{41}\text{Ca}/\text{Ca} = 1.155 \times 10^{-10}$ ) 測定の測定結果。標準試料には  $^{41}\text{K}$  の汚染はほぼ見られなかった。

#### (9) Lamb シフト型偏極イオン源の偏極ビームの生成

筑波大学研究基盤総合センター応用加速器部門の Lamb シフト型偏極イオン源 (PIS) は、東日本大震災による大きな被害を受けたが、平成 26 年度末までに再構築を終え、平成 27 年度には PIS からのビーム加速試験を行った。平成 28 年度は、主に、偏極ビームの生成試験を実施した。

PIS における核偏極の生成にとって、スピフィルター (SF) は重要なデバイスである。SF は、(1) ビーム方向の一樣磁場、(2) 1610 MHz のビーム方向の振動電場、(3) ビームに垂直方向の静電場、をかけることができる。これらのパラメータを適切に設定することで、陽子および重陽子において核スピが揃った状態のビームを取り出すことができる。我々は、初めに SF の磁場測定や共振周波数などの確認を行い、その後、偏極ビームの生成試験を行った。

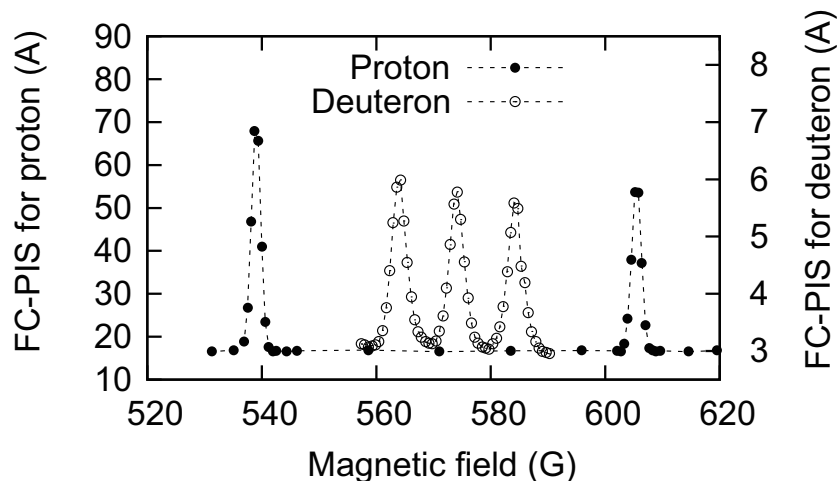


図 11 SF の磁場を変化させ、PIS 末端におけるファラデーカップで測定したビーム電流の絶対値。

SF の磁場測定では、磁場と電流との間には良い直線性があり、偏極生成にとって必要な磁場がかかることを確認した。振動電場をかけるための電源の発振周波数は 1610 MHz であり、特に問題はなかった。一方、SF の共振周波数を調べたところ、1609.475 MHz であり、発振周波数である 1610 MHz からのシフトが確認された。SF のコイルへの通電を止めてから 2 時間後の共振周波数は 1609.875 MHz であり、発振周波数に近づく方向へ変化した。このことから、我々は通電による SF の温度上昇が共振周波数のシフトを生じさせると考えた。そこで、我々は、大型ファン 2 台を用いて SF を外部より冷やしながら、核偏極の生成試験を実施した。図 11 は、SF の磁場を変化させた時の PIS 末端におけるファラデーカップ (FC-PIS) で測定したビーム電流である。実際は、陽子および重陽子は 1 荷の負イオンとして引き出されるので、FC-PIS では負の電流値として測定される。陽子の場合、SF の磁場を 540 G と 605 G に設定した時に、それぞれ、核スピンの磁気量子数  $m_1 = +1/2$  と  $m_1 = -1/2$  に対応する共鳴ピークを観測した。このとき、540 G のピークにおいて、クエンチング法による偏極陽子ビームの偏極度は約 80% だった。また、重陽子の場合、SF の磁場が 565 G、575 G、585 G の時に、それぞれ、 $m_1 = +1, 0, -1$  に対応する共鳴ピークを観測した。冷却用の大型ファンを用いない場合、陽子や重陽子におけるこれらの共鳴ピークは見られなかったことから、核偏極の生成にとって SF の冷却は重要であることがわかった。今後は、SF の冷却システムを改善すると共に、ビームコース末端にポラリメータを設置し、核反応を用いた核偏極度測定を進める予定である。

#### (10) 固体水素標的を用いた不安定核のスキン厚導出手法の開発

不安定核にはスキン構造と呼ばれる安定核に見られない現象がある。スキンとは不安定核の表面に現れる過剰の中性子もしくは陽子の層を指す。不安定核におけるスキン厚の実験値は、これまで、オプティカルアイソトープシフト (OIS) の測定と反応断面積の測定から導出してきた。ところが、OIS の測定は実験的な制限により測定可能な同位体が限られており、不安定核のスキン厚の実験データは乏しいのが現状である。本研究は、反応断面積測定だけから不安定核の陽子密度分布と中性子密度分布を別々に求め、それらからスキン厚を導出することを目的とする。

本研究にとって、固体水素標的は重要である。核子核子全断面積は約 100 MeV 以下のエネルギー領域で同種粒子間よりも陽子-中性子間の方が約 3 倍大きいという特徴を持つ。これは、入射核の中性子密度分布の情報を引き出すために水素標的が有効なツールであることを意味する。既に、我々は先行研



究において、中性子過剰核  $^{11}\text{Li}$  を対象に、固体水素標的を用いた反応断面積測定を実施し、 $^{11}\text{Li}$  の陽子密度分布と中性子密度分布の導出に成功した。本研究はこれを発展させるものであり、特に、陽子過剰核の陽子スキン厚の導出を試みる。研究対象としては、初めに  $^{17}\text{Ne}$  を考えている。 $^{17}\text{Ne}$  は陽子ドリップライン核であり、既にスキン厚の実験値は報告されている。そのため、本研究で得た実験値との比較が可能であり、本手法の妥当性を評価できる。

実験は放射線医学総合研究所の HIMAC を用いて行った。一次ビームとして核子当たり 180 MeV の  $^{20}\text{Ne}$  を利用した。平成 28 年度は、初めての実験ということで、 $^{20}\text{Ne}$  の荷電変換断面積（反応によって陽子数が変化する確率）を測定し、検出器系やデータ収集系等の測定システムの確認を行った。また、次回以降のマシントimeに繋げるよう、 $^{20}\text{Ne}$  ビームから生成される  $^{17}\text{Ne}$  の収量の確認を行った。

本実験によって得られた  $^{20}\text{Ne}$  の断面積データは、これまでの先行研究と同様の傾向を示し、測定システムは問題無いことを確認した。また、実際に実験で得られた  $^{17}\text{Ne}$  の収量は予想値の約 3 分の 1 であることがわかり、今後の実験計画を立てる上で重要な情報を得ることができた。今後は、 $^{17}\text{Ne}$  の反応断面積測定を実施し、スキン厚を導出することで、本手法の妥当性を確認する。その後、スキン厚が未知の不安定核を対象とした反応断面積測定に進む予定である。

## 【2】高エネルギー原子核実験グループ

(三明康郎、江角晋一、中條達也、Oliver Busch、坂井真吾、加藤純雄)

### (1)LHC-ALICE 実験 陽子 + 陽子、鉛 + 鉛衝突における荷電粒子ジェット生成量測定

本研究では、以下の 2 点を主目的として、2015 年に LHC-ALICE 実験において収集された重心系衝突エネルギー 5.02 TeV での陽子-陽子実験における荷電粒子ジェットの生成量測定を行った。

1. 摂動論的量子色力学 (pQCD) による理論計算及び高エネルギー粒子衝突実験に用いられるモンテカルロ (MC) イベントジェネレータのテスト
2. 同じ重心系衝突エネルギーにおける重イオン衝突実験に対して基準となる結果の確立

図 12 はジェット半径  $R=0.4$  として測定した荷電粒子ジェット生成微分断面積である。pQCD 計算に基づく MC イベントジェネレータを用いたシミュレーション (PYTHIA 及び POWHEG) は実験結果をよく再現し、特に、NLO の精度での計算 (POWHEG) は非常によく実験結果と一致した。また、図 13 はジェット半径  $R=0.4$  及び  $R=0.2$  として測定した荷電粒子ジェット生成微分断面積の比である。この量は生成されたジェットの空間的発展に鋭敏な量の一つであり、高横運動量を持つジェットほど収束した形となることが示されている。加えて、この高横運動量ジェットの収束及びその割合もシミュレーションによってよく再現された。以上を測定するにあたり、実験データに含まれる検出効率や運動量分解能といった検出器効果は、Geant3[16] を用いたシミュレーションによって検出器応答を見積もり、SVD unfolding method[17] を用いて補正した。これらの結果は同じ重心系衝突エネルギーでの鉛-鉛衝突実験における測定結果との比較を合わせ、Hard Probes 2016 及び Quark Matter 2017 国際会議において発表された。

重イオン衝突を用いたクォーク・グルーオン・プラズマ相 (QGP) の物性探索において、衝突初期に作られる高横運動量パートンは有用なプローブとなりうる。このパートンは QGP との相互作用を経てジェッ

ト事象として観測されるため、重イオン衝突におけるジェットの形状変化測定はパートンを用いた QGP のトモグラフィーと考えられる。本年は、LHC にて 2015 年 11 月より行われた  $\sqrt{s_{NN}} = 5.02\text{TeV}$  の陽子 + 陽子及び鉛 + 鉛衝突実験でのデータを用いて、QGP に起因する荷電粒子ジェット抑制の測定を行った。重イオン衝突実験における、ジェット形状変化を示唆する測定量として、陽子 + 陽子衝突と鉛 + 鉛衝突での生成量比 ( $R_{AA}$ , 式 1) が代表的である。

$$R_{AA} = \frac{dN_{jets}^{AA}/dp_T}{\langle T_{AA} \rangle d\sigma_{jets}^{pp}/dp_T}. \quad (1)$$

本研究にて得られた  $R_{AA}$  の中心衝突度依存性を図 14 に示す。ここで、鉛 + 鉛衝突の中心衝突において、ジェットの強い収量抑制が観測された。この結果に関して、国際会議 (Hard Probes 2016, 中国武漢, 2016 年 9 月) にて議論を行った。その後、ジェットの広がり方の評価のため、ジェット半径依存性の評価を開始した。

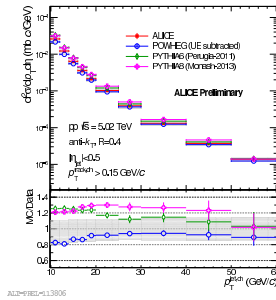


図 12 ジェット生成微分断面面積 ( $R=0.4$ )

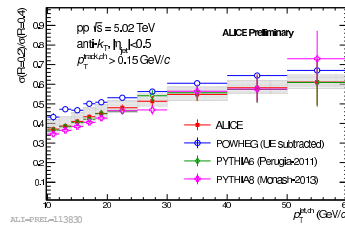


図 13 ジェット生成微分断面面積の比 ( $\sigma(R = 0.2)/\sigma(R = 0.4)$ )

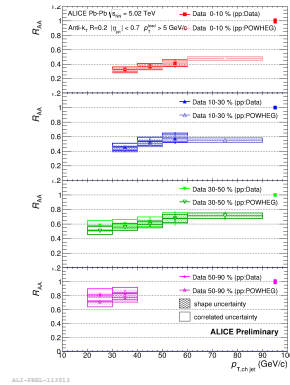


図 14  $\sqrt{s_{NN}} = 5.02\text{TeV}$  鉛 + 鉛衝突、荷電粒子 Jet の  $R_{AA}$

## (2)LHC-ALICE 実験 $\sqrt{s_{NN}} = 2.76\text{ TeV}$ Pb+Pb 衝突における HBT 測定のイベント平面依存性

相対的重イオン衝突により、誕生した直後の宇宙に存在したとされるクォーク・グルーオン・プラズマを再現し  $\pi$  中間子を用いた HBT 測定から、クォーク・グルーオン・プラズマの集団運動的な発展や粘性、初期幾何学的形状が関係する終状態の系の幾何学的形状を調べた。しかし、HBT 半径は終状態の幾何学的形状だけでなく系の膨張にも敏感な測定量である。そこで、近年注目されている方位角異方性の強度を示すベクトルを用いて衝突毎に方位角異方性の強い(または弱い)事象を選ぶ手法 (Event Shape Engineering)[18] を HBT 測定と組み合わせ、終状態の形状と系の膨張に敏感である方位角異方性との関係を調べた。

図 15 に、HBT 測定より求めた終状態における系の楕円形状(赤・黄)と三角形形状(青・緑)の中心衝突度依存性を示した。黄、緑はそれぞれ 2 次、3 次の方位角異方性が大きな事象における形状である。楕円形状は中心衝突度に大きく依存し周辺衝突ではより楕円形状となる。また、方位角異方性が大きな事象では終状態の形状がより楕円形となる。三角形形状は中心衝突度にはあまり依存しない。 $R_{side}$  は 2 次のイベント平面依存性と異なり、負の値を持つ。また 3 次の方位角依存性の大きな事象を選んででも大きな変化は観測できなかった。

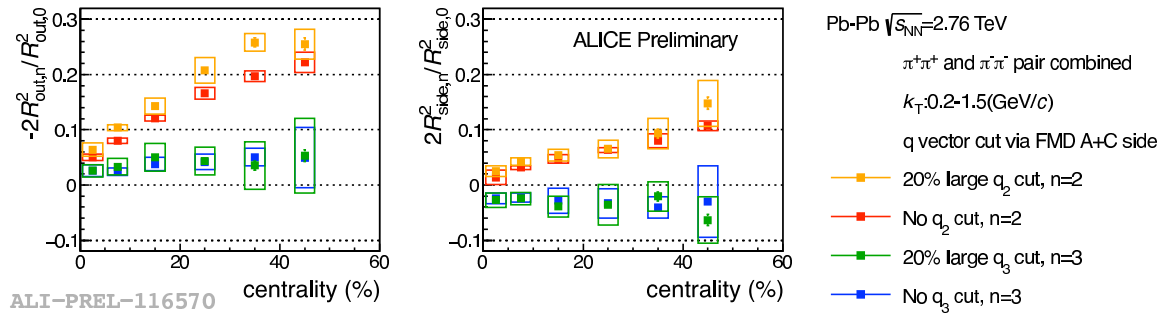


図 15  $\sqrt{s_{NN}} = 2.76\text{TeV}$  鉛 + 鉛原子核衝突における HBT 半径の 2 次・3 次の振幅の中心衝突度依存性

### (3)LHC-ALICE 実験にでの重いクォーク (charm と beauty quark) の測定

チャームクォークやボトムクォークは質量が大きいため、主に衝突初期の hard scattering によって生成される。高エネルギー原子核衝突では衝突初期に作られたチャームクォークやボトムクォークは、衝突によって生成される高温高密度物質 (QGP) を通過してくるため、その測定は QGP の性質を調べる上で有用なプローブだと考えられている。チャームクォークやボトムクォークはその重い質量のため、 $u, d, s$  などの軽いクォークと比べて QGP 中での振る舞いが違うことが予想されている。図は LHC-ALICE 実験での鉛 + 鉛衝突 5.02TeV における D meson と D meson 及び B meson から崩壊してくる電子の  $R_{AA}$  (陽子 + 陽子衝突と鉛 + 鉛衝突の比) の測定結果である。測定結果はともに  $R_{AA}$  が 1 より小さく、これは鉛 + 鉛衝突において D meson 及び B meson の生成量が抑制されていることを示唆している。この原因はチャームクォークやボトムクォークが QGP 中でエネルギーを失うためだと考えられている。今後は電子の測定においてチャームクォークとボトムクォーク起源の電子を分けることによりボトムクォークのエネルギー損失の研究、 $\Lambda_c$  などのチャームクォークを含む粒子、さらにチャームクォークとボトムクォーク起源の jet を測定することによりパートンレベルでの重いクォークを用いた QGP の研究を行う予定である。

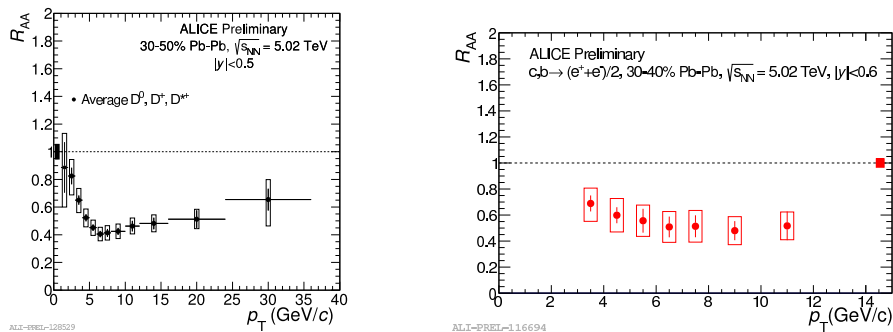


図 16 D meson(右) と D 及び B meson 起源の電子の  $R_{AA}$

### (4)RHIC-PHENIX 実験における銅・金衝突での方位角異方性測定

米国 BNL の RHIC-PHENIX 実験では、相対論的速度での重イオン衝突実験が行なわれており、QGP

物性の研究が進められている。重イオン衝突での QGP 研究に有効なプローブとして発生粒子の方位角異方性測定がある。衝突後の系は、衝突初期形状が崩れる前に中のパートンが激しく散乱し熱平衡状態に達し、初期形状に起因した内部圧力を生み膨張する。衝突初期形状が楕円型ならば楕円型の膨張をし、三角形型ならば三角形型の膨張をするため、発生粒子の方位角異方性は衝突初期形状を起源とし QGP の膨張に影響を受ける測定量となる。RHIC ではこの衝突初期条件形状の為に、非対称系の銅・金衝突が行なわれた [19]。銅・金衝突では金と銅原子核の衝突関与部の形状が異なるため、銅 / 金原子核が進む領域（前方 / 後方）での衝突初期形状が異なる可能性がある。図 17 の左の図は前方 / 後方領域での楕円型異方性の強度  $v_2$  の多重度依存性を示す。横軸の多重度は中心衝突度事に決まる平均値を表しており、金側の方が銅側よりも  $v_2$  及び多重度が同一イベントで平均的に大きい。共に高多重度から低多重度にかけて  $v_2$  が大きくなっており、これは初期の形状が中心衝突からかすり衝突にかけて円型から楕円型へ変化している事から来ると考えられる。右の図は  $v_2$  を初期形状の楕円型異方性強度  $\varepsilon_2$  で割った値の多重度依存性を表す。この図では、金側と銅側の  $v_2$  は共通の  $\varepsilon_2$  で割っており、綺麗にスケールしている。これは前方 / 後方ともに共通の初期形状の異方性を表しており、3 次元初期形状の理解に向けた結果となる。

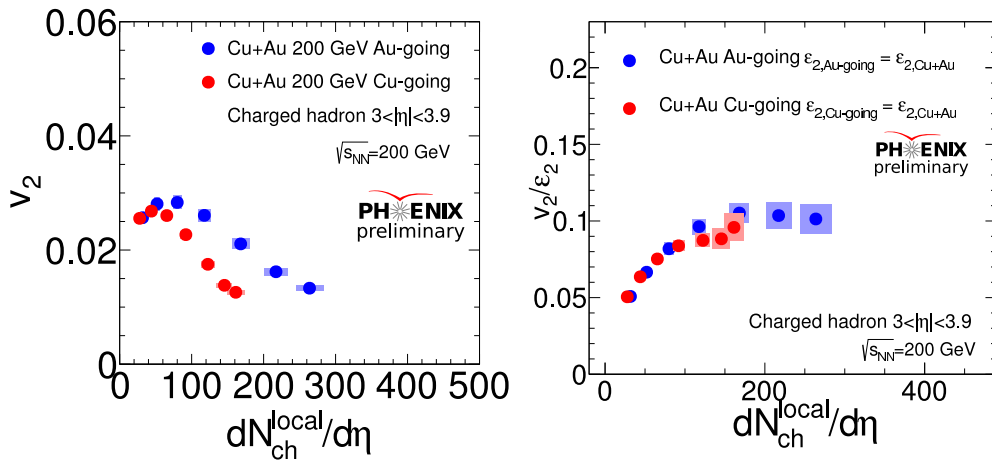


図 17 銅・金衝突における前方 / 後方領域での楕円型異方性強度  $v_2$  と初期形状の楕円型異方性強度  $\varepsilon_2$  との比の多重度依存性

#### (5) RHIC-PHENIX 実験における重陽子・金原子核衝突での方位角異方性の衝突エネルギー依存性

高エネルギー原子核衝突実験における課題の一つに重陽子・金原子核衝突等の小さな系での方位角異方性の起源の理解がある [20]。これまで方位角異方性は原子核衝突においてのみ観測される現象であると考えられていたが、高多重度の小さな衝突系でも同様な強度の異方性が測定された。原子核衝突での方位角異方性は衝突初期形状を起源に流体的な集団運動の結果観測されるが小さな系での方位角異方性の起源は分かっていない。RHIC-PHENIX 実験では、この小さな系での方位角異方性理解の為に、重陽子・金原子核衝突の衝突エネルギー走査実験が行なわれた。図 18 は重陽子・金衝突での衝突エネルギーの楕円型方位角異方性強度  $v_2$  の横運動量依存性の図である。実験データが黒いデータ点を示し、その他の橙色と紫色の線が流体モデル、緑の線がパートンカスケードモデルの計算結果となる。200GeV と 62.4GeV の領域では  $v_2$  は同程度の大きさ及び似た様な横運動量依存性を示しているが、39GeV 以降では振る舞いが異なっている。低横運動量では  $v_2$  の強度はたいして変わらないが、高運動

量領域では横運動量とともに線形的に大きくなっている。これは、ジェットなどの集団運動以外の寄与から来ていると考えられており、理論計算とも高横運動量の領域では合っていない。PHENIX 実験ではさらにこの小さな系での集団運動を理解する為に、多粒子相関や前方 / 後方領域での異方性測定も進められている。

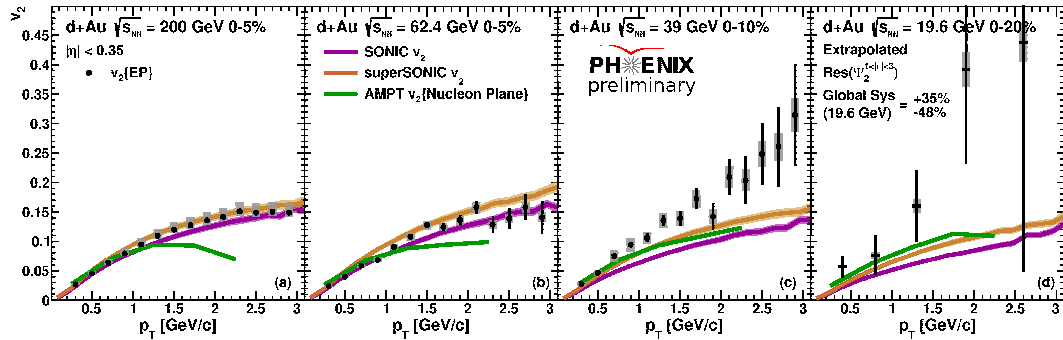


図 18 重陽子・金衝突における楕円型異方性強度  $v_2$  の横運動量依存性

#### (6) RHIC-STAR 実験における net-proton 分布の 6 次キュムラント測定

QCD 相構造、特に QGP 相からハドロン相への相転移の仕組みを明らかにするために、理論的・実験的に様々なアプローチで研究が行われてきた。格子ゲージ理論によると、バリオン密度が小さい領域での相転移は、明確な境界の無いクロスオーバーであると言われている。しかし、いまだ直接的に相転移を示す実験結果は無い。そこで、相転移に敏感な観測量として net-charge 分布および net-baryon 分布の高次ゆらぎが提唱された [21]。

近年 RHIC-STAR 実験において、QCD 臨界点を探すために、保存量分布の 4 次までのゆらぎが測定されている [22]。しかし、金 + 金衝突  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  GeV において、4 次ゆらぎは  $C_4/C_2 \approx 0.92$  であり、ハドロンガスからのずれは観測されていない。一般的に、より高次のゆらぎほどより相関長に敏感になるため、6 次ゆらぎを測定することによって相転移の信号が観測されることが期待される。

図 19 は、 $C_6/C_2$  の中心衝突度依存性である。周辺衝突から中心衝突にかけて、ポアソン分布の予測値である 1 からのずれが見え始め、負の値を示していることがわかる。しかし、中心衝突では統計誤差が大きくなり、系統的な議論は難しい。引き続き実験を行い、誤差を減らす努力が必要である。

#### (7) RHIC-STAR 実験における横運動量分布のエネルギー依存性測定

RHIC 加速器を用いた STAR 実験において、2010 年から 2014 年にかけて Beam Energy Scan 1 (BES1) が行われた。BES の目的は QGP の物性の理解と QCD 相図の解明である。今回金 + 金衝突における衝突エネルギーが  $\sqrt{s_{NN}} = 7.7, 11.5, 19.6, 27, 39$  GeV の  $K, p$  とその反粒子それぞれについて粒子数分布が測定された。[23] 中央ラピディティにおける粒子多重度密度と平均横運動量、そして粒子種ごとの粒子数の比がそれぞれのエネルギーについて報告された。また粒子の  $p_T$  分布や粒子数比をフィットすることで、QGP 物性を理解する上で重要となるフリーズアウト時の温度や化学ポテンシャル、平均膨張速度などのパラメータが測定された。図 20 は横軸が衝突エネルギー、縦軸が上下それぞれフリーズアウト時の温度と膨張速度を表している。運動学的凍結温度は BES のエネルギー領域ではほぼ一定であり、化学的凍結温度はエネルギーとともに上昇するが、11.5 GeV 以降緩やかになることがわかった。

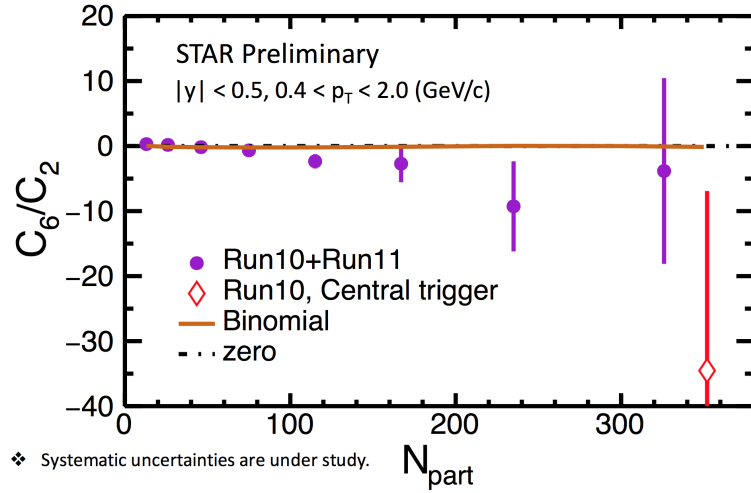


図 19  $C_6/C_2$  の中心衝突度依存性

また、平均膨張速度はエネルギーとともに上昇する傾向があるが、BES のエネルギー領域では一定に近い振る舞いがみられた。

#### (8) RHIC-STAR 実験 $\sqrt{s_{NN}}=200\text{GeV}$ 直接光子および中性パイ中間子 trigger による Jet-like 相関の測定

STAR 実験の  $\sqrt{s_{NN}}=200\text{GeV}$  の金 + 金中心衝突および陽子 + 陽子衝突において直接光子 ( $\gamma_{dir}$ ) および中性パイ中間子 ( $\pi^0$ ) と荷電粒子との方位角相関が測定された。クォークは媒質中で相互作用してエネルギーを損失するが、光子は色荷を持たないため、高温高密度物質とは相互作用せずに検出器まで到達する。そのため、パイ中間子、光子をトリガー粒子とした時のアソシエイト粒子の、トリガー粒子と反対方向 (away-side) における粒子の収量を比較することで、ハドロンが媒質中を通過した距離と色荷による効果を見積もることができる。金 + 金中心衝突において、1 トリガー粒子あたりの荷電粒子の収量が陽子 + 陽子衝突に比べて抑制されていることが確認された [24]。トリガー粒子と反対方向 (away-side) における、直接光子 1 粒子に対する荷電粒子の収量の抑制は、直接光子の運動量は依存していなかった。一方で、荷電粒子の運動量が小さくなると収量の抑制が小さくなることが明らかになった (図 21)。直接光子と中性パイ中間子との間の抑制の割合の違いは誤差の範囲内であった。この研究結果は、低運動量領域ではエネルギーの再分配が支配的であり、トリガー粒子のエネルギーには依存しないという STAR 実験の以前の結果を支持するものである。

#### (9) RHIC-STAR 実験における $\Lambda, \bar{\Lambda}$ 粒子のグローバル偏極の測定

RHIC 加速器をもちいた STAR 実験において  $\Lambda$  粒子と、 $\bar{\Lambda}$  粒子の反応平面に対する偏極を測定し、それらがともに正の偏極を示し、衝突ビームエネルギーを下げる程大きくなる事を観測した。これは、原子核衝突の角運動量による渦の生成を史上始めて観測した事に対応する。また、 $\bar{\Lambda}$  粒子の偏極が、 $\Lambda$  粒子の偏極よりも僅かに大きい事は、原子核衝突による角運動量と同じ方向に生成される可能性のある強磁場による寄与である可能性を示唆しているが、統計及び系統誤差の範囲で有意な差があるとは言えないため、今後の実験による高統計で高精度の測定に期待が寄せられる。図 22 は、原子核衝突の反応領域の角運動量による渦の生成と、 $\Lambda$  粒子の偏極の方向を模式的に表している。図 23 は、 $\Lambda$  粒子と、 $\bar{\Lambda}$



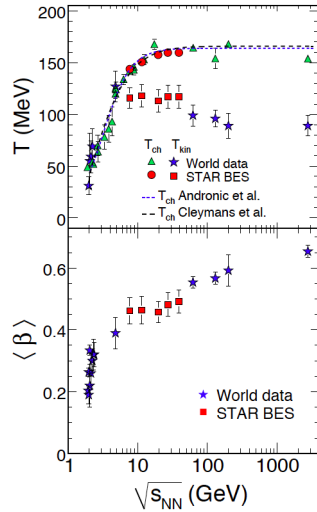


図 20 凍結温度と平均膨張速度の衝突エネルギー依存性

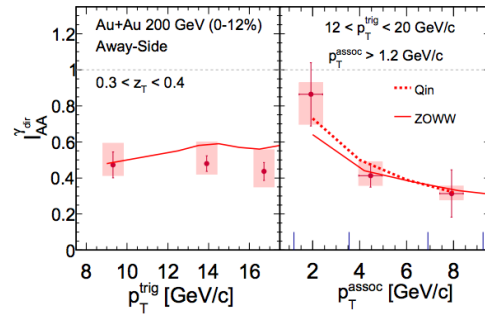


図 21 直接光子 Trigger に対する、Associate 荷電粒子の  $I_{AA}^{\gamma_{dir}}$

粒子それぞれの偏極度の衝突ピームエネルギー依存性に関する測定結果を示す [25]。

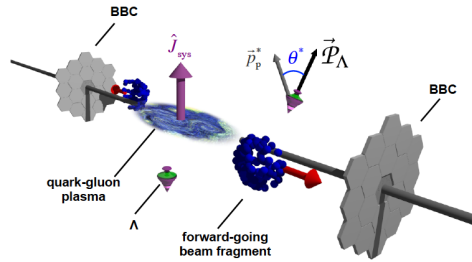


図 22 反応平面による QGP の角運動量と  $\Lambda$  粒子のグローバルな偏極

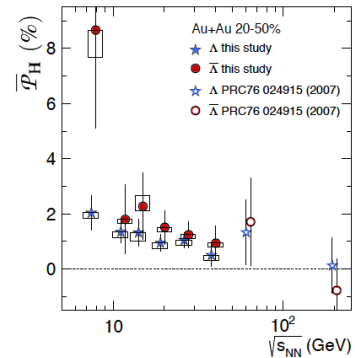


図 23  $\Lambda, \bar{\Lambda}$  粒子の偏極の衝突ピームエネルギー依存性

#### (10)ALICE 実験高度化に向けた超前方光子測定用検出器 (FoCal) の開発

欧州原子核研究機構 CERN の LHC 加速器を用いた ALICE 実験において、超前方領域 (擬ラピディティ領域  $3.5 < \eta < 5.3$ ) における光子測定のために FoCal(Forward Calorimeter) 検出器を導入する計画がある。光子は色荷を持たず QGP 中を相互作用せずに通過するため、衝突初期の情報を含んでいると予想されている。また前方で直接光子を検出することで、QGP 早期熱化の原因の解明やカラーグラス凝縮理論の検証、重イオン衝突初期条件の決定などが期待できる。FoCal 検出器は電磁カロリメータ (FoCal-E) とハドロンカロリメータ (FoCal-H) から構成され、FoCal-E はエネルギー測定を行う  $1 \times 1 \text{ cm}^2$  の Si PAD 部と、シャワーの位置・形状を観測する  $30 \times 30 \mu\text{m}^2$  の Si pixel 部からなる。平成 27 年度までに 2 度のテストビーム実験を実施し、ノイズレベルの削減や 50 GeV までのエネルギーに対する性能評価を行ってきた。

平成 28 年度は CERN-SPS 加速器において FoCal-E 試作機のテストビーム実験を行い、新たに高エネルギー領域 (50 ~ 130 GeV) における検出器の性能評価実験を行った。課題であった高エネルギービームにおける信号の飽和を加算回路においてシグナルの波高を減衰させることにより解決し、130 GeV/c までのシグナルの取得に成功した (図 24)。不感領域の影響を考慮したシミュレーションを行い、取得したシグナルとの整合性を確認した (図 25)。また、トリガー情報を共有させることにより独立の DAQ を持つ PAD 部と pixel 部のイベントデータ照合をし、同一のイベントを観測することに成功した (図 26)。加算回路を変更したことにより今後は FoCal-E 実機の開発に向けて、実機製作やデザインの最適化を物理シミュレーションと並行して行い、ALICE 実験への導入を目指す。

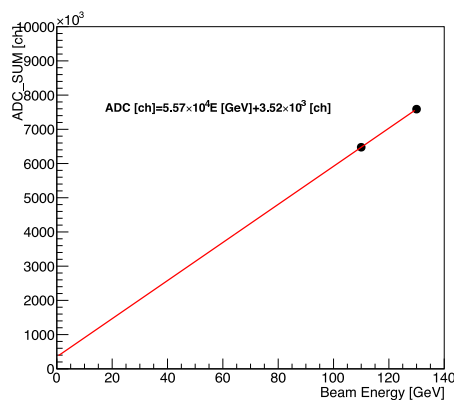


図 24 PAD 部におけるシグナルのエネルギー依存性

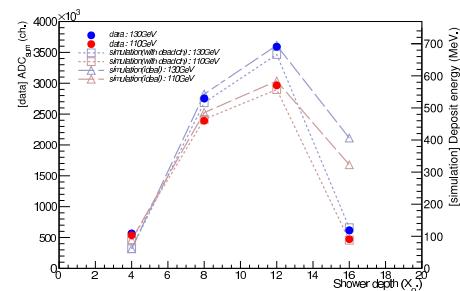


図 25 PAD 部における縦方向のシャワープロファイルとシミュレーションとの比較

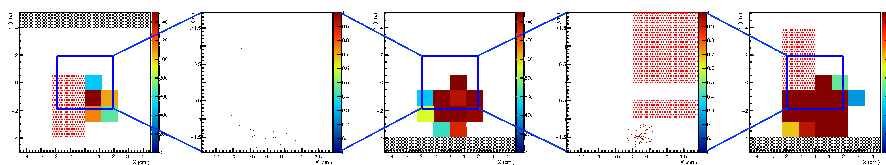


図 26 PAD 部及び pixel 部のイベントデータ照合によるヒットマップ

## (11) 陽電子ビームを用いた MRPC の性能評価

Multi-gap Resistive Plate Chamber(MRPC) というガス検出器は現在 TOF 検出器として広く浸透しており、非常に安価でかつ単純な構造で設計の自由度が高く優れた時間分解能を持っているという特徴を持つ。現在、日本の J-PARC においても重イオン衝突実験を行う計画が進んでおり、MRPC はその TOF 検出器として採用される見込みとなっている。今年度は、ソニーグローバルマニュファクチャリング&オペレーションズ株式会社による電磁界シミュレーションを元に制作した、読み出しパッド形状の最適化により高い時間分解能を追求する機体と、J-PARC への導入を見据えた 20×30 cm<sup>2</sup> の基板を用いた機体 (以降大型 MRPC とする) について 2016 年 11 月に東北大学電子光物理学研究センター (ELPH) で行われた陽電子ビームを用いた実験により性能評価を行った。前者の機体についてはパッドの幅が 2.4 cm のものと、1.2 cm のものを制作し、評価を行った。前者については図 27 にあるようにパッド幅が細い方で時間分解能  $78.9 \pm 1.8$  ps を達成した (1 段型)。一方大型 MRPC について、パッド部分と読み出しの間のインピーダンス整合が取れず、シグナルが反射してしまう影響が強く見られ図 28 にあるよう



に時間分解能は  $79.5 \pm 1.8$  ps であった (4 段型)。

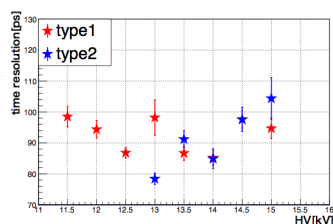


図 27 時間分解能の印加電圧依存性。  
type1(赤) がパッド幅の太い方、type2(青)  
がパッド幅の細い方を示している。

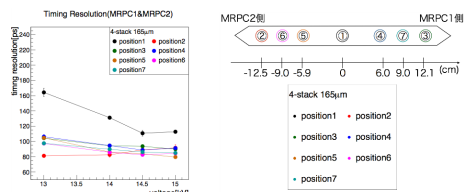


図 28 大型 MRPC の時間分解能の印加電圧依存性。右はパッドに対するビームの入射位置を表している。

## (12)RHIC-STAR 実験における EPD(Event Plane Detector) の導入に向けたアップグレード

RHIC では QCD 相図の解明を目的として Beam Energy Scan phaseII が 2018 年に行われる予定である。EPD は半径方向に 16 個のセグメント、方位角方向に 24 個のセクターで構成されているシンチレーション検出器であり。BBC(Beam Beam Counter) よりも粒子の位置分解能が良いこと、中心ラビディティ領域での測定における CTB(Central Trigger Barrel) との自己相関が軽減されるなどの理由から、BBC に替わって稼働する予定である。現在、East 側に全方位角の 1/4 を覆うように proto-type が図 29 のように置かれ、 $pp$  衝突において ADC(図 30) 等のデータが取られており、EPD の本格的な稼働に向けて読み出しの調整が行なわれている。

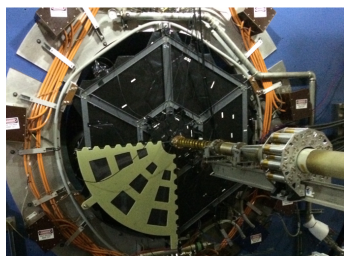


図 29 EPD の proto-type

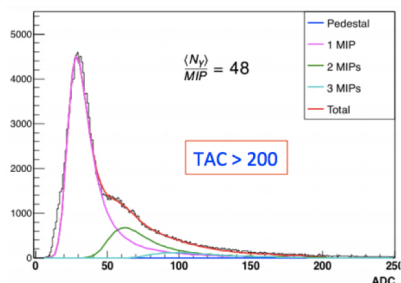


図 30 EPD の Tile4 で測定された ADC 分布

## 原子核実験グループ研究業績リスト

### < 原著論文 >

1. First direct mass measurements of stored neutron-rich  $^{129,130,131}\text{Cd}$  isotopes with FRS-ESR R. Knobel, M. Diwisch, F. Bosch, D. Boutin, L. Chen, C. Dimopoulou, A. Dolinskii, B. Franczak, B. Franzke, H. Geissel, M. Hausmann, C. Kozhuharov, J. Kurcewicz, S.A. Litvinov, G. Martinez-Pinedo, M. Matos, M. Mazzocco, G. Munzenberg, S. Nakajima, C. Nociforo, F. Nolden, T. Ohtsubo, A. Ozawa, Z. Patyk, W.R. Plaß, C. Scheidenberger, J. Stadlmann, M. Steck, B. Sun, T. Suzuki, P.M. Walker, H. Weick, M.-R. Wu, M. Winkler, T. Yamaguchi *Physics Letters B* 754 (2016) 288293.
2. Magnetic moment of the  $13/2^+$  isomeric state in  $^{69}\text{Cu}$ : Spin alignment in the one-nucleon removal reaction A. Kusoglu, G. Georgiev, C. Sotty, D. L. Balabanski, A. Goasduff, Y. Ishii, Y. Abe, K. Asahi, M. Bostan, R. Chevrier, M. Chikamori, J. M. Daugas, T. Furukawa, H. Nishibata, Y. Ichikawa, Y. Ishibashi, R. Lozeva, H. Miyatake, D. Nagae, T. Nanao, M. Niikura, T. Niwa, S. Okada, A. Ozawa, Y. Saito, H. Shirai, H. Ueno, D. T. Yordanov, and N. Yoshida *PHYSICAL REVIEW C* 93, 054313 (2016).
3. New results from isochronous mass measurements of neutron-rich uranium fission fragments with the FRS-ESR-facility at GSI R. Knobel, M. Diwisch, H. Geissel, Yu.A. Litvinov, Z. Patyk, W.R. Plaß, C. Scheidenberger, B. Sun, H. Weick, F. Bosch, D. Boutin, L. Chen, C. Dimopoulou, A. Dolinskii, B. Franczak, B. Franzke, M. Hausmann, C. Kozhuharov, J. Kurcewicz, S.A. Litvinov, M. Matos, M. Mazzocco, G. Munzenberg, S. Nakajima, C. Nociforo, F. Nolden, T. Ohtsubo, A. Ozawa, J. Stadlmann, M. Steck, T. Suzuki, P.M. Walker, M. Winkler, and T. Yamaguchi *Eur. Phys. J. A* (2016) 52: 138 (11 page).
4. Proton-proton correlations in distinguishing the two-proton emission mechanism of  $^{23}\text{Al}$  and  $^{22}\text{Mg}$  D. Q. Fang, Y. G. Ma, X. Y. Sun, P. Zhou, Y. Togano, N. Aoi, H. Baba, X. Z. Cai, X. G. Cao, J. G. Chen, Y. Fu, W. Guo, Y. Hara, T. Honda, Z. G. Hu, K. Ieki, Y. Ishibashi, Y. Ito, N. Iwasa, S. Kanno, T. Kawabata, H. Kimura, Y. Kondo, K. Kurita, M. Kurokawa, T. Moriguchi, H. Murakami, H. Ooishi, K. Okada, S. Ota, A. Ozawa, H. Sakurai, S. Shimoura, R. Shioda, E. Takeshita, S. Takeuchi, W. D. Tian, H. W. Wang, J. S. Wang, M. Wang, K. Yamada, Y. Yamada, Y. Yasuda, K. Yoneda, G. Q. Zhang, and T. Motobayashi *PHYSICAL REVIEW C* 94, 044621 (2016).
5. Identification of the Lowest  $T = 2$ ,  $J_\pi = 0^+$  Isobaric Analog State in  $^{52}\text{Co}$  and Its Impact on the Understanding of  $\beta$ -Decay Properties of  $^{52}\text{Ni}$  X. Xu, P. Zhang, P. Shuai, R. J. Chen, X. L. Yan, Y. H. Zhang, M. Wang, Yu. A. Litvinov, H. S. Xu, T. Bao, X. C. Chen, H. Chen, C. Y. Fu, S. Kubono, Y. H. Lam, D. W. Liu, R. S. Mao, X. W. Ma, M. Z. Sun, X. L. Tu, Y. M. Xing, J. C. Yang, Y. J. Yuan, Q. Zeng, X. Zhou, X. H. Zhou, W. L. Zhan, S. Litvinov, K. Blaum, G. Audi, T. Uesaka, Y. Yamaguchi, T. Yamaguchi, A. Ozawa, B. H. Sun, Y. Sun, A. C. Dai, and F. R. Xu *Physical Review Letters*, 117, 182503 (2016).
6. Charge-changing cross-section measurements of  $^{12}\text{C}$  at around 45A MeV and development of a Glauber model for incident energies 10 A2100 A MeV D. T. Tran, H. J. Ong, T. T. Nguyen, I. Tanihata, N. Aoi, Y. Ayyad, P. Y. Chan, M. Fukuda, T. Hashimoto, T. H. Hoang, E. Ideguchi, A. Inoue, T. Kawabata, L. H. Khiem, W. P. Lin, K. Matsuta, M. Mihara, S. Momota, D. Nagae, N. D. Nguyen, D. Nishimura, A. Ozawa, P. P. Ren, H. Sakaguchi, J. Tanaka, M. Takechi, S. Terashima, R.

- Wada, and T. Yamamoto PHYSICAL REVIEW C 94, 064604 (2016).
7. Development of the detector system for b-decay spectroscopy at the KEK Isotope Separation System S. Kimura, H. Ishiyama, H. Miyatake, Y. Hirayama, Y.X. Watanabe, H.S. Jung, M. Oyaizu, M. Mukai, S.C. Jeong, A. Ozawa Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 376 (2016) 338340.
  8. First online multireflection time-of-flight mass measurements of isobar chains produced by fusion-evaporation reactions: Toward identification of superheavy elements via mass spectroscopy P. Schury, M. Wada, Y. Ito, D. Kaji, F. Arai, M. MacCormick, I. Murray, H. Haba, S. Jeong, S. Kimura, H. Koura, H. Miyatake, K. Morimoto, K. Morita, A. Ozawa, M. Rosenbusch, M. Reponen, P.-A. Soderstrom, A. Takamine, T. Tanaka, and H. Wollnik PHYSICAL REVIEW C 95, 011305(R) (2017).
  9. Investigations of charge-changing processes for light proton-rich nuclei on carbon and solid-hydrogen targets K. Sawahata, A. Ozawa, Y. Saito, Y. Abe, Y. Ichikawa, N. Inaba, Y. Ishibashi, A. Kitagawa, S. Matsunaga, T. Moriguchi, D. Nagae, S. Okada, S. Sato, S. Suzuki, T. Suzuki, Y. Takeuchi, T. Yamaguchi, J. Zenihiro Nuclear Physics A 961 (2017) 142153.
  10. Search for efficient laser resonance ionization schemes of tantalum using a newly developed time-of-flight mass-spectrometer in KISS M. Mukai, Y. Hirayama, H. Ishiyama, H. S. Jung, H. Miyatake, M. Oyaizu, Y. X. Watanabe, S. Kimura, A. Ozawa, S. C. Jeong, T. Sonoda Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 376 (2016) 73-76.
  11. Seiji Hosoya, Kimikazu Sasa, Tetsuya Matsunaka, Tsutomu Takahashi, Masumi Matsumura, Hiroshi Matsumura, Mark Sundquist, Mark Stodola, Keisuke Sueki, Optimization of a  $\Delta E - E$  detector for  $^{41}\text{Ca}$  AMS, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B, (2017) in press.
  12. A. Yamazaki, K. Sasa, S. Ishii, M. Kurosawa, S. Tomita, Y. Shiina, S. Shiki, G. Fujii, M. Ukibe, M. Ohkubo, A. Uedono, E. Kita, Development of the microbeam PIXE system for additive light elements in structural materials, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B, (2017) in press.
  13. Kenji Kawamura, Ayako Abe-Ouchi, Hideaki Motoyama, Yutaka Ageta, Shuji Aoki, Nobuhiko Azuma, Yoshiyuki Fujii, Koji Fujita, Shuji Fujita, Kotaro Fukui, Teruo Furukawa, Atsushi Furusaki, Kumiko Goto-Azuma, Ralf Greve, Motohiro Hirabayashi, Takeo Hondoh, Akira Hori, Shinichiro Horikawa, Kazuho Horiuchi, Makoto Igarashi, Yoshinori Iizuka, Takao Kameda, Kokichi Kamiyama, Hiroshi Kanda, Mika Kohno, Takayuki Kuramoto, Yuki Matsushi, Morihiro Miyahara, Takayuki Miyake, Atsushi Miyamoto, Yasuo Nagashima, Yoshiki Nakayama, Takakiyo Nakazawa, Fumio Nakazawa, Fumihiko Nishio, Ichio Obinata, Rumi Ohgaito, Akira Oka, Jun 'ichi Okuno, Junichi Okuyama, Ikumi Oyabu, Frdric Parrenin, Frank Pattyn, Fuyuki Saito, Takashi Saito, Takeshi Saito, Toshimitsu Sakurai, Kimikazu Sasa, Hakime Seddik, Yasuyuki Shibata, Kunio Shinbori, Keisuke Suzuki, Toshitaka Suzuki, Akiyoshi Takahashi, Kunio Takahashi, Shuhei Takahashi, Morimasa Takata, Yoichi Tanaka, Ryu Uemura, Genta Watanabe, Okitsugu Watanabe, Tetsuhide Yamasaki, Kotaro Yokoyama, Masakazu Yoshimori, Takayasu Yoshimoto, State dependence of climatic instability over the past 720,000 years from Antarctic ice cores and climate modelling, Science Advances, 08 Feb 2017, Vol. 3, no. 2, e1600446. DOI: 10.1126/sciadv.1600446
  14. Yukihiro Satou, Keisuke Sueki, Kimikazu Sasa, Kouji Adachi, Yasuhito Igarashi, First successful isolation of radioactive particles from soil near the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant, Anthro-

pocene, 14 (2016) 71-76. DOI:10.1016/j.ancene.2016.05.01

15. Masanori Kurosawa, Kimikazu Sasa, Ki-Choel Shin, Satoshi Ishii, Trace-element compositions and Br/Cl ratios of fluid inclusions in the Tsushima granite, Japan: Significance for formation of granite-derived fluids, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 182 (2016) 216239. doi:10.1016/j.gca.2016.03.015
16. R. Brun *et al.*, "GEANT: Detector Description and Simulation Tool", CERN-W5013 (1994)
17. A. Hoecker, V. Kartvelishvili, "SVD Approach to Data Unfolding", *Nucl. Instrum. Meth.* **A372** 469 (1996)
18. J. Schukraft, A. Timmins, and S. A. Voloshin, "Ultra-relativistic nuclear collisions: event shape engineering," *Phys. Lett.* **B719** (2013) 394-398
19. A. Adare *et al.* (PHENIX Collaboration), "Measurements of directed, elliptic, and triangular flow in Cu+Au collisions at  $\sqrt{s_{NN}}=200$  GeV", *Phys. Rev. C* **94** (2016) 054910
20. A. Adare *et al.* (PHENIX Collaboration), "Measurement of long-range angular correlation and quadrupole anisotropy of pions and (anti)protons in central d+Au collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  GeV", *Phys. Rev. Lett.* **114** (2015) 192301
21. B. Friman, F. Karsch, K. Redlich, V. Skokov, "Fluctuations as probe of the QCD phase transition and freeze-out in heavy ion collisions at LHC and RHIC", *Eur. Phys. J. C* (2011) 71:1694
22. L. Adamczyk *et al.* (STAR Collaboration), "Beam energy dependence of moments of the net-charge multiplicity distributions in Au+Au collisions at RHIC", *Phys. Rev. Lett.* **113** (2014) 092301
23. L. Adamczyk *et al.* (STAR Collaboration), "Bulk Properties of the Medium Produced in Relativistic Heavy-Ion Collisions from the Beam Energy Scan Program", arXiv:1701.07065v1
24. L. Adamczyk *et al.* (STAR Collaboration), "Jet-like correlations with direct-photon and neutral-pion triggers at  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  GeV", *Phys. Lett. B* **760** (2016) 689
25. L. Adamczyk *et al.* (STAR Collaboration), "Global hyperon polarization in nuclear collisions: evidence for the most vortical fluid", arXiv:1701.06657
26. S. He, X. Luo, Y. Nara, S. Esumi, N. Xu, Effects of Nuclear Potential on the Cumulants of Net-Proton and Net-Baryon Multiplicity Distributions in Au+Au Collisions at  $\sqrt{s_{NN}}=5$ GeV, *Phys. Lett. B* **762** (2016) 296-300
27. J. Adam *et al.* (ALICE collaboration), Higher harmonic flow coefficients of identified hadrons in Pb-Pb collisions at  $\sqrt{s_{NN}}=2.76$  TeV, *JHEP* **1609** (2016) 164
28. J. Adam *et al.* (ALICE collaboration), Elliptic flow of electrons from heavy-flavour hadron decays at mid-rapidity in Pb-Pb collisions at  $\sqrt{s_{NN}}=2.76$  TeV, *JHEP* **1609** (2016) 028
29. J. Adam *et al.* (ALICE collaboration), Pseudorapidity dependence of the anisotropic flow of charged particles in Pb-Pb collisions at  $\sqrt{s_{NN}}=2.76$  TeV, *Phys.Lett. B* **762** (2016) 376-388
30. D. Adamov *et al.* (CERES/NA45 collaboration), Triangular flow of negative pions emitted in PbAu collisions at  $\sqrt{s_{NN}}=17.3$  GeV, *Nucl. Phys. A* **957** (2017) 99-108
31. T. Nonaka, T. Sugiura, S. Esumi, H. Masui, X. Luo, Importance of separated efficiencies between positively and negatively charged particles for cumulant calculations, *Phys. Rev. C* **94** (2016) no.3, 034909
32. J. Adam *et al.* (ALICE collaboration), Anisotropic flow of charged particles in Pb-Pb collisions at  $\sqrt{s_{NN}}=5.02$  TeV, *Phys. Rev. Lett.* **116** (2016) no.13, 132302
33. A. Adare *et al.* (PHENIX collaboration), Single electron yields from semileptonic charm and bottom

- hadron decays in Au+Au collisions at  $\sqrt{s_{NN}}=200$  GeV, Phys. Rev.C93 (2016) 034904
34. S. Esumi, Collective flow measurements at RHIC energies, EPJ Web Conf. 141 (2017) 05001
  35. J. Adam et al. (ALICE collaboration), Flow dominance and factorization of transverse momentum correlations in Pb-Pb collisions at the LHC, Phys.Rev.Lett. 118 (2017) no.16, 162302
  36. C. Aidala et al. (PHENIX collaboration), Measurements of  $B^- \rightarrow J/\psi$  at forward rapidity in p+p collisions at  $\sqrt{s}=510$  GeV, Phys.Rev. D95 (2017) no.9, 092002
  37. A. Adare et al. (PHENIX collaboration), Angular decay coefficients of  $J/\psi$  mesons at forward rapidity from p+p collisions at  $\sqrt{s}=510$  GeV, Phys.Rev. D95 (2017) 092003
  38. J. Adam et al. (ALICE collaboration), W and Z boson production in p-Pb collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$  TeV, JHEP 1702 (2017) 077
  39. L. Adamczyk et al. (STAR Collaboration), Measurement of the cross section and longitudinal double-spin asymmetry for di-jet production in polarized pp collisions at  $\sqrt{s} = 200$  GeV, Phys.Rev. D95 (2017) no.7, 071103
  40. J. Adam et al. (ALICE collaboration), Determination of the event collision time with the ALICE detector at the LHC, Eur.Phys.J.Plus 132 (2017) no.2, 99
  41. Y. Akiba, S. Esumi, K. Fukushima, H. Hamagaki, T. Hatsuda, T. Hirano, K. Shigaki, Proceedings, 25th International Conference on Ultra-Relativistic Nucleus-Nucleus Collisions (Quark Matter 2015) : Kobe, Japan, September 27-October 3, 2015, Nucl.Phys. A956 (2016) pp.1-974
  42. H. Sako et al. (J-PARC Heavy-Ion Collaboration), Studies of high density baryon matter with high intensity heavy-ion beams at J-PARC, Nucl.Phys. A956 (2016) 850-853
  43. A. Adare et al. (PHENIX collaboration), Measurement of the relative yields of  $\phi(2S)$  to  $\phi(1S)$  mesons produced at forward and backward rapidity in p+p, p+Al, p+Au, and 3He+Au collisions at  $\sqrt{s_{NN}}=200$  GeV, Phys.Rev. C95 (2017) no.3, 034904
  44. A. Adare et al. (PHENIX collaboration), Non-perturbative-transverse-momentum effects and evolution in dihadron and direct photon-hadron angular correlations in p+p collisions at  $\sqrt{s}=510$  GeV, Phys.Rev. D95 (2017) no.7, 072002
  45. C. Aidala et al. (PHENIX collaboration), Measurement of long-range angular correlations and azimuthal anisotropies in high-multiplicity p+Au collisions at  $\sqrt{s_{NN}}=200$  GeV, Phys.Rev. C95 (2017) no.3, 034910
  46. J. Adam et al. (ALICE collaboration), Jet-like correlations with neutral pion triggers in pp and central PbPb collisions at 2.76 TeV, Phys.Lett. B763 (2016) 238-250
  47. L. Adamczyk et al. (STAR Collaboration),  $\phi$  production in U + U collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 193$  GeV measured with the STAR experiment, Phys.Rev. C94 (2016) no.6, 064904
  48. L. Adamczyk et al. (STAR Collaboration), Charge-dependent directed flow in Cu+Au collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  GeV, Phys.Rev.Lett. 118 (2017) no.1, 012301
  49. L. Adamczyk et al. (STAR Collaboration), Direct virtual photon production in Au+Au collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  GeV, Phys.Lett. B770 (2017) 451-458
  50. J. Adam et al. (ALICE collaboration),  $J/\psi$  suppression at forward rapidity in Pb-Pb collisions at  $\sqrt{s_{NN}}=5.02$  TeV, Phys.Lett. B766 (2017) 212-224
  51. J. Adam et al. (ALICE collaboration), Enhanced production of multi-strange hadrons in high-multiplicity proton-proton collisions, Nature Phys. (2017)
  52. A. Adare et al. (PHENIX collaboration), Measurements of double-helicity asymmetries in inclusive

- $J/\psi$  production in longitudinally polarized p+p collisions at  $\sqrt{s}=510$  GeV, Phys.Rev. D94 (2016) no.11, 112008
53. J. Adam et al. (ALICE collaboration), D-meson production in p-Pb collisions at  $\sqrt{s_{NN}}=5.02$  TeV and in pp collisions at  $\sqrt{s}=7$  TeV, Phys.Rev. C94 (2016) no.5, 054908
  54. J. Adam et al. (ALICE collaboration), Measurement of azimuthal correlations of D mesons and charged particles in pp collisions at  $\sqrt{s}=7$  TeV and p-Pb collisions at  $\sqrt{s_{NN}}=5.02$  TeV, Eur.Phys.J. C77 (2017) no.4, 245
  55. J. Adam et al. (ALICE collaboration), Correlated event-by-event fluctuations of flow harmonics in Pb-Pb collisions at  $\sqrt{s_{NN}}=2.76$  TeV, Phys.Rev.Lett. 117 (2016) 182301
  56. J. Adam et al. (ALICE collaboration), Measurement of transverse energy at midrapidity in Pb-Pb collisions at  $\sqrt{s_{NN}}=2.76$  TeV, Phys.Rev. C94 (2016) no.3, 034903
  57. J. Adam et al. (ALICE collaboration), Centrality dependence of charged jet production in pPb collisions at  $\sqrt{s_{NN}}=5.02$  TeV, Eur.Phys.J. C76 (2016) no.5, 271
  58. J. Adam et al. (ALICE collaboration), Centrality dependence of  $\phi(2S)$  suppression in p-Pb collisions at  $\sqrt{s_{NN}}=5.02$  TeV, JHEP 1606 (2016) 050
  59. J. Adam et al. (ALICE collaboration), Measurement of D-meson production versus multiplicity in p-Pb collisions at  $\sqrt{s_{NN}}=5.02$  TeV, JHEP 1608 (2016) 078
  60. J. Adam et al. (ALICE collaboration), Particle identification in ALICE: a Bayesian approach, Eur.Phys.J.Plus 131 (2016) no.5, 168
  61. J. Adam et al. (ALICE collaboration), Anisotropic flow of charged particles in Pb-Pb collisions at  $\sqrt{s_{NN}}=5.02$  TeV, Phys.Rev.Lett. 116 (2016) no.13, 132302
  62. J. Adam et al. (ALICE collaboration), Production of  $K^*(892)^0$  and  $(1020)$  in pPb collisions at  $\sqrt{s_{NN}}=5.02$  TeV, Eur.Phys.J. C76 (2016) no.5, 245
  63. J. Adam et al. (ALICE collaboration), Multiplicity dependence of charged pion, kaon, and (anti)proton production at large transverse momentum in p-Pb collisions at  $\sqrt{s_{NN}}=5.02$  TeV, Phys.Lett. B760 (2016) 720-735
  64. J. Adam et al. (ALICE collaboration), Multipion Bose-Einstein correlations in pp, p-Pb, and Pb-Pb collisions at energies available at the CERN Large Hadron Collider, Phys.Rev. C93 (2016) no.5, 054908
  65. J. Adam et al. (ALICE collaboration), Multi-strange baryon production in p-Pb collisions at  $\sqrt{s_{NN}}=5.02$  TeV, Phys.Lett. B758 (2016) 389-401
  66. J. Adam et al. (ALICE collaboration), Centrality dependence of the charged-particle multiplicity density at midrapidity in Pb-Pb collisions at  $\sqrt{s_{NN}}=5.02$  TeV, Phys.Rev.Lett. 116 (2016) no.22, 222302
  67. J. Adam et al. (ALICE collaboration), Charge-dependent flow and the search for the chiral magnetic wave in Pb-Pb collisions at  $\sqrt{s_{NN}}=2.76$  TeV, Phys.Rev. C93 (2016) no.4, 044903
  68. A. Adare et al. (PHENIX collaboration), Inclusive cross section and double-helicity asymmetry for  $\phi$  production at midrapidity in p+p collisions at  $\sqrt{s}=510$  GeV, Phys.Rev. D93 (2016) no.1, 011501
  69. J. Adam et al. (ALICE collaboration), Measurement of an excess in the yield of  $J/\psi$  at very low pT in Pb-Pb collisions at  $\sqrt{s_{NN}}=2.76$  TeV, Phys.Rev.Lett. 116 (2016) no.22, 222301
  70. J. Adam et al. (ALICE collaboration), Pseudorapidity and transverse-momentum distributions of

- charged particles in protonproton collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV, Phys.Lett. B753 (2016) 319-329
71. J. Adam et al. (ALICE collaboration), Inclusive quarkonium production at forward rapidity in pp collisions at  $\sqrt{s} = 8$  TeV, Eur.Phys.J. C76 (2016) no.4, 184
  72. A. Adare et al. (PHENIX collaboration), Azimuthally anisotropic emission of low-momentum direct photons in Au+Au collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  GeV, Phys.Rev. C94 (2016) no.6, 064901
  73. J. Adam et al. (ALICE collaboration), Charged-particle multiplicities in protonproton collisions at  $\sqrt{s} = 0.9$  to 8 TeV, Eur.Phys.J. C77 (2017) no.1, 33
  74. J. Adam et al. (ALICE collaboration), Measurement of electrons from heavy-flavour hadron decays in p-Pb collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$  TeV, Phys.Lett. B754 (2016) 81-93
  75. J. Adam et al. (ALICE collaboration), Azimuthal anisotropy of charged jet production in  $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$  TeV Pb-Pb collisions, Phys.Lett. B753 (2016) 511-525
  76. J. Adam et al. (ALICE collaboration), Direct photon production in Pb-Pb collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$  TeV, Phys.Lett. B754 (2016) 235-248
  77. J. Adam et al. (ALICE collaboration), Centrality evolution of the charged-particle pseudorapidity density over a broad pseudorapidity range in Pb-Pb collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$  TeV, Phys.Lett. B754 (2016) 373-385
  78. J. Adam et al. (ALICE collaboration), Measurement of  $D_s^+$  production and nuclear modification factor in Pb-Pb collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$  TeV, JHEP 1603 (2016) 082
  79. J. Adam et al. (ALICE collaboration), Multiplicity and transverse momentum evolution of charge-dependent correlations in pp, pPb, and PbPb collisions at the LHC, Eur.Phys.J. C76 (2016) no.2, 86
  80. J. Adam et al. (ALICE collaboration), Transverse momentum dependence of D-meson production in Pb-Pb collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$  TeV, JHEP 1603 (2016) 081
  81. A. Adare et al. (PHENIX collaboration), Scaling properties of fractional momentum loss of high-pT hadrons in nucleus-nucleus collisions at  $\sqrt{s_{NN}}$  from 62.4 GeV to 2.76 TeV, Phys.Rev. C93 (2016) no.2, 024911
  82. A. Adare et al. (PHENIX collaboration), Transverse energy production and charged-particle multiplicity at midrapidity in various systems from  $\sqrt{s_{NN}} = 7.7$  to 200 GeV, Phys.Rev. C93 (2016) no.2, 024901
  83. A. Adare et al. (PHENIX collaboration), meson production in the forward/backward rapidity region in Cu+Au collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  GeV, Phys.Rev. C93 (2016) no.2, 024904
  84. A. Adare et al. (PHENIX collaboration), Forward J/  $\psi$  production in U+U collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 193$  GeV, Phys.Rev. C93 (2016) no.3, 034903
  85. A. Adare et al. (PHENIX collaboration), Dielectron production in Au+Au collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  GeV, Phys.Rev. C93 (2016) no.1, 014904
  86. A. Adare et al. (PHENIX collaboration), Single electron yields from semileptonic charm and bottom hadron decays in Au+Au collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  GeV, Phys.Rev. C93 (2016) no.3, 034904
  87. A. Adare et al. (PHENIX collaboration), Centrality-dependent modification of jet-production rates in deuteron-gold collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  GeV, Phys.Rev.Lett. 116 (2016) no.12, 122301
  88. A. Adare et al. (PHENIX collaboration), Study of cosmic ray events with high muon multiplicity using the ALICE detector at the CERN Large Hadron Collider, JCAP 1601 (2016) no.01, 032
  89. J. Adam et al. (ALICE collaboration), Event shape engineering for inclusive spectra and elliptic flow

- in Pb-Pb collisions at  $\sqrt{s_{NN}}=2.76$  TeV, Phys.Rev. C93 (2016) no.3, 034916
90. J. Adam et al. (ALICE collaboration), Elliptic flow of muons from heavy-flavour hadron decays at forward rapidity in PbPb collisions at  $\sqrt{s_{NN}}=2.76$  TeV, Phys.Lett. B753 (2016) 41-56
  91. J. Adam et al. (ALICE collaboration), Production of light nuclei and anti-nuclei in pp and Pb-Pb collisions at energies available at the CERN Large Hadron Collider, Phys.Rev. C93 (2016) no.2, 024917
  92. J. Adam et al. (ALICE collaboration),  $\phi$ -meson production at forward rapidity in p-Pb collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$  TeV and in pp collisions at  $\sqrt{s} = 2.76$  TeV, Phys.Lett. B768 (2017) 203-217
  93. J. Adam et al. (ALICE collaboration),  ${}^3_{\Lambda}H$  and  ${}^3_{\Lambda}\bar{H}$  production in Pb-Pb collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$  TeV, Phys.Lett. B754 (2016) 360-372
  94. J. Adam et al. (ALICE collaboration), Differential studies of inclusive  $J/\psi$  and  $\psi(2S)$  production at forward rapidity in Pb-Pb collisions at  $\sqrt{s_{NN}}=2.76$  TeV, JHEP 1605 (2016) 179
  95. J. Adam et al. (ALICE collaboration), Forward-central two-particle correlations in p-Pb collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$  TeV, Phys.Lett. B753 (2016) 126-139
  96. A. Adare et al. (PHENIX collaboration), Measurement of higher cumulants of net-charge multiplicity distributions in Au+Au collisions at  $\sqrt{s_{NN}}=7.7 - 200$  GeV, Phys.Rev. C93 (2016) no.1, 011901
  97. J. Adam et al. (ALICE collaboration), Search for weakly decaying  $\bar{\Lambda}\bar{n}$  and  $\Lambda\Lambda$  exotic bound states in central Pb-Pb collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$  TeV, Phys.Lett. B752 (2016) 267-277
  98. J. Adam et al. (ALICE collaboration), Centrality dependence of the nuclear modification factor of charged pions, kaons, and protons in Pb-Pb collisions at  $\sqrt{s_{NN}}=2.76$  TeV, Phys.Rev. C93 (2016) no.3, 034913
  99. A. Adare et al. (PHENIX collaboration), Measurement of parity-violating spin asymmetries in  $W^{\pm}$  production at midrapidity in longitudinally polarized p+p collisions, Phys.Rev. D93 (2016) no.5, 051103

#### < レビュー、解説、書籍等 >

1. 笹 公和、入門講座 精密同位体分析「加速器質量分析装置の原理」、日本分析化学会学会誌「ぶんせき」2016 年 6 月号 (2016) 196-202.

#### < 学位論文 (博士) >

1. 数理物質科学研究科・博士 (理学) 中込 宇宙 (Hiroshi Nakagomi), Measurements of 1st, 2nd and 3rd azimuthal anisotropy in  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  GeV Cu+Au collisions at RHIC-PHENIX (RHIC-PHENIX 実験における  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  GeV 銅・金衝突での 1 次、2 次、3 次方位角異方性の測定)

#### < 学位論文 (修士) >

1. 数理物質科学研究科・修士 (理学) 伊藤 喬一郎、LHC-ALICE 実験  $\sqrt{s} = 7$  TeV 陽子・陽子衝突における直接光子-ハドロン方位角相関の研究



2. 数理物質科学研究科・修士(理学) 工藤 咲子、RHIC-PHENIX 実験  $s_{NN} = 200 \text{ GeV}$  3He+Au 衝突におけるシリコン崩壊点検出器を用いた高横運動量荷電ハドロン測定
3. 数理物質科学研究科・修士(理学) 小山 亮平、LHC-ALICE 実験  $s = 5.02 \text{ TeV}$  陽子・陽子衝突における電磁カロリメータを用いた中性パイ中間子の測定
4. 数理物質科学研究科・修士(理学) 福田 悠裕、RHIC-PHENIX 実験  $s = 510 \text{ GeV}$  陽子・陽子衝突における長距離方位角相関の粒子多重度依存性に関する研究
5. 数理物質科学研究科・修士(理学) 松永 一成、LHC-ALICE 実験  $s_{NN} = 5.02 \text{ TeV}$  鉛・鉛衝突における中性中間子測定による電磁カロリメータの性能評価
6. 数理物質科学研究科・修士(理学) 金 秉徹、LHC-ALICE 実験  $s_{NN} = 5.02 \text{ TeV}$  鉛・鉛衝突における電磁カロリメータを用いたジェットの研究

#### < 学位論文(学士) >

1. 物理学類・学士(理学) 上岡 大起 (Daiki Kamioka)、薄膜からの二次電子放出を利用した RI ビーム飛行時間検出器の大型化 (Developments of time-of-flight detector using secondary electrons from thin foil)
2. 物理学類・学士(理学) 市沢 太地、飛行時間測定器 Multi-gap Resistive Plate Chamber (MRPC); J-PARC 実験に向けた  $30 \times 20 \text{ cm}^2$  大型試作機の陽電子ビームを用いた性能評価
3. 物理学類・学士(理学) 加藤 浩樹、飛行時間測定器 Multi-gap Resistive Plate Chamber (MRPC) の開発; 陽電子ビームと宇宙線を用いた読み出しパッド形状の最適化に向けた性能評価
4. 物理学類・学士(理学) 川名 大地、LHC-ALICE 実験 超前方光子測定用 Si-W 電磁カロリメータ Si PAD 及び Si Pixel 統合型試作機のテストビーム実験による性能評価
5. 物理学類・学士(理学) 川村 陽太、LHC-ALICE 実験 超前方光子測定用電磁カロリメータ Si PAD 試作機の高エネルギー領域 ( $60\text{--}130 \text{ GeV}/c$ ) における性能評価
6. 物理学類・学士(理学) 鈴木 刀真、LHC-ALICE 実験 超前方光子測定用電磁カロリメータ試作機のシミュレーションによる検出器デザインの最適化と性能評価
7. 物理学類・学士(理学) 中川 和也、RHIC-STAR 実験  $s_{NN} = 200 \text{ GeV}$  金・金衝突における反応平面検出器導入のための前方後方領域での反応平面測定
8. 物理学類・学士(理学) 西松 巧矢、LHC-ALICE 実験 超前方光子測定用電磁カロリメータ製作に向けた Si PAD の基礎特性評価
9. 物理学類・学士(理学) ジョン ホジュン、ALICE 実験・超前方光子検出器のシミュレーションによる中性 中間子の識別能力の評価

#### < 国際会議(招待講演) >

1. T. Moriguchi et al., "Density distribution of  $^{14}\text{Be}$  from reaction cross-section measurements", Nuclear chemistry 2016, San Antonio, Texas, USA, 8- 9 December 2016.
2. O. Busch, "Jet Physics at ALICE", seminar PBM 70th birthday "QCD thermodynamics - pressure and passion", Mainz, Germany, August 24-26 2016
3. O. Busch, "Jets in Pb-Pb collisions at ALICE", XII Quark confinement and the hadron spectrum, Makedonia Palace conference centre, Thessaloniki, Greece, August 28 - September 4 2016
4. S. Sakai, "Heavy-flavour productions in the relativistic heavy ion collisions at the LHC", XII Quark

confinement and the hadron spectrum, Makedonia Palace conference centre, Thessaloniki, Greece, August 28 - September 4 2016

5. S. Esumi, "Collective flow measurements at RHIC energies", XLVI International Symposium on Multi particle Dynamics (ISMD2016), Jeju island, South Korea, August 29 - September 2, 2016
6. S. Esumi, "Experimental Research On Quark Gluon Plasma With Relativistic Heavy-ion Collisions At RHIC", 26th International Nuclear Physics Conference (INPC 2016), Adelaide Convention Centre, Adelaide, Australia, 11-16 September 2016
7. O. Busch, "Strangeness Production and Nuclear Modification at LHC energies", Hard Probes 2016, Wuhan, China, Sep 22-27 2016
8. S. Esumi, "Collective flow measurements at RHIC energies", Korean Physics Society meeting, Gwangju, Korea, 19 - 21 October 2016
9. S. Esumi, "Beam Energy Scan studies at RHIC and Flow studies in small system", Heavy-Ion Meeting, Chonnam National University, Gwangju, Korea, 22 October 2016
10. T. Chujo, "Forward Calorimeter upgrade in ALICE", France-Japan SAKURA Workshop on small-x physics at the LHC, The University of Tokyo, Komaba campus, 2016-Oct-29

#### < 国際会議発表 >

1. S. Suzuki, "Development of Secondary Electron Time Detector for Ion Beams", International Nuclear Physics Conference (INPC2016), Adelaide Convention Center, Australia, 11-26 September 2016 ( Oral presentation )
2. T. Moriguchi et al., "Density Distributions of  $^{11}\text{Li}$  Deduced from Reaction Cross Section Measurements", International Nuclear Physics Conference (INPC2016), Adelaide Australia, 11-16 September 2016. ( Poster )
3. S. Suzuki, "Development of time-of-flight detector for mass measurements of short-lived nuclei with the rare-RI ring", International Symposium on Neutron Star Matter (NSMAT2016), 21-24 November 2016 (Poster)
4. T. MATSUNAKA, K. SASA, T. TAKAHASHI, M. MATSUMURA, K. SUEKI, A. GOTO, T. WATANABE, Y. TUCHIYA, N. HIRANO, M. KURI, M. TAKAHASHI, K. KAZAHAYA, I. MIYAGI AND H. MATSUZAKI, Decrease of iodine isotope ratio observed in crater lake and geothermal area at Zao volcano, Japan, Goldschmidt2016, Pacifico Yokohama, Yokohama, 26 June-1 July, 2016.
5. Y. SATOU, K. SUEKI, K. SASA, I. NAKAI, Y. ABE, Y. IIZAWA, T. ONO, K. ADACHI AND Y. IGARASHI, Overview of the radioactive particles in the Fukushima accident, Goldschmidt2016, Pacifico Yokohama, Yokohama, 26 June-1 July, 2016.
6. M. HONDA, K. SUEKI R. TOMITA, A. SAKAGUCHI, K. SASA, Analysis for chlorine and iodine in natural samples by SEC coupled with ICP-QQQ, Goldschmidt2016, Pacifico Yokohama, Yokohama, 26 June-1 July, 2016.
7. Kimikazu Sasa, Tsutomu Takahashi, Tetsuya Matsunaka, Masumi Matsumura, Seiji Hosoya, Maki Honda, Keisuke Sueki, Mark Stodola, Mark Sundquist, Isobar separation performance of the Tsukuba 6 MV AMS system, 12th European Conference on Accelerators in Applied Research and Technology (ECAART12), Jyväskylä, Finland on 3 - 8 July 2016.

8. Seiji Hosoya, Kimikazu Sasa, Tetsuya Matsunaka, Masumi Matsumura, Tsutomu Takahashi, Mark Sundquist, Mark Stodola, Keisuke Sueki, Optimization of  $\Delta E - E$  detector for  $^{41}\text{Ca}$  AMS measurement using PHITS code simulation, 12th European Conference on Accelerators in Applied Research and Technology (ECAART12) , Jyväskylä, Finland on 3 - 8 July 2016.
9. A. Yamazaki, K. Sasa, S. Ishii, M. Kurosawa, S. Tomita, S. Shiki, G. Fujii, M. Ukibe, M. Ohkubo, A. Uedono, E. Kita, Development of the microbeam PIXE system for additive light elements in structural materials, 15th International Conference on Nuclear Microprobe Technology and Applications (ICNMTA) ( IMP-CAS Lanzhou, China), 31July - 5August, 2016.
10. Kimikazu Sasa, Akiyoshi Yamazaki, Shigeo Tomita, Masanori Kurosawa, Satoshi Ishii, Hiroshi Naramoto, Masao Sataka, Hiroshi Kudo, Eiji Kita, Akira Uedono, Construction of an Ion Beam Analysis Facility for Structural Materials at the University of Tsukuba, 2nd International Symposium for Innovative Measurement and Analysis for Structural Materials (SIP-IMASM2016), AIST Tsukuba Campus, Japan, 27-28 Sep., 2016.
11. A. Yamazaki, K. Sasa, S. Ishii, M. Kurosawa, S. Tomita, S. Shiki, G. Fujii, M. Ukibe, M. Ohkubo, A. Uedono, E. Kita, Present Status of Development of the Ion Microbeam System for Additive Light Elements in Structural Materials at the University of Tsukuba, 2nd International Symposium for Innovative Measurement and Analysis for Structural Materials (SIP-IMASM2016), AIST Tsukuba Campus, Japan, 27-28 Sep., 2016.
12. T. Chujo, "Operation and Plan, Hiroshima and Tsukuba", Sixth Annual ALICE Tire-1/Tire-2 Workshop, the Bergen University College, Bergen, Norway, April 18-20, 2016
13. O. Busch, "Jet Properties in Pb-Pb collisions at ALICE", LHC seminar, CERN, May 10 2016
14. T. Chujo, "Measurements of Jets and Photons in Heavy Ion Collisions at the Highest Beam Energy during the LHC-Run 2 by ALICE", 2016 Joint Workshop of the France-Korea (FKPPL) and France-Japan (TYL/FJPPL) Particle Physics Laboratories, Korea Institute for Advanced Study (KIAS), Seoul, May 18, 2016
15. T. Chujo, "Forward Calorimeter upgrade in ALICE", ALICE Calo meeting, NRC Kurchatov Institute, 12-13 September 2016, NRC Kurchatov Institute, Moscow, Russia
16. R. Hosokawa, "Recent jet spectra mesurent results and future prospects in ALICE with analysis level QA", ALICE Calo meeting, NRC Kurchatov Institute, 12-13 September 2016, NRC Kurchatov Institute, Moscow, Russia
17. K. Ito, "Isolated photon-hadron correlations in pp collisions at 7 TeV in ALICE with EMCAL", ALICE Calo meeting, NRC Kurchatov Institute, 12-13 September 2016, NRC Kurchatov Institute, Moscow, Russia
18. O. Busch, "Strangeness production and nuclear modification at LHC energies", TGSW 2016, Tsukuba International Congress Center, Tsukuba, Sep 17 - 19 2016
19. T. Nonaka, "Fluctuation of Conserved Quantities to look for a Critical Point in Phase Diagram", TGSW 2016, Tsukuba International Congress Center, Tsukuba, Sep 17 - 19 2016
20. H. Yokoyama, "Measurement of Inclusive Charged Jet Production in pp and Pb-Pb collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$  TeV with ALICE", Hard Probes 2016, Wuhan, China, Sep 22-27 2016
21. H. Nakagomi, "Forward/Backward asymmetry of  $v_n$  in Cu+Au at RHIC-PHENIX", Quark Matter 2017, Hyatt Regency Chicago, USA, February 6-11, 2017

#### < 国内会議発表（招待講演） >

1. 笹 公和, 「最新の加速器質量分析装置が拓く多核種 AMS による高精度年代測定の展望」(招待講演), 「高精度年代測定の地平-AMS と樹木年輪」第 19 回日本 AMS シンポジウム (JAMS-19)・2016 年度「樹木年輪」研究会 共同開催シンポジウム、2016 年 12 月 17 - 18 日, 国立歴史民俗博物館 講堂
2. 笹 公和, 「加速器質量分析法による長寿命放射性核種の超高感度検出技術の進展とその応用」(招待講演), 第 18 回「環境放射能」研究会, つくば, 2017.3.14-16.
3. S. Esumi, "Experimental results on collective flow and correlation at RHIC and LHC", 30th Heavy Ion Cafe, June 11, 2016, RIKEN, Wako.
4. O. Busch, "Exploring the QGP with Jets at ALICE", 32nd Heavy Ion cafe, RIKEN, Wako, Jan. 23, 2017
5. 江角 晋一, 『RHIC における QCD 相転移領域の実験研究』、シンポジウム「原子核コライダーにおける QCD 物理: クォーク・グルーオンプラズマの発見を中心に」, 日本物理学会第 72 回年次大会, 大阪大学 豊中キャンパス, 2017 年 3 月 17 日-20 日

#### < 国内会議発表 >

1. 向井もも, "Development of low-background gas-counter for the beta spectroscopy at KISS" 第 9 回 停止・低速不安定核ビームを用いた核分光研究会 (2017 年 3 月、原子力機構) (口頭発表)
2. 木村 創大, "Precision mass measurements of proton-rich nuclei in  $A \sim 60 - 80$  region with the multireflection time-of-flight mass spectrometer" 第 9 回 停止・低速不安定核ビームを用いた核分光研究会 (2017 年 3 月、原子力機構) (口頭発表)
3. 松中哲也, 笹公和, 高橋努, 松村万寿美, 末木啓介, 富田涼平, 恩田裕一, 石丸隆, 谷口圭輔, 脇山義史, 松崎浩之「福島河川と沿岸海洋環境における  $^{129}\text{I}/^{137}\text{Cs}$  比から推察される放射性のヨウ素とセシウムの挙動」平成 28 年度北関東支部「若手研究者発表会」, 東海, 2016.4.15.
4. 松中哲也, 笹公和, 高橋努, 松村万寿美, 末木啓介, 富田涼平, 恩田裕一, 石丸隆, 谷口圭輔, 脇山義史, 松崎浩之, 「福島河川の土壌・水圏における  $^{129}\text{I}/^{137}\text{Cs}$  分布から推測される放射性ヨウ素と放射性セシウムの挙動」, 第 53 回アイソトープ・放射線研究発表会、2016 年 7 月 6 日 (水)~7 月 8 日 (金)、東京大学弥生講堂 (東京都文京区弥生 1-1-1)
5. 笹 公和, 石井 聡, 大島弘行, 高橋 努, 田島義一, 大和良広, 関場大一郎, 森口哲朗, 左高正雄, 檜本洋, 工藤 博, 松村万寿美, 山崎明義, 松中哲也, 喜多英治, 上殿明良, 筑波大学タンデム加速器施設 UTTAC の現状 (2015 年度), 「稼働を開始した 6 MV タンデム加速器によるイオンビーム利用研究の展望」, 「第 29 回タンデム加速器及びその周辺技術の研究会」, 2016 年 6 月 30 日 (木) ~7 月 1 日 (金), 筑波大学 大学会館
6. 森口 哲朗, 笹 公和, 大島弘行, 石井 聡, 高橋 努, 田島義一, 大和良広, 関場大一郎, 喜多英治, 上殿明良筑波大学 12UD ペレトロンタンデム加速器の廃止措置, 「第 29 回タンデム加速器及びその周辺技術の研究会」, 2016 年 6 月 30 日 (木) ~7 月 1 日 (金), 筑波大学 大学会館
7. 山崎 明義, 笹 公和, 石井 聡, 黒澤正紀, 富田成夫, 上殿明良, 筑波大学 6MV タンデム加速器マイクロビームラインの整備状況, 「第 29 回タンデム加速器及びその周辺技術の研究会」, 2016 年 6 月 30 日 (木) ~7 月 1 日 (金), 筑波大学 大学会館

8. 松村 万寿美, 笹 公和, 松中哲也, 高橋 努, 細谷青児, 末木啓介, 筑波大学 6MV タンデム加速器による I-129 測定の性能評価-TSUKUBA I-129 STD 作製に向けて-, 「第 29 回タンデム加速器及びその周辺技術の研究会」, 2016 年 6 月 30 日 (木) ~ 7 月 1 日 (金), 筑波大学 大学会館
9. 細谷 青児, 笹 公和, 高橋 努, 松中哲也, 松村万寿美, 末木啓介, 36Cl-AMS 測定に向けた, 妨害核種 36S 除去の検討, 「第 29 回タンデム加速器及びその周辺技術の研究会」, 2016 年 6 月 30 日 (木) ~ 7 月 1 日 (金), 筑波大学 大学会館
10. 松中 哲也, 笹 公和, 細谷青児, 高橋 努, 松村万寿美, 末木啓介, ガスイオン源を用いた迅速 14C 測定法の検討, 「第 29 回タンデム加速器及びその周辺技術の研究会」, 2016 年 6 月 30 日 (木) ~ 7 月 1 日 (金), 筑波大学 大学会館
11. 椎名 陽子, 木下 亮, 松田 誠, 今井 誠, 川面 澄, 左高正雄, 笹 公和, 富田成夫, 高速クラスター照射におけるコンバイ電子収量の標的膜厚依存性, 「第 29 回タンデム加速器及びその周辺技術の研究会」, 2016 年 6 月 30 日 (木) ~ 7 月 1 日 (金), 筑波大学 大学会館
12. 笹 公和, 石井 聡, 大島 弘行, 高橋 努, 田島 義一, 大和 良広, 関場 大一郎, 森口 哲朗, 喜多 英治, 上殿 明良, 筑波大学複合タンデム加速器施設の現状報告, 第 13 回日本加速器学会年会, 2016 年 8 月 8 日 (月) ~ 10 日 (水), 幕張メッセ国際会議場
13. 笹 公和, Stodola Mark, Sundquist Mark, 複合イオンビーム利用研究の展開を目指した 6 MV タンデム型静電加速器の開発, 第 13 回日本加速器学会年会, 2016 年 8 月 8 日 (月) ~ 10 日 (水), 幕張メッセ国際会議場
14. 黒尾奈未, 笹公和, 細谷青児, 松中哲也, 6MV タンデム型静電加速器におけるビーム輸送設定条件の検討, 第 13 回日本加速器学会年会, 2016 年 8 月 8 日 (月) ~ 10 日 (水), 幕張メッセ国際会議場
15. 椎名陽子, 木下亮, 松田誠, 今井誠, 川面澄, 左高正雄, 笹公和, 富田成夫, 炭素薄膜への高速クラスターイオン照射における 0 度電子分光 I, 日本物理学会 2016 年秋季大会, 2016 年 9 月 13-16 日, 金沢大学
16. 佐藤志彦, 末木啓介, 笹公和, 福島第一原発北西部における放射性物質と放射性粒子の関係, 2016 日本放射化学学会年会・第 60 回放射化学討論会, 2016 年 9 月 10 日 ~ 12 日, 新潟大学五十嵐キャンパス
17. 松中 哲也, 笹 公和, 細谷 青児, 高橋 努, 松村 万寿美, 末木 啓介, CO<sub>2</sub> ガスイオン源を用いた迅速 <sup>14</sup>C-AMS の開発, 2016 日本放射化学学会年会・第 60 回放射化学討論会, 2016 年 9 月 10 日 (土) ~ 12 日 (月), 新潟大学五十嵐キャンパス
18. 富田涼平, 松中哲也, 本多真紀, 佐藤志彦, 松村万寿美, 高橋努, 坂口綾, 松崎浩之, 笹公和, 末木啓介, 福島原発事故以降の 河川 における溶存態と底質土のセシウム同位体比変化, 2016 日本放射化学学会年会・第 60 回放射化学討論会, 2016 年 9 月 10 日 ~ 12 日, 新潟大学五十嵐キャンパス
19. 黒澤正紀, 笹公和, 石井聡, 対馬花崗岩の流体包有物中のチタン濃度, 日本鉱物科学学会年会, 2016 年 9 月 23 日 ~ 25 日, 金沢大学
20. 池端 慶, 服部浩一, 黒澤 正紀, 小室光世, 笹 公和, 石井 聡, 三好陽子, 島田和彦, 戸塚修平, 石橋純一郎, 中部沖縄トラフ伊平屋北海丘熱水域に産する黄鉄鉱の 微量元素組成の特徴, 日本火山学会 2016 年度秋季大会学術講演会, 2016 年 10 月 13 日 ~ 15 日, 富士吉田市民会館富士山ホール (山梨県富士吉田市)
21. 笹 公和, 左高 正雄, 檜本 洋, 工藤 博, 低 LET 加速粒子による放射線耐性試験のための宇宙用素子照射装置の開発, 日本原子力学会 2016 年秋の大会, 2016 年 9 月 7 日 ~ 9 日, 福岡県久留米シ

ティブラザ

22. 細谷 青児, 笹 公和, 高橋 努, 松中 哲也, 松村 宏, 松村 万寿美 万寿美, 末木 啓介, 難測定核種  $^{41}\text{Ca}$  の加速器質量分析法による超高感度測定, 日本原子力学会 2016 年秋の大会, 2016 年 9 月 7 日~9 日, 福岡県久留米シティブラザ
23. 末木 啓介, 佐藤 志彦, 笹 公和, 福島第一原発から北西地域における放射性核種と放射性粒子, 日本放射線安全管理学会 第 15 回学術大会, 2016 年 11 月 30 日~12 月 2 日, 岡山大学
24. 松村万寿美, 笹 公和, 松中 哲也, 末木 啓介, 高橋 努, 渡邊 雅也, 松崎 浩之, 福島第一原子力発電所 事故前後における降水中のヨウ素 129 濃度の推移, 日本放射線安全管理学会 第 15 回学術大会, 2016 年 11 月 30 日~12 月 2 日, 岡山大学
25. 村上道夫, 荏澤貴夫, 吉兼隆生, 末木啓介, 笹公和, 芳村圭, 仮想的な原子力発電所事故における飲食物由来の被ばく量と希釈率の推定, 2016 年度第 29 回日本リスク研究学会年次大会, 2016 年 11 月 25~27 日, 大分市 ホルトホール大分
26. 笹 公和, 宇宙線生成核種の超高感度検出を実現する 6 MV タンデム加速器質量分析装置, 第 2 回 TIA 光・量子計測シンポジウム- 光・量子が繋ぐ TIA 計測連携 新しい科学と産業の創製をめざして, 2016 年 11 月 10 日, つくば国際会議場 2F 中会議室 201B 202
27. 山崎明義, 笹公和, 石井聡, 黒澤正紀, 富田成夫, 椎名陽子, 檜本洋, 左高正雄, 工藤博, 志岐成友, 藤井剛, 浮辺雅宏, 大久保雅隆, 上殿明良, 喜多英治, 筑波大学 6MV タンデム加速器イオンマイクロビームシステムの整備状況, 第 2 回 TIA 光・量子計測シンポジウム- 光・量子が繋ぐ TIA 計測連携 新しい科学と産業の創製をめざして, 2016 年 11 月 10 日, つくば国際会議場 2F 中会議室 201B 202
28. 中本尚樹, 新田紀子, 土田秀次, 富田成夫, 笹 公和, 平田浩一, 平野貴美, 山田圭介, 千葉敦也, 斎藤勇一, 鳴海一雅, 高速  $\text{C}_{60}$  フラレーンイオンビーム照射による GaSb 表面改質, 高知工科大学 総合研究所ナノテク研シンポジウム 2016, 2016 年 11 月 12 日, 高知工科大学 永国寺キャンパス
29. Y. Shiina, R. Kinoshita, M. Matsuda, M. Imai, K. Kawatsura, M. Sataka, K. Sasa and S. Tomita, Target thickness dependence of convoy electron yield observed in fast cluster ion bombardment on thin foils, 第 17 回「イオンビームによる表面・界面」特別研究会, 2016 年 1 2 月 3 日 4 日京都府立大学
30. 細谷青児, 笹公和, 高橋努, 松中哲也, 松村万寿美, 末木啓介,  $^{41}\text{Ca}$ -AMS の実用化に向けた技術開発と測定評価, 第 19 回日本 AMS シンポジウム (JAMS-19), 2016 年 12 月 17 - 18 日, 国立歴史民俗博物館 講堂
31. 本多真紀, 高久雄一郎, 大野剛, 角田伸一郎, 鹿籠康行, 松崎浩之, 坂口綾, 笹公和, 高橋努, 松中哲也, 松村万寿美, 細谷青児, 末木啓介, AMS とコリジョン/リアクションセル ICP-MS による環境試料中の  $^{129}\text{I}$  の分析, 第 19 回日本 AMS シンポジウム (JAMS-19), 2016 年 12 月 17 - 18 日, 国立歴史民俗博物館 講堂
32. 稲葉留衣, 坂口綾, 野村知哉, 山川茜, 山野博哉, 佐々木圭一, 渡邊剛, Peter Steier, 本多真紀, 笹公和, 松中哲也, 細谷青児, 高橋努, 松村万寿美, 末木啓介, サンゴコア分析による長寿命人工放射性核種の日本海導入履歴復元の試み, 第 19 回日本 AMS シンポジウム (JAMS-19), 2016 年 12 月 17 - 18 日, 国立歴史民俗博物館 講堂
33. 松村万寿美, 笹公和, 松中哲也, 高橋努, 細谷青児, 末木啓介, 筑波大学におけるヨウ素 129 標準試料作製計画, 第 19 回日本 AMS シンポジウム (JAMS-19), 2016 年 12 月 17 - 18 日, 国立歴史民俗博物館 講堂
34. Hongtao Shen, Jiang Shan, Kimikuzu Sasa, Masumi Matsumura, Tetsuya Masunaka, Tsutomu Taka-

- hashi, Seiji Hosoya, Keisuke Sueki, Study on  $^{36}\text{Cl}$ -AMS for Exposure Age Dating of Guangxi Tiankeng, 第 19 回日本 AMS シンポジウム (JAMS-19), 2016 年 12 月 17 - 18 日, 国立歴史民俗博物館 講堂
35. 松中哲也, 笹公和, 高橋努, 細谷青児, 松村万寿美, 末木啓介, 佐藤志彦, 東日本原子力施設周辺の年輪内における 1960 年以降の炭素 14 濃度変動, 第 19 回日本 AMS シンポジウム (JAMS-19), 2016 年 12 月 17 - 18 日, 国立歴史民俗博物館 講堂
  36. 末木啓介, 松尾一樹, 太田裕貴, 本多真紀, 坂口綾, 笹公和, 松中哲也, 高橋努, 細谷青児, 松村万寿美, 佐藤志彦, 福島事故由来の放射性物質における長寿命核種の AMS 測定, 第 19 回日本 AMS シンポジウム (JAMS-19), 2016 年 12 月 17 - 18 日, 国立歴史民俗博物館 講堂
  37. 松中 哲也, 笹 公和, 高橋 努, 細谷 青児, 松村 万寿美, 末木 啓介, 佐藤 志彦, 東海原子力施設の稼働状況に回答した樹木年輪内の炭素 14 濃度変動, 第 18 回「環境放射能」研究会, 2017 年 3 月 14 ~ 3 月 16 日
  38. 細谷青児, 笹公和, 松中哲也, 高橋努, 松村万寿美, Hongtao Shen, 末木啓介「長寿命放射性核種  $^{36}\text{Cl}$  の加速器質量分析法による超高感度測定」, 第 18 回「環境放射能」研究会, つくば, 2017.3.14-16.
  39. 新田紀子, 中本尚樹, 土田秀次, 富田成夫, 笹 公和, 平田浩一, 平野貴美, 山田圭介, 千葉敦也, 斎藤勇一, 鳴海一雅, 高速  $\text{C}_{60}$  フラレーンイオンビーム照射による GaSb への照射効果, 日本金属学会、2017 年春期 (第 160 回) 講演大会, 首都大学東京南大沢キャンパス, 2017 年 3 月 15 日 (水) ~ 3 月 17 日 (金)
  40. 細谷青児, 笹公和, 高橋努, 松中哲也, 松村万寿美, Hongtao Shen, 末木啓介, 加速器質量分析法における  $^{10}\text{Be}$ ,  $^{36}\text{Cl}$  の高感度測定のための同重体分離手法の検討とその測定性能評価, 日本原子力学会 2017 年春の年会, 東海大学湘南キャンパス, 2017. 3. 27-29.
  41. 笹 公和, 山崎明義, 石井 聡, 黒澤正紀, 富田成夫, 左高正雄, 檜本 洋, 工藤 博, 構造材料計測用イオンビーム分析装置の開発, 日本原子力学会 2017 年春の年会, 東海大学湘南キャンパス, 2017. 3. 27-29.
  42. 野中 俊宏 「Measurement of Sixth Order Cumulant of Net-Proton Multiplicity Distribution at  $\sqrt{s_{\text{NN}}} = 200 \text{ GeV}$  from the STAR experiment」, 日本物理学会 2016 年秋季大会, 宮崎大学木花キャンパス、2016 年 9 月 21 日 (水) ~ 24 日 (土)
  43. 田中 直斗 「LHC-ALICE 実験  $\sqrt{s_{\text{NN}}} 2.76 \text{ TeV}$  Pb+Pb 衝突における量子力学的干渉効果のイベント平面に対する方位角依存性の研究」, 日本物理学会 2016 年秋季大会, 宮崎大学木花キャンパス、2016 年 9 月 21 日 (水) ~ 24 日 (土)
  44. 細川 律也 「LHC-ALICE 実験  $\sqrt{s_{\text{NN}}} 5.02 \text{ TeV}$  pp 衝突におけるジェット横運動量スペクトル測定」, 日本物理学会 2016 年秋季大会, 宮崎大学木花キャンパス、2016 年 9 月 21 日 (水) ~ 24 日 (土)
  45. 杉浦 哲郎 「RHIC-STAR 実験金 + 金衝突における net-charge 揺らぎの 依存性」, 日本物理学会 2016 年秋季大会, 宮崎大学木花キャンパス、2016 年 9 月 21 日 (水) ~ 24 日 (土)
  46. T. Chujo, "Forward Calorimeter upgrade in ALICE", CiRfSE workshop, Jan 24, 2017 Univ. of Tsukuba
  47. S. Mizuno, "Prompt identified particle spectra at RHIC-STAR", CiRfSE workshop, Jan 24, 2017 Univ. of Tsukuba
  48. S. Sakai, "Heavy flavor measurements at LHC-ALICE", CiRfSE workshop, Jan 24, 2017 Univ. of Tsukuba
  49. H. Nakagomi, "Azimuthal anisotropy in CuAu collisions at RHIC-PHENIX", CiRfSE workshop, Jan 24, 2017 Univ. of Tsukuba

50. T. Nonaka, "Fluctuations at RHIC-STAR", CiRfSE workshop, Jan 24, 2017 Univ. of Tsukuba
51. N. Tanaka, "Azimuthally sensitive HBT measurements at LHC-ALICE", CiRfSE workshop, Jan 24, 2017 Univ. of Tsukuba
52. R. Aoyama, "Multi-particle correlations at RHIC-STAR", CiRfSE workshop, Jan 24, 2017 Univ. of Tsukuba
53. R. Hosokawa, "Jet measurements at LHC-ALICE", CiRfSE workshop, Jan 24, 2017 Univ. of Tsukuba
54. J. Lee, "Jet-hadron correlations at LHC-ALICE", CiRfSE workshop, Jan 24, 2017 Univ. of Tsukuba
55. K. Sato, "MRPC-TOF development for future experiments", CiRfSE workshop, Jan 24, 2017 Univ. of Tsukuba
56. 江角 晋一, 「RHIC ビームエネルギー走査実験と STAR 実験のアップグレード計画」, 日本物理学会第 72 回年次大会, 大阪大学 豊中キャンパス, 2017 年 3 月 17 日-20 日
57. 横山 広樹, 「The nuclear modification of charged jets in  $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$  TeV Pb-Pb collisions at LHC-ALICE」, 日本物理学会第 72 回年次大会, 大阪大学 豊中キャンパス, 2017 年 3 月 17 日-20 日
58. 野中 俊宏, 「Centrality and Acceptance Dependence of Sixth Cumulant of Net-Proton Multiplicity Distribution at  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  GeV at the STAR experiment」, 日本物理学会第 72 回年次大会, 大阪大学 豊中キャンパス, 2017 年 3 月 17 日-20 日
59. 杉浦 哲郎, 「RHIC-STAR 実験金 + 金衝突における net-charge 揺らぎの 依存性」, 日本物理学会第 72 回年次大会, 大阪大学 豊中キャンパス, 2017 年 3 月 17 日-20 日
60. 工藤 咲子, 「RHIC-PHENIX 実験 3He+Au 衝突における 高運動量の荷電ハドロン生成量の測定」, 日本物理学会第 72 回年次大会, 大阪大学 豊中キャンパス, 2017 年 3 月 17 日-20 日
61. 川名 大地, 「LHC-ALICE 実験 超前方光子測定用電磁カロリメータ Si PAD 及び Si Pixel 統合型試作機のテストビーム実験による性能評価」学部学生ポスターセッション), 日本物理学会第 72 回年次大会, 大阪大学 豊中キャンパス, 2017 年 3 月 17 日-20 日

#### < 科学研究費取得状況 >

1. 基盤研究 (A) 「多種の長寿命放射性核種を超高感度で検出可能な加速器質量分析法の開発」, 研究期間: 2015 - 2018 年度、研究経費: 直接経費 33,500 千円、間接経費 10,050 千円、2016 年度: 10,790 千円 (直接経費: 8,300 千円, 間接経費: 2,490 千円)、研究代表者: 笹 公和、研究分担者: 末木啓介、坂口綾、松崎浩之、松四 雄騎、松村宏、國分陽子
2. 挑戦的萌芽研究 「炭素 14 マッピング直接測定を目指したレーザーアブレーション加速器質量分析法の開発」, 研究期間: 2014 - 2016 年度、研究経費: 直接経費 3,000 千円、間接経費 900 千円、2016 年度: 910 千円 (直接経費: 700 千円, 間接経費: 210 千円)、研究代表者: 笹 公和、研究分担者: 末木啓介
3. 新学術領域研究 (研究領域提案型) 新型飛行時間検出器による Ni 同位体の質量測定、代表 (小沢顕) 2,800 千円、840 千円
4. 新学術領域研究 (研究領域提案型) 「福島原発事故により放出された放射性核種の環境動態に関する学際的研究」, 「水・土砂移動に伴う放射性物質の移行過程の理解」研究期間: 2012 - 2016 年度、研究経費: 直接経費: 85,200 千円, 間接経費: 25,560 千円、研究代表者: 恩田 裕一、研究分担者: 笹 公和、分担金: 2016 年度 1,000 千円



5. 科学研究費 基盤研究 (B)「革新的な超伝導分子検出技術の開拓と宇宙における分子進化の精密評価への展開」、研究代表者：浮辺雅宏 (産総研)、研究分担者：笹公和、富田成夫、平成 27 年度～平成 30 年度 13,100 千円、分担金：2016 年度 150 千円
6. 若手研究 (B)「スキン構造理解のための不安定原子核の陽子及び中性子密度分布の研究」、研究代表者：森口哲朗、平成 29 年度～平成 31 年度、直接経費 3200 (千円) 間接経費 900 (千円)
7. 基盤研究 (B)「粒子・ジェット方位角相関測定によるグルーオン衝撃波の探索」、研究代表者：三明康郎、平成 25 年度～平成 28 年度、配分総額 14300 (千円)
8. 挑戦的萌芽研究「高エネルギー実験のための 10 ピコ秒 飛行時間測定器の開発」、研究代表者：中條達也、平成 27 年度～平成 29 年度、配分総額 3900 (千円)

#### < 外部資金取得状況 >

1. 内閣府 SIP (戦略的創造研究プログラム)「革新的構造材料」、「構造材料の未活用情報を測定する先端計測技術開発」(研究拠点型) 研究代表者：大久保雅隆 (産業技術総合研究所) 筑波大学機関代表：喜多英治、副代表：笹公和、事業参加者：12 名、平成 26 年度～平成 30 年度 配分経費：250,000 千円、2016 年度 42,922 千円
2. 日米科学技術協力事業、「相対論的重イオン加速器をもちいた PHENIX 実験」、研究代表者：江角晋一、平成 28 年度、配分総額 13800 (千円)

#### < 学内プロジェクト >

1. 平成 28 年度 TIA 連携プログラム探索推進事業「かけはし」「加速器総合技術インターンシップの構築」【調査研究代表者】代表 高エネルギー加速器研究機構 道園 真一郎【TIA 内連携機関：連携機関代表者】 筑波大学：笹公和、筑波大学配分経費 300,000 円

# VII-1. 量子物性理論

教授：初貝 安弘

大学院生：6名(博士1名、修士5名)

卒論学生：3名

## 1 トポロジカル相におけるバルク・エッジ対応の普遍性について

バルクの境界をもたない多粒子系のある相が励起ギャップ有限で特徴的な低エネルギー状態をもたない場合（一般化された絶縁体），物性物理学において大きな成功をあげてきた通常の自発的対称性の破れの概念に基づく相分類の理論（ランダウ理論）は適用できないが，この系に不純物および境界等の幾何学的な局所的外乱を与えたとき特徴的な低エネルギー局在状態が生ずることがある。このとき，この局在状態の存在を外乱を与える前のバルクの特徴と考え，バルクの相をエッジ状態が特徴づけると考えてみよう。このような物質相の典型例が2次元磁場下の量子ホール相であり，バルクの量子ホール相は対称性の破れを伴わず，ベリー接続を用いたトポロジカルな量によってのみ，特徴づけられるが，境界等の幾何学的外乱の下で存在する局在状態でバルクの量子ホール相を特徴づけるとみなすのである。つまりこのエッジ状態を物理的な観測量すなわちトポロジカルな秩序変数とみるわけである。この状況は，逆に考えると，この特徴的なエッジ状態はバルクの（隠れた）トポロジカルな特性の反映であると考えられることもでき，一般にこの相互関係はバルク・エッジ対応と呼ばれる。このバルク・エッジ対応の視点は，いわゆるトポロジカル絶縁体の発見以来極めて広く多様な相に対して適用可能である普遍的な概念であることが明らかとなりつつある。このバ

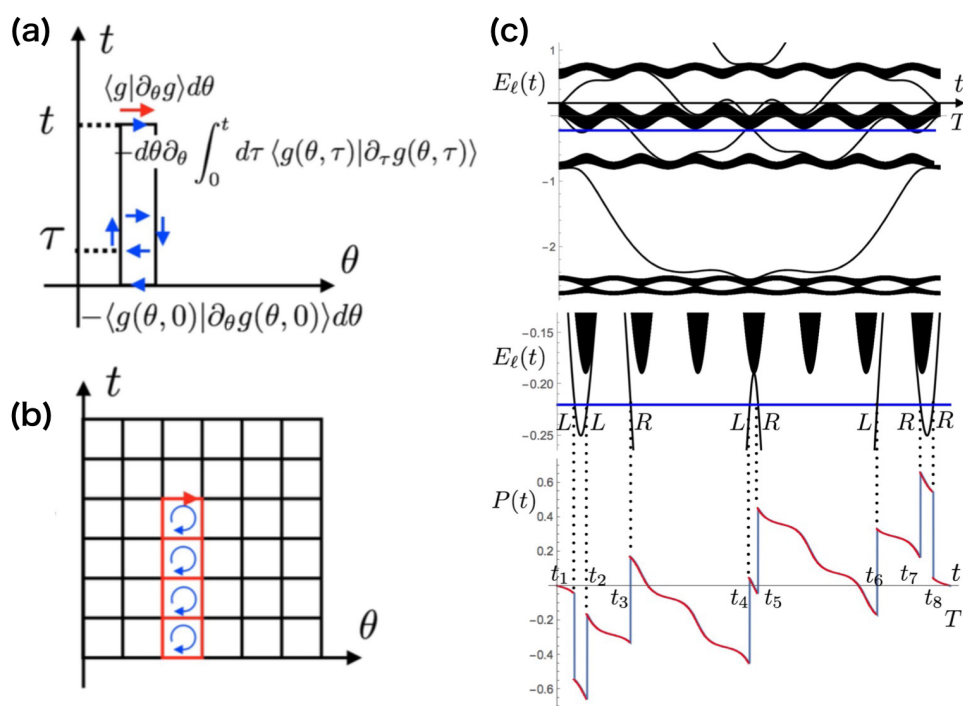


図 1: ハーパー模型にもとづくトポロジカルポンプ系での (a) ベリー接続の Temporal ゲージ ( $A_t = 0$ ) でのゲージ固定 (b) 対応する離散系でのゲージ固定処方 (c) 重心の時間発展 [論文 [1]] 参照

ルクエッジ対応の概念は量子ホール効果での発見以来、多くの量子系において確認されてきたものであるが、21世紀の発見としては、この概念、現象は量子系に限らず古典電磁場（フォトニック系）や古典力学系などより広範囲に存在することが分かってきた。

一般に古典力学の粒子描像に対して量子力学は波動性を特徴とすると通常理解されているが、量子論においてもいわゆる局在状態（束縛状態）は粒子的な特徴を持ち、無限系において規格化できない（広がった）散乱状態とは明確に区別され、この局在状態はある種の古典的な自由度と考えることができる。よって、バルク・エッジ対応とはある種の波動－粒子の対応、量子－古典対応とも考えられるのである。

以下関連した研究に関する本年度の結果を例示する。

## 1.1 1次元の断熱ポンプにおけるバルクエッジ対応の研究 [1]

30年程前に D.J.Thouless により考案された1次元の断熱ポンプは周期的な時間を波数に読み直すことにより量子ホール系と考えられ、今日トポロジカルポンプと呼ばれている。その理論的な提案から30年程経過して、この系は冷却原子系において実際に実験的に実現した。我々はこの実験に強く動機づけられこの問題を理論的に再考察し、トポロジカル相において近年広く確立したバルクエッジ対応の観点からトポロジカルポンプにおけるエッジ状態の意義とポンプされる電荷の量子化の起源を世界で初めて明らかにした。

## 1.2 古典力学系でのバルク・エッジ対応：メカニカルダイヤモンド [2]

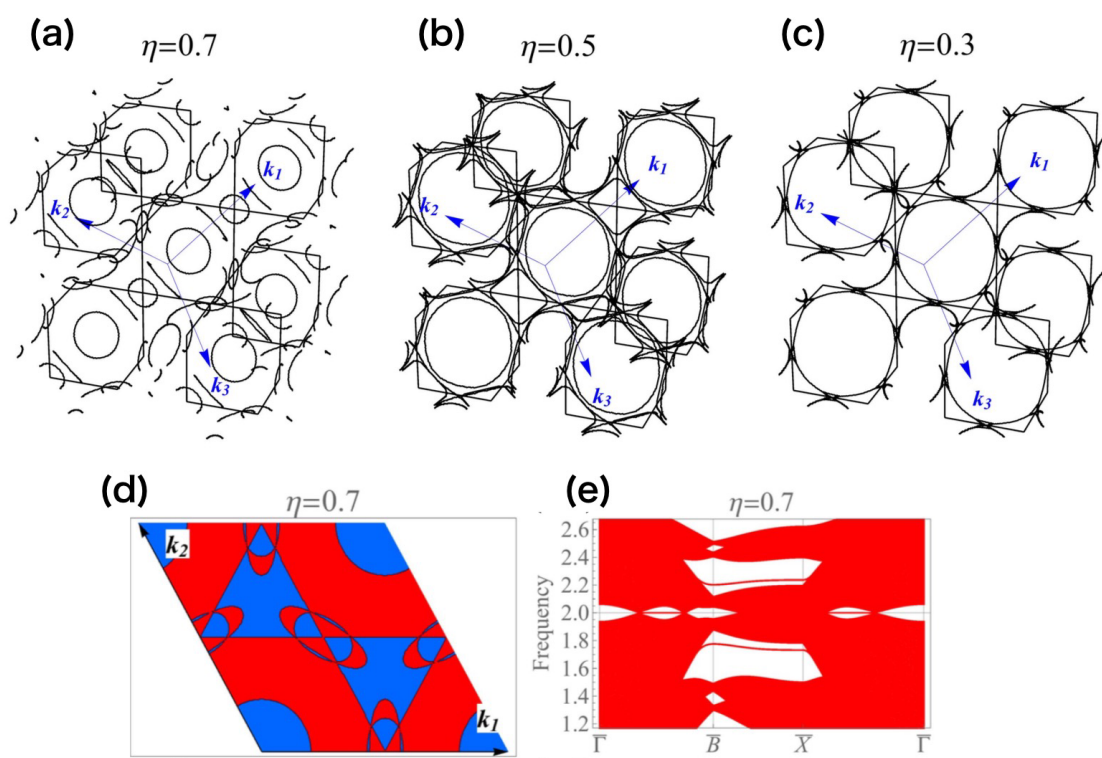


図 2: (a),(b),(c) メカニカルダイヤモンドの3次元の分散に現れるラインノード。(d) 量子化ベリー位相を2次元の波数をパラメータとして表示した（赤がベリー位相  $\pi$  を意味する。）(e) 対応する境界を持つ系のエネルギー準位。ゼロモードエッジ状態が見える [論文 [2]]

バルク・エッジ対応は典型的な量子ホール系での議論に見られるように、励起ギャップ有限の量子系に関するペリー接続で記述されるバルクの位相不変量と系に境界のあるときのエッジ状態、局在状態の相互関係を記述する。

しかし、近年この対応は量子系に限らず古典電磁場の系や更に力学系においても有効であることが明らかとなった。昨年、我々は、2次元ハニカム格子上の単純なバネー質点系、つまり連成振動系においてもバルクエッジ対応が成立することを明らかとした。

特にその非自明な相の出現のためには準位交差つまり、Dirac 分散の存在が必須であり、その生成消滅に対応して相のトポロジカルな性質が定まることをバルク・エッジ対応の観点から示した。

本年度はその3次元への拡張と考えられるメカニカルダイヤモンドを提案するとともにそのトポロジカルな特性を明かとし、バルク・エッジ対応の観点からエッジ状態を特徴付けした。

### 1.3 フォトニック結晶におけるワイル点とエッジ状態の研究 [3]

電子系以外のトポロジカル相が多く興味を集めているがその一つの例として、周期構造を持つ誘電体中の古典電磁場とトポロジカル相に着目した研究をおこなった。特にねじれた円柱状の誘電体を用いたメタマテリアル中の電磁場の分散にはワイル点と呼ばれる特異点が存在することをセクション・チャーン数と呼ばれるトポロジカル数を計算することで確立するとともに、対応するエッジ状態の存在を予言し、その環境デバイスにおける機能に関しても検討した。

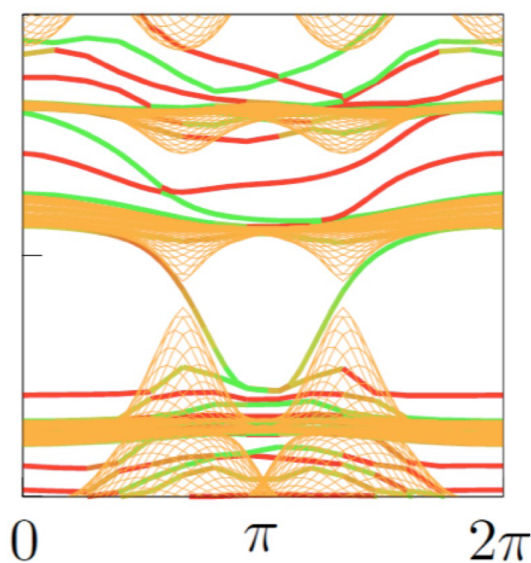


図 3: フォトニック結晶中のワイル点近傍のエッジ状態 [論文 [3]]

## 2 新しいトポロジカル量としてのエンタングルメントチャーン数

### 2.1 エンタングルメントチャーン数をもちいたスピンプンプの研究 [4]

2次元トポロジカル絶縁体とは、スピンごとの磁場を逆にすることにより、系全体としては時間反転対称性を回復した量子ホール系と見なすことができる。この”有効”磁場はスピン軌道相互作用に起因し、一般にはスピンは保存量とならないため量子ホール相2層として個別に議論することはできない。また、系の

時間反転対称性に起因するクラマース縮退により非可換 Berry 接続からつくったチャーン数は常にゼロとなるため量子ホール相とは異なり相分類には使えない。

しかし、この系においても、いわゆる extensive partition とよぶ系の分割を用いてスピンに対して非対称な部分系をトレースアウトすることでエンタングルメントハミルトニアンを構成すると量子スピンホール相においても有限の Chern 数が得られる。これをエンタングルメント Chern 数とよび、そのトポロジカル絶縁体における相分類における有効性を昨年、明らかとした。

このように一般にギャップのある多体系の基底状態がトポロジカルに非自明であり、本質的にチャーン数が有限の系に断熱的につながるとしても、系の対称性により系全体のチャーン数が打ち消し合ってゼロとなる場合がある。上述の時間反転不変のトポロジカル絶縁体はその例であるが、複合系を構成する事で高い対称性をもつ系を考察する場合、類似の現象が一般にも生まれ得る。この一般の状況においても基底状態からつくった、密度行列を部分空間に縮約する事で行ったエンタングルメントハミルトニアンの基底状態は非自明なトポロジカル数を持ち得て、もとの基底状態の相分類に有効となる。部分系に縮約する事で一般には縮約密度行列は有限温度のものとなるため、エンタングルメントハミルトニアンの基底状態を考えることは有効温度を下げて量子化するトポロジカル数を定義することに対応する。

本年度はこのエンタングルメントチャーン数を用いてスピンプンプに関する研究を行った。

### 3 グラフェン関連の原子層物質の研究

#### 3.1 シリセンにおける多軌道の意義とエッジ状態の研究 [5]

グラフェンを作る炭素をシリコンに置換したシリセンはグラフェンとは異なり、完全な平面構造をとらず、バックリングした構造をとる。そのため、グラフェンでは $\pi$ 電子のみを考えれば主たる現象を説明できるのに対して、シリセンでは多軌道を用いた記述が必須となる。特にトポロジカル相としてのグラフェンやシリセンに固有のエッジ状態においてはその多軌道性が重要であることを理論的に明らかとした [5]。

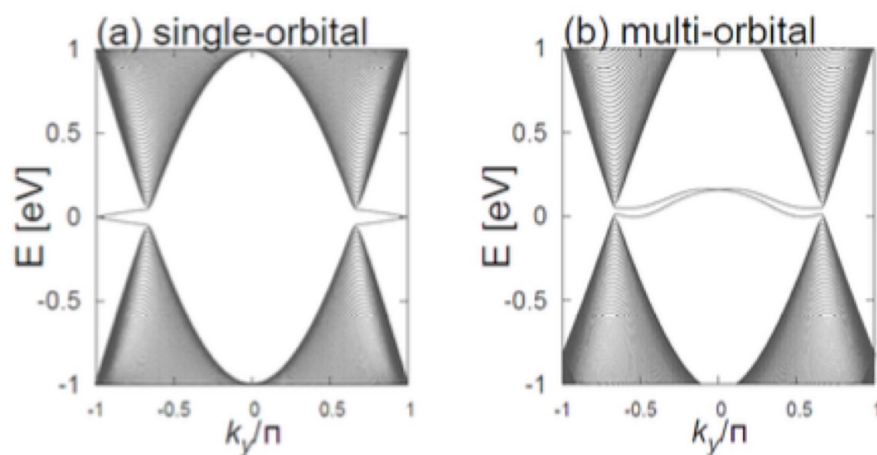


図 4: 境界を持つシリセンのエネルギー準位 [論文 [5]]

#### 3.2 Dirac 分散の一般論の研究。[6]

結晶中の傾いたディラックコーンの一般論の確立グラフェンのような完全にバンドギャップが閉じたゼロギャップ半導体でなくともバンドギャップの小さな半導体は質量を持つディラック粒子として記述するのが

適切である。さらに実際のバンド構造を反映して、そのディラック分散は一般に傾いたものとなる。近年、2次元で励起ギャップが閉じる場合の一般論を構築してきたが、本年度は、このような結晶中の傾いたディラック分散の一般論を格子模型との関連の下で構築した [6]。

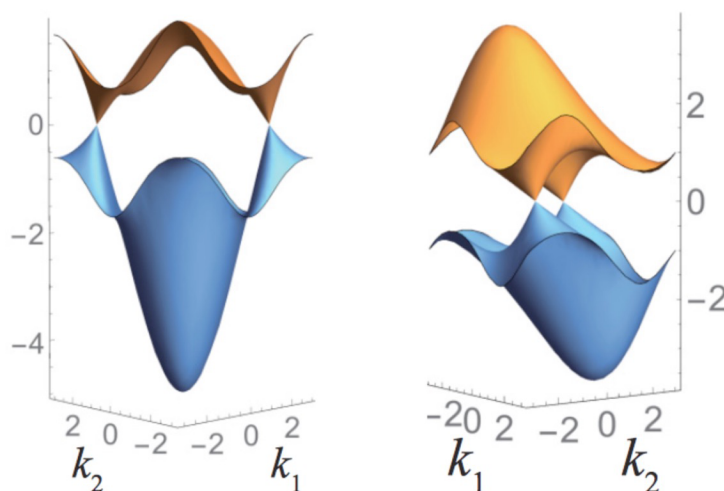


図 5: 傾いた Dirac 分散の例 [論文 [6]]

## <論文>

1. Y. Hatsugai, T. Fukui, "Bulk-edge correspondence in topological pumping", Phys. Rev. B **94**, 041102(2016), DOI: 10.1103/PhysRevB.94.041102
2. Y. Takahashi, T. Kariyado, Y. Hatsugai, " Edge states of mechanical diamond and its topological origin", New J. Phys. **19**, 035003 (2017), DOI: 10.1088/1367-2630/aa5edb
3. S. Oono, T. Kariyado, Y. Hatsugai, "Section Chern number for a three-dimensional photonic crystal and the bulk-edge correspondence", Phys. Rev. B **94**, 125125 (2016), DOI: 10.1103/PhysRevB.94.125125
4. T. Fukui, Y. Hatsugai, "A Spin Pump Characterized by Entanglement Chern Numbers", J. Phys. Soc. Jpn **85**, 083703 (2016), DOI: 10.7566/JPSJ.85.083703
5. A. Hattori, S. Tanaya, K. Yada, M. Araidai, M. Sato, Y. Hatsugai, K. Shiraishi, Y. Tanaka, "Edge states of hydrogen terminated monolayer materials: silicene, germanene and stanene ribbons", J. Phys. Cond. Mat. **29**, 115302 (2017), DOI: 10.1088/1361-648X/aa57e0
6. T. Kawarabayashi, H. Aoki, Y. Hatsugai, "Lattice realization of the generalized chiral symmetry in two dimensions", Phys. Rev. B **94**, 235307 (2016), DOI: 10.1103/PhysRevB.94.235307

## <著書，解説等>

1. 初貝安弘「ノーベル物理学賞：物質をトポロジカルにみる」『パリティ』31 巻, 10 月号 p.26-p.30 (2016) 丸善



2. 初貝安弘「2016 年度ノーベル物理学賞 : David J. Thouless 氏, F. Duncan M. Haldane 氏, J. Michael Kosterlitz 氏」学術ニュース,『日本物理学会誌』 71 巻, 12 月号 p.855-p.856 (2016) 日本物理学会

## <講演:国際会議>

1. (招待講演) Y. Hatsugai, "Roles of edge states in topological pumping", Trends in Theory of Correlated Materials (TTCM2016), May 22-25 (2016), Paul Scherrer Institute, Switzerland
2. (招待講演) Y. Hatsugai, "Roles of edge states in Thouless pumping", Yukawa Institute for Theoretical Physics (YITP) international workshop, "Physics of bulk-edge correspondence and its universality: From solid state physics to cold atoms", September 27- 30, 2016
3. (招待講演) Yasuhiro Hatsugai, "Bulk-edge correspondence in topological pumping", "Symmetry, Topology, and Quantum Phases of Matter: From Tensor Networks to Physical Realizations", KITP program, Oct. 14 (2016).
4. (招待講演) Yasuhiro Hatsugai, "Two dimensional electronics/spintronics devices", JSPS-EPSRC Tohoku-Cambridge-CNRS Core to Core program Symposium, Sendai, Nov.16-20 (2016)
5. (招待講演) Yasuhiro Hatsugai, "Bulk-edge correspondence in Thouless pumping & mechanical diamond", Topological metamaterials and beyond Aspen Center for Physics, Winter Conference 2017 January 2-8, 2017
6. (招待講演) Yasuhiro Hatsugai, "From graphene to topological materials", TIMS-CENIDE-NTHU Joint Symposium, Univ. of Tsukuba, March 11 (2017)
7. (招待講演) Yasuhiro Hatsugai, "Bulk-edge correspondence in Topological phases & Applications", CPEC seminar, Center for Photonics Electronics Convergence, Univ. Tokyo, Komaba, March 9 (2017)
8. Hiromu Araki, Takahiro Fukui, Yasuhiro Hatsugai, "Weak and strong phases of the FuKaneMele model by entanglement hamiltonians", Theory of Correlated Topological Materials, Feb. 21, 2017, ISSP, Kashiwa, JAPAN
9. T. Kawarabayashi, H.Aoki, Y. Hatsugai, "Zero modes of two-dimensional tilted Dirac fermions with vortices", Graphene Week 2016, June 13-17 (2016) , University of Warsaw, Poland
10. Hiromu Araki, Takahiro Fukui, Yasuhiro Hatsugai, "Entanglement Chern Number in Tree Dimensions", APS March Meeting 2017 MondayFriday, March 13-17, 2017; New Orleans, Louisiana, USA
11. Koji Kudo, Toshikazu Kariyado, Yasuhiro Hatsugai, "Chern number of many-body states on various lattices", APS March Meeting 2017 MondayFriday, March 13-17, 2017; New Orleans, Louisiana, USA
12. Yuta Takahashi, Toshikazu Kariyado, Yasuhiro Hatsugai, "Edge states of mechanical diamond", APS March Meeting 2017 MondayFriday, March 13-17, 2017; New Orleans, Louisiana, USA

## <主催:国際会議>

1. YITP (Yukawa Institute for Theoretical Physics) International Workshop "Physics of bulk-edge correspondence and its universality: From solid state physics to cold atoms", Sep. 27- 30, (2016) Panasonic Hall, Kyoto University, Kyoto.

## ＜講演:国内会議＞

1. 工藤耕司, 苅宿俊風, 初貝安弘, 13aAB-7: 「カゴメ格子上の分数量子ホール効果とチャーン数」, 日本物理学会 2016 年秋季大会 (2016 年) 9 月 13 日-16 日 (2016)
2. 大野修平, 初貝安弘, 14aBG-1: 「時間依存したフォトニック系におけるトポロジカルエッジモード」, 日本物理学会 2016 年秋季大会 (2016 年) 9 月 13 日-16 日 (2016)
3. 河原林透, 青木秀夫, 初貝安弘, 14pBG-11: 「傾いたディラック電子を持つ格子模型の連続変形」, 日本物理学会 2016 年秋季大会 (2016 年) 9 月 13 日-16 日 (2016)
4. 福井隆裕, 初貝安弘, 16pAE-1: 「エンタングルメント・チャーン数で特徴付けられるスピン・ポンプ」, 日本物理学会 2016 年秋季大会 (2016 年) 9 月 13 日-16 日 (2016)
5. 板垣諒, 初貝安弘, 青木秀夫, 河原林透, 16pAE-2: 「二次元ディラック電子系の vortex に伴う非分数電荷のランダムネスに対する安定性」, 日本物理学会 2016 年秋季大会 (2016 年) 9 月 13 日-16 日 (2016)
6. 高橋雄太, 苅宿俊風 A, 初貝安弘, 16pAE-3: 「メカニカルグラフェンの多様なエッジ状態とそのトポロジカルな起源」, 日本物理学会 2016 年秋季大会 (2016 年) 9 月 13 日-16 日 (2016)
7. 工藤耕司, 苅宿俊風, 初貝安弘, 「種々の格子模型における多粒子状態のチャーン数」, 第 10 回 物性科学領域横断研究会 (領域合同研究会) Kobe, Univ. Dec.9-10 (2016)
8. 高橋雄太, 苅宿俊風, 初貝安弘, 「3 次元メカニカルダイヤモンドのエッジ状態」, 第 10 回 物性科学領域横断研究会 (領域合同研究会) Kobe, Univ. Dec.9-10 (2016)
9. 高橋駿, 大野 修平, 岩本 敏, 初貝 安弘, 荒川 泰彦「半導体カイラルフォトニック結晶におけるワイル点とトポロジカルエッジ状態」第 64 回応用物理学会春季学術講演会, パシフィコ横浜, March 14-17 (2017)
10. 國府田桂介, 初貝安弘「平坦バンド系の乱れた臨界波動関数のマルチフラクタル解析」JPS 2017 spring Osaka Univ. Toyonaka, March 17-20, 2017
11. 河原林透, 青木秀夫, 初貝安弘「格子模型における擬ゼロモードのトポロジカル安定性」JPS 2017 spring Osaka Univ. Toyonaka, March 17-20, 2017
12. 大野修平, 高橋駿, 岩本敏, 初貝安弘, 荒川泰彦「全誘電体ウッドパイル型カイラルフォトニック結晶におけるトポロジカルエッジモード」JPS 2017 spring Osaka Univ. Toyonaka, March 17-20, 2017
13. 工藤耕司, 初貝安弘「磁場下の格子模型における擬ポテンシャルの厳密対角化: ラフリン状態の不安定化」JPS 2017 spring Osaka Univ. Toyonaka, March 17-20, 2017
14. 吉村幸徳, 井村健一郎, 初貝安弘, 福井隆裕「トポロジカル量子ポンプにおけるバルクエッジ対応」JPS 2017 spring Osaka Univ. Toyonaka, March 17-20, 2017
15. 高橋雄太, 苅宿俊風, 初貝安弘「メカニカルダイヤモンドの多様なエッジ状態とカイラル対称性の破れ」JPS 2017 spring Osaka Univ. Toyonaka, March 17-20, 2017



## <アウトリーチ>

1. 初貝 安弘, 千葉市科学館 平成 28 年度 「大人が楽しむ科学教室 量子力学シリーズ」(4)「トポロジカル物質の母としてのグラフェン」12月4日 (2016)
2. 初貝 安弘, 千葉市科学館 平成 28 年度 「大人が楽しむ科学教室 量子力学シリーズ」(7)「物理学における対称性の役割とトポロジカル相」12月17日 (2016)

## <受賞>

1. 初貝安弘, 2016 年 7 月 31 日: 日本学術振興会「平成 27 年度特別研究員等審査会専門委員 (書面担当) 表彰」
2. 工藤耕司, 第 10 回物性科学領域横断研究会 (領域合同研究会) 優秀ポスター賞

## <外部委員等>

1. 初貝安弘, 東北大学特任教授 (客員) (国際集積エレクトロニクス研究開発センター)
2. Y. Hatsugai, "Progress of Theoretical and Experimental Physics", Editorial Board

## <卒業論文>

1. 文挟彰太:「量子スピン系におけるトポロジカル相の研究」(物理学類, 卒業論文, 2017.3)
2. 西沢駿:「拡張 Haldane 模型のチャーン数」(物理学類, 卒業論文, 2017.3)
3. 鈴木仙里:「磁場下の多層グラフェンの電子状態」(物理学類, 卒業論文, 2017.3)

## <修士論文>

1. 荒木広夢:「Entanglement Chern numbers for 2D and 3D topological insulators (2次元および3次元トポロジカル絶縁体におけるエンタングルメントチャーン数)」(数理物質科学研究科物理学専攻, 修士論文, 2016.3)
2. 国府田桂介:「平坦バンド系の乱れた臨界波動関数のマルチフラクタル解析」(数理物質科学研究科物理学専攻, 修士論文, 2016.3)

## <大学院学生>

博士 1 年. 大野 修平

修士 2 年. 荒木 広夢, 国府田 桂介, 保田 和馬

修士 1 年. 工藤耕司, 高橋雄太

## ＜外部資金＞

1. 科学研究費 基盤研究 (A) 「トポロジカル相におけるバルク・エッジ対応の物理とその普遍性：固体物理から冷却原子まで」 (2014 年度～2016 年度) 研究課題番号：26247064 (研究代表者：初貝安弘)  
総額：41,470 千円 (直接経費：31,900 千円、間接経費：9,570 千円)  
2016 年度：13,130 千円 (直接経費：10,100 千円、間接経費：3,030 千円)
2. 科学研究費 挑戦的萌芽研究「四元数のトポロジカル相での意義の解明への挑戦：多体問題と時間反転の破れ」 (2016 年度～2018 年度) 研究課題番号：26247064 (研究代表者：初貝安弘)  
総額：3,510 千円 (直接経費：2,700 千円、間接経費：810 千円)  
2016 年度：1,430 千円 (直接経費：1,100 千円、間接経費：330 千円)
3. 科学研究費補助金 新学術領域研究 (研究領域提案型) 原子層科学, 領域代表 齋藤 理一郎, 理論班 連携研究者 初貝安弘
4. 京都大学基礎物理学研究所共同利用研究計画, 国際ワークショップ開催経費, “Physics of bulk-edge correspondence & universality: From solid state physics to cold atoms: International workshop 2016(2017)” 1,600 千円

## VII-2 ナノ量子物性グループ

准教授 谷口 伸彦

大学院生 2 名（修士課程 2 名）

卒研究生 1 名

本研究グループでは、ナノ構造系で顕在化する量子性と電子相関・非平衡性が織りなす電子相関量子非平衡現象を調べるために、場の量子論に基づく様々な手法と近似法の開発を行い、解析を進めている。ナノ量子系に現れる非平衡性と電子相関効果を理解することは、ナノ系量子デバイスの物性解明に重要なだけでなく、強相関電子系全般に現れるさまざまな相関現象を系統的に理解する上でも不可欠である。このような観点より、本年度は文科省科研費「物質のゲージ理論とナノ系非平衡量子輸送現象」(外部資金 [1]) の課題研究を中心として、特に電子相関の非摂動効果を含む一貫した近似法の開発、および非平衡定常状態を記述する量子熱力学の理論定式化を中心として研究を行った。他に関連する研究として、二重量子ドット系において実現されるハイブリッド量子ビットの微視的特性とデコヒーレンス効果の解析を行った。本年度の具体的な成果は以下のとおりである。

### 【1】局所相関系の汎関数積分評価とモット絶縁性のパラダイム (外部資金 [1], 講演 [1,3], 論文 [1])

経路積分は物性分野の様々な分野で使われている強力な方法であり、摂動効果の計算・繰り込みに加えて、非平衡量子系を比較的柔軟に扱うこともできる。特にコヒーレント状態に基づく経路積分法は、生成消滅演算子の  $N$  積となるハミルトニアンと直接対応付けることができるため、極めて有用である。一方、経路積分の厳密評価は、演算子順序の問題や発散的な無限積の正規化などの様々な問題のためガウス型自由粒子系に限られきたのが現状である。実際、演算子法では容易に解ける 1 サイト Bose-Hubbard 模型に対し厳密な手法による経路積分評価を試みても、演算子法から得られる正しい答に達することができず、その原因も十分に理解されていなかった。

本研究では（生成消滅演算子の 4 次の項を含む）局所相関ハミルトニアン

$$H = \sum_{\alpha} \epsilon_{\alpha} \hat{n}_{\alpha} + \frac{U}{2} \hat{N}(\hat{N} - 1); \quad \hat{N} = \sum_{\alpha} \hat{n}_{\alpha} \quad (1)$$

に対し、経路積分による正しい厳密評価方法を提案・確立した。従来のコヒーレント状態経路積分による評価は、経路積分の連続時間極限において相互作用項特有の演算子順序の問題があり、Hubbard-Stratonovich 変換を行うときに注意が必要であることがわかった。この点を解決する Hubbard-Stratonovich 変換を導出することで、電荷型局所相互作用をもつ多準位ボーズ粒子・フェルミ粒子に対し、熱力学関数および一体グリーン関数が経路積分により正しく評価できることを示した。

本研究の重要性は単なる技巧的な改善にとどまらず、評価法が提示する局所相関系の物理描像に

ある。局所相関係では粒子数が保存するため、双対関係にある位相は時間的に大きく揺動し、その揺動の大きさは局所相互作用の大きさにより支配される。経路積分の評価を確立することで得られた描像は、「動的位相揺らぎが付与された自由粒子」により、局所相関を厳密に扱うことが可能である、というものである。この描像は、従来のフェルミ流体論とは大きく異なり、一粒子スペクトル関数は複数ピーク構造と非対称的な電子/正孔励起を持ち、伝統的な準粒子描像の範疇外にある。局所相関ハミルトニアンが、強相関物質の記述に用いられている Hubbard 模型の局所相関がバンド幅より遥かに大きい「強相関極限」に相当することを考えると、局所相関係で得られた「動的複合粒子的描像」が、多体相関効果としてのモット絶縁性を特徴づける「非フェルミ流体固定点」の簡単なモデル化になっていると期待できる。モット絶縁性が必ずしも磁気秩序を伴うことなく、電荷ブロッキングを特徴づける強い位相揺らぎにより特徴づけられることがわかった。

## 【2】非平衡量子輸送と物質ゲージ場 (外部資金 [1], 講演 [2,3], 論文 [3])

ナノ構造系の量子輸送を電子間相互作用を摂動として非平衡状態に対して計算すると、必ずしも非平衡電流保存則が保証されない結果が得られることが知られている。これは、電子相関効果を局所ゲージ不変性を破らずに考慮するためには、非摂動的寄与を考慮することが不可欠なことによる。我々は電子の位相自由度について着目し、非平衡電流保存則（ゲージ不変性）を保持して電子相関効果を取り込むことのできる解析法の確立を目指し研究を進めてきた。最も単純な電子相関の非摂動効果は電荷ブロッキングを起こすクーロン閉塞現象であり、このような多体状態は、相互作用を摂動的に扱えるフェルミ流体描像とはまったく異質のものである。本研究は、このような多体状態が電子相関を動的に揺動する位相自由度として取り扱う「動的複合粒子」により捉えることが可能であることを踏まえ、非平衡系において強相関効果を取り扱うことのできる解析的近似手法を開発した。電子相関の非摂動的効果を系統的に取り扱うには、 $2\pi$  を超える大きな動的位相揺らぎの寄与を考慮し、Gauss 近似を越えてゲージ不変性を満たすよう一貫した近似が必要となる。本年度に得られた結果は下記の通り。

(1) 特に低温領域における大きな動的位相揺らぎ効果を解析するためには、位相自由度のコンパクト性と非エルミート性を適切に取り扱うことが不可欠である。この問題を解決するため、Keldysh 経路積分に位相演算子の方法を援用し、電子の自己エネルギー部分への繰り込み効果を解析的に近似評価した。これを単一準位の量子ドット系に適用した結果、得られた状態密度を明示したものが図 1 である。 $E/\gamma \approx -2$ , 11 に幅の広いクーロンピークがある一方で、低温領域では  $E/\gamma = 0$  に鋭いコヒーレントピークが現れる。後者は近藤共鳴ピークに相当する。つまり量子ドット系の相関現象としてクーロン閉塞と近藤効果を統一的に記述可能である。線形コンダクタンスの温度依存性を数値繰り込み群による結果との比較検討を行うと、高温から近藤温度程度の広い温度領域に対して現在の解析的近似が定量的にもかなり良い一致を示すことが確認できた。しかし極低温では近似法に起因した非物理的な挙動を示すことも判明し、この挙動の改善が現在の課題である。

(2) 位相の動的揺らぎとして電子相関を取り込む解析法が、電子相関量子ドットが埋め込まれ

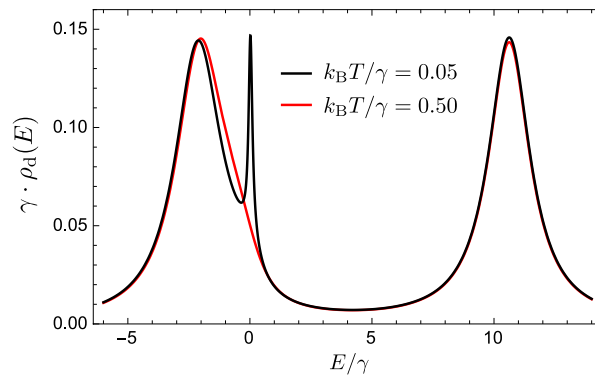


図1 単一準位ドット系に対する状態密度  $\rho_d(E)$  の温度依存性（黒：低温、赤：高温）。高温でのクーロン閉塞ピークに加えて、低温では新しいコヒーレントピーク（近藤共鳴ピーク）が形成される。

た様々な模型に対して、有効であることを示すため、二重量子ドット系（「サイド結合 T 字型二重量子ドット系」）への適用を行った。近似により得られた各ドットのスペクトル関数および線形コンダクタンスを見ると、相互作用により低温では 2 個の量子ドット間でスペクトル関数の乗り移りが起き、反近藤効果と呼ばれるコンダクタンス減少が現れることが確認できた。

### 【3】ナノ量子系の量子熱力学（外部資金 [1], 論文 [2]）

定常状態 (steady state) は時間に依存しない状態であるが、平衡状態とは異なり、外部環境の駆動により様々な定常流が内部に存在する。その結果、系の内部エントロピーは時間とともに増大し、その過程は不可逆である。このような不可逆性をもつ状態に対し、一貫した熱力学・統計力学の枠組みを構築可能か否か、という問題は、理論物理が長らく取り組む基礎的難題の 1 つである。その困難は、平衡系を扱う上で有用であった様々な熱力学の基本概念を非平衡定常状態では見直す必要がある点にある。

ナノ量子輸送で使われる量子ドット系は、異なる温度と化学ポテンシャルを持つ複数の外部環境系（＝リード）に強く結合され、非平衡定常状態にある。ナノ量子系の場合、量子ドットを介する量子輸送特性は量子力学を基本法則として完全に決定される。粒子・エネルギー・熱の流れはランダウアー型公式により記述され、熱力学第二法則（エントロピー増大の法則）が成立することを示すことが可能である。これは、ナノ系はいわゆる「熱力学極限」とは対極の系ではあるが、量子力学法則に基づき非平衡熱力学を定式化できることを示す。このように量子力学法則に立脚して非平衡熱力学を構築する手法を「量子熱力学」と呼ぶ。

本研究では、複数の外部環境に結合するナノ量子系（量子ドット系）に対し、量子力学法則に基づき熱力学的記述を構成した。定常状態の還元密度演算子に対応して、非平衡定常状態の「熱力学的関数」 $\Phi_{ss} = \ln \mathcal{Z}$ （ $\mathcal{Z}$  は系の有効分配関数）を導入することができる。この熱力学関数  $\Phi_{ss}$  は時間不変であるため、増大する内部エントロピーを測る直接の指標ではないが、我々は、関数  $\Phi_{ss}$  が量子ドットの平均粒子数、平均エネルギーといった熱力学的な量だけでなく非線形量子輸送の情報

も含み、非平衡定常状態を特徴づける重要な関数であることを明らかにした。具体的には、外部環境が作る温度差、電圧差が熱力学な力（親和力）として系にどのような役割を果たし、非線形流とともにエントロピー増加率が関数  $\Phi_{ss}$  により如何に記述されるかを明らかにした。これらの関係は関数  $\Phi_{ss}$  に関する熱力学関係式の非平衡拡張版としてまとめることができる。相互作用がないナノ量子系、および単一準位アンダーソン模型に対して以上の熱力学的関係が厳密に成立することを示した。

#### 【4】ハイブリッド量子ビットのデコヒーレンス (学位論文 [1])

近年、量子コンピュータ実現に向け、半導体量子ドットを使った量子ビットの研究が盛んに行われている。その中で特に注目されているのが二重量子ドットによる「ハイブリッド量子ビット系」である。二重量子ドット中の3つの電子が作る、 $S = 1/2$ ,  $S_z = -1/2$  のスピン状態を計算基底  $|0\rangle_L, |1\rangle_L$  として使用することで、従来の量子ビット実現法と比較して、電荷量子ビットが持つ高い操作性とスピン量子ビットが持つ長い緩和時間の2つの利点を併せ持つと考えられている。本研究では、このようなハイブリッド量子ビット系に対して、(1) ゲート電圧調整に対する操作性、(2) 外部環境の影響下におかれたときのデコヒーレンスの影響、を明らかにすることを目的とした。

量子ビットの特性は計算基底に対する有効スピン模型  $\hat{H}_{qb} = \frac{1}{2}\epsilon\hat{\sigma}_z + \frac{1}{2}\Delta\hat{\sigma}_x$  により記述される。ハイブリッド量子ビットの操作性を考える上で、これらの有効パラメータ  $\epsilon, \Delta$  が、二重量子ドット系の微視的パラメータ（エネルギー準位、ホッピング強度、電子間相互作用）にいかに関係しているかを調べるのが重要である。我々は、種々の電子相関効果を含む二重量子ドット系の微視的ハミルトニアンから出発し、Schrieffer-Wolff 変換で量子ビットの有効ハミルトニアンを近似的に導出することで、ハイブリッド量子ビットの微視的パラメータに対する操作性を明らかにした。次に、ハイブリッド量子ビットがボゾン環境下にある状況を考え、スピンボゾン模型を使い、ハイブリッド量子ビットのデコヒーレンス効果をラビ振動  $\Omega$  の減衰率  $\Gamma$  により調べた。量子ビットと環境の結合  $\alpha$  が強い場合にも適用可能な「直接留数評価法」を新たに開発し、従来の「弱結合近似」との比較を行った。量子ビットの操作性を良くすると一般にデコヒーレンス率も増加してしまうこと、オーミック環境では従来の弱結合近似はデコヒーレンスの影響を過小評価するが、スーパーオーミック環境では過大評価していること、が明らかになった。

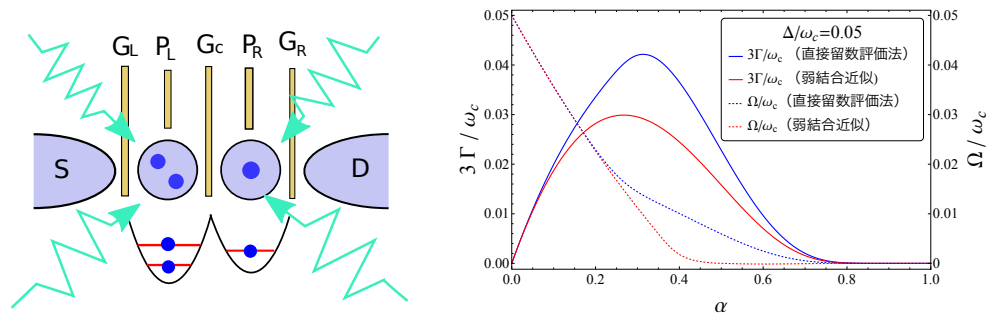


図2 (左) ハイブリッド量子ビットとデコヒーレンスの概念図。(右) デコヒーレンス率  $\Gamma$ , ラビ周波数  $\Omega$  の結合強度  $\alpha$  依存性。直接留数評価法と従来の弱結合近似の結果を比較。環境はオーミックを仮定。

## 研究業績

### <論文>

1. Nobuhiko Taniguchi, "Exact path integral evaluation of locally interacting systems: The Subtlety of operator ordering" in the free-particle paradigm" (投稿済み).
2. Nobuhiko Taniguchi, "Quantum thermodynamics of nanoscale steady states far from equilibrium" (投稿済み).
3. Nobuhiko Taniguchi, "Local gauge symmetry and multi-peak structure of the spectra function" (in preparation).

### <学位論文>

1. 卒業論文：金杉翔太「二重量子ドット系におけるハイブリッド量子ビットとデコヒーレンス」(筑波大学物理学類 2017 年 2 月)

### <講演>

1. 谷口伸彦「局所相互作用系の汎関数積分厳密評価とモット絶縁性の自由粒子描像」日本物理学会 2016 年秋大会 (2016 年 9 月 13 日～9 月 16 日 金沢大学角間キャンパス).
2. 新井和明・谷口伸彦「非平衡量子ドット系における位相揺らぎの解析的評価：クーロン閉塞と近藤効果」日本物理学会第 72 回年次大会 (2017 年 3 月 17 日～20 日 大阪大学豊中キャンパス).
3. Nobuhiko Taniguchi, *Analytical results for locally interacting systems: How strong fluctuations of emergent gauge fields affect charge-blocking physics*, APS March Meeting (2017.3.13 – 3.17, New Orleans, USA).

### <外部資金>

1. 文部科学省 科研費 基盤研究 (C)「物質のゲージ理論とナノ系非平衡量子輸送現象」(研究代表 谷口伸彦 2014 年度–2017 年度).

## VII-3 表面界面物性グループ

### 1. メンバー

准教授	小野 倫也
D1	岩瀬 滋
M1	高木 謙介

### 2. 概要

物質の電子状態や伝導特性を量子力学の第一原理に基づいて高精度に計算でき、最先端のスーパーコンピュータで大規模計算を実現できる計算手法と計算コード **RSPACE** の開発を行っている。また、**RSPACE** を用いた大規模シミュレーションにより、表面や界面で起こる物理現象の解明と予測を行っている。さらに、発見した物理現象をデバイスに応用する研究にも取り組むとともに、計算科学手法によるデバイスデザイン技術の構築を推進している。**RSPACE** を用いたシミュレーションとして、平成 28 年度は、次世代パワーエレクトロニクスデバイスとして期待されている SiC デバイス界面のキャリア輸送解析を行った。

### 3. 研究成果

#### 【1】第一原理計算コード **RSPACE** の開発

超並列計算機での計算に適した実空間差分法に基づく第一原理電子状態・伝導特性計算法とこの方法に基づく計算コード **RSPACE** を開発している。**RSPACE** を様々な系の計算に利用していくには、計算の高速化することと擬ポテンシャルの種類を増やしていくことが重要である。今年度は、バンド並列計算部の並列化チューニングと他コードで使われている擬ポテンシャル変換コードの組み込みを行った。また、28 年度 12 月より運用を開始した Oakforest-PACS に合わせたコード改良とチューニングを行い、メニーコアシステムでの高速シミュレーションを可能にした。

#### 【2】SiC-MOSFET 開発における界面電子状態シミュレーション

SiC を用いたパワーデバイスには、エネルギー問題の解決や国内半導体デバイス産業の復興に向け、大きな期待が寄せられている。しかし、SiC-MOS 界面でのキャリア移動度が SiC バルクに対して 10%程度しかなく、Si バルクに対して 90%以上を誇る Si-MOS に比べ、深刻な欠点となっている。したがって、SiC パワーデバイスの普及には、移動度の向上が急務である。これまで、SiC-MOS 界面の欠陥準位によるキャリア散乱が移動度低下の原因であることが実験的研究より示唆されている。しかし、どのような界面欠陥がキャリアを散乱するのかは定性的な議論しかなく、詳しいことは分かってい



ない。SiC-MOS の移動度の向上のためには、界面の電子状態を理解し、制御する必要がある。

本年度は、SiC-MOS 界面の原子構造とキャリア散乱特性の関係を、RSPACE を用いて評価した。まず、熱酸化過程のシミュレーションをもとに、図 1 に示すような計算モデルを用いて、酸化中に現れる原子構造がキャリア散乱に与える影響を調べた。パワーデバイスによく用いられる 4H-SiC は、積層構造に関係した h 面、k 面と呼ばれる最表面層が交互に現れる。そして、h 面を最表面に持つ界面は、伝導帯端に自由電子的な振る舞いをする特徴的な準位を持ち、その電子状態は、酸化による酸素原子侵入により顕著に変わることが昨年度までの研究で分かっている。図 2 に示すように、h 面では、酸化による界面への酸素原子侵入を起因とするキャリア散乱が k 面に比べて大きいことを第一原理電気伝導計算で明らかにした。SiC/SiO<sub>2</sub> 界面には、格子間炭素原子やカルボニル基を原因とする界面欠陥も存在する。図 2 に示すように、h 面での酸素原子侵入によるキャリア散乱は、界面欠陥準位を作る界面欠陥と同程度にキャリアを散乱することが分かった。この結果は、Si デバイスでは散乱因子として考えられてこなかった欠陥準位を作らない電氣的に不活性な欠陥でも、SiC デバイスでは界面欠陥準位を作る活性な欠陥と同程度にキャリアを散乱することを示すものである。

この結果は、n チャネル SiC-MOSFET によく使われる SiC(0001)面の電子移動度を制限するメカニズムの一つであると予想される。現在、筑波大パワエレ研・産総研の実験グループと協力して、高い移動度を実現する界面構造の探索を進めている。

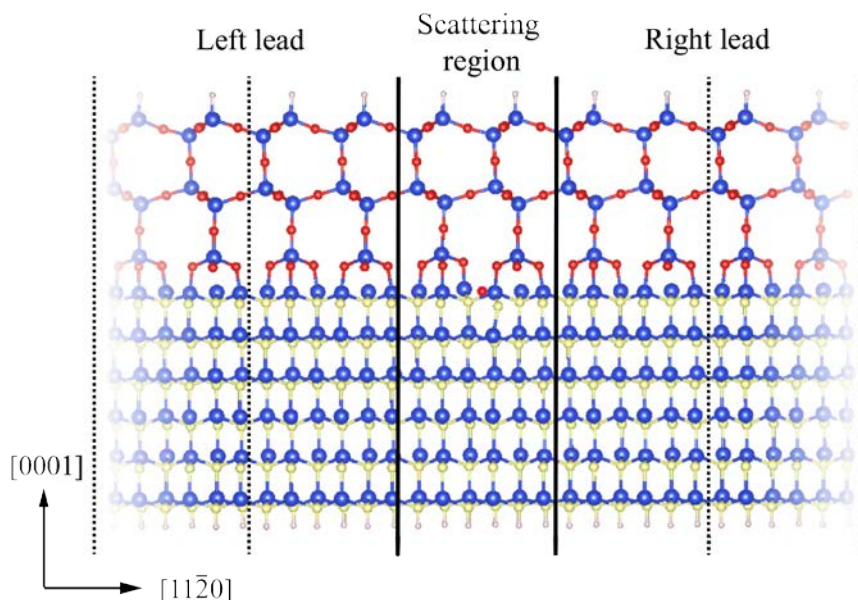


図 1 SiC/SiO<sub>2</sub> 界面の電気伝導特性計算モデル。文献[1-A-2]より。

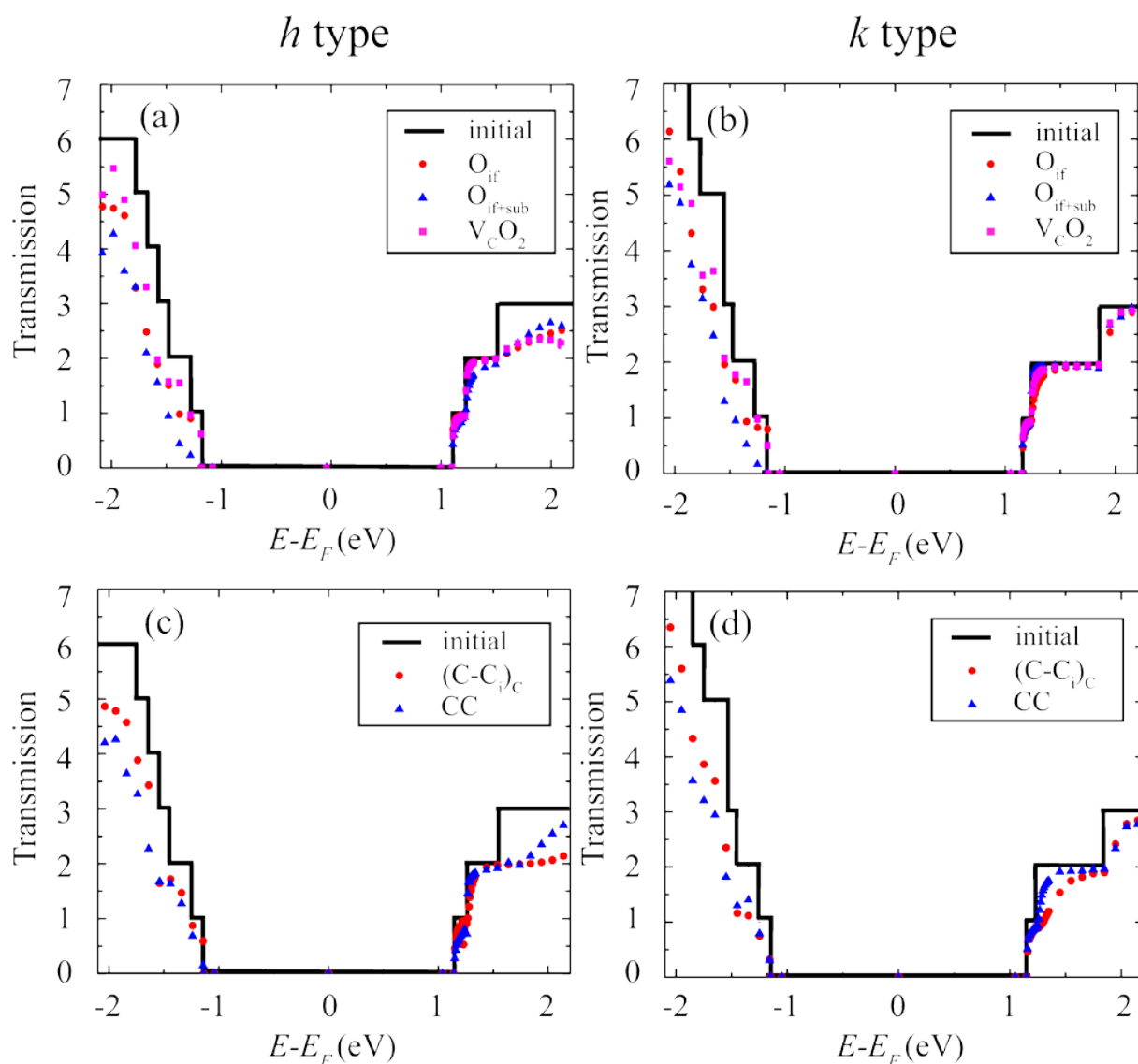


図 2 界面のキャリア散乱特性の比較。(a)  $h$  面に酸素原子が侵入した界面。(b)  $k$  面に酸素原子が侵入した界面。(c)  $h$  面に欠陥ができた界面。(d)  $k$  面に欠陥ができた界面。酸素侵入や欠陥生成の無い界面(initial)、酸素原子 1 個侵入( $O_{if}$ )、2 個侵入( $O_{if+sub}$ )、3 個侵入後 CO 分子放出( $V_{CO_2}$ )、格子間炭素原子欠陥( $(C-C_i)_C$ )、カルボニル基欠陥(CC)。透過確率の initial から減少幅が大きい界面ほどキャリアの散乱が多い。文献[1-A-2]より。

#### 4. 受賞、外部資金、知的財産権等

1. 科学技術振興機構、戦略的創造研究推進事業・さきがけ、小野倫也、代表、2013 年度より継続、6630 千円、「計算科学的手法による省電力・低損失デバイス用界面のデザイン」

2. 科学技術振興機構、先導的物質変換領域、小野倫也、分担、2012 年度より継続、0 円、「二酸化炭素活性化機構の学理に基づくメタノール室温合成触媒の創成」
3. 文部科学省、ポスト「京」で重点的に取り組むべき社会的・科学的課題に関するアプリケーション開発・研究開発、小野倫也、分担、2016 年度 0 円、「次世代の産業を支える新機能デバイス・高性能材料の創成」
4. 日本学術振興会、基盤研究(B): 小野倫也、代表、2016 年、3300 千円、「大規模第一原理スピン輸送シミュレーターの開発と革新的デバイス用界面構造の設計」

## 5. 研究業績

### (1) 研究論文

#### A) 査読付き論文

1. S. Tsukamoto, T. Ono, K. Hirose, S. Blügel, "Self-energy matrices for electron transport calculations within the real-space finite-difference formalism", Phys. Rev. E 95, 033309 (2017).
2. S. Iwase, C. J. Kirkham, T. Ono, "Intrinsic origin of electron scattering at the 4H-SiC(0001)/SiO<sub>2</sub> interface", Phys. Rev. B 95, 041302 (2017).
3. T. Ono, C. J. Kirkham, S. Iwase, "First-Principles Study on Electron Conduction at 4H-SiC(0001)/SiO<sub>2</sub> Interface", ECS Transactions 75, 121 (2016).
4. C. J. Kirkham, T. Ono, "Importance of SiC Stacking to Interlayer States at the SiC/SiO<sub>2</sub> Interface", Materials Science Forum 858, 457 (2016).

#### B) 査読無し論文

### (2) 国際会議発表

#### A) 招待講演

1. T. Ono, "Density functional theory study on transport property of nanomaterials", 5th International Conference from Nanoparticles and Nanomaterials to Nanodevices and Nanosystems (IC4N), June 26-30, 2016, Porto Heli, Greece.
2. T. Ono, C. J. Kirkham, S. Iwase, "First-Principles Study on Electron Conduction at 4H-SiC(0001)/SiO<sub>2</sub> Interface", Pacific Rim Meeting on Electrochemical and Solid-State Science 2016, October 2-7, 2016, Honolulu, USA.

#### B) 一般講演

1. T. Ono, C. J. Kirkham, S. Iwase, "First-principles study on carrier scattering property at 4H-SiC(0001)/SiO<sub>2</sub>", 2016 International Conference

on Solid State Devices and Materials, September 26-29, 2016, Tsukuba, Japan.

2. T. Ono, C. J. Kirkham, "First-principles study on atomic and electronic structures of 4HSiC(0001)/SiO<sub>2</sub> interface", APS March Meeting 2017, March 13-17, 2017, New Orleans, USA.

(3) 国内学会・研究会発表

A) その他の発表

1. 高木謙介, 小野倫也, 岩瀬滋, "第一原理計算による HfO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub>/Si 界面における酸素空孔欠陥に起因したリーク電流の評価", 日本物理学会 2016 年秋季大会, 2016 年 9 月 13 日～17 日, 金沢大学.
2. 岩瀬滋, 小野倫也, "波動関数接合法による第一原理輸送特性計算手法の開発", 日本物理学会 2016 年秋季大会, 2016 年 9 月 13 日～17 日, 金沢大学.
3. 岩瀬滋, 小野倫也, "第一原理計算による熱酸化 SiO<sub>2</sub>/SiC 界面の界面原子構造、電子状態、電子輸送特性の解析", 日本物理学会第 72 回年次大会, 2017 年 3 月 17 日～20 日, 大阪大学.
4. 高木謙介, 小野 倫也, "第一原理計算による HfO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub>/Si 界面における酸素空孔欠陥に起因したリーク電流の評価", 第 64 回応用物理学会春季学術講演会, 2017 年 3 月 14 日～17 日, パシフィコ横浜.

(4) 著書、解説記事等

1. Y. Egami, S. Tsukamoto, T. Ono, "First-principles calculation method and its applications for two-dimensional materials", Quantum Matter 6, 4 (2017).
2. T. Ono, S. Saito, S. Iwase, "First-principles study on oxidation of Ge and its interface electronic structures", Jpn. J. Appl. Phys. 55, 08PA01 (2016).

## VII-4 ナノ構造物性

### 1. メンバー

教授 岡田 晋

学生 博士後期課程学生：6名、修士課程学生：5名、学群生：6名

### 2. 概要

ナノスケール構造を持つ物質においては、その物性は系のサイズ、表面(端)形状等に非常に大きく依存することが知られている。このことは、他方において、既存の物質においても、物質のサイズをナノメートルオーダーとし、その形状を制御することにより、新奇物性、新機能発現を誘起させることが可能であることを示唆している。実際、興味深い物性を示す種々のナノスケール炭素物質群の合成が近年盛んになされている。例えば、有限幅のグラファイト断片（グラファイトリボン）はその端形状に依存して、端を構成する原子にスピン分極が生じる事が知られている。さらに、このリボンを丸めた有限長さのナノチューブでは、そのチューブ直径に依存して、強磁性、反強磁性磁気秩序を示す事が我々の量子論に基づく全エネルギー計算から明らかになっている。また、チューブに5員環と8員環からなるトポロジカル欠陥を導入することにより、欠陥にそって分極電子が局在しチューブ軸にそって強磁性的秩序を発現する。

我々のグループでは、ナノサイズ炭素系（ナノチューブ、フラーレン、グラファイト）の電子物性を理論的に解析することによって、サイズ、形状が誘起する特異な電子物性発現の可能性を探索する事を目的としている。

### 3. 研究成果

#### 【1】ディラックコーンとカゴメ平坦バンドを有する炭化水素ネットワーク

グラフェンは炭素原子のみからなる蜂の巣格ネットワークで、格子の特性から得意な電子状態、すなわちディラックコーンと呼ばれる線形分散バンドをフェルミレベルに有している。ここでは、炭化水素分子をレゴのブロックのように組み合わせることにより、グラフェンと同じような電子物性、さらに奇妙な電子物性を有する炭化水素ネットワークの理論設計を第一原理電子状態計算の方法を用いて行った。ここでは、フェナレニルと呼ばれる3個のベンゼン環が3角形状に並んだ炭化水素

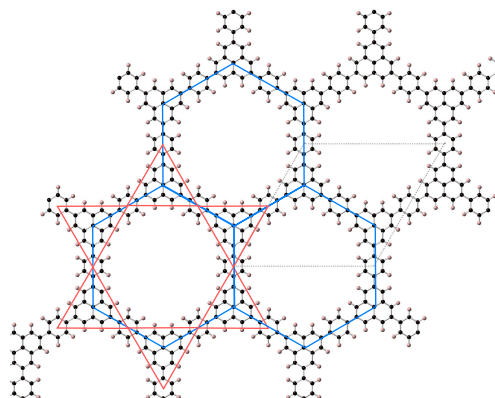


図 1:ディラックコーンとカゴメ平坦バンドを有する炭化水素ネットワーク構造

を蜂の巣格子状に配置し、その間をフェニル（ベンゼン環）でつないだ2次元のネットワークを考えた。驚くべきことに、この炭化水素ネットワークは、非常に傾きの小さいディラックコーンを有するゼロギャップの半導体で、かつ、ディラックコーンの上下にカゴメ平坦バンドを有する。また、ディラックコーンの傾きが小さいことから、シートはフェナレニルユニットに局在したスピンによる、種々の磁性状態を有することが明らかになった。

## 【2】六方晶窒化ホウ素リボンのエネルギー論と電子構造

六方晶窒化ホウ素(h-BN)

は、ホウ素と窒素からなる蜂の巣格子であり、グラフェンと等価なネットワーク構造を有している。一方で、構成元素が異なるために、電子構造的には非常に大きなバンドギャップを有する絶縁体であり、グラフェン応用のさいの担持基板や、グラフェンとの面内ヘテロ構造を形成する物質として注目を集めている。本論文では、グラフェンとの類似性から、

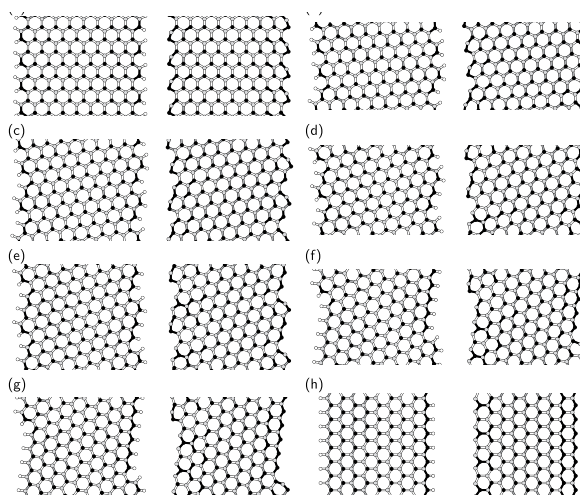


図 2、種々の h-BN リボンの端の安定構造

h-BN のリボンに着目し、その端の安定性と電子状態を密度汎関数理論と有効遮蔽媒質法を組み合わせた第一原理電子状態計算の手法を用いて計算した。その結果、端のエネルギー、すなわち、端の安定性は水素終端されたリボンでは、端の形状依存性はみられず、清浄端（水素等が付いていない端）では、アームチェアと呼ばれる端形状が最も安定で、ジグザグに近づくにつれて単調に不安定性が増加することが明らかになった。この不安定化の原因は、フェルミレベルにおける状態密度の増加に起因することを解明した。

## 【3】電界効果トランジスタ構造中の CNT 薄膜における異常な誘起電界

カーボンナノチューブ (CNT) はその形状と得意な電子物性から半導体デバイス、特にフレキシブルデバイス材料として注目を集めている。CNT は実デバイス中においては、マット状構造（互いに絡まったシート状構造）を有している。すなわち、互いに交差した薄膜構造を有している。一般にこのような薄膜の交点においては、物質間の相互作用により、電子状態の変調が誘起される。この電子状態の変調は、デバイス構造中の CNT へのキャリア注入に影響を及ぼすことが



予想される。ここでは、このような薄膜構造を有す CNT に対して、対向電極から電子/正孔の注入を行い、注入電荷の空間分布、誘起される電界、さらに薄膜の静電容量の解析をおこなった。その結果、ある種の CNT の組み合わせの下では、CNT の電子構造の違いを反映し、印加した外部電界に対して逆向きの電界が誘起されることを明らかにした。この結果は、CNT 薄膜を用いた半導体デバイスにおいて、その界面構造の制御の重要性を示したものである。

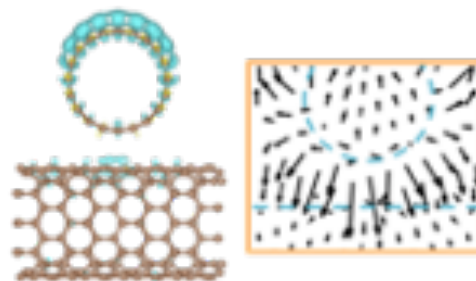


図 3 CNT 薄膜での CNT 間電界

#### 【4】グラフェン端の化学修飾による電子物性変調

物質の表面では、構成する元素の物質内で有している周期性が壊れ、それに伴い得意な表面状態が出現することがある。2次元の結晶である、グラフェンの場合、端が結晶の表面に相当し、端の導入により特異な物性の発現が通常の固体と同様に期待される。ここでは、グラフェンの端の仕事関数と電子構造について、端に吸着した化学官能基、具体的にはケトン(-O)、カルボニル(-COH)、カルボキシル(-COOH)、水酸基(-OH)について着目し、吸着による仕事関数と電子構造の変調を量子論に立脚した計算科学の方法を用いて調べた。グラフェンの端の電子構造と仕事関数は、吸着された化学官能基種に強く依存することが明らかになった。とくに、水酸基を吸着した場合、端の仕事関数が著しく小さくなり、端の外の真空領域に分布を有し、端に沿って広がった特異な状態がフェルミレベルに出現します。この状態は、水酸基を付加したグラフェン端において負の電気親和力が発現する可能性があることを示したものであり、水酸化されたグラフェンが、高効率な電界電子放出源として応用の可能性を有していることを予言した。

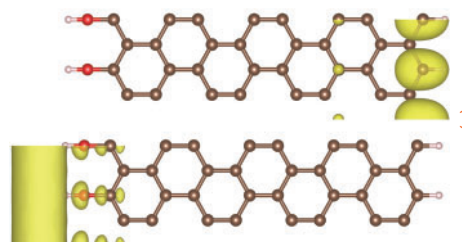


図 4 GNR 端に現れる特異な電子状態

#### 【5】2次元原子層状窒化ガリウムの物質設計と物性探索

グラフェンの合成以降、種々の原子層状物質の合成が報告されています。これらは、構成要素となる元素種の組み合わせにより、多様な構造と電子物性を示すことが知られている。とりわけ、グラフェンや h-BN といった厳密な意味での原子層物質はその究極の薄さという点から非常に興味深い物質である。ここでは、半導体的な性質を有する原子層物質として、h-BN と同じ III 族元素と V 族元素の組み合わせからなる新たな原子層物質合成の可能性を探索するために、Ga と N からなる 2 次元蜂の巣格子ネットワーク物質の物質設計と電子物性の解明を第一原理計算の手法を用いておこなった。計算の結果、GaN は平衡状態において、平面構造を取ることが明らかになった。また、シートは 2.2 eV の間接ギャップを有する半導体となる。一方、このシートを圧縮すると、GaN が本来持っている凸凹した構造が復活し、シートの上下に分極が生じることが明らかになった。また、その時の極性は、シートへの水素吸着により反転させることができることをも明らかにした。

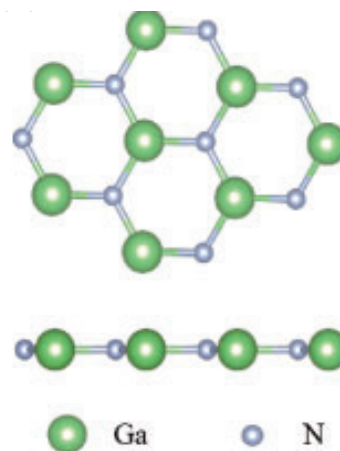


図 5 蜂の巣格子 GaN

## 【6】電界印加下における 5 重付加 C60 分子の電子構造

C60 分子はその適度な化学反応性から種々の分子デバイスへ応用されている。ここでは 5 個の有機官能基が付加した、バドミントンのシャトルcock 状の分子に着目し、その分子への外部印加によるキャリア注入による電子物性の変調の解明をおこなった。とくに、これらの分子が電子デバイスの構成単位として用いられることから、電界効果トランジスタ構造内に置かれた時の、分子の電子状態、スピン状態の変調を調べた。この分子は、化学官能基が付加することにより、C60 の形状を保持した側と、官能基化された側とで静電ポテンシャルの差が生じ、分子と

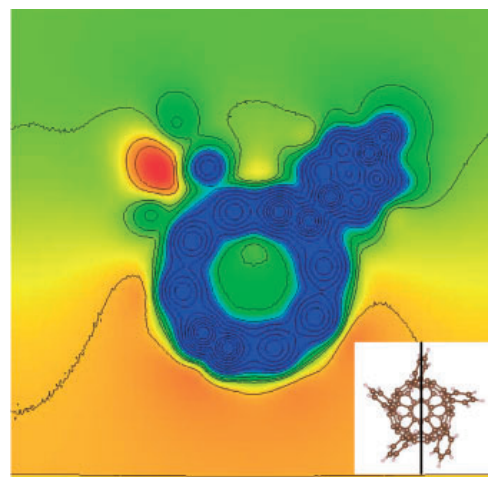


図 6：5 重付加 C60 の静電ポテンシャル図



して双極子モーメントを有す。また、この双極子モーメントのために、電極による電界印加時においては、分子と電極間の電界分布に、分子の廃校依存性があることを示した。さらに、電荷の注入により、分子のスピン状態を制御することが可能であり、 $S=0$ ,  $1/2$ ,  $1$  の 3 つのスピン状態を外場で制御できることを示した。

#### 4. 学位論文

博士：

1. 丸山実那, “Electronic Properties of  $sp^2$  Carbon Networks with Defects and Interfaces” (2017 年 3 月)
2. 山中綾香, “Energetics and Electronic Properties of Edges of Two-dimensional Materials” (2017 年 3 月)
3. 重田真浩, “Study on physical properties of carbon nanotube-polymer hybrids” (2017 年 2 月)
4. 高橋秀和, “Theoretical Study on the Origin of the Antiferromagnetic-Ferromagnetic Phase Transition and the Inverse Magnetocaloric Effect of FeRh” (2016 年 12 月)

修士：

1. 岸本健, “欠陥・層間相互作用・外部電界を用いたグラフェン薄膜の電子構造制御” (2017 年 3 月)
2. 古地健人, “第一原理計算による複合構造を形成したカーボンナノチューブの電子物性の解明” (2017 年 3 月)
3. 反町純也, “ $\pi$  電子ネットワークの構造設計と外部電界下における電子物性解明” (2017 年 3 月)

#### 5. 受賞、外部資金、知的財産権等

受賞等（賞の名称、受賞者名、タイトル、年月日）

1. 山中綾香、日本学術振興会・博士特別研究員（DC2）2015 年 4 月~2017 年 3 月
2. 丸山実那、日本学術振興会・博士特別研究員（DC2）2015 年 4 月~2017 年 3 月

外部資金（名称、氏名、代表・分担の別、採択年度、金額、課題名）

代表

1. 科学研究費補助金 基盤研究(A)(文部科学省)(2013 年度~2016 年度)「ナノ炭素物質と無機半導体からなる複合構造におけるナノ界面物性の解明」（総額：35,200 千円）

2. 科学研究費補助金 新学術研究（公募研究）（文部科学省）（2016 年度～2017 年度）「計算科学による原子層物質の新物性デザインとデバイス設計指針の提示」（総額：5,600 千円）

## 6. 研究業績

### (1) 研究論文

1. K. Kishimoto and S. Okada, “Influence of the Defects on the Electronic Structures of Bilayer Graphene”, *Surf. Sci.* **644**, 18–23 (2016).  
(doi:10.1016/j.susc.2015.08.036)
2. A. Yamanaka and S. Okada, “Energetics and electronic structures of graphene nanoribbons under a lateral electric field”, *Carbon* **96**, 351–361 (2016).  
(doi:10.1016/j.carbon.2015.09.054)
3. M. Maruyama and S. Okada, “Magnetic Properties of Graphene Quantum Dots Embedded in h-BN Sheet”, *J. Phys. Chem. C* **120**, 1293–1302 (2016). (DOI: 10.1021/acs.jpcc.5b09882).
4. A. Yamanaka and S. Okada, “Influence of electric field on electronic states of graphene nanoribbons under a FET structure”, *Jpn. J. Appl. Phys.* **55**, 035101 (2016). (DOI: 10.7567/JJAP.55.035101).
5. P. Solis-Fernandez, S. Okada, T. Sato, M. Tsuji, and H. Ago, “Gate-Tunable Dirac Point of Molecular Doped Graphene”, *ACS Nano* **10**, 2930 – 2939 (2016). (DOI: 10.1021/acsnano.6b00064)
6. J. Sorimachi and S/ Okada, “Influence of fullerene cages on energetics of dipole moment of encapsulated water molecule”, *Jpn. J. Appl. Phys.* **55**, 04EP02 (2016). (DOS: 10.7567/JJAP.55.04EP02)
7. U Ishiyama, N. T. Cuong, and S. Okada, “Anomalous electrostatic potential properties in CNT thin films under a weak external electric field”, *Appl. Phys. Express* **9**, 045101 (2016). (DOI: 10.7567/APEX.9.045101).
8. K. Narita and S. Okada, “Geometric and electronic structures of corannulene polymers: Ultra narrow graphene ribbons with corrugation and topological defects”, *Chem. Phys. Lett.* **650**, 76–81 (2016).  
(DOI:10.1016/j.cplett.2016.02.075).
9. A. Hasegawa and S. Okada, “Effect of structural deformation on carrier accumulation in semiconducting carbon nanotubes under an external electric field”, *Jpn. J. Appl. Phys.* **55**, 045101 (2016). (DOI:10.7567/JJAP.55.045101).
10. T. Kochi and S. Okada, “Energetics and electronic structure of tubular Si nanoscale vacancies filled by carbon nanotubes”, *Jpn. J. Appl. Phys.* **55**, 055101 (2016). (DOI:10.7567/JJAP.55.055101)

11. K. Narita and S. Okada, “Geometric and electronic structures of one-dimensionally polymerized coronene molecules”, *Jpn. J. Appl. Phys.* **55**, 06GF02 (2016). (DOI:10.7567/JJAP.55.06GF02)
12. K. Kishimoto and S. Okada, “Electron-state tuning of bilayer graphene by defects”, *Jpn. J. Appl. Phys.* **55**, 06GF06 (2016). (DOI:10.7567/JJAP.55.06GF06)
13. M. Sugahara, Y. Yomogida, H. Kawai, Y. Maniwa, S. Okada, and K. Yanagi, “Ambipolar Transistor of WS<sub>2</sub> Nanotube Random Networks”, *Appl. Phys. Express* **9**, 075001 (2016). (DOI:10.7567/APEX.9.075001)
14. J. Sorimachi and S. Okada, “Electrostatic properties of fullerenes under an external electric field: First-principles calculations of energetics for all IPR isomers from C<sub>60</sub> to C<sub>78</sub>”, *Chem. Phys. Lett.* **659**, 1–5 (2016). (DOI:10.1016/j.cplett.2016.06.022)
15. H. Takahashi, M. Araidai, S. Okada, and K. Shiraishi, “Theoretical Investigation on Electronic and Magnetic Structures of FeRh”, *J. Mag. Soc. Jpn.* **40**, 77–80 (2016). (DOI:10.3379/msjmag.1605L011)
16. Y. Takesaki, K. Kawahara, H. Hibino, S. Okada, M. Tsuji, and H. Ago, “Highly Uniform Bilayer Graphene on Epitaxial Cu-Ni(111) Alloy”, *Chem. Mat.* **28**, 4583–4592 (2016). (DOI: 10.1021/acs.chemmater.6b01137)
17. T. Kochi and S. Okada, “Effect of an intersection of carbon nanotubes on the carrier accumulation under an external electric field”, *Appl. Phys. Express* **9**, 085103 (2016). (DOI: 10.7567/APEX.9.085103)
18. J. Pu, K. Kanahashi, N. T. Cuong, C.-H. Chen, L.-J. Li, S. Okada, H. Ohta, and T. Takenobu, “Enhanced thermoelectric power in two-dimensional transition metal dichalcogenide monolayers”, *Phys. Rev. B* **94**, 014312 (2016). (DOI: 10.1103/PhysRevB.94.014312)
19. A. Yamanaka and S. Okada, “Energetics and electronic structure of h-BN nanoribbons”, *Sci. Rep.* **6**, 30653 (2016). (DOI:10.1038/srep30653)
20. Y. Gao, T. Yayama, and S. Okada, “Polar properties of a hexagonally bonded GaN sheet under biaxial compression”, *Appl. Phys. Express* **9**, 095201 (2016). (DOI: 10.7567/APEX.9.095201)
21. M. Maruyama, N. T. Cuong, and S. Okada, “Coexistence of Dirac cones and Kagome flat bands in two-dimensional network of hydrocarbon molecules”, *Carbon* **109**, 755–763 (2016). (DOI: 10.1016/j.carbon.2016.08.090).

22. R. Taira, A. Yamanaka, and S. Okada, "Electronic structure modulation of graphene edges by chemical functionalization", *Appl. Phys. Express* **9**, 115102 (2016). (DOI: 10.7567/APEX.9.115102)
23. S. Furutani and S. Okada, "Electronic properties of pentaorgano [60]fullerenes under an external electric field", *Appl. Phys. Express* **9**, 115103 (2016). (DOI: 10.7567/APEX.9.115103)
24. K. M. Bui, V. A. Dinh, S. Okada, and T. Ohno, "Na-ion diffusion in NASICON-type solid electrolyte: a density functional study", *Phys. Chem. Chem. Phys.* **18**, 27226-27231 (2016). (DOI: 10.1039/C6CP05164B).
25. H. Jippo, T. Ozaki, S. Okada, and M. Ohfuchi, "Electronic Transport Properties of Graphene Channel with Foreign Materials in 10 nm-scale devices", *J. Appl. Phys.* **120**, 154301 (2016). (DOI: 10.1063/1.4964948).

(2) 招待講演

1. Susumu Okada, "Electronic Properties of Nanoscale Materials under a Finite Electric Field", The 19th Asian workshop on First-Principles Electronic Structure Calculations, October 31 – November 2, 2016, National Chiao Tung University (Hsinchu).

(3) 国際会議発表

1. M. Maruyama and S. Okada, "Coexistence of Dirac Cone and Kagome Band in Two-Dimensional Network of Hydrocarbon Molecules", Seventeenth International Conference on the Science and Application of Nanotubes and Low-Dimensional Materials - NT16, August 7--13, 2016, University of Vienna (Vienna).
2. A. Yamanaka and S. Okada, "Tuning of polarization of h-BN nanoribbons by the edge hydrogenation", Seventeenth International Conference on the Science and Application of Nanotubes and Low-Dimensional Materials - NT16, August 7--13, 2016, University of Vienna (Vienna).
3. Y. Gao and S. Okada, "Energetics and electronic structures of GaN thin films", Seventeenth International Conference on the Science and Application of Nanotubes and Low-Dimensional Materials - NT16, August 7--13, 2016, University of Vienna (Vienna).
4. J. Sorimachi and S. Okada, "Magnetic properties of triangular pyramidal hydrocarbon molecule", 8th International Conference on Recent Progress in Graphene/2D Research, September 25-29, 2016, Sungkyunkwan University (Seoul).
5. T. Kochi and S. Okada, "Electronic structure of CNT thin films with nanointerfaces under an electronic field", 8th International Conference on Recent Progress in Graphene/2D Research, September 25-29, 2016, Sungkyunkwan University (Seoul).

6. K. Kishimoto and S. Okada, "Electronic structure of graphene thin films with atomic and topological defects", 8th International Conference on Recent Progress in Graphene/2D Research, September 25-29, 2016, Sungkyunkwan University (Seoul).
7. Y. Gao and S. Okada, "Geometric and electronic properties of a hexagonally bonded sheet of GaN", 8th International Conference on Recent Progress in Graphene/2D Research, September 25-29, 2016, Sungkyunkwan University (Seoul).
8. M. Maruyama and S. Okada, "Coexistence of Dirac cones and Kagome bands on a porous graphene", 8th International Conference on Recent Progress in Graphene/2D Research, September 25-29, 2016, Sungkyunkwan University (Seoul).
9. A. Yamanaka and S. Okada, "Electronic structure of h-BN nanoribbons", 8th International Conference on Recent Progress in Graphene/2D Research, September 25-29, 2016, Sungkyunkwan University (Seoul).
10. M. Sugahara, H. Kawai, Y. Yomogida, Y. Maniwa, S. Okada, and K. Yanagi, "Ambipolar Transistors Based on Random Networks of WS<sub>2</sub> Nanotubes", 29th International Microprocesses and Nanotechnology Conference, November 8- 11, 2016, ANA Crown Plaza Hotel (Kyoto)
11. M. Maruyama, N.T. Cuong, and S. Okada, "Coexistence of Dirac Cones and Kagome Flat Bands in Porous Graphene", 29th International Microprocesses and Nanotechnology Conference, November 8- 11, 2016, ANA Crown Plaza Hotel (Kyoto)
12. H. Nishino, T. Fujimori, A. Fujino, T. Fujita, N. Umezawa, S. Okada, E. Nishibori, S. Ito, J. Nakamura, H. Hosono, and T. Kondo, "Room Temperature Synthesis of Two-Dimensional Boron Sheets", 29th International Microprocesses and Nanotechnology Conference, November 8- 11, 2016, ANA Crown Plaza Hotel (Kyoto)
13. S. Furutani and S. Okada, "Electronic Properties of PCBM under an External Electric Field", 29th International Microprocesses and Nanotechnology Conference, November 8- 11, 2016, ANA Crown Plaza Hotel (Kyoto)
14. T. Kawai, S. Okada, and M. Otani, "Diffusion of Li Atom from a Solvated State to Interlayer of Graphite through Carbonylic Edge Termination for Fast Charge/Discharge of Li Ion Battery: First-Principles Calculations", 29th International Microprocesses and Nanotechnology Conference, November 8- 11, 2016, ANA Crown Plaza Hotel (Kyoto)
15. K. Kishimoto and S. Okada, "Electronic Structure of Bilayer Graphene with Defects under an External Electric Field", 29th International Microprocesses and

- Nanotechnology Conference, November 8- 11, 2016, ANA Crown Plaza Hotel (Kyoto)
16. T. Kochi and S. Okada, "Electronic Structure of CNT Thin Films with Nanoscale Interfaces under an Electric Field", 29th International Microprocesses and Nanotechnology Conference, November 8- 11, ANA Crown Plaza Hotel (Kyoto)
  17. Y. Nagasawa and S. Okada, "Energetics and Electronic Structures of Molecular Complexes Consisting of Large Fullerene and Cyclohydrocarbon", 29th International Microprocesses and Nanotechnology Conference, November 8- 11, 2016, ANA Crown Plaza Hotel (Kyoto)
  18. R. Taira, A. Yamanaka and S. Okada, "Work Function Modulation of Edge Functionalized Graphene Nanoflakes", 29th International Microprocesses and Nanotechnology Conference, November 8- 11, 2016, ANA Crown Plaza Hotel (Kyoto)
  19. A. Yamanaka and S. Okada, "Energetics and Electronic Structure of h-BN Nanoribbons", 29th International Microprocesses and Nanotechnology Conference, November 8- 11, 2016, ANA Crown Plaza Hotel (Kyoto)
  20. J. Sorimachi and S. Okada, "Porous Hydrocarbon Networks of Pyramidal Molecules", 29th International Microprocesses and Nanotechnology Conference, November 8- 11, 2016, ANA Crown Plaza Hotel (Kyoto)
  21. M. Matsubara and S. Okada, "Effect of Metal Nanoparticles on Carrier Accumulation in Graphene under an Electric Field", 29th International Microprocesses and Nanotechnology Conference, November 8- 11, 2016, ANA Crown Plaza Hotel (Kyoto)
  22. Y. Gao and S. Okada, "Energetics and Electronic Properties of a Hexagonally Bonded Sheet of GaN Under Biaxial Compression", 29th International Microprocesses and Nanotechnology Conference, November 8- 11, 2016, ANA Crown Plaza Hotel (Kyoto)

## VII-5. 量子輸送研究

教授：都倉康弘

助教：吉田恭

大学院生：博士後期課程 1 名、前期課程 5 名

### 【1】量子状態制御と非平衡統計物理

#### (1) 量子ポンプと時間依存伝導現象（中嶋、都倉、論文 3, 5、国際講演 2, 3、国内講演 3, 10）

時間依存するポテンシャルの下での量子伝導現象に継続して取り組んでいる。熱浴の温度や科学ポテンシャルをゆっくり変動させた時の、過剰エントロピー生成に関して古典系では活発に議論されている。今回量子系での扱いについて、新しい方法を提案し、いくつかの極限条件で従来研究と整合していることを確かめた。ベクトルポテンシャルやスピン・軌道相互作用の強さを周期的に変動させた量子ポンプについて理論的に考察を加えた。また、時間的に変動する電圧が加えられた電極と結合し、フォノン系とも結合した単一分子接合の伝導を非平衡グリーン関数により解析した。特に加えた摂動の周波数がフォノンの周波数の 2 倍となる条件で交流コンダクタンスに構造が現れる事が分かった。三重大、ベングリオン大との共同研究である。

#### (2) メゾスコピック系の物性と伝導現象（都倉 論文 1、国内講演 18）

金属に時間に依存する摂動が加わると、電荷の粗密波（プラズモン）が発生するが、その緩和過程の微視的な議論は不十分であった。今回特に磁場下のデバイス端に見られるエッジマグネトプラズモンの緩和を決める因子を明らかにした。またエッジの非平衡励起のダイナミクスを朝永・ラッティンジャーモデルを用いて解析を進めた。擬二次元量子ドットに閉じ込められた電子スピンに様々なスピン・軌道相互作用がスペクトルに与える影響について検討を加え、摂動展開の一般項とその近似の精度に関する知見を得た。

#### (3) 光格子中の冷却原子のダイナミクス（都倉 論文 6）

光格子中の冷却原子系では、多彩な物理パラメタを制御しながら量子ダイナミクスを実験・理論を比較しながら研究することができる。一次元 Bose-Hubbard モデルを舞台として、スピン 1 のボゾン系の量子ウォーク現象の解析により、スピン混合ダイナミクスと遠距離スピン相関を明らかにした。特に相互作用の大きな極限ではコトンネリング過程が重要であることが分かった。NTT 物性科学基礎研究所との共同研究である。

#### (4) 高感度電荷測定（都倉 国内会議 8）

超伝導接合で有名なジョセフソン効果と双対の関係にある量子位相滑りに関する研究を継続している。今回これを用いた高感度電荷測定の実現の為の特性評価を行った。産総研との共同研究の成果である。

#### (5) 一次元トポロジカル物質の端状態（武井、都倉 国内講演 7, 9）

古くから知られている、AB 副格子一次元鎖はトポロジカル的な性質を持ち、端に現れる局在状態で特徴付けられる。今回そのモデルを拡張した次々近接相互作用を入れたモデルを考察し、そのトポロジカルな性質を明らかにし、さらに従来モデルとの接合界面に現れる局在状態の性質について詳しく解析を行った。

### 【2】量子測定と量子系のデコヒーレンス、エンタングルメント

#### (1) 測定理論と量子連続測定（浅井、都倉 国内講演 21）

また量子測定理論における、弱値とその測定過程である弱測定は量子力学の特徴が明瞭に現れる研究課題である。弱値は量子力学的平均を一般化したものであり、量子測定の感度向上や通常測りにくい物理量へアクセスできる可能性から注目を集めている。今回、この弱値を混合状態へ拡張する方法について検討を開始した。独自の視点として、量子力学的平均という見方を一般化するアプローチを提案し、その物理的実現可能性を調べた。

**(2) 量子ビットと光子場の相互作用 (都倉、大山 国際講演 4, 6, 国内講演 1, 5, 11, 12, 19)**

半導体スピン量子ビットのコヒーレント制御について研究を継続している。今回スピン・軌道相互作用を用いた電場誘起スピン共鳴のマイクロ波強度依存性を詳しく調べ、いわゆる 3 次ドレSSLハウス項の寄与によりラビ振動数が飽和傾向を示すことを理論的に明らかにした。一方、光子場と結合した二準位系の緩和過程について擬モードを用いて解析を加え、non-Markov 的な環境の特徴を明らかにした。また、量子ビットのコヒーレンスを保つためにしばしば実行される動的ディカップリングについて考察を加えた。これは連続して  $\pi$  パルスで量子ビット系に加えることによりデコヒーレンスを抑制するというものだが、 $\pi$  パルスとなる光子系が量子性を持っている場合には、その量子揺らぎに起因する別のデコヒーレンス過程を無視することができない。量子的な光子場を用いた動的ディカップリングにおいて最適なパルス間隔と光子数を初めて理論的に明らかにした。

**(3) エンタングルメントの生成と制御 (古谷、都倉 論文 2, 4, 国際会議 1, 5, 国内会議 6, 13, 17, 20)**

相互作用する一次元スピン系の量子相転移を二体のエンタングルメントを特徴付けるコンカレンスと量子的相関の重み関数の二つにより、理解できる事を見いだした。また、近接した二つの局在スピンともう一つの電子スピンを一定時間相互作用させてエンタングルメントを生成させる過程を理論的に解析した。ゼロ磁場の条件では、最大エンタングルメント状態は実現可能であるがその生成確率は 100% ではない。しかし適切な磁場を印加する事により 100% とする事が可能である事を見いだした。また、この逆過程としてエンタングルした 2 量子ビットのベル状態測定を二つの電子スピンを相互させてそのスピンを射影測定することにより実現することを試みた。従来方法に比べ、より多くのベル基底を識別することが可能であることがわかったが、その忠実度は 1 以下の一定値を超えることができないことを明らかにした。

**【3】統計力学と乱流の物理**

**(1) 古典場の系の典型性 (吉田 国内講演 [2])**

近年、典型性の概念を用いて統計力学のアンサンブル描像の基礎付けが量子系を中心に試みられている。本研究では、昨年度に引続き、古典系での典型性を、自由度が空間座標でラベルされる古典場の系の場合で考察した。量子場への応用を意識して、生成消滅演算子に対応する場で議論を再構成し、対応するミクロ状態量としてのエントロピーの表現を得た。

**(2) 壁乱流の統計法則 (吉田 国内講演 [5])**

壁(境界)のある領域内の流体は、十分に発達した乱流状態で粘性底層から十分離れた領域では、平均流速が壁からの距離の対数に比例するという現象論が知られている。本研究では、愛知工業大学金田行雄教授との共同研究で、対数則の比例係数である Kármán 定数および速度場相関関数の定量的見積もりを得るために昨年度求めた完結近似(高次統計量を低次統計量で近似する方法)の表式を数値的に解析するコードを開発した。数値解析の実行は今後の課題である。

**(3) 乱流中の慣性粒子分布に対する統計法則 (吉田 国内講演 [3])**



大気中の雲粒、太陽系惑星形成時のダストの運動等は、乱流中の慣性粒子の運動でモデル化される。本研究では、有木健人研究員（名古屋大学）らとの共同研究で、乱流中の慣性粒子分布に対して、緩和時間をパラメタとする摂動解析で大スケールにおける相似則を導いた。また、完結近似による相似則の比例係数の見積もりも行った。

#### (4) 量子流体乱流の統計法則（吉田 国内講演 [1, 4]）

液体ヘリウムの超流動状態や Bose-Einstein 凝縮体 (BEC) の流動などの量子流体の運動は、適切な近似のもと Gross-Pitaevskii (GP) 方程式により支配される。一方、近年の実験技術の進歩により、生成した BEC を磁場などで駆動して乱流を発生されるようになっている。本研究は辻義之教授(名古屋大学)、三浦英昭准教授(核融合研)との共同研究で、GP 方程式に従う乱流の数値シミュレーションを行い、場のスペクトルを研究者自身による理論解析、他の研究者による数値シミュレーションと実験の結果との比較を行っている。

#### <論文>

1. Tatsuki Tojo, Masashi Inui, Ryo Ooi, Kyozauro Takeda, and Yasuhiro Tokura, “Effect of isotropy and anisotropy of the confinement potential on the Rashba spin-orbit interaction for an electron in two-dimensional quantum system”, Accepted for publication to JJAP.
2. T. Shimo-Oka, Y. Tokura, Y. Suzuki, and N. Mizuochi, “Fast Phase-manipulation of the Single Nuclear Spin Induced by an Electric Field”, Phys. Rev. A 95, 032316 (2017).
3. A. Ueda, Y. Utsumi, Y. Tokura, O. Entin-Wohlman, A. Aharony, “AC transport and full-counting statistics of molecular junctions in the weak electron-vibration coupling regime”, J. Chem. Phys. 146, 092313 (2017).
4. Yuichiro Matsuzaki, Takaaki Shimooka, Hirotaka Tanaka, Yasuhiro Tokura, Kouichi Semba, Norikazu Mizuochi, “Hybrid quantum magnetic field sensor with an electron spin and a nuclear spin in diamond”, Phys. Rev. A, 94, 052330 (2016).
5. Masahiko Taguchi, Satoshi, Nakajima, Toshihiro Kubo and Yasuhiro Tokura, “Quantum adiabatic pumping by modulating tunnel phase in quantum dots”, J. Phys. Soc. Jpn, 85, 084704 (2016).
6. Daichi Morita, Toshihiro Kubo, Yasuhiro Tokura, Makoto Yamashita, “Spin-1 Quantum Walk”, Phys. Rev. A 96, 063625 (2016).

#### <書籍>

#### <講演：国際会議>

1. Yasuhiro Tokura, Yuta Ohyama and Taichi Furuya, “Coherence of the photo-generated spins and effective Bell measurement”, 2016 Workshop on Innovative Nanoscale Devices and Systems (WINDS), Hapuna Beach Prince Hotel, Kohala Coast, Hawaii, USA, Dec. 4-9 (2016) (invited).
2. Yasuhiro Tokura, “Dynamical quantum transport in nanostructures”, 6th Int. Quantum Science Symposium Europe-2016 Meeting, Peterhouse, Univ. Cambridge, UK, Nov.

1-2 (2016) (invited).

3. Yasuhiro Tokura, “Quantum adiabatic spin pump in Rashba-Aharonov-Bohm interferometer”, 9th Int. Conf. on Physics and Applications of Spin-Related Phenomena in Solids (PASPS9), Kobe Int. Conf. Center, Kobe, Aug 8-11 (2016).
4. Y. Ohya and Y. Tokura, “Pseudomode quantum jump and memory effect of non-Markovian dynamics”, Resonance and Non-Hermitian Quantum Mechanics 2016, Arata Hall, Osaka University, Aug. 3-5 (2016).
5. T. Furuya and Y. Tokura, “Entanglement dynamics in simultaneously coupling system: Toward the Bell measurement”, The 9th Int. Conf. on Quantum Dot (QD2016), Jeju, Korea, May 22-27 (2016).
6. Yasuhiro Tokura, “Microwave amplitude dependence of electric dipole spin resonance”, China-Japan International Workshop on Quantum Technologies (QTech2016), May 13th-14th, 2016, Beijing (2016) (invited).

<講演：国内会議>

1. 都倉康弘, 「Coherent control of single electron spin in a semiconductor quantum dot」, 第55回電子スピンサイエンス学会年会 (SEST2016) ミニシンポジウム, 大阪市立大学、大阪 2016. 11. 12, (招待講演) .
2. 吉田恭「外力・散逸の無い量子流体乱流のシミュレーション」、プラズマシミュレータシンポジウム 2016, ポスター発表、2016 年 9 月 7 日、核融合科学研究所、土岐。
3. 都倉康弘” Quantum adiabatic pumping with modulating phases in an interfereometer”、第6回半導体量子効果と量子情報の夏期研修会、2016 年 9 月 23 日、ホテルサンバレー那須、那須。
4. 吉田恭”Entropy as a function of microscopic state for classical free field systems”、第6回半導体量子効果と量子情報の夏期研修会、ポスター発表、2016 年 9 月 22 日、ホテルサンバレー那須、那須。
5. 大山侑太” Bang-Bang control of a qubit with coherent field”、第6回半導体量子効果と量子情報の夏期研修会、ポスター発表、2016 年 9 月 22 日、ホテルサンバレー那須、那須。
6. 古谷太一” Calculation of the heat current flowing into quantum dots measured by QPC with the finite temperature difference”、第6回半導体量子効果と量子情報の夏期研修会、ポスター発表、2016 年 9 月 22 日、ホテルサンバレー那須、那須。
7. 武井皐” Topological properties of one-dimensional chain and edge states”、第6回半導体量子効果と量子情報の夏期研修会、ポスター発表、2016 年 9 月 22 日、ホテルサンバレー那須、那須。
8. 川畑史郎, 田口真彦, 都倉康弘「電荷位相双対性に基づく超伝導ナノ細線電荷センサーの理論」、日本物理学会 2016 年秋季大会、2016 年 9 月 13 日、金沢大学、金沢。
9. 武井皐, 都倉康弘「1次元鎖のトポロジカルな性質とエッジ状態」、日本物理学会 2016 年秋季大会、2016 年 9 月 13 日、金沢大学、金沢。
10. 植田暁子, 内海裕洋, 今村裕志, 都倉康弘「分子接合におけるフォノンによる電子正孔励起と AC コンダクタンス」、日本物理学会 2016 年秋季大会、2016 年 9 月 13 日、金沢大学、金沢。
11. 大山侑太, 都倉康弘「非マルコフ過程における pseudomode とメモリー効果について」、日本物理学会 2016 年秋季大会、2016 年 9 月 14 日、金沢大学、金沢。
12. 都倉康弘「電場誘起電子スピン共鳴のマイクロ波振幅依存性」、日本物理学会 2016 年秋季大会、2016 年 9 月 15 日、金沢大学、金沢。

13. 清水薫, 都倉康弘「一次元量子スピン系における隣接スピン間エンタングルメントと量子揺らぎ振幅との対応関係」、日本物理学会 2016 年秋季大会、2016 年 9 月 16 日、金沢大学、金沢。
14. 有木健人、芳松克則、吉田恭「乱流中の慣性粒子分布に対する統計法則」、鳥取非線形研究会 2016、2016 年 11 月 16 日、鳥取大学、鳥取。
15. 吉田恭「電磁流体・量子流体乱流の統計法則」、第 12 回協定講座シンポジウム、招待講演、2016 年 12 月 6 日、神戸大学、神戸。
16. 吉田恭、金田行雄「壁乱流対数則領域の二点完結近似 II」、日本物理学会第 72 回年次大会、2017 年 3 月 17 日、大阪大学豊中キャンパス、大阪。
17. 古谷太一, 都倉康弘「交換相互作用を含む系における電荷/スピン輸送の完全計数統計」、日本物理学会第 72 回年次大会、2017 年 3 月 17 日、大阪大学豊中キャンパス、大阪。
18. 東条樹, 武田京三郎, 都倉康弘「二次元量子場における Rashba および Dresselhaus スピン軌道相互作用」、日本物理学会第 72 回年次大会、2017 年 3 月 18 日、大阪大学豊中キャンパス、大阪。
19. 大山侑太, 都倉康弘「量子化された外場による Qubit 操作の不完全性の解析」、日本物理学会第 72 回年次大会、2017 年 3 月 20 日、大阪大学豊中キャンパス、大阪。
20. 下岡孝明, 鈴木義茂, 都倉康弘, 水落憲和「回転場を用いたダイヤモンド中単一核スピンの高速位相制御」、日本物理学会第 72 回年次大会、2017 年 3 月 20 日、大阪大学豊中キャンパス、大阪。
21. 浅井海図, 都倉康弘「弱値における線形応答と感受率について」、日本物理学会第 72 回年次大会、2017 年 3 月 20 日、大阪大学豊中キャンパス、大阪。

#### <学位論文>

(博士論文) 数理物質科学研究科

##### 1. 中島慧

“Theoretical studies on quantum pump and excess entropy production: Quantum master equation approach”

(修士論文) 数理物質科学研究科

##### 1. 大山侑太

「Qubit 系における外場の影響についての研究」

##### 2. 古谷太一

「1 次元トポロジカル絶縁体におけるゼロモードの研究」

##### 3. 武井卓

「三体系での同時相互作用によるエンタングルメント生成」

(学位論文) 理工学群物理学類

##### 1. 権俣権

「量子マスター方程式を用いた量子ドットと環境の間の電子ダイナミクスに関する研究」

#### <外部資金>

1. 科学研究費 基盤研究(A) 課題番号: 26247051 「量子ホールエッジチャネルの非平衡電荷ダイナミクス」(分担) 平成 28 年度: 直接経費: 1,580 千円(平成 26 年度~平成 30 年度、研究代表者: 藤澤利正)
2. 国立研究開発法人科学技術振興機構 戦略的創造研究推進事業(チーム型研究(CREST))研究領域「新たな光機能や光物性の発現・利活用を基軸とする次世代フォトニクスの基盤技術」(研究代表者: 大岩顕) 研究課題「電子フォトニクス融合によるポアンカレインターフェースの創製」研究題目「光子-電子スピ

ン量子変換理論」平成28年度：6,500千円（平成27年12月1日～平成32年度）

〈社会還元等〉

1. 都倉康弘、日本物理学会 領域4代表 2016年4月～2017年3月

## VII. 生命物理グループ

### メンバー

教授	重田 育照
助教	庄司 光男
助教	栢沼 愛 (計算科学研究センター専任)
研究員	原田 隆平 (学術振興会特別研究員)
研究員	佐藤 竜馬
研究員	鬼頭 宏任
研究員	Bui Thi Kieu My
学生	大学院生 2 名、学類生 3 名

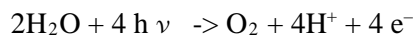
### 【1】. 概要

生命機能情報分野では、生体内で重要な働きをしている蛋白質と核酸に注目し、その原子レベルでの特異的機能を理論的に解明することを目的としている。平成 28 年度では、光合成酸素発生中心(PSII-OEC)の反応機構の解明、宇宙空間におけるヒダントイン及びアミノ酸生成機構の解明、分子動力学シミュレーションによる細菌の細胞分裂タンパク質の動的秩序解析、紫外線損傷 DNA におけるフッリピング機構の理論的研究について研究が大きく進展した。

### 【2】. 研究成果

#### (1) 光化学系 II 酸素発生中心(OEC)の反応機構についての理論的研究

光合成は光エネルギーを化学エネルギーに効率的に変換するシステムであり、生命が作り上げた洗練された化学反応系とも言える。光合成反応は巨大な蛋白質複合体内で行われ、一連の化学反応：光捕集、電子伝達、ATP 生成と糖生成が行われる。電子伝達を担う光化学系 II では水を分解し、酸素分子を発生する以下の反応を触媒している。



この反応では化学的に安定な水から電子を引き抜いて（酸化して）いる事から分かるように、極めて難しいため、多くの反応制御がなされていると考えられる。そのため、これらの反応機構を明らかにする事は、生化学的重要性のみならず人工光合成の有益な設計指針を与えるものと期待される。

今年度は最も初めの化学反応過程である  $\text{S}_2 \rightarrow \text{S}_3$  遷移について量子古典混合 (QM/MM)法を用いて理論解析を進めた。本過程は水分子が挿入するかどうかで反応過程が大きく変わる。また、 $\text{S}_3$ 構造は研究開始当初は不明であったため(2017 年 3 月に沈

先生らにより報告される)、両可能性について理論的に検討した。まず、水が挿入されない場合では可能なスピン状態解析を行い、 $S_3$ 状態後の  $OO$  結合形成時での反応性の検討を行った。水分子が挿入する場合については、 $S_3$ 状態で  $OO$  結合形成を行う場合と、 $S_4$ 状態になってから  $OO$  結合を形成する場合についてそれぞれの機構を検討した。 $S_3$ 状態できとりうる可能な中間体の構造と相対安定性について網羅的に理論解析をおこなった。 $S_2 \rightarrow S_3$ に続く  $S_3 \rightarrow S_4$ 反応に関しても既に理論研究を進展させており、様々な  $OO$  結合形成経路（プロトン移動経路、プロトン化状態、 $OO$  結合形成機構）について理論検討を行った。酸素放出経路についても理論計算を完了しており、現在論文投稿中である。酸素発生機構は多くの仮定の上に組み立てられており、まだ多くの検討すべき状況が残されている。そのため、結晶構造、EXAFS、分光実験結果と整合性を吟味しながら、全ての可能性を検討していく事が重要である。例えば酸素結合過程に関してはラジカルカップリング機構とは異なり、非断熱電子移動によって  $OO$  結合が形成される可能性について指摘した。

また、活性中心のコンフォメーション自由度を取り込んだ、自由エネルギーでの議論を行えるように、計算プログラムを整備している。それにより、これまでの膨大な実験結果とより対応させることが可能となり、PSII の酸素発生機構が急速に明確になると期待される。

## (2) 宇宙空間におけるヒダントイン及びアミノ酸生成機構の解明

宇宙空間におけるアミノ酸の生成機構に関しては、様々な反応経路が提唱されているが、本研究では、Bücherer-Bergs 反応によりアミノアセトニトリルからヒダントインが生成し、ヒダントインが加水分解されることで、最も単純な構造を持つアミノ酸であるグリシンが生成する経路（図 1）を、量子化学計算を用いて解析した。アミノアセトニトリルは星間雲で観測されており、また、ヒダントインも隕石から検出されているなど、どちらも宇宙化学において重要な分子である。

密度汎関数法（DFT、Density Functional Theory）を用い、汎関数は B3LYP、基底関数は 6-31G\*として計算を行った。星間ダスト上の氷表面の影響を検証する為、触媒として働く水分子がない場合と 1 個、さらに 2 個存在する場合について、反応障壁の高さを比較した。

図 2 に、水分子なしの場合と水分子を一つ考慮した場合の反応エネルギープロファイルを示した。今回検証した反応経路における 9 つの遷移状態の中で、最も反応障壁が高い反応は、触媒となる水分子なし及び一個を考慮した場合で、それぞれ  $71.5 \text{ kcal mol}^{-1}$  及び  $56.1 \text{ kcal mol}^{-1}$  となり、水分子を考慮することで、 $15 \text{ kcal mol}^{-1}$  反応障壁が減少した。

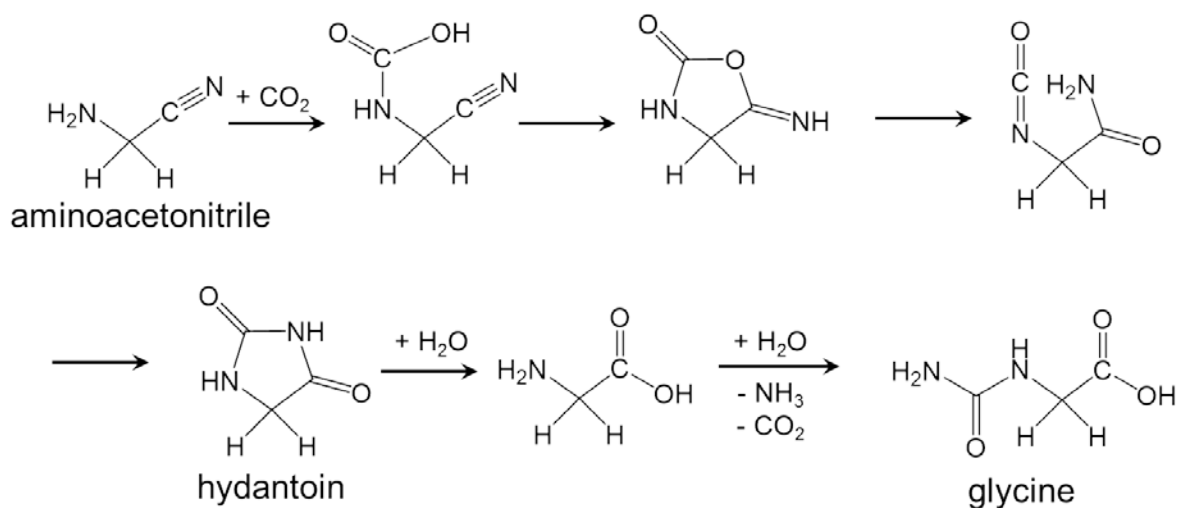


図1 ヒダントインを経由するグリシン生成経路

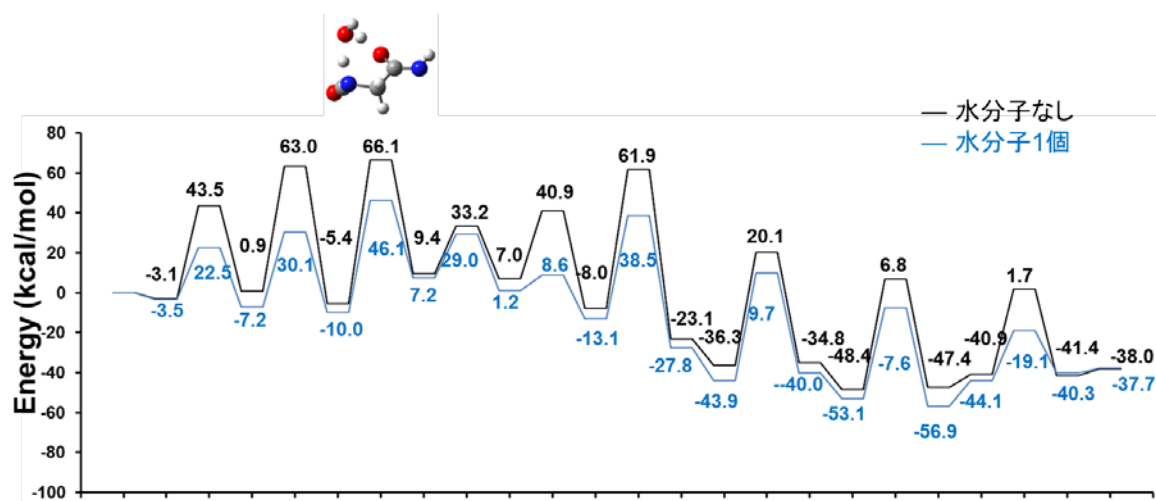


図2 ヒダントインを経由するグリシン生成経路の反応エネルギープロファイル

さらに、触媒となる水分子を2個に増やした場合では、障壁は  $46.9 \text{ kcal mol}^{-1}$  にまで減少した。このことから、本反応において、触媒となる水分子の重要性、即ち、星間ダスト上の氷表面の重要性が示された。しかし、反応障壁は依然として高いことから、更なる解析を進めている。

### (3) 分子動力学シミュレーションによる細菌の細胞分裂タンパク質の動的秩序解析

細菌の細胞分裂タンパク質 FtsZ は、図3に示す様に細胞膜の内側にリング状のフィラメント (Zリング) を形成し、ダイナミックに離合集散を繰り返すことで細胞膜に陥入を生じさせる。この細胞膜の陥入はZリングの収縮により起きると考えられるが、その分子メカニズムには未解明な部分が多い。平成28年度は、立命館大学・松村教授の研

究グループが X 線構造解析により決定した黄色ブドウ球菌 FtsZ の結晶構造をもとに、全原子の分子動力学シミュレーションを実行し、細菌の細胞分裂タンパク質の動的秩序解析を行った。大変興味深いことに、X 線結晶構造解析から同一結晶中に立体構造が大きく異なる FtsZ が 2 状態(T-状態と R-状態)存在していることが分かった。同一種で状態の異なる 2 構造が得られた例はこれまでになく大変貴重な実験結果であるため、T-R 状態間の構造遷移経路の探索を行い細胞分裂タンパク質の動的秩序過程の解析を行った。一般的に、生体機能に関係する大規模な構造遷移を分子動力学シミュレーションにより再現するためには、極めて長時間のシミュレーション時間が必要になる。この問題に対して、出来るだけ短時間かつ効率的に重要な構造変化を再現するためには、何らかの構造サンプリング手法を適用する必要がある。本研究では、研究室で開発しているタンパク質の構造サンプリング法の中から、レアイベントを効率的に計算機上に再現することが出来る「カスケード型超並列シミュレーション」を適用し、同一結晶中の 2 状態構造間の構造遷移経路を探索した。

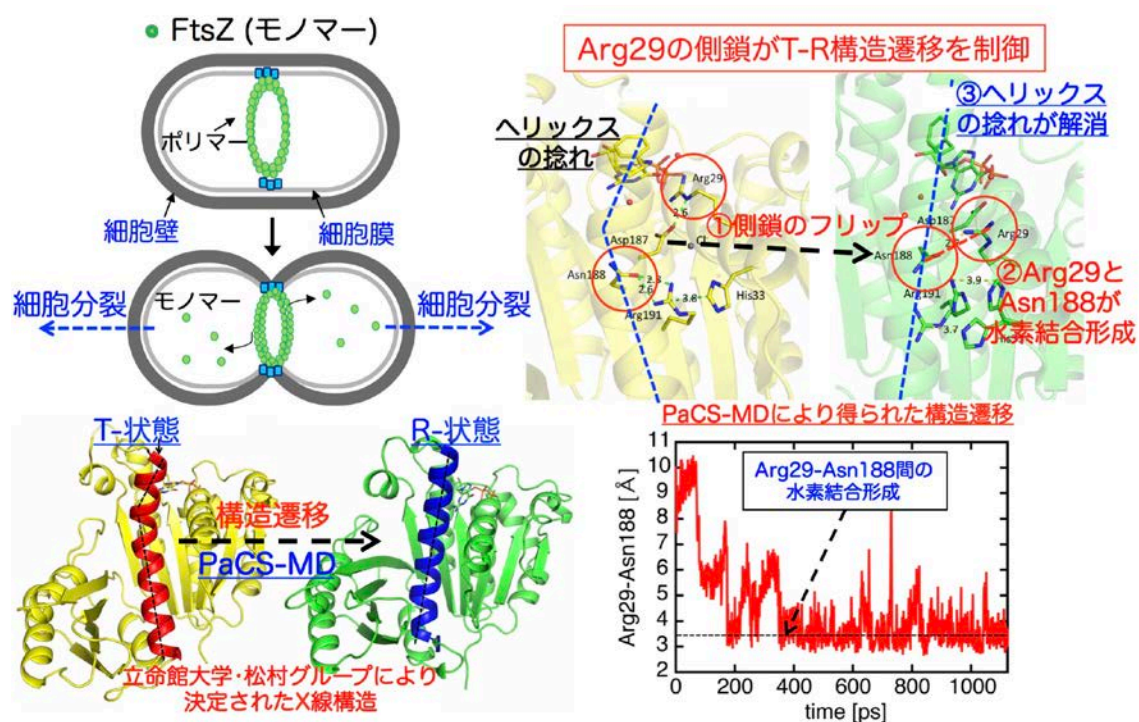


図 3: 黄色ブドウ球菌由来の FtsZ モノマーの状態遷移メカニズム

我々の研究室で開発しているレアイベント探索法である PaCS-MD により得られた遷移経路を解析したところ、状態遷移における重要なアミノ酸残基のメカニズムを突き止めることができた。具体的には、29 番目のアルギニン残基に注目したところ、側鎖のフリップがスイッチとなり状態遷移を制御していることが明らかになった。図 3 に示す



様に、Arg29 の側鎖がフリップすることで Asn188 の側鎖と水素結合を形成し、FtsZ 中央に存在しているヘリックスが捩れた構造から捩れが解消された直線的な形状に構造遷移するメカニズム解明した。また、PaCS-MD により抽出した Arg29-Asn188 の水素結合距離の時系列データ(図 3・右下)から、T-R 状態遷移に伴い Arg29-Asn188 間に水素結合が形成されていることが分かる。更に、FtsZ モノマーは 2 構造間の構造遷移において基質である GDP を段階的に認識・解除していることを解明し、中間体構造を経て多段階に状態遷移していることも突き止めた。

#### (4) 紫外線損傷 DNA におけるフリッピング機構の理論的研究

DNA は紫外線によって損傷を受けることが知られている。そして、受けた損傷が修復されないで DNA の転写や複製の障害、植物の静緒障害などの原因となる。生物はこの損傷を修復する機能を有する光回復酵素 (PHR) という酵素を保有している。PHR は紫外線損傷 DNA を認識して結合し、光誘起電子移動反応によって修復する。紫外線損傷 DNA において PHR と結合するために、損傷部位が二重らせん構造から外れるフリッピングと呼ばれる現象が起こることが X 線結晶構造解析により明らかになった。しかし、フリッピングがどの段階で生じているかについては明らかではない。

本研究では、フリッピングが DNA が損傷した際に起こっているのか蛋白質との相互作用によって起こっているのかを明らかにするために分子動力学 (MD) 計算と量子化学計算を用いて、その反応機構を調べた。MD 計算の結果、DNA 単体ではフリッピングは生じなかった。さらに、損傷部位と核酸間の相互作用エネルギーを量子化学計算によって見積もった結果、損傷部位と隣接する核酸間の相互作用エネルギーが  $< -10 \text{ kcal mol}^{-1}$  であった。以上のことから紫外線損傷部位は隣接する核酸と強く相互作用しており、DNA 単体ではフリッピングは生じず、フリッピングを起こすためには外部からの力が必要であることを明らかにした。本研究結果は、Biophysics and Physicobiology に採択された。

### [3] . 教育

#### 【講義】

重田育照、計算物理学 2、物理学類専門科目、春 ABC

重田育照、計算物理学 3、物理学類専門科目、秋 ABC

庄司光男、生物物理科学、物理学類専門科目、春 ABC

#### 【卒業研究発表】

木間塚政人、「分子動力学法を用いた不凍蛋白質-水分子間相互作用解析」

山崎笙太郎、「シアン耐性酸化酵素における反応機構についての理論的研究」  
石井優輝、「FtsZ 繊維の構造変化についての分子動力学解析」

【博士論文発表】

前川慎太郎、「First-Principles Studies on Physical Properties of Optical Materials and Biomaterials

【4】. 受賞、外部資金、知的財産権等

【受賞】

原田隆平、若手招待講演賞、第54回日本生物物理学会、2016年11月26日

佐藤皓允、学生発表賞、第54回日本生物物理学会、2016年11月27日

【外部資金】

(1) 研究代表者

1. 新学術領域研究「複合光応答」計画研究、重田育照（代表者）（平成26～30年度）「実験と理論の協奏的アプローチによる多重スピン励起子変換制御」
2. 基盤研究C：庄司光男（代表者）（平成26年～28年度）「トレオニン合成酵素の全反応機構の理論的解明」
3. 若手研究（A）：原田隆平（研究代表者）（平成28年～30年度）「Gタンパク質共役受容体におけるシグナル伝達機構の解明」

(2) 分担

1. 挑戦的萌芽研究：重田育照（分担者）（代表者：岡野泰則 大阪大学教授）（平成27～28年度）「メゾスケール空間内移動速度論創成のための挑戦的研究」
2. 特別推進研究：庄司光男（分担者）（代表者：沈建仁 岡山大学教授）（平成24～28年度）「光合成系IIにおける水分解反応の学理解明」

【知的財産権】

1. [国際特許] 特許名: Information Processing Apparatus and Simulation Method, 発明者: Tomotake Nakamura, Ryuhei Harada, Yasuteru Shigeta, 出願日: 2016年8月4日, 特許庁: US(米国), 申請番号: 15/228,540
2. [国際特許] 特許名: Information Processing Apparatus and Index Dimension Extracting Method, 発明者: Tomotake Nakamura, Ryuhei Harada, Yasuteru Shigeta, 出願日: 2016年8月4日, 特許庁: US(米国), 申請番号: 15/228,873

## 【5】． 研究業績

### 【査読付き論文】

1. J. Fujita, R. Harada, Y. Maeda, Y. Saito, E. Mizohata, T. Inoue, Y. Shigeta, H. Matsumura, "Identification of the key interactions in structural transition pathway of FtsZ from *Staphylococcus aureus*", *J. Struct. Biol.* **198**, 65-73 (2017).
2. Y. Kitagawa, M. Asaoka, Y. Natori, K. Miyagi, R. Teramoto, T. Matsui, Y. Shigeta, M. Okumura, M. Nakano, "Theoretical study on relationship between spin structure and electron conductivity of one-dimensional tri-nickel (II) complex", *Polyhedron*, in press (2017).
3. W. Naito, N. Yasuda, T. Morimoto, Y. Shigeta, H. Takaya, I. Hisaki, H. Maeda, "Doubly N-Methylated Porphyrinoids", *Org. Lett.*, **18**, 3006-3009 (2016).
4. S. Maekawa, M. Krzysztof, Y. Shigeta, "Refractive Indices of Organo-Metallic and -Metalloid Compounds: A Long-Range Corrected DFT Study ", *J. Comp. Chem.* **37**(32), 2759-2769 (2016).
5. S. Negoro, Y. Kawashima, N. Shibata, T. Kobayashi, T. Baba, Y.-H. Lee, K. Kamiya, Y. Shigeta, K. Nagai, I. Takehara, D.-I. Kato, M. Takeo, Y. Higuchi, "Mutations affecting the internal equilibrium of the 6-aminohexanoate-dimer hydrolase reactions", *FEBS Lett.*, **590**(18), 3133-3143 (2016).
6. R. Yamakado, S. Sato, Y. Shigeta, H. Maeda, "Ion-Pairing Crystal Polymorphs of Interlocked [2+1]-type Receptor-Anion Complexes", *J. Org. Chem.*, **81**, 8530-8536 (2016).
7. S. Maekawa, R. Sato, K. Hirao, Y. Shigeta, "Solvent effects on excited-state electron transfer rate of pyrene-labeled deoxyuridine: A theoretical study", *Chem. Phys. Lett.*, **644**, 25-30(2016).
8. M. Shoji, H. Isobe, T. Nakajima, K. Yamaguchi, "Large-scale QM/MM calculations of the  $\text{CaMn}_4\text{O}_5$  cluster in the oxygen-evolving complex of photosystem II: comparisons with EXAFS structures", *Chem. Phys. Lett.*, 658, 354-363 (2016).
9. Y. Abe, M. Shoji, Y. Nishiya, H. Aiba, T. Kishimoto, K. Kitaura, "Reaction mechanism of sarcosine oxidase elucidated using FMO and QM/MM methods", *Phys. Chem. Chem. Phys.*, **19**, 9811-9822 (2017).
10. W. Tanaka, M. Shoji, F. Tomoiike, Y. Ujiie, K. Hanaoka, R. Harada, M. Kayanuma, K. Kamiya, T. Ishida, R. Masui, S. Kuramitsu, Y. Shigeta, "Molecular Mechanisms of Substrate Specificities of Uridine-Cytidine Kinase", *Biophys. Physico.*, **13**, 77-84 (2016).
11. R. Hadara, Y. Takano, Y. Shigeta, "TaBoo SeArch(TBSA) algorithm with a modified inverse histogram for reproducing biologically relevant rare-events of proteins", *J. Chem. Theoret. Comp.*, **12**, 2436-2445 (2016).
12. R. Harada, T. Nakamura, Y. Shigeta, "A Fast Convergent Simulated Annealing Algorithm for Protein-Folding: Simulated Annealing Outlier FLOODing (SA-OFLOOD) Method", *Bull. Chem.*

*Soc. Jpn.*, **89** (11), 1361-1367 (Cover).

13. R. Harada, Y. Shigeta, "Efficient Conformational Search Based on the Structural Dissimilarity Sampling: Applications to Reproductions of Structural Transitions in Maltodextrin Binding Protein", *J. Chem. Theoret. Comp.*, **13**(3), 1411-1423(2017).
14. R. Harada, Y. Takano, Y. Shigeta, "Common Folding Processes of the Fast-Folding Proteins: Partial Formations of Secondary Structures Initiate the Immediate Protein Folding", *J. Comp. Chem.* **38** (Front Cover), 790-797(2017).
15. R. Harada, Y. Shigeta, "How does the number of initial structures affect the conformational sampling efficiency and quality in Parallel Cascade Selection Molecular Dynamics (PaCS-MD)?", *Chem. Lett.*, **46**, 862-865 (2017)
16. R. Sato, H. Kito-Nishioka, T. Yanai and Y. Shigeta., "Theoretical Analyses on Triplet-triplet Annihilation Process of 9,10-diphenylanthracene in Solution", *Chem. Lett.*, **46** (2017).
17. R. Sato, R. Harada and Y. Shigeta., "Theoretical analyses on a flipping mechanism of UV-induced DNA damage", *Biophys. Physico.*, **13**, 311-319 (2016).
18. R. Yamakado, R. Sato, Y. Shigeta and H. Maeda, "Ion-Pairing Crystal Polymorphs of Interlocked [2+1]-Type Receptor-Anion Complexes", *J. Org Chem.*, **81**, 8530-8536 (2016).
19. R. Yamakado, Y. Ashida, R. Sato, Y. Shigeta, N. Yasuda and H. Maeda, "Cooperatively Interlocked [2+1]-Type  $\pi$ -system-Anion Complexes", *Chem. Eur. J.*, **23**, 4160-4168 (2017).

## 【国際会議発表】

### 1. 招待講演

1. Y. Shigeta, "A consistent scheme for accurately estimating acid dissociation constant ( $pK_a$ ) and redox potential"(Invited), *Fourth Changsha International Workshop on Theoretical and Computational Chemistry with Materials 2016*, June 10th-12th, Hunan, China.
2. M. Shoji, H. Isobe, K. Yamaguchi, "Reaction mechanisms for the S2 to S3 transition in the oxygen-evolving complex of photosystem II" (Invited), *AWEST 2016*, June 19-21, Awaji island, Hyogo, Japan.
3. Y. Shigeta, "Simple conformational search methods for understanding biological functions" (Invited), *Shanghai Workshop on Frontiers in Molecular Biophysics*, Jul. 23<sup>th</sup>-26<sup>th</sup> 2016, Shanghai, China.
4. Y. Shigeta, "Efficient Conformational Search Methods for Protein Folding Problems" (Invited), *The 9th Congress of the International Society for Theoretical Chemical Physics (ISTCP 2016)*, Jul. 17<sup>th</sup>-22<sup>nd</sup> 2016, Grand Forks, North Dakota, USA.

5. M. Shoji, H. Isobe, J.-R. Shen, K. Yamaguchi, Y. Shigeta, Y. Takano, "Electronic structures of the synthetic model of the photosynthetic oxygen-evolving complex" (poster, **Invited**), *VUVX satellite workshop*, Jul. 1<sup>st</sup> 2016, University of Zurich, Zurich, Switzerland.
6. R. Harada, Y. Shigeta, "Developments of Efficient Conformational Sampling Methods for Reproducing Biologically Rare Events" (**invited**), *The 54<sup>th</sup> Annual Meeting of Biophysical Society of Japan*, Nov. 25<sup>th</sup> 2016, Tsukuba, Japan.

## 2. 一般講演

1. S. Maekawa, M. Krzysztof, Y. Shigeta, "Refractive Indices of Organo-Metallic and -Metalloid Compounds: A Long-Range Corrected DFT Study" (**Oral**), *Asian Photochemistry Conference*, Dec. 4<sup>th</sup>-8<sup>th</sup> 2016, Singapore.
2. Y. Shigeta, K. Kamiya, T. Sugimura, "Intramolecular Stereodynamic Effects on Ketene-Olefin [2 + 2] Cycloadditions of 2,4-Pentanediol Tether" (**Poster**), *Stereodynamics 2016*, Nov. 6<sup>th</sup>-11<sup>th</sup> 2016, Taipei, Taiwan.
3. K. Kamada, Y. Kitagawa, R. Kishi, M. Nakano, R. Sato, Y. Shigeta, "Control of multiple spin exciton states by synergetic studies of theory and experiment" (**Oral**), *1st International Symposium on Photosynergetics*, June 2nd-4th 2016, Osaka, Japan.
4. M. Shoji, "A quantum chemical study of the glycine formation reactions in interstellar medium" (Oral), *ABC workshop*, Mar. 21-23 2017, Hiroshima, Japan.
5. M. Shoji, H. Isobe, K. Yamaguchi, "Large-Scale QM/MM study on the oxygen-evolving complex of photosystem II" (poster), *79<sup>th</sup> Harden Conference*, Apr. 16<sup>th</sup>-20<sup>th</sup> 2016, Innsbruck, Austria.
6. R. Sato, K. Kamada, R. Kishi, Y. Kitagawa, M. Nakano, Y. Shigeta, "Theoretical Studies on Photon-upconversion of 9,10-Diphenylanthracene Derivatives via Triplet-triplet Annihilation Mechanism in Solvent" (**Poster**), *Asian Photochemistry Conference*, Dec. 4<sup>th</sup>-8<sup>th</sup> 2016, Singapore.
7. R. Sato, R. Harada, Y. Shigeta, "On the Flipping-out mechanism of the UV-induced DNA damage", (**Poster**), *The 54<sup>th</sup> Annual Meeting of Biophysical Society of Japan*, Nov. 27<sup>th</sup> 2016, Tsukuba, Japan
8. R. Sato, K. Kamada, Y. Kitagawa, M. Nakano, Y. Shigeta, "Theoretical Analysis of Triplet-Triplet Annihilation Based Photon Up-Conversion Mechanism in Solvent" (**Poster**), *1st International Symposium on Photosynergetics*, June 2nd-4th 2016, Osaka, Japan.
9. K. Kidachi, Y. Komatsu, Y. A. Sato, M. Kayanuma, M. Shoji, Y. Shigeta, Y. Aikawa, M. Umemura, "A theoretical study of glycine formation reactions in interstellar medium" (poster),

*the 57th Sanibel Symposium*, Feb. 19<sup>th</sup>-24<sup>th</sup> 2017, Georgia, USA.

10. Bui My *et al.* (**Poster**), *The 57th Sanibel Symposium*, Feb. 19<sup>th</sup>-24<sup>th</sup> 2017, Georgia, USA.
11. Bui My *et al.* (**Poster**), *The 77th Okazaki Conference Series: International Symposium on Ultrafast Dynamics in Molecular and Material Sciences*, Mar. 6<sup>th</sup>-8<sup>th</sup> Okazaki, Japan.
12. H. Kitoh-Nishioka and Y. Shigeta, "Singlet Fission Couplings Calculated with Complete-Active-Space Self-Consistent Field (CASSCF) Theory" (**Poster**) *The 57th Sanibel Symposium*, Feb. 19<sup>th</sup>-24<sup>th</sup> 2017, Georgia, USA.
- A. Sato, "Ly alpha Irradiation in the Early Phase Milky Way Galaxy Responsible for Initiating Homochirality" (**Oral**), *Formation of the Solar System and the Origin of Life*, Feb. 20<sup>th</sup>-24<sup>th</sup> 2017, Leiden, Netherland.

## 【国内学会・研究会発表】

### 1. 招待講演

1. 庄司光男、「光合成酸素発生中心の電子・スピン状態の理論解析」(招待講演), SEST2016, 2016年11月11日、大阪市立大学.
2. 重田育照、「理論計算によるタンパク質の機能解析と制御：最近の進展」、分子研理論・計算領域セミナー、May 19<sup>th</sup> 2016、分子科学研究所、岡崎、愛知.

### 2. その他の発表

1. 庄司光男、磯部寛、山口兆「光化学系 II 酸素発生中心(PSII-OEC)における S2-S3 状態変化についての理論的研究」(**ポスター**)、第89回日本生化学会大会、2016年9月26日、東北大学、仙台.
2. 庄司光男、「星間ダスト上でのアミノ酸生成機構についての理論的研究」(口頭)、宇宙生命計算科学連携拠点第2回ワークショップ、2016年4月27日~28日、筑波大学.
3. 栢沼愛、「星間空間におけるアミノ酸生成反応の第一原理計算」、ポスト「京」萌芽的課題・計算惑星第1回公開シンポジウム:惑星の起源・進化と環境変動の解明を目指して、2017年3月6日、神戸大学.
4. 原田隆平、重田育照、「カスケード型分子動力学計算によるタンパク質の折りたたみ過程解析」(口頭)、第43回生体分子化学討論会、2016年5月24日~25日、名古屋.
5. 原田隆平、鷹野優、重田育照、「Universality of protein folding investigated by a rare-event search method」(**ポスター**)、第16回蛋白質科学会、2016年5月7日~9日、福岡.
6. 佐藤竜馬、鎌田賢司、岸 亮平、中野雅由、重田育照、「溶媒中における三重項-三重項消滅に基づくフォトン・アップコンバージョン機構に関する研究」、第19回理論化

学討論会、2016年5月23日～25日.

7. 佐藤竜馬、鎌田賢司、岸 亮平、北河康隆、中野雅由、重田育照、「A Theoretical Studies on Up-conversion Mechanism via Triplet-Triplet Annihilation in Solution」、*TIA”かけはし”*ポスター交流会、2016年8月30日.
8. 佐藤竜馬、鎌田賢司、岸 亮平、北河康隆、中野雅由、重田育照、「三重項-三重項消滅に基づくフォトン・アップコンバージョン機構に関する理論的研究」、*第10回分子科学討論会*、2016年9月13日～15日.
9. 佐藤竜馬、原田隆平、重田育照、「紫外線損傷 DNA における Flipping 機構」、*第54回日本生物物理学会年会*、2016年11月25日～27日.
10. 佐藤竜馬、重田育照、「9,10-ジフェニルアントラセンおよびその誘導体に対する三重項-三重項消滅に基づくフォトン・アップコンバージョン機構の理論的研究」、*高次複合応答分子システムの開拓と学理の構築 第5回公開シンポジウム・第5回若手セミナー*、2017年1月20日～21日
11. 佐藤皓允、「星間空間における円偏光吸収反応による L 型アミノ酸過剰生成の計算科学的検証」、*宇宙生命計算科学連携拠点第2回ワークショップ*、2016年4月27日～28日、筑波大学.
12. 鬼頭(西岡)宏任、「有機半導体のエキシトン/キャリア輸送現象の理論解析」(ポスター)、*学際大規模情報基盤共同利用・共同研究拠点 (JHPCN) 第8回シンポジウム*、会場: THE GRAND HALL (品川)、2016年7月14日～15日.
13. 鬼頭(西岡)宏任、「Studies on Charge Transfers in Bio-system and Organic Semiconductor by Using Fragment Molecular Orbital Methods」、*TIA”かけはし”*ポスター交流会、2016年8月30日.
14. 鬼頭(西岡)宏任、重田育照、「有機ナノ結晶における励起状態ダイナミクスの理論研究」(ポスター)、*第10回分子科学討論会*、2016年9月13日～15日.

#### 【著書、解説記事等】

1. 原田隆平、最近の研究から「カスケード型超並列シミュレーションに基づく遷移経路探索法」、*分子シミュレーション研究会誌「アンサンブル」*, **18**, 159-167(2016).
2. 松井亨、喜屋武茜、庄司光男、重田育照、「プロトンの水和自由エネルギー：酸解離定数および標準水素電極電位の高精度計算」、*量子水素の科学（特集号）*、*日本コンピュータ化学会誌 (invited review)*、**15**(5)、184-191 (2016).

## 【6】． シンポジウム、研究会、スクール等の開催実績

1. 重田育照、第 77 回岡崎コンファレンス「Ultrafast dynamics in Molecular Science and Material Science」、牛山浩、重田育照、高橋聡、藤井幹也、山下雄史、斉藤真司、Mar 6<sup>th</sup>-8<sup>th</sup> 2017, 岡崎コンファレンスセンター.

## 【7】． 社会貢献・国際貢献

### 【集中講義】

1. 重田育照、「量子化学に基づく化学反応理論」“大学院講義”、愛媛大学大学院医系研究科. (2016 後期)
2. 重田育照、「量子化学に基づく化学反応理論」“大学院講義”、 東京大学大学院工学系研究科. (2016 後期)
3. 重田育照、「量子化学に基づく化学反応理論」“大学院講義”、九州大学大学院理学研究科.(2016 前期)

### 【その他】

1. Yasuteru Shigeta、Outstanding Reviewers for Physical Chemistry Chemical Physics in 2016. Royal Chemical Society (2016).  
Royal Chemical Society の発刊している「Physical Chemistry Chemical Physics」において、数多くの査読を行い、2016 年度の Outstanding Reviewers として PCCP 誌に掲載された (*Phys. Chem. Chem. Phys.* 2017, **19**, 8140)

## 【8】． その他

とくになし



## IX-1. 磁性物性グループ

准教授 小野田 雅重

大学院生 8 名 (数理物質科学研究科 前期課程 8 名)

卒研究生 なし

遷移金属化合物における相関電子系 (新型超伝導, 金属 - 非金属転移など), 量子スピン系 (低次元系, 幾何学的競合系など) ならびに機能性物質系 (2 次電池, 固体電解質, 熱電変換など) を対象とした, 結晶構造と巨視的・微視的物性の包括的理解.

この報告書では, 本グループによる「バナジウムセラミックス系」「バナジウムポリアニオン系」などの研究状況を簡潔に整理する. 2016 年度, 本グループが対象とした物質群を図 1 に示す.

### 【1】バナジウムセラミックス系

#### (1) 金属-絶縁体転移系および熱電変換系

バナジウムブロンズ  $M_xV_2O_5$  に関し, 特に金属-非金属転移機構および熱電変換系の見地から研究を進めている (学位論文 3; 学会発表 2, 6; 特許出願 2; 継続)

#### (2) 量子スピン系

幾何学的競合系として, スピネル格子, 三角格子, トレリス格子などを対象に研究を進めている. 本年度は 2 重トレリス格子を有する  $\epsilon-Cu_xV_2O_5$  などを対象とした (学会発表 3, 7; 継続)

#### (3) 2 次電池正極活物質系

$Cu_xV_4O_{11}$  系 ( $\alpha$  相;  $2 \leq x \leq 2.33$ ) は, その結晶構造および物性の特異性に基づいて, 2006 年に多機能性複合結晶として発表した研究室オリジナルの物質系で, リチウム 2 次電池正極活物質であり熱電変換材料である. 本年度は, 本系からソフト化学的手法により Cu を部分的に脱離した相 ( $\beta$  相;  $1.2 \leq x < 2$ ) の超格子構造と物性機構を確立するとともに,  $\beta-Cu_xV_4O_{11}$  が, 2 V 以上の領域において, バナジウムセラミックス系で最大の  $C \approx 300 \text{ A h kg}^{-1}$  の高容量正極活物質であることを実証した. 並行して, 高容量性を示すリチウム 2 次電池正極活物質  $Li_xV_3O_8$  系および  $Li_xV_2O_5$  系の研究も進めている (論文 2; 特許出願 1; 継続)

#### (4) 固体電解質系

機能性物質系の一つである 2 次イオン電池の性能向上に関しては, バナジウムセラミックス (前述) およびポリアニオン系 (後述) を対象とした高容量正極活物質の開発を進めている. 一方で, 可燃性の有機溶媒系電解質に代わりうる固体電解質への期待が高まっており, 室温で  $10^{-3} \Omega^{-1} \text{ cm}^{-1}$  を超えるイオン伝導率を持つ酸化物, 硫化物などの無機リチウム高速イオン伝導材料や代表的錯体水素化物  $LiBH_4$  などが候補として挙げられている.

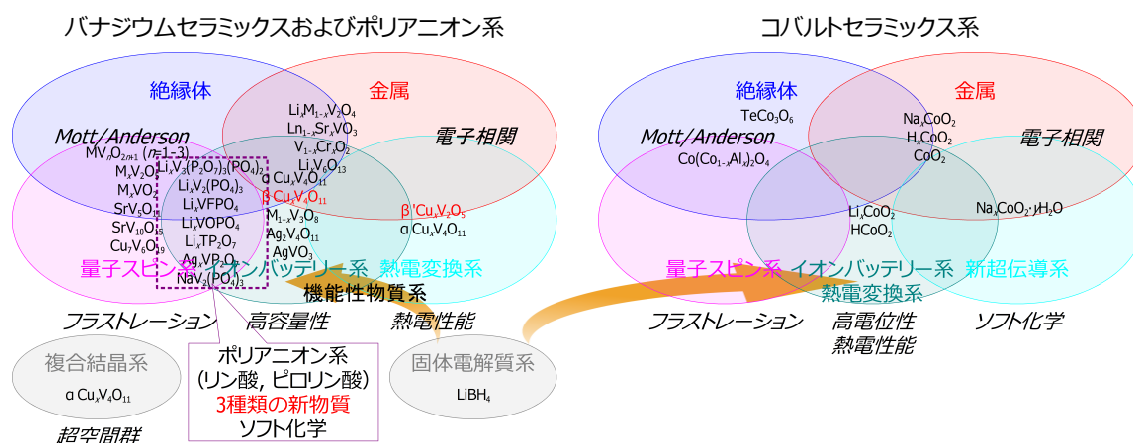


図 1: 2016 年度，本グループが研究対象としたバナジウムセラミックス系，ポリアニオン系ならびにコバルトセラミックス系の物質群．

現在，リチウム 2 次電池の固体電解質として，低い粒界抵抗，高い電気化学的安定性，金属電極に対する低い分極性などの利点を持つ  $\text{LiBH}_4$  および関連系を対象とした研究を進めている（産学連携；継続）

## 【2】バナジウムポリアニオン系

2 次電池正極性能を示す物質系として，2010 年度より，ポリアニオン系を対象とした研究を開始した．実用的目標は充放電のサイクル特性向上と高容量化である．過放電試料は，一般に  $\text{V}^{2+}$  あるいは  $\text{V}^{3+}$  のみからなる高密度電子系に対応し，量子スピン系あるいは相関電子系における物質探索の観点からも大変興味深い．充放電組成は一般の固相反応では得がたいので，その結晶構造および物性を多角的に追究した例はほとんどない．

本研究室で発明された次世代 2 次電池正極材料  $\text{Li}_9\text{V}_3(\text{P}_2\text{O}_7)_3(\text{PO}_4)_2$  の初充電は 2 電子反応を示し，電位 3 V 以上の領域において  $C \approx 170 \text{ A h kg}^{-1}$  を与える．この値は，実用化が検討されている単斜晶  $\text{Li}_x\text{V}_2(\text{PO}_4)_3$  あるいはタボライト型  $\text{LiVFPO}_4$  の容量に匹敵する．

### (1) $\text{Li}_x\text{V}_3(\text{P}_2\text{O}_7)_3(\text{PO}_4)_2$ ( $3 \leq x < 12$ )

$\text{Li}_9\text{V}_3(\text{P}_2\text{O}_7)_3(\text{PO}_4)_2$  の充放電過程は，それぞれ  $\text{V}_3\text{P}_8\text{O}_{29}$  当り 3 モル以上の Li 脱離および 3 モル程度の Li 挿入に対応する．これまでに母物質および充電・放電組成の精密構造，Li の拡散経路，V イオンの中間的結晶場，ならびに Li 脱離相における磁気秩序を明らかにしてきた．本年度は， $\text{Li}_9\text{V}_3(\text{P}_2\text{O}_7)_3(\text{PO}_4)_2$  の充放電特性改良のため，昨年度に引き続き，P-S および P-Si 置換系の作製を行い一定の成果を得た．

### (2) タボライト型 $\text{Li}_x\text{VFPO}_4$ ( $0 \leq x \leq 2$ )， $\text{Li}_x\text{VOPO}_4$ ( $\alpha: 0.9 < x \leq 1$ ， $\beta: 0 \leq x \leq 2$ )

タボライト型  $\text{LiVOPO}_4$  には 3 斜晶  $\alpha$  相と直方晶  $\beta$  相が存在し，それぞれ高温，低温合成で得られる． $\alpha$  相は高温で 1 次元磁性を示し，10 K で一種のスピンパイエルス状態に転移する．また 1 次元常磁性状態とスピンパイエルス状態の間にスピン 2 量体のゆらぎが存在する．充放電容量は約  $20 \text{ A h kg}^{-1}$  である．一方， $\beta$  相においては，全温度領域で 1 次元反強

磁性鎖磁性を示し、 $150 \text{ A h kg}^{-1}$  の充放電容量を持つ。現在、 $\beta$  相の微視的研究を進めている。

$\text{LiVFPO}_4$  は、 $\text{V-F-V}$  の超交換相互作用を介した 1 次元反強磁性鎖磁性を示し、 $\text{V-O-P-O-V}$  の鎖間相互作用により  $T_N = 10 \text{ K}$  で反強磁性状態に転移する。 $T_N$  近傍の  $^7\text{Li}$  核 NMR に基づくスピンドYNAMIX は、反強磁性的スピンゆらぎの臨界発散から、1 軸型磁気異方性による指数関数的振る舞いへのクロスオーバーとして特徴づけられる。現在、 $x \neq 1$  に対する磁気秩序およびスピンドYNAMIX を検討している（論文 1；学会発表 1, 4, 5；継続）

### (3) $\text{Li}_x\text{V}_2(\text{PO}_4)_3$ ( $0 < x \leq 3$ )

バナジウムポリアニオン系で最大の電気容量を持つ  $\text{Li}_x\text{V}_2(\text{PO}_4)_3$  に対して P-S および P-Si 置換系の作製を行っている（継続）

### (4) 新型 Na 含有ポリアニオン系

Na 含有ポリアニオン系の代表的物質である NASICON 型  $\text{Na}_x\text{V}_2(\text{PO}_4)_3$  は、 $\text{V-O-P-O-V}$  経路の超交換相互作用を考えると、3 次元的に強く結合した蜂巢格子を持つ。約 9 K での帯磁率の極大が、蜂巢格子間で結合した  $\text{V}^{3+}$  のスピン 1 重項 2 量体に基づいて説明でき、また反強磁性状態 ( $T_N = 4 \text{ K}$ ) 周辺のスピンドYNAMIX が  $\text{LiVFPO}_4$  の場合と類似の機構で理解できた。

本年度は、ナトリウム 2 次電池への応用も念頭に入れて新物質  $\text{Na}_7\text{V}_3(\text{P}_2\text{O}_7)_4$ ,  $\text{Na}_3\text{V}(\text{PO}_4)_2$  などを作製し、それらの評価を行った（学位論文 1, 2, 4；学会発表 8；継続）

## 【3】コバルトセラミックス系

2 次電池正極の代表である三角格子型  $\text{Li}_x\text{CoO}_2$  系には、組成変化による金属-絶縁体転移現象や量子スピン効果などの問題がある。

これまでに  $\text{Li}_x\text{CoO}_2$  ( $0.5 < x \leq 1$ ) および  $x = 0$  の構造・物性研究を行ってきた。現在、全濃度域における物性解析を進めている（継続）

## 【4】その他の遷移金属化合物系

### (1) ペロブスカイト格子 $\text{SrTiO}_3$ および関連系 $\text{BaTiO}_3$ , $\text{Sr}_2\text{TiO}_4$

熱電変換材料の開発を念頭に、これまでにペロブスカイト型セラミックス  $\text{SrTiO}_{3-\delta/2}$  系などの輸送機構を検討してきた。現在は、 $\text{BaTiO}_3$  の最高安定相である六方晶型  $\text{BaTiO}_{3-\delta/2}$  およびペロブスカイト関連格子  $\text{Sr}_2\text{TiO}_4$  の結晶構造と電子状態に関して、広い酸素濃度領域にわたって検討を行っている（保留）

### (2) 三角格子 $\text{Li}_x\text{NiO}_2$

幾何学的フラストレーション効果、2 次電池などの観点から  $\text{LiNiO}_2$  およびその Li 欠損系に注目している。ソフト化学的手法により得られた試料の伝導機構に関しては一定の理解が得られたが、本系の物性理解をさらに進めるため、試料の質を高める工夫を行っている。（保留）

## 〈 論 文 〉

1. 小野田雅重, 機能性バナジウムポリアニオン系の結晶構造と電子状態  
第 19 回超イオン導電体物性研究会講演集 (2016) pp. 67-70.
2. Masashige Onoda and Asato Tamura, Superlattice structures, electronic properties, and spin dynamics of the partially Cu-extracted phase for the composite crystal system  $\text{Cu}_x\text{V}_4\text{O}_{11}$   
Journal of the Physical Society of Japan **86** (2), 024801 [11pp] (2017).

## 〈 学位論文 〉

1. 相川俊, 新型バナジウムポリアニオン  $\text{Na}_7\text{V}_3(\text{P}_2\text{O}_7)_4$  の合成と評価  
数理物質科学研究科修士 (理学) 論文, 2017 年 3 月  
遷移金属ポリアニオン系は次世代 2 次電池正極材料の一つであり, また新しい量子スピン系にもなり得る物質群である. 本研究では, 新しいポリアニオン系として  $\text{Na}_7\text{V}_3(\text{P}_2\text{O}_7)_4$  の合成を行った. リートベルド解析を通じて, 本物質が目的の物質であることを明らかにするとともに, Na イオンの拡散経路を確立することを目標に, 電気抵抗率, 帯磁率測定, ならびに  $^{23}\text{Na}$  MAS-NMR を行った. 電氣的・磁氣的性質から, 本物質の 3d 電子が強く局在していることがわかり, 2 次電池の高電位性との関連を明らかにした. MAS-NMR スペクトルの解析から, Na イオンの不完全な先鋭化が示唆され, これを根拠に本物質の拡散経路を明らかにした.
2. 川原井優太, 新型バナジウムポリアニオン  $\text{Na}_3\text{V}(\text{PO}_4)_2$  の合成と評価  
数理物質科学研究科修士 (理学) 論文, 2017 年 3 月  
新しいポリアニオン系としてグラセライト型構造をとる  $\text{Na}_3\text{Fe}(\text{PO}_4)_2$  が報告されたことを受け, 多電子反応型ポリアニオン系の構築を目指して  $\text{Na}_3\text{V}(\text{PO}_4)_2$  の合成を試みた. リートベルド解析を通じて, 本物質がグラセライト型構造をとることを明らかにし, その充放電特性, ソフト化学法による Na 脱離性および磁性を解析した. ソフト化学的には  $\text{NaV}(\text{PO}_4)_2$  相を確認できたが, 電気化学的には  $\text{Na}_{2.4}\text{V}(\text{PO}_4)_2$  までの充放電に留まった. 一方, 本系は V-O-P-O-V の超交換相互作用経路を介した  $S = 1$  の三角格子系であり, 8 K 近傍で反強磁性状態に転移することを明らかにした.
3. 佐藤拓磨, バナジウムブロンズ  $\beta'$ - $\text{Cu}_x\text{V}_2\text{O}_5$  の物性と応用  
数理物質科学研究科修士 (理学) 論文, 2017 年 3 月  
 $\beta$  あるいは  $\beta'$  相バナジウムブロンズ  $\text{M}_x\text{V}_2\text{O}_5$  ( $\text{M} = \text{Li}, \text{Na}, \text{Cu} \dots$ ) において, 本研究で対象とする  $\beta'$ - $\text{Cu}_x\text{V}_2\text{O}_5$  は化学式当り 0.24 ~ 0.65 個の Cu イオンをドーピングできる性質があり, 組成に応じた多彩な物性を示す. 本研究では, 特に熱電変換系の可能性を試験するために, 固相反応法を用いて種々の Cu 濃度を持つ単結晶および多結晶試料を作成し, 輸送現象 (電気抵抗率, 熱電能, 熱伝導度) と磁性 (帯磁率, 電子スピン共鳴) を詳細に解析した. その結果, 本系の金属 - 非金属相境界近傍である  $x \simeq 0.4$  の組成において, 室温の無次元熱電性能因子  $zT$  が  $10^{-2}$  を超えることが明らかになった.
4. 平尾亮磨, バナジウムポリアニオン  $\text{Na}_7\text{V}_4(\text{P}_2\text{O}_7)_4\text{PO}_4$  の Na 脱離相の合成と評価  
数理物質科学研究科修士 (理学) 論文, 2017 年 3 月  
本研究は, 新型ポリアニオン系の一つである  $\text{Na}_7\text{V}_4(\text{P}_2\text{O}_7)_4\text{PO}_4$  の Na 脱離相をソフト化学的に合成し, その磁氣的性質および Na イオンの拡散経路を解明することを目的とした. Na 脱離に伴う帯磁率のキュリー定数の減少を,  $\text{V}^{3+}-\text{V}^{4+}$  あるいは  $\text{V}^{3+}-\text{V}^{5+}$  の混合原子価状態を考えることで定性的に説明した. 母物質および Na 脱離相の  $^{23}\text{Na}$  MAS-NMR スペクトルは, 結晶学的に異なる 3 種の Na 席を考慮することで理解できた. また 3 種の NMR スペクトルの相対強度比が Na 脱離量に依存しないことから, すべての Na 席で Na イオンが一樣に脱離することが示唆された.

## 〈 学会発表など 〉

1. 小野田雅重, 機能性バナジウムポリアニオン系の結晶構造と電子状態  
第 19 回超イオン導電体物性研究会 204, 山形テルサ, 山形県山形市, 2016 年 6 月 10 日
2. 佐藤拓磨, 小野田雅重, ジグザグ鎖-梯子格子系  $\beta'$ - $\text{Cu}_x\text{V}_2\text{O}_5$  の磁性と伝導  
日本物理学会 2016 年秋季大会 13aPS27, 金沢大学角間キャンパス, 石川県金沢市, 2016 年 9 月 13 日

3. 大竹尚人, 小野田雅重, 2 重トレリス層系  $\epsilon\text{-Cu}_x\text{V}_2\text{O}_5$  の相転移  
日本物理学会 2016 年秋季大会 13aPS28, 金沢大学角間キャンパス, 石川県金沢市, 2016 年 9 月 13 日
4. 小野田雅重, 石橋剛彦, 金沢浩紀, 機能性バナジウムポリアニオン系の磁気秩序  
日本物理学会 2016 年秋季大会 13aPS29, 金沢大学角間キャンパス, 石川県金沢市, 2016 年 9 月 13 日
5. 石橋剛彦, 佐藤拓磨, ° 小野田雅重, タボライト型  $\text{Li}_x\text{VFPO}_4$  系の結晶構造とスピンドynaミクス IV  
日本物理学会 2016 年秋季大会 13aPS30, 金沢大学角間キャンパス, 石川県金沢市, 2016 年 9 月 13 日
6. 佐藤拓磨, 小野田雅重, バナジウムブロンズ  $\beta'\text{-Cu}_x\text{V}_2\text{O}_5$  の物性と応用  
日本物理学会第 72 回年次大会 17pK-PS1, 大阪大学豊中キャンパス, 大阪府豊中市, 2017 年 3 月 17 日
7. 大竹尚人, 小野田雅重, 2 重トレリス層系  $\epsilon\text{-Cu}_x\text{V}_2\text{O}_5$  の相転移 II  
日本物理学会第 72 回年次大会 17pK-PS2, 大阪大学豊中キャンパス, 大阪府豊中市, 2017 年 3 月 17 日
8. 小野田雅重, 相川俊, 川原井優太, 平尾亮磨, 福沢直也, 新型機能性バナジウムポリアニオン系の結晶構造と磁性  
日本物理学会第 72 回年次大会 17pK-PS3, 大阪大学豊中キャンパス, 大阪府豊中市, 2017 年 3 月 17 日

#### 〈高校生・中学生対象授業, 講演など〉

1. 小野田雅重, 次世代 2 次電池正極材料の開発  
科学技術週間事業-環境・エネルギーのための科学と技術: 体験実験とポスター展, 筑波大学, 茨城県つくば市, 2016 年 4 月 23 日
2. 小野田雅重, 物性実験研究と物質科学 - 物理学の基礎から学際領域研究まで -  
平成 28 年度受験生のための筑波大学説明会, 筑波大学, 茨城県つくば市, 2016 年 8 月 11 日

#### 〈産学連携など〉

1. 小野田雅重,  $\text{LiBH}_4$  系のイオンダイナミクスに関する研究, 2016 年 4 月-2017 年 3 月

#### 〈特許公開・出願〉

1. 小野田雅重, リチウムイオン電池, リチウムイオン電池用の正極部材およびリチウムイオン電池用の正極活物質の製造方法, 特願 2016-252804
2. 小野田雅重, 熱電変換材料, 特願 2017-051258

## IX-2 ナノフォトニクスグループ

准教授 池沢 道男  
講 師 久保 敦  
助 教 富本 慎一  
名誉教授 舛本 泰章  
大学院生 13名  
卒研生 6名

### 【1】0次元半導体の分光研究（池沢道男、舛本泰章）

（1）フォトニック結晶による単一窒素等電子トラップの発光寿命制御（池沢道男、舛本泰章，佐久間芳樹<sup>A</sup>，迫田和彰<sup>A</sup>，杉本喜正<sup>A</sup>，<sup>A</sup>物質・材料研究機構）

2次元フォトニック結晶を用いた微小共振器（Photonic Crystal Cavity, PCC）を単一の等電子トラップの周囲に作製し、パーセル効果を利用した発光寿命の短縮の研究を行った。量子ドットと比べて、エネルギーのそろった等電子トラップでは、再現性良く共振器モードと結合させることができるかと期待される。この手法により発光寿命の大幅な短縮が実現できれば、フーリエ変換限界の単一光子パルスに達する可能性があり、より明瞭な2光子干渉が期待される。

昨年度までに、GaAs:N 中の NN<sub>A</sub> 窒素等電子トラップに共鳴波長を合わせた2次元 PCC 構造を作製し、低温における発光スペクトルに格子定数に依存した波長をもつ鋭いピーク群を観測していた。これらのピーク1つ1つが単一の発光中心に対応していることは、光子相関測定からすでに明らかになっている。このようなピーク群について、時間相関単一光子計数法によって発光寿命を調べたところ、ピーク群の中でも共振器モードの中心に近いものほど寿命が短く、離調の増大とともに発光寿命が長くなっている傾向があることが確認された。同様の傾向は複数のフォトニック結晶共振器で確認されている。これは、パーセル効果による寿命短縮が起こっているという解釈と矛盾しない。最も短い発光寿命は 400 ps 程度であり、共振器構造を持たない希薄な NN<sub>A</sub> 窒素等電子トラップについて観測されていた 5~6 ns という発光寿命に比べて大幅に短縮されている。

また、5K 程度に冷却した PCC 試料の周りに窒素ガスを導入し、PCC に吸着させることによって共振器モードの波長を 2~3 nm だけ長波長シフトさせる手法を用いて、発光中心と共振器モードとの結合の強さを変化させたところ、期待通りの寿命の変化が観測された。これらのことから、単一の窒素発光中心の発光寿命を PCC によるパーセル効果によって制御できたことが確かめられた。

### （2）単一窒素等電子トラップの電荷制御（池沢道男，佐久間芳樹<sup>A</sup>，<sup>A</sup>物質・材料研究機構）

様々な半導体量子ドットについて、量子ドットの電荷状態を印加電圧によって制御する技術が確立しており、正や負の様々な荷電励起子状態が発光スペクトル中に観測されている。量子ドットに類似の系である GaAs:N 中の窒素発光中心では、N が As を置換しているものと考えられ、電子親和力の差に起因して、電子を近距離的な力で引き付けるとされている。このような等電子不純物の電荷状態が量子ドットと同様に制御できるかどうかは基礎と応用両面から興味深い。GaAs 中の窒素発光中心についても、近年、負の荷電励起状態が観測されたという報告があったことから、発光中心の荷電状態の制御が期待できる。

我々は、電荷制御量子ドットに用いられる試料構造を用いて、単一発光中心の電荷制御を試みた。n ドープ層から 100 nm 程度離れた位置に窒素デルタドープ層を形成し、その後に 20 nm の GaAs 層、100 nm の AlGaAs ブロッキング層、20 nm の GaAs 層を成長させ、表面には ITO 透明電極をスパッタ製膜した。裏面はオーミックコンタクトとした。そのような試料について顕微発光スペクトルを観測したところ、印加電圧に依存したピークの出現、消失が観測された。GaAs:N でよく見られる窒素発光中心の発光スペクトルは微細分裂し、それらが互いに垂直な直線偏光を持っている。しかし、この試料構造を用いると、ある電圧下でそのような微細分裂が見られないピークが現れる

ことが分かった。電子や正孔を余計に一つ持つ荷電励起子では、微細分裂が消失することが知られており、今回の観測は、あるバイアス電圧下で荷電励起子状態が形成されていることを表しているのではないかと解釈することができる。今後、試料に磁場を印加する事によって、対応する中性励起子状態のエネルギーや、電荷の正負などについて情報が得られることが期待される。

### (3) 窒素等電子トラップのスピン研究 (池沢道男, 佐久間芳樹<sup>A</sup>, <sup>A</sup>物質・材料研究機構)

これまで、希薄なN等電子トラップのスピン寿命に関する研究はあまり行われて来なかった。この材料は、単一光子源として有用な事から、スピンと光子の変換の観点からも、そのスピン特性を知ることは重要である。そのため、GaAs/AlGaAs量子井戸の中央に窒素デルタドープ層を形成した試料を作製した。このような試料では、GaAs量子井戸の元々の発光はほぼ見られなくなり、窒素由来の発光が支配的になるため、高速に光励起キャリアが等電子トラップに束縛されていると考えられる。量子井戸では重い正孔と軽い正孔の縮退が解けているため、適切な波長による円偏光励起で、スピンの100%揃った電子を励起することが出来、これらが高速に不純物窒素にトラップされる。この発光の円偏光度を調べる事で、スピンの寿命に関する情報が得られる。その結果、低温では200 ps程度のスピン寿命が観測された。他グループからは、似た材料系で、温度上昇とともにスピン寿命が長くなり、1ns超に達したという報告があることから、これらの温度依存性を調べることは興味深い。

### (4) セレン化カドミウムナノプレートの合成と光学測定 (池沢道男)

近年、CdSe, CdS, CdTeなどのカドミウムカルコゲナイドのナノメートルサイズの板状結晶を化学的手法で合成できるようになってきた。これらは原子層レベルでフラットな構造になっており、原子層厚さに対応した離散的な吸収スペクトル変化が見られる。また球形の量子ドットに比べて非常に高速の応答が期待されている。このようなナノプレートを超高速の単一光子発生に利用するために、CdSeナノプレート試料合成と、分離、顕微PL測定を進めた。光学スペクトルからは、合成した試料は6ML厚に良く揃っており、7ML以上の厚さのナノプレートはほぼ存在しておらず、良好な試料が得られていることが分かった。ナノプレートは適当な化学処理を施してスタックを解除した上で基板上にドロップキャストして顕微発光観察を行った。発光寿命には室温においても、溶液中のナノプレートには見られない、300 psを切るような速い減衰成分が観測されており、これらは非発光過程によるものと考えられる。今後、このような非発光過程を抑制しつつ、孤立ナノプレートを観測可能な程度に希薄に分散させる手法の開発が必要である。

## 【2】表面プラズモンダイナミクス・プラズモニクス (久保敦)

### (1) 10 フェムト秒表面プラズモン波束の位相・包絡線形状の空間領域における変化の研究 (久保敦)

光パルスの変形や伝搬速度については多くの議論があり、古くは1914年にBrillouinとSommerfeldにより予測された分散媒質中を伝搬するパルス信号に付随する先駆信号の観測や、最近では負の屈折率を持つメタマテリアル中での負の群速度の実現などの報告がある。波動光学の基本となる均一で等方的な誘電媒質中を伝搬する光パルスの変形に関しては、媒質の2次分散までを考慮した場合の解析解が一般的に知られている。しかし、このような光パルスの伝搬に関する研究においては、その大部分が空間中のある座標に固定された観測点において、「時間領域」における光パルス形状を解析したものであり、パルスの空間形状に関わる「空間領域」の観点から行われた研究は理論・実験とも非常に限定的である。我々は時間分解顕微鏡法を用いることで、金属-誘電体界面を伝搬する10 フェムト秒表面プラズモン (SP) 波束の「空間領域」における波束形状を観察し、光波束の位相

および形状の変化に関する定量的な解析を可能にした。SP 波束の搬送波位相と包絡線形状の変化は、SP 波束が伝搬する導波空間の分散に起因する。そのため、本研究の議論は、一般に分散媒質中を伝搬する光パルスに適用でき、光波束の空間的広がりがある性質について新たな知見を与える。

#### (2) プラズモニック結晶導波路における 10 フェムト秒表面プラズモン波束の伝搬 (久保敦)

SPP の分散関係は導波路構造をナノスケールの精度で人工的に形成することにより様々に変調でき、その結果極端に大きな波数 (スロー・ライト) や負の群速度などの興味深い状態を作り出すことができる。これらの特徴から次世代ナノスケールデバイスへの応用が見込まれており、金属表面に MIM 構造、金属ストライプ構造などを作製することで SPP の伝搬を制御する研究が多く行われている。フォトニック結晶の考え方を応用したプラズモニック結晶では特定の波長帯の SPP に対してバンドギャップを形成すること、プラズモニック結晶中の構造を取り除くことで導波路のようにふるまうこと、バンド端でスローライトが実現すること、等が知られている。本研究ではプラズモニック結晶中に構造を取り除いた領域 (欠陥) を設けることで作製したプラズモニック結晶導波路に SPP を伝搬させ、10 fs パルス対を用いたポンプ-プローブ法に基づく時間分解二光子顕微鏡観察を行い、プラズモニック結晶導波路における SPP 波束のダイナミクスを時間分解イメージングした。なお本研究の試料作製は NIMS 微細加工プラットフォームで行った。

#### (3) 光通信波長 1.55 $\mu\text{m}$ フェムト秒表面プラズモンのダイナミクス (久保敦)

表面プラズモンポラリトン(SPP)を情報伝達の媒体に用いる「プラズモニックデバイス」を実装化するにあたっては、実用化が先行するフォトニックデバイスで用いられる波長域 (光通信波長帯:  $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ ) との整合が求められる。超広帯域なデバイス動作を実現するためには、超高速時間領域におけるプラズモン信号の測定法を確立し、信号伝搬の様相について理解することが必要である。また、励起光の光子エネルギーを近赤外域まで下げることで、金属酸化物などより多くの物質への SPP 励起が可能になることや、SPP の伝搬長が大きく伸びるといった物性論的な観点からも、通信波長域における SPP 励起は注目されている。そこで、本研究では時間分解顕微鏡法を用いた 1.55  $\mu\text{m}$  帯表面プラズモンの動的な観察法の構築と Au 導波路を伝搬する SPP 波束の動的特性の評価を目的とし、1.55  $\mu\text{m}$  フェムト秒レーザーパルスの自己相関法による時間幅の評価、SPP 導波のための Au 導波路の構築と 1.55  $\mu\text{m}$  光で二光子蛍光発光する蛍光薄膜の形成、ならびにそれを用いた SPP の二光子蛍光顕微鏡法による可視化・時間分解観察を行い、SPP の群速度や伝搬長、波数の時間発展を評価した。なお本研究の試料作成は筑波大学微細加工プラットフォームおよび NIMS 微細加工プラットフォームで行った。

#### (4) 表面プラズモンの誘導放出による増幅 (久保敦)

金属と反転分布した利得媒質からなる積層構造の界面においては、励起子から表面プラズモン (SP) へのエネルギー移行によりコヒーレントに SP が増幅される SPASER (SP amplification by stimulated emission of radiation) が生じる。この現象は SP の損失補償やナノレーザー開発の基本原則となるもので高く注目されている。SPASER の最初の実験的報告は、プリズムに蒸着した Ag 薄膜上に色素溶液セルや色素ドープ樹脂を配した試料を用い、クレッチマン配置における反射率の色素ポンプに伴う変化や、色素ポンプで誘起される SP 輻射光のスペクトル幅の狭窄化として観測された。本研究では、角度 (波数) 分解分光法を用い、パルスレーザーで励起 (ポンプ) した Dye-PMMA/Ag/プリズム積層構造において、Ag/Dye-PMMA 界面の表面プラズモン、および Dye-PMMA 層内の多重な光導波モード、それぞれの共鳴角に強く指向した輻射を測定した。これらは増幅自然放出 (Amplified spontaneous emission : ASE) の特徴であるスペクトルの狭窄化を示し、輻射光強度がポンプ光強度に対して非線形的に増大する閾値を示した。特に SP については、光ポンプ色素層から



の誘導放出による SP 増幅 (SPASER) の実現が確認された。

(5)カルコゲン超格子を用いたアクティブプラズモニクス (久保敦, 中野隆志<sup>A</sup>, <sup>A</sup>産業技術総合研究所)

GeTe/Sb<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> 超格子 (GST) へのパルス電圧印加により繰り返し RESET-SET 相転移が可能なプラズモニク光変調デバイスの製作を行った。Au/SiO<sub>2</sub>/GST 多層膜にスリット状の光入力部と電極パッドを、集束イオンビームエッチング/デポジション法により作製した。入力した光信号はスリット部でプラズモンに変換され、Au/SiO<sub>2</sub>/GST 層を導波する。パルス電圧印加/レーザー照射その場観察装置により、電圧パルス ( $V_{\text{set}}$ ) 印加に伴うリード抵抗の変化を計測し、iPCM の動作に類似した RESET-SET-RESET 動作を捉えることに成功した。これにより、ミクロンサイズの GST 面積を有するプラズモニクデバイスの繰り返し駆動が可能であることの証左を得た。なお、本研究は産総研グループを代表とする CREST 研究であり、産総研ナノエレクトロニクス部門から超格子試料の提供を受け、追加工を筑波大学微細加工プラットフォームおよび NIMS 微細加工プラットフォームで行った。

(6) GeTe/Sb<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> 超格子スピン偏極プラズモン観察用中赤外ポンプ-プローブ光学系の開発 (久保敦, 中野隆志<sup>A</sup>, <sup>A</sup>産業技術総合研究所)

GeTe/Sb<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> 超格子のプラズモン励起・観察のための波長可変フェムト秒中赤外光源の構築を進めた。本年度は光学系の改良による差周波発生 (DFG) の高効率化を実施し、また中赤外/近赤外分光器を用い中赤外パルスの分光学的な評価を行った。この中赤外パルスをプラズモン励起のポンプパルスに、波長 800nm の近赤外フェムト秒パルスをプローブパルスに用いた時間分解ポンプ-プローブ法により、プラズモン場を和周波過程により可視光域にアップコンバートし高感度 CCD により検出する。DFG による中赤外パルスは波長 3~8  $\mu\text{m}$  の範囲で発生し、時間幅は約 110fs であった。この範囲で波長は連続的に可変であり、0.35  $\mu\text{J/pulse}$  の出力が得られる。ポンプパルスが波長可変であることから、プラズモンモードの分散関係など分光学的な調査までも行う目処が立った。

#### <論文>

(査読論文)

1. M. Ikezawa, L. Zhang, Y. Sakuma, and Y. Masumoto: "Quantum interference of two photons emitted from a luminescence center in GaAs:N", (to be published in Appl. Phys. Lett.).
2. H. Yu, Q. Sun, J. Yang, K. Ueno, T. Oshikiri, A. Kubo, Y. Matsuo, Q. Gong, H. Misawa, "Near-field spectral properties of coupled plasmonic nanoparticle arrays", Optics Express, **25**, 6883-6894 (2017).
3. H. Yu, Q. Sun, J. Yang, K. Ueno, T. Oshikiri, A. Kubo, Y. Matsuo, H. Misawa, "Exploring Coupled Plasmonic Nanostructures in the Near Field by Photoemission Electron Microscopy", ACS Nano, **10**, 10373-10381 (2016).
4. T. Sugiyama, A. Kubo, T. Nakano, "Optical Modulating Device using Phase Transition of [ (GeTe)/ (Sb<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>) ]<sub>20</sub> Superlattice", Extended Abstracts of the 2016 International Conference on Solid State Devices and Materials, 863-864 (2016).
5. 久保敦, "表面プラズモンのフェムト秒時間・ナノメートル空間分解イメージング", 光アライアンス, **27**, 14-18 (2016).

(学位論文)

1. 修士論文 佐藤 浩介, 「GaAs 中の単一窒素不純物発光中心の電荷制御」

2. 修士論文 吉岡 篤志、「GaAs 中の希薄窒素等電子トラップのスピン特性」
3. 修士論文 王 若曦、「フォトニック結晶共振器による単一等電子発光中心の発光寿命制御」
4. 修士論文 中村 圭佑、「時間分解顕微鏡法を用いたフェムト秒表面プラズモン波束の位相・包絡線形状の空間領域における変化の研究」
5. 修士論文 松本 実夏、「Ag/利得媒質積層膜における表面プラズモンの誘導放出による増幅」
6. 修士論文 村上 亮輔、「Au 導波路における  $1.55\ \mu\text{m}$  帯フェムト秒表面プラズモンポラリトンの動的特性評価」
7. 卒業論文 阿部 美咲、「 $[(\text{GeTe})_2(\text{Sb}_2\text{Te}_3)]_{20}$  超格子の相転移を用いたプラズモニック導波モード変調」
8. 卒業論文 大野 裕樹、「二次元プラズモニック結晶導波路を用いた表面プラズモンポラリトンの伝搬制御」
9. 卒業論文 佐藤 耀至、「波長可変フェムト秒中赤外パルスの時間分解ポンプ - プローブ光学系の開発」
10. 卒業論文 宮崎 純、「光通信波長帯表面プラズモンパルスの 2 光子蛍光顕微鏡法によるフェムト秒時間分解観察」
11. 卒業論文 貝塚 秀樹、「窒素をデルタドープした GaAs 量子井戸の光学特性」
12. 卒業論文 山下 勇真、「スペクトロメータを用いた干渉法による位相緩和時間測定」

#### <書籍>

1. Y. Sakuma, M. Ikezawa, and L. Zhang, in Micro- and Nanophotonic Technologies, edited by P. Meyrueis, K. Sakoda, and M. Van de Voorde (Wiley-VCH, Weinheim, 2017) pp. 125-141.
2. 久保敦, 「科学者からのメッセージ “遍歴する研究者”」, p.143-144 「もっと知りたい! 「科学の芽」の世界 Part 5」筑波大学出版会 (2016)

#### <国際会議>

1. M. Ikezawa, L. Zhang, Y. Sakuma, K. Sakoda, and Y. Masumoto: " Study on coherence time and indistinguishability of single photons from nitrogen impurity centers in GaAs", 9th International Conference on Quantum Dots (QD 2016) (韓国済州島, 2016/05).
2. A. Kubo, "Dissecting deformation dynamics of femtosecond surface plasmon wave packet", OSJ-OSA Joint Symposia, 2016 年 10 月 30 日, Univ. of Tsukuba, Tokyo, Japan [招待講演]
3. T. Sugiyama, A. Kubo, T. Nakano, "Optical Modulating Device using Phase Transition of  $[(\text{GeTe})_2(\text{Sb}_2\text{Te}_3)]_{20}$  Superlattice", SSDM2016, 2016 年 9 月 28 日, Tsukuba International Congress Center, Tsukuba, Japan

#### <国内会議>

1. 王若曦; 池沢道男; 山田雄太; 佐久間芳樹; 武田寛之, 池田直樹, 杉本喜正, 迫田和彰, 舛本泰章:「フォトニック結晶共振器による単一等電子発光中心の発光寿命制御」 応用物理学会 第 64 回応用物理学会春季学術講演会 (パシフィコ横浜, 2017 年 3 月)
2. 王若曦; 池沢道男; 山田雄太; 佐久間芳樹; 武田寛之, 池田直樹, 杉本喜正, 迫田和彰, 舛本泰章:「等電子トラップを埋め込んだフォトニック結晶共振器による 単一光子発生と発光寿命制御」 日本物理学会 第 72 回年次大会 (大阪大学, 2017 年 3 月)
3. 池沢道男:「GaAs 中の窒素不純物を利用した明るい単一光子源」 第 2 回 光・量子計測シンポジウム (つくば, 2016 年 11 月)

4. 久保敦, “「光のパルス」を金属表面やナノ空間に補足して 可視化する - レーザーと電子顕微鏡・光学顕微鏡の組み合わせ”, 日本顕微鏡学会様々なイメージング技術研究部会第4回研究会, 2016年11月20日, ホテル紫雲閣・日立製作所基礎研究センタ〔招待講演〕
5. 久保敦, “フェムト秒時間領域における プラズモン波束の変形と崩壊”, 日本物理学会2016年秋季大会シンポジウム「表面界面ナノ構造のその場観察」, 2016年9月15日, 金沢大学〔招待講演〕
6. 中村圭佑, 久保敦, “フェムト秒表面プラズモン波束の搬送波位相・包絡線形状変化の超高速イメージングによる解析”, 日本物理学会 2016年秋季大会, 2016年9月14日, 金沢大学
7. 杉山岳, 久保敦, 中野隆志, “[ $(\text{GeTe})_2(\text{Sb}_2\text{Te}_3)$ ]超格子の相転移で誘起される金属・絶縁体-超格子型積層膜のナノスリット構造における電磁場モード変調”, 日本物理学会 2016年秋季大会, 2016年9月15日, 金沢大学
8. 松本実夏, 久保敦, “Dye-PMMA/Ag/プリズム積層構造の蛍光発光スペクトルの角度分解測定”, 日本物理学会 2016年秋季大会, 2016年9月15日, 金沢大学
9. 大竹祐香, 久保敦, 笠谷岳士, 宮崎英樹, “フェムト秒表面プラズモン波束によるMIM型ナノキャビティ励振のダイナミクス”, 日本物理学会 2016年秋季大会, 2016年9月15日, 金沢大学
10. 久保敦, “フェムト秒レーザー励起二光子蛍光顕微鏡法によるフェムト秒プラズモン波束の時間・空間ダイナミクス”, 筑波大学ブレ戦略イニシアチブキックオフシンポジウム, 2016年11月1日, 筑波大学
11. 久保敦, “物質の2次分散と3次分散は波束をどの様に歪ませるか?”, 分子キラリティー研究センターシンポジウム「光化学の最先端2016」, 2016年11月24日, 千葉大学西千葉キャンパス
12. 松本実夏, 久保敦, “Ag/Rhodamine 系色素積層構造における表面プラズモン・光導波モードの多重波数ASE”, 第64回応用物理学会春季学術講演会, 2017年3月14日, パシフィコ横浜
13. 村上亮輔, 宮崎純, 池沢道男, 久保敦, “Au 導波路における1.55  $\mu\text{m}$ 帯フェムト秒表面プラズモンポラリトンの時間分解顕微鏡観察”, 第64回応用物理学会春季学術講演会, 2017年3月14日, パシフィコ横浜

#### <外部資金>

1. 公益財団法人住友電工グループ社会貢献基金, H28~29, 「半導体ナノ構造の共鳴光励起による区別のつかない光子の発生」: 池沢
2. 科研費 若手(A), 研究代表者, H26~29, 「通信帯フェムト秒表面プラズモン波束の顕微映像化と非線形増幅」: 久保
3. 科学技術振興機構 CREST, 研究担当者, H26~H31, 「カルコゲン超格子を用いたアクティブプラズモニクス」: 久保
4. TIA 連携プログラム探索推進事業かけはし, 共同研究者, H28, 「材料およびバリア膜・コーティング膜評価のための、吸着・脱離・透過測定装置開発に関する調査研究」: 久保

## I X-3 強相関物性グループ

教授		守友 浩
講師		東山和幸
助教		小林 航 (H22.9 -)
助教		丹羽秀治 (H27.8 -)
大学院生	D3	米澤宏平
	D3	高地雅光
	M2	Rögnvaldur Lindal Magnússon
	M2	赤間翔太
	M2	福住勇矢
	M1	天羽 薫
	M1	中田 光彦
	M1	伊王野慎司 (休学)
卒業研究生	B4	岡崎 慶彦
事務員		木村京子 (H26.5 -)

### 【1】 チタン酸化物のイオン拡散係数のイオン種依存性[1]福住 (M2)、守友

チタン酸化物はインターカレーションタイプの二次電池負極として有力である。この物質の特徴は、イオン半径の小さなリチウムイオンとイオン半径の大きなナトリウムイオンのインターカレーションが可能であることである。この特徴を利用して、同一ホストに対するイオン拡散係数とその活性化エネルギーのイオン種依存性を明らかにした。 $\text{Na}_2\text{Ti}_3\text{O}_7$ では、伝導パスが同一であるにもかかわらず、イオン拡散係数とその活性化エネルギーのイオン種依存性が小さいことが分かった。

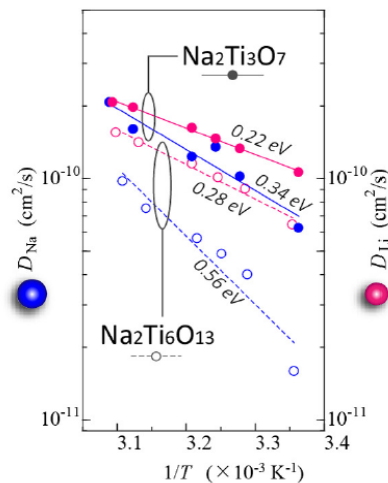


図1:チタン酸化物のイオン拡散係数のイオン種依存性

### 【2】 マンガン・プルシャンプルー類似体の電池特性の向上 [2] 守友、浦瀬 (修了)、柴田

マンガン・プルシャンプルー類似体はナトリウムイオン電池正極材として有望である。我々は、マンガンサイトを他の遷移金属に部分置換することにより、電池特性（レ

ート特性、サイクル特性) が著しく向上することを見出した。これは、元素置換がマンガンイオンのヤンテラー不安定性を抑制するためと考えられる。

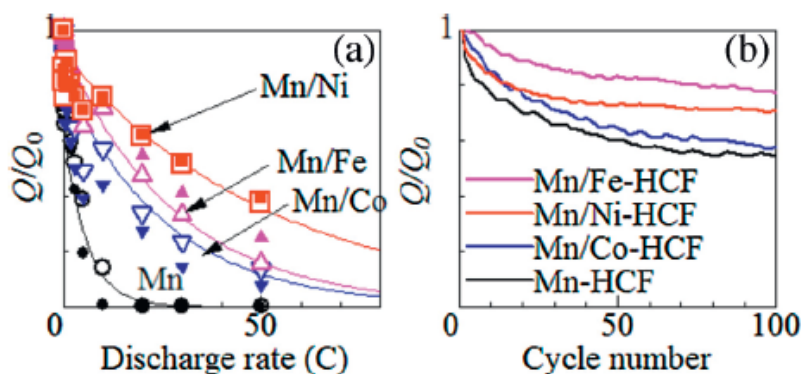


図2: 元素置換されたマンガン・プルシャンブルー類似体の放電曲線の(a)レート特性と(b)サイクル特性

### 【3】 層状酸化物の電池特性と構造との相関[3] 天羽 (M1)、小林、赤間 (M2)、三石 (NIMS)、守友

層状酸化物  $\text{NaCo}_{1/2}\text{Fe}_{1/2}\text{O}_2$  は、有力なナトリウムイオン二次電池の正極材料である。我々は、合成条件は放電曲線のサイクル特性に著しい影響を及ぼすことを見出した。そこで、徐冷した試料と急冷した試料の構造を放射光 X 線回折、高分解 SEM で詳細に知らべた。その結果、遷移金属の組成揺らぎがサイクル特性に重要な影響を及ぼしていることが、明らかとなった。

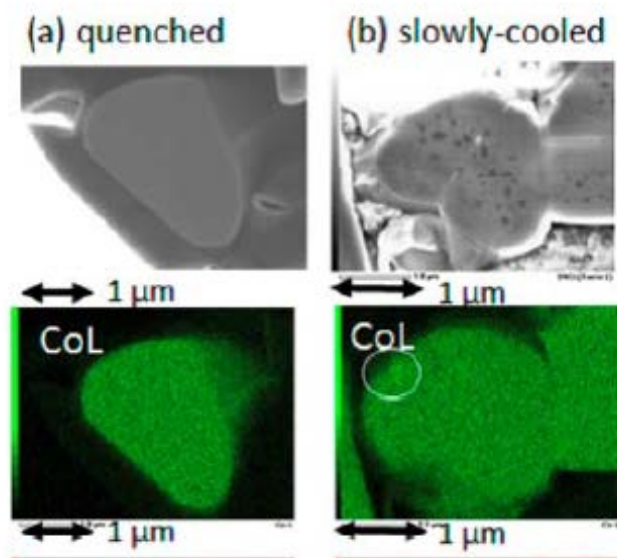


図3: (a) 急冷試料と (b) 徐冷試料の SEM 像と Co イオンの分布。測定は NIMS の TEM ステーションを利用した。

### 【4】 マンガン・プルシャンブルー類似体のイオン拡散係数のイオン種依存性[4] 高地 (D3)、福住 (M2)、守友

マンガン・プルシャンブルー類似体は二次電池正極として有力である。この物質の特徴は、イオン半径の小さなリチウムイオンとイオン半径の大きなナトリウムイオンのインターカレーションが可能であることである。この特徴を利用して、同一ホストに対するイオ

ン拡散係数とその活性化エネルギーのイオン種依存性を明らかにした。得られた結果を、イオン伝導パスの違いで説明した。

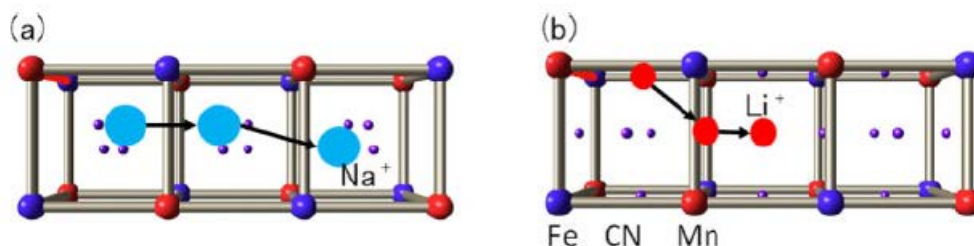


図4:マンガン・プルシアンブルー類似体のイオン伝導パス:(a)ナトリウムイオンと(b)リチウムイオン

#### 【5】 リチウムイオン電池材料の充電過程におけるマクロな二相分離高[7] 高地(D3)守友

大部分の二次電池材料は、充電または放電過程において二相状態が出現することが知られている。しかしながら、各相の長さスケールや成長様式は全くい分かっていない。我々は、コバルト・プルシアンブルー類似体の二つの相が異なった色を示すことに着目し、受電プロセスにおける相分離ダイナミクスのその場観察に成功した。その結果、 $10\mu\text{m}$ といったマクロな相分離が起こり、相境界が活性点であることが明らかとなった。

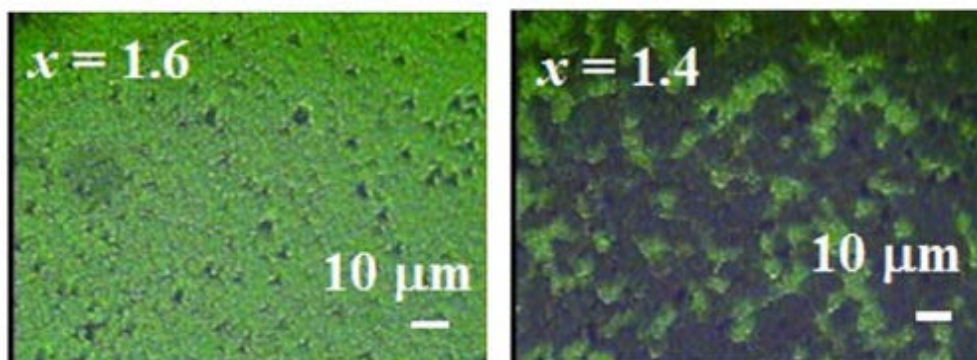


図5:コバルト・プルシアンブルーの相分離。左図は充電前、右図は充電の途中。

#### 【6】 X線マイクロビームを利用した相分離の観測[8] 丹羽、柴田、今井 (JASRI)、木村 (JASRI)、守友

$\text{Na}_x\text{CoO}_2$ は、03と03'相に相分離することが知られている。我々は、良質薄膜試料を作成し、X線マイクロ回折を用いて、各相のサイズを決定した。03'相のドメインサイズは粒子サイズと同程度であることが明らかとなった。

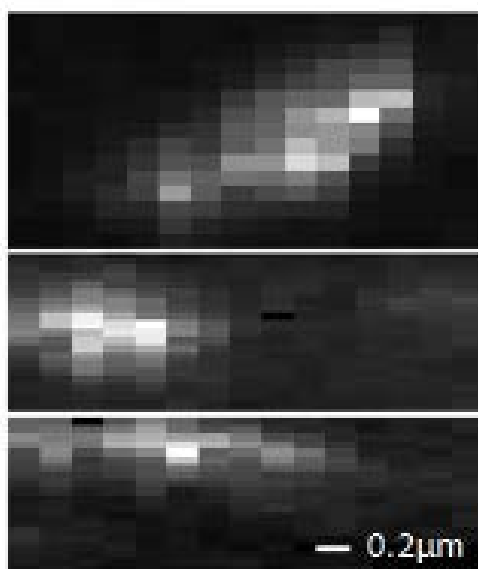


図6:Na<sub>x</sub>CoO<sub>2</sub> の O3'ドメインの X 線マイクロ回折像。

【7】 層状酸化物の遷移金属周りの局所構造[9] 赤間 (M2)、小林、天羽 (M1)、丹羽、仁谷 (KEK)、守友

二次電池材料である層状酸化物は、遷移金属サイトを部分置換すると電池性能が著しく向上することが知られている。しかしながら、遷移金属周りの局所構造がどのようなになっているか、系統的に調べた例はない。われわれは、一連の層状酸化物を合成し、EXAFS 局所構造解析により、M-O 結合長を決定した。その結果、ゲスト遷移金属周りの M-O 結合長は、宿主格子の M-O 結合長ではなく、ゲスト遷移金属しか含まない層状酸化物の M-O 結合長に近いことがわかった。ただし、格子歪を緩和するために、ホストの M-O 結合長に近づいていることが分かった。

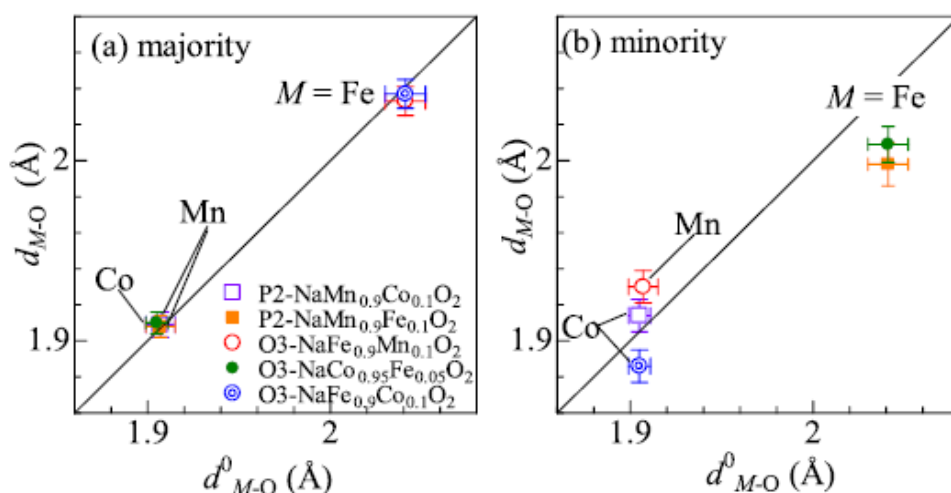


図7:層状酸化物中の宿主およびゲスト遷移金属周りの M-O 長。横軸はゲスト遷移金属しか含まない層状酸化物の M-O 長。

【8】 マンガン・プルシャンブルー類似体の低電圧動作の機構解明[10] 柴田、高地 (D3)、守友



プルシャンブルー類似体はリチウムに対して、1V 程度の低電圧動作を示すことが報告されている。我々は、この定電圧動作の機構を明らかにするために、放射光 X 線を利用した X 線回折と X 線吸収を系統的に行った。結果、低電圧動作の起源は、主に、プルシャンブルー類似体が分解して生成した Fe 金属のコンバージョン反応であることが分かった。

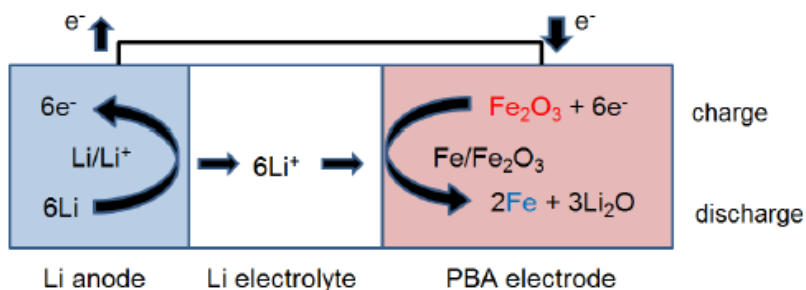


図 8: プルシャンブルー類似体の低電圧動作の反応プロセス

#### 【 9 】 KEK 大学等連携支援事業に関する活動

平成28年度KEK大学等連携支援事業「加速器科学と融合した物質科学教育研究拠点の構築に向けて」（代表：守友 浩）として、筑波大—KEKの連携・協力の強化のための活動を行った。

#### 【 1 0 】 放射光物質科学コースの開設

西堀教授と共同で放射光物質学コースを開設した。本年度は、修士課程1年が7名、修士課程2年が4名、博士課程1年が1名、博士課程3年が1名、計13名の学生が在籍した。2名のコース学生がSPRing-8の大学院生提案課題に採択された。

- ① 赤間翔太(物理学専攻: 修士課程2年) 酸化物固溶体における局所構造の支配要因 (2016B1887) 3 シフト
- ② 佐々木友彰(物理学専攻: 博士課程1年) 単体金属の充填構造と電子密度の相関の放射光 X 線回折による解析 (2016B1754) 6 シフト

#### 【 1 1 】 TIA かけはしに関する活動

筑波大学、NIMS、AIST、KEK4機関の代表として、「未利用熱エネルギーを変換する熱発電素子」に関する調査研究を行った。

#### <論文>

1. Y. Fukuzumi, W. Kobayashi, and Y. Moritomo, "Size Dependent Ion Diffusion in  $\text{Na}_2\text{Ti}_3\text{O}_7$  and  $\text{Na}_2\text{Ti}_6\text{O}_{13}$ ", J. Adv. Nanomaterials 1 (2016)
2. Y. Moritomo, S. Urase, and T. Shibata, "Enhanced battery performance in manganese hexacyanoferrate by partial substitution", Electrochimica Acta 210 (2016) 963-969
3. K. Amaha, W. Kobayashi, S. Akama, K. Mitsuishi, and Y. Moritomo, "Interrelation between inhomogeneity and cyclability in  $\text{O}_3\text{-NaFe}_{1/2}\text{Co}_{1/2}\text{O}_2$ ", Phys. Status Solidi RRL, (2016) 1-6 DOI 10.1002/pssr.201600284



4. M. Takachi, Y. Fukuzumi, and Y. Moritomo, "Concentration dependence of  $\text{Li}^+/\text{Na}^+$  diffusion in manganese hexacyanoferrates", Jpn. J. Appl. Phys., **53**(2016)067101.
5. Y. Moritomo, K. Yonezawa, and T. Yasuda, "Carrier formation dynamics in prototypical organic solar cells as investigated by transient absorption spectroscopy", International Journal of Photoenergy 2016, Article ID 9105460 (2016).
6. T. Nomura, Y. Harada, H. Niwa, K. Ishii, M. Ishikado, S. Shamoto, and I. Jarrige, "Resonant inelastic X-ray scattering study of entangled spin-orbital excitations in superconducting  $\text{PrFeAsO}_{0.7}$ ", Phys. Rev. **B94**, 035134 (2016).
7. M. Takachi and Y. Moritomo, "In situ observation of macroscopic phase separation in cobalt hexacyanoferrate film", Sci. Reps. **7**, 42694 (2017).
8. H. Niwa, T. Shibata, Y. Imai, S. Kimura, and Y. Moritomo, "Domain size of phase-separated  $\text{Na}_x\text{CoO}_2$  as investigated by X-ray microdiffraction", Batteries **3** (2017) 5.
9. S. Akama, W. Kobayashi, H. Niwa, T. Uchiyama, and Y. Moritomo, "Local distortion around the guest ion in perovskite oxides", Appl. Phys. Express. **19** (2017) 051101
10. T. Shibata, M. Takachi, and Y. Moritomo, "Low voltage charge/discharge behavior of manganese hexacyanoferrate", Batteries **3** (2017) 7.
11. Jun Miyawaki, Shigemasa Suga, Hidenori Fujiwara, Hideharu Niwa, Hisao Kiuchi and Yoshihisa Harada, "A Compact permanent-magnet system for measuring magnetic circular dichroism in resonant inelastic soft X-ray scattering", J. Synchrotron Rad. **24**, 449-455 (2017).
12. R. L. Magnusson, W. Kobayashi, M. Takachi, and Y. Moritomo, "Temperature effect on redox voltage in  $\text{Li}_x\text{Co}[\text{Fe}(\text{CN})_6]_y$ ", AIP advance, **7** (2017) 045002
13. S. Akama, W. Kobayashi, K. Amaha, H. Niwa, H. Nitani, and Y. Moritomo, "Local structures around the substituted elements in mixed layered oxides", Sci. Reps. **7**, 43791(2017)
14. Z. C. Wang, X. Y. Zhong, L. Jin, X. F. Chen, Y. Moritomo, J. Mayer, "Effects of dynamics diffraction condition on magnetic parameter detection in a double perovskite  $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_6$  using electron energy-loss magnetic chiral dichroism", Ultramicroscopy (2017), in press.

#### < 著書 >

1. 守友 浩、安田剛、米澤宏平、桜井岳暁「有機デバイスへの応用：ナノ構造と機能性」放射光 29 (2016) 313-319

#### < 学位論文 >

1. 修士論文 Rögvaldur Línal Magnússon、「Thermal effect on the redox voltage in Prussian blue analogues」
2. 修士論文 赤間翔太、「遷移金属酸化物固溶体の局所構造解析」
3. 修士論文 福住勇矢、「チタン酸化物における拡散係数のイオン依存性」
4. 博士論文 高地 雅光、「Interrelation between Ion-Intercalation and Structure in Prussian Blue Analogues」

#### < 講演 >

1. (Invited) Yutaka Moritomo "Carrier formation dynamics in organic solar cells as investigated by transient absorption spectroscopy" GREEN2016, taipei, Taiwan, 2016/12/24
2. (招待)守友 浩「プルシャンブルー類似体の光誘起現象と構造物性」錯体討論会、福岡大学、2016/9/10
3. (招待)守友 浩「電池型セルによる排熱利用」第二回光・量子シンポジウム、筑波国際会議場、2016/11/10
4. (招待)守友 浩「電池型熱セルによる排熱利用」第一回かけはしシンポジウム、筑波大学、2016/11/21
5. (招待)小林航「二次電池材料の起電力の圧力効果」第一回かけはしシンポジウム、筑波大学、2016/11/21
6. (Invited) Y. Moritomo "Carrier formation dynamics in organic solar cell", SPARCA2017, Okinawa, 2017/2/16-18
7. (Invited) 守友 浩「エネルギー変換・貯蔵部門」, 第三回 CiRfSE シンポジウム、筑波、2017/1/23-24
8. Yutaka Moritomo "Structural properties of transition metal hexacyanoferrate as secondary battery material", AsCa2016, hanoi, Vietnam, 2016/12/6
9. Yutaka Moritomo "Structural properties of transition metal hexacyanoferrate as secondary battery material", APenergy2016, hsinchu, Taiwan, 2016/9/7
10. Yutaka Moritomo "Visualization of Li<sup>+</sup> deintercalation dynamics in cobalt hexacyanoferrate", ICMM2016, Sendai, 2016/9/5
11. 福住 勇矢、小林 航、守友 浩「熱セルを用いた P2 型 Na<sub>x</sub>CoO<sub>2</sub> の熱電変換効果の計測」第77回応用物理学会秋季学術講演会、新潟県、2016/9/16
12. 天羽 薫、守友 浩、小林 航「O3 型 NaFe<sub>0.5</sub>Co<sub>0.5</sub>O<sub>2</sub> 固溶体の構造-電池特性相関」第77回応用物理学会秋季学術講演会、新潟県、2016/9/16
13. 赤間 翔太、天羽 薫、小林 航、丹羽 秀治、守友 浩「層状酸化物固溶体の EXAFS 解析」第77回応用物理学会秋季学術講演会、新潟県、2016/9/16
14. 小林 航、伊王野 慎司、天羽 薫、赤間 翔太、守友 浩「層状酸化物 NaMO<sub>2</sub>における起電力の静水圧効果」第77回応用物理学会秋季学術講演会、新潟県、2016/9/16
15. 丹羽秀治、天羽薫、小林航、守友 浩「軟 X 線分光によるナトリウムイオン電池用層状酸化物の電子状態観察」第 57 回電池討論会、幕張メッセ、2016/11/29
16. 柴田恭幸、浦瀬翔太、守友 浩「異種遷移金属部分置換によるマンガン・プルシャンブルー類似体の電気化学特性の向上」第 57 回電池討論会、幕張メッセ、2016/11/29
17. 丹羽秀治、高地雅光、岡本淳、Wen-Bin Wu, Di-Jing Huang, 守友浩「共鳴軟 X 線発光分光によるナトリウムイオン電池正極活物質の局所電子状態測定」第 30 回日本放射光学会年会放射光科学合同シンポジウム、神戸芸術センター、2017/1/8
18. 赤間翔太、小林 航、丹羽 秀治、守友 浩「ペロブスカイト型酸化物固溶体の EXAFS 解析」第64回応用物理学会春季学術講演会、神奈川県、2017/3/17
19. 小林 航、天羽 薫、守友 浩「高圧力下における LiMPO<sub>4</sub> (M=Fe, Co)の結晶構造解析」第 64回応用物理学会春季学術講演会、神奈川県、2017/3/17
20. 福住 勇矢、小林 航、守友 浩「P2 型 Na<sub>x</sub>CoO<sub>2</sub> の起電力の温度依存性」第64回応用物理学会春季学術講演会、神奈川県、2017/3/17

21. 丹羽 秀治, 高地 雅光, 岡本 淳, WuWen-Bin, Huang Di-Jing, 守友 浩「ナトリウムイオン電池正極プルシアンブルー類似体の局所電子状態観測」第64回応用物理学会春季学術講演会、神奈川県、2017/3/17
22. 丹羽秀治, 平成 28 年度 CORE ラボ 研究成果報告会「次世代エネルギーデバイスの放射光オペランドナノ顕微分光解析」, ナトリウム電池正極材料の放射光解析, 東北大学多元研南総合研究棟 2, 1F 大会議室, 2017 年 3 月 24 日.(口頭発表)
23. 守友 浩「排熱を刈り取る低コスト熱発電素子」第 8 回 TIA シンポジウム、イリノイホール&カンファレンスセンター、2016/10/11(ポスター)
24. 丹羽秀治, 中島淳貴, 宮脇淳, 原田慈久, 森田将史, 福田勝利, 軟 X 線発光分光による第四級アンモニウムカチオンの水和状態観測, 柏の葉カンファレンスセンター, 2016 年 1 月 9 日-11 日(ポスター)
25. 第 2 回 TIA 光・量子計測シンポジウム(平成28年11月10日、つくば国際会議場)守友 浩「電池型熱セルによる排熱利用」(ポスター)
26. 第 2 回 TIA 光・量子計測シンポジウム(平成28年11月10日、エポカルつくば)小林航「電池型熱セルによる排熱利用」(ポスター)
27. 小林航「Development of battery-type thermocell」TIA かけはし「ポスター交流会」～計算科学・計測技術・インフォマティクスの融合によるインテリジェント解析～(平成28年8月30日、エポカルつくば)(ポスター)
28. Rögnvaldur Línvald Magnússon, W. Kobayashi, and Y. Moritomo, “Temperature dependence of redox potential in Prussian blue analogues”, Tsukuba global science week (TGSW2016), 2016/9/17, Epochal Tsukuba, Tsukuba(ポスター)
29. Y. Fukuzumi, W. Kobayashi, and Y. Moritomo, “Ion dependence of diffusion dynamics in  $\text{Na}_2\text{Ti}_3\text{O}_7$  and  $\text{Na}_2\text{Ti}_6\text{O}_{13}$ ”, Tsukuba global science week (TGSW2016), 2016/9/17, Epochal Tsukuba, Tsukuba(ポスター)
30. K. Amaha, W. Kobayashi, and Y. Moritomo, “Effects of Concentration Inhomogeneity on Cyclability of  $\text{NaFe}_{1/2}\text{Co}_{1/2}\text{O}_2$ ”, Tsukuba global science week (TGSW2016), 2016/9/17, Epochal Tsukuba, Tsukuba(ポスター)
31. Y. Fukuzumi, W. Kobayashi, and Y. Moritomo, “Ion dependence of diffusion dynamics in  $\text{Na}_2\text{Ti}_n\text{O}_{2n+1}$  ( $n=3, 6$ )”, Interdisciplinary Workshop on Science and Patents (IWP) 2016, 2016/9/2, University of Tsukuba, Tsukuba(ポスター)
32. K. Amaha, W. Kobayashi, and Y. Moritomo, “Effects of Concentration Inhomogeneity on Cyclability of  $\text{NaFe}_{1/2}\text{Co}_{1/2}\text{O}_2$ ”, Interdisciplinary Workshop on Science and Patents (IWP) 2016, 2016/9/2, University of Tsukuba, Tsukuba(ポスター)
33. W. Kobayashi, S. Iouno, K. Amaha, S. Akama, and Y. Moritomo, “Pressure effect on battery voltage in layered  $\text{NaMO}_2$ ”, Gordon Research Conference, 2017/2/27-2017/3/4, Ventura, USA(ポスター)
34. 丹羽秀治, 高地雅光, 岡本淳, Wen-Bin Wu, Di-Jing Huang, 守友浩「共鳴軟 X 線発光分光によるナトリウムイオン電池正極活物質の局所電子状態測定」第 30 回日本放射光学会年会放射光科学合同シンポジウム、神戸芸術センター、2017/1/8(ポスター)
35. 東山和幸「第一原理計算による K 吸着 Pd(110)表面の構造安定性」日本物理学会第 72 回年次大会、大阪大学豊中キャンパス、2017/3/17(ポスター)

<特許出願>

1. 守友 浩、小林航、特願 2016-211227「熱発電素子」、筑波大学、2016/10/28

<特許取得>

1. 守友 浩、大村彩子、特許 6015891「セシウムイオンの除去方法およびセシウムイオンの除去装置」、筑波大学、2016/10/7
2. 守友 浩、松田智行、特許 6004540「バインダーフリー電池」、筑波大学、2016/9/16
3. 守友 浩、小林航、特許 5988172「酸化還元反応を利用した熱電変換方法および熱電変換素子」、筑波大学、2016/8/19

<外部資金>

1. 矢崎財団 平成 27 年度～29 年度;「配位高分子を用いたナトリウムイオン電池材料の開発」(代表:守友 浩); 研究経費 200 万円
2. 谷川熱技術振興基金 平成 28 年度～29 年度;「電池型熱発電素子の開発と排熱利用」(代表:守友 浩); 研究経費 120 万円
3. TIA 架け橋 平成 28 年度「未利用熱エネルギーを変換する熱発電素子」(代表:守友 浩) 90 万円
4. 科研費・若手 B 平成 28 年度～29 年度「非白金燃料電池触媒の活性点分布の解明」(代表:丹羽秀治); 研究経費 210 万円

<その他>

1. 教育コース開設:常陽新聞 2016. 5. 2「放射光物質科学コースを開設」

<受賞>

1. 高地雅光:数理物質科学研究科長賞
2. 福住勇矢:数理物質科学研究科長賞
3. 小林 航助教:筑波大学若手奨励賞
4. 福住勇矢:TGSW2016 ポスター賞受賞

## IX - 4. 光ナノ物性グループ

准教授 野村 晋太郎

大学院生 6 名

### 【1】ベクトル電場波形整形波の二次元電子系への照射効果（谷川、中野、野村）

最近開発されたベクトル電場波形整形法によって、ベクトルの時間発展が制御された光パルスの発生が可能となり、従来にはない自由度と可能性を物質中の電子系の光励起にもたらした。偏光方位角が時間に伴い回転するねじれ偏光パルスの発生および偏光状態が制御された THz 帯のパルスを、数 THz の振動数の範囲で生成可能となった。この手法は円偏向 THz 波を用いた近接場イメージングに適した方法である。そこで、本研究室ではこの外部制御された光パルスを用いた新たな量子状態の生成と観測を目的として研究を進めている。

図 1 に反射 4f 光学系ベクトル電場波形整形器の概略図を示す。フェムト秒モード同期チタンサファイアレーザからのパルス光は透過型回折格子で分散された後、凹面鏡により空間光変調器 (SLM) に入射される。各波長の二つの直交偏光成分のスペクトル位相を SLM を通してコンピュータ制御される。各スペクトル成分に二次分散、周波数チャープを与えてフェムト秒パルスを時間軸上で引き延ばされ、二つの直交偏光成分に異なる一次分散を与えることにより、各偏光成分の瞬時周波数に一定の周波数差  $\Omega$  を与えられる。SLM 透過後の光を再度、透過型回折格子を通過させ、ねじれ周波数  $\Omega$  とパルスの継続時間が制御された右・左まわりねじれ偏光パルスが生成される。前年度に構築を開始した反射 4f 光学系ベクトル電場波形整形ねじれ偏光パルスの局所励起のためのシステムについて、多光子パルス内干渉法を用いてフェムト秒パルス中のスペクトル位相を評価した。この手法によりベクトル電場波形整形器を透過する光パルスの二次分散量と一次分散量の補正を行った。また、新たに電子密度が可変のバックゲート付き変調ドープ量子井戸試料を作製した。ヘリウムクライオスタット中に設置した GaAs 単一ヘテロ接合試料および変調ドープ量子井戸試料に対するねじれ偏光パルスの照射効果について調べた。ねじれ偏光パルスの照射によって試料の電圧端子間に生じる光起電圧の波長依存性を調べ、パルス励起による電子温度上昇に起因する応答とインパルス誘導ラマン散乱過程による応答を分離して研究を進めた。光起電圧のフェムト秒パルスの二次分散量とスペクトル幅に対する依存性を調べ、光起電圧が入射パルスエネルギーに対して線形な領域において、励起パルスのパルス幅が長い程、光起電圧が増大することを見出した。さらに、光起電圧のパルス光の THz 帯の回転周波数と回転方向に対する依存性を調べた。観測された信号の起源については現時点では不明であり、その解明に向けて測定データを積み重ねている。

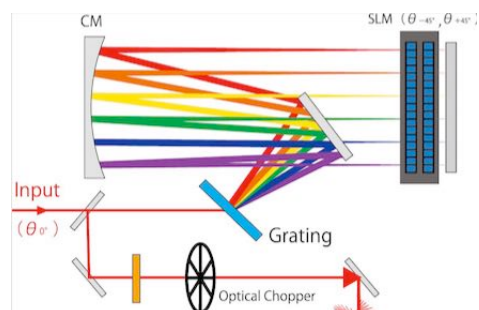


図 1 : 反射 4f 光学系ベクトル電場波形整形器の概略図。

本研究は東京農工大学三沢和彦氏のグループとの共同研究である。

### 【2】ダイヤモンド窒素不純物-欠陥中心を用いた高感度磁場測定 (三浦、野元、野村) [論文 1-4]

直接的磁場イメージングは、ナノ構造半導体、トポロジカル物質、超伝導体等の物性研究において有力な手法である。これまで SQUID を用いた磁場イメージングから試料中の電流密度を可視化する研究を私たちは進めてきた。また、磁場イメージングにより超伝導体への渦糸の侵入を調べてきた。

磁場イメージングの手法として、ダイヤモンド中窒素不純物-欠陥 (NV) 中心を用いた高感度磁場測定が最近注目を集めている。これは、ダイヤモンド中の NV 中心からの発光強度の電子スピン共鳴 (ESR) から磁場を検出するものである。発光中心が強く局在しているため、ダイヤモンドの表面近傍に NV 中心を生成したプローブを用いた走査プローブ顕微鏡に組み込むことにより高い空間分解能が見込まれる。本研究室ではこの NV 中心を用いた低温から室温の広い範囲で動作する局所磁場測定システムの開発を進めている。超高純度ダイヤモンドの表面近傍に  $^{15}\text{N}_2^+$  を注入して作製したダイヤモンド NV 中心を磁場センサーとして用いた。図 2 に磁場  $\mathbf{B} \parallel [111]$  に印加した際の NV 中心からの規格化発光強度のマイクロ波振動数依存性と  $\mathbf{B}$  の方向と結晶方位に関する概略図を示す。発光強度のディップのマイクロ波共鳴振動数から  $\mathbf{B}$  の各 NV 軸への射影成分が求まる。今回、広視野顕微鏡に対して、マイクロ波周波数変調法を導入した。マイクロ波周波数変調法は、測定にあたって時間のかかる測定パラメータのチューニングが不必要でかつ、DC 磁場に対してラムゼーフリンジ法と同等の磁場感度を得られる手法である。マイクロ波周波数変調法を適用した場合の ESR スペクトルを図 3 に示す。図 3 (b) に見られる約 3 MHz の分裂は  $^{15}\text{N}$  核スピン超微細構造によるものである。マイクロ波周波数を変調しない定常マイクロ波を用いた場合と比較して磁場感度を向上させることに成功した。さらに、磁場感度と関わる電子スピン共鳴のコントラストと線幅のマイクロ波強度、レーザー励起強度依存性を調べ、測定に用いた励起光強度領域では NV 中心中スピンの横緩和時間で制限されていることが明らかにされた。実例として、レーザーリソグラフィ法によって作製した金細線を流れる電流によって生じる磁場を検出し、そのイメージングを行った。ダイヤモンド NV 中心を用いた ESR 信号の検出は室温で可能であるという大きな特徴を持ち、固体素子の評価、バイオイメージング等に幅広く適用されると見込まれる。

本研究は産業技術総合研究所柏谷聡氏のグループとの共同研究である。

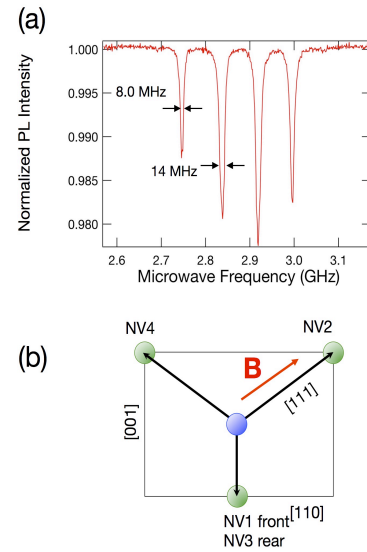


図 2. (a) 磁場  $\mathbf{B} \parallel [111]$  に印加した際の NV 中心からの規格化発光強度のマイクロ波振動数依存性 (b)  $\mathbf{B}$  の方向と結晶方位に関する概略図。

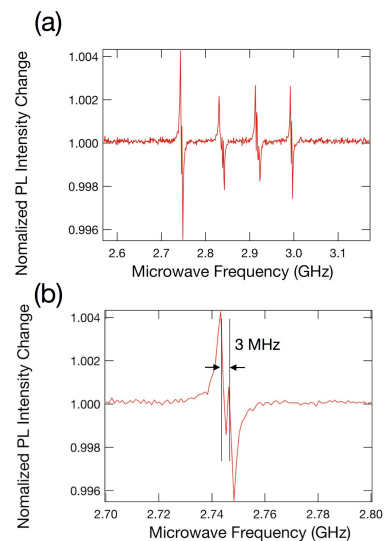


図 3. (a) 磁場  $\mathbf{B} \parallel [111]$  に印加した際の周波数変調発光強度のマイクロ波振動数依存性 (b) 2.7-2.8 GHz の拡大図。

### 【3】 遷移金属ダイカルコゲナイド薄膜の光応答（齋藤、綾野、野村）

遷移金属ダイカルコゲナイドは遷移金属元素 M(Mo, W, Nb 等)と 2 個のカルコゲナイド X(S, Se, Te)が結合した物質である。グラフェンと同様の手法により劈開され、原子層オーダーの薄膜が得られる。例えば二硫化モリブデン  $\text{MoS}_2$  では蜂の巣構造が 2 種類の元素から構成され、空間反転対称性が破れているためバンドギャップが開く。この有限の大きさのバンドギャップにより高い on/of 比の電界効果トランジスタ(FET)が作製され、発光素子・光検出器としても有望とされている。

これまでも私たちは遷移金属ダイカルコゲナイド  $\text{MoS}_2$  薄膜を利用した FET 構造を作製し研究を進めてきたが、試料の安定性と電子移動度の低さが課題であった。そこで、本年度、 $\text{MoS}_2$  薄膜を六方晶窒化ボロン h-BN で挟み込んだ 3 層構造の試料を作製し、その電気伝導特性と光応答特性に関する研究を行った。ドライトランスファー法により h-BN で  $\text{MoS}_2$  薄膜を挟み、チャネルが溶媒に触れることなく図 4 に示すような積層構造を作製し、電極を形成した。作製された  $\text{MoS}_2$ /h-BN 積層構造電界効果トランジスタの特性を評価したところ、 $10^5$  以上の on/off 比、サブスレッシュホールドスイング値 200 mV/dec 以上、電子移動度約  $25 \text{ cm}^2/\text{Vs}$  を得た。 $\text{MoS}_2$ /h-BN 積層構造によるキャリア散乱の低減効果によるものと推定される。h-BN に  $\text{MoS}_2$  薄膜が挟まれているため大気中での安定度が高く、【1】、【2】の研究手法をこの試料に適用する可能性が開かれた。さらに、作製された素子の光応答特性において、従来の素子と比較して高い光応答を得、窒化ボロンを用いたことによる応答特性の向上が示された。

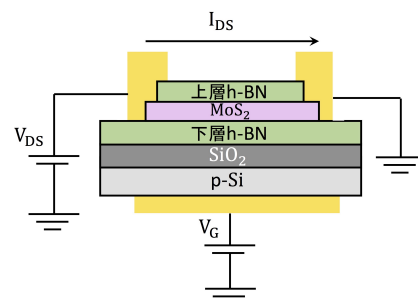


図 4. ドライトランスファー法により作製した  $\text{MoS}_2$ /h-BN 積層構造電界効果トランジスタの概略図。

#### <論文>

1. Yusuke Shibata, Shintaro Nomura, Ryosuke Ishiguro, Hiromi Kashiwaya, Satoshi Kashiwaya, Yusuke Nago and Hideaki Takayanagi, “Magnetic field imaging of a tungsten carbide film by scanning nano-SQUID microscope”, Supercond. Sci. Technol. **29** (10) 104004 (2016).
2. Y. Shibata, S. Nomura, H. Kashiwaya, S. Kashiwaya, R. Ishiguro, Y. Nago, and H. Takayanagi, “Mappings of Magnetic Field and Current Density Using Nano Superconducting Quantum Interference Device Microscope”, Ext. Abstr. Int. Conf. Solid State Devices and Materials, p. 535, (2016).
3. Y. Miura, S. Kashiwaya, and S. Nomura, “Wide-field imaging of magnetic field distribution with nitrogen-vacancy centers in diamond by frequency modulation of microwaves”, Ext. Abstr. Int. Conf. Solid State Devices and Materials, p. 837, (2016).
4. Y. Miura, S. Kashiwaya, and S. Nomura, “Frequency modulation technique for wide-field imaging of magnetic field with nitrogen-vacancy ensembles”, Jpn. J. Appl. Phys. **56**, 04CK03 (2017).
5. Daisuke Sakuma, Yusuke Nago, Ryosuke Ishiguro, Satoshi Kashiwaya, Shintaro Nomura, Kimitoshi Kono, Yoshiteru Maeno, and Hideaki Takayanagi, “Investigation of the Vortex States of  $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$ -Ru Eutectic Microplates Using DC-SQUIDs”, Jpn. J. Phys. Soc. (submitted).

< 学位論文 >

数理物質科学研究科物理学専攻修士論文 (2016 年 9 月)

1. 長谷川 卓也: 「単一半導体接合を用いた超高速光伝導スイッチの研究」

同 (2017 年 3 月)

2. 齋藤 明央: 「 $\text{MoS}_2/\text{BN}$  薄膜積層構造の光伝導特性の研究」
3. 谷川 大貴: 「インパルス誘導ラマン散乱過程による二次元電子ガスの励起」
4. 三浦 幸浩: 「ダイヤモンド NV センターを用いた周波数変調広視野磁場空間マッピング」

< 国際会議 >

1. Y. Miura, S. Kashiwaya, and S. Nomura, “Magnetic field imaging with spin ensembles in diamond using frequency modulation of microwave”, The 22nd International Conference on High Magnetic Fields in Semiconductor Physics (Jozankei View Hotel, July 25-29, 2016).
2. Y. Shibata, S. Nomura, H. Kashiwaya, S. Kashiwaya, R. Ishiguro, Y. Nago, and H. Takayanagi, “Mappings of Magnetic Field and Current Density Using Nano Superconducting Quantum Interference Device Microscope”, International Conference on Solid State Devices and Materials (Tsukuba International Conference Center, 27-29, Sep. 2016).
3. Y. Miura, S. Kashiwaya, and S. Nomura, “Wide-field imaging of magnetic field distribution with nitrogen-vacancy centers in diamond by frequency modulation of microwaves”, International Conference on Solid State Devices and Materials, (Tsukuba International Conference Center, 27-29, Sep. 2016).
4. (Invited) S. Nomura, Y. Shibata, H. Kashiwaya, S. Kashiwaya, R. Ishiguro, Y. Nago, and H. Takayanagi, “Scanning nano-SQUID microscope for investigations of properties of two-dimensional layer of semiconductors and superconductors”, Workshop on Innovative Nanoscale Devices and Systems 2016 (Kohala coast, Dec. 4-9, 2016).
5. (Invited) S. Nomura, “Circularly polarized near-field scanning optical microscope for characterization of nano-devices and nano-materials”, 2016 Global Research Efforts on Energy and Nanomaterials (GIS Taipei Tech Convention Center, Dec. 22-25, 2016).

< 講演 >

1. 野村晋太郎 「先端ナノプローブ分光測定によるトポロジカル物質の解明」 新学術領域研究「トポロジーが紡ぐ物質科学のフロンティア」公募班キックオフミーティング, (京都市, 京都大学京都大学理学研究科, 2016 年 6 月 4 日)
2. 野村晋太郎 「ダイヤモンド窒素-空孔欠陥を用いた高感度磁気イメージング」, (つくば市, 筑波大学 TARA センター, 2016 年 8 月 5 日)
3. 三浦幸浩, 柏谷聡, 野村晋太郎 「ダイヤモンド NV センターを用いた広視野周波数変調磁気イメージング」 日本物理学会 2016 年秋季大会, (金沢市, 金沢大学, 2016 年 9 月 13 日)
4. 永合祐輔, 佐藤太一, 篠崎智也, 佐久間大輔, 石黒亮輔, 柏谷聡, 柏谷裕美, 野村晋太郎, 河野公俊, 前野悦輝, 高柳英明 「マイクロ SQUID を用いた超伝導  $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  に誘起される磁束量子渦の観測」 日本物理学会 2016 年秋季大会, (金沢市, 金沢大学, 2016 年 9 月 15 日)



5. (招待講演) 野村晋太郎「半導体二次元電子系へのベクトル波形整形ねじれ偏光パルス励起効果」東北大学電気通信研究所共同プロジェクト研究会, (仙台市, 茂庭荘, 2016 年 11 月 22 日)
6. 野村晋太郎, 三浦幸浩, 柏谷聡「ダイヤモンド NV センター中スピンアンサンブルを用いた磁場分布空間マッピング」第 2 回領域研究会 (TMS2016), (仙台市, 東北大学, 2016 年 12 月 16 日)
7. 永合祐輔, 篠崎智也, 佐藤太一, 石黒亮輔, 柏谷聡, 柏谷裕美, 野村晋太郎, 河野公俊, 前野悦輝, 高柳英明「マイクロ SQUID による  $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  中の磁束量子渦状態の観測」第 2 回領域研究会 (TMS2016), (仙台市, 東北大学, 2016 年 12 月 17 日)
8. 佐久間大輔, 永合祐輔, 石黒亮輔, 柏谷聡, 柏谷裕美, 野村晋太郎, 河野公俊, 前野悦輝, 高柳英明「マイクロ SQUID による  $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$ -Ru 共晶中磁束量子渦状態の観測」第 2 回領域研究会 (TMS2016), (仙台市, 東北大学, 2016 年 12 月 17 日-18 日)
9. 佐久間大輔, 永合祐輔, 石黒亮輔, 柏谷聡, 野村晋太郎, 河野公俊, 前野悦輝, 高柳英明, 「 $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$ -Ru 共晶における磁束量子渦状態」日本物理学会年次大会 17aL22-6, (豊中市, 大阪大学, 2017 年 3 月 17 日)
10. 三浦幸浩, 柏谷聡, 野村晋太郎「ダイヤモンド NV センターを用いた電流がつくる磁場の周波数変調イメージング」日本物理学会年次大会 18aA21-6, (豊中市, 大阪大学, 2017 年 3 月 18 日)
11. 谷川大貴, 中野徹生, 伊藤宙陸, 野村晋太郎, 三沢和彦「ベクトル電場波形整形パルス照射による二次元電子系試料の光起電力効果」日本物理学会年次大会 18aA21-8, (豊中市, 大阪大学, 2017 年 3 月 18 日)

#### <社会貢献>

1. 野村晋太郎「発光ダイオードはなぜ省エネルギーなのか? ~原子・量子・光について(演示実験を交えて)~」(栃木県立宇都宮東高等学校「大学講座」, 2016 年 11 月 18 日)

#### <外部資金>

1. 科学研究費 基盤研究 B 「ヘリカル THz 波による二次元電子系局所励起効果の解明」研究課題番号: 15H03673, 平成 28 年度: 直接経費 2,300,000 円 (研究代表者: 野村 晋太郎)
2. 科学研究費 新学術領域研究「先端ナノプローブ分光測定によるトポロジカル物質の解明」研究課題番号: 16H00978, 平成 28 年度: 直接経費 2,000,000 円 (研究代表者: 野村 晋太郎)
3. 科学研究費 基盤研究 A 「ベクトル電場波形整形パルスによる時間反転対称性の破れた量子系の生成と制御」研究課題番号: 15H02117, 平成 28 年度: 直接経費 9,500,000 円 (分担金 1,800,000 円) (研究代表者: 三沢 和彦)

## IX-5. 低温物性グループ

教 授	大塚洋一
准教授	神田晶申
助 教	森下將史
研究員	友利ひかり(科学技術振興機構さがけ専任研究者)
大学院生	迫坪行広(数理物質科学研究科博士課程(早期修了プログラム)) 青沼快、柴田倭宏、鎌水勝秀(同修士課程2年) 園田大樹、中村和史、堀江彩叶、矢部大輔(同修士課程1年)
学類生	田村啓、吉川拓見、藤盛悠仁、星直樹(物理学類4年)

### 【1】 グラフェン等の原子層物質とその複合構造における物性開拓とデバイス応用への基盤技術開発

#### (1) グラフェンのひずみ効果 (友利、中村、吉川、神田)

炭素の2次元原子層膜であるグラフェンには、その特異な結晶構造を反映し、格子ひずみによって実効的なベクトルポテンシャルが生じるという特殊な性質がある。ひずみの空間変化の結果生じる擬似磁場は、グラフェンのバンド構造内の2つのバレーである K 点、K' 点近傍にある伝導電子に対して逆向きに作用することで時間反転対称性が保たれる点で、通常の磁場とは異なる。この擬似磁場をうまく使うと、これまで困難であった局所磁場やバレートロンクスに関する基礎的な実験が可能となるだけでなく、ビッグデータや IoT 社会の発展に不可欠である超低消費電力デバイス実現のための基盤技術が実現できる可能性もある。このようなひずみエレクトロニクスの実現を目指して、以下の研究を行った。

#### a) グラフェンの伝導ギャップの増大に向けた試料構造の検討 (友利、星、神田)

昨年度の研究で、周期ひずみ構造、局所ひずみ構造のそれぞれを持つ電界効果トランジスタ構造において、伝導ギャップを観測することに世界で初めて成功した。今年度はそのギャップを実用化レベルに近づけることを目標とし、周期ひずみ構造の周期の微小化、ひずみの空間変化量の増大化を行った。前者では、ひずみ周期 120 nm の構造の形成に成功した(図1)。後者では、ピエゾ素子を用いてひずみを印加する手法を開発した。

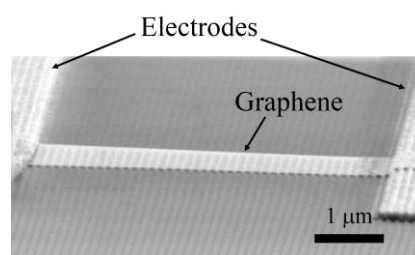


図1: 周期ひずみを導入したグラフェン電界効果トランジスタの走査電子顕微鏡写真。

#### b) グラフェンのひずみ方位の簡便な判別法の開発 (中村、友利、神田)

グラフェンのひずみ効果は、ひずみの結晶方位に大きく依存する。ひずみ方位は偏光ラマン分光法によって調べることができるが、従来の方法では、基準となる偏光板の向きの決定方法が複雑であり、ひずみ方位の同定は容易ではなかった。我々は、グラフェンのラマンスペクトルに現れる G バンド、2D バンドのピーク波数の偏光角度依存性から、偏光板の向きとひずみ方位の両方を容易に決定できる方法を考案した。また、その検証実験において予想通りの良好な結果を得た。

#### c) 周期1軸ひずみ構造を持つグラフェン電界効果トランジスタ構造の作製 (吉川、神田)

昨年度の大学院生である平出璃音可らが開発した、グラフェンに周期的なひずみを導入する方法を用いて、周期 1 軸ひずみ構造を持つグラフェン電界効果トランジスタ構造を作製した。局所ラマン分光における G バンド、2D バンドのピーク位置から、約 0.13% の平均ひずみ量をもつひずみが導入されていることが確認され、平出らの方法の再現性が確認された。

#### d) ひずみのあるグラフェンのコンダクタンスの計算手法の開発 (友利、神田)

局所ひずみによる伝導ギャップを最大化するために、任意形状のグラフェン細線の両端に張力を印加した場合のひずみの空間分布とコンダクタンスを計算する手法を開発した。本研究は、林正彦教授 (秋田大学) との共同研究である。

### (2) グラフェンの超伝導近接効果 (鏈水、友利、神田)

グラフェンと超伝導体との界面では、通常とは異なる超伝導近接効果 (鏡面アンドレーエフ反射) が起こることが理論予測されている。この現象は、現在まで実験では観測されていない。鏡面アンドレーエフ反射の観測が困難である原因として、従来、荷電不純物によるディラック点の空間揺らぎが指摘されてきたが、我々はそれに加えて、仕事関数差に起因する電荷ドーピングの重要性に着目している。本年度は、荷電不純物の影響を抑制するために、2 層グラフェン/層状超伝導体 NbSe<sub>2</sub> の接合を窒化ボロン (hBN) 膜で挟み込んだ構造 (図 2) を作製し、常伝導状態、超伝導状態における電気伝導特性を詳細に検討した。その結果、接合からの距離に依存してディラック点がシフトすることを観測し、先行研究 (Efetov et al. Nat.

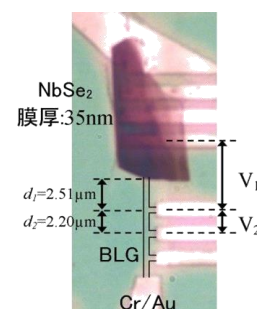


図 2 : 2 層グラフェン/層状超伝導体 NbSe<sub>2</sub> の接合を窒化ボロン (hBN) 膜で挟み込んだ試料の光学顕微鏡像。

Phys. (2016)) において行われた、仕事関数差を無視した解析が不適切であることを明らかにした。さらに、高根美武氏 (広島大) との共同研究において、仕事関数差

を考慮した場合の電流電圧特性を理論的に考察し、特定の状況においてアンドレーエフ反射の共鳴状態が出現することを見出した。本研究で用いた hBN は、物質・材料研究機構の谷口尚氏より提供を受けたものである。

### （３）劈開法で得た原子層超伝導体の超伝導（園田、矢部、友利、神田）

グラフェンの研究で発展した劈開製膜法を層状超伝導体に応用することにより、これまで実現が困難であった厚さが原子オーダーで均一なメゾスコピック超伝導体を実現することが可能となり、超伝導の物理、低消費電力の超伝導エレクトロニクスの新しい展開が期待される。今年度は、層状超伝導体 NbSe<sub>2</sub> の劈開膜について、薄膜化や微細加工が超伝導特性に与える影響を調べた。また、高温超伝導体 Bi2212 の薄膜化が伝導特性に与える影響を調べた。

#### a) 超伝導特性の試料作製プロセス依存性（矢部、友利、神田）

層状超伝導体を用いた様々な試料を作製する上で重要となる、試料作製プロセスが超伝導特性に与える影響を調べた。膜厚 10 nm 程度の層状超伝導体 NbSe<sub>2</sub> について、大気暴露したまま作製した試料と、hBN 膜で大気から遮断した状態で作製した試料を比較した結果、超伝導転移温度、臨界磁場共にほとんど差が出ず、バルクとほぼ同じ値となることがわかった。また、超伝導体を反応性プラズマイオンエッチング (RIE) で加工すると、超伝導転移温度の減少、転移幅の増大、臨界磁場の減少が観測された。

#### b) 層状高温超伝導体 BSCCO 薄膜の超伝導探索（園田、友利、神田）

層状高温超伝導体 Bi2212 (Bi<sub>2</sub>Sr<sub>2</sub>CaCu<sub>2</sub>O<sub>x</sub>) をスコッチテープ法によって薄膜化した試料の超伝導転移の観測を試みた。バルクでは 100 K 程度で超伝導転移が観測されたが、薄膜化した試料では、hBN で保護した場合、大気暴露した場合の両方で現段階では伝導転移は観測されていない。今後は酸素アニールによるドーピング効果等を調べる予定である。本研究で用いた高温超伝導体は、物質・材料研究機構の高野義彦氏より提供を受けた。

### （４）グラフェン上における金の拡散現象の発見（藤盛、神田）

半導体微細加工（リソグラフィ）プロセスにおける有機ポリマー（レジスト）によるグラフェン表面の汚染を回避するために、ステンシルマスクを用いた電極形成を検討した。ニッケル、クロム、パラジウムなど多くの金属ではマスク蒸着の結果は良好であったが、最も頻繁に使われている金の場合のみ、金の微粒子がグラフェンの上を動き回る（拡散する）現象を見出した（図 3）。金微粒子は格子欠陥や

結晶の端に集まる傾向がある。この現象をうまく使うと、グラフェンやグラファイトの欠陥の分布が可視化できる可能性がある。

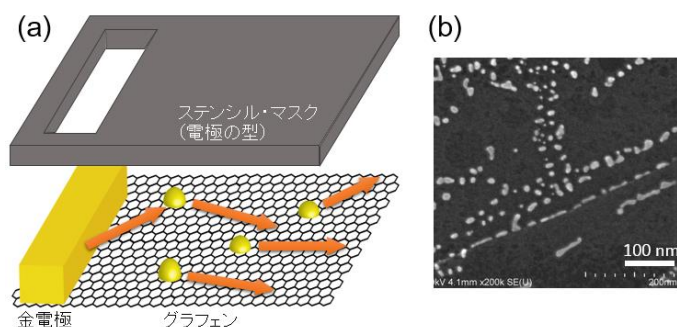


図 3：ステンシルマスクを使った電極の蒸着と、金微粒子の拡散の様子。(b)はグラファイト上の金電極から 100 マイクロメートル離れた場所の走査電子顕微鏡写真。

#### (5) 折り畳みグラフェン中の電気伝導（堀江、大塚）

二次元電子の軌道運動は磁場の面垂直成分のみの影響を受ける。従って、平坦ではない基板上に置かれた二次元電子系に磁場をかけると、磁場が一様であっても軌道運動に対する有効磁場は空間変化することになる。これを利用して極めて急峻な変化をする外部磁場中での二次元電子の運動を調べるために、薄い絶縁膜をスペーサーとして、その端で折り返した「折り畳みグラフェン」に垂直強磁場中を加えた場合の電気抵抗・ホール効果を調べる研究を始めた。グラフェンはマクロな大きさを持つ CVD グラフェンを使用する。本年度はグラフェンの折り畳みとそれへの電極接続を行うためのプロセスを種々検討した。これまでにネガ型レジストをスペーサーとした折り返しグラフェンを作り、金電極パターンのついた Si 及びガラス基板で上下からはさむことには成功したが、まだ良好な電氣的接続は得られていない。

#### (6) 超伝導微粒子-グラフェン系における超伝導転移（田村、堀江、大塚）

前年度にインジウムを微量真空蒸着した単層グラフェンの超伝導転移を調べたが、今年度は 2 層グラフェンについて同様の実験を行った。CVD 2 層グラフェンにインジウムを約 10 nm 蒸着し、その電気伝導を液体ヘリウム及び希釈冷凍温度で測定した。グラフェン上でインジウムは直径 50 nm 程度の微粒子を形成するため、試料はこのインジウム粒子がグラフェンを介してつながった二次元ネットワークとなり、粒子間の結合はゲート電圧でその場制御できる。インジウムの超伝導転移に伴い電気抵抗はインジウム粒子の揺らぎを伴う超伝導転移とさらに低温での Berezinskii-Kosterlitz-Thouless (BKT) 転移の 2 段階で変化する。単層 CVD の場合と比較しより明確な BKT 転移に伴う温度変化が電気抵抗に観測された。

## 【2】電流バイアスした金属ナノコンタクトにおける熱現象（柴田、大塚）

単原子ポイントコンタクトや単分子架橋系では加えた電圧が nm オーダーの接合両端に集中する中で伝導が生じており、エネルギー散逸は著しく不均一であり、容易に強い非平衡状態が生じると考えられる。そこで機械的破断接合（MBJ）法で作製した超伝導アルミニウムのナノコンタクトに電流を流した場合に生じる発熱とその伝達を希釈冷凍温度域で調べた。発熱は極めて局所的に生じるために接合に極近接した位置に超小型の AuGe 抵抗温度計を取り付けた。実験では以下の 3 つの方法で接合近傍の電子温度及び電子温度を決定した：①接合に電流を流した時の AuGe 温度、②接合に電流を流すことによる Al の常伝導状態への転移、③AuGe 抵抗をヒーターとして局所加熱したときの Al 電子温度。その結果、・接合の両側での温度上昇は電流の方向には依存しない、・しかし試料によっては両側での温度上昇には差がある事、・さらにその原因はジュール発熱の偏りにある事を明らかにした。

## 【3】希釈冷凍温度域磁化測定システムの開発（青沼、大塚）

SQUID をセンサーとした 0.1 K～1 K の希釈冷凍温度域での実用的な磁化測定システムの実現を目指して開発を行った。高感度な磁化測定装置は物質開発に欠かせない計測器として多くの研究機関で使用されているが、その測定温度域は約 2 K までに限られている。より低温を生成できるヘリウム希釈冷凍機は構造が複雑であり、かつ熱流入に極めて弱いことから、その温度で微弱磁化を測定したという報告は数例に限られていた。そこで以前に大塚が開発したトップローディング式簡易型希釈冷凍機をベースに、室温部にあるモーターで極低温試料を直接駆動する構造を考案し、実用的な磁化測定装置の開発を行った。簡易希釈冷凍機の設計と製作の他、超伝導磁石や SQUID の制御回路、試料駆動装置の製作を行った。試験運転の結果、到達温度は目標とした 0.1 K にはまだ届いていないものの、 $^3\text{He}$  冷凍では達成できない温度に達しており、試料の上下動による大きな発熱がないことも確認した。

## 【4】遷移金属酸化物薄膜における抵抗変化現象と記憶素子への応用（迫坪、大塚）

抵抗変化現象とは一定以上の電流あるいは電圧を加えると電気抵抗が変化し電流・電圧を小さくしても変化した抵抗を維持し続ける一方、逆の極性あるいは別の大きさ以上の電流・電圧を加えると以前の抵抗に戻るといった現象である。不揮発メモリー現象であり、しかも集積度や高速性にも優れる可能性が高いことから近年応用に向けた研究が活発になっているとともに、そのメカニズムはまだ不明なところが多く基礎物理の観点からも興味深い研究対象である。早期修了プログラムで入学した迫坪は、酸化タンタル/酸化チタン ( $\text{Ta}_2\text{O}_5/\text{TiO}_2$ ) 積層薄膜における抵抗変化現象に関する問題、特に抵抗スイッチングが生じる位置及び高抵抗状態の電気伝導について実験的に検討を行い、さらにこの構造の不揮発メモリー素子としての高サイクル耐性の実証を行った結果を学位論文としてまとめた。

## 【5】グラファイト上ヘリウム薄膜における2次元量子物性（森下、梅本）

原子レベルで平坦なグラファイト表面に吸着した数原子層のヘリウム薄膜は、理想的な2次元系を与える。この系では低次元系特有の、ゆらぎやフラストレーションを反映した物性、さらには、ヘリウムの高い量子性を反映した、他の吸着系には見られない特異な吸着構造や物性の出現が期待される。

### （1）ヘリウム単原子層薄膜における Dirac 粒子系

ヘリウム4 ( $^4\text{He}$ ) 単原子層薄膜に少量のヘリウム3 ( $^3\text{He}$ ) を溶解させた際、従来、 $^4\text{He}$  薄膜が固相であると考えられていた吸着量領域で、 $^3\text{He}$  の熱容量が有限であり、しかも温度の自乗に比例する異常な温度依存性を観測している。この解釈として、 $^4\text{He}$  薄膜の吸着構造の honeycomb domain wall が流動性を示し、溶解した  $^3\text{He}$  が蜂の巣構造の中を運動し、Dirac 粒子として振る舞って入る可能性を指摘している。

Dirac 粒子系は Fermi 面近傍で線形分散を示し、Fermi 粒子系でありながら全ての粒子が同一の速さをもつ上、Dirac 点の存在のために粒子速度が非常に大きくなる。熱容量から見積もられる Dirac 粒子として振る舞う  $^3\text{He}$  の速度の面密度依存性を図1に示す。従来の結果 ( $^3\text{He}$ :  $0.1 \text{ nm}^{-2}$ ,  $0.2 \text{ nm}^{-2}$ ) からは、 $^3\text{He}$  混入量が少ない程、粒子速度が大きく、また、 $4 \times 4$  という最小の周期性を与える  $8.4 \text{ nm}^{-2}$  近傍で最大値  $160 \text{ m/s}$  程度を得ていたが、この値は頭打ちになっているようにも見える。 $^3\text{He}$  原子が大きな速度をもつことから、 $^4\text{He}$  の honeycomb domain wall は超流動状態にあると考えられ、 $^3\text{He}$  原子の運動に  $^4\text{He}$  の超流動臨界速度が影響を与えている可能性が指摘された。臨界速度の影響を受けているのか否かを明らかにする目的で、従来より  $^3\text{He}$  混入量をさらに半分に減らした系 ( $^3\text{He}$ :  $0.05 \text{ nm}^{-2}$ ) での熱容量測定を行った。図4に示すように、誤差の範囲を越えて  $^3\text{He}$  の粒子速度は大きくなっている。 $^4\text{He}$  薄膜の超流動臨界速度はおおよそ  $60 \text{ m/s}$  と見積もられ、これを遙かに越えた値が観測されていることから、 $^3\text{He}$  の粒子速度は  $^4\text{He}$  薄膜の超流動臨界速度の影響は受けていないと見られる。

$^4\text{He}$  薄膜の honeycomb domain wall が流動性を示すことを、より直接的に観測すべく、音叉型水晶発振器を用いた水晶マイクロバランス法による動的応答測定の前準備も進めている。

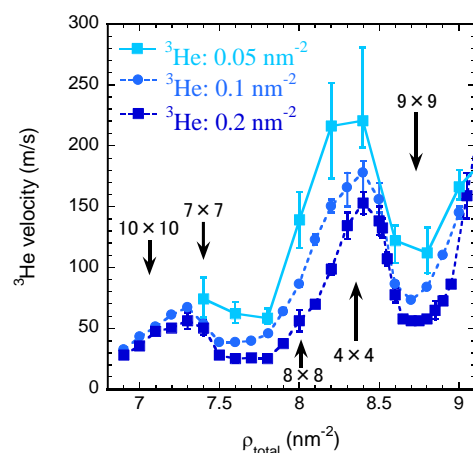


図4： $^4\text{He}$  薄膜中で Dirac 粒子として振る舞う  $^3\text{He}$  原子の速さの面密度変化。



## (2) ヘリウム4薄膜吸着第2原子層整合固相

$^4\text{He}$  薄膜吸着第2原子層においては、1原子層目に対しほぼ4/7の比率をもった整合固相の存在が信じられている。動的応答測定で、この面密度領域でのみ超流動的な振る舞いが観測されていることから、固体の超流動（超固体）や量子液晶相の存在が議論されている他、量子臨界点の存在も明らかとなり、注目を集めている。整合固相については、1 K 近傍の熱容量ピークの存在から、その存在が信じられている一方で、理論的な指摘から、その存在の有無が依然議論されている。我々のグループでは、 $^4\text{He}$  薄膜に少量の  $^3\text{He}$  を混入した系の熱容量測定において、 $^3\text{He}$  が流動性を示すという整合固相の存在に否定的な結果を得ているが、不純物としての  $^3\text{He}$  が固化を阻害している可能性も完全には否定できない。そこで、純粋な  $^4\text{He}$  薄膜について、従来より2桁近い低温まで熱容量測定を行った。その結果、面密度の関数としての構造相転移を示唆する熱容量の変化が得られず、また、整合固相に特有な phonon gap も観測されなかった。 $^3\text{He}$  を混入しての測定と相補的に、整合固相の存在を否定する結果を得た。

## <学位論文>

(博士論文) 数理物質科学研究科、2017年3月

1. 迫坪行広：Resistance change phenomenon in  $\text{Ta}_2\text{O}_5/\text{TiO}_2$  stacked structure and its application to non-volatile memory ( $\text{Ta}_2\text{O}_5/\text{TiO}_2$  積層構造における抵抗変化現象とその不揮発メモリーへの応用) (早期修了プログラム)

(修士論文) 数理物質科学研究科、2017年3月

1. 青沼快：希釈冷凍温度域磁化測定システムの開発
2. 柴田倭宏：電流バイアスされた超伝導ナノコンタクトにおける熱生成と温度計測
3. 鍵水勝秀：グラフェン／層状超伝導体接合における超伝導近接効果

(卒業論文) 物理学類、2017年3月

1. 田村啓：二層グラフェン-インジウム系の超伝導転移
2. 吉川拓見：周期1軸ひずみ構造を持つグラフェントランジスタの作製
3. 藤盛悠仁：SiC上に形成されたグラフェンナノリボン列のダメージレスな電気伝導評価法の開発
4. 星直樹：ピエゾ素子を用いたグラフェンの一軸ひずみ制御

## <論文>

1. Y. Takane, K. Yarimizu, A. Kanda, "Andreev Reflection in a Bilayer Graphene Junction: Role of Spatial Variation of the Charge Neutrality Point", J. Phys. Soc. Jpn 86, 064707 (2017) (8 pages).



2. M. Morishita: “Low-Temperature Heat Capacity of  $^4\text{He}$  Films on Graphite”, J. Low Temp. Phys. 187, 453-458 (2017).

<著書>

1. 神田晶申、「第6章:超伝導層状カルコゲナイド／グラフェン接合」(上野啓司、安藤淳、島田敏宏編『カルコゲナイド系層状物質の最新研究』シーエムシー出版、35～44頁)、2016年

<講演>

(国際会議)

1. Hikari Tomori, Rineka Hiraide, Youiti Ootuka, Kenji Watanabe, Takashi Taniguchi, Akinobu Kanda, “Inducing Strain to Encapsulated Graphene”, Graphene Week 2016, Warsaw (Poland), Jun. 13-16, 2016.
2. Yu Ito, Kenta Katakura, Shoma Higuchi, Hiroki Sonoda, Hikari Tomori, Akinobu Kanda, “Effect of Metal Contact on Electron Transport and Its Removal in Graphene Field Effect Devices”, The 43rd International Symposium on Compound Semiconductor, Toyama, Jun. 13-16, 2016.
3. Rineka Hiraide, Shoma Higuchi, Hiroki Sonoda, Hikari Tomori, Akinobu Kanda, “Strain-induced Semiconducting Electron Transport in Graphene Field Effect Devices”, The 43rd International Symposium on Compound Semiconductor, Toyama, Jun. 13-16, 2016.
4. Hikari Tomori, Rineka Hiraide, Youiti Ootuka, Kenji Watanabe, Takashi Taniguchi, Akinobu Kanda, “Introducing Uniaxial Local Strain to Graphene Encapsulated with hBN”, The 43rd International Symposium on Compound Semiconductor, Toyama, Jun. 13-16, 2016.
5. Hikari Tomori, Rineka Hiraide, Youiti Ootuka, Kenji Watanabe, Takashi Taniguchi, Akinobu Kanda, “Introducing Uniaxial Local Strain to Graphene Encapsulated with hBN”, Seventeenth International Conference on the Science and Application of Nanotubes and Low-dimensional materials (NT16), Vienna (Austria), Aug. 7-13, 2016.
6. Rineka Hiraide, Shoma Higuchi, Hiroki Sonoda, Hikari Tomori, Akinobu Kanda, “Semiconducting Electron Transport in Graphene Induced by Periodic Uniaxial Strain”, Seventeenth International Conference on the Science and Application of Nanotubes and Low-dimensional materials (NT16), Vienna (Austria), Aug. 7-13,

2016.

7. Akinobu Kanda, Rineka Hiraide, Shoma Higuchi, Takumi Kichikawa, Youiti Ootuka, Hikari Tomori, “Formation of Graphene field Effect Devices with Periodic Uniaxial Strain and Its Semiconducting Electron Transport”, The 8th International Conference on Recent Progress in Graphene and 2D Research (PRGR2016), Seoul (Korea), Sep. 25-29, 2016.
8. Hikari Tomori, Kazushi Nakamura, Naoki Hoshi, Youiti Ootuka, Kenji Watanabe, Takashi Taniguchi, Akinobu Kanda, “Semiconducting Electron Transport in Strained Graphene Encapsulated with hBN” , The 8th International Conference on Recent Progress in Graphene and 2D Research (PRGR2016), Seoul (Korea), Sep. 25-29, 2016.
9. Hikari Tomori, Kazushi Nakamura, Naoki Hoshi, Youiti Ootuka, Kenji Watanabe, Takashi Taniguchi, Akinobu Kanda, “Opening a Gap in Graphene Encapsulated with hBN” , 29th International Microprocess and Nanotechnology Conference (MNC2016), Kyoto, Nov. 08-11 (2016).
10. Shoma Higuchi, Rineka Hiraide, Takumi Kichikawa, Youiti Ootuka, Hikari Tomori, Akinobu Kanda, “Strain-induced Semiconducting Electron Transport in Graphene Field Effect Devices”, 29th International Microprocess and Nanotechnology Conference (MNC2016), Kyoto, Nov. 08-11 (2016).
11. Katsuhide Yarimizu, Youiti Ootuka, Hikari Tomori, Kenji Watanabe, Takashi Taniguchi, Keiji Ueno, Akinobu Kanda, “Superconducting Proximity Effect in Graphene/Layered Superconductor NbSe<sub>2</sub> Interface”, 29th International Microprocess and Nanotechnology Conference (MNC2016), Kyoto, Nov. 08-11 (2016).
12. Akinobu Kanda, Kenta Katakura, Yu. Ito, Youiti Ootuka, Hikari Tomori, “Influence of Metal Contacts on Graphene Transport Properties and Its Removal with Nano-carbon Interfacial Layer”, 2016 Materials Research Society Fall Meeting, Boston (USA), Nov. 27-Dec. 2 (2016).
13. Hikari Tomori, Rineka Hiraide, Youiti Ootuka, Kenji Watanabe, Takashi Taniguchi, Akinobu Kanda, “Opening a Gap in Graphene Field Effect Devices Based on Strain Engineering”, 2016 Materials Research Society Fall Meeting, Boston (USA), Nov. 27-Dec. 2 (2016).
14. (Invited) Rineka Hiraide, Hikari Tomori, Akinobu Kanda, “Graphene Strain Engineering for Band Gap Opening”, 2106 Workshop on Innovative Nanoscale

Devices and Systems (WINDS), 2016.12.04-09, Hawaii (USA), Dec. 4-9, 2016.

15. Hikari Tomori, Rineka Hiraide, Youiti Ootuka, Akinobu Kanda, “Formation of Graphene field Effect Devices with Periodic Uniaxial Strain and Its Semiconducting Electron Transport”, American Physical Society March Meeting 2017, New Orleans (USA), Mar. 13-17, 2017.
16. Youiti Ootuka, Jin Aoki, and Ayato Horie, Electrical Transport in Metal-Deposited CVD-Graphene, CIQM Frontiers in Quantum Materials and Devices Workshop, RIKEN Wako Campus (Saitama), June 13-14, 2016.
17. Yukihiro Shibata and Youiti Ootuka, Local Heating in Superconducting Atomic Point-Contacts, CIQM Frontiers in Quantum Materials and Devices Workshop, RIKEN Wako Campus (Saitama), June 13-14, 2016.
18. Youiti Ootuka, Jin Aoki, and Ayato Horie, Electrical Transport in Metal-Decorated CVD-Graphene, 19th International Conference on Superlattices, Nanostructures and Nanodevices (ICSNN 2016), Hong Kong, 25-30 July 2016.
19. Yukihiro Shibata and Youiti Ootuka, Local electron- and lattice-heating in superconducting atomic point-contacts, 19th International Conference on Superlattices, Nanostructures and Nanodevices (ICSNN 2016), Hong Kong, 25-30 July 2016.
20. Kenichi Takemasa, Shin-Hong Kim, Yuji Takeuchi, Kazuki Nagata, Kota Kasahara, Shunsuke Yagi, Rena Wakasa, Yoichi Otsuka, Hirokazu Ikeda, Takehiko Wada, Koichi Nagase, Shuji Matsuura, Yasuo Arai, Ikuo Kurachi, Masashi Hazumi, Takuo Yoshida, Chisa Asano, Takahiro Nakamura, Makoto Sakai, Satoshi Mima, Kenji Kiuchi, H.Ishino, A.Kibayashi, Yukihiro Kato, Go Fujii, Shigetomo Shiki, Masahiro Ukibe, Masataka Ohkubo, Shoji Kawahito, Erik Ramberg, Paul Rubinov, Dmitri Sergatskov, Soo-Bong Kim, Development of Superconducting Tunnel Junction Detectors and Cold Amplifier for COBAND experiment, The 3rd International Workshop on Superconducting Sensors and Detectors (IWSSD2016), AIST Tsukuba Campus, Nov. 14-17, 2016.
21. M. Morishita and M. Umemoto, “Fluidity of Domain Walls in Dilute  $^3\text{He}$ - $^4\text{He}$  Mixture Monolayer Films  $\sim$  Possible 1D Fermi Fluid and 2D Dirac Fermions in Helium Film on Graphite  $\sim$ ”, International Conference on Quantum Fluids and Solids (QFS2016) (Prague, August 11, 2016).
22. M. Morishita, “Low Temperature Heat Capacity of  $^4\text{He}$  Films on Graphite”, International Conference on Quantum Fluids and Solids (QFS2016) (Prague, August 11, 2016).

(国内会議)

1. 鍵水勝秀, 矢部大輔, 園田大樹, 友利ひかり, 神田晶申, "Superconducting proximity effect in graphene", 新学術領域「ハイブリッド量子科学」第3回領域会議、東京理科大学神楽坂キャンパス (東京)、2016年8月25-26日。
2. 友利ひかり, 樋口翔馬, 中村和史, 星直樹, 神田晶申, "Electron Transport in Graphene with Local Strain", 新学術領域「ハイブリッド量子科学」第3回領域会議、東京理科大学神楽坂キャンパス (東京)、2016年8月25-26日 (ポスター)。
3. 樋口翔馬, 平出璃音可, 吉川拓見, 大塚洋一, 友利ひかり, 神田晶申, 「周期1軸ひずみによるグラフェンの半導体化」, 第77回応用物理学会秋季学術講演会, 朱鷺メッセ (新潟県新潟市), 2016年9月13-16日。
4. 鍵水勝秀, 大塚洋一, 友利ひかり, 渡邊賢司, 谷口尚, 上野啓司, 神田晶申, 「グラフェン／層状超伝導体 NbSe<sub>2</sub> 直接接合における超伝導近接効果」, 第77回応用物理学会秋季学術講演会, 朱鷺メッセ (新潟県新潟市), 2016年9月13-16日。
5. 友利ひかり, 林正彦, 吉岡英生, 渡邊賢司, 谷口尚, 大塚洋一, 神田晶申, 「局所1軸ひずみによるグラフェンへのギャップ生成」, 第77回応用物理学会秋季学術講演会, 朱鷺メッセ (新潟県新潟市), 2016年9月13-16日。
6. 矢部大輔, 鍵水勝秀, 園田大樹, 大塚洋一, 友利ひかり, 渡邊賢司, 谷口尚, 上野啓司, 神田晶申, 「層状超伝導体 NbSe<sub>2</sub> 薄膜の超伝導転移」, 第77回応用物理学会秋季学術講演会, 朱鷺メッセ (新潟県新潟市), 2016年9月13-16日。
7. 神田晶申, 「原子膜積層化により形成した超伝導システムの物性探索」, 科研費新学術領域「原子層科学」第7回領域会議, 産総研 (つくば), 2016年9月29-30日。
8. 矢部大輔, 鍵水勝秀, 園田大樹, 大塚洋一, 友利ひかり, 渡邊賢司, 谷口尚, 上野啓司, 神田晶申, 「層状超伝導体 NbSe<sub>2</sub> 薄膜の超伝導転移」, 第24回渦糸物理国内会議, あきた芸術村温泉ゆぼぼ (秋田県仙北市), 2016年11月28-30日。
9. 園田大樹, 矢部大輔, 鍵水勝秀, 大塚洋一, 友利ひかり, 渡邊賢司, 谷口尚, 高野義彦, 神田晶申, 「スコッチテープ法で得た Bi-2212 薄膜の電気伝導」, 第24回渦糸物理国内会議, あきた芸術村温泉ゆぼぼ (秋田県仙北市), 2016年11月28-30日。
10. 鍵水勝秀, 大塚洋一, 友利ひかり, 渡邊賢司, 谷口尚, 上野啓司, 神田晶申, 「グラフェン／層状超伝導体 NbSe<sub>2</sub> 接合における超伝導近接効果」, 第24回渦

- 糸物理国内会議，あきた芸術村温泉ゆぼぼ（秋田県仙北市），2016 年 11 月 28-30 日。
11. 神田晶申，「原子膜積層化により形成した超伝導システムの物性探索」，科研費新学術領域「原子層科学」第 8 回領域会議，東京大学駒場 II キャンパス，2017 年 1 月 24-25 日。
  12. Akinobu Kanda, “Strain Engineering in Graphene”，新学術領域「ハイブリッド量子科学」第 4 回領域会議、理化学研究所（埼玉県和光市）、2017 年 2 月 27 日～3 月 1 日。
  13. Hikari Tomori, Kazushi Nakamura, Naoki Hoshi, Akinobu Kanda, “Transport gap formation in strained graphene”，新学術領域「ハイブリッド量子科学」第 4 回領域会議、理化学研究所（埼玉県和光市）、2017 年 2 月 27 日～3 月 1 日。
  14. Kazushi Nakamura, Hikari Tomori, Naoki Hoshi, Akinobu Kanda, “Simplified estimation of crystallographic orientation of strained graphene by micro-Raman spectroscopy”，新学術領域「ハイブリッド量子科学」第 4 回領域会議、理化学研究所（埼玉県和光市）、2017 年 2 月 27 日～3 月 1 日。
  15. Hikari Tomori, Rineka Hiraide, Youiti Ootuka, Kenji Watanabe, Takashi Taniguchi, Akinobu Kanda, “Opening a Gap in Graphene Field Effect Devices with Periodic Uniaxial Strain”，第 52 回 フラーレン・ナノチューブ・グラフェン総合シンポジウム，東京大学本郷キャンパス（東京都文京区），2017 年 3 月 1－3 日。
  16. Kazushi Nakamura, Hikari Tomori, Naoki Hoshi, Akinobu Kanda, “Simplified estimation of crystallographic orientation of strained graphene by micro-Raman spectroscopy”，第 52 回 フラーレン・ナノチューブ・グラフェン総合シンポジウム，東京大学本郷キャンパス（東京都文京区），2017 年 3 月 1 日。
  17. 林正彦，吉岡英生，友利ひかり，神田晶申，「歪み導入グラフェンの電気伝導の理論」大阪大学豊中キャンパス(大阪府)，2017 年 3 月 17 日。
  18. 柴田倭宏，大塚洋一、超伝導ナノコンタクトにおける局所温度計測 IV、日本物理学会 2016 年秋季大会，金沢大学角間キャンパス(石川県金沢市)，2016 年 9 月 13 日。
  19. 青沼快，大塚洋一、希釈冷凍温度域磁化測定システムの開発その 2、日本物理学会 2016 年秋季大会，金沢大学角間キャンパス(石川県金沢市)，2016 年 9 月 13 日。
  20. 松本益明，一宮彪彦，井通暁，右近修治，大嶋孝吉，大塚洋一，川村康文，岸澤眞一，毛塚博史，小牧研一郎，近藤泰洋，桜井一充，下田正，真梶克彦，末元徹，

- 鈴木功, 瀬川勇三郎, 武士敬一, 遠山潤志, 長谷川修司, 林壮一, 深津晋, 松本悠, 味野道信、物理チャレンジ 2016 報告:IV. 第 2 チャレンジ実験問題、日本物理学会 2016 年秋季大会, 金沢大学角間キャンパス(石川県金沢市), 2016 年 9 月 13 日.
21. 武政健一, 金信弘, 武内勇司, 永田和樹, 笠原宏太, 八木俊輔, 若狭玲那, 大塚洋一, 美馬寛, 新井康夫, 倉知郁生, 羽澄昌史, 石野宏和, 吉田拓生, 広瀬龍太, 加藤幸弘, 池田博一, 和田武彦, 長勢晃一, 松浦周二、COBAND 実験のための Hf-STJ の研究開発 I、日本物理学会 2016 年秋季大会, 宮崎大学木花キャンパス(宮崎市), 2016 年 9 月 21 日.
22. 大塚洋一、堀江彩叶、田村啓、折りたたみグラフェンを利用した階段型磁場中の二次元電子系の電気伝導の研究、新学術領域研究「原子層科学」第 7 回領域全体会議、産総研共用講堂(つくば)、2016.9.29
23. 柴田倭宏, 大塚洋一、超伝導ナノコンタクトにおける局所温度計測 V、日本物理学会第 72 回年次大会, 大阪大学豊中キャンパス(大阪府), 2017 年 3 月 17 日.
24. 堀江彩叶, 田村啓, 大塚洋一、折り畳みグラフェンの磁場中における電気伝導、日本物理学会第 72 回年次大会, 大阪大学豊中キャンパス(大阪府), 2017 年 3 月 17 日.
25. Yuji Takeuchi, Shin-Hong Kim, Kenichi Takemasa, Kazuki Nagata, Kota Kasahara, Shunsuke Yagi, Rena Wakasa, Youiti Ootuka, Hirokazu Ikeda, Takehiko Wada, Koichi Nagase, Shuji Matsuura, Yasuo Arai, Ikuo Kurachi, Masashi Hazumi, Takuo Yoshida, Chisa Asano, Takahiro Nakamura, Makoto Sakai, Satoshi Mima, Kenji Kiuchi, H.Ishino, A.Kibayashi, Yukihiro Kato, Go Fujii, Shigetomo Shiki, Masahiro Ukibe, Masataka Ohkubo, Shoji Kawahito, Erik Ramberg, Paul Rubinov, Dmitri Sergatskov, Soo-Bong Kim, Development of Far-infrared Spectrophotometers based on Superconducting Tunnel Junction (STJ) for COBAND Experiment, 新学術領域研究「ニュートリノフロンティアの融合と進化」研究会 2016、ゆのくに天祥(石川県加賀市山代温泉) 2016 年 11 月 28~30 日.
26. Kenichi Takemasa, Shin-Hong Kim, Yuji Takeuchi, Kenichi Takemasa, Kazuki Nagata, Kota Kasahara, Shunsuke Yagi, Rena Wakasa, Youiti Ootuka, Hirokazu Ikeda, Takehiko Wada, Koichi Nagase, Shuji Matsuura, Yasuo Arai, Ikuo Kurachi, Masashi Hazumi, Takuo Yoshida, Chisa Asano, Takahiro Nakamura, Makoto Sakai, Satoshi Mima, Kenji Kiuchi, H.Ishino, A.Kibayashi, Yukihiro Kato, Go Fujii, Shigetomo Shiki, Masahiro Ukibe, Masataka Ohkubo, Shoji Kawahito, Erik Ramberg, Paul Rubinov, Dmitri Sergatskov, Soo-Bong Kim, R&D status of Hf-STJ, 新学術領域研究「ニュートリノフロ

ンティアの融合と進化」研究会 2016、ゆのくに天祥(石川県加賀市山代温泉)2016年11月28～30日.

27. Rena Wakasa, Shin-Hong Kim, Yuji Takeuchi, Kenichi Takemasa, Kazuki Nagata, Kota Kasahara, Shunsuke Yagi, Youiti Ootuka, Hirokazu Ikeda, Takehiko Wada, Koichi Nagase, Shuji Matsuura, Yasuo Arai, Ikuo Kurachi, Masashi Hazumi, Takuo Yoshida, Chisa Asano, Takahiro Nakamura, Makoto Sakai, Satoshi Mima, Kenji Kiuchi, H.Ishino, A.Kibayashi, Yukihiro Kato, Go Fujii, Shigetomo Shiki, Masahiro Ukibe, Masataka Ohkubo, Shoji Kawahito, Erik Ramberg, Paul Rubinov, Dmitri Sergatskov, Soo-Bong Kim, ニュートリノ崩壊光探索に向けた極低温増幅器の開発と現状, 新学術領域研究「ニュートリノフロンティアの融合と進化」研究会 2016、ゆのくに天祥(石川県加賀市山代温泉)2016年11月28～30日.
28. Shunsuke Yagi, Shin-Hong Kim, Yuji Takeuchi, Kenichi Takemasa, Kazuki Nagata, Kota Kasahara, Rena Wakasa, Youiti Ootuka, Hirokazu Ikeda, Takehiko Wada, Koichi Nagase, Shuji Matsuura, Yasuo Arai, Ikuo Kurachi, Masashi Hazumi, Takuo Yoshida, Chisa Asano, Takahiro Nakamura, Makoto Sakai, Satoshi Mima, Kenji Kiuchi, H.Ishino, A.Kibayashi, Yukihiro Kato, Go Fujii, Shigetomo Shiki, Masahiro Ukibe, Masataka Ohkubo, Shoji Kawahito, Erik Ramberg, Paul Rubinov, Dmitri Sergatskov, Soo-Bong Kim, R&D Status of Nb/Al-STJ with SOI cryogenic preamplifier, 新学術領域研究「ニュートリノフロンティアの融合と進化」研究会 2016、ゆのくに天祥(石川県加賀市山代温泉)2016年11月28～30日.
29. 梅本匡敏、森下將史、「ヘリウム単原子層薄膜における Domain Wall の流動性」, 日本物理学会 2016 年秋季大会(金沢大学, 2016 年 9 月 14 日).
30. 梅本匡敏、森下將史、「グラファイト上ヘリウム4薄膜の低温熱容量」, 日本物理学会 第72回年次大会 (大阪大学, 2017 年 3 月 18 日).

<集中講義> なし

#### <外部資金>

1. 神田晶申：科学研究費補助金 新学術領域研究 「原子層積層化により形成した超伝導システムの物性探索」(H28～H29)、直接経費 280 万円
2. 神田晶申：科学研究費補助金 新学術領域研究 「電荷／スピンハイブリッド量子科学の研究」(H27～H30)、直接経費 1,120 万円
3. 神田晶申：(共同研究受入) 戦略的創造研究推進事業さきがけ(科学技術振興機構)「ひずみ誘起ゲージ場を用いた単原子層膜の伝導制御とエレクトロニクス応用」(友利ひかり)(H26～H30)、直接経費 501 万円

4. 大塚洋一：科学研究費補助金 新学術領域研究「折り畳みグラフェンを利用した階段型磁場中の二次元電子系の電気伝導の研究」(H26-27)、直接経費 140 万円



## IX-6. 構造科学グループ

教授 西堀 英治  
教授 Iversen, Bo (海外教育研究ユニット招致)  
助教 笠井 秀隆  
助教 Hathwar, Venkatesha Rama (海外教育研究ユニット招致)  
大学院生 4 名  
学類生 1 名

### 【 1 】 スピンコート高分子膜の生成プロセス可視化の研究

スピンコートによる高分子膜生成は、有機太陽電池を含めた幅広い高分子を利用したデバイス開発等に広く用いられている。この膜の品質を高めるには、スピンコートプロセスにおいて高分子の配向の変化を調べ、制御することが望まれる。

本研究では、poly(styrene-*b*-2vinylpyridine) (PS-*b*-P2VP) 薄膜のスピンコートによる成膜過程を *in situ* grazing incidence small angle X-ray scattering (GISAXS) によって調べた。

SPring-8 の BL03XU ビームラインで 10~100 ミリ秒間隔で製膜中の回折パターン変化を調べたところ、製膜開始後 1000~2000 ミリ秒後領域に結晶相と思われるピークが現れることが分かった。このピークは、3000 ミリ秒では完全に消失することも分かった。このことは、製膜で溶媒が蒸発する途中に結晶的に高分子が配列する領域があることを示している。

我々のグループで、高分子結晶用の回折パターン解析ソフトを作成し、回折ピークの配列を調べたところ、途中の領域で高分子が体心格子に配列することが明らかになった。

### 【 2 】 多機能、多色発光を示す Zn 錯体の粉末 X 線回折による構造決定

東京大学西原研究室のグループにより、紫から青、緑、黄色までの様々な発光を、溶媒を変えるだけで示す新しい Zn を含む化合物が合成された。この物質については、その機能性より構造が望まれたが、単結晶試料を得ることができず、構造決定が全くできていなかった。我々のグループで開発してきた遺伝的アルゴリズムを用いた構造決定法を利用し、この物質の構造決定を行った。

試料を直径 0.4mm φ のキャピラリーに詰め、SPring-8 の BL02B2 ビームラインで粉末回折データを測定した。回折線のうち低角から 19 本を利用することで、C2/c 空間群をもつ monoclinic の結晶系であることが分かった。遺伝的アルゴリズムによる構造決定で初期構造を決定した。最終的に Rietveld 解析で  $d > 0.94 \text{ \AA}$  の分解能で構造を決定することに成功した。(図 1) 結晶構造を調べたところ、分子内に mirror が存在し、対称性の高い配列を持つことも分かった。(図 2)

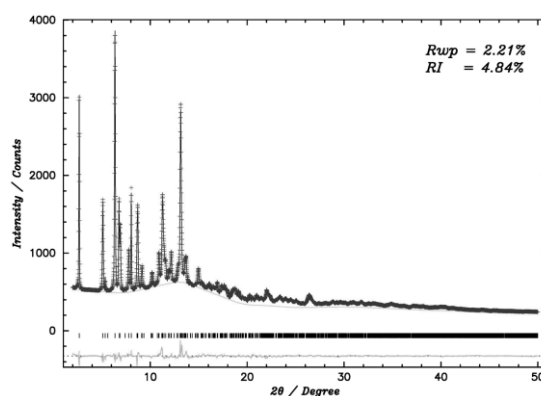


図1 Rietveld 解析の結果

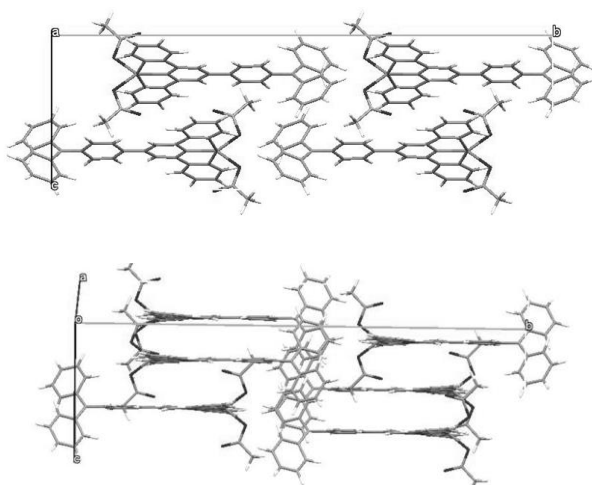


図2 結晶構造模式図

### 【 3 】超高分解能粉末 X 線回折データによる、金属六ホウ化物の $\pi$ 電子可視化

分子性結晶や低次元化合物において、分子の持つ  $\pi$  電子は、電気伝導など物性に重要な役割を果たすことはよく知られている。エネルギー的に、フェルミ面近傍に位置する  $\pi$  電子の空間分布は軟 X 線などを利用して配向を見る研究はあるものの実験的に観測することは難しい。

機能性材料の物質科学において、同一の構造を持ち、機能・物性が異なる物質群は多数存在する。例えば、超電導を示す金属酸化物などはその典型例であり、わずかな組成の違いで、ほぼ同じ構造をとるにも関わらず、金属、絶縁体、超伝導体が現れる。この違いを生み出す電子は、通常、全体の数%以下のわずかな電子であることが多く、その実験的観測は困難である。

本研究では、同一の構造を持ち、金属的な物性を示す金属六ホウ化物  $\text{LaB}_6$  と半導体の物性を示す  $\text{BaB}_6$  の精密電子密度分布解析から、物性の違いに起因する電子密度の検出を行った。理論的には、 $\text{B}_6$  クラスタを分子として捉えた際のクラスタ間の  $\pi$  電子が金属伝導を

担うと考えられており、 $\pi$  電子の空間分布の実験的可視化にもつながっている。

SPring-8 にて  $d > 0.2 \text{ \AA}$  の知りうる限り世界最高分解能の粉末 X 線回折データを  $\text{LaB}_6$  と  $\text{BaB}_6$  について同一条件で測定した。 $d > 0.25 \text{ \AA}$  を超えた領域では、一般の構造解析に利用される原子散乱因子の近似が破綻し通常のソフトウェアを利用した解析ができない。本研究では、国際結晶学連合(IUCr)の電荷、スピン、運動量密度委員会の委員長 P. Macchi 博士の力を借りて、相対論的原子散乱因子のデータとそれを利用可能にした多極子展開解析ソフトウェア XD2006 を利用して解析した。

$\text{LaB}_6$  と  $\text{BaB}_6$  の電子密度分布では、イオンの金属イオンと、 $\text{B}_6$  分子間に強い共有結合、 $\text{B}_6$  分子内に分子間より弱い共有結合電子が観測された。一方で両者の違いについては全電子密度分布および化電子密度分布では検出できなかった。そこで  $\text{LaB}_6$  と  $\text{BaB}_6$  の価電子密度の差密度を求めた。その結果、 $\text{B}_6$  分子間に分子をつなぐ方向に垂直にピークの存在が確認された。第一原理計算で求めた電子密度分布との比較から、この電子が  $\text{LaB}_6$  に存在する  $\text{B}_6$  分間の  $\pi$  電子であることが分かった。同一構造を持つ物質の超高分解能データの精密構造解析の差分により、単位格子 100 電子中 1 電子の空間分布を検出できることを示した。

#### 【 4 】 SPring-8 パートナーユーザー活動

SPring-8 において、粉末回折ビームライン BL02B2 および単結晶 X 線回折ビームライン BL02B1 でパートナーユーザーに指定され活動を行っている。装置の高度化とユーザー利用の拡大が主目的である。粉末回折ビームラインでは、精密データ測定法の開発に貢献を続けている。単結晶回折ビームラインでは、低温高圧実験装置の立ち上げと、複数の利用研究の支援を行った。

#### 【 5 】 海外教育研究ユニット招致

デンマーク・オーフス大学材料結晶学センター (Center for Materials Crystallography: CMC) のセンター長 Bo Iversen 教授を筑波大学海外教育研究ユニット招致の PI として承知し、研究を開始した。CMC には、笠井秀隆助教が国際テニュアトラック教員として派遣されている。また、本年度 5 月には Venkatesha Rama Hathwar 助教が着任した。SPring-8 を利用した研究で成果が上がり始めている。また複数の共同研究を新規に開始した。また、11 月に、CMC から 3 名、ドイツから 3 名、J-PARC、SPring-8 から研究者を招き、筑波大学で国際ワークショップを行った。

#### < 論文 >

(査読論文)

1. Yasuyo Ogino, Tetsuro Kusamoto, Yohei Hattori, Masaki Shimada, Mizuho Tsuchiya, Yoshinori Yamanoi, Eiji Nishibori, Kunihisa Sugimoto, and Hiroshi Nishihara. Solvent-Controlled Doublet Emission of an Organometallic Gold(I) Complex with a Polychlorinated Diphenyl(4-pyridyl)methyl Radical Ligand: Dual Fluorescence and Enhanced Emission Efficiency. *Inorg. Chem.*, (2017), 56, 3909-3915; DOI:

10.1021/acs.inorgchem.6b02864

2. Takamasa Tsukamoto, Risa Aoki, Ryota Sakamoto, Ryojun Toyoda, Masaki Shimada, Yohei Hattori, Mizuki Asaoka, Yasutaka Kitagawa, Eiji Nishibori, Masayoshi Nakano and Hiroshi Nishihara. A simple zinc(II) complex that features multi-functional luminochromism induced by reversible ligand dissociation. Chem. Commun., (2017),53, 3657-3660; DOI: 10.1039/C6CC10190A, Communication
3. H. Kasai, and E. Nishibori, Spatial distribution of electrons near the Fermi level in the metallic LaB<sub>6</sub> through accurate X-ray charge density study. Sci. Rep. 7, 41375; doi: 10.1038/srep41375 (2017).
4. V. R. Hathwar, M. K. Thomsen, M. A. H. Mamakhel, M. O. Filso, J. Overgaard, B. B. Iversen, Electron Density Analysis of the "O-O" Charge-Shift Bonding in Rubrene Endoperoxide, J. Phys. Chem. A, (2016),120,7510-7518
5. Sist, E. M. J. Hedegaard, S. Christensen, N. Bindzus, K. F. F. Fischer, H. Kasai, K. Sugimoto, B. B. Iversen, Carrier concentration dependence of structural disorder in thermoelectric Sn<sub>1-x</sub>Te. M. IUCRJ (2016), 3, 377-388.
6. Satomi Ogura, Yuki Idobata, Biao Zhou, Akiko Kobayashi, Rina Takagi, Kazuya Miyagawa, Kazushi Kanoda, Hidetaka Kasai, Eiji Nishibori, Chikatoshi Satoko, Bernard Delley, Antiferromagnetic Ordering in the Single-Component Molecular Conductor, [Pd(tmdt)<sub>2</sub>]. Inorg. Chem. 2016, 55, 7709-7716.
7. Mizuho Tsuchiya, Ryota Sakamoto\*, Masaki Shimada, Yoshinori Yamanoi, Yohei Hattori, Kunihisa Sugimoto, Eiji Nishibori, Hiroshi Nishihara\*. Bis(dipyrinato)zinc(II) complexes: emission in the solid state. Inorg. Chem.(2016) 55, 5732-5734.
8. K. Kato, H. Kasai, A. Hori, M. Takata, H. Tanaka, S. Kitagawa, A. Kobayashi, N. Ozawa, M. Kubo, H. Arikawa, T. Takeguchi, M. Sadakiyo, M. Yamauchi, Superionic Conduction in Co-Vacant P2-NaxCoO<sub>2</sub> Created by Hydrogen Reductive Elimination, Chemistry-An Asian Journal (2016), 11, 1537-1541
9. Hiroki Ogawa\*, Mikihiro Takenaka, Tsukasa Miyazaki, Keisuke Shimokita, Akihiko Fujiwara, Eiji Nishibori, Masaki Takata, Direct observation of spin-coating process in PS-b-P2VP thin films. Macromolecules (2016), 49, 3471-3477.F.

#### <国際会議>

1. Eiji Nishibori, Hidetaka Kasai, "Charge density studies of metallic and semiconductor hexaborides." AnalytiX-2017, Fukuoka, Japan, 2017.03.22 (oral)
2. Eiji Nishibori, Hidetaka Kasai, Takayuki Shibata, Wataru Kobayashi, Yutaka Moritomo, "X-ray charge density study of positive electrodes for secondary battery. " AsCA2016, Hanoi, Vietnam, 2016.12.04-07(poster)
3. Hidetaka Kasai, "Electron Density of a Layered Transition Metal Dichalcogenide", ECM-30, Basel, Switzerland, 2016. 08.26-09.01.(oral)
4. Hidetaka Kasai, "Advanced Charge Density Studies of TiS<sub>2</sub> and LaB<sub>6</sub> Using High-Resolution X-Ray Diffraction Data" 2017 TMS-CENIDE-NTHU Joint Symposium on Nanoscience and Nanotechnology, Tsukuba,

Japan, 2017.03.10-11

<国内会議>

1. 小沢帆太郎・西堀英治・柴田恭幸・守友浩「プルシアンブルー類似体のナノ領域原子配列解析法の開発」平成 28 年度 日本結晶学会年会、水戸、2016.11.17-18
2. Lorraine A. Malaspina・Simon Grabowsky・杉本邦久・西堀英治「Towards precise and accurate determination of hydrogen positions with X-ray diffraction data utilizing hydrogen maleate salts」平成 28 年度 日本結晶学会年会、水戸、2016.11.17-18
3. 唐津秀一・西堀英治・関真一郎・十倉好紀「スキルミオン発現物質  $\text{Cu}_2\text{OSeO}_3$  の放射光 X 線回折による構造研究」平成 28 年度 日本結晶学会年会、水戸、2016.11.17-18
4. 中村篤・西堀英治・末國晃一郎・田中博己・高島敏郎「熱電材料テトラヘドライトの Sb lone-pair 電子の観測」平成 28 年度 日本結晶学会年会、水戸、2016.11.17-18

## X プラズマ研究グループ

教授	今井 剛、中嶋洋輔、坂本瑞樹
准教授	吉川正志、假家 強、南龍太郎
講師	小波蔵純子、平田真史、沼倉友晴
助教	池添竜也
シニアスタッフ	大川和夫
大学院生	20名
学群学生	13名

### 共同研究者

准教授	片沼伊佐夫、江角直道（物理工学域）
研究員	市村 真、東郷 訓、飯島貴朗

### 研究協力者

技術専門官	杉山昭彦
技術専門職員	和所保規、遠藤洋一、嶋 頼子、千勝雅之
研究支援推進員	岡崎 昇
大学院生	0名
学群学生	5名

### 【1】大学法人化に向けての、当該プラズマグループの研究の方針・基本理念

当プラズマ研究グループでは、平成16年度から実施された大学の法人化に伴う筑波大学の「中期計画」に則り、筑波大学が世界に広く貢献できる優れた研究成果の創出の一端を担うことを使命として、下記のように研究の新展開を図ることを基本方針・基本理念としている。

法人化後の新制度のもと、グループ教職員学生一丸となり研究に邁進し、当該グループとして、数理物質科学研究科の中期目標・中期計画の推進はもとより、国立大学法人筑波大学第Ⅲ期中期目標・中期計画の「4 世界トップレベルの研究の推進に向けての目標を達成するための措置」として、「25 国内外の大学等の県之間との連携の強化として双方向型共同研究」が、第Ⅱ期に引き続き、明記されていることは、本学のプラズマ研究の歴史を拓いた当該グループとしても、その責務を重く受け止め、応分の貢献を行うことを目指すことは、法人化後の一貫した研究姿勢である。

また、上記「筑波大学 中期計画」等に基づき、平成16年度から新たに立ち上った双方向型共同研究の枠組みを背景に、第Ⅱ期、第Ⅲ期中期計画においても、核融合科学研究所と、筑波大学、京都大学、大阪大学、九州大学の4大学を中心に、近年新たに加わった東北大学、富山大学、更に講座単位の各大学との、共同研究を積極的に推進し、普遍性の高い学術成果と、それに基づく核融合実用への基盤研究を進めており、第Ⅲ期中期計画の初年である平成28年度においても、更に双方向型共同研究の深化と国内外の共同研究の強化に務めている。

学内にあっては、プラズマ研究センターをはじめとする連携協力研究・教育、その他の

学内の関連グループとの共同研究、更には国内・国外のプラズマ研究グループとの緊密な連携・研究協力の基に、顕著な成果の創造・推進を図ることを基本理念・基本目標・基本方針に掲げ、教職員学生一丸となり、日夜努力を積み重ねている。

## 【2】プラズマ研究の研究目的と意義・位置づけ

物理学専攻のプラズマ実験グループが主体となって研究しているプラズマ研究センターでは、「プラズマ物理学、特に電位／電場によるプラズマ閉じ込めの向上、並びにプラズマの高性能化に係る教育・研究」等を行うことが、中期計画・新しい筑波大学規則・規定に則した研究目的の柱である。本研究目的は、核融合実用に必要不可欠で喫緊の課題である「数億度の高性能プラズマと常温壁の両立の理工学研究」を行い、プラズマ物理・核融合研究の進展に本質的且つ普遍的な貢献を行うという、プラズマ核融合分野全体に広く役立つ、重要な位置づけを持つ。

この研究は、延いては国際熱核融合実験炉 ITER の心臓部である、核融合炉心プラズマの高閉じ込めHモードや、環状型プラズマのエネルギー閉じ込めの改善で注目を集めているドリフト波などの揺動、内部輸送障壁 (ITB) の形成機構とその効果の究明、また、核融合炉の成否を決めるとも言える境界／ダイバータプラズマの制御など先端的な極めて重要な研究課題という意義・位置づけを併せ持っている。これらの重要課題に対し、装置端部を持つミラー型実験装置は、電子を選択的に電子サイクロトロン加熱により高温・高速化し、ミラー端部に対しマイナスの電荷を持つ電子フローの一部を制御し、これによりプラズマ内部のプラス電荷を持つイオンの過不足による電位／電場を自在に形成・制御が可能、また、ミラー特有の端損失の制御という、「ミラーにしかできないこと、ミラーならば他形式プラズマ装置にも普遍的な物理機構解明を含めてできること」、こうしたミラー装置独自の特色を活かした研究を推進している。

これらの研究を具体的に推進するために、ジャイロトロンやビームプローブといった世界最先端の加熱機器や計測機器の開発研究を進めるとともに、それらを用いた研究により、上記で述べた研究課題に関する物理機構解明に不可欠な、プラズマ半径方向（径方向）の電位分布制御、電場分布の精密な測定による輸送研究、また、ミラー端部で発生する高熱流束によるダイバータ模擬研究が可能となり、学術普遍性の高い、極めて重要な本研究課題の更なる究明を進めている。

当プラズマグループの電位閉じ込めの研究は、インスブルックで開催された 国際連合の原子力部門である国際原子力機関 (IAEA) の「第7回プラズマ物理並びに制御核融合研究に関する国際会議」において、当研究グループが世界で初めて電位閉じ込めの有効性を実証した、先駆的な実績を持つテーマであることは、斯界では広く知られており、かつて米国のサイエンス誌の表紙を筑波大学のガンマ6装置が飾ったように、先駆的な電位閉じ込め研究の成果を挙げてきた。また、最近では、電位制御の強力なツールであるミリ波帯のマイクロ波源、ジャイロトロンの開発研究も進展し、当センターのみならず、核融合科学研究所の大型ヘリカル装置 (LHD) にも大きく貢献し、国際原子力機関 (IAEA) の「第23回～26回核融合エネルギー国際会議」で高く評価され、九州大学やプリンストン大学など、他大学や海外との共同研究へと発展しつつある。また、これらの成果の新展開とも言える境界プラズマの研究では、ITERの定常熱流束密度レベルを達成し、「第24回核融合エネルギー国際会議」等で斯界の注目を浴び、これを応用した共同研究が大きく進展している。

国際熱核融合実験炉 ITERをはじめ、トカマク・ヘリカル型プラズマ閉じ込め形式をも含む、核融合実用に必要不可欠な研究課題という意義・位置づけを持った研究課題を、プラズマグループは推進し、発展・展開を見ている。すなわち、輸送障壁形成の物理機構の解明と境界プラズマ物理の解明は、核融合装置の実用的経済的なコンパクト化・高信頼化・核融合プラズマの定常制御のために、必要欠くべからざる研究内容であるという意義を持つばかりでなく、プラズマ特性の学術研究・応用研究という観点からも、大学の研究の在り方として最適な学術研究内容とその意義、研究規模であると位置づけられる。

### 【3】研究成果の概要

#### (1) はじめに

物理学域プラズマグループでは、大学の第Ⅱ期中期目標・中期計画の方針に沿って双方向型共同研究を充実し、大型タンデムミラー装置 GAMMA 10/PDX を用いた高性能プラズマと低壁熱負荷の両立をめざして「開放端磁場と電位／電場効果を活かしたプラズマ輸送制御と境界プラズマ現象の解明研究」を進展させている。第Ⅲ期の初年度である平成 28 年度より、双方向型共同研究の更なる質的向上と高度化を目指し、原型炉へ向けた研究として、開放端プラズマとなるトーラス系のスクレープオフ層やダイバータ・プラズマを模擬するとともに、境界プラズマの様々な現象、物理機構解明とそれを通じた熱負荷の軽減法とプラズマ壁相互作用の研究を実施している。平成 27 年度までに、ITER の定常熱負荷相当  $10 \text{ MW/m}^2$  を上回る  $15 \text{ MW/m}^2$  の端損失熱流束を達成し、端損失プラズマ流の特性を詳細に調べるとともに、本格的なダイバータ模擬実験に向けた V 字ターゲット板を持つ閉構造ダイバータ模擬モジュール (D-モジュール) の実験を開始し、水素ガスや希ガスの入射による非接触プラズマ制御に向けての実験を進展させてきた。GAMMA 10/PDX が、これまでにダイバータ模擬の基礎実験を担ってきた小型線形装置と比べて特徴的な点は、高磁場下において高温のイオン束を発生・制御できることにあり、この特徴を活かしてダイバータ開発において最大の課題である非接触プラズマの制御に関するイオン温度依存性等のデータ取得が可能となっている。これらの模擬実験の基盤となるプラズマ生成に関して、主として用いられる ICRF 加熱アンテナ系やガス入射方法を工夫することにより、端損失イオン束増大の実験を進めている。

プラズマグループのもう一つの特徴である大電力ジャイロトロンに関して、14GHz から 300GHz の広い周波数範囲における MW レベルの開発を進展させている。これまでに、双方向型共同研究における九大応用力学研究所とのセンター間連携を推進し、同研究所の球状トカマク装置 QUEST での電流駆動実験に大きく貢献してきた。また、プリンストン大学との国際共同研究に関しても、着実に進展させている。GAMMA 10/PDX の実験においては、大電力長パルスジャイロトロンを用いた高熱流束生成に加えて、高繰り返しパルス運転から ELM 熱負荷の模擬による PWI に関するデータ取得を目指している。さらに、イオン流束等の増大と合わせて、京都大学、九州大学との連携を進め、プラズマ照射に関する成果も期待できる。

大学の第Ⅲ期中期目標・中期計画の初年度である平成 28 年度は、これまで精力的に進めてきたダイバータ模擬実験とジャイロトロン開発研究という大きな 2 つの柱を元に、各大学の研究者の多様な視点、豊富な経験と双方向型共同研究の特徴を活かした研究に加え、全国の複数のセンターが連携するネットワーク型の双方向型共同研究もさらに発展させ、核融合炉に向けた必須、かつ緊急の課題を進展させることを本研究の目的とした。

#### (2) ダイバータ模擬実験

図 1 は、GAMMA 10/PDX 全体図、西エンド部の真空容器と設置された昇降式のダイバータ模擬実験モジュール (D モジュール) の概略図を示している。図 2 の写真で示すように、SUS 製の容器の前面から端損失プラズマ流が導入される D モジュール内部には、V 字型の 0.2mm 厚のタングステン製ターゲット板及び、前面の流入するプラズマを冷却し、非接触化を起こす為のガス導入

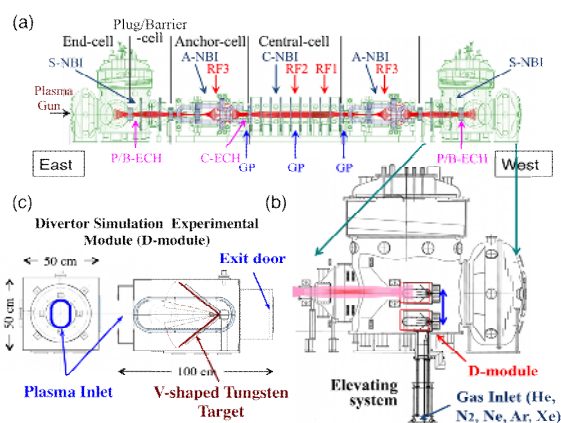


図 1 (a) GAMMA 10/PDX 全体図、(b) 西側エンド部に設置されたダイバータ模擬実験モジュール (D モジュール) の模式図。昇降機構により、従来の配位でのミラー実験が可能である。(c) D モジュールの概略図。



系が組み込まれている。また、V字のターゲット板は、電気ヒータにより最大300℃まで温度を上昇させることができる。ターゲット板には、電子温度、密度計測のための多チャンネル静電プローブや多チャンネルカロリメーターが取り付けられている。また、図中に示したように、水素ガスや希ガス導入等による放射冷却や不純物輸送などの周辺プラズマを模擬したプラズマ研究やPWI研究が、高速イオンゲージ（ASDEX Gauge）や各種分光器、高速カメラ等により制御された形で可能となっている。

平成26年度から28年度にかけて、放射冷却用の不純物ガスとして様々な希ガスや新たに窒素ガスを用い、それぞれのプラズマ冷却効果や非接触プラズマ形成を目差した、イオン束、熱流束の低減効果について検証した。図3は、ガス入射時にDモジュール内V字ターゲットのコーナーギャップ間に設置しているプローブとカロリメータによって測定されたイオン束と熱流束およびターゲットの奥側に設置されたプローブで測定された電子温度のDモジュール内ガス圧依存性を示している。図3(a), (b)から、Xeガスが他のガスに比べて熱流束及びイオン束の低減に効果的であり、図3(c)に示すように電子冷却にも最も強い効果を現す事が判った。また、N<sub>2</sub>ガスについては、Arガスとほぼ同等の効果を示しているが、低圧力領域(<2Pa)では、Arよりも電子冷却効果が良好である結果も得られた。以上のように様々な放射冷却に有望なガスについて詳細な結果が得られ始めており、将来のダイバータ運転への有効な知見が得られるものと期待される。

図4はターゲット板温度を上昇させた場合の水素ガス導入時のH $\alpha$ 線強度イメージを高速カメラで観測したものである。ガス供給量（プレナム圧）の増加とともにH $\alpha$ 線強度が増加している。さらに、水素ガス供給なし(0 mbar)も含めて、各ガス供給量に対して、高温ターゲットの方が室温ターゲットに比べてH $\alpha$ 線強度が空間全体にわたり高くなっていることが明らかとなった。ターゲットの高温化により、リサイクリング過程で励起原子の生成が促進されることが示唆される。

高周波波動加熱による粒子束の増強については、東西両アンカー部への高周波入射に加え、西バリア部への高周波入射や各アンテナへの入射周波数、位相調整によるエンド部への粒子束、熱流束への影響を調べた。更にセンタラル部加熱用の2つのアンテナへ供給する回路の改良を行い、発振器出力を2分岐しても以前と同等のプラズマ加熱が可能であることを確認した。これにより、同時に使用可能な高周波アンテナが増え、各部への高周波入射により得られた幾つかの知見を複合的に検証する準備が整った。

ECH入射による高熱流束実験では、ICRF加熱されたプラズマに対して5msの短パルス入射によるELM模擬の実験を行っている。今年度春に西プラグ部のECHアンテナを改造し、軸上でマイクロ波強度を2倍にする改良が行われ、端部の熱流束強度は23MW/m<sup>2</sup>まで上昇

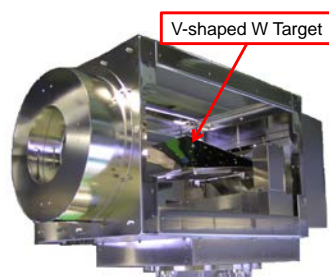


図2 Dモジュールの写真。

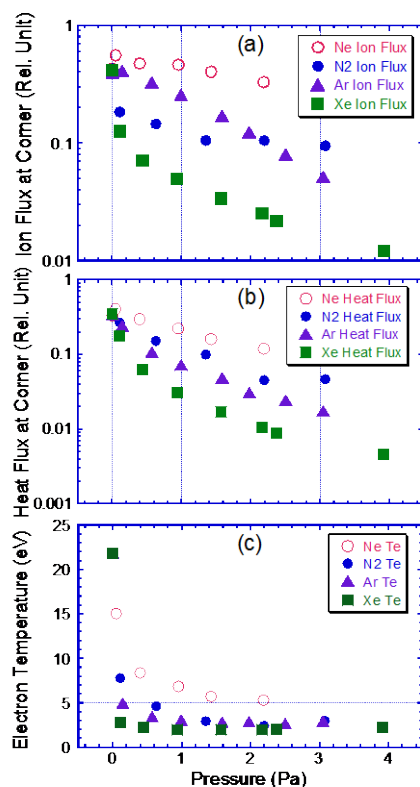


図3 Dモジュール内プラズマパラメータの導入不純物ガス圧依存性 (a) V字ターゲットコーナー部のイオン束、(b) 熱流束、(c) ターゲット奥側(probe#1)による電子温度

した。その後、夏期の大気開放作業時に東西プラグ部のアンテナが整備され、両者の同時ECH加熱によって、端部の熱流束が $30\text{MW/m}^2$ まで到達した。今後、開発中のMWクラスのジャイロトロンを使用することにより、 $50\text{MW/m}^2$ 以上の熱流束生成が期待される。

### (3) マルチパストムソン散乱計測システム及びエンド部トムソン散乱計測システム

平成21年度からNIFS等との共同研究を活用して導入した高精度トムソン散乱計測システムの開発をさらに進めている。特に、エンド部におけるダイバータ模擬実験で重要な低密度、低温度の電子温度測定を高精度にすることを目指している。昨年度までに6パス以上のマルチパス・トムソン散乱信号を安定して取得することができるマルチパス・システムの改良を行ってきたが、本年度は密度校正のためのガス散乱実験を行い、パス毎の密度計測を可能とした。本マルチパス・システムをプラズマ電子温度計測、電子密度計測に適用した結果を図5に示す。6パスのトムソン散乱信号の積分値は、シングルパスの信号積分値の約5倍程度あり、測定した電子温度は、 $35 \pm 1 \text{ eV}$  となり、シングルパスで測定した電子温度  $39 \pm 3 \text{ eV}$  に比べ測定精度が上昇している。電子密度については、マルチパスの積分値では、 $(1.8 \pm 0.6) \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$  となり、シングルパスでの計測値  $(2.1 \pm 0.7) \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$  よりも改善した。

一方、エンド部ダイバータ模擬部の電子温度、密度計測を目的としてエンド部トムソン散乱計測システムの開発を行った。後方  $160^\circ$  散乱を使用し、真空容器内に凹面ミラー、光ファイバーを設置し集光光学系を構築した。ポリクロメーターは、低温測定用に特別に開発したものを使用し、光学システムの確認のためガス散乱実験まで行った。しかし、迷光の影響が大きいためレーザーコリメートレンズの配置、ビームダンプの位置の調整等が必要であった。

### (4) 大出力長パルスジャイロトロンの開発

筑波大学の大きな特徴である大電力ジャイロトロンに関しては、これまでのNIFS、九大等との共同研究及びQSTとの連携研究をより強化し、 $14\text{-}300\text{GHz}$  と周波数範囲を大きく拡張し開発を進めている。平成28年度では、 $28/35\text{GHz}$  の2周波数ジャイロトロンの製作において順調な進展があった。 $28\text{GHz}$  帯の2号管となる同2周波ジャイロトロンは、2016年6月に製作を完了し、性能評価試験を開始した。

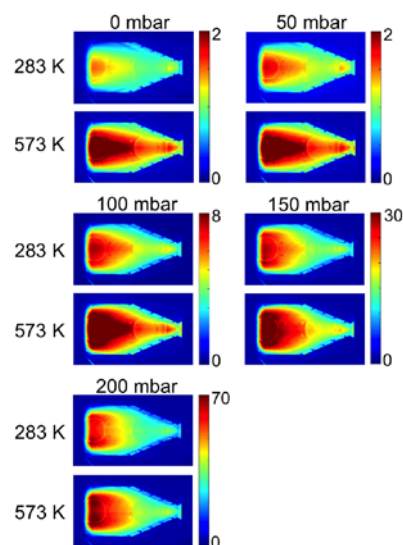


図4 ターゲット板温度上昇実験におけるH $\alpha$ 線強度イメージの水素導入圧力依存性

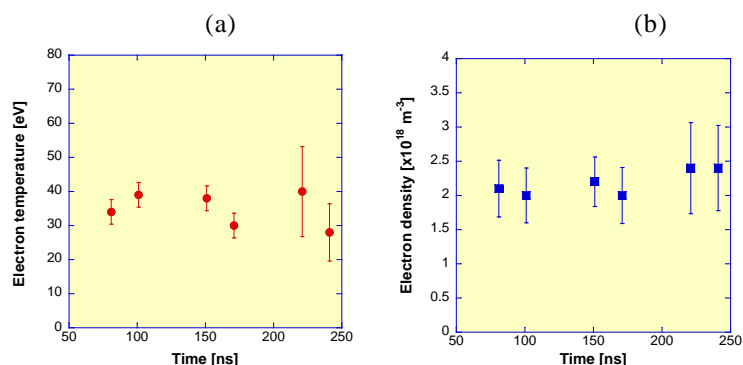


図5 (a) マルチパス・トムソン散乱計測システムによって測定した高速時間分解電子温度、(b) 高速時間分解電子密度測定結果

図6に出力窓に取付けた短パルス用 SiC ダミーロードを用いて測定した RF 出力と効率のビーム電流依存性を示す。図から判るように周波数 28.045GHz において 1.27MW のガウス状ビーム出力が得られた。又、34.83GHz において、0.48MW のガウス状ビーム出力も確認した。RF 出力ビームの位置は、28GHz、35GHz 出力とも出力窓中心にあり、RF 伝送系に問題が無いことが確認された。また 28GHz 発振における、RF 出力の空洞共振器磁場強度に対する依存性、RF 出力のアノード電圧に対する依存性を取得し、大きな問題が無いことを確認した。本2周波数ジャイロトロンは、発振相互作用を終えた後の電子ビームのエネルギーを回収する電位降下型コレクタ (CPD) を採用している。図7にビーム電流  $I_k=25.5A$  における CPD 電圧特性を示す。CPD 電圧  $V_{cpd}$  の増加と共に発振出力は減少しているが、エネルギー回収により  $V_{cpd}=30kV$  において、目標の総合効率  $\eta_t=50\%$  を達成した。

筑波大学と九州大学間のセンター間連携研究に基づき、筑波大学で開発した 28GHz-1MW ジャイロトロンを九州大学の QUEST 装置に適用しプラズマ実験が行われている。今年度の QUEST 実験に先立ち、ジャイロトロンの再調整とエージングを実施した。エージングは、整合器 (MOU) 出口のコルゲート導波管にテフロンチューブのダミーを接続し、 $\sim 300kW$  でパルス幅 3.6 秒まで行った。また、QUEST プラズマ実験では、九州大学で新たに開発された可動式ランチャーシステムやプラズマ調整等により、これまでの 1/2 程度のジャイロトロン出力で、これまでの記録を超える 70kA の無誘導プラズマ電流の駆動が達成された。プラズマ電流はパルス幅とともに増加しており、更なる電流増加が期待され、センター間連携研究の着実な進展と考えられる。

#### (5) 成果発表等

平成 28 年度には、平成 23 年度から筑波大学およびつくば地区で毎年開催している全国のダイバータに代表される境界領域プラズマ、壁材料等に係る多く研究者が参加した研究会として、7 月にプラズマ研究シンポジウムを核融合エネルギーフォーラムダイバータ研究開発ワーキンググループの第 10 回会合との合同で行い、参加者も約 70 名と盛況であった。11 月に開催されたプラズマ・核融合学会第 33 回年会では 40 件の講演を行った。また、同会議では、センターにおいて現在検討している将来計画を議論するインフォーマルミーティングを主催し、広く核融合コミュニティーに向けて発信した。国際会議では、8 月にロシア連邦ノボシビルスクで開催された第 11 回プラズマ閉じ込めの為の開放磁場系国際会議において、基調講演 1 件、招待・レビュー口頭講演 6 件を含む全 15 件の発表を行い、次回会議は筑波で開催することが決定された。11 月に開催された IAEA の主催する核融合エネルギー会議では、口頭発表 1 件とポスター発表 4 件の講演を行った。上記国際会議を含む国際発表は 43 件、国内の会議は全 76 件に達し、学術雑誌では 35 編の発表を行った。

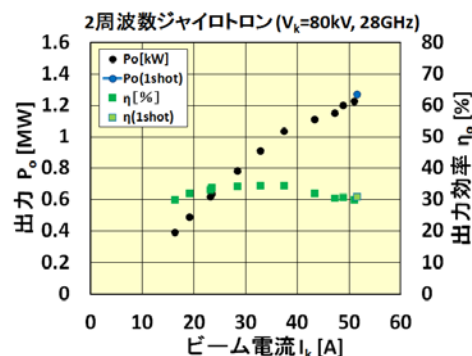


図6 28GHz 出力と効率のビーム電流依存性

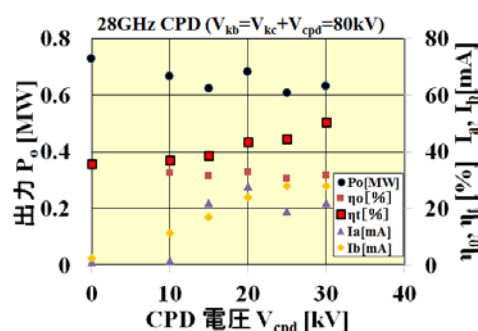


図7 28GHz 発振における出力 ( $P_o$ )、出力効率( $\eta_o$ )、総合効率( $\eta_t$ )、アノード電流( $I_a$ )、ボディ電流( $I_b$ )の CPD 電圧依存性

#### 【4】 GAMMA 10 における超音速分子性ビームによる粒子供給

##### (1) はじめに

磁場閉じ込め型の核融合プラズマ実験装置において、中性粒子輸送や水素リサイクリング・周辺プラズマ挙動観測は、タンデムミラープラズマやダイバータ領域でのプラズマ挙動解明ばかりでなく、プラズマ・壁相互作用からコアプラズマの輸送に至るまでの幅広い情報・指針を与える重要な研究対象である。従来からタンデムミラー型プラズマ閉じ込め装置 GAMMA 10 では、高密度プラズマ生成・維持が課題であり、超音速分子性ガスビーム入射(SMBI)法を用いたガス供給や、ICRF 周波数帯加熱等の工夫により研究が進められてきた。特に近年、GAMMA 10 装置は端損失粒子を用いたダイバータ模擬装置への改造および実験が進められており、本研究の推進によりパラメータ領域が拡大できれば、主閉じ込め領域のプラズマ性能向上だけでなく、ダイバータ模擬実験への貢献も期待される。

本研究においては、一昨年度よりラバールノズルを用いたSMBI実験を開始し、指向性の高い粒子供給が可能であることが分かった。本研究の目的は、新たに導入したラバールノズルの効果を、実験とシミュレーションの両面において検証することである。昨年度はセントラル部GP付近に設置されているラバールノズルを用いたSMBIによる高密度プラズマ生成実験を行った。今年度は、ICRF 加熱にPlug/Barrier ECH(P/B-ECH)を重畳したプラズマにSMBI を行い、プラズマの応答を調べた。また従来より取得した結果とあわせ、各種加熱条件・ノズルに対するSMBI のガス入射特性を実験およびシミュレーションの観点から詳細に調べた。

##### (2) 実験方法

GAMMA 10 における高速カメラシステムと、今回使用したラバールノズル付き SMBI の設置の模式図を図 1 に示す。SMBI による水素ガス入射に伴ったプラズマ発光や挙動を観測するため、2分岐ファイバーを用いることで水平方向、垂直方向の同時測定を可能とした高速カメラシステムを構築している。高速カメラの視野は、SMBI および従来のガスパフの入射領域を、同時に観測できるように設定されている。

図 2 に、セントラル部下部の真空容器内の画像を示す。ラバールノズルはその構造の複雑さのため材質はアルミが選択された。一方、先端部にはステンレスのカバーを取り付けた。これまでの実験では、ノズル無し、ストレートノズル付きと実験状況を変えて行ってきた結果、どちらの実験条件においてもプレナム圧に対して依存性があることが確認されている。

放電シナリオは以下のとおりである。まず GP#1b-#2b により初期ガスを導入し、プラズマガンにより初期プラズマを生成した。その後、密度維持・アンカー部加熱のための ICRF 加熱(RF1)を導入し、同時に GP#3-#4 により密度を維持した。プラズマ密度が安定した時点で SMBI を行った。密度計測は多チャンネルのマイク

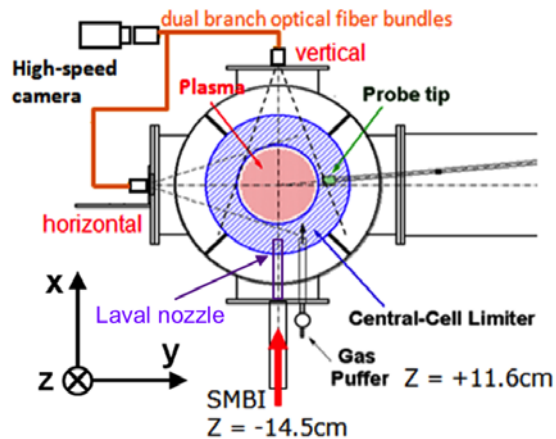


図 1 ストレートノズル付き SMBI と高速カメラの設置位置の模式図

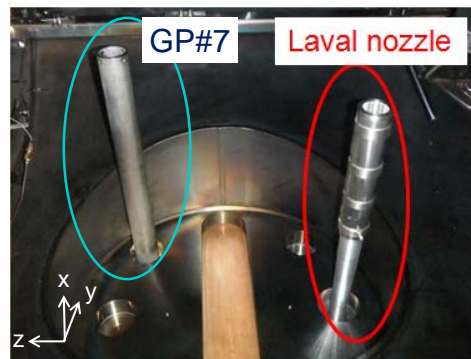


図 2 セントラル部中央付近に設置されている GP#7 および SMBI 用ラバールノズル



ロ波干渉計により行い、トムソン散乱装置による電子温度計測、および  $H\alpha$  線発光強度計測を行った。

### (3) 実験結果

図3に、SMBIを用いた高密度放電の電子線密度の時間発展を示す。P/B-ECH は  $t = 145\text{--}165\text{ms}$  に印加され、それぞれのパワーは150、100kW であった。SMBIは、 $t = 150\text{ms}$  に入射され、その動作時間は0.5msであった。SMBIのプレナム圧を0.5MPa から2.0MPa まで変化させて密度の応答を観測した。P/B-ECH重畳に伴い、線平均密度の増加が見られた。SMBI入射直前のターゲットの線平均密度は  $1.3 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$  (プラズマ半径を18cm として算出) であり、2.0MPaの場合にはピーク値で3倍近く増加していることが観測された。この増分はICRF 単独加熱と比べると大きい。一方でP/B-ECHを重畳してもSMBI 直後のプラズマ蓄積エネルギーの低下を低減できていない。今後、蓄積エネルギーの低下を抑えた放電シナリオの構築が課題である。

図4にプレナム圧に対するSMBI入射前後での密度増分 ( $\Delta NL_{cc}$ ) の依存性を示す。P/B-ECH 重畳加熱の結果をICRF単独加熱の場合と比較する。両者ともプレナム圧の増加に従って密度の増加が見られる。ICRF単独加熱の場合と比べてP/B-ECHを重畳した場合は線密度の増加分は約7割程度高い。なお、今回行ったプレナム圧力の範囲内では両者とも密度の飽和は見られなかった。この動作圧力範囲はSMBI 電磁バルブの仕様で決められており、今後は入射粒子数の制御をパルス幅も含めて複合的に行うことを検討する。

高速カメラの結果と中性粒子輸送シミュレーションを用いたSMBI模擬の結果を比較することでSMBIノズル形状に対する指向性の特性を調べた。図5 (a)に高速カメラで撮影したSMBIによる発光の2次元分布を示す。上側ポートからの発光強度の分布から半値幅を求め、指向性の指標とした。またモンテカルロ法を用いた中性粒子輸送シミュレーションコードDEGAS を用いてSMBIを模擬した。このとき、ガスの初速度分布を通常のcosine分布から収束させるため、発散角指数  $\sigma_{div}$  を導入した。またシミュレーションにおいても発光強度分布を評価し (図5 (b)参照)、その半値幅を実験結果と比較した。

得られた半値幅のプレナム圧力依存性から、ICRF 加熱およびECH 重畳プラズマにラバーノズルを用いたSMBIの結果に加え、

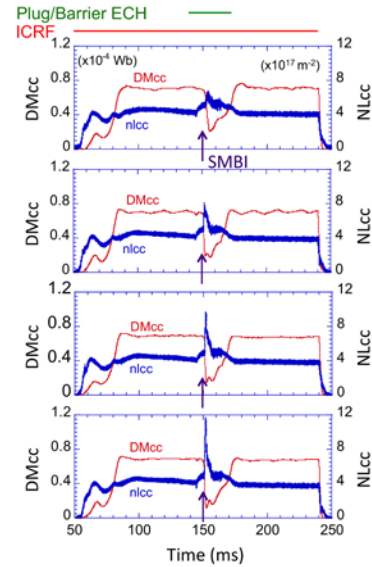


図3 SMBI 実験におけるセントラル部電子線密度(NLcc)時間発展。プレナム圧を0.5MPa から2.0MPa まで変化。

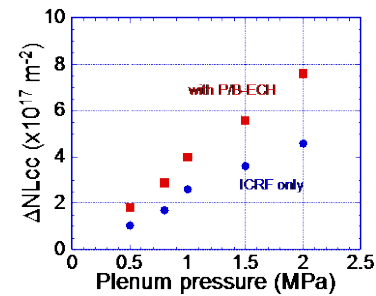


図4 SMBI プレナム圧に対するセントラル部電子線密度増加分の依存性。

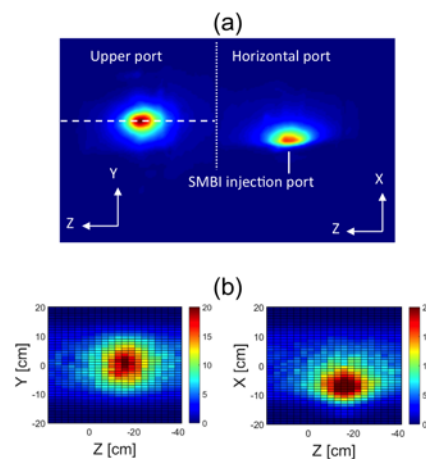


図5 (a) 水平方向、垂直方向から同時撮影した SMBI 入射中の発光イメージ、(b) 中性粒子輸送シミュレーションによる SMBI 時の  $H\alpha$  発光強度の計算結果

ICRF 加熱プラズマでノズルなし、および直線ノズルを用いた結果において、全ての場合で、圧力とともに半値幅が低下し、1 MPa を境にほぼ飽和していることがわかった。ECH を重畳することで若干の半値幅の低下が見られたが、この要因については電子温度・密度分布等の変化と併せて今後議論する必要がある。また、シミュレーションから得られた発光強度分布半値幅の発散角指数 $\sigma_{div}$  依存性については、実験結果と比較するとノズルなしで低圧(0.2 MPa)の場合は $\sigma_{div} = 1$  のcosine分布と等価であることが分かった。これは通常の高スパフと同程度の指向性であると考えられる。一方で直線ノズル、ラバールノズル(ICRF)、ラバールノズル(ECH)での順に、相当する $\sigma_{div}$  は0.5、0.3、0.25 と小さくなった。

#### (4) まとめ

各種ノズルに対する指向性の評価を実験・シミュレーション両面から行うことができ、SMBI によるガス入射特性の基礎データが取得できた。ノズルなしでプレナム圧が低い場合はSMBI としての効果がほとんど見られないため、適用する装置に最適なノズル・運転方法を選択する必要がある。今回の評価では半値幅のみを議論したが、実際の装置設計・性能評価にはノズル先端からプラズマ境界までの距離も重要であるため、距離を考慮した実験・解析が必要となる。

### 【5】タンデムミラー端部を用いたダイバータ模擬研究

#### (1) はじめに

核燃焼プラズマの定常維持の為には、高熱流束に耐えるダイバータの開発が急務の課題となっている。開放端磁場配位は、ダイバータと共通する磁力線の構造をしており、タンデムミラープラズマにおいて、軸方向閉じ込め電位の無いプラズマ周辺部はトラスプラズマの SOL 領域に、ミラー端部はダイバータ板前面の開いた磁場領域に酷似している。本研究の目的は、タンデムミラープラズマ閉じ込め装置ガンマ 10 のダイバータプラズマの模擬装置としての可能性を探るために、実験的及び数値計算に基づいた検討を行うことである。これによって、開放端磁場配位を活かし、ダイバータ開発における課題解決に向けた貢献を行う。

#### (2) 実験装置

図 1 に GAMMA 10/PDX 全体図及び、西エンド部真空容器と平成 24 年度から稼働を開始したダイバータ模擬実験モジュール(Dモジュール)の配置を示す。平成 23 年度までに設置した計測器は、端部ミラーコイルの中心から中心軸外側に向かって 30 cm の位置( $Z_{EXIT} = 30$ )にあるカロリメータと方向性プローブの複合計測器、複数のターゲット及び計測器を備えて、 $Z_{EXIT} = 70$  cm に設置されている回転式ターゲットアセンブリ、エンドタンクに設置されている端損失イオンエネルギー分析器(ELIEA)などである。また、ターゲット材とプラズマとの相互作用光は、高速カメラを用いて計測されている。

Dモジュールの概略図と写真を図 2 に示す。本モジュール

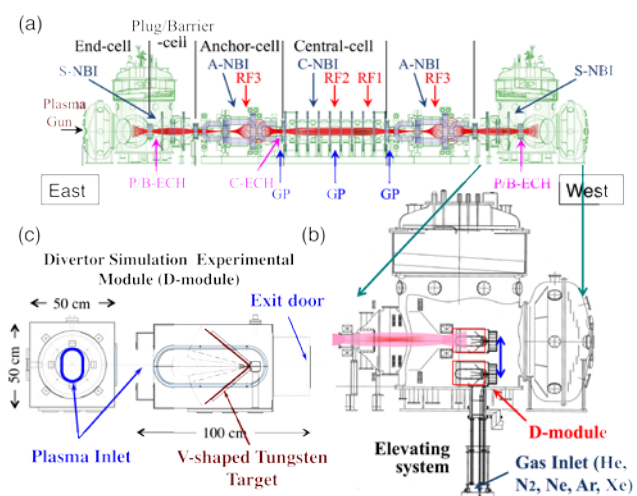


図 1 (a) GAMMA 10/PDX 全体図, (b) 西エンド部真空容器, (c) 昨年度から稼働を開始したダイバータ模擬実験モジュール。

は、SUS製の断面50×48 cm、長さ70 cmの直方体の容器で、前方にあるφ20 cmの円形ポートから、端損失プラズマ流が導入される。容器内部には、V字形の2枚のタングステン製ターゲット(30 cm×35 cm)が設置されており、V字形開口部の角度が15度から80度まで可変となっている。ターゲットの表面及びV字コーナー部には、静電プローブとカロリメータのレイが設置されており、端損失プラズマ流の粒子束、熱流束が測定される。また、後部にはガス排出口が設置され、扉の開き角度を変えることにより、容器内部の中性粒子圧力を制御できるようになっている。

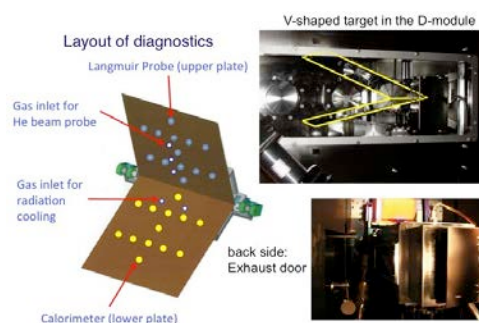


図2 ダイバータ模擬実験モジュールの概略図と写真。

### (3) 実験結果

今年度ECH入射による高熱流束実験では、ICRF加熱されたプラズマに対して5msの短パルス入射によるELM模擬の実験を行い、端部に設置しているカロリメータによる熱流計測を行っている。図3はこれまでに得られた端部ミラー出口近傍で測定されたECH印加中熱流束をECHパワーに対してプロットしたもので、パワーの増加に伴い順調に増加していることが判る。今年度春に西プラグ部のECHアンテナを改造し、軸上でマイクロ波強度を2倍にする改良が行われ、端部の熱流束強度は23MW/m<sup>2</sup>まで上昇した。その後、夏期の大気開放作業時に東西プラグ部のアンテナが整備され、両者の同時ECH加熱によって、端部の熱流束が30MW/m<sup>2</sup>まで到達した。今後、開発中のMWクラスのジャイロトロンを使用することにより、50MW/m<sup>2</sup>以上の熱流束生成が期待される。

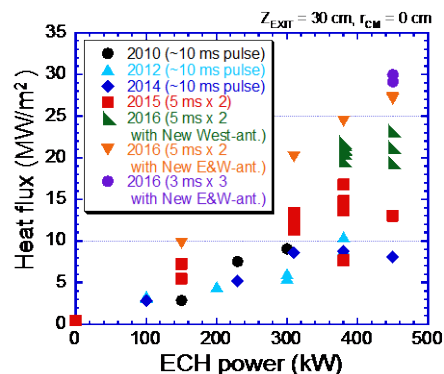


図3 端部ミラー出口で測定した熱流束のECHパワー依存性。

平成26年度から28年度にかけて、放射冷却用の不純物ガスとして様々な希ガスや新たに窒素ガスを用い、それぞれのプラズマ冷却効果や非接触プラズマ形成を目差した、イオン束、熱流束の低減効果について検証した。図4は非接触プラズマ形成実験の模式図を示す。プラズマの放射冷却用不純物ガスは、V字ターゲットの上部から入射され、ターゲット上およびV字コーナー部に設置された静電プローブや熱電対と受熱板から成るカロリメータで、Dモジュール内に流入したプラズマ流の冷却の様子が測定された。

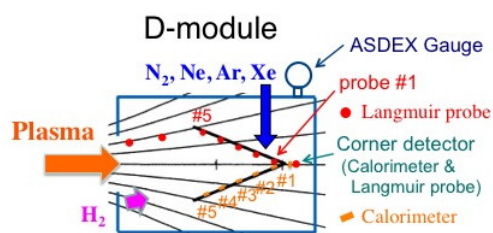


図4 Dモジュール内部に設置された計測器の概略図。

図5は、ガス入射時にDモジュール内V字ターゲットのコーナーギャップ間に設置しているプローブとカロリメータによって測定されたイオン束と熱流束およびターゲットの奥側に設置されたプローブ(図3 probe#1)で測定された電子温度のDモジュール内ガス圧依存性を示している。モジュール内のガス圧力は、磁場中で計測可能な高速イオンゲージであるASDEX-ゲージをモジュールの上部(図3)に設置し、使用ガスに対する感度較正

実験を行った後、使用している。

図 5 (a), (b) から、Xe ガスが他のガスに比べて顕著に熱流束及びイオン束の低減に効果的であり、図 5 (c) に示すように電子冷却にも最も強い効果を現す事が判った。また、N<sub>2</sub> ガスについては、Ar ガスとほぼ同等の効果を示しているが、低圧力領域 (<2Pa) では、Ar よりも電子冷却効果が良好である結果も得られた。以上のように様々な放射冷却に有望なガスについて詳細な結果が得られ始めており、将来のダイバータ運転への有効な知見が得られるものと期待される。

以上の他にも可視分光器を用いた D モジュール内に導入した不純物の挙動や窒素ガス導入時の分子発光線の観測など、様々なダイバータ模擬実験が行われ、興味深い結果が得られた。

#### (4) まとめ

ダイバータ実験装置 (E-Div.) を導入した境界プラズマにおける粒子輸送制御研究を課題に掲げ、熱流束では ECH の短パルス入射により、30 MW/m<sup>2</sup> を越える高熱流束を達成した。また、D モジュールを用いた本格的ダイバータ模擬実験では、種々の放射冷却用ガスの非接触プラズマ化への効果が検証され、Xe ガスが最も効果が高く、窒素ガスも効果的であることが認められた。今後は更に熱流・粒子束密度の強化に向けてプラズマ生成・加熱の最適化を推し進めると共に、ダイバータ模擬実験、プラズマ壁相互作用並びに非接触プラズマの特性、定常維持に関する機構解明へ向けて研究を進めてゆく。

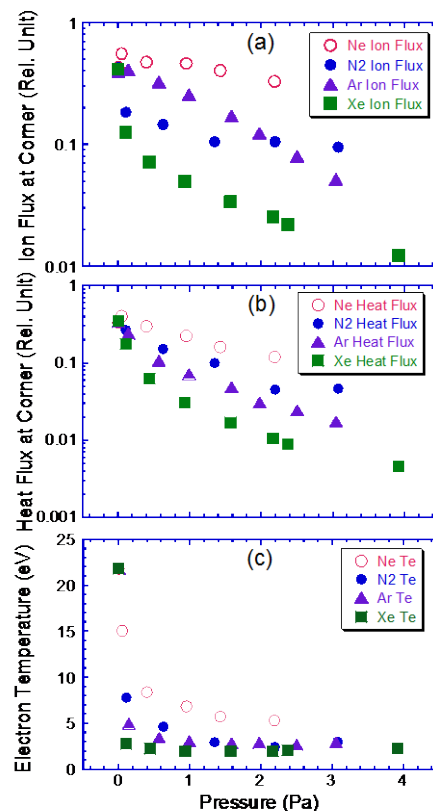


図 5 D モジュール内プラズマパラメータの導入不純物ガス圧依存性 (a) コーナ部のイオン束、(b) 熱流束、(c) ターゲット奥側(probe#1)による電子温度

## 【6】 GAMMA 10 E-div 領域における多流体コードによる数値シミュレーション解析

### (1) はじめに

直線型装置は、定常状態での実験が可能であることや、磁場構造が単純な為、観測ポート設置の利便性が非常に高い事などの環状装置には無い有利な特徴があることから、直線型装置を使用した周辺プラズマ研究が、広く世界中で行われている。これらの直線型装置は、トカマク装置に匹敵する粒子束で研究可能である PSI-II の様に、其々の特徴を生かした研究を行っている。そこで、数値計算シミュレーションによって、プラズマにどの物理過程が強く影響を及ぼしているのかを評価する事が非常に重要となる。筑波大学に設置されているタンデムミラー型装置 GAMMA 10/PDX の西エンド部においても、ダイバータ模擬実験が行われている。

本研究の目的は、他の直線型装置と比較してイオン温度が非常に高いプラズマで実験可能である GAMMA 10/PDX を用いたダイバータ模擬実験に対して、新たに構築した数値計算コードを用いて数値シミュレーションによる解析を行う事によって、高イオン温度プラズマ下におけるプラズマ挙動を解明する事である。また、高イオン温度プラズマに不純物粒子や中性粒子の外部ガスパフを行った際の背景プラズマ挙動並びに、ターゲット板への熱・粒子負荷について数値計算コードを用いて評価する事である。これにより、GAMMA



10/PDX で行われているダイバータ模擬実験で現れる物理機構に対する理解や、トカマク、及びヘリカル型装置における周辺プラズマ挙動の研究に大きく貢献できる。

## (2) メッシュおよび物理モデル

本研究で開発した流体コードは、トカマク等で広く用いられている B2 コードと同様の物理モデルで構築された方程式を使用している。図 1 に GAMMA 10 プラグバリア部及びエンド部の真空容器プラズマ形状の概略図と同部に設定した数値シミュレーション計算空間のメッシュ構造を示す。

GAMMA 10/PDX は、セントラルセル、アンカーセル、プラグ・バリアセルとエンドセルの 4 つのセルによって、構成されている。プラズマは、主としてセントラルセルにおいて生成され、ロスコーンに落ち込んだ荷電粒子がセントラルセルから、各セルを経由してエンドセルに流出する。GAMMA 10/PDX では、この端損失プラズマを利用してダイバータ模擬実験を行っている。その為、エンド部における磁力線構造を基に計算空間内のメッシュを作成する必要がある。また、エンド部に存在するプラズマは、セントラルセルから流出したプラズマであるので、エンド部に流入するプラズマパラメータは常に一定であり、軸対称性を持つと仮定した。ターゲット板は、計算空間終端に、タングステン製の円形ターゲット板を設置していると仮定した。一方、プラズマ内中性粒子のモデルとしてバックグラウンドの ( $3 \times 10^{16} \text{m}^{-3}$ ) を与え、 $\text{H}_2$  原子については、図 2 (a) に示すようにターゲット面上でのリサイクリングを想定した  $10^{18} \text{m}^{-3}$  台の高い密度からプラグバリアに向かって 3 桁減少する分布を与えた。Ar 及び Ne 粒子については、エンド部において一様で、プラグバリアに向かって指数関数的に減少する分布とした。

以上の様に、GAMMA 10/PDX の磁力線構造と各境界条件を、新たに開発した数値計算コードに適用させた上で、テスト計算を行った。その結果、非線形性が強い系で計算される全ての変数について、より良い収束性が確認されたことから、開発した本計算コードは、GAMMA 10/PDX の環境下においても、正しく稼働している事を確認している。

## (3) 計算結果

図 3 は、(a) 水素 :  $0.5 \times 10^{18} \text{m}^{-3}$  のみ導入した場合、(b) 水素に加えて Ar :  $1.0 \times 10^{18} \text{m}^{-3}$  を導入した場合、(c) 水素に加えて Ne :  $1.0 \times 10^{18} \text{m}^{-3}$  を導入した場合におけるプラズマ密度・温度の空間構造のシミュレーション解析結果を示す。いずれのガスの場合でも、イオン温度電子温度は共にターゲットに向かって減少していることが判り、ガス導入によるプラズ

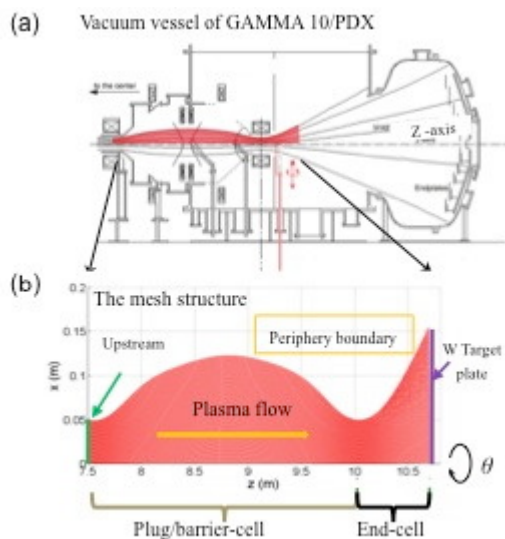


図 1 GAMMA 10 エンド部に設定した数値シミュレーション計算空間 (a) エンド部真空容器とプラズマ形状, (b) 同部に設定したシミュレーション空間のメッシュ形状と今回計算を行った領域

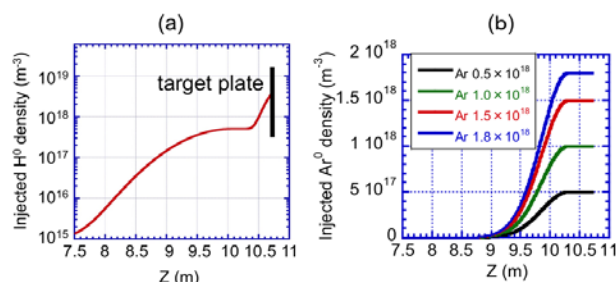


図 2 数値シミュレーション計算空間に導入する中性粒子の軸方向分布 (a) 水素中性粒子, (b) Ar 及び Ne 中性粒子

マ冷却効果が認められている。その中で Ar が  $T_e$  への最も強い低減効果を示していることがわかる。一方 Ne ガスでは、温度減少の度合いは小さく冷却効果の弱いことが判った。

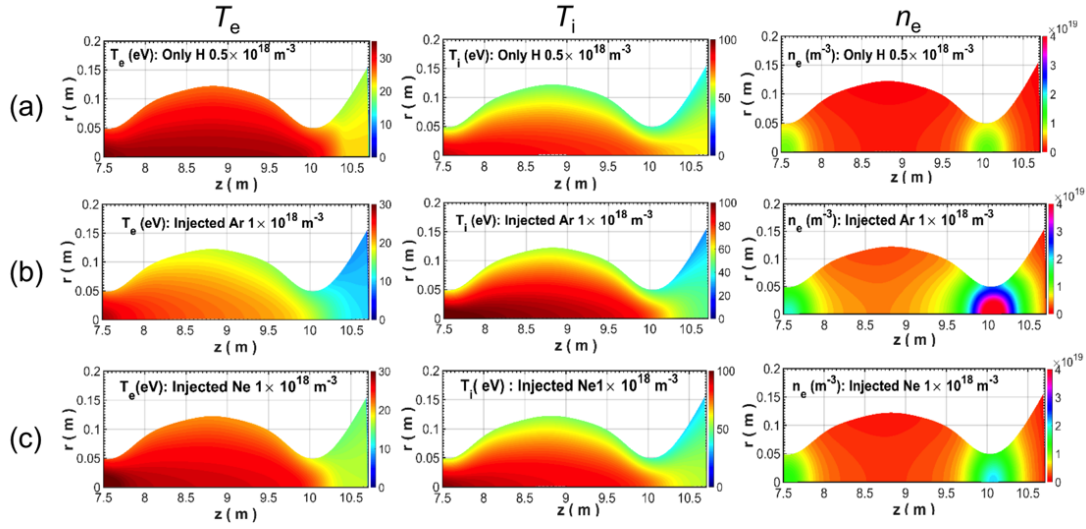


図3 水素： $0.5 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$  (a)、水素+Ar： $1.0 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$  (b)、及び水素+Ne： $1.0 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$  (c)を導入した場合のプラズマ密度・温度の空間構造のシミュレーション結果

図4は、上記と同様の条件で入射 Ar 及び Ne の密度に対するターゲット上における各種プラズマパラメータのシミュレーション解析結果の依存性を示す。両者のガス入射量の増加に伴い電子温度、イオン温度が低下してゆく傾向が認められ、不純物ガスによる放射冷却効果が現れている。Ar の場合は電子冷却効果が著しく  $2.1 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$  の導入密度で 2eV 以下に達している。電子密度は、Ar 密度と共に増加し、 $1.8 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$  以上で飽和し減少する傾向（ロールオーバー）を示しており、それに対してイオン束も減少する傾向を示している。一方 Ne の場合は、温度減少率も Ar に比べ低く、密度は単調に増加する傾向を示し、非接触プラズマへ向かう効果の弱いことが明らかとなった。

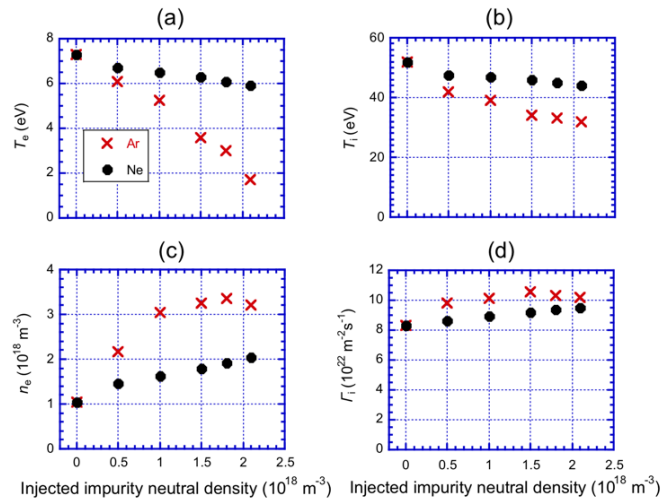


図4 ターゲット上のプラズマパラメータに対する入射不純物ガス密度の依存性。(a)電子温度、(b)イオン温度、(c)電子密度、(d)イオン束

#### (4) まとめ

多流体数値計算コードを用いて、GAMMA 10 エンド部におけるプラズマ流の挙動を調べている。Ar ガス及び Ne ガス入射による放射冷却等、非接触プラズマ形成へ向けた特性の比較が可能となってきた。今後は、再結合過程など、より詳細な原子分子過程を考慮した計算を進めてゆく。

## 【7】小型プラズマ生成装置を用いたプラズマ-材料相互作用研究

本研究では、低エネルギー・高フラックスの定常プラズマを生成することができる小型のプラズマ生成装置 APSEDAS を用いて、プラズマと材料との相互作用研究を進めている。今回は、中性子照射に対する代替照射として重イオン ( $\text{Cu}^{2+}$ ) 照射を用いて、照射損傷タングステンの水素吸蔵特性を明らかにすることを目的として研究を行った。

研究に用いたタングステン材料は、タングステンへの重イオン照射の効果をより明確にするために残留ひずみの少ない再結晶タングステン (10 mm x 10 mm x 1 mm) を用いた。この再結晶タングステンに対して、2.4 MeV のエネルギーの  $\text{Cu}^{2+}$  イオンを照射し、その後 APSEDAS において重水素プラズマを照射した。重水素のフラックスは約  $3.7 \times 10^{21} \text{ D/m}^2\text{s}$ 、フルエンスは  $2 \times 10^{25} \text{ D/m}^2$  である。また、照射イオンのエネルギーは約 30 eV であり、プラズマ照射中の試料表面温度は約 480 K であった。重水素プラズマ照射後に、試料を昇温脱離装置に移し、1173 K まで 1 K/s で昇温して重水素の昇温脱離特性を調べた。重イオンを照射していない W 試料の昇温脱離スペクトルには、約 560 K と約 740 K にピークが存在した。一方、重イオン照射した試料では、上記とほぼ同じ温度に 2 つのピークが存在するが、さらに 840 K 付近に新しいピークが存在することが分かった。これは、別のタングステン試料に重イオン照射をして透過電子顕微鏡観察を行った結果から、ナノボイドに起因するピークであると考えられる。材料中の重水素吸蔵量 (重水素リテンション) は、昇温脱離スペクトルを積分することで求めることができる。 $\text{Cu}^{2+}$  イオン照射のフラックスを  $5 \times 10^{15} \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  として、重水素リテンションの  $\text{Cu}^{2+}$  イオン照射量依存性を取得した。損傷レベルが 0.4 dpa までは重水素リテンションは損傷レベルとともに増加するが、0.4 dpa 以上ではリテンションが飽和していることが分かった。これは、重イオン照射によって発生した損傷 (空孔やボイド等) が高密度になり、新たに導入された損傷が相殺されてしまうためであると考えられる。さらに、 $\text{Cu}^{2+}$  イオンのフラックスが  $1 \times 10^{15} \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  の低フラックス照射の場合には、重水素リテンションが 2 dpa まで増加し続けることが分かった。これは  $\text{Cu}^{2+}$  イオンのフラックスの違いにより損傷形成プロセスに違いが生じる可能性を示唆している。今後、照射損傷形成プロセスに関する物理機構の解明を行う予定である。

## 【8】GAMMA 10/PDX におけるトムソン散乱計測システムの構築

タンデムミラー GAMMA 10/PDX では、高出力マイクロ波による電子加熱を行って高電位生成を行い、磁場に加えて電位でもプラズマを閉じ込めることによってプラズマ性能を向上させている。そして、主閉じ込め領域であるセンタラル部への電子直接加熱を行うことによって、電子温度を上昇させる実験を行っている。この電子温度を直接計測するためにトムソン散乱計測システムを導入した。これまでに空間 6 点、10 Hz 間隔での時間変化計測を 1 プラズマショットで調べることを可能とし、さらに、ダイバータ模擬部のトムソン散乱計測システムの構築を行ってきた。当該年度は、空間 7 点計測のためポリクロメーター、オシロスコープの増設を行った。一方、ダイバータ模擬部トムソン散乱計測システムの設置を進め、エンド部へのレーザー光の導入のための光路の設置を行った。

空間 7 点目の径方向外側の  $X = +15 \text{ cm}$  の位置からのトムソン散乱光を測定するため、ポリクロメーター (TS139) とオシロスコープ (IWATSU, DS5524A) を設置した。データ取得用のオシロスコープ制御プログラム (MultiVControl V2.23) は 1 台の制御 PC で 6 台までのオシロスコープしか制御できないため、新たに制御 PC を準備し、7 台目のオシロスコープを MultiVControl で制御した。これにより、空間 7 点の電子温度、電子密度の 1 プラズマショット中の時間変化 (10 Hz) の測定が可能となった。図 1 に、測定した電子温度 (a) と電子密度 (b) の径方向分布を示す。赤●が  $t = 64.4 \text{ ms}$ 、青■が  $t = 164.4 \text{ ms}$  を示す。このプラズマは、 $t = 150 \sim 162 \text{ ms}$  にセンタラル部 ECH 入射実験となっており、電子温度が測定時刻直前に変化しているプラズマとなっており、径方向  $X = +10 \text{ cm}$  の位置の電子温度が高くでている。

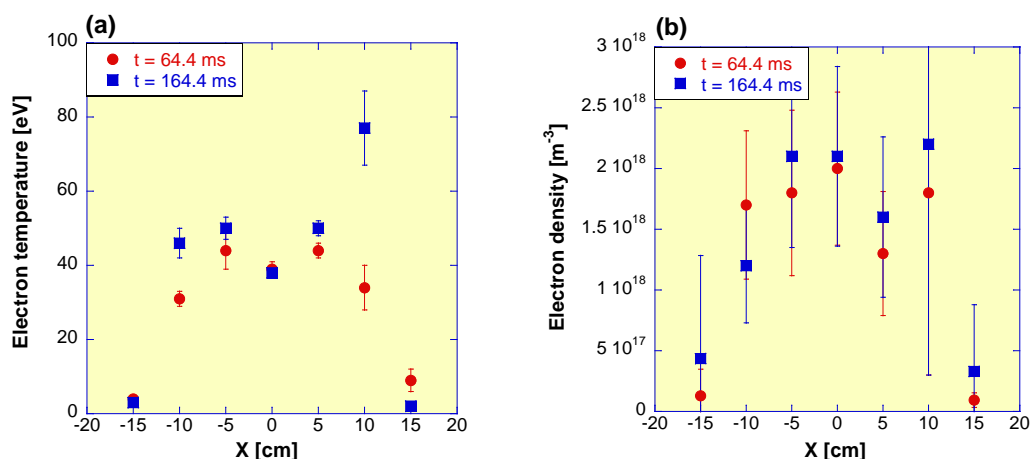


図 1：電子温度(a)及び電子密度(b)分布測定結果。

本年度は、エンド部に新たにトムソン散乱計測システムを導入するため、セントラル部に設置してある YAG レーザーの光を分岐して、エンド部までレーザー光を伝送した。エンド部のトムソン散乱光学系の散乱点までの距離は、約 21 m である。YAG レーザーは、高さ 1.8 m から水平にエンド部のポートに入射し、真空容器の中に凹面集光ミラー (A1,  $\phi$  0.15 m,  $R = 0.35$  m) と光ファイバー (三菱電線, CSMSLKSL SPH400-SU57/56,  $L = 10$  m) を設置して散乱光を集光する。光ファイバーによって真空容器から取り出された散乱光は、低温測定用に開発したポリクロメーター (TS194) に取り付ける。ポリクロメーターからの出力信号はオシロスコープで収集する。エンド部トムソン散乱計測システムは、後方  $160^\circ$  散乱で測定し、立体角は、約  $70 \text{ mstr}$  である。図 2 にエンド部トムソン散乱計測システム概略図を示す。赤色レーザーと YAG レーザーによる集光光学系との光軸調整を行ってから、GAMMA 10 本体に窒素ガスを導入してのガス散乱実験を行った。しかし、レーリー散乱光には迷光の影響が強く、ガス圧による信号強度の変化は見られなかった。一方、ラマン散乱については、ガス圧による信号出力の減衰は確認できたが、迷光成分が大きく今後の対策が必要であった。ビームダンプがレーザー光の入射方向に設置したため、迷光が大きくなった。これについては、レーザーのコリメートレンズの配置を検討してビームダンプの位置を視線方向からずらすようにする必要がある。

今後、セントラル部トムソン散乱計測システムについては、測定精度向上のため、径方向外側の信号増強のための集光ミラーの設置、マルチパス・トムソンシステムの利用を進めていく。空間多点化についてもポリクロメーターの改良も念頭に進めていくこととする。一方、エンド部トムソン散乱計測システムについては、迷光対策を進めトムソン散乱信号の取得を目指す。エンド部のプラズマ密度は低いため、マルチパス・トムソン散乱計測システムの導入の検討を進めていく。

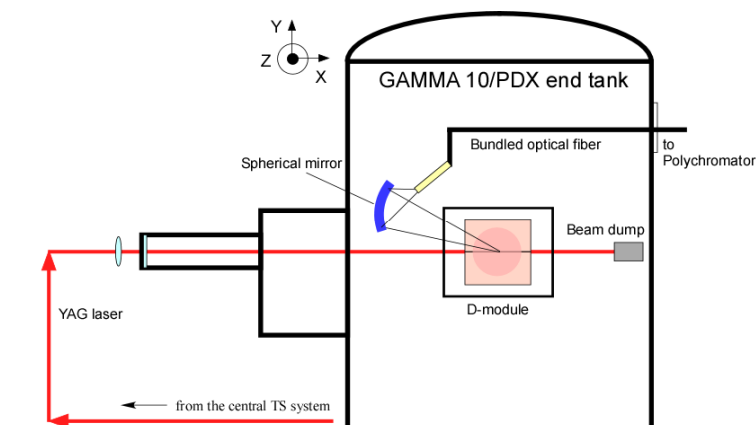


図 2： エンド部トムソン散乱計測システム概略図。

## [ 9 ] 再生レーザー増幅方式による高時間分解電子温度計測システムの開発

プラズマの電子温度・密度を高時間分解能で計測することは、SMBI実験やペレット入射実験、ELM模擬実験など、電子温度、電子密度が高速で変化するプラズマにおいてその物理機構を解明するために重要である。電子温度計測には、トムソン散乱計測が直接測定できるため非常に有効な手法であるが、トムソン散乱計測の時間分解能は使用するレーザー発振周期で制限されており、kHzオーダーでの測定が上限となっている。そのため、本研究では、MHzオーダーの時間分解能をもつ高時間分解トムソン散乱計測システムを開発することを目的とした。この高時間分解能を達成するため、プローブレザーをプラズマ中に何度も往復させてパス毎の散乱信号を測定するマルチパス・トムソン散乱計測システムを構築することとした。しかしながら、通常のレーザー装置外にマルチパスの機構を設置したのでは、パス数の増加とともに散乱信号強度が減衰していき、6パス程度以上では、半分以下になってしまう。そこで、本研究では、レーザー強度が減衰したところでレーザーアンプによりパワーを増強し、散乱信号が安定して測定できるようなマルチパスシステムを新たに構築することとする。増幅方法には、再生レーザー増幅方式を予定している。

当該年度は、レーザーアンプを導入したマルチパスシステムの光学設計を行うことと、ビームプロファイラーの設計及びレーザーアンプを設置する光路の調整を行い、アンプを設置しない場合のマルチパスの回数の確認を行うこと、高時間分解計測時のトムソン散乱計測信号解析のための解析ソフトウェアの開発を進めることを計画した。レーザーアンプを導入したマルチパスシステムの光学設計は順調に進み、さらにレーザー増幅システムの検討も行った。マルチパス状態で、パス数が8回後に、レーザーアンプにつながる光路に設置したポッケルスセルに高圧印加してレーザーアンプ側にレーザー光を導く。レーザーパワーは、初期の約20%程度に減衰しているが、これをレーザーアンプで増幅し、レーザーパワーを初期値にまで戻して、再びマルチパス・システムに戻す。これで、パス数が16回程度まで伸びることになる。

マルチパスのパス毎にトムソン散乱信号強度を解析できるように、ラマン・ガス散乱実験を行い、パス毎の密度校正実験を行うとともに、フィッティング解析手法を構築し、高時間分解計測のための逐次パス解析ソフトウェアの開発を進めた。これにより、トムソン散乱信号のパス毎の散乱光強度を校正して、パス時刻毎の電子温度・電子密度計測を可能とした。図3にパス毎の電子温度(a)、電子密度(b)の変化を示す。測定したプラズマは、電子温度、密度が高速で変化するプラズマではないので、時間的变化が見られていないが、今後、SMBI実験などで高速で温度、密度が変化するプラズマについて測定する予定である。

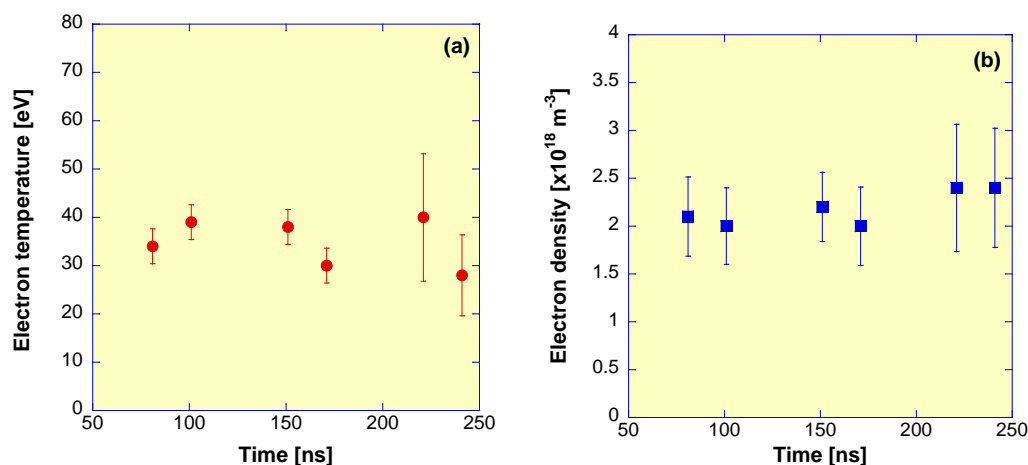


図 3 : パス毎の電子温度(a)、電子密度(b)変化。



## [10] GAMMA10/PDX プラズマの $H\alpha$ 線 2 次元放射分布の研究

磁場閉じ込めプラズマ中の揺動はプラズマ閉じ込めを悪化させるため、この揺動について詳細に調べることは重要である。GAMMA 10/PDX で観測される揺動は、高イオン温度モード実験ではドリフト型揺動が主で周波数 10 kHz 程度の揺動が観測され、閉じ込め電位形成のための電子サイクロトロン共鳴加熱 (ECH) の印加によって抑制されることがわかっている。これは、電位形成による電場シアの効果で揺動が抑制されたと考えられている。これらの揺動は、金中性粒子ビームプローブ、多チャンネルマイクロ波干渉計、超短パルス反射計などを用いて観測されてきた。今回、これまでよりも早い時間取り込み性能をもつ ADC を用いて 2 次元  $H\alpha$  線計測を行うことにより、プラズマ 2 次元断面の体積輻射率分布を求め、2 次元揺動計測を行うことにより、揺動の 2 次元空間分布について調べることにした。

GAMMA 10/PDX の 2 次元  $H\alpha$  線計測システムは、プラズマ断面（直径約 38 cm）を縦方向、横方向、各 12 チャンネルの  $H\alpha$  線フィルター、光ファイバー、光電子増倍管を使用した 2 次元計測システムである。光電子増倍管の出力は、プリアンプを通して 10 倍程度増幅され、CAMAC システムでデジタル信号に変換される。縦、横の 12 チャンネルの放射輝度分布を Philipps-Tikhonov (PT) 法を用いて 2 次元体積輻射率分布へと変換した。図 4 に 2 次元体積輻射率分布を示す。この 2 次元体積輻射率分布の時間変化データを用いて、FFT 解析を行い、揺動の 2 次元分布を求めた (図 5)。この揺動の 2 次元分布より、揺動強度の時間変化、空間的に強く観測される場所等について調べることが可能となった。今後、データを詳細に検討し、他の揺動測定データと比較することにより、観測された揺動について調べていくこととする。

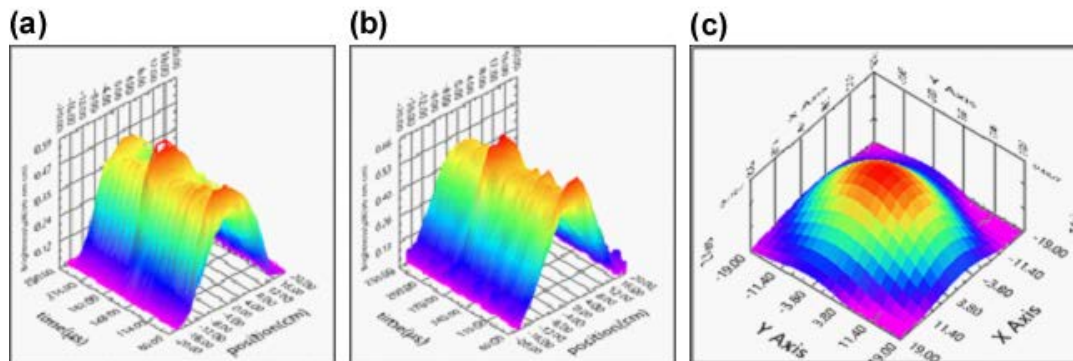


図 4 : (a)縦方向  $H\alpha$  線放射輝度分布、(b)横方向  $H\alpha$  線放射輝度分布の時間変化、(c)PT 法による 2 次元  $H\alpha$  線体積輻射率分布。

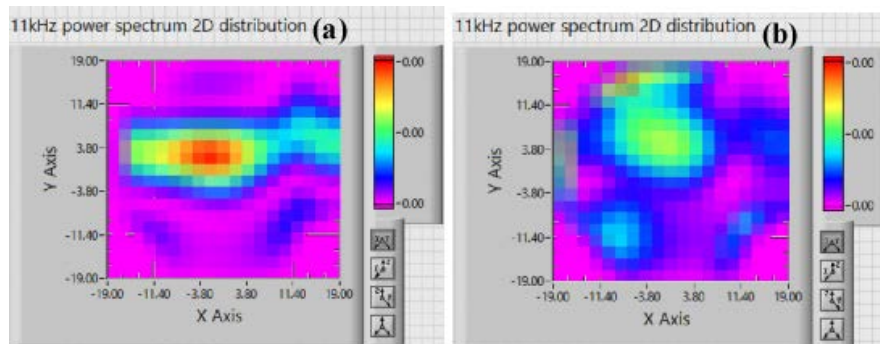


図 5 : (a)ECH 印加前の周波数 11 kHz の揺動強度の 2 次元分布、(b)ECH 印加中の揺動強度の 2 次元分布。

# [11] GAMMA10 における密度揺動回転計測のためのドップラー反射計の開発

現在 GAMMA10 セントラル部においてプラズマ密度揺動の周方向回転速度が計測可能なドップラー反射計の開発を行っている。本計測により揺動の位相速度や径電場、フロー速度シア等の空間構造に関する情報を得ることを目的としている。これらは揺動や乱流の発生・抑制機構の解明に重要な情報となる。現在のシステムは図 1 のようになっており、単色入射マイクロ波 (X-mode, 11~20GHz) を用い放電毎に周波数を変更し径方向各点の密度揺動速度の情報を得ることができる。

図 2 にスペクトラム・アナライザーで計測した周波数スペクトルを示す。入射周波数 13.7GHz、設定入射角度は(a)+2 度、(b)-3 度であり、それぞれイオンサイクロトロン周波数帯 (ICRF) の高周波のみで生成・加熱された場合 (青細線) と、これにプラグ・バリア部電子サイクロトロン加熱 (ECH) を重畳した場合 (赤太線) である。0 次光の影響はあるが、いずれのスペクトルもドップラーシフトした非対称な形状が確認できた。また、入射角度を正／負の方向に反転するとシフト方向も反転し、ICRF では電子反磁性方向へ、ECH 重畳時にはイオン反磁性方向へ回転している。

次に再現性の良い放電を用いて、入射周波数、すなわち計測半径位置を変えて得られたドップラーシフト量から求めた密度揺動の周方向回転速度を図 3(a) に示す。データはそれぞれ、ICRF (青四角) と、プラグ・バリア部 ECH (100kW) を重畳した場合 (赤丸) である。周辺部 (半径  $r \geq 10$  cm) では、ICRF の場合は電子反磁性方向に密度揺動が回転し、速度シアが形成されている。ECH が印加されると速度は小さくなり、方向が反転している領域もあることが明らかとなった。ドップラー反射計で得られる回転速度は揺動位相速度と背景  $E \times B$  ドリフト速度の和と考えられる。このとき重イオンビームプローブで計測したセントラル部の空間電位を図 3(b) に示す。空間電位は ICRF の場合は下に凸の電位構造が形成され、ECH が重畳されると上に凸に変化している。本データは一連の実験中のある一回の放電において、5ms 間で半径位置をスキャンするスイープ計測により取得しており、これだけで精度の良い径電場分布を出すのは難しいが放物線型の電位分布を仮定し電場を求めた。計算した  $E \times B$  ドリフト速度を図 3(a) に実線と破線で示す。計測領域はドップラー反射計が  $\sim 10 < r < 18$  cm、一方空間電位は  $r < 14$  cm で一部の領域での比較となるが、ECH 有／無による揺動回転速度方向と  $E \times B$  ドリフト速度方向は一致している。定量的な比較は今後の課題である

揺動や乱流の時空間構造を考えるには、空間多点同時計測が重要となる。本研究では現在、多周波数のプローブ信号を同時入射可能なコム・ジェネレータを導入し、単一放電において回転速度分布が計測可能なドップラー反射計システムの開発を進めている。今年度は GAMMA 10/PDX のパラメータに最適なシステムの設計を行い、主に送信回路系を製作した。入射マイクロ波は 11-18GHz の X-mode で、GAMMA 10/PDX の典型的な電子密度分布ではプラ

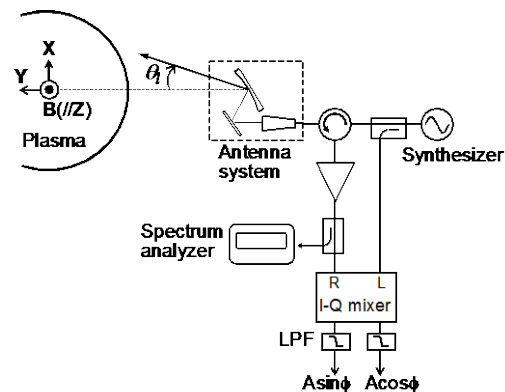


図 1: ドップラー反射計システム

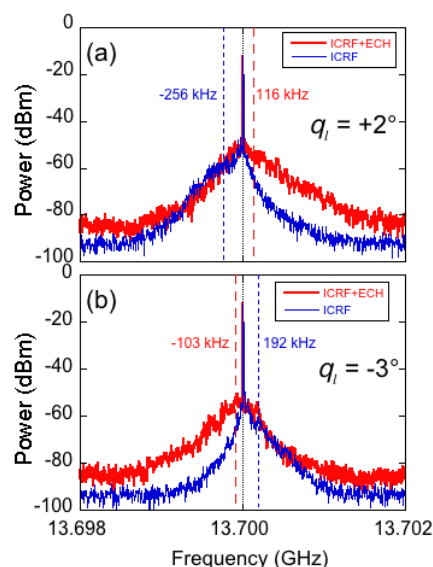


図 2: 観測した周波数スペクトル

ズマ半径  $a$  (18 cm) に対し  $r/a=0.4-1$  の観測位置に対応する。コム・ジェネレータの発振周波数間隔は 200MHz に設定した。図 4 にスペクトラム・アナライザで計測したコム・ジェネレータ出力 (11-19GHz) を示す。横軸は 800MHz/div であり、200MHz 間隔の広帯域発振信号を確認した。これらの信号のうち 11.8, 12.8, 13.8, ..., 17.8GHz まで 1GHz 間隔 (一部は 0.4GHz 間隔) の 8 周波数の使用 (即ち径方向 8 点の同時計測) を当面は予定している。各周波数信号は 10.8GHz の局部発振器 (LO) 信号により 1, 2, 3, ..., 7GHz の中間周波数 (IF) 信号に変換される。今年度は検波信号を取り込むためのデータ収集系 (1MS/s) の整備も進めた。来年度はバンドパス・フィルタを含む位相検出回路系の

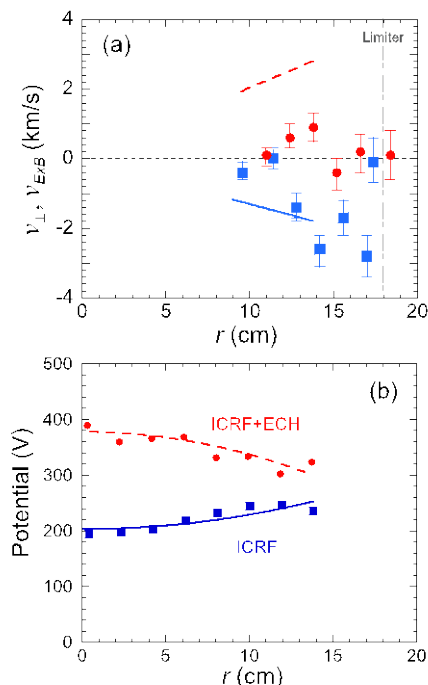


図 3: (a)周方向速度、ExB ドリフト速度 および(b)空間電位分布

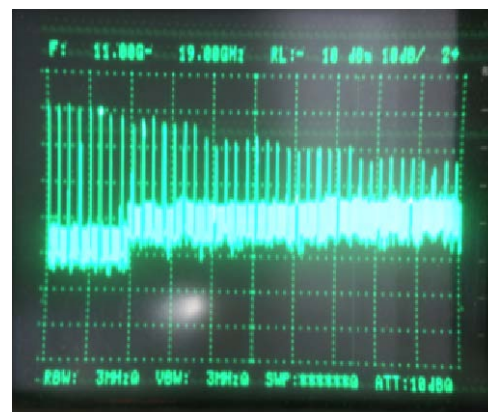


図 4:コム・ジェネレータ出力

構築を行い、ドップラー反射計システムを完成する予定である。

## [12] 高周波を用いた初期プラズマ生成と加熱、及び加熱プラズマの巨視的・微視的挙動の解析

イオンサイクロトロン周波数帯 (ICRF) の高周波を用い、プラズマ中の電位形成やプラズマ閉じ込め物理、また、開放端磁場配位を利用したダイバータ模擬実験等の境界プラズマ研究における標的プラズマ生成、イオン加熱の実験を進めている。さらに、高性能プラズマを制御する上で不可欠なプラズマの巨視的・微視的挙動についての研究を並行して進めている。平成 28 年度は、アンカー部・バリア部に設置したアンテナを用いた端損失プラズマ制御に関する考察を進め、3 次元波動解析コードによる検討を進めた。また、アンカー部アンテナによるセントラル部周辺浮遊電位上昇について、励起した ICRF 波動の伝搬、加熱の両面から検討した。更に、励起 ICRF 波動や温度非等方性により自発励起されるアルペニオンサイクロトロン (AIC) 波動の特性を調べるため、マイクロ波反射計を利用した波動計測システムの高度化、及び MCP を用いた新しいイオン検出器の整備を行った。

### (1) アンカー部・バリア部アンテナを用いた端損失プラズマ制御

端損失プラズマ制御を目的として、東西両アンカー部のセントラル側アンテナ (EAI-DAT, WAI-DAT) に 7.7 MHz の高周波を印加し、東エンド部に設置された端損失イオンエネルギー分析器 (ELECA) を用いて端損失イオンのエネルギー分布を測定した。EAI-DAT アンテナを使用した場合はセントラル部から見てアンテナ側に流出してエンド部まで到達するイオンを、WAI-DAT アンテナを使用した場合はアンテナ側からセントラル部方向へ向かい、さらにエ



ンド部に流出するイオンを計測している。ELECA で計測された端損失イオンエネルギー分布を見ると、低エネルギー側(約 200 eV)の上昇は両実験において観測されているが、より高エネルギー側の上昇は EAI-DAT アンテナの実験においてのみ観測された。

アンカー部アンテナで励起された高周波波動はセントラル側に伝搬し、セントラル部スロート付近のイオンサイクロトロン共鳴層において吸収される。この時、ドップラー効果を含めた共鳴領域は、(A)セントラル部中心からアンテナ側に向かうイオンの場合、共鳴層からアンテナ側に、(B)アンテナ側からセントラル部中心に向かうイオンの場合、共鳴層から中心側に広がって存在する。(B)の場合はアンテナから伝搬した波動は共鳴層で吸収され、イオンと共鳴できない。従って東西アンカー部アンテナによる端損失イオンエネルギー分布の差異は、アンカー部アンテナで励起された高周波波動とセントラル部スロート付近のイオンとの共鳴の有無に起因すると考えられる。一方、低エネルギー側の電流密度上昇については、ピッチ角による端損失イオンエネルギーの差異から、アンカー部追加熱によるセントラル部の電位上昇より速度空間における損失領域が拡大し、端損失イオンが増大したことによると考えられる。

ダイバート模擬実験を行う西エンド部に隣接しているバリア部を直接加熱することにより、端損失プラズマ制御が期待される。平成 28 年度は、平成 27 年度に設置した Double Half Turn (DHT) アンテナを取り外し、Nagoya Type III アンテナを設置した。図 1 に DHT アンテナと Type III アンテナによる ICRF 追加熱実験を行った際の(a)西バリア部高周波印加電力に対する西バリア部電子線密度、(b)西バリア部線密度に対するバリア部加熱効果を表す Secondary Electron Detector (SED) の信号比を示す。プラズマ生成に対しては DHT アンテナがより効果的であり、イオン加熱効果がより強いのは Type III アンテナであった。従って、端損失粒子束増大には DHT アンテナが、端損失熱流束増大には Type III アンテナが効

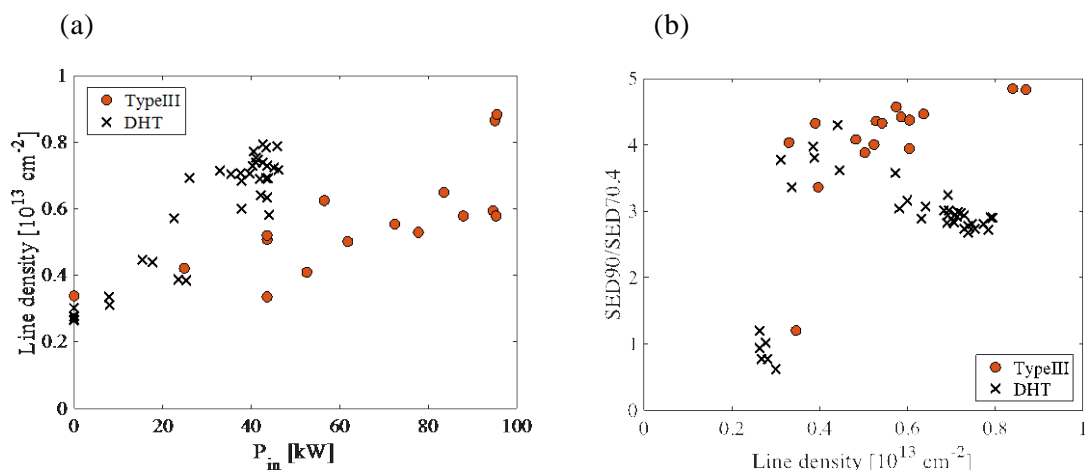


図 1 (a)西バリア部電子線密度の西バリア部高周波印加電力依存性、(b)SED 信号比の西バリア部電子線密度依存性。

果的であることが示唆された。また、実験結果との比較を行うため、3次元波動解析コードを用いた西バリア部アンテナによるアンテナ負荷抵抗や加熱効率の計算を進めた。

## (2) アンカー部アンテナによるセントラル部周辺浮遊電位上昇

アンカー部アンテナにより追加熱を行うと、セントラル部中心付近周辺部の浮遊電位が上昇することが観測されている。この浮遊電位上昇のメカニズムを解明するため、アンカー部・セントラル部に共鳴層が存在する 10.3MHz、セントラル部に共鳴層が存在する 7.7MHz、共鳴層が存在しない 6.0 MHz の高周波を印加したところ、どの条件でも浮遊電位の上昇が確認された。従って、浮遊電位上昇にイオンサイクロトロン共鳴現象は本質的ではないと考えられる。

また、アンカー部追加熱によりセントラル部周辺浮遊電位の方位角分布が非軸対称にな

るが、高周波を印加するアンテナを変えると分布形状も変化することが観測されている。そこで、東西アンカー部アンテナを用いて同時に追加熱を行ったところ、軸対称性の良い浮遊電位方位角方向分布が得られる加熱条件が得られた。今後、波動伝搬と浮遊電位分布の関係について詳細な検討を進める。

### (3) 反射計を用いたイオンサイクロトロン周波数帯波動の計測

AIC 波動の境界条件の解明に向けて、セントラル部の反射計の多点計測化の改造を行い、軸方向 5 点 ( $z = 52, 82, 112, 142, 193$  cm) までの計測を実現させた。これらのアンテナは PIN ダイオードスイッチを介してセントラル部の 2ch マイクロ波反射計システムに接続され、1 ns の時間応答でアンテナを切り替えることができる。これにより AIC 波動の径方向分布が  $z$  方向に変化する様子が観測できるようになり、複数励起される AIC 波動間での明確な差異などの境界条件に関係する初期計測結果が得られた。

また、マイクロ波反射計多点計測によりセントラル部でのイオン加熱に用いる 6.36 MHz 波動に伴う密度揺動強度を測定した。図 2 に  $z = 142$  cm の点で測定した 6.36 MHz の揺動強度の径方向分布の時間発展を、その放電におけるセントラル部の線積分密度と反磁性量と共に示す。 $z = 142$  cm では二つの特徴的な振舞いが観測された。図 2(b) 中の点線で囲った領域で示されるように、一つはプラズマの外側領域 ( $r > 10$  cm) において強い揺動強度が見られる点である。 $z = 142$  cm の点が 6.36 MHz を励起している DHT アンテナに隣接していることから、アンテナ近傍波動電界の影響が考えられる。もう一つの特徴は、反磁性量の立ち上がりに見られる過渡的な増減と対応する揺動強度の増減が観測されている点である。6.36 MHz を励起させる RF 加熱パワーを単調に増加 (ランプアップ) させている時間帯に、内部に励起される波動強度が過渡的に増減していることから、波動励起に影響する境界条件の変化がその原因として挙げられる。これら二つの現象は加熱の最適化の観点から重要であり、今後この多点計測器を用いて現象の解明を図る。

アンカー部における ICRF 加熱の最適化を進めるために導入したマイクロ波反射計では、周波数の高速掃引が可能なマイクロ波発振器に交換し、周波数掃引による密度分布計測を実施した。これにより密度揺動の絶対値が測定可能になった。

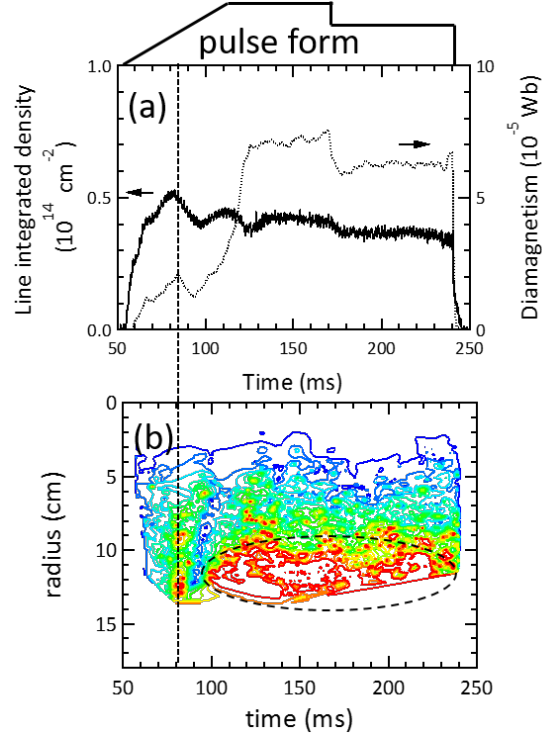


図 2 GAMMA10 セントラル部における (a) 線積分密度と反磁性量、(b) 6.36 MHz ICRF 波動に伴う密度揺動強度の径方向分布の時間発展。

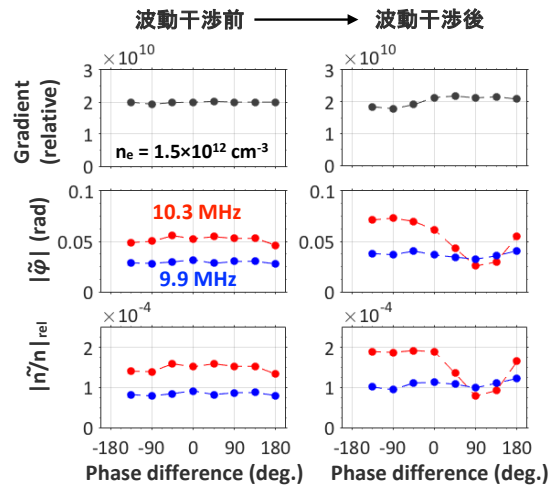


図 3 10.3MHz 波動干渉実験時の西アンカー部 10.3MHz 密度揺動測定結果。左側が干渉前、右側が干渉後。

図 3 に西アンカー部での密度勾配、位相揺動、及びそれらから導出した密度揺動レベルの絶対値を示す。図 3 に示す実験では、西側アンカー部のイオン加熱を担う 10.3 MHz の波動を二つの ICRF アンテナから励起させ、干渉させることにより波動の制御を行っている。その際に二つの ICRF アンテナに流した電流の位相差を図 3 の横軸にとっている。干渉していない 9.9 MHz の波動に伴う密度揺動レベルは位相差により変動せず、 $1.0\text{--}1.2 \times 10^{-4}$  程度である。干渉している 10.3 MHz の波動は位相差に応じて揺動レベルが  $0.8\text{--}2.0 \times 10^{-4}$  程度変化している。このように、波動強度が位相制御により変化している様子が明瞭に測定された。今後、加熱に最適な位相差が、加熱の結果として変化する密度に応じて変化するため、反射計の信号をセンサーとして最適な位相差にフィードバック制御することを考えている。

#### (4) 高エネルギーイオンの AIC 差周波揺動による軸方向輸送の研究

セントラル部の反射計で評価した AIC 波動間の非線形結合から、AIC 波動間の差周波揺動がプラズマ中心領域で顕著に励起されていることがわかっている。また、その差周波の周期で高エネルギーイオンが軸方向に輸送されていることが装置端部での粒子計測から明らかになっている。この詳細な波動粒子相互作用を調べるために、平成 28 年度に MCP を用いた新しいイオン検出器を整備した。電子リペラーグリッドとイオンリペラーグリッドを設置することで、高エネルギーイオン成分のみを検出している。光成分はコリメータと端部での磁力線の曲率を利用して軽減させている。従来の半導体検出器では見えていなかった異なる波動間の差周波揺動成分の観測、また、セントラル部の反磁性量に対する異なる揺動強度依存性を得た。新検出器を用いることで、今後、波動と相互作用するイオンのエネルギー帯に関する議論、および径方向位置の依存性に関する議論を進める。

### [13] ガンマ 10 セントラル部及びプラグ部における ECH アンテナの開発

ガンマ 10 において、電子サイクロトロン加熱 (ECH) は、高いプラズマ閉じ込め電位の生成及び高い電子温度の達成に、本質的なツールである。主要閉じ込め領域であるセントラル部では、クーロン・ドラッグによるイオン・エネルギー損失の低減、高電子温度の安定維持などが重要な研究課題である。また、電位生成領域であるプラグ部では、ミラー端部への強い電子流束を発生させることがわかっており、ECH パワー変調入射する事で、ダイバータ模擬研究に向けた間欠的な ELM 様高熱流負荷を生成することを重要な研究課題の一つと位置付けている。

セントラル部では、偏波制御がし易く高電子温度が得られた直接入射型をベースに、高電子温度と安定入射を両立できるように新しいミラー・アンテナを設計 (M6)・製作した (図 1)。28 GHz, 3 W の低電力発振器を用いて、製作した M6 の性能評価試験を行った。ターゲットに電波吸収体を用い、吸収体の温度上昇を測定し、放射分布計算結果と比較した結果、計算にないサイドローブが生じていることが明らかとなった (図 2 上)。サイドローブ発生の原因及び計算コードの改良等は課題として残っている。確認されたアンテナ性能は不十分であるが、ガンマ 10 実験に適用し、従来のアンテナを用いた実験との比較を行った。その結果、サイドローブのプラズマへの明らかな悪影響は見られず、軟 X 線強度においても非対称な分布は見られなかった。また、軟 X 線強度の振動は小さいが、パワー増大させても期待される軟 X 線強度増大は見られなかった (図 2 下)。アンテナ性能が不十分なので、パワーが十分に伝送されていない可能性があることが分かった。

プラグ部では、既存の 500 kW ジャイロトロンを用いた ECH システムにおいて、入射パワー変調実験を行い、熱流データ及び端損失電子データの取得を行った。図 3 に、ガンマ 10

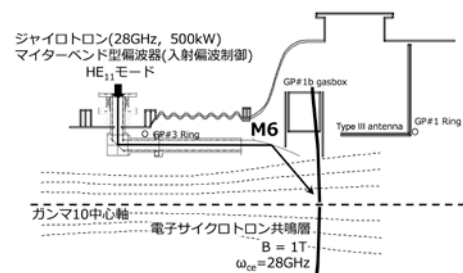


図 1 セントラル部 ECH アンテナ配位。

プラグ部及びエンド部の概略図を示す。プラグ部 ECH のパワー変調によるプラズマ応答を、端損失電子、端損失イオンを計測できる静電エネルギー型分析器(LED, ELIEA)を用いて解析した。熱流は、可動型カロリメーターにより計測した。今回設計した新型ミラーは、2 つあるミラー・アンテナ(M1, M2)の内、M2 のみを変更する設計として、製作コストが最小限になるように工夫した。その上で、設計で実現した新型ミラーの放射パワー密度分布の  $1/e$  半径( $r$ )は、本年度の目的である、パワー密度局所化効果のデータを取得するために必要な設計値を得る事が出来た。新型ミラーをガンマ 10 プラグ部の ECH システムに適用し、ECH パワー( $P_{P-ECH}$ )変調実験を実施した。その結果、 $P_{P-ECH}=450$  kW, 3 ms のプラグ部 ECH 入射で、 $30 \text{ MW/m}^2$  を超える高熱流束が得られた。図 4 に、LED により計測した ECH 変調入射時における電子熱流束の入射パワー依存性を示す。新型ミラーの適用により、2 倍程度の電子熱流束の増大が確認され、パワー密度局所化効果を確認する事が出来た。これにより、1 パルス当たり得られたエネルギー密度は、 $0.09 \text{ MJ/m}^2$  程度と見積もる事が出来る。ITER の Type I ELM のエネルギー密度は、 $0.2 \sim 2 \text{ MJ/m}^2$  と想定されており、それと比較すると数倍程度低いが、軸上に局所化した入射パワーの増大に伴い、エネルギー密

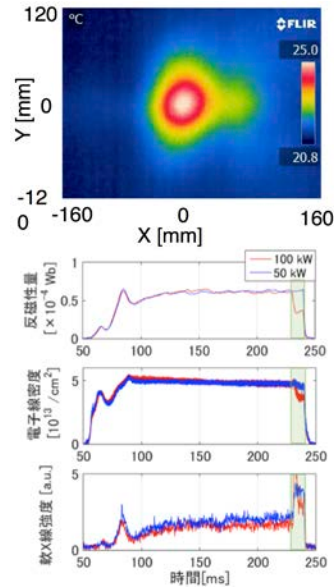


図 2 M6 アンテナの低電力性能評価試験とプラズマ加熱実験の初期結果。

度が、飽和することなくおよそ線形に増大することが明らかとなった。

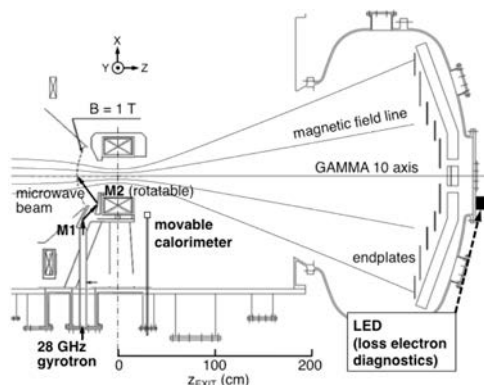


図 3 西側プラグ部及びエンド部断面概略図。

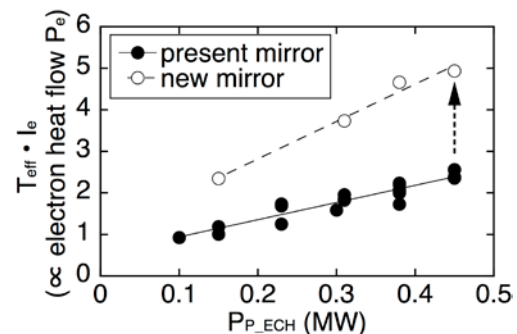


図 4 ECH 変調入射時における端損失電子熱流束の入射パワー依存性。

## [14] 核融合に向けた大電力ジャイロトロンの開発

### (1) はじめに

タンデムミラーGAMMA10/PDX では、プラグ部及びセントラル部電子サイクロトロン加熱(ECH)によるプラズマ閉じ込め性能の研究と改善に加え、基幹研究の新展開として開始されたダイバータ模擬研究の高度化に向け、ECH システムの大電力化、長パルス化を進めている。ECH/ECCD(電子サイクロトロン電流駆動)用大電力マイクロ波源である大電力ジャイロトロンの開発は、プラズマ研究センター(PRC)における研究開発の大きな柱の一つと成っており、共同研究として、核融合科学研究所(NIFS)のLHD用、九州大学のQUEST用、プリンストン大学のNSTX-U用、京都大学のHeliotron J用ジャイロトロンの開発も進めていると



ころである。さらに、量子科学技術研究開発機構(QST)との共同研究として DEMO 炉用 300GHz ジャイロトロンの開発も開始した。

2015 年度においては、GAMMA10/PDX のみならず、QUEST、NSTX-U、Heliotron J における ECH/ECCD 用として使用可能な、28/35GHz の 2 周波数で動作可能なジャイロトロンを設計を完了し、ジャイロトロン製作を開始した。一方、NIFS との共同研究では、154GHz と 116GHz の 2 周波数で動作可能な 2 周波数ジャイロトロンを設計を開始した。更に、JAEA との共同研究による 300GHz ジャイロトロンを開発を継続し、空洞発振に出力窓の反射が大きく影響することを明らかにした。

## (2) 28/35GHz 2 周波数ジャイロトロン開発

PRC では 28GHz-1MW ジャイロトロンを開発し、最大出力で 1.38MW、長パルス運転で 0.6MW-2s を達成した。本ジャイロトロンは、共同研究として、九州大学の QUEST 装置に適用され、2016 年度のプラズマ実験において 70kA のプラズマ電流立上を達成し、更なる電流増大が期待されている。次のジャイロトロン開発として、GAMMA10/PDX のダイバータ模擬実験において、より高い熱流束を生成するために 28GHz-2MW-3s のジャイロトロンを開発を進めている。このジャイロトロンは、共同研究を有効に進めるため、QUEST で必要とされる動作性能 28GHz-0.4MW-CW (連続動作)、NSTX-U で必要とされる動作性能 28 GHz-1.5~2 MW-3s、Heliotron J で必要とされる動作性能 35 GHz-1 MW-0.5 秒を 1 本のジャイロトロンで動作可能な、28 GHz と 35 GHz の両周波数で動作可能な 2 周波ジャイロトロンである。

2016 年度は、28/35 GHz 2 周波ジャイロトロン製作を完了し、性能評価試験を開始した。図 1 に出力窓に取付けた短パルス用ダミーロードにより測定した、ビーム電圧  $V_k=80\text{kV}$  における RF 出力と効率のビーム電流依存性を示す。周波数 28.045GHz において 1.27MW のガウス状ビーム出力が得られた。又、34.83GHz において、0.48MW のガウス状ビーム出力を確認した。更に 28GHz 発振における、RF 出力の空洞共振器磁場強度に対する依存性、RF 出力のアノード電圧に対する依存性を取得し、大きな問題が無いことを確認した。本 2 周波数ジャイロトロンは、発振相互作用を終えた後の電子ビームのエネルギーを回収する電位降下型コレクタ (CPD) を採用している。図 2 に CPD 電圧特性を示す。CPD 電圧  $V_{cpd}$  とともに発振出力は減少しているが、エネルギー回収により  $V_{cpd}=30\text{kV}$  において、総合効率  $\eta_t=50\%$  が得られた。

試験開始後、電源故障 (充電器、クローバ回路、切換器) やジャイロトロン外付け窓損傷等のトラブルが多発し、当初予定に対し大幅に試験が遅れているが、2017 年 4 月より、ダブルディスク窓の性能評価 (出力、冷却媒体流速に対する窓温度上昇) や 1.5MW 出力を目指した調整等を実施予定である。

## (3) 154/116GHz 2 周波数ジャイロトロン設計

NIFS とのジャイロトロン共同研究において、2014 年度までに開発した 3 機の 77GHz ジ

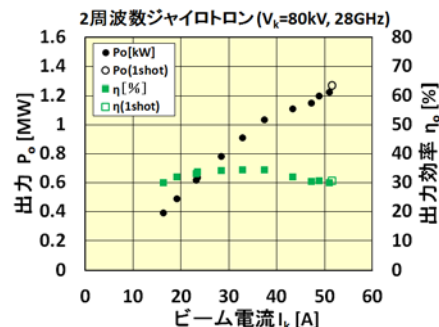


図 1 28GHz 発振における出力と効率のビーム電流依存性

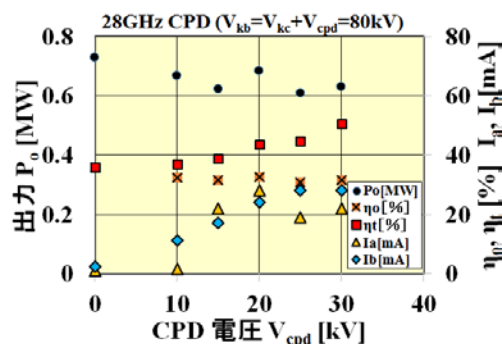


図 2 28GHz 出力 ( $P_o$ )、出力効率 ( $\eta_o$ )、総合効率 ( $\eta_t$ )、アノード電流 ( $I_a$ )、ボディ電流 ( $I_b$ ) のビーム電流依存性

ジャイロトロンと2機の154GHzジャイロトロンは、LHD実験に供されている。全入力電力は5.4MWに達し、LHDにおける電子系内部輸送障壁(electron ITB)実験等に大きく貢献している。これらの実績を踏まえ2015年度より、154GHzと116GHzの両方で動作可能な2周波数ジャイロトロンの開発を開始した。

2016年度は、2015年度の空洞共振器、電子銃、出力窓、コレクタの設計に引き続き、放射器の最適化と内蔵ミラー系の設計が行われた。4枚の内蔵ミラーによる出力窓までの電磁波伝送効率として、154GHzにおいて97.8%、116GHzにおいて98.1%が得られた。又、2周波数管製作に向け、DCブレードとコレクタ間の大型部品を含む一部共通部品の製作を行った。

#### (4) 300GHzジャイロトロンの開発

量子科学技術研究開発機構(QST)との共同研究として、2014年度より核融合発電に向けた原型炉Demo用300GHz帯ジャイロトロンの開発を進めている。2015年度の動作試験において、299.84 GHz (TE<sub>32,18</sub>)で522 kW、295.65 GHz (TE<sub>31,18</sub>)で542 kW、301.8 GHz (TE<sub>30,19</sub>)で528 kWを達成し、Demoの300GHz-MW-CWジャイロトン開発に向けての大きなステップとなる結果をえた。

2016年度試験においては、240GHz近傍の発振試験を実施し、磁場調整範囲において300kW程度の7つの発振モードを確認した。1つモードを除き、6つのモードに対しては、空洞磁場強度、電子ビーム入射位置、電磁波出力の電力ピーク半径/回転方向より発振モードを同定することで、発振周波数は226~254GHzであると推定され、サブミリ波領域での周波数可変ジャイロトロンの基礎となる多周波数の発振を確認した。

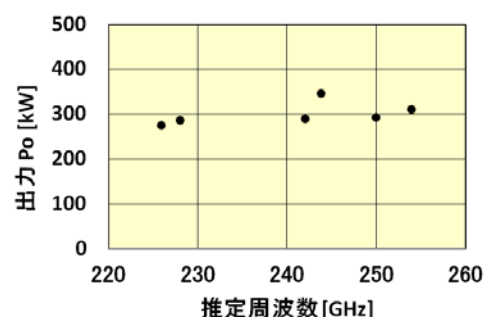


図3 300GHzジャイロトンにおける220~260GHz帯発振試験

#### <論文>

01. Md. Shahinul ISLAM, Yousuke NAKASHIMA, Hiroto MATSUURA, Kazuya ICHIMURA, Md. Maidul ISLAM, Keita SHIMIZU, Kazuma FUKUI, Masato OHUCHI, Kunpei NOJIRI, Akihiro TERAKADO, Naomichi EZUMI, Mizuki SAKAMOTO and Tsuyoshi IMAI, Study of Heat and Particle flux in the case of Gas Injection in the D-module of GAMMA 10/PDX, Plasma and Fusion Research **11** (2016) 2402042.
02. K. Ichimura, Y. Nakashima, M. M. Islam, M. S. Islam, K. Shimizu, K. Fukui, M. Ohuchi, M. Hirata, R. Ikezoe, M. Yoshikawa, N. Ezumi, M. Sakamoto, M. Ichimura and T. Imai, Study of the axial plasma confinement for high particle flux operations in GAMMA 10/PDX, Plasma and Fusion Research **11** (2016) 2405045.
03. M. M. Islam, Y. Nakashima, S. Kobayashia, Y. Nakanoa, N. Nishinob, K. Hosoi, K. Ichimura, M. S. Islam, K. Shimizu, K. Fukui, M. Ohuchi, A. Terakado, M. Yoshikawa, J. Kohagura, R. Ikezoe, X. Wang, M. Ichimura, T. Imai, Effect of Laval Nozzle in the GAMMA 10 SMBI Experiments, Plasma and Fusion Research **11** (2016) 2402053.
04. Masayuki Yoshikawa, Ryuya Ikezoe, Kouichi Ohta, Xiaolong Wang, Junko Kohagura, Yoriko Shima, Masayuki Chikatsu, Kazuya Ichimura, Mizuki Sakamoto, Makoto Ichimura, Tsuyoshi Imai, Ryutaro Minami, Kouhei Tsumura, and Yousuke Nakashima, Direct observation of electron heating by electron Landau damping of Alfvén ion cyclotron waves with Thomson scattering system in the tandem mirror GAMMA 10/PDX, Plasma and Fusion Research **11** (2016) 2402051.
05. X. Wang, Z. Ma, I. Sakagami, A. Mase, and M. Yoshikawa, Small, single-band, two-section transformer for real load impedances with symmetry property,

- Electronics Letters **52**, 11 (2016) 934-935.
06. A. Kuzmin, H. Zushi, I. Takag, S.K. Sharma, Y. Hirooka, M. Kobayashi, M. Sakamoto, K. Hanada, T. Onchi, Y. Oyama, N. Youshida, K. Nakamura, A. Fujisawa, H. Idei, Y. Nagashima, M. Hasegawa, K. Mishra,  
Hydrogen flux measurements with permeation probes in spherical tokamak QUEST, *Vacuum* **129** (2016) 178-182.
  07. H. Takeda, Y. Nakashima, A. Hatayama, M. S. Islam, K. Ichimura, M.M. Islam, K. Shimizu, K. Fukui, M. Ohuchi, M. Sakamoto, and T. Imai,  
Numerical Simulation Study of Plasma Flow in the GAMMA 10/PDX End-cell Using a Fluid Code, *Contributions to Plasma Physics* **56**, 6-8 (2015) 784-789.
  08. J. Kohagura, M. Yoshikawa, X. Wang, D. Kuwahara, N. Ito, Y. Nagayama, Y. Shima, K. Nojiri, M. Sakamoto, Y. Nakashima, and A. Mase,  
A 60-GHz interferometer with a local oscillator integrated antenna array for divertor simulation experiments on GAMMA 10/PDX, *Review of Scientific Instruments* **87** (2016) 11E127.
  09. Y. Hayashi, K. Jeřko, H.J. van der Meiden, J.W.M. Vernimmen, T.W. Morgan, N. Ohno, S. Kajita, M. Yoshikawa and S. Masuzaki,  
Plasma detachment study of high density helium plasmas in the Pilot-PSI device, *Nuclear Fusion* **56**, 12 (2016) 126006.
  10. H. TAKENO, Y. TOGO, T. KATSURA, Y. YASAKA, K. ICHIMURA, Y. NAKASHIMA,  
A Study of Miniaturization of Traveling Wave Direct Energy Converter for Loading on a Spacecraft, *Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, Aerospace Technology Japan* **14** (2016) Pb\_105-Pb\_109.
  11. X. Wang, Z. Ma, I. Sakagami, A. Mase, and M. Yoshikawa,  
A Small Wilkinson Power Divider with Complex Isolation Component, *Microwave and Optical Technology Letters* **58**, 9 (2016) 2163-2168.
  12. T. Kariya, T. Imai, R. Minami, T. Numakura, K. Tsumura, Y. Ebashi, Y. Endo,  
Development of Over MW Gyrotrons for Fusion at Frequencies from 14 GHz to Sub-terahertz, *IAEA-FEC2016* (2016) FIP/1-6Rc.
  13. H. Idei, T. Onchi, T. Kariya, K. Hanada, T. Imai, A. Ejiri, H. Togashi, T.I. Tsujimura, S. Kubo, O. Watanabe, K. Mishra, K. Nakamura, A. Fujisawa, Y. Nagashima, M. Hasegawa, S. Kawasaki, A. Higashijima, T. Nagata, H. Zushi, Y. Takase and A. Fukuyama,  
Non-inductive Electron Cyclotron Heating and Current Drive with Dual Frequency (8.2 /28 GHz) Waves in QUEST, *IAEA-FEC2016* (2016) EX/P4-50.
  14. Y. Nakashima, T. Imai, M. Sakamoto, I. Katanuma, T. Kariya, M. Yoshikawa, N. Ezumi, R. Minami, M. Hirata, J. Kohagura, T. Numakura, R. Ikezoe, K. Ichimura, X. Wang, M. Ichimura, and GAMMA 10/PDX group,  
Overview of recent progress and future in GAMMA 10/PDX project, *AIP Conference Proceedings* **1771** (2016) 020002.
  15. R. Minami, T. Imai, T. Kariya, T. Numakura, K. Tsumura, Y. Ebashi, S. Kajino, Y. Endo and Y. Nakashima,  
Measurements of Electron Temperature and Density Distribution on a V-Shaped Target of a Divertor Development of new mirror antenna for generation of high intermittent heat flux in GAMMA 10 tandem mirror, *AIP Conference Proceedings* **1771** (2016) 030003.
  16. S. Jang, M. Ichimura, S. Sumida, M. Hirata, R. Ikezoe, M. Sakamoto, T. Okada, Y. Iwamoto, Y. Onodera, J. Itagaki, K. Ichimura, and Y. Nakashima,  
ICRF heating in the plug/barrier region to control end-loss ions on GAMMA 10/PDX, *AIP Conference Proceedings* **1771** (2016) 030011.
  17. M. M. Islam, Y. Nakashima, S. Kobayashi, N. Nishino, K. Hosoi, K. Ichimura, M. S. Islam, K. Fukui, K. Shimizu, M. Ohuchi, M. Arai, T. Yokodo, G. Lee, M. Yoshikawa, J. Kohagura, M. Hirata, R. Ikezoe, M. Ichimura, M. Sakamoto, and T. Imai,

- Characteristics of SMBI fueling with laval nozzle in GAMMA 10 based on experimental and simulation results,  
AIP Conference Proceedings **1771** (2016) 030018.
18. T. Kariya, T. Imai, R. Minami, K. Tsumura, Y. Ebashi, H. Idei, K. Hanada, M. Ono, K. Komurasaki, T. Numakura, Y. Endo and Y. Nakashima,  
Development of 28/35 GHz dual-frequency gyrotron for ECH study,  
AIP Conference Proceedings **1771** (2016) 030020.
  19. T. Numakura, T. Imai, T. Kariya, R. Minami, K. Tsumura, Y. Ebashi and S. Kajino,  
Code development for the calculations of time-dependent multimode oscillations in the cavity of the future high-power gyrotrons,  
AIP Conference Proceedings **1771** (2016) 030023.
  20. T. Yokodo, Y. Nakashima, K. Shimizu, K. Ichimura, M. M. Islam, M. S. Islam, K. Fukui, M. Ohuchi, A. Terakado, K. Nojiri, M. Yoshikawa, N. Ezumi, M. Sakamoto, and T. Imai,  
Study of the impurity transport by injecting the gas to D-module in GAMMA 10/PDX,  
AIP Conference Proceedings **1771** (2016) 040007.
  21. R. Ikezoe, M. Ichimura, J. Itagaki, M. Hirata, S. Sumida, S. Jang, M. Yoshikawa, J. Kohagura, M. Sakamoto, and Y. Nakashima,  
Development of internal ICRF wave detection using microwave reflectometry on GAMMA 10,  
AIP Conference Proceedings **1771** (2016) 050002.
  22. Masayuki Yoshikawa, Koichi Ohta, Masayuki Chikatsu, Yoriko Shima, Junko Kohagura, Rytaro Minami, Mizuki Sakamoto, Yousuke Nakashima, Makoto Ichimura, Tsuyoshi Imai, Ryo Yasuhara, Ichihiko Yamada, Hisamichi Funaba, and Takashi Minami,  
Status of GAMMA 10/PDX-Thomson scattering system,  
AIP Conference Proceedings **1771** (2016) 050004.
  23. A. Terakado, M. Sakamoto, N. Ezumi, S. Togo, K. Nojiri, Y. Nakashima, K. Ichimura, K. Sawada, and J. Kohagura,  
Spatial distribution measurement of molecular activated recombination using hydrogen Balmer line intensities of divertor simulation plasma in GAMMA 10/PDX,  
AIP Conference Proceedings **1771** (2016) 050008.
  24. M. Ohuchi, Y. Nakashima, H. Matsuura, K. Ichimura, M. S. Islam, M. M. Islam, K. Fukui, T. Yokodo, G. Lee, N. Ezumi, M. Sakamoto, K. Tsumura, R. Minami, T. Kariya, and T. Imai,  
Evaluation of heat flux from the plasma flow by using calorimeter in the GAMMA 10/PDX end-cell,  
AIP Conference Proceedings **1771** (2016) 050011.
  25. M. Sakamoto, A. Terakado, K. Nojiri, N. Ezumi, K. Oki, Y. Nakashima, K. Ichimura, M. Fukumoto, M. Yoshikawa, J. Kohagura, T. Imai, and M. Ichimura,  
Impact of target temperature on hydrogen recycling in divertor simulation plasma of GAMMA 10/PDX tandem mirror,  
AIP Conference Proceedings **1771** (2016) 060001.
  26. N. Ezumi, K. Nojiri, A. Terakado, K. Ichimura, M. Sakamoto, and Y. Nakashima,  
Ion sensitive probe measurement of divertor simulation plasma in GAMMA 10/PDX,  
AIP Conference Proceedings **1771** (2016) 060002.
  27. K. Nojiri, M. Sakamoto, N. Ezumi, S. Togo, A. Terakado, K. Ichimura, M. Yoshikawa, J. Kohagura, and Y. Nakashima,  
Electron temperature and density distributions of detached plasma in divertor simulation experiments in GAMMA 10/PDX,  
AIP Conference Proceedings **1771** (2016) 060008.
  28. K. Fukui, Y. Nakashima, S. Nagata, K. Ichimura, M. M. Islam, M. S. Islam, K. Shimizu, M. Ohuchi, T. Yokodo, M. Arai, and K. Ohkawa,  
Study of beam-material interaction by using hydrogen ion beam,  
AIP Conference Proceedings **1771** (2016) 060011.
  29. M. S. Islam, Y. Nakashima, R. Tatsumi, A. Hatayama, K. Ichimura, M. M. Islam, K. Shimizu, K. Fukui, M. Ohuchi, T. Yokodo, G. Lee, N. Ezumi, M. Sakamoto, and T. Imai,  
Study of plasma behavior during impurity injection in the end-cell of GAMMA 10/PDX by fluid code,



- AIP Conference Proceedings **1771** (2016) 060015.
30. Kazuya Ichimura, Masakatsu Fukumoto, Md. Maidul Islam, Md. Shahinul Islam, Keita Shimizu, Kazuma Fukui, Masato Ohuchi, Kunpei Nojiri, Akihiro Terakado, Masayuki YOSHIKAWA, Naomichi Ezumi, Mizuki Sakamoto, and Yousuke Nakashima, Measurement of neutral gas pressure in the D-module of GAMMA 10/PDX by using ASDEX type fast ionization gauge, Review of Scientific Instruments **87**, 11 (2016) 11D424.
  31. Masayuki Yoshikawa, Ryo Yasuhara, Koichi Ohta, Masayuki Chikatsu, Yoriko Shima, Junko Kohagura, Mizuki Sakamoto, Yousuke Nakashima, Tsuyoshi Imai, Makoto Ichimura, Ichihiko Yamada, Hisamichi Funaba and Takashi Minami, High time resolved electron temperature measurements by using the multi-pass Thomson scattering system in GAMMA 10/PDX, Review of Scientific Instruments **87**, 11 (2016) 11D617.
  32. J. Kohagura, M. Yoshikawa, X. Wang, D. Kuwahara, N. Ito, Y. Nagayama, Y. Shima, K. Nojiri, M. Sakamoto, Y. Nakashima, and A. Mase, A 60-GHz interferometer with a local oscillator integrated antenna array for divertor simulation experiments on GAMMA 10/PDX, Review of Scientific Instruments **87**, 11 (2016) 11E127.
  33. R. Minami, T. Imai, T. Kariya, T. Numakura, M. Uehara, K. Tsumura, Y. Ebashi, S. Kajino, Y. Endo, and Y. Nakashima, Measurement of effect of electron cyclotron heating in a tandem mirror plasma using a semiconductor detector array and an electrostatic energy analyzer, Review of Scientific Instruments **87**, 11 (2016) 11E306.
  34. I. Yamada, H. Funaba, R. Yasuhara, H. Hayashi, N. Kenmochi, T. Minami, M. Yoshikawa, K. Ohta, J. H. Lee, and S. H. Lee, Calibrations of the LHD Thomson scattering system, Review of Scientific Instruments **87**, 11 (2016) 11E531.
  35. K. Ohta, M. Yoshikawa, R. Yasuhara, M. Chikatsu, Y. Shima, J. Kohagura, M. Sakamoto, Y. Nakasima, T. Imai, M. Ichimura, I. Yamada, H. Funaba, and T. Minami, Analysis method for Thomson scattering diagnostics in GAMMA 10/PDX, Review of Scientific Instruments **87**, 11 (2016) 11E730.
  36. X. Wang, M. Ohira, Z. Ma, I. Sakagami, A. Mase, and M. Yoshikawa, Capacitive/inductive compensation factor in coupled lines wilkinson power divider design, Microwave and Optical Technology Letters **58**, 12 (2016) 2940-2944.
  37. Kohei TAKEYAMA, Noriyasu OHNO, Masayuki YOSHIKAWA, Hirohiko TANAKA and Shin KAJITA, Localized Density Fluctuation in the Downstream of Detached Plasma, Plasma and Fusion Research **12** (2016) 1202007.
  38. R. Ikezoe, M. Ichimura, T. Okada, J. Itagaki, M. Hirata, S. Sumida, S. Jang, K. Izumi, A. Tanaka, M. Yoshikawa, J. Kohagura, M. Sakamoto, and Y. Nakashima, Multi-point measurement using two-channel reflectometer with antenna switching for study of high-frequency fluctuations in GAMMA 10, Review of Scientific Instruments **88** (2017) 33504.

#### <学位論文>

学位論文（修士）[数理物質科学研究科]

01. 大内理人 [修士（理学），数理物質科学研究科物理学専攻]  
GAMMA 10/PDX 端部におけるプラズマ熱流計測と計測システムの改良
02. 太田晃一 [修士（理学），数理物質科学研究科物理学専攻]  
GAMMA 10/PDX におけるマルチパストムソン散乱計測の解析手法の確立
03. 田中裕樹 [修士（理学），数理物質科学研究科物理学専攻]  
高エネルギーの銅イオンにより欠陥導入されたタングステンの重水素吸蔵特性
04. 津村康平 [修士（理学），数理物質科学研究科物理学専攻]  
GAMMA 10/PDX における改良型 ECRH 反射鏡を用いた端損失熱流束生成実験及

- び ECRH 用 28/35GHz-MW 級 2 周波数ジャイロトロンの性能評価試験
05. 成田昂平 [修士 (理学), 数理解質科学研究科物理学専攻]  
GAMMA 10 におけるセントラル ECH 印加プラズマの金中性粒子ビームプローブを用いた電位計測
06. 福井良磨 [修士 (理学), 数理解質科学研究科物理学専攻]  
GAMMA 10/PDX におけるビーム・材料相互作用研究の為にビーム入射系の開発
07. ジャン ソウオン [修士 (理学), 数理解質科学研究科物理学専攻]  
GAMMA10/PDX 端損失イオン束の制御に向けた高周波加熱実験
- 学位論文 (学士) [理工学群]
08. 九島槇之介 [学士 (理学), 理工学群物理学類]  
GAMMA 10/PDX アンカー部における紫外・可視分光測定システムを用いた不純物分光計測
09. 田沼康平 [学士 (理学), 理工学群物理学類]  
GAMMA 10/PDX セントラル部における電子サイクロトロン共鳴加熱時のイオンセンシティブプローブ計測
10. 泉 昂希 [学士 (理学), 理工学群物理学類]  
GAMMA 10 における高周波揺動に起因する端損失イオンの MCP を用いた計測
11. 岡田麻希 [学士 (理学), 理工学群物理学類]  
プラズマ加熱用 28/35GHz 2 周波数ジャイロトロンの性能評価試験
12. 櫻庭 史郎 [学士 (理学), 理工学群物理学類]  
GAMMA 10/PDX ダイバータ模擬部の Thomson 散乱計測システムの開発
13. 清水弘慈 [学士 (理学), 理工学群物理学類]  
GAMMA 10 セントラル部における 6 チャンネルマイクロ波干渉計を用いた電子密度計測
14. 鈴木 佑 [学士 (理学), 理工学群物理学類]  
小型プラズマ生成装置 APSEDAS における実時間分光エリプソメトリーシステムの製作と初期測定
15. 関口健太 [学士 (理学), 理工学群物理学類]  
軟 X 線計測による GAMMA 10/PDX プラグ ECH アンテナミラー角度の最適化研究
16. 田中温人 [学士 (理学), 理工学群物理学類]  
GAMMA 10 高周波アンテナ配位がセントラル周辺部浮遊電位分布に与える影響
17. 三上智弘 [学士 (理学), 理工学群物理学類]  
GAMMA 10/PDX ダイバータ模擬実験装置における He 分光システムの改良及び HeI 線強度比法による電子温度・電子密度評価
18. 山下双太郎 [学士 (理学), 理工学群物理学類]  
GAMMA 10/PDX ダイバータ模擬実験における各種放射冷却ガスを用いた ASDEX ゲージの感度校正実験
19. 吉本 翼 [学士 (理学), 理工学群物理学類]  
GAMMA 10/PDX ダイバータ模擬実験装置内から上流領域におけるプラズマ分光計測
20. 川又裕也 [学士 (工学), 応用理工学類]  
開放端系の交換型不安定性に関する研究
21. 木下洋輔 [学士 (工学), 応用理工学類]  
静電プローブを用いた GAMMA10/PDX ダイバータ模擬プラズマのイオン温度計測
22. 小林 楓 [学士 (工学), 応用理工学類]  
レーザー誘起蛍光法を用いた GAMMA10/PDX ダイバータ模擬プラズマのイオン・中性粒子速度分布計測システムの開発

<講演>

01. Y. Nakashima, K. Ichimura, M.S. Islam, K. Shimizu, T. Yokodo, M. Sakamoto, N. Ezumi, K. Fukui, M. Hirata, M. Ichimura, R. Ikezoe, T. Imai, M.M. Islam, I. Katanuma, T. Kariya, J. Kohagura, R. Minami, K. Nojiri, T. Numakura, M. Ohuchi, A. Terakado, M. Yoshikawa, X. Wang, N. Asakura, M. Fukumoto, A. Hatayama, Y. Hirooka, S. Kado, H. Kubo, S. Masuzaki, H. Matsuura, T. Nakano, S. Nagata, N. Nishino, N. Ohno, A. Sagara, S. Sawada, M. Shoji, A. Tonegawa, Y. Ueda,  
Impact of gas injection on detached plasma formation in divertor simulation experiments using the GAMMA 10/PDX tandem mirror,  
22nd International Conference on Plasma Surface Interactions in Controlled Fusion Devices (22nd PSI) (Roma, Italy, 2016.5.30-2015.6.3) P1-108.
02. I. Katanuma, G. Oda, T. Oi,  
Particle simulation on the blob production in an open system,  
22nd International Conference on Plasma Surface Interactions in Controlled Fusion Devices (22nd PSI) (Roma, Italy, 2016.5.30-2015.6.3) P2-29.
03. M. Sakamoto, A. Terakado, K. Nojiri, N. Ezumi, Y. Nakashima, K. Okia, K. Ichimura, M. Fukumoto, K. Shimizu, K. Sawada, N. Ohno, S. Masuzaki, J. Kohagura, M. Yoshikawa,  
Molecular activated recombination in divertor simulation plasma on GAMMA 10/PDX,  
22nd International Conference on Plasma Surface Interactions in Controlled Fusion Devices (22nd PSI) (Roma, Italy, 2016.5.30-2015.6.3) P2-115.
04. N. Ezumi, K. Nojiri, A. Terakado, K. Ichimura, M. Sakamoto, Y. Nakashima, K. Sawada, N. Ohno, H. Tanaka, M. Kobayashi, S. Masuzaki,  
Evaluation of ion temperature and its anisotropy using an ion sensitive probe in the divertor simulation plasma of GAMMA 10/PDX,  
22nd International Conference on Plasma Surface Interactions in Controlled Fusion Devices (22nd PSI) (Roma, Italy, 2016.5.30-2015.6.3) P3-29.
05. R. Minami, T. Imai, T. Kariya, T. Numakura, M. Uehara, K. Tsumura, Y. Ebashi, S. Kajino, Y. Endo and Y. Nakashima,  
Measurement of ECH Effect in a Tandem Mirror Plasma Using a Semiconductor Detector Array and an Electrostatic Energy Analyzer,  
21st Topical Conference on High-Temperature Plasma Diagnostics (HTPD 2016) (Madison, Wisconsin, USA, 2016.6.5-2016.6.9).
06. K. Ichimura, M. Fukumoto, M. M. Islam, M. S. Islam, K. Shimizu, K. Fukui, M. Ohuchi, K. Nojiri, A. Terakado, M. Yoshikawa, N. Ezumi, M. Sakamoto and Y. Nakashima,  
Measurement of neutral gas pressure in the D-module of GAMMA 10/PDX by using ASDEX type fast ionization gauge,  
21st Topical Conference on High-Temperature Plasma Diagnostics (HTPD 2016) (Madison, Wisconsin, USA, 2016.6.5-2016.6.9) 1.2.26.
07. Ichihiro Yamada, Hisamichi Funaba, Ryo Yasuhara, Hiroshi Hayashi, Naoki Kenmochi, Takashi Minami, Masayuki YOSHIKAWA, Koichi Ohta, Jongha Lee, Seung Hun Lee,  
21st Topical Conference on High-Temperature Plasma Diagnostics (HTPD 2016) (Madison, Wisconsin, USA, 2016.6.5-2016.6.9) 2.2.52.
08. Masayuki YOSHIKAWA, Ryo Yasuhara, Koichi Ohta, Masayuki Chikatsu, Yoriko Shima, Junko KOHAGURA, Mizuki Sakamoto, Yosuke Nakashima, Tsuyoshi Imai, Makoto Ichimura, Ichihiro Yamada, Hisamichi Funaba, Takashi Minami,  
High time resolved electron temperature measurements by using the multi-pass Thomson scattering system,  
21st Topical Conference on High-Temperature Plasma Diagnostics (HTPD 2016) (Madison, Wisconsin, USA, 2016.6.5-2016.6.9) 2.2.53.
09. Junko KOHAGURA, Masayuki YOSHIKAWA, Xiaolong WANG, Daisuke Kuwahara, Naoki ITO, Yoshio Nagayama, Yoriko Shima, Kunpei Nojiri, Mizuki Sakamoto, Yosuke Nakashima, ATSUSHI MASE,  
A 60-GHz Interferometer with a Local Oscillator Integrated Antenna Array for Divertor Simulation Experiments on GAMMA 10/PDX,

- 21st Topical Conference on High-Temperature Plasma Diagnostics (HTPD 2016) (Madison, Wisconsin, USA, 2016.6.5-2016.6.9) 4.2.17.
10. Koichi Ohta, Masayuki YOSHIKAWA, Ryo Yasuhara, Masayuki Chikatsu, Yoriko Shima, Junko KOHAGURA, Mizuki Sakamoto, Yosuke Nakasima, Tsuyoshi Imai, Makoto Ichimura, Ichihiro Yamada, Hisamichi Funaba, Takashi Minami,  
Improvement of analyzing method of Thomson scattering diagnostics in GAMMA 10/PDX,  
21st Topical Conference on High-Temperature Plasma Diagnostics (HTPD 2016) (Madison, Wisconsin, USA, 2016.6.5-2016.6.9) 7.2.47.
  11. A. Mase, Y. Kogi, D. Kuwahara, Y. Nagayama, X. Wang, N. Ito, J. Kohagura, M. Yoshikawa, M. Inutake, H. Ikezi, T. Tokuzawa,  
Application of radar reflectometer to plasmas and other fields,  
The 18th International Congress on Plasma Physics (ICPP2016) (Kaohsiung, Taiwan, 2016.6.27-2016.7.1) B3P2-5.
  12. M. Sakamoto, A. Terakado, K. Nojiri, N. Ezumi, K. Oki, Y. Nakashima, K. Ichimura, M. Fukumoto, M. Yoshikawa, J. Kohagura, T. Imai, and M. Ichimura,  
Hydrogen recycling study utilizing end region in the GAMMA 10/PDX tandem mirror,  
11th International Conference on Open Magnetic Systems for Plasma Confinement (OS2016) (Novosibirsk, Russia, 2016.8.8-2016.8.12).
  13. N. Ezumi, K. Nojiri, A. Terakado, K. Ichimura, M. Sakamoto, and Y. Nakashima,  
Ion sensitive probe measurement of divertor simulation plasma in GAMMA 10/PDX,  
11th International Conference on Open Magnetic Systems for Plasma Confinement (OS2016) (Novosibirsk, Russia, 2016.8.8-2016.8.12).
  14. K. Nojiri, M. Sakamoto, N. Ezumi, S. Togo, A. Terakado, K. Ichimura, M. Yoshikawa, J. Kohagura, and Y. Nakashima,  
Electron temperature and density distributions of detached plasma in divertor simulation experiments in GAMMA 10/PDX,  
11th International Conference on Open Magnetic Systems for Plasma Confinement (OS2016) (Novosibirsk, Russia, 2016.8.8-2016.8.12).
  15. A. Terakado, M. Sakamoto, N. Ezumi, S. Togo, K. Nojiri, Y. Nakashima, K. Ichimura, K. Sawada, and J. Kohagura,  
Spatial distribution measurement of molecular activated recombination using hydrogen Balmer line intensities of divertor simulation plasma in GAMMA 10/PDX,  
11th International Conference on Open Magnetic Systems for Plasma Confinement (OS2016) (Novosibirsk, Russia, 2016.8.8-2016.8.12).
  16. R. Ikezoe, M. Ichimura, J. Itagaki, M. Hirata, S. Sumida, S. Jang, M. Yoshikawa, J. Kohagura, M. Sakamoto, Y. Nakashima,  
Development of internal ICRF wave detection using microwave reflectometry on GAMMA 10,  
11th International Conference on Open Magnetic Systems for Plasma Confinement (OS2016) (Novosibirsk, Russia, 2016.8.8-2016.8.12).
  17. S. Jang, M. Ichimura, S. Sumida, M. Hirata, R. Ikezoe, M. Sakamoto, T. Okada, Y. Iwamoto, Y. Onodera, J. Itagaki, K. Ichimura, Y. Nakashima,  
ICRF heating in the plug/barrier region to control end-loss ions on GAMMA 10/PDX,  
11th International Conference on Open Magnetic Systems for Plasma Confinement (OS2016) (Novosibirsk, Russia, 2016.8.8-2016.8.12).
  18. MINAMI Ryutaro, IMAI Tsuyoshi, KARIYA Tsuyoshi, NUMAKURA Tomoharu, TSUMURA Kohei, EBASHI Yuto, KAJINO Satoshi, ENDO Yoichi, NAKASHIMA Yousuke,  
Development of New Mirror Antenna for Generation of High Intermittent Heat Flux in GAMMA 10 Tandem Mirror,  
11th International Conference on Open Magnetic Systems for Plasma Confinement (OS2016) (Novosibirsk, Russia, 2016.8.8-2016.8.12).
  19. KARIYA Tsuyoshi, IMAI Tsuyoshi, ENDO Yoichi, NAKASHIMA Yousuke, MINAMI Ryutaro, TSUMURA Kohei, EBASHI Yuto, IDEI Hiroshi, HANADA Kazuaki, ONO Masayuki, KOMURASAKI Kimiya, NUMAKURA Tomoharu,  
Development of 28/35 GHz dual-frequency gyrotron for ECH study,  
11th International Conference on Open Magnetic Systems for Plasma Confinement (OS2016)

- (Novosibirsk, Russia, 2016.8.8-2016.8.12).
20. NUMAKURA Tomoharu, IMAI Tsuyoshi, KARIYA Tsuyoshi, MINAMI Ryutaro, TSUMURA kohei, EBASHI Yuto, KAJINO Satoshi,  
Code Development for the Calculations of the Time- dependent Multimode Oscillations in the Cavity of the Future High-Power Gyrotrons,  
11th International Conference on Open Magnetic Systems for Plasma Confinement (OS2016) (Novosibirsk, Russia, 2016.8.8-2016.8.12).
  21. Y. Nakashima, T. Imai, M. Sakamoto, I. Katanuma, T. Kariya, M. Yoshikawa, N. Ezumi, R. Minami, M. Hirata, J. Kohagura, T. Numakura, R. Ikezoe, K. Ichimura, X. Wang, M. Ichimura, and GAMMA 10/PDX group,  
Overview of recent progress and future in GAMMA 10/PDX project,  
11th International Conference on Open Magnetic Systems for Plasma Confinement (OS2016) (Novosibirsk, Russia, 2016.8.8-2016.8.12).
  22. Y. Nakashima, K. Ichimura, Md. S. Islam, Md. M. Islam, K. Shimizu, K. Fukui, M. Ohuchi, T. Yokodo, M. Sakamoto, N. Ezumi, K. Nojiri, A. Terakado, M. Yoshikawa, M. Hirata, M. Ichimura, R. Ikezoe, T. Imai, T. Kariya, I. Katanuma, J. Kohagura, R. Minami, T. Numakura, X. Wang,  
Recent Results of Characterization of Detached Plasma in Divertor Simulation Experiments Using the GAMMA 10/PDX Tandem Mirror,  
11th International Conference on Open Magnetic Systems for Plasma Confinement (OS2016) (Novosibirsk, Russia, 2016.8.8-2016.8.12).
  23. M. M. Islam, Y. Nakashima, S. Kobayashi, N. Nishino, K. Hosoi, K. Ichimura, M. S. Islam, K. Fukui, K. Shimizu, M. Ohuchi, M. Arai, T. Yokodo, G. Lee, M. Yoshikawa, J. Kohagura, M. Hirata, R. Ikezoe, M. Ichimura, M. Sakamoto, and T. Imai,  
Characteristics of SMBI fueling with laval nozzle in GAMMA 10 based on experimental and simulation results,  
11th International Conference on Open Magnetic Systems for Plasma Confinement (OS2016) (Novosibirsk, Russia, 2016.8.8-2016.8.12).
  24. T. Yokodo, Y. Nakashima, K. Shimizu, K. Ichimura, M. M. Islam, M. S. Islam, K. Fukui, M. Ohuchi, A. Terakado, K. Nojiri, M. Yoshikawa, N. Ezumi, M. Sakamoto, and T. Imai,  
Study of the impurity transport by injecting the gas to D-module in GAMMA 10/PDX,  
11th International Conference on Open Magnetic Systems for Plasma Confinement (OS2016) (Novosibirsk, Russia, 2016.8.8-2016.8.12).
  25. M. Ohuchi, Y. Nakashima, H. Matsuura, K. Ichimura, M. S. Islam, M. M. Islam, K. Fukui, T. Yokodo, G. Lee, N. Ezumi, M. Sakamoto, K. Tsumura, R. Minami, T. Kariya, and T. Imai,  
Evaluation of heat flux from the plasma flow by using calorimeter in the GAMMA 10/PDX end-cell,  
11th International Conference on Open Magnetic Systems for Plasma Confinement (OS2016) (Novosibirsk, Russia, 2016.8.8-2016.8.12).
  26. K. Fukui, Y. Nakashima, S. Nagata, K. Ichimura, M. M. Islam, M. S. Islam, K. Shimizu, M. Ohuchi, T. Yokodo, M. Arai, and K. Ohkawa,  
Study of beam-material interaction by using hydrogen ion beam,  
11th International Conference on Open Magnetic Systems for Plasma Confinement (OS2016) (Novosibirsk, Russia, 2016.8.8-2016.8.12).
  27. M. S. Islam, Y. Nakashima, R. Tatsumi, A. Hatayama, K. Ichimura, M. M. Islam, K. Shimizu, K. Fukui, M. Ohuchi, T. Yokodo, G. Lee, N. Ezumi, M. Sakamoto, and T. Imai,  
Study of plasma behavior during impurity injection in the end-cell of GAMMA 10/PDX by fluid code,  
11th International Conference on Open Magnetic Systems for Plasma Confinement (OS2016) (Novosibirsk, Russia, 2016.8.8-2016.8.12).
  28. Masayuki Yoshikawa, Koichi Ohta, Masayuki Chikatsu, Yoriko Shima, Junko Kohagura, Ryutaro Minami, Mizuki Sakamoto, Yousuke Nakashima, Makoto Ichimura, Tsuyoshi Imai, Ryo Yasuhara, Ichihiko Yamada, Hisamichi Funaba, and Takashi Minami,  
Status of GAMMA 10/PDX-Thomson Scattering System,  
11th International Conference on Open Magnetic Systems for Plasma Confinement (OS2016)

- (Novosibirsk, Russia, 2016.8.8-2016.8.12).
29. T. Shimozuma, S. Kubo, Y. Yoshimura, H. Igami, H. Takahashi, T. Tsujimura, R. Makino, S. Ito, Y. Mizuno, K. Okada, S. Kobayashi, R. Minami, T. Kariya, T. Imai,  
Present Status of the ECRH System in LHD and Development of a New Gyrotron and the Related Component,  
US-EU-JA RF Technology Workshop (Leinsweiler Hof, Germany, 2016.9.21-2016.9.23).
  30. Hiroki Tanaka, Mizuki Sakamoto, Hideo Watanabe, Masayuki Tokitani, Naoko Ashikawa, Shuntaro Ino, Akihiro Terakado, Naomichi Ezumi, Yousuke Nakashima,  
Deuterium retention in heavy-ion-irradiated tungsten exposed to low energy and high flux plasma,  
The 13th China-Japan Symposium on Materials for Advanced Energy Systems and Fission and Fusion Engineering (Hefei, China, 2016.9.26-2016.9.29) Po 2-051.
  31. N. Ezumi, K. Nojiri, A. Terakado, K. Ichimura, M. Sakamoto and Y. Nakashima,  
Investigation of the behavior of ion and neutral particle during detached plasma operation in GAMMA 10/PDX,  
The 1st International "All-about-Divertor" Symposium (IADiS-1) (Kyoto, Japan, 2016.10.14-2016.10.15).
  32. Y. Nakashima, K. Ichimura, M. Sakamoto, N. Ezumi, I. Katanuma, M. Yoshikawa, M. S. Islam, M. M. Islam, K. Fukui, M. Ohuchi, T. Yokodo, K. Nojiri, A. Terakado, M. Hirata, M. Ichimura, R. Ikezoe, T. Imai, T. Kariya, J. Kohagura, K. Lee, R. Minami, T. Numakura and S. Togo,  
Present Status and Future of Divertor Simulation Research Using the GAMMA 10 /PDX Tandem Mirror,  
The 1st International "All-about-Divertor" Symposium (IADiS-1) (Kyoto, Japan, 2016.10.14-2016.10.15).
  33. M. S. Islam, Y. Nakashima, A. Hatayama, K. Ichimura, M. M. Islam, K. Fukui, M. Ohuchi, T. Yokodo, G. Lee, S. Togo, N. Ezumi, M. Sakamoto and T. Imai,  
Numerical Simulation of Detached Plasma in the End-Cell of GAMMA 10/PDX for Divertor Simulation Study,  
The 1st International "All-about-Divertor" Symposium (IADiS-1) (Kyoto, Japan, 2016.10.14-2016.10.15).
  34. M. Sakamoto, H. Tanaka, H. Watanabe, N. Yoshida, M. Tokitani, S. Ino, A. Terakado, N. Ezumi, Y. Nakashima,  
Hydrogen Isotope Retention in Tungsten Surface-modified by Heavy Ion Irradiation, Helium bubbles and Tungsten Deposition,  
26th IAEA Fusion Energy Conference (Kyoto, Japan, 2016.10.17-2016.10.22) MPT/P5-14.
  35. R. Ikezoe, M. Ichimura, M. Hirata, T. Okada, S. Sumida, S. Jang, J. Itagaki, M. Yoshikawa, J. Kohagura, M. Sakamoto, Y. Nakashima,  
Spatial Structure of Spontaneously Excited ICRF Waves and Relevant High-Energy Ion Loss in the GAMMA 10 Tandem Mirror,  
26th IAEA Fusion Energy Conference (Kyoto, Japan, 2016.10.17-2016.10.22) EX/P8-43.
  36. T. Kariya, T. Imai, R. Minami, T. Numakura, K. Tsumura, Y. Ebashi, Y. Endo, R. Ikezoe, Y. Nakashima, K. Sakamoto, Y. Oda, R. Ikeda, K. Takahashi, T. Kobayashi, S. Moriyama, T. Shimozuma, S. Kubo, Y. Yoshimura, H. Takahashi, H. Igami, S. Ito, K. Okada, S. Kobayashi, T. Mutoh, H. Idei, K. Hanada, K. Nagasaki, M. Ono, T. Eguchi, Y. Mitunaka,  
Development of Over MW Gyrotrons for Fusion at Frequencies from 14 GHz to Sub-terahertz,  
26th IAEA Fusion Energy Conference (Kyoto, Japan, 2016.10.17-2016.10.22) FIP/1-6Rc.
  37. H. Idei, T. Onchi, T. Kariya, K. Hanada, T. Imai, A. Ejiri, O. Watanabe, K. Mishra, K. Nakamura, A. Fujisawa, Y. Nagashima, M. Hasegawa, S. Kawasaki, T. Nakashima, A. Higashijima, H. Zushi, Y. Takase, A. Fukuyama,  
Non-inductive Electron Cyclotron Heating and Current Drive with Dual Frequency (8.2 /28 GHz) Waves in QUEST,  
26th IAEA Fusion Energy Conference (Kyoto, Japan, 2016.10.17-2016.10.22) EX/P4-50.
  38. Y. Nakashima, K. Ichimura, M. S. Islam, M. Sakamoto, N. Ezumi, M. Hirata, M. Ichimura, R. Ikezoe, T. Imai, T. Kariya, I. Katanuma, J. Kohagura, R. Minami, T. Numakura,

- M. Yoshikawa, T. Iijima, M. M. Islam, K. Nojiri, K. Shimizu, A. Terakado, S. Togo, N. Asakura, M. Fukumoto, A. Hatayama, Y. Hirooka, S. Kado, H. Kubo, S. Masuzaki, H. Matsuura, T. Nakano, S. Nagata, N. Nishino, N. Ohno, A. Sagara, K. Sawada, M. Shoji, A. Tonegawa, Y. Ueda,  
Recent Progress of Divertor Simulation Research Using the GAMMA 10/PDX Tandem Mirror, 26th IAEA Fusion Energy Conference (Kyoto, Japan, 2016.10.17-2016.10.22) EX-P8-42.
39. I. Katanuma, G. Oda, T. Oi,  
Particle simulation on blob formation and propagation in an open system,  
26th IAEA Fusion Energy Conference (Kyoto, Japan, 2016.10.17-2016.10.22) TH/P6-15.
  40. R. Ikezoe, M. Ichimura, J. Itagaki, M. Hirata, S. Sumida, S. Jang, K. Izumi, A. Tanaka, M. Yoshikawa, J. Kohagura, M. Sakamoto, Y. Nakashima,  
Probing of high-frequency coherent fluctuations by using a two-channel microwave reflectometer with antenna switching,  
58th Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics (San Jose, USA, 2016.10.31-2016.11.4) CP10.00168.
  41. T. Onchi, H. Idei, M. Hasegawa, H. Ohwada, H. Zushi, K. Hanada, T. Kariya, K. Mishra, T. Shikama,  
Intrinsic toroidal rotation in 28 GHz electron cyclotron heated plasmas on QUEST spherical tokamak,  
58th Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics (San Jose, USA, 2016.10.31-2016.11.4).
  42. I. Katanuma,  
A design of the MHD stable axisymmetric mirror,  
58th Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics (San Jose, USA, 2016.10.31-2016.11.4) YP10.00037.
  43. D. Kuwahara, N. Ito, Y. Nagayama, H. Tsuchiya, M. Yoshikawa, J. Kohagura, T. Yoshinaga, S. Yamaguchi, Y. Kogi and A. Mase,  
Development of Local Oscillator Integrated Antenna Array for Electron Cyclotron Emission Imaging Diagnostics,  
58th Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics (San Jose, USA, 2016.10.31-2016.11.4) NP10.00163.
  44. N. Ezumi and GAMMA10/PDX Group,  
Recent Results of Divertor Simulation Experiment in the Tandem Mirror GAMMA10/PDX, 2016 U.S.-Japan Workshop on Heat Removal and Plasma Material Interactions for Fusion (Berkeley, CA, U.S.A, 2016.11.7-2016.11.8).
  45. T. Tokuzawa, H. Tsuchiya, T. Saito, M. Tani, K. Yamamoto, H. Kitahara, M. Nishiura, J. Kohagura, M. Yoshikawa, S. Inagaki, I. Yamada and K. Tanaka,  
Study of THz pulse wave application for the plasma diagnostics,  
The 6th International Workshop on Far-Infrared Technologies (IW-FIRT 2017) and The 2nd International Symposium on Development of High Power Terahertz Science and Technology (DHP-TST 2017) (Fukui, Japan, 2017.3.7-2017.3.9) P19.
  46. Keishi Sakamoto, Tsuyoshi Kariya, Yasuhisa Oda, Ryutaro Minami, Ryosuke Ikeda, Takayuki Kobayashi, Koji Takahashi, Tsuyoshi Imai,  
Development of Sub-Terahertz Gyrotron for DEMO,  
The 6th International Workshop on Far-Infrared Technologies (IW-FIRT 2017) and The 2nd International Symposium on Development of High Power Terahertz Science and Technology (DHP-TST 2017) (Fukui, Japan, 2017.3.7-2017.3.9).
  47. 津村康平, 假家強, 今井剛, 南龍太郎, 沼倉友晴, 江橋優斗, 梶野悟史, 大内理人, 中嶋洋輔,  
GAMMA10/PDX における ECRH による熱流束生成実験及び反射鏡性能評価試験,  
第 11 回核融合エネルギー連合講演会, (九州大学伊都キャンパス椎木講堂, 2016.7.14-2016.7.15) 14P031.
  48. 江橋優斗, 今井剛, 假家強, 南龍太郎, 沼倉友晴, 津村康平, 梶野悟史, 中嶋洋輔,  
28/35GHz 2 周波数高パワージャイロトロン用ダブルディスク窓の性能評価試験,  
第 11 回核融合エネルギー連合講演会, (九州大学伊都キャンパス椎木講堂,

- 2016.7.14-2016.7.15) 14P032.
49. 梶野悟史, 今井剛, 假家強, 南龍太郎, 沼倉友晴, 津村康平, 江橋優斗, 中嶋洋輔, 坂本瑞樹, 吉川正志,  
GAMMA10/PDX セントラル ECRH アンテナの改良研究,  
第 11 回核融合エネルギー連合講演会, (九州大学伊都キャンパス椎木講堂,  
2016.7.14-2016.7.15) 14P033.
50. 板垣惇平, 池添竜也, 市村真, 平田真史, 隅田脩平, ジャン・ソウオン, 吉川正志, 小波蔵純子, 坂本瑞樹, 中嶋洋輔,  
反射計を用いた GAMMA 10 アンカー部 ICRF 加熱時の密度分布の変動と揺動の同時計測,  
第 11 回核融合エネルギー連合講演会, (九州大学伊都キャンパス椎木講堂,  
2016.7.14-2016.7.15) 14P034.
51. 伊能俊太郎, 坂本瑞樹, 田中裕樹, 渡邊英雄, 時谷政行, 芦川直子, 寺門明紘, 野尻訓平, 江角直道, 中嶋洋輔,  
GAMMA 10 セントラル部に長期設置されたタングステン試料の水素同位体吸蔵特性,  
第 11 回核融合エネルギー連合講演会, (九州大学伊都キャンパス椎木講堂,  
2016.7.14-2016.7.15) 14P067.
52. 東郷訓, 滝塚知典, 中村誠, 星野一生, 伊庭野健造, 小川雄一, 坂本瑞樹,  
非接触ダイバータプラズマシミュレーションにおける温度非等方性の粘性近似の影響,  
第 11 回核融合エネルギー連合講演会, (九州大学伊都キャンパス椎木講堂,  
2016.7.14-2016.7.15) 14P084.
53. 竹山紘平, 大野哲靖, 吉川正志, 田中宏彦, 梶田信,  
直線型ダイバータ模擬実験装置における再結合フロント近傍の揺動計測,  
第 11 回核融合エネルギー連合講演会, (九州大学伊都キャンパス椎木講堂,  
2016.7.14-2016.7.15) 14P087.
54. 田中裕樹, 坂本瑞樹, 渡邊英雄, 時谷政行, 伊能俊太郎, 寺門明紘, 江角直道, 中嶋洋輔,  
高エネルギー銅イオン照射されたタングステンの重水素吸蔵特性評価,  
第 11 回核融合エネルギー連合講演会, (九州大学伊都キャンパス椎木講堂,  
2016.7.14-2016.7.15) 15P064.
55. 中嶋洋輔,  
筑波大学プラズマ研究センターの研究計画と双方向型共同研究の概要,  
平成 28 年度筑波大学プラズマ研究センターシンポジウム・核融合エネルギーフォーラム ダイバータ研究開発ワーキンググループ合同会合, (つくばイノベーションプラザ,  
2016.7.27-2016.7.28).
56. 坂本瑞樹,  
GAMMA 10/PDX における非接触プラズマ生成への水素リサイクリング効果に関する研究,  
平成 28 年度筑波大学プラズマ研究センターシンポジウム・核融合エネルギーフォーラム ダイバータ研究開発ワーキンググループ合同会合, (つくばイノベーションプラザ,  
2016.7.27-2016.7.28).
57. 松浦寛人,  
熱絶縁型カロリメーターの熱伝導解析,  
平成 28 年度筑波大学プラズマ研究センターシンポジウム・核融合エネルギーフォーラム ダイバータ研究開発ワーキンググループ合同会合, (つくばイノベーションプラザ,  
2016.7.27-2016.7.28).
58. 江角直道,  
GAMMA 10/PDX ダイバータ模擬実験におけるイオン温度計測の現状と今後の展開,  
平成 28 年度筑波大学プラズマ研究センターシンポジウム・核融合エネルギーフォーラム ダイバータ研究開発ワーキンググループ合同会合, (つくばイノベーションプラザ,  
2016.7.27-2016.7.28).
59. 竹野裕正, 中本聡, 市村和也, 松浦寛人, 宮澤順一, 後藤拓也, 中嶋洋輔, 片沼伊佐夫,  
GAMMA 10 におけるプラズマ直接発電器の小型化のための基礎研究,



- 平成 28 年度筑波大学プラズマ研究センターシンポジウム・核融合エネルギーフォーラム ダイバータ研究開発ワーキンググループ合同会合, (つくばイノベーションプラザ, 2016.7.27-2016.7.28).
60. 南龍太郎,  
ELM 模擬に向けた ECH 入射電力変調/位置制御による高熱流束生成の基礎,  
平成 28 年度筑波大学プラズマ研究センターシンポジウム・核融合エネルギーフォーラム ダイバータ研究開発ワーキンググループ合同会合, (つくばイノベーションプラザ, 2016.7.27-2016.7.28).
61. 吉川正志,  
GAMMA 10/PDX におけるトムソン散乱計測システムの構築,  
平成 28 年度筑波大学プラズマ研究センターシンポジウム・核融合エネルギーフォーラム ダイバータ研究開発ワーキンググループ合同会合, (つくばイノベーションプラザ, 2016.7.27-2016.7.28).
62. 小波蔵純子,  
GAMMA 10/PDX ダイバータ模擬部におけるマイクロ波干渉計の開発,  
平成 28 年度筑波大学プラズマ研究センターシンポジウム・核融合エネルギーフォーラム ダイバータ研究開発ワーキンググループ合同会合, (つくばイノベーションプラザ, 2016.7.27-2016.7.28).
63. 假家 強,  
電子サイクロトロン高密度プラズマ加熱連携研究における 2 周波数(28/35GHz、14/21GHz)ジャイロトロンの開発と ECH 実験への適用,  
平成 28 年度筑波大学プラズマ研究センターシンポジウム・核融合エネルギーフォーラム ダイバータ研究開発ワーキンググループ合同会合, (つくばイノベーションプラザ, 2016.7.27-2016.7.28).
64. 池添竜也, ICRF グループ,  
GAMMA 10 における温度非等方性緩和機構の解明に向けた ICRF 波動計測の進展,  
平成 28 年度筑波大学プラズマ研究センターシンポジウム・核融合エネルギーフォーラム ダイバータ研究開発ワーキンググループ合同会合, (つくばイノベーションプラザ, 2016.7.27-2016.7.28).
65. 東郷訓,  
非接触プラズマシミュレーションにおける非等方イオン温度の影響,  
平成 28 年度第 1 回「境界領域プラズマダイナミクスの診断と制御」研究会, (核融合科学研究所, 2016.8.2-2016.8.3).
66. 隅田脩平,  
JT-60U における DD 核融合生成  $3\text{He}$  に起因するイオンサイクロトロン放射の分散関係の解析,  
第 55 回プラズマ若手夏の学校第 30 回核融合炉夏期セミナー, (千葉県白子温泉リゾート サンシャイン白子, 2016.8.30-2016.9.2).
67. ジャン ソウオン,  
GAMMA 10/PDX におけるバリア部 ICRF 加熱を用いた端損失プラズマの制御,  
第 55 回プラズマ若手夏の学校第 30 回核融合炉夏期セミナー, (千葉県白子温泉リゾート サンシャイン白子, 2016.8.30-2016.9.2).
68. 板垣惇平,  
GAMMA 10 極小磁場部における密度変動及び高周波揺動計測,  
第 55 回プラズマ若手夏の学校第 30 回核融合炉夏期セミナー, (千葉県白子温泉リゾート サンシャイン白子, 2016.8.30-2016.9.2).
69. 中嶋洋輔,  
GAMMA10/PDX におけるモデリング研究,  
BA 原型炉設計活動共同研究: 原型炉設計に必要なダイバータおよび第一壁における物理課題の検討 第二回会合, (信州大学 信州科学技術総合振興センター, 2016.9.2).
70. 東郷訓,  
非等方イオン温度を導入したスクレイプオフ層-ダイバータプラズマ一次元流体シミュレーション

- ミュレーション,  
プラズマシミュレータシンポジウム 2016, (核融合科学研究所, 2016.9.7-2016.9.8).
71. 隅田脩平, 井手俊介, 篠原孝司, 池添竜也, 市村 真, 坂本瑞樹, 平田真史,  
JT-60U における DD 核融合生成  $3\text{He}$  に起因するイオンサイクロトロン放射の密度依存性,  
日本物理学会 2016 年秋季口会, (金沢大学角間キャンパス, 2016.9.13-2016.9.16)  
15aKA-3.
  72. 東郷訓,  
イオン温度非等方性を考慮した非接触ダイバータプラズマの数値解析,  
第 12 回 QUEST 研究会, (九州大学応用力学研究所, 2016.9.20-2016.9.21).
  73. 井澤裕皓, 北原知幸, 市村和也, 竹野裕正, 中嶋洋輔,  
カスプ型直接エネルギー変換器のラインカスプ上高周波電界の電子の運動に対する影響に関する研究 II,  
平成 28 年電気関係学会関西連合大会, (大阪府立大学, 2016.11.22-2016.11.23) G5-14.
  74. 北原勇希, 呑田有也, 市村和也, 中本聡, 竹野裕正, 松浦寛人, 中嶋洋輔,  
静電減速によるダイバータ熱負荷低減のための熱量測定に関する研究,  
平成 28 年電気関係学会関西連合大会, (大阪府立大学, 2016.11.22-2016.11.23) G5-15.
  75. 北原知幸, 井澤裕皓, 市村和也, 竹野裕正, 中嶋洋輔,  
カスプ型直接エネルギー変換器における粒子分離用高周波電界下の電子の運動の数値解析,  
平成 28 年電気関係学会関西連合大会, (大阪府立大学, 2016.11.22-2016.11.23) G5-16.
  76. 若泉貴弘, 佐藤大気, 市村和也, 竹野裕正, 中嶋洋輔,  
進行波型直接エネルギー変換器における集群による粒子の散乱効果についての研究,  
平成 28 年電気関係学会関西連合大会, (大阪府立大学, 2016.11.22-2016.11.23) G5-17.
  77. 福井 良磨, 中嶋 洋輔, 永田 普二, 市村 和也, M.M.Islam, M.S. hahinul.Islam,  
大内 理人, 横土敬幸, 李冠億, 吉本 翼, 山下 双太郎, 大川 和夫,  
GAMMA 10/PDX におけるイオンビームを用いた PWI の研究,  
プラズマ・核融合学会第 33 回年会, (東北大学青葉山キャンパス, 2016.11.29-2016.12.3)  
29aP03.
  78. M. M. Islam, Y. Nakashima, S. Kobayashi1, N. Nishino2, K. Hosoi, K. Ichimura3, M. S. Islam,  
K. Fukui, M. Ohuchi, T. Yokodo, G. Lee, S. Yamashita, T. Yoshimoto, M. Yoshikawa,  
J. Kohagura, M. Hirata, R. Ikezoe, M. Ichimura, M. Sakamoto and T. Imai,  
Investigation of Plasma Behavior during ECRH Injection in the GAMMA 10 SMBI  
Experiments,  
プラズマ・核融合学会第 33 回年会, (東北大学青葉山キャンパス, 2016.11.29-2016.12.3)  
29aP43.
  79. 瀧本壽来生, 飯島貴朗, 利根川昭, 佐藤浩之助, 河村和孝,  
直線型ダイバータ模擬装置 TPD-Sheet IV における Super-X ダイバータに関する基礎研究,  
プラズマ・核融合学会第 33 回年会, (東北大学青葉山キャンパス, 2016.11.29-2016.12.3)  
29aP77.
  80. 佐藤大気, 若泉貴弘, 市村和也, 竹野裕正, 中嶋洋輔,  
進行波型直接エネルギー変換器における集群改善のための 2 周波変調方式の研究,  
プラズマ・核融合学会第 33 回年会, (東北大学青葉山キャンパス, 2016.11.29-2016.12.3)  
29aP84.
  81. 呑田有也, 北原勇希, 市村和也, 中本 聡, 竹野裕正, 松浦寛人, 中嶋洋輔,  
直接エネルギー変換によるダイバータ負荷軽減のためのカスプ磁場型小型装置の改造,  
プラズマ・核融合学会第 33 回年会, (東北大学青葉山キャンパス, 2016.11.29-2016.12.3)  
29aP85.
  82. 中嶋洋輔, 坂本瑞樹, 江角直道, 市村和也, M.S.Islam, M.M.Islam, 大内理人,  
福井良磨, 横土敬幸, 李 冠億, 野尻訓平, 寺門明紘, 大野哲靖, 門 信一郎,  
澤田圭司, 庄司 主, 畑山明聖, 福本正勝, 朝倉伸幸, 久保博孝, 松浦寛人, 今井 剛,

- 市村 真, 片沼伊佐夫, 假家 強, 小波蔵純子, 沼倉友晴, 平田真史, 南 龍太郎,  
吉川正志, 池添竜也, 東郷 訓, 飯島貴朗,  
筑波大における大型直線装置を用いたダイバータ模擬研究の現状と将来計画,  
プラズマ・核融合学会第 33 回年会, (東北大学青葉山キャンパス, 2016.11.29-2016.12.3)  
30aA05.
83. 野尻訓平, 坂本瑞樹, 江角直道, 東郷訓, 寺門明紘, ジャン ソウオン, 吉川正志,  
中嶋洋輔,  
GAMMA 10/PDX における静電プローブ計測を用いて評価したイオン温度のプラズ  
マパラメータ依存性,  
プラズマ・核融合学会第 33 回年会, (東北大学青葉山キャンパス, 2016.11.29-2016.12.3)  
30aP23.
84. 大内理人, 中嶋洋輔, 松浦寛人, 市村和也, M.S.Islam, M.M. Islam, 福井良磨,  
横土敬幸, 李冠億, 山下双太郎, 吉本翼, 江角直道, 坂本瑞樹, 津村康平, 南龍太郎,  
假家 強, 今井 剛,  
GAMMA 10/PDX 端部でのカロリメータを用いた熱流束の計測,  
プラズマ・核融合学会第 33 回年会, (東北大学青葉山キャンパス, 2016.11.29-2016.12.3)  
30aP25.
85. 横土敬幸, 中嶋洋輔, M.M. Islam, M.S. Islam, 大内理人, 福井良磨, 李 冠億,  
山下双太郎, 吉本 翼, 寺門明紘, 野尻訓平, 吉川正志, 江角直道, 坂本瑞樹, 今井 剛,  
GAMMA 10/PDX におけるアンカー部からエンド部にわたる広範囲の不純物挙動の計  
測,  
プラズマ・核融合学会第 33 回年会, (東北大学青葉山キャンパス, 2016.11.29-2016.12.3)  
30aP29.
86. 津村康平, 假 家強, 今井 剛, 南龍太郎, 沼倉友晴, 江橋優斗, 梶野悟史, 岡田麻希, 関口健太,  
田沼康平, 大内理人, 中嶋洋輔,  
GAMMA10/PDX における改良型 ECRH 反射鏡を用いた熱流束生成実験,  
プラズマ・核融合学会第 33 回年会, (東北大学青葉山キャンパス, 2016.11.29-2016.12.3)  
30aP45.
87. M. S. Islam, Y. Nakashima, A. Hatayama, K. Ichimura, M. M. Islam, K. Fukui, M. Ohuchi,  
T. Yokodo, G. Lee, M. Yoshikawa, N. Ezumi, M. Sakamoto, and T. Imai,  
Numerical Simulation Study of Ar and Ne Injection in the End-cell of GAMMA 10/PDX,  
プラズマ・核融合学会第 33 回年会, (東北大学青葉山キャンパス, 2016.11.29-2016.12.3)  
30aP51.
88. 松浦寛人, 梅田雄太郎, M.S. Islam, 大内理人, 中嶋洋輔,  
熱絶縁型カロリメータの熱伝導解析,  
プラズマ・核融合学会第 33 回年会, (東北大学青葉山キャンパス, 2016.11.29-2016.12.3)  
30aP53.
89. 竹山紘平, 大野哲靖, 田中宏彦, 吉川正志, 梶田信,  
分割エンドターゲットおよびマイクロ波干渉計を用いた非接触プラズマ中の揺動計測,  
プラズマ・核融合学会第 33 回年会, (東北大学青葉山キャンパス, 2016.11.29-2016.12.3)  
30aP58.
90. 市村和也, 福本正勝, 中嶋洋輔, 久保博孝, 庄司主, 坂本瑞樹 3, 江角直道, M.M.Islam,  
M.S. Islam, 大内理人, 福井良磨, 横土敬幸, 寺門明紘, 野尻訓平, 李冠億, 竹野裕正,  
GAMMA 10/PDX ダイバータ模擬実験における希ガス圧力の測定,  
プラズマ・核融合学会第 33 回年会, (東北大学青葉山キャンパス, 2016.11.29-2016.12.3)  
30aP61.
91. 沼倉友晴, 今井 剛, 假家 強, 南龍太郎, 津村康平, 江橋優斗, 梶野悟史, 岡田麻希, 中嶋洋輔,  
高出力発振ジャイロトロンのための計算コード開発,  
プラズマ・核融合学会第 33 回年会, (東北大学青葉山キャンパス, 2016.11.29-2016.12.3)  
30aP63.
92. 江橋優斗, 假家 強, 今井 剛, 南龍太郎, 沼倉友晴, 津村康平, 岡田麻希, 中嶋洋輔,  
ECRH 用 28/35GHz 2 周波数ジャイロトロンの開発,

- プラズマ・核融合学会第 33 回年会, (東北大学青葉山キャンパス, 2016.11.29-2016.12.3)  
30aP64.
93. 李冠億、福井良磨、M. M. Islam、M. S. Islam、大内理人、横土敬幸、山下双太郎、吉本翼、坂本瑞樹、今井剛、大川和夫、中嶋洋輔、  
GAMMA 10/PDX における中性ヘリウムビームを用いた NBI の研究、  
プラズマ・核融合学会第 33 回年会, (東北大学青葉山キャンパス, 2016.11.29-2016.12.3)  
30aP69.
94. 伊能俊太郎、田中裕樹、坂本瑞樹、本島 巖、渡邊英雄、芦川直子、時谷政行、  
江角直道、中嶋洋輔、  
GAMMA 10 におけるプラズマ対向壁面の変色評価、  
プラズマ・核融合学会第 33 回年会, (東北大学青葉山キャンパス, 2016.11.29-2016.12.3)  
30aP76.
95. 小波蔵純子、吉川正志、嶋頼子、桑原大介、伊藤直樹、長山好夫、野尻訓平、  
坂本瑞樹、中嶋洋輔、間瀬淳、  
GAMMA 10/PDX におけるマイクロ波干渉計を用いたダイバータ模擬プラズマの電子  
密度計測、  
プラズマ・核融合学会第 33 回年会, (東北大学青葉山キャンパス, 2016.11.29-2016.12.3)  
30pP22.
96. 鈴木健介、辻原匡志、梶田信、大野哲靖、飯島貴朗、滝本壽来生、利根川昭、  
水素・ヘリウム混合プラズマにおけるヘリウム原子分光計測、  
プラズマ・核融合学会第 33 回年会, (東北大学青葉山キャンパス, 2016.11.29-2016.12.3)  
30pP26.
97. 池添竜也、市村真、板垣惇平、平田真史、隅田脩平、ジャンソウオン、泉昂希、  
田中温人、吉川正志、小波蔵純子、坂本瑞樹、中嶋洋輔、  
アンテナスイッチングを用いた反射計による高温プラズマ内部アルベン波動の径方向  
と磁力線方向の構造計測、  
プラズマ・核融合学会第 33 回年会, (東北大学青葉山キャンパス, 2016.11.29-2016.12.3)  
30pP46.
98. 平田真史、ジャンソウオン、隅田脩平、市村真、福山淳、池添竜也、坂本瑞樹、  
板垣惇平、泉昂希、田中温人、中嶋洋輔、  
GAMMA10/PDX バリア部 ICRF アンテナの 3 次元波動解析コードを用いた評価、  
プラズマ・核融合学会第 33 回年会, (東北大学青葉山キャンパス, 2016.11.29-2016.12.3)  
30pP50.
99. ジャンソウオン、市村真、平田真史、池添竜也、坂本瑞樹、隅田脩平、板垣惇平、  
泉昂希、田中温人、中嶋洋輔、  
GAMMA10/PDX におけるアンカー部 ICRF アンテナを用いた端損失プラズマ制御実験、  
プラズマ・核融合学会第 33 回年会, (東北大学青葉山キャンパス, 2016.11.29-2016.12.3)  
30pP54.
100. 板垣惇平、池添竜也、市村真、平田真史、隅田脩平、ジャンソウオン、泉昂希、  
田中温人、吉川正志、小波蔵純子、坂本瑞樹、中嶋洋輔、  
GAMMA 10 極小磁場部における反射計を用いた高周波揺動計測、  
プラズマ・核融合学会第 33 回年会, (東北大学青葉山キャンパス, 2016.11.29-2016.12.3)  
30pP55.
101. 隅田脩平、井手俊介、篠原孝司、池添竜也、市村 真、坂本瑞樹、平田真史、  
D-D 反応生成ヘリウム 3 に起因したイオンサイクロトロン放射のトロイダル波数と励  
起、  
プラズマ・核融合学会第 33 回年会, (東北大学青葉山キャンパス, 2016.11.29-2016.12.3)  
30pP57.
102. 梶野悟史、今井剛、假家強、南龍太郎、沼倉友晴、津村康平、江橋優斗、岡田麻希、  
関口健太、田沼康平、中嶋洋輔、坂本瑞樹、吉川正志、  
GAMMA10/PDX セントラル部における ECR アンテナ系の改良設計と加熱効果検証、  
プラズマ・核融合学会第 33 回年会, (東北大学青葉山キャンパス, 2016.11.29-2016.12.3)

- 30pP68.
103. 太田晃一、吉川正志、千勝雅之、小波蔵純子、嶋頼子、南龍太郎、坂本瑞樹、  
中嶋洋輔、今井剛、安原亮、山田一博、丹場久芳、南貴司、  
GAMMA 10/PDX におけるマルチパス・トムソン散乱計測システムの解析方法、  
プラズマ・核融合学会第 33 回年会、(東北大学青葉山キャンパス, 2016.11.29-2016.12.3)  
30pP-PD1.
104. 東郷訓、滝塚知典、中村誠、星野一生、伊庭野健造、李躍、小川雄一、坂本瑞樹、  
非接触ダイバータプラズマにおける粒子束のロールオーバーと分岐特性、  
プラズマ・核融合学会第 33 回年会、(東北大学青葉山キャンパス, 2016.11.29-2016.12.3)  
01aP50.
105. 寺門明紘、坂本瑞樹、江角直道、澤田圭司、東郷 訓、野尻訓平、三上智弘、横土敬幸、  
吉川正志、小波蔵純子、中嶋洋輔、  
GAMMA 10/PDX における非接触プラズマ形成時の水素分子 線分光計測、  
プラズマ・核融合学会第 33 回年会、(東北大学青葉山キャンパス, 2016.11.29-2016.12.3)  
01aP53.
106. 梅田雄太郎、松浦寛人、秋吉優史、奥田修一、飯島貴朗、小林広彰、瀧本壽来生、  
利根川昭、  
衝突輻射モデルを用いたダイバータ模擬装置 TPD-Sheet IV おける非接触プラズマ中の  
分子イオンの役割、  
プラズマ・核融合学会第 33 回年会、(東北大学青葉山キャンパス, 2016.11.29-2016.12.3)  
01aP54.
107. 飯島貴朗、瀧本壽来生、利根川昭、佐藤浩之助、河村和孝、  
直線型ダイバータ模擬装置を用いた高密度水素プラズマでの不純物粒子挙動、  
プラズマ・核融合学会第 33 回年会、(東北大学青葉山キャンパス, 2016.11.29-2016.12.3)  
01aP56.
108. 坂本瑞樹、寺門明紘、野尻訓平、江角直道、横土敬幸、東郷 訓、小波蔵純子、  
吉川正志、中嶋洋輔、  
GAMMA 10/PDX における高温ターゲットを用いたダイバー タ模擬実験、  
プラズマ・核融合学会第 33 回年会、(東北大学青葉山キャンパス, 2016.11.29-2016.12.3)  
01aP58.
109. 田中裕樹、伊能俊太郎、坂本瑞樹、渡邊英雄、大矢泰久、桜田翔大、藤田啓恵、  
寺門明紘、芦川直子、時谷政行、江角直道、中嶋洋輔、  
重水素プラズマ曝露された照射欠陥導入タングステン昇温脱 離スペクトルの解析、  
プラズマ・核融合学会第 33 回年会、(東北大学青葉山キャンパス, 2016.11.29-2016.12.3)  
01aP79.
110. 假家 強、  
核融合炉へ向けた大電力ジャイロトロンの開発研究、  
プラズマ・核融合学会第 33 回年会、(東北大学青葉山キャンパス, 2016.11.29-2016.12.3)  
01pC04.
111. 福成雅史、山口敏和、中村友祐、小紫公也、小田靖久、池田亮介、梶原 健、高橋幸司、  
坂本慶司、南 龍太郎、假家 強、今井 剛、  
ジャイロトロンを用いた大電力ミリ波放電の発振周波数と集光形状による放電構造の  
変化、  
プラズマ・核融合学会第 33 回年会、(東北大学青葉山キャンパス, 2016.11.29-2016.12.3)  
01pC05.
112. 吉川正志、太田晃一、千勝雅之、小波蔵純子、嶋頼子、南龍太郎、坂本瑞樹、  
中嶋洋輔、今井剛、安原亮、山田一博、丹場久芳、釧持尚輝、南貴司、  
GAMMA 10/PDX におけるトムソン散乱計測システムの進展、  
プラズマ・核融合学会第 33 回年会、(東北大学青葉山キャンパス, 2016.11.29-2016.12.3)  
02pB02.
113. 江角直道、小林楓、木下洋輔、野尻訓平、寺門明紘、東郷訓、坂本瑞樹、  
Md. Shahinul ISLAM、横土敬幸、小波蔵純子、吉川正志、中嶋洋輔、澤田圭司、桑原大介、

- 篠原俊二郎, 増崎貴,  
レーザー誘起蛍光法を用いたイオン・中性粒子速度分布計測におけるプラズマとトレーサー粒子間温度緩和過程の影響,  
プラズマ・核融合学会第33回年会, (東北大学青葉山キャンパス, 2016.11.29-2016.12.3) 02pB06.
114. 中嶋洋輔,  
ダイバータ模擬研究のこれまでの成果と新計画の概要,  
第33回 プラズマ・核融合学会年会インフォーマルミーティング 5「筑波大学プラズマ研究センターにおける原型炉へ向けたダイバータ模擬実験装置の新計画」, (東北大学青葉山キャンパス, 2016.11.29-2016.12.3).
115. 吉川正志,  
新装置におけるダイバータ模擬プラズマの計測計画,  
第33回 プラズマ・核融合学会年会インフォーマルミーティング 5「筑波大学プラズマ研究センターにおける原型炉へ向けたダイバータ模擬実験装置の新計画」, (東北大学青葉山キャンパス, 2016.11.29-2016.12.3).
116. Satoshi Togo, Tomonori Takizuka, Makoto Nakamura, Kazuo Hoshino, Kenzo Ibano, Yue Li, Yuichi Ogawa, Mizuki Sakamoto,  
Research on behavior of divertor particle flux with a one-dimensional numerical model and an analytical one,  
第14回核燃焼プラズマ統合コード研究会, (九州大学応用力学研究所, 2016.12.7-2016.12.8) 2-6.
117. 江角直道, 木下洋輔, 野尻訓平, 寺門明紘, 坂本瑞樹, G10 実験グループ, 澤田圭司, 田中宏彦, 大野哲靖, 小林政弘, 増崎貴,  
GAMMA10/PDX ダイバータ模擬モジュールにおけるプローブを用いた非接触プラズマ形成時のイオン温度計測,  
平成28年度第2回「境界領域プラズマダイナミクスの診断と制御」研究会, (核融合科学研究所, 2016.12.13-2016.12.14).
118. 東郷訓,  
ロールオーバーと分岐に着目したダイバータ粒子束の挙動の解析,  
平成28年度第2回「境界領域プラズマダイナミクスの診断と制御」研究会, (核融合科学研究所, 2016.12.13-2016.12.14).
119. 大内理人, 中嶋洋輔, 松浦寛人, M.S. Islam, M.M. Islam,  
GAMMA 10/PDX 西エンド部でのカロリメーターを用いた熱流計測,  
平成28年度第2回「境界領域プラズマダイナミクスの診断と制御」研究会, (核融合科学研究所, 2016.12.13-2016.12.14).
120. 福井良磨,  
GAMMA 10/PDX におけるビーム・材料 相互作用研究の為にビーム入射系の開発,  
平成28年度第2回「境界領域プラズマダイナミクスの診断と制御」研究会, (核融合科学研究所, 2016.12.13-2016.12.14).
121. M.M. Islam,  
Investigation of Plasma Behavior during SMBI in GAMMA 10,  
平成28年度第2回「境界領域プラズマダイナミクスの診断と制御」研究会, (核融合科学研究所, 2016.12.13-2016.12.14).
122. M.S. Islam,  
Investigation of Detached Plasma by injecting Gas into the D-module of GAMMA 10/PDX,  
平成28年度第2回「境界領域プラズマダイナミクスの診断と制御」研究会, (核融合科学研究所, 2016.12.13-2016.12.14).
123. 横土 敬幸, 中嶋 洋輔, M. S. Islam, 吉本 翼,  
GAMMA 10/PDX におけるエンド部 D-module から上流域に至る不純物挙動の計測,  
「プラズマ科学における分光計測の高度化と原子分子過程研究の新展開」 「原子分子データ応用フォーラムセミナー」 合同研究会, (核融合科学研究所, 2016.12.20-2016.12.22).

124. 池添竜也, 市村真, 板垣惇平, 平田真史, 隅田脩平, ジャンソウォン, 泉昂希, 田中温人, 吉川正志, 小波蔵純子, 坂本瑞樹, 中嶋洋輔,  
アンテナスイッチングを用いた反射計による多点 ICRF 波動計測,  
第 6 回 ICRF 研究会「ICRF 加熱装置の高性能化と将来応用」, (核融合科学研究所, 2016.12.27).
125. 東郷訓,  
SOL-DIV プラズマシミュレーションにおけるイオン温度非等方性の考慮の意義,  
理論共同研究「過渡現象を含んだ壁面-周辺・炉心プラズマ相互作用モデリング」研究  
作業会, (核融合科学研究所, 2017.1.25-2017.1.26).
126. 今井 剛,  
核融合プラズマ加熱用ジャイロトロン開発研究の進展 —筑波大学に於ける研究を中  
心に—,  
理論共同研究「過渡現象を含んだ壁面-周辺・炉心プラズマ相互作用モデリング」研究  
作業会, (核融合科学研究所, 2017.1.25-2017.1.26).
127. 東郷訓,  
非等方イオン温度による流体モデルの等方イオン温度による流体モデル及び粒子モデ  
ルとの比較,  
SOL ダイバータモデリング研究会, (核融合科学研究所, 2017.2.15-2017.2.16).
128. 江角 直道, 将来計画検討 WG,  
原型炉に向けたダイバータ模擬実験装置新計画の概要,  
仙台プラズマフォーラム『プラズマ流の基礎と応用に関する研究会』, (東北大学工学  
研究科, 2017.3.2-2017.3.3).
129. 池添竜也、市村 真、板垣惇平、泉昂希、平田真史、隅田脩平、ジャンソウォン、  
田中温人、坂本瑞樹、中嶋洋輔,  
GAMMA 10/PDX における高速イオンの軸方向輸送解明に向けた波動計測の高度化,  
仙台プラズマフォーラム『プラズマ流の基礎と応用に関する研究会』, (東北大学工学  
研究科, 2017.3.2-2017.3.3).
130. 隅田脩平, 篠原孝司, 池添口也, 市村 真, 坂本瑞樹, 平田真史, 井手俊介,  
JT-60U におけるイオンサイクロトロン放射を駆動する高速イオンの速度分布解析,  
第 20 回若手科学者によるプラズマ研究会, (量子科学技術研究開発機構那珂核融合研  
究所, 2017.3.6-2017.3.8)
131. 松浦寛人、小林進二、大島慎介、水内亨、中嶋洋輔,  
熱流束モニターの為に複合プローブアレイの製作,  
原子力学会 2017 年春の年会, (東海大学湘南キャンパス, 2017.3.27-2017.3.29) 3B07.

#### <解説・紀要等>

01. 假家 強, 今井 剛, 南龍太郎, 津村康平, 江橋優斗, 岡田麻希, 中嶋洋輔, 出射浩,  
花田和明, 下妻 隆, 久保伸, 小田靖久, 池田亮介, 坂本慶司, 小野雅之,  
核融合炉へ向けた大電力ジャイロトロンの開発  
J. Plasma Fusion Res. Vol.93, No.3 (2017) 146-149

#### <受賞>

01. Md. Shahinul Islam,  
Diagnostics of Detached Plasma by Calorimeters and Langmuir Probes in the case of Radiator  
Gas Injection in the D-module of GAMMA 10/PDX,  
BEST Poster AWARD in 8th Korea-Japan Seminar on Advanced Diagnostics for Steady-State  
Fusion Plasmas, 2016.8.27.
02. 田中裕樹,  
Deuterium retention in heavy-ion-irradiated tungsten exposed to low energy and high flux  
plasma,

Outstanding Poster Award

The 13th China-Japan Symposium on Materials for Advanced Energy Systems and Fission and Fusion Engineering, Institute of Nuclear Energy Safety Technology(INEST), Hefei, China, 2016.9.29.

03. Jang Seowon,

第 13 回数理物質科学研究科研究科長賞, 2017.3.24.



## 【1】物理教育

### （1）学類教育（小沢顕）

平成 28 年度は、4 月には 65 名が 1 年次に入学し、また 62 名の 4 年次学生が各研究室に配属され卒業研究を行った。平成 28 年度の卒業生は 61 名であり、その進路は、大学院進学が 44 名、就職が 13 名、その他（進学準備中など）4 名である。

物理学類の教育は、カリキュラム委員会にて審議・検討し、学類教育会議に諮り最終的な決定を行う。平成 28 年度も、平成 25 年度から実施された 2 学期制に対応した新カリキュラムに基づき進め、逐次検証を進めている。また、能動的な学習を促進するための科目（課題探究実習セミナー）を継続して開講し専門的な知識や考え方を吸収したい学生に提供している。また主要科目においては講義と演習を一体化した形式での授業を進めている。さらに、1 年次での大学の物理でのつまづきをなくすため、夏休みに 1 学期科目（力学、電磁気学）の補習を行った。また、教育の効率化と学生の能動的学習の支援のため e-ラーニングを活用し、専門分野に特有の英語の教育のためのシステム（科学英語 2）を開設している。平成 28 年度から卒業研究を含む全ての学類科目について授業評価を実施し、その評価結果を担当教官にフィードバックし、クラス連絡会等で教員・学生の参加のもと教育の質の向上のための議論を行った。平成 30 年度からは物理学位プログラムという学位プログラムとして教育を進めて行く予定である。

平成 28 年度に行われた入学試験は、実施時期の順に、編入学試験（志願者 19 名、合格者 3 名）、アドミッションセンター入試（志願者 3 名、合格者 0 名）、推薦入試（志願者 35 名、合格者 15 名）、個別学力検査・前期日程（志願者 158 名、合格者 48 名）、私費外国人留学生入試（志願者 8 名、合格者 2 名）である。個別学力検査（前期日程）志願倍率は 3.7 倍で、推薦入試は 2.3 倍であった。また、情報学類から転学類生 1 名を受け入れることになった（平成 29 年度に物理学類 2 年次に編入）。平成 29 年 4 月には 63 名が物理学類 1 年次に入学する予定である。

## （２）大学院教育（藏増 嘉伸）

本学の教育面で特に力を入れている点として、グローバル化と幅広い専門性・学際性が挙げられる。物理学専攻でも、宇宙史一貫プログラム・つくば共鳴教育プログラム・ダブルデグリープログラム・デュアルデグリープログラム等の様々な特色あるプログラムを用意し、学生に多様な学修機会を提供している。教育の質の向上に関しては、学類と同様にカリキュラム委員会にてその内容を審議し、専攻教育会議に諮り最終的な審議・承認を行っている。今後も、継続して更なる大学院教育の充実を目指していく。

平成 28 年度の在籍者数の内訳は以下の表の通りである。

M1	M2	D1	D2	D3
63	71	14	12	16

博士前期課程の在籍者数は定員よりも多いが、博士後期課程の方は定員よりも少ない状態である。社会人を対象とした博士後期課程の早期修了プログラムであれば最短 1 年で学位取得が可能であり、今後このような特色ある制度の周知・活用を図っていきたい。

大学院入試に関しては、7 月の推薦入試（定員 15 名）と、8 月と 2 月に一般入試（定員 35 名）を行っている。今年度の入試の結果は下の表の通り。5 月に行われるオープンキャンパスや各研究室への研究室訪問等の広報活動もあり、筑波大学以外からも多くの受験生を集めている。例えば、今年度のオープンキャンパスでは、物理学専攻の見学に 64 名（うち外部 49 名）の参加者があり、大変盛況であった。

入試	受験者数（外部）	合格者数（外部）
7 月（前期推薦）	35（17）	25（11）
8 月（前期）	51（21）	40（15）
8 月（後期）	4（0）	4（0）
2 月（前期）	11（5）	8（3）
2 月（後期）	6（2）	6（2）

平成 28 年度の就職進学状況は下の表の通り。物理学専攻の特徴は、他専攻と比較して前期課程から後期課程への進学率が高いことである。博士後期課程の教育は、わが国全体の研究・技術開発の発展にとって重要であると考えており、今後も更に発展させていくことが肝要と考えている。

前期課程

進学	企業	独法	教員	公務員	その他
11	39	3	5	5	1

後期課程

大学	研究員	企業	独法	公務員	その他
0	5	3	0	1	0

## 【2】体験学習（重田育照）

物理学類では、大学における物理学の教育内容を高校生に知ってもらうために、体験学習を毎年実施している。平成28年度は、8月12日（金）に実施し、57名の参加者があった。学類長の説明のあと、物理学に関する講義4件を開講し、その後、物理学実験（参加者は4テーマの内から一つ選択）を行った。実験終了後、修了式を行い、さらに希望者は学内センターの見学を行った。

具体的な内容と時間進行は以下の通りである。

9:30～9:40	物理学類長挨拶 および 事務連絡	小沢 顕
9:40～10:00	物理学類説明、実験内容説明、アンケート	重田 育照, 西堀 英治
10:05～10:40	【講義1】 素粒子	山崎 剛
10:45～11:20	【講義2】 物性・生命	重田 育照
11:25～12:00	【講義3】 宇宙	中井 直正
12:00～13:00	昼 食	
13:00～13:35	【講義4】 原子核	矢花 一浩
13:40～13:50	実験の組み分け	西堀 英治
13:50～16:30	<b>【物理実験】</b> ① 水と固体の比熱 ② 放射線と宇宙線 ③ 光の干渉と回折 ④ 電流の作る電場	東山 和幸 森口 哲朗 富本 慎一 西堀 英治
16:35～17:10	修了書授与、アンケートなど	小沢 顕 重田 育照
17:10～17:40	センター見学（希望者）（下記のいずれか） 計算科学研究センター、プラズマ研究センター、 研究基盤総合センター応用加速器部門	

右端が担当者であるが、その他に多数の学群生、大学院生、事務方の協力を得た。最後にアンケートを回収した。例年と同様に、講義・実験について、ほとんどの参加者が興味を持ってもらえたが、全ての参加者が内容を理解できた訳ではなかった。レベルの調整など今後改善していきたい。

### 【3】カリキュラム関係（重田 育照）

平成 28 年度中のカリキュラム関係の報告は以下の通りである。

#### 1. 学類カリキュラム

##### （1）授業評価について

学生が主体となった授業評価アンケートを「卒業研究」を含む全科目に対し実施した。担当する教員が複数となる物理学実験でも全てのテーマに対して授業評価アンケートを実施した。

##### （2）総合科目に関して

27 年度に総合科目 I「現代物理学への招待 I~III」の見直し・再編を行い、その一部を発展させ総合科目 III とした「現代物理学入門」を平成 28 年度からを開講した。

##### （3）他学類向けの講義に関して

また、オープンコースウェアとしての利用も想定して、講義をビデオ収録して理工学群で共有した。

##### （4）入試改革（大きくくり入試）および初年度のカリキュラム編成（SFT）に関して

年度内に 6 回カリキュラム委員会を開催し、議論を行なった。

#### 2. 大学院カリキュラム

##### （1）授業評価について

大学院の授業のためのアンケートを作成し、実施した。

##### （2）「数理物質科学研究科オナーズプログラム」について

平成 27 年度より本プログラムがスタートし、平成 28 年度は物理学専攻から 1 名が選ばれた。

##### （3）物質研究の重要かつ強力なツールとなる国内外の放射光施設を活用できる人材育成に向けて、「放射光物質科学コース」を物理学専攻が主体となって設置準備を行い、平成 28 年度からスタートした。

#### 3. 新たな教育方法の開拓と実践

##### （1）学類学生の能動的な学習を喚起させるために、「課題探求実習」を引き続き実施している。

##### （2）学類教育では、講義による知識の吸収と、知識をさらに深く理解す

るための演習形式の学習を統合した形の授業を力学、電磁気学、量子力学、物理数学、統計力学で実施している。

(3) 講義資料の閲覧やレポートの提出などに、学習管理システム **manaba** を積極的に活用している。

(4) 現代社会において必須である英語の強化の観点から、英語を母国語とする講師の授業を引き続き開講している。28年度は非常勤講師に本授業の担当をして頂いた。

#### 4. 教養教育、リメディアル教育

(1) 高校で物理を習っていない主に文科系の学生を対象とした総合科目「現代人のための科学Ⅰ」、「初めて学ぶ物理学Ⅰ・Ⅱ」を開講している。また、より広い学生を対象とした高度な内容まで含んだ「現代物理学への招待」も開講している。平成 28 年度には、「現代物理学への招待」の一部を発展させ総合科目 Ⅲ「現代物理学入門」として開講した。

(2) 学類 1 年次春学期の科目「力学 1」、「電磁気学 1」、「基礎力学 1」、「基礎電磁気学 1」の補習を夏休み（平成 28 年 9 月 29, 30 日）に実施した。合計 4 名の参加があった。

# 《大学院資料》

## 大学院生・卒業研究生・学振特別研究員 員数表

平成28年度

	博士						卒研 生	* 学振		* TA	合計
	M1	M2	D1	D2	D3	小計		PD	DC		
素粒子理論	3	4	1	2	0	10	5	0	{ 0 }	[ 9 ]	15 { 0 } [ 9 ]
宇宙理論	6	6	0	2	2	16	2	0	{ 1 }	[ 8 ]	18 { 1 } [ 8 ]
原子核理論	2	1	1	0	0	4	1	1	{ 0 }	[ 4 ]	6 { 0 } [ 4 ]
量子物性理論	2	3	0	1	0	6	3	0	{ 0 }	[ 5 ]	9 { 0 } [ 5 ]
ナノ量子物性	0	2	0	0	0	2	1	0	{ 0 }	[ 0 ]	3 { 0 } [ 0 ]
表面界面物性	1	0	1	0	0	2	0	0	{ 1 }	[ 1 ]	2 { 1 } [ 1 ]
ナノ構造物性 (D1ナノ, D3ナノ)	2	3	2	0	4	11	6	0	{ 2 }	[ 0 ]	17 { 2 } [ 0 ]
量子輸送研究 (D3ナノ)	2	3	0	0	1	6	1	0	{ 0 }	[ 2 ]	7 { 0 } [ 2 ]
生命物理	1	0	1	0	1	3	2	0	{ 0 }	[ 1 ]	5 { 0 } [ 1 ]
素粒子実験	4	6	0	2	3	15	1	0	{ 1 }	[ 10 ]	16 { 1 } [ 10 ]
宇宙観測	5	7	0	0	1	13	3	0	{ 0 }	[ 11 ]	16 { 0 } [ 11 ]
原子核高エネ	2	6	3	2	3	16	8	0	{ 0 }	[ 9 ]	24 { 0 } [ 9 ]
原子核低エネ	3	0	1	1	3	8	1	0	{ 0 }	[ 4 ]	9 { 0 } [ 4 ]
磁性物性	4	5	0	0	0	9	0	0	{ 0 }	[ 2 ]	9 { 0 } [ 2 ]
ナノフォトンクス (D3ナノ)	4	8	1	0	0	13	7	0	{ 0 }	[ 8 ]	20 { 0 } [ 8 ]
光ナノ物性 (D3)	2	4	0	0	0	6	2	0	{ 0 }	[ 5 ]	8 { 0 } [ 5 ]
強相関物性	3	3	0	0	2	8	1	0	{ 0 }	[ 5 ]	9 { 0 } [ 5 ]
構造科学	3	0	1	0	0	4	1	0	{ 0 }	[ 4 ]	5 { 0 } [ 4 ]
低温物性	6	3	1	0	0	10	4	0	{ 0 }	[ 5 ]	14 { 0 } [ 5 ]
プラズマ	7	7	2	2	1	19	13	0	{ 0 }	[ 10 ]	32 { 0 } [ 10 ]
物質材料 (D1ナノ)	1	0	2(1)			3	0	0	{ 0 }	[ 0 ]	3 { 0 } [ 0 ]
合 計	63	71	17	12	21	184	62	1	5	103	247 { 5 } [ 103 ]
(ナノ)	0	0	3	0	5	8	0	0	2	0	8 { 2 } [ 3 ]

\*学振欄の{ }内数字はDC1～DC3で内数、{ }なし数字は、PDで外数

\*[ ]は大学院生のため内数

## 学位論文取得者一覧

### 【博士論文】

<課程博士>〔 〕内は指導教員名  
数理物質科学研究科 物理学専攻

- 1) 五十嵐 朱夏〔森 正夫〕  
Transonic analysis of galactic outflows and its application  
(銀河風の遷音速解析とその応用)
- 2) 桐原 崇亘〔森 正夫〕  
Numerical study of internal structure of galaxies via minor merger events in M31  
(M31におけるマイナーマージャー現象を用いた銀河の内部構造の数値的研究)
- 3) 前川 真太朗〔重田 育照〕  
First-principles studies on physical properties of optical materials and biomaterials.  
(光学材料および生体材料評価に関する第一原理計算法の研究)
- 4) 笠原 宏太〔受川 史彦〕  
Search for Physics beyond the Standard Model in Events with a Z Boson and Missing Transverse Momentum in pp Collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV  
(重心系エネルギー13 TeVでの陽子陽子衝突におけるZボソンと消失運動量を含む事象を用いた標準模型を超える物理の探索)
- 5) 永田 和樹〔金 信弘〕  
Search for charged Higgs bosons in the  $H^{\pm} \rightarrow tb$  decay channel in pp collisions at  $\sqrt{s} = 8$  TeV with the ATLAS detector  
(ATLAS実験における重心系衝突エネルギー8 TeVでの陽子-陽子衝突のデータを用いたトップクォークとボトムクォークに崩壊する荷電ヒッグス粒子の探索)
- 6) 藤田 真司〔久野 成夫〕  
Observational study of physical properties of giant molecular clouds in W51  
(W51巨大分子雲の物理状態に関する観測的研究)
- 7) 中込 宇宙〔江角 晋一〕  
Measurements of 1st, 2nd and 3rd azimuthal anisotropy in  $\sqrt{s_{NN}}=200$  GeV Cu+Au collisions at RHIC-PHENIX  
(RHIC-PHENIX実験における $\sqrt{s_{NN}}=200$  GeV銅・金衝突での1次、2次、3次方位角異方性の測定)
- 8) 高地 雅光〔守友 浩〕  
Interrelation between Ion-Intercalation and Structure in Prussian Blue Analogues  
(プルシャンブルー類似体におけるイオンインターカレーションと構造との相関)
- 9) 迫坪 行広〔大塚 洋一〕  
Resistance change phenomenon in Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/TiO<sub>2</sub> stacked structure and its application to non-volatile memory  
(Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/TiO<sub>2</sub>積層構造における抵抗変化現象とその不揮発メモリへの応用)



【修士論文】

<博士課程修士>〔 〕内は指導教員名  
数理物質科学研究科 物理学専攻

- 1) 萩野 孝浩〔石橋 延幸〕  
ゲージ/重力対応に動機付けられた弦的ハドロン模型
- 2) 佐久間 弘基〔山崎 剛〕  
スパースモデリングを用いた格子QCDにおける相関関数の解析
- 3) 藤井 拓也〔伊敷 吾郎〕  
行列模型における回転するメンブレンの構成
- 4) 石原 駿〔梅村 雅之〕  
惑星大気の多重散乱を扱う輻射輸送モデルを用いた生命の痕跡の示唆について
- 5) 久喜 奈保子〔梅村 雅之〕  
A Radiative Diffusion and Transfer Scheme for Lyman alpha Line Scattering  
(ライマン $\alpha$ ライン散乱の輻射拡散・輸送計算スキーム)
- 6) 楠 尚久〔森 正夫〕  
銀河衝突シミュレーションで探るアンドロメダ銀河のダークマターハロー外縁部構造と  
衝突軌道の探査
- 7) 佐々木 さゆり〔梅村 雅之〕  
初期宇宙における構造形成に対するダークマター・バリオン相対速度の影響
- 8) 古谷 眸〔梅村 雅之〕  
原始惑星系円盤における圧縮性乱流場中のダスト粒子運動
- 9) 柴野 祥平〔森 正夫〕  
M31の銀河進化における星間ガスと恒星風の相互作用
- 10) 柏葉 優〔中務 孝〕  
中性子星内殻におけるスラブ相に対する完全自己無撞着計算
- 11) 荒木 広夢〔初貝 安弘〕  
Entanglement Chern numbers for 2D and 3D topological insulators  
(2次元および3次元トポロジカル絶縁体におけるエンタングルメントチャーン数)
- 12) 大山 侑太〔都倉 康弘〕  
Qubit系における外場の影響についての研究
- 13) 岸本 健〔岡田 晋〕  
欠陥・層間相互作用・外部電界を用いたグラフェン薄膜の電子構造制御

- 14) 國府田 桂介〔初貝 安弘〕  
平坦バンド系の乱れた臨界波動関数のマルチフラクタル解析
- 15) 古地 健人〔岡田 晋〕  
第一原理計算による複合構造を形成したカーボンナノチューブの電子物性の解明
- 16) 反町 純也〔岡田 晋〕  
 $\pi$  電子ネットワークの構造設計と外部電界下における電子物性解明
- 17) 武井 阜〔都倉 康弘〕  
1次元トポロジカル絶縁体におけるゼロモードの研究
- 18) 古谷 太一〔都倉 康弘〕  
三体系での同時相互作用によるエンタングルメント生成
- 19) 青柳 航〔金 信弘〕  
MGy放射線耐性を持つ2層埋込酸化膜構造SOIピクセル検出器の開発研究
- 20) 岩渕 周平〔受川 史彦〕  
HL-LHCへ向けたマイクロストリップセンサーの電荷収集効率の評価
- 21) 佐藤 和之〔原 和彦〕  
HL-LHC実験に向けたATLAS検出器増強用ピクセル検出器のテストビームによる性能評価
- 22) 関川 大介〔金 信弘〕  
サブミクロンスケールの位置分解能を持つ高精細SOIピクセル検出器の開発研究
- 23) 八木 俊輔〔原 和彦〕  
COBAND実験のための超伝導トンネル接合素子光検出器及び極低温増幅器の性能評価
- 24) SUBEDI BIPIN〔受川 史彦〕  
Basic research on SOI pixel detectors with internal gain based on avalanche multiplication.  
(アバランシュ増幅に基づく内部ゲイン付きSOIピクセル検出器の基礎研究)
- 25) 伊佐見 薫〔中井 直正〕  
活動銀河核の水蒸気レーザーおよびアンモニアの観測特にセイファート銀河IC2560の中心核の構造と運動の研究
- 26) 上西 広弥〔中井 直正〕  
南極1.2m電波望遠鏡の主鏡面精度に関する研究
- 27) 奥村 大志〔中井 直正〕  
点回折干渉計を用いた南極電波望遠鏡の鏡面測定法の開発
- 28) 栗木 美香〔久野 成夫〕  
超新星残骸Kes79に付随する星間ガスに関する研究

- 29) 田中 隆広〔久野 成夫〕  
棒渦巻銀河NGC4088における分子ガスと星形成の関係についての研究
- 30) 富安 悠人〔久野 成夫〕  
ALMAを用いたスターバースト銀河NGC1808における分子ガス物理状態の研究
- 31) 周 斌〔久野 成夫〕  
The study of the noise influence on phase retrieval holography measurement for the Antarctic 10-m THz telescope  
(Phase-retrieval holography法による南極10mテラヘルツ望遠鏡の鏡面測定に及ぼす雑音の影響に関する研究)
- 32) 伊藤 喬一郎〔江角 晋一〕  
LHC-ALICE実験  $\sqrt{s} = 7 \text{ TeV}$  陽子・陽子衝突における直接光子-ハドロン方位角相関の研究
- 33) 工藤 咲子〔江角 晋一〕  
RHIC-PHENIX実験  $\sqrt{s_{NN}} = 200 \text{ GeV}$   $^3\text{He}+\text{Au}$ 衝突におけるシリコン崩壊点検出器を用いた高横運動量荷電ハドロンの測定
- 34) 小山 亮平〔江角 晋一〕  
LHC-ALICE実験  $\sqrt{s} = 5.02 \text{ TeV}$  陽子・陽子衝突における電磁カロリメータを用いた中性パイ中間子の測定
- 35) 福田 悠裕〔江角 晋一〕  
RHIC-PHENIX実験  $\sqrt{s} = 510 \text{ GeV}$  陽子・陽子衝突における長距離方位角相関の粒子多重度依存性に関する研究
- 36) 松永 一成〔江角 晋一〕  
LHC-ALICE実験  $\sqrt{s_{NN}} = 5.02 \text{ TeV}$  鉛・鉛衝突における中性中間子測定による電磁カロリメータの性能評価
- 37) 金 秉徹〔江角 晋一〕  
LHC-ALICE実験  $\sqrt{s_{NN}} = 5.02 \text{ TeV}$  鉛・鉛衝突における電磁カロリメータを用いたジェットの研究
- 38) 相川 俊〔小野田 雅重〕  
新型バナジウムポリアニオン $\text{Na}_7\text{V}_3(\text{P}_2\text{O}_7)_4$ の合成と評価
- 39) 青沼 快〔大塚 洋一〕  
希釈冷凍温度域磁化測定システムの開発
- 40) 赤間 翔太〔守友 浩〕  
遷移金属酸化物固溶体の局所構造解析
- 41) 川原井 優太〔小野田 雅重〕  
新型バナジウムポリアニオン $\text{Na}_3\text{V}(\text{PO}_4)_2$ の合成と評価

- 42) 齋藤 明央〔野村 晋太郎〕  
MoS<sub>2</sub>/BN薄膜積層構造の光伝導特性の研究
- 43) 佐藤 浩介〔池沢 道男〕  
GaAs中の単一窒素不純物発光中心の電荷制御
- 44) 佐藤 拓磨〔小野田 雅重〕  
バナジウムブロンズβ'-Cu<sub>x</sub>V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>の物性と応用
- 45) 柴田 倅宏〔大塚 洋一〕  
電流バイアスされた超伝導ナノコンタクトにおける熱生成と温度計測
- 46) 谷川 大貴〔野村 晋太郎〕  
インパルス誘導ラマン散乱過程による二次元電子ガスの励起
- 47) 中村 圭佑〔池沢 道男〕  
時間分解顕微鏡法を用いたフェムト秒表面プラズモン波束の位相・包絡線形状の空間領域における変化の研究
- 48) 長谷川 卓也〔野村 晋太郎〕  
単一半導体接合を用いた超高速光伝導スイッチの研究
- 49) 平尾 亮磨〔小野田 雅重〕  
バナジウムポリアニオンNa<sub>7</sub>V<sub>4</sub>(P<sub>2</sub>O<sub>7</sub>)<sub>4</sub>PO<sub>4</sub>のNa脱離相の合成と評価
- 50) 福住 勇矢〔守友 浩〕  
チタン酸ナトリウムにおける拡散係数のイオン依存性
- 51) 松本 実夏〔池沢 道男〕  
Ag/利得媒質積層膜における表面プラズモンの誘導放出による増幅
- 52) 三浦 幸浩〔野村 晋太郎〕  
ダイヤモンドNVセンターを用いた周波数変調広視野磁場空間マッピング
- 53) 村上 亮輔〔池沢 道男〕  
Au導波路における1.55 μm帯フェムト秒表面プラズモンポラリトンの動的特性評価
- 54) 鍵水 勝秀〔大塚 洋一〕  
グラフェン／層状超伝導体接合における超伝導近接効果
- 55) 吉岡 篤志〔池沢 道男〕  
GaAs中の希薄窒素等電子トラップのスピン特性
- 56) 王 若曦〔池沢 道男〕  
Controlling the spontaneous emission rate of single isoelectronic luminescence centers in photonic crystal cavities  
(フォトリック結晶共振器による単一等電子発光中心の発光寿命制御)

- 57) Rögnvaldur Línal Magnússon [守友 浩]  
Thermal effect on the redox voltage in Prussian blue analogues  
(プルシアンブルー類似体の起電力の温度効果)
- 58) 大内 理人 [中嶋 洋輔]  
GAMMA 10/PDX端部におけるプラズマ熱流計測と計測システムの改良
- 59) 太田 晃一 [吉川 正志]  
GAMMA 10/PDXにおけるマルチパストムソン散乱計測の解析手法の確立
- 60) 田中 裕樹 [坂本 瑞樹]  
高エネルギーの銅イオンにより欠陥導入されたタングステンの重水素吸蔵特性
- 61) 津村 康平 [假家 強]  
GAMMA 10/PDXにおける改良型ECRH反射鏡を用いた端損失熱流束生成実験及びECRH用  
28/35GHz-MW級2周波数ジャイロトロンの性能評価試験
- 62) 成田 昂平 [坂本 瑞樹]  
GAMMA 10におけるセントラルECH印加プラズマの金中性粒子ビームプローブを用いた電位  
計測
- 63) 福井 良磨 [中嶋 洋輔]  
GAMMA 10/PDXにおけるビーム・材料相互作用研究の為にビーム入射系の開発
- 64) Jang Seowon [坂本 瑞樹]  
GAMMA 10/PDX端損失イオン束の制御に向けた高周波加熱実験

# 物理学セミナー

平成28年度

	開催日	講師	題目
第1回	10月5日	中井 直正 (宇宙観測)	パルサー
第2回	10月12日	丹羽 秀治 (物性実験)	放射光を用いたエネルギー材料の軟X線分光研究
第3回	10月19日	吉江 友照 (素粒子理論)	計算素粒子物理とデータグリッド
第4回	10月26日	古家 健次 (宇宙理論) (計算科学研究センター)	星・惑星系形成過程に伴う物質進化
第5回	11月9日	小野 倫也 (物性理論)	第一原理計算を用いた新物質・新デバイス探索
第6回	11月16日	原 和彦 (素粒子実験)	宇宙線ミューオンを用いた原子炉内部構造の透視
第7回	11月28日	坂本 慶司 (プラズマ) (連携大学院)	大電力ミリ波帯電波波の発生とその応用
第8回	12月7日	日野原 伸生 (原子核理論) (計算科学研究センター)	原子核の変形と大振幅集団運動
第9回	12月14日	西村 俊二 (原子核実験) (連携大学院)	重元素合成 (r 過程) : 金はどこで作られた？」

## 大学院関係経費

1. TA経費 数理物質科学研究科 物理学専攻分 4,840,244 円
2. TA経費 数理物質科学研究科  
ナノサイエンス・ナノテクノロジー（物理学分野）分  
183,935 円

平成28年度科学研究費助成事業交付決定一覧  
(科学研究費補助金・学術研究助成基金助成金)

研究種目		職 名	研究代表者	課題番号	研 究 題 目	金額 (千円)	
新学術領域研究	計	補助金	教授	相川 祐理	16H00931	星・惑星系形成過程における気相と固相の化学:天体構造の観測指標と物質進化	1,800
〃	公	補助金	教授	大塚 洋一	16H00896	折りたたみグラフェンを利用した階段型磁場中の二次元電子系の電気伝導の研究	1,400
〃	公	補助金	教授	岡田 晋	16H00898	計算科学による原子層物質の新物性デザインとデバイス設計指針の提示	2,800
〃	公	補助金	教授	小沢 顕	15H00830	新型飛行時間検出器によるNi同位体の質量測定	2,400
〃	計	補助金	教授	金 信弘	25105007	宇宙背景ニュートリノの崩壊探索に用いる超伝導赤外線検出器の開発	10,700
〃	計	補助金	教授	重田 育照	26107004	理論と実験の協奏的アプローチによる複合スピン励起子変換制御	11,700
〃	公	補助金	准教授	神田 晶申	16H00897	原子膜積層化により形成した超伝導システムの物性探索	2,800
〃	公	補助金	准教授	野村晋太郎	16H00978	先端ナノプローブ分光測定によるトポロジカル物質の解明	2,000
基盤研究(A)	一般	補助金	教授	今井 剛	26249141	原型炉ECHに向けたマルチMWジャイロトロン発振の研究	7,300
〃	〃	補助金	教授	岡田 晋	25246010	ナノ炭素物質と無機半導体からなる複合構造におけるナノ界面物性の解明	7,500
〃	〃	補助金	教授	中井 直正	26247019	大規模電波カメラによる「あかり」北極域の掃天観測	900
〃	〃	補助金	教授	初貝 安弘	26247064	トポロジカル相におけるバルク・エッジ対応の普遍性：固体物理から冷却原子まで	10,100
〃	〃	補助金	准教授	笹 公和	15H02340	多種の長寿命放射性核種を超高感度で検出可能な加速器質量分析法の開発	9,300
基盤研究 (B)	一般	補助金	副学長	三明 康郎	25287048	粒子・ジェット方位角相関測定によるグルーオン衝撃波の探索	2,000
		助成金					200
〃	〃	補助金	教授	梅村 雅之	15H03638	一般相対論的輻射流体によるブラックホール超臨界降着流と超大質量星の研究	1,200
〃	〃	補助金	教授	藏増 嘉伸	15H03651	テンソルネットワーク形式による格子ゲージ理論の研究	4,800
〃	〃	補助金	教授	坂本 瑞樹	26289352	照射損傷タングステンの水素吸蔵とその低減法の開発	1,200
		助成金					700
〃	〃	補助金	教授	矢花 一浩	15H03674	第一原理計算に基づく極限パルス光と物質の相互作用の解明	3,300
〃	〃	補助金	准教授	石塚 成人	15H03650	格子QCDによる K中間子崩壊の直接的CP非保存パラメータの決定	3,500
〃	〃	補助金	准教授	小野 倫也	16H03865	大規模第一原理スピン輸送シミュレーターの開発と革新的デバイス用界面構造の設計	3,300
〃	〃	補助金	准教授	野村 晋太郎	15H03673	ヘリカルTHz波による二次元電子系局所励起効果の解明	2,300
基盤研究(C)	一般	助成金	名誉教授	舩本 泰章	26400309	時間分解スピン回転をプローブとした高速電子移動の研究	1,100
〃	〃	助成金	教授	石橋 延幸	25400242	弦の場の理論を用いた超弦理論・D-ブレーンの研究	800
〃	〃	助成金	教授	金谷 和至	15K05041	有限温度・有限密度クォーク物質の物性と相構造	900
〃	〃	助成金	准教授 (連携大学院)	河合 孝純	26390060	リチウムのグラファイトインターカレーションにおける固液界面反応の物理	900
〃	〃	助成金	准教授	谷口 伸彦	26400382	物質のゲージ理論とナノ系非平衡量子輸送現象	500
〃	〃	助成金	准教授	根村 英克	16K05340	格子QCD計算による現実的一般化核力の研究と軽いハイパー核の精密物理への展開	1,400
〃	〃	助成金	准教授	森 正夫	25400222	輻射流体シミュレーションによる銀河系統樹の構築	800
〃	〃	助成金	助教	佐藤 勇二	24540248	重力／ゲージ理論双対性の可積分構造に基づいたグルーオン散乱振幅の研究	700
〃	〃	助成金	助教	庄司 光男	26410002	トレオニン合成酵素の全反応機構の理論的解明	600
〃	〃	助成金	助教	森下 將史	16K05432	2次元量子固体の構造操作による量子現象の発現と解明	1,300



平成28年度科学研究費助成事業交付決定一覧  
(科学研究費補助金・学術研究助成基金助成金)

研究種目		職 名	研究代表者	課題番号	研 究 題 目	金額 (千円)	
〃	〃	助成金	研究員	滑川 裕介	15K05068	格子量子色力学による新たなハドロン存在形態の解明	700
挑戦的萌芽研究		助成金	教授	相川 祐理	16K13782	計算科学によるアストロバイオロジーへの理論的挑戦	1,300
〃	助成金	教授	西堀 英治	16K13660	弾性・非弾性散乱データ同時解析による計測物質科学の創成	2,000	
〃	助成金	教授	初貝 安弘	16K13845	四元数のトポロジカル相での意義の解明への挑戦：多体問題と時間反転の破れ	1,100	
〃	助成金	准教授	笹 公和	26600138	炭素14マッピング直接測定を目指したレーザーアブレーション加速器質量分析法の開発	700	
〃	助成金	准教授	武内 勇司	16K13797	半導体SOI回路と超伝導検出器STJの融合による革新的高感度検出器の開発	700	
〃	助成金	講師	中條 達也	15K13475	高エネルギー実験のための10ピコ秒 飛行時間測定器の開発	1,200	
〃	助成金	助教	小林 航	15K13513	イオンモデルに基づいた新奇なナトリウムイオン電池材料の開発	900	
若手研究(A)	補助金	講師	久保 敦	26706018	通信帯フェムト秒表面プラズモン波束の顕微映像化と非線形増幅	2,200	
	助成金					300	
〃	助成金	准教授	山崎 剛	16H06002	量子色力学を基にした原子核構造の解明へ向けた基礎研究	3,600	
若手研究(B)	助成金	助教	池添 竜也	15K17797	ミラー磁場配位における自発励起アルベン波動の境界条件および非等方性緩和の研究	1,400	
〃	助成金	助教	伊敷 吾郎	16K17679	超弦理論の非摂動的定式化についての研究	1,100	
〃	助成金	助教	丹羽 秀治	16K20940	非白金燃料電池触媒の活性点分布の解明	2,100	
〃	助成金	助教	日野原 伸生	16K17680	中性子－陽子対相関・対凝縮の解明	900	
〃	助成金	助教	森口 哲朗	16K17678	スキン構造理解のための不安定原子核の陽子及び中性子密度分布の研究	1,900	
〃	助成金	研究員	永井 誠	15K17598	焦点面における位相差を用いた電波望遠鏡の鏡面形状測定法の開発	900	
〃	助成金	研究員	松中 哲也	16K16347	石英中炭素14の超高感度測定法の開発と氷河地形編年への応用	1,200	
合 計							124,600

※ 金額は当初の交付決定額で直接経費のみ  
※ 網掛けは計算科学研究センターより申請・交付

## 平成28年度 受託研究

NO	職 名	氏 名	委 託 者 名	研 究 題 目	金 額 (円)
1	教授	石橋 延幸	(独)日本学術振興会	素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理分野に関する学術研究動向	1,690,000
2	教授	都倉 康弘	国立研究開発法人科学技術振興機構	光子－電子スピン量子変換理論	6,500,000
3	教授	中井 直正	大学共同利用機関法人自然科学研究機	高精度VLBI観測による銀河系の構造及び進化の解明	5,182,000
4	教授	中務 孝	国立研究開発法人科学技術振興機構	核構造計算による核反応モデルの高精度化	6,000,000
6	講師	久保 敦	国立研究開発法人科学技術振興機構	カルコゲン超格子を用いたアクティブプラズモニクス	7,657,000
7	助教	新田 冬夢	株式会社 雄鳥試作研究所	AR溝付レンズの最適な形状の研究	540,000
合 計					27,569,000

## 平成28年度 受託事業

NO	職 名	氏 名	委 託 者 名	研 究 題 目	金 額 (円)
1	教授	中井 直正	(独)日本学術振興会	自作の望遠鏡で宇宙を見よう：「ひらめき☆ときめき サイエンス～ようこそ大学の研究室へ～KAKENHI」(研究成果の社会還元・普及事業)	344,000
2	教授	西堀 英治	(独)日本学術振興会	平成28年度二国間交流事業：オープンパートナーシップ共同研究(デンマーク)「精密電子密度観測法の開発によるエネルギー材料の構造科学研究」	1,640,000
3	講師	中條 達也	(独)日本学術振興会	平成28年度二国間交流事業：フランスとの共同研究(CNRS)「ジェット・光子・ハドロン測定によるジェット抑制機構とQGP媒質応答の解明」	2,000,000
4	助教	佐藤 勇二	(独)日本学術振興会	平成28年度二国間交流事業：ハンガリーとの共同研究(HAS)「ゲージ-重力双対性と可積分性に基づく強結合ゲージ理論ダイナミクスの展開」	1,875,202
合 計					5,859,202

## 平成28年度 共同研究

NO	職 名	氏 名	共同研究相手方名	研 究 題 目	金 額 (円)
1	教授	神田 晶申	国立研究開発法人科学技術振興機構	ひずみ誘起ゲージ場を用いた単原子層膜の伝導制御とエレクトロニクス応用	5,547,000
2	准教授	小野田 雅重	国立研究開発法人科学技術振興機構	LiBH4系のイオンダイナミクスに関する研究	3,300,000
合 計					8,847,000

## 平成28年度 奨学寄附金

NO	職 名	氏 名	寄 付 者 等 名	寄 付 の 目 的	金 額 (円)
1	教授	西堀 英治	公益財団法人カシオ科学振興財団	「粒子内原子配列の実空間モデリングによる階層構造科学の創成」に対する研究助成	5,000,000
2	教授	西堀 英治	公益財団法人住友電工グループ社会貢献基金	「金属材料の電子密度分布からの機能構造相関抽出法の開発」に対する研究助成	1,100,000
3	教授	守友 浩	公益財団法人谷川熱技術振興協会	研究テーマ「電池型熱発電素子の開発と排熱利用」に対する研究助成	1,200,000
4	准教授	池沢 道男	公益財団法人住友電工グループ社会貢献基金	「半導体ナノ構造の共鳴光励起による区別のつかない光子の発生」に対する研究助成	1,100,000
5	准教授	小野田 雅重	公益財団法人日本板硝子材料工学助成会	「バナジウムセラミックスおよびポリアニオン系正極の開発」に対する研究助成	900,000
合 計					9,300,000

## 平成28年度 その他

NO	職 名	氏 名	機関等名	事 業 名 称 等	金 額 (円)
1	教授	守友 浩	大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構	筑波大-KEK連携を核としたつくば教育研究拠点の構築に向けて	700,000
2	教授	守友 浩	TIA中核4機関(AIST・NIMS・筑波大学・KEK)	TIA連携プログラム探索推進事業『かけはし』	900,000
合 計					1,600,000

平成28年度 各種受賞等

NO	職 名	氏 名	賞 名	受賞論文等	受賞月
1	助教	小林航	平成28年度筑波大学若手教 員奨励賞	エネルギー物質の研究	29.1

## 役 割 分 担 （ 平 成 2 8 年 度 ）

### 【物理学域】

物理学域長	矢花
グループ長	石橋、梅村、中務、都倉、重田、 受川、中井、江角、西堀、中嶋
理論グループ懇談会議長	都倉
実験系教授懇談会世話人	受川
カリキュラム委員長	重田
カリキュラム委員	小沢、重田、西堀、相川、矢花、 中井、坂本、受川、藏増
物理学域広報委員会	重田
物理学域教育研究倫理委員会	必要に応じて
物理学域図書係	岡田
学生支援対応チーム	守友、藏増、小沢、重田
学域計算機委員会	橋本(委員長)
物理学域スペース調査検討委員会	守友、石橋、梅村、中務、都倉、 田、受川、中井、江角、西堀、中嶋
校正線源管理責任者	守友
校正線源保管責任者	小沢
自然系学系液体室素タンク管理委員	小野田
科学の芽賞	武内、久保
朝永記念室	金谷、受川
実験廃棄物取扱責任者	東山
工作室管理担当	池沢
高圧ガスゾーン管理者	神田(1F)、小沢(自然E)、神田(自然D)

### 【数理物質系・数理物質科学研究科】

系長	伊藤(電物)
研究科長	鈴木(物分)
物理学専攻長	守友
物理学専攻学務委員	藏増
ナノサイエンス・ナノテクノロジー専攻長	大塩(化学)
系長室会議構成員	守友、初貝、金谷(オブザーバー)
系人事委員会総会委員	守友、小沢、中嶋、梅村
系運営委員会委員	守友、小沢、(藏増)
研究科運営委員会委員	守友、藏増、(小沢)
研究科学務委員会	藏増
研究科就職委員会	藏増
系 広報委員会委員	藏増
系 図書委員会委員	岡田
系 施設・安全管理委員会委員	守友
系 情報環境委員会	守友、橋本
系 総合研究棟B棟管理委員会委員	岡田
系 総合研究棟B棟ドラフト管理委員会	野村
系 研究倫理委員会委員	藏増
研究科 学生相談室員	武内
専攻eラーニング担当教員	橋本

### 【物理学類】

物理学類長	小沢
物理学類学務委員	重田
物理学実験責任者	中嶋
学類クラス担任 (1年)	中務、中條
(2年)	森、佐藤(構)
(3年)	坂本、谷口(裕)
(4年)	藏増、久保

### 【理工学群】

入学試験実施委員会	吉江、池沢
全学学群教育課程委員会	小沢
全学学群教職課程委員会	吉川(正)
学生担当教員	石塚
スポーツ・運営委員会	森口
理工学群FD委員(FD窓口教員)	小沢
理工学群総合政策室委員	初貝
理工学群広報委員会	岡田
アドミッションセンター専門委員	岡田
教職実践演習担当教員	原
ハラスメント相談員	野村
教育実習校訪問指導教員	(4年担任)
キャリア支援室員	久野
キャリア支援担当教員	東山
自然系学類計算機委員会	橋本

### 【センター】

計算科学研究センター長	梅村
数理物質融合科学センター長	金谷
研究基盤総合センター運営委員会	久野
研究基盤総合センター低温部門運営委員会	野村
研究基盤総合センター工作部門運営委員会	池沢
研究基盤総合センター分析部門運営委員会	守友
アイソトープ環境動態研究センター運営委員会	小沢
プラズマ研究センター運営委員会	石橋、中井
プラズマ研究センター運営協議会	石橋、中井
計算科学研究センター運営委・運営協議会	都倉
計算科学研究センター人事委員会	都倉、日野(物分)
学際物質科学研究センター運営委員会	守友
学生生活支援室員	仁瓶(化学)

### 【全学委員会委員等】

筑波大学学長補佐室	
教育社会連携推進室	受川
ハラスメント防止対策委員会	森
キャリア支援室担当教員会議構成員	藏増
FD委員会(物理学専攻FD窓口教員)	重田
つくばグローバルサイエンスウィーク実地委員	守友、江角
産学連携推進プロジェクト審査委員会委員	

## 物理学域人事異動

(平 2 8 . 4 . 1 ～ 平 2 9 . 3 . 3 1 )

### 【物理学域に來られた方々】

氏 名	職名	発令日	異 動 内 容 (前職)
Hathwar Venkatesha Rama	助教	H28. 5. 1	オーフス大学
Kim Soo Bong	教授	H28. 7. 1	ソウル国立大学
坂井 真吾	助教	H28. 7. 1	INFN博士研究員

### 【物理学域を去られた方々】

氏 名	職名	発令日	異 動 内 容
今井 剛	教授	H29. 3. 31	定年退職
大塚 洋一	教授	H29. 3. 31	定年退職
金 信弘	教授	H29. 3. 31	定年退職
相川 祐理	教授	H29. 3. 31	東京大学大学院理学系研究科天文学専攻

	グループ			担当センター		グループ			担当センター				
理論	素粒子	教授	石橋延幸 金谷和至 蔵増嘉伸	計算科学セ 計算科学セ 計算科学セ 計算科学セ 計算科学セ	実験	宇宙観測	教授	中井直正 久野成夫 新田冬夢					
		准教授	石塚成人 谷口裕介 根村英克			原子核	教授	三明康郎 小沢 颯 江角晋一 笹 公和 中條達也 鈴木伸司 森口哲朗 坂井真吾	研究基盤セ				
			助教			山崎 剛 吉江友照 伊敷吾郎 佐藤勇二 毛利健司 大野浩史	准教授	海外ユニット Busch Oliver	研究基盤セ				
						梅村雅之 相川祐理 森 正夫 吉川耕司 古家健次 Alexander Wagner	教授	守友 浩 大塚洋一 西堀英治 Iversen Bo, Brummerstedt	TIMS				
		原子核	教授			矢花一浩 中務 孝 橋本幸男 日野原伸生	計算科学セ 計算科学セ 計算科学セ 計算科学セ	物性	教授	小野田雅重 池沢道男 野村晋太郎 神田晶申 東山和幸 久保 敦 富本慎一 森下将史 小林 航 笠井秀隆 丹羽秀治 Hathwar Rama			
	物性	教授	岡田 晋 都倉康弘 初貝安弘 小野倫也 谷口伸彦 吉田 恭	TIMS 計算科学セ		講師 助教	プラズマ	教授	今井 剛 坂本瑞樹 中嶋洋輔 假家 強 南龍太郎 吉川正志 小波蔵純子 沼倉友晴 平田真史 池添竜也	プラズマセンター			
		助教	重田育照 庄司光男					准教授	ブラズマセンター ブラズマセンター ブラズマセンター ブラズマセンター ブラズマセンター ブラズマセンター				
		生命物理	教授 助教					計算科学セ 計算科学セ	助教				
		素粒子	教授					受川史彦 金 信弘 原 和彦 武内勇司 佐藤構二 大川英希 Kim. Soo. Bong	計算科学セ 計算科学セ	助教	助教		
			准教授										
講師													
助教													
海外ユニット													

## 研究員

舛本泰章	物性実験
柴田恭幸	物性実験
水野三四郎	原子核実験
武政健一	素粒子実験
齋藤弘雄	宇宙観測
永井 誠	宇宙観測
松中哲也	原子核実験
村木 久祥	素粒子理論
温 凱	原子核理論
鷲山広平	原子核理論

## 連係大学院

宇治進也	NIMS
迫田和彰	NIMS
胡 曉	NIMS
山口尚秀	物質・材料機構

## 連携大学院

位地正年	NEC	物理, ナノ
河合孝純	NEC	物理, ナノ
佐々木健一	NTT	物理, ナノ
後藤秀樹	NTT	物理, ナノ
西村俊二	理化学	物理
坂本慶司	原研	物理
仲野友英	NEC	物理, ナノ
丸山敏毅	原研	物理
井手俊介	原研	物理
宮本良之	産総研	物理
山本 剛	NEC	物理, ナノ
横尾 篤	NTT	物理, ナノ

## 技術職員

大川和夫	シニアスタッフ
加藤純雄	
平田久子	シニアスタッフ

## 客員教員

新井康夫	KEK
大見和史	KEK
高崎史彦	KEK
幅 淳二	KEK
宮武宇也	KEK
田中真伸	KEK
吉田拓生	クロスアポ
山口貴之	クロスアポ
小沢恭一郎	クロスアポ
池上陽一	クロスアポ

## 事務職員

飯村美智子	教務
米山啓子	総務
谷島有美・矢口美佐子	会計・研究支援
石橋夕美・谷島有美	会計

年次研究報告 筑波大学数理物質系物理学域

2016（平成28）年度

発行 2017年9月

発行者 筑波大学数理物質系物理学域

〒305-8571 茨城県つくば市天王台1-1-1

TEL 029-853-4033

FAX 029-853-6618

ISSN 2189-7557