

ISSN 2189-7557

年次研究報告

ANNUAL REPORT OF DIVISION OF PHYSICS
THE UNIVERSITY OF TSUKUBA

2015 (平成27) 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	39
III	宇宙物理理論グループ	78
IV	宇宙観測グループ	100
V	原子核理論グループ	112
VI	原子核実験グループ	136
VII	物性理論グループ	
VII-1	量子物性理論グループ	161
VII-2	ナノ量子物性グループ	169
VII-3	表面界面物性グループ	173
VII-4	ナノ構造物性グループ	178
VII-5	量子輸送研究グループ	189
VIII	生命物理グループ	195
IX	物性実験グループ	
IX-1	磁性物性グループ	205
IX-2	ナノフォトニクスグループ	210
IX-3	強相関物性グループ	216
IX-4	光ナノ物性グループ	227
IX-5	低温物性グループ	234
IX-6	構造科学グループ	245
X	プラズマ研究グループ	250

— 教育活動 —

XI	物理教育および物理教育の研究	287
	【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	292
	物理学域資料	300

1. 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、木村 哲士、齋藤 華、佐々木 健志、滑川 裕介、村木 久祥、

大学院生 （9名）

【人事異動】

金谷和至教授が数理物質系長を退任し、素粒子論研究室の教授に復帰した（2015年4月1日）。

谷口裕介博士が計算科学研究センター准教授に昇任した（2016年1月1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る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（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となる見込み）が稼働予定であり、これに向けてPACS Collaborationを組織し、準備研究を開始している。これと並行して、有限温度・有限密度QCDの研究、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、2016年度から「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・研究開発が始まった。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。

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。今年度は博士研究員の木村氏・村木氏が加わったことにより、研究の幅が広がった。弦の場の理論と次元正則化、弦の場の理論の次元正則化とループ振幅、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、コヒーレント状態を用いた行列幾何の研究等、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、佐々木 健志、滑川 裕介)

(1) HPCI 戦略プログラム分野 5 における研究開発課題

分野 5「物質と宇宙の起源と構造」の戦略目標は、ビッグバンに始まる宇宙の歴史に於ける、素粒子から元素合成、星・銀河形成に至る物質と宇宙の起源と構造を、複数の階層を繋ぐ計算科学的手法で統一的に理解することにある。この目標を目指して 4 つの研究開発課題が設定されており、そのうちのひとつが「格子 QCD による物理点でのバリオン間相互作用の決定」である。本課題が目指すものは、格子 QCD 計算の微細化とマルチスケール化を鍵とする新しい展開である。微細化とは、アイソスピン対称性の破れの効果を取り入れた計算や、低エネルギーのハドロン構造計算を意味する。他方、マルチスケール化とは、格子 QCD を用いた原子核の直接構成によってその束縛エネルギーを求めたり、あるいは核子間の有効ポテンシャルを調べたりすることを意味する。前者は、山崎・藏増を中心としたグループによって推進されており、後者は HAL QCD Collaboration が取り組んでいるアプローチである (後述)。

「京」で生成された配位を用いた基本物理量計算

「京」では、DDHMC (Domain-Decomposed Hybrid Monte Carlo) 法を用いて、 96^4 の格子サイズ、0.1 fm 程度の格子間隔を持つ、2+1 フレーバー ($m_u = m_d \neq m_s$) QCD のゲージ配位を生成した。この配位の最大の特徴は、 $(9\text{fm})^3$ という従来にない圧倒的な大きさの空間体積である。その最大の利点は、複数の核子から原子核を直接構成することが可能になることや、離散化された運動量の刻み幅が細くなることによって、ハドロン形状因子の運動量空間における精密な解析が可能となることである。配位生成は 2014 年度初めに終了し、HA-PACS (計算ノード数 332、GPU 部ピーク演算性能 1.048Pflops、CPU 部ピーク演算性能 0.118Pflops) を用いてハドロン質量などの基本物理量の測定を行ってきた。2015 年度は、ハドロン質量、クォーク質量、擬スカラー中間子崩壊定数などの基本的な物理量の計算に対して時空間並進対称性を利用した統計精度の向上を目指した。図 1 は物理点でのハドロン質量計算の最終結果を実験値と比較したものである。ここでは、クォーク質量 ($m_u = m_d \neq m_s$) と格子間隔を決めるための 3 つの物理量として、 π 中間子質量 (m_π)、 K 中間子質量 (m_K)、 Ω バリオン質量 (m_Ω) を採用している。

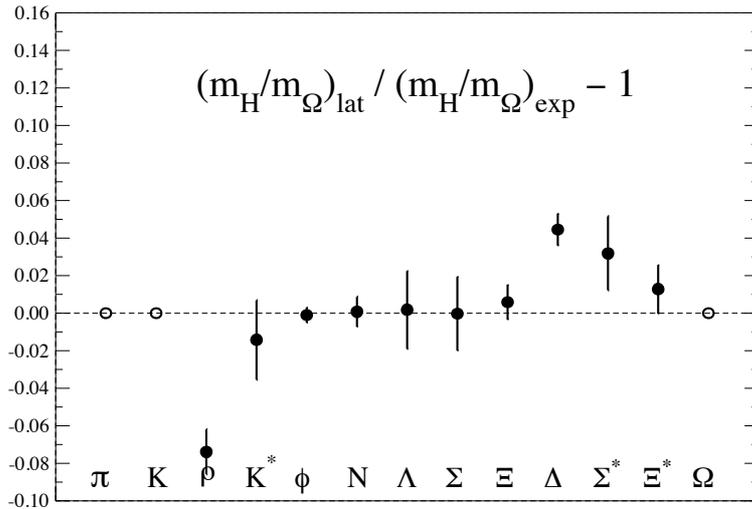


図 1: 2+1 フレーバー格子 QCD 計算で得られたハドロン質量と実験値との比較。白抜きシンボルはクォーク質量と格子間隔を決めるための物理インプットを表す。

安定粒子 (強い相互作用で崩壊しない) は実験値と誤差の範囲で一致しているのに対して、不安定粒子 (強い相互作用で崩壊する ρ や Δ など) は、誤差の範囲を超えて実験値との有意なズレが見て取れる。これは、現在採用しているハドロン質量の計算方法が不安定粒子に対しては有効でないことを表しており、これほど明確に実証された例は世界で初めてである。その他、ハドロン質量の計算と並行して、擬スカラー中間子の崩壊定数、カイラル摂動論における低エネルギー定数、核子のシグマ項などの計算も実行し、大変興味深い結果を得ている (論文 8)。

(2) K 中間子崩壊振幅の研究

素粒子標準模型には、昔からの未解決な問題で、かつ理論の検証において極めて重要な問題が残されている。K 中間子崩壊での $\Delta I = 1/2$ 則の解明と、CP 非保存パラメータ (ϵ'/ϵ) の理論からの予測である。これらの問題には、K 中間子が二つの π 中間子に崩壊する場合の崩壊振幅の計算が必要である。

石塚、吉江らは、格子 QCD により崩壊振幅を格子 QCD により数値計算し、問題の研究を行った。 π 中間子質量 $m_\pi = 280$ MeV の元で、終状態の π 中間子が運動量をもたない場合の計算を完成させた (文献.9)。この計算により、 $\Delta I = 1/2$ 則の兆候を見ることができた。CP 非保存パラメータ (ϵ'/ϵ) に関しては統計誤差が非常に大きく、計算の改善が必要であることが分かった。

この研究を元に、計算を運動量をもつ現実の崩壊の場合に拡張し、信頼性の高い振幅を求める研究を開始した。現在、崩壊振幅の計算のために、新たなゲージ配位を生成し、本格計算に向けた試験計算を行っている。

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

金谷、谷口らは、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らとの共同研究で、Wilson 型クォークによる有限温度・密度 QCD の研究を引き続き推進した。

改良 Wilson クォークによる $N_F = 2 + 1$ QCD の物理点近傍における状態方程式のための配位生成を継続して推進するとともに、状態方程式の評価に必要なベータ関数を QCD の多変数空間で精度よく決定する手法として、多重点再重み付け法によるベータ関数評価の試験を行った。さらに、Gradient Flow 法を用いた有限温度状態方程式の評価を、動的クォークを含む QCD で実行する最初の研究を開始し、試験研究の結果を得た。

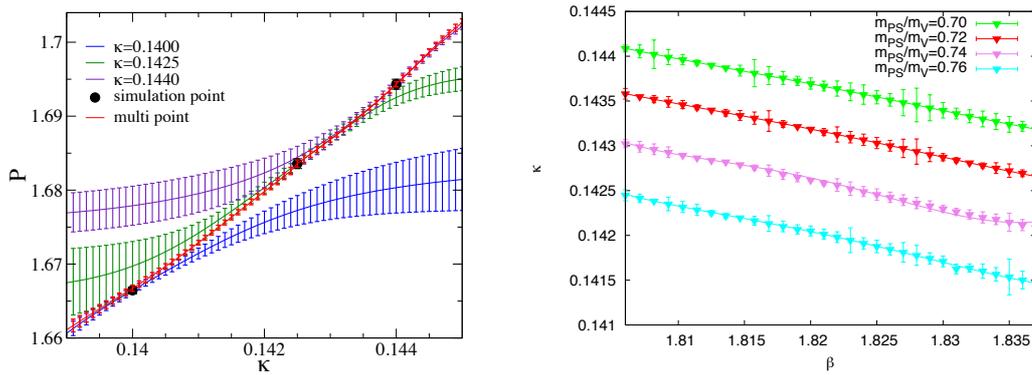


図 2: $N_F = 2$ QCD における多重点再重み付け法の研究 [論文 11]。左図：改良プラケット $P = c_0 W^{1 \times 1} + 2c_1 W^{1 \times 2}$ の期待値の $\beta = 1.825$ における κ 依存性。黒丸は、3つのシミュレーション点における観測結果。紫、緑、青は、3点それぞれのデータによる単純な再重み付け法の結果。「重ねあわせ問題」のために、パラメータを大きく動かすと単純な再重み付け法では観測結果を再現できないことがわかる。赤は、3点のデータを多重点再重み付け法により結合して計算した結果。観測結果をスムーズに繋ぎ、広いパラメータ領域で精度の高い計算が可能となる。右図： m_{PS}/m_V の結果から求めた等物理線 (LCP)。 m_{PS}/m_V が 1 に近いほどクォーク質量が大きい場合に相当する。

多重点再重み付け法による QCD ベータ関数

有限温度・有限密度 QCD の状態方程式や物理量の温度・密度依存性を計算するためには、理論のパラメータ空間内の「等物理線 (Line of Constant Physics: LCP)」（同一の物理系を様々な格子間隔で表現）と、LCP 上でパラメータの格子間隔依存性をあらかず「ベータ関数」の情報が必要である。QCD は、ゲージ結合定数 (β) と複数のクォーク質量 (κ) や化学ポテンシャル (μ) を基本パラメータとして持つが、多次元のパラメータ空間で LCP やベータ関数を精度よく評価することは簡単ではない。それを解決するために「多重点再重み付け法 (multi-point reweighting 法)」を検討し、密度ゼロの $N_F = 2$ QCD の場合に試験研究を行った (論文 10,11)。

系のパラメータ依存性を調べる有力な方法として、再重み付け法 (reweighting 法) がよく使われるが、有限温度・有限密度 QCD の研究で要求されるような、

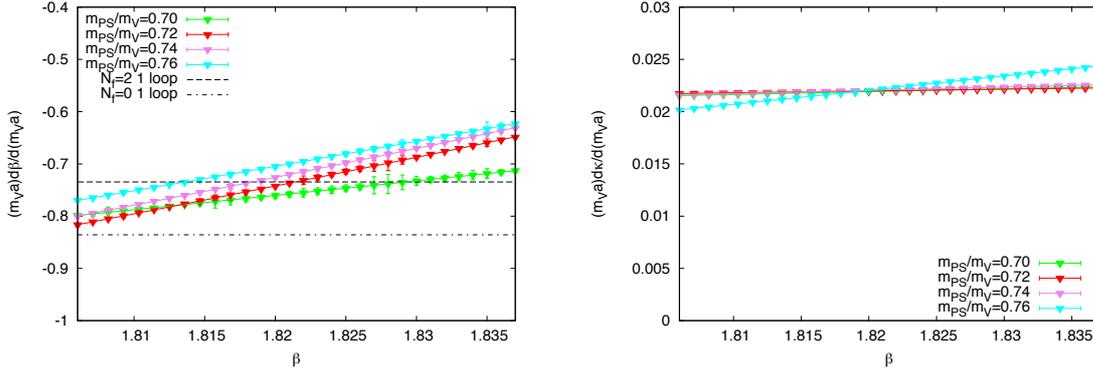


図 3: 多重点再重み付け法による、 $N_F = 2$ QCD のベータ関数 $a(d\beta/da)$ (左図) と $a(d\kappa/da)$ (右図)。 $m_V a$ を近傍で結合パラメータの 2 次フィットした結果に基づいて計算したもの。左図の破線は、 $N_F = 0$ と 2 の場合の摂動 1 次の結果。[論文 11]

パラメータ空間の広い領域に応用することには困難が伴う。図 2 左に、改良ブラケット P の κ 依存性を示す。黒丸は 3 つのシミュレーション点における観測結果で、紫、緑、青は、それぞれのシミュレーション点のデータを使って再重み付け法を使って計算した P の κ 依存性の予言をあらわす。パラメータを大きく動かすと観測結果を再現できないことがわかる。誤差評価も信頼性が低く、このまま LCP やベータ関数の計算に使うことは難しい。これは、再重み付け法に必要なヒストグラムを、各シミュレーション点での期待値近傍でしか信頼できる評価ができず、期待値が大きく動く事に対応するようなパラメータの大きな変化に対応できない事による（「重ねあわせ問題」）。

多重点再重み付け法では、重ねあわせ問題を解決するために、複数のシミュレーションデータを統合して再重み付けする。図 2 左図に、3 つのシミュレーションを合わせて多重点再重み付け法により計算した結果を赤線で示す。観測結果（黒丸）をスムーズに繋ぎ、シミュレーション点の間の領域も含め、広いパラメータ領域で信頼性と精度の高い結果が得られた。これにより、LCP とベータ関数の計算に必要な、パラメータ空間の広い領域での精度の高い測定が可能となる。それに基づいて計算した $N_F = 2$ QCD の LCP とベータ関数を、図 2 右図と図 3 に示す。

$N_F = 2 + 1$ 物理点 QCD と有限密度 QCD

この手法を応用して $N_F = 2 + 1$ 物理点 QCD や有限密度 QCD を研究するための準備も進めている（論文 12）。

我々が開発したる固定格子間隔アプローチに基づき、PACS-CS のゼロ温度シミュレーションと同じシミュレーション・パラメータを使って、 $T = 140\text{--}500$ MeV に相当する有限温度配位を系統的に蓄積している。これまでに生成した有限温度配位と、PACS-CS が公開しているゼロ温度配位や reweighting factor を用いて、Plaquette 期待値、Polyakov loop 期待値、さらに状態方程式の計算で必要となる QCD 作用の coupling parameter 微分の試験計算をおこない、

期待する振る舞いを確認した (図 4 左図)。これを発展させ、多重点再重み付け法や Gradient Flow 法を用いた物理点でのベータ関数の評価が次の課題である。

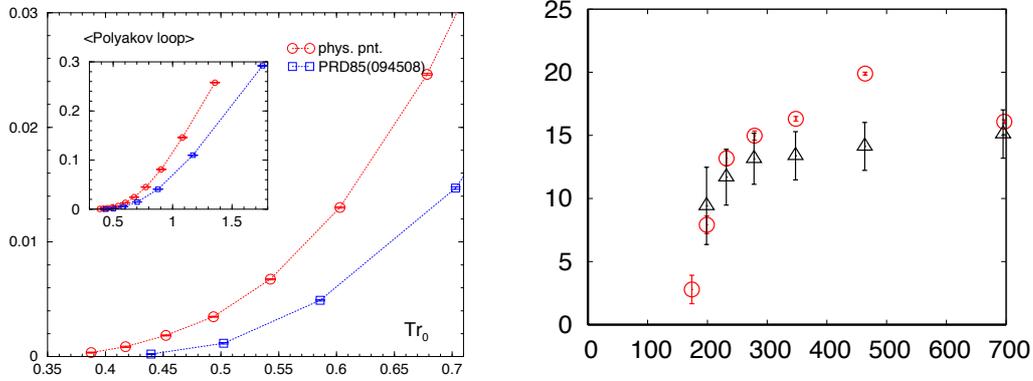


図 4: 左図 : 物理点における有限温度 QCD の配位で計算した Polyakov loop 期待値の温度依存性。以前の計算による比較的重いクォーク質量での結果も示す。クォーク質量が軽くなると相転移温度が下がる事が分かる。[論文 11] 右図 : Gradient Flow 法による $N_F = 2 + 1$ QCD 状態方程式 (中間結果)。縦軸は ϵ/T^4 、横軸は T [MeV]。赤丸が Gradient Flow 法の結果で、黒三角は T -積分法による以前の結果。

Gradient Flow 法による $N_F = 2 + 1$ QCD 状態方程式

近年 QCD 熱力学量の新しい計算方法として gradient flow を用いた方法が注目を浴びている。この方法では繰り込まれたエネルギー運動量テンソルを格子上で直接計算することが可能になり、エネルギー密度などの状態方程式を計算することができる。さらに gradient flow によるクーリングの効果によって、熱力学量における誤差の大部分を占めるゲージ配位の揺らぎが押さえられ、従来の積分法をベースとした計算手法に比べて、高精度の計算が可能になることが期待されている。

これまでにクエンチ近似では gradient flow を用いた計算が行われており、その有効性が示されている。動的クォークを含む作用での gradient flow の定式化は、M. Lüscher により行われており、full QCD でのエネルギー運動量テンソルの評価方法も H. Makino と H. Suzuki の論文で開発されている。さらに、カイラルオーダーパラメータや位相数の評価も gradient flow により容易になると期待されており、相構造などの研究にも大きな進展が期待される。我々は、これらを使って動的クォークを含む (2+1)-flavor QCD における gradient flow を用いた QCD 熱力学量の計算を目的として、研究を進めている。そのための計算コードを、Bridge++ をベースに開発した。

最初のステップとして、 $m_{PS}/m_V = 0.65$ のやや重いクォーク質量領域で $N_F = 2 + 1$ QCD の状態方程式の研究を開始した。固定格子間隔法を採用し、CP-PACS Collaboration で生成したゼロ温度配位と同じシミュレーション・パラ

メータを用い、 $T = 170\text{--}700\text{MeV}$ に相当する有限温度配位を生成している。図 4 右図に、gradient flow を用いた状態方程式計算の中間結果を示す。Makino-Suzuki による状態方程式 (エネルギー・運動量テンソル) の評価方法では、flow time t についてゼロの極限を外挿する必要があるが、 $N_t \approx 4$ の高温格子以外では、安定した結果を得ることが出来た。図 4 右図で、赤丸が Gradient Flow 法によるエネルギー密度の結果で、黒三角は、 T -積分法により我々が以前計算した結果である。Gradient Flow 法による右端のデータ ($N_t = 4$) とその次のデータ ($N_t = 6$) では、 $t \rightarrow 0$ の外挿に不定性が有るが、その系統誤差はエラーバーに含まれていない。連続極限以外で Gradient Flow 法と T -積分法が一致する必然性はないが、有限の格子上で両者がほぼ一致していることは、方法の有用性を示唆している。

Gradient Flow 法による計算時間は、 T -積分法より大きく削減されている。次の目標は、異なる格子間隔での同様の計算を行い、連続極限を調べることである。最終的には、物理点での有限温度配位を用いたエネルギー運動量テンソルの測定を目指している。

(4) 格子 QCD による保存電荷の揺らぎと相関の研究

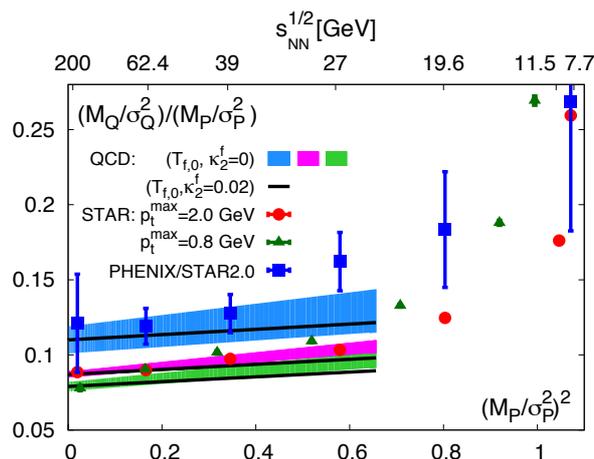


図 5: 総電荷揺らぎの平均と分散の比と総陽子数揺らぎの平均と分散の比の比の実験値 (シンボル) と格子 QCD 計算 (バンド及び線) との比較。

閉じ込め・非閉じ込め相転移の前後では、系の自由度がハドロンからクォークに変化する。保存電荷の揺らぎやそれらの間の相関は、この自由度の変化に敏感であり、相転移の性質を詳細に調べるのに有用である。

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 シミュレーションにより、様々な保存電荷の揺らぎ及びそれらの間の相関に関する共同研究を行った。ここで、シミュレーションは複数の格子間隔にて行い、連続極限をとった。まず、300–700MeV の高温領域において、u,d,s クォークに対する対角及び非対角クォーク数感受率を 4 次のオーダーまで計算した。そして、得られた結果をいくつかの摂動計算と比較し、互いによ

く一致することを示した (論文 14)。また、温度と化学ポテンシャルに関するテイラー展開を用いて、総バリオン数及び総電荷の揺らぎの平均と分散を計算した。そして、その結果を STAR 及び PHENIX 実験の結果と比較し、バリオン化学ポテンシャルが 0 の極限での freeze-out 温度を決定するとともに、初めて、freeze-out line の曲率に制限を与えた (論文 16)。

(5) 有限温度格子 QCD によるクォークonium消失と重クォーク輸送の研究

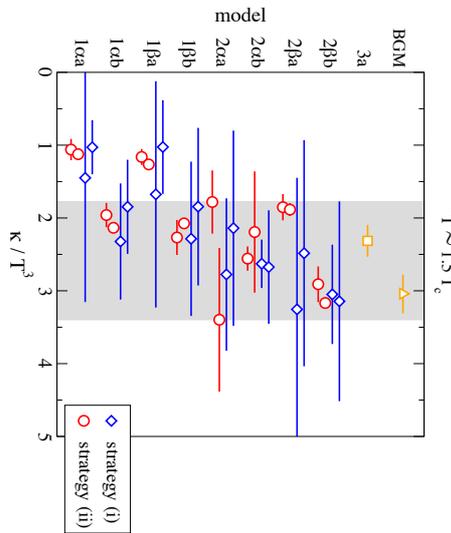


図 6: 様々なモデルに基づくスペクトル関数のフィットから得られた重クォーク運動量拡散係数の結果。灰色のバンドは最終結果を示す。

クォークoniumはチャームやボトムといった重クォークとその反クォークの束縛状態である。RHIC や LHC での相対論的重イオン衝突実験におけるクォークonium生成量の抑制は、クォーク・グルオン・プラズマ (QGP) 生成を示す重要なシグナルの一つであり、クォークoniumの高温媒質中での振る舞いを理論的に理解することは、実験結果を説明する上で非常に重要である。また、QGP の流体力学的な性質も注目されており、流体モデルに基づく実験結果の説明には、QGP 中での重クォーク輸送現象の理論的理解が必要不可欠である。

大野は、York 大の Anthony Francis 氏、Bielefeld 大の Olaf Kaczmarek 氏、Bern 大の Mikko Laine 氏及び Jülich 計算センターの Thomas Neuhaus 氏らと共に、最大 $192^3 \times 48$ という非常に大きな格子を用いて pure SU(3) の格子 QCD シミュレーションを行い、連続極限における色電荷相関関数を計算した。そして、この相関関数に対して様々なモデルに基づくフィットを行い、スペクトル関数を計算し、そのゼロ周波数近傍の振る舞いから重クォーク運動量拡散係数 (κ) を見積もった。その結果、相転移温度の約 1.5 倍の温度 (T) において、 $\kappa/T^3 = 1.8 - 3.4$ という値を得た (論文 15)。また、Heng-Tong Ding 氏、Olaf Kaczmarek 氏、Swagato Mukherjee 氏及び Hai-Tao Shu 氏らとの共同研究により、相関関数からスペクトル関数を計算する方法として、確率論的な手法を導入し、クォークoniumのスペクトル関数の計算に向けた様々な予備的計

算を行った (論文17)。今後は、より詳細な系統誤差の検証や既存の方法との比較等と共に、様々な温度におけるクォークoniumのスペクトル関数を計算し、クォークoniumの消失温度や重クォーク拡散係数の推定を行う。

(6) 3フレーバー・2+1フレーバー有限温度QCDにおける相構造 (藏増)

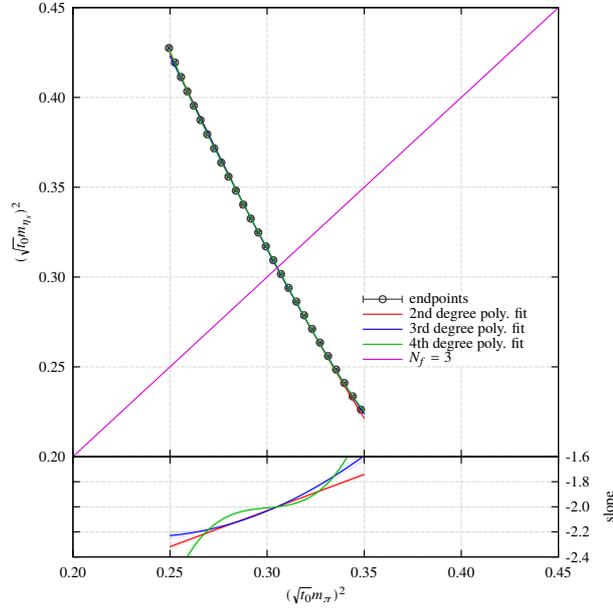


図 7: m_π^2 - m_η^2 平面における臨界終線。直線は SU(3) 対称点 ($m_\pi = m_\eta$) を表す。

温度 T とクォーク化学ポテンシャル μ 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 、 μ 、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 $\mu = 0$ (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。本研究は、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ものであり、QCD の相構造を理解する上での非常に重要な礎石となっている。

次のステップは 3 フレーバー QCD から 2+1 フレーバー QCD への拡張であるが、われわれはまず 3 フレーバー QCD の計算結果を用いた reweighting 法によって、3 フレーバー QCD の臨界終点近傍の臨界終線の振る舞いを調べた。ただし、今回は「時間方向」の格子サイズを $N_T = 6$ に固定している。図 7 は、 m_π^2 - m_η^2 平面における SU(3) 対称点近傍の臨界終線の振る舞いをプロットした

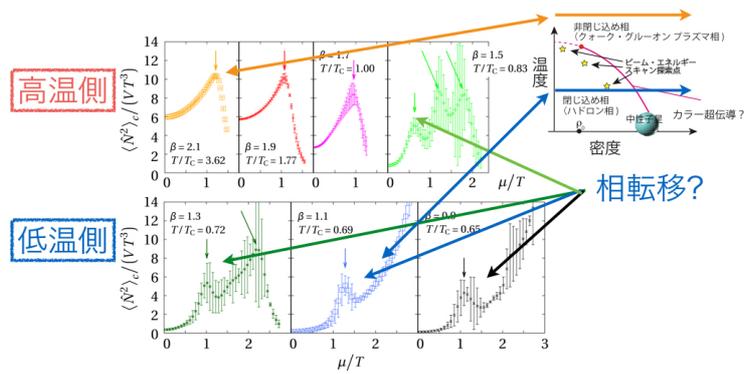


図 8: クォーク化学ポテンシャル μ/T の関数としてのクォーク数密度の 2 次キュムラント $\langle \hat{N}^2 \rangle_c / (VT^3)$. グラフは上から高温側: $\beta = 2.1$ (orange), 1.9 (red), 1.7 (magenta), 1.5 (green), 1.3 (dark green), 1.1 (blue), 0.9 (black): 低温側。

ものである。紫色の直線は SU(3) 対称な点を表しており、それを横切る臨界終線の傾きは理論的に -2 になるはずであるが、われわれの結果も良い精度でそれを再現している。

(7) 有限密度 QCD の研究

鈴木と谷口は阪大の中村純氏、立教大の岡将太郎氏らと共同で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、及びその派生としての符合問題と呼ばれる未解決の問題がある。この複素作用の問題を直接回避する方策として、カノニカル分配関数をフガシティー展開の係数として直接計算するカノニカル法と呼ばれる手法を採用した研究を行った。特に重いクォークに対して有効な hopping parameter 展開を採用することで、広い温度領域でカノニカル分配関数の計算を行った。

物理量としては、クォーク数密度とその高次のキュムラントの計算を主に行った。特にクォーク数の揺らぎに相当する 2 次のキュムラントには $T < T_c$ の低温側において相転移に特有なピーク構造が現れていることが見て取れる (図 8)。更に 2 次と 1 次のキュムラントの比 $\langle \hat{N}^2 \rangle_c / \langle \hat{N} \rangle$ について計算を行った (図 9)。これはハドロンレゾナンスガス模型及びクォークガス模型との比較が明確な量であるが、注目すべきポイントは、特に $T < T_c$ の低温側での振る舞いである。低密度側ではハドロン模型の予言とよく一致している一方で、密度を上げて行くに従って、ハドロン模型からはずれて、クォーク模型の予言に近づいていく様子が見て取れる。高温側では一貫してクォーク模型の予言とよく一致していることと比較するとこれは著しい違いである。これは、低温側で密度を上げて行くに従って、QCD 相図のクォークの閉じ込め - 非閉じ込め相転移の境界をまたいで行く現象と考えられる。最後に 2 次のキュムラントに現れたピークの位置から QCD の相図を類推したものが図 10 である。

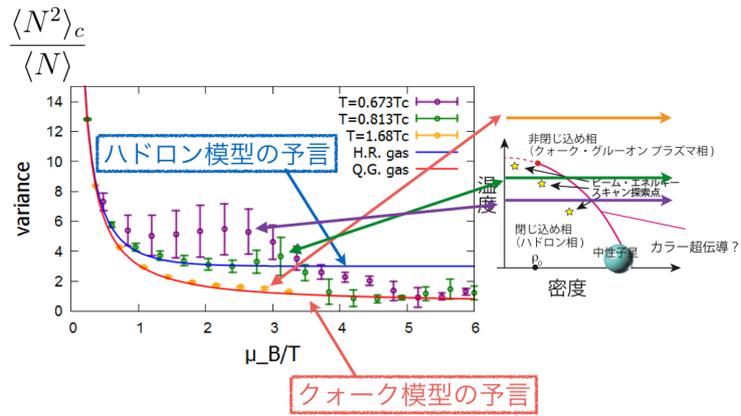


図 9: バリオン化学ポテンシャル μ_B/T の関数としてのクォーク数の 2 次キュムラントとクォーク数の比 $\langle \hat{N}^2 \rangle_c / \langle \hat{N} \rangle$. ハドロンレゾナンスガス模型 (青線) 及びクォークガス模型 (赤線) との比較を行っている。

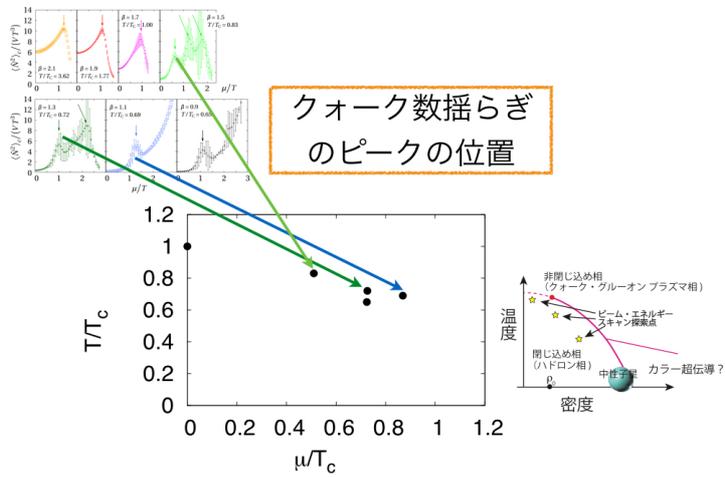


図 10: クォーク数揺らぎに現れるピークの位置から類推した QCD 相図。

(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 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。

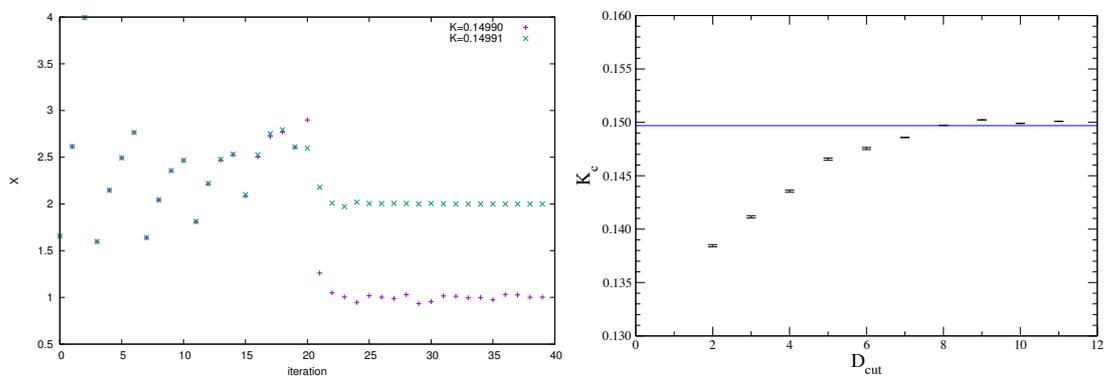


図 11: 1024^4 格子サイズにおける 4 次元イジングモデルの相転移温度の決定。左図: $D_{\text{cut}}=10$ におけるテンソルの固有値の縮重度による高温相 (縮重度 1) と低温相 (縮重度 2) の同定。右図: 転移温度の D_{cut} 依存性。青い横線はモンテカルロ法による計算結果を表す。

これまで、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、 θ 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。2015 年度において特に進展があった研究は、テンソル繰り込み群を用いた 4 次元イジングモデルの解析である。図 11 は、 1024^4 格子サイズにおける 4 次元イジングモデルの相転移温度計算を表している。まず、各 D_{cut} (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) において、テンソル固有値の縮重度を調べることによって相転移温度を決定する。左図では $D_{\text{cut}}=10$

の例をプロットしている。その後、相転移温度の D_{cut} 依存性において収束の様子を調べることによって、最終的な相転移温度を決定する（右図）。青い横線はモンテカルロ法の結果を表しているが、テンソル繰り込み群の結果も近い値に収束していることがわかる。ただし、従来のモンテカルロ計算における最大格子サイズは 80^4 であり、今回のわれわれの計算における 1024^4 格子サイズに比べて非常に小さい。テンソル繰り込み群における計算コストの体積依存性は対数的であり、この点もモンテカルロ法にくらべて圧倒的な優位性を持つ特徴の一つである。

(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、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。ただし、この計算は π 中間子質量 0.5 GeV 相当のクォーク質量を用いたものであり、物理点 (π 中間子質量 0.14 GeV に相当) よりもかなり重い。そのため、物理点へ向けたクォーク質量依存性を調べるために、広島大学 石川健一准教授を共同研究者に加え、 π 中間子質量 0.3 GeV 相当のクォーク質量での計算を遂行した。この研究成果は、本年度、学術論文に掲載された (論文 22, 23)。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での軽原子核束縛エネルギー計算を行なっている。 ^3He 原子核の束縛エネルギーに対応する有効エネルギー差の中間結果を図 12 に示す。物理点での計算では統計誤差を抑えることが非常に難しいため、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の計算を継続していく。

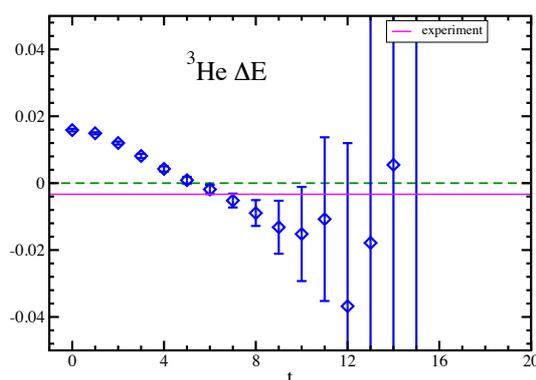


図 12: ^3He 原子核の有効エネルギー差。横軸は虚時間、実線は実験値。大きな虚時間領域で、有効エネルギー差が定数になれば、その値が束縛エネルギーに対応する。

(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なわれてきたが、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 (π 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 は電氣的核子形状因子の中間結果である。これまでの計算結果とは異なり、実験値に良く一致した結果が得られている。今後もこの計算を進め、磁氣的形状因子や軸性カレントに関する形状因子の研究を行なっていく予定である。

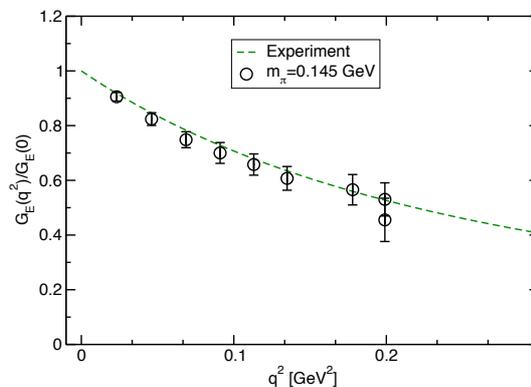


図 13: 電氣的核子形状因子。横軸は運動量移行、破線は実験値を表す

(11) 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。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、山脇幸一特別教授、青木保道准教授らと共に、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た。これまでの4(論文 24)、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(論文 25)。その可能性を確かめるため、様々なハドロン質量(論文 26)、S パラメータ(論文 27)、トポロジカルチャージに関係した物理量(論文 28, 29)を計算し、8 フレーバー理論の性質をより明確に理解するための研究を行った。

(12) コンフォーマル理論の数値的研究

素粒子標準模型を越える理論の候補であるウォーキングテクニカラー模型は、コンフォーマル対称性をもった理論をベースに構築されると考えられている。WMFQCD Collaboration (岩崎 (筑波・KEK)、石川 (広島)、中山 (Walter Burke Institute), 野秋, Cossu (KEK)、吉江) は、QCD 的な場の理論 (N_f 個の基本表現のフェルミオンが結合した SU(3) ゲージ理論) のコンフォーマル対称性に関する理論構造の解明を目的に研究を行っている。繰り込み群等に基づく理論的な考察と、それを検証する為の格子シミュレーションを研究手段としている。前年度までに、「有限の IR cutoff を持つコンフォーマル理論」という、新概念を提唱し、その理論の特徴を明らかにしてきた。つまり、

- ゲージ結合定数が IR fixed point (赤外固定点) を持つ理論を、有限の IR cutoff を持つ時空 (例えば、空間方向のサイズが有限な時空) 上で定式化すると、IR cutoff が無い理論ではフェルミオン質量 m_f がゼロでのみ実現する conformal 対称性が、有限の m_f へ広がり、「閉じ込め相」とも「非閉じ込め相」とも異なる「conformal 領域」が存在すること、
- 「conformal 領域」での meson 伝搬関数 $G(t)$ (空間運動量 $\vec{p} = 0$) は、変形湯川型

$$G(t) \sim C \exp(-mt)/t^\alpha$$

となる (閉じ込め相では指数関数型 $G(t) \sim C \exp(-mt)$) こと、

- conformal 領域の真空は、空間方向の Polyakov Loop が非自明な Z(3) 位相をもつ "twisted Z(3) vacuum" であること

を理論的・数値的に示した。(後 2 者は、conformal 領域の特徴。) QCD 的理論の理論構造としては、

- $N_f = 7, 8, 12, 16$ の系でコンフォーマル領域が存在することから、QCD 的理論 (ゼロ温度) の conformal window は $N_f = 7 - 16$ であること、
- $N_f = 2$ の有限温度 QCD においても、高温相に conformal 領域が存在すること

などを明らかにした。

本年度は、ゼロ温度の QCD 的理論に対して、IR fixed point を同定する新手法を提案し、 $N_f = 7, 8, 12, 16$ の格子シミュレーションで実際に IR fixed point を求めた (論文 30)。新手法は、繰り込み群に基づく。サイズ (IR cutoff) の異なる時空上の meson 伝搬関数に関する繰り込み群方程式から出発し、伝搬関数 (から定義される有効質量 $m(t)$) のスケーリング則が導かれる。つまり、 $m(t)$ は、時間 t (と有効質量自身) をサイズでスケールすると、IR fixed point 上 ($m_f = 0$) では、サイズに依存しないユニバーサルな関数となる。この手法の検証のため、 $N_f = 7, 8, 12, 16$ の理論に対して、Iwasaki ゲージ作用と Wilson フェルミオン作用を用いた格子シミュレーションを 3 つの格子サイズ $8^3 \times 32$, $12^3 \times 48$, $16^3 \times 64$ で、結合定数を変えながら行い、「特定の結合定数の時 (の

み)、スケールした meson 有効質量がサイズによらない」ことを示した。つまり、IR fixed point を同定できた。伝搬関数のスケーリング則から、異常質量次元を求める事ができるが、数値的に意味のある結果を得るには、より大きなサイズの計算が必要であり、今後の課題である。

$N_f = 2$ 高温相のコンフォーマルの性質の解明についても進展があった(論文 32)。昨年度までは、時間方向(温度方向)のサイズ L_t が空間方向のサイズ L_s より大きい系に対して、conformal 領域の存在を示してきたが、正しい有限温度系である $L_t < L_s$ の系に対しても conformal 領域が存在する事を示した。具体的には、Polyakov loop と meson 有効質量を測定し、 $m_f = 0$ で、Z(3) twisted state が実現している事を示した。

今年度は、さらに domain wall quark を用いたシミュレーションによるコンフォーマル理論の研究も推進し、中間結果を、国際会議で報告した(論文[?])。domain wall quark では、質量のチューニングが不要であり、カイラル対称性の破れ/回復の直接検証が可能である点で、Wilson quark の計算より優位である。計算はゼロ温度 $N_f = 8$ で行い、Wilson quark に対して行ってきた前述の解析を行うとともに、ディラックスペクトル密度の解析から異常質量次元を見積もる試みも行っている。

(13) 格子 QCD によるバリオン間相互作用の研究 (HAL QCD Collaboration)

陽子および中性子(核子)を結びつけ、原子核を構成している力(核力)は、現象論的には中間子交換によって生じると考えられているが、その起源をより基本的なクォーク・グルーオンの自由度に基づいて理解すること、とりわけ短距離核力における斥力芯の発現機構を理論的に導くことは、素粒子原子核物理に残された大問題の1つである。根村、佐々木は、京都大学基礎物理学研究所青木教授、理化学研究所初田主任研究員らと HAL QCD Collaboration を結成し、2核子間の波動関数から核子間のポテンシャルを導き出すという方法を応用して、様々な粒子間のポテンシャルを格子 QCD の数値シミュレーションで計算してきた。論文 34 では、PACS-CS によって生成されたゲージ配位のうち、格子間隔 $a = 0.09$ fm、空間体積 $L^3 = (2.9\text{fm})^3$ 、 $m_\pi \approx 700$ MeV、 $m_\Omega \approx 1970$ MeV のものを用いて 1S_0 チャネルの $\Omega\Omega$ ポテンシャルの計算を行った。論文 35 では、CP-PACS/JLQCD によって生成されたゲージ配位を用いて、空間体積 $L^3 = (1.93\text{fm})^3$ におけるフレーバ $SU(3)$ 対称性が破れたクォーク質量 ($m_\pi/m_K = 0.96, 0.90, 0.86$) でのストレンジネス $S = -2$ セクターの結合チャネルバリオン間ポテンシャルの計算を行った。以下では、格子 QCD による物理点でのバリオン間相互作用の決定に関連して行われた 2015 年度の研究成果を紹介する。

格子 QCD による物理点でのバリオン間相互作用の決定

格子 QCD による物理点でのバリオン間相互作用の決定は、京速計算機などの大規模な計算機資源を活用して計算が行われた。この研究課題には、ストレンジネスを持たない核力ポテンシャルと、ストレンジネスを持ったハイペロンポテンシャルの両方が含まれる。核力については、これまでに豊富な実験データ

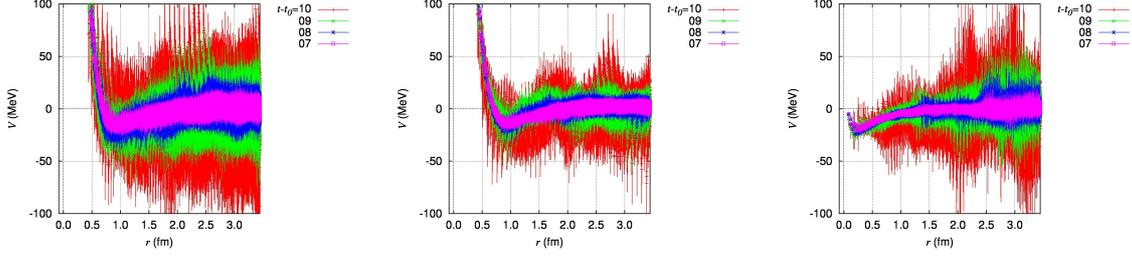


図 14: 体積 $(96a)^4 \approx (8.2\text{fm})^4$ 、格子間隔 $a \approx 0.085\text{fm}$ 、 $(m_\pi, m_K) \approx (146, 525)\text{MeV}$ に対応するほぼ物理点上で計算された、 $\Lambda N - \Lambda N$ 対角成分のポテンシャルを示す。色の違いは格子上で測定された虚時間の違いを示している。左: 1S_0 チャネルにおける中心力ポテンシャル。中央: 3S_1 - 3D_1 チャネルにおける中心力ポテンシャル。右: 3S_1 - 3D_1 チャネルにおけるテンソル力ポテンシャル。

に基づいて現象論的には精密に調べられているため、この研究課題で用いる方法によって、これまでの核力ポテンシャルに対する理解と矛盾しない結果が得られることを検証するという側面がある。いっぽう、ハイペロンポテンシャルについては、実験データが限られている、もしくはほとんど実験からの情報が無いため、この研究課題で得られる結果は、従来の現象論的なモデルとは異なり、パラメータフリーの予言を与えるという重要な成果が期待される。従って、貴重な計算機資源をできるだけ有効活用するために、2+1 フレーバの格子 QCD 計算で引き出すことのできるアイソスピン対称性を持った八重項バリオン間相互作用の情報をすべて求められるように、以下に示す 52 チャネルの 4 点相関関数を一度の計算ジョブで同時に計算するようにプログラムを準備した上で計算を開始している。

$$\begin{aligned}
& \langle p\bar{n}p\bar{n} \rangle, \\
& \langle p\Lambda p\bar{\Lambda} \rangle, \quad \langle p\Lambda\bar{\Sigma}^+n \rangle, \quad \langle p\Lambda\bar{\Sigma}^0p \rangle, \\
& \langle \Sigma^+n\bar{p}\bar{\Lambda} \rangle, \quad \langle \Sigma^+n\bar{\Sigma}^+n \rangle, \quad \langle \Sigma^+n\bar{\Sigma}^0p \rangle, \\
& \langle \Sigma^0p\bar{p}\bar{\Lambda} \rangle, \quad \langle \Sigma^0p\bar{\Sigma}^+n \rangle, \quad \langle \Sigma^0p\bar{\Sigma}^0p \rangle, \\
& \langle \Lambda\Lambda\bar{\Lambda}\bar{\Lambda} \rangle, \quad \langle \Lambda\Lambda\bar{p}\bar{\Xi}^- \rangle, \quad \langle \Lambda\Lambda\bar{n}\bar{\Xi}^0 \rangle, \quad \langle \Lambda\Lambda\bar{\Sigma}^+\bar{\Sigma}^- \rangle, \quad \langle \Lambda\Lambda\bar{\Sigma}^0\bar{\Sigma}^0 \rangle, \\
& \langle p\bar{\Xi}^-\bar{\Lambda}\bar{\Lambda} \rangle, \quad \langle p\bar{\Xi}^-p\bar{\Xi}^- \rangle, \quad \langle p\bar{\Xi}^-n\bar{\Xi}^0 \rangle, \quad \langle p\bar{\Xi}^-\bar{\Sigma}^+\bar{\Sigma}^- \rangle, \quad \langle p\bar{\Xi}^-\bar{\Sigma}^0\bar{\Sigma}^0 \rangle, \quad \langle p\bar{\Xi}^-\bar{\Sigma}^0\bar{\Lambda} \rangle, \\
& \langle n\bar{\Xi}^0\bar{\Lambda}\bar{\Lambda} \rangle, \quad \langle n\bar{\Xi}^0p\bar{\Xi}^- \rangle, \quad \langle n\bar{\Xi}^0n\bar{\Xi}^0 \rangle, \quad \langle n\bar{\Xi}^0\bar{\Sigma}^+\bar{\Sigma}^- \rangle, \quad \langle n\bar{\Xi}^0\bar{\Sigma}^0\bar{\Sigma}^0 \rangle, \quad \langle n\bar{\Xi}^0\bar{\Sigma}^0\bar{\Lambda} \rangle, \\
& \langle \Sigma^+\bar{\Sigma}^-\bar{\Lambda}\bar{\Lambda} \rangle, \quad \langle \Sigma^+\bar{\Sigma}^-p\bar{\Xi}^- \rangle, \quad \langle \Sigma^+\bar{\Sigma}^-n\bar{\Xi}^0 \rangle, \quad \langle \Sigma^+\bar{\Sigma}^-\bar{\Sigma}^+\bar{\Sigma}^- \rangle, \quad \langle \Sigma^+\bar{\Sigma}^-\bar{\Sigma}^0\bar{\Sigma}^0 \rangle, \quad \langle \Sigma^+\bar{\Sigma}^-\bar{\Sigma}^0\bar{\Lambda} \rangle, \\
& \langle \Sigma^0\bar{\Sigma}^0\bar{\Lambda}\bar{\Lambda} \rangle, \quad \langle \Sigma^0\bar{\Sigma}^0p\bar{\Xi}^- \rangle, \quad \langle \Sigma^0\bar{\Sigma}^0n\bar{\Xi}^0 \rangle, \quad \langle \Sigma^0\bar{\Sigma}^0\bar{\Sigma}^+\bar{\Sigma}^- \rangle, \quad \langle \Sigma^0\bar{\Sigma}^0\bar{\Sigma}^0\bar{\Sigma}^0 \rangle, \\
& \quad \langle \Sigma^0\bar{\Lambda}p\bar{\Xi}^- \rangle, \quad \langle \Sigma^0\bar{\Lambda}n\bar{\Xi}^0 \rangle, \quad \langle \Sigma^0\bar{\Lambda}\bar{\Sigma}^+\bar{\Sigma}^- \rangle, \quad \langle \Sigma^0\bar{\Lambda}\bar{\Sigma}^0\bar{\Lambda} \rangle, \\
& \langle \Xi^-\bar{\Lambda}\bar{\Xi}^-\bar{\Lambda} \rangle, \quad \langle \Xi^-\bar{\Lambda}\bar{\Sigma}^-\bar{\Xi}^0 \rangle, \quad \langle \Xi^-\bar{\Lambda}\bar{\Sigma}^0\bar{\Xi}^- \rangle, \\
& \langle \Sigma^-\bar{\Xi}^0\bar{\Xi}^-\bar{\Lambda} \rangle, \quad \langle \Sigma^-\bar{\Xi}^0\bar{\Sigma}^-\bar{\Xi}^0 \rangle, \quad \langle \Sigma^-\bar{\Xi}^0\bar{\Sigma}^0\bar{\Xi}^- \rangle, \\
& \langle \Sigma^0\bar{\Xi}^-\bar{\Xi}^-\bar{\Lambda} \rangle, \quad \langle \Sigma^0\bar{\Xi}^-\bar{\Sigma}^-\bar{\Xi}^0 \rangle, \quad \langle \Sigma^0\bar{\Xi}^-\bar{\Sigma}^0\bar{\Xi}^- \rangle, \\
& \langle \Xi^-\bar{\Xi}^0\bar{\Xi}^-\bar{\Xi}^0 \rangle,
\end{aligned}$$

2015 年度中では、上記八重項に加えて、強い相互作用による崩壊チャンネルの開かない (従って現在の方法で安全にポテンシャルを求められる) $\Omega\Omega$ チャンネルも加えた大規模計算がすすめられた。データが膨大であるため解析もまだ進行中であるが、予備的な結果の一例として、 ΛN の中心力及びテンソル力ポテンシャルを図 14 に示す。

(14) 格子 QCD 研究用データグリッド JLDG/ILDG の運用

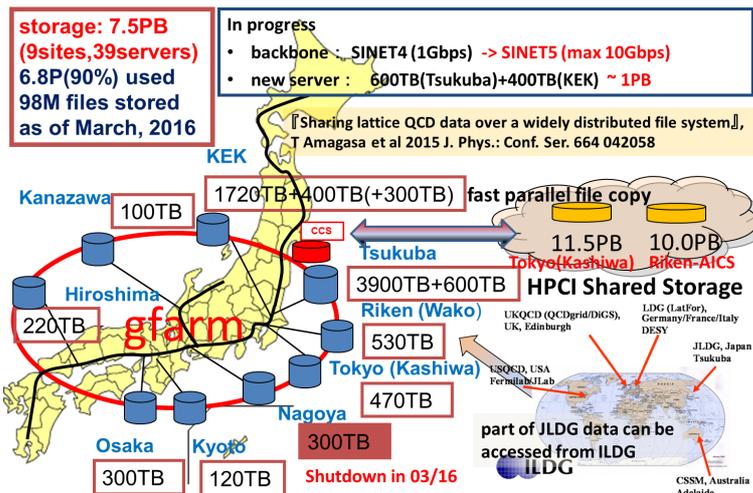
JLDG (Japan Lattice Data Grid) は、国内の計算素粒子物理研究グループが日々の研究データを管理・共有する為のデータグリッドである。主システムは、国内の主要な格子 QCD 研究拠点 9 箇所に設置したファイルサーバを国立情報学研究所が提供する SINET VPN で接続し、グリッドファイルシステムソフトウェア Gfarm で束ねたファイルシステムである。どの拠点からアクセスしても同一のファイルシステムが見えるので、「ある拠点のスパコンで生成したデータ (格子 QCD 配位など) を JLDG に投入・蓄積し、別拠点で読み出して、その拠点のスパコンで再解析 (物理量の計算) 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 (図 参照)。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 年から運用している。JLDG は、一昨年度まではシステムの改良や新機能の実装をおこなって、その利便性が向上してきたが、昨年度からは、システムの増強・安定運用に主眼が移ってきている。また、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 JLDG を使用している。この事から、JLDG が実用システムとして、一定の完成の域に達したと判断し、この段階でのシステムとその運用についての記録と国内外への広報の目的で、国際会議 CHEP2015 にて JLDG の総合報告をおこなった (論文 33)。

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 28 サーバ 5.0PB から 39 サーバ 7.5PB へ
- 管理機器更新 (JLDG 2 件、ILDG 2 件)
- Gfarm 更新 (4 回)
- SINET5 への移行対応: 一部拠点で 1Gbps から 10Gbps へ増速
- ファイルサーバの個別障害対応

ILDG は、世界 5 地域に構築された Lattice QCD 用のデータグリッドを、Lattice QCD の基礎データ (配位) の共有を目的として、相互運用を可能にする Grid of Grids である。JLDG は ILDG の日本地域グリッドである。また、日本から



は、ILDG の board member として藏増が、Metadata working group member として吉江が参加している。また、もうひとつの Middleware working group には 天笠（システム情報）がメンバーとして参加するとともに、吉江もオペレータとして参加しユーザーサイドからの提言等をおこなっている。ILDG は、2007 年の運用開始依頼、細かな改良はあるものの、主要部分は安定した運用を続けている。

ILDG には、運用開始当初から「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できれば、それを用いて、その配位データの有用性を測る資料となりうるし、ひいては、データ共有の為の ILDG の有用性を示す資料ともなりうる。この事は、格子 QCD 配位データに限った問題ではなく、多くの研究分野が、データの引用・被引用関係を把握するニーズを持っている。このような背景の下で、学术论文の出版界で広く用いられている『DOI(DigitalObjectIdentifier) 登録』の仕組みを研究データにも用いる試みが始まっている。ILDG でも、『格子 QCD アンサンブルへの DOI 登録』を行い、High Energy Physics 分野の最大の情報システムである INSPIRE-HEP を用いて、アンサンブルの引用・被引用関係を把握できる仕組みを構築する提案がなされ、2015 年 4 月の ILDG workshop で、各地域グリッドで検討する事となった。

この合意を受け、日本では、天笠、松古 (KEK)、吉江が中心となって、DOI 登録の体制面の検討 (DOI 登録機関との協議、関係機関との協議と DOI 登録実施体制とフローの検討) をおこなうとともに、DOI 登録に必要な実作業 (Metadata と landing page の ILDG ensemble/configuration metadata からの半自動生成) の試行に着手した。

(15) 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 (論文 37, 38)。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、一般化フェルミオンの追加、FFT 対応、XML 形式の導入などを行った。これらの変更を含めた Bridge++ ver.1.3.0 へのメジャーアップデートが 2015 年 10 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.1.3.2 である。なお、共通コードを使用した研究論文が、今年度新たに 9 本追加された。通算 13 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) 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た。相互作用をサイン関数の 2 乗にとった場合と定数の場合は、ある共形変換で結びついていることを示し、この共形変換から基底状態等の性質が理解できることを示した (論文 39)。また、この理論に現れる演算子・状態の性質を調べた (論文 40)。

(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、対応する強結合散乱振幅を解析的に評価する我々の定式化が完結した (論文 41)。

(3) 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。しかし、この行列幾何の性質はこれまで深く理解されていなかった。伊敷はこの幾何の構造を理解する手法として、量子力学のコヒーレント状態を用いた新たな方法を提案した（論文 42）。この方法により離散的な行列幾何から、計量や曲率といった弦や D ブレーンの微分幾何学的な情報を得ることが出来るようになった。また伊敷と村木は大学院生の松本とともに、この方法を用いて行列幾何の構造を調べた（論文 43）。その結果、特定の行列幾何はケーラー構造と呼ばれる非常に良い性質の構造を持つことが示された。また、このケーラー構造と行列の配位を直接結びつける関係式が得られた。

(4) 弦の場の理論の次元正則化とループ振幅

弦の理論は散乱振幅が摂動論を用いて有限に計算できることが知られているが、発散は相殺するのであり、最初からないわけではない。従って、点粒子の場の理論と同様に、うまい正則化の方法を考えることは重要である。特に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ると示している。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 44）。

(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描像を超え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/monodifold) 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（立命館大学）と共に、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、共形対称性を保つ共形場理論の界面 (共形界面/conformal interface) を用いて非幾何学的背景時空中の弦に対する新しいタイプのモジュラー不変な分配関数を構成した（論文 45）。また、このような構成を拡張し、T-fold タイプの非幾何学的背景中の弦理論では、時空の超対称性が破れているにも拘らず 1 ループでの宇宙項が消える、現象論的に興味深いモデルが容易に構成できることを示した（論文 46）。

(6) ゲージ/重力対応の数値的検証

伊敷は京大基研の花田正範准教授、茨城大学の百武慶文准教授、KEKの西村淳准教授らとともに、ゲージ/重力対応の数値的検証を行った（論文 47）。伊敷らは超弦理論との等価性が予想される 1 次元のゲージ理論の数値計算を行い、内部エネルギー等の熱力学量を求め、得られた結果を超弦理論のものと比較した。その結果、ゲージ/重力対応が確かに成立しているという強い証拠を得ることが出来た。この研究では、ゲージ群のランクが比較的大きい場合と小

さい場合の両方が調べられた。ランクが大きい場合の計算はすでに他の先行研究でも行われていたが、伊敷らはその結果をさらに精密化した。一方、ランクが小さい場合の先行研究はこれまでに行われておらず、この研究によってはじめて対応が検証された。

(7) 一般化幾何学の研究

超重力理論の NSNS 部分は、時空の計量、Kalb-Ramond 場とディラトン場からなる。一般化幾何学は、これらの場に幾何学的理解を与える。すなわち、接束と余接束からなる直和束の上に、時空の計量と Kalb-Ramond 場の幾何学的な記述を実現している。弦理論では、これらの場の適当な配位を背景として、その中での弦の運動を考察する。異なる背景同士で弦の運動が非自明に等価になる関係として、T 双対性が知られている。時空の計量と Kalb-Ramond 場を同等に扱う一般化幾何学は、この T 双対性を含めて幾何学的に記述すると期待される。形式的に T 双対性変換を施すと、これまで考えられてこなかったような場の配位が得られる。特に興味深いのは、既存の幾何学では捉えきれない「非幾何学的」な場の配位が出現するという議論である。一般化幾何学は T 双対性を含めて背景場の幾何学的記述を与えることから、これを用いて非幾何学的な背景を「幾何学的」に理解しようという議論がなされている。

村木は一般化幾何学において接束と余接束の役割を入れ替えた変種を導入し、非幾何学的背景の理解を探求した。特に一般化幾何学の変種に基づく重力を構築し、非幾何学的背景と重力場との結合を明らかにした (論文 48)。

(8) 弦をプローブとしたエキゾチックブレーンの背景時空の研究

エキゾチックブレーンは低次元時空の超弦理論に登場する特殊なブレーンである。背景時空は一般座標変換だけでは捉えられず、超弦理論の双対性の構造が含まれる。この様なブレーンや背景時空は、超弦理論のコンパクト化とそこから得られる素粒子物理を包括的に理解するために重要である。エキゾチックブレーンの一例である 5_2^2 ブレーンは NS5 ブレーンに対して 2 回 T 双対変換することで登場する。木村は、2013 年に 5_2^2 ブレーン背景時空を 2 次元超場形式を用いたゲージ理論を用いた定式化を成功させていた。2 次元超場形式では T 双対変換に対応する Legendre 変換を正しく実行するために可約な超場を導入していたが、可約であるため多くの余分な成分場が登場する。そのため、超対称ゲージ変換によって物理的自由度だけが生き残る正しいゲージ固定条件を発見した (論文 49)。このゲージ固定は、局所化定理を用いた 2 次元超対称ゲージ理論の経路積分を評価する際に重要である。

〈論文〉

1. Takeshi Yamazaki, Ken-ichi Ishikawa, Yoshinobu Kuramashi, Akira Ukawa, Study of quark mass dependence of binding energy for light nuclei in 2+1 flavor lattice QCD, Phys. Rev. D92 (2015) ref. 014501.

2. X.-Y. Jin, Y. Kuramashi, N. Nakamura, S. Takeda, and A. Ukawa, Curvature of the critical line on the plane of quark chemical potential and pseudoscalar meson mass for three-flavor QCD, Phys. Rev. D92 (2015) ref. 114511.
3. S. Takeda, X.-Y. Jin, Y. Kuramashi, N. Nakamura, and A. Ukawa, Phase structure of $N_f = 3$ QCD at finite temperature and density by Wilson-Clover fermions, Proceeding of Science (LATTICE 2015) 145.
4. N. Nakamura, X.-Y. Jin, Y. Kuramashi, S. Takeda, and A. Ukawa, Towards the continuum limit of the critical endline of finite temperature QCD, Proceeding of Science (LATTICE 2015) 160.
5. H. Suno, Y. Nakamura, K.-I. Ishikawa, Y. Kuramashi, Y. Futamura, A. Imakura, and T. Sakurai, Eigenspectrum Calculation of the Non-Hermitian $O(a)$ -Improved Wilson-Dirac Operator using the Sakurai-Sugiura Method, Proceeding of Science (LATTICE 2015) 026.
6. Hirokazu Kobayashi, Yoshifumi Nakamura, Shinji Takeda, and Yoshinobu Kuramashi, Optimization of Lattice QCD with CG and Multi-Shift CG on Intel Xeon Phi Coprocessor, Proceeding of Science (LATTICE 2015) 029.
7. PACS Collaboration: K.-I. Ishikawa, N. Ishizuka, Y. Kuramashi, Y. Nakamura, Y. Namekawa, Y. Taniguchi, N. Ukita, T. Yamazaki, T. Yoshié, Mass and Axial Current Renormalization in the Schrödinger Functional Scheme for the RG-Improved Gauge and the Stout Smearred $O(a)$ -Improved Wilson Quark Actions, Proceeding of Science (LATTICE 2015) 271.
8. PACS Collaboration: K.-I. Ishikawa, N. Ishizuka, Y. Kuramashi, Y. Nakamura, Y. Namekawa, Y. Taniguchi, N. Ukita, T. Yamazaki, T. Yoshié, 2+1 Flavor QCD Simulation on a 96^4 Lattice, Proceeding of Science (LATTICE 2015) 075.
9. N. Ishizuka, K.-I. Ishikawa, A. Ukawa, T. Yoshie, Calculation of $K \rightarrow \pi\pi$ decay amplitudes with improved Wilson fermion action in lattice QCD, Phys. Rev. D92 (2015) 074503.
10. Ryo Iwami, S. Ejiri, K. Kanaya, Y. Nakagawa, T. Umeda, D. Yamamoto (WHOT-QCD Collaboration), Multipoint reweighting method and beta functions for the calculation of QCD equation of state, PoS (LATTICE 2014) (2015) 222.
11. R. Iwami, S. Ejiri, K. Kanaya, Y. Nakagawa, D. Yamamoto, and T. Umeda, Multipoint reweighting method and its applications to lattice QCD, Phys. Rev. D 92, No.9 (2015) ref.094507, pp.1-11.

12. T. Umeda, S. Ejiri, R. Iwami, K. Kanaya, Towards the QCD equation of state at the physical point using Wilson fermion, PoS (LATTICE 2015) (2016), to be published.
13. A. Francis, O. Kaczmarek, M. Laine, T. Neuhaus and H. Ohno, Critical point and scale setting in SU(3) plasma: An update, Phys. Rev. D 91, no. 9, 096002 (2015).
14. H.-T. Ding, S. Mukherjee, H. Ohno, P. Petreczky and H.-P. Schadler, Diagonal and off-diagonal quark number susceptibilities at high temperatures, Phys. Rev. D 92, no. 7, 074043 (2015).
15. A. Francis, O. Kaczmarek, M. Laine, T. Neuhaus and H. Ohno, Nonperturbative estimate of the heavy quark momentum diffusion coefficient, Phys. Rev. D 92, no. 11, 116003 (2015).
16. A. Bazavov, H.-T. Ding, P. Hegde, O. Kaczmarek, F. Karsch, E. Laermann, Swagato Mukherjee, H. Ohno, P. Petreczky, C. Schmidt, S. Sharma, W. Soeldner, and M. Wagner, Curvature of the freeze-out line in heavy ion collisions, Phys. Rev. D 93, 014512 (2016).
17. H. Ohno, H.-T. Ding, S. Mukherjee, O. Kaczmarek and H.-T. Shu, Charmonia and bottomonia at finite temperature on large quenched lattice, Proceeding of Science (Lattice 2015) ref. 175.
18. A. Nakamura, S. Oka, 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, A. Suzuki 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, Study of quark mass dependence of binding energy for light nuclei in 2+1 flavor lattice QCD, Physical Review D92 (2015) no.1, 014501.

23. Takeshi Yamazaki for PACS Collaboration, Light Nuclei and Nucleon Form Factors in Nf=2+1 Lattice QCD, Proceedings of Science(LATTICE 2015) 081, arXiv:1511.09179.
24. 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), SU(3) gauge theory with four degenerate fundamental fermions on the lattice, arXiv:1512.00957.
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), Walking and conformal dynamics in many-flavor QCD, arXiv:1601.02287.
26. 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), Lattice study of the scalar and baryon spectra in many-flavor QCD, arXiv:1510.07373.
27. 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), S-parameter and vector decay constant in QCD with eight fundamental fermions, arXiv:1602.00796.
28. 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), Topological insights in many-flavor QCD on the lattice, arXiv:1510.05863.
29. 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), Topological observables in many-flavour QCD, arXiv:1601.04687.
30. K.-I. Ishikawa, Y. Iwasaki, Yu Nakayama, T.Yoshie, IR fixed points in $SU(3)$ gauge Theories, Phys. Lett. B748 (2015) 289-294.
31. J. Noaki, G. Cossu, K-I. Ishikawa, Y. Iwasaki, T. Yoshie, Study of the conformal region of the SU(3) gauge theory with domain-wall fermions, arXiv:1511.06474 [hep-lat], in Proceedings of (Lattice 2015) in press.

32. K. -I. Ishikawa, Y. Iwasaki, Yu Nakayama, T. Yoshie, Conformal Properties in High Temperature QCD, arXiv:1511.03411 [hep-lat].
33. T. Amagasa, S. Aoki, Y. Aoki, T. Aoyama, T. Doi, K. Fukumura, N. Ishii, K.-I. Ishikawa, H. Jitsumoto, H. Kamano, Y. Konno, H. Matsufuru, Y. Mikami, K. Miura, M. Sato, S. Takeda, O. Tatebe, H. Togawa, A. Ukawa, N. Ukita, Y. Watanabe, T. Yamazaki, T. Yoshie, Sharing lattice QCD data over a widely distributed file system J. Phys.: Conf. Ser. 664 (2015) 4, 042058 (CHEP2015).
34. M. Yamada, K. Sasaki, S. Aoki, T. Doi, T. Hatsuda, Y. Ikeda, T. Inoue, N. Ishii, K. Murano and H. Nemura, for HAL QCD Collaboration, $\Omega\Omega$ interaction from 2+1 flavor lattice QCD, PTEP 2015, no. 7, 071B01 (2015).
35. K. Sasaki, S. Aoki, T. Doi, T. Hatsuda, Y. Ikeda, T. Inoue, N. Ishii and K. Murano, for HAL QCD Collaboration, Coupled-channel approach to strangeness $S = -2$ baryon-bayron interactions in lattice QCD, PTEP 2015, no. 11, 113B01 (2015).
36. S. Aoki, Hadron Interactions from lattice QCD EPJ Web Conf. 113 (2016) 01009, arXiv:1603.00989[hep-lat].
37. H. Matsufuru, S. Aoki, T. Aoyama, K. Kanaya, S. Motoki, Y. Namekawa, H. Nemura, Y. Taniguchi, S. Ueda, N. Ukita, OpenCL vs OpenACC: Lessons from Development of Lattice QCD Simulation Code, Procedia Computer Science Volume 51 (2015) 1313.
38. S. Motoki, S. Aoki, T. Aoyama, K. Kanaya, H. Matsufuru, Y. Namekawa, H. Nemura, Y. Taniguchi, S. Ueda, N. Ukita, Lattice QCD code Bridge++ on arithmetic accelerators, Proceeding of Science (Lattice 2015) 040.
39. N. Ishibashi and T. Tada, Infinite circumference limit of conformal field theory, Journal of Physics A48 (2015) no.31, 315402.
40. N. Ishibashi and T. Tada, Dipolar quantization and the infinite circumference limit of two-dimensional conformal field theories, arXiv:1602.01190 [hep-th], UTHEP-681.
41. 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, arXiv:1512.04673 [hep-th].
42. G. Ishiki, Matrix Geometry and Coherent States, Phys. Rev. D 92, no. 4, (2015) ref. 046009.
43. G. Ishiki, T. Matsumoto and H. Muraki, Kähler structure in the commutative limit of matrix geometry, arXiv:1603.09146 [hep-th], UTHEP-685.

44. N. Ishibashi and K. Murakami, Worldsheet theory of light-cone gauge non-critical strings on higher genus Riemann surfaces, arXiv:1603.08337 [hep-th], UTHEP-683.
45. Yuji Satoh and Yuji Sugawara, Non-geometric backgrounds based on topological interfaces, JHEP **1507** (2015) 022.
46. Yuji Satoh, Yuji Sugawara and Taiki Wada, Non-supersymmetric asymmetric orbifolds with vanishing cosmological constant, JHEP **1602** (2016) 184.
47. 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 , arXiv:1603.00538 [hep-th], UTHEP-682.
48. T. Asakawa, H. Muraki, S. Watamura Gravity theory on Poisson manifold with R -flux, Fortschritte der Physik 63 (2015) 683-704.
49. Tetsuji Kimura, Gauge-fixing Condition on Prepotential of Chiral Multiplet for Nongeometric Backgrounds, Prog. Theor. Exp. Phys. (2016) no.2, 023B04.

〈著書・総説等〉

1. 花田 正範, 百武 慶文, 伊敷 吾郎, 西村 淳, 「量子ブラックホールのホログラム的記述の数値的検証」, Science 「サイエンス誌に載った日本人研究者」 (2015), p46.
2. 伊敷 吾郎, 西村 淳, 花田 正範, 百武 慶文, 「ブラックホールに対するホログラフィック原理の数値的検証」, 日本物理学会誌 70 巻, 6 号 (2015), p436 .

〈学位論文〉

[修士論文]

1. 賀数 淳平
「 $N_f = 2 + 1$ 格子 QCD による微小な運動量移行での π 中間子形状因子計算へ向けた基礎研究」
2. 三崎 博道
「高階微分項を含む重力理論における因果律の破れ」
3. 深山 陽平
「メンブレンの幾何と行列模型」

〈非常勤講師・集中講義〉

1. 伊敷吾郎, 「超弦理論と行列正則化」, Advanced Summer School on Lattice Gauge Theories, 筑波大学計算機センター, 2015年8月26日-28日.
2. 木村哲士「微分積分II」、東京工科大学コンピュータサイエンス学部、2015年4月-9月.
3. 木村哲士「素粒子や時空とは?」(夏期特別講座)、千代田区立九段中等教育学校、2015年8月20日.

〈研究成果発表 (講演)〉

[国際会議]

1. T. Umeda, S. Ejiri, R. Iwami, K. Kanaya 「Towards the QCD equation of state at the physical point using Wilson fermion」, The XXXIII International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2015) (Kobe Convention Center, Kobe, Japan, 7.14-18, 2015).
2. E. Itou, H. Suzuki, Y. Taniguchi, T. Umeda 「(2+1)-flavor QCD Thermodynamics from the Gradient Flow」, The XXXIII International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2015) (Kobe Convention Center, Kobe, Japan, 7.14-18, 2015).
3. Y. Taniguchi 「QCD energy momentum tensor at finite temperature using gradient flow」, RBRC Workshop on Lattice Gauge Theories 2016 (BNL, NY, USA, 3.9-11, 2016).
4. Yoshinobu Kuramashi, 「Tensor Network Scheme for Lattice Gauge Theories」(招待講演), XXVII IUPAP Conference on Computational Physics (CCP2015), (Indian Institute of Technology Guwahati,, Assam, India, December 2-5, 2015).
5. Hiroshi Ohno, 「Charmonia and bottomonia at finite temperature on large quenched lattice」, The 33rd International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2015) (Kobe International Conference Center, Kobe, Japan, Jul. 14-18, 2015).
6. Hiroshi Ohno, 「Charmonium and bottomonium spectral functions from lattice QCD at finite temperature」, The XXV International Conference on Ultrarelativistic Nucleus-Nucleus Collisions (Quark Matter 2015) (Kobe Fashion Mart, Kobe, Japan, Sept. 27-Oct. 3, 2015).
7. Hiroshi Ohno, 「Charmonia and bottomonia in hot medium and heavy quark diffusion from lattice QCD at finite temperature」(招待講演), New Progress

- in Heavy Ion Collision: What is Hot in the QGP (CCNU, Wuhan, China, Oct. 5-9, 2015).
8. Hiroshi Ohno, 「Charmonium and bottomonium spectral functions at finite temperature」 (招待講演), RBRC Workshop on Lattice Gauge Theories 2016 (BNL, New York, USA, Mar. 9-11, 2016).
 9. 鈴木遊 「Calculation of high-order cumulants with canonical ensemble method in lattice QCD」, The 33rd International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2015), (Kobe International Conference Center, Kobe, Japan, July 14-18, 2015).
 10. 鈴木遊 「Study of finite density phase transition with Canonical approach」, The 13th international eXtreme QCD conference (XQCD 2015), (CCNU, Wuhan, China, Sep. 21-23, 2015).
 11. 鈴木遊 「Calculation of high-order cumulants with canonical ensemble method in lattice QCD」, The XXV international conference on ultra-relativistic heavy-ion collisions (Quark Matter 2015), (Kobe Fashion Mart, Kobe, Japan, Sep. 27- Oct. 3, 2015).
 12. 鈴木遊 「Calculation of Hadronic observable with Canonical approach in finite density lattice QCD」, RBRC Workshop on Lattice Gauge Theories 2016, (BNL, New York, USA, March 9-11, 2016).
 13. 谷口裕介 「Study of high density phase transition in lattice QCD with canonical approach」, The 33rd International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice2015), (Kobe Convention Center, Kobe, Japan, 14 July 2015 - 18 July 2015).
 14. 谷口裕介 「Study of high density phase transition in lattice QCD with canonical approach」, XXV INTERNATIONAL CONFERENCE ON ULTRA-RELATIVISTIC NUCLEUS-NUCLEUS COLLISIONS (Quark Matter 2015), (Kobe, Fashion Mart, Japan, September 27 - October 3, 2015).
 15. 谷口裕介 「Study of high density lattice QCD with canonical approach」, Symposium on ‘Quarks to Universe in Computational Science (QUCS 2015)’, (Nara Kasugano International Forum IRAKA, Nara, Japan, November 4-8, 2015).
 16. Takeshi Yamazaki 「Light nuclei from 2+1 flavor lattice QCD」 (招待講演), Lattice Nuclei Nuclear physics and QCD – Bridging the gap – (European Centre for Theoretical Studies in Nuclear Physics and Related Areas (ECT*), Italy, June 6-10, 2015).
 17. Takeshi Yamazaki 「Light nuclei and nucleon form factors in Nf=2+1 lattice QCD」, The 33rd International Symposium on lattice field theory (Lattice 2015) (Kobe International Conference Center, Japan, June 14-18, 2015).

18. Takeshi Yamazaki 「Light nuclei and nucleon form factors in $N_f=2+1$ lattice QCD」 (招待講演), The 5th International Workshop on Lattice Hadron Physics (LHPV) (Conference Centre of the Cairns Colonial Club Resort, Australia, June 20-24, 2015).
19. Takeshi Yamazaki 「Light nuclei and nucleon form factors in $N_f=2+1$ lattice QCD」 (招待講演), Long-term and Nishinomiya-Yukawa Memorial International Workshop on "Computational Advances in Nuclear and Hadron Physics" (CANHP2015) (Yukawa Institute of Theoretical Physics (YITP), Kyoto University, Japan, September 21-October 30, 2015).
20. Takeshi Yamazaki 「Light nuclei and nucleon form factors from lattice QCD」, Symposium on Quarks to Universe in Computational Science (QUCS 2015) (Nara Kasugano International Forum IRAKA, Japan, November 4-8, 2015).
21. Takeshi Yamazaki 「Nucleon form factors and light nuclei in $N_f=2+1$ lattice QCD」 (招待講演), RBRC Workshop on Lattice Gauge Theories 2016 (Brookhaven National Laboratory, USA, March 9-11, 2016).
22. 吉江 友照 「Sharing lattice QCD data over a widely distributed file system」 21st International Conference on Computing in High Energy and Nuclear Physics (CHEP2015) (Okinawa, Japan, April 13 - 17, 2015).
23. 吉江 友照 「Metadata Working Group Report」 23th Workshop of International Lattice Data Grid (video conference hosted by CSSM, Adelaide, Australia, April 24, 2015).
24. S. Aoki, 「Hadron Interactions from lattice QCD」 (招待講演), 21th International Conference on Few-Body Problems in Physics, (Chicago, USA, May 18-22, 2015).
25. S. Aoki, 「Nuclear forces from lattice QCD」 (招待講演), ECT* Workshop on "Lattice Nuclei Nuclear Physics and QCD - Bridging the gap", (Trento, Italy, July 6-10, 2015).
26. S. Aoki, 「Comparative studies for baryon interactions with HAL QCD method and Luscher's method」 (招待講演), Long-term and Nishinomiya-Yukawa Memorial International Workshop on "Computational Advances in Nuclear and Hadron Physics", (YITP, Kyoto, Japan, September 21-October 30, 2015).
27. S. Aoki, 「Recent developments and challenges in lattice QCD」 (招待講演), International Symposium "RIKKYO MathPhys 2016", (Rikkyo University, Tokyo, Japan, January 9-11, 2016).
28. S. Aoki, 「New strategies with HAL QCD potential method」 (招待講演), Joint HAL QCD-CalLat mini-workshop on lattice QCD for NP, (LBL, Berkeley, USA, January 27-29, 2016).

29. S. Aoki, 「Hadron interactions at heavier quark masses in lattice QCD –Are deuteron and di-neutron bound ? –」 (招待講演), YITP and IOPP Joint workshop on Heavy Ion Physics, (CCNU, Wuhan, China, February 20, 2016).
30. H. Nemura, (for HAL QCD Collaboration), 「An implementation of hybrid parallel CUDA code for the hyperonic nuclear forces」, The 33rd International Symposium on Lattice Field Theory, (Kobe, Japan, July 14-18, 2015).
31. H. Nemura, (for HAL QCD Collaboration), 「A fast algorithm for lattice hyperonic potentials」, The 12th International Conference on Hypernuclear and Strange Particle Physics, (Tohoku University, Sendai, Japan, September 7 - 12, 2015).
32. H. Nemura, (for HAL QCD Collaboration), 「Hyperonic lattice QCD potentials and hypernuclear few-body problems」, YIPQS Long-term and Nishinomiya-Yukawa Memorial International Workshop, Computational Advances in Nuclear and Hadron Physics (CANHP 2015), (YITP, Kyoto, Japan, September 21 - October 30, 2015).
33. H. Nemura, (for HAL QCD Collaboration), 「Algorithm, benchmarks, and hyperon potentials with strangeness $S = -1$ at almost physical point」, Symposium on ‘Quarks to Universe in Computational Science (QUCS 2015)’, (Nara Prefectural New Public Hall, Nara, Japan, November 4 - 8, 2015).
34. K. Sasaki for HAL QCD Coll., 「First results on baryon interactions from lattice QCD with physical masses (3) –Strangeness $S=-2$ two-baryon system–」, The 33rd International Symposium on Lattice Field Theory(LATTICE2015) (Kobe, Japan, Jul. 14-18, 2015).
35. K. Sasaki for HAL QCD Coll., 「Results from HALQCD on light nuclei and exotic states」, EMMI workshop on anti-matter, hyper-matter and exotica production at the LHC (CERN, Geneva, Switzerland, Jul. 20-22, 2015).
36. K. Sasaki for HAL QCD Coll., 「Coupled channel baryon-baryon interactions on the lattice」, The 12th International Conference on Hypernuclear and Strange Particle Physics (HYP2015), (Tohoku University, Sendai, Japan, Sept. 7-12, 2015).
37. K. Sasaki for HAL QCD Coll., 「Lattice QCD studies of baryon-bayon interactions and dibaryon states」, ELPH workshop C013 ”Meson Production and Meson-Baryon Interaction”, (Tohoku University, Sendai, Japan, Sept. 12-14, 2015).
38. K. Sasaki for HAL QCD Coll., 「Physical point lattice QCD simulation on the $S = -2$ baryon-baryon interactions」, Symposium on Quarks to Universe in Computational Science (QUCS 2015), (Nara, Japan, Nov. 4-8, 2015).

39. Y.Namekawa 「Comparative study of topological charge in lattice QCD」 ,
Quarks to Universe in Computational Science (QUCS2015) (Nara, Japan, Nov
4-8, 2015).
40. Nobuyuki Ishibashi, 「 “ Dimensional regularization of light-cone gauge super-
string field theory and multiloop amplitudes」 (招待講演)
International Conference on String Field Theory and Related Aspects VII,
SFT2015 (ChengDu, China, May 11-15, 2015).
41. Yuji Satoh 「Analytic expansions of strong-coupling amplitudes in N=4 SYM」
(招待講演),
Amplitudes in Asia 2015 (National Center for Theoretical Sciences, Taipei,
Taiwan, November 2 - 6 , 2015).
42. Goro Ishiki, 「Matrix Geometry and Coherent States」 (招待講演) ,
Workshop on Noncommutative Field Theory and Gravity (Corfu, Greece, Sep.
21-26, 2015).
43. Goro Ishiki, 「Spherical M5-branes from the plane wave matrix model」 ,
KEK theory workshop Dec. (KEK, Tsukuba, Japan, Dec. 1-4, 2015).
44. Goro Ishiki, 「Spherical M5-branes from the plane wave matrix model」 ,
YITP workshop 「Developments in String Theory and Quantum Field Theory」
(YITP, Kyoto, Japan, Nov. 9-13, 2015).
45. Goro Ishiki, 「Matrix Geometry and Coherent States」 ,
YITP workshop 「Numerical approaches to the holographic principle, quantum
gravity and cosmology」 (YITP, Kyoto, Japan, July 21-24, 2015).
46. Goro Ishiki, 「Matrix Geometry and Coherent States」 ,
The 33rd International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2015)
(Kobe, Japan, July 14-18, 2015).
47. Takaki Matsumoto, 「New construction method of Matrix Regularization
using coherent states」 ,
Geometry in Gauge Theories and String Theory (Korea Institute for Advanced
Study, Seoul, Korea, Sep. 15-18, 2015).
48. Takaki Matsumoto, 「New construction method of Matrix Regularization using
coherent states」 ,
YITP workshop 「Developments in String Theory and Quantum Field Theory」
(YITP, Kyoto, Japan, Nov. 9-13, 2015).
49. Takaki Matsumoto, 「Kähler Structure in Matrix Geometry」 ,
KEK workshop 2015 Dec. (KEK, Tsukuba, Japan, Dec. 1-4, 2015).

50. Hisayoshi Muraki, 「Gravity on Poisson manifold」
Workshop on Higher structures in string theory and M-theory (Tohoku university, Sendai, Mar. 7-11, 2016).
51. Hisayoshi Muraki, 「Gravity theory on Poisson manifold with R-flux」
KEK workshop 2015 Dec. (KEK, Tsukuba, Dec. 1-4, 2015).
52. Hisayoshi Muraki, 「Gravity theory on Poisson manifold with R-flux」
YITP workshop 「Developments in String Theory and Quantum Field Theory」
(Yukawa Institute of Theoretical Physics, Kyoto, Nov. 9-13, 2015).
53. Tetsuji Kimura, 「Exotic five-branes」, 2nd String Theory in Greater Tokyo
(RIKEN, Saitama, Japan, June 9, 2015).

[国内学会、研究会]

1. 伊藤悦子, 鈴木博, 谷口裕介, 梅田貴士 「グラディエント フローを用いた $N_f=2+1$ QCD の熱力学量の測定」,
日本物理学会 (大阪市大, 大阪, 9.25-28, 2015).
2. 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 で見る有限温度 QCD」,
日本物理学会 第 71 回年次大会 (東北学院大, 仙台, 3.19-22, 2016).
3. 白銀瑞樹, 江尻信司, 金谷和至, 北沢正清, 石見涼 「Quenched QCD の一次相
転移点における潜熱と圧力ギャップ」,
日本物理学会 第 71 回年次大会 (東北学院大, 仙台, 3.19-22, 2016).
4. 石見涼, 江尻信司, 金谷和至, 大野浩史, 梅田貴士, 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」,
日本物理学会 第 71 回年次大会 (東北学院大, 仙台, 3.19-22, 2016).
5. 大野浩史 「Quarkonia at finite temperature」 (招待講演), 研究会「有限温度密
度系の物理と格子 QCD シミュレーション」 (筑波大学計算科学研究センター,
つくば, 2015 年 9 月 5 日).
6. 大野浩史 「有限温度格子 QCD によるチャーモニウム及びボトモニウムスペク
トル関数の研究」, 日本物理学会 2015 年秋季大会 (大阪市立大学杉本キャン
パス, 大阪, 2015 年 9 月 25 日-28 日).
7. 谷口裕介 「QCD phase transition at real chemical potential with canonical
approach」, JICFUS セミナー, (京都大学).
8. 谷口裕介 「カノニカル法で発見した格子 QCD の有限密度相転移現象の研究」,
日本物理学会 2015 年秋季大会, (2015 年 9 月 25 日?2015 年 9 月 28 日 大阪市立
大学 (杉本キャンパス)).

9. 鈴木 遊「カノニカル法を用いた有限密度格子 QCD における相転移現象の研究」, 日本物理学会秋季大会, (大阪市立大学, 2015 年 9 月 25 日-28 日).
10. 鈴木 遊「カノニカル法を用いた有限密度格子 QCD における相転移現象の研究」, 原子核三者若手夏の学校, (ホテルたつき, 愛知, 2015 年 8 月 17 日-22 日).
11. 鈴木 遊「カノニカル法を用いた有限密度格子 QCD における物理量の計算とその体積依存性の研究」, 第 71 回年次大会, (東北学院大学, 2016 年 3 月 19 日-22 日).
12. 山崎 剛, 石川 健一, 藏増 嘉伸, 佐々木 勝一, 宇川 彰 for PACS Collaboration, 「改良されたウィルソンフェルミオン作用を用いた 2+1 フレーバー QCD による核子形状因子の研究」 日本物理学会 2015 年秋季大会 (大阪市立大学, 大阪, 2015 年 9 月 25-28 日).
13. 山崎 剛, 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」, HPCI 第 2 回成果報告会 (日本科学未来館, 東京, 2015 年 10 月 26 日).
14. 山崎 剛, 石川 健一, 藏増 嘉伸, 宇川 彰 for PACS Collaboration 「 $N_f = 2 + 1$ 格子 QCD による軽原子核束縛エネルギーの計算」, 日本物理学会第 71 回年次大会 (東北学院大学, 宮城, 2016 年 3 月 19-22 日).
15. 賀数 淳平 「 $N_f = 2 + 1$ 格子 QCD による微小な運動量移行での π 中間子形状因子の研究」 日本物理学会第 71 回年次大会 (東北学院大学, 仙台, 2016 年 3 月 19 日-22 日).
16. 吉江 友照 「計算物理学におけるデータシェアリングの現状と課題」(招待講演) データシェアリングを利用した科学技術に関する勉強会 (文科省, 東京, 2015 年 5 月 13 日).
17. 吉江 友照 「格子シミュレーションによるコンフォーマル理論の研究」 筑波大学計算科学研究センター学際共同利用成果報告会 (筑波大学, つくば, 2015 年 10 月 20 日)
18. 吉江 友照 「計算素粒子物理データ管理・共有基盤 JLDG」 HPCI システム利用研究課題成果報告会 (科学未来館, 東京, 2015 年 10 月 26 日).
19. 吉江 友照 「HEPnet-J/sc 報告」 2015 年度 HEPnet-J ユーザー会、(広島大学, 広島, 2015 年 11 月 24-25 日).
20. 根村英克, (HAL QCD Collaboration) 「ハイパー核の少数多体系計算に向けた格子 QCD によるハイペロンポテンシャルの研究」, 日本物理学会 2015 年秋季大会, (大阪市立大学 (杉本キャンパス), 2015 年 9 月 25-28 日).

21. 根村英克, (HAL QCD Collaboration) 「格子 QCD によるハイペロンポテンシャルと軽い原子核への応用」, 新学術領域「実験と観測で解き明かす中性子星の核物質」の第4回研究会, (湘南国際村センター、2015年9月17-18日).
22. 根村英克, (for HAL QCD Collaboration), 「ハイパー核の少数多体系計算に向けた HAL QCD 法によるハイペロンポテンシャルの研究」, 日本物理学会 第71回年次大会, (東北学院大学泉キャンパス、2016年3月19-22日).
23. K. Sasaki for HAL QCD Coll., 「Coupled channel approach to two-baryon interactions from QCD」, ストレンジネス・ハドロン合同研究会, (KEK 東海キャンパス、2015年8月3-7日).
24. 佐々木健志 for HAL QCD Coll. 「物理点格子 QCD によるバリオン間相互作用 $-S=-2$ セクター」, 日本物理学会 2015年秋季大会 (大阪市立大、2015年9月25-28日).
25. 佐々木健志 for HAL QCD Coll., 「物理点格子 QCD によるバリオン間相互作用 [2] $-S=-2$ セクター」, 日本物理学会 第71回年次大会 (東北学院大学泉キャンパス、2016年3月19-22日).
26. K.Sasaki for HAL QCD Coll., 「Dibaryon searches from lattice QCD」, 素粒子・原子核・宇宙「京からポスト京に向けて」シンポジウム (ワンテラスコモンホール、東京都千代田区神田、2016年3月30-31日).
27. 石橋 延幸、 「Dimensional regularization of light-cone gauge superstring field theory and multiloop amplitudes」, 日本物理学会 2015年秋季大会 (大阪市立大学, 大阪, 2015年9月25日-28日).
28. Yuji Satoh 「World-sheet conformal interfaces and their applications」 (招待講演), 弦の場の理論 16 (筑波大学東京キャンパス, 東京, 2016年2月22-23日).
29. 伊藤克司, 佐藤勇二, Chris Locke, 束紅非, 「T-Q relation for modified affine B2 Toda field equation」, 日本物理学会第71回年次大会 (東北学院大学, 仙台 2016年3月19-22日).
30. Zoltan Bajnok, Janos Balog, 伊藤克司, 佐藤勇二, Gabor Zsolt Toth, 「Exact mass-coupling relation of simplest multi-scale quantum integrable model」, 日本物理学会第71回年次大会 (東北学院大学, 仙台 2016年3月19-22日).
31. 佐藤勇二, 菅原祐二, 和田大樹, 「Non-susy asymmetric orbifolds with vanishing cosmological constant」, 日本物理学会第71回年次大会 (東北学院大学, 仙台 2016年3月19-22日).

32. 伊敷 吾郎, 「Numerical simulation for superstring theory」(招待講演),
～スパコン「京」がひらく科学と社会～第2回「京」を中核とするHPCIシステム利用研究課題 成果報告会, (日本科学未来館, 東京, 2015年10月26日).
33. 伊敷 吾郎, 松本 高興, 深山 陽平, 島田 英彦, 「コヒーレント状態による行列正則化の新しい構成法」,
日本物理学会 2015年秋季大会 (大阪市立大学, 大阪, 2015年9月25日-28日).
34. 伊敷 吾郎, 松本 高興, 村木 久祥, 「Kähler Structure in Matrix Geometry」,
日本物理学会 第71回年次大会 (東北学院大学, 仙台, 2016年3月19日-22日).
35. 伊敷 吾郎, 松本 高興, 村木 久祥, 「ゆらいだ非可換球面上のケーラー構造について」,
日本物理学会 第71回年次大会 (東北学院大学, 仙台, 2016年3月19日-22日).
36. 浅野 侑磨, 伊敷 吾郎, 島崎 信二, 寺嶋 靖治, 「Spherical fivebranes from the plane wave matrix model」,
日本物理学会 第71回年次大会 (東北学院大学, 仙台, 2016年3月19日-22日).
37. 伊敷 吾郎, 「Numerical simulation for superstring theory」(ポスター発表),
～スパコン「京」がひらく科学と社会～第2回「京」を中核とするHPCIシステム利用研究課題 成果報告会, (日本科学未来館, 東京, 2015年10月26日).
38. 浅川 嗣彦, 村木 久祥, 綿村 哲, 「A study of construction of gravity theory based on generalized geometry」,
日本物理学会 2015年秋季大会 日本物理学会 2015年秋季大会 (大阪市立大学, 大阪, 2015年9月25日-28日).
39. 村木 久祥 「A study of construction of gravity theory based on generalized geometry」
「離散的手法による場と時空のダイナミクス」研究会 (岡山衛生会館、岡山、2015年9月14-18日) .

〈受賞〉

1. H P C I 優秀成果賞受賞, 課題番号 hp140067 (代表: 花田正範, 伊敷吾郎), 2015年10月26日.

〈国際会議・研究会の実施〉

1. 第33回格子上の場の理論国際会議組織委員会主催 (組織委員長: 藏増嘉伸), The XXXIII International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2015), 2015年7月14-18日, 神戸国際会議場, 神戸.

2. 筑波大学計算科学研究センター/理研BNL研究センター共催,
RBRC Workshop on Lattice Gauge Theories 2016,
2016年3月9-11日, BNL, NY.
3. 筑波大学計算科学研究センター/計算基礎科学連携拠点 (JICFuS) 主催, 研究会「有限温度密度系の物理と格子QCDシミュレーション」2015年9月5日,
筑波大学計算科学研究センター, つくば.
4. 筑波大学計算科学研究センター/理研BNL研究センター共催, RBRC Workshop on Lattice Gauge Theories 2016 2016年3月9日-11日, Brookhaven National Laboratory, New York, USA.
5. 主催: 筑波大学計算科学研究センター, 計算基礎科学連携拠点 (JICFuS) 有限温度密度QCDの数値的研究における最近の発展 2015年9月5日, 筑波大学計算科学研究センター, つくば.
世話人: 青木保道 (名古屋大), 浮田尚哉 (筑波大), 梅田貴士 (広島大), 江尻信司 (新潟大), 大野浩史 (筑波大), 金児隆志 (KEK), 武田真滋 (金沢大), 滑川裕介 (筑波大), 山崎剛 (筑波大)
6. Advanced Summer School on Lattice Gauge Theories 2015年8月26-28日, 筑波大学計算科学研究センター, つくば.
世話人: 齋藤華 (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
7. YIPQS Long-term and Nishinomiya-Yukawa Memorial International Workshop, Computational Advances in Nuclear and Hadron Physics (CANHP 2015), 2015年9月21日-10月30日, 京都大学基礎物理学研究所, 京都.
8. 筑波大学計算科学研究センター, 計算基礎科学連携拠点共催研究会「有限温度密度系の物理と格子QCDシミュレーション」2015年9月5日, 筑波大学計算科学研究センター, つくば.
9. 「弦の場の理論16」、2016年2月22日-23日, 筑波大学東京キャンパス文京校舎, 東京.
世話人: 岸本功 (新潟大), 伊敷吾郎, 佐藤勇二, 石橋延幸
10. 基研研究会「Numerical approaches to the holographic principle, quantum gravity and cosmology」, 2015年7月21日-24日, 京都大学基礎物理学研究所, 京都.

〈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. High Performance Computing Infrastructure (HPCI) 戦略プログラム
<http://www.jicfus.jp/field5/jp/>
3. 理化学研究所計算科学研究機構 (AICS)
<http://www.aics.riken.jp/>
4. International Lattice Data Grid (ILDG)
<http://ildg.sasr.edu.au/Plone>
5. Japan Lattice Data Grid (JLDG)
<http://www.jldg.org/jldg/>, <http://ws.jldg.org/QCDArchive/index.jsp>
6. 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
7. 石橋延幸, PTEP 編集委員
8. 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
9. 佐藤勇二, Hungarian Academy of Sciences (HAS)との二国間交流事業 (共同研究)「ゲージ理論/重力理論双対性における可積分性と強結合ゲージ理論ダイナミクス」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	木内 健司, 武政 健一
大学院生	19 名
学群 4 年次生	2 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、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を目的とした高分解能光検出器 STJ の開発、SOI 技術を用いた次世代粒子検出器の開発、および宇宙線ミュオン粒子を用いた大規模構造物の透視を行っている。

【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 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。2015-16 年には 15 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。

トップクォーク対の生成機構の解明のため、 $t\bar{t}$ 対の前後方非対称度に着目し、2010 年度には 5.1 fb^{-1} 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。2015 年度には、dilepton チャンネルと lepton+jets チャンネルの測定を総合した最終結果を得た (図 1)。

【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 3.4 fb^{-1} の陽子・陽子衝突データを取得した。Run-1 で 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

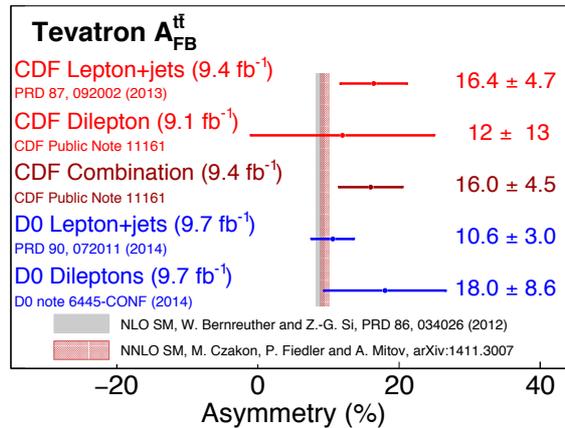


図 1: CDF 実験でのトップクォーク対生成の前後方非対称度。

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、2023 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。

(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

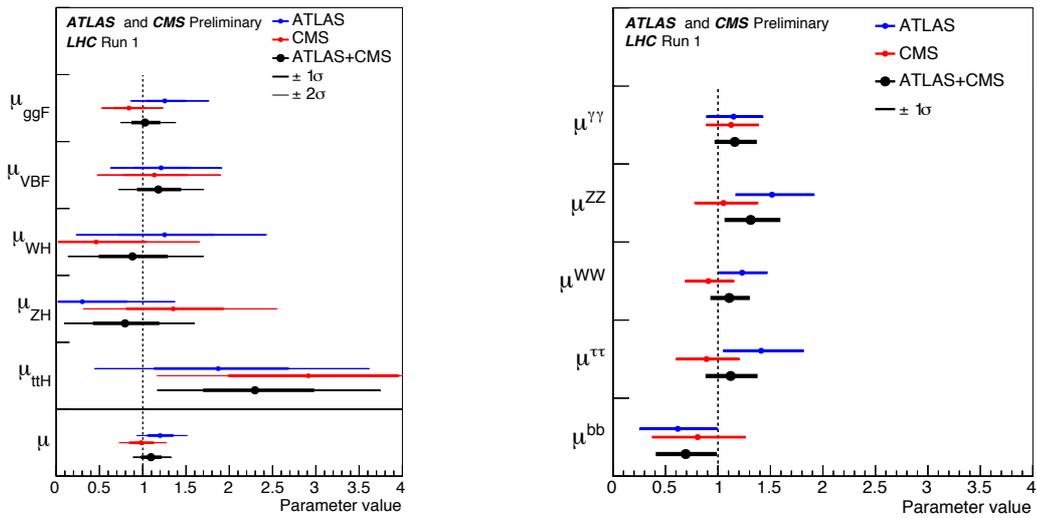


図 2: ATLAS および CMS 実験の測定結果を複合して得られたヒッグス粒子の信号の強さ μ (標準理論の予言値で規格化したもの)。(左) 様々な素過程の生成断面積, および (右) 様々な終状態への崩壊分岐比を示す。

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 両実験により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 μ (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) の最新結果を図 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 (τ) 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 5σ 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, τ 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も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。

(3) 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 実験ではじ

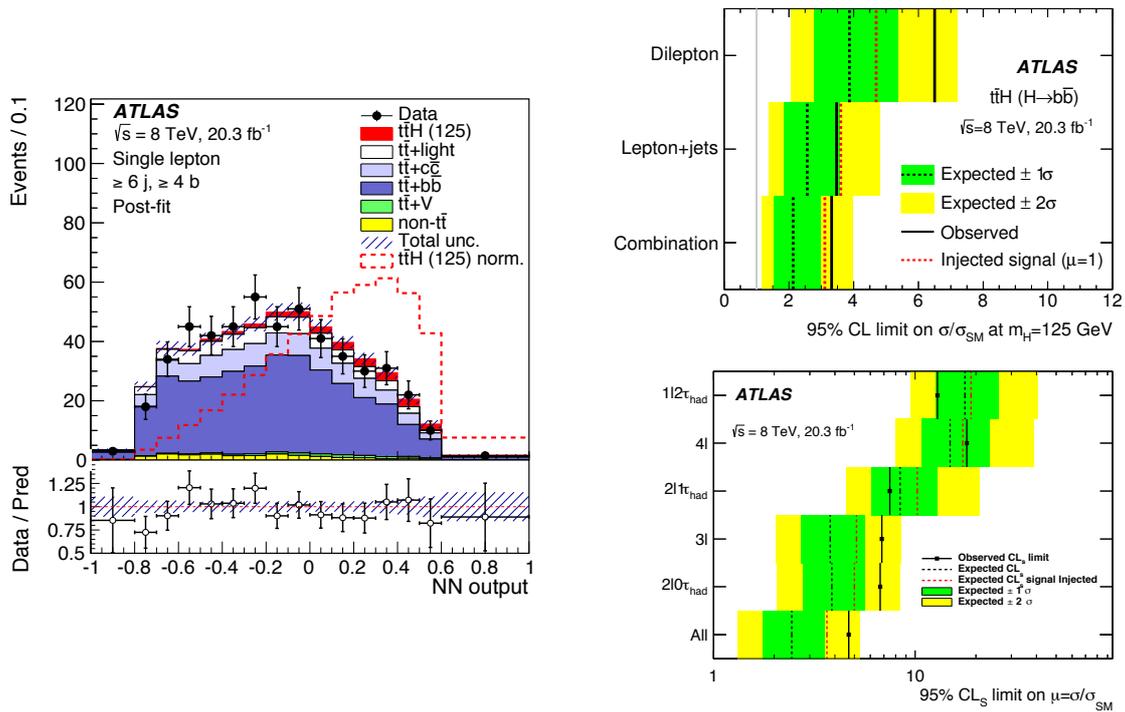


図 3: ATLAS 実験の Run-1 データ内で $t\bar{t}H$ 事象を探索した結果。(左) ヒッグス粒子が $b\bar{b}$ に崩壊し、1 個のレプトンが終状態に含まれるモードでの解析の、ニューラル・ネットワーク出力の分布。データ点はバックグラウンドの総和によく一致している。ヒッグス粒子質量を $125 \text{ GeV}/c^2$ と仮定した場合の $t\bar{t}H$ 信号の分布も同時に示してある。(右上) $t\bar{t}H$ 生成過程に引き続き、ヒッグス粒子が $H \rightarrow b\bar{b}$ 崩壊が起こる事象を探索することで得た、 $t\bar{t}H$ 事象の生成断面積に対する上限。断面積の標準理論の予言値との比で表している。レプトンを 1 または 2 個含む終状態を探索した結果 (それぞれ Lepton+jets, Dilepton), 両終状態を統合した結果を示す。(右下) $t\bar{t}H$ 生成過程に続いて、ヒッグス粒子が W や Z ボソンを介してレプトンに崩壊する事象を探索した結果得られた、 $t\bar{t}H$ 事象の生成断面積に対する上限。断面積の標準理論の予言値との比で表している。終状態のレプトンの種類、数ごとに $1l2\tau_{had}$, $4l$, $2l1\tau_{had}$, $3l$, $2l0\tau_{had}$ の 5 つの独立な解析チャンネルで解析した。

初めての $t\bar{t}H$ 過程の探索結果を発表した。この Run-1 データの解析結果を図 3 に示す。ヒッグス粒子が $t\bar{t}$ 対を伴って生成し、引き続きヒッグス粒子が $b\bar{b}$ または W や Z ボソンを介して複数のレプトンを含む終状態へ崩壊する事象を Run-1 データ中に探索した。それぞれのヒッグス粒子崩壊モードで生成断面積と崩壊分岐比の積に対して得られた 95%信頼度での上限は、標準理論の予言値の 3.4 倍、4.7 倍である。

なお、図 2 に示した ATLAS 実験による $t\bar{t}H$ 過程の生成断面積測定は、これと同一の結果であり、CMS 実験と統合した探索での信号の有意度は、 4.4σ に達している。標準理論通りの場合に予想された 2.0σ よりも高い有意度が結論されたことは大変興味深い。今後、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。

(4) 13 TeV 衝突でのヒッグス粒子の生成断面積

2015 年度に取得した重心系エネルギー 13 TeV でのデータをもちいたヒッグス粒子の生成断面積の測定も行われた。いまのところ、 $H \rightarrow \gamma\gamma$ および $H \rightarrow ZZ^{(*)} \rightarrow 4\ell$ の 2 崩壊モードでの解析が完了している。測定されたヒッグス粒子の全生成断面積はそれぞれの解析で、

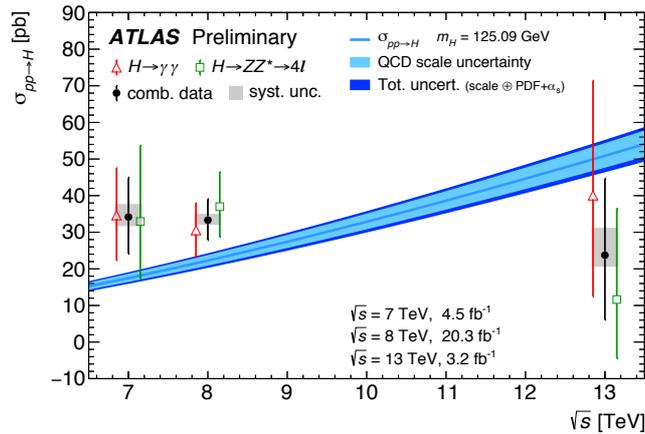


図 4: 陽子・陽子衝突の重心系エネルギーの関数としてのヒッグス粒子の生成断面積。

40_{-28}^{+31} pb, 12_{-16}^{+25} pb, 統合すると 24_{-18}^{+21} pb, であった。これらの結果は誤差が大きいので、2016 年度に新規に取得するデータを合わせて更新して行く必要がある。標準理論の予言値 $50_{-4.4}^{+4.5}$ pb とは、現在の誤差の範囲では一致している。これらの解析モードでの Run-1 および Run-2 での断面積測定の結果を、まとめたのが図 4 である。

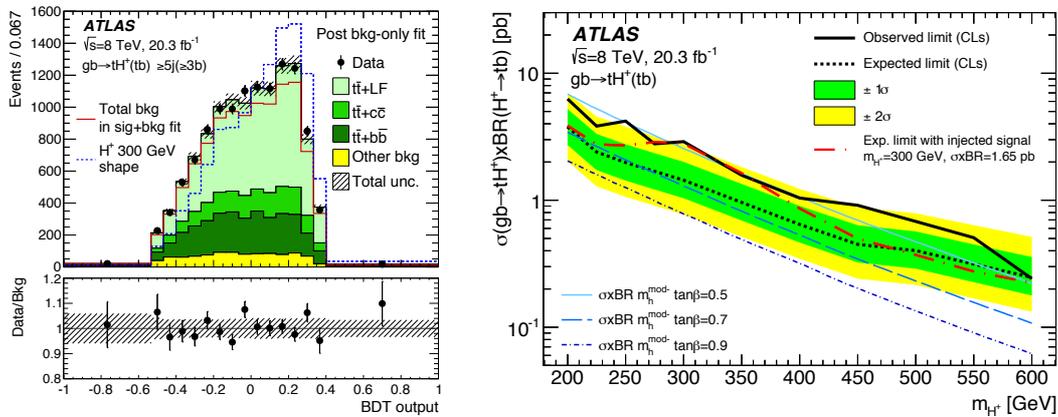


図 5: 荷電ヒッグス粒子の探索結果。(左) 質量 $300 \text{ GeV}/c^2$ の荷電ヒッグス粒子信号のバックグラウンドからの分離を最適化した Boosted Decision Tree 出力の分布。荷電ヒッグス粒子の信号なしのバックグラウンド事象のみを仮定してデータをフィットした結果が色塗りのヒストグラムである。信号の存在も仮定したフィット結果でのバックグラウンドの寄与は、赤線で示している。(右) 荷電ヒッグス粒子の生成断面積とトップクォークとボトムクォークへの崩壊分岐比の積に対して、本研究が与えた上限値。荷電ヒッグス粒子の質量の関数としてプロットしている。

(5) 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、広く有望視され

ている。とくに、多くの理論で $200 \text{ GeV}/c^2$ 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。

2015年度は、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-1 データを使って探索した。図5に、 $300 \text{ GeV}/c^2$ 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 出力の分布と、得られた生成断面積に対する上限を示す。本解析では、広い荷電ヒッグス粒子の質量領域で 2σ を超えるバックグラウンドからの超過が見られ、有意度は $m_{H^\pm} = 250 \text{ GeV}/c^2$ での 2.4σ が最大であった。Run-2 データでも引き続き探索を続ける。

(6) ヒッグス粒子の非可視崩壊の探索

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。LHC ATLAS 実験では、vector-boson 随伴生成 (VH) や vector-boson fusion (VBF) 生成過程を用いた探索結果の combination を行い、非可視崩壊比に対して、既存の結果よりも強い、 $\text{BR}(H \rightarrow \text{invisible}) < 0.25$ (95% confidence level) をつけることができた(図6)。これにより、ヒッグスポータルモデルにおいて、暗黒物質の質量がヒッグス粒子の質量の半分よりも低い領域において、暗黒物質と原子核の散乱断面積に対して非常に強い制限をつけることができた(図7)。

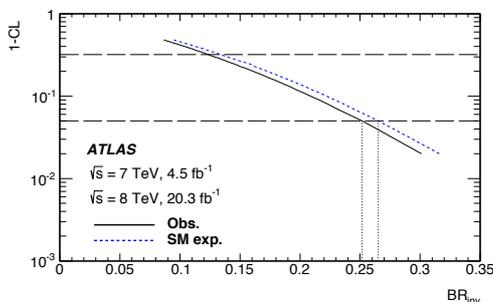


図 6: VH や VBF 生成過程による探索を用いた、ヒッグス粒子の非可視崩壊比への制限。

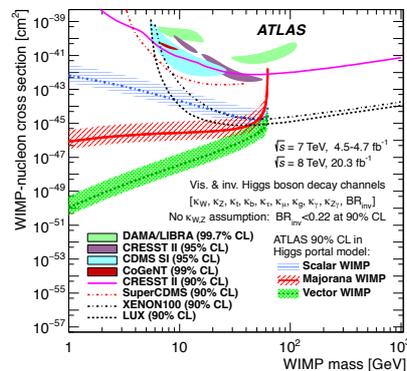


図 7: ヒッグスポータルモデルにおける、暗黒物質と原子核の散乱断面積への制限。青(暗黒物質がスカラー粒子)、赤(マヨラナ粒子)、緑(ベクター粒子)の線が、本研究から得られた制限。LUX など他の実験からの結果も、比較のために載せている。

(7) 標準理論を超えた重いヒッグス粒子の探索

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。2012年までの LHC Run 1 のデータを用いて、gluon-fusion 及び VBF 過程への断面積及び分岐比の積 ($\sigma \times \text{BR}$) への制限を付けた。図9に gluon-fusion での生成に対して得られた上限を示す。又、Two Higgs Double Model (2HDM) による解

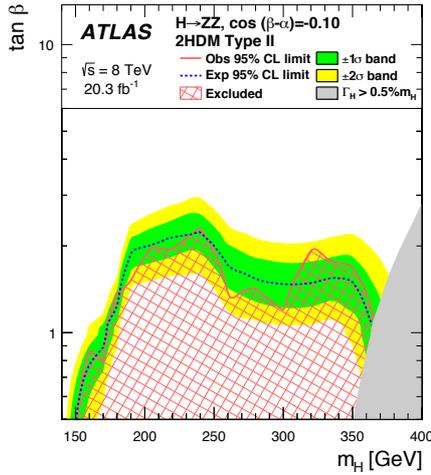


図 8: Type-II の 2HDM において, $\cos(\beta - \alpha) = -0.1$ を仮定した際の, $\tan \beta$ 及び重いヒッグス粒子の質量域への制限。

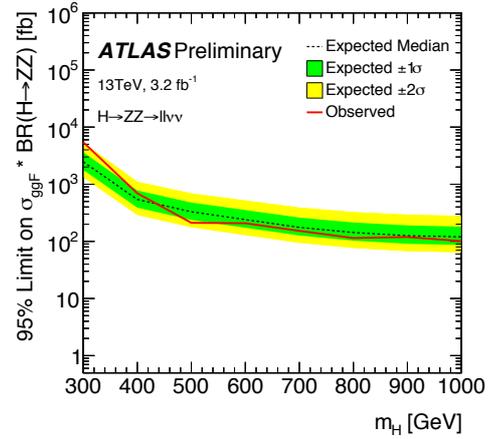


図 9: LHC Run 2 のデータを用いた, gluon-fusion 過程における ZZ モード崩壊に対する $\sigma \times \text{BR}$ への制限。

積を行い, $\tan \beta < 2$ の場合には, 質量 200-350 GeV の重いヒッグス粒子は棄却されることがわかった (図 8)。2015 年から再開した, LHC Run-2 のデータを用いて, 同様の探索を gluon-fusion 過程に対して行った。標準理論からの有意な逸脱は見られなかったが, 既に Run 1 に匹敵するシグナルへの感度を得ており, 来年度以降の進展が待たれる。この探索結果を用いて, Bulk Randall-Sundrum Graviton の存在可能質量域への制限も付けた。

このような重いヒッグス粒子は, すでに発見されている 2 つのヒッグス粒子への崩壊モード ($H \rightarrow hh$ 崩壊) も予想されている。とくに 250 – 350 GeV/ c^2 ほどの質量領域では, 崩壊分岐比が大きくなるのがさまざまなモデルで予想されている。ヒッグス粒子対がボトムクォーク対とタウ粒子対, W ボソン対と光子対, ボトムクォーク対と光子対, 両方ともボトムクォーク対に崩壊する 4 つの解析モードで, 重いヒッグス粒子を探索し, 重いヒッグス粒子の生成断面積とヒッグス粒子対への崩壊分岐比の積に対して上限をつけた (図 10 (左))。得られた結果を超対称性理論の hMSSM および low-tb-high の両シナリオのもとに解釈し, それぞれのシナリオに対して制約を与えた。図 10 (右) に hMSSM シナリオのパラメタに対して得られた制約を示す。

(8) Boosted-boson tagging を用いたダイボソン共鳴事象における新粒子の探索

Boosted-boson tagging と呼ばれる手法 (高い運動量を持った W や Z ボソンのハドロン崩壊を, 大きな radius parameter によるジェット (large-R jet) として再構成する方法) を用いた物理解析にも取り組んでいる。LHC Run 2 において, $WV \rightarrow \ell\nu J$ (V : W, Z ボソン, J : large-R jet) 及び $VH \rightarrow \ell\ell/\ell\nu/\nu\nu bb$ チャンネルにおける, Boosted-boson tagging を用いた解析にも取り組み, TeV 領域における新粒子の探索を行った (図 11)。LHC Run 1 において不変質量 2 TeV 付近に観測された, ダイボソン共鳴事象における標準理論からの 3.4σ の逸脱は, 現時点での Run 2 のデータを用いた解析では確認できず, $\sigma \times \text{BR}$ への制限を与えた (図 12)。

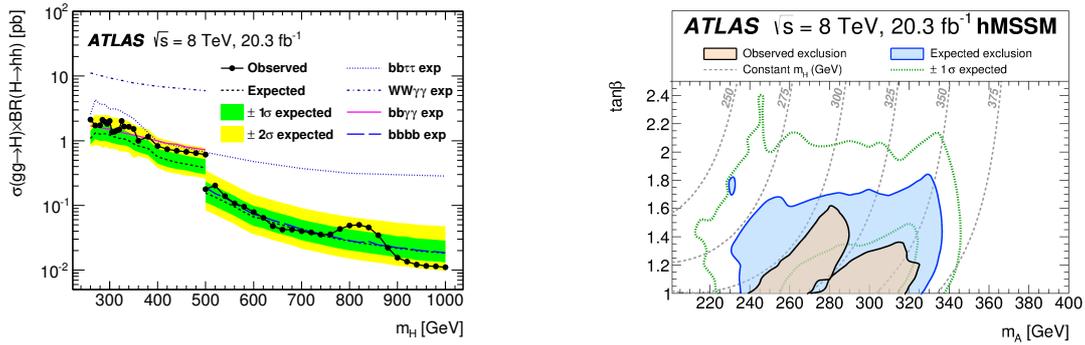


図 10: 重いヒッグス粒子が、既知のヒッグス粒子の対に崩壊する $H \rightarrow hh$ 過程の探索結果。(右) $gg \rightarrow H$ 生成断面積と $H \rightarrow hh$ 崩壊分岐比の積に対してつけた上限。(左) hMSSM シナリオに対して設けた制約。

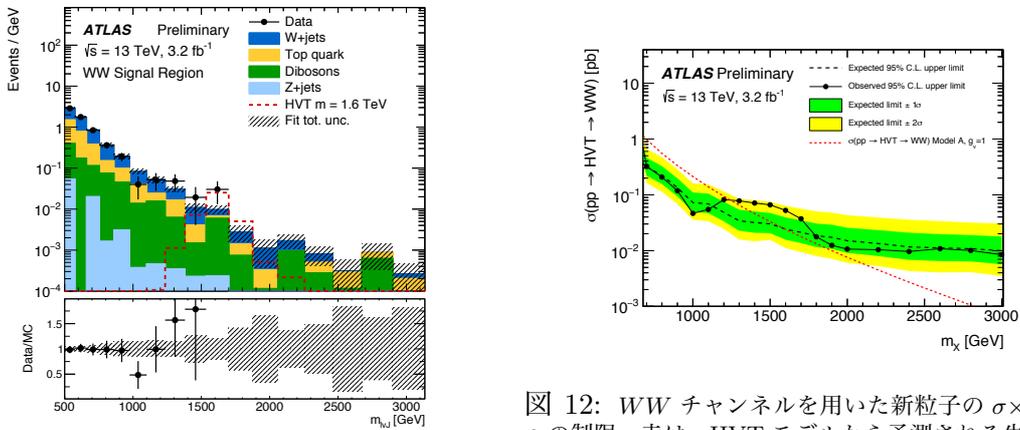


図 11: WW チャンネルのシグナル領域における、再構成したダイボソンの不変質量分布。

図 12: WW チャンネルを用いた新粒子の $\sigma \times BR$ への制限。赤は、HVT モデルから予測される生成断面積と分岐比の積。

【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、2023 年から当初設計値を超え、年間 $200\text{-}250\text{ fb}^{-1}$ の衝突をめざす高輝度 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による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。

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 ($n^+\text{-on-p}$) 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の設計をしている。p 型基板を用いることで高速な電子を収集することで電荷収集が放射線により影響を受けにくい事、また、従来から放射線耐性に優れる $n^+\text{-on-n}$ 型設計に比べ、 $n^+\text{-on-p}$ 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、従来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。

ATLAS の設計では、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し、それぞれ最大 2×10^{16} と 1×10^{15} $1\text{-MeV n}_{\text{eq}}/\text{cm}^2$ の放射線を受けても使用可能であること

を目標としている。

図 13 (左) はバイアス電圧 500 V を印加した状態での 320 μm 厚のセンサーから収集できる電荷量の放射線量依存性を測定したもので、我々の測定 (東北大学 CYRIC の 70 MeV 陽子ビームを照射) に加え、各国の ATLAS グループによる測定も比較して示している。陽子よりも中性子による損傷が 10^{15} n/cm² の近傍では大きなことが分かるが、検出器のノイズと比較して十分な量の電荷が収集できることが実証された。これはシリコンセンサー設計の最終結果として、国際学会で発表した。バルク基板の損傷に対して表面の損傷は様々な影響を与える。その損傷の詳細についても他のグループと共同で評価し、筑波大の測定結果は主要な項目について最終設計に用いることのできる重要なデータとして国際学会で発表した。

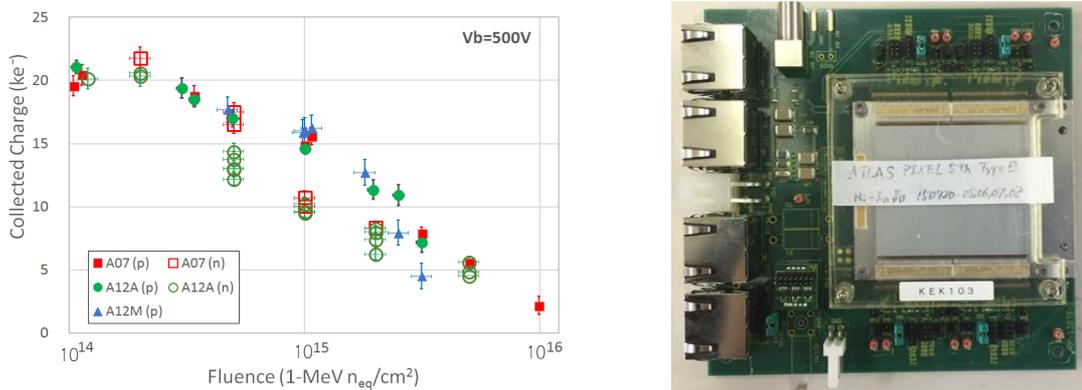


図 13: (左) 通過する β 線を用いて測定したシリコン検出器からの収集電荷量 (厚さ 320 μm , バイアス電圧 500 V)。横軸はセンサーに与えた照射量で 1 MeV 中性子に換算した粒子数 (n/cm²)。中性子や様々なエネルギーの陽子線照射の結果をまとめたもの。(右) 4cm 角ピクセルセンサー試験用モジュール (センサーは中央部やや右)。

最も衝突点に近い位置に設置するピクセル型検出器の設計も平行して行っている。ピクセル検出器は読み出し回路である FE-I4 の仕様からピクセルサイズ 50 \times 250 μm が基本設計値である。図 13 (右) に示す様に、2cm 角の FE-I4 読み出しチップ 4 枚に対し 4 cm 角のピクセル型センサーを金属バンプで接合した試験モジュールを試作した。これらは機械強度等の温度試験の後に、CYRIC で照射試験をし、ドイツ DESY 研究所の電子ビームや CERN の陽子ビームで検出器性能を評価した。

さらにピクセルサイズの小さなセンサーを設計することを見越して、同じ FE-I4 で対応できる 25 \times 500 μm のピクセルセンサーも試作した。金属バンプを用いるハイブリッド型では 25 μm の精密さは例を見ない。3 \times 10¹⁵ n/cm² の陽子照射をしたのちに DESY で検出効率を測定した結果例を図 14(左) に示す。ビーム範囲にある複数のピクセルの検出効率を重ね合わせてピクセル内の位置の依存性として示すもので、バイアス電圧を各ピクセルに配線する側の境界 (左側) と配線の無い側の境界 (右側) で検出効率が低下することが分かる。この 2 つの領域に分けて検出効率の低下分をバイアス電圧の関数として示したものが図 14(右) である。さらに金属バンプを境界部に配置しない設計 (青で示すデータ) ではさらに検出効率の低下は低減できることが示された。これら構造による検出効率の低下は放射線損傷に起因するものであるが、ATLAS で予想する 2 倍の照射量でも低下分は 0.3% 程度に抑えられ十分に高い検出効率が達成できることを示した。

ハイブリッド型ピクセルでは、金属バンプの不良率を下げるのが重要な開発項目である。我々は Sn/Ag を用いるものと Ni/In を用いるものを平行して比較検討している。現状

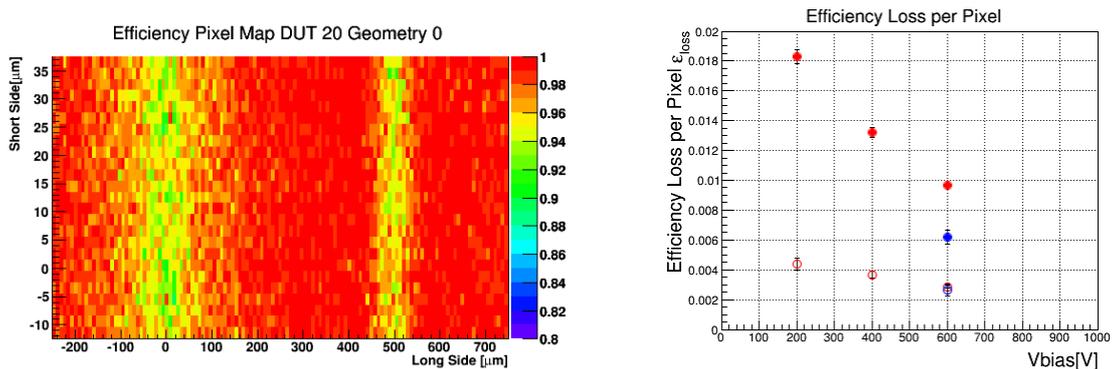


図 14: (左) $3 \times 10^{15} \text{ n/cm}^2$ を照射した $25 \times 500 \mu\text{m}$ ピクセルサイズセンサーのピクセル内位置での検出効率の分布。座標 (0,0), (500,25) が 1 ピクセルに相当し、検出効率はいくつかのピクセルに対する値を平均として求めている。(右) 検出効率が劣る部分での検出効率の低下分をバイアス電圧の関数として示した ($3 \times 10^{15} \text{ n/cm}^2$ 照射済み)。異なるマークはピクセル電極の設計の違いを表す。

では Ni/In の方がボンド用フラックスを必要とせずまた小さな不良率で接続できる。ただし、In はやらかいため、またセンサーと読み出し FE-I4 間を一定間隔に保つ必要性のために Ni の量を増やす必要がある。そのため、センサーモジュールを ATLAS の 2 T の磁場中に設置しても機械強度が十分であるかの試験を行った。ATLAS 環境下でのモジュールへのストレスは磁場の不均一性により強磁性体である Ni に加わる力の不均一性によるもの、磁場の上げ下げに伴うストレスによるものが想定できる。

強度評価には KEK 低温センターの 1.5T ソレノイド磁場を借用し、磁場中へのモジュール出し入れを繰り返すことで ATLAS 実験で受けるストレスを超える耐性試験を行った。4 つのモジュールに対して 3300 回の磁場への出し入れ試験した結果、バンプの機械強度は十分であることが示された。

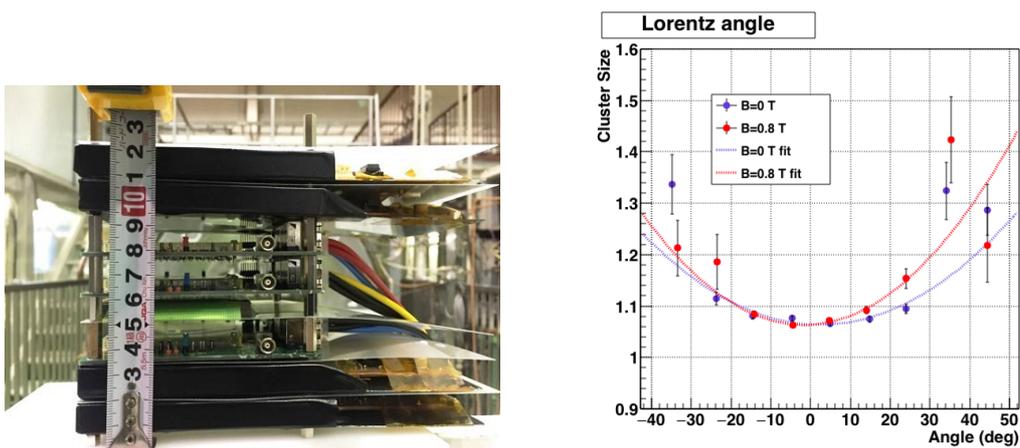


図 15: (左) ローレンツ角測定に用いたシステム。3 台のピクセルモジュールをシンチレータではさみ宇宙線のトリガー信号とした。(右) 磁場中に設置したピクセルモジュールのクラスターサイズの天頂角依存性。データは磁場 0 と 0.8 T で取得した。シリコンの厚さ=150 μm 、バイアス電圧=200 V。

磁場中にモジュールを設置する機会を利用し、シリコン内でのキャリア移動にともなう

ローレンツ角の評価を行った。磁場がなければ電場に従いキャリアは移動し、 $50\mu\text{m}$ 間隔の電極で測定する電荷分布は最小のヒット電極数（クラスターサイズ）で計測できる。宇宙線の天頂角分布に従い、クラスターサイズは影響を受けるが、磁場を印加することでクラスターサイズ最小の天頂角は移動する。図 15（左）の示す 3 台のモジュールを磁場中に設置した。図 15（右）には磁場が無い場合と 0.8T を加えた場合の平均クラスターサイズを飛跡の天頂角の関数として示す。磁場の印加により系統的に天頂角依存性が移動することが分かる。最小クラスターサイズの天頂角の変化分は、シミュレーションの予想値 $3.9\pm 0.8^\circ$ に対して $4.0\pm 1.5^\circ$ と矛盾しない結果を得た。ただし、統計不確かさが大きく、今後さらに計測を繰り返すことで測定精度を向上させる。

[4] SOI を用いたモノリシック型ピクセル検出器の開発

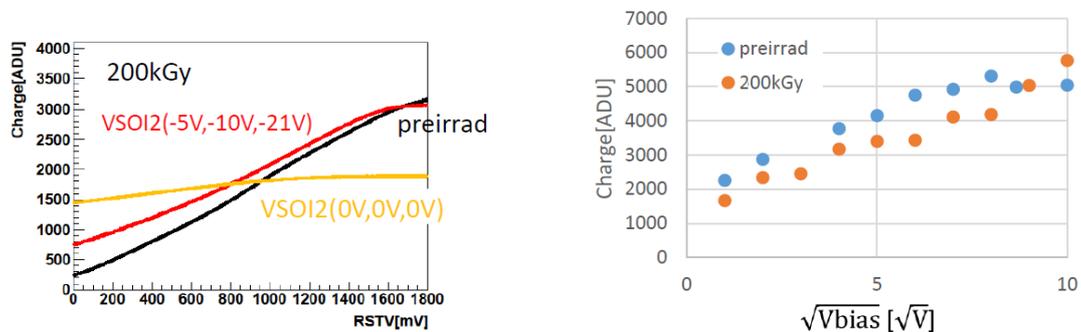


図 16: 200kGy 照射した FPIX2 の（左）回路部分のリセット電圧に対する出力値。照射前（黒色）と照射後（オレンジ）VSOI2 に電圧を加えない場合と（赤）適正な電圧を加えた場合。（右）赤外レーザーに対する応答の照射前後での比較をバイス電圧の平方根の関数として示す。

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。

2 層 SOI 素子の総合評価として、電荷積分型のピクセル素子 (INTPIXh2) を主に使用してきた。その結果、100kGy までの照射に対して未照射とほぼ同等の信号が得られることを示した。これは 2 層構造を持たないセンサーでの収集電荷量は放射線量とともに劣化し、数

kGy で完全に信号を得られなくなるものと比較して大幅な放射線耐性を実現できた。信号収集速度、クロストークなど総合的な評価も完了して国際学会で発表した。

INTPIXh2 は 200kGy を照射すると出力が安定しなくなった。様々な種類の MOSFET が用いられているが、ゲート酸化膜の厚さの違いや PMOS/NMOS で TID 補償に最適な電圧 VSOI2 が違うことが主因と考えられる。そこで新たに FPIX2 を設計した。FPIX は $8\mu\text{m}$ 角のピクセルサイズで SOI としては最も微細な位置測定が可能な素子であるが、ピクセル部分、入出力 (IO) 部分、アドレスデコーダ部分それぞれで VSOI2 が調整できるように設計した。図 16 には 200kGy 照射後の読み出し回路部分の応答 (左) と赤外レーザーを用いて総合的なセンサー応答 (右) を測定したものである。回路応答は、照射後に VSOI2 を与えないと全く応答を示さない。しかし適正な VSOI2 (ピクセル部 = -5V , デコーダ部 = -10V , IO 部 = -21V) を加えると未照射の場合に近い応答が示された。その条件で赤外レーザーに対する応答を見ると、バイアス電圧に依存し空乏層が広がり電荷を収集できることが示され、未照射時と変わらない応答が得られた。500kGy 照射された FPIX2 でも応答を観測できたが、未照射時と比べると信号量の劣化は明らかであり完全な補償が可能でない事が分かった。

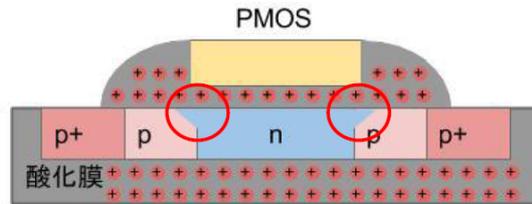


図 17: 薄い LDD 濃度は酸化膜へのホール蓄積効果により実効的にチャンネル長を長くしトランスコンダクタンスを劣化させる効果がある。

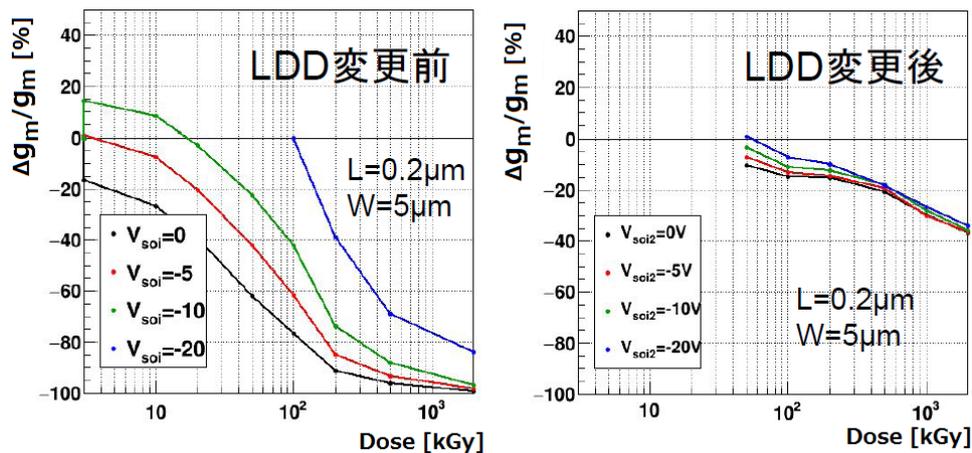


図 18: トランスコンダクタンスの照射による変動割合を照射量の関数としていくつかの VSOI2 電圧に対して示す。(左) 従来の LDD 濃度、(右) 従来より LDD 濃度を 10 倍にあげたもの

IO 部 FET と他の部分の FET ではゲート酸化膜の厚みが異なり、FPIX2 ではその効果を考慮した SOI2 の分割を行ったものである。実際に図 16(左) に示したように IO 部には他よ

り高い VSOI2 が必要であった。

従来行ってきた FET 単体での照射試験 (TrTEG を用いた測定) によるとトランスコンダクタンスの高照射量での劣化が PMOS で顕著であることが分かっていた。詳細なデータ解析を行い、LDD (lightly doped drain) の濃度が放射線耐性としては最適でない可能性があきらかになってきた。放射線によりホールが蓄積されると LDD との界面で PMOS のチャンネルが形成されにくくなり結果としてトランスコンダクタンスが劣化する。

この推定をもとに LDD 濃度を従来品の 10 倍にした PMOS-FET の放射線による特性変化を評価した。図 18 には標準 LDD と 10 倍濃度の LDD の FET のトランスコンダクタンスの変動を示す。従来品では 1 MGy では殆んどゼロとなるが、LDD 変更後は 10 MGy でも劣化分は 30–40% に抑えられる。従来は顕著であった VSOI2 による補償があまり有効でなくなった理由は現在検討中である。閾値の劣化についても有意に改善が得られた。従来では 1 MGy を超える環境では SOI 素子は使用できないと考えていたが、この LDD の最適化によりさらに放射線耐性に優れた素子が実現できる可能性が得られた。

我々は、100kGy 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の開発を KEK らと共同で推進している。

【5】 超伝導体遠赤外線検出器の開発

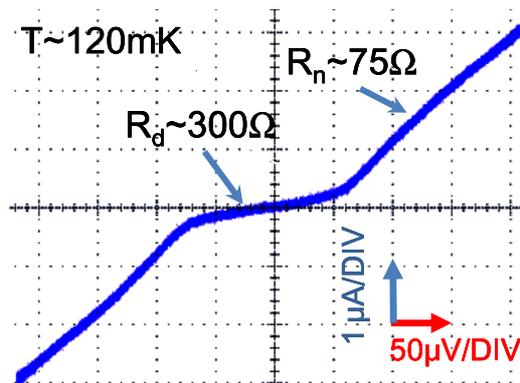


図 19: Hf-STJ において絶縁層 HfOx の上に Al を少量 ($\sim 10\text{nm}$) 成膜した $100\mu\text{m}$ 角試料の I-V 特性. 測定温度は、約 120mK. 従来の Hf/HfOx/Hf に比べて R_d/R_n の値が 1 から 4 へ改善した. 但し磁場無印加時における直流ジョセフソン電流が確認できない.

過去二十年間に超伝導トンネル接合素子 STJ (Superconducting Tunnel Junction) を用いた光検出器の開発研究が世界でひろく行われ、実用化されてきた。これは超伝導体が半導体と比較して非常に小さいギャップエネルギーを有し、半導体を基礎とした既存の光検出器に比べて、原理的に著しく高いエネルギー分解能を持つ光検出器を実現可能であるが強い動機となっている。このことから、半導体を超える分解能をもつ X 線検出器や赤外線検出器の開発が進められてきた。

本開発研究ではニュートリノ崩壊探索実験への応用を目標として、従来から用いられてきた Nb (超伝導ギャップエネルギー $\Delta=1.55\text{meV}$, $T_c = 9.23\text{K}$) を用いた Nb/Al-STJ やさらに Δ の小さい Hf ($\Delta=0.020\text{meV}$, $T_c = 0.165\text{K}$) を超伝導体として用い、遠赤外線領域

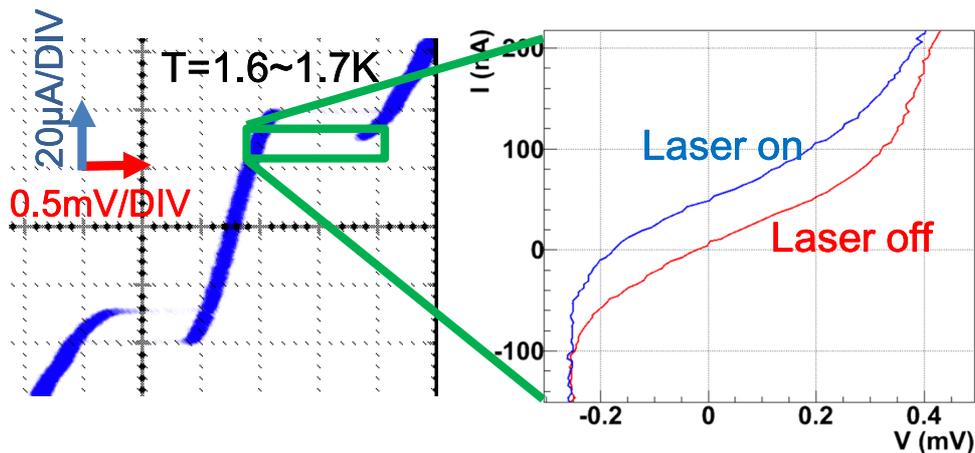


図 20: 産総研 CRAVITY で作製した 200 μm 角 Nb/Al-STJ への遠赤外線レーザー (波長 57.2 μm) 照射時の I-V 特性. レーザーは, チョッパーにより $f=200$ Hz でオン・オフされており, 左の拡大図 (差動アンプ出力によりオフセットは移動している) において, レーザーオン時・オフ時の I-V 特性の変化が確認された.

($E_\gamma \sim$ 数 10 meV) の一光子ごとのエネルギーを数%の精度で測定する性能をもつ STJ の開発を行っている.

我々のグループでは, 2007 年より 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ハフニウムを超伝導体とする STJ (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_x-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. 実用化に向けた課題として要となるものは, 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. 昨年度において, 絶縁層 HfO_x の上に Hf と異なる金属層 (Al \sim 10nm 厚) を成膜し絶縁層の上下層の馴染みが悪くなることで漏れ電流の改善が期待される Hf-STJ 試料を作製し I-V 特性を 120mK で測定した (図 19). その結果, 漏れ電流の大幅な改善が確認できた. 但し磁場無印加時における直流ジョセフソン電流が確認できない, すなわち信号となるトンネル電流も抑制されるという問題が新たに発生しており, 更なる検証が必要である.

Hf-STJ 開発と並行して, 既に作成方法の確立している Nb/Al-STJ を用いた一光子分光器の開発も行っている. Nb/Al-STJ 単体では, 25 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, アレイ状に並べた Nb/Al-STJ ピクセルと回折格子の組み合わせによって一光子分光が可能となる. Nb/Al-STJ では, 常温増幅器を用いた読み出しにおいて可視光 \sim 近赤外までの一光子検出・分光の報告例がある. 我々のグループでは STJ による遠赤外一光子検出を目指して, 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 SOI (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ており, 我々のグループではこの試料の供給を受け, 漏れ電流, 静電容量, 光応答の時定数などの基礎特性の測定を行っている. 特に昨年度においては, 福井大遠赤センターの遠赤外分子レーザー装置を用いて CRAVITY 製 Nb/Al-STJ の遠赤外光応答の試験を行った. 図 20 は, 200 μm 角 Nb/Al-STJ

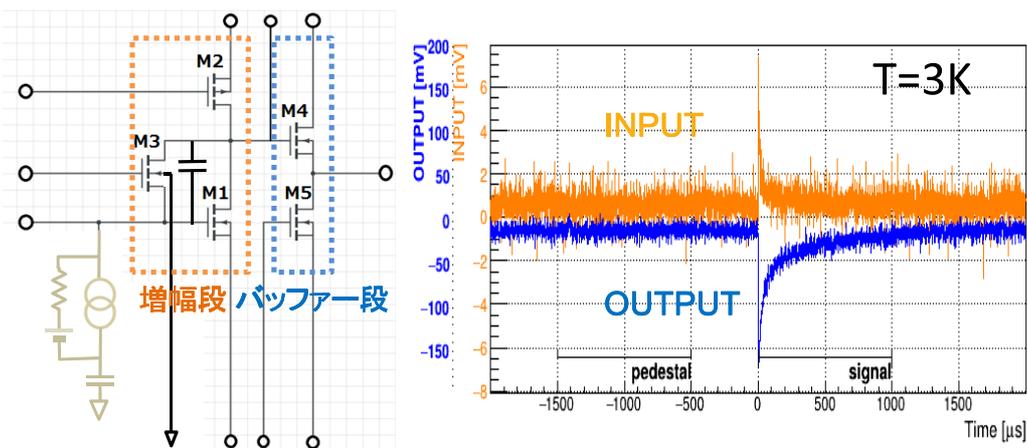


図 21: SOI 技術を用いて試作された STJ 信号読み出し用の極低温増幅器の回路図 (左), および $T=3\text{K}$ での $C=1\text{nF}$ を用いたテストパルス入力の様子 (右). 入力信号の信号雑音比が増幅後の出力では向上している.

への遠赤外線レーザー (波長 $57.2\ \mu\text{m}$) 照射時の I-V 特性を示している. レーザーは, チョッパにより周波数 $200\ \text{Hz}$ でオン・オフされており, レーザーオン時・オフ時の I-V 特性の変化が確認され, 遠赤外線レーザーの照射パワーと STJ の応答から, 現段階での遠赤外光子に対する STJ の検出効率が $0.5\ \%$ 程度と見積もられた. STJ 表面に反射防止コーティングやアンテナを使用して STJ と遠赤外光子との結合を向上させることが今後の課題となる.

SOI プロセスによる MOSFET が STJ の動作温度においてトランジスタとして機能することは既に確立している. 我々のグループでは, 昨年度においてより現実的に動作する SOI 読み出し回路の試作および測定を行った. 図 21 は, SOI プロセスによって作製された STJ 信号読み出し用の極低温増幅器の極低温 ($T=3\text{K}$) におけるテスト信号入力の様子を示している. 極低温での増幅器としての動作, および増幅器への入力の信号雑音比が増幅後の出力では向上しているのが確認された. 入力波形の時定数から増幅器の入力インピーダンスが数十キロオームであることが分かるが, STJ の光応答速度および STJ 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. 現在, 低入力インピーダンスの電荷積分型増幅器の設計, 並びに極低温における回路シミュレーションのための SOI MOSFET の特性の測定を行っている.

[6] ミューオンラジオグラフィーによる大規模構造物の透視

ミュー粒子が建物などを透過しやすい性質を利用し, 宇宙線ミュー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ーオンラジオグラフィーに取り組んでいる. 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, 2012 年には実際の原子炉透視に成功することで技術設計の実証を行った. その後国際廃炉機構 (IRID) の計画として放射線遮蔽の設計を施した図 22 (左) に示すような検出器を 2 台建設した. 全体を $10\ \text{cm}$ の鉄で遮蔽し, さらにバックグランド放射線を排除できるように 3 ユニットの XY 測定面から構成されている. 2015 年 2 月から 1 号炉の観測を開始した結果, 燃料装荷位置には核燃料の溶け残りは殆どないことが判明し (図 22 (右)), IRID により観測結果は

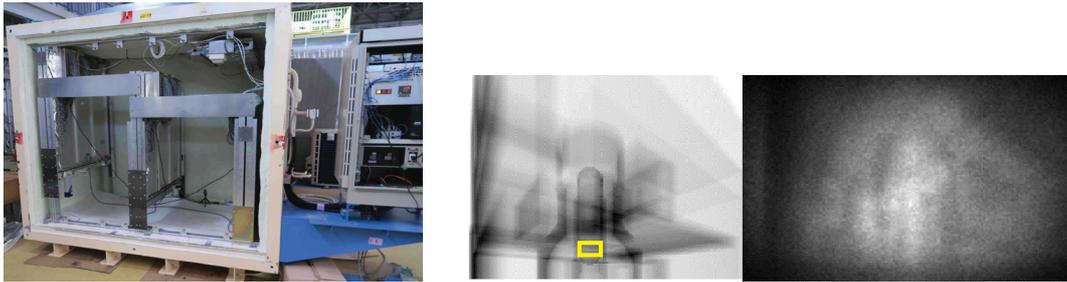


図 22: (左) 福島第一原発 1 号炉の観測に用いられた検出器。シンチレータバーで構成される 1 m 角の位置検出器を 3 セット組み合わせてミュ粒子数分布を観測する。全体は放射線遮蔽のための鉄で覆われている。(右) IRID で公表された資料。構造物の配置図 (黄色の枠は燃料装荷位置) と観測結果を比較し、燃料装荷位置での飛来数の減少は少なく、燃料は殆どないことが判明した。

公表された。

溶け落ちた燃料デブリがどこにあるかを観測するには、検出器からの仰角が低い場合宇宙線ミュ粒子の飛来数が少なすぎるという問題がある。そのため、1 号炉の観測と並行して、(1) 地下に検出器を設置しても地上の構造物が観測できるか、(2) 低角度宇宙線ミュ粒子の飛来数や運動量分布はどうなっているか、の 2 つの課題に取り組んだ。

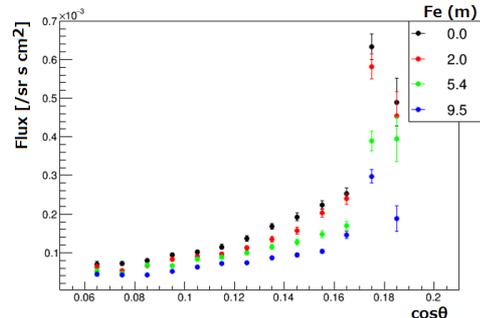


図 23: (左) KEK に設置された水平ミュ粒子の飛来数を計測するシステム。(右) ミュ粒子の飛来数を天頂角の θ の関数として計測した。異なるマークは通過する鉄ブロックの厚さで、最小運動量が対応できる。

(1) については 2014 年から KEK 施設を用いて地下から、地上に置いた 2 m 立方の鉄ブロックが観測できることを実証し、その結果は 2015 年の国際会議で発表した。

(2) については、KEK に鉄ブロックを最長 9 m まで設置し、鉄での吸収からミュ粒子の運動量分布を決定する方法で低角度の飛来数分布の計測を行っている。図 23 (左) は KEK に設置したシステムで、前方に福島で用いた検出器ユニットと同じものを 2 ユニット、鉄ブロックを挟んで手間に 1 ユニットを設置して計測している様子である。図 23 (右) は鉄の厚さを変えたときのミュ粒子飛来数 ($1/\text{sr}\cdot\text{s}\cdot\text{cm}^2$) を天頂角 θ の関数として示したものである。水平ミュ粒子の飛来数の測定は $\theta = 75^\circ$ の近辺で 1 例が報告されているが、今回の測定結果はその結果とよく一致している。さらに水平領域および大角度領域をカバーできるデータを現在取得中である。

1 号炉での観測の成果を受けて、2016 年 3 月からは東京電力の事業委託を受けた KEK に協力する形態で 2 号炉を観測している。1 号炉の場合に比べ、より近くに検出器を設置する

ことができ、現在までに燃料装荷位置にはほとんど燃料がなさそうであり、それに加え圧力容器の底の様子も観測できていることが分かってきた。

【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: 武内勇司
19,240 千円 (直接経費 14,800 千円, 間接経費 4,440 千円) (2015 年度)
2. 科学研究費 基盤研究 (C)「ハドロン衝突における重いクォーク生成の物理」2013 – 2015 年度, 研究代表者: 受川 史彦
910 千円 (直接経費 700 千円, 間接経費 210 千円) (2015 年度)
3. 科学研究費 基盤研究 (C)「アトラス実験でのヒッグス湯川結合の測定」2013 – 2015 年度, 研究代表者: 原 和彦
1,560 千円 (直接経費 1,200 千円, 間接経費 360 千円) (2015 年度)
4. 科学研究費 新学術領域研究「先端加速器 LHC が切り拓くテラスケールの素粒子物理学～真空と時空への新たな挑戦」2011 – 2015 年度
計画研究 A01:「ヒッグス粒子の発見による素粒子の質量起源の解明」, 研究分担者: 受川 史彦
9,100 千円 (直接経費: 7,000 千円, 間接経費: 2,100 千円) (2015 年度)
5. 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
5,850 千円 (直接経費 4,500 千円, 間接経費 1,350 千円) (2015 年度)
6. KEK 大学等連携支援事業「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」
共同代表者: 守友 浩, 金 信弘, 末木啓介
物件費: 200 千円 (STJ プロジェクト向け配分額)
物件費: 100 千円 (SOI プロジェクト向け配分額)

【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],
“Study of the energy dependence of the underlying event in proton-antiproton collisions,”
Phys. Rev. D **92**, 092009 (2015)
2. T. A. Aaltonen, K. Hara, S.H. Kim, K. Sato, Y. Takeuchi, F. Ukegawa *et al.* [CDF Collaboration],
“Measurement of the Production and Differential Cross Sections of W^+W^- Bosons

- in Association with Jets in $p\bar{p}$ Collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,”
 Phys. Rev. D **91**, 111101 (2015) Addendum: [Phys. Rev. D **92**, no. 3, 039901 (2015)]
3. T. Aaltonen, K. Hara, S.H. Kim, K. Sato, Y. Takeuchi, F. Ukegawa *et al.* [CDF Collaboration],
 “Measurement of the top-quark mass in the $t\bar{t}$ dilepton channel using the full CDF Run II data set,”
 Phys. Rev. D **92**, 032003 (2015)
 4. T. A. Aaltonen, K. Hara, S.H. Kim, K. Sato, Y. Takeuchi, F. Ukegawa *et al.* [CDF Collaboration],
 “First measurement of the forward-backward asymmetry in bottom-quark pair production at high mass,”
 Phys. Rev. D **92**, 032006 (2015)
 5. T. A. Aaltonen, K. Hara, S.H. Kim, K. Sato, Y. Takeuchi, F. Ukegawa *et al.* [CDF Collaboration],
 “Search for Resonances Decaying to Top and Bottom Quarks with the CDF Experiment,”
 Phys. Rev. Lett. **115**, 061801 (2015)
 6. T. A. Aaltonen, K. Hara, S.H. Kim, K. Sato, Y. Takeuchi, F. Ukegawa *et al.* [CDF and D0 Collaborations],
 “Tevatron Combination of Single-Top-Quark Cross Sections and Determination of the Magnitude of the Cabibbo-Kobayashi-Maskawa Matrix Element \mathbf{V}_{tb} ,”
 Phys. Rev. Lett. **115**, 152003 (2015)
 7. T. A. Aaltonen, K. Hara, S.H. Kim, K. Sato, Y. Takeuchi, F. Ukegawa *et al.* [CDF Collaboration],
 “Measurement of central exclusive $\pi^+\pi^-$ production in $p\bar{p}$ collisions at $\sqrt{s} = 0.9$ and 1.96 TeV at CDF,”
 Phys. Rev. D **91**, 091101 (2015)
 8. T. Aaltonen, K. Hara, S.H. Kim, K. Sato, Y. Takeuchi, F. Ukegawa *et al.* [CDF and D0 Collaborations],
 “Tevatron Constraints on Models of the Higgs Boson with Exotic Spin and Parity Using Decays to Bottom-Antibottom Quark Pairs,”
 Phys. Rev. Lett. **114**, 151802 (2015)
 9. T. A. Aaltonen, K. Hara, S.H. Kim, K. Sato, Y. Takeuchi, F. Ukegawa *et al.* [CDF Collaboration],
 “Constraints on Models of the Higgs Boson with Exotic Spin and Parity using Decays to Bottom-Antibottom Quarks in the Full CDF Data Set,”
 Phys. Rev. Lett. **114**, 141802 (2015)
 10. T. Aaltonen, K. Hara, S.H. Kim, K. Sato, Y. Takeuchi, F. Ukegawa *et al.* [CDF Collaboration],

- “Search for production of an $\Upsilon(1S)$ meson in association with a W or Z boson using the full 1.96 TeV $p\bar{p}$ collision data set at CDF,”
 Phys. Rev. D **91**, 052011 (2015)
11. T. A. Aaltonen, K. Hara, S.H. Kim, K. Sato, Y. Takeuchi, F. Ukegawa *et al.* [CDF Collaboration],
 “Measurement of differential production cross section for Z/γ^* bosons in association with jets in $p\bar{p}$ collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,”
 Phys. Rev. D **91**, 012002 (2015)
 12. T. A. Aaltonen, K. Hara, S.H. Kim, K. Sato, Y. Takeuchi, F. Ukegawa *et al.* [CDF Collaboration],
 “Studies of high-transverse momentum jet substructure and top quarks produced in 1.96 TeV proton-antiproton collisions,”
 Phys. Rev. D **91**, 032006 (2015)
 13. 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)
 14. 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 $\bar{p}p$ collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,”
 Phys. Rev. D **93**, 052012 (2016)
 15. T. A. Aaltonen, K. Hara, S.H. Kim, K. Sato, Y. Takeuchi, F. Ukegawa *et al.* [CDF Collaboration],
 “Measurement of the Single Top Quark Production Cross Section and $|V_{tb}|$ in 1.96 TeV $p\bar{p}$ Collisions with Missing Transverse Energy and Jets and Final CDF combination,”
 Phys. Rev. D **93**, 032011 (2016)
 16. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Measurement of four-jet differential cross sections in $\sqrt{s} = 8$ TeV proton-proton collisions using the ATLAS detector,”
 JHEP **1512**, 105 (2015)
 17. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Search for flavour-changing neutral current top quark decays $t \rightarrow Hq$ in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector,”
 JHEP **1512**, 061 (2015)

18. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Measurement of the $t\bar{t}W$ and $t\bar{t}Z$ production cross sections in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector,”
 JHEP **1511**, 172 (2015)
19. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Searches for Higgs boson pair production in the $hh \rightarrow bb\tau\tau, \gamma\gamma WW^*, \gamma\gamma bb, bbbb$ channels with the ATLAS detector,”
 Phys. Rev. D **92**, 092004 (2015)
20. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Search for pair production of a new heavy quark that decays into a W boson and a light quark in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector,”
 Phys. Rev. D **92**, 112007 (2015)
21. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Constraints on new phenomena via Higgs boson couplings and invisible decays with the ATLAS detector,”
 JHEP **1511**, 206 (2015)
22. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Summary of the ATLAS experiment’s sensitivity to supersymmetry after LHC Run 1 - interpreted in the phenomenological MSSM,”
 JHEP **1510**, 134 (2015)
23. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Search for lepton-flavour-violating $H \rightarrow \mu\tau$ decays of the Higgs boson with the ATLAS detector,”
 JHEP **1511**, 211 (2015)
24. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Measurement of transverse energy-energy correlations in multi-jet events in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV using the ATLAS detector and determination of the strong coupling constant $\alpha_s(m_Z)$,”
 Phys. Lett. B **750**, 427 (2015)
25. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Determination of the ratio of b -quark fragmentation fractions f_s/f_d in pp collisions

- at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector,”
 Phys. Rev. Lett. **115**, 262001 (2015)
26. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Measurement of the branching ratio $\Gamma(\Lambda_b^0 \rightarrow \psi(2S)\Lambda^0)/\Gamma(\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi\Lambda^0)$ with the ATLAS detector,”
 Phys. Lett. B **751**, 63 (2015)
 27. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Z boson production in p +Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV measured with the ATLAS detector,”
 Phys. Rev. C **92**, 044915 (2015)
 28. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Summary of the searches for squarks and gluinos using $\sqrt{s} = 8$ TeV pp collisions with the ATLAS experiment at the LHC,”
 JHEP **1510**, 054 (2015)
 29. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Search for photonic signatures of gauge-mediated supersymmetry in 8 TeV pp collisions with the ATLAS detector,”
 Phys. Rev. D **92**, 072001 (2015)
 30. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Determination of the top-quark pole mass using $t\bar{t} + 1$ -jet events collected with the ATLAS experiment in 7 TeV pp collisions,”
 JHEP **1510**, 121 (2015)
 31. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Measurement of the production of neighbouring jets in lead-lead collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV with the ATLAS detector,”
 Phys. Lett. B **751**, 376 (2015)
 32. G. Aad, K. Hara, 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)]
 33. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Measurement of exclusive $\gamma\gamma \rightarrow \ell^+\ell^-$ production in proton-proton collisions at

- $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector,”
Phys. Lett. B **749**, 242 (2015)
34. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
“Study of (W/Z)H production and Higgs boson couplings using $H \rightarrow WW^*$ decays with the ATLAS detector,”
JHEP **1508**, 137 (2015)
35. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
“Search for heavy Majorana neutrinos with the ATLAS detector in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV,”
JHEP **1507**, 162 (2015)
36. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
“Search for the associated production of the Higgs boson with a top quark pair in multilepton final states with the ATLAS detector,”
Phys. Lett. B **749**, 519 (2015)
37. G. Aad, K. Hara, 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)]
38. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
“Measurement of colour flow with the jet pull angle in $t\bar{t}$ events using the ATLAS detector at $\sqrt{s} = 8$ TeV,”
Phys. Lett. B **750**, 475 (2015)
39. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
“Modelling $Z \rightarrow \tau\tau$ processes in ATLAS with τ -embedded $Z \rightarrow \mu\mu$ data,”
JINST **10**, P09018 (2015)
40. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
“Search for metastable heavy charged particles with large ionisation energy loss in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV using the ATLAS experiment,”
Eur. Phys. J. C **75**, 407 (2015)
41. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
“Measurements of the top quark branching ratios into channels with leptons and

- quarks with the ATLAS detector,”
 Phys. Rev. D **92**, 072005 (2015)
42. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Search for type-III Seesaw heavy leptons in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS Detector,”
 Phys. Rev. D **92**, 032001 (2015)
43. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Search for heavy lepton resonances decaying to a Z boson and a lepton in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector,”
 JHEP **1509**, 108 (2015)
44. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Search for Dark Matter in Events with Missing Transverse Momentum and a Higgs Boson Decaying to Two Photons in pp Collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS Detector,”
 Phys. Rev. Lett. **115**, 131801 (2015)
45. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Search for high-mass diboson resonances with boson-tagged jets in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector,”
 JHEP **1512**, 055 (2015)
46. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Search for Higgs boson pair production in the $b\bar{b}b\bar{b}$ final state from pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector,”
 Eur. Phys. J. C **75**, 412 (2015)
47. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Measurement of differential J/ψ production cross sections and forward-backward ratios in p + Pb collisions with the ATLAS detector,”
 Phys. Rev. C **92**, 034904 (2015)
48. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Search for new light gauge bosons in Higgs boson decays to four-lepton final states in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector at the LHC,”
 Phys. Rev. D **92**, 092001 (2015)
49. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],

- “A search for $t\bar{t}$ resonances using lepton-plus-jets events in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector,”
JHEP **1508**, 148 (2015)
50. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Search for production of vector-like quark pairs and of four top quarks in the lepton-plus-jets final state in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector,”
JHEP **1508**, 105 (2015)
51. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Search for Higgs bosons decaying to aa in the $\mu\mu\tau\tau$ final state in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS experiment,”
Phys. Rev. D **92**, 052002 (2015)
52. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Measurements of the Total and Differential Higgs Boson Production Cross Sections Combining the $H \rightarrow \gamma\gamma$ and $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4\ell$ Decay Channels at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS Detector,”
Phys. Rev. Lett. **115**, 091801 (2015)
53. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Search for high-mass diphoton resonances in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector,”
Phys. Rev. D **92**, 032004 (2015)
54. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Search for massive, long-lived particles using multitrack displaced vertices or displaced lepton pairs in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector,”
Phys. Rev. D **92**, 072004 (2015)
55. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Analysis of events with b -jets and a pair of leptons of the same charge in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector,”
JHEP **1510**, 150 (2015)
56. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Measurement of charged-particle spectra in Pb+Pb collisions at $\sqrt{s_r mNN} = 2.76$ TeV with the ATLAS detector at the LHC,”
JHEP **1509**, 050 (2015)

57. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Search for invisible decays of the Higgs boson produced in association with a hadronically decaying vector boson in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector,”
 Eur. Phys. J. C **75**, 337 (2015)
58. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Measurement of the top pair production cross section in 8 TeV proton-proton collisions using kinematic information in the lepton+jets final state with ATLAS,”
 Phys. Rev. D **91**, 112013 (2015)
59. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Search for heavy long-lived multi-charged particles in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV using the ATLAS detector,”
 Eur. Phys. J. C **75**, 362 (2015)
60. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Search for long-lived, weakly interacting particles that decay to displaced hadronic jets in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector,”
 Phys. Rev. D **92**, 012010 (2015)
61. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Measurement of the correlation between flow harmonics of different order in lead-lead collisions at $\sqrt{s_{NN}}=2.76$ TeV with the ATLAS detector,”
 Phys. Rev. C **92**, 034903 (2015)
62. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Search for New Phenomena in Dijet Angular Distributions in Proton-Proton Collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV Measured with the ATLAS Detector,”
 Phys. Rev. Lett. **114**, 221802 (2015)
63. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Search for low-scale gravity signatures in multi-jet final states with the ATLAS detector at $\sqrt{s} = 8$ TeV,”
 JHEP **1507**, 032 (2015)
64. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Search for a new resonance decaying to a W or Z boson and a Higgs boson in the

- $l\bar{l}/l\nu/\nu\nu + b\bar{b}$ final states with the ATLAS detector,”
Eur. Phys. J. C **75**, 263 (2015)
65. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS and CMS Collaborations],
“Combined Measurement of the Higgs Boson Mass in pp Collisions at $\sqrt{s} = 7$ and 8 TeV with the ATLAS and CMS Experiments,”
Phys. Rev. Lett. **114**, 191803 (2015)
66. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
“Measurement of the top quark mass in the $t\bar{t} \rightarrow$ lepton+jets and $t\bar{t} \rightarrow$ dilepton channels using $\sqrt{s} = 7$ TeV ATLAS data,”
Eur. Phys. J. C **75**, 330 (2015)
67. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
“Search for vector-like B quarks in events with one isolated lepton, missing transverse momentum and jets at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector,”
Phys. Rev. D **91**, 112011 (2015)
68. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
“Search for the Standard Model Higgs boson produced in association with top quarks and decaying into $b\bar{b}$ in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector,”
Eur. Phys. J. C **75**, 349 (2015)
69. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
“Search for production of WW/WZ resonances decaying to a lepton, neutrino and jets in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector,”
Eur. Phys. J. C **75**, 209 (2015) Erratum: [Eur. Phys. J. C **75**, 370 (2015)]
70. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
“Search for a Heavy Neutral Particle Decaying to $e\mu$, $e\tau$, or $\mu\tau$ in pp Collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS Detector,”
Phys. Rev. Lett. **115**, 031801 (2015)
71. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
“Search for a Charged Higgs Boson Produced in the Vector-Boson Fusion Mode with Decay $H^\pm \rightarrow W^\pm Z$ using pp Collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS Experiment,”
Phys. Rev. Lett. **114**, 231801 (2015)
72. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
“Measurement of the forward-backward asymmetry of electron and muon pair-production

in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector,”
JHEP **1509**, 049 (2015)

73. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
“Determination of spin and parity of the Higgs boson in the $WW^* \rightarrow e\nu\mu\nu$ decay channel with the ATLAS detector,”
Eur. Phys. J. C **75**, 231 (2015)
74. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
“Search for supersymmetry in events containing a same-flavour opposite-sign dilepton pair, jets, and large missing transverse momentum in $\sqrt{s} = 8$ TeV pp collisions with the ATLAS detector,”
Eur. Phys. J. C **75**, 318 (2015) Erratum: [Eur. Phys. J. C **75**, 463 (2015)]
75. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
“Evidence of $W\gamma\gamma$ Production in pp Collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV and Limits on Anomalous Quartic Gauge Couplings with the ATLAS Detector,”
Phys. Rev. Lett. **115**, 031802 (2015)
76. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
“Constraints on the off-shell Higgs boson signal strength in the high-mass ZZ and WW final states with the ATLAS detector,”
Eur. Phys. J. C **75**, 335 (2015)
77. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
“Two-particle Bose-Einstein correlations in pp collisions at $\sqrt{s} = 0.9$ and 7 TeV measured with the ATLAS detector,”
Eur. Phys. J. C **75**, 466 (2015)
78. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
“A search for high-mass resonances decaying to $\tau^+\tau^-$ in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector,”
JHEP **1507**, 157 (2015)
79. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
“Differential top-antitop cross-section measurements as a function of observables constructed from final-state particles using pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV in the ATLAS detector,”
JHEP **1506**, 100 (2015)
80. G. Aad, K. Hara, 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)]
81. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Search for a CP-odd Higgs boson decaying to Zh in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector,”
 Phys. Lett. B **744**, 163 (2015)
82. G. Aad, K. Hara, 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 $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector,”
 Eur. Phys. J. C **75**, 299 (2015) Erratum: [Eur. Phys. J. C **75**, 408 (2015)]
83. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Observation of top-quark pair production in association with a photon and measurement of the $t\bar{t}\gamma$ production cross section in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV using the ATLAS detector,”
 Phys. Rev. D **91**, 072007 (2015)
84. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Measurement of the charge asymmetry in dileptonic decays of top quark pairs in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV using the ATLAS detector,”
 JHEP **05**, 061 (2015)
85. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Search for direct pair production of a chargino and a neutralino decaying to the 125 GeV Higgs boson in $\sqrt{s} = 8$ TeV pp collisions with the ATLAS detector,”
 Eur. Phys. J. C **75**, 208 (2015)
86. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Evidence for the Higgs-boson Yukawa coupling to tau leptons with the ATLAS detector,”
 JHEP **1504**, 117 (2015)
87. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Search for pair-produced long-lived neutral particles decaying in the ATLAS hadronic calorimeter in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV,”
 Phys. Lett. B **743**, 15 (2015)
88. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],

- “Search for squarks and gluinos in events with isolated leptons, jets and missing transverse momentum at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector,”
JHEP **1504**, 116 (2015)
89. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Search for Higgs and Z Boson Decays to $J/\psi\gamma$ and $\Upsilon(nS)\gamma$ with the ATLAS Detector,”
Phys. Rev. Lett. **114**, 121801 (2015)
90. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Search for Scalar Charm Quark Pair Production in pp Collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS Detector,”
Phys. Rev. Lett. **114**, 161801 (2015)
91. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Identification and energy calibration of hadronically decaying tau leptons with the ATLAS experiment in pp collisions at $\sqrt{s}=8$ TeV,”
Eur. Phys. J. C **75**, 303 (2015)
92. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Search for charged Higgs bosons decaying via $H^\pm \rightarrow \tau^\pm\nu$ in fully hadronic final states using pp collision data at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector,”
JHEP **1503**, 088 (2015)
93. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Observation and measurements of the production of prompt and non-prompt J/ψ mesons in association with a Z boson in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector,”
Eur. Phys. J. C **75**, 229 (2015)
94. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Measurement of Spin Correlation in Top-Antitop Quark Events and Search for Top Squark Pair Production in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV Using the ATLAS Detector,”
Phys. Rev. Lett. **114**, 142001 (2015)
95. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Centrality and rapidity dependence of inclusive jet production in $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV proton-lead collisions with the ATLAS detector,”
Phys. Lett. B **748**, 392 (2015)
96. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],

- “Observation and measurement of Higgs boson decays to WW^* with the ATLAS detector,”
 Phys. Rev. D **92**, 012006 (2015)
97. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Measurement of the transverse polarization of Λ and $\bar{\Lambda}$ hyperons produced in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV using the ATLAS detector,”
 Phys. Rev. D **91**, 032004 (2015)
98. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Search for anomalous production of prompt same-sign lepton pairs and pair-produced doubly charged Higgs bosons with $\sqrt{s} = 8$ TeV pp collisions using the ATLAS detector,”
 JHEP **1503**, 041 (2015)
99. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Searches for heavy long-lived charged particles with the ATLAS detector in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV,”
 JHEP **1501**, 068 (2015)
100. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Search for new phenomena in events with three or more charged leptons in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector,”
 JHEP **1508**, 138 (2015)
101. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Measurements of the Nuclear Modification Factor for Jets in Pb+Pb Collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV with the ATLAS Detector,”
 Phys. Rev. Lett. **114**, 072302 (2015)
102. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Measurement of three-jet production cross-sections in pp collisions at 7 TeV centre-of-mass energy using the ATLAS detector,”
 Eur. Phys. J. C **75**, 228 (2015)
103. G. Aad, K. Hara, 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 $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector,”
 Phys. Rev. D **91**, 012008 (2015) Erratum: [Phys. Rev. D **92**, 059903 (2015)]
104. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Measurement of the inclusive jet cross-section in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV using 4.5 fb^{-1} of data with the ATLAS detector,”
 JHEP **1502**, 153 (2015) Erratum: [JHEP **1509**, 141 (2015)]

105. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Measurement of the $WW + WZ$ cross section and limits on anomalous triple gauge couplings using final states with one lepton, missing transverse momentum, and two jets with the ATLAS detector at $\sqrt{s} = 7$ TeV,”
 JHEP **1501**, 049 (2015)
106. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Search for invisible particles produced in association with single-top-quarks in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector,”
 Eur. Phys. J. C **75**, 79 (2015)
107. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Search for the X_b and other hidden-beauty states in the $\pi^+\pi^-\Upsilon(1S)$ channel at ATLAS,”
 Phys. Lett. B **740**, 199 (2015)
108. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Search for $W' \rightarrow t\bar{b}$ in the lepton plus jets final state in proton-proton collisions at a centre-of-mass energy of $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector,”
 Phys. Lett. B **743**, 235 (2015)
109. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Search for dark matter in events with heavy quarks and missing transverse momentum in pp collisions with the ATLAS detector,”
 Eur. Phys. J. C **75**, 92 (2015)
110. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Search for s -channel single top-quark production in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector,”
 Phys. Lett. B **740**, 118 (2015)
111. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Measurements of the W production cross sections in association with jets with the ATLAS detector,”
 Eur. Phys. J. C **75**, 82 (2015)
112. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Search for the $b\bar{b}$ decay of the Standard Model Higgs boson in associated $(W/Z)H$ production with the ATLAS detector,”
 JHEP **1501**, 069 (2015)
113. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Search for resonant diboson production in the $\ell\ell q\bar{q}$ final state in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector,”
 Eur. Phys. J. C **75**, 69 (2015)
114. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Search for $H \rightarrow \gamma\gamma$ produced in association with top quarks and constraints on the

- Yukawa coupling between the top quark and the Higgs boson using data taken at 7 TeV and 8 TeV with the ATLAS detector,”
 Phys. Lett. B **740**, 222 (2015)
115. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Measurement of the top-quark mass in the fully hadronic decay channel from ATLAS data at $\sqrt{s} = 7$ TeV,”
 Eur. Phys. J. C **75**, 158 (2015)
116. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Measurements of Higgs boson production and couplings in the four-lepton channel in pp collisions at center-of-mass energies of 7 and 8 TeV with the ATLAS detector,”
 Phys. Rev. D **91**, 012006 (2015)
117. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Measurement of the production and lepton charge asymmetry of W bosons in Pb+Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV with the ATLAS detector,”
 Eur. Phys. J. C **75**, 23 (2015)
118. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Performance of the ATLAS muon trigger in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV,”
 Eur. Phys. J. C **75**, 120 (2015)
119. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Search for $W' \rightarrow tb \rightarrow qqbb$ decays in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector,”
 Eur. Phys. J. C **75**, 165 (2015)
120. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Search for new phenomena in the dijet mass distribution using $p - p$ collision data at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector,”
 Phys. Rev. D **91**, 052007 (2015)
121. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Measurement of the $t\bar{t}$ production cross-section as a function of jet multiplicity and jet transverse momentum in 7 TeV proton-proton collisions with the ATLAS detector,”
 JHEP **1501**, 020 (2015)
122. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Simultaneous measurements of the $t\bar{t}$, W^+W^- , and $Z/\gamma^* \rightarrow \tau\tau$ production cross-sections in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector,”
 Phys. Rev. D **91**, 052005 (2015)
123. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Search For Higgs Boson Pair Production in the $\gamma\gamma b\bar{b}$ Final State using pp Collision Data at $\sqrt{s} = 8$ TeV from the ATLAS Detector,”
 Phys. Rev. Lett. **114**, 081802 (2015)

124. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
“Jet energy measurement and its systematic uncertainty in proton-proton collisions
at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector,”
Eur. Phys. J. C **75**, 17 (2015)
125. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
“Measurements of $W\gamma$ and $Z\gamma$ production in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the
ATLAS detector at the LHC,”
Phys. Rev. D **87**, 112003 (2013) Erratum: [Phys. Rev. D **91**, 119901 (2015)]
126. K. Nakamura, K. Hara *et al.*, “Irradiation and testbeam of KEK/HPK planar p-type
pixle modules for HL-LHC”,
JINST 10 C06008 (2015).
127. I. Kurachi, K. Hara *et al.*, “Analysis of Effective Gate Length Modulation by X-Ray
Irradiation for Fully Depleted SOI p-MOSFETs”,
IEEE Trans Electron Devices 62-8 (2015) 2371-2376.

(2) 学会・研究会での講演（国内）

1. 八木俊輔：ニュートリノ崩壊光探索のための超伝導検出器開発，
第5回高エネルギー春の学校 2015（2015年6月10-12日），天津市びわこクラブ。
2. 武内勇司：可視～遠赤外域単一光子検出のための半導体・超伝導複合型検出器 (SOI-STJ) の開発（ポスター発表），
第一回光・量子計測シンポジウム（2015年9月9日），茨城県つくば市エポカルつくば。
3. 大川英希：LHC-ATLAS 実験 Run-2 における Missing E_T の再構成，
日本物理学会 2015 年秋季大会（2015 年 9 月 25-28 日），大阪市立大学。
4. 萩原睦人：アトラス実験の Run2 におけるシリコンストリップ検出器 (SCT) の全空
乏化電圧の経年変化，
日本物理学会 2015 年秋季大会（2015 年 9 月 25-28 日），大阪市立大学。
5. 関川大介：2 層埋込酸化膜構造をもつ SOI ピクセル検出器のクロストーク特性評価，
日本物理学会 2015 年秋季大会（2015 年 9 月 25-28 日），大阪市立大学。
6. 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，
日本物理学会 2015 年秋季大会（2015 年 9 月 25-28 日），大阪市立大学。
7. 佐藤和之：ミューオン透過法による大規模構造体内部撮像に用いるシンチレーター検
出器 (III)，
日本物理学会 2015 年秋季大会（大阪市大，2015 年 9 月 25 日）。
8. 木内健司：Development of Superconducting-Tunnel-Junction Single-Photon-Detectors
Integrated with FD-SOI MOSFET Amplifiers，
新学術領域研究「ニュートリノフロンティア」研究会 2015（2015 年 12 月 1-3 日），静
岡県熱海市ニューウェルシティー湯河原。

9. 森内航也：Performance evaluation of Nb/Al-STJ fabricated at CRAVITY, 新学術領域研究「ニュートリノフロンティア」研究会 2015 (2015年12月1-3日), 静岡県熱海市ニューウェルシティー湯河原.
10. 原和彦: 2層 SOI センサーの放射線耐性の評価, 第5回新学術領域研究会 (静岡大学, 2015年12月2日). (招待講演)
11. 受川史彦：素粒子構造部門 成果報告, 第2回 CiRfSE ワークショップ (2016年1月18-19日), 筑波大学.
12. 武内勇司：ニュートリノ崩壊探索概要, 第2回 CiRfSE ワークショップ (2016年1月18-19日), 筑波大学.
13. 武政健一：Hf-STJ 開発, 第2回 CiRfSE ワークショップ (2016年1月18-19日), 筑波大学.
14. 木内健司：SOI 極低温アンプ設計, 第2回 CiRfSE ワークショップ (2016年1月18-19日), 筑波大学.
15. 先崎蓮：SOI-STJ4 評価, 第2回 CiRfSE ワークショップ (2016年1月18-19日), 筑波大学.
16. 森内航也：CRAVITY 製 Nb/Al-STJ 評価, 第2回 CiRfSE ワークショップ (2016年1月18-19日), 筑波大学.
17. 佐藤構二：ATLAS 実験の概要, 第2回 CiRfSE ワークショップ (2016年1月18-19日), 筑波大学.
18. 大川英希：AATLAS 実験におけるダイボゾン共鳴状態の探索, 第2回 CiRfSE ワークショップ (2016年1月18-19日), 筑波大学.
19. 永田和樹：ATLAS 実験における荷電ヒッグス粒子の探索, 第2回 CiRfSE ワークショップ (2016年1月18-19日), 筑波大学.
20. 淵 遼亮：ATLAS 実験におけるヒッグス粒子対生成の探索, 第2回 CiRfSE ワークショップ (2016年1月18-19日), 筑波大学.
21. 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2回 CiRfSE ワークショップ (2016年1月18-19日), 筑波大学.
22. 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2回 CiRfSE ワークショップ (2016年1月18-19日), 筑波大学.
23. 武内勇司：超伝導検出器と SOI 極低温アンプ, 第1回光量子計測器ワークショップ (2016年3月2日) 筑波大学.
24. 永田和樹: LHC-ATLAS 実験 Run1 における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, 日本物理学会第71回年次大会 (2016年3月19-22日), 東北学院大学.

25. 伊藤史哲: LHC-ATLAS 実験 Run2 における $WH \rightarrow \ell\nu b\bar{b}$ 崩壊過程でのトップクォーク対背景事象除去の改善,
日本物理学会第 71 回年次大会 (2016 年 3 月 19–22 日), 東北学院大学.
26. 笠原宏太: LLHC-ATLAS 実験における $Z + \text{Missing } E_T$ チャンネルを用いた標準模型を超える物理の探索,
日本物理学会第 71 回年次大会 (2016 年 3 月 19–22 日), 東北学院大学.
27. 佐藤和之: HL-LHC 実験 ATLAS 検出器のアップグレードに向けた精密ピクセル検出器の開発,
日本物理学会第 71 回年次大会 (2016 年 3 月 19–22 日), 東北学院大学.
28. 岩淵周平: HL-LHC アトラス実験に用いるシリコンストリップ検出器の放射線損傷および長期アニーリング特性の評価,
日本物理学会第 71 回年次大会 (2016 年 3 月 19–22 日), 東北学院大学.
29. 関川大介: 高エネルギー実験にむけた 2 層埋込酸化膜構造をもつ SOI ピクセル 検出器の放射線耐性評価,
日本物理学会第 71 回年次大会 (2016 年 3 月 19–22 日), 東北学院大学.
30. 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,
日本物理学会第 71 回年次大会 (2016 年 3 月 19–22 日), 東北学院大学.
31. 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,
日本物理学会第 71 回年次大会 (2016 年 3 月 19–22 日), 東北学院大学.
32. 武政健一: ニュートリノ崩壊光探索のための Hf-STJ の研究開発,
日本物理学会第 71 回年次大会 (2016 年 3 月 19–22 日), 東北学院大学.
33. 森内航也: ニュートリノ崩壊光探索のための Nb/Al-STJ の研究開発,
日本物理学会第 71 回年次大会 (2016 年 3 月 19–22 日), 東北学院大学.
34. 武内勇司: 超伝導遠赤外センサーの開発 (シンポジウム「光センサー: 単一光子検出の最前線」),
日本物理学会第 71 回年次大会 (2016 年 3 月 19–22 日), 東北学院大学.
35. 高橋和希: シンチレーター検出器を用いた水平方向から飛来した宇宙線ミューオンの測定
日本物理学会第 71 回年次大会 (2016 年 3 月 19–22 日), 東北学院大学.

(3) 国際会議・研究会での口頭発表

1. Y. Takeuchi *et al.*, “Development of Superconducting Tunnel Junction Detectors as a Far Infrared Photon-By-Photon Spectrometer for Neutrino Decay Search”,
2015 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC), May 11 – 14, 2015, Pisa, Italy

2. S. Honda, K. Hara *et al.*, ‘Evaluations of TID-Effect Compensation and Sensor-Circuit Cross-Talk Suppression in Double-SOI Devices’, International Workshop on SOI Pixel Detector (SOIPIX2015), June 3 – 6, 2015, Sendai, Japan.
3. K. Kiuchi *et al.*, “Development FD-SOI MOSFET amplifiers for integrated read-out circuit of superconducting-tunnel-junction single-photon-detectors”, International Workshop on SOI Pixel Detector (SOIPIX2015), June 3 – 6, 2015, Sendai, Japan.
4. H. Okawa, “Higgs Boson & Flavors at the ATLAS & CMS Experiments,” SUSY 2015, Aug. 23 – 29, 2015, Lake Tahoe, USA.
5. K. Hara, K. Sato *et al.*, “Charge collection and field profile studies of heavily irradiated strip sensors for the ATLAS inner tracker upgrade”, 10th International Symposium on the Development and Application of Semiconductor Tracking detectors (HSTD10) , Sept. 25 – 29, 2015, Xi’an, China.
6. H. Okawa, “Searches for diboson resonances at the LHC-ATLAS experiment”, Tsukuba Global Science Week 2015 (TGSW2015), Sept. 28 – 30, 2015, EPOCHAL Tsukuba, Tsukuba-shi, Japan
7. Y. Takeuchi *et al.*, “Development of far-infrared single-photon spectrometers based on superconducting tunnel junction for search for the cosmic background neutrino decay”, Tsukuba Global Science Week 2015 (TGSW2015), Sept. 28 – 30, 2015, EPOCHAL Tsukuba, Tsukuba-shi, Japan
8. K. Kiuchi *et al.*, “Development of Superconducting-Tunnel-Junction Single-Photon-Detectors Integrated with FD-SOI MOSFET Amplifiers”, 2015 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference (NSS/MIC), Oct. 31 – Nov. 7, 2015, San Diego, USA.
9. K. Hara *et al.*, “Development of Fine Pixel Detector for HEP Experiments Based on Innovative Double SOI Technology”, 2015 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference (NSS/MIC), Oct. 31 – Nov. 7, 2015, San Diego, USA.

(4) 国際会議・研究会でのポスター発表

1. M. Asano, K. Hara *et al.*, “Characteristics of non-irradiated and irradiated double SOI integration type sensor”, International Workshop on SOI Pixel Detector (SOIPIX2015), June 3 – 6, 2015, Sendai, Japan.
2. N. Tobita, K. Hara *et al.*, “Bias Dependence of TID Effect Compensation in Double SOI”,

International Workshop on SOI Pixel Detector (SOIPIX2015), June 3 – 6, 2015, Sendai, Japan.

3. R. Senzaki *et al.*, “R&D status of FD-SOI Cold Amplifier”, Interdisciplinary Workshop on Science and Patents (IWP) 2015, Sept. 4, 2015, Univ. of Tsukuba, Japan
4. K. Takemasa *et al.*, “Development of Superconducting Tunnel Junction Detector using Hafnium (Hf-STJ)”, Interdisciplinary Workshop on Science and Patents (IWP) 2015, Sept. 4, 2015, Univ. of Tsukuba, Japan
5. K. Moriuchi *et al.*, “Development of Superconducting Tunnel Junction photon detector using Niobium and Aluminum (Nb/Al-STJ)”, Interdisciplinary Workshop on Science and Patents (IWP) 2015, Sept. 4, 2015, Univ. of Tsukuba, Japan
6. M. Asano, K. Hara *et al.*, “Characteristics of non-irradiated and irradiated double SOI integration type pixel sensors”, 10th International Symposium on the Development and Application of Semiconductor Tracking detectors (HSTD10), Sept. 25 – 29, 2015, Xi’an China.
7. K. Sato, K. Hara, S. H. Kim *et al.*, “Detection of On-Surface Objects using an Underground Muon Radiography Detector System”, IEEE Nuclear Science Symposium, Oct. 31 – Nov. 7, 2015, San Diego, USA.

(5) 会議・研究会報告書

1. Y. Takeuchi *et al.*, “Development of Superconducting Tunnel Junction detectors as a far-infrared photon-by-photon spectrometer for neutrino decay search”, Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC), 2015 IEEE International, 551 - 555 (2015), DOI: 10.1109/I2MTC.2015.7151327
2. K. Kiuchi *et al.*, “Development FD-SOI MOSFET amplifiers for integrated read-out circuit of superconducting-tunnel-junction single-photon-detectors”, Proceedings of International Workshop on SOI Pixel Detector, FERMILAB-CONF-15-355-E-TD (2015), arXiv:1507.07424

(6) 学位論文

博士論文

筑波大学大学院数理物質科学研究科物理学専攻, 2016年2月

1. 瀧 遼亮: Search for Higgs boson pair production in the $hh \rightarrow b\bar{b}\tau^+\tau^-$ channel with the ATLAS detector (アトラス検出器におけるボトムクォーク及びタウレプトン対に崩壊するヒッグス粒子対生成の探索)

修士論文

筑波大学大学院数理物質科学研究科物理学専攻, 2016年2月

1. 浅野麻莉: 高エネルギー実験のための2層埋込酸化膜構造を持つSOIピクセル検出器の開発研究
2. 先崎 蓮: ニュートリノ崩壊光探索のための超伝導トンネル接合光検出器及び極低温増幅器の開発研究
3. 高橋和希: 大規模構造体内部透視に用いる低角度ミュー粒子飛来数及び運動量分布の測定
4. 飛田尚志: 二層埋込酸化膜構造を持つSOIピクセル検出器回路の放射線損傷の補償
5. 森内航也: ニュートリノ崩壊光探索実験のためのニオブとアルミニウムを用いた超伝導トンネル接合光検出器の性能評価

【構成員の異動】

2015年4月に木内健司が研究員として着任。

2016年3月に木内健司が理化学研究所に転出。

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	Wagner, Alexander
研究員	小松 勇 (学振 PD)
	行方 大輔 (HPCI 戦略)
	野村 真理子 (HPCI 戦略)
	三木 洋平 (CREST)
学生	大学院生 16名 、 学類生 8名

2. 概要

本年度、当グループは、活動銀河核トーラスのダスト昇華半径付近のガス構造とガスダイナミクスの研究、星団形成に関する3次元輻射流体力学による研究、初代ブラックホールの合体過程の研究、原始惑星系円盤の分子組成、原始惑星系円盤の形成過程、Cold dark matter halo における cusp-core 問題と too-big-to-fail 問題の関連性、アンドロメダ銀河のステラーハロー形成過程、活動銀河核アウトフローの輻射流体計算を行った。また、計算コード開発として、銀河の多成分力学平衡分布生成コードの開発、Vlasov-Poisson シミュレーションの高次精度化の研究、GPUを用いた重力多体計算コードの開発を進めた。さらに、宇宙生命計算科学連携として、原始惑星系円盤乱流中の微惑星形成、星間ダストにおけるアミノ酸生成、量子化学計算を用いた太陽以外の恒星周りの光合成への示唆の研究を行った。

3. 研究成果

【1】活動銀河核トーラスのダスト昇華半径付近のガス構造とガスダイナミクスの研究

活動銀河核(AGN)は銀河の形成・進化に大きな影響を与えてきたと考えられており、AGNの活動性の詳細な理解は、銀河形成を理解する上で欠かせない課題である。本研究はAGNの活動性の発現・維持機構に着目し、AGNダストトーラスから巨大ブラックホール降着円盤へのガス供給過程の解明を目指すものである。これに関係して、我々はガス供給がAGNの輻射で最も阻害される領域、すなわち、ダスト昇華半径付近でのガス構造、及び、そこからのアウトフロー率に関して、軸対称マルチグループ輻射流体計算を実施して調査を行った。その結果、以下の知見を得た：

(1) 準定常状態においては、ほぼ中性で、幾何学的に薄い、高密度なガス円盤がダスト昇華半径付近に形成され、円盤の表面から高速な($\sim 200\text{-}3000$ [km/s])アウトフローが吹く。

(2) アウトフロー率は、AGNのX線光度の割合やダストサイズに依存して、0.05-0.1[太陽質量/年]の範囲を取る。これは質量-エネルギー変換効率が0.1の場合のEddington質量降着率の20-40%程度に相当する。

(3) 銀河半径1[pc]以内におけるアウトフローの水素柱密度は約 10^{21} [cm^{-2}]である。

(4) AGNからの照射とダスト再放射だけでは、先行研究で提案されているような幾何学的に厚い遮蔽構造をダスト昇華半径付近に形成させるのは困難である。

上記の結果は、欧文雑誌に査読論文として受理され、現在印刷中である。

【2】 星団形成に関する3次元輻射流体力学による研究

非常に古い星団として知られる球状星団は、矮小楕円銀河といった他の低質量天体とともに階層的構造形成過程の初期段階に形成されたと考えられるが、球状星団は光度に対してより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。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次元の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。我々は、非一様密度構造を持つ低質量ガス雲 (10^6 太陽質量) 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、等方輻射場と違い日陰領域を伴った非等方性の強い自己遮蔽領域が形成されるものの、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 ~ 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。

【3】 初代ブラックホールの合体過程の研究

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。その種として初代星起源のBHを仮定した場合、ガスの質量降着で観測されている質量に達するためには常にEddington降着率を超えていなければならない。しかし、BHの合体が効率よく起これば、この制限は緩和される。第一世代天体形成の頃はガスが豊富であり、ガスによる力学的摩擦の効果が有効に働く可能性がある。これまで、3体より多いBHの合体過程の研究は唯一Tanikawa & Umemura (2014)で行われている。この計算では、銀河内に存在する恒星から受ける力学的摩擦を考慮し、BH合体が寡占的に起こることを示した。我々は、一般相対論効果を入れたポストニュートン

アンN体計算によって、第一世代天体形成期のガスによる力学的摩擦を考慮して、 $30M_{\odot}$ と 10^4M_{\odot} の10体のBHの合体過程の研究を行った。その結果、ガスによる力学的摩擦を取り入れると、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が分かった

(Tagawa, Umemura, et al 2015)。さらに、この研究を発展させ、ガス降着を伴う $30M_{\odot}$ BH多体系の計算を行った (Tagawa, Umemura, Gouda, 2015)。今年になって、LIGOによって $36^{+5.4}_{-4} M_{\odot}$ と $29^{+4.4}_{-4} M_{\odot}$ のブラックホールの合体による重力波が検出された (GW150914)。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 10^6cm^{-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、また数 M_{\odot} のガス降着があることがわかった。

【4】 原始惑星系円盤の分子組成

原始惑星系円盤は惑星系の母胎であり、そこでのガス、氷、ダストは惑星系の材料物質である。現在、ALMA望遠鏡により、円盤からのガス輝線の高空間分解能観測が行われている。TW Hya 周りの原始惑星系円盤では N_2H^+ のリング構造が発見された (Qi et al. 2013)。 N_2H^+ はCOとの反応で破壊されるので、 N_2H^+ のリング内縁はCO snow line (円盤中心面でのこの半径より内側ではCOが昇華する)に相当すると考えられる。しかし N_2H^+ の親分子である N_2 の昇華温度はCOの昇華温度に近く、CO snow lineの外側で N_2H^+ が多くなる条件などの定量的なモデルはなかった。そこで我々は反応ネットワークモデルを用いて、 N_2H^+ やCOの存在度を温度・密度・電離率の関数として解析的に求め、 N_2H^+ の存在度が確かにCO昇華の良い指標になること、さらに気相中のCOと電子の数密度比が $\sim 10^3$ の時に N_2H^+ の存在度が極大になることなどを示した。またALMAでの円盤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。

【5】 原始惑星系円盤の形成過程

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。円盤形成領域ではSO輝線はリング状の強度分布を示す一方、 C_3H_2 はSO輝線よりも外側の落下するガスをトレースするなど、分子組成が場所によって変わることがわかってきており、組成進化と物理構造・進化を同時に考える必要がある。我々は、今までに構築してきた原始星形成過程における分子組成進化モデルをもとに、ALMAでの円盤形成過程の観測的研究に共同研究者として貢献した。また、円盤形成を輻射流体力学計算によってシミュレーションした Tsukamoto et al. (2015)のモデルに基づき、円盤形成時のガスと氷の組成進化を調べた。

【6】 原始惑星系円盤乱流中の微惑星形成の研究

惑星形成過程において、ミクロンサイズのダストから微惑星に至るダストの集積・衝突・合体過程は、未だに解明されていない。微惑星形成過程では、原始惑星系円盤乱流が大きな影響

を与えると考えられているが、乱流中のダスト成長の確かなシナリオは得られていない。乱流によって運ばれるダスト(慣性粒子)の流体への追従性はダストサイズ(慣性の大きさ)に依存する。乱流の非線形性の強さはレイノルズ数 $Re = UL/\nu$ (U と L は乱流中のエネルギー保有渦の代表的な速さと大きさ、 ν は動粘性係数)、粒子の流体運動への追従性はストークス数 $St = \tau_p/\tau_\eta$ (τ_p は粒子の緩和時間、 τ_η は乱流中の最小渦のコルモゴロフ・タイムスケール) で表される。原始惑星円盤乱流の場合 $Re = O(10^{10})$ であり、大小の渦のスケール比は巨大である。また、 St の値は 0.01 程度から 100 以上にわたる。高レイノルズ数乱流の性質の理解にはナビエ・ストークス(NS)方程式の「第一原理計算」、すなわち微細な渦の動きまで解像する大規模な直接数値計算(DNS)が必要であるが、宇宙分野ではこれまで数値粘性による近似的なオイラー方程式の計算しか行われてこなかった。近年、流体分野では乱流 DNS を用いた粒子追跡計算が盛んであり、乱流による微粒子のクラスタリングや衝突促進などの第一原理計算が行われているが、これまでの計算は $Re < 10^4$ に限られ、原始惑星系円盤乱流中のダストの成長過程の本質的な解決には至っていない。我々は名古屋大学の乱流計算のグループと協働して、原始惑星系円盤乱流中の微惑星成長過程解明を目的とし、NS 方程式の大規模 DNS に基づく高 Re 乱流中の粒子追跡の大規模数値実験を進めている。最新の計算によれば、乱流構造は $Re \approx 10^4$ を超えたあたりから、質的な変化が現れ、渦糸から渦クラスターへ変化する。そして、慣性粒子は、渦クラスターの表面に集積する傾向を表す。また、ストークス数の大きな慣性粒子ほど、レイノルズ数が大きくなるにつれ、空間相関が強くなる傾向を見せる。これは、ダストの合体成長過程がレイノルズ数増加と共に加速することを表しており、ダストから微惑星形成に至る物理過程の解明にとって極めて重要な結果である。

【7】 Cold dark matter halo における cusp-core 問題と too-big-to-fail 問題の関連性

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 構造を予言するが、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解析をおこなった。その結果、振動の高波長モードが高いエネルギー輸送効率を示すことを見出した。

【8】 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の、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・ストリームを生成した母銀河の性質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、その性質に制限をつけることに成功した。その結果、母銀河は質量が 10^9 太陽質量程度の矮小銀河であり、その回転が観測されるアンドロメダ・ジャイアント・ストリームの形状を決定する重要な要因であることが分かった。

【9】 活動銀河核アウトフローの輻射流体計算

一部の活動銀河核(AGN)の輻射スペクトルに現れる、金属による青方偏移した吸収線はアウトフローの存在を示唆している。特に、X線スペクトル上の鉄吸収線は光速の10–30%もの速度で噴出する超高速アウトフローの存在を示唆している。このアウトフローは質量・エネルギー放出率が非常に大きいため、巨大ブラックホールと銀河の成長・進化に甚大な影響を及ぼしている可能性がある。しかしながらその加速メカニズムや構造はわかっていない。そこで、我々は有力モデルの一つである“ラインフォース駆動型円盤風”に着目し、この円盤風が超高速アウトフローの観測結果を再現できるか否かを調べた。ラインフォースとは降着円盤から放射された紫外光を金属元素が束縛-束縛遷移吸収する際に受ける力であり、物質の運動に起因するドップラーシフトにより、広範囲の波長にわたって輻射を吸収することができるため非常に加速効率が良い。我々はこのラインフォースを考慮した輻射流体シミュレーションを行い、以下のことを明らかにした。(1) ラインフォース加速による円盤風の速度は光速の約10%、(2) 極角 $\sim 75^\circ$ 度において、円盤風は超高速アウトフローの観測的特徴(高階電離状態、光速の10%程度の視線速度、 10^{23} cm^{-2} 程度の柱密度)を再現、(3) 超高速アウトフローの観測確率(アウトフローの特徴が現れる立体角/ 4π)は Eddington 比0.1以上の場合20-30%であり、観測と矛盾しない、(4) Eddington 比が0.01以下の場合、円盤風の噴出はなく、超高速アウトフローの特徴は現れない。以上の結果によって、我々は明るい活動銀河核に付随する超高速アウトフローがラインフォース駆動型円盤風で説明できる、ということを解明した。

【10】 銀河の多成分力学平衡分布生成コードの開発

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、これを力学平衡な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。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、こうした望ましい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な粒子分布として表現できる。また円盤成分については、天の川銀河のように厚い円盤と薄い円盤が共存する系を念頭に、厚さの異なる複数の円盤成分を持った粒子系を生成できるような実装になっている。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。

【11】 Vlasov—Poisson シミュレーションの高次精度化の研究

銀河・銀河団・宇宙大規模構造などの無衝突自己重力系の数値シミュレーションは従来より N 体シミュレーションによって行われてきたが、物理量を評価する際のショットノイズや速度分散が大きい成分の無衝突減衰を正確に取り扱えないという欠点があった。その欠点を克服する手段として、Vlasov 方程式を直接数値積分することによって 6 次元位相空間中の物質の分布関数を数値シミュレーションする手法を研究している。この手法では空間 3 次元・運動量空間 3 次元の合わせて 6 次元の情報をメモリに載せる必要があり、メッシュ数をあまり大きくできず、実効的な空間分解能が N 体シミュレーションなどと比較して良くない。そこで、我々は Vlasov 方程式の数値解法の高次精度化を行った。これまでに行われてきた手法に基づいて高次精度化を行うと数値解の安定性に影響が表れ、分布関数が負になる領域が現れたりすることが知られていたが、流速制限法を拡張することで分布関数の正值性を数学的に保証する手法を構築した。この正值化の手法を用いて、正值性を保証した空間 5 次精度及び 7 次精度の数値解法を構築した。

【12】 GPU を用いた重力多体計算コードの開発

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 コードを GPU を用いて高速化した。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を、図 1 に示した。直接法によって得られた重力からの誤差の関数として 1 ステップあたりの実行時間をプロットしたところ、先行研究でも採用されている一般的な実装 (図 1 中の◇) に比べて 5-10 倍程度の高速化が確認できた (図 1 中の赤塗りの丸)。

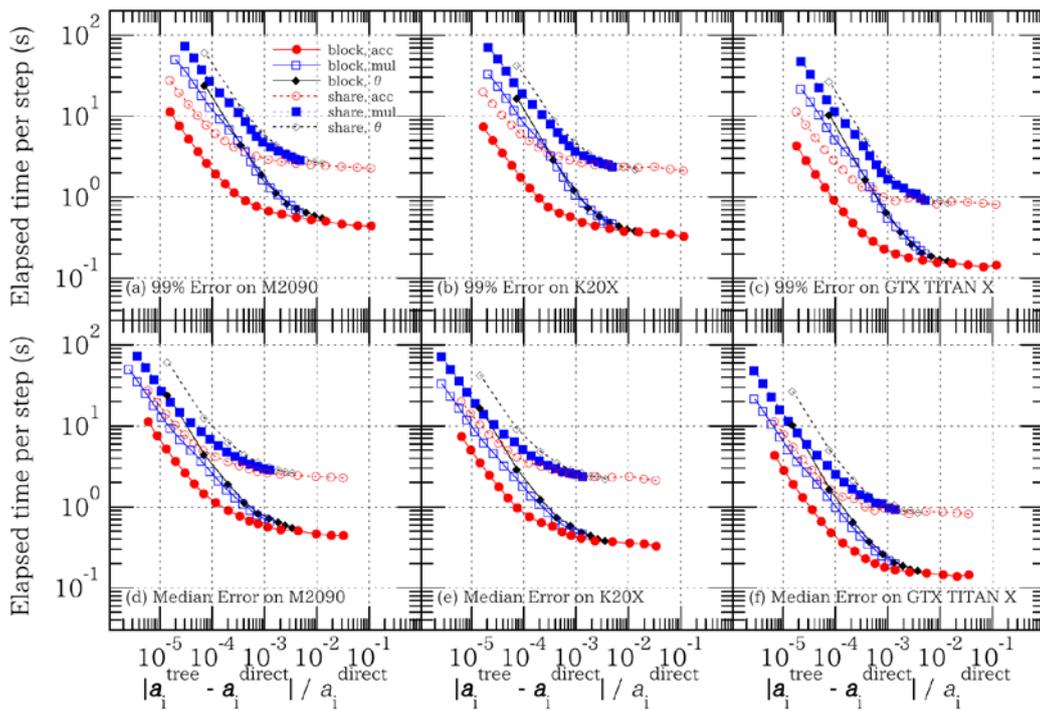


図 1. Tree code の性能評価の結果。(横軸は、直接計算との誤差)

高速化の効果が特に大きかったのは **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 2-6 倍程度の高速化が達成できた (図 2)。図 2 の横軸はツリー法による重力計算の精度を制御するパラメータであり、銀河スケールの計算であれば 10^{-2} 程度に取っておけば十分である。従って、現実的な計算を行った際には **block time step** の導入によって 5 倍程度の高速化が期待できる。

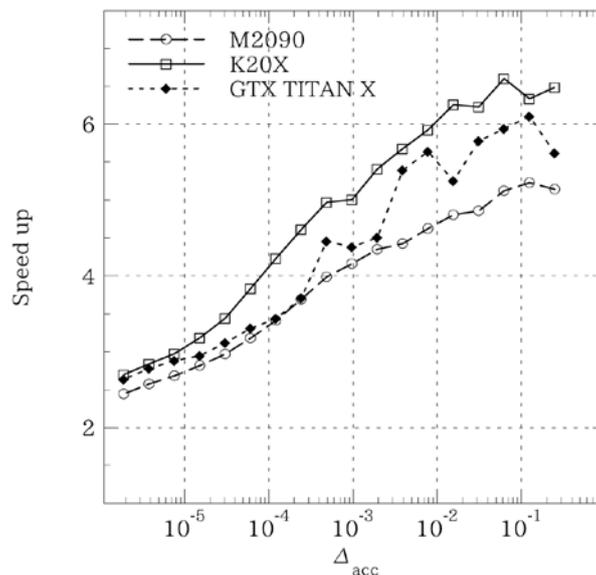


図 2. Block time step による速度向上率。

【13】 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、1953年のMillerの実験によりアミノ酸などの有機物が単純な物質から無生物的に合成されることが示され、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。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(Cooper & Cronin, 1995)と分子雲から検出されたアミノアセトニトリル(Belloche et al., 2008)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。

【14】 量子化学計算を用いた太陽以外の恒星周りの光合成への示唆

今後観測で得られる太陽系外惑星のスペクトルから光合成生物に由来する痕跡、バイオマーカーを検出することが期待されている。水圏に生息する光合成生物の吸収スペクトルは透過光のスペクトルの概形と良く一致しており、これらの生物は生息地の光を効率的に吸収していることが示唆される。今後の観測においては低質量のM型矮星周りの惑星に焦点が当たるので、

このような地球と異なる環境において、周囲の光をスペクトル的にどの程度効率的に吸収するかを本研究では定量的に評価した。鉛直1次元の惑星大気の輻射対流・光化学モデル、輻射輸送モデルを用いて様々なスペクトルタイプ (F,G,K,M 型) の星の周りの地球型惑星の表層環境 (水中など) での透過スペクトルを算出した。一方で、クロロフィルに代表される光合成色素や、これらで構成される光捕集複合体 (LHC) の吸収スペクトルを量子化学計算によって見積もった。このように得られた光合成生物の器官の吸収スペクトルと、ある輻射環境における透過光スペクトルの一致の度合いを示す吸収効率を評価、それぞれの条件を比較した。色素の励起状態計算には時間依存密度汎関数法などを用いた。

色素の金属を天然のものから交換した色素で構成された LHC のスペクトルの長波長化、水を持つ M 型周りの地球型惑星の環境における吸収効率を見積もった。その結果、カドミウムを中心金属にした系は、天然の系よりも高効率で吸収できることがわかった。水中の深度の関数として表現するとより複雑になり、10cm 程の深度で高効率になった。ただし、さらに深い箇所ではたとえカドミウムに交換したとしても、到達する光自体が減光されるので高効率にはならないことがわかった。

4. 教育

【学位論文】

<博士論文>

1. 安部 牧人

Three-Dimensional Radiation-Hydrodynamic Study on the Formation of Star Clusters Regulated by External Ultraviolet Radiation

(外部紫外線輻射場によって制御される星団形成に関する3次元輻射流体力学による研究)

<修士論文>

1. 土屋 将太郎

Vlasov シミュレーションにおける計算スキームの高次精度化

2. 木立 佳里

星間ダストにおけるアミノ酸生成の理論的研究

3. 結城 文香

矮小楕円銀河核の形成シミュレーション

<学士論文>

1. 石川 徹

銀河中心領域における巨大ブラックホールの合体シミュレーション

2. 北澤 優也

星間分子雲中でのグリシン生成についての理論的検討①: $\text{NH}_2\text{CH}_2\text{CO}\cdot$ 中間体を經由する低温ラジカル反応

3. 越智 聡郎

星間分子雲中でのグリシン形成についての理論的検討②: $\cdot\text{CH}_2\text{COOH}$ 中間体を經由する低温ラジカル反応

4. 藤原 隆寛

SPH 法の性能比較

5. 杉本 隼

銀河のマイナーマージャーによって形成されるステラーハローの構造

6. 高橋 瞭太

M31North-West Stream 形成シミュレーション

7. 河田 隼季

SIMD 命令による移流方程式の数値計算の高速化

8. 櫻井 駿介

Particle-in-Cell 法による無衝突衝撃波の数値シミュレーション

【集中講義】

・相川祐理

「惑星宇宙物理学特論 I」 (2015 年 8 月 24 日～25 日, 神戸大学惑星学専攻)

「特別講義 IX」 (2015 年 8 月 26 日～28 日, 大阪大学宇宙地球科学専攻)

・町田正博 (九州大学)

「宇宙物理特講 II」 “星・惑星の形成過程” (2016 年 1 月 28 日～30 日, 筑波大学数理物質科学研究科)

5. 受賞, 外部資金, 知的財産権等

【受賞】

1. 2014 年度地球惑星科学振興西田賞

相川祐理「分子雲から原始惑星系円盤形成にいたる化学進化の統合的理論モデルの研究」, 2015 年 5 月 27 日

2. HEART2015 最優秀論文賞

Chiharu Tsuruta, Yohei Miki, Takuya Kuhara, Hideharu Amano, Masayuki Umemura, “Off-loading LET generation to PEACH2: A switching hub for high performance GPU clusters” International Symposium on Highly Efficient Accelerators and Reconfigurable Technologies, 2015 年 6 月 2 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」
(H27 年度 180 万円／全体 540 万円)
- ・基盤研究 (C) (一般) H23 年度～H27 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」
(H27 年度 50 万円／全体 340 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」
(H27 年度 104 万円／全体 520 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)
(H27 年度分担金 2.5 万円／分担金全体 12.5 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」 (2.5 万円)
(H27 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」
(H27 年度分担金 2,000 万円／分担金全体 7853 万円)
- ・新学術領域研究(研究領域提案型)「太陽系外惑星の新機軸：地球型惑星へ」
計画研究「円盤から惑星へ」 H23 年度～H27 年度：相川祐理 (代表者：百瀬宗武)
(H27 年度分担金 115 万円／分担金全体 692 万円)

6. 研究成果報告

(1) 【研究論文】

A) 査読付き論文

- 1) Aikawa, Y., Furuya, K., Nomura, H., Qi, C., 2015, “Analytical Formulas of Molecular Ion Abundances and N₂H⁺ Ring in Protoplanetary Disks”, The Astrophysical Journal, 807, 19pp (DOI: 10.1088/0004-637X/807/2/120)
- 2) Aso, Y., Ohashi, N., Saigo, K., Koyamatsu, S., Aikawa, Y., Hayashi, M., Machida, M.N., Saito, M., Takakuwa, S., Tomida, K., Tomisaka, K., Yen, H.-W., 2015, “ALMA

- Observations of the Transition from Infall Motion to Keplerian Rotation around the Late-phase Protostar TMC-1A”, *The Astrophysical Journal*, 812, 27, 20pp (DOI:10.1088/0004-637X/812/1/27)
- 3) Favre, C., Bergin, E. A., Cleeves, L. I., Hersant, F., Qi, C., Aikawa, Y., 2015, “Evidence for DCO+ as a Probe of Ionization in the Warm Disk Surface”, *Astrophysical Journal Letters*, 802, L23, 6pp (DOI: 10.1088/2041-8205/802/2/L23)
 - 4) Furuya, K., Aikawa, Y., Hincelin, U., Hassel, G.E., Bergin, E.A., Vasyunin, A.I., Herbst, E., 2015, “Water Deuteration and Ortho-to-Para Nuclear Spin Ratio of H₂ in Molecular Clouds Formed via Accumulation of HI Gas”, *Astronomy and Astrophysics*, 584, A124, 18pp (DOI: 10.1051/0004-6361/201527050)
 - 5) Furuya, K., van Dishoeck, E.F and Aikawa, Y., 2016, “Reconstructing the history of water ice formation from HDO/H₂O and D₂O/HDO ratios in protostellar cores”, *Astronomy and Astrophysics*, 586, A127, 8pp (DOI: 10.1051/0004-6361/201527579)
 - 6) Kirihara, T., Miki, Y., Mori, M., & Kawaguchi, T., “Formation of the Andromeda Giant Stream: Asymmetric Structure and Disc Progenitor”, submitted to *Monthly Notices of Royal Astronomical Society*
 - 7) Komatsu, Y., Umemura, M., Shoji, M., Kayanuma, M. Yabana, K. and Shiraishi, K., 2015, “Light absorption efficiencies of photosynthetic pigments: the dependence on spectral types of central stars”, *International Journal of Astrobiology* 14, 505-510 (DOI: 0.1017/S147355041400072X)
 - 8) Komatsu, Y., Kayanuma, M., Shoji, M., Yabana, K., Shiraishi, K., Umemura, M., 2015, “Light absorption and excitation energy transfer calculations in primitive photosynthetic bacteria”, *Molecular Physics*, 113, 12, 1413-1421 (DOI: 10.1080/00268976.2014.998305)
 - 9) Mousis, O., Chassefière, E., Holm, N. G., Bouquet, A., Waite, J. H., Geppert, W. D., Picaud, S., Aikawa, Y., Ali-Dib, M., Charlou, J-L., Rousselot, P., 2015, “Methane Clathrates in the Solar System”, *Astrobiology*, 15, 308-326 (DOI: 10.1089/ast.2014.1189)
 - 10) 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 Royal Astronomical Society*, 460, 980-1018 (DOI: 10.1093/mnras/stw862)
 - 11) Momose, R., Ouchi, M., Nakajima, K., Ono, Y., Shibuya, T., Shimasaku, K., Yuma, S., Mori, M., Umemura, M., 2016, “Statistical properties of diffuse Ly α haloes around star-forming galaxies at z~2”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 457, 2318-2330 (DOI: 10.1093/mnras/stw021)
 - 12) Nishimura, Y., Shimonishi, T., Watanabe, Y., Sakai, N., Aikawa, Y., Kawamura, A., & Yamamoto, S., 2016, “Spectral Line Survey toward Molecular Clouds in the Large Magellanic Cloud”, *The Astrophysical Journal*, 818, 161, 17pp (DOI: 10.3847/0004-637X/818/2/161)

- 13) Nomura, M., Ohsuga, K., Takahashi, R. H., Wada, K., & Yoshida, T., 2016, “Radiation Hydrodynamic Simulations of Line-Driven Disk Winds for Ultra Fast Outflows”, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 68, 16 (DOI: 10.1093/pasj/psv124)
- 14) Öberg, K. I., Guzmán, V. V., Furuya, K., Qi, C., Aikawa, Y., Andrews, S. M., Loomis, R., Wilner, D. J., 2015, “The comet-like composition of a protoplanetary disk as revealed by complex cyanides”, *Nature*, 520, 198-201 (DOI: 10.1038/nature14276)
- 15) Öberg, K.I., Furuya, K., Loomis, R., Aikawa, Y., Andrews, S.M., Qi, C., van Dishoeck, E.F., Wilner, D.J., 2015, “Double DCO⁺ Rings Reveal CO Ice Desorption in the Outer Disk Around IM Lup”, *The Astrophysical Journal*, 810, 112, 7pp (DOI: 10.1088/0004-637X/810/2/112)
- 16) Sakai, T., Sakai, N., Furuya, K., Aikawa, Y., Hirota, T., Foster, J. B., Sanhueza, P., Jackson, J. M., Yamamoto, S., 2015, “ALMA Observations of the IRDC Clump G34.43+00.24 MM3: DNC/HNC Ratio”, *The Astrophysical Journal*, 803, Issue 2, article id. 70, 9pp (DOI:10.1088/0004-637X/803/2/70)
- 17) Tagawa, H., Umemura, M., Gouda, N., Yano, T., Yamai, Y., 2015, “Early Cosmic Merger of Multiple Black Holes”, *Monthly Notices of Royal Astronomical Society*, 451, 2174-2184 (DOI: 10.1093/mnras/stv1099)
- 18) Takahashi, R., Umemura, M., “General relativistic radiation hydrodynamics I: MASTER - a ray-tracing code in a rotating black hole spacetime”, submitted to *Monthly Notices of Royal Astronomical Society*
- 19) Tanaka, S., Yoshikawa, K., Okamoto, T., Hasegawa, K., 2015, “A new ray-tracing scheme for 3D diffuse radiation transfer on highly parallel architectures”, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 67, 62 (DOI: 10.1093/pasj/psv027)
- 20) Wagner, A. Y., Bicknell, G. V., Umemura, M., Sutherland, R. S., Silk, J., 2016, “Galaxy-scale AGN Feedback – Theory”, *Astronomische Nachrichten*, 335, 167 (DOI: 10.1002/asna.201512287)
- 21) Igarashi, A., Mori, M., Nitta, S., “Polytropic transonic galactic outflows in a dark matter halo with a central black hole”, submitted to *Monthly Notices of Royal Astronomical Society*
- 22) Miki, Y., Mori, M., Rich, R.M., “Collision tomography: Physical properties of possible progenitors of the Andromeda stellar stream”, submitted to *The Astrophysical Journal*
- 23) Tagawa, H., Umemura, M., Gouda, N., 2016, “Mergers of accreting stellar-mass black holes”, submitted to *Monthly Notices of Royal Astronomical Society* (arXiv:1602.08767)

B) 査読無し論文

- 24) Aikawa, Y. 2015, “Astrochemical models of water in molecular clouds and protoplanetary disks”, submitted to *Astronomy in Focus Vol. 1* (proceedings of IAU Focus meeting 15)

- 25) Aikawa, Y. 2015, “Evaporation of Grain-surface Species by Shock Waves onto a Forming Protoplanetary Disk”, submitted to proceedings of IAU Symposium 315
- 26) Aikawa, Y. 2015, “Analytical Formulas of Molecular Ion Abundances and N_2H^+ Ring in Protoplanetary Disks”, submitted to proceedings of IAU Symposium 315
- 27) Bicknell, G.V., McNamara, B.R., Nawaz, M.A., Sutherland, R.S., Umemura, M., Wagner, A.Y. 2015, “AGN feedback by relativistic jets”, IAU Symposium 313, 101-107.
- 28) Igarashi, A., Mori, M., Nitta, S., 2015, “Transonic galactic outflows in a dark matter halo with a central black hole”, IAU General Assembly Meeting 29, 2256244
- 29) Igarashi, A., Mori, M., Nitta, S., 2016, “A new concept of transonic galactic outflows and its application to the Sombrero galaxy”, submitted to Proceedings of IAU Symposium 321 "Formation and evolution of galaxy outskirts"
- 30) Kirihara, T., Miki, Y., Mori, M., & Kawaguchi, T., 2016, “Disk dwarf galaxy as the progenitor of the Andromeda giant stream”, proceedings of IAU Symposium 317, 1500712

(2) 【国際会議発表】

A) 招待講演

- 1) Wagner, A. Y., Bicknell, G. V., Umemura, M., Mukherjee, D., Sutherland, R. S., “AGN Feedback: Theory”, 5th Workshop on Compact Steep Spectrum and GHz-Peaked Spectrum Radio Sources, May 27-29, 2015, Rimini, Italy.
- 2) Yoshikawa, K., “Vlasov-Poisson Simulation of Self-Gravitating Systems and Its Application to Dynamics of Cosmic Neutrinos”, YITP molecular-type workshop on “Vlasov-Poisson: towards numerical methods without particles”, June 1-12, 2015, Kyoto
- 3) Aikawa, Y., “Astrochemical models of water in molecular clouds and protoplanetary disks”, Focus Meeting 15, International Astronomical Union General Assembly XXIX, Aug. 3-5, 2015, Honolulu
- 4) Nomura, M., Ohsuga, K., Takahashi, H., Wada, K., Yoshida, T. “Radiation Hydrodynamic Simulations of Line-Driven Disk Winds for Ultra Fast Outflows”, Prospects, challenges and evolution of AGN modeling in the Astro-H Era, Oct. 21-22, 2015, Rikkyo University, Tokyo
- 5) Aikawa, Y., “Chemistry in the Forming Disks”, Workshop ALMA-Cycle 4, Astrochemistry as a diagnostic of Star and Planet Formation, Jan.12-13, 2016, Observatoire de Bordeaux, France
- 6) Aikawa, Y. "Chemistry in the disk formation", Workshop on Astrochemistry in Star and Planet Formation, Feb.16, 2016, Riken, Wako

B) 一般講演

- 1) Aikawa, Y., “Analytical Formulas of Molecular Ion Abundances and N₂H⁺ Ring in Protoplanetary Disks”, 3rd DTA Symposium: The Origins of Planetary Systems: from the Current View to New Horizons (Jun.1-4, 2015, NAOJ, Tokyo)
- 2) Tsuruta C., Miki, Y., Kuhara T., Umemura, M., Amano, H., “Off-loading LET generation to PEACH2: A switching hub for high performance GPU clusters”, HEART2015 (Jun. 1-2, 2015, Boston, USA)
- 3) Nomura, M., Ohsuga, K., Takahashi, H., Wada, K., “Radiation Hydrodynamic Simulations of Line-Driven Disk Winds for Ultra Fast Outflows”, Black Hole Accretion and AGN Feedback (Jun. 1-5 2015, Shanghai, China) (Poster)
- 4) Komatsu, Y., Umemura, M., Shoji, M., Kayanuma, M., Shigeta, Y., “Absorption Efficiencies of Antenna Complexes in Photosynthetic Organisms Exposed to the Photoenvironment of Exoplanets”, AbSciCon2015 (Jun.15-19, 2015, Chicago, USA)
- 5) Tagawa, H., Umemura, M., Gouda, N., Yano, T., Yamai, Y., “Early Cosmic Merger of Multiple Black Holes”, First stars, galaxies and black holes: now and then (Jun. 15-19, 2015, Groningen, The Netherlands)
- 6) Komatsu, Y., Umemura, M., Shoji, M., Kayanuma, M., Shigeta, Y., “Absorption efficiencies of light-harvesting complexes in photosynthetic organisms exposed to the photoenvironment of exoplanets”, Pathways2015 (Jul. 13-17, 2015, Bern, Switzerland) (Poster)
- 7) Aikawa, Y., Furuya, K., Nomura, H., Qi, C., “Analytical Formulas of Molecular Ion Abundances and N₂H⁺ Ring in Protoplanetary Disks”, IAU Symposium 315: From interstellar clouds to star-forming galaxies: universal processes?, IAU General Assembly 2015 (Aug. 3-7, 2015, Honolulu)(Poster)
- 8) Aota, T., Aikawa, Y., Inoue, T., “Evaporation of Grain-surface Species by Shock Waves onto a Forming Protoplanetary Disks”, IAU Symposium 315: From interstellar clouds to star-forming galaxies: universal processes?, IAU General Assembly 2015 (Aug. 3-7, 2015, Honolulu)(Poster)
- 9) Kirihara, T., Miki, Y., Mori, M., Kawaguchi, T., “Disk minor merger as the progenitor of the Andromeda giant stream”, IAU XXIXth General Assembly Symposium 317 (Aug. 3-14, 2015, Honolulu, USA) (Poster)
- 10) Kirihara, T., Miki, Y., Mori, M., “Investigating the outer density profile of the dark matter halo of M31”, IAU XXIXth General Assembly Focused meeting 18 (Aug. 3-14, 2015, Honolulu, USA) (Poster)
- 11) Kato, K., Mori, M., Ogiya, G., “Connection between cusp-core problem and too-big-to-fail problem”, IAU XXIX General Assembly (Aug. 3-14, 2015, Hawaii USA)(Poster)

- 12) Igarashi, A., Mori, M., Nitta, S., "Transonic galactic outflows in a dark matter halo with a central black hole", The 29th International Astronomical Union General Assembly, FM18p13, (Aug. 10-14, 2015, Honolulu, USA) (Poster)
- 13) Miki, Y., "Computation / Communication Unification on FPGA Solution", LENS2015 (Oct. 29-30, 2015, Akihabara, Japan)
- 14) Nomura, M., Ohsuga, K., Takahashi, R. H., Wada, K., Yoshida, T., "Radiation hydrodynamic simulations of line-driven disk winds around super massive black holes", Symposium on 'Quarks to Universe in Computational Science (QUCS 2015)' (Nov. 4-8, 2015, Nara, Japan)
- 15) Aikawa, Y., "Molecular ions and COMs in protoplanetary disks", International Workshop on "Exoplanets and Disks: Their Formation and Diversity III" (Feb. 22-24, 2016, Hotel Nikko Yaeyama, Japan)
- 16) Kirihara, T., Miki, Y., Mori, M., Kawaguchi, T., & Rich, R. M., "Multilateral Study of the Formation of the Andromeda Giant Stellar Stream", IAU Symposium 321: Formation and Evolution of Galaxy Outskirts (Mar.14-18, 2016, Toledo, Spain) (Poster)
- 17) Igarashi, A., Mori, M., & Nitta, S., "A new concept of transonic galactic outflows and its application to the Sombrero galaxy", IAU Symposium 321: Formation and Evolution of Galaxy Outskirts (Mar.14-18, 2016, Toledo, Spain) (Poster)

(3) 【国内学会・研究会発表】

A) 招待講演

- 1) 森正夫, 「ダークマターの構造と銀河進化」, 研究会「新世紀における 銀河宇宙観測の方向」 (2015年3月31日~4月2日, KKR 熱海, 熱海)
- 2) 梅村雅之, 「元素はめぐる」, 日本天文学会公開講演会 (2015年9月12日, 甲南大学, 神戸)
- 3) 相川祐理「Astrochemistry in star-forming cores and protoplanetary disks」, 研究会「星形成の諸階層ー銀河から惑星までー」 (2015年9月14日~16日, フォレスト箱根)
- 4) 相川祐理「星・惑星系形成領域の星間化学: モデルと ALMA 観測」, 日本地球化学会第62回年回 (2015年9月16日~18日, 横浜国立大学, 横浜)
- 5) 三木洋平, 「GPU を用いた N 体シミュレーション向けの実践的テクニック」, GPU Computing Workshop for Advanced Manufacturing (2015年9月17日, 虎ノ門ヒルズフォーラム, 東京)
- 6) 梅村雅之, 「The Origin of Cosmic Objects」, 新学術領域「加速宇宙」発足シンポジウム(2015年9月20日~21日, 東大 IPMU, 柏)
- 7) 梅村雅之, 「宇宙の旅」, 竹園東小学校講演会 (2015年10月23日, 竹園東小学校, つくば)

- 8) 相川祐理「星間化学におけるテラヘルツ単一鏡観測の役割」, 南極で切り開くテラヘルツ天文学 (2015年11月18日, 国立天文台, 三鷹)
- 9) 森正夫「南極テラヘルツ望遠鏡と銀河形成・進化シミュレーション」, 南極で切り開くテラヘルツ天文学 (2015年11月18日, 国立天文台, 三鷹)
- 10) 野村真理子, 「活動銀河核アウトフローの輻射流体力学シミュレーション」理論天文学研究会2015(2015年11月27日~29日, 伊豆大仁ホテル, 伊豆の国)
- 11) 相川祐理, 「星・惑星系形成領域における有機物: 理論と観測の現状」理論懇シンポジウム2015「宇宙における天体形成から生命まで」(2015年12月23日~25日, 大阪大学, 大阪)
- 12) 梅村雅之, 「TAOによる銀河形成研究の新展開」, 企画セッション「東京大学アタカマ天文台のサイエンス戦略」, 日本天文学会春季年会(2016年3月14日~17日, 首都大学東京, 八王子)

B) その他の発表

- 1) 野村真理子, 「輻射流体シミュレーションと可視分光観測で探る AGN アウトフローの姿」, 研究会「活動銀河核ワークショップ2015 ~すばる PFS の登場に向けて~」(2015年5月18日~19日, 国立天文台, 三鷹)
- 2) 木立佳里, 梅村雅之, 庄司光男, 小松勇, 栢沼愛, 重田育照, 「量子化学計算による星間ダストでのグリシン生成の研究」, 日本地球惑星科学連合2015年大会,(2015年5月24日~28日, 幕張メッセ, 千葉)
- 3) 加藤一輝, 森正夫, 扇谷豪, 「CDM モデルにおける cusp-core 問題と too-big-to-fail 問題の関連性」, 「第2回 銀河進化研究会」(2015年6月3日~6月5日, 名古屋大学, 名古屋)
- 4) 桐原崇亘, 「アンドロメダ銀河に衝突した矮小銀河の性質」, 「第2回 銀河進化研究会」2015(2015年6月3日~6月5日, 名古屋大学坂田・平田ホール, 名古屋)
- 5) 五十嵐朱夏, 「Sombrero 銀河に銀河風は存在するのか?」, 「第2回 銀河進化研究会」2015(2015年6月3日~6月5日, 名古屋大学坂田・平田ホール, 名古屋)
- 6) 安部牧人, 梅村雅之, 長谷川賢二, 「Star cluster formation regulated by the interstellar radiation field」, Star Formation Workshop 2015: From Cloud to Cores (2015年6月29日~7月1日, 国立天文台, 三鷹)
- 7) 安部牧人, 梅村雅之, 長谷川賢二, 「3次元輻射流体計算による非等方背景輻射場中の球状星団形成過程の研究」, 日本天文学会秋季年会(2015年9月9日~11日, 甲南大学, 神戸)
- 8) 江野畑圭, 石原卓, 白石賢二, 森下浩二, 中本泰史, 梅村雅之, 「微惑星系形成過程解明のための乱流の直接数値計算と粒子追跡」日本天文学会秋季年会(2015年9月9日~11日, 甲南大学, 神戸)

- 9) 加藤一輝, 森正夫, 扇谷豪, 「Cold dark matter モデルにおける cusp-core 問題と too-big-to-fail 問題の関連性」, 研究会「日本天文学会 2015 年秋季年会」(2015 年 9 月 9 日～11 日, 甲南大学, 神戸)
- 10) 桐原崇亘, 三木洋平, 森正夫, 川口俊宏, 「M31 に衝突した矮小銀河の形態とダークマター分布の進化」, 日本天文学会 2015 年秋季年会(2015 年 9 月 9 日～11 日, 甲南大学, 神戸)
- 11) 小林直樹, 江野畑圭, 石原卓, 白石賢二, 梅村雅之, 「乱流の直接数値計算による原始惑星系円盤中の粒子運動に対する鉛直重力の影響の解析」, 日本天文学会秋季年会(2015 年 9 月 9 日～11 日, 甲南大学, 神戸)
- 12) 三木洋平, 梅村雅之, 「銀河の多成分力学平衡分布生成コードの開発」, 日本天文学会 2015 年 秋季年会(2015 年 9 月 9 日～11 日, 甲南大学, 神戸)
- 13) 行方大輔, 梅村雅之, 「活動銀河核トーラス内縁部の輻射流体計算」, 日本天文学会秋季年会(2015 年 9 月 9 日～11 日, 甲南大学, 神戸)
- 14) 鈴木裕行, 長谷川賢二, 梅村雅之, Benoit Semelin, 「SPH-based Ly α 輻射輸送コードの開発」, 日本天文学会秋季年会(2015 年 9 月 9 日～11 日, 甲南大学, 神戸)
- 15) 田川寛通, 梅村雅之, 郷田直輝, 矢野太平, 「初期宇宙における多重ブラックホールの合体過程の研究」, 日本天文学会秋季年会(2015 年 9 月 9 日～11 日, 甲南大学, 神戸)
- 16) 高橋良輔, 岡本直也, 芳松克則, 石原卓, 白石賢二, 梅村雅之, 「電磁流体乱流中の直接数値シミュレーションによる原始惑星系円盤内の粒子運動の解析」, 日本天文学会秋季年会(2015 年 9 月 9 日～11 日, 甲南大学, 神戸)
- 17) 梅村雅之, 高橋芳太, 「一般相対論的輻射流体力学計算コードの開発」, 「超巨大ブラックホール研究推進連絡会」第 3 回ワークショップ(2015 年 10 月 17 日～18 日, 甲南大学, 神戸)
- 18) 梅村雅之, 「Cosmo Simulator 構想について」, 第 7 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—多分野に広がる計算科学の発展と将来像—(2015 年 10 月 19 日～20 日, 筑波大学, つくば)
- 19) 相川祐理, 「原始惑星系円盤の輝線観測とモデル」, 新領域「宇宙における分子進化: 星間雲から原始惑星系へ」研究会(2015 年 10 月 22 日～23 日, 北海道大学低温科学研究所, 札幌)
- 20) 小松勇, 「光合成生物の光吸収モデル: 低質量星周りにおける吸収効率の評価」, 近赤外高分散分光研究会: 地球型惑星探索と広がるサイエンス, (2015 年 11 月 24 日～26 日, 国立天文台, 三鷹)
- 21) 梅村雅之, 「宇宙生命計算科学連携拠点の現状」, 第 3 回キラル研究会(2015 年 11 月 28 日, 京都大学, 京都)
- 22) 行方大輔, 梅村雅之, 「輻射流体計算で探る活動銀河核トーラスのダスト昇華半径付近の構造」, ALMA ワークショップ「AGN 銀河の中心 1kpc \rightarrow 1pc スケールでの質量降着機構の理解に向けて」, (2015 年 12 月 21 日～22 日, 国立天文台, 三鷹)
- 23) 桐原崇亘, 「M31 における矮小円盤銀河の衝突シミュレーション」, 第 28 回理論懇シンポジウム「宇宙における天体形成から生命まで」(2015 年 12 月 23 日～25 日, 大阪大学, 大阪)

- 24) 木立 佳里, 「星間でのアミノ酸生成過程の理論的研究」, 第 28 回理論懇シンポジウム「宇宙における天体形成から生命まで」(2015 年 12 月 23 日～25 日, 大阪大学, 大阪)(ポスター)
- 25) 小松勇, 「太陽と異なる主星の輻射場における光合成の吸収効率」, 第 28 回理論懇シンポジウム「宇宙における天体形成から生命まで」(2015 年 12 月 23 日～25 日, 大阪大学, 大阪)
- 26) 野村真理子, 「Ultra Fast Outflow のラインフォース駆動型円盤風モデル: 質量・エネルギー放出率と AGN 光度依存性」, 第 28 回理論懇シンポジウム「宇宙における天体形成から生命まで」(2015 年 12 月 23 日～25 日, 大阪大学, 大阪) (ポスター)
- 27) 相川祐理, 「惑星系形成領域の有機物進化」, 日本天文学会春季年会, (2016 年 3 月 14 日～17 日, 首都大学東京, 八王子)
- 28) 古谷眸, 江野畑圭, 石原卓, 白石賢二, 芳松克則, 岡本直也, 梅村雅之, 「原始惑星系円盤における圧縮性乱流場中の粒子運動」, 日本天文学会春季年会 (2016 年 3 月 14 日～17 日, 首都大学東京, 八王子)
- 29) 小林直樹, 江野畑圭, 石原卓, 白石賢二, 梅村雅之, 「乱流の「第一原理計算」による原始惑星系円盤中のダスト粒子衝突過程に対する鉛直重力の影響の解析」, 日本天文学会春季年会 (2016 年 3 月 14 日～17 日, 首都大学東京, 八王子)
- 30) 小松勇, 梅村雅之, 「様々な主星の輻射環境における光合成の吸収効率」, 日本天文学会春季年会 (2016 年 3 月 14 日～17 日, 首都大学東京, 八王子)
- 31) 田川寛通, 梅村雅之, 郷田直輝, 「 $z > 10$ の初代天体における中性子星連星の合体」, 日本天文学会春季年会 (2016 年 3 月 14 日～17 日, 首都大学東京, 八王子)
- 32) 田中賢, 吉川耕司, 吉田直紀, 「6 次元位相空間上での Vlasov シミュレーションにおける高次精度化」, 日本天文学会春季年会 (2016 年 3 月 14 日～17 日, 首都大学東京, 八王子)
- 33) 野村真理子, 大須賀健, 高橋博之, 「Ultra Fast Outflow のラインフォース駆動型円盤風モデル: 質量・エネルギー放出率と AGN 光度依存性」, 日本天文学会春季年会 (2016 年 3 月 14 日～17 日, 首都大学東京, 八王子)

(4) 【著書, 解説記事等】

- 1) 森正夫, 「アンドロメダ銀河の素顔」, Newton 6 月号, 2015 年 4 月 26 日
- 2) 森正夫, 「アンドロメダ銀河が我が銀河に大衝突」, Newton 9 月号, 2015 年 7 月 25 日
- 3) 森正夫, 「大宇宙—保存版」, Newton 別冊, 2015 年 11 月 26 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) バイオマーカー部会
宇宙・生命分野間連携により, 系外惑星の大気吸収効果を入れた光合成光捕集機構について

量子化学計算を進めた。

3) 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】

- LBNL-CCS Tsukuba Joint Meeting 2015, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, USA (May 28-29, 2015) (Umemura)
- SC15 出展, Austin, USA(Nov.16-21,2015) (Umemura)

8. シンポジウム、研究会、スクール等の開催実績

1) 「銀河・銀河間物質に関する観測・理論合同ミニワークショップ」

2015年6月10日～11日，筑波大学計算科学研究センター，つくば市

2) 「銀河・銀河間物質に関するワークショップ」

2015年11月25日～27日，大阪産業大学（梅田サテライト），大阪市

3) 「超巨大ブラックホール研究推進連絡会」第3回ワークショップ

2014年10月17日～18日，甲南大学，神戸市

4) 「天体形成研究会」

2015年10月30日～31日，筑波大学計算科学研究センター，つくば市



5) 「初代星・初代銀河研究会」

2015年11月30日～12月2日，草津セミナーハウス，草津市

- 6) Goldschmidt 2015, session 'Protoplanetary disks in the age of ALMA: physics and chemistry of dust and volatiles in the Solar Nebula and its analogues', Prague (Aug. 16-21, 2015) (Aikawa)
- 7) The 6th Zermatt ISM-Symposium, Conditions and Impact of Star Formation, Zermatt, Switzerland (Sept. 7-11, 2015) (Aikawa)
- 8) From Clouds to Protoplanetary Disks: the Astrochemical Link, Berlin (Oct. 4-8, 2015) (Aikawa)

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】

学長補佐室会議委員
 教育研究評議会委員
 人事企画委員会委員
 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 研究企画室委員長
 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

【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
物理学域図書委員会委員
計算基礎科学連携拠点企画チーム

10. 社会貢献・国際貢献

- ・2015年10月23日 竹園東小学校講演会「宇宙の旅」(梅村)
- ・2015年11月21日 竹園東中学校土曜特別講座「PCで宇宙旅行」(相川)
- ・2016年1月23日 つくばエキスポセンター講演会「一般相対性理論と宇宙」(梅村)

11. その他

学会活動等

- ・IAU Commission H2 Astrochemistry, Organizing Committee (相川)
- ・日本天文学会欧文報告誌 PASJ 編集委員 (相川)

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
大学院生	11名（数理解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）
卒研究生	5名

4月1日付けで新田冬夢が助教（テニュアートラック）に採用された。大学院数理解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）が入学してきた。理工学群物理学類4年の4名が卒研究生として配属されてきた。大学院博士後期課程3年の1名が博士の学位を取得して修了し、前期課程の5名と教育研究科教科教育専攻の1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。

国土地理院つくば32m鏡はVLBIおよび単一鏡観測を継続した。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新しい設置場所であるドームCの現地調査等を行った。また30m級テラヘルツ望遠鏡計画の検討を継続した。

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鏡の電波望遠鏡の開発整備と観測

(1) 観測システムの開発整備

- アンテナの雨除けカバーの取り付け金具がかなりさびていて締まらないので全部を交換した。またカバーの表面掃除を行った。
- K帯受信機の1偏波の20GHz帯増幅器が壊れたので新しいものを購入し、交換した。
- アンテナのビームパターンの測定を行い、従来と変わらないことを確認した。
- アンテナの指向性が悪化したので全天で較正天体を観測して指向性誤差を測定し、器差ファイルを更新して指向性を改善した。
- 32mアンテナの20GHz帯の周波数保護について長く総務省と協議していたが、内容についてまとまったので保護申請を行った。
- 32mアンテナは来年度末までに解体されることが決まった。

(2) 観測

（VLBI観測）

- X帯およびK帯の大学連携VLBI観測を15回実施した。
- これまでに我々が32mアンテナの単一鏡観測で発見していた系外銀河NGC3079の中心部のアンモニア吸収線を大学連携VLBI網で観測した。

（単一鏡観測）

- オリオン分子雲の分子雲コア約80個の励起温度をアンモニアNH₃ (J,K)=(1,1)-(6,6)の観測から測定した。分子雲コアから星が誕生するためにはガスの乱流が減少して音速のみによる圧力となって内部圧力が弱くなり収縮して星が生まれるのではないかと推測して

いる。その仮説を証明するためには温度の精密な測定が必要であり、アンモニア観測による励起温度の測定は最も適している。

○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3点において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。

○活動的銀河中心核において強い連続波電波を背景としてアンモニア吸収線の探査を行った。

【2】南極天文学の推進

(1) 10m テラヘルツ望遠鏡のアンテナ開発

広視野光学系について検討を進めるなかで、開口能率と収差について一般的な洞察を得て、これらに成り立つ関係式を導出した。得られた関係式を実際に光学系の設計や評価に使うため、Zernike 多項式による波面収差の展開と組み合わせて具体的に書き下した。書き下すことで、これまでに知られていなかった開口能率における収差の打ち消し条件を解析的に明らかにした。

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ている。Phase Retrieval Holography については計算機シミュレーション、焦点面位相差法については小型電波干渉計の製作を行った。また、点解説干渉計の電波望遠鏡への応用をフォトリソと絡めて提案した。

(2) 10m テラヘルツ望遠鏡の建設予定地の現地調査

南極 10m テラヘルツ望遠鏡の新しい建設候補地ドームCにあるフランス・イタリアのコンコルディア基地に望遠鏡を設置すべく、日本の国立極地研究所長の紹介のもと、フランスの極地研究所長を窓口として設置に関する協議を行った。

コンコルディア基地の現地調査も行った。1月10日つくば発、2月13日つくば着の行程で、商用飛行機でニュージーランドのクライストチャーチまで行き、そこからイタリアの観測船「イタリカ」に乗船して南極大陸沿岸部のイタリアのマリオ・ツチュリ基地に到着した。沿岸部近くは氷が厚くて船は砕氷して進まざるをえず基地への到着が遅れるので手配されたヘリコプターにより基地に到着した。1泊ののち小型機（ツイン・オッター、バスターターボ=ダグラス DC3）で内陸のコンコルディア基地に到着。そこに2週間滞在して種々の調査を行うとともに現地のエンジニアと協議し10m望遠鏡の輸送、現地組み立て、運営についての大枠を取り決め、英文にしてフランス・イタリアの関係者に送付された。帰路は小型機（バスターターボ）でコンコルディア基地から沿岸部の豪州のケーシー基地に移動し、3泊ののち豪空軍の大型輸送機（C17）でタスマニア島のホバートに着いた。その後は商用飛行機で日本に帰国した。

コンコルディア基地は設備が良く整っており、運営も優れている。特に、130 トンクレーンや高さ 15m までの高所作業車を所有しているため、10m 望遠鏡の建設は可能と判断される。また夏季は常にブルドーザーで除雪しているため雪の吹き溜まりを防ぐための高床式のアンテナ基礎は不要であることがわかり、これは将来の 30m 級テラヘルツ望遠鏡を含めてアンテナ設置には非常に大きな要素である。基地の収容人員数は夏期が 60 名、冬期が 16 名である。アンテナの建設時（夏期）は収容人員数を上回るため独立して宿泊所等を用意する必要がある。

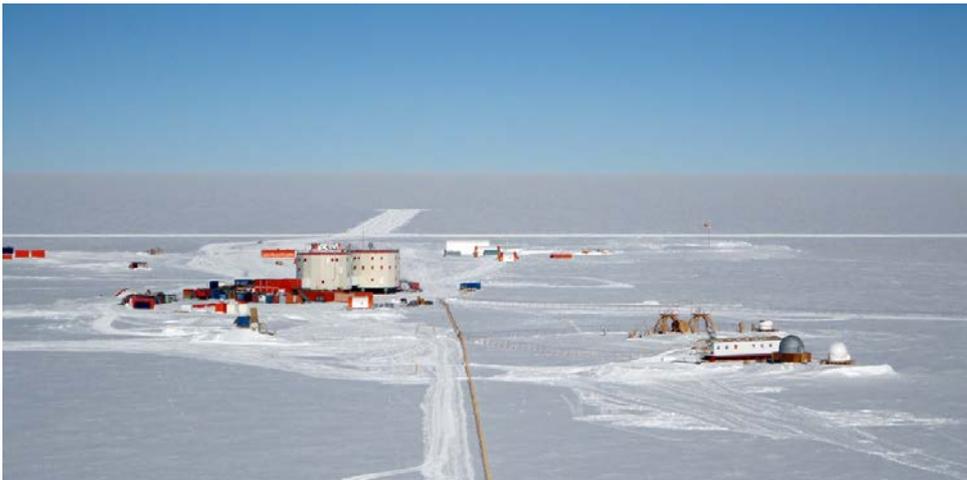


図.コンコルディア基地の全景。右下のところが 10m 望遠鏡の建設予定地。



図.コンコルディア基地の本館



図.望遠鏡の輸送、組立、運用の打ち合わせ

(3) 超伝導電波カメラの開発

南極テラヘルツ望遠鏡を用いて遠方銀河の広視野観測を実現するため、超伝導カメラの開発を進めている。本年度は国立天文台の野辺山 45m 電波望遠鏡に搭載する 90/150-GHz 帯ミリ波カメラの開発を進めた。これは南極 10m 望遠鏡に向けた技術開発としても重要である。本カメラは 80-180 GHz をカバーする広帯域コルゲートホーンアレイ、平面 OMT(偏波分離器)、90、150 GHz 帯を分離するバンドパスフィルター、Nb/Al を組み合わせた力学インダクタンス検出器(MKID)で構成される。望遠鏡光学系とカメラを結合する冷却光学系には直径 200 mm と 300 mm のシリコンレンズを使用した屈折式光学系を開発した。また、冷却系には希釈冷凍機を用いている。直径 195 mm の真空窓が開いた状態で冷却測定を行い、カメラ焦点面で最低到達温度 65 mK を達成した。また、MKID 読み出しのための多素子同時読み出し回路の評価および観測時のソフトウェア開発も行った。

本ミリ波カメラの冷却光学系をもとに

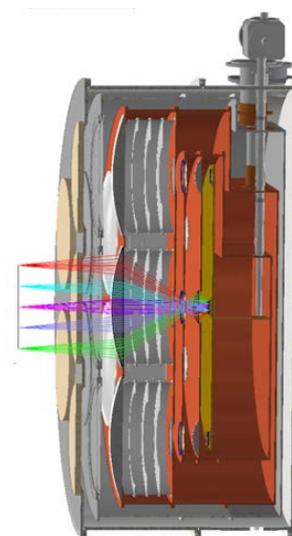


図. 南極 10m 望遠鏡用クライオスタット

して、南極 10m 望遠鏡のクライオスタット設計も進めた。

(4) 30m 級テラヘルツ望遠鏡

南極 30m 級テラヘルツ望遠鏡によるサイエンスの検討を進めるため、国立天文台の研究集会として「南極で切り開くテラヘルツ 天文学」を国立天文台にて開催した。全国から 60 名以上の参加者があり、30m テラヘルツ望遠鏡によるサイエンスの検討をより具体的に進めるワーキング・グループが立ち上げられた。現在 8 つのグループ（惑星大気、星間化学、星・惑星形成、銀河面サーベイ、近傍銀河、AGN、銀河形成・進化、時間変動天体）によって検討が進められている。

【3】銀河等の観測的研究

(1) 棒渦巻銀河 NGC6946 の中心及び棒状構造における分子ガスと星形成の性質

近傍の棒渦巻銀河 NGC6946 の中心部と棒状構造の分子ガスを、野辺山宇宙電波観測所 4.5 m 電波望遠鏡 (NRO45m 鏡) および米国の電波干渉計 CARMA を用いて観測した結果、中心部における分子ガスは棒状構造部分よりも高密度かつ高温であることが明らかとなった。

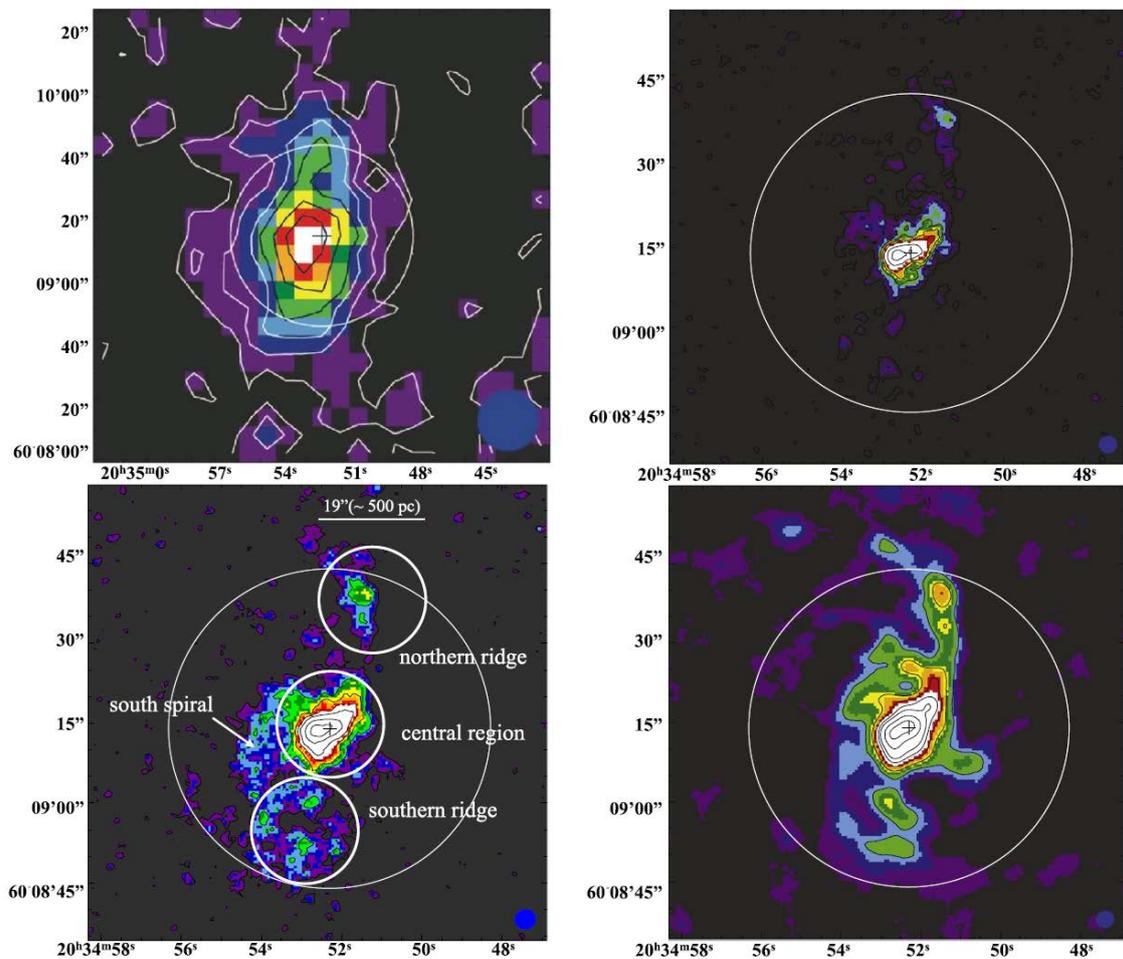


図.左上) NRO 4.5 m 鏡による $^{13}\text{CO}(1-0)$ の積分強度図。右上) CARMA による $^{13}\text{CO}(1-0)$ の積分強度図。左下) NRO 4.5 m 鏡と CARMA のデータを結合した $^{13}\text{CO}(1-0)$ の積分強度図。右下) NRO 4.5 m 鏡と CARMA のデータを結合した $^{12}\text{CO}(1-0)$ の積分強度図。

(2) 30cm サブミリ波望遠鏡を用いてオリオン A 分子雲の広い領域を CO (J=4-3) 輝線をマッピングした結果を発表した。同じ角分解能である既存の CO (J=1-0) 輝線の観測データとの強度比から、分子雲の外縁部で温度が高い (運動温度 ~ 60 K) ことが明らかになり、外部の OB 星団からの輻射で照らされて温度が高くなっていると考えられる。

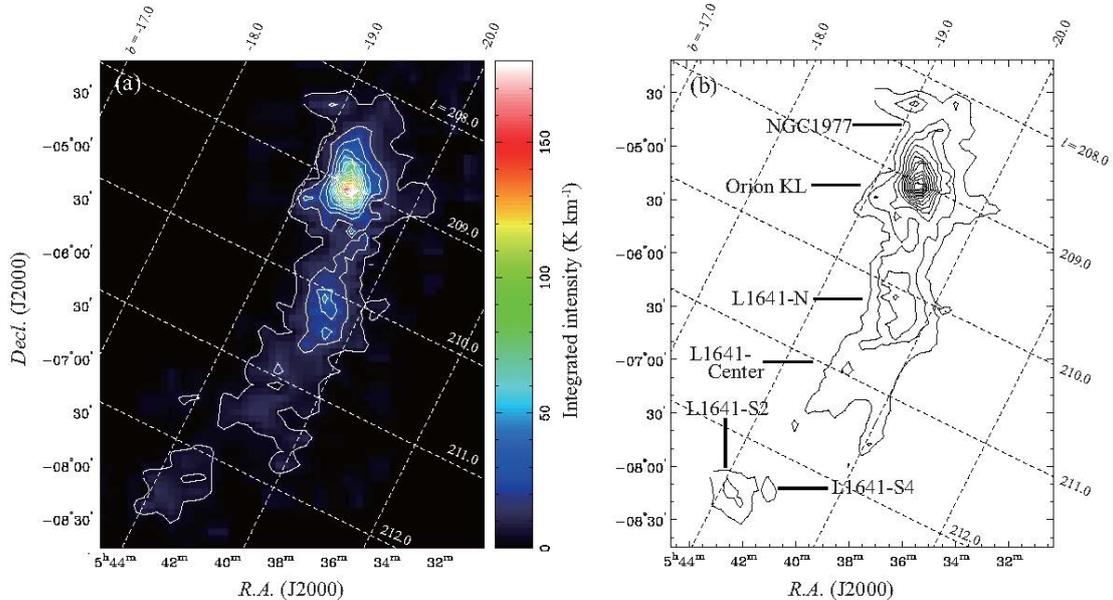


図.オリオン A 分子雲の CO (J=4-3) の積分強度の分布

< 論 文 >

(査読論文)

1. Ishii, Shun; Seta, Masumichi; Nagai, Makoto; Miyamoto, Yusuke; Nakai, Naomasa; Nagasaki, Taketo; Arai, Hitoshi; Imada, Hiroaki; Miyagawa, Naoki; Maezawa, Hiroyuki; Maehashi, Hideki; Bronfman, Leonardo; Finger, Ricardo, “Large-scale CO (J = 4-3) mapping toward the Orion-A giant molecular cloud”, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 68, id.1013, 13 pp. (2016).
2. Rigby, A. J.; Moore, T. J. T.; Plume, R.; Eden, D. J.; Urquhart, J. S.; Thompson, M. A.; Mottram, J. C.; Brunt, C. M.; Butner, H. M.; Dempsey, J. T.; Gibson, S. J.; Hatchell, J.; Jenness, T.; Kuno, N.; Longmore, S. N.; Morgan, L. K.; Polychroni, D.; Thomas, H.; White, G. J.; Zhu, M., “CHIMPS: the $^{13}\text{CO}/\text{C}^{18}\text{O}$ (J = 3 \rightarrow 2) Heterodyne Inner Milky Way Plane Survey”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 456, p.2885-2899. (2016).
3. Izumi, Takuma; Kohno, Kotaro; Aalto, Susanne; Espada, Daniel; Fathi, Kambiz; Harada, Nanase; Hatsukade, Bunyo; Hsieh, Pei-Ying; Imanishi, Masatoshi; Krips, Melanie; Martín, Sergio; Matsushita, Satoki; Meier, David S.; Nakai, Naomasa; Nakanishi, Kouichiro; Schinnerer, Eva; Sheth, Kartik; Terashima, Yuichi; Turner, Jean L., “Submillimeter-HCN Diagram for Energy Diagnostics in the Centers of Galaxies”, *The Astrophysical Journal*, 818, id. 42, 23 pp. (2016).
4. Naruse, Masato; Nitta, Tom; Karatsu, Kenichi; Sekine, Msakazu; Sekiguchi,

- Shigeyuki; Sekimoto, Yutaro; Noguchi, Takashi; Taino, Tohru; Myoren, Hiroaki, "Dual-Double Slot Antennas Fabricated with Single Superconducting Film for Millimeter Wave Camera", *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 37, pp 128-136 (2016).
5. Izumi, Takuma; Kohno, Kotaro; Aalto, Susanne; Doi, Akihiro; Espada, Daniel; Fathi, Kambiz; Harada, Nanase; Hatsukade, Bunyo; Hattori, Takashi; Hsieh, Pei-Ying; Ikarashi, Soh; Imanishi, Masatoshi; Iono, Daisuke; Ishizuki, Sumio; Krips, Melanie; Martín, Sergio; Matsushita, Satoki; Meier, David S.; Nagai, Hiroshi; Nakai, Naomasa; Nakajima, Taku; Nakanishi, Kouichiro; Nomura, Hideko; Regan, Michael W.; Schinnerer, Eva; Sheth, Kartik; Takano, Shuro; Tamura, Yoichi; Terashima, Yuichi; Tosaki, Tomoka; Turner, Jean L.; Umehata, Hideki; Wiklind, Tommy, "ALMA Observations of the Submillimeter Dense Molecular Gas Tracers in the Luminous Type-1 Active Nucleus of NGC 7469", *The Astrophysical Journal*, Volume 811, id. 39, 15 pp. (2015).
 6. Fathi, Kambiz; Izumi, Takuma; Romeo, Alessandro B.; Martín, Sergio; Imanishi, Masatoshi; Hatziminaoglou, Evanthia; Aalto, Susanne; Espada, Daniel; Kohno, Kotaro; Krips, Melanie; Matsushita, Satoki; Meier, David S.; Nakai, Naomasa; Terashima, Yuichi, "Local Instability Signatures in ALMA Observations of Dense Gas in NGC 7469", *The Astrophysical Journal Letters*, 806, id. L34, 6 pp. (2015).
 7. Tsuzuki, Toshihiro; Nitta, Tom; Imada, Hiroaki; Seta, Masumichi; Nakai, Naomasa; Sekiguchi, Shigeyuki; Sekimoto, Yutaro, "Design of wide-field Nasmyth optical system for a submillimeter camera", *Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems*, 1, id. 025002 (2015).
 8. Morokuma-Matsui, Kana; Baba, Junichi; Sorai, Kazuo; Kuno, Nario, "CO emissions from optically selected galaxies at $z \sim 0.1-0.2$: Tight anti-correlation between molecular gas fraction and 4000 Å break strength", *Publications of the Astronomical Society of Japan*, Volume 67, Issue 3, id.36, 13 pp. (2015).
 9. Pan, Hsi-An; Kuno, Nario; Koda, Jin; Hirota, Akihiko; Sorai, Kazuo; Kaneko, Hiroyuki, "Molecular Gas and Star-formation Properties in the Central and Bar Regions of NGC 6946", *The Astrophysical Journal*, 815, id. 59, 14 pp. (2015).
 10. Pan, Hsi-An; Kuno, Nario; Sorai, Kazuo; Umei, Michiko, "Constraints on the minor merging and star formation history of the Wolf-Rayet galaxy NGC 5430 through observations", *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 67, id.116, 17 pp. (2015).
 11. Nakamura, Fumitaka; Ogawa, Hideo; Yonekura, Yoshinori; Kimura, Kimihiko; Okada, Nozomi; Kozu, Minato; Hasegawa, Yutaka; Tokuda, Kazuki; Ochiai, Tetsu; Mizuno, Izumi; Dobashi, Kazuhito; Shimoikura, Tomomi; Kamenoi, Seiji; Taniguchi, Kotomi; Shinnaga, Hiroko; Takano, Shuro; Kawabe, Ryohei; Nakajima, Taku; Iono, Daisuke; Kuno, Nario; Onishi, Toshikazu; Momose, Munetake; Yamamoto, Satoshi, "Z45: A new 45-GHz band dual-polarization HEMT receiver for the NRO 45-m radio telescope", *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 67, id.117, 19 pp. (2015).
 12. Imada, Hiroaki; Matsuo, Taro; Yamamoto, Kodai; Kino, Masaru, "Real-time point-diffraction interferometer and its analytical formulation", *Applied Optics*, volume

54, no. 26, pp. 7870-7878 (2015).

13. Yamamoto, Kodai; Matsuo, Taro; Imada, Hiroaki; Kino, Masaru, “Measurement of complex amplitude with a point-diffraction interferometer”, *Applied Optics*, volume 54, no. 26, pp. 7895 - 7903 (2015).

(国際研究集会集録等)

1. Miyamoto, Y.; Nakai, N.; Kuno, N.; Seta, M.; Salak, D.; Kaneko, H.; Nagai, M.; Ishii, S., “The Velocity Vectors of Gas in Spiral Galaxies and Influence of the Dynamics on Giant Molecular Associations”, *Revolution in Astronomy with ALMA: The Third Year. Proceedings of a Conference held at the Tokyo International Forum, Tokyo, Japan 8-11 December 2014*. Edited by Daisuke Iono, Ken-ichi Tatematsu, Alwyn Wootten, and Leonardo Testi. ASP Conference Series Vol. 499. San Francisco: Astronomical Society of the Pacific, p.159 (2015).
2. Salak, D.; Nakai, N.; Miyamoto, Y., “Feeding and Feedback in the Starburst Galaxy NGC 1808 Revealed with ALMA and ASTE”, *Revolution in Astronomy with ALMA: The Third Year. Proceedings of a Conference held at the Tokyo International Forum, Tokyo, Japan 8-11 December 2014*. Edited by Daisuke Iono, Ken-ichi Tatematsu, Alwyn Wootten, and Leonardo Testi. ASP Conference Series Vol. 499. San Francisco: Astronomical Society of the Pacific, p.155 (2015).
3. Nakanishi, K.; Sorai, K.; Nakai, N.; Kuno, N.; Matsubayashi, K.; Sugai, H.; Takano, S.; Kohno, K.; Nakajima, T., “Ionized Gas Observation Toward a Nearby Starburst Galaxy NGC 253”, *Revolution in Astronomy with ALMA: The Third Year. Proceedings of a Conference held at the Tokyo International Forum, Tokyo, Japan 8-11 December 2014*. Edited by Daisuke Iono, Ken-ichi Tatematsu, Alwyn Wootten, and Leonardo Testi. ASP Conference Series Vol. 499. San Francisco: Astronomical Society of the Pacific, p.117 (2015)
4. Miyamoto, Yusuke; Nakai, Naomasa; Seta, Masumichi; Salak, Dragan; Nagai, Makoto; Ishii, Shun; Yamauchi, Aya, “Hot gas in the center of the Seyfert galaxy NGC 3079”, *IAU General Assembly, Meeting #29*, id.2251511 (2015).
5. Nishimura, Atsushi; Umemoto, Tomofumi; Minamidani, Tetsuhiro; Kuno, Nario; Tosaki, Tomoka; Fujita, Shinji; Matsuo, Mitsuhiro; Tsuda, Yuya; Ohashi, Satoshi,” *Nobeyama 45m CO Galactic Plane Survey: Filament properties and star formation in M17*”, *IAU General Assembly, Meeting #29*, id.2247474 (2015)
6. Kaneko, H.; Kuno, N.; Saito, T. R., “The Detection of Giant Molecular Associations at a Colliding Region by an Interaction of Galaxies”, *Revolution in Astronomy with ALMA: The Third Year. Proceedings of a Conference held at the Tokyo International Forum, Tokyo, Japan 8-11 December 2014*. Edited by Daisuke Iono, Ken-ichi Tatematsu, Alwyn Wootten, and Leonardo Testi. ASP Conference Series Vol. 499. San Francisco: Astronomical Society of the Pacific, p.147. (2015)
7. Morokuma-Matsui, K.; Baba, J.; Sorai, K.; Kuno, N.,” *CO Emissions from Optically Selected Galaxies at $z\sim 0.1-0.2$: Tight Anti-Correlation Between Molecular Gas Fraction and 4000 Angstrom Break Strength*”, *Revolution in Astronomy with ALMA: The Third Year. Proceedings of a Conference held at the Tokyo International Forum, Tokyo, Japan 8-11 December 2014*. Edited by Daisuke Iono,

- Ken-ichi Tatematsu, Alwyn Wootten, and Leonardo Testi. ASP Conference Series Vol. 499. San Francisco: Astronomical Society of the Pacific, p.157. (2015)
8. Nakamura, F.; Tanaka, T.; Awazu, Y.; Shimajiri, Y.; Sugitani, K.; Kawabe, R.; Nishitani, H.; Dobashi, K.; Shimoikura, T.; Yonekura, Y.; Mizuno, I.; Kimura, K.; Tokuda, K.; Kozu, M.; Okada, N.; Hasegawa, Y.; Ogawa, H.; Kamen, S.; Shinnaga, H.; Momose, M.; Nakajima, T.; Onishi, T.; Maezawa, H.; Hirota, T.; Takano, S.; Iono, D.; Kuno, N.; Yamamoto, S.,” Cluster Formation Triggered by Filament Collisions in Serpens South”, Revolution in Astronomy with ALMA: The Third Year. Proceedings of a Conference held at the Tokyo International Forum, Tokyo, Japan 8-11 December 2014. Edited by Daisuke Iono, Ken-ichi Tatematsu, Alwyn Wootten, and Leonardo Testi. ASP Conference Series Vol. 499. San Francisco: Astronomical Society of the Pacific, p.239. (2015)

<学会発表>

1. 藤田真司, 久野成夫, 梅本智文, 西村淳, 南谷哲宏, 濤崎智佳, 松尾光洋, 津田裕也, 山岸光義, 河野樹人, 他FUGINチーム, 「FUGIN: W51 領域におけるCO multi-line 解析」、日本天文学会2016年春季年会、2016年3月15日、首都大学東京
2. 畠山拓也, 久野成夫, 田中隆広, 富安悠人, 川原裕佑, 中井直正, 岸田望美, 徂徠和夫, 武田美保, 柳谷和希, 村岡和幸, 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(6): 近傍矮小銀河NGC2976 における分子ガス分布と星形成」、日本天文学会2016年春季年会、2016年3月14日、首都大学東京
3. 村岡和幸, 武田美保, 柳谷和希, 金子紘之, 中西康一郎, 久野成夫, 徂徠和夫, 濤崎智佳, 河野孝太郎, 「近傍銀河における、空間分解したCO(3-2) 輝線光度ー 赤外線光度の関係」、日本天文学会2016年春季年会、2016年3月14日、首都大学東京
4. 富安悠人, Dragan SALAK, 中井直正, 宮本祐介, 久野成夫, 金子紘之, 畠山拓也, 「近傍銀河NGC1808 のALMAによる12CO(3-2)、連続波観測」、日本天文学会2016年春季年会、2016年3月14日、首都大学東京
5. 河野孝太郎, 泉拓磨, 松下聡樹, 原田ななせ, 中井直正, S. Martín, K. Fathi, K. Sheth 他ALMA NGC1097 チーム, 「ALMAでみた10 pc スケールでの1 型低光度活動銀河核NGC1097」、日本天文学会2016年春季年会、2016年3月14日、首都大学東京
6. Dragan Salak, Naomasa Nakai, Yusuke Miyamoto, 「Feeding and feedback of star formation in NGC 1808 revealed with ALMA」日本天文学会2016年春季年会、2016年3月14日、首都大学東京
7. 山田淑乃, 新田冬夢, 中井直正, 久野成夫, 永井誠, 今田大皓, 久松俊輔, 関本裕太郎, 三ツ井健司, 岡田則夫, 福嶋美津広, 都築俊宏, 野口卓, 松尾宏, Dominjon Agnes, 関根正和, 関口繁之, Shibo Shu, 成瀬雅人, 「野辺山45m電波望遠鏡搭載に向けた広帯域超伝導カメラ冷却光学系の開発」日本天文学会2016年春季年会、2016年3月16日、首都大学東京
8. 永井誠, 久松俊輔, 新田冬夢, 中井直正, 久野成夫, 今田大皓, 山田淑乃, 関本裕太郎, 木内等, 野口卓, 松尾宏, Dominjon Agnes, 関根正和, 関口繁之, Shibo Shu, 成瀬雅人, 前川淳, 南谷哲宏, 齋藤正雄, 「野辺山45m 電波望遠鏡搭載用MKIDカメラの観測システムの構築」日本天文学会2016年春季年会、2016年3月16日、首都大学東京
9. 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(I)」日本天文学会 2016 年春季年会、2016 年 3 月 16 日、首都大学東京

10. 山本広大、松尾太郎、森本悠介、木野勝、今田大皓、入部正継、中村祐一「京大岡山 3.8m 望遠鏡:高コントラスト惑星撮像装置 SEICA の撮像性能」日本天文学会 2016 年春季年会、2016 年 3 月 15 日、首都大学東京
11. 米倉覚則、齋藤悠、沖本有、加古琳一、永瀬桂、安井靖堯、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(13)」日本天文学会2016年春季年会、2016年3月16日、首都大学東京
12. 永井誠、伊佐見薫、奥村大志、中井直正、平田承夫、「AXIe 12 ビット高速デジタイザによるデジタル分光計の性能評価」日本天文学会2016年春季年会、2016年3月16日、首都大学東京
13. 増田聖、成瀬雅人、田井野徹、明連広昭、関本裕太郎、新田冬夢「ミリ波広帯域マイクロストリップ交差構造の開発」日本天文学会2016年春季年会、2016年3月16日、首都大学東京
14. 伊藤和雅、成瀬雅人、田井野徹、明連広昭、関本裕太郎、新田冬夢「ミリ波帯用コプレーナ導波路へのエアブリッジ構造の開発」日本天文学会2016年春季年会、2016年3月16日、首都大学東京
15. 関本裕太郎、野口卓、Wenlei Shan, Dominjon Agnes, 関根正和、関口繁之、Shibo Shu, 成瀬雅人、新田冬夢、川崎繁男、三田信、宮地晃平、他 LiteBIRD WG「LiteBIRD MKID 焦点面検出器の設計」日本天文学会2016年春季年会、2016年3月16日、首都大学東京
16. 徂徠和夫、久野成夫、村岡和幸、中井直正、宮本祐介、金子紘之、諸隈佳菜、松本尚子、武田美保、柳谷和希、畠山拓也、岸田望美、Dragan SALAK, 他COMING メンバー、「NROレガシープロジェクトCOMING (1) : プロジェクトの概要」日本天文学会2015年秋季年会、2015年9月9日、甲南大学
17. 柳谷和希、武田美保、村岡和幸、岸田望美、徂徠和夫、畠山拓也、久野成夫、中井直正、宮本祐介、金子紘之、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 (2) : 棒渦巻銀河NGC2903のCO(J=1-0) 多輝線撮像観測」日本天文学会2015年秋季年会、2015年9月9日、甲南大学
18. 武田美保、柳谷和希、村岡和幸、岸田望美、徂徠和夫、畠山拓也、久野成夫、中井直正、宮本祐介、金子紘之、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 (3) : 棒渦巻銀河NGC 2903 における分子ガスの物理状態診断」日本天文学会2015年秋季年会、2015年9月9日、甲南大学
19. 畠山拓也、久野成夫、中井直正、岸田望美、徂徠和夫、武田美保、柳谷和希、村岡和幸、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 (4) : 近傍矮小銀河NGC2976 の分子ガス観測」日本天文学会2015年秋季年会、2015年9月9日、甲南大学
20. 宮本祐介、徂徠和夫、幸田仁、Dragan SALAK、中井直正、久野成夫、村岡和幸、金子紘之、諸隈佳菜、松本尚子、岸田望美、畠山拓也、武田美保、柳谷和希、他COMING メンバー「NROレガシープロジェクトCOMING (5) : 近傍銀河NGC 3079 のCO観測」日本天文学会2015年秋季年会、2015年9月9日、甲南大学
21. 米倉覚則、齋藤悠、沖本有、加古琳一、永瀬桂、安井靖堯、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、近藤哲朗、関戸衛、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(12)」日本天文学会2015年秋季年会、2015年9月9日、甲南大学
22. 藤沢健太、ほか大学VLBI 連携グループ「大学VLBI 連携の将来計画」日本天文学会2015年

秋季年会、2015年9月9日、甲南大学

23. 栗木美香, 瀬田益道, 永井誠, 今田大皓, 朝倉健, 中井直正, 久野成夫, 石井峻, 宮本祐介, 南谷哲宏, 荒井均, 長崎岳人, 南極天文コンソーシアム「南極30 cm可搬型サブミリ波望遠鏡の指向性能の改善」日本天文学会2015年秋季年会、2015年9月10日、甲南大学
24. 永井誠、今田大皓「一般のアンテナにおける実効開口面積と開口能率について」日本天文学会2015年秋季年会、2015年9月10日、甲南大学
25. 今田大皓, 永井誠「収差と開口能率の関係」日本天文学会2015年秋季年会、2015年9月10日、甲南大学
26. 今田大皓, 永井誠「幾何光学の応用による広視野電波望遠鏡の効率的な光学設計」日本天文学会2015年秋季年会、2015年9月10日、甲南大学
27. 中島大貴、西川由恭、徂徠和夫、日浦皓一朗、新沼浩太郎、藤沢健太、米倉覚則、中井直正、永井誠、村田泰宏、河野裕介、小山友明「ダブルピーク広輝線を持つ電波銀河 3C332 の JVN による高分解能観測」日本天文学会2015年秋季年会、2015年9月10日、甲南大学
28. 梅本智文, 南谷哲宏, 西村淳, 水野範和, 本間希樹, 井上剛志, 廣田明彦, 諸隈佳菜, Chibueze, J., 久野成夫, 藤田真司, 半田利弘, 面高俊宏, 中西裕之, 新永浩子, 松尾光洋, 小澤武揚, 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, 鳥居和史, 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, 亀谷和久, 大橋聡史, 桑原翔, 祖父江義明, 坪井昌人「NRO 銀河面サーベイプロジェクト: 2014 年度進捗」日本天文学会2015年秋季年会、2015年9月10日、甲南大学
29. 松尾光洋, 中西裕之, 梅本智文, 南谷哲宏, 西村淳, 濤崎智佳, 久野成夫, 藤田真司, 津田裕也, 銀河面サーベイチーム「NRO 銀河面サーベイプロジェクト: 銀河系外縁部 2」日本天文学会2015年秋季年会、2015年9月10日、甲南大学
30. 小栗秀悟, 美馬覚, 石塚光, 内田智久, 大谷知行, 関本裕太郎, 田島治, Thushara Damayanthi, Jihoon Choi, 富田望, 永井誠, 長崎岳人, 羽澄昌史, 服部誠, 蓑輪眞, 吉田光宏, Eunil Won「GroundBIRD搭載用超伝導検出器MKIDアレイのデザイン設計」日本物理学会第71回年次大会、2016年3月19日、東北学院大学
31. 美馬覚, 小栗秀悟, 石塚光, 内田智久, 大谷知行, 関本裕太郎, 田島治, Thushara Damayanthi, Jihoon Choi, 富田望, 永井誠, 長崎岳人, 羽澄昌史, 服部誠, 蓑輪眞, 吉田光宏, Eunil Won「GroundBIRD搭載用超伝導検出器MKIDアレイの製作と評価」日本物理学会第71回年次大会、2016年3月19日、東北学院大学

<学位論文>

(博士論文)

数理物質科学研究科・物理学専攻

1. 今田大皓

「Theoretical Study of Radio Telescope Optics with Wide Field of View」

(修士論文)

数理物質科学研究科・物理学専攻

1. 朝倉 健

「Phase Retrieval Holography による南極 10m テラヘルツ望遠鏡の鏡面測定の研究」

2. 田中伊織

「つくば 32m 電波望遠鏡を用いた銀河面のアンモニア分子輝線観測」

3. 畠山拓也

「近傍矮小銀河 NGC2976 における分子ガス分布と星形成」

4. 久松俊輔

「野辺山 45m 電波望遠鏡搭載用超伝導電波カメラの観測システムの開発」

5. 山田淑乃

「野辺山 45m 電波望遠鏡搭載用の広帯域超伝導カメラ冷却光学系の開発」

教育研究科・教科教育専攻

1. 小池紫央里

「星形成領域オリオンA分子雲のアンモニア輝線の観測的研究」

(卒業論文)

理工学群・物理学類

1. 飯田美幸

「アンモニア観測による巨大分子雲 W3 の星形成過程の研究」

2. 川原裕佑

「渦状銀河 M100 のパターン速度と渦状腕における星形成時間の測定」

3. 村山洋佑

「南極 10 m テラヘルツ望遠鏡搭載用超伝導電波カメラの熱設計」

<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 1270 万円）（2/5 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 150 万円）（1/2 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 36 万円）
4. 国立極地研究所平成 26 年度研究プロジェクト：中井直正（研究代表者）、他
「ドームふじ基地における赤外線・テラヘルツ天文学の開拓」
（交付額 95 万円）
5. 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 VLBI 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 542 万円）
6. 自然科学研究機構国立天文台（研究集会）：久野成夫（研究代表者）
「南極で切り開くテラヘルツ 天文学」
（交付額 40 万円）
7. 雄島試作研究所（受託研究）：新田冬夢（研究代表者）
「AR 溝付レンズの最適な形状の研究」
（交付額 54 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（2015年4月1日～2016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3月31日）

<受 賞>

1. 筑波大学大学院博士後期課程・数理物質科学研究科長賞（2016年3月25日）
今田大皓

V. 原子核理論グループ

メンバー

教授	矢花一浩、中務 孝
准教授	寺崎 順 (HPCI 戦略プログラム)
講師	橋本幸男
助教	日野原伸生 (国際テニユアトラック)
研究員	温 凱 (数理物質系物理学域)、鷲山広平 (数理物質系物理学域)
学生	大学院生 4名、学類生 2名

1. 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。

時間依存密度汎関数理論(TDDFT)に基づく物質中の電子ダイナミクスに対する第一原理シミュレーション法の開発と、それを用いたパルスレーザーと誘電体・半導体の相互作用の解明に関わる研究を進めている。本年度は、パルスレーザーにより固体中に生じる非線形分極の生成とそのアト秒科学の方法を用いた計測に対するシミュレーション、フェムト秒レーザーによる非熱加工初期過程に関わる研究を中心に行った。

2. 研究成果

【1】 高強度パルス光と誘電体の相互作用の解明

高強度で極めて短いパルスレーザーと物質の相互作用に関する研究は、光科学のフロンティアの一つとして急速に進展している。光の瞬間的な最大強度が 10^{14}W/cm^2 程度を越えると物質は瞬時にプラズマ化され、物質を非熱的に加工する手段として注目されている。これに近い光強度では、光と物質の相互作用は著しい非線形性が生じる。この非線形性を活用した新奇な光デバイス原理の開拓が課題となっている。我々は、このよう

な極限的なパルス光と物質の相互作用を記述する理論と第一原理計算の手法開発に取り組んでいる。

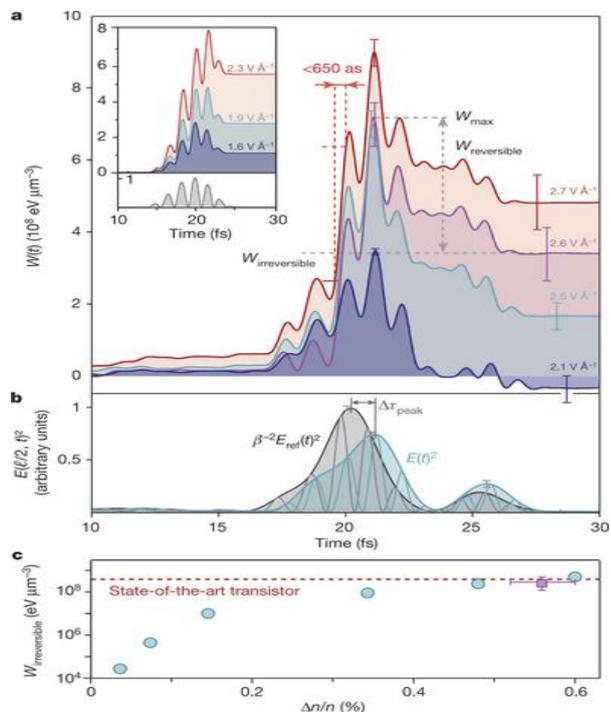
我々のアプローチの根幹をなすのは、結晶の単位セルに、空間的に一様で時間とともに変化する電場が印加されたときの電子ダイナミクスに対する時間依存密度汎関数理論 (TDDFT) に基づく第一原理計算である。実時間・実空間法を用いて TDDFT の基礎方程式である時間依存コーン・シャム方程式を解くことにより、空間的にはナノメートル以下、時間的にはフェムト秒以下の微視的な解像度で光と物質の相互作用を記述し理解することが可能になる。

この単位セル計算により、任意の光電場に対して結晶中に生じる電流密度（と時間積分した分極密度）を得ることができ、それは電場と分極を結び付ける数値的な構成関係式とみなすことができる。この観点から我々は、マクスウェル方程式と TDDFT に基づく電子ダイナミクス計算をマルチスケール手法で結びつけた新奇なシミュレーション法の開発に成功している。これは、京コンピュータ程度の今日利用可能な最大規模の計算機を用いてのみ実行可能であり、高強度パルス光と物質の相互作用を自在に記述する手法として注目を集めている。

以下、この課題に関係した今年度の研究の中から特筆すべきものを紹介する。

(1) ガラス中に生じる非線形分極の実時間計測とパルス光と物質の間のエネルギー移行 (A. Sommer 他 (マックス・プランク量子光学研)、佐藤 (筑波大院生)、矢花)

独マックスプランク量子光学研究所のアト秒実験グループとの共同研究である。高強度パルス光が $10\ \mu\text{m}$ のガラス薄膜を透過する際の光波波形的変化を、アト秒ストリーキング技術を用いて正確に測定した実験に対して、我々の第一原理マルチスケール計算による解析を行った。京コンピュータを用い、パルス光伝播を実験に正確に対応する条件で計算し、その結果を実験結果と比較した。ガラス薄膜を透過したパルス光の時間波形から、非線形分極の時間領域での振る舞いを求め、電場と非線形分極の間に時間の遅れがあることが示された。この時間の遅れは、パルス光と物質電子の間にエネルギー移行



レーザーパルス光から物質電子へのエネルギー移行と対応する計算値 (インセット) 文献[1]より。

があることを示しており、エネルギー移行の時間変化を詳細に調べることが可能となった。得られた結果は、我々の理論計算と少なくとも定性的には良い一致を示すことが確認された。この成果を大学 HP 及び独マックスプランク量子光学研究所において紹介した。

(2) メタ GGA 汎関数及びハイブリッド汎関数を用いた電子ダイナミクス計算 (佐藤、谷口、矢花)

密度汎関数理論で用いられる最も簡単な近似である局所密度近似は、半導体や誘電体のバンドギャップを系統的に過小評価するという問題がある。光応答を記述し実験と比較する際に、このバンドギャップの過小評価は大きな問題となる。近年、バンドギャップを再現可能な汎関数がいくつか知られるようになった。一つは、運動エネルギー密度を用いたメタ GGA 汎関数であり、もう一つは非局所な交換ポテンシャルを部分的に用いるハイブリッド汎関数である。我々は、これらの汎関数を用いた電子ダイナミクス計算を試みた。

メタ GGA 汎関数を用いた場合には、軌道関数の時間発展を安定して遂行するために、予測修正法を用いることが必要であることが明らかとなった。また、バンドギャップを再現できるメタ GGA 汎関数では、ポテンシャルの表式が直接与えられエネルギー密度が未知であることから、系の励起エネルギーをどのように評価するかが課題となる。この点に関し、外場が行った仕事に着目することで計算が可能となることを示した。

ハイブリッド汎関数を用いた計算では、非局所な交換ポテンシャルの軌道関数に対する作用の計算に極めて大きな計算リソースを必要とする。我々は、GPU を搭載したスーパーコンピュータ HA-PACS を利用し交換ポテンシャルの計算に必要な高速フーリエ変換を GPU で加速することにより、高速な計算が可能となることを示した。

(3) 動的 Franz-Keldysh 効果 (乙部 (原研)、篠原 (東大)、佐藤、矢花)

高強度なパルス光が照射している間、物質の光学的性質が極めて短い時間にどのように変化するかは、基礎物理学の観点に加え、パルス光を利用した新奇なデバイス原理の開拓に向けて高い興味を集めている。静的な強い電場を印加した時には、誘電体のバンドギャップよりも低いエネルギーで吸収が起こることが知られており、Franz-Keldysh 効果と呼ばれる。時間とともに変化する強い光電場を印加した場合に起こる光学的性質の変化は、動的 Franz-Keldysh 効果と呼ばれ、長く議論されてきた課題である。我々は、光電場の 1 周期以下の時間スケールで、この動的 Franz-Keldysh 効果がどのように現れるかに関し、計算機シミュレーションと解析的アプローチの両方から検討を行った。

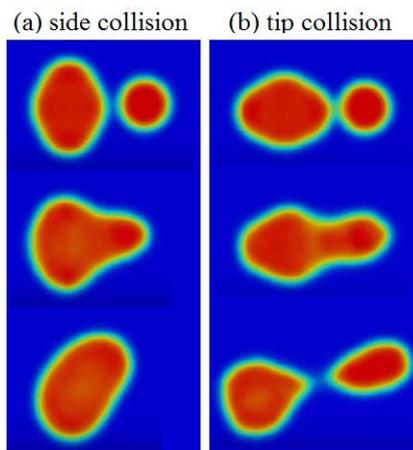
(4) 計算コード ARTED の Xeon-Phi における高速化 (廣川、朴、佐藤、矢花)

電子ダイナミクス計算で最も計算の負荷が高いのは、ハミルトニアンを軌道関数に作用する部分、特にラプラシアン作用である。実空間差分法では、これはステンシル計算となる。高性能計算システム研究部門との共同研究により、このステンシル計算部分の高速化を行った。特に超並列メニーコアマシンである COMA を使い、ARTED による電子ダイナミクス計算を高速化できることを確認した。

【2】 時間依存平均場理論による低エネルギー重イオン反応の研究

(1) 多核子移行反応・準核分裂過程に対する系統的な TDHF 計算 (関澤、矢花)

低エネルギー原子核衝突は、融合反応と共に終状態で2つの分裂片に分かれる反応を利用した、安定に存在しない原子核を生成する手段として興味を持たれている。我々は時間依存 Hartree-Fock (TDHF) 法を用い、 $^{64}\text{Ni} + ^{238}\text{U}$ 反応に対する詳細な計算を行った。この反応は、合成系が原子番号 120 の超重核となることや、 ^{238}U が大きな変形を持つことなどの観点から興味を持たれ、実験が行われてきた。この反応の特徴として、計算から以下のことを明らかにした。まず、反応の様相が、衝突時の U の方向に強く依存する。U の変形軸が入射方向と平行な場合には、長く伸びた複合系が形成され、比較的短い反応時間で分裂し、相対運動から内部運動へのエネルギー移行は小さくなる。この場合、重い分裂片が ^{208}Pb となる傾向が見られ、魔法数が準核分裂ダイナミクスに大きな影響を与えることが見出された。一方、U の変形軸が入射方向に対し垂直な場合には、反応時間が長くなり、エネルギー移行も大きくなる。また、入射エネルギー依存性を調べたところ、バリア近傍の入射エネルギーでは準核分裂が主要であり核融合過程は見られなかったが、より高い入射エネルギーにおいて融合過程が見出された。右図に、計算によって得られた $^{64}\text{Ni} + ^{238}\text{U}$ 反応における密度分布の時間発展の様子を示す。衝突時の U の向きに応じ、反応の様相が大きく異なることが分かる。この知見は、 $Z=120$ の超重核を生成する反応への示唆を与えるものであると考えられる。



$^{64}\text{Ni} + ^{238}\text{U}$ 反応の様子 :

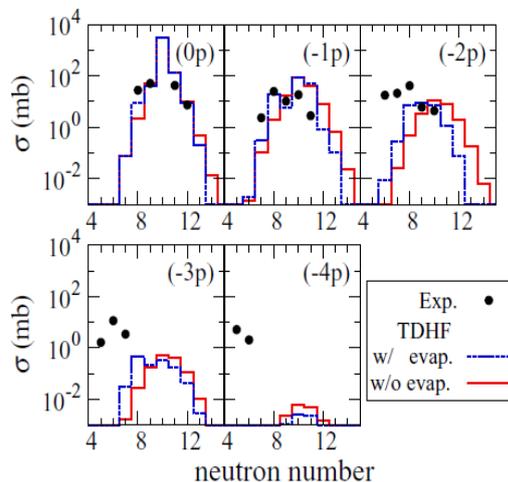
- (a) U の側面に衝突し、融合
- (b) U の先端に衝突し、分裂

(2) 質量の非対称な系における多核子移行反応の研究 (B. J. Roy 他 (BARC、インド)、関澤)

中性子過剰な原子核を実験的に生成し、その性質を明らかにすることは、原子核物理学の重要課題の一つである。近年、多核子移行反応は、中性子過剰な不安定核の生成が期待できる反応として注目を浴びている。我々は、微視的な計算により反応機構を明らか

にし、目的の不安定核を生成する最適な反応を予言することを目指し、研究を進めている。この目的を達成するため、2014 年末から、インドの実験グループとの共同研究を進めている。これまでに我々は、 $^{16,18,24}\text{O}+^{206,208}\text{Pb}$, $^{16,24}\text{O}+^{154}\text{Sm}$, $^{16}\text{O}+^{27}\text{Al}$ 反応に対する系統的な TDHF 計算を行った。その内、実験データの解析が完了した、 $^{18}\text{O}+^{206}\text{Pb}$ 反応について、移行反応の角度分布、フラグメントの運動エネルギー分布、移行反応断面積に対する実験値と計算値の比較を行った。

その結果、主要な反応過程について、TDHF 計算により定量的な記述が得られることが示された。しかし、平均値から離れた反応確率の小さい過程について、実験値とのずれが見出された。この結果は、分析した反応における、現在の計算に含まれていない多体相関の重要性を示唆している。現在は、大きく変形した ^{154}Sm 原子核を標的核とした $^{16}\text{O}+^{154}\text{Sm}$ 反応に着目し、入射エネルギーを変えた結果を分析することにより、多核子移行反応における原子核の変形の効果を明らかにするための研究を進めている。



移行反応断面積の実験値との比較

(3) 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、断熱近似型の理論が提案されているが、そのうちの 하나가、2000 年に提案された断熱自己無撞着集団座標法 (Adiabatic Self-consistent Collective Coordinate Method: ASCC 法) である。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り、特に、過去の断熱時間依存平均場理論では不可能であった一意的な抽出ができる点が優れている。2014 年の秋から、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ことを目指した研究を開始した。BKN 相互作用と呼ばれる有効相互作用を用いた 3 次元座標表示のコード開発を行い、昨年度に引き続き、今年度は、アルファ粒子と炭素 (融合核: 酸素)、アルファ粒子と酸素 (融合核: ネオン) の散乱・融合過程を記述する集団座標をマイクロに決定した。拘束条件付き平均場方程式と、その拘束演算子を決定する局所調和近似方程式を自己無撞着に解くことで、これを実現した。こうして、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が決定される。昨年度求めた 2 つのアルファ粒子の融合・分裂過程に対して決定した集団質量と同様、上記のより重い系においても、遠方で換算質量に一致することが示された。また、2 つの原子核が接触すると、換算質量が大きくなることが分かった。また、反応経路に対しても興味深い結果が得られている。通常行われるように、拘束演算子を四重極演算子や八重極演算子に仮定して反応経路を求

めた結果と、ASCC 法によって自己無撞着に反応経路を決めた場合では、異なる経路が得られた。これは、系の動的な性質を反映した理論によって初めて可能になった成果と言える。

【3】 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（理研）、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 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、開発したコードを利用して、アイソスピン対称性の破れを定量的に検証する研究を行った。

アイソスピン対称性は、原子核において近似的に成立する対称性であるが、電磁相互作用では破れていることが知られている。また、強い相互作用においても、u, d クォーク間に質量差が存在するためわずかに破れている。この破れの度合いと核力との関係は、軽い原子核について調べられていたが、重い原子核における研究はほとんど無かった。我々は、アイソスピン不変なエネルギー汎関数にそれを破る汎関数を加えることでこれを実現し、実験データとの比較からその破れの大きさを評価した。荷電類似状態（アイソバリックアナログ状態）と呼ばれる状態を系統的に計算し、豊富な実験データとの比較を行い、新しいパラメータを 2 つだけ導入することにより、アイソスピン対称性を破る普遍的な汎関数を構築することに成功した。特に、質量依存性に現れるジグザグ構造等、特徴的な振る舞いが再現できており、また破れの大きさが重い原子核の質量に拡大されて現れるといった現象も明らかになりつつある。現在、より詳細な解析を実行中である。

【4】 超重元素領域におけるエネルギー密度汎関数の不定性（中務、Afanasjev（ミシシッピ州立大）、Ring（ミュンヘン工科大））

2015 年 6 月から 8 月にかけて、米国・ミシシッピ州立大学の Anatoli Afanasjev 教授が研究室にサバティカルで滞在した。これを契機に、原子核のエネルギー密度汎関数の制度・不定性を明らかにする研究をスタートさせた。特に、陽子数が 100 を超える超重元素領域には、実験データが少ないために不定性が大きいと予想される。2015 年の大晦日に、森田氏をグループリーダーとする理化学研究所の実験グループが元素番号 113 の命名権を獲得したニュースは記憶に新しいが、将来の実験の設計などにおいても、理論の不定性を明らかにしておくことは重要である。

我々は、多くの異なる共変形式エネルギー汎関数を用いて軸対称性変形を取り入れた計算を実行し、理論予測のばらつきを評価した。その結果、開殻配位 (open-shell configuration) に対応する多くの超重核の構造に対しては、ばらつきが非常に小さく、理論予測の信頼度が高いことが分かった。一方、閉殻配位 (closed-shell configuration) に近い原子核に対してのばらつきが大きい。また、変形を考慮しない計算によって示唆された中性子の魔法数 $N=172$ が、変形を考慮することによって消滅すること (すなわち、 $N=172$ の原子核のほとんどは変形していること) を示した。

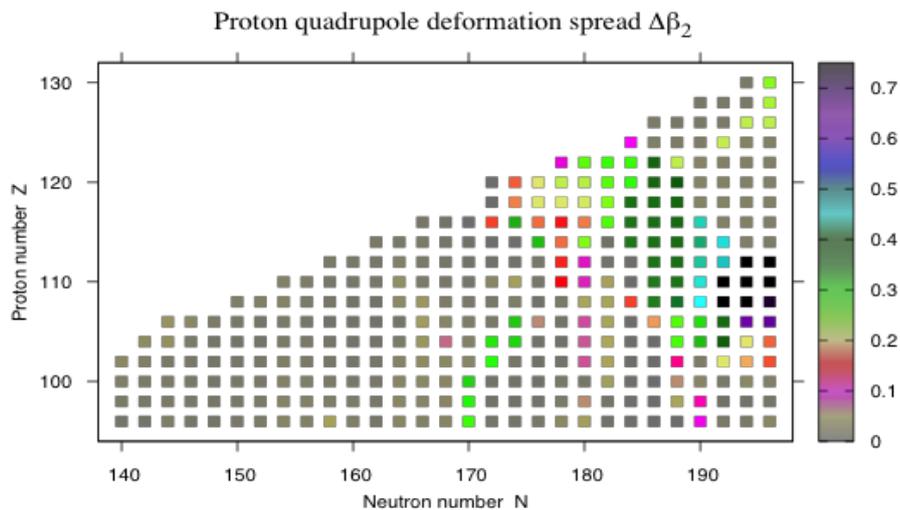


図 1 : 超重核領域における変形度の理論予測不確定性

【5】 冷却フェルミ系における倍周期状態の安定性 (中務、渡辺 (APCTP)、Yoon (APCTP)、Dalfvo (トレント大))

光格子にトラップされたフェルミ粒子の冷却原子系における対相関・超流動ダイナミクスを、周期性を取り入れた Bogoliubov-de-Gennes (BdG) 方程式を解くことで研究した。光格子のポテンシャルが距離毎に周期的である場合、通常、固体のバンド計算として良く知られているように、この周期 d に対応するブロッホ波動関数で記述される。しかし、対相関が対ポテンシャルを生み出す場合には、その機構が非線形であるために、ポテンシャルの周期が d ではなく、 $2d$ 、 $3d$ 、 \dots といった d の整数倍の周期のポテンシャルが現れる場合がある。これを倍周期状態と呼ぶ。これまでのボソン凝縮系の研究では、これらの倍周期状態は常にエネルギー的に高く、基底状態には現れないと言われていた。今回、フェルミ粒子系での対相関が比較的弱い BCS 的な状態においては、周期 d の状態よりも、倍周期状態のエネルギーが低くなる可能性を示唆した。また、倍周期状態の安定性を、時間依存 BdG 方程式を解くことで調査し、現在実験が可能となる時間スケールにおいて実現・観測が可能であることを示した。

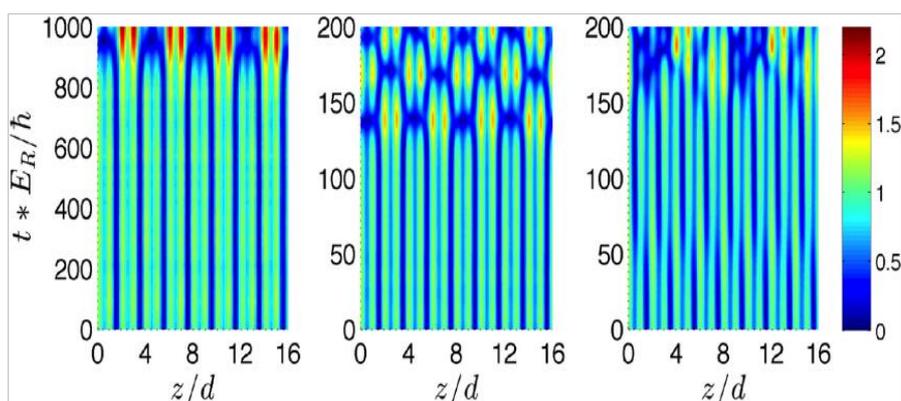


図2：TDBdG 計算による倍周期状態の安定性の検証。真ん中の図がユニタリ極限に対応し、左がBCS、右がBEC側に対応。

【6】 リチャードソン模型における集団励起構造(中務、侃(M2))

原子核の励起状態の中で、スピン・パリティが 0^+ の状態の性質には多くの未解決問題が残っている。多重フォノン状態、クラスター状態、対振動状態など、原子核における 0^+ 励起状態は多様な様相を示すが、最近の実験でも、過去の伝統的な解釈を否定する実験データが数多く報告されている。これらのデータの蓄積にも関わらず、まだその本質が理解できていないというのが現状である。

我々は、対相関をもたらす集団的ダイナミクスにこの問題の本質があると考え、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）を最初の手がかりとして、この課題に取り組んでいる。厳密解では、対凝縮によって基底状態が対回転スペクトルを生み出すことが示されたが、励起 0^+ 状態に対しては、対回転スペクトルが現れる場合と現れない場合があることが分かった。この違いを生み出す機構を理解するために、厳密解に加えて、準古典的なアプローチを取ることによって、そのダイナミクスを解析した。対回転は、対凝縮したフェルミ系で発言する集団運動（南部・ゴールドストーン・モード）であり、ゲージ空間での回転運動と見なすことができる。このような回転運動が現れるためには、系に対して大局的なゲージ角が定義できる必要があるが、これが励起状態に対して可能になると対回転スペクトルが現れることが分かった。

【7】 3次元空間上の有限振幅法の開発(鷲山、中務)

原子核の励起モードの解析に対相関を含む密度汎関数に基づく準粒子乱雑位相近似法(QRPA)がよく用いられている。ただし、自己無撞着な密度汎関数に基づくQRPA計算は大規模な数値計算を必要とする。その要因として、残留相互作用の煩雑な計算、及び、大次元のQRPA行列の対角化があげられる。これらの要因を回避して効率良くQRPA計算を実行するために2007年に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行列の対角化をあら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。これまでQRPA計算は2次元の軸対称原子核に

限られてきたが、本研究では、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。数値計算コードはほぼ完成し、妥当な計算時間及びメモリ容量での数値計算の実行が可能であることを示した。また、テスト計算としていくつかの軸対称変形原子核のアイソスカラー四重極応答に応用し、先行研究と同様の結果を得た。今後は、非軸対称原子核の励起モード、大振幅集団運動に対する質量パラメータ計算に応用する。

【8】 原子核の二重ベータ崩壊の原子核行列要素（寺崎）

寺崎は五年前に赴任して以来ニュートリノレス二重ベータ崩壊の理論的研究を実施している。その中心的内容は、準粒子乱雑位相近似を用いたその崩壊の原子核行列要素の計算である。その崩壊が観測された場合にニュートリノの質量スケールを決定するために必要な原子核行列要素の信頼できる数値を出すことが目標である。

2015年度は、 ^{150}Nd から ^{150}Sm へのニュートリノレス二重ベータ崩壊の原子核行列要素を陽子・中性子準粒子乱雑位相近似 (pnQRPA) を用いて本来の二重ベータ崩壊経路に沿って求め、2014年度に得ていた、完全性近似のもとで可能な二核子移行経路を用いた原子核行列要素との整合性を研究した。これら二つの原子核行列要素は一致しなければならないが、QRPA アプローチでは、二重ベータ崩壊経路と二核子移行経路では、影響の大きい相互作用が異なるため、任意の相互作用に対して一致を保証することができない。寺崎は、異なる経路による原子核行列要素の一致要請が、不確定性の比較的大きい陽子・中性子対相互作用の強さを決める条件として用いることができるということを見出した。この原理によって求めたアイソスカラー陽子・中性子対相互作用の強さは、ほぼ同種核子間対相互作用の強さの平均値であった。これを用いた二個ニュートリノ二重ベータ崩壊の原子核行列要素は、この崩壊に対する寿命の実験値から求められる半実験値より約50%大きい、この半実験値を再現するように相互作用の強さを調節する計算を除くと、因子2以下のずれは、いい方である。寺崎の方法では、pnQRPA の解は近似がよい範囲にあり、従来の強すぎるアイソスカラー陽子・中性子対相互作用（従来の重複計算方法で二個ニュートリノ二重ベータ崩壊原子核行列要素のフィッティングをするところなる）による pnQRPA の劣化問題が解決される。

寺崎は2011年度以来 QRPA を用いた二重ベータ崩壊の研究を行ってきたが、異なる原子核に基づく QRPA 状態の重複を求める際、QRPA 基底状態の波動関数をあらわに用いること、pnQRPA と同種粒子 QRPA の積基底状態波動関数を用いること、そして2015年度の、異なる崩壊経路を相互作用に対する拘束条件として用いることの三つが分野にとって大きな意味のある進歩であった。これによって QRPA の適用方法の主要な改良は完結した。

【9】 有限振幅法による南部=Goldstone モードを取り扱う定式化と対回転モードの系統的評価（日野原、Nazarewicz(ミシガン州立大)）

大局的な連続対称性が自発的に破れると対称性を回復させる南部=Goldstone (NG) モードが発生する。有限核では並進対称性やゲージ対称性の破れに伴って重心運動、対回転運動が NG モードとして発生し、そのモードの慣性質量である Thouless-Valatin の慣性モーメントは準粒子乱雑位相近似 (QRPA) によって計算できる。原子核密度汎関数の QRPA を線形応答理論によって解く有限振幅法を座標—運動量表示で定式化することにより、NG モードの Thouless-Valatin の慣性モーメントおよび NG モードの非自明な座標演算子を応答関数から効率よく計算する方法を確立した。この定式化は重心運動と対回転運動で成立することを数値計算によって確認した。

対相関はゲージ対称性の破れをもたらす原子核での代表的な集団的相関であるが、原子核密度汎関数での対密度汎関数の理解はあまり進んでいない。これは対相関と関連のある実験観測量が少ないことが一因である。一般的には対ギャップを奇核と偶核の束縛エネルギー差と対応させて対密度汎関数の結合定数を決めるが、対ギャップは厳密には実験観測量ではないため、これだけから対密度汎関数の詳細を議論することは難しい。先の定式化を用いて、対回転の Thouless-Valatin の慣性モーメントを系統的に評価し、以下の結論を得た。1) 対回転の慣性モーメントは対相関の新しい指標となることを提案した。慣性モーメントは偶々核の束縛エネルギーからのみ導出できる測定量であるため密度汎関数の時間反転に対して符号を変える time-odd 項の影響を受けない。2) 対回転の慣性モーメントは偶々核の二重束縛エネルギー差の逆に対応しており、 δ_{2n} 、 δ_{2p} 、 δV_{pn} として知られている二重閉殻付近での一粒子状態の性質を表す量は、超伝導状態では対相関の集団性と関連のある対回転の慣性モーメントとして総合的に理解できることを示した。3) 中性子過剰不安定原子核の対回転の慣性モーメントは対密度汎関数の密度依存性に依存することを指摘した。中性子過剰不安定核の質量測定によって将来的に対相関の詳細が明らかになる可能性がある。4) 中性子、陽子両方の粒子数保存が破れている場合の NG モードは中性子と陽子の混ざったモードになっていることを初めて系統的に示した。

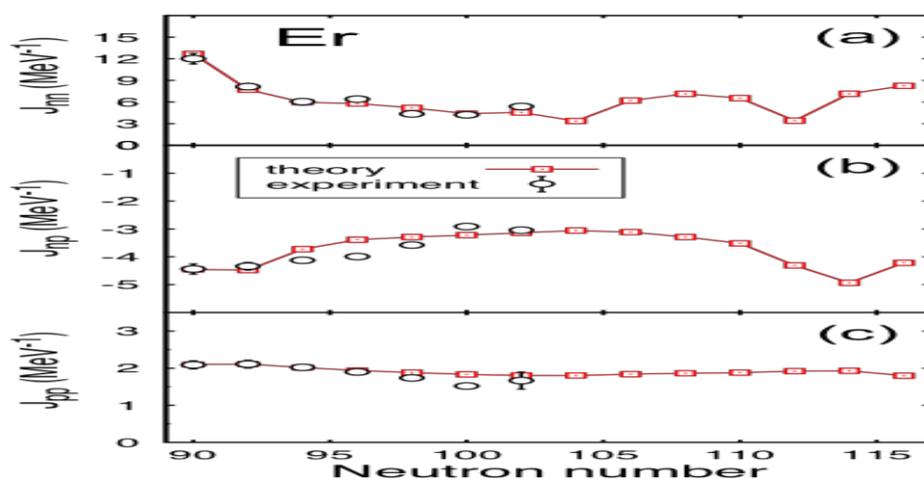


図3：エルビウム同位体基底状態での二次元対回転の慣性モーメントの対角成分 J_{nn} (a)、 J_{pp} (c) と非対角成分 J_{np} (b)。

【10】 非軸対称励起モードを扱う有限振幅法の計算コード構築と希土核双極子巨大共鳴の系統的計算 (日野原、Kortelainen (ユバスキュラ大)、大石(ユバスキュラ大)、Nazarewicz(ミシガン州立大))

原子核密度汎関数理論での準粒子乱雑位相近似(QRPA)は巨大共鳴を始めとする集団励起状態を記述する理論であるが、従来の行列対角化の方法は計算スケールが大きくなるため、二準粒子模型空間のサイズに制限を加える必要がある。QRPAの効率的解法である有限振幅法ではこの模型空間の制限なく計算が可能である。これまでに軸対称調和振動子基底によるHartree-Fock-BogoliubovコードHFBTHOに基づいて有限振幅法を実装してきたが、今回の拡張によって軸対称変形原子核の非軸対称励起モードを計算することが可能となった。一例として、重い軸対称変形原子核の ^{240}Pu の四重極、八重極巨大共鳴が計算できることを示し、また、 ^{154}Sm の $K=0, 1, 2, 3$ の低エネルギー集団モードの励起エネルギーおよび $B(E3)$ を以前に開発した複素積分の方法を用いて示した。このコードの開発によって、軸対称変形した原子核のあらゆる多重極モードの効率よい系統的計算が可能となった。

構築したコードを用いて希土類核(Gd-W)の巨大双極子共鳴の系統的計算を行った。巨大双極子共鳴の平均エネルギーとエネルギー幅の多くは計算によって再現できることを示したが、Erより重い原子核ではエネルギー幅にずれがあった。このずれを評価するために密度汎関数の結合定数を変化させ、その依存性を分析した。和則を増大させるThomas-Reiche-Kuhn増大因子を増やすと共鳴エネルギーのピークが高エネルギー側に動くが、遷移の分布にはあまり影響しないことがわかった。実験とのずれの解消のためにはさらなる系統的な密度汎関数の最適化、あるいはQRPAを超えた理論を用いるが今後必要になると考えられる。

【11】 生成座標法による二重ベータ崩壊核行列要素における集団相関の役割の分析 (日野原、Menéndez(東大)、Engel(ノースカロライナ大)、Martínez-Pinedo(ダルムシュタット工科大)、Rodríguez(マドリード自治大))

変形や対相関といった集団的自由度は原子核基底状態の記述には不可欠であるが、ニュートリノレス二重ベータ崩壊の原子核行列要素に対して集団相関はどの程度関連があるのかを、シェル模型厳密計算が可能なpf殻領域(Ca, Ti, Cr)での二重ベータ崩壊のガモフ-テラー核行列要素をシェル模型計算と生成座標法計算によって分析した。KB3G相互作用を用いたシェル模型計算、およびKB3Gから導出した分離型集団ハミルトニアンをシェル模型計算、および同じ分離型集団ハミルトニアンを四重極変形とアイソスカラー型中性子-陽子対振幅を生成座標に用いた生成座標法を比較した。

シェル模型計算同士の比較では分離型集団ハミルトニアンはKB3Gの核行列要素の結果をよく再現し、核行列要素を記述する上でもハミルトニアンの集団相関近似の重要性を示した。さらに、アイソスカラー型対相関を取り入れた生成座標法の結果はシェル模型

計算をよく再現した。生成座標法は平均場理論に基づいているため模型空間をシェル模型よりも容易に拡張することができるため、特に集団性が高く厳密なシェル模型計算が困難となる変形中重核領域では今後分離型集団ハミルトニアンを用いた生成座標法計算による核行列要素の評価が強力な手法となりうることを示した。

【12】 Gogny-TDHFBによる $^{20}\text{O}-^{20}\text{O}$ 正面衝突の計算 (橋本)

原子核の振る舞いを研究するうえで、時間依存平均場の方法は定性的にも定量的にも極めて有用な枠組みとなっている。原子核の基底状態近傍の状態においては対相関が重要な働きをすることが知られているので、中性子過剰核の性質を理解する目的で、TDHFの枠組みを拡張して対相関を扱えるようにした時間依存ハートレーフォックボゴリュボフ (TDHFB) の実用的な数値計算が行われるようになってきた。橋本は、調和振動子基底と空間格子としてのLagrange格子点を組み合わせた基底を利用し、Gogny力を用いたTDHFBを解く、という数値計算の方法を整備してきた。昨年度は、 $^{20}\text{O}+^{20}\text{O}$ および $^{20}\text{O}+^{34}\text{Mg}$ の正面衝突の計算を行った。この計算で特に着目した点は、1960年代から話題になっている、超流動原子核反応における核子移行機構とジョセフソン効果との対応である。HFBを解いて得られる超流動原子核では、粒子数演算子の共役量であるゲージ角に関連した不変性があるが、反応時の超流動原子核においては、物理的な量が(相対)ゲージ角に依存すると考えられる。実際の数値計算は、 $^{20}\text{O}+^{20}\text{O}$ において、クーロン障壁頂上付近の軌道を2本(2個の初期エネルギー)設定し、また、相対ゲージ角 χ を0度、45度、90度、135度のそれぞれについて、相対距離2.1 fm離れた点から計算を開始した。この一連の計算により、①超流動原子核間のポテンシャルエネルギーに相対ゲージ角依存性があり、その“高さ”では0.5 MeV程度、ピーク位置では0.2 fm程度のずれになる、②対相関エネルギーは相対ゲージ角が90度のときに最小となる、さらに、③移行中性子数は、相対ゲージ角の2倍($\Phi=2\chi$)の正弦($\sin \Phi$)に比例する、ことがわかってきた。③は、ジョセフソン効果と類似である。今後は、粒子数射影法を用いながら、対相関のあるときの核子移行の機構を明らかにするためのTDHFB計算を継続する。

3. 教育

<学位論文>

1. 理学博士:

佐藤駿丞、博士(理学)

“Time-dependent density functional theory for extremely nonlinear interactions of light with dielectrics”

2. 理学修士

1. 桑原有輝、修士(理学)

“時間依存密度汎関数理論による非線形分極の時空間分析”

2. 倪 放、修士 (理学)

“Richardson 模型における集団座標の量子化と 0+集団励起状態の解明”

4. 受賞、外部資金、知的財産権等

< 受賞 >

1. 第 10 回日本物理学会若手奨励賞 (第 17 回核理論新人論文賞)、
関澤一之、「時間依存密度汎関数法による重イオン多核子移行反応の研究」、2016
年 3 月
2. 筑波大学学長表彰、
佐藤駿丞、「Time-dependent density functional theory for extremely nonlinear
interactions of light with dielectrics」、2016 年 3 月 25 日

< 外部資金 >

1. 日本学術振興会科学研究費、基盤研究 (B)、矢花一浩、代表、2015 年度 4900
千円、「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」
2. 日本学術振興会二国間交流事業オープンパートナーシップ共同研究 (アメリカ
合衆国)、矢花一浩、代表、2015 年度 288 千円、「超高速電子ダイナミクス
に対する第一原理計算アプローチ」
3. 株式会社 IHI との共同研究、2015 年度研究経費 1000 千円、「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」
4. 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、
5,800,000 円 (H27 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」
5. 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 (H27 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」
6. 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 (H27 年度)、「核構造計算による
核反応モデルの高精度化」
7. 科研費 平成 27 年度基盤研究 C、寺崎順、研究代表者、
平成 26 年度採択、交付額 (直接経費) 1,300 千円、
課題名 QRPA を用いたニュートリノレス二重ベータ崩壊の原子核行列
要素計算。
8. 科研費 平成 27 年度新学術領域「宇宙の歴史をひもとく地下素粒子原子核
研究」公募研究、寺崎順、研究代表者、平成 27 年度採択、交付額
(直接経費) 900 千円、課題名 原子核行列要素の方法による不一致問題の
解決。

5. 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, F. Krausz, "Attosecond nonlinear polarization and light-matter energy transfer in solids", Nature, doi:10.1038/nature17650.
2. T. Otobe, Y. Shinohara, S.A. Sato, K. Yabana, "Femtosecond time-resolved dynamical Franz-Keldysh effect", Phys. Rev. B93, 045124 (2016).
3. G. Wachter, S.A. Sato, C. Lemell, X.M. Tong, K. Yabana, J. Burgdoerfer, "Controlling ultrafast currents by the non-linear photogalvanic effect", New J. Phys. 17, 123026 (2015).
4. G. Wachter, S. Nagele, S.A. Sato, R. Pazourek, M. Wais, C. Lemell, X.-M. Tong, K. Yabana, J. Burgdoerfer, "Protocol for observing molecular dipole excitations by attosecond self-streaking", Phys. Rev. A92, 061403 (2015).
5. S.A. Sato, Y. Taniguchi, Y. Shinohara, K. Yabana, "Nonlinear electronic excitations in crystalline solids using meta-generalized gradient approximation and hybrid functional in time-dependent density functional theory", J. Chem. Phys. 143, 224116 (2015).
6. S.A. Sato, K. Yabana, Y. Shinohara, T. Otobe, K.M. Lee, G.F. Bertsch, "Time-dependent density functional theory of high-intensity, short-pulse laser irradiation on insulators", Phys. Rev. B92, 205413 (2015).
7. X.-M. Tong, G. Wachter, S.A. Sato, C. Lemell, K. Yabana, J. Burgdoerfer, "Application of norm-conserving pseudopotentials to intense laser-matter interactions", Phys. Rev. A92, 043422 (2015).
8. T. Akahori, Y. Funaki, K. Yabana, "Imaginary-time formalism for triple-alpha reaction rate", Phys. Rev. C92, 022801 (2015).
9. Y. Komatsu, M. Umemura, M. Shoji, M. Kayanuma, K. Yabana, K. Shiraishi, "Light absorption efficiencies of photosynthetic pigments: the dependence on spectral types of central stars",

- International Journal of Astrobiology, 14 (3), 505-510 (2014).
10. Y. Komatsu, M. Kayanuma, M. Shoji, K. Yabana, K. Shiraishi, M. Umemura,
"Light absorption and excitation energy transfer calculations in primitive
photosynthetic bacteria",
Molecular Physics, 113 (12), 1413-1421 (2015).
 11. K. Sekizawa, K. Yabana,
"Time-dependent Hartree-Fock calculations for multinucleon transfer and
quasifission processes in the $^{64}\text{Ni}+^{238}\text{U}$ reaction",
Phys. Rev. C 93, 054616 (2016).
 12. Sonika, B.J. Roy, A. Parmar, U.K. Pal, H. Kumawat, V. Jha, S.K. Pandit, V.V.
Parker, K. Ramachandran, K. Mahata, A. Pal, S. Santra, A.K. Mohanty, and K.
Sekizawa,
"Multinucleon transfer study in $^{206}\text{Pb}(^{18}\text{O}, x)$ at energies above the Coulomb
barrier",
Phys. Rev. C 92, 024603 (2015).
 13. S. Yoon, F. Dalfovo, T. Nakatsukasa, and G. Watanabe,
" Multiple period states of the superfluid Fermi gas in an optical lattice ",
New J. Phys. 18, 023011 (2016).
 14. K. Wen, K. Washiyama, F. Ni, T. Nakatsukasa,
"Time-dependent Density Functional Studies of Nuclear Quantum
Dynamics in Large Amplitudes",
Acta Phys. Polo. B. Proc. Suppl. 8, 637 (2015).
 15. S. E. Agbemava, A. V. Afanasjev, T. Nakatsukasa, and P. Ring,
"Covariant density functional theory: Reexamining the structure of
superheavy nuclei", Phys. Rev. C 92, 054310 (2015).
 16. S. Ebata and T. Nakatsukasa,
"Repulsive aspects of pairing correlation in nuclear fusion reaction", JPS
Conf. Proc. 6, 020056 (2015).
 17. W. Horiuchi, T. Inakura, T. Nakatsukasa, and Y. Suzuki,
"Systematic analysis of total reaction cross sections of unstable nuclei
with Glauber theory", JPS Conf. Proc. 6, 030079 (2015).
 18. K. Sato, J. Dobaczewski, T. Nakatsukasa, and W. Satula,
"Mean-field calculation based on proton-neutron mixed energy density
functionals", JPS Conf. Proc. 6, 020051 (2015).
 19. K. Matsuyanagi, M. Matsuo, T. Nakatsukasa, K. Yoshida, N. Hinohara, K.
Sato,
"Microscopic derivation of the quadrupole collective Hamiltonian for

- shape coexistence/mixing dynamics”,
J. Phys. G 43, 24006 (2016).
20. J. Terasaki
“Two decay paths for calculating the nuclear matrix element of
neutrinoless double- β decay using quasiparticle random-phase
approximation”,
Phys. Rev. C **93**, 024317 (2016)
21. J. Terasaki
“Many-body correlations of QRPA in nuclear matrix elements of double- β
decay”,
AIP Conf. Proc. **1686**, 020025 (2015).
22. N. Hinohara, M. Kortelainen, W. Nazarewicz, E. Olsen,
“Complex-energy approach to sum rules within nuclear density functional
theory”,
Phys. Rev. C 91, 044323 (2015)
23. N. Hinohara,
“Collective inertia of the Nambu-Goldstone mode from linear response
theory”, Phys. Rev. C 92, 034321 (2015)
24. M. Kortelainen, N. Hinohara, W. Nazarewicz,
“Multipole modes in deformed nuclei within the finite amplitude method”,
Phys. Rev. C 92, 051302(R) (2015)
25. J. Menéndez, N. Hinohara, J. Engel, G. Martínez-Pinedo, T. R. Rodríguez,
“Testing the importance of collective correlations in neutrinoless $\beta\beta$
decay”, Phys. Rev. C 93, 014305 (2016)
26. T. Oishi, M. Kortelainen, N. Hinohara,
“Finite amplitude method applied to the giant dipole resonance in heavy
rare-earth nuclei”, Phys. Rev. C 93, 034329 (2016)
27. N. Hinohara and J. Engel,
“Effect of Fluctuations of Quadrupole Deformation and Neutron-Proton
Correlations on Double-Beta Decay Nuclear Matrix Element”, JPS Conf.
Proc. 6, 020034 (2015)
28. Y. Hashimoto,
“Hartree-Fock and time-dependent Hartree-Fock calculations with the
Gogny interaction using a Lagrange mesh”,
INFORMATION Vol. 18(2015), 2219 - 2232.

B) 査読無し論文

1. 倪放,
” 対相関模型における 0^+ 集団励起状態の解明”、原子核研究 2016 夏の学校特集号、Vol. 60、Suppl. 1、pp. 69–71 (2016)

(2) 国際会議発表

A) 招待講演

1. K. Yabana,
"Time-dependent density functional theory for strong laser pulses in dielectrics", Exploration of ultra-fast time scales using time dependent density functional theory and quantum optical control theory, Sept. 28-Oct. 2, 2015, CECAM-HQ-EPFL, Lausanne, Switzerland.
2. K. Yabana,
"Time-dependent density functional theory for extreme nonlinear optics", Psi-K 2015, Sept. 6-10, 2015, San Sebastian, Spain.
3. K. Yabana,
"Time-dependent Hartree-Fock calculations for multi-nucleon transfer and quasi-fission processes", The 12th Int. Conf. on Nucleus-Nucleus Collisions, June 21-26, 2015, Catania, Italia.
4. T. Nakatsukasa,
"Recent activities in the time-dependent density-functional theory", 9th Japan-China Joint Nuclear Physics Symposium (JCNP2015), Ibaraki, Japan, Nov. 7-12, 2015.
5. T. Nakatsukasa,
"Isospin invariant energy density functional and its applications", 2015 SKLTP-BLTP Joing Workshop on Physics of Strong Interaction, Guillin, China, Oct. 29 - Nov. 3, 2015.
6. T. Nakatsukasa,
"TDDFT studies of nuclear quantum dynamics in small and large amplitudes", XXII Nuclear Physics Workshop "Marie & Pierre Curie", Kazimierz-Dolny, Poland, Sep. 22-27, 2015.
7. T. Nakatsukasa,
"Problems associated with the symmetry breaking", Progress in and beyond Theoretical Nuclear Physics Laboratory, Wako, Japan, Mar. 28, 2016.
8. J. Terasaki
"Proton-neutron pairing correlations in double- β decay"
2nd International Workshop & 12th RIBF Discussion on Neutron-proton Correlations, Hong Kong, P. R. China, Jul. 6-9, 2015.

9. N. Hinohara,
 “Isospin Invariant Density Functional Theory”,
 2015 Gordon Research Conference on Nuclear Chemistry “Confluence of
 Structure and Reactions”, Colby-Sawyer College, New London, NH, USA,
 May 31-Jun. 5, 2015.
10. N. Hinohara,
 “Neutron-proton pairing fluctuations and double-beta decay”,
 2nd International Workshop & 12th RIBF Discussion on Neutron-Proton
 Correlations, Univ. of Hong Kong, Hong Kong, Jul. 6-9, 2015.
11. Kai Wen
 The inertial mass of nuclear collective motion derived by the adiabatic
 self-consistent collective coordinate(ASCC) method,
 SKLTP-BLTP Joint Workshop on Physics of Strong Interaction in Guilin,
 China. Oct. 29-Nov. 3rd, 2015.
12. Shunsuke A. Sato
 "Multiscale implementation of real-time TDDFT for nonlinear light-
 matter interactions", 5th International Workshop on Massively Parallel
 Programming Now in Quantum Chemistry and Physics - Toward
 exascale computing ,University of Tokyo, Tokyo, Japan, November 26-27,
 2015.

B) 一般講演

1. J. Terasaki
 “Effects of nuclear many-body correlations on neutrinoless double- β decay
 in quasiparticle random-phase approximation”
 Symposium on Quarks to Universe in Computational Science (QUCS2015),
 Nara, Japan, Nov. 4-9, 2015.
2. J. Terasaki
 “Many-body correlations of QRPA in nuclear matrix elements of double- β
 decay”, 10th MEDEX’15 Meeting (Matrix Elements for the Double- β -decay
 Experiments), Prague, Czech, Jun. 9-12, 2015.
3. N. Hinohara,
 “QRPA sum rules within the finite-amplitude method”,
 Nuclear Computational Low-Energy Initiative Collaboration Meeting
 (NUCLEI2015), Michigan State Univ., East Lansing, MI, USA, Jun. 10-13,
 2015.
4. N. Hinohara, J. Engel,

- “Generator coordinate method with proton-neutron pairing coordinates and evaluation of double-beta decay nuclear matrix elements”,
Nuclear Structure and Dynamics III, Portorož, Slovenia, Jun. 14-19, 2015.
5. N. Hinohara,
“Generator Coordinate Method with Proton-Neutron Pairing Amplitudes”,
The future of multi-reference Density Functional Theory, Univ. of Warsaw, Poland, Jun. 25-26, 2015.
6. N. Hinohara,
“Collective modes and sum rules within nuclear density functional theory”, YITP Long-term workshop “Computational Advances in Nuclear and Hadron Physics” (CANHP2015), YITP, Kyoto Univ., Kyoto, Japan, Sep. 21-Oct. 30, 2015
7. N. Hinohara,
“Recent development of finite-amplitude method for nuclear collective excitation”, Symposium on ‘Quarks to Universe in Computational Science (QUCS2015)’, Nara, Japan, Nov. 4-8, 2015
8. K. Washiyama,
“Microscopic Description of Fusion Hindrance in Heavy Systems”, 5th International Conference on the Chemistry and Physics of the Transactinide Elements (TAN15), Urabandai, Japan, May 25-29, 2015
9. Shunsuke A. Sato, Kazuhiro Yabana, Yasushi Shinohara, Kyung-Min Lee, Tomohito Otobe, George F. Bertsch,
"First-principles calculations for ultrafast laser-induced damage in dielectrics", CLEO 2015, San Jose, California, May 10-15, 2015

(3) 国内学会・研究会発表

A) 招待講演

1. 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への取り組み”、
レーザー学会学術講演会第36回年次大会、名城大学、2016年1月9-11日
2. 中務 孝、
“原子核構造における自発的対称性の破れ”、日本物理学会第72回年次大会シンポジウム、東北学院大学、仙台、2016年3月19-22日
3. 鷲山広平、
“低エネルギー重イオン反応の最前線と微視的反応模型”、KEK 理論センター研究会「原子核・ハドロン物理の課題と将来」、KEK、2015年11月24-26日
4. 関澤一之、

” 時間依存密度汎関数法による重イオン多核子移行反応の研究”、日本物理学会第 71 回年次大会 若手奨励賞受賞記念講演、東北学院大学泉キャンパス、2016 年 3 月 20 日

5. 関澤一之、

” TDHF の現状と新しい反応機構”、日本物理学会 2015 年秋季大会 実験・理論核物理領域合同シンポジウム”重イオン深部非弾性散乱の基礎と応用”、大阪市立大学杉本キャンパス、2015 年 9 月 25 日

B) その他の発表

1. Kai Wen, 中務孝、

“ 8Be の崩壊経路と集団質量”、日本物理学会第 72 回年次大会、東北学院大学、仙台、2016 年 3 月 19-22 日

2. 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 3 月 24 日

3. 寺崎順

「QRPA を用いた原子核行列要素計算の理論的一貫性」
日本物理学会 2015 年度秋季大会、大阪市、2015 年 9 月 25 日

4. 寺崎順

「QRPA を用いた ^{48}Ca のニュートリノレス二重ベータ崩壊の原子核行列要素計算」日本物理学会第 71 回年次大会、仙台市、2016 年 3 月 22 日

5. 日野原伸生

“密度汎関数理論における巨大共鳴と和則”、アイソスカラー型単極遷移で探る原子核の励起状態とクラスター構造、大阪大学核物理研究センター、2015 年 7 月 16-17 日

6. N. Hinohara,

“Binding-energy differences and pairing Nambu-Goldstone modes”,
Nuclear Theory Seminar, National Superconducting Cyclotron
Laboratory, Michigan State Univ., East Lansing, MI, USA, Jan. 26, 2016

7. N. Hinohara,

“Pairing Nambu-Goldstone modes and binding energy differences within
nuclear density functional theory”, Nuclear Physics Seminar, Department
of Physics, Univ. of Jyväskylä, Jyväskylä, Finland, Mar. 15, 2016

8. 橋本幸男、

“Gogny-TDHFによる $^{20}\text{O} + ^{20}\text{O}$ の計算における相対位相の効果”、
日本物理学会第 71 回年次大会 (平成 28 年 3 月 19~22、東北学院大学)

9 鷲山広平、

“重い反応系における核融合阻害現象の微視的解析 II”、日本物理学会秋季大会、大阪市立大学、2015年9月25-28日

10. 鷺山広平、
“Microscopic analysis of fusion hindrance in heavy nuclear systems”、
RCNPセミナー、大阪大学核物理研究センター、2015年10月5日
11. 鷺山広平、
“3次元空間上の有限振幅法 QRPA 計算”、
日本物理学会年次大会、2016年3月19-22日
12. 倪放、中務孝、
“ 0^+ 対励起状態を記述する集団座標の量子化”、日本物理学会第71回年次大会、東北学院大学、2016年3月。
13. 倪放、中務孝、
“リチャードソン模型における 0^+ 集団励起状態の解明”、日本物理学会2015年秋季大会、大阪市立大学、2015年9月
14. 倪放、
“対相関模型における 0^+ 集団励起状態の解明”、2015年度原子核三者若手夏の学校、ホテルたつき、2015年8月
15. 倪放、
“対相関模型における 0^+ 集団励起状態の解明”、RCNP 研究会—アイソスカラ一型単極遷移で探る原子核の励起状態とクラスター構造、大阪大学核物理研究センター、2015年7月
16. 柏葉 優、中務 孝、
“中性子星 inner crust 核物質における密度汎関数計算”、
「低密度領域の EOS」研究会、東京大学、2016年2月27日
17. 柏葉 優、中務 孝、
“中性子星 inner crust 核物質における密度汎関数計算”、
日本物理学会第71回年次大会、東北学院大学、2016年3月19-22日

(4) 著書、解説記事等

1. 中務孝、
“物質を構成する原子核”、自動車技術会関東支部報「高翔」、
2016年1月号(No. 65), pp. 32-35.
2. 中務孝、
“放射化学の事典” (一部を執筆)、朝倉書店、2015年9月。

6. 異分野間連携・国際連携・国際活動等

【異分野間連携】

1. 高性能計算システム研究部門との共同研究

矢花は、高性能計算システム研究部門の朴、及び大学院生の廣川と、実時間電子ダイナミクス計算コード ARTED のメニーコアシステムを用いた加速に関して共同研究を行っている。

【国際連携】

1. 日本学術振興会二国間交流事業共同研究（平成25～27年度）

米国との間で、超高速電子ダイナミクスに対する第一原理計算アプローチをテーマとする共同研究を平成25年度より推進している。米国はバンダービルト大学及びワシントン大学（米国側代表はバンダービルト大学の K. Varga 准教授）、日本側は筑波大学（代表：矢花）の他、分子科学研究所、日本原子力研究開発機構が参加している（矢花）。

2. アト秒科学に関する国際共同研究

アト秒科学に関し、マックスプランク量子光学研究所の実験グループ（F. Krausz 教授、M. Schultze 博士、他）、チューリッヒ工科大学の実験グループ（U. Keller 教授、他）と国際共同研究を推進している（矢花）。

3. 時間依存密度汎関数理論に基づく光科学に関する国際共同研究

ウィーン工科大学の理論グループ（J. Burgdoerfer 教授、及びそのグループメンバー）と、実時間電子ダイナミクス計算コード ARTED を用いた国際共同研究を推進している（矢花、全）。

4. 低エネルギー重イオン反応に関する国際共同研究

時間依存平均場理論に基づく低エネルギー重イオン反応の研究に関し、ワルシャワ工科大学の理論グループ（P. Magierski 教授、G. Wlazłowski 博士）、インド BARC の実験グループ（B. J. Roy 教授、他）、オーストラリア国立大学の理論・実験グループ（C. Simenel 博士、他）、イタリアレニャーロ原子核物理研究所の実験グループ（L. Corradi 教授、他）、東北大学の理論研究者（G. Scamps 博士）と、国際共同研究を推進している（関澤）。

5. ポーランド・ワルシャワ大学の原子核理論グループと共同で、オープンソースコード HFODD をアイソスピン不変なエネルギー密度汎関数へ適用する拡張に取り組んでいる（中務）。

6. 韓国・APCTP およびイタリア・トレント大学の冷却原子系理論グループと、1次元周期ポテンシャル中のフェルミ粒子系の超流動状態に関する共同研究を行っている（中務）。

7. 米国・ミシシッピ州立大学と、エネルギー密度汎関数の不定性に関する共同研究を行っている（中務）。

8. 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）。

9. 米国ミシシッピ州立大学 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. シンポジウム、研究会、スクール等の開催実績

1. 第14回国際サマースクール CNSSS15 (RIKEN, Aug. 26 - Sep. 1, 2015) (中務)。
2. Long-term workshop on Computational Advances in Nuclear and Hadron Physics (Kyoto, Japan, Sep. 21-Oct. 30, 2015)の国際諮問委員を務めた(中務)。

8. 管理・運営

矢花一浩

センターの共同研究担当主幹として、当センターの全国共同利用業務である学際共同利用プログラムの運営を統括した。また、数理物質系物理学域長・数理物質科学研究科物理学専攻長、数理物質系広報委員長などを務めた。

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 図書委員長
理化学研究所・中務原子核理論研究室 准主任研究員（兼務）
核理論委員会委員
日本物理学会 理論核物理領域・領域副代表
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
文部科学省 HPCI 戦略プログラム分野5「物質と宇宙の起源と構造」
運営委員
日本原子力研究開発機構 黎明研究評価委員会委員

日本原子力研究開発機構 タンデム専門部会委員

寺崎 順

文部科学省 HPCI 戦略プログラム分野 5「物質と宇宙の起源と構造」中の
計算機ユーザーのプログラミング支援活動において連絡係を務めた。

9. 社会貢献・国際貢献

中務 孝

理化学研究所一般公開(2015. 4. 18)において講演「量子力学と原子核」

物理チャレンジ 2015・フィジックスライブ(2015.08.21)において
講演「元素・原子核と量子の世界」

カナダ・TRIUMF 国際プログラム諮問委員会(SAP-EEC)委員

Editor for Journal of Physical Society of Japan

Editor for International Journal of Modern Physics E

10. 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, 2015年4月1日～
2016年3月31日(次年度に継続)

長期ビジター

- 1) Anatoli Afanasjev 氏 (ミシシッピ州立大学・米国) 、
2015. 6. 22-2015. 8. 16、学振・外国人招へい研究員 (受入研究者：中務)

VI. 原子核実験グループ

教授	小沢顕、三明康郎
准教授	新井一郎、江角晋一、笹公和
講師	中條達也
助教	Busch Oliver、森口哲朗、鈴木伸司
研究員	益井宙、水野三四郎
技官	加藤純雄
大学院生	石橋陽子 (D3)、木村創大 (D3)、中込宇宙 (D3)、Bhom Jihyun(D3)、福岡翔太 (D3)、渡邊大介 (D3)、田中直斗 (D2)、向井もも (D2)、横山広樹 (D2)、新井郁也 (D1)、野中俊宏 (D1)、細川律也 (D1)、青山遼 (M2)、李準一 (M2)、市川ゆきな (M2)、塩谷知弘 (M2)、平野勝大 (M2)、山本大貴 (M2)、伊藤喬一郎 (M1)、金秉徹 (M1)、小山亮平 (M1)、工藤咲子 (M1)、松永一成 (M1)、福田悠裕 (M1)
卒業研究生	佐藤一輝、田尻芳之、平石健太郎、細谷青児、松本拓也

【1】低エネルギー原子核実験グループ

(新井一郎、小沢顕、笹公和、森口哲朗、鈴木伸司)

(1) 稀少 RI リングプロジェクトの現状

平成 16 年 4 月以来、理化学研究所の RI ビームファクトリー (RIBF) の大型基盤実験装置の一つとして稀少 RI リング (Rare-RI Ring) の開発研究を行ってきた。稀少 RI リングは、RIBF 棟の K4 室に設置され、平成 24 年 4 月より製作が始まっている。

平成 27 年度は、加速器からのビームを使った初めてのコミッションング実験を 2 回行った。最初のコミッションング実験では、ビーム輸送系の確立、個別入射の確認、等時性磁場の検証などを目的とし、168 A MeV の ^{78}Kr ビームを用いて平成 27 年 6 月に行った。光学計算に基づき入射軌道を調整した後、キッカー電磁石を励磁し、そのタイミング及び強度を調整することで ^{78}Kr を 1 粒子毎に周回軌道にのせ、個別入射に成功した。その後、リング周回軌道に設置したビームモニタで周期的な信号を観測し、粒子がリングに入射され周回したことを確認した。さらに入射に使用したキッカー磁石により、出射を行い、リング出口に設置したプラスチックシンチレータにて信号を確認した。等時性度の確認には、図 1 に示すように、縦軸をリングの入口と出口に設置したプラスチックシンチレータの時間差 (TOF)、横軸を入射ラインの運動量分散地点で取得した運動量とした 2 次元プロットを活用した。(dB/dr)/ B_0 はリング内磁場の動径方向依存性を示すパラメーターで、このパラメーターを変更することにより等時性度を調整する。図 1 に示すように、0.279 で運動量に対してほぼフラットとなった。この図の TOF の幅から導出した等時性度は、 7×10^{-6} であり、シュミレーションの結果とほぼ一致した。

リング内には、共鳴空洞をピックアッププローブとする非破壊型のビームモニタ (共鳴空洞型ショットキーピックアップ) も設置されている。取出しを行わない蓄積モードでイベントの発生を観測した。典型的なショットキーピックアップのスペクトルを図 2 に示した。1 粒子の ^{78}Kr がリング内を周波数を変えながら 4 秒程度周回したことを示している。(コミッションング実験までの開発研究と最初のコミッションング実験についての詳細は、文献 [1] を参照されたい。)

平成 27 年 12 月には、BigRIPS で ^{48}Ca 一次ビームから生成された二次ビーム (^{36}Ar と ^{35}Cl) の入射

と出射に成功した。これらの核の質量は既知であるので、TOF 測定から質量の導出が可能であり、現在解析中である。平成 28 年度は、U 一次ビームから生成した中性子過剰核の質量測定を予定している。

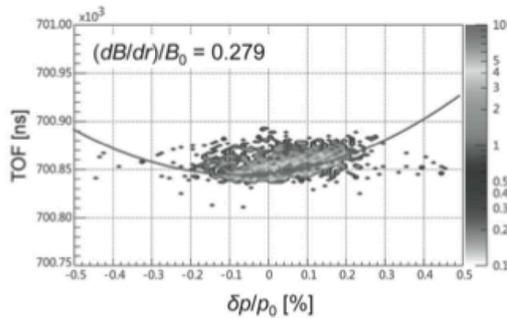


図 1 縦軸を TOF 横軸を運動量とした 2 次元プロット。(dB/dr)/B₀=0.279 における結果を示した。曲線は、2 次関数でフィットした結果で、等時性の傾向の目安を示す。

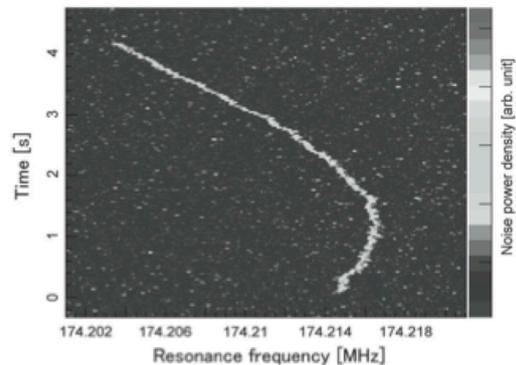


図 2 縦軸は時間経過、横軸はショットキーピックアップの共鳴周波数を示す。線が ⁷⁸Kr に由来する信号である。

(2) 飛行時間検出器の開発

稀少 RI リングでは飛行時間の測定により不安定核の質量を決定する。精密質量測定を行うためには精度良く飛行時間を測定する検出器が必要であり、現在開発中である。検出器に求められる性能は ① 100 ps 以下の時間分解能、②物質質量が少ない、③高い検出効率、④アクセプタンスが大きいことである。これらの要求を達成するため、二次電子を発生させるためのアルミナイズドマイラー膜と、マイクロチャンネルプレート (MCP) を組み合わせた検出器の開発を行っている。この検出器は、荷電粒子が膜を通過した時に放出される二次電子を電場と磁場を用いて MCP へと導き電子を増幅して信号を得る。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する。その効果を小さくするため、①今年度は電場を大きくして時間分解能の向上を図った。印可する電場は 650 V/mm 程度であり、これまでより 4 倍以上大きくした。電場の増強に伴って磁場も大きくする必要がある、永久磁石を用いて約 190 Gauss の磁場を発生させた。②さらに、今年度は検出効率を向上させるため MCP を二台に増設した。これまでは、ビーム進行方向と同じ方向に放出された二次電子のみを検出していたが、ビーム進行方向と反対方向に放出する二次電子も検出できるように二台の MCP を配置し、前方放出と後方放出の二次電子を独立に検出できるように改良した (図 3)。放射線医学総合研究所の HIMAC (Heavy Ion Accelerator in Chiba) から供給される ⁸⁴Kr ビームを用いて性能評価を行った。前方放出と後方放出のどちらも時間分解能は $\sigma \sim 50$ ps であり、検出効率は前方放出と後方放出の OR をとることにより最大 99% の結果を得た。時間分解能と検出効率ともに目標を達成した。現在は小型試作機のため MCP の有効領域は $\phi 14.5$ mm である。今後は有効領域のより大きな MCP を用いて大きなビームサイズに対応できるように検出器の大型化を行って実機完成を目指す。

(3) 陽子共鳴吸収反応による不安定核の生成

安定核の陽子共鳴吸収反応は、宇宙元素合成などの興味から良く研究されている。この陽子共鳴吸収

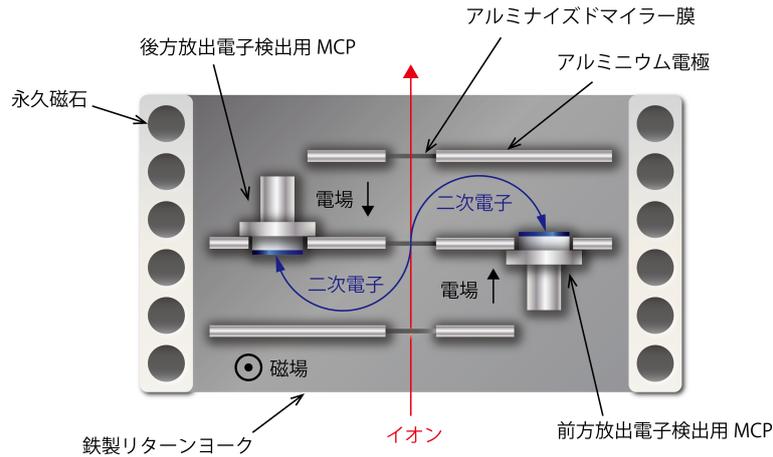


図3 両読型飛行時間検出器の模式図。

反応は、不安定核生成の観点でも興味深い。応用加速器部門の6MVタンデム加速器には、ラムシフト型偏極イオン源があり、偏極した陽子ビームの生成が可能である。偏極陽子を使用することにより、核偏極した不安定核が生成できる可能性がある。核偏極した不安定核が生成できれば、 β 線の非対称放出を指標とした核磁気共鳴法(β -NMR法)により、不安定核の核モーメントの研究を行うことができる。以上の動機から、我々は、2015年3月から応用加速器部門の1MVタンデトロンにおいて、陽子共鳴吸収反応の研究を始めた。

平成27年度は、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 $^{25}\text{Al}(I^\pi=5/2^+, T_{1/2}=7.1\text{ s})$ と $^{30}\text{P}(I^\pi=1^+, T_{1/2}=150\text{ s})$ の生成を試みた。それぞれ、 $^{24}\text{Mg}(p, \gamma)^{25}\text{Al}$ 、 $^{24}\text{Mg}(p, \gamma)^{25}\text{Al}$ という陽子共鳴吸収反応を使用する。陽子ビームエネルギーは860keVで、平均的なビーム強度は $1\ \mu\text{ A}$ であった。標的の厚さは、Mgは0.32mm、Siは0.51mmであった。この厚さでは、陽子ビームは標的中で止まってしまふ。標的中で止まるまでに、Mg標的中の ^{24}Mg は、3つのエネルギー(223, 419, 823 keV)で共鳴を起こし、Si標的中の ^{29}Si は、4つのエネルギー(333, 414, 695, 730 keV)で共鳴を起こす。陽子吸収後の ^{25}Al と ^{30}P の励起状態からは、それぞれ固有の γ 線が放出されるが、この γ 線は、2台のGe検出器で測定した。Ge検出器のエネルギーと検出効率の校正は、 ^{152}Eu 線源で行った。測定された典型的な γ 線スペクトルを図4に示した。 ^{25}Al と ^{30}P の生成量は、測定された γ 線のピークの積分値に検出効率を考慮し、さらに ^{25}Al と ^{30}P でそれぞれ総和をとることにより得た。得られた ^{25}Al と ^{30}P の生成量はそれぞれ $180\text{ cps}/\mu\text{ A}$ と $160\text{ cps}/\mu\text{ A}$ であった。MgとSi標的には、それぞれ他のアイソトープが混入している。Ep=860keVでは、他のアイソトープも陽子共鳴吸収反応を起こし得る。上と同じ方法で、他のアイソトープの生成量も評価した。 ^{29}P と ^{31}P の生成量は、 $30\text{ cps}/\mu\text{ A}$ と $380\text{ cps}/\mu\text{ A}$ であり、 ^{26}Al 、 ^{26m}Al と ^{27}Al の生成量は、 $540\text{ cps}/\mu\text{ A}$ 、 $350\text{ cps}/\mu\text{ A}$ と $2100\text{ cps}/\mu\text{ A}$ であった。これらの混入核のうち β -NMRのシリアスなバックグラウンドとなるものは、Si標的では、 $^{29}\text{P}(I^\pi=5/2^+, T_{1/2}=7.1\text{ s})$ のみであり、Mg標的では、 $^{26m}\text{Al}(I^\pi=0^+, T_{1/2}=6.3\text{ s})$ のみである。

今回の実験で、陽子共鳴吸収反応は、 ^{25}Al および ^{30}P の生成に対してきわめて効果的であることがわかった。今後は、6MVタンデム加速器で研究を進めていく。

(4) KISSの開発状況

KISSでは平成27年度、(i)三段RFイオンガイドの導入、(ii)ガス検出器の開発を行った。平成27年

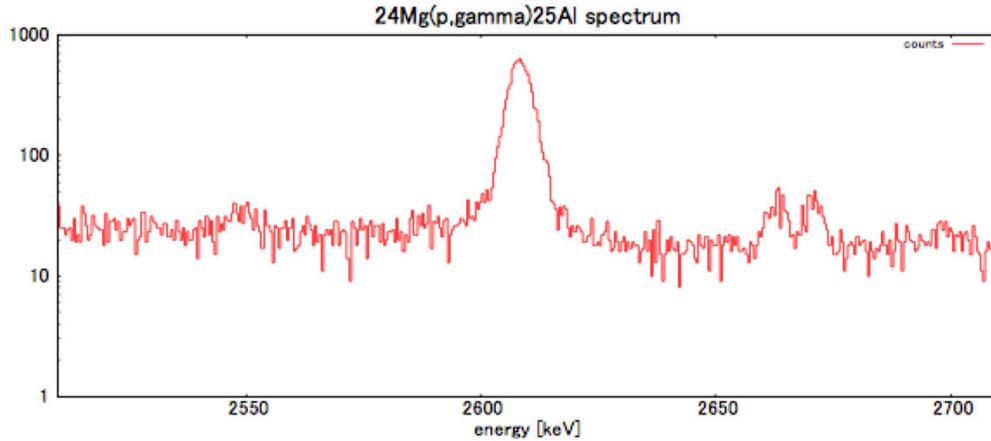


図4 Mg 標的の陽子共鳴吸収反応で観測された 2610 keV の γ 線のスペクトル。これは、 $^{24}\text{Mg}(p, \gamma)^{25}\text{Al}$ により生成した ^{25}Al の励起状態から放出された γ 線である。

度後半のオンライン試験では、新たに (iii) ドーナツガスセルを導入した。また、(iv) ^{199}Pt の磁気モーメント及び荷電半径の同位体シフト測定に成功した。

(i) 三段 RF イオンガイドの導入：短寿命核の中性原子輸送時間の短縮化に向けて、ガスセル出口穴径の大口径化を計画しており、それに伴う下流のイオン輸送系改造に着手した。出口穴径が大きくなるとガスジェットによるイオンビームの広がりが増えるため、現在の 2 段構成の六重極 RF イオンガイドの上流に、内径の大きな八重極 RF イオンガイドを導入した。Ir フィラメントを用いたオフライン試験で、ガス圧に応じてイオンガイドの RF 強度・DC 電圧を最適化した。このイオン輸送系では、イオンガイド間に微小な電位差を与えて分子状イオンを乖離し、単原子イオンの取量を改善できる。2015 年 9 月のオンライン試験で分子乖離の試験を行い、全引き出し量に対して、90% 以上の割合で単体の ^{198}Pt イオンを引き出した。ガスセル出口穴の大口径化による輸送速度の変化については今後確認を行う。

(ii) ガス検出器の開発：未知核種の寿命測定には、バックグラウンド計数率が 0.01cps 以下の検出器が要求される。この条件を満たすために、低密度物質で構成されたガス検出器 (図 5) の開発を始めた。陽極線と台形型の陰極箔でできた微小検出器ユニットを同心円状に 2 層配置して、内・外層ユニット間の同時計数信号による位置選択的な β 線検出を行う。周囲に配置される Ge 検出器の立体角を確保するためコンパクトな設計になった。高効率 (100%) かつ長時間安定動作を実現するため、P10 ガスを用いて比例計数領域で使用する予定である。試作機の性能試験では、ユニット検出器の効率は 95% 以上で、一週間以上の安定動作を確認した。夏には実機を完成させて、9 月の寿命測定実験で使用する予定である。(iii) ドーナツガスセルの導入：これまでのガスセルでは、ガスセルと真空チェンバー間の真空隔離膜 (ハーバー、厚さ $2.5\mu\text{m}$) がビームによる熱で破損するのを防ぐため、最大入射強度を 20pA に制限していた。今後の 10 倍以上のビーム強度による中性子過剰未知核種生成に向けて、ビームをガスセル内に入射させず、多核子移行反応生成物のみをカプトン薄膜 ($5\mu\text{m}$) を通して打ち込めるドーナツ型ガスセルを開発した。2016 年 1 月と 3 月のオンライン試験では、従来のガスセルと同等の引出し効率を確認できた。今後は、回転標的を準備し、ビーム強度を 250pA まで増やす予定である。

(iv) ^{199}Pt の磁気モーメント測定：2016 年 1 月と 3 月のオンライン試験では、励起レーザーの波長スキャンにより $^{199}\text{Pt}(I = 5/2, \text{原子遷移 } J_{\text{gs}} = 3 \rightarrow J_{\text{ex}} = 4)$ の超微細構造のレーザー核分光に成功した (図 6)。得られた準位分布の解析から磁気モーメントおよび荷電半径の同位体シフト量を導出した。今後、核モ

デルとの比較から核構造を議論する予定である。

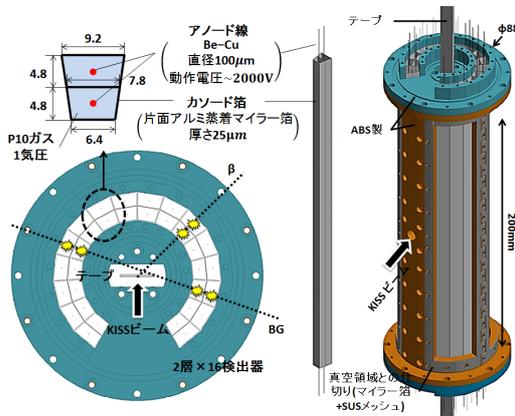


図5 ガス検出器の概略図(上から見た図)。

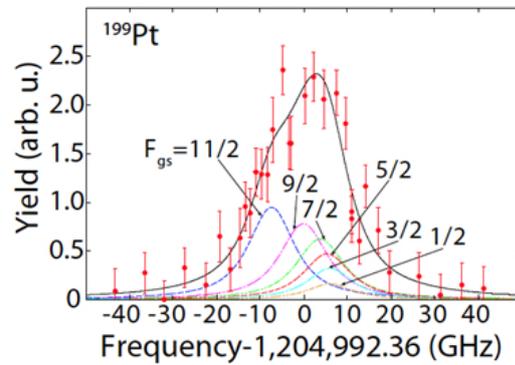


図6 ^{199}Pt の準位分布 ($\lambda=248.792\text{nm}$)。

(5) 福島第一原発事故起源の放射性物質の環境移行研究

2011年3月に発生した福島第一原発(FDNPP)事故では、大量の放射性物質が環境中に放出された。放出時における放射性物質の形態は、環境動態研究において重要な初期情報の1つであるが、その一形態として、放射性セシウムを含む粒子が確認されている。FDNPP事故における放射性粒子の実態を明らかにするため、FDNPPから北西方向の半径20km圏内の帰還困難区域において採取した土壌から放射性粒子を分離し、化学形態について分析を行った。粒子の形状は先行研究で報告されている球状に加え、断片状や複数の粒子が結合した構造のものが見つかった。 γ 線測定で、全ての粒子から ^{134}Cs および ^{137}Cs を検出した。また2つの異なるCs同位体比が観測され、2011年3月12日に1号機からも放射性粒子が放出されたことを確認した。構成元素はEDSでSi、O、Fe、Znに加え、一部の粒子からCsの存在を確認した。また、全ての粒子においてSiの割合が多かった[2]。

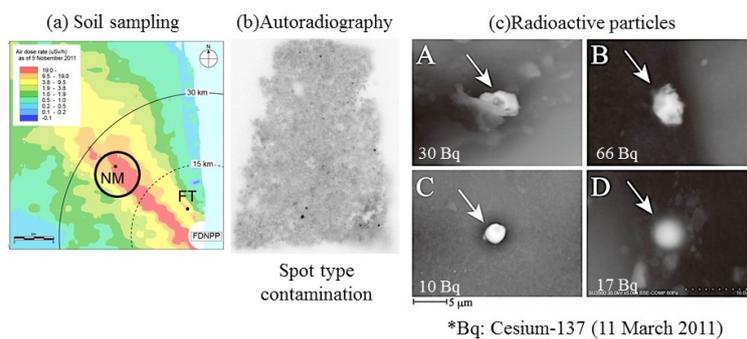


図7 (a) Sampling point. (b) Autoradiography image obtained by the imaging plate (IP) technique. Black spots indicate aggregates of radioactive atoms. (c) SEM images of four radioactive particles (arrows) isolated from the soil sample.

その他に、放射性ヨウ素の河川における挙動と沿岸環境中の分布について、調査研究を実施している。FDNPP事故によって、 ^{129}I (半減期: 1,570万年)と ^{131}I (半減期: 8.02日)を含む揮発性の核分裂生成物質が多量に放出された。環境中に放出された ^{129}I と ^{131}I は、陸域から河川および海洋環境にわたる

移行挙動を長期的に把握することが必要な核種の1つである。

2015年度は、福島県浪江町新田川下流域における粒子状 ^{129}I の供給源と放出量の継時調査を実施した。新田川下流における月ごとの粒子状 ^{129}I は $0.92\text{--}4.1\text{ mBq kg}^{-1}$ であり、懸濁物質と強い相関性が認められた($R^2 = 0.88$)。降水量の多かった月では、粒子状 ^{129}I の放出量は $7.6\text{--}9.0\text{ kBq month}^{-1}$ と推定され、放射能汚染の比較的強い上流域から粒子状 ^{129}I が多量に輸送されていることが判明した[3]。

(6) 筑波大学6 MV タンデム加速器システムの導入

筑波大学研究基盤総合センター応用加速器部門において、震災復興計画により開発をおこなった6 MV タンデム加速器が2015年度に完成した。6 MV タンデム加速器は、2016年1月に放射線発生装置としての施設検査に合格しており、2016年3月より本格的な運用を開始した。図8に筑波大学6 MV タンデム加速器の概略図を示す。加速器システムとしては、5台の負イオン源と12本のビームラインを有している。加速器本体は、ペレトロン型タンデム(National Electrostatics Corp., USA 製, 18SDH-2)であり、全長10.5 m、直径2.7 mの加速タンク内に強化アクリルガラス支柱に保持されたコンプレスト型加速管を設置している。なお、加速器の最高到達電圧としては、6.5 MVを記録している。電圧制御はGVM制御とスリット電流負帰還制御の2方式により、 $\Delta V/V=10^{-4}$ 以下の電圧安定性を得ている。ラムシフト偏極イオン源による偏極陽子と重陽子から、重イオン用Csスパッタ負イオン源によるAuまでの多種のイオンを加速可能である。加速エネルギー範囲は、1 keV分解能で陽子は1.5 MeVから13 MeVまで、Auイオンでは90 MeVまでとなっている。高度に制御されたイオンビームは、イオンビーム物質分析法や加速器質量分析法、宇宙環境用半導体のイオン照射実験などに適用可能である。

国内最大規模となる6 MV 加速器質量分析(AMS)システムの極微量核種検出ライン(L4ライン)は22.5° 静電分析器と5電極型ガス ΔE -E検出器からなっており、 ^{10}Be , ^{14}C , ^{26}Al , ^{36}Cl , ^{41}Ca , ^{129}I 等の多核種の高感度AMS測定が可能である[4]。2015年度に6 MV AMSシステムでは、 ^{14}C , ^{36}Cl , ^{41}Ca , ^{129}I 等の試験測定に成功した。 ^{14}C -AMSでは、加速電圧5.0 MVにより荷電数4+を用いて25.0 MeVでの試験測定をおこなった。試験測定結果として、 ^{14}C -AMSでは、マシンバックグラウンドが $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ 比で 2.4×10^{-16} となり、測定精度は0.4%であった。また、 ^{129}I の試験測定では、 $^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$ 比で 10^{-13} 位の測定が可能であり、測定精度として約1%の評価となった。

(7) 難測定核種 AMS 開発に向けた PHITS シミュレーションの適用

AMS(Accelerator Mass Spectrometry)は同位体比 10^{-16} の測定が可能な超高感度な質量分析法である。しかしながら、目的の核種以外の核種(妨害核種)が検出器に共に入りこみ度々検出の妨害となる。このため、重イオン・粒子輸送コード(Particle and Heavy Ion Transport code System:以下 PHITS)を用いて検出器内のビームの挙動を再現し、実際に測定する前に妨害粒子が分離される条件を決定することを本研究の目的とする。本研究では、その第一段階として筑波大学6 MV タンデム加速器での測定と同条件でPHITSによるシミュレーションを行い、実際の測定結果と比較する。今回のAMS測定については5枚電極型(dE1, dE2, dE3, dE4, dE5)の電離箱を用いており、シミュレーションと実測の比較については図9に示す。両者を比較してみると、スペクトルの位置関係は再現できていることが分かる。しかし実際の測定結果の方がスペクトルの広がりが大きくなっている。シミュレーションでのスペクトルの広がりにはビームのエネルギー分散のみによる広がりであるが、検出器のエネルギー分解能は考慮されていない。そのため、実際の測定のスぺクトルの広がりには、検出器のエネルギー分解能による広がりだと考えられる。よって、実際の測定の方がシミュレーションよりスペクトルの分離が悪くなってい

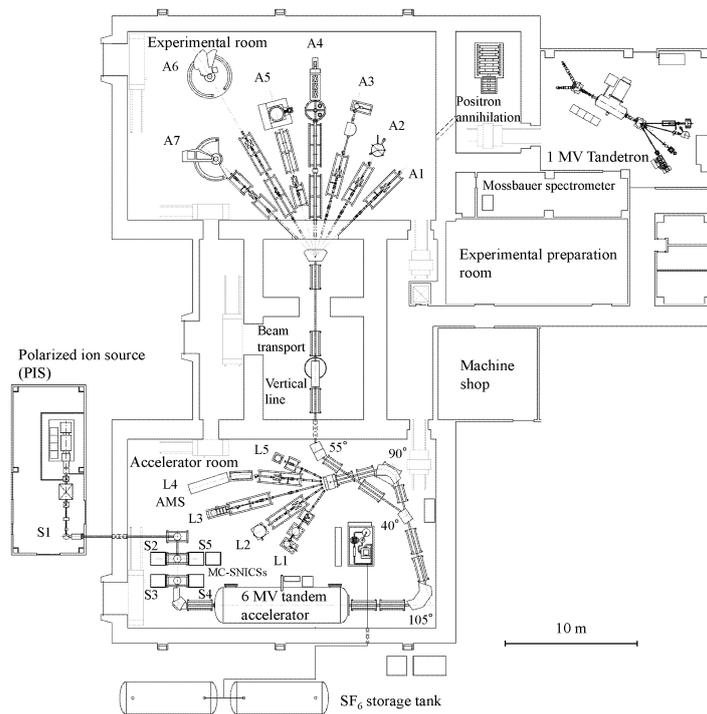


図8 Layout of the 6 MV tandem accelerator at the University of Tsukuba.

る。また、 $dE1+dE2$ プレートでのエネルギー損失量は良い一致を示すが、 $dE4+dE5$ プレートでのエネルギー損失は実測と約 1.0 MeV の差異があった。この原因として、 $dE4+dE5$ プレートではビームが止まる寸前、すなわちエネルギーが非常に低い領域であるので PHITS だとその領域では計算が正しくできていない可能性、若しくは検出体系の設定に再検討が必要であることが考えられる。以上の比較より、PHITS シミュレーションはまだ改善の余地が考えられるが、AMS 測定に有用である可能性を見出した。今後は検出器のガス種、ガス圧、入射膜の材質などの検討を行い、AMS 測定に最適なパラメータを決定していく。

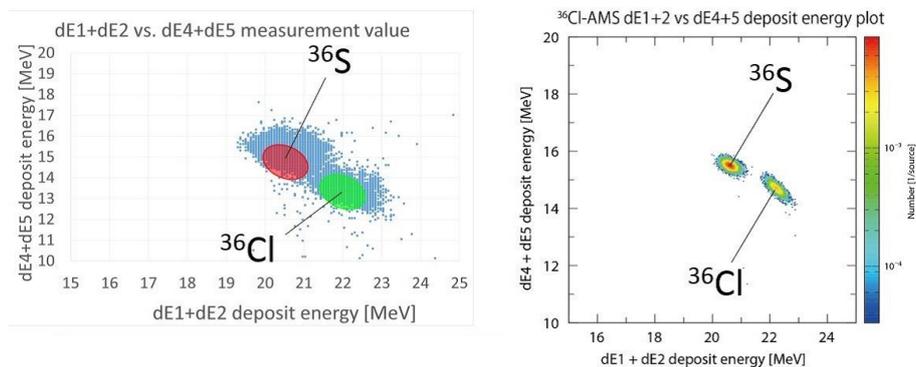


図9 ^{36}Cl -AMS 測定についてのシミュレーションと実測の比較。右がシミュレーション結果で左が実測結果である。縦軸が $dE4+dE5$ 、横軸が $dE1+dE2$ でのエネルギー損失量を表している。加速電圧は 5.9 MV で価数は 7 価。電離箱のガスについてはイソブタンガス 24 Torr、入射窓窒化シリコン膜 (Si_3N_4) 膜 75 nm を用いており、シミュレーションもその条件に従って計算している。

(8) Lamb シフト型偏極イオン源のビーム試験

筑波大学研究基盤総合センター応用加速器部門では Lamb シフト型偏極イオン源 (PIS) を所有しており、これまでに偏極分解能や核モーメントの測定に PIS は使用されてきた。東日本大震災で大きな損害を受けた PIS は、元々設置されていた加速器棟の 9 階から新規に建設された PIS 棟へ移設され、再構築が行われた。平成 26 年度末までに再構築に関する作業はほぼ完了し、平成 27 年度は主にビーム試験とその準備を行った。準備としては、PIS を制御するための EPICS や CSS の導入、静電レンズの電源交換、前段加速電源の放電対策等を行った。ビーム試験は PIS からの無偏極陽子ビームを 6MV タンデム加速器によって 12 MeV まで加速させ、ビームラインに設置されているファラデーカップ (FC) でビーム電流を測定し、そのトランスミッションを調べた。前段加速電圧は 75 kV に設定した。静電レンズや四重極電磁石等の調整後、PIS の直線コース最下流におけるビーム電流は 800 nA だった。電源を新しくしたことによりアーク放電が一定に維持され、以前に比べビーム電流は安定していた。静電球形電極アナライザー (ESA) によって 90 度曲げられたビームは加速器棟へと輸送された。加速器棟入ってすぐに設置されている FC でビーム電流は 430 nA と測定され、PIS 棟から加速器棟までのトランスミッションが悪いことが確認された。また、加速直前と直後のビーム電流はそれぞれ 360 nA と 230 nA であり、この加速前後のトランスミッションは他のイオン源と同程度だった。加速されたビームは最終的に測定室の A7 コースへと輸送され、A7 コースの FC でビーム電流は 200 nA だった。今後、PIS から加速器までのビームトランスポートの改善が必要であり、核モーメント測定に向けた偏極ビームによるビーム試験も予定している。

【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、Busch Oliver)

(1) 銅+金衝突における指向型、楕円型、三角形型の方位角異方性測定の研究

クォーク・グルーオン・プラズマ (QGP) は原子核物質状態の一つであり宇宙初期に存在していたとされ、米国ブルックヘブン国立研究所 (BNL) では相対論的重イオン加速器 (RHIC) を用いて QGP の研究が行なわれている。QGP のプローブとして生成粒子分布の方位角異方性がある。方位角異方性は衝突関与部の幾何学的な形状を起源とし、QGP の膨張を経て測定される為、衝突初期モデルや QGP の粘性に敏感である。これまで対称系である金+金や銅+銅衝突での異方性測定が行なわれてきたが、2012年に非対称系の銅+金衝突の実験が行なわれた。銅+金衝突では、銅側と金側の衝突関与部の厚みが違う事からくる指向型の異方性が期待され、衝突初期モデルの検証を目的としている。

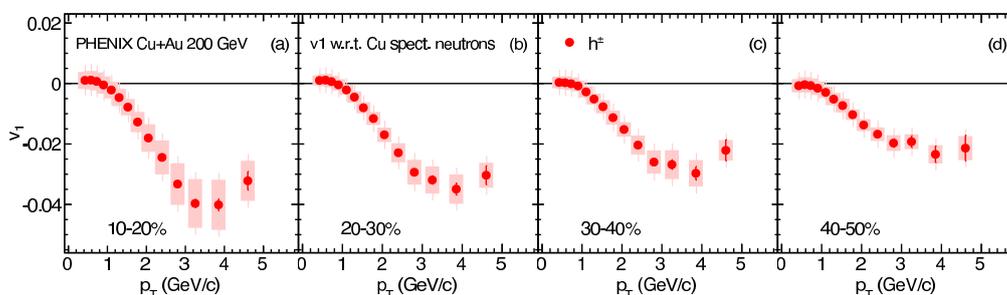


図 10 銅+金衝突における荷電粒子 v_1 の p_T 依存性

図 10 は銅+金衝突における指向型の異方性の横運動量依存性である [5]。パネルの違いは中心衝突度を表し、左側が中心衝突で右側がかすり衝突を表す。低運動量領域では統計誤差のため v_1 の正負が分からないが、高運動量領域では v_1 が負であるため、高運動粒子が金側に多く生成されている事を示す。また、かすり衝突側の方が v_1 の絶対値の最大値が小さい、これはかすり衝突側の方が銅側と金側の衝突関与部の大きさの違いが小さくなっている事から来るものと考えられる。図 11、図 12 は楕円型、三角形型の方位角異方性の横運動量依存性の実験データと理論計算の比較を表す。この比較から銅+金衝突での方位角異方性は従来の衝突初期モデルと粘性値 $0.08 - 0.16$ で理論的に再現する事が出来る事が分かった [5, 6]。

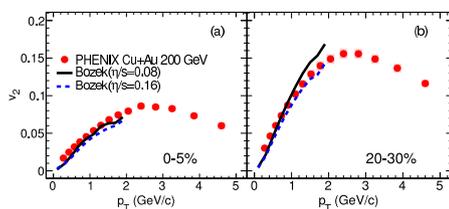


図 11 荷電粒子 v_2 と流体計算との比較

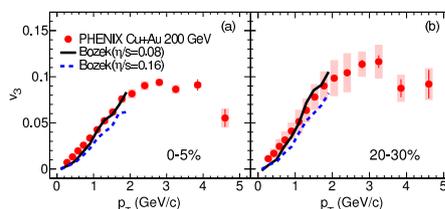


図 12 荷電粒子 v_3 と流体計算との比較

(2) RHIC エネルギーにおける $d+Au, ^3\text{He}+Au$ 等の小さい高密度系での集団運動

欧州共同原子核研究機構 (CERN) の大型ハドロン衝突型加速器 (LHC) における世界最高エネルギーでの陽子・陽子 (p+p) 衝突実験や原子核・原子核 (A+A) 衝突実験が数年前から始まり、p+p 衝突や p+A 衝突のような小さな衝突系においても、終状態の生成粒子数が多い高多重度事象においては、集団運動的膨張を表す結果が報告された。RHIC 加速器ではその多彩な粒子加速技術を生かし、p+p や A+A 衝突実験に加えて、p+A, d+A, $^3\text{He}+A$ 衝突実験や、d+A 衝突における衝突ビームエネルギー走査実験を近年行っている。図 13 は $\sqrt{s_{NN}} = 200 \text{ GeV}$ の $^3\text{He}+Au$ 原子核の中心衝突における荷電粒子の v_2, v_3 の測定結果と流体力学計算等との比較を示している [7]。これは小さな衝突系においても、これまで行ってきた大きな原子核同士の衝突系と同じように、初期密度が十分大きくなるような高多重度事象においては v_2 が v_3 が QGP の流体的膨張によって発展していることを示唆する結果である。これらの小さな衝突系における系統的測定（衝突の大きさや形状に対する依存性、ラピディティ依存性、衝突ビームエネルギー依存性）を今後詳細に測定し研究する予定である。

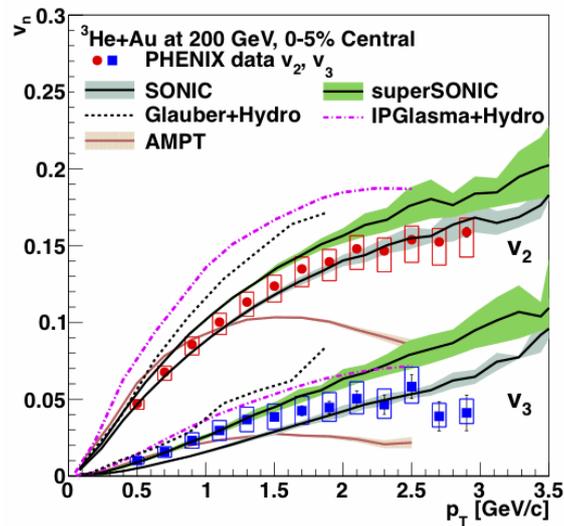


図 13 $\sqrt{s_{NN}} = 200 \text{ GeV}$ の $^3\text{He}+Au$ 原子核の中心衝突における荷電粒子の v_2, v_3

(3) RHIC-STAR 実験における QCD 臨界点探索

RHIC では QCD 相図の臨界点探索を目的として Beam Energy Scan が行われ、STAR 実験において net-proton 分布の高次キュムラントが測定された [8]。本研究では、その結果 [8] における検出効率補正法の妥当性を吟味した。通常、ビームパイプ等との相互作用により、陽子と反陽子の検出効率には有限の差が生じるが、その解析 [8] においては、それらの検出効率の平均値を補正に用いていた。それらを独立に補正した場合、その結果 [8] が本来どうあるべきかを、簡単な統計モデルを用いて見積もった [9]。図 14 は横軸にビームエネルギー、縦軸に両補正方法の差をプロットしたものである。差は衝突エネルギーと共に大きくなり、200 GeV では 偶数次キュムラントが約 20% ずれることを確認した。

(4) RHIC-STAR 実験 金 + 金衝突における高次方位角異方性のエネルギー依存性

RHIC 加速器を用いて Beam Energy Scan 実験を行い QCD 相図を理解するために高密度領域の QGP

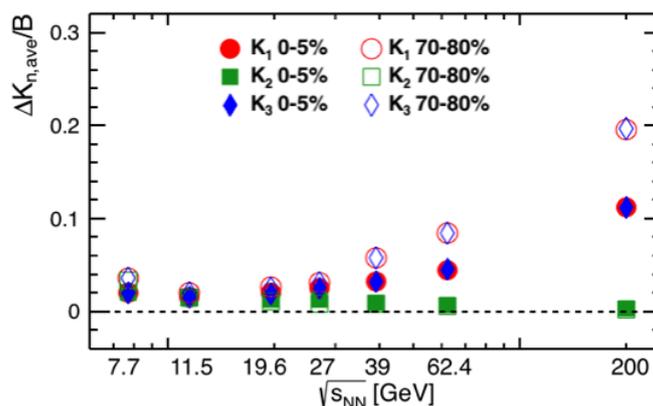


図 14 検出効率の平均補正と独立補正の差の衝突ビームエネルギーに対する依存性

研究を推進している。STAR 実験では初期の核子分布のゆらぎを主な起源とする 3 次の方位角異方性 ($v_3^2\{2\}$) のビームエネルギー依存性が測定された。 $v_3^2\{2\}$ は主に衝突初期の粘性の小さい QGP 相で発展するとされ、QGP の生成および衝突初期の QGP 相での圧力勾配について調べるためのいいプローブである。図 15 は横軸をビームエネルギー $\sqrt{s_{NN}}$ 、縦軸に $v_3^2\{2\}/n_{ch,PP}$ ($n_{ch,PP}$ は衝突核子対あたりの荷電粒子数の擬ラピディティ密度) をプロットしたものである。LHC の $\sqrt{s_{NN}}=2.76\text{TeV}$ 鉛 + 鉛衝突での結果も合わせて表示されている。 $v_3^2\{2\}$ を衝突核子対あたりの粒子多重度で規格化すると、 $\sqrt{s_{NN}}$ が 15-20GeV 付近で最小となるという結果が得られた。

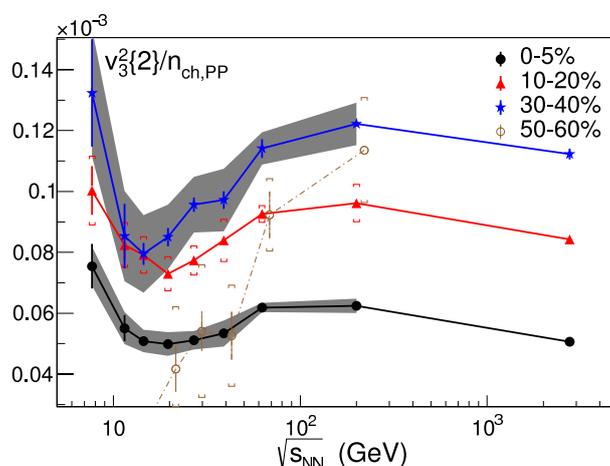


図 15 $v_3^2\{2\}/n_{ch,PP}$ の衝突エネルギー依存性

(5) LHC-ALICE 実験 2.76 TeV Pb+Pb 衝突における HBT 測定のイベント平面依存性

スイス欧州原子核研究機構 (CERN) の ALICE 実験では、LHC 加速器を用いた重イオン衝突実験により、クォーク・グルーオン・プラズマ (QGP) の物性研究が進められている。原子核衝突により、衝突関与部は高温高密度状態となり QGP が生成すると考えられている。また、生成された QGP は流体的に膨張しハドロン物質へ相転移する。終状態における粒子の密度分布や膨張時間を詳細に調べることは QGP の粘性や初期状態を調べるための良いプローブである。RHIC-PHENIX 実験では 2 次および 3 次のイベント平面 (楕円および三角的膨張方向軸) に対して HBT 測定をすることで終状態における系の形

状が \cos または \sin の振幅であることが観測された [11]。

また近年、方位角異方性の強度を示すベクトル (Q vector) を用いて衝突毎に方位角異方性が強い (または弱い) 事象を選ぶ手法 (Event Shape Engineering) が用いられている [12]。図 16 は ALICE で測定された 2 次の方位角異方性 v_2 の横運動量依存性であり、Q vector が大きな (小さな) 事象を選ぶことにより、 v_2 がより大きく (小さく) なることが観測された。また、全事象で求めた v_2 に対する比は、横運動量によらずほぼ一定の値をとっている。これは、この事象選択が Jet など高運動量で特徴付けられるものでないことを示唆している。本研究では、 π 中間子を用いて 2 次および 3 次のイベント平面に対し HBT 測定をすることにより、LHC-ALICE 実験における終状態の系の形状の詳細測定を行っている。さらに Event Shape Engineering の手法を用いることにより、2 次または 3 次の方位角異方性と終状態の系の形状がどのように関係しているのかを調べている。

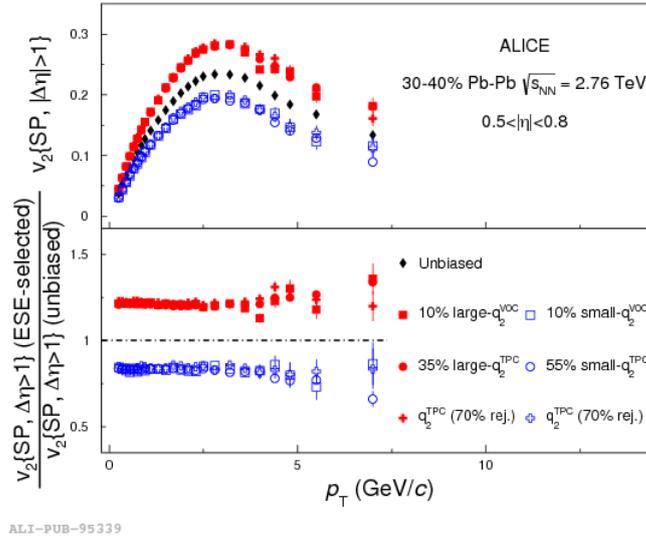


図 16 $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV Pb+Pb 衝突における v_2 の横運動量依存性

(6) Centrality dependence of charged jet in p-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}}=5.02$ TeV

In heavy-ion collisions at the LHC, jet quenching is observed in central Pb-Pb collisions; the yield of hadrons and jets is strongly modified compared to the expectation from pp collisions scaled by the average number of binary collisions $\langle N_{\text{Coll}} \rangle$. This observation is attributed to the formation of a QGP in the collision, due to gluon radiation induced by the hot and dense medium. p-Pb collisions are important to investigate cold nuclear initial and final state effects. In minimum bias p-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}}=5.02$ TeV the production of jets [13] is consistent with the absence of a strong final state suppression. However, multiplicity dependent studies in p-Pb collisions on the production of low p_T identified particles and long range correlations [14] show similar features as measured in Pb-Pb collisions, where they are attributed to the collective behavior following the creation of a QGP. These features in p-Pb collisions become more pronounced for higher multiplicity events. The ALICE collaboration has measured the centrality dependence of charged jet production in p-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}}=5.02$ TeV for jet resolution parameters $R=0.2$ and 0.4 in the p_T range from 20 to 120 GeV/c [15]. Charged jets are reconstructed with the anti- k_T algorithm using charged particle tracks reconstructed with the ALICE Inner Tracking System (ITS) and Time Projection

Chamber (TPC). The event centrality classes are defined by the zero-degree energy measured in the lead-going neutron detector ZNA. N_{Coll} is estimated from a Glauber model and the mean measured amplitude in the V0 detector on the Pb-going side for each centrality class.

The nuclear modification factor Q_{pPb} , obtained by dividing the measured spectra in p-Pb collisions by a pp reference constructed from charged jet spectra at $\sqrt{s}=7$ TeV scaled with $\langle N_{\text{Coll}} \rangle$, is shown in Fig.17. Both for $R=0.2$ (upper panel) and $R=0.4$ (lower panel) the nuclear modification factor is compatible with unity in all centrality classes, indicating the absence of centrality-dependent nuclear effects on the jet yield in the kinematic regime probed by our measurement. The ratio of jet production cross sections reconstructed with $R=0.2$ and 0.4 (not shown) is consistent with the result obtained in minimum bias p-Pb collisions, which agrees with the jet cross section ratio in pp collisions. Within present uncertainties, no effects of parton energy loss or jet broadening in small systems created in p-Pb collisions is observed.

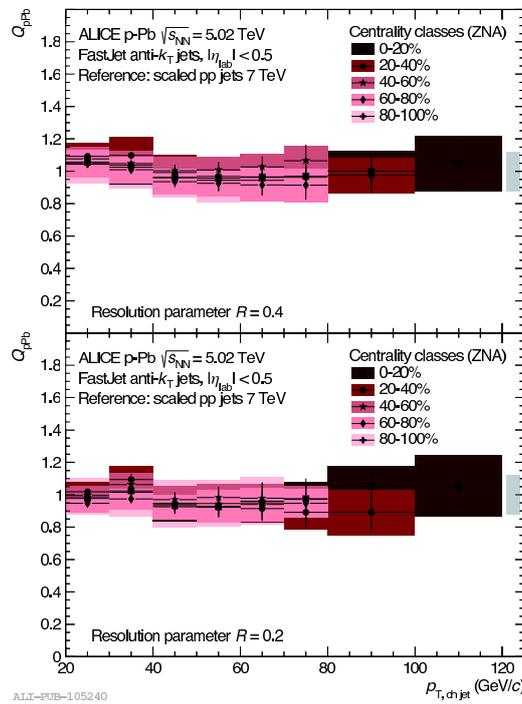


図 17 Nuclear modification factor Q_{pPb} at $\sqrt{s_{\text{NN}}} = 5.02$ TeV p-Pb collisions

(7) 高エネルギー鉛＋鉛衝突におけるジェット抑制効果の測定

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。LHC にて 2015 年 11 月より行われた $\sqrt{s_{\text{NN}}} = 5.02\text{TeV}$ 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開始した。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}) が代表的である。図 18 に、これまで得られた $\sqrt{s_{\text{NN}}} = 2.76\text{TeV}$ の結果を示す [16]。ここでは鉛＋鉛衝突において、ジェットの収量が抑制されることが観測された。 $\sqrt{s_{\text{NN}}} = 5.02\text{TeV}$ においても、同様の測定を行い、より広いエネルギー領域において、高運動量パートン

の QGP 中での振る舞いを、系統的に理解する。

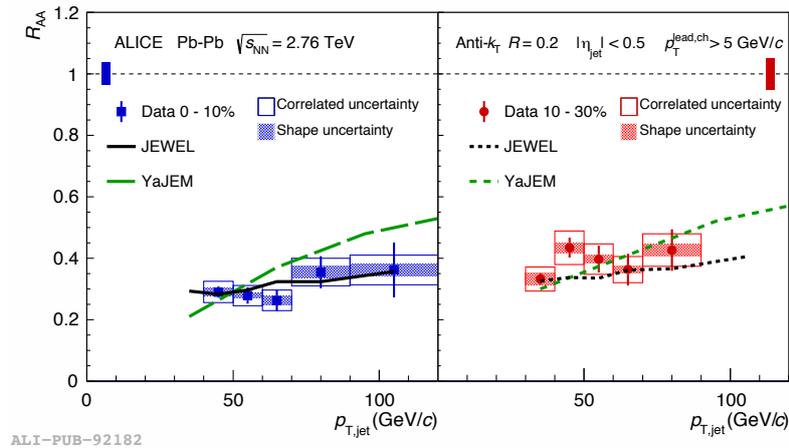


図 18 $\sqrt{s_{NN}} = 2.76\text{TeV}$ 鉛 + 鉛衝突における R_{AA}

(8) LHC-ALICE 実験における電磁カロリメータトリガーシステムの開発

欧州原子核研究機構 (CERN) が運用を行っている大型ハドロン衝突型加速器 (LHC) では、2015 年から、核子あたりの衝突エネルギーを陽子-陽子衝突、鉛-鉛衝突それぞれについて最大 13TeV、5.02TeV までに引き上げての Run2 実験が行われている。LHC 加速器を利用する主要実験グループの一つである ALICE 実験では、我々の研究グループがその構想・開発・実験施設への導入に大きく携わった電磁カロリメータ DCAL(図 19)が増設され、これにより、先に行われた Run1 での実験と比較してクォーク・グルーオン・プラズマ物性の重要なプローブとなる高エネルギー光子及びジェットイベント測定能力の向上を目的とする。我々は新たに設置されたこの DCAL 検出器と Run1 時から稼働していた EMCAL 及び PHOS 検出器を組み合わせ高エネルギー光子・ジェットイベントを効率的に収集するためのトリガーシステム開発を行った。開発内容としては、主に、トリガー計算を行う Summary Trigger Unit(STU, 図 20) 上に実装された FPGA 用のファームウェア開発を行った。また、この検出器を運用を開始するための作業・運用システムの更新作業を行った。本システムは 2015 年冬に運用を開始し、鉛-鉛衝突実験におけるカロリメータトリガーによるデータ収集に成功した (図 21)。

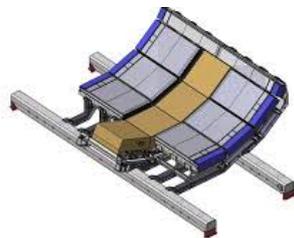


図 19 DCAL 検出器と PHOS 検出器

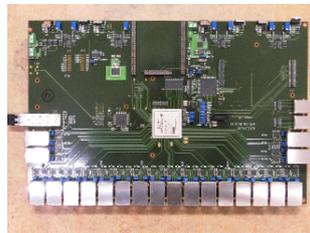


図 20 Summary Trigger Unit (STU) ボード

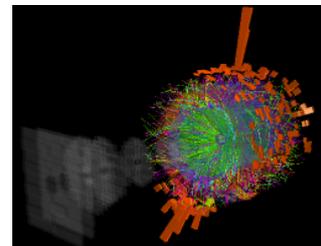


図 21 トリガーシステムを用いて収集した Di-jet 事象

(9) MRPC の時間分解能の改善を目指すガスギャップ幅の最適化

多層型ガス検出器 Multi-gap Resistive Plate Chamber(MRPC) は、比較的安価で非常に高い時間分解

能を達成できると期待されている。同機は J-PARC 加速器で開始予定の重イオン衝突実験に採用される予定であり、現在、飛行時間分解能 30ps を目指し研究開発が進められている。釣り糸をスペーサーに用いてガラス板を積み重ねることで各ガラス板の間に細く均一なギャップを形成し、さらにその上下を高電圧用電極と、シグナル読出し電極のついた基板で挟んだ構造をしている。これを 1 段とし、今年度は、図 22 のような 4 段積み重ねた構造の MRPC を用いた。各ギャップをガスで満たしたところへ宇宙線が入射するとギャップ間で電子雪崩が発生し、電荷の移動によってパッドに誘起される。この誘起された電荷信号の時間を読み取り時間分解能を評価した。ガラス板の間隔を狭くすることで時間分解能が改善する傾向にあることが報告されている [17] ことを受け、今年度はガラス板を隔てる釣り糸より細いものにする事で時間分解能の改善を目指した。釣り糸の太さが $165\mu\text{m}$ 、 $128\mu\text{m}$ 、 $104\mu\text{m}$ の三種類用意して評価したところ、 $104\mu\text{m}$ に $16\text{V}/\mu\text{m}$ の電場をかけた時に $50.6 \pm 4.7\text{ps}$ の時間分解能に達した (図 23)。しかし、ストリーマー現象の発生に伴い、立ち上がったタイミングを正確につかむことができない事象が増えてしまい、検出効率は 50% 程度にとどまった (図 24)。

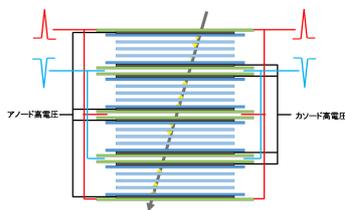


図 22 4 段型 MRPC のセットアップ

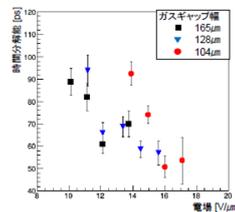


図 23 時間分解能のギャップ間電場依存性

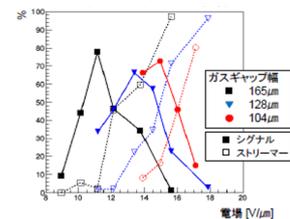


図 24 電子雪崩・ストリーマー現象の割合

参考文献

- [1] 山口由高 他, 「加速器」 Vol. 12 (2015) 1-10.
- [2] Y. Satou *et al.*, Elsevier, Anthropocene, in press.
- [3] T. Matsunaka *et al.*, Springer, T. Takahashi (ed.), “Radiological Issues for Fukushima’s Revitalized Future” 57-63
- [4] K. Sasa *et al.*, Nucl. Instrum. Meth. Res. B 361, (2015) 124-128
- [5] A. Adare *et al.* (PHENIX Collaboration), arXiv:1509.07784
- [6] P. Bozek, Phys. Lett. B. **717** (2012) 287
- [7] A. Adare *et al.* (PHENIX Collaboration), Phys. Rev. Lett. **115** (2015) 142301
- [8] L. Adamczyk *et al.* (STAR Collaboration), Phys. Rev. Lett. **113** (2014) 092301
- [9] T. Nonaka, T. Sugiura, S. Esumi, H. Masui, X. Luo, arXiv:1604.06212
- [10] L. Adamczyk *et al.* (STAR Collaboration), Phys. Rev. Lett. **116** (2013) 112302
- [11] A. Adare *et al.* (PHENIX Collaboration), Phys. Rev. Lett. **112** (2014) 222301
- [12] J. Adam *et al.* (ALICE Collaboration), Phys. Rev. C **93** (2016) 034916
- [13] J. Adam *et al.* (ALICE Collaboration), Phys. Lett. B **749** (2015) 68-81
- [14] B. Abelev *et al.* (ALICE Collaboration), Phys. Lett. B **719** (2013) 29-41
- [15] B. Abelev *et al.* (ALICE Collaboration), arXiv:1603.03402
- [16] J. Adam *et al.* (ALICE Collaboration), Phys. Lett. B **746** (2015) 1-14
- [17] ALICE Addendum to the Technical Design Report of the Time Of Flight System, 2002, 4

原子核実験グループ研究業績リスト

<論文>

1. “Different mechanism of two-proton emission from proton-rich nuclei ^{23}Al and ^{22}Mg ” Y.G. Ma, D.Q. Fang, 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, T. Motobayashi *Physics Letters B* 743 (2015) 306309.
2. “Spatial distributions of photons in plastic scintillator detected by multi-anode photomultiplier for heavy-ion position determination” S. Omika, T. Yamaguchi, M. Fukuda, A. Kitagawa, S. Matsunaga, D. Nagae, D. Nishimura, T. Nishimura, A. Ozawa, S. Sato, K. Sawahata, T. Suzuki, Y. Takeuchi *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* 797 (2015) 247254.
3. “Velocity-dependent transverse momentum distribution of fragments produced from $^{40}\text{Ar}+^{9}\text{Be}$ at 95 MeV/nucleon” S. Momota, I. Tanihata, A. Ozawa, M. Notani, K. Yoshida, K. Morimoto, T. Yamaguchi, T. Onishi, A. Yoshida, Y. X. Watanabe, Z. Liu, and A. Ono *PHYSICAL REVIEW C* 92, 024608 (2015).
4. RI ビーム「放射化学の事典」118 120 ページ（担当、小沢顕）日本放射科学会編集、朝倉書店 2015 年 9 月 25 日初版
5. “Isochronous field study of the Rare-RI Ring” Y. Abe, Y. Yamaguchi, M. Wakasugi, T. Uesaka, A. Ozawa, F. Suzaki, D. Nagae, H. Miura, T. Yamaguchi and Y. Yano *Physica Scripta*, T166 (2015) 014047.
6. “Fast-kicker system for rare-RI ring” Y. Yamaguchi, H. Miura, M. Wakasugi, Y. Abe, A. Ozawa, F. Suzaki, A. Tokuchi, T. Uesaka, T. Yamaguchi and Y. Yano *Physica Scripta*, T166 (2015) 014056.
7. “A resonant Schottky pick-up for Rare-RI Ring at RIKEN” F. Suzaki, Y. Abe, A. Ozawa, T. Suzuki, T. Uesaka, M. Wakasugi, K. Yamada, T. Yamaguchi, Y. Yamaguchi and J. Zenihiro and Ring collaboration *Physica Scripta*, T166 (2015) 014059.
8. 「理研 RI ビームファクトリー稀少 RI リングの建設」山口由高、若杉昌徳、阿部康志、洲崎ふみ、長江大輔、大甕舜一朗、三浦宙、Naimi SARAH、Ge ZHUANG、山口貴之、小沢顕、上坂友洋、大西純一、菊池崇志、込山美咲、熊谷桂子、徳地明、藤縄雅、眞家武士、山澤秀行、柳澤善行、渡邊裕、矢野安重、日本加速器学会誌「加速器」Vol. 12, No. 3, (2015) 132-141.
9. “PERFORMANCE OF A RESONANT SCHOTTKY PICK-UP IN THE COMMISSIONING OF RARE-RI RING” F. Suzaki, Y. Abe, Z. Ge, D. Nagae, S. Naimi, T. Uesaka, T. Watanabe, M. Wakasugi, K. Yamada, Y. Yamaguchi, J. Zenihiro, Y. Yano, I. Kato, H. Miura, T. Nishimura, S. Omika, T. Suzuki, N. Tadano, Y. Takeuchi, T. Yamaguchi, K. Hiraishi, Y. Ichikawa, T. Moriguchi, A. Ozawa, S. Suzuki, Y. Tajiri, *Proceedings of HIAT2015*, 98-100, 2015.
10. “PERFORMANCE OF A FAST KICKER MAGNET FOR RARE-RI RING” H. Miura, Y. Abe, Z. Ge, K. Hiraishi, Y. Ichikawa, I. Kato, T. Moriguchi, D. Nagae, S. Naimi, T. Nishimura, S. Omika, A. Ozawa, F. Suzaki, S. Suzuki, T. Suzuki, N. Tadano, Y. Tajiri, Y. Takeuchi, T. Uesaka, M. Wakasugi, T. Yamaguchi, Y. Yamaguchi, *Proceedings of HIAT2015*, 95-97, 2015.

11. “CONSTRUCTION OF THE 6 MV TANDEM ACCELERATOR SYSTEM FOR VARIOUS ION BEAM APPLICATIONS AT THE UNIVERSITY OF TSUKUBA,” K. Sasa, S. Ishii, H. Oshima, Y. Tajima, T. Takahashi, Y. Yamato, D. Sekiba, T. Moriguchi, E. Kita, Proceedings of HIAT2015, 285-287.
12. “STATUS OF THE TANDEM ACCELERATOR COMPLEX AT THE UNIVERSITY OF TSUKUBA (UTTAC)” K. Sasa, S. Ishii, H. Oshima, H. Kimura, T. Takahashi, Y. Tajima, Y. Yamato, D. Sekiba, T. Moriguchi, E. Kita, Proceedings of the 12th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (PASJ2015), 322-324, 2015.
13. “Trace-element compositions and Br/Cl ratios of fluid inclusions in the Tsushima granite, Japan: Significance for formation of granite-derived fluids”, Masanori Kurosawa, Kimikazu Sasa, Ki-Choel Shin, Satoshi Ishii, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 182 (2016) 216239.
14. “Migration Behavior of Particulate ^{129}I in the Niida River System”, Tetsuya Matsunaka, Kimikazu Sasa, Keisuke Sueki, Yuichi Onda, Keisuke Taniguchi, Yoshifumi Wakiyama, Tsutomu Takahashi, Masumi Matsumura, and Hiroyuki Matsuzaki, Springer Japan 2016, T. Takahashi (ed.), Chapter 6, Radiological Issues for Fukushima’s Revitalized Future, DOI 10.1007/978-4-431-55848-4-6.
15. “Pre- and post-accident ^{129}I and ^{137}Cs levels, and $^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$ and $^{129}\text{I}/^{137}\text{Cs}$ ratios in soil profiles near the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant”, Tetsuya Matsunaka, Kimikazu Sasa, Keisuke Sueki, Tsutomu Takahashi, Masumi Matsumura, Yukihiko Satou, Jun-ichi Kitagawa, Norikazu Kinoshita, Hiroyuki Matsuzaki, Japan, *Journal of Environmental Radioactivity*, 151 (2015) 209-217.
16. “Oxidation of SO_2 and Formation of Water Droplets under Irradiation of 20 MeV protons in $\text{N}_2/\text{H}_2\text{O}/\text{SO}_2$ ”, Shigeo Tomita, Yoichi Nakai, Shuhei Funada, Hideomi Tanikawa, Isao Harayama, Hitomi Kobara, Kimikazu Sasa, Jens Olaf Pepke Pedersen, Preben Hvelplund, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B* 365 (2015) 616-621.
17. “The new 6MV multi-nuclide AMS facility at the University of Tsukuba”, Kimikazu Sasa, Tsutomu Takahashi, Masumi Matsumura, Tetsuya Matsunaka, Yukihiko Satou, Daiki Izumi, Keisuke Sueki, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B* 361 (2015) 124-128.
18. “Measurement of long-lived radionuclides in surface soil around F1NPP accident site by Accelerator Mass Spectrometry”, Yasuto Miyake, Hiroyuki Matsuzaki, Kimikazu Sasa, Tsutomu Takahashi, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B* 361 (2015) 627-631.
19. “Technological developments for strontium-90 determination using AMS”, Yukihiko Satou, Keisuke Sueki, Kimikazu Sasa, Tetsuya Matsunaka, Tsutomu Takahashi, Nao Shibayama, Daiki Izumi, Norikazu Kinoshita, Hiroyuki Matsuzaki, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B* 361 (2015) 233-236.

< 学位論文 (博士) >

1. 数理物質科学研究科・博士論文、阿部康志、Study of isochronous field in Rare-RI Ring for high-precision mass measurements (精密質量測定のための稀少 RI リングの等時性磁場の研究)
2. 数理物質科学研究科・博士論文、Jihyun Bhom、Multiplicity dependence of two-particle correlation in $\sqrt{s} = 7$ TeV pp collisions at LHC-ALICE
3. 数理物質科学研究科・博士論文、渡辺大介、Measurements of π 0-jet correlations in $\sqrt{s}=7\text{TeV}$ pp collisions and in $\sqrt{s_{\text{NN}}}=2.76$ TeV central Pb-Pb collisions at ALICE experiment

<学位論文（修士）>

1. 数理物質科学研究科・修士（理学）、青山 遼、RHIC-STAR 実験 $\sqrt{s_{NN}}=200\text{GeV}$ 金 + 金衝突実験における 2 粒子相関のラピディティおよび反応平面依存性の研究
2. 数理物質科学研究科・修士（理学）、李 準一、LHC-ALICE 実験 $\sqrt{s_{NN}}=2.76\text{TeV}$ 鉛・鉛衝突での Jet-Hadron 相関分布を用いた hard-soft 相互作用の研究
3. 数理物質科学研究科・修士（理学）、塩谷 知弘、RHIC-PHENIX 実験 $\sqrt{s_{NN}}=200\text{GeV}$ $^3\text{He}+\text{Au}$ 衝突における方位角異方性の測定と長距離相関に関する研究
4. 数理物質科学研究科・修士（理学）、杉浦 哲郎、RHIC-STAR 実験金 + 金衝突における net-charge 揺らぎの $\Delta\eta$ 依存性の研究
5. 数理物質科学研究科・修士（理学）、平野 勝大、ALICE 実験高度化に向けた超前方光子測定用電磁カロリメータ SiPAD 検出器のビームテスト実験による性能評価
6. 数理物質科学研究科・修士（理学）、山本 大貴、RHIC-PHENIX 実験における小さく高密度な衝突系での集団膨張の探索
7. 数理物質科学研究科・修士（理学）、市川 ゆきな、交差電磁場を利用した RI ビーム飛行時間検出器の開発

<学位論文（学士）>

1. 数理物質科学研究科・学士（理学）、佐藤 一輝、J-PARC 加速器重イオン実験計画に向けた MRPC-TOF の開発 —ガスギャップ幅と時間分解能—
2. 数理物質科学研究科・学士（理学）、田尻 芳之、稀少 RI リングでの質量測定に用いる飛行時間検出器の開発
3. 数理物質科学研究科・学士（理学）、平石 健太郎、陽子共鳴吸収反応による不安定核 ^{30}P の生成
4. 数理物質科学研究科・学士（理学）、細谷 青児、PHITS を用いた AMS 測定条件の評価と宇宙線生成核種の測定
5. 数理物質科学研究科・学士（理学）、松本 拓也、陽子共鳴吸収反応による不安定核 ^{25}Al の生成

<招待講演（国際会議）>

1. A. Ozawa, Mass measurements with Rare-RI Ring at RIBF 2015 SKLTP-BLTP Joint Workshop on Physics of Strong Interaction 2015, 10/30-11/2, Ronghu Lake Hotel, Guilin, China
2. Kimikazu Sasa, Tsutomu Takahashi, Masumi Matsumura, Tetsuya Matsunaka, Yukihiro Satou, Maki Honda, Daiki Izumi, Ryouhei Tomita, Seiji Hosoya, Aya Sakaguchi and Keisuke Sueki, Construction of the 6 MV tandem accelerator for multi-nuclide AMS at the University of Tsukuba, The 6th East Asia Accelerator Mass Spectrometry Symposium (EA-AMS 6), National Taiwan University, Taipei, Taiwan, October 05-08, 2015.

<国際会議発表>

1. A. Ozawa, Day-one experiment with R3 OEDO-SHARAQ International Collaboration Workshop 2015, 9/8-9, 東大 CNS
2. K. Sasa, M. Matsumura, T. Matsunaka, T. Takahashi, Y. Satou, N. Kinoshita, H. Matsuzaki and K. Sueki, Estimation of ^{131}I deposition from ^{129}I analysis in surface soils released from the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident, International Conference on Environmental Radioactivity (ENVIRA2015), Thessaloniki, Greece, from September 21st to 25th, 2015.
3. Kimikazu SASA, Satoshi Ishii, Hiroyuki Oshima, Yoshikazu Tajima, Tsutomu Takahashi, Yoshihiro Yamato, Daiichiro Sekiba, Tetsuaki Moriguchi and Eiji Kita, Construction of the 6 MV Tandem Accelerator System for Various Ion Beam Applications at the University of Tsukuba, 13th Heavy Ion Accelerator Technology Conference (HIAT2015), YOKOHAMA, JAPAN, SEPTEMBER 7-11, 2015.
4. K. Sueki, N. Shibayama, R. Tomita, Y. Satou, K. Sasa, T. Takahashi, T. Matsunaka, M. Matsumura, H. Matsuzaki, M. Murakami, R. Yamashita, H. Takada, Y. Koibuchi, O. Haecong, G. Mouri, , T. Oki, Time variation of iodine-129 and radioactive cesium in river water at Ohori River. The International Chemical Congress of Pacific Basin Societies, Honolulu, USA, 15-20 December, 2015.
5. Y.Satou, K. Adachi, T. Ono, Y. Iizawa, Y. Abe, I. Nakai, Y. Igarashi, K. Sasa, K. Sueki, Physico-chemical characterizations of radioactive particles emitted at the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant accident. The International Chemical Congress of Pacific Basin Societies, Honolulu, USA, 15-20 December, 2015.
6. R. Tomita , T. Matsunaka, M. Honda, Y. Satou, M. Matsumura, T. Takahasi, A. Sakaguchi, K. Sasa, K. Sueki and H. Matsuzaki, Environmental dynamics of dissolved radionuclides and ions in riverine water after the FDNPP accident. The International Chemical Congress of Pacific Basin Societies, Honolulu, USA, 15-20 December, 2015.
7. Y. Satou, K. Sueki, K. Sasa, T. Matsunaka, Takahashi, T., Kinoshita, N. and Matsuzaki, H.: Sample preparation for ^{90}Sr -AMS using solid phase extraction. 6th East Asia AMS Symposium, Taipei, Taiwan, October 5-8, 2015.
8. M. Honda, K. Sueki, K. Sasa, A. Sakaguchi and H. Matsuzaki, Developments of analytical methods for ^{36}Cl , ^{129}I , ^{99}Tc in soil samples. 6th East Asia AMS Symposium, Taipei, Taiwan, October 5-8, 2015.
9. T. Matsunaka, K. Sasa, K. Sueki, T. Takahashi, M. Matsumura, A. Goto, T. Watanabe, N. Tsuchiya, N. Hirano and H. Matsuzaki, Iodine isotopic ratio in crater lake and geothermal area at Zao volcano, Japan. 6th East Asia AMS Symposium, Taipei, Taiwan, October 5-8, 2015.
10. T. Matsunaka, K. Sasa, K. Sueki, Y. Onda, K. Taniguchi , Y. Wakiyama, T. Takahasi, M. Matsumura, and H. Matsuzaki, Migration behavior and flux of particulate ^{129}I in the river system of Fukushima. 6th East Asia AMS Symposium, Taipei, Taiwan, October 5-8, 2015.
11. M. Matsumura, M. Watanabe, K. Sasa, T. Matsunaka, T. Takahashi, K. Sueki and H. Matsuzaki, Environmental impact of the Fukushima accident on iodine-129 levels in meteoric water. 6th East Asia AMS Symposium, Taipei, Taiwan, October 5-8, 2015.
12. T. Matsunaka, K. Sasa, K. Sueki, Y. Onda, T. Ishimaru, K. Taniguchi, Y. Wakiyama, M. Honda,

- T. Takahasi, M. Matsumura and H. Matsuzaki, Study on the migration behaviour of Fukushima accident-derived iodine-129 from land area to the marine environment. International Conference Environmental Radioactivity, Thessaloniki, Greece, 21-25 September, 2015.
13. T. Matsunaka, K. Sasa, K. Sueki, T. Takahashi, M. Matsumura, A. Goto, T. Watanabe, N. Tsuchiya, N. Hirano and H. Matsuzaki, Changes in $^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$ ratio of crater lake and volcanic activity at Zao volcano, Japan. International Conference Environmental Radioactivity, Thessaloniki, Greece, 21-25 September, 2015.
 14. K. Sasa, M. Matsumura, T. Matsunaka, T. Takahashi, Y. Satou, N. Kinoshita, H. Matsuzaki and K. Sueki, Estimation of I-131 deposition from I-129 analysis in surface soils released from the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident. International Conference Environmental Radioactivity, Thessaloniki, Greece, 21-25 September, 2015.
 15. T. Matsunaka, K. Sasa, K. Sueki, Y. Onda, K. Taniguchi, Y. Wakiyama, T. Takahasi, M. Matsumura, and H. Matsuzaki, Migration behavior of particulate ^{129}I in the Niida River system. International Symposium on Radiological Issues for Fukushima's Revitalized Future, Fukushima, Japan, 30-31 May, 2015.
 16. T. Matsunaka, K. Sasa, K. Sueki, T. Takahasi, M. Matsumura, Y. Satou, J. Kitagawa, N. Kinoshita, and H. Matsuzaki, Pre- and post-accident levels of ^{129}I and ^{137}Cs in soil profile near field of the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant. International Symposium on Radiological Issues for Fukushima's Revitalized Future, Fukushima, Japan, 30-31 May, 2015.
 17. Yukihiro Satou, Keisuke Sueki, Kimikazu Sasa, Kouji Adachi, Yasuhito Igarashi, Characterization study of cesium concentrated particles in the soils near the Fukushima Daiichi nuclear power plant, EGU General Assembly, 12-17 April, 2015, Vienna, Austria.
 18. Shigeo Tomita, Ryo Kinoshita, Yoko Shiina, Makoto Imai, Kiyoshi Kawatsura, Makoto Matsuda, Kimikazu Sasa, Masao Sataka, Vicinage Effect on the Generation Mechanism of Convoy Electrons, SHIM2015, Swift Heavy Ions in Matter , 18-May 21, 2015, Darmstadt, Germany.
 19. Shigeo Tomita, Yoichi Nakai, Shuhei Funada, Jens Olaf Pepke Pedersen, Preben Hvelplund, Hitomi Kobara, Kimikazu Sasa, Formation of Nanodroplets in $\text{N}_2/\text{H}_2\text{O}/\text{SO}_2$ under Irradiation of Fast Proton Beams, SHIM2015, Swift Heavy Ions in Matter , 18-May 21, 2015, Darmstadt, Germany.
 20. A. Yamazaki, K. Sasa, D. Sekiba, T. Moriguchi, S. Ishii, M. Kurosawa, S. Tomita, E. Kita, Design of the High Resolution Ion Microbeam System for Analysis of Structural Materials on the 6 MV Tandem Accelerator at the University of Tsukuba, NIMS Conference 2015, Tsukuba International Congress Center, EPOCHAL TSUKUBA (Tsukuba, Japan), July 14-16, 2015.
 21. A. Yamazaki, K. Sasa, S. Ishii, M. Kurosawa, S. Tomita, E. Kita, Development of the Ion Microbeam System for Analysis of Light Elements in Structural Materials at the University of Tsukuba, SIP-IMASM 2015 symposium, AIST Tsukuba Central 1, The National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST) (Tsukuba, Japan), September 29-October 1, 2015.
 22. T. Chujo, Evolution of the ALICE computing model in Run 3, 2015 WLCG Collaboration Workshop, April 11-12, 2015, Okinawa, Japan
 23. T. Chujo, Correlation measurements with jets, Mini-workshop on jet physics in ALICE at the LHC Run2, April 14-15, 2015, Wuhan, China
 24. O. Busch, Jet Physics with ALICE from LHC run 1 to LHC run 2, same conference
 25. D. Watanabe, Jet azimuthal distribution with high pT neutral pion triggers in pp 7 TeV and PbPb

- 2.76 TeV, same conference
26. N. Tanaka, Azimuthally sensitive HBT w.r.t. jet axis in Pb+Pb collisions, same conference
 27. J. Bhom, Multiplicity dependence of two particle correlation in $\sqrt{s_{NN}}=7$ TeV pp collisions at LHC-ALICE experiment, KPS2015, April 22-24, 2015, Daejeon, South Korea
 28. S. Mizuno, Measurement of soft photon collective flow in $\sqrt{s_{NN}}=200$ GeV Au+Au collisions at RHIC-PHENIX experiment, DIS2015, April 27 - May 1, 2015, Dallas, Texas, USA
 29. O. Busch, Jet fragmentation in pp and PbPb, ALICE Jet Workshop 2015, May 13-15, 2015, Yale University, USA
 30. D. Watanabe, π^0 -jet correlations in pp and Pb-Pb collisions, same conference
 31. T. Chujo, Run2 di-jet + soft hadron & HBT measurements, same conference
 32. H. Yokoyama, EMCAL+DCAL jet triggering, same conference
 33. O. Busch, Exploring the QGP with Jets in ALICE experiment, Universe Evolution and Matter Origin, TGSW2015, Sep 28-30, 2015, Tsukuba, Japan
 34. H. Nakagomi, Flow and correlation results from RHIC-PHENIX experiment, same conference
 35. H. Nakagomi, Measurement of charged hadron anisotropic flow in Cu+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV at RHIC-PHENIX (poster), Quark Matter 2015, Sep 27- Oct 3, 2015, Kobe, Japan
 36. D. Watanabe, Jet azimuthal distributions with high pT neutral pion triggers in pp 7 TeV and Pb-Pb 2.76 TeV collisions from ALICE at the LHC (poster), same conference
 37. H. Yamamoto, Flow and correlation measurement in d+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV at PHENIX experiment (poster), same conference
 38. Y. Fukuda, Analysis methods to extract possible flow and ridge signal in small systems and application to high multiplicity events in 510 GeV p+p collisions at RHIC PHENIX experiment (poster), same conference
 39. S. Kudo, Charged hadron production and two-particle correlations in $^3\text{He}+\text{Au}$ collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV measured with PHENIX detector (poster), same conference
 40. N. Tanaka, HBT measurements with respect to event plane and jet axis in Pb-Pb 2.76 TeV collisions from ALICE (poster), same conference
 41. M. Hirano, Detector R&D of the Forward Calorimeter with PAD readout for the ALICE upgrade (poster), same conference
 42. O. Busch, Jets in p-Pb Collisions Measured with ALICE, QCD challenges at the LHC : from pp to AA, Jan 18-22, 2016, Taxco, Mexico
 43. S. Esumi, Experimental evidences for hydrodynamic flow in heavy-ion collisions, ATHIC2016, Feb 15-19, 2016, New Delhi, India
 44. T. Nonaka, Importance of separated efficiencies for positively and negatively charged particles for cumulant calculations, same conference
 45. H. Nakagomi, Latest results of charged hadron flow measurements in CuAu collisions at RHIC-PHENIX, WWND2016, Feb 28 - Mar 5, 2016, Guadeloupe

<国内会議発表>

1. 小沢顕、RI ビーム飛行時間検出器の開発 H26 年度 HIMAC 共同利用研究成果発表会 2015, 4/20-21, ホテルポートプラザちば、Chiba, Japan

2. 小沢顕、固体水素標的を用いた陽子ドリップライン近傍核生成法の開発 H26 年度 HIMAC 共同利用研究成果発表会 2015, 4/20-21, ホテルポートプラザちば、Chiba, Japan
3. 小沢顕、Present status of Rare-RI Ring project at RIBF 「実験と観測で解き明かす中性子星の核物質」第 4 回研究会: 2015, 9/17-18, 湘南国際村センター
4. 森口哲朗、筑波大学 12UD ペレトロンタンデム加速器の廃止措置計画、第 14 回放射線安全管理学会第 14 回学術大会、筑波大学、2015/12/2-4.
5. 森口哲朗、筑波大学イオン加速器システムによる計測手法、第 1 回光・量子計測シンポジウム、つくば国際会議場、2015/9/9.
6. 森口哲朗、筑波大学 UTTAC におけるタンデム加速器の廃止措置計画、第 28 回タンデム加速器及びその周辺技術の研究会、東北大学、2015/7/3-4.
7. 鈴木伸司、「RI ビーム飛行時間検出器の開発」、日本物理学会 2015 年秋季大会、大阪市立大学、2015 年 9 月 25 28 日
8. 鈴木伸司、「質量測定用飛行時間検出器の開発」、日本物理学会第 71 回年次大会、東北学院大学、2016 年 3 月 19 22 日
9. 石橋陽子、「中性子過剰核 ^{39}S の磁気モーメント測定」、同上
10. 笹 公和, 高橋 努, 松中 哲也, 松村 万寿美, 坂口 綾, 佐藤 志彦, 本多 真紀, 富田 涼平, 細谷 青児, 末木 啓介: 6 MV タンデム加速器質量分析システムにおける極微量核種の検出試験, 日本原子力学会 2016 年春の年会, 仙台, 東北大学, 3.26-28, 2016.
11. 松中 哲也, 笹 公和, 末木 啓介, 恩田 裕一, 高橋 努, 松村 万寿美, 石丸 隆, 谷口 圭輔, 脇山 義史, 松崎 浩之: 放射性ヨウ素の河川における挙動と沿岸環境中の分布, 日本海洋学会 2016 年度春季大会, 東京大学本郷キャンパス, 3.14-18, 2016.
12. 松中 哲也, 笹 公和, 末木 啓介, 高橋 努, 佐藤 志彦, 松村 万寿美, 松崎 浩之: 福島県浪江町における年輪中の炭素 14 濃度変動, 第 17 回「環境放射能」研究会, つくば, KEK, 3.8-10, 2016.
13. 細谷 青児, 笹 公和, 松中 哲也, 松村 万寿美, 高橋 努, Mark Sundquist, Mark Stodola, 末木 啓介: 難測定核種 AMS 開発に向けた PHITS シミュレーションの適用, 第 18 回 AMS シンポジウム, 東京大学, 3.4-5, 2016.
14. 笹 公和, 高橋 努, 松中 哲也, 松村 万寿美, 坂口 綾, 佐藤 志彦, 本多 真紀, 富田 涼平, 細谷 青児, 末木 啓介: 筑波大学 6 MV 加速器質量分析システムの現状と AMS 試験測定結果, 第 18 回 AMS シンポジウム, 東京, 3.4-5. 東京大学, 3.4-5, 2016.
15. 松中 哲也, 笹 公和, 高橋 努, 松村 万寿美, 末木 啓介, 松崎 浩之: 福島における西暦 2010 年の晩材に記録された $\Delta^{14}\text{C}$ 増大, 第 18 回 AMS シンポジウム, 東京大学, 3.4-5, 2016.
16. 松中 哲也, 笹 公和, 高橋 努, 松村 万寿美, 末木 啓介, 後藤 章夫, 渡邊 隆広, 土屋 範芳, 平野 伸夫, 久利 美和, 高橋 正明, 風早 康平, 宮城 磯治, 松崎 浩之: 蔵王山における火口湖と地熱帯で観測されたヨウ素同位体比の低下, 第 18 回 AMS シンポジウム, 東京大学, 3.4-5, 2016.
17. 松村 万寿美, 渡邊 雅也, 笹 公和, 松中 哲也, 高橋 努, 末木 啓介, 松崎 浩之: 福島第一原子力発電所事故によるヨウ素 129 の降水への影響, 第 18 回 AMS シンポジウム, 東京大学, 3.4-5, 2016.
18. 松中 哲也, 笹 公和, 末木 啓介, 高橋 努, 佐藤 志彦, 松村 万寿美, 松崎 浩之: 過去 7 年間にわたる福島県浪江町の年輪中の炭素 14 濃度変動, 日本放射線安全管理学会 第 14 回学術大会, つくば, 筑波大学 12.2-4, 2015.
19. 松村 万寿美, 笹 公和, 末木 啓介, 松中 哲也, 高橋 努, 佐藤 志彦, 松崎 浩之: ヨウ素 129 による経時的汚染調査 - 加速器質量分析用の試料処理実験室の場合 -, 日本放射線安全管理学会 第 14 回学術大会, つくば, 筑波大学 12.2-4, 2015.

20. 笹 公和, 大島 弘行, 森口哲郎, 高橋 努, 松村 万寿美, 松中 哲也, 末木 啓介, 喜多 英治: 筑波大学 6 MV タンデム加速器の建設と極微量核種検出システムの開発, 日本放射線安全管理学会 第 14 回学術大会, つくば, 筑波大学 12.2-4, 2015.
21. 佐藤 志彦, 末木 啓介, 笹 公和, 箕輪 はるか, 吉川 英樹, 藤原 健壯, 中間 茂雄, 足立 光司, 五十嵐 康人: 福島第一原発周辺で見つかった放射性粒子の特徴, 日本放射線安全管理学会 第 14 回学術大会, つくば, 筑波大学 12.2-4, 2015.
22. M. Honda, K. Sueki, K. Sasa, A. Sakaguchi, H. Matsuzaki, A new extraction method for ^{36}Cl , ^{129}I and ^{99}Tc in soil samples with microwave assisted digestion equipment, 日本質量分析学会同位体比部会 2015, 大津, 11.25-27, 2015.
23. 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: 発事故以降の都市部河川における放射性核種と溶存イオンの挙動, 2015 日本放射化学学会年会・第 59 回放射化学討論会, 仙台, 東北大学, 9.25-27, 2015.
24. 本多 真紀, 末木 啓介, 坂口 綾, 笹 公和, 松崎 浩之: 難測定核種である塩素 36, ヨウ素 129, テクネチウム 99 の土壌からの抽出方法の検討, 2015 日本放射化学学会年会・第 59 回放射化学討論会, 仙台, 東北大学, 9.25-27, 2015.
25. 佐藤 志彦, 足立 光司, 小野 貴大, 飯澤 勇信, 阿部 善也, 中井 泉, 五十嵐 康人, 笹 公和, 末木 啓介: 福島第一原発事故で放出した放射性粒子の発生源による違い, 2015 日本放射化学学会年会・第 59 回放射化学討論会, 仙台, 東北大学, 9.25-27, 2015.
26. 松中 哲也, 笹 公和, 末木 啓介, 恩田 裕一, 石丸 隆, 谷口 圭輔, 脇山 義史, 高橋 努, 松村 万寿美, 松崎 浩之: 福島原発起源ヨウ素 129 の陸域から海洋への移行研究, 2015 年度日本地球化学学会年会, 横浜, 9.16-28, 2015.
27. 佐藤 志彦, 末木 啓介, 笹 公和, 小野 貴大, 飯澤 勇信, 阿部 善也, 中井 泉, 足立 光司, 五十嵐 康人: 福島第一原発事故で放出した放射性粒子の特徴, 2015 年度日本地球化学学会年会, 横浜, 9.16-28.
28. 笹 公和, 石井 聡, 大島 弘行, 木村 博美, 高橋 努, 田島 義一, 大和 良広, 関場 大一郎, 森口 哲朗, 喜多 英治: 筑波大学マルチタンデム加速器施設の現状, 第 12 回日本加速器学会年会, 敦賀, 8.5-7, 2015.
29. 笹 公和, 石井 聡, 大島 弘行, 木村 博美, 高橋 努, 田島 義一, 大和 良広, 関場 大一郎, 喜多 英治: 筑波大学タンデム加速器施設 UTTAC の現状 (2014 年度), 第 28 回タンデム加速器及びその周辺技術の研究会, 仙台, 7.3-4, 2015.
30. 山崎 明義, 笹 公和, 石井 聡, 黒澤正紀, 富田成夫, 喜多英治, 工藤 博, 植本 洋, 左高正雄, 筑波大学 6MV タンデム加速器マイクロビームラインの建設計画, 第 28 回タンデム加速器及びその周辺技術の研究会, 仙台, 7.3-4, 2015.
31. 佐藤 志彦, 末木 啓介, 笹 公和, 足立 光司, 五十嵐 康人, 福島第一原発周辺で採取した土壌から分離した放射性微粒子の同定, 日本地球惑星科学連合 2015 年大会, 幕張メッセ国際会議場, 2015 年 5 月 26 日.
32. 土田秀次, 間嶋拓也, 富田成夫, 笹公和, 平田浩一, 柴田裕実, 鳴海一雅, 斉藤勇一, 千葉敦也, 山田圭介, 的場史朗, 伊藤秋男, キャピラリー帯電効果による C60 ビームの静電偏向, 日本物理学会秋の大会, 関西大学, 2015 年 9 月 16 日 (水)~19 日 (土).
33. 佐藤志彦, 足立光司, 小野貴大, 飯澤勇信, 阿部善也, 中井泉, 五十嵐康人, 笹公和, 末木啓介, 福島第一原発事故で放出した放射性粒子の特徴, 2015 年度 日本地球化学学会年会, 横浜国立大学 教育人間科学部, 2015 年 9 月 16-18 日.
34. 松中哲也, 笹公和, 末木啓介, 恩田裕一, 石丸隆, 谷口圭輔, 脇山義史, 高橋努, 松村万寿美, 松

崎浩之、福島原発起源ヨウ素 129 の陸域から海洋への移行研究、2015 年度 日本地球化学会年会、横浜国立大学教育人間科学部、2015 年 9 月 16-18 日、

35. Shigeo Tomita, Yoko Shiina, Ryo Kinoshita, Makoto Imai, Kiyoshi Kawatsura, Makoto Matsuda, Kimikazu Sasa, and Masao Sataka, Zero degree electron spectroscopy of fast carbon clusters through carbon foil, 第 16 回「イオンビームによる表面・界面」特別研究会、2015 年 12 月 5-6 日、奈良女子大
36. 村上道夫、葦澤貴夫、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の推定、第 2 回福島大学環境放射能研究所成果報告会、2016 年 3 月 7 日、コラッセふくしま 4 階 多目的ホール、
37. 葦澤貴夫、村上道夫、吉兼隆生、末木啓介、笹公和、芳村圭、放射性物質沈着量からの飲食物由来の被ばく量の推定、第 50 回日本水環境学会年会 (2015 年度)、アスティとくしま (徳島県徳島市)、2016 年 3 月 16 日 (水) ~18 日 (金)、
38. 平野勝大、LHC-ALICE 実験のアップグレードに向けた超前方光子測定用電磁カロリメータ Si PAD 検出器の性能評価、第 71 回年次大会、2016 年 3 月 19 - 22 日、東北学院大学 泉キャンパス
39. 塩谷知弘、Measurement of collective flow via two-particle correlation method in $\sqrt{s_{NN}} = 200\text{GeV}$ $^3\text{He}+\text{Au}$ collisions at RHIC-PHENIX、同上
40. 金 秉徹、ALICE FoCal-E PAD 検出器の信号読み出しに向けた VMM2 チップの性能評価、同上
41. 佐藤一輝、MRPC 飛行時間測定器の時間分解能向上を目指すガスギャップ幅の最適化、同上

< 科学研究費取得状況 >

1. 挑戦的萌芽研究、「不安定核電気双極子モーメント測定への挑戦」、代表 (小沢顕)、600 千円、300 千円
2. 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)、2,200 千円、660 千円
3. 若手研究 (B)、「脳虚血性病態理解のための非侵襲的小動物 O-15 ガス PET 検査システムの構築」、代表 (森口哲朗)、2000 (千円)、600 (千円)
4. 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、2015 年度：13,780 千円 (直接経費：10,600 千円、間接経費：3,180 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
5. 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、2015 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
6. 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: 2015 年度 1,000 千円
7. 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：2015 年度 500 千円

8. 三明康郎、基盤 B (2013-2016) 「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」
9. 中條達也、基盤 B (2013-2015) 「LHC-ALICE 実験・前方光子検出器のための高速読み出し系の開発」
10. 中條達也、挑戦的萌芽 (2015-2017) 「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」

<外部資金取得状況>

1. JST/CREST 「持続可能な水利用を実現する革新的な技術とシステム」、平成 23 年度採択課題「安全で持続可能な水利用のための放射性物質移流拡散シミュレータの開発」、代表 東京大学 沖 大幹 CREST 移流拡散チーム 末木グループ 研究代表者 末木啓介、研究分担 笹 公和、恩田裕一、分担金：2015 年度 300 千円
2. 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、分担金：2015 年度 21,200 千円
3. 内閣府 SIP (戦略的創造研究プログラム) 「次世代海洋資源調査研究」、「レアメタルを含む海底マンガン鉱床の多様性に関する地球科学研究」、研究代表者：白井 朗 (高知大学)、筑波大学機関代表者：坂口綾、研究参加者：笹 公和、末木啓介、山崎信哉、2015 年度 筑波大学配分額 1,200 千円
4. 文部科学省「先端研究基盤共用・プラットフォーム形成事業」、「マルチタンDEM加速器施設の産業・学術共用事業」、事業代表者: 喜多英治, 副代表者: 笹 公和、事業参加者: 富田成夫 他 10 名、平成 25 年度～平成 27 年度 102,265 千円、2015 年度経費：26,702 千円
5. 筑波大学・KEK 連携事業「物質-量子ビーム融合領域」、素粒子原子核分野 (原子核、加速器分野) 小沢 顕、中條達也、笹 公和、150 千円 (2015 年度)
6. 中條達也、二国間交流、日仏 (2015-2016) 「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」
7. 江角晋一、日米科学技術事業 (2011-2017) 「重イオン加速器 RHIC を用いる高エネルギー原子核衝突実験 PHENIX」

<学内プロジェクト>

1. 平成 26 年度筑波大学・ドイツ学術交流会 (DAAD) パートナーシップ・プログラム (筑波-DAAD 共同研究プログラム) 量子ビームを用いた高効率太陽電池の研究 Studies of high-efficiency solar cells using quantum beams 2014 年 4 月 1 日～2016 年 3 月 31 日代表 上殿明良、分担 秋本克洋、櫻井岳暁、笹公和、平成 26 年度 1,214 千円 平成 27 年度 589 千円

VII-1. 量子物性理論

教授：初貝 安弘

助教：苜宿 俊風

大学院生：4名(博士1名、修士3名)

卒論学生：2名

1 バルク・エッジ対応の一般論とその普遍性

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。より広くはこのバルク・エッジ対応の概念は量子系に限るものではなく、実は古典電磁場（フォトニック系）や古典力学系においても適用可能なものであることもわかってきた。

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（拡がった）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ハイライトを例示する [論文 1-6]。

1.1 スピンラダーの多様なエッジ状態とエンタングルメントエントロピー [論文 5]

スピンラダー系においてはそのダイマリゼーションのタイプとその磁化（有効電子占有率）により、多様なトポロジカルな相が存在する。それらの相は、単位胞の取り方と対応するベリー位相により、トポロジカルな観点から上手く記述される（図 1）。特に、本研究では磁場下のトポロジカル相に着目し、ベリー位相とエッジ状態との関係をバルク・エッジ対応の観点から明らかとした [論文 5]。

また、バルクエッジ対応は実際の境界を作らずとも、量子系を空間的に部分的に縮約する事で生じる有効的な境界に対しても適用される。具体的にはバルクの（周期的な）系を空間的に2分割し、バルクの量子系の基底状態が定義する絶対零度の密度行列をその一部分に対して縮約する事で得られる縮約密度行列は有効的な境界の影響を反映し、もとのバルクがトポロジカルに非自明であれば、縮約密度行列が定義する量子系のエントロピーにはエッジ状態の寄与が含まれる。このエントロピーは一般に系の部分系間の量子もつれを反映すると考えられるのでエントロピーエントロピーとよばれ、一つのトポロジカル量となる。本研究でも、このエンタングルメントエントロピーを計算し、系の多様なトポロジカル相と対比することで、バルク・エッジ対応の観点から、エントロピーエントロピーとエッジ状態の関連を明確に議論した。

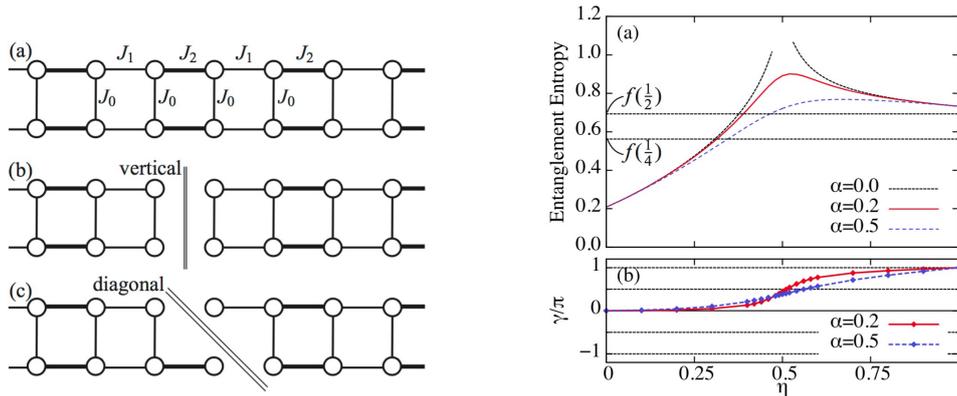


図 1: ダイマライズしたスピンラダーの多様なエッジ状態(左)。ダイマライズしたスピンラダー系のベリー位相とエンタングルメントエントロピー (右) [論文 5]

1.2 古典力学系でのバルク・エッジ対応：メカニカルグラフェン [論文 4]

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ベ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。特に我々は、2次元ハニカム格子上的単純なバネ質点系、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 [論文 4]。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。

また、古典系を回転することで生まれる慣性力であるコリオリ力は一種のゲージ場を起源としており、有効的な時間反転の破れをもたらす。これに対応してチャーン数は非自明となり、系に境界があるとき回転の向きとは独立にチャーン数の符号に依存した方向に伝搬する局在モードを生ずる。このエッジ状態の進行方向の反転をチャーン数の計算と共に実際の系の強制振動モードの時間発展を用いて、明確に示した (図 2)。

1.3 古典力学系でのバルク・エッジ対応：古典系でのベリー位相としての Hannay Angle とエッジ状態の対応 [論文 2]

近年のトポロジカル相の研究は、バルクの特徴づけにはベリー接続を用いたトポロジカルな物理量を用い、境界をもつ系のエッジ状態をバルク・エッジ対応の観点から対応させることを基本的な戦略とする。特にこの対応は近年の研究により、量子系に限らず、古典電磁場の系としてのフォトニック系や、古典力学系でも成立することが明らかとなった。特にベリー位相はその発見の当初からその古典系での類似物との関係が議論されており、Hannay angle と呼ばれる。本研究ではこの Hannay angle の議論を明確化する事でバルクエッジ対応により、系に境界がある場合のエッジ状態の存在との関連を明らかとした [論文 2]。

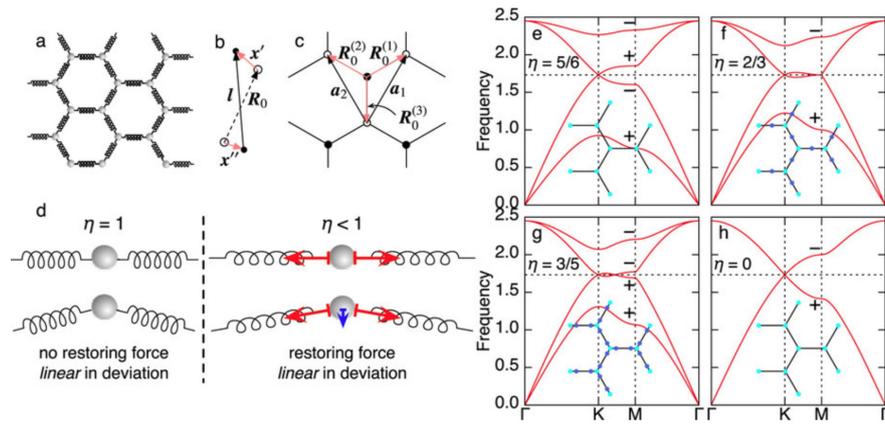


図 2: メカニカルグラフェンの構造と Dirac 分散 [論文 4]

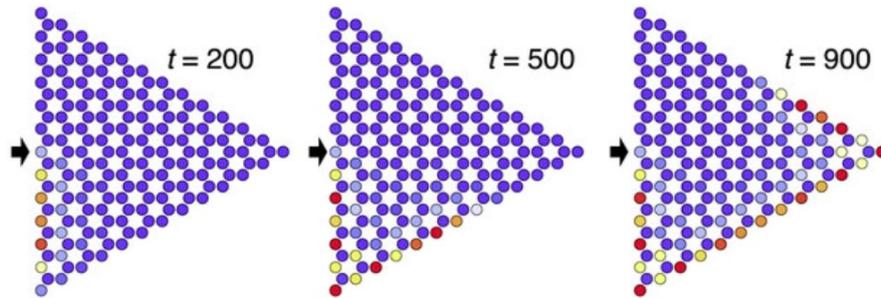


図 3: 回転するメカニカルグラフェンにおける局在振動モード [論文 4]

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とその相分類における有効性

2.1 エンタングルメントチャーン数の意義の再考察 [論文 3]

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。引き続き本年は、その物理的意義について明確化した議論を出版した [3]。

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

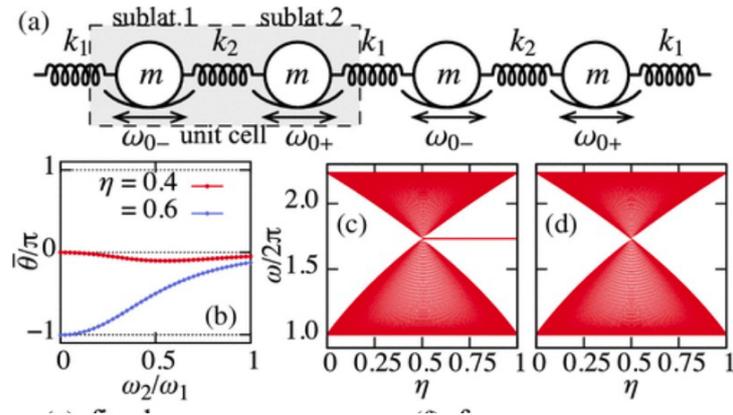


図 4: 一次元連成振動子系と Hannay angle、エッジ状態 [論文 2]。

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 [3]。

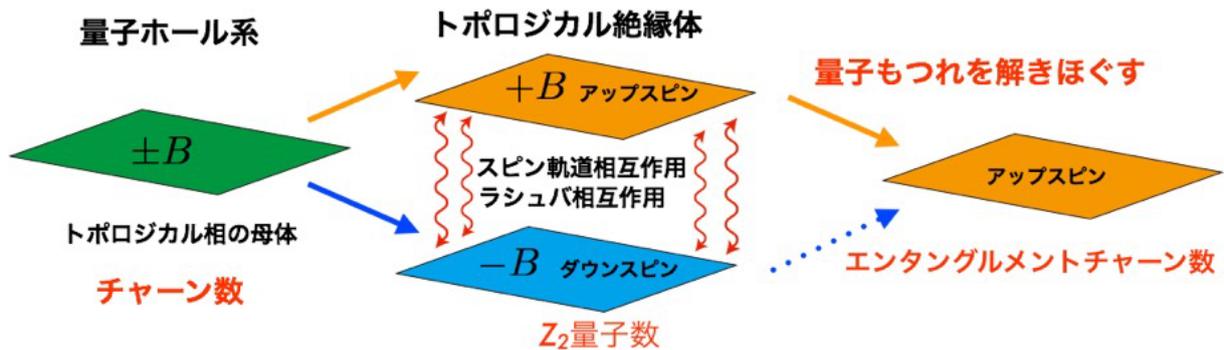


図 5: トポロジカル絶縁体を例にとった時のエンタングルメントチャーン数の意義

2.2 Kane-Mele 模型の相図再構築と時間反転対称性の破れに伴う新しい相 [1]

Kane-Mele 模型はトポロジカル絶縁体の基本的な模型であり、いわゆる Z_2 不変量でその非自明な相が特徴づけられると考えられている。まず、この系の相図を Z_2 量子数でなく、エンタングルメントチャーン数を用いて再構成することができることを本研究では明らかとした。さらに、この系に磁場を印加する事で多様でトポロジカルに非自明な新しい相が現れることも示した [論文 1]。これらの研究はエンタングルメントチャーン数のより広い系での有効性を示唆しており、今後の研究の展開が期待されている。

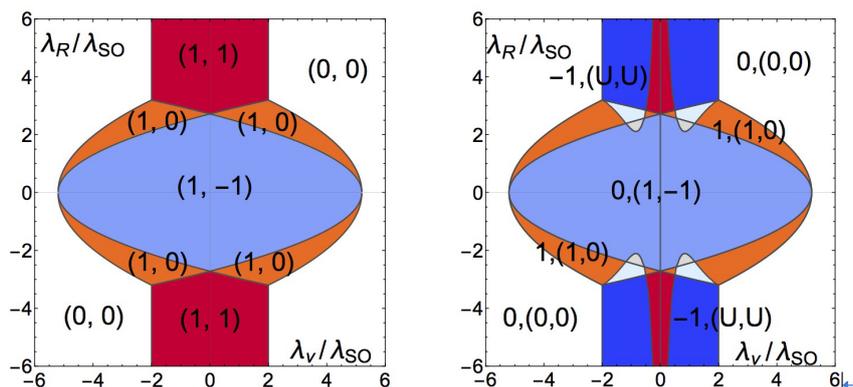


図 6: 磁場下の Kane-Mele 模型におけるエンタングルメントチャーン数による相図。スピン軌道相互作用が弱い場合 (左) と強い場合 (右)[論文 1]

<論文>

1. H. Araki, T. Kariyado, T. Fukui and Y. Hatsugai, “Entanglement Chern Number of the Kane-Mele Model with Ferromagnetism”, J. Phys. Soc. Jpn. **85**, 043706(1-4) (2016), selected as “Editor’s Choice”, DOI: 10.7566/JPSJ.85.043706
2. Y. Kariyado and Y. Hatsugai, “Yet Another Symmetry-Protected Topological Order Parameter in Classical Mechanics”, J. Phys. Soc. Jpn. **85**, 043001(1-4) (2016), DOI: 10.7566/JPSJ.85.043001
3. T. Fukui and Y. Hatsugai, “Disentangled Topological Numbers by a Purification of Entangled Mixed States for Non-Interacting Fermion Systems”, J. Phys. Soc. Jpn. **84**, 043703 (1-4) (2016), DOI: 10.7566/JPSJ.84.043703
4. T. Kariyado and Y. Hatsugai, “Manipulation of Dirac Cones in Mechanical Graphene”, Scientific Reports **5**, 18107(1-8) (2015), DOI: 10.1038/srep18107
5. T. Kariyado and Y. Hatsugai, “Topological order parameters of the spin-1/2 dimerized Heisenberg ladder in magnetic field”, Phys. Rev. B **91** 214410(1-10) (2015), DOI: 10.1103/PhysRevB.91.214410
6. Y. Hatsugai and T. Fukui, “Bulk-edge correspondence in a topological pumping”, arXiv:1601.03537, to appear in Phys. Rev. B, Rapid comm. (2016)

<講演:国際会議>

1. [Invited] Y. Hatsugai, “Entanglement Chern numbers for random systems”, The APCTP Workshop on “Delocalization Transitions in Disordered Systems” /2015-7-31–2015-7-31
2. [Invited] Y. Hatsugai, “Bulk-edge correspondence: from math to physics”, International workshop 2015, Physics of bulk-edge correspondence & its universality : From solid stat physics to cold atoms/2015-09-27–2015-09-29
3. S. Oono, T. Kariyado and Y. Hatsugai, “Topologically protected propagating modes of electromagnetic waves in 3D photonic crystals without inversion symmetry”, 17-th International conference on physics of Light-Matter coupling in nanostructure/2016-03-28–2016-03-31

4. T. Kawarabayashi, Y. Hatsugai and H. Aoki, "Tilted Massive Dirac Fermions with Disorder: Anomaly in Landau Levels", The 21st International Conference on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems/2015-07-26–2015-07-31
5. S. Oono, T. Kariyado and Y. Hatsugai, "Photonic Chern numbers and the bulk-edge correspondence by using a Gaussian basis", The 21st International Conference on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems/2015-07-26–2015-7-31
6. H. Araki, T. Kariyado, T. Fukui and Y. Hatsugai, "Entanglement Chern Number of the Kane-Mele Model with Ferromagnetism", The 21st International Conference on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems/2015-07-26–2015-07-31
7. H. Aoki, K. Shiraishi and Y. Hatsugai, "Molecular-orbital view of the whole band structure of silicene in an extended Weaire-thorpe model", The 16th International Conference on the Science and Application of Nanotubes (NT15)/2015-06-29–2015-07-03
8. T. Kariyado and Y. Hatsugai, "Topological Transition in "Mechanical" Graphene: Chern Number and Edge States", Gordon Research Conference : Advances in Topological Phases of Matter in Crystalline Solids and Cold Atom Systems/2015-06-28–2015-07-03
9. T. Kariyada and Y. Hatsugai, "Correlation induced local spin moment of the topological boundary states of graphene nanoflake", Graphene Week 2015/2015-06-22–2015-06-24
10. T. Kawarabayashi, Y. Hatsugai and H. Aoki, "Landau levels in general tilted massive Dirac fermions: stability against randomness", Graphene Week 2015/2015-06-22–2015-06-24

<主催:国際会議>

1. Physics of bulk-edge correspondence & its universality : From solid state physics to cold atoms (BEC2015), Sep. 27-30 (2015), Univ. of Tsukuba, Bunkyo School Building, Myogadani, Bunkyo-ku, Tokyo. (登録参加者 60 名)
<http://thetis.ph.tsukuba.ac.jp/hatsugai/modules/pico/>

<講演:国内会議>

1. [招待講演] Y. Hatsugai, 「トポロジカル相の普遍性:異方的超伝導からシリセン, ワイル/ディラック半金属まで」名古屋大学応用物理学科 共催 豊田理化学研究所 第 369 回 物性談話会/2015-11-12–2015-11-12
2. [招待講演] Y. Hatsugai, 「トポロジカル相の最近の話題:エンタングルメントチャーン数」千葉大学理学部物性セミナー/2015-7-10–2015-7-10
3. T. Kariyado, T. Morimoto and Y. Hatsugai, 「スピン 1 の系における Z₃ トポロジカル相と量子化ベリー位相」日本物理学会第 71 回年会/2016-03-19–2016-03-22
4. S. Oono, T. Kariyado and Y. Hatsugai, 「Gaussian 基底によるフォトニック結晶中電磁場の時間発展」日本物理学会第 71 回年会/2016-03-19–2016-03-22
5. Y. Hatsugai; T. Fukui, 「トポロジカルポンプにおけるバルク・エッジ対応」日本物理学会第 71 回年会/2016-03-19–2016-03-22

6. T. Kawarabayashi, Y. Hatsugai and H. Aoki, 「一般化されたカイラル対称性を持つ格子模型」日本物理学会第 71 回年会/2016-03-19–2016-03-22
7. A. Hattori, M. Araidani, Y. Hatsugai, K. Yata, K. Shiraishi, M. Sato, Y. Tanaka, 「水素終端シリセン, ゲルマネン, スタネンリボンにおけるエッジ状態」日本物理学会第 71 回年会/2016-03-19–2016-03-22
8. T. Kariyado and Y. Hatsugai, 「ニュートン方程式に従う系のトポロジカル数とバルク・エッジ対応」第 9 回 物性科学領域横断研究会/2015-11-13–2015-11-15
9. H. Araki, T. Kariyado, T. Fukui and Y. Hatsugai, 「磁場下の Kane-Mele 模型のエンタングルメントチャーン数による相図」第 9 回 物性科学領域横断研究会/2015-11-13–2015-11-15
10. S. Oono, T. Kariyado and Y. Hatsugai, 「時間反転対称性下で実現するトポロジカルに安定な電磁波のエッジモード」第 9 回 物性科学領域横断研究会/2015-11-13–2015-11-15
11. T. Kawarabayashi, Y. Hatsugai and H. Aoki, 「傾いたディラック電子系におけるボンド秩序の vortex とゼロモード」日本物理学会 2015 年秋季大会/2015-09-16–2015-09-19
12. R. Itagaki, Y. Hatsugai, H. Aoki and T. Kawarabayashi, 「ディラック電子系におけるボンド秩序の高次 vortex 近傍の局所状態密度」日本物理学会 2015 年秋季大会/2015-09-16–2015-09-19
13. T. Fukui and Y. Hatsugai, 「1 次元梯子系におけるスピン・ポンプとエンタングルメント・チャーン数」日本物理学会 2015 年秋季大会/2015-09-16–2015-09-19
14. H. Araki, T. Kariyado, T. Fukui and Y. Hatsugai, 「磁場下の Kane-Mele 模型のエンタングルメントチャーン数と新しい相」日本物理学会 2015 年秋季大会/2015-09-16–2015-09-19
15. S. Oono, T. Kariyado and Y. Hatsugai, 「空間反転対称性の破れた 3 次元フォトニック結晶でのセクションチャーン数とエッジ状態」日本物理学会 2015 年秋季大会/2015-09-16–2015-09-19
16. T. Kariyado and Y. Hatsugai, 「古典系のトポロジカル秩序変数としての Hannay angle」日本物理学会 2015 年秋季大会/2015-09-16–2015-09-19

<受賞>

1. Y. Hatsugai, FY2015 BEST FACULTY MEMBER (University of Tsukuba)

<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

<集中講義>

1. 初貝安弘, 千葉大学理学部集中講義「バルク・エッジ対応の物理の多様性と普遍性」2015 年 7 月 8 日～7 月 9 日

<卒業論文>

1. 工藤耕司：「磁場中の多電子系における相互作用とチャーン数」（物理学類，卒業論文，2016.3）
2. 高橋雄太：「メカニカルグラフェンの特異な分散とエッジ状態」（物理学類，卒業論文，2016.3）

<大学院学生>

博士1年. 大野 修平

修士1年. 荒木 広夢, 国府田 桂介, 保田 和馬

<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)
2015 年度：12,740 千円 (直接経費：9,800 千円，間接経費：2,940 千円)
2. 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

VII-2 ナノ量子物性グループ

准教授 谷口 伸彦

大学院生 3名 (修士課程 3名)

卒研究生 1名

本研究グループでは、メゾ系・ナノ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、様々な場の量子論の解析手法と近似法の開発を行い、解析を行っている。非平衡量子ドット系で電子相関効果を一貫した近似で扱おうとすると電子相関の非摂動的効果を考慮することが必要不可欠となる。そのため、非平衡定常状態において、如何に摂動論を越えた電子相関を系統的に取り込むかが解決すべき課題である。ナノ系に現れる局所的電子相関効果の深い理解は、ナノ系量子デバイスの物性理解として重要なだけでなく、強相関電子系全般に現れるさまざまな強相関現象 — モット絶縁体転移や擬ギャップ相・異常金属相の挙動 — を理解する上での礎となる。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研究を行った。また関連研究として、開放的量子ドット状態と端子状態の量子もつれに現れる電子相関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】非平衡量子輸送と物質ゲージ場 (外部資金 [1], 論文 [1], 講演 [1,2])

ナノ構造系の量子輸送の標準的モデルである、不純物準位 Anderson モデルで電子相関に関する非平衡摂動計算を行うと、非平衡定常状態では必ずしも電流保存則が保証されない。一般に、相互作用効果を局所ゲージ不変性 (ワード恒等式) を満たすように取り込むことは非自明であり、摂動補正を越える非摂動的効果を考慮することが必要となるためである。本研究では、ナノ系の非平衡量子輸送現象を物質ゲージ場の理論見地から再定式化することで、非平衡電流保存則を自然に保証する理論的枠組みを構築し、電子相関の非摂動効果を含めて系統的に評価する方法を開発した。電子相関の最も単純な非摂動効果の例は、Coulomb 閉塞現象であり、対応する物質ゲージ場モデルは、位相自由度のみを用いる Ambegaokar-Eckern-Schön 理論である。しかし AES 理論は、位相揺らぎに関する 2 次展開近似をし、大きな揺らぎを持つ有限の巻き付き数効果等を考慮していないため、その適用領域は古典領域 (高温かつ電子数: 大) に制限される。そのため、単一準位 Anderson モデルのような量子性の強い系の解析には不適であり、近藤効果を取り込むこともできない。本研究では、大きな位相揺らぎの寄与を定量的に評価すると同時に近藤相関も考慮することができるように、電子の自由度に位相場を付加する「複合粒子描像」に基づく解析手法を開発した。これにより、位相揺らぎをゲージ不変性を満たすように高次まで取り込むと同時に、低温での近藤効果を記述することが可能となり、ナノ系の電子相関効果に関して高温領域から低温領域に渡って系統的なアプローチが可能となった。単一準位アンダーソンモデル模型に対して解析を行うと、温度を下げるに従い自己エネルギーに大きなエネルギー依存性が現れる。特にその虚部 (緩和関数) は、急激に低

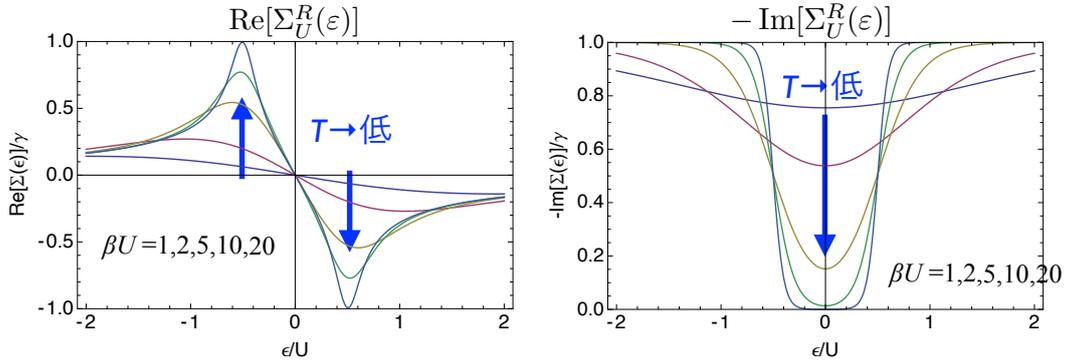


図1 電子相関自己エネルギーのエネルギー依存性と温度依存性：実部（左）および虚部（右）

音で減少し、擬ギャップ挙動を示すことがわかる [図1(右) 参照]。

【2】局所相関系の汎関数積分評価と自由粒子の新パラダイム (外部資金 [1], 論文 [2], 講演 [2])

汎関数積分法は物性分野の様々な分野で使われている大変強力で柔軟性のある手法であり、摂動計算や繰り込みに加え、さまざまな非摂動的効果や散逸効果を考察する上でも有効である。多くの利点を持つが、汎関数積分自体を直接評価することは、演算子順序や無限積の正規化など問題があり、それほど容易ではない。また、汎関数積分を厳密に評価できる系は（特殊な対称性を持つものを除き）実質的に Gauss 型 (=自由粒子系) の場合に限定されているのが現状である。一般に、汎関数積分法は、原子相関・局所的相関のような強い非摂動効果を持つ相関系を扱うことは不得手である。このような事情のため、相互作用系の有効場理論とは「低エネルギー領域で本質的な役割を果たす自由度に関する Gauss 型モデル」を通常は意味する。しかし、このような Gauss 型有効場理論で記述され得ない相関系があることは明らかである。例えば Gauss 型理論では、低エネルギー励起は（繰り込まれた）Fermi 分布か Bose 分布に限られるが、これは、強相関物質の Mott 絶縁体相の励起の様子とは必ずしも相容れない。

本研究では、従来、汎関数積分法では評価が困難であった局所相関系に対して、汎関数積分を評価する具体的な手法を開発するとともに、厳密評価の際に自然に現れる物理描像に基づき、Mott 絶縁性の有効場理論の研究を行った。局所相関ハミルトニアンとして

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

となる多準位局所相関系（電子系・ボーズ系; α は軌道/スピン自由度）をとる。この系に対して Keldysh 経路積分法による熱力学関数、スペクトル関数、および Green 関数の厳密評価を行った。更にこのアプローチを環境と結合した非平衡定常状態系へと拡張することで、系統的な近似計算を行った。

汎関数の厳密評価を通して得られた電子相関系の描像は、系がある種のランダムポテンシャル中

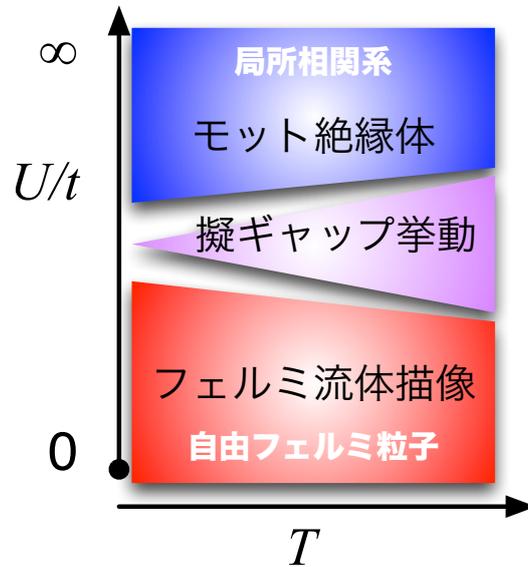


図2 電子相関系における Fermi 流体描像と局所相関系の概念図。局所相関系は、強相関極限は自由粒子描像の対局にあたる。

の自由粒子として考えることが可能であることを示唆する。これらの局所相関系の一粒粒子スペクトル関数は、複数ピーク構造を持つのが特徴であり、伝統的な準粒子描像の範疇外にある。バルクの強相関電子系の局所近似として考えると、この「拡張された自由粒子系」が記述する系は、準粒子が存在せず非対称的な電子/正孔励起を持つ、つまり、従来本質的な多体相関効果として考えられてきた Mott 絶縁性の特徴をすべて再現している。そのため「Fermi 流体理論を超える自由粒子の新パラダイム」であると考えている (図2 参照)。

【3】非平衡量子ドット系における電子相関と量子もつれ (学位論文 [1])

リード端子が結合した量子ドット系の電子状態は、一般にドット状態とリード状態が混ざり合った状態 (=もつれた状態) になっている。バイアス電圧は状態もつれを増加させる一方で、量子ドットの電子相関は電子をブロックすることで状態もつれを小さくすると考えられる。状態のもつれ具合を直接測る指標としてエンタングルメントエントロピーが近年注目され利用されている。本研究では、ドット状態のエンタングルメントエントロピーを計算することで、量子ドット状態の電子相関と非平衡性のもつれ状態に与える影響を定量的に調べる事を目的とした。量子ドット系の準位数が少数の場合には、エンタングルメントエントロピーを占有数揺らぎにより厳密に書き表すことが可能である。特に最も単純な単一準位量子ドットのエンタングルメントエントロピー S_d に関しては以下のことがわかった。(1) S_d はドットの電子数とその分散に表される、測定可能な物理量である。(2) S_d は相互作用の有無や平衡・非平衡性にかかわらず、ドットの電子数が $\langle \hat{n}_\uparrow \hat{n}_\downarrow \rangle = \langle \hat{n}_\uparrow \rangle \langle \hat{n}_\downarrow \rangle$ を満たすときに、最大値を取る (この関係は電子相関がないときに成立)。(3) S_d は、全体的にはコンダクタンスと類似の挙動を示すが、コンダクタンスとは異なり、ピーク位

置での S_d の値は、常にほぼ最大値 $\log 4$ が実現される。これは、コンダクタンスのピーク値が低い時であっても、最大限にもつれた状態が実現されていることを意味する。

研究業績

<論文>

1. N. Taniguchi, “Exact path integral evaluation of locally interacting systems, and expanding the free-particle paradigm” (in preparation).
2. N. Taniguchi, “Local gauge symmetry and multi-peak structure of the spectra function of open locally interacting systems” (in preparation).

<学位論文>

1. 卒業論文：久保賢太郎「非平衡量子ドット系における電子相関と量子もつれ」(筑波大学物理学類 2016年2月)

<講演>

1. 谷口伸彦・新井和明「非平衡量子ドットの計数場依存有効作用：電荷の量子化と揺らぎ効果」日本物理学会 2015 年秋季大会 (2015 年 9 月 17 日 大阪市立大学)
2. 谷口伸彦「非平衡量子ドット系の電子相関と動的複合フェルミオン描像」日本物理学会 第 71 回年次大会 (2016 年 3 月 19 日 東北学院大学)

<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-2016 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
研究員 Kirkham Christopher

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の開発を行っている。また、開発した第一原理計算コード 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。

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 の伝導特性計算において、散乱領域の摂動グリーン関数の計算と電極の自己エネルギーの計算は、計算のボトルネックのひとつである。前者については、平成 26 年度までに数理研究グループと協力して解決法を開発した。平成 27 年度は、後者の問題に取り組んだ。後者の問題の本質は、一般化ブロッホ状態を計算する二次固有値問題用ソルバーである QZ 法は全固有値固有ベクトルを計算するため、計算量が行列サイズの 3 乗に比例しプロセス並列化にも向かないことである。この問題を回避すべく、本研究グループで以前開発していた波動関数接合法を用いた伝導計算法のテクニックを応用し、自己エネルギーが満たすべき連分数方程式を利用して自己エネルギーを計算する方法を開発した。

この方法は、進行波と進行波の直交補空間を用いて連分数方程式を解くので、全固有値固有ベクトルの計算を必要としない。そのため、QZ 法の使用による計算速度の制約

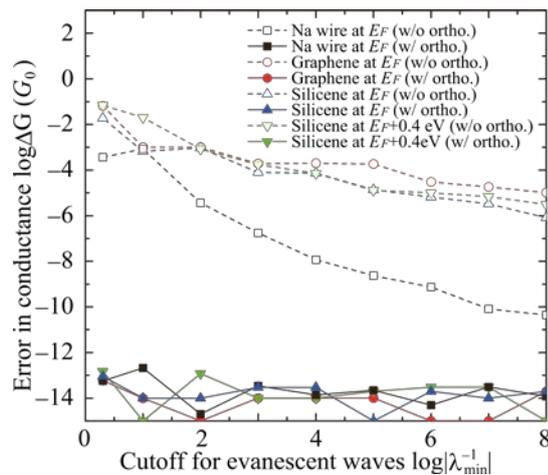


図 1 厳密解との比較。従来の回避法で計算した結果(点線)と本研究で開発した結果(実線)。文献[4]より。

がない。開発した計算方法の精度評価のため、この方法で計算した電極自己エネルギーを用いてナノ構造の電気伝導特性を計算した結果と、従来法の厳密な方法計算した電極自己エネルギーを用いた結果、および従来の回避法で計算した電極自己エネルギーを用いた結果の差を図1に示す。従来の回避法では、厳密解との差が顕著であるが、本計算手法で用いた自己エネルギーを用いると、厳密解との差は数値計算の有効数字の範囲内である。この方法は、QZ法を用いる必要がないだけでなく、並列計算に有利な櫻井-杉浦法を活用できるため、さらなる高速化が期待できる。

【2】SiC-MOSFET 開発における界面電子状態シミュレーション

代表的な SiC-MOS 界面に用いられる SiC(0001)面は、4 回周期で SiC 原子層が積層し、h(hexagonal)面と k(cubic)面が交互に現れる。h 面の表面 3 原子層分は cubic 積層構造を持ち、k 面は hexagonal 積層構造が現れる。表面エネルギーは、h 面よりも k 面の方が低いため、表面では h 面が優位に現れることが実験的に確認されている。これに対し界面では、h 面と k 面がほぼ同じ割合で出現することが実験的に確認されている。本研究グループでは、開発した第一原理計算コード RSPACE を用いて、このような h 面、k 面と呼ばれる積層面に起因する 4H-SiC(0001)/SiO₂ 界面の電子状態の違いを調べた。SiC は、伝導帯端に floating states という特徴的な準位をもつ。この準位の波動関数は cubic 積層の領域に分布し、原子周りではなく Si に囲まれた四面体構造の内部に局在する。

電子状態計算の結果、図2に示すように h 面では界面第一層から floating states が現れるのに対し、k 面では界面第二層から floating states が現れることが分かった。これは、k 面では界面第二層より cubic 積層構造が始まることから説明できる。次に、熱酸化により導入される O 原子を、界面の SiC 結合の間に挿入した。図3に示すように、h 面では界面伝導帯端の floating states のエネルギーが増加し、界面での禁制帯幅が広がるのに対し、k 面では界面の禁制帯幅に変化がないことが分かった。結晶中の floating

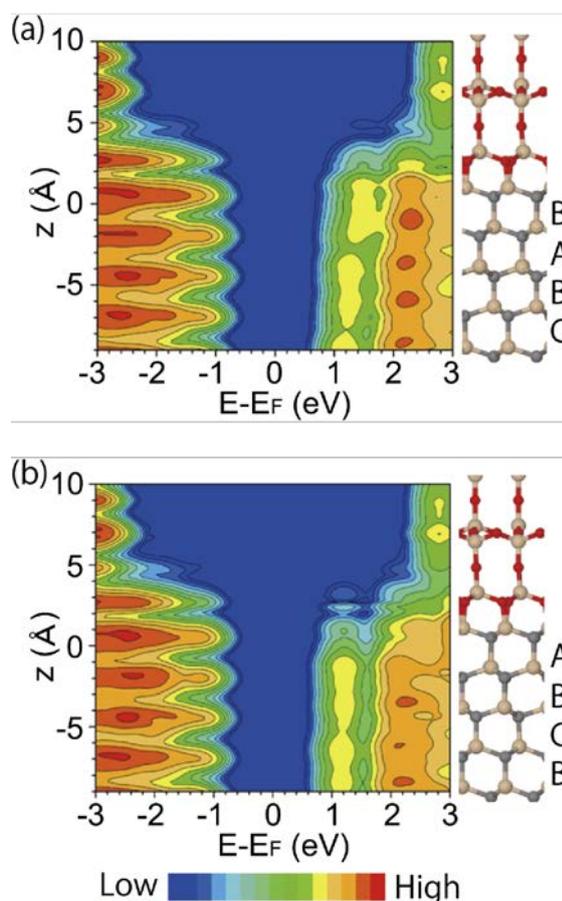


図2 酸素導入前の局所状態密度。(a) h 面。(b) k 面。文献[3]より。

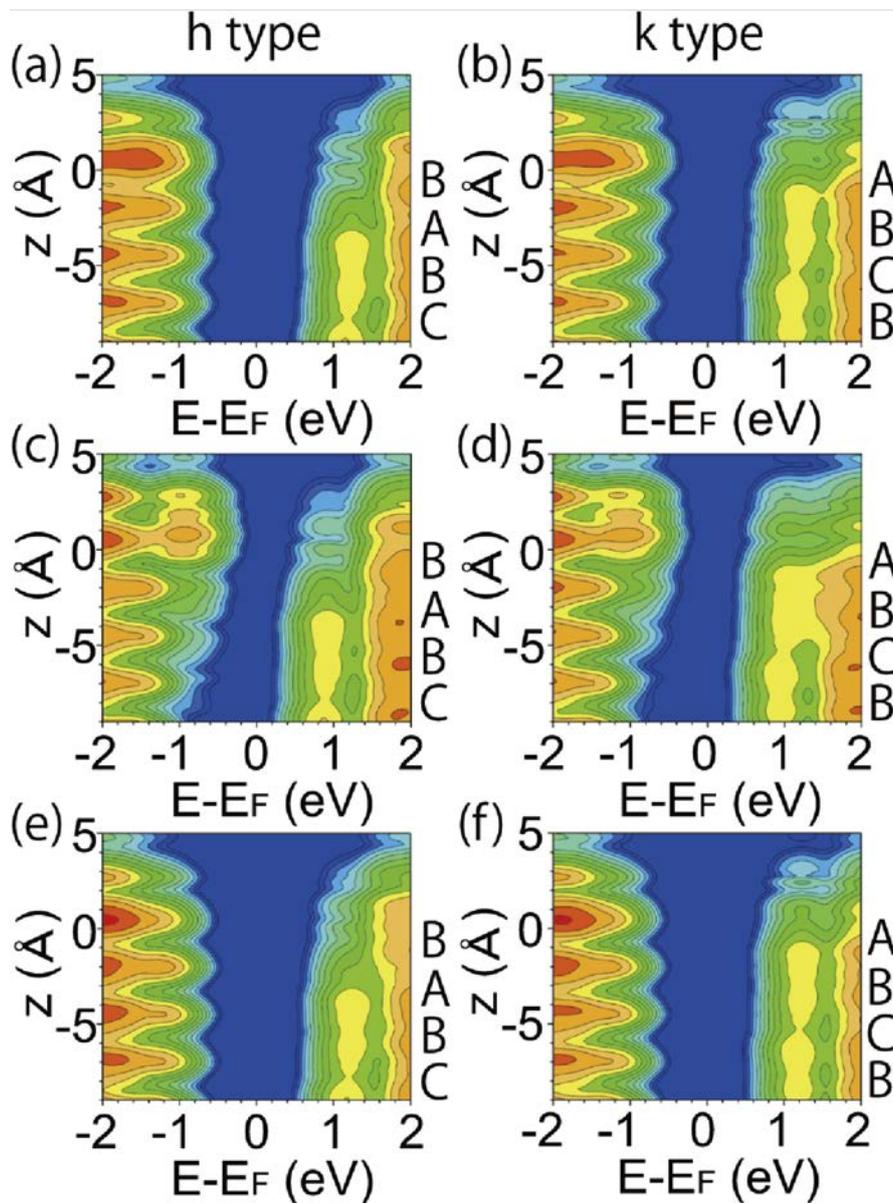


図3 酸素導入後の局所状態密度。(a), (b) O原子1個。(c), (d) O原子2個。(e), (f) O原子3個挿入後にCO分子を放出。文献[3]より。

states は、C よりも Si の方が電気陰性度の低いので、静電ポテンシャルが低い Si に囲まれた四面体構造内部に局在する。h 面では、電気陰性度の大きい O 原子が挿入されることにより、四面体構造内部の静電ポテンシャルが上昇することで禁制帯幅が広がる。一方、k 面は界面部に floating states が現れないため、禁制帯幅の変化が小さいと説明できる。

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。移動度を向上させるには floating states の影響を軽減させるか、(0001)面以外の結晶面で MOS 界面を作成する必要がある

る。現時点で、前者の方法は実現困難であるため、(0001)面と違う結晶面を用いた界面の評価を、筑波大パワエレ研・産総研の実験グループと協力して進めている。

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～2016年度、「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. 東京大学、委託研究、小野倫也、代表、2012年度～2015年度、「実空間手法に基づくナノ構造の電子・スピン輸送特性計算コードの開発」
3. 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～2016年度、「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」
4. 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、2014年度～2018年度、「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」

5. 研究業績

(1) 研究論文

(査読論文)

1. S. Iwase, T. Hoshi, T. Ono, "Numerical solver for first-principles transport calculation based on real-space finite-difference method", Phys. Rev. E 91, 063305 (2015).
2. Y. Egami, S. Iwase, S. Tsukamoto, T. Ono, K. Hirose, "First-principles calculation method for electron transport based on the grid Lippmann-Schwinger equation", Phys. Rev. E 92, 033301 (2015).
3. C. J. Kirkham, T. Ono, "First-principles study on interlayer states at the 4H-SiC/SiO₂ interface and the effect of oxygen-related defects", J. Phys. Soc. Jpn. 85, 024701 (2016).
4. T. Ono, S. Tsukamoto, "Real-space method for first-principles electron transport calculations: Self-energy terms of electrodes for large systems", Phys. Rev. B 93, 045421 (2016).
5. C. J. Kirkham, T. Ono, "Importance of SiC Stacking to Interlayer States at the SiC/SiO₂ Interface", Mater. Sci. Forum 858 457 (2016).

(2) 国際会議発表

(招待講演)

1. T. Ono, "First-Principles Calculations using Real-Space Finite-Difference Method", Advances in Modeling of Nano Materials, June 14-16, 2015, Hefei, China.

2. T. Ono, C. J. Kirkham, "Ab initio investigations for interface electronic structures of SiC-MOS", International Workshop on Dielectric Thin Films for Future Electron Devices – Science and Technology –, November 2-4, 2015, Tokyo, Japan.
3. T. Ono, "Density functional theory calculation for transport property of carbon nanostructures", EMN Meeting on Carbon Nanostructures, March 27-31, Honolulu, USA.

(一般講演)

1. S. Iwase, T. Ono, "Efficient solver of the Green's function method for electronic transport calculations", Psi-k Conference 2015, September 6-10, 2015, San Sabastian, Spain.
2. T. Ono, "Transport calculation method using real-space finite-difference Green's function scheme, Psi-k Conference 2015, September 6-10, 2015, San Sabastian, Spain.
3. T. Ono, C. J. Kirkham, "First-principles electronic-structure calculation for defect at SiC(0001)/SiO₂ interface", 16th International Conference on Silicon Carbide and Related Materials, October 4-9, 2015, Sicily, Italy.
4. T. Ono, C. J. Kirkham, S. Iwase, "Electronic structure and scattering property of 4H-SiC(0001)/SiO₂ interface", APS March Meeting 2016, March 14-18, 2016, Baltimore, USA.

(3) 国内学会・研究会発表

(招待講演)

1. 小野倫也, "SiC 酸化過程と MOS 界面電子状態の第一原理シミュレーション", 応用物理学会先進パワー半導体分科会 第 1 回個別討論会 「SiC 酸化メカニズムと界面欠陥」, 2015 年 8 月 4 日, 東京.
2. 小野倫也, "第一原理計算による SiC/SiO₂ 界面の電子状態とキャリア輸送特性解析", 2015 年度大阪大学産業科学研究所共同研究会, 2016 年 1 月 8 日～9 日, 岐阜.

(一般講演)

1. 小野倫也, "実空間差分法を用いた第一原理輸送特性計算：自己エネルギー項計算の高速化", 日本物理学会第 71 回年次大会, 2016 年 3 月 19-22 日, 東北学院大学.

(4) 著書、解説記事等

1. T. Ono, "First-principles Study on Transport Property of Nanostructures Using Real-space Finite-difference Method, Simulation", 34, 18 (2015).
2. T. Ono, S. Saito, S. Iwase, "First-principles study on oxidation of Ge and its interface electronic structures", Jpn. J. Appl. Phys., accepted.
3. 小野倫也, 塚本茂, 江上喜幸, "実空間差分法を用いた第一原理電気伝導特性計算の高速化", アンサンブル 18, 82 (2016).

VII-4 ナノ構造物性

1. メンバー

教授 岡田晋

学生 博士課程学生：6名、修士課程学生：5名、学群生：3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】 六方晶窒化ホウ素(h-BN)とグラフェンからなるヘテロシートの磁性

六方晶窒化ホウ素(h-BN)は窒素とホウ素からなる2次元の原子層物質で、そのトポロジーがグラフェンのそれとほぼ一致していることから、グラフェンとの面内のヘテロ構造構築の点で興味を持たれている。ここでは、h-BN中に三角形のグラフェンフレーク(フェナレニル分子)からなるヘテロ構造の電子状態の解明を行なった。特に、グラフェンフレークが不対電子による $S=1/2$ のスピンを有することから、h-BNに埋め込まれたグラフェンフレークのスピン物性の解明を行った。我々の計算から、h-BNに埋め込まれたグラフェンフレーク間のスピン-スピン相互作用は反強磁性的で、相互作用の大きさは、フレーク間距離が0.5nmで25meVと最大となり、フレーク間の増加に伴い速やかに減少し、1nmを越えると厳密にゼロとなることを明らかにした。また、分極したスピンの分布は境界を形成する原子種、すなわちB/C境界、N/C境界に依存して、境界における異種原子の π 軌道の混成により、異なる振る舞いを示すことが明らかになった。

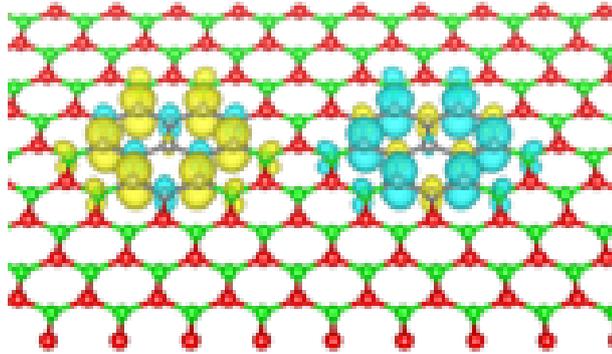


図 1: グラフェン/h-BN ヘテロ構造でのスピン密度分布

【2】 グラフェンナリボンのエネルギー論と電子構造

グラフェンの電子構造はそのネットワーク形状に強く依存することが知られている。例えば、グラフェンをナノスケールの幅を持つリボン状に切り出したグラフェンナリボン (GNR) は、リボンの端形状や幅に依存して金属や半導体となる。このように、形状による電子構造制御が可能であることからグラフェンは次世代の各種デバイスの材料として注目されている。その応用において必須となるのが、種々の電子構造を生み出すナノ構造のエネルギー安定性となる。ここでは、グラフェンの応用において本質となる、グラフェンの端に着目し、その端形成に要するエネルギー、すなわち端の安定性をしらべました。ここでは、ジグザグからアームチェアまで5通りの端形状に対して、その端形成エネルギーを明らかにした。

その結果、アームチェア型の端がジグザグ型の端に比べてエネルギー的に安定であること、アームチェア近傍の端においてはエネルギーがほぼ一定であることを明らかにした。また、GNR への横電界印加により、端の形成エネルギーが下がることも明らかにした。

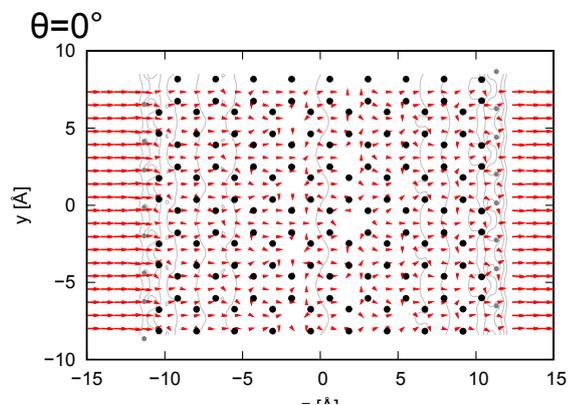


図 2 電界下のグラフェンリボン。

【3】変形した CNT へのキャリア注入

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ます。CNT は実デバイス中においては、担持基板や他の CNT との相互作用により、変形していることが示唆されている。一般に CNT の電子構造は変形に対して脆弱であることから、この変形がデバイス構造中の 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、種々の断面形状に変形した直径 1.5nm の CNT を対向電極の前に配置し、CNT への電荷注入を行い、蓄積された電荷密度分布、電界分布、静電容量の解析の計算を行った。計算の結果、蓄積電荷密度、電界分布共に CNT の断面形状に強く依存することが明らかになった。凸部を有するような変形の場合、その近傍において電界集中が起こると同時にその周りでの電荷の振動が起こる。また、静電容量は断面形状によってスケールされること、印加されたゲ

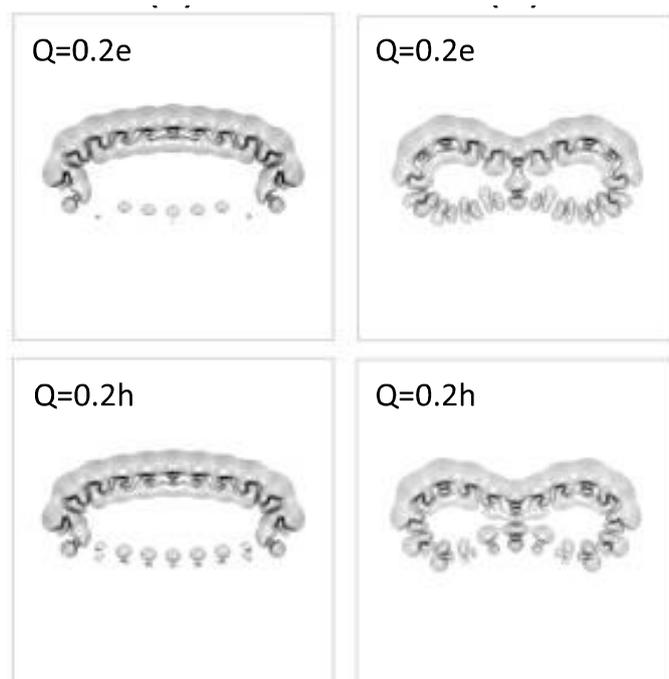


図 3:変形した CNT に注入された電子、ホールの空間分布。

ート電圧に強く依存する。

【4】十重付加 C60 鎖のラジカルスピン相互作用

メチル基(-CH₃) 10個が付加した C₆₀ 分子は、メチル基が付加することによって C₆₀ 分子の球状の π 電子系が、2つの五員環と赤道線上に存在するシクロフェナントレンの3つに分断される。このうち、五員環は5個の π 電子を持つことから、開殻電子系となり1個のラジカルスピンを持つ。メチル付加 C₆₀ 分子は、五員環を2つ持つので、それぞれに S=1/2 のラジカルスピンの誘起され、それらの間での相互作用が期待される。本研究では、そのようなメチル付加 C₆₀ 分子の1次元鎖を考え、分子上に存在する2つのラジカルスピンの分子内、分子間でどの相互作用の強さと、安定な相対配向を理論的に調べた。その結果、分子間のスピン相互作用 J₂ は 11meV と、分子内の相互作用 J₁=42meV の概ね 1/4 の強さであることがわかった。また、安定なスピン配向は分子内、分子間ともに反平行の反強磁性的な配向を好むことが明らかになった。さらに、分子配向も、分子間のスピン相互作用に影響を及ぼすことも明らかにした。

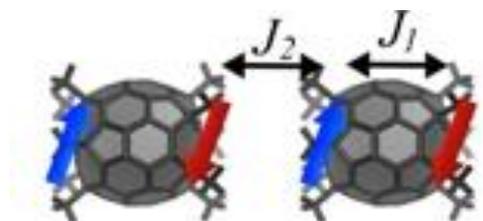


図 4: C₆₀Me₅ 鎖のスピン配向

【5】 欠陥による2層グラフェンの電子構造変調

通常グラフェンはフェルミレベルに線形分散バンドを有する金属となります。このため、非常に高速な電子/正孔がフェルミレベル近傍に存在し、これらを用いたデバイス応用の可能性が期待されています。一方、この超高速な電子系は、グラフェンと他の物質、もしくは他のグラフェンの層との相互作用によって強く擾乱を受けることが知られています。例えば、2枚のグラフェンを重ねることで得られる2層グラフェンでは、層間相互作用により、グラフェンの特徴である線形分散バンドを持たないことが知られています。ここでは、グラフェンに欠陥を有するグラフェンを吸着させたとき（片層に欠陥を有する2層グラフェン構造）、グラフェンの電子構造はどのように変調を受けるかを調べました。解析の結果、どのような欠陥を導入しても、欠陥をもたないグラフェンのバンド構造に

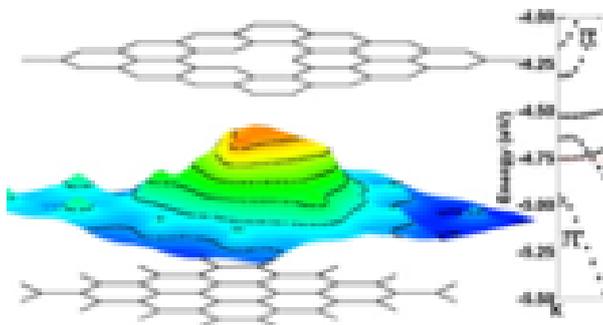


図 5 : 欠陥を有する2層グラフェンの電子構造

有限のバンドギャップが誘起され、半導体化が起こることが明らかになりました。これは、欠陥によるがグラフェン層上のポテンシャル変調によるもので、積層構造と欠陥構造によるグラフェンのバンドエンジニアリングが可能であることを示したものです。

4. 学位論文

博士：

1. Bui Thi Kieu My : First principles study on NASICON-based rechargeable sodium-ion batteries: Structures and diffusion in cathode, electrolyte materials and through interfaces (2016年3月)

修士：

1. 石山佑：電界下におけるカーボンナノチューブの電子物性(2016年3月)
2. 成田康平：密度汎関数理論による1次元ナノカーボン構造体の物性解明(2016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～
2. 丸山実那、日本学術振興会・博士特別研究員（DC2）2015年4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)(2014年度～2015年度)「計算科学に基づく新奇原子層物質複合系の物性解明と物質設計」(総額：5,300千円)

6. 研究業績

(1) 研究論文

1. M. Maruyama, S. Okada, “Geometric and Electronic Structures of Polymerized C32 Fullerenes: Electronic Structure Tuning by Fullerene and Carbon Nanotube Filling”, Jpn. J. Appl. Phys. **54**, 06FF02 (2015). (10.7567/JJAP.54.06FF02)

2. U Ishiyama, N.-T. Cuong, S. Okada, “Threshold voltage variation for charge accumulation in carbon nanotube owing to monatomic defect arrangement”, *Jpn. J. Appl. Phys.* **54**, 06FF04 (2015).
(10.7567/JJAP.54.06FF04)
3. K. Narita, S. Okada, “Electronic structures of Decamethyl C₆₀ under an Electric Field”, *Jpn. J. Appl. Phys.* **54**, 06FF09 (2015).
(10.7567/JJAP.54.06FF09)
4. T. Igarashi, H. Kawai, K. Yanagi, N.-T. Cuong, S. Okada, T. Pichler, “Manipulation of Localized Transverse Surface Plasmon Resonance in Electricity-selected Single-wall Carbon Nanotubes by Electric Double Layer Carrier Injections”, *Phys. Rev. Lett.* **114**, 176807 (2015).
(10.1103/PhysRevLett.114.176807)
5. S. Kigure, H. Omachi, H. Shinohara, S. Okada, “Nano-Saturn: Energetics of the Inclusion Process of C₆₀ into Cyclohexabiphenylene”, *J. Phys. Chem. C* **119**, 8931– 8936 (2015). (10.1021/acs.jpcc.5b00449).
6. H. E. Lim, Y. Miyata, M. Fujihara, S. Okada, H. Omachi, R. Kitaura, H. Shinohara, “Fabrication and Optical Probing of Highly-Extended, Ultrathin Graphene Nanoribbons in Carbon Nanotubes”, *ACS NANO* **9**, 5034–5040 (2015). (10.1021/nn507408m)
7. U Ishiyama, N.-T. Cuong, S. Okada, “Influence of Defects for Carrier Injection In Carbon Nanotubes”, *Jpn. J. Appl. Phys.* **54**, 065101 (2015).
(10.7567/JJAP.54.065101)
8. K. Narita, S. Okada, “Radical Spin Interaction in One-dimensional Chain of Decamethyl C₆₀”, *Chem. Phys. Lett.* **634**, 129–133 (2015).
(doi:10.1016/j.cplett.2015.05.075)
9. D. Matsumoto, K. Yanagi, T. Takenobu, S. Okada, and K. Marumoto, “Electrically induced ambipolar spin vanishments in carbon nanotubes”, *Scientific Rep.* **5**, 11859 (2015). (doi:10.1038/srep11859)

10. M. Maruyama, N.-T. Cuong, S. Okada, “Geometric and electronic structures of two-dimensional networks of fused C₃₆ fullerenes”, *J. Phys. Soc. Jpn.* **84**, 084706 (2015). (doi: 10.7566/JPSJ.84.084706)
11. M. Nakamura, S. Yoshida, T. Katayama, A. Taninaka, Y. Mera, S. Okada, O. Takeuchi, H. Shigekawa, “Three-dimensional dynamic probe imaging mechanically activated switching of Si-based single-molecule junction”, *Nature Commun.* **6**, 8465 (2015). (doi:10.1038/ncomms9465)
12. T. Kondo, D. Guo, T. Shikano, T. Suzuki, M. Sakurai, S. Okada, J. Nakamura, “Observation of Landau levels on nitrogen-doped flat graphite surfaces without external magnetic fields”, *Sci. Rep.* **5**, 16412 (2015). (DOI: 10.1038/srep16412)
13. K.-M. Bui, V.-A. Dinh, S. Okada, T. Ohno, “Hybrid functional study of the NASICON-type Na₃V₂(PO₄)₃: Crystal and electronic structures, and polaron-Na vacancy complex diffusion”, *Phys. Chem. Chem. Phys.* **17**, 30433–30439 (2015). (DOI: 10.1039/c5cp05323d)
14. K. Kishimoto, 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)
15. A. Yamanaka, 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)
16. M. Maruyama, 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).
17. A. Yamanaka, 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).

18. P. Solis-Fernandez, S. Okada, T. Sato, M. Tsuji, H. Ago, "Gate-Tunable Dirac Point of Molecular Doped Graphene", ACS Nano **10**, 2930 – 2939 (2016). (DOI: 10.1021/acsnano.6b00064)

(2) 招待講演

1. Susumu Okada, "Geometric and electronic structures of nanocarbon hybrid materials", CCTN15: Tenth International Symposium on Computational Challenges and Tools for Nanotubes, June 28, 2015, Nagoya University (Nagoya).

(3) 国際会議発表

1. M. Maruyama, S. Okada, "Magnetic properties of carbon flakes embedded in h-BN sheet", 18th International Symposium on Intercalation Compounds (ISIC-18), May 31- June 4 2015, Strasbourg, France,
2. A. Yamanaka, S. Okada, "Electronic structure and energetics of graphene nanoribbons under an external electric field", 18th International Symposium on Intercalation Compounds (ISIC-18), May 31- June 4 2015, Strasbourg, France,
3. M. Maruyama, S. Okada, "Geometric and electronic structures of two-dimensional networks of fused C₃₆ fullerenes", 16th International Conference on the Science and Application of Nanotubes (NT15), June 29- July 3, 2015, Nagoya University (Nagoya).
4. S. Okada, S. Kigure, H. Omachi, H. Shinohara, "Energetics and electronic structures of nano-Saturn: Novel inclusion compounds consisting of C₆₀ and cyclohexabiphenylene", 16th International Conference on the Science and Application of Nanotubes (NT15), June 29 - July 3, 2015, Nagoya University (Nagoya).
5. A. Yamanaka, S. Okada, "Energetics and electronic structure of graphene nanoribbons", 16th International Conference on the Science and Application of Nanotubes (NT15), June 29 - July 3, 2015, Nagoya University (Nagoya).
6. K. Narita, S. Okada, "Magnetic properties of decamethyl C₆₀ chain", 16th International Conference on the Science and Application of Nanotubes (NT15),
7. June 29-July 3, 2015, Nagoya University (Nagoya).
8. U Ishiyama, S. Okada, "Competition and cooperation between external and internal electric fields for carrier injection in carbon nanotubes with defects", 16th International Conference on the Science and Application of Nanotubes (NT15), June 29 - July 3, 2015, Nagoya University (Nagoya).

9. T. Yayama, S. Okada, T. Chikyow, "Electronic structure of carbon nanotubes on GaN-(0001) surface", 16th International Conference on the Science and Application of Nanotubes (NT15), June 29 - July 3, 2015, Nagoya University (Nagoya).
10. U Ishiyama, S. Okada, "Competition and Cooperation between External and Internal Electric Fields for Carrier Injection In Carbon Nanotubes with Defects", 28th International Conference on Defects in Semiconductors, July 27 - 31, 2015, Aalto University (Espo)
11. M. Maruyama, S. Okada, "Magnetic properties of graphene flakes embedded in h-BN sheet", 28th International Conference on Defects in Semiconductors, July 27 - 31, 2015, Aalto University (Espo)
12. K. Narita, S. Okada, "Geometric and Electronic Structures of Graphene Nanoribbon with Topological Defects: Corannulene Polymers" 28th International Conference on Defects in Semiconductors, July 27 - 31, 2015, Aalto University (Espo)
13. A. Yamanaka, S. Okada, "Energetics and Electronic Structure of Graphene Edges", 28th International Conference on Defects in Semiconductors, July 27 - 31, 2015, Aalto University (Espo)
14. A. Yamanaka, S. Okada, "Influence of Local Electric Field on Electronic States of Graphene Nanoribbons", International Conference on Solid State Devices and Materials, September 27-30, Sapporo Convention Center (Sapporo)
15. K. Kishimoto, S. Okada, "Bandgap Engineering of Graphene by Mean of Adsorption of Defective Graphene", International Conference on Solid State Devices and Materials, September 27-30, 2015, Sapporo Convention Center (Sapporo)
16. M. Maruyama, S. Okada, "Radical Spin Interaction of Graphene Flakes Embedded into h-BN Sheet", International Conference on Solid State Devices and Materials, September 27-30, 2015, Sapporo Convention Center (Sapporo)
17. T. Kawai, S. Okada, M. Otani, "First-Principles Calculations for Diffusion Mechanism of Li Atom from Li(EC)₄ to Interlayer of Graphite with Hydrogen/Carbonylic Edge Terminations", International Conference on Solid State Devices and Materials, September 27-30, 2015, Sapporo Convention Center (Sapporo)
18. U Ishiyama, N.T. Cuong, S. Okada, "Competition and Cooperation between External and Internal Electric Fields for Carrier Injection in Carbon Nanotubes with Defects", International Conference on Solid State Devices and Materials, September 27-30, 2015, Sapporo Convention Center (Sapporo)
19. J. Sorimachi, S. Okada, "Energetics of H₂O Encapsulated in Fullerenes under an Electric Field", International Conference on Solid State Devices and Materials, September 27-30, 2015, Sapporo Convention Center (Sapporo)

20. T. Kawai, S. Okada, M. Otani, "First-Principles Calculations for Desolvation of Li(EC)₄ at the Graphite Edge with Hydrogen/Carboxylic Terminations", 28th International Microprocesses and Nanotechnology Conference, November 10-13, 2015, Toyama International Conference Center (Toyama)
21. U Ishiyama, S. Okada, "Electronic Properties of CNT Thin Films under an Electric Field", 28th International Microprocesses and Nanotechnology Conference, November 10-13, 2015, Toyama International Conference Center (Toyama)
22. K. Narita, S. Okada, "Geometric and Electronic Structures of One-Dimensionally Polymerized Coronene Molecules", 28th International Microprocesses and Nanotechnology Conference, November 10-13, 2015, Toyama International Conference Center (Toyama)
23. M. Maruyama, N.T. Cuong, S. Okada, "Design of Novel Elemental Semiconductors: Two-Dimensional Covalent Networks of Fused C₃₆ Fullerenes", 28th International Microprocesses and Nanotechnology Conference, November 10-13, 2015, Toyama International Conference Center (Toyama)
24. K. Kishimoto, S. Okada, "Electron-State Tuning of Bilayer Graphene by Defects", 28th International Microprocesses and Nanotechnology Conference, November 10-13, 2015, Toyama International Conference Center (Toyama)
25. J. Sorimachi, S. Okada, "Electric Field Screening of Fullerene Cages: Energetics of a Water Molecule Encapsulated in Fullerenes", 28th International Microprocesses and Nanotechnology Conference, November 10-13, 2015, Toyama International Conference Center (Toyama)
26. K. Kanahashi, J. Pu, N.T. Cuong, L.-J. Li, S. Okada, H. Ohta, T. Takenobu, "Thermoelectric Properties of CVD-Grown Transition Metal Dichalcogenide Monolayers", 28th International Microprocesses and Nanotechnology Conference, November 10-13, 2015, Toyama International Conference Center (Toyama)
27. A. Hasegawa, S. Okada, "Influence of Deformations of Carbon Nanotubes on Carrier Accumulation under an Electric Field", 28th International Microprocesses and Nanotechnology Conference, November 10-13, 2015, Toyama International Conference Center (Toyama)
28. A. Yamanaka, S. Okada, "Structural dependence of electronic properties of graphene nanoribbons on an electric field", 2015 International Chemical Congress of Pacific Basin Society, December 15-20, Honolulu Convention Center (Honolulu, Hawaii)
29. M. Maruyama, S. Okada, "Radical spin interaction of graphene flake embedded into h-BN sheet", 2015 International Chemical Congress of Pacific Basin Society, December 15-20, Honolulu Convention Center (Honolulu, Hawaii)

30. U Ishiyama, S. Okada, "Gate voltage variation for carrier accumulation by the defects in carbon nanotubes", 2015 International Chemical Congress of Pacific Basin Society, December 15--20, Honolulu Convention Center (Honolulu, Hawaii)
31. K. Narita, S. Okada, Geometric and energetics structures of corannulene polymers", 2015 International Chemical Congress of Pacific Basin Society, December 15--20, Honolulu Convention Center (Honolulu, Hawaii)

VII-5. 量子輸送研究

教授：都倉康弘

助教：吉田恭

研究員：久保敏弘(‘H27. 12)

大学院生：博士後期課程2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 (田口、中嶋 論文4, 11, 国際会議1, 5, 国内会議3)

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。計数統計を取り入れた量子マスター方程式を用い相互作用の効果も考慮して、理論的な考察を加えた。電極/量子ドットの磁場とトンネル結合を変調した際に誘起される量子ポンプ電流、スピン流を調べた。また断熱的なポンプ電流だけでなく非断熱変調の効果を逐次的に評価した。一方有限バイアス下ではエントロピー生成が起こるが、さらに系のパラメタが時間的に変化する場合には、さらに過剰エントロピーの寄与が起こるとされる。従来古典系に対してこの解析が行われて来たが、今回物理的にもっともらしい量子的な取り扱い手法を提案した。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。

(2) メソスコピック系の物性と伝導現象 (都倉 論文2, 3, 5, 6, 13, 国内会議19)

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。また擬二次元量子ドットに閉じ込められた電子スピンの様々なスピン・軌道相互作用がスペクトルに与える影響について継続して検討を加えている。また継続して超伝導細線を用いた単一光子検出器の開発を進め、長距離量子通信実験に適用した。

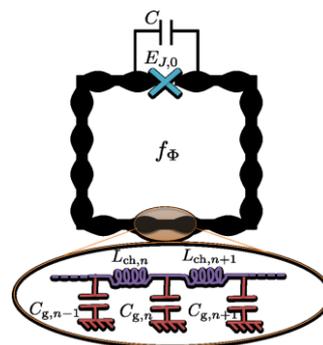
(3) 光格子中の冷却原子のダイナミクス (森田、都倉 論文1, 国際会議3, 8, 国内会議13)

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。昨年度に引き続き一次元 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を理論的に解析した。2粒子系を厳密に解く事により、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ネル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) 量子位相滑りと高感度電荷測定 (田口 論文12, 国際会議2, 4, 10, 国内会議14, 18)

超伝導接合においてジョセフソン効果と双対の関係にある量子位相滑りが注目を集めている。その電磁場環境を人為的に制御する事により磁束のトンネルレート等性能改善が可能であることを理論的に示した。これは、フランス Grenoble LPMC/CNRS グループとの共同研究の成果である。また産総研との共同研究により、超伝導接合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。

図1 周期的に変調された超伝導ループとジョセフソン接合



(5) 熱伝導と揺らぎの定理 (安富、都倉 論文7, 10, 国内会議4, 16)

電圧プローブを含む系において電気伝導・熱伝導係数およびその揺らぎの間の普遍的な関係を導いた。また、量子極限のエッジ状態はカイラル朝永ラッティンジャー流体モデルで良く記述される事が知られている。複数のエッジ状態が平行して伝搬する場合には、エッジ間の相互作用が重要となる。特に特定のエッジのみに高温の分布の電子を注入した後の時間発展は「量子クエンチ」の問題として興味深い。朝永ラッティンジャー流体が可積分系である事を反映して、高温のエッジ状態と相互作用した低温エッジ状態の奇妙なエネルギー分布が非常に安定で緩和しにくい事を明らかにした。また、常伝導体/超伝導体接合では超伝導状態の状態密度を利用して電子冷却が提案されているが、Andreev 反射がその効率を阻害している事が知られている。最近活発に研究されているトポロジカル物質は軌道とスピンの結合が強く結合するため、Andreev 反射が抑えられ、冷却効率の向上が期待される。今回この系の熱伝導を理論的に調べたが、大幅な改善は得られなかった。その理由はフェルミ面近傍でトポロジカル物質の状態密度が小さい事ためである。

【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 (久保、中嶋、都倉 国際会議6, 7, 国内会議1, 9, 10, 13, 15, 17)

昨年に引き続き Aharonov-Bohm 干渉計中の量子ドットと静電的に結合したもう一つの量子ドットに現れる磁束の影響を理論的に調べた。これは電荷測定との反作用の定量的評価も可能なモデルである。また量子連続測定を扱う Mensky の制限経路積分の微視的な導出を行うとともに、測定装置が non-Markov な場合への拡張を行った。また量子測定理論における、弱値と Einselection についても検討を開始した。

(2) 量子ビットと光子場の相互作用 (都倉、大山 書籍1, 国内会議2, 5, 15)

半導体量子ビットの最近の東大・理研グループとの共同研究成果をまとめ出版した。一方、光子場と結合した二準位系の緩和過程について検討を加えた。特に外部測定系によって制限される条件付きの時間発展を調べる手法を開発した。本手法は、non-Markov 的な環境についても定量的な解析が可能である事が分かった。

(3) エンタングルメントの生成と制御 (古谷、都倉 論文9, 国際会議9, 国内会議17)

相互作用する一次元スピン系の量子相転移を量子エンタングルメントの観点から検討を加えている。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、量子相転移の挙動は完全に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。

【3】統計力学と乱流の物理

(1) 古典場の系の典型性 (吉田 論文 [8], 国内講演 [8])

標準的な統計力学において、マクロな熱平衡状態はミクロな状態のアンサンブルで記述される。近年、典型性の概念を用いてこのアンサンブル描像の基礎付けが試みられている。アンサンブル内の殆ど全ての状態(典型的状態と呼ばれる)において、注目すべき物理量(状態の関数)が殆ど同じ値を持てば、アンサンブル平均または時間平均をとらずとも個々の典型的状態が熱平衡状態に対応している、という議論である。本研究では、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。ハミルトニアンが波数空間で互いに独立な調和振動子型

で表せる場合に、ある物理量が典型性を示すための十分条件を求めた。また、その条件を満たしかつ標準的なエントロピーの定義と整合する「マイクロ状態量としてのエントロピー」を構築した。

(2) 壁乱流の統計法則 (吉田 国内講演 [12])

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おり、実験・数値シミュレーションによっても支持されている。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の完結近似(高次統計量を低次統計量で近似する方法)の手法開発を行った。数値解析を援用して具体的な見積もりを求めるのは今後の課題である。

(3) 量子流体乱流の統計法則 (吉田 国内講演 [6])

液体ヘリウムの超流動状態や Bose-Einstein 凝縮体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。量子流体は、循環が量子化された渦糸が存在するなど、Navier-Stokes 方程式に従う古典流体とは異なる性質を有する。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および他の研究者による数値計算の結果との比較を行っている。

<論文>

(査読論文)

1. Daichi Morita, Toshihiro Kubo, Yasuhiro Tokura, Makoto Yamashita, “Spin-1 Quantum Walk”, accepted for publication to Phys. Rev. A.
2. Ken-ichi Sasaki, Shuichi Murakami, Yasuhiro Tokura, and Hideki Yamamoto, “Determination of intrinsic lifetime of edge magnetoplasmons”, Phys. Rev B **93**, 125402 (2016).
3. Evgenii Novoselov, Stella Bevilacqua, Sergey Cherednichenko, Hiroyuki Shibata, and Yasuhiro Tokura, “Effect of the Critical and Operational Temperatures on the Sensitivity of MgB₂ HEB Mixers”, IEEE TRANSACTIONS ON TERAHERTZ SCIENCE AND TECHNOLOGY, Vol. **6**, issue 2, 238-244, (2016)
DOI:10.1109/TTHZ.2016.2520659.
4. Akiko Ueda, Yasuhiro Utsumi, Hiroshi Imamura, and Yasuhiro Tokura, “Phonon-Induced Electron-Hole Excitation and ac Conductance in Molecular Junction”, J. Phys. Soc. Jpn. **85**, 043703 (2016).
5. 柴田浩行、清水薫、本庄利守、武居弘樹、都倉康弘、「冷却フィルタを用いた超伝導単一光子検出器の性能指数向上 および長距離量子暗号通信への応用」電子情報通信学会論文誌エレクトロニクス Vol. **J99-C**No. 3, pp. 51-58, March 2016.
6. T. Yamaguchi, K. Ido, K. Takeda and Y. Tokura, “Reconsideration of the spin-orbit interaction for an electron confined in a quasi-two-dimensional quantum dot: II. Bulkiness and in-plane spin-orbit coupling”, Jpn. J. Appl. Phys. **55**, 045201 (2016).
7. K. Washio, R. Nakazawa, M. Hashisaka, K. Muraki, Y. Tokura, and T. Fujisawa, “Long-lived binary tunneling spectrum in a quantum-Hall Tomonaga-Luttinger liquid”, Phys. Rev. B **93**, 075304 (2016).
8. Kyo Yoshida, “Typicality and statewise entropy for classical field systems”, EPL, **110**, 60001 (2015).
9. Kaoru Shimizu and Yasuhiro Tokura, “Identifying a correlated spin fluctuation in an entangled spin chain subject to a quantum phase transition”, Phys. Rev. E **92**, 062143 (2015).

10. Y. Utsumi, O. Entin-Wohlman, A. Aharony, T. Kubo and Y. Tokura, “Fluctuation theorem for a two-terminal conductor connected to a thermal probe”, *Physica Scripta* **T165**, 014021 (2015).
11. Satoshi Nakajima, Masahiko Taguchi, Toshihiro Kubo, and Yasuhiro Tokura, “Interaction effect on adiabatic pump of charge and spin in quantum dot”, *Phys. Rev. B* **92**, 195420 (2015).
12. Masahiko Taguchi, Denis M. Basko, Frank W. J. Hekking, “Mode engineering with a one-dimensional superconducting metamaterial”, *Phys. Rev. B* **92**, 024507 (2015).
13. Hiroyuki Shibata, Kaoru Shimizu, Hiroki Takesue, and Yasuhiro Tokura, “Superconducting nanowire single-photon detector with ultimate low dark count rate”, *Optics Letters* **40**, 3428 (2015).

<書籍>

1. Seigo Tarucha, Michihisa Yamamoto, Akira Oiwa, Byung-Soo Choi, and Yasuhiro Tokura, “Spin Qubits with Semiconductor Quantum Dots”, Chapter 25, “Principles and Methods of Quantum Information Technologies”, *Lecture Notes in Physics* **911** (2016), Y. Yamamoto, K. Semba (eds.), DOI 10.1007/978-4-431-55756-2_25.

<講演：国際会議>

1. Yasuhiro Tokura, “Quantum pumping in mesoscopic systems”, *New Perspectives in Spintronic and Mesoscopic Physics*, Kashiwa, Japan, Jun. 3 (2015).
2. M. Taguchi, D. M. Basko, and F. W. J. Hekking, “Mode engineering with a one-dimensional superconducting metamaterial”, *New Perspectives in Spintronic and Mesoscopic Physics*, Kashiwa, Japan, Jun. (2015).
3. Daichi Morita, Toshihiro Kubo, Yasuhiro Tokura, and Makoto Yamashita, “Spin-1 Quantum Walk”, *Joint Quantum Center (JQC) Durham-Newcastle, Mini-conference, Non-equilibrium Quantum Dynamics in Low Dimensions*, Durham, UK, 20 July (2015).
4. M. Taguchi, D. M. Basko, and F. W. J. Hekking, “Normal mode engineering for quantum phase fluctuations of an inhomogeneous superconducting loop”, *Frontiers of Quantum and Mesoscopic Thermodynamics*, Prague, Czech Republic, Jul. (2015).
5. Satoshi Nakajima and Yasuhiro Tokura, “Quantum adiabatic and diabatic pump in quantum dot: quantum master approach”, *21st Int. Conf. on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems (EP2DS-21)*, Sendai International Center, Sendai, Jul. 26 (2015).
6. Toshihiro Kubo and Yasuhiro Tokura, “Coulomb Interaction Induced Aharonov-Bohm Oscillations”, *21st Int. Conf. on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems (EP2DS-21)*, Sendai, Jul. 27 (2015).
7. Satoshi Nakajima and Yasuhiro Tokura, “Formulation of non-Markovian time-continuous quantum measurement using the Mensky’s restricted path integral”, *15th Asian Quantum Information Science Conference (AQIS’ 15)*, PA27, Korea Institute for Advanced Study (KIAS), Seoul, Korea, Aug. 27 (2015).
8. D. Morita, T. Kubo, Y. Tokura and M. Yamashita, “Spin-1 Quantum Walks”, *Int. Symp. Nanoscale Transport and Technology (ISNTT-2015)*, NTT Atsugi R&D Center, Kanagawa, Nov. 18 (2015).
9. Taichi Furuya and Yasuhiro Tokura, “Entanglement dynamics in simultaneously coupling system”, *Int. Symp. Nanoscale Transport and Technology (ISNTT-2015)*, NTT Atsugi R&D Center, Kanagawa, Nov. 18 (2015).

10. Masahiko Taguchi, Denis M. Basko, Frank W. J. Hekking and Yasuhiro Tokura, “Quantum engineering with a one-dimensional superconducting system”, Int. Symp. Nanoscale Transport and Technology (ISNTT-2015), NTT Atsugi R&D Center, Kanagawa, Nov. 18 (2015).

<講演：国内会議>

1. 中嶋慧、都倉康弘「Mensky 制限経路積分による Non-Markov な量子連続測定の定式化」、第32回量子情報技術研究会(QIT32)、2015年5月25日、大阪大学豊中キャンパス基礎工学部国際棟シグマホール、大阪。
2. 大山侑太、都倉康弘「単一光子を用いた2つの物質量子ビット間のエンタングルメント生成」、量子制御技術の発展により拓かれる量子情報の新時代、2015年7月15日、京都大学、京都。
3. 中嶋慧、都倉康弘「Excess entropy の経路依存性」、日本物理学会2015年秋季大会、2015年9月17日、大阪市大、大阪。
4. 藤澤利正、鷲尾和久、中澤遼、橋坂昌幸、村木康二、都倉康弘「量子ホールエッジチャネルによる人工的朝永ラッティンジャー流体の準安定非平衡状態」、日本物理学会2015年秋季大会、2015年9月19日、大阪市大、大阪。
5. 大山侑太、都倉康弘「単一光子検出器によって制限される2準位系の条件付き時間発展」、第33回量子情報技術研究会(QIT33)、2015年11月24日、NTT厚木研究開発センタ、神奈川。
6. 吉田恭「平衡系統計力学から乱流統計理論への道 -Bose 気体の場合-」、平成27年度物性研究所短期研究会「量子乱流と古典乱流の邂逅」、2016年1月7日、東京大学物性研究所、柏。
7. 中嶋慧「共変解析力学のDirac場と結合した重力場への適用」、第5回QUATUO研究会、2016年1月11日、高知工科大学、高知。
8. 吉田恭「古典自由場の典型性とマイクロ状態量としてのエントロピー」、QMKEK6「量子論の諸問題と今後の発展」、ポスター発表、2016年2月17日、高エネルギー加速器研究機構、つくば。
9. 浅井海図「Weak Values of Hardy’s Paradox with Several Post-Selections」、QMKEK6「量子論の諸問題と今後の発展」、ポスター発表、2016年2月17日、高エネルギー加速器研究機構、つくば。
10. 熊澤正浩「量子測定理論におけるEinselection及び測定器のオブザーバブルの選択則について」、QMKEK6「量子論の諸問題と今後の発展」、ポスター発表、2016年2月17日、高エネルギー加速器研究機構、つくば。
11. 中嶋慧「共変解析力学の基礎とDirac場と結合した重力場への応用」、QMKEK6「量子論の諸問題と今後の発展」、ポスター発表、2016年2月17日、高エネルギー加速器研究機構、つくば。
12. 吉田恭、金田行雄「壁乱流対数則領域の二点完結近似」、日本物理学会第71回年次大会、2016年3月22日、東北学院大学泉キャンパス、仙台。
13. 森田大地、久保敏弘、都倉康弘「一次元光格子上でのspin-mixing dynamics」、日本物理学会第71回年次大会、2016年3月19日、東北学院大学泉キャンパス、仙台。
14. 田口真彦、Denis M. Basko, Frank W. J. Hekking、都倉康弘「超伝導リングのキャパシタンスとインダクタンスを空間変調させた下での量子位相トンネルの解析」、日本物理学会第71回年次大会、2016年3月22日、東北学院大学泉キャンパス、仙台。
15. 大山侑太、都倉康弘「外部測定系によって制限される量子系の条件付き時間発展の解析」、日本物理学会第71回年次大会、2016年3月22日、東北学院大学泉キャンパス、仙台。
16. 安富幸輝、川畑史郎、都倉康弘「トポロジカル物質と超伝導体接合における熱流の理論」、日本物理学会第71回年次大会、2016年3月22日、東北学院大学泉キャンパス、仙台。
17. 古谷太一、都倉康弘「同時に相互作用する系でのエンタングルメント生成と時間発展」、日本物理学会第71回年次大会、2016年3月22日、東北学院大学泉キャンパス、仙台。

18. 田口真彦、都倉康弘、川畑史郎「超伝導ナノ細線の電場応答特性のシミュレーション」、応用物理学会春季学術講演会、2016年3月19日、東工大大岡山キャンパス、東京。
19. 柴田浩行、清水薫、武居弘樹、都倉康弘「究極的な極低暗計数率を有するSSPDの作製」、応用物理学会春季学術講演会、2016年3月21日、東工大大岡山キャンパス、東京。

<学位論文>

(博士論文) 数理物質科学研究科

1. 田口真彦

“Theory of quantum phase manipulation in semiconducting and superconducting nanostructures”

(修士論文) 数理物質科学研究科

1. 安富幸輝

「トポロジカル物質/超伝導体接合における熱輸送に関する理論」

2. 森田大地

「一次元光格子中の spin-1 量子ウォークに関する研究」

(学位論文) 理工学群物理学類

1. 浅井海図

「量子測定論と Hardy のパラドックスにおける弱値について」

2. 熊澤正浩

「量子測定理論における Einselection についての研究」

<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ンネルの非平衡電荷ダイナミクス」(分担) 平成27年度: 直接経費: 965千円(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: 大岩頭) 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27年度: 1,950千円(平成27年12月1日~平成32年度)
3. 物質・デバイス領域共同研究拠点 ナノサイエンス・デバイス研究領域(阪大)、研究課題「光-スピン量子インターフェースのための量子ドット設計と開発」共同研究先 第1研究部門(情報・量子科学系) 光・電子材料 大岩頭教授

<社会還元等>

1. 都倉康弘、東京工業大学 客員教授 2015年4月~2016年3月
2. 都倉康弘、茨城県高校生科学研究発表会審査員 2016年3月

VIII 生命物理グループ

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)
研究員 原田隆平 (学術振興会特別研究員)
研究員 佐藤龍馬 (外部資金雇用研究員)
学生 大学院生 1 名 (後期課程 2 年 1 名)、4 回生 1 名

研究の概要

生命物理学研究グループでは、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。また、理論解析のための大規模量子化学計算プログラムの開発も平行して行っている。

【1】タンパク質の折り畳みシミュレーション[文献 1-8]

タンパク質の折りたたみは、通常の分子動力学(MD)シミュレーションで追跡可能な時間より長時間の確率過程において観測される「レアイベント」である。我々は、(1)「構造変化を誘起する可能性が高い初期構造(シード)の選択」、(2)「選ばれたシードに対して速度を再分配した短時間 MD を実行」の 2 つの過程を 1 サイクルとする、構造サンプリング手法を開発してきた。一般的なタンパク質の折りたたみ過程の問題点は、どのように反応座標を選ぶか?ということであり、一般的には結晶構造からの平均自乗偏差や、フォールディングした時、特有の水素結合、コンタクト数などが選ばれる。しかしながら、このような反応座標は最終的な構造が分かる場合にのみ定義されるもので、ブラインド予測には向かない。しかしながらタンパク質の折りたたみ特有の反応経路をどのように選択するかは、極めて困難である。そこで、本手法では我々が開発してきた OFLOOD 法で行われるクラスタリングの特性を生かし、着目している反応座標 ($\{\xi\}$) に 1 つ違う反応座標を加えた時のクラスタ数が最大となる反応座標を重要な反応座標 (ξ_x) と捉え、拡張した反応座標系 ($\{\xi, \xi_x\}$) に対して OFLOOD 法を実行する。図は探索領域の累積度数であり、サイクル数の増大に伴い、オリジナルの OFLOOD 法では収束が遅い(右図赤線)にもかかわらず、本手法は収束が極めて速くなる(右図緑線)ことが分かる。

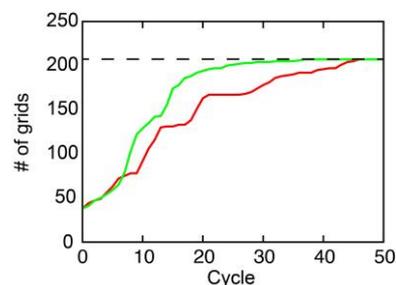


図 探索領域の累積度数

【2】フラグメント分子軌道(FMO)法の GPGPU 化[文献 18]

GPU等の演算加速装置を用いた高性能科学技術計算システムへの対応は、量子化学計算においても重要なトピックとなっている。これまでに我々は、大規模分子軌道計算の実現に向けてフラグメント分子軌道(FMO)計算プログラム実装の一つであるOpenFMOのGPGPU化に向けた開発を行ってきた。本年度の成果としては、フラグメント間の静電相互作用(ESP)計算のGPU化である。ESP計算のうち特に二つの近接フラグメント間の静電相互作用を計算する4中心フラグメント間クーロン相互作用計算(4C-IFC)のアルゴリズム構成はこれまでGPU化してきたFock行列計算と類似しており、その知見を大いに活用できる。

実装したGPGPU化OpenFMOの性能評価は筑波大学のHA-PACSベースクラスタを用いて行った。8ノードを利用してクランビン (642原子、20フラグメント)のFMO-HF/6-31G(d)計算を実行した。比較のためCPUによる直接計算の他、SCF中に積分を保存しておくin-core手法も行っている。表には全実行時間[sec]に加えFMO計算の主たる計算過程であるモノマー自己無撞着電荷(SCC)計算、ダイマー自己無撞着場 (dimer SCF) 計算および遠隔ダイマー正殿相互作用計算(ES dimer)の実行時間[sec]を示した。またCPUによる直接計算からのGPGPU化による性能向上(speedup)も示している。GPU化により全ての計算過程で3~4倍の高速化となっており、計算全体としては3.3倍の高速化を実現している。

表 Crambinに対するGPGPU化されたOpenFMOの性能評価

Crambin	CPU direct	CPU in-core	CPU+GPU direct	Speedups direct
# node	8	8	8	8
SCC[sec]	629.8	632.2	207.1	3.0
dimer SCF[sec]	1266.2	857.3	345.5	3.7
ES dimer [sec]	43.3	42.5	10.5	4.1
Total [sec]	1961.1	1586.0	590.8	3.3

【3】3重項消光過程の理論解析

励起状態を含む複数の分子が協同的にスピン状態変化する複合励起過程の一つである、三重項-三重項消滅 (TTA) 過程は、低エネルギーの光を高エネルギーへ変換 (UC) することが可能となるが、その効率を上げるメカニズムの解明が急務である。そこで本研究では、分光学的実験及び、量子化学・分子動力学計算の両面からTTAの支配因子の抽出と機構の解明を通して、有用な新規物質の設計指針提案を目的としている。本年度は、溶液中におけるTTA-UCの理論解析を行った。

溶液中でのジフェニルアントラセン (DPA) と鎖長の異なるアルキル鎖架橋ジフェニルアントラセン (C_n -sDPA; n は炭素鎖数) の2量体の配向を、分子動力学計算により解析した。DPA では2量体の重心間距離が6~8Åに、発光収率が最も良好な C_7 -sDPA では11Å程度にピークが存在した。またその配向も様々であり、溶液中での構造の多様性がうかがえる。特に後者の距離では2つの3重項からなる1~5重項の複合スピン状態のエネルギー

一はほぼ縮退しており、その分布が平衡にあると考えられる。1重項からの発光及び単量体3重項状態の供給によりその平衡が変化することが、量子収率の理論値の上限11%を超える理由であると推測される。

【4】ニトリルヒドラーゼ(NHase)の反応機構についての理論的研究[文献 9]

NHaseはニトリルを水和してアミドを生成($R-CN + H_2O \rightarrow R-CONH_2$)する酵素であるが、化学工業においてアクリルアミド等の合成に広く用いられている重要な生体触媒の一つである。NHaseの反応機構の詳細に関しては、最近、K.H. Hopmannによる先行理論研究、更にY. Yamanakaらによる変異体(β R56K)の時間分解X線結晶構造解析から、環状中間体が形成されることが示唆された。しかし、環状中間体形成後の反応機構に関しては、これまで3つの異なる経路が提唱されており、明らかになっていなかった。我々は、QM/MM法により、環状中間体生成以降の想定される複数の反応機構の解析を行い、以下の機構であることを明らかにした。(1) β Tyr72から基質に α Ser113を経由してプロトン移動が起こり、 α Cys114-SO⁻のS-O結合が開裂すると同時に α Cys109と α Cys114の間にS-S結合が生成、(2)水分子が α Cys114の硫黄原子と反応することでイミド酸生成と α Cys114のシステインスルフェン酸の再生が起こり、(3)活性中心あるいはタンパク質の外でイミド酸がアミドに異性化する。また、反応機構に深く関わる周辺アミノ酸残基(β Arg56)の役割についても分子レベルで明らかにし、S-S中間体の形成において重要な役割を果たしていることを明らかにした。

【5】光合成酸素発生中心の電子状態についての理論的研究[文献 13-16]

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。

我々は最も初めの化学反応過程であるS₂→S₃遷移を量子古典混合(QM/MM)法を用いて理論解析した。活性中心のMnクラスターでの化学反応のみならず、Y161(Yz)に関連するプロトン共役電子移動も取り扱うため、Y161も含む大きなQM領域を用いて、反応経路探索を行った。その結果、Caに配位する水(W3)がMn(III)サイトに移動する2つの経路(L、R反応)が存在する事を見いだした。中でもL構造(L-opened structure)を経由する経路(L経路)がR反応経路よりもエネルギー障壁が低く、より好ましい事も明らかにした。

2015年にPSII-OECのMnクラスター骨格を良く再現した(4つのMn原子を持つ)モデル錯体がC. Zhangらにより合成がなされた。天然系(native OEC)とより詳しい比較を行うため、取り

うる酸化状態での構造変化、電荷、スピン状態について詳しく理論解析を行った[3,5]。モデル錯体は多くの物性が native OEC と極めて良く似ている事を明らかにしたが、少し違いも有る事も明らかになった。Native OEC とモデル錯体の構造を比較するとモデル錯体は Mn3 と Mn4 をつなぐ酸素原子(O₄)が無い。理論モデルに O₄ を導入すると native OEC により構造が近づく事から、O₄ の導入がより正確なモデル錯体に重要である事を示した。

【6】宇宙生命計算 (宇宙物理分野との共同研究)

宇宙分野での目覚ましい観測技術の向上により、宇宙 (星間空間) でのアミノ酸検出が近年注目されている。隕石中での数種類にわたるアミノ酸の検出、電波観測による分子雲中のグリシン前駆体の発見、探査機 Stardust のサンプルリターンによる彗星中のグリシンの発見等により、星間アミノ酸の存在が強く示唆されるようになった。一方で、その生成機構は不明な点が多く、観測されている星間分子からどのようにしてアミノ酸が作られるかは未だ謎が多い。我々は、これまでに提案されている生成経路を基に、反応物と生成物の安定性、および反応における遷移状態に関するエネルギー評価を行うことで、最も妥当なアミノ酸生成経路を理論的に推定した。特にアミノニトリルやヒダントインといった安定性の高い中間体を經由した加水分解反応によるアミノ酸生成と、反応活性の高いラジカル分子を用いた経路について、第一原理計算 (密度汎関数法) による解析を行った。

その結果、前駆体の加水分解によるアミノ酸生成では、その反応エネルギー障壁は、60 kcal/mol 以上となり、触媒として水分子を加えたものでも 50 kcal/mol 程度となった。星間雲中のような極低温下ではこの程度のエネルギー障壁を熱揺らぎによって越えることは難しく、光輻射のような外部エネルギー供給による反応促進が必要となる。一方で、ラジカルを用いたグリシン生成機構ではその生成経路中における反応のエネルギー障壁が最大で 7.99 kcal/mol、最も低い経路では全体で 1.85 kcal/mol しかなく、星間ダスト上でも比較的起こりやすい生成経路である。このことから、星間分子としてのアミノ酸生成にはラジカルが強く関わることを計算科学的に解明した。本研究により星間アミノ酸の生成機構に対する詳細な反応エネルギープロファイルの構築に成功した。

<学術論文 (20 報)>

1. R. Harada, Y. Takano, Y. Shigeta, “TaBoo SeArch (TBSA) algorithm with a modified inverse histogram for reproducing biologically relevant rare-events of proteins”, *Journal of Chemical Theory and Computation* **12**, 2436–2445 (2016), DOI:10.1021/acs.jctc.6b00082.
2. R. Harada, T. Nakamura, Y. Shigeta, “Sparsity-weighted Outlier FLOODing method” *Journal of Computational Chemistry* **37**, 724–738 (2016), DOI:10.1002/jcc.24255.
3. R. Harada, A. Kitao, “Non-targeted Parallel Cascade Selection Molecular Dynamics for Enhancing the Conformational Sampling of Proteins” *Journal of Chemical Theory and Computation* **11**, 5493–5502 (2015), DOI:10.1021/acs.jctc.5b00723.
4. R. Harada, T. Nakamura, Y. Shigeta, “Automatic Detection of Hidden Dimension in OFLOOD

- Method” *Chemical Physics Letters* **639**, 269-274 (2015), DOI: 10.1016/j.cplett.2015.09.031.
5. R. Harada, Y. Takano, Y. Shigeta, “Efficient Conformational Sampling of Proteins based on a Multi-Dimensional Inverse Histogram: an Application to Folding of Chignolin in Explicit Solvent” *Chemical Physics Letters* **630**, 68-75 (2015), DOI:10.1016/j.cplett.2015.04.039.
 6. R. Harada, Y. Takano, T. Baba, Y. Shigeta, “Simple, yet Powerful for Conformational Sampling of Proteins” *Physical Chemistry Chemical Physics* **17**, 6155-6173 (2015), *invited as a feature article*, DOI: 10.1039/C4CP05262E.
 7. R. Harada, Y. Takano, Y. Shigeta, “Enhanced Conformational Sampling Method for Proteins on the TaBoo SeArch algorithm: Application to the Folding of a Mini-Protein Chignolin” *Journal of Computational Chemistry* **36**, 763-772 (2015), DOI: 10.102/jcc.23854.
 8. R. Harada, T. Nakamura, Y. Takano, Y. Shigeta, “Protein Folding Pathways Extracted by OFLOOD Method” *Journal of Computational Chemistry* **36**, 97-102 (2015), DOI: 10.102/jcc.23773.
 9. M. Kayanuma, M. Shoji, M. Yohda, M. Odaka, Y. Shigeta, “Catalytic Mechanism of Nitrile Hydratase Subsequent to Cyclic Intermediate Formation: A QM/MM Study”, *The Journal of Physical Chemistry B* **123**(13), 3259-3266 (2016), DOI: 10.1021/acs.jpcc.5b11363.
 10. M. Kayanuma, T. Stoll, C. Daniel, F. Odobel, J. Fortage, A. Deronzier, M.-N. Collomb, “A computational mechanistic investigation of hydrogen production in water with the $[\text{Rh}^{\text{III}}(\text{dmbpy})_2\text{Cl}_2]^+ / [\text{Ru}^{\text{II}}(\text{bpy})_3]^{2+} / \text{ascorbic acid}$ photocatalytic system”, *Physical Chemistry Chemical Physics* **17**, 10497-10509 (2015), DOI: 10.1039/C4CP04949G.
 11. T. Stoll, C. E. Castillo, M. Kayanuma, M. Sandroni, C. Daniel, F. Odobel, J. Fortage, M.-N. Collomb, “Photo-induced redox catalysis for proton reduction to hydrogen with homogeneous molecular systems using rhodium-based catalysts”, *Coordination Chemistry Reviews* **304**, 20-37, (2015), DOI:10.1016/j.ccr.2015.02.002.
 12. M. Shoji, M. Kayanuma, H. Umeda, Y. Shigeta, “Performance of the divide-and-conquer approach used as an initial guess”, *Chemical Physics Letters* **634**, 181-187 (2015), DOI:10.1016/j.cplett.2015.06.011.
 13. M. Shoji, H. Isobe, K. Yamaguchi, “QM/MM Study of the S_2 to S_3 Transition Reaction in the Oxygen-Evolving Complex of Photosystem II”, *Chemical Physics Letters* **636**, 172-179 (2015), DOI:10.1016/j.cplett.2015.07.039.
 14. M. Shoji, H. Isobe, J.-R. Shen, K. Yamaguchi, “Geometric and electronic structures of the synthetic CaMn_4O_4 model compound mimicking the photosynthetic oxygen-evolving complex”, *Physical Chemistry Chemical Physics* **18**, 11330-11340 (2016), DOI: 10.1039/C5CP07226C.
 15. M. Shoji, H. Isobe, T. Nakajima, K. Yamaguchi, “Full Geometry Optimizations of the CaMn_4O_4 Model Cluster for the Oxygen Evolving Complex of Photosystem II”, *Chemical Physics Letters* **640**, 23-30 (2015), DOI:10.1016/j.cplett.2015.10.006.

16. H. Isobe, M. Shoji, J.-R. Shen, K. Yamaguchi, "Chemical Equilibrium Models for the S₃ State of the Oxygen-Evolving Complex of Photosystem II", *Inorganic Chemistry* **55**(2), 502-511(2015), DOI:10.1021/acs.inorgchem.5b02471.
17. K. Hanaoka, W. Tanaka, M. Kayanuma, M. Shoji, "A QM/MM study of the 5'-AMP DNA hydrolysis of aprataxin", *Chemical Physics Letters* **631-632**, 16-20 (2015), DOI:10.1016/j.cplett.2015.04.053.
18. 梅田宏明、埜敏博、庄司光男、朴泰祐、重田育照、"OpenFMOにおける4中心クーロン相互作用項計算のGPGPU化の試み", *Journal of Computer Chemistry Japan (invited letter)* **14**, 69-70(2015). DOI: 10.2477/jccj.2015-0041.
19. S. Maekawa, R. Sato, K. Hirao, Y. Shigeta, "Solvent effects on excited-state electron-transfer rate of pyrene-labeled deoxyuridine: a theoretical study", *Chemical Physics Letters* **644**, 25-30 (2016). DOI:10.1016/j.cplett.2015.11.037.
20. S. Maekawa, T. Matsui, K. Hirao, Y. Shigeta, "A Theoretical Study on Reaction Mechanisms of Nitrite Reduction in Copper Nitrite Complexes as Models for the Copper Nitrite Reductase", *Journal of Physical Chemistry B* **119**, 5392-5403 (2015). DOI: 10.1021/acs.jpccb.5b01356.

<学位論文>

a)卒業研究（1件）

- ・坂本航太郎「伸長因子 EF-1 α の立体構造に関する理論的研究」

<講演>

a) 国内・口頭（19件中、招待講演10件）

1. 重田育照、"ナノバイオ系のシミュレーションとダイナミクス：その後の展開"（招待）、「量子化学の最近の進展- 大規模・複雑系の量子化学シミュレーション -」、Mar. 23rd 2016、AICS、兵庫.
2. 重田育照、"分子動力学法と情報科学の融合によるタンパク質の構造探索"（招待）、「分子技術と理論計算・データ科学」大阪大学未来研究分子技術イニシアティブセミナー、Mar. 14th-15th 2016、大阪大学豊中キャンパス、大阪
3. 重田育照、"第一原理計算に基づく物質の起源と生命痕跡の探求"（招待）、シンポジウム「宇宙惑星居住の実現に向けて - 生命維持，食糧生産，エネルギー・資源開発等 -」、化学工学会第81年会、Mar. 13th-15th 2016、関西大学千里山キャンパス、大阪.
4. 重田育照、"化学における動力学と統計について"（招待）、研究交流会「理論分子科学・分子非線形科学のこれまでとこれから」、東京大学駒場リサーチキャンパス、Mar. 5th-6th 2016、東京.
5. 重田育照、"レアイベントとしてのタンパク質の構造変化と機能"（招待）、タンパク研セミナー「構造を基盤とする蛋白質科学における未解決問題」、東京大学 先端科

- 学技術研究センターENEOS ホール、Mar. 1st-2nd 2016、東京.
- 重田育照、神谷克政、“理論研究によるチトクロム *c* 酸化酵素の酸化還元と共役したプロトン輸送機構：入り口と出口” (**招待**)、生物物理学会シンポジウム「膜を介したプロトン透過機構」、Sep. 13th-15th 2015、金沢、石川.
 - 重田育照、“理論計算に基づくタンパク質の反応性と物性の解析” (**招待**)、「2015 年度第 1 回水和ナノ構造研究会」、Sep. 1st-2nd 2015、那須、栃木.
 - 重田育照、“第一原理計算に基づく酵素機能解析：チトクロム *c* 酸化酵素のプロトンポンプを例として” (**招待**)、東京大学物性研究所「機能物性融合科学シリーズ(3)「反応と輸送」」、Jun. 24th-26th、柏、千葉.
 - 重田育照、神谷克政、“チトクロム *c* 酸化酵素におけるプロトン輸送の構造的仕掛け” (**招待**)、分子研研究会「膜タンパク質内部のプロトン透過を考える」、Apr. 20th-21st 2015、分子研、愛知.
 - 庄司光男、“NTChem による光合成酸素発生中心の電子状態解析” (**招待**)、第五回 NTChem ワークショップ、秋葉原 UDX6 階カンファレンス、2016/3/9.
 - 栢沼愛、庄司光男、重田育照、“ニトリル水和酵素の触媒機構に関する理論的研究”、日本化学会第 96 春季年会、同志社大学、京都、口頭、2016/3/27.
 - 栢沼愛、庄司光男、重田育照、“QM/MM 法によるニトリル水和酵素の触媒機構の解析”、生体分子科学討論会 2015、高崎シティーギャラリー、群馬、口頭、2015/6/13.
 - 庄司光男、“宇宙空間におけるアミノ酸生成反応についての理論的研究”、第 3 回キラル研究会、京都大学、京都、口頭発表、2015/11/28.
 - 庄司光男、磯部寛、山口兆、重田育照、鷹野優、“光化学系 II 酸素発生中心の S2->S3 状態変化についての理論的解明”、3D active site、第 2 回成果報告会、筑波山京成ホテル、茨城、口頭+Poster、2015/9/4-5.
 - 張致遠、原田隆平、栢沼愛、庄司光男、○重田育照、“主成分解析に基づくエン트로ピー計算に関する一考察”、第 18 回理論化学討論会 2015、大阪大学、大阪、口頭、2015/5/20-22.
 - M. Shoji, H. Isobe, J.-R. Shen, K. Yamaguchi, "Electronic structure analysis on the synthetic model (Mn₄CaO₄) of the photosynthetic oxygen evolving complex"、日本化学会春季年会、同志社大学、京都、口頭、2016/3/27.
 - 庄司光男ら、“宇宙空間でのアミノ酸生成反応機構についての理論的研究”、日本天文学会 2016 年春季年会、首都大学東京、東京、口頭、2016/3/15.
 - 佐藤竜馬、鎌田賢司、岸亮平、中野雅由、重田育照、“三重項-三重項消滅光アップコンバージョンの反応機構の理論的研究”、第 29 回分子シミュレーション討論会、朱鷺メッセ、新潟、口頭、2015/11/30-12/2.
 - 佐藤皓允、庄司光男、重田育照、白石賢二、矢花一浩、梅村雅之、“星間空間での光反応による L 型アミノ酸過剰生成の計算科学的検証”、第 3 回キラル研究会、京都大学、口頭、2015/11.

b) 国内・ポスター（7件中）

1. 庄司光男、栢沼愛、重田教育照、長友重紀、長井雅子、“ヘム蛋白の特異的円二色性(Soret 帯 CD)についての理論的解明”、蛋白質科学会、あわぎんホール、徳島、ポスター、2015/6/24-26.
2. 庄司光男、栢沼愛、梅田宏明、重田育照、“分割統治法を用いた初期電子密度行列の構築、第18回理論化学討論会2015、大阪大学、大阪、ポスター、2015/5/20-22.
3. 栢沼愛、庄司光男、重田育照、“ニトリル水和酵素の触媒機構に関する理論的研究”、第18回理論化学討論会2015、大阪大学、大阪、ポスター、2015/5/20-22.
4. 庄司光男、佐藤皓允、佐藤竜馬、原田隆平、栢沼愛、重田育照、“分割統治法を用いた初期電子密度行列の効率的作成”、蛋白質研セミナー、東京大学先端科学研究センター、東京、ショートトーク+ポスター、2016/3/1-2.
5. 佐藤竜馬、鬼頭（西岡）宏任、安藤耕司、重田育照、倭剛久、“光回復酵素における電子移動経路解析”、蛋白研セミナー、東京大学先端科学研究センター、東京、ポスター、2016/3/1-2.
6. 佐藤皓允、庄司光男、重田育照、“アミノ酸過剰生成の起源についての理論解析”、大阪大学蛋白質研究所セミナー、東京大学 先端科学技術研究センター、ポスター、2016/3.
7. 佐藤皓允、庄司光男、重田育照、“L型アミノ酸過剰生成の起源についての計算化学的解析”、第5回CSJ化学フェスタ2015、タワーホール船堀、ポスター、2015/10.

c) 国際・口頭（13件中、招待講演6件）

1. Y. Shigeta, "Theoretical design of photochemical properties of diarylethenes" (**Invited**), *International Mini-Symposium on Fundamentals and Applications of Photosynergetic Excitations*, AIST Osaka center Mar. 15th 2016, Osaka, Japan.
2. Y. Shigeta, "Inverse Histogram-based Sampling Algorithm for Protein-folding Problems" (**Invited**), *The Seventh Asia-Pacific Conference of Theoretical and Computational Chemistry (APCTCC 7)*, Jan. 25th-28th 2016, Kaohsiung, Taiwan.
3. R. Harada, Y. Takano, Y. Shigeta, "Simple, yet powerful conformational sampling methodologies for proteins" (**Oral**), Symposium #98 'Conformational Dynamics of Biomolecules and the Biomolecule-Solvent Interface' *Pacificchem 2015*, Dec. 15th-20th 2015, Hawaii, USA.
4. Y. Shigeta, "Theoretical studies on triplet-triplet annihilation processes of diphenylanthracene derivatives in solution" (**Invited**), *Symposium #44 'Modeling and Analyzing Exciton and Charge Dynamics in Molecules and Clusters' Pacificchem 2015*, Dec. 15th-20th 2015, Hawaii, USA.
5. Y. Shigeta, "Molecular Design for Optical Properties of Diarylethenes" (**Invited**), *Energy, Materials, Nanotechnology (EMN) Bangkok meeting*, Nov. 10th-13th 2015, Bangkok, Thailand.
6. Y. Shigeta, "Simple Conformational Search Algorithms For Protein Folding" (**Invited**), 6th

Czech-Slovakia-Japan Theoretical Chemistry meeting, Oct. 11th-14th 2015, Bratislava, Slovakia.

7. Y. Shigeta, K. Kamiya, T. Baba, M. Boero, "An Integrated Approach for Analyzing Mutational Effects on Enzymatic Reactions of Nylon Oligomer Hydrolase (NylB)" **(Oral)**, 20th Quantum Systems Chemistry, Physics, and Biology, September 14th-20th, Varna, Bulgaria.
8. M. Kayanuma, M. Shoji, Y. Shigeta, "A QM/MM study of catalytic mechanism of nitrile hydratase"**(Oral)**, The 53rd Annual Meeting of the Biophysical Society of Japan, Kanazawa University, oral, 2015/9/13.
9. M. Kayanuma, M. Shoji, Y. Shigeta, "Theoretical study on the reaction mechanism of nitrile hydratase"**(Oral)**, Kyoto University, Kyoto, oral, 2016/3/17.
10. M. Shoji, Y. Ujiie, M. Kayanuma, Y. Shigeta, T. Murakawa, H. Hayashi, "Theoretical elucidation on the molecular mechanism of product assisted catalysis of threonine synthase"**(Oral)**, The 53rd Annual Meeting of the Biophysical Society of Japan, Kanazawa University, 2015/9/14.
11. 庄司光男, "光化学系 II の酸素発生中心の電子状態" **(Invited)**、総会シンポジウム、第 53 回生物物理学会、2015/9/14.
12. M. Shoji, "QM/MM study on the possible reactions of Photosystem II oxygen evolving complex in the S2 to S3 transition" **(Invited)**, AWEST2016, Awaji island Conference, Hyogo, 2015/6/14-15.
13. M. Shoji, "Possibilities of Glycine formation in interstellar medium" **(Invited)**, Symposium on Hierarchy and Holism in Natural Sciences, National Astronomical Observatory of Japan, 2016/2/5.

d) 国際・ポスター (3 件)

1. K. Okuno, Y. Shigeta, R. Kishi, M. Nakano, "Theoretical Studies on Efficient Nonlinear Optical Switches by Tuning Diradical Character Controlled by Photochromic Reaction." , 12th Functional π electron systems, Jul. 19th-24th, Seattle, USA.
2. M. Shoji, Y. Ujiie, R. Harada, M. Kayanuma, Y. Shigeta, T. Murakawa, H. Hayashi, "Molecular dynamics study on the key catalytic intermediates of threonine synthase", 29th Annual Symposium of the Protein Society, Barcelona, Spain, poster, 2015/7/22-25.
3. M. Shoji, "QM/MM Study on the Reaction Mechanism of Assimilatory Nitrite Reductase (aNiR)", Metals in Biology in Wako, poster+2 min's talk), 2015/6/16-17.

<著書 (1 報) >

1. R. Harada, Y. Inagaki, Y. Shigeta, "Protein Folding and Evolution", *Materials Science and Engineering, Article ID: Protein Folding and Evolution/00999* Elsevier.

<集中講義 (2 件) >

1. 重田育照、「量子化学に基づく化学反応理論」“大学院講義反応量子化学”、14th-15th Jan. 2016、名古屋大学大学院理学研究科。(8 コマ)

2. 重田育照、“大学院講義”、June 22nd 2015、徳島大学大学院薬学研究科。(1コマ)

<外部資金獲得(5件)>

1. 新学術領域研究「複合光応答」計画研究：重田育照(研究代表者)(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(研究代表者)(平成26年度～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(B)：原田隆平(研究代表者)(平成26年～28年度)「タンパク質構造揺らぎに基づく構造変化予測法の構築」
4. 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」
5. 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」

<その他>

a) シンポジウム運営(2件)

1. 重田育照、研究交流会「理論分子科学・分子非線形科学のこれまでとこれから」、2016.3.5-3.6.
2. 重田育照、「構造を基盤とする蛋白質科学における未解決問題」大阪大学蛋白研セミナー、2016.3.1-3.2.

b) 学会委員等(2件)

1. 重田育照、分子科学会 速報配信担当、2015/09/01-2016/08/31
2. 重田育照、水和ナノ構造研究会委員(平成27年度)、ATI-公益財団法人新世代研究所.

c) 産学連携(3件)

1. 重田育照、原田隆平、庄司光男、谷口岳志氏(株式会社MCHCR&Dシナジーセンター)との共同研究.
2. 重田育照、原田隆平、中村朋健(富士通株式会社)との共同研究.
3. 庄司光男、阿部幸浩氏(東洋紡)への学術指導.

d) 受賞(3件)

1. 庄司光男、新学術領域3D活性サイト科学第2回成果報告会、ポスター賞(大門賞)、2015年9月
2. 佐藤 皓允(D2)、ポスター賞受賞(発表タイトル:「L型アミノ酸過剰生成の起源についての計算化学的解析」)、第5回化学フェスタ、2015年11月
3. 栢沼愛、第一回黒田チカ賞、2016年1月.

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後期課程1名, 前期課程7名)

卒研究生 3名

遷移金属化合物における機能性物質系 (2次電池, 熱電変換など), 相関電子系 (新型超伝導) ならびに量子スピン系 (幾何学的競合系) 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「バナジウムポリアニオン系」, 「バナジウムセラミックス系」, 「コバルトセラミックス系」などの研究状況を簡潔に整理する. 2015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 V^{2+} あるいは 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. 充放電された物質系は, 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 $Li_9V_3(P_2O_7)_3(PO_4)_2$ の初充電は2電子反応を示し, 容量 $C \approx 170 \text{ A h kg}^{-1}$ を与える. この値は, 実用化が検討されている単斜晶 $Li_xV_2(PO_4)_3$ あるいはタボライト型 $LiVFPO_4$ の容量に匹敵する.

(1) $Li_xV_3(P_2O_7)_3(PO_4)_2$ ($3 \leq x < 12$)

$Li_9V_3(P_2O_7)_3(PO_4)_2$ の充放電過程は, それぞれ $V_3P_8O_{29}$ 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の拡散径路, 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, $Li_9V_3(P_2O_7)_3(PO_4)_2$ の充放電特性改良のため, P-SおよびP-Si置換系の作製を試みた.

(2) タボライト型 Li_xVFPO_4 ($0 \leq x \leq 2$), Li_xVOPO_4 ($\alpha: 0.9 < x \leq 1$, $\beta: 0 \leq x \leq 2$)

タボライト型 $LiVOPO_4$ には3斜晶 α 相と直方晶 β 相が存在し, それぞれ高温, 低温合成で得られる. α 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 A h kg^{-1} である. 一方, β 相においては, 全温度領域で1次元反強磁性鎖磁性を示すこと, および 150 A h kg^{-1} の充放電容量を持つことを実証した. (学位論文1; 学会発表4; 継続)

$LiVFPO_4$ は, 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, 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 ^7Li 核 NMRに基づくスピンドイナミクスは, 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イナミクスを検討している. (学会発表3, 4, 6; 特願1; 継続)

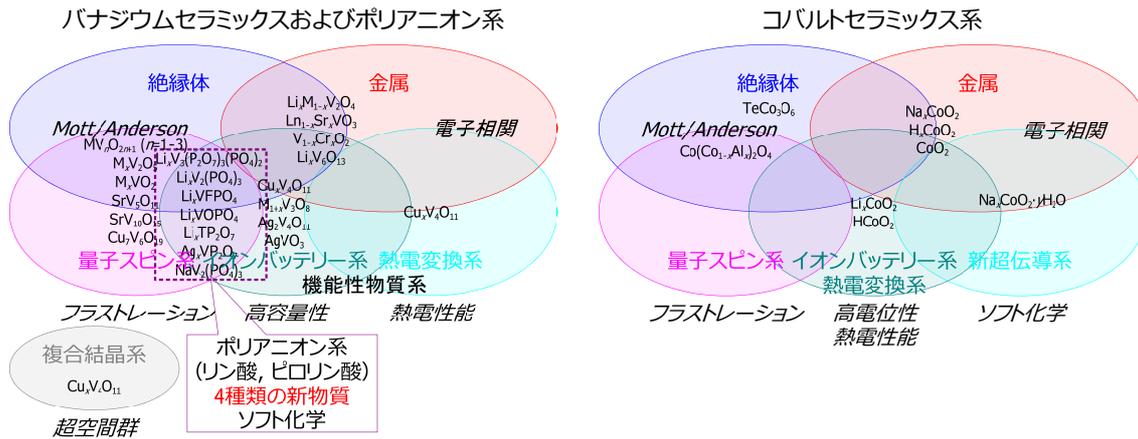


図 1: 2015 年度, 本グループが研究対象としたバナジウムセラミックス系, ポリアニオン系ならびにコバルトセラミックス系の物質群.

(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 置換系の作製を試みた。(継続)

(4) NASICON 型 $\text{Na}_x\text{V}_2(\text{PO}_4)_3$ および関連系

NASICON 型構造は, 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と見なすことができる. すなわち, 蜂巢格子上に 3 つの経路と格子間に 1 つの経路が存在する. $\text{Na}_3\text{V}_2(\text{PO}_4)_3$ の帯磁率は約 9 K で極大値を持ち, それは蜂巢格子間で結合した V^{3+} のスピン 1 重項 2 量体に基づいて近似的に理解できる. ^{23}Na 核のスピン格子緩和率は, 10 K 以上でほぼ一定で, より低温で温度の減少とともに増加し, $T_N = 4$ K で反強磁性状態への臨界発散の挙動を示した後, 約 10 K のギャップを伴って指数関数的に減少する. また T_N 以下において矩形的スペクトルが現れることから, 確かに反強磁性状態への転移として理解できる. すなわち, $\text{Na}_3\text{V}_2(\text{PO}_4)_3$ の相転移およびその周りにおけるダイナミクスは, 上記 LiVFPO_4 の場合と同様な機構に基づく.(論文 2; 学会発表 4; 継続)

並行して, ナトリウム 2 次電池への応用を念頭に, 4 種類の新物質を作製することに成功した.(継続)

【2】バナジウムセラミックス系

(1) 機能性物質系

$\text{Cu}_x\text{V}_4\text{O}_{11}$ 系 (α 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 (β 相; $1.2 \leq x < 2$) を対象とし検討を進めている.(論文 1; 学会発表 1, 2, 5; 継続)

並行して, 高容量性を示すリチウム 2 次電池正極活物質 $\text{Li}_x\text{V}_3\text{O}_8$ 系および $\text{Li}_x\text{V}_2\text{O}_5$ 系の研究も進めている.(継続)

(2) 金属-絶縁体転移系

ジグザグ鎖・梯子系 $M_xV_2O_5$ に関し、特に熱電変換系の見地から研究を開始した。(継続)
スピネル格子型 $Li_xZn_{1-x}V_2O_4$ 、複合結晶型 $Cu_xV_4O_{11}$ 、 $Li_xV_6O_{13}$ などにおける Anderson 型あるいは電子相関型金属-絶縁体転移機構の解明。(論文 1；学会発表 1, 2, 5；継続)

(3) 量子スピン系

幾何学的競合系として、主にスピネル格子と三角格子を対象に研究を進めている：スピネル格子型 $Cd_xZn_{1-x}V_2O_4$ では、交換歪型 Jahn-Teller 秩序相、反強磁性秩序相（軌道秩序効果との競合）およびスピングラス相の組成依存性の検討；三角格子型 Li_xVO_2 では、常磁性相における擬 3 量体模型の構築およびスピン 1 重項 3 量体転移に関する構造解析；三角格子型 Na_xVO_2 では、 $x = 1$ の超常磁性転移機構と $x \approx 0.7$ のスピン $\frac{1}{2}$ -3 量体転移機構に関する NMR。(保留)

【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 Li_xCoO_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 Li_xCoO_2 ($0.5 < x \leq 1$) および $x = 0$ の構造・物性研究を行ってきたが、本年度は $0 < x < 0.5$ を対象に NMR を行った。(学位論文 2；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 $SrTiO_3$ および関連系 $BaTiO_3$, Sr_2TiO_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 $SrTiO_{3-\delta/2}$ 系などの輸送機構を検討してきた。現在は、 $BaTiO_3$ の最高安定相である六方晶型 $BaTiO_{3-\delta/2}$ およびペロブスカイト関連格子 Sr_2TiO_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 Li_xNiO_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 $LiNiO_2$ 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, 複合結晶型 $Cu_xV_4O_{11}$ 系における Cu 部分脱離相の結晶構造と電子状態
第 18 回超イオン導電体物性研究会講演集 (2015) pp. 37-40.
2. Masashige Onoda and Hiroki Kanazawa, Phase transition and spin dynamics of the NASICON-type $Na_3V_2(PO_4)_3$ with the strongly coupled planes of $S = 1$ pseudo-honeycomb lattice
Journal of the Physical Society of Japan **85** (4), 044801 [5pp] (2016).

〈学位論文〉

1. 新井惇規, 直方晶タボライト型 LiVOPO_4 の磁性と元素置換効果
数理物質科学研究科修士 (理学) 論文, 2015 年 3 月
バナジウムポリアニオン系の一つである直方晶タボライト型 $\beta\text{-LiVOPO}_4$ およびその Li 脱離相を対象に, 磁性および電気化学特性との相関を解明することを目的として, 試料作成, X 線粉末回折, 帯磁率ならびに電子スピン共鳴 (ESR) の測定を行った。これまで報告されてきた試料作成法よりも簡便な方法で, ほぼ単相な $\beta\text{-LiVOPO}_4$ を得ることに成功した。帯磁率および ESR スピン帯磁率の解析から, V^{4+} イオン 1 次元鎖の存在が実証できた。さらに Li が完全に脱離した $\beta\text{-VOPO}_4$ を作成し, そこへの Li ドープをソフト化学的に行った。 $\beta\text{-VOPO}_4$ の酸素欠損性および Li ドープ効果を, ESR を通して微視的見地から明らかにし, $\beta\text{-VOPO}_4$ の充電特性が極めて低い原因を考察した。
2. 石井勝也, 三角格子型 Li_xCoO_2 における Li 低濃度相の NMR
数理物質科学研究科修士 (理学) 論文, 2015 年 3 月
三角格子型 ATO_2 系 (A: アルカリ金属, T: 遷移金属) は, 基本構造を保持したまま A イオンの脱離・挿入が可能であり, A 濃度に応じて T イオンの価数分布が変化することで, 変化に富む物性を示す。 Li_xCoO_2 系は二次電池正極活物質として実用化されており, Li 高濃度相 $0.5 \leq x \leq 1$ における正極性能向上あるいは基礎物性の研究が精力的に行われてきた。一方で, Li 低濃度相 $0 < x < 0.5$ の物性は未解明な点が多い。本研究では, Li_xCoO_2 ($0.4 \leq x \leq 0.5$) 系を合成し, X 線粉末回折, 帯磁率ならびに核磁気共鳴 (NMR) の測定を行い, 特に $x \approx 0.47$ で現れる 170 K 近傍における磁気転移の機構を検討した。この磁気転移は, Li イオンの拡散的運動および核 4 重極効果の変化と関連づけられた。

〈学会発表など〉

1. 小野田雅重, 複合結晶型 $\text{Cu}_x\text{V}_4\text{O}_{11}$ 系における Cu 部分脱離相の結晶構造と電子状態
第 18 回超イオン導電体物性研究会 108, 徳島大学工学部常三島キャンパス, 徳島県徳島市, 2015 年 7 月 21 日
2. 小野田雅重, 田村麻人, 佐藤拓磨, 複合結晶型 $\text{Cu}_x\text{V}_4\text{O}_{11}$ 系における Cu 部分脱離相の結晶構造とスピンドイナミクス
日本物理学会 2015 年秋季大会 16aPS18, 関西大学千里山キャンパス, 大阪府吹田市, 2015 年 9 月 16 日
3. 石橋剛彦, 小野田雅重, タボライト型 Li_xVFPO_4 系の結晶構造とスピンドイナミクス II
日本物理学会 2015 年秋季大会 16aPS19, 関西大学千里山キャンパス, 大阪府吹田市, 2015 年 9 月 16 日
4. 小野田雅重, バナジウムポリアニオン系のスピン秩序とダイナミクス
東大物性研短期研究会「スピン系物理の深化と最前線」O12 (2015), 東京大学物性研究所, 千葉県柏市, 2015 年 11 月 17 日
5. 小野田雅重, 田村麻人, 複合結晶型 $\text{Cu}_x\text{V}_4\text{O}_{11}$ 系における Cu 部分脱離相の結晶構造とスピンドイナミクス II
日本物理学会第 71 回年次大会 19aPS19, 東北学院大学泉キャンパス, 宮城県仙台市, 2016 年 3 月 19 日
6. 石橋剛彦, 小野田雅重, タボライト型 Li_xVFPO_4 系の結晶構造とスピンドイナミクス III
日本物理学会第 71 回年次大会 19aPS20, 東北学院大学泉キャンパス, 宮城県仙台市, 2016 年 3 月 19 日

〈高校生・中学生対象授業, 講演など〉

1. 小野田雅重, 次世代二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, 2015 年 4 月 18 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-
和歌山県立向陽高等学校研究室訪問, 筑波大学, 茨城県つくば市, 2015 年 7 月 21 日

3. 小野田雅重, 物性実験研究と物質科学ー物理学の基礎から学際領域研究までー
平成 27 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, 2015 年 8 月 8 日
4. 小野田雅重, 物性物理: 物性実験研究と物質科学ー物理学の基礎から学際領域研究までー
物理チャレンジ・フィジックスライブ, 筑波大学, 茨城県つくば市, 2015 年 8 月 21 日

〈産学連携など〉

1. 小野田雅重, 2016 年度共同研究に向けたミーティング, 2016 年 3 月

〈特許公開・出願〉

1. 小野田雅重, 組成物, リチウムイオン二次電池用電極, リチウムイオン二次電池及び組成物の製造方法, 特願 2015-238960 (特願 2014-249869 に基づく優先権主張)

〈特記事項〉

1. 小野田雅重, 遷移金属酸化物系の研究, Marquis Who's Who in the World 2016 (33th Edition), 2015 年 11 月

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	12名
卒研究生	4名

【1】量子ドットの分光研究（池沢道男、舛本泰章）

(1) GaAs中の単一Nx発光中心から発生させた2光子の干渉（張遼，池沢道男，佐久間芳樹^A A物質・材料研究機構）

昨年までの研究で、GaAs中の窒素等電子トラップに束縛された励起子が量子ドットに閉じ込められた励起子と同程度の長い位相緩和時間を示し、区別のつかない光子の発生に有用であることが分かってきた。そこで、一つの等電子トラップから引き続いて発生させた2つの光子を干渉させ、光子の不可弁別性を評価した。発光中心は、我々がNxセンターと呼んでいる明るい発光中心を用いた。発光寿命と位相緩和時間は温度 5 K でそれぞれ 350 ps と 800 psであった。2光子干渉のために、試料を 2 ns だけ離れたパルス対で非共鳴励起した。発光はシングルモード光ファイバーで非対称マイケルソン干渉計に送られ、2 ns 間隔で連続して発生した2光子は、ある確率でビームスプリッター上に同時入射する。この際、2光子が区別がつく場合と区別がつかない場合を比較できるように、干渉計の一方のパスに半波長板を挿入してある。実験の結果、偏光を平行にしてどちらのパスを通ったか分からなくした場合のみ、遅延時間ゼロに明瞭な窪みがみられた。この窪みの大きさから光子のindistinguishabilityを求めると、0.25 ほどであった。これは非共鳴励起された量子ドットの典型的な値と同程度である。また、励起パルスの時間間隔を伸ばしても、ほとんど変化が見られなかった。理想値からのずれは、非共鳴励起のため自由キャリアが生成され、それらによる位相緩和メカニズムが早い時間領域で顕著に起こっているためではないかと考えられた。

(2) フォトニック結晶と結合させた等電子トラップからの単一光子発生（池沢道男，佐久間芳樹^A，迫田和章^A，杉本喜正^A，^A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を単一の等電子トラップの周りに作製し、パーセル効果を利用した発光寿命の短縮のための研究を行った。これまでに研究例のある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期待できる。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。

GaAs:N中の NN_A 窒素等電子トラップに共鳴波長を合わせた2次元フォトニック結晶構造を作製し、低温における発光スペクトルにキャビティーモードに起因すると考えられる鋭いピークを多数観測した。これまでは、発光中心の密度が高かったために、複数個の発光中心がキャビティーモードと結合しており、アンチバンチングは見られたものの単一光子性が悪かった。本年度、より希薄ドープした試料を用いたところ、これまで観測されていたピークよりもさらに狭い、少数個の発光ピークが共振器モードと考えられる波長範囲内に観測された。各々のピークは強いアンチバンチングを示し、これらが単一の発光中心に起因することが確認された。

パーセル効果が起こっているかどうかについては、発光の減衰時間が確かに速くなっていることが観測されているものの、キャビティーを形成していない未加工領域の発光減衰時間も同様に速くなっているため、観測された短い発光寿命にパーセル効果がどの程度寄与しているか慎重に検討し

なければならない。さらに、微細加工によるダメージも高速の非発光過程を引き起こす可能性もある。そのため、キャビティーモードをガスの吸着によってシフトさせ、発光中心との結合を実験中に調整できるような機構を導入した。これまでのところ、窒素ガスの吸着で、波長にして2~3 nmの長波長シフトが確認されている。今後、これを用いて、パーセル効果の寄与を明らかにする予定である。

(3) 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 (舛本泰章)

化学的に生成された量子ドットへの電子や正孔のドーピングは、重要な課題である。従来はタイプII型のシェルを形成することによってのみ電子や正孔のドーピングが行われていたが、本研究では量子ドットの表面に電荷アクセプター(受容体)を化学的に結合させたり、配置したりすることで光励起後に過渡的に量子ドットへ電子や正孔のドーピングを行い、これを時間分解ファラディ回転信号の強度により電子と正孔の異なるスピン回転周波数を電子か正孔かを同定してドーピングの程度を調べることに成功した。量子ドット中に電子が存在すると、室温・横磁場中でフェムト秒時間分解ファラディ回転信号中に、電子スピンの回転を反映した振動構造が観測される。ファラディ回転信号中の非振動成分は、正孔スピンの強い方向異方性を反映して励起子のスピン分極と同定され、CdS量子ドットに比べてCdS量子ドット・電荷アクセプター複合系ではわずかに減衰が速くなり、CdS量子ドット・正孔アクセプター複合系では減衰が大幅に速くなる。CdS量子ドットが分子リンカーを介してTiO₂電子アクセプターに結合している時には、電子スピンの回転信号は増強され、スピン緩和時間は室温でもT₂*=450psまで長くなる。このとき、CdS量子ドット中に光励起された電子・正孔対から電子のみがTiO₂に移り、励起レーザーパルス列の次のレーザー光パルスが量子ドットを励起したときまでかなりの数のCdS量子ドット中に正孔が残留し、この中に電子1つと互いに反平行なスピンをもった2つの正孔が結合した正のトリオンが形成される。正のトリオンのスピンと同じとなる電子スピンの回転は前の光励起の後に残留した正孔から正のトリオンへの光励起遷移により開始される。量子ドットを光励起後に過渡的に正孔をドープすることで電子スピンの回転信号を増強することが示された。

【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) フェムト秒表面プラズモン波束の変形の詳細な計測と解析 (中村、久保)

分散媒質中を伝搬する光パルスは、群速度分散(2次分散)のためにパルス幅が広がり、さらに、高次分散の影響により包絡線の形状が大きく変形する。このようなパルスの変形は幅広いスペクトル成分を有する超短パルス光で特に顕著である。パルスの変形は光通信の最大帯域を制約し、また光電場の尖頭値を低減させるため、特に光ファイバー光学やレーザー工学、非線形光学等の観点から多くの研究がなされてきた。電磁光学に基づくパルスの解析解は2次分散まで考慮した場合が一般的に知られているが、これらの解析ではパルスの「時間応答」を記述したものが大部分であり、「空間分布」についての報告は理論・実験ともほとんどない。しかし、時間分解顕微鏡法を用いることで伝搬する超短パルスの「空間分布」を観察し、パルス形状の変形を定量的に解析することが可能になる。本研究では、光パルスと性質が類似する表面プラズモン(Surface Plasmon: SP)波束をAu表面に励起し、10fsパルス対による時間分解顕微鏡法により、伝搬の様子を可視化した。特に、フェムト秒時間領域における位相情報をも含めたSP波束の変形に注目し、伝搬に伴う搬送波周波数の変化(チャープ)の発現や波束の空間的広がり、包絡線形状変化の空間的非対称性に注目し評価を行った。これらの波束変形は高次分散を考慮することで定量的に解釈されることが示された。なお本研究での試料は筑波大学微細加工プラットフォームで製作した。

(2) 伝搬形表面プラズモン波束とナノスケール共振モードとの相互作用 (大竹、久保)

次世代情報処理デバイスであるプラズモニクデバイスにおいては、回路内の各要素・素子間の信

号伝達は伝搬型表面プラズモンポラリトン (SPP) により行われる。今回、パルス状 SPP と、光波長より十分に小さいナノスケールプラズモニック素子との超高速時間領域における相互作用を模擬するため、Au 薄膜上に一辺 100 nm の平面型プラズモンキャビティを作成し、これにパルス幅 10 fs の SPP 波束を入射して共鳴励起を行い、キャビティが励振される様子を時間分解顕微鏡法により観察した。10 fs レーザーを光-SPP 結合部とキャビティを含む試料表面に照射し、SPP 波束の動きとキャビティの励振を動的に可視化した。ポンプ-プローブ遅延時間を励起レーザー光の 1 周期分増大させる間にキャビティは 1 回振動し、キャビティは伝搬型 SP の入射により共鳴的に励振される様子が確認された。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) 通信帯波長 1.55 μm フェムト秒表面プラズモンのダイナミクス (村上、久保)

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」の実装化にあたっては、実用が先行するフォトニックデバイスの使用波長域 (光通信波長帯: $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$) との整合が求められる。また、プラズモニックデバイスの超広帯域な動作を実現するため、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、信号伝搬の様相や能動素子との相互作用について理解することが必要である。本研究では時間分解顕微鏡法を用いた光通信帯表面プラズモンの動的な観察法の構築を目的とし、1.55 μm フェムト秒レーザーを用いたストライプ型 Au プラズモン導波路への SPP の励起、および時間分解顕微鏡法による可視化を行った。レーザー光源はチタン・サファイアフェムト秒再生増幅器の出力で励起した光パラメトリック増幅器のシグナル光 (110 fs, 1.55 μm , 1 kHz, 60 $\mu\text{J}/\text{pulse}$) を使用した。時間分解像から決定される SPP 波長、SPP 群速度は分散曲線から見積もられる値と良い一致を示した。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。

(4) 表面プラズモンの非線形増幅 (松本、尾島、久保)

2003 年に Stockman らにより提唱された、反転分布した利得媒質と表面プラズモンのモードを空間的に重ねることで、誘導放出によりコヒーレントなプラズモン増幅がなされるとする SPASER (surface plasmon amplification of stimulated emission of radiation) 機構は、SP 信号の増幅や非線形な振幅変調 (スイッチング) を実現する方法として高く注目され、プラズモニックナノレーザーなどの微小光源や能動的な信号変調を実現するための指導原理になっている。クレッチマン型全反射減衰測定装置を用い、可視光域 (波長約 600 nm) で SPASER 機構による反射率変調の計測を行った。利得媒質層への光ポンピングに伴い表面プラズモンが増強され、これに伴いプローブ光の反射率変調される現象が確認され、当測定手法が表面プラズモン増幅度の定量的評価や、利得媒質物質の選定、最適な光ポンプ強度の調査などに用いられることを確認した。加えて、波長 1.55 μm 帯レーザーをプローブ光とする同様の計測装置も構築し、通信波長帯表面プラズモンの光増強の評価システムを構築した。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。

(5) カルコゲナイド超格子の光誘起相転移と光学変調素子への適用 (杉山、久保)

$[(\text{GeTe})_2(\text{Sb}_2\text{Te}_3)]$ 超格子 (以下 GST 超格子) を絶縁体/金属層構造と共に積層化した、金属-絶縁体相転移物質 (Metal-Insulator-Phase transition material; MIP) 積層型のプラズモニック信号変調素子の開発を目指し、FDTD 法による素子形状のシミュレーションならびに通信帯近赤外光の変調実験を行った。Au/Si₃N₄/GST 超格子積層膜に集束イオンビームエッチングによるナノ加工を施して作製した、光と GST 層の相互作用長がわずか 40nm の試料で、波長 1.55 μm 光の透過強度に最大 20% の変調を得た。相転移に伴う GST 超格子の複素屈折率変化は、同組成の GeSbTe 合金に比べて数倍程度も大きい。光学定数の変化は光の減衰や閉じ込めを複合的に変化させ光変調機能を発現することが、電磁場シミュレーションから示唆された。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) カルコゲナイド超格子のプラズモン励起のためのパルス中赤外光源開発 (伊藤、久保)

[(GeTe)₂(Sb₂Te₃)]超格子の有するトポロジカル物性から予測されるディラック・プラズモンの励起/観察を行うため、波長可変なフェムト秒パルス中赤外光源の開発を行った。2波長の近赤外パルスレーザー光の差周波発生 (DFG) により 4~10 μm 程度の範囲で波長可変なパルス光を発生する。フェムト秒再生増幅器 (100 fs, 1 kHz)、光パラメトリック増幅器から波長可変な2つの近赤外パルス、シグナル光、およびアイドラー光を取り出し、両者の DFG により中赤外パルスを発生する光学系の構築を行った。EKSMA OPTICS 社製 AgGaS₂ 結晶を DFG 結晶に用いて発生した波長 5.6 μm の中赤外パルスを PbSe 光導電素子で測定し、繰り返し周波数 1 kHz の安定的な中赤外パルスの発生を確認した。

<論文>

(査読論文)

1. P. Jing, W. Ji, X. Yuan, S. Qu, R. Xie, M. Ikezawa, J. Zhao, H. Li, Y. Masumoto: "Ultrafast Carrier Dynamics and Hot Electron Extraction in Tetrapod-Shaped CdSe Nanocrystals", *Appl. Mater. Interfaces* **7**, 7938 (2015).
2. Y. Masumoto, H. Umino, J. Sun, E. Suzumura: "Enhanced electron spin rotation in CdS quantum dots", *Physical Chemistry Chemical Physics* **17**, 25278 (2015).
3. Q. Sun, H. Yu, K. Ueno, A. Kubo, Y. Matsuo, H. Misawa, "Dissecting the Few-Femtosecond Dephasing Time of Dipole and Quadrupole Modes in Gold Nanoparticles Using Polarized Photoemission Electron Microscopy", *ACS NANO* **10**, 3835-3842 (2016)

(学位論文)

1. 修士論文 鈴木 諒、「CdSe Nanoplatelets の合成と光学スペクトル」
2. 修士論文 山田 雄太、「GaAs フォトニック結晶共振器中の窒素不純物発光中心」
3. 修士論文 杉山 岳、「(GeTe)/(Sb₂Te₃)超格子の光誘起相転移を用いたナノスリット構造の光導波変調」
4. 卒業論文 Abdul Karim、「プラズモン共鳴のための CuInS₂ 量子ドット合成」
5. 卒業論文 伊藤 祥太、「レーザー励起蛍光顕微鏡の開発と AgGaS₂ 結晶を用いた中赤外パルス光の発生」
6. 卒業論文 大竹 祐香、「フェムト秒表面プラズモン波束による平面型ナノキャビティの共鳴励起」
7. 卒業論文 尾島 隆也、「光通信波長帯 1.55 μm 光を用いた Au 薄膜の Kretschmann 配置型反射率測定」

<書籍>

1. 舛本泰章 他 89 名 (編集者: 木下修一、太田信廣、永井健治、南不二雄)「発光の事典 基礎からイメージングまで」朝倉書店、2015 年、788 ページ
2. 舛本泰章 「量子ドットの基礎と応用」裳華房、2015 年、312 ページ

<国際会議>

1. M. Ikezawa, N. Yasuda, L. Zhang, Y. Sakuma, K. Sakoda, and Y. Masumoto: "Resonant Excitation of Single Luminescence Centers in GaAs:N", 2015 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM2015) (札幌, 2015.9)
2. M. Ikezawa, Y. Yamada, Y. Sakuma, L. Zhang, Takeda, N. Ikeda, Sugimoto, K. Sakoda, and Y. Masumoto: "

Non-classical Light Generation from Isoelectronic Traps Embedded in Photonic Crystal Microcavities", the joint conference of 21st International Conference on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems (EP2DS-21) and 17th International Conference on Modulated Semiconductor Structures (MSS-17) (仙台, 2015.7)

3. M. Ikezawa: "Single Photon generation from nitrogen isoelectronic traps in III-V semiconductors", Korea-Japan Joint Symposium on Semiconductor Physics and Technology - Ultrafast Nanophotonics (韓国Daejeon, 2015.4) [招待講演]
4. A. Kubo, "Evolution of surface plasmon wave packets in femtosecond time-domain", MANA-DIPC Workshop 'Nanostructures and Complex Functional Materials', 2015年8月27日, DIPC, San Sebastian, Spain [招待講演]
5. A. Kubo, "Femtosecond imaging of surface plasmon wave packet by using time-resolved fluorescence microscopy", The 9th International Symposium on Ultrafast Surface Dynamics, 2015年5月26日, Resort Hotel Laforet Biwako, Siga, Japan
6. Q. Sun, H. Yu, K. Ueno, A. Kubo, Y. Matsuo, H. Misawa, "Exploring plasmonic hot spots and their dynamics by photoemission electron microscopy", Pacificchem 2015, 2015年12月15~20日, Honolulu, Hawaii, USA
7. H. Yu, Q. Sun, K. Ueno, A. Kubo, Y. Matsuo, H. Misawa, "Fano resonances on gold nano dolmen structures probed by photoemission electron microscopy", Pacificchem 2015, 2015年12月15~20日, Honolulu, Hawaii, USA

<国内会議>

1. 張遼、池沢道男、佐久間芳樹、迫田和彰、舛本泰章：「GaAs中の窒素発光中心から発生した光子の量子干渉」 応用物理学会 第63回応用物理学会春季学術講演会（東工大、2016年3月）
2. 池沢道男：「GaAs中の窒素発光中心を用いた単一光子源」 第1回光・量子計測シンポジウム（つくば、2015年9月）
3. 池沢道男：「半導体量子ドットのレーザー分光～量子光源・太陽電池応用に向けて」 第1回光・量子計測シンポジウム（つくば、2015年9月）
4. 久保敦，“プラズモニクスと伝搬型表面プラズモン”，第5回光科学異分野横断萌芽研究会, 2015年8月4日, ホテル竹島 [招待講演]
5. 久保敦，“非同径干渉時間分解蛍光顕微鏡法による局所励起表面プラズモン波のフェムト秒映像”，国際光年記念シンポジウム, 2015年4月21日, 東京大学安田講堂
6. 中村圭佑, 久保敦，“フェムト秒表面プラズモン波束の変形・減衰ダイナミクス”，国際光年記念シンポジウム, 2015年4月21日, 東京大学安田講堂
7. 杉山岳, 久保敦, 中野隆志，“金属-絶縁体-(GeTe)(Sb₂Te₃)超格子型光変調素子”，第76回応用物理学会秋季学術講演会, 2015年9月15日, 名古屋国際会議場
8. 中村圭佑, 久保敦，“フェムト秒表面プラズモン波束のチャープ広がり時間分解観察”，第76回応用物理学会秋季学術講演会, 2015年9月15日, 名古屋国際会議場
9. 久保敦，“極小ポンプ-広域プローブ型干渉時間分解顕微鏡法”，「新しい光科学の創成とナノ情報デバイスへの展開Ⅲ」研究会, 2015年10月15日, 東北大学電気通信研究所
10. 中村圭佑, 久保敦，“フェムト秒時間領域における高次分散に起因する表面プラズモン波束の変形の解析”，第63回応用物理学会春季学術講演会, 2016年3月20日, 東京工業大学大岡山キャンパス
11. 村上亮輔, 池沢道男, 久保敦，“1.55 μm帯フェムト秒表面プラズモンの二光子蛍光顕微鏡観察”，第63回応用物理学会春季学術講演会, 2016年3月20日, 東京工業大学大岡山キャンパス
12. 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平面型ナノキャビティの共鳴励起” 第63回応用物理学会春季学術講演会, 2016年3月21日, 東京工業大学大岡山キ

キャンパス

13. H. Yu, Q. Sun, T. Oshikiri, K. Ueno, A. Kubo, Y. Matsuo, H. Misawa, “Spectral response and spatial evolution of plasmonic near field in coupled gold nanostructures”, 日本化学会第 96 回春季年会, 2016 年 3 月 24-27 日, 同志社大学京田辺キャンパス

<外部資金>

1. 科研費 基盤(C), 研究代表者, H26~28, 「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」: 舩本泰章
2. 光科学技術研究振興財団 研究助成, H26~27 「半導体中の等電子不純物の共鳴励起による超コヒーレントな光子の発生」: 池沢道男
3. 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」: 久保敦
4. 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」: 久保敦
5. 学術指導契約, コニカミノルタ株式会社: 久保敦

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 -)
研究員		柴田恭幸 (- H28.3)
大学院生	D3	米澤宏平
	D2	高地雅光
	M2	浦瀬翔太
	M2	柳田 歩
	M1	Rögnvaldur Líndal Magnússon
	M1	赤間翔太
	M1	福住勇矢
卒業研究生	B4	天羽 薫
	B4	伊王野慎司
研究補助員		深山真美子 (H26.5 - H27.8)
事務員		木村京子 (H26.5 -)

【1】 有機薄膜太陽電池の励起子と電荷の絶対数の時間変化[1, 2, 5] 米澤、安田(NIMS)、守友

有機薄膜太陽電池では、光励起された励起子がドナーアクセプター界面で電荷分離し、発電が起こる。我々は、フェムト秒時間分解分光と電気化学分光を組み合わせることにより、励起子と電荷の絶対数（吸収された光子あたりの数）の時間変化を決定する方法を提案した。そして、この手法を PTB7/PC71BM ヘテロ接合膜と SDMPPEH/PC71BM 混合膜に適用した。図1に PTB7/PC71BM ヘテロ接合膜の結果を示す。時間の経過とともにアクセプター励起子（青）とドナー励起子（赤）の数が減り、電荷（緑）の数が増える。この定量的な解析により、アクセプター励起子の遅い成分は電荷形成に寄与しないことが明らかとなった。これは、理論的に提唱されているホット励起子の描像を、実験的に支持するものである。

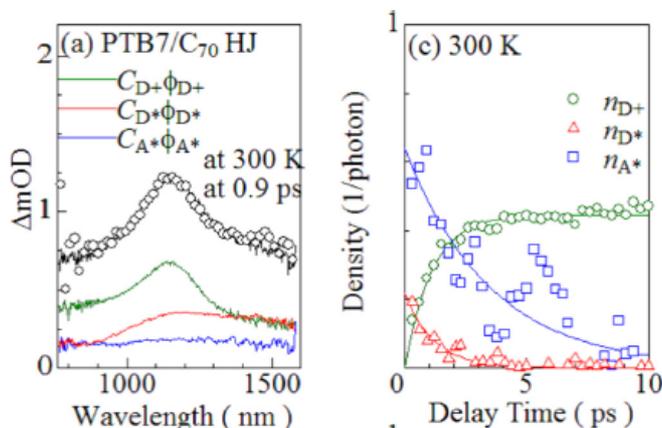


図1:PTB7/PC71BM ヘテロ接合膜の励起子と電荷の絶対数の時間変化

【2】 有機薄膜太陽電池の界面電密度と回収電荷密度との相関 [3] 米澤、安田(NIMS)、守友

有機薄膜太陽電池では、パルスレーザーで強励すると光電変換効率が低下することが知られている。この機構に迫るために、PTB7/PC71BM ヘテロ接合膜を用いて、定量的な実験を行った。フェムト秒レーザーで励起した際の電荷生成速度は3 ps 以下であるので、励起直後に界面に高密度な電荷が存在すると考えて良い。そこで、太陽電池デバイスを作成し、光励起密度（そして、界面電荷密度）と回収電荷密度との関係を明らかにした。（図2）弱励起では、回収電荷密度は生成した界面電荷密度に比例している。しかしながら、強励起下では、回収電荷密度が急速に飽和する、自乗項または三乗項を取り入れた現象論（点線または実線）で、得られた実験結果を説明した。

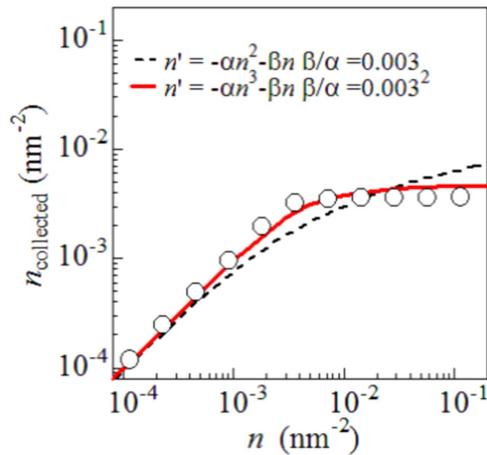


図2:PTB7/PC71BM ヘテロ接合膜における界面電密度と回収電荷密度との相関

【3】 ナトリウムイオン二次電池における放電容量と放電レートとの相関[6] 柳田、柴田、小林、守友

ナトリウムイオン二次電池のレート特性（電流密度に対する容量劣化）において、イオン拡散は重要な要因の一つであると考えられる。しかしながら、二次電池の開発研究においては、分極効果（電流を流すことによる放電電位の低下）で実験結果が解釈されている。我々は、イオン拡散の影響を抽出するために、放電容量における電圧降下成分を補正して、放電容量と放電レートとの関係を実験的に明らかにした。（図3）横軸は、くりこまれた放電レートで（ L^2/DT : L は特徴的な長さ、 D は拡散係数、 T は理論容量の電荷を吐き出す時間）ある。複数の試料が同一の曲線を描く。三次元拡散方程式を数値的に計算（実線）し、実験結果を説明した。

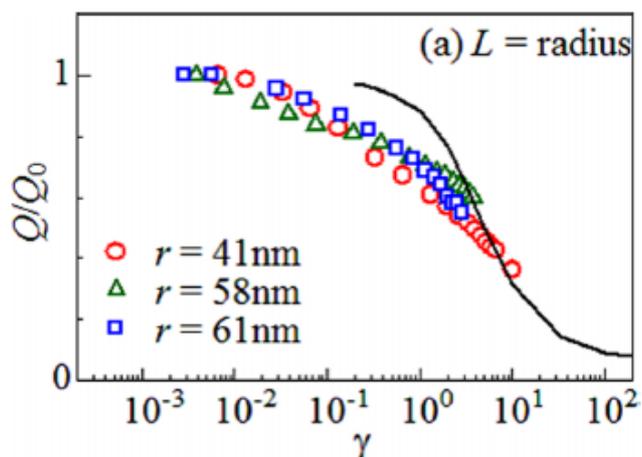


図3：NaCoO₂薄膜における、放電容量とくりこまれた放電レートとの関係。

【4】 ナトリウムイオン二次電池材料のイオン拡散係数と格子定数との相関 [7] 高地、守友

ヘキサシアノフェライトは有望なリチウム/ナトリウムイオン二次電池正極材料である。この物質の格子定数は、遷移金属のイオン半径を変えることで精密に制御できる。我々は、この物質のイオン拡散係数と格子定数の相関を実験的に明らかにした。(図4) 格子定数の増大に伴い、イオン拡散係数は増大し、イオン拡散係数の活性化エネルギーが低下する。

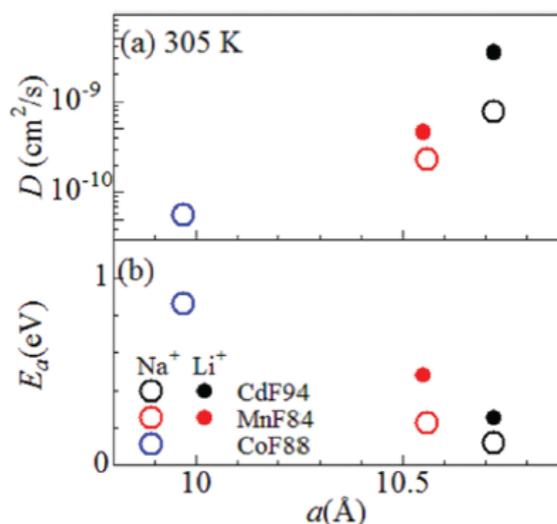


図4:ヘキサシアノフェライトのイオン拡散係数とその活性化エネルギーの格子定数依存性。

【5】 グルコース熱処理によるマンガン・ヘキサシアノフェライトのレート特性の向上 [8] 守友、柴田、後藤

マンガン・ヘキサシアノフェライトは、低コストなナトリウムイオン二次電池材料である。この物質の欠点は電気伝導性が低いことである。我々は、マンガン・ヘキサシアノフェライトの表面にグルコース熱処理を加え、レート特性の向上に成功した。試料を TEM 観察したところ、マンガン酸化物のナノ粒子が析出していることが分かった。このナノ粒子

が電気伝導性向上の要因であると考えられる。

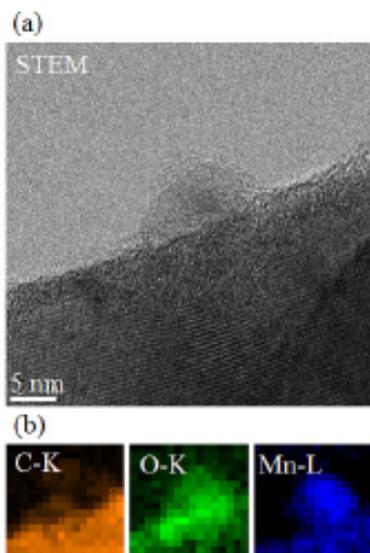


図5:グルコース熱処理によるマンガン・ヘキサシアノフェライトのTEM観察。下図は、EELSによる元素マップである

【6】 二次電池型熱発電素子の提案と実証[9] 木下、小林、守友

室温付近の排熱利用は、地球環境の保全と環境社会の実現に不可欠である。半導体を用いた熱電変換は、(1)希少元素の利用により高コスト、(2)かさばる素子形状、等の問題がある。我々は、二次電池型熱発電素子を提案し、その実証（起電力の発生と充電・放電）に成功した。我々の提案する熱発電素子では、二次電池の正極と負極に同じ活物質電極を配置し、正極と負極の温度差による起電力の差を利用して、発電を行う。この二次電池型熱発電素子には、下記の長所がある。

- ① 低コストである二次電池活物質が利用できる。
- ② 工業化には、二次電池製造技術・インフラを転用できる。
- ③ シート型熱発電素子であるため、人体発電、熱源（太陽光パネル、建物の壁、車体、・・・）へ貼り付け等の用途がある。また、塗布型の熱発電も可能である。
- ④ 室温付近の未利用エネルギーを利用するので、半導体の熱電変換技術と競合しない。
- ⑤ 我々の提案する熱発電では、熱伝導を担う電解質層と起電力を担う活物質層を独立に開発できる。そのため、性能指数Zの理論上限がない。
- ⑥ 熱発電用活物質の条件は、[1]高い熱起電力と[2]高い電気容量だけである。起電力は低くても構わない。言い換えれば、電解質層は安全な水溶液でも構わない。この観点からの材料探索・開発は全くなされていない。
- ⑦ 室温付近の構造相転移を利用することで、超巨大熱起電力の発生が可能である。なぜならば、構造相転移の前後で起電力が不連続に変化するからである。

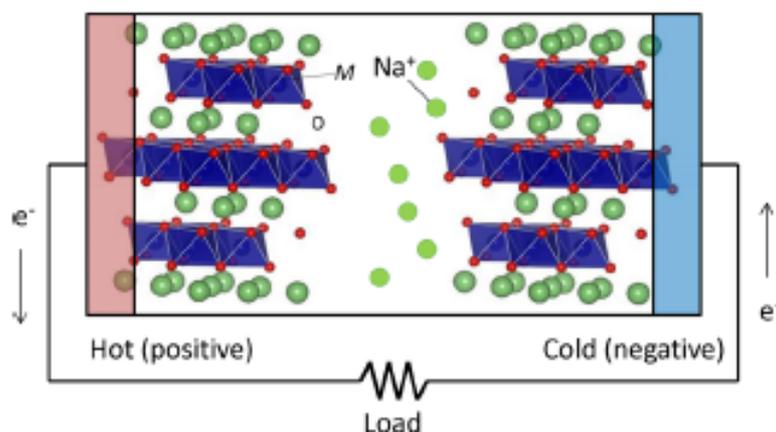


図6:二次電池型熱発電素子の模式図

【7】 LiCoO₂の電子分布とトポロジカル解析[10] 西堀、柴田、小林、守友

LiCoO₂は最も有名なリチウムイオン二次電池材料である。我々は、LiCoO₂の良質粉末を作成し、SPring-8で統計精度の高い粉末回折パターンを測定した。得られたデータをMEM/Rietveld解析し、実験的に電子分布を得た。この電子分布をもとにトポロジカル解析を行ったところ、Co-O間に結合電子がないことが明らかとなった。

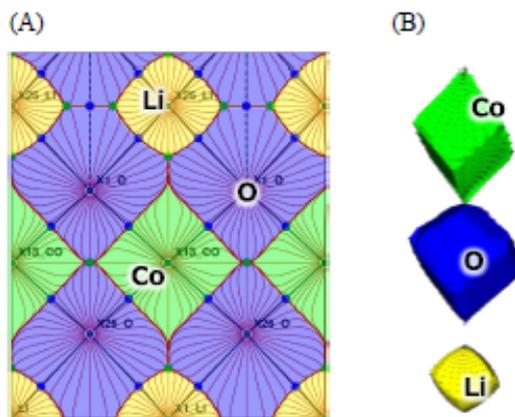


図7:LiCoO₂のトポロジカル解析

【8】 微粒子化によるポリイミド由来酸素還元触媒の活性向上 [16] 丹羽、難波江(東工大)、他

固体高分子形燃料電池の普及のために、希少で高価な白金触媒に代わる非貴金属系酸素還元触媒の開発が急務である。今回我々は、鉄を微量に含む球状のポリイミドナノ粒子を熱分解することで非貴金属系酸素還元触媒を合成した。沈殿重合法により、粒径の異なる触媒の合成に成功した。約60nmに微粒子化した触媒の燃料電池セル特性は、正極に空気を用いたとき、0.46Vにおける電流密度で1.0 A cm⁻²を達成した。X線吸収端微細構造(XANES)測定結果から、微粒子化しても鉄の化学状態組成には大きな違いは見られず、いずれもFeN₄のような単核鉄種が観測された。電気化学測定の結果とあわせて、微粒子化による活性向上は酸素拡散性の増大によるものと考えられた。

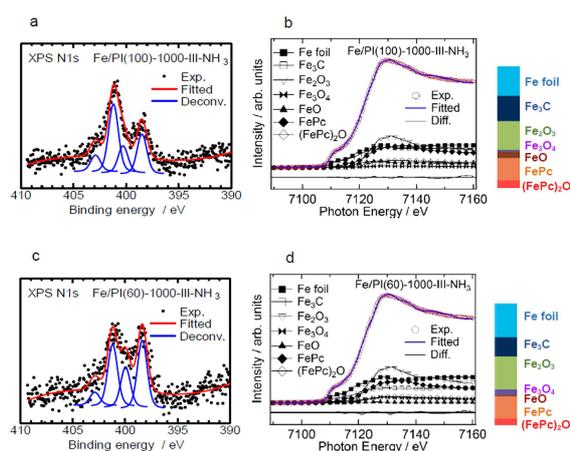


図 8: 粒径の異なるポリイミド由来酸素還元触媒の N 1s XPS 及び Fe K 端 XANES スペクトル。

【9】 K 吸着 Pd(110) 表面の研究：実験と第一原理計算 東山

fcc 遷移金属の(110)表面では、自発的に、あるいは異種原子の吸着によって missing-row (MR) 型再構成が起こる。Pd(110)表面に微量 ($< 0.1\text{ML}$) の K を吸着させると $1 \times 2\text{MR}$ 構造に再構成することが知られている。STM と LEED による実験から、K が吸着量の増加とともに一次元鎖を形成して秩序化することを以前提唱した。これを検証するために、密度汎関数理論を用いて構造と電子状態、特に仕事関数の吸着量依存性を調べたので報告する。

計算手法は前年度の報告と同様である。K の吸着量は 1×2 構造 ($1/12\text{ML}$) から一次元鎖 ($1/3\text{ML}$) まで考察した。初期吸着位置として hollow サイトを仮定してエネルギーと力による構造最適化を行った。

図 9 は K が 1×2 表面に吸着したときの仕事関数の変化である。比較のため、 1×1 表面に一次元鎖が形成されたと仮定した場合の計算も示している。実験と計算の一致は非常に良い。さらに 2 種類の周期構造 (2×2 と $c2 \times 4$) に対して全エネルギーと仕事関数を計算したところ、差は認められなかった。これは鎖間の相互作用は重要ではなく、鎖内の相互作用が支配的であることを示しており、LEED で散漫散乱線が観測された事実とつじつまが合う。また、フェルミ準位における局所状態密度の計算から、K4s 成分は非常に少なく、ほとんどが Pd4d 成分であることが分かった。これは STM で観測された 1×2 格子が Pd 由来で、K は観測されないとする推定を支持する結果である。

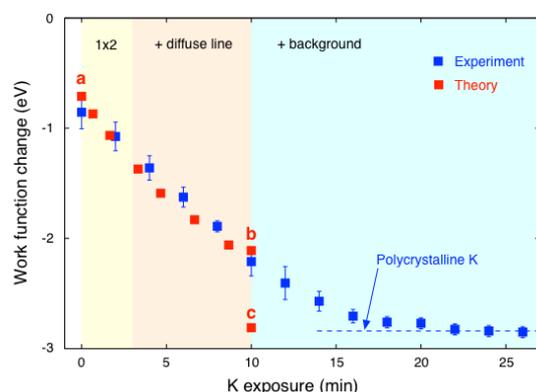


図9:仕事関数のK吸着量依存性。基準は1x1表面(実験 5.13eV、計算 4.88eV)

【10】KEK 大学等連携支援事業に関する活動

平成27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。

<論文>

1. Kouhei Yonezawa, Takeshi Yasuda, and Yutaka Moritomo, "Temperature effects on carrier formation dynamics in organic heterojunction solar cell", *Appl. Phys. Lett.* 107 (2015) 133903.
2. Kouhei Yonezawa, Takeshi Yasuda, and Yutaka Moritomo, "Temperature-independent carrier formation dynamics in bulk heterojunction", *Appl. Phys. Express* 8 (2015) 112301.
3. Yutaka Moritomo, Kouhei Yonezawa and Takeshi Yasuda, "Carrier density effect on recombination in PTB7-based solar cell", *Sci. Rep.* 5 (2015) 13648.
4. Yutaka Moritomo, Kouhei Yonezawa, and Yasuda Takeshi, "Spectroscopic determination of charge formation efficiency of organic photovoltaic cells", *Mol. Cryst. Liq. Cryst.* 620 (2015) 26-31.
5. Yutaka Moritomo, Kouhei Yonezawa, Takeaki Sakurai, Takeshi Yasuda, Yasuo Takeichi, Hayato Kamioka, Hiroki Suga, Yoshio Takahashi, Yuji Yoshida, Nobuhito Inami, Kazuhiko Mase & Kanta Ono, "Morphology of F8T2/PC71BM blend film as investigated by scanning transmission X-ray microscope (STXM)", *Mol. Cryst. Liq. Cryst.* 620 (2015) 32-37..
6. Ayumu Yanagita, Takayuki Shibata, Wataru Kobayashi, and Yutaka Moritomo, "Scaling relation between renormalized discharge rate and capacity in Na_xCoO_2 films", *APL materials* 3 (2015) 106104.
7. Masamitsu Takachi, Yuya Fukuzumi and Yutaka Moritomo, " Na^+ diffusion kinetics in nanoporous metal-hexacyanoferrates" *Dalton Trans.* 45 (2016) 458-461.
8. Yutaka Moritomo, Kensuke Goto, and Takayuki Shibata, "Glucose-treated manganese hexacyanoferrate for sodium-ion secondary battery", *Energies* 8 (2015) 9486-9494.
9. Wataru Kobayashi, Akemi Kinoshita, and Yutaka Moritomo, "Seebeck effect in a battery-type thermocell", *Appl. Phys. Lett.* 107 (2015) 073906.

10. Eiji Nishibori Takayuki Shibata, Wataru Kobayashi, and Yutaka Moritomo, "Bonding nature of LiCoO₂ by topological analysis of electron density from X-ray diffraction", *Electrochemistry* 83 (2015) 840-842.
11. Yutaka Moritomo, Tomoyuki Matsuda, Yutaro Kurihara, and Jungeun Kim, Erratum: "Cubic-rhombohedral structural phase transition in Na_{1.32}Mn[Fe(CN)₆]_{0.83}·3.6H₂O" [*J. Phys. Soc. Jpn.* 80, 074608 (2011)] [*J. Phys. Soc. Jpn.* 85 (2016) 9038001].
12. S. Moser, S. Fatale, P. Krüger, H. Berger, P. Bugnon, A. Magrez, H. Niwa, J. Miyawaki, Y. Harada, and M. Grioni, "Electron-phonon coupling in the bulk of anatase TiO₂ measured by resonant inelastic x-ray spectroscopy", *Phys. Rev. Lett.* 115 (2015) 096404.
13. Hisao Kiuchi, Takahiro Kondo, Masataka Sakurai, Donghui Guo, Junji Nakamura, Hideharu Niwa, Jun Miyawaki, Maki Kawai, Masaharu Oshima and Yoshihisa Harada, "Characterization of nitrogen species incorporated into graphite using low energy nitrogen ion sputtering", *Phys. Chem. Chem. Phys.* 18 (2016) 458-465.
14. Yusuke Nanba, Tatsumi Iwao, Benoit Mortemard de Boisse, Wenwen Zhao, Eiji Hosono, Daisuke Asakura, Hideharu Niwa, Hisao Kiuchi, Jun Miyawaki, Yoshihisa Harada, Masashi Okubo, Atsuo Yamada, "Redox potential paradox in Na_xMO₂ for sodium-ion battery cathodes", *Chem. Mater.* 28 (2016) 1058-1065.
15. Hisao Kiuchi, Riku Shibuya, Takahiro Kondo, Junji Nakamura, Hideharu Niwa, Jun Miyawaki, Maki Kawai, Masaharu Oshima, and Yoshihisa Harada, "Lewis basicity of nitrogen-doped graphite observed by CO₂ chemisorption", *Nanoscale Res. Lett.* 11 (2016) 127.
16. Yuta Nabae, Shinsuke Nagata, Teruaki Hyakawa, Hideharu Niwa, Yoshihisa Harada, Masaharu Oshima, Ayano Isoda, Atsushi Matsunaga and Kazuhisa Tanaka, "Morphology controlled carbon-based fuel cell catalyst from spherical polyimide", *Sci. Rep.* 6 (2016) 23276.

<著書>

1. 守友 浩、「ナトリウムイオン電池正極物質としての配位置高分子」*化学工業* 67(2016)297-304

<学位論文>

1. 修士論文 浦瀬翔太、「マンガンプルシアンブルー類似体の電池特性向上に関する研究」
2. 修士論文 柳田 歩、「Na_xCoO₂ 薄膜を用いた Na インターカレーションの研究」

<講演>

1. (招待) Y. Moritomo "average and local structure of cathode materials for SIB" seminar at NSRRC@新竹、2016/3/14
2. (招待) 守友 浩「ナトリウムイオン二次電池の X 線分光/回折」第 18 回 XAFS 討論会@KEK, 2015/7/29-31

3. (招待) 守友 浩「エネルギー変換・貯蔵部門」CiRfSE シンポジウム, 2016/1/18-19, 筑波大学
4. (招待) 守友 浩、他「有機薄膜太陽電池の電荷生成」第 64 回高分子討論会@仙台、2015/9/16
5. (招待) Y. Moritomo, "charge-driven phase transition in cobalt hexacyanoferrates" PCOS2015@熱海、2015/11/26-27
6. (招待) 守友 浩、他「有機薄膜代替電池の STXM」PF 研究会「X 線顕微分光の新展開」@PF2015/10/2
7. (招待) W. Kobayashi, "Sodium ion diffusion and electrochemical Seebeck effect in layered Na_xMO_2 ", 1h seminar, 2015/6/5, CRISMAT laboratory, Caen
8. (招待) H. Niwa, "Operando soft X-ray emission spectroscopy of non-Pt oxygen reduction catalysts for polymer electrolyte fuel cells", TGSW2015, EPOCHAL TSUKUBA, Tsukuba, Japan, 2015/9/30
9. (招待) H. Niwa, "In situ and operando soft X-ray emission spectroscopy of non-Pt fuel cell catalysts", IXS2015, Oral, The 9th International Conference on Inelastic X-ray Scattering (IXS2015), National Synchrotron Radiation Research Center, Hsinchu, Taiwan, 2015/9/25
10. Y. Moritomo, "Coordination polymer as Na-ion secondary battery material", 18th International Symposium on Intercalation Compounds (ISIC18), Strasbourg, 2015/6/2
11. 守友 浩「ナトリウムイオン二次電池材料 PBA の固溶体の Redox 反応」第 18 回 XAFS 討論会@KEK, 2015/7/29-31
12. 柴田恭幸、後藤謙典、高地雅光、守友 浩「マンガン・プルシャンブルー類似体の熱処理効果と電気化学特性」第 56 回電池討論会、第 56 回電池討論会、2015/11-11-13
13. 小林 航、木下明美、守友 浩「二次電池型熱電変換セルの試作と評価」第 76 回応用物理学会秋季学術講演会、名古屋国際会議場、2015/9/13-16
14. 福住 勇矢、小林 航、守友 浩「チタン酸化物のイオン拡散と構造相関」第 76 回応用物理学会秋季学術講演会、名古屋国際会議場、2015/9/13-16
15. 高地 雅光、福住 勇矢、守友 浩「プルシャンブルー類似体の Li^+/Na^+ 拡散係数と格子定数依存性」第 76 回応用物理学会秋季学術講演会、名古屋国際会議場、2015/9/13-16
16. 赤間 翔太、柴田 恭幸、高地 雅光、小林 航、守友 浩「ナトリウムイオン電池正極層状酸化物の EXAFS 解析」第 76 回応用物理学会秋季学術講演会、名古屋国際会議場、2015/9/13-16
17. 福住 勇矢、小林 航、守友 浩「イオン拡散における充填効果」第 63 回応用物理学会春季学術講演会、東工大、2016/3/19-22
18. 柴田 恭幸、浦瀬 翔太、守友 浩「マンガン・プルシャンブルー類似体のリチウムイオン二次電池負極挙動」第 63 回応用物理学会春季学術講演会、東工大、2016/3/19-22
19. 小林 航、天羽 薫、赤間 翔太、丹羽 秀治、守友 浩「O3 型 $\text{Na}_x\text{Co}_{1-x}\text{Fe}_x\text{O}_2$ 固溶体の EXAFS 解析」第 63 回応用物理学会春季学術講演会、東工大、2016/3/19-22
20. 赤間 翔太、天羽 薫、小林 航、丹羽 秀治、守友 浩「P2 型 $\text{Na}_x\text{Co}_{1-x}\text{Mn}_x\text{O}_2$ 固溶体の EXAFS 解析」第 63 回応用物理学会春季学術講演会、東工大、2016/3/19-22

21. 岡本淳、張培裕、柴田恭幸、小林航、守友浩、黃迪靖、“XAS による P2 型 Na_xCoO_2 薄膜電極の電子状態の研究”、日本物理学会 2015 年秋季大会、2015/9/16-19、関西大学（千里山キャンパス）
22. W. Kobayashi, T. Shibata, and Y. Moritomo, “Large Na^+ diffusion coefficient in layered Na_xMO_2 ($M=\text{Co}, \text{Mn}$)”, 18th International Symposium on Intercalation Compounds (ISIC18), Strasbourg, 2015/5/31 (ポスター)
23. 東山和幸「K 吸着 Pd(110) 表面の構造と電子状態：実験と第一原理計算」日本物理学会年次大会、東北学院大学泉キャンパス、2016/3/19 (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、2016/1/9-11、(ポスター)
25. R. L. Magnússon, W. Kobayashi, and Y. Moritomo, “ Li^+ intercalation into layered chalcogenides”, IWP2015@Tsukuba, 2015/9/4 (poster)
26. M. Takachi, Y. Fukuzumi, and Y. Moritomo, “Diffusion constant of Li^+/Na^+ in Prussian Blue Analogues (PBAs)”, IWP2015@Tsukuba, 2015/9/4 (poster)
27. S. Akama, W. Kobayashi, T. Shibata, M. Takachi, and Y. Moritomo, “XAFS analysis of layered oxides as sodium ion secondary battery cathode material”, IWP2015@Tsukuba, 2015/9/4 (poster)
28. Y. Fukuzumi, W. Kobayashi, and Y. Moritomo, “ Na^+/Li^+ diffusion in $\text{Na}_2\text{Ti}_n\text{O}_{2n+1}$ ($n=3, 6$)”, IWP2015@Tsukuba, 2015/9/4 (poster)
29. K. Yonezawa, and Y. Moritomo, “Molecular Mixing in Donor and Acceptor Domains as Investigated by Scanning Transmission”, IWP2015@Tsukuba, 2015/9/4 (poster)

<特許出願>

<特許取得>

<外部資金>

1. 研究成果最適展開支援プログラム FS ステージ探索タイプ (科学技術振興機構) 平成 26 年~27 年度; 研究課題「水溶液中アニオンの高速・高密度貯蔵技術の開発」(代表: 守友 浩) 133 万円
2. 日本板硝子財団 平成 27 年度; 研究課題「配位高分子をベースとしたリチウムおよびナトリウムイオン二次電池材料の開発」(代表: 守友 浩); 研究経費 90 万円 挑戦
3. 新技術開発事業団復興支援特定研究助成 2014 平成 27 年度~28 年「放射性 Cs イオンの高速除去技術と濃縮技術の開発」(代表: 守友 浩) 288 万円
4. 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
5. 人材育成費補助事業 Nanotech Career-up Alliance (CUPAL) Nanotech Research Professional (NRP) 平成 26-27 年 「電池材料の原子レベル構造観測とナノ電池デバイスによる SEM/TEM その場計測」(代表: 小林 航); 1,000 万円/2 年
6. 科研費挑戦的萌芽研究「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」(代表: 小林 航); 260 万円
7. 東燃ゼネラル石油研究奨励・奨学財団/研究奨励助成「イオンモデルに基づいた高性能ナトリウムイオン電池正極材料の開発」(代表: 小林 航); 100 万円

8. 人材育成費補助事業 Nanotech Career-up Alliance (CUPAL) Nanotech Research Professional (NRP) 平成 26 年～28 年; 「ナノポーラス材料におけるイオン分布の空間・時間変化の可視化」 (代表: 柴田恭幸); 研究経費 1000 万円/2 年、就職のため 2016 年 3 月 31 日に中止
9. 平成 27 年度筑波大学研究基盤支援プログラム (A タイプ)、平成 27 年度; 「配向制御したナトリウムイオン二次電池正極薄膜の作成と電気化学特性の評価」 (代表: 柴田恭幸); 研究経費 93 万円

<その他>

1. 太陽電池に関する記事: 日刊工業新聞 2015. 10. 6 「有機太陽電池の発電解明」
2. 熱電変換に関する記事: 日刊工業新聞 2015. 8. 24 「熱電変換セルを安価に」
3. 共同研究に関する記事: 日本経済新聞 2015. 8. 7 「筑波大、共同研究を強化」
4. Rognvaldur Lindal Magnusson 君が IWP2015 においてポスター賞を受賞

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】 量子ホール系カイラルエッジ状態のスピ分解観測 (大平、吉川、野村) [論文1]

最近、量子ホール効果、量子スピンホール効果、量子異常ホール効果等の端状態に多くの注目が集まっている。これらの端状態では、スピン状態に依存したキャリアの輸送等の興味深い現象が起こるとされている。私達は近接場走査型光学顕微鏡を用いてスピン分裂した量子ホール端状態を空間分解して観測を行ってきた。私達が開発した円偏光近接場光学顕微鏡を用いることにより、光によってスピン偏極した電子をナノメートル領域に注入可能であることを初めて実験的に示し、スピン非偏極の非圧縮性液体の帯とスピン分裂した非圧縮性液体の帯の分布を空間マップして示すことに成功したことを昨年度までに報告した。本年度は、スピに依存した圧縮性、非圧縮性液体の帯についてさらに解析を進め、また、手動のベレク補償子に変わって外部コンピュータ制御可能な液晶可変リターダを用いた近接場光プローブからの出射光の偏光状態の制御を行った。

円偏光近接場光学顕微鏡を用いたカイラルエッジ状態の空間分解分光測定法の概略図を図1に示す。従来の方法では Berek 補償子を用いて手動で偏光補正を行っていたため、最適な補正值を求めるためには長時間が必要であった。また、測定中に手動で右・左回り円偏光の切り替えを行っていたため、それぞれの測定間の測定条件の揺らぎが生じていた。そこで、手動のベレク補償子に変わってコンピュータ制御可能な液晶可変リターダと光弾性変調器を用いて、コンピュータ制御による偏光状態制御と円偏光変調を行った。図2に示すように、液晶可変リターダを用いて偏光補正を行い、左円偏光、右円偏光それぞれについて円偏光度 $P=0.90$, 0.84 の結果を得た。さらに、光弾性変調器を液晶可変リターダの前に設置し、近接場光プローブからの出射光を右左円偏光に周波数 100 kHz で変調できていることを示した。以上の結果は、私達の開発した円偏光近接場光学顕微鏡をより簡便に使うことを可能とし、さらに円偏光照射に対する試料の応答をより高い感度で測定することを可能とした。以上の成果は、円偏光近接場光学顕微鏡がより広い用途に対して使われることに寄与すると期待される。

スピに依存した圧縮性、非圧縮性液体の帯について局所スピン密度汎関数法による計算に基づき、さらに解析を進めた。図3に

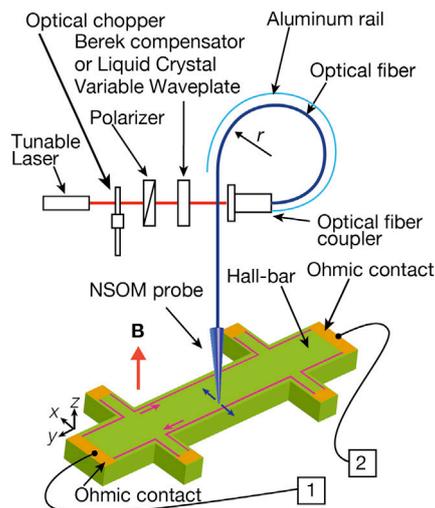


図1: 円偏光照射近接場走査型光学顕微鏡を用いたカイラルエッジ状態の空間分解分光測定法の概略図。近接場光プローブからの出射光の偏光状態の制御にはベレク補償子または液晶可変リターダを用いた。

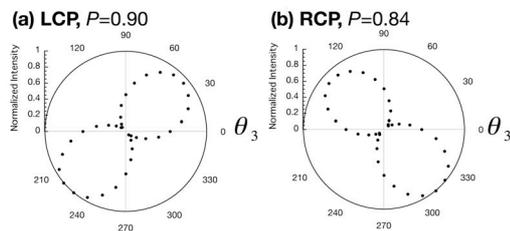


図2: 液晶可変リターダを用いて偏光補正をした場合の近接場光プローブからの出射光の極座標プロット。(a) 左円偏光、(b) 右円偏光を出射した場合。

$$P_{EF}(B, k_y) = \frac{1}{f'(E_F)} \left[\sum_j f'(E_{j,k_y,\uparrow}(B)) - f'(E_{j,k_y,\downarrow}(B)) \right] \quad (1)$$

で定義されるフェルミ準位 (E_F) 近傍のスピンの偏極した電子の占有率の磁場-座標についてのマップ図を示す。 $f(E_F)$ はフェルミ分布関数、 $E_{j,k_y,s}(B)$ は波数 k_y , スピン s の j 番目の電子のエネルギー、 B は磁場である。赤 (青) で示す領域はフェルミ面近傍を上 (下) 向きの電子が占有する圧縮性液体の帯である。白で示す領域は非圧縮性液体の帯の領域を示し、電子占有数 ν に対して、偶数 $\nu < \nu < \text{奇数}$ を満たす場合は幅 $W+$ の広いスピン非偏極非圧縮性液体がバルクとエッジを分け、奇数 $\nu < \nu < \text{偶数}$ を満たす場合は幅 $W-$ の狭いスピン分裂非圧縮性液体がバルクとエッジを分けていることがわかる。これらの非圧縮性液体の帯の位置は閉じ込めポテンシャルの次数によって変化することがわかる。即ち次数の大きい 4 次ベキ関数のより硬い閉じ込めポテンシャルの場合、非圧縮性液体の帯は 2 次ベキ関数の場合と比べてより端に位置することがわかる。このように実験で得られたスピン非偏極の非圧縮性液体の帯とスピン分裂した非圧縮性液体の帯の分布の空間マップ図は、実際に試料の閉じ込めポテンシャルの硬さを反映したものであることが明らかにされた。

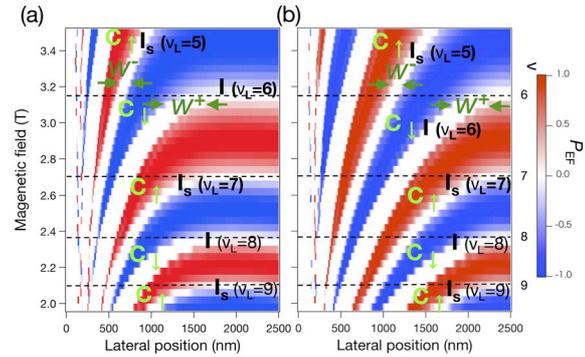


図 3 : 式(1)で定義されるフェルミ準位近傍のスピンの偏極した電子の占有率の磁場-座標についてのマップ図。(a) 4 次ベキ関数、(b) 放物面の閉じ込めポテンシャル関数に対する計算結果。白で示す領域が非圧縮性液体の帯の領域である。

以上のように、本研究によって開発された円偏光近接場光学顕微鏡は、光によってスピン偏極した電子をナノメートル領域に注入可能であることを初めて実験的に示したものであり、その結果、スピン非偏極の非圧縮性液体の帯とスピン分裂した非圧縮性液体の帯の分布を空間マップして示すことに成功した。本研究の成果は、例えば、消費電力を極限まで低減させるとされるスピントロニクス素子やトポロジカル素子中のスピン偏極した電子の流れの空間分布の解明を促進し、ひいてはそれらの素子の開発に大きく貢献するものと考えられる。

本研究は最新の工学分野の研究成果を紹介しているカナダの Advances in Engineering 社のウェブページにて紹介された。本研究は低温物性グループの大塚洋一教授、産業技術総合研究所柏谷聡氏、NTT 物性科学基礎研究所山口真澄氏、田村浩之氏との共同研究である。

【2】 弱結合型 Nb ナノ SQUID 走査型顕微鏡を用いた超伝導タングステンカーバイド膜の評価 (柴田、野村) [論文 2, 3]

昨年度までに、ヒステリシスの小さい弱結合型ニオブナノ超伝導量子干渉計 (SQUID) 走査型顕微鏡の開発に成功したについて報告した。弱結合型 SQUID にしばしば見られる臨界電流-磁場、電流-電圧特性に見られるヒステリシスは走査型顕微鏡の構築に不都合なものであったが、私達は新規の構造の弱結合型ニオブナノ SQUID を開発することによってその弱点を解消することに成功した。本年度は、この Nb 弱結合型ナノ SQUID 顕微鏡を用いた超伝導タングステンカーバイド膜の評価を行った。

集束イオンビーム (FIB) を照射することにより化学気相成長 (CVD) されたタングステンカーバイド膜は超伝導転移温度 T_c が 5.2 K とタングステンバルク結晶の T_c を大き

く上回ることが示され、最近注目を集めている。FIB 直接描画によりマスクレスで超伝導体のナノメートル構造を作製することが可能であるため、FIB-CVD はナノ SQUID を作製するための有力な手法である。しかしながら FIB-CVD で堆積されたタングステンカーバイド膜の超伝導特性には不明な点が多く見られる。そこで FIB-CVD により堆積されたタングステンカーバイド膜の超伝導特性を Nb 弱結合型ナノ SQUID 顕微鏡を用いて評価した。図 4 に測定に用いた $20\ \mu\text{m}$ 角のタングステンカーバイド膜および参照用の Nb/Au 薄膜の走査型電子顕微鏡像を示す。垂直印加磁場 $0.171\ \text{mT}$ 、温度 $4.3\ \text{K}$ において、この試料表面上を Nb 弱結合型ナノ SQUID 顕微鏡により走査して磁束イメージングを行った。その結果、タングステンカーバイド膜上の磁場変化は垂直印加磁場の約 0.9% と微小であることがわかった。この観測された磁場分布をタングステンカーバイド膜および Nb/Au 薄膜上の磁場分布をロンドン方程式を有限要素法により解いて求めた結果と比較した。この結果はタングステンカーバイド膜に渦糸が侵入して磁場遮蔽が不完全となっていることを示唆した。以上のように、私達の開発した Nb 弱結合型ナノ SQUID 顕微鏡は超伝導体薄膜等の評価に対しても有力な手段であることを示された。

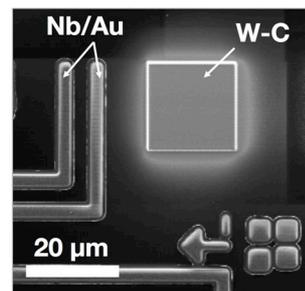


図 4 : Nb/Au ワイヤと FIB-CVD により作製された厚さ $300\ \text{nm}$ 、大きさ $20\ \mu\text{m} \times 20\ \mu\text{m}$ のタングステンカーバイド (W-C) 膜の走査型電子顕微鏡像。

本研究は産業技術総合研究所柏谷聡氏のグループ、東京理科大学教授高柳英明氏のグループとの共同研究である。

【3】ベクトル波形整形波の二次元電子系試料への照射効果（谷川、野村）

近年の超高速パルスレーザー技術の急速な進歩に伴い、光パルス波形の外部制御の可能性が大幅に拡大し、そこから新たな物性研究が展開されつつある。最近、光パルスの直交する二つの方向の電場ベクトルの位相と振幅を各スペクトル成分毎に独立にコントロールして光パルスの時間発展をベクトル的に制御するベクトル波形整形波の発生法が開発され、注目を集めている。この手法により、例えば、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が実証され、さらに波長変換により任意の偏光状態をもつ THz 帯のパルスを、数 THz の振動数の範囲で生成可能であることが示された。このような外部制御された光パルスを二次元電子系、ナノ構造試料等の物性研究に適用し、このような光パルス照射下のみには生じる新たな量子状態の生成を観測することを目標として私達は研究を進めている。本年度、科研費基盤研究の採択を受けて、ベクトル波形整形波の発生とその局所照射のための光学系の開発を開始した。

図 5 に光電場パルス波形整形器を用いて発生させたベクトル波形整形パルスの二次元電子系試料への照射のための光学系の概略図を示す。フェムト秒モード同期チタンサファイアレーザー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。空間光変調器により各波長の二つの直交偏光成分のスペクトル位相がコンピュータにより制御される。各スペクトル成分に対して二次分散、周波数チャープを与えてフェムト秒パルスを時間軸で引き延ばす。

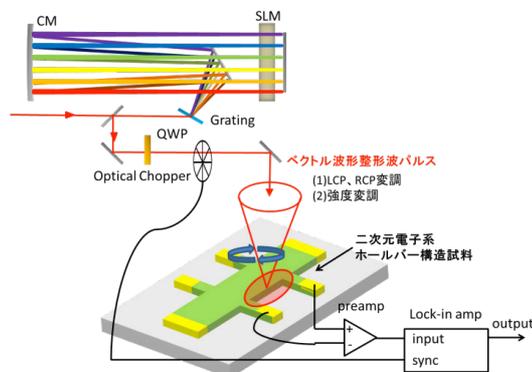


図 5 : 二次元電子系へのベクトル波形整形波照射・測定系の概略図。

さらに、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電場波形を時間軸で平行移動させる。このことにより各偏光成分の瞬時周波数に一定の周波数差 Ω を与えることができる。空間光変調器透過後の光を再度、透過型回折格子を通過してパルスに戻すことにより、ねじれ周波数 Ω 、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。本年度導入した液晶空間光変調器にフェムト秒パルス光を入射して二つの直交する偏光の位相を各波長成分に対して独立に制御するセットアップを構築し、周波数チャープと偏光の乱れを解消することを試みた。また、顕微鏡対物レンズを用いた局所励起のためのシステムを構築した。このベクトル波形整形波発生器を用いて、ねじれ偏光パルス、円偏向 THz 電磁波の二次元電子系、ナノ構造試料等への照射効果の研究を進めていく計画である。

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。

【4】 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、野村）

私達がナノ SQUID 走査型顕微鏡で示してきたように、空間分解して磁場のマッピングを行うことは、試料中の電流密度の可視化、超伝導物質の超伝導特性の評価等の手段として有力な手法である。SQUID は二つの超伝導体のアーム間の量子干渉から磁束を検出するもので、最高の磁束感度を示す素子の一つである。しかしながら図 6 (a) に示すように、空間分解能の向上に伴い磁場感度が低下する傾向にある。最近、ダイヤモンド窒素不純物-欠陥(NV) 中心を用いた磁場測定が注目を集めている。これは、ダイヤモンド中の NV 中心からの発光の 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、高い空間分解能の測定において SQUID より高い磁場感度を示すと見込まれる。図 6 (b) に示すように、負の電荷をもつダイヤモンド NV 中心(NV⁻)の基底状態はスピン 3 重項であること、光照射により $m_s=0$ 準位に電子占有を集中させ状態を“初期化”することが可能であること、というユニークな特徴をもつ。そのため、磁場中においてゼーマン分裂した $m_s=\pm 1$ の準位と $m_s=0$ の準位との間のマイクロ波共鳴を NV からの発光強度により室温において検出可能であるという希有な特徴をもつ。そこで、私達は、ダイヤモンド NV 中心を用いた空間分解高感度磁場測定の研究を開始した。本年度は、結晶場により 0 磁場において $D=2.8970$ GHz に分裂している $m_s=\pm 1$ と $m_s=0$ の準位間にマイクロ波を共鳴させ、NV からの発光強度を観測することにより、励起レーザー強度のゆらぎ、CCD カメラの読み出しノイズ、暗電荷ノイズ、フォトンショットノイズ等のノイズ要因が、測定された磁場に与える不確かさを調べた。さらに、マイクロ波を周波数変調し、変調に同期した NV からの発光を検出することにより、磁場の不確かさを小さくすることが可能であることを示した。本研究手法は、ナノ構造半導体、超伝導体、トポロジカル物質等の物性研究に広く適用可能であると見込まれる。

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。

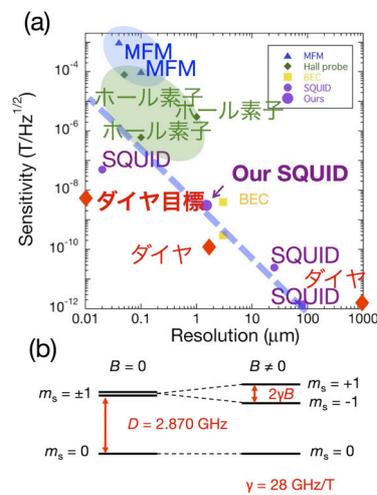


図 6 : (a) 代表的な磁気顕微鏡における感度-空間分解能の関係。(b) 負の電荷をもつダイヤモンド NV 中心(NV⁻)の ³A₂ スピン 3 重項基底状態のエネルギー準位。

< 論文 >

1. Shintaro Nomura, Syuhei Mamyouda, Hironori Ito, Yusuke Shibata, Tomoya Ohira, Luno Yoshikawa, Youiti Ootuka, Satoshi Kashiwaya, Masumi Yamaguchi, Hiroyuki Tamura, Tatsushi Akazaki, “Circularly Polarized Near-field Scanning Optical Microscope for Investigations of Edge States of a Two-dimensional Electron System”, *Appl. Phys. A* **121**, (4), 1341-1345 (2015).
2. Yusuke Shibata, Shintaro Nomura, Hiromi Kashiwaya, Satoshi Kashiwaya, Ryosuke Ishiguro, and Hideaki Takayanagi, “Imaging of current density distributions with a Nb weak-link scanning nano-SQUID microscope”, *Sci. Rep.* **5**, 15097/1- 15097/10 (2015).
3. Yusuke Shibata, Shintaro Nomura, Ryosuke Ishiguro, Hiromi Kashiwaya, Satoshi Kashiwaya, Yusuke Nago and Hideaki Takayanagi, “Current and field imaging in tungsten-carbide films by scanning nano-SQUID microscope” (submitted).
4. Y. Nago, T. Shinozaki, S. Tsuchiya, R. Ishiguro, H. Kashiwaya, S. Kashiwaya, S. Nomura, K. Kono, H. Takayanagi, and Y. Maeno, “Development of Magnetization Measurement Devices Using Micro-dc-SQUIDs and a Sr_2RuO_4 Microplate”, *J. Low. Temp. Phys.*, **183**, 292-299 (2016).
5. Daisuke Sakuma, Tomoya Shinozaki, Yusuke Nago, Ryosuke Ishiguro, Satoshi Kashiwaya, Shintaro Nomura, Kimitoshi Kono, Hideaki Takayanagi, "Development of Two-Dimensional Micro-SQUID Array for Measurements of Magnetization Spatial Distribution", *J. Low Temp. Phys.*, **183**, 300-306 (2016).

< 学位論文 >

数理物質科学研究科博士論文 (2016年3月)

1. 柴田祐輔: “Weak-link Nb-based scanning nano-SQUID microscope system for local magnetic flux imaging” (「弱結合型ニオブナノ超伝導量子干渉計走査型顕微鏡による局所磁束イメージング」)

数理物質科学研究科物理学専攻修士論文 (2016年3月)

1. 大平 智也: 「液晶可変リターダを用いた近接場光プローブの偏光補正と円偏光変調」

< 国際会議 >

1. S. Nomura, S. Mamyouda, H. Ito, Y. Shibata, T. Ohira, L. Yoshikawa, Y. Ootuka, S. Kashiwaya, M. Yamaguchi, H. Tamura and T. Akazaki, “Circularly Polarized Near-field Scanning Optical Microscope for Investigations of Edge States of a Two-dimensional Electron Gas”, The 10th Asia-Pacific Conference on Near-field Optics, (Hakodate Research Center for Fisheries and Oceans, July 7-10, 2015).
2. Y. Shibata, Y. Oshima, S. Nomura, H. Kashiwaya, S. Kashiwaya, R. Ishiguro, H. Takayanagi, “Weak-link Nb Based Scanning Nano-SQUIDs for Imaging Current Densities in a Two-dimensional Layer”, 21st International Conference on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems (EP2DS-21) (Sendai International Center, July 26 - 31, 2015).
3. H. Watanabe, C. Tsukamoto, and S. Nomura, “High photoresponsivity MoS_2 photodetectors by chemical doping technique”, 21st International Conference on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems (EP2DS-21) (Sendai International Center, July 26 - 31, 2015).
4. Y. Nago, T. Shinozaki, T. Sato, D. Sakuma, R. Ishiguro, H. Kashiwaya, S. Kashiwaya, S. Nomura, K. Kono, Y. Maeno, and H. Takayanagi, “Development of Magnetization Measurement Device using Micro-SQUIDs and a Mesoscopic Sr_2RuO_4 Superconductor”, 2015 International Symposium on Quantum Fluids and Solids, (Conference Event Center Niagara Falls, NY, USA, August 9-15, 2015).
5. D. Sakuma, T. Shinozaki, Y. Nago, R. Ishiguro, S. Kashiwaya, S. Nomura, K. Kono, Y. Maeno, and H. Takayanagi, “Development of Micro-SQUID Array for Simultaneous Measurements of Magnetization Spatial Distribution”, 2015 International Symposium on Quantum Fluids and Solids, (Conference Event Center Niagara Falls, NY, USA, August 9-15, 2015).

6. A. Saito, R. Kimura, H. Watanabe, and S. Nomura, “Photoconductivity measurements of back-gated MoS2 photodetectors”, Interdisciplinary Workshop on Science and Patents (IWP) 2015, (Univ. Tsukuba, Sep. 4, 2015).
7. S. Nomura, S. Mamyouda, H. Ito, Y. Shibata, Y. Ootuka, S. Kashiwaya, M. Yamaguchi, H. Tamura, and T. Akazaki, “Spin-split and spin-unpolarized incompressible strips revealed by optical local spin injection”, International Symposium on Advanced Nanodevices and Nanotechnology, (Waikoloa, Hawaii, USA, Nov. 29-Dec. 4, 2015).

<講演>

1. 谷下 智紀、永合 祐輔、石黒 亮輔、渡辺 英一郎、大里 啓孝、津谷 大樹、柏谷 聡、柏谷 裕美、野村 晋太郎、河野 公俊、「電子ビーム描画装置を用いて Sr₂RuO₄-Ru共晶中に作製したNb/Ru/Sr₂RuO₄微小接合を持つdc-SQUIDの開発」2015年秋季学術講演会(名古屋市、名古屋国際会議場、2015年9月13日)
2. 佐久間大輔、篠崎智也、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、「Sr₂RuO₄-Ru共晶中に誘起される磁束量子渦の観測」日本物理学会秋季大会、(吹田市、関西大学、2015年9月16日)
3. 柴田祐輔、野村晋太郎、柏谷裕美、柏谷聡、石黒亮輔、永合祐輔、高柳英明、「集束イオンビームにより堆積されたタングステンカーバイド膜まわりの磁束イメージング」日本物理学会秋季大会、(吹田市、関西大学、2015年9月17日)
4. 吉川ルノ、大平智也、大塚洋一、野村晋太郎、「液晶可変リターダを用いた近接場光プローブによる円偏光照射」日本物理学会秋季大会(吹田市、関西大学、2015年9月18日)
5. 齋藤明央、渡邊寛之、野村晋太郎、「ゲート付き遷移金属ダイカルコゲナイド薄膜の光伝導特性」日本物理学会秋季大会(吹田市、関西大学、2015年9月18日)
6. 野村晋太郎「光誘起端状態の検出に向けて」東北大学電気通信研究所共同プロジェクト研究会(宮城県黒川郡大和町、ベルサンピアみやぎ泉、2015年10月8日)
7. (招待講演) 野村晋太郎, ” Observations of Chiral Edge States by Near-field Scanning Optical Microscopy” 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」第1回領域研究会、(京都市、京都大学芝蘭会館、2015年12月13日)
8. 三浦幸浩、柏谷聡、野村 晋太郎、「ダイヤモンドNV中心を用いた磁場測定の不確かさの要因について」日本物理学会第71回年次大会(仙台市、東北学院大学、2016年3月21日)
9. 濱崎拓也、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、「マイクロdc-SQUIDを用いたメゾスコピック超伝導Sr₂RuO₄における半整数磁束量子渦の探索」日本物理学会第71回年次大会(仙台市、東北学院大学、2016年3月22日)
10. 佐久間大輔、濱崎拓也、永合祐輔、濱崎拓也、石黒亮輔、柏谷聡、野村晋太郎、河野公俊、前野悦輝、高柳英明、「Sr₂RuO₄-Ru共晶中に誘起される磁束量子渦の観測II」日本物理学会第71回年次大会(仙台市、東北学院大学、2016年3月22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27年度: 直接経費 6,300,000円(研究代表者: 野村 晋太郎)

2. 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 27 年度：直接経費 14,500,000 円（分担金 3,000,000 円）（研究代表者：三沢 和彦）
3. 科学研究費 挑戦的萌芽研究 「ベクトル整形パルス励起による端電流制御」 研究課題番号：26610079，平成 27 年度：直接経費 1,200,000 円（研究代表者：野村 晋太郎）

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	森下将史
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	青木 仁、伊藤 優、田中宏和、平出璃音可 (数理物質科学研究科物理学専攻 修士課程2年)
	青沼 快、柴田倭宏、鎌水勝秀 (同修士課程1年)
卒業研究	園田大樹、樋口翔馬、堀江彩叶 (物理学類4年)

【1】 グラフェンのひずみ効果

炭素の2次元原子層膜であるグラフェンには、格子ひずみによって実効的なゲージ場（ベクトルポテンシャル・スカラーポテンシャル）が生じるという特殊な性質がある。その結果生じる擬似磁場は時間反転対称性を有する点で通常の磁場とは異なるので、格子ひずみによって様々な新規物理現象が起こることが期待される。また、格子ひずみをうまく利用するとグラフェンに伝導ギャップを誘起して電子デバイスに応用することも可能となる。我々は、ひずみに起因する物理現象の解明と電子デバイス応用のための基盤構築を目指して、以下の研究を行った。

(1) ラマン分光におけるグラフェンの格子ひずみと電荷ドーピングの影響の分離

グラフェンの格子ひずみ量を評価するための最も有効な方法はラマン分光である。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はひずみによって変化する。ただし、G、2Dバンドのピークシフトは電荷ドーピングによっても引き起こされるので、ひずみ量を正確に評価するためには、両者の影響を分離することが必要となる。2013年に発表された先行論文では、G、2Dバンドのピークシフト量の比が、格子ひずみと電荷ドーピングで異なることが報告されている。ただし、用いられている励起レーザー波長は我々の波長とは異なるため、先行研究の結果をそのまま我々の実験に適用できるとは限らない。そこで、我々のラマン分光装置を用いて同様の実験を行い、1) ひずみ、電荷ドーピングが無い場合のG、2Dバンドのピーク波数、2) 格子ひずみによるG、2Dバンドのピークシフト量の比、を導出した。これにより、我々の装置を用いて、格子ひずみ量を正確に評価することが可能となった。

(2) グラフェンにおける局所1軸ひずみによる伝導ギャップの観測

グラフェンに局所的に1軸ひずみを導入すると、グラフェンに垂直方向に擬似磁場が発生し、伝導電子はサイクロトロン運動をしますので、低キャリア密度領域で伝導ギャップが生じる。ひずみによる伝導ギャップ生成は、グラフェンの電子デバイス応用のためには重要であるが、ひずみの制御が困難であるので、これまで観測されたことがなかった。我々は、4枚の六方晶窒化ボロン(hBN)薄膜(うち2枚は微細加工済み)とグラフェンの積層構造(図1)を作ることによってグラフェンに1軸ひずみを導入し、その電気伝導を測定した。ひずみの導入はラマン分光によって確認

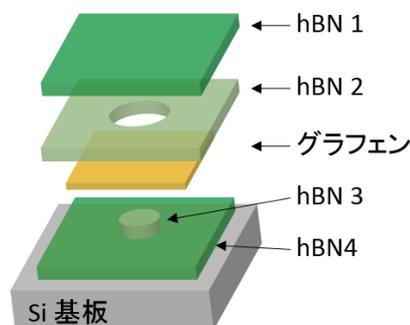


図1：グラフェンへの局所ひずみの導入のための試料構造。

した。ひずみを含む電流経路と含まない電流経路の電気伝導を比較すると、後者では、金属的な電気伝導が見られたのに対し、前者では、熱活性化型の温度依存性をもつ半導体的な電気伝導が観測された。ギャップの値 (3.2 meV) はひずみ量から求めた値とコンシステントであることから、局所1軸ひずみに起因する伝導ギャップをはじめて観測できたと考えられる。本研究で用いたhBN膜は、谷口尚博士、渡邊賢司博士 (NIMS) から提供されたものである。

(3) 1軸ひずみ周期構造によるグラフェンの伝導ギャップの観測

グラフェンに周期的なひずみ (ひずみ超格子) を導入するとバンドギャップが生じることが理論予測されている。これまでに、周期凹凸構造のある基板に載せたグラフェンに対する局所トンネル分光でバンドギャップを観測したとの報告はあるが、電界効果トランジスタ構造において、ゲート挿引によってバンドギャップを確認するのは困難であるとされてきた。これは、電極形成プロセスでひずみが緩和されるためである。我々は、試料作製プロセスを工夫し、周期1軸ひずみのあるグラフェンの電界効果トランジスタ構造を作製することに成功した。ひずみの導入はラマン分光によって確認した。ゲート挿引における最小コンダクタンスの温度依存性では熱活性化型の振る舞いが観測され、低温の電流電圧特性 (図2) では原点周辺で高抵抗領域が現れた。それぞれから見積もった伝導ギャップの値はほぼ一致し、約2 meVであった。このように、周期1軸ひずみによる伝導ギャップの観測にはじめて成功した。今後はひずみの周期や大きさを変化させることによって、伝導ギャップの増大を図りたい。

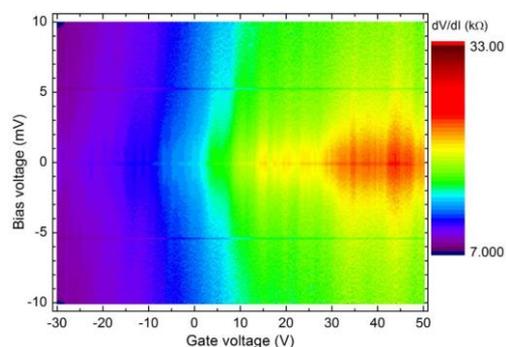


図2: 微分抵抗のゲート電圧、バイアス電圧依存性。

(4) チャネル幅を変化させた架橋グラフェンFETの形状最適化

グラフェンにおけるひずみ誘起局所磁場の大きさは、ひずみの空間変化量に依存する。ひずみの空間変化を集中化させるためには、幅が非一様なグラフェンに張力を加えることが有効であると考え、様々な形状を持つグラフェンに張力を印加した場合のベクトルポテンシャルの空間分布を数値計算によって求め、最適形状を検討した。本研究は、林正彦教授 (秋田大学) との共同研究である。

(5) ナノプローバを利用したグラフェンへの局所ひずみの印加

グラフェンに局所ひずみを導入するために、幅の変化したグラフェンの架橋構造を作製し、産業技術総合研究所の多探針ナノプローバを用いてグラフェンに張力を印加することを試みた。絶縁体を全面に蒸着した探針を用いた場合には、宙に浮いたグラフェン領域を押すことができたがすぐにグラフェン膜が破れた。そこで、図3のように、探針の先端に棒状の金属を取り付けた。この場合には、広範囲で架橋部分を押すことができた。今後、電気伝導の同時計測を行いたいと考えている。

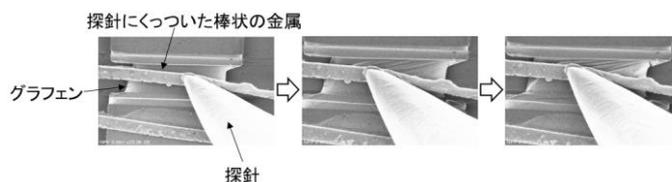


図3: 棒状の金属がついた探針によるひずみの導入。

(6) ひずみ量を変化させることのできる架橋グラフェン構造の作製

単一のグラフェン膜において様々な特性の格子ひずみ量依存性を調べるために、Si 基板のナノギャップ上にグラフェンを転写し、 piezoelectric アクチュエータを用いてギャップの大きさを変化させることを計画している。今年度は、牧英之准教授（慶応義塾大）の協力のもと、Si 基板のナノギャップ構造を作製し、ギャップの大きさを piezoelectric アクチュエータによって制御することに成功した（図4）。今後はギャップ上にグラフェンを転写し、ラマン分光、電気伝導測定を行う予定である。

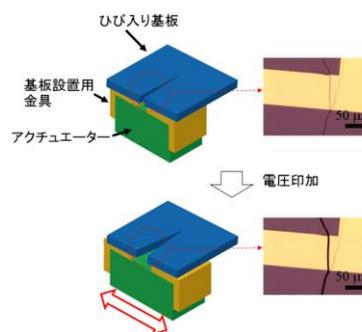


図4：Si 基板のギャップの制御。

(7) レジストナノ柱構造を用いたグラフェンへのひずみ導入

グラフェンと基板の間にレジストでできたナノ柱構造を挿入すると、柱からの距離が大きくなるほどラマン 2D バンドのシフト量が大きくなり、グラフェンのひずみが増大しているように見えることが昨年度までの研究でわかっている。これは、柱の直上でひずみが最大になるという直感的な予想や数値計算結果とは反するものである。また、2D バンドのシフトは基板からの電荷ドーピングに起因している可能性もある。そこで、グラフェンと基板の間に2本のナノ柱構造を挿入した場合の、ひずみの空間分布をラマン分光(Gバンドと2Dバンドのシフト量の比)によって調べた。その結果、1)ナノ柱構造から遠ざかるほどひずみ量が増大すること、2)ナノ柱構造の間隔が大きくなるほど、2本の柱の中間部のひずみ量が大きくなること、3)柱直上、柱周辺のひずみ量は柱の間隔には依存しないこと、が明らかになった。

【 2 】 グラフェンの超伝導近接効果

グラフェンと超伝導体の界面では、グラフェンのバンド構造を反映して、特殊なアンドレーエフ反射（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が、現在まで実験における確認には至っていない。我々は、その原因が超伝導体からグラフェンへの局所電荷ドーピングであると考え、金属からグラフェンへの電荷ドーピングの詳細を検討するとともに、金属接続の影響を除去する方法を開発した。

(1) グラフェンへの金属電極接続の影響の解明とその除去手法の開発

グラフェンに金属を接続すると、両者の仕事関数の違いに起因して、金属からグラフェンへキャリア（電子あるいはホール）がドーピングされる。その結果、接合近傍のグラフェン領域のキャリア密度は接合から離れたグラフェン領域のキャリア密度とは異なる値をとり、ディラック点に対応するエネルギー E_D は空間的に変化することとなる。このことに起因して、短チャネル長のグラフェン試料の抵抗のゲート電圧依存性にはピークが2つあらわれることを昨年度までの研究で明らかにした。今年度はさまざまな電極金属について測定を行い、2つのディラック点のゲート電圧差と電極（接着層）の金属の仕事関数との関係を調べた。その結果（図5）、(1) グラフェンの実効的な仕事関数が4.93 eVであること、(2) 2つのディラック点のゲート電圧差は接続金属とグ

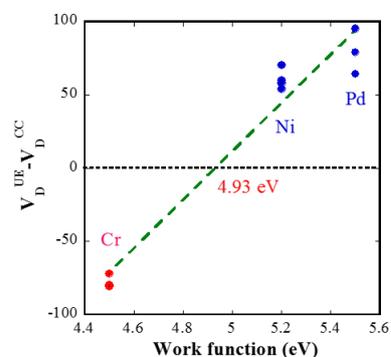


図5：接続金属の仕事関数と2つのディラック点のゲート電圧差の関係。

ラフェンの仕事関数差に比例し、ゲート絶縁膜として厚さ 300 nm の SiO_2 を用いた場合、接続金属とラフェンの仕事関数が 0.1 eV 異なると、2つのディラック点のゲート電圧の差は約 19V となることが明らかになった。

電極金属からの電荷ドーピングを軽減するためには、界面への多層ラフェンの挿入が有効であることを提案し、厚さ 6 nm の多層ラフェンの有効性を昨年度示した。今年は、3 nm の多層ラフェンについても検証し、電荷ドーピングが除去されていることを確認した。

(2) グラフェン/超伝導層状カルコゲナイド接合の作製

超伝導体/グラフェン接合で起こる特殊なアンドレーエフ反射を観測するためには、1) グラフェン上の荷電不純物密度の低減、2) 高い臨界温度を持つ超伝導体の使用、3) 超伝導体からの電荷ドーピングの軽減が必要である。このような接合を実現するためには、層状超伝導体が都合がよいと考え、界面に多層ラフェンを挿入した、グラフェン/セレン化ニオブウム (NbSe_2) 接合を乾式転写法とエッジコンタクト法を用いて作製した。ここで、 NbSe_2 は層状カルコゲナイド超伝導体のうちで最も臨界温度が高い。電気伝導測定の結果、接合界面の抵抗が高く、超伝導近接効果は観測されなかった。この原因は、大気暴露による NbSe_2 表面の劣化である可能性が高い。そこで現在、不活性気体中での試料を作製する準備を行っている。本研究は、上野啓司教授 (埼玉大)、谷口尚博士、渡邊賢司博士 (NIMS) との共同研究である。

【 3 】 SiC 上に形成した新型グラフェンナノリボン (GNR) の電気伝導

グラフェンにバンドギャップを導入するための有力な方法のひとつに、グラフェンの細線化 (ナノリボン化) がある。従来、GNR はグラフェンを切断することによって得られてきたが、エッジの原子配列の乱れによってキャリアが局在化して量子ドットが形成され、移動度が大幅に低減するという問題があった。これに対し、九州大の田中らによって微傾斜 SiC 上に形成された GNR では、エッジが連続的に絶縁体であるバッファ層につながるために、キャリアの局在が抑制される可能性がある。このことを検証するために、田中らの新型 GNR の電気伝導の測定を行った。微細加工には、筑波大学微細加工プラットフォームのマスクレス露光機を使用した。電気伝導測定の結果、一部の試料では、コンダクタンスの温度依存は 2 次元弱局在の振舞いを示し、量子ドットの形成を否定するものであった。これより、この新型 GNR では、従来の GNR の持つエッジ構造の乱れに関する欠点を克服できることが示唆された。本研究は、田中悟教授 (九州大)、小森文夫教授 (東京大)、岡田晋教授 (筑波大) との共同研究である。

【 4 】 表面修飾した CVD グラフェンの磁気抵抗効果

スパッタリングや化学反応、化学吸着、物理吸着などによるグラフェン結晶の改変や修飾はグラフェンの物性制御や新しい機能の付与のための有力な方法である。たとえば、グラフェンに蒸着された金属は電荷移動によってグラフェンのキャリア密度を変えると共に電子の散乱原因ともなる。第 1 原理計算によれば、グラフェンとの相互作用の弱い金や銀上ではグラフェンに特有な線形分散関係が保存されるのに対して、多くの遷移金属で化学吸着の結果分散関係にはギャップが生じるとされている。この場合キャリア散乱は通常のクーロンポテンシャルではなく、より近距離の不純物ポテンシャルが支配的となるであろう。このような散乱ポテンシャルの違いを調べるために、低温での磁気抵抗測定を行った。グラフェンは低温低磁場で弱局在効果による顕著な磁気抵抗を示し、その解析によって位相緩和時間や谷間散乱時間など電子の散乱に関する新たな情報が得られる。大きな波数変化を伴う谷間散乱は近距離ポテンシャルでは起きるもののクーロンポテンシャルでは起きにくい。

試料は CVD によって製作され Si 基板に転写されたグラフェンであり、これに極微量の Ni を真空

蒸着した。CVD グラフェンは移動度がやや小さいものの、大面積であり試料作製が容易であるとともに、コンダクタンス揺らぎ(UCF)の影響を受けないという利点がある。低温の磁気抵抗は弱磁場で負であり、約 1T で抵抗は極小となり、さらに高磁場では正の磁気抵抗となった。約 1T までの磁場領域の磁気抵抗は弱局在理論でフィッティング可能であり、それによって位相緩和時間と谷間散乱時間を決定できた。今後は希釈冷凍温度域での測定を行うと共に、様々な金属による表面修飾グラフェンにおける各緩和時間の相違について調べる。

【 5 】超伝導微粒子-グラフェン系における超伝導転移

むき出しの単原子層導体であり電界効果によって容易に伝導を制御することのできるグラフェンは 2 次元系研究に新しい手段を提供してくれる。CVD グラフェンにインジウムを約 10nm 蒸着し、その電気伝導を液体ヘリウム温度で測定した。低融点金属であるインジウムはグラフェン上で直径 50nm 程度の微粒子を形成するため、3.4K 以下では超伝導インジウム微粒子がグラフェンを介してつながった二次元ランダム超伝導ネットワークを形成する。図 6 はこの系の電気抵抗の温度変化であり、3.4K 付近での各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) 転移として理解することができる。ゲート電圧によるグラフェン抵抗の変化によって BKT 転移温度は変化する。さらにグラフェンに短時間酸素プラズマ処理を施し高抵抗化することによって超伝導・絶縁体転移も観測できた。

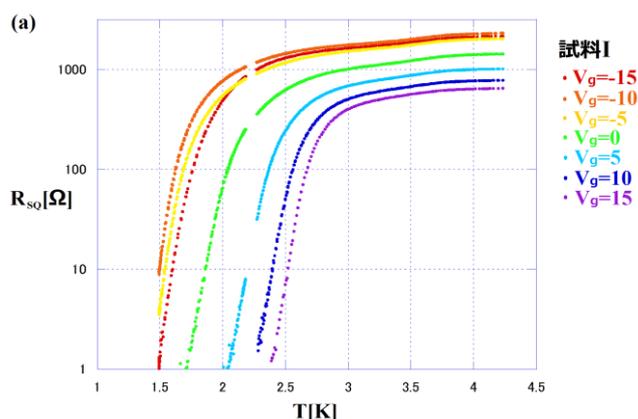


図 6 : インジウムを蒸着した CVD グラフェンの電気抵抗

【 6 】金属ナノコンタクトにおける熱現象

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。このような系でのエネルギー散逸や熱伝導について調べるために機械破断法(MBJ) 試料に小型の抵抗温度計を取り付け、極低温で実験を行っている。

図 7 は作製した MBJ 試料の電子顕微鏡写真である。破断接合を形成するアルミニウム架橋細線の基部に小型の AuGe 抵抗温度計を取り付けることに成功した。希釈冷凍機で 50mK 以下まで冷却し、MBJ の破断・再結合を行い、様々な接合状態における MBJ の電流・電圧特性と二つの AuGe センサー抵抗の同時測定を行った。接合に流すバイアス電流を増やすと両端の温度計が示す温度は敏感に変化し、ジュール損に対する温度計温度の上昇の割合は約 50K/ μ W であった。これはこれまでに報告されているナノ接合における局所温度測定の結果に比べ 2 桁から 3 桁大きな値である。

Au のナノコンタクトにおいては、温度上昇が電流の向きに依存すること、つまりジュール損による発熱が電流の上流と下流で異なるとの実験報告があるが、Al-MBJ では温度上昇は電流の極性には

よらず対称であった。ただし少数ではあるが、低バイアスでは対称であるものも、バイアスを増すと非対称になるケース見られた。これがどのような場合に生じるかは今後確認を行いたい。

IV 特性に見られる A1 接合部の超伝導・常伝導転移による構造を本試料でも確認した、電子温度が T_c に達する時の格子温度の情報を得た。さらに二つの AuGe 抵抗の一方をヒーターとし、他方を温度計として使用することによって、ナノコンタクトの熱伝達の実験も行った。

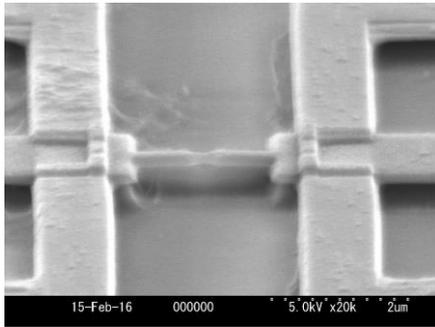


図 7 : AuGe 抵抗温度計付き A1-MBJ 試料の走査型電子顕微鏡写真

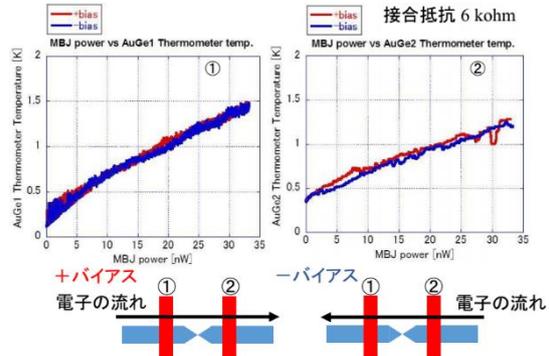


図 8 : 温度上昇のバイアス依存性

【 7 】 極低温磁化測定装置の開発

希釈冷凍温度域の汎用 SQUID 磁化測定装置の開発を始めた。市販の SQUID 磁化測定装置では到達できない 1K 以下の極低温領域での測定を行うことが目標である。技術的な課題は磁化の絶対値を知るために、試料を極低温のまま動かす事にある。使用の簡便性を保持しながらこれを実現するために、以前に開発したトップロード式簡易希釈冷凍機をベースにした冷凍機を設計し、研究基盤総合センター工作部門に部品の製作を依頼した。

【 8 】 グラファイト上ヘリウム単原子層薄膜における 1 次元 Fermi 流体 と 2 次元 Dirac 粒子系 (森下)

原子レベルで平坦なグラファイト表面に吸着した単原子層ヘリウム薄膜は、理想的な 2 次元系を与える。この系ではヘリウムの高い量子性のために、他の吸着系には見られない特異な吸着構造や、それを反映した物性が期待できる。測定手段に乏しく、ヘリウム³(³He) 薄膜に比べ情報が著しく不足していたヘリウム⁴(⁴He) 薄膜について、少量の ³He を加えて熱容量測定を行うことにより、この系の情報が得られるようになり、その中で特異な現象が観測されている。

単原子層ヘリウム薄膜は、大きな零点振動を反映し、低面密度領域では流体として振る舞う。ここから面密度を増していくと、ヘリウム原子間のハードコア斥力と、吸着ポテンシャルの凹凸との協力により、ヘリウム原子は局在し、ヘリウム薄膜はグラファイト基盤に整合な $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ 相に固化する。³He 薄膜では、ここから面密度を増しても固体として振る舞うことが確認されており、⁴He 薄膜も同様と考えられてきた。しかし、上記の ⁴He に少量の ³He を加えて行った熱容量測定は異なる結果を与えた。測定される熱容量は、³He の運動を反映したものである。流体相では 2 次元 Fermi 流体の熱容量を与え、 $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ 相では ³He が局在し、熱容量は消失する。ところが、さらに面密度を増すと再び熱容量が有限となり、³He が運動していること、即ち、面密度の増大により ⁴He 薄膜が融解していることを示唆する。しかし、この面密度領域のうち、比較的高面密度の領域で、熱容量は温度の自乗に比例しており、⁴He 薄膜が一様に融解し、³He 原子が 2 次元 Fermi 流体として振る舞っているとしたのでは、観測結果を説明できない。この面密度領域で ⁴He 薄膜は、domain wall 構造と呼ばれる、 $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ 相のドメインの境界が規則的に配列する吸着構造を

とる。ドメイン境界では、ヘリウム原子は吸着ポテンシャルの極小からはずれた場所に吸着しており、ヘリウム原子を局在化させる働きは弱くなっており、この境界部分のみが融解している可能性が指摘できる。domain wall 構造には、境界が1次元的に配列する striped 構造と、蜂の巣状に配列する honeycomb 構造がある。 ^3He 原子はこの中を運動するため、striped 構造では1次元 Fermi 流体として、honeycomb 構造では2次元 Dirac 粒子系として振る舞うことが期待される。2次元 Dirac 粒子系の熱容量は温度の自乗に比例するため、観測された異常な温度依存性も説明される。

この現象について、さらなる測定データの収集とともに、上記モデルの正当性の検証を行っている。

domain wall 構造は、比較的low面密度領域で striped、高面密度領域で honeycomb となるので、熱容量の温度依存性が面密度の増大とともに線形から自乗に移行することは、上記モデルと符合する。また、温度に線形な熱容量の係数 γ_1 の面密度依存性も、1次元 Fermi 流体の熱容量と定量的に矛盾しないことも確認された。高温極限に目を転ずると、low面密度領域では、熱容量は $\frac{1}{2}N_3k_B$ (N_3 : ^3He の原子数) に漸近し、1次元系であることを強く示唆する。一方、高面密度領域では N_3k_B に漸近し、2次元系であることを示すが、2次元 Dirac 粒子系で期待される $2N_3k_B$ には漸近しない。これについては熱的 de Broglie 波長が、測定の高温極限では honeycomb 構造の周期長を下回り、Dirac 粒子系の性質を失っているものとして説明される。幾つかの面密度では、温度の上昇とともに一旦 N_3k_B を越える熱容量が現れたのち、 N_3k_B に漸近している。単純な2次元系ではこのようなオーバーシュートは説明できず、Dirac 粒子系形成の傍証となっている。

2次元 Dirac 粒子系では Fermi 面近傍で線形分散となっており、ここでは全ての粒子の速さは一定となる特徴がある。この系の熱容量の T^2 の係数は、この速さの自乗に反比例するが、粒子速度は系の状況に依存するため、測定された熱容量を2次元 Dirac 粒子系の熱容量と定量的に比較することはできない。逆に、測定された熱容量から見積もられる ^3He 原子の速さ v_3 を面密度の関数として図9に示す。8.4 nm^2 近傍で最大値をとるが、この面密度は 4×4 という周期性をもつ honeycomb 構造の面密度に一致する。 4×4 構造は周期長が最も短く、結晶子の大きさが限られた基盤上で honeycomb 構造が非常によく定義される。また、面密度の増大とともに honeycomb 構造は2つの異なる周期長が混在しながら構造を変化させていくが、8.4 nm^2 では 4×4 の周期性のみとなる。即ち、ここでは規則正しい honeycomb 構造が良く定義されていることとなり、 v_3 が最大値をとる要因となっていると考えることができる。一方、この面密度近傍で v_3 は 160 m/s 程度の値をもつ。 ^3He 薄膜の非常に低面密度の領域で現れる流体相での Fermi 速度は、最大で 50 m/s 程度である。Fermi 分布している速度の最大値がこの値であるのに対して、Dirac 粒子系が実現しているとする、全ての ^3He 原子が非常に大きな速さで運動していることになり、特異な系となっている。また、データ数が少なく確定的ではないが、 ^3He の速度はこの値で頭打ちになっているようにも見える。 ^4He の超流動臨界速度がこの値を規定している可能性が考えられる。超流動臨界速度は従来、渦糸の生成・成長で規定され、数 10 cm/s 程度と3桁近く小さな値となっていたが、ここでは Landau 条件、即ち準粒子生成による臨界速度が初めて観測された可能性もある。

特異な現象が観測されているが、流動性についての動的応答測定等の直接的検証と、domain wall が流動性をもつ原因についての理論的検証が必要となっている。

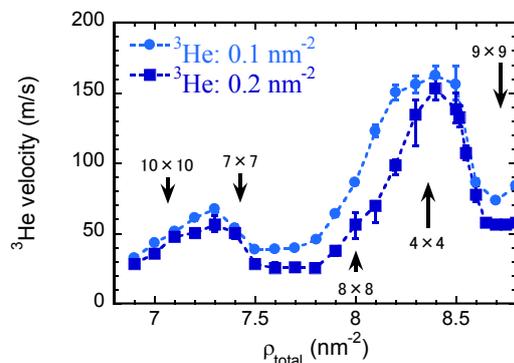


図9. ^4He 薄膜中で Dirac 粒子として振る舞う ^3He の速さの面密度変化。

<学位論文>

(修士論文)

- 伊藤 優：グラフェンの電気伝導に対する電極接続の影響の評価（数理物質科学研究科、2015年9月）
青木 仁：金属で表面修飾したグラフェンの電気伝導（数理物質科学研究科、2016年3月）
田中宏和：SiC ナノ構造上グラフェンナノリボンの電気伝導（数理物質科学研究科、2016年3月）
平出璃音可：グラフェンへの周期一軸ひずみの導入と電気伝導測定（数理物質科学研究科、2016年3月）

(卒業論文)

- 園田大樹：電極界面に多層グラフェンを挿入したグラフェン電界効果トランジスタ構造の作製と電気伝導評価（物理学類、2016年3月）
樋口翔馬：グラフェンの電気伝導における電極接続の影響（物理学類、2016年3月）
堀江彩叶：グラフェン上インジウム微粒子膜の超伝導転移（物理学類、2016年3月）

<論文>

1. S. Nomura, S. Mamyouda, H. Ito, Y. Shibata, T. Ohira, L. Yoshikawa, Y. Ootuka, S. Kashiwaya, M. Yamaguchi, H. Tamura, and T. Akazaki, “Circularly polarized near-field scanning optical microscope for investigations of edge states of a two-dimensional electron system”, *Appl. Phys. A – Mater. Sci. & Proc.* **121**, 1341-1345 (2015).
2. S. Mamyouda, H. Ito, Y. Shibata, S. Kashiwaya, M. Yamaguchi, T. Akazaki, H. Tamura, Y. Ootuka and S. Nomura, “Circularly Polarized Near-Field Optical Mapping of Spin-Resolved Quantum Hall Chiral Edge States”, *Nano Lett.* **15**, 2417-2421 (2015).
3. M. Morishita: “Heat Capacity of Dilute ^3He - ^4He Monolayer Films”, *J. Low Temp. Phys.* **183**, 245-250 (2016).

<著書>

1. 神田晶申：「超伝導層状カルコゲナイド／グラフェン接合」、『カルコゲナイド系層状物質の最新研究』（上野啓司、安藤淳、島田敏宏編）第6章、シーエムシー出版（印刷中）
2. A. Kanda, H. Tomori: “Experimental approaches to graphene electron transport for device applications”, in “Physics and Chemistry of Graphene: Nanographene to Graphene, 2nd edition” (edited by T. Enoki, T. Ando), Pan Stanford Publishing, in press.

<講演>

国際会議

1. Kanda, K. Katakura, Y. Ito, Y. Ootuka, and H. Tomori, Influence of Metal Contacts on Graphene Transport Characteristics and Its Reduction with Nano-carbon Interfacial Layer, 21st International Conference on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems, 仙台国際センター（宮城県仙台市）, July 27, 2015
2. R. Hiraide, H. Tomori, Y. Ootuka, and A. Kanda, Formation of Graphene with Controlled Uniaxial Local Strain and Its Electron Transport, 21st International Conference on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems, 仙台国際センター（宮城県仙台市）, July 30, 2015
3. H. Tanaka, K. Fukuma, K. Morita, S. Hayashi, T. Kajiwara, A. Visikovskiy, T. Iimori, K. Ienaga,

- K. Yaji, K. Nakatsuji, F. Komori, N. T. Cuong, S. Okada, S. Tanaka, and A. Kanda, Electron Transport in Graphene Nanoribbons Placed on a Corrugated SiC Surface, 21st International Conference on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems, 仙台国際センター (宮城県仙台市) , July 30, 2015
4. S. Tanaka, K. Fukuma, K. Morita, S. Hayashi, T. Kajiwara, A. Visikovskiy, T. Iimori, K. Ienaga, K. Yaji, K. Nakatsuji, F. Komori, H. Tanaka, A. Kanda, N. T. Cuong, and S. Okada, Quasi-one-dimensional graphene nanostructure on corrugated SiC surfaces, 17th International Conference on Modulated Semiconductor Structures, 仙台国際センター (宮城県仙台市) , July 30, 2015
 5. A. Kanda, Y. Ito, K. Katakura, Y. Ootuka, Influence of Metal Contacts on Graphene Transport Characteristics and Its Removal with Nano-carbon Interfacial Layer, 7th International Conference on Recent Progress in Graphene (and Two-dimensional Materials) Research, Lorne, Australia, Oct. 28, 2015
 6. H. Tomori, R. Hiraide, Y. Ootuka, K. Watanabe, H. Taniguchi and A. Kanda, Inducing Strain to Encapsulated Graphene, 28th International Microprocesses and Nanotechnology Conference, 富山国際会議場(富山県富山市) , Nov. 12, 2015
 7. Y. Ito, K. Katakura, H. Sonoda, S. Higuchi, Y. Ootuka, H. Tomori and A. Kanda, Effect of Metal Contact on Transport Properties of Graphene Field Effect Devices, 28th International Microprocesses and Nanotechnology Conference, 富山国際会議場(富山県富山市) , Nov. 13, 2015
 8. H. Tanaka, K. Fukuma, K. Morita, S. Hayashi, T. Kajiwara, A. Visikovskiy, S. Tanaka, A. Kanda Electron Transport in Densely-Packed Graphene Nanoribbons Formed on a Corrugated SiC Surface, International Symposium on Advanced Nanodevices and Nanotechnology (ISANN 2015), Waikoloa, USA, Dec. 1, 2015
 9. K. Yarimizu, K. Katakura, Y. Ootuka, K. Watanabe, T. Taniguchi, K. Ueno, H. Tomori, A. Kanda, Encapsulated Graphene/Superconductor Junctions: Formation and Electron Transport, International Symposium on Advanced Nanodevices and Nanotechnology (ISANN 2015), Waikoloa, USA, Dec. 1, 2015
 10. H. Tomori, R. Hiraide, Y. Ootuka, K. Watanabe, H. Taniguchi, A. Kanda, Inducing Strain to Encapsulated Graphene, International Symposium on Advanced Nanodevices and Nanotechnology (ISANN 2015), Waikoloa, USA, Dec. 4, 2015
 11. A. Kanda, K. Katakura, Y. Ito, Y. Ootuka, H. Tomori, Influence of Metal Contacts on Graphene Transport Properties and Its Reduction with Nano-carbon Interfacial Layer, International Symposium on Advanced Nanodevices and Nanotechnology (ISANN 2015), Waikoloa, USA, Dec. 4, 2015
 12. A. Kanda, Toward observation of specular Andreev reflection in graphene, M. S. Dresselhaus 教授名誉博士号授与記念シンポジウム, 東北大学(宮城県仙台市) , Feb. 18, 2016
 13. H. Tomori, R. Hiraide, Y. Ootuka, K. Watanabe, T. Taniguchi, A. Kanda, Introducing lattice strain to graphene encapsulated in hBN, APS March Meeting 2016, Baltimore, USA, Mar. 17, 2016
 14. A. Kanda, Y. Ito, K. Katakura, T. Sonoda, S. Higuchi, H. Tomori, Y. Ootuka, Influence of Metal Contacts on Graphene Transport Characteristics and Its Removal with Nano-carbon Interfacial

Layer, APS March Meeting 2016, Baltimore, USA, Mar. 14, 2016

15. M. Morishita, "Fluidity of Domain Walls in Dilute ^3He - ^4He Mixture Films", International Symposium on Quantum Fluids and Solids (QFS2015) (Niagara Falls, August 13, 2015).
16. M. Morishita, "Heat Capacity of Dilute ^3He - ^4He Monolayer Films", International Symposium on Quantum Fluids and Solids (QFS2015) (Niagara Falls, August 13, 2015).

国内会議

1. 神田晶申, 電子デバイス応用に向けたグラフェン研究の最近の進展, 平成 27 年度 TIMS 研究交流会, 筑波大学(茨城県つくば市), 2015 年 7 月 24 日
2. 田中悟、福間洗平、林真吾、梶原隆司、Visikovskiy Anton1、飯盛拓嗣、家永紘一郎、矢治光一郎、中辻寛、小森文夫、田中宏和、神田晶申、Cuong Nguyen Thanh、岡田晋, SiC ファセット上のグラフェン横方向超格子の形成と物性 (1), 第 76 回応用物理学会秋季学術講演会, 名古屋国際会議場(愛知県名古屋市), 2015 年 9 月 14 日
3. 福間洗平、林真吾、梶原隆司、Visikovskiy Anton、田中悟、飯盛拓嗣、家永紘一郎、矢治光一郎、中辻寛、小森文夫、田中宏和、神田晶申、Cuong Nguyen Thanh、岡田晋, SiC ファセット上のグラフェン横方向超格子の形成と物性 (2), 第 76 回応用物理学会秋季学術講演会, 名古屋国際会議場(愛知県名古屋市), 2015 年 9 月 14 日
4. 田中宏和、福間洗平、森田康平、林真吾、梶原隆司、A. Visikovskiy, 田中悟、神田晶申, SiC 傾斜面に形成されたグラフェンナノリボンの電気伝導, 日本物理学会 2015 年秋季大会, 関西大学千里山キャンパス(大阪府吹田市), 2015 年 9 月 16 日
5. 平出璃音可、友利ひかり、大塚洋一、神田晶申, レジストナノ構造への転写によってひずみを導入したグラフェンの電気伝導, 日本物理学会 2015 年秋季大会, 関西大学千里山キャンパス(大阪府吹田市), 2015 年 9 月 16 日
6. 伊藤優、片倉健太、大塚洋一、友利ひかり、神田晶申, グラフェンの電気伝導に対する電極接続の影響, 日本物理学会 2015 年秋季大会, 関西大学千里山キャンパス(大阪府吹田市), 2015 年 9 月 16 日
7. 友利ひかり、平出璃音可、大塚洋一、林正彦、吉岡英生、渡辺賢司、谷口尚、神田晶申, BN 上グラフェンへの局所 1 軸ひずみ導入法の開発, 日本物理学会 2015 年秋季大会, 関西大学千里山キャンパス(大阪府吹田市), 2015 年 9 月 16 日
8. 大塚洋一、青木仁、CVD グラフェンにおける磁気抵抗効果: 表面修飾の影響, 日本物理学会 2015 年秋季大会, 関西大学千里山キャンパス(大阪府吹田市), 2015 年 9 月 18 日
9. 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 II、日本物理学会 2015 年秋季大会, 関西大学千里山キャンパス(大阪府吹田市), 2015 年 9 月 18 日
10. 吉川ルノ、大平智也、大塚洋一、野村晋太郎、液晶可変リターダを用いた近接場光プローブによる円偏光照射, 日本物理学会 2015 年秋季大会, 関西大学千里山キャンパス(大阪府吹田市), 2015 年 9 月 18 日
11. 右近修治、一宮彪彦、井通暁、江尻有郷、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、真梶克彦、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、松本益明、松本悠、味野道信、物理チャレンジ 2015 報告: IV 第 2 チャレンジ実験問題、日本物理学会 2015 年秋季大会, 関西大学千里山キャンパス(大阪府吹田市), 2015 年 9 月 19 日

12. 福間洗平、林真吾、梶原隆司、Visikovskiy Anton、飯盛拓嗣、家永紘一郎、矢治光一郎、中辻寛、小森文夫、田中宏和、神田晶申、田中悟、SiC フェアセット上サブ 2 次元グラフェンの構造制御、第 63 回応用物理学学会春季学術講演会、東京工業大学(東京都目黒区)、2016 年 3 月 22 日
13. 大塚洋一、青木仁、堀江彩叶、表面修飾した CVD グラフェンの電気伝導、日本物理学会第 71 回年次大会 (東北学院大学, 2016 年 3 月 19 日).
14. 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、日本物理学会第 71 回年次大会 (東北学院大学, 2016 年 3 月 19 日).
15. 武政健一、金信弘、武内勇司、木内健司、先崎蓮、森内航也、八木俊輔、大塚洋一、美馬覚、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、ニュートリノ崩壊光探索のための Hf-STJ の研究開発、本物理学会第 71 回年次大会 (東北学院大学, 2016 年 3 月 21 日).
16. 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 III、本物理学会第 71 回年次大会 (東北学院大学, 2016 年 3 月 22 日).
17. 森下将史、「グラファイト上ヘリウム薄膜における Dirac 粒子系」、素励起シンポジウム (東京大学, 2015 年 4 月 25 日).
18. 森下将史、「グラファイト上ヘリウム薄膜における 2 次元超流動の臨界速度」、物性研短期研究会「量子乱流と古典乱流の邂逅」(東京大学物性研究所, 2016 年 1 月 7 日).
19. 森下将史、「ヘリウム薄膜における 1 次元 Fermi 流体・Dirac 粒子系」、日本物理学会第 71 回年次大会 (東北学院大学, 2016 年 3 月 22 日).

〈集中講義、他〉

1. 大塚洋一、固体物理学「電気伝導：ナノを中心として」 東邦大学理学研究科物理学専攻 2015 年 7 月.
2. 大塚洋一、磐城高校 SSH 体験実験 極低温の世界：気体の状態方程式、液体窒素の蒸気圧曲線と三重点 2015. 8. 7.
3. 大塚洋一、高校生のための体験学習 低温実験、筑波大学 2015. 8. 7.

〈外部資金〉

1. 神田晶申：科学研究費補助金 基盤研究 B 「歪み誘起ゲージ場を用いたグラフェンのエネルギーギャップの生成と制御」(H25～H27)、直接経費 300 万円
2. 神田晶申：科学研究費補助金 新学術領域研究 「単層／多層グラフェンにおける超伝導近接効果」(H26～H27)、直接経費 270 万円
3. 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 1,180 万円
4. 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 1,765 万円

IX-6. 構造科学グループ

教授 西堀 英治

助教 笠井 秀隆

学類生 3名

【 1 】 放射光X線回折データを用いた電子密度解析の研究

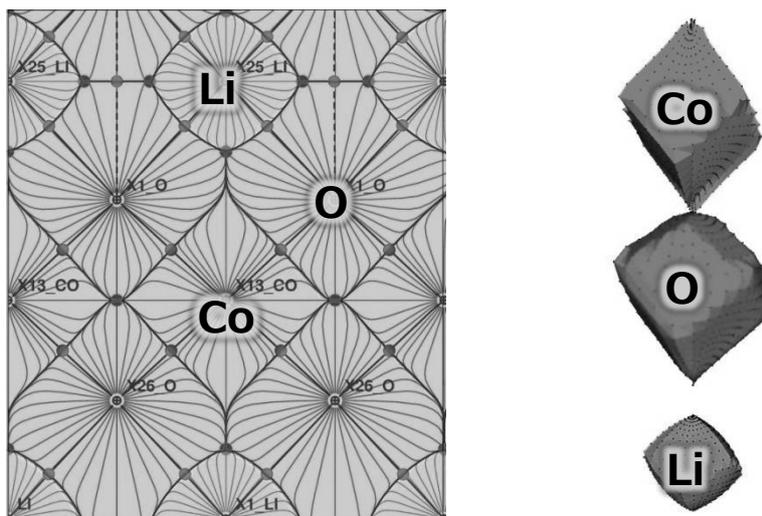
二次電池やエネルギー関連材料を中心に、物質科学で最も精度よく観測可能な量である物質中の電子密度を観測する研究を放射光X線回折データを利用して進めている。今年度論文誌上に報告した成果について記述する。

(1) Li イオン二次電池材料 LiCoO_2 の精密電子密度解析の研究

Li イオン二次電池材料 LiCoO_2 について、SPring-8 の BL44B2 で、統計精度と逆空間の分解能を極限まで高めるために、4つの露光時間と回折角度範囲の異なるデータを測定した。これを、開発・発展を進めてきた精密電荷分布解析法により解析し、マキシマムエントロピー法および多極子展開解析で電子密度分布を求めた。関数で解析的に表される多極子電子密度については、Bader's Topological 解析により Co-O 結合の評価も行った。

マキシマムエントロピー法の解析では、全電子密度だけでなく、球状原子からの差を示す差分電子密度も求めた。その結果、Co 周りの O 方向の電子密度が少なくなっていることが分かった。このことは、Co の 3d 電子が O を避けるように分布していることを示している。

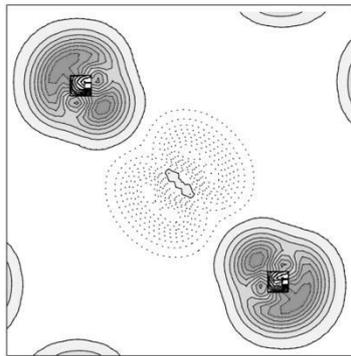
Co-O 結合の Bader's Topological 解析の結果、Co-O 結合は、NaCl などよりもむしろイオン結合的であることが分かった。以上のように超精密電子密度からイオン電池材料の電子系の構造について新たな知見が得られた。



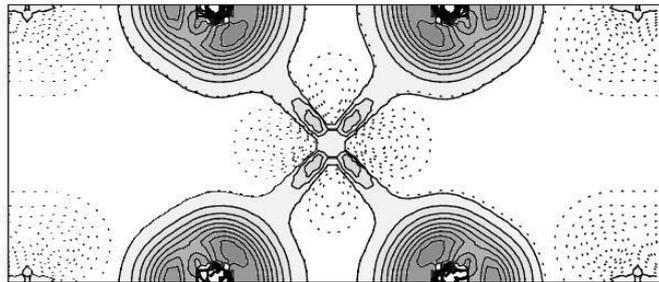
LiCoO_2 の Bader's Topological 解析結果

(2) 多重粉末回折データを利用した金属酸化物の電子密度解析

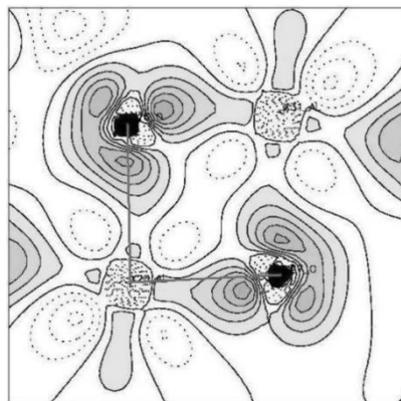
TiO₂およびAl₂O₃の一般的な金属酸化物の試料を用いて SPring-8 で1時間程度の短時間で測定したデータが電子密度解析に耐えうるかを検証した。これまで進めてきた研究から、分解能 $d > 0.35 \text{ \AA}$ の範囲で十分な統計精度を持ったデータが得られれば電子密度解析が可能ならずである。一方で、通常の全てのデータ点で同じX線露光時間で測定したデータではローレンツ因子の影響により、そうしたデータは得られないことも判明している。これを改善すべく回折データの測定軸（ 2θ 軸）方向のスリット幅を角度によって変化させた手法の開発に取り組んできた。スリット幅の増大で統計精度は高められるが、軸発散の効果も現れる。これを避けるために、幅の変化のさせ方を検討してきた。



(a)



(b)



(c)

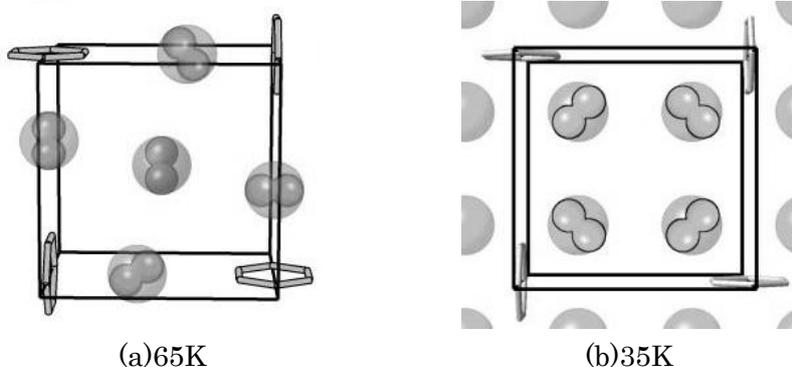
多極子展開解析に基づく Deformation Density. (a),(b) TiO₂, (c) Al₂O₃

SPring-8 で波長 35KeV の X 線を利用してデータを測定した。スリットは全角度領域で 300mm 幅とし、2次元から1次元データの作成時にデータの積算幅を変化させることで、2種類の回折データを作成した。そのデータを利用して、マキシマムエントロピー法による電子密度解析と多極子展開法による電子密度解析を行った。その結果、この手法で十分に結合電子を 0.1 電子の精度で議論しうる電子密度が得られることが分かった。

【 2 】 水素を吸蔵する多孔性錯体の吸蔵水素のオルトパラ変換と構造の相関

水素分子は、二酸化炭素を排出しないクリーンなエネルギー源として実用研究が活発に行われるとともに、2個の陽子と2個の電子からなる立体構造および電子構造の明快さから、基礎科学の分野でも長年にわたって研究がされている。本研究では、オルトパラ変換の触媒として、高度に構造を制御可能な多孔性配位高分子を用い、その気体吸着特性を利用して水素を吸着した多孔性錯体の構造研究を行った。

三次元ホフマン型類似配位高分子{Fe(pyrazine)[Pd(CN)₄] }が細孔あたり 65K で約 2.7 分子、35K で約 3.3 分子の水素を吸着できることを見出した。温度によって細孔あたりの吸着量が変化することから、細孔内での水素原子の配置を SPring-8 でのその場 X 線回折実験により観測した。その結果、65K と 35K では、水素の位置が異なることが分かった。また、配列変化に伴う、水素の核スピンの状態を水素吸着下ラマン散乱により調べ、温度低下に伴いオルト水素が数百秒の時間スケールでパラ水素に変換されることを観測した。



多孔性配位高分子内の水素分子配列の模式図

最近、物質内部の電場勾配による高速オルトパラ変換の理論が提案されている。本研究は、細孔内電場による数百秒タイムスケールのオルトパラ高速変換を、X線構造解析、ラマン散乱、電子密度、静電ポテンシャル解析などの実験的手法により観測し、その機構を解明した。

【 3 】 天然鉍物熱電変換材料の構造科学研究

天然鉍物として存在する熱電変換材 $\text{Cu}_{12}\text{Sb}_4\text{S}_{13}$ について 80K 以下の磁気転移に伴う構造

の変化を、SPring-8にて粉末および単結晶X線回折実験により調べた。その結果、相転移に伴い、CubicがTetragonalに変化すること、*abc*軸共に2倍の超格子反射が現れることが明らかになった。超格子反射の消滅側から体心格子を取ることが分かった。低温ではツインとなり構造解析は不可能だったためこの時点までの構造情報を報告した。

<論文>

(査読論文)

1. Hidetaka Kasai, Eiji Nishibori*. Multiple powder diffraction data for an accurate charge density study using synchrotron radiation X-ray. *Phys. Scripta*. (2016) 91, 043009 (7pages).
2. Biao Zhou, * Satomi Ogura, Qi Zhi Liu, Hidetaka Kasai, Eiji Nishibori, Heng Bo Cui, Reizo Kato, and Akiko Kobayashi. A Single-component Molecular Conductor with Metal-metal Bonding, [Pd(hfdt)₂] (hfdt = bis(trifluoromethyl) tetrathiafulvalenedithiolate). *Chem. Lett.* (2016) 45, 303-305.
3. Masaki Shimada, Mizuho Tsuchiya, Ryota Sakamoto, Yoshinori Yamanoi,* Eiji Nishibori, Kunihisa Sugimoto, and Hiroshi Nishihara* Bright Solid-State Emission of Disilane-Bridged Donor-Acceptor-Donor and Acceptor-Donor-Acceptor Chromophores. *Angew. Chem. Int. Ed.* (2016) 128, 3074-3078.
4. Takayuki Nakashima, Masaki Shimada, Yu Kurihara, Mizuho Tsuchiya, Yoshinori Yamanoi*, Eiji Nishibori, Kunihisa Sugimoto, and Hiroshi Nishihara*. Fluorescence and phosphorescence of a series of silicon-containing six-membered-ring molecules. *J. Organometallic Chemistry*. (2016) 805, 27-33.
5. Hiromi I. Tanaka, Koichiro Suekuni*, Kazunori Umeo, Toshiki Nagasaki, Hitoshi Sato, Galif Kutluk, Eiji Nishibori, Hidetaka Kasai, and Toshiro Takabatake, Metal-semiconductor transition in tetrahedrite Cu₁₂Sb₄S₁₃. *J. Phys. Soc. Jpn.* 85, 014703 (2016).
6. E. Nishibori, T. Shibata, W. Kobayashi, Y. Moritomo, Bonding nature of LiCoO₂ by topological analysis of electron density from X-ray diffraction, *Electrochemistry*, (2015) 83, 840-842.
7. Takashi Kosone, Akihiro Hori, Eiji Nishibori*, Yoshiki Kubota, Akio Mishima, Masaaki Ohba, Hiroshi Tanaka, Kenichi Kato, Jungeun Kim, José Antonio Real, Susumu Kitagawa, Masaki Takata*, Coordination Nano-Space as Stage of Hydrogen Ortho-Para Conversion., *Royal Society Open Science*. (2015), 2, 150006
8. Naoyuki Katayama *, Kenta Kimura, Yibo Han, Joji Nasu, Natalia Drichko, Yoshiki Nakanishi, Mario Halim, Yuki Ishiguro, Ryuta Satake , Eiji Nishibori, Masahito Yoshizawa, Takehito Nakano, Yasuo Nozue, Yusuke Wakabayashi, Sumio Ishihara, Masayuki Hagiwara, Hiroshi Sawa, and Satoru Nakatsuji, Absence of Jahn-Teller transition in the hexagonal Ba₃CuSb₂O₉ single crystal. *Proceedings of the National Academy Sciences United States America*, (2015) 112, 9305-9309.

9. Eiji Nishiobri, Masaki Takata, Element-selective visualization for materials science using synchrotron X-ray two-wavelength anomalous powder diffraction data., *Transactions of the Materials Research Society of Japan* (2015) 40[2], 165-168.
10. Nobuhiro Mizuno, Eiji Nishibori, Mitsuru Oka, Takahito Jomori, Masaki Takata, Takashi Kumasaka, " Structural basis for polymorphic and solvation properties of the organogermanium crystalline polymer propagermanium and its derivatives ", *J. Pharm. Sci.* (2015) 104, 2482-2488.

<国際会議>

1. Eiji Nishibori, Structural Studies using multiple powder diffraction dataset. The 13th Conference of the Asian Crystallographic Association, 8, December, 2015, Kolkata, India
2. Eiji Nishibori, Multiple powder diffraction profiles for charge density study using synchrotron radiation X-ray. Samgamore XVIII, 10, Jul. 2015, サルデーニャ、イタリア

<国内会議>

1. 畠山あかり、西堀英治、Lei Miao, 木村薫、高田昌樹、放射光粉末X線回折データを用いた $W_xV_{1-x}O_2$ の物理的モデルに基づく構造研究 第29回放射光学会年会、2016年1月13日、東京大学柏キャンパスサテライト

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	平田久子、大川和夫
大学院生	29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、王小龍、市村和也

研究協力者	
技術専門職員	杉山昭彦、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	4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、数理工学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Ⅱ期中期目標・中期計画の「I 大学の教育研究等の質の向上に関する目標を達成するためにとるべき措置」の2の(2)の「研究実施体制等の整備に関する目標を達成するための措置」に、第I期に引き続き「双方向型共同研究等の新しい取組みを積極的に支援する。」と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。

更に、これらの新たな物理究明は、コアの高温のプラズマ現象のみならず、核融合炉に必須の境界プラズマ研究に展開し、また、自ら開発した高電力ジャイロトロンを用いて、イオン閉じ込め電位、電子・イオン温度の上昇に加えて、境界/ダイバータプラズマの制御につながる成果を得ている。

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いる。

学内にあっては、数理物質系のプラズマ研究グループ、並びにシステム情報系のグループ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～25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得、「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GAMMA10/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。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、能動的な輸送制御で境界プラズマのさまざまな現象、物理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26年度までに、ITERの定常熱負荷相当 10 MW/m^2 を上回る 11 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）の実験を開始した。水素ガスや希ガスの入射により、著しい密度の上昇と電子温度の低下を観測し、非接触プラズマ制御に向けての実験を進展させてきた。GAMMA10/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る。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であることが特徴である。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いる。また、プリンストン大学との共同研究に関しても、着実に進展させている。GAMMA10/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、東北大学、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 II 期中期目標・中期計画の最終年である平成 27 年度は、より詳細な計測・特性評価や物理的解釈を念頭に、各大学の研究者の多様な視点・豊富な経験と双方向型の特長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、GAMMA10/PDX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。平成27年度には、上流側の西プラグ/バリア部に設置したICRFアンテナを用いたエンド部へ流出するイオン束の増大やイオンによる熱流束の増大の実験を進めた。図2に写真で示すように、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。

図3に示すように、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

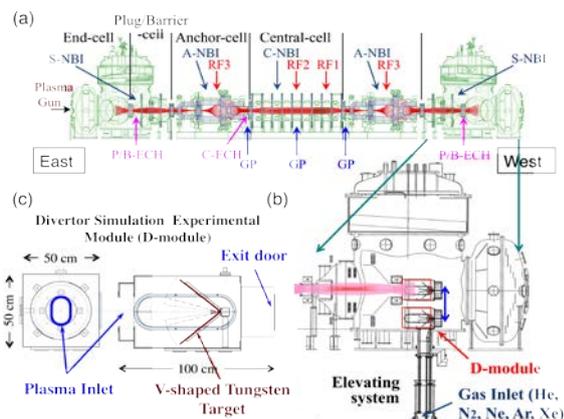


図 1 (a) GAMMA 10/PDX 全体図, (b) 西側エンド部に設置されたダイバータ模擬実験モジュール (Dモジュール) の模式図。昇降機構により、従来の配位でのミラー実験が可能である。(c) Dモジュールの概略図。

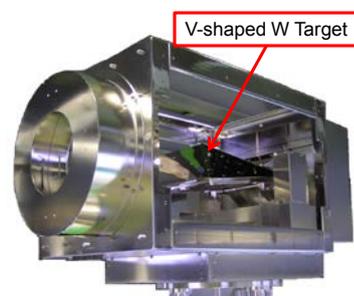


図2 Dモジュールの写真。

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、制御された形で可能となっている。図4は、希ガス入射時に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ーによって測定されたイオン束と熱流束のガス圧依存性を示している。図から、ArガスがNe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、 N_2 は低圧力状況下ではArと同等以上の熱流粒子束の低減効果が得られることがわかった。また、図には示されていないが、Xeガスが最も電子温度の低減効果も含め最も非接触プラズマ形成へ効果が高いことが判った。こ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。

一方、非接触化の進展にともなうターゲット内の密度減少と、観測される H_α 線と H_β 線の強度変化が異なることが観測されている。 H_α 線のガス圧力依存性の特徴から分子活性化再結合が主な過程であることが光学的に示唆されている。水素ガスを用いた非接触プラズマ化実験を行った際のDモジュール内のプラズマの電子温度、電子密度、バルマー線強度の中性ガス圧力依存性を調べた実験では、電子温度は、中性ガス圧力とともに減少し、Dモジュール入口付近では、約30eVから約8eV、ターゲットのコーナー付近では約23eVから1eVまで減少している。ターゲットコーナー付近の電子密度は、1~2Paでピークとなり、その後中性ガス圧力とともに減少しており、明確な密度のロールオーバーが観測されている。 H_β 線強度の圧力依存性は電子密度と同様であるが、 H_α 線強度は、約7Paまで圧力とともに増加しており、密度の依存性とは違う傾向を示した。これは、分子活性化再結合が起き、 H_α 線強度が選択的に増加したことによると考えられる。

高熱流・流束の増強については、これまでに引き続き、ICRF アンテナ等の改良を進め、東西両アンカー部への高周波入射とセントラル部高周波アンテナとの位相調整を含めた調整等により、エンド部への粒子束、熱流束増大を進めた結果、粒子束としては、最大で $3.3 \times 10^{23} \text{s}^{-1} \text{m}^{-2}$ に達している。また、ECH 入射による高熱流束実験では、ICRF 加熱さ

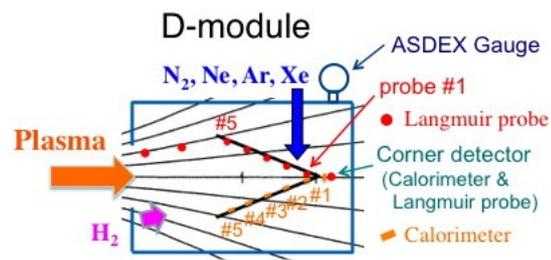


図3 Dモジュール内部のV字ターゲット上、及び周辺に設置された計測器の概略図。

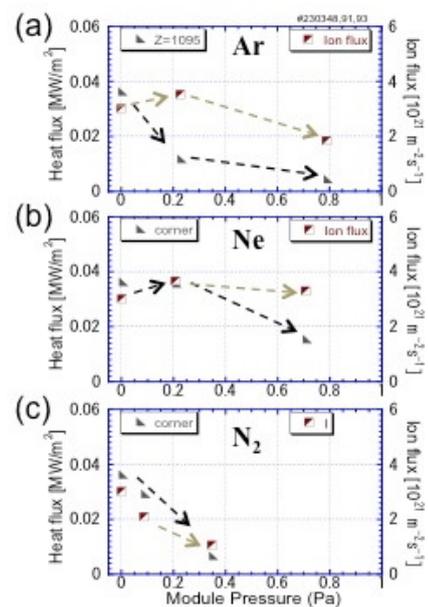


図4 Dモジュール内プラズマパラメータの導入不純物ガス圧依存性 (a) Ar、(b) Ne、(c) N_2 。

れたプラズマに対して 5ms の短パルス入射による ELM 模擬の実験を行った際に $15\text{MW}/\text{m}^2$ に到達している。図5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。

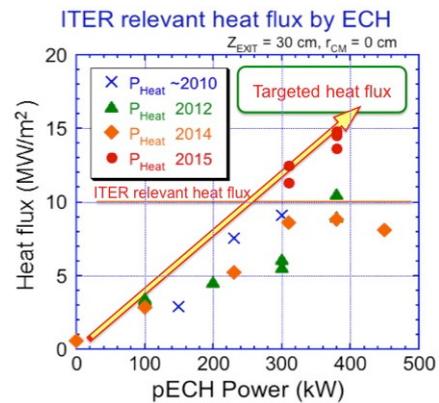


図5 端部ミラー出口で測定した熱流束の ECH パワー依存性。

(3) マルチパス・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トムソン散乱計測システムの開発をさらに進めている。6 パス以上のマルチパス・トムソン散乱信号を目指してマルチパスシステムの改良を進めた。パス毎にレーザービームパターンの確認を行い、安定したマルチパスを達成できるようにした。本マルチパスシステムをプラズマ電子温度計測に適用した結果を図6に示す。マルチパス・トムソン散乱信号は8 パス以上まで確認できた。青線はシングルパス、緑線はダブルパス、赤線はマルチパスシステムでのトムソン散乱信号を示す。マルチパス・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 6 倍程度あり、測定した電子温度は、 $22 \pm 1 \text{ eV}$ となり、シングルパスで測定した電子温度 $23 \pm 3 \text{ eV}$ に比べ測定精度が上昇した。パス毎の散乱信号強度を求め、電子温度解析を行った結果を図6 (b) に示す。測定した電子温度の 20, 50 ns 間隔での測定ができた。電子温度が時間的に振動している様子が見られた。今後、マルチパス信号の解析方法を構築し、ショット毎に電子温度、密度の時間変化を解析できるようにしていく予定である。

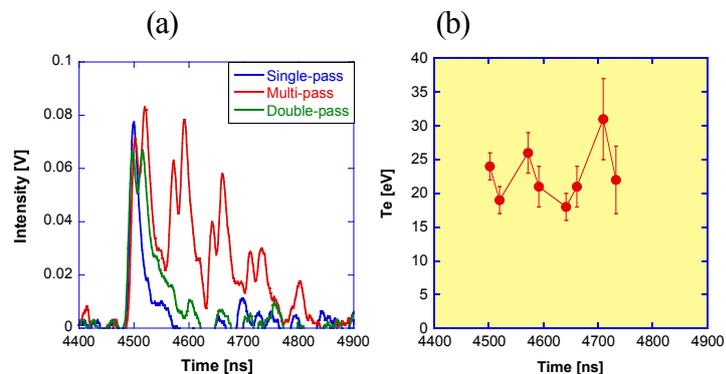


図6 (a) マルチパス・トムソン散乱信号波形。シングルパス信号(青)、ダブルパス信号(緑)、マルチパス信号(赤)で示す。(b) 高速時間分解電子温度測定。

(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 JAEA との連携研究をより強化し、14-300GHz と周波数範囲を大きく拡張し開発を進めている。平成 27 年度では、28/35GHz の 2 周波数ジャイロトロン製作において順調な進展があった。全ての設計が完了し製作が行われ、2016 年 3 月に真空排気を行い来年度 6 月からの試験発振を予定している。また、これと並行して 2 周波数ジャイロトロン用 0.4MW での CW 動作が可能なダブルディスク窓の性能評価も進めている。また、九州大学との共同研究で開発した 28GHz-1MW ジャイロトロン修理が完

了し、発振試験を行った。試験電源の調整によりビーム電流を 55A まで上げ、1 ショットでのダミー冷却水温度変化の時間積分を行うことで、これまでに得られていた 1.28MW より高い 1.38MW の出力を確認した。発振試験後、長パルス運転のためのガス出しエージングを行い、九大 QUEST の実機装置に据付、調整を行った。今後、QUEST での 2016 年度 ECH 実験が進められる予定である。また、将来の QUEST や GAMMA10 中央部加熱への適用を見込み 14GHz ジャイロトロン設計検討を進めてきた。14GHz と 28GHz の 2 周波数動作が可能な発振モードの組合せが無い場合、14GHz の単一発振として TE_{4,2}モードの選択を行い、電子銃、空洞共振器、モード変換器、コレクタ設計を行った。一方、研究の進展に合わせ、QUEST における実験領域の拡大のため、14GHz に加え 28GHz と 14GHz の間の周波数でも発振可能な 2 周波数ジャイロトロン開発要望もあり、14GHz と同一の出力窓で周波数マッチングの取れる 21GHz 近傍での発振検討を開始した。図 7 に MW ジャイロトロン開発の現状についてまとめたものを示す。

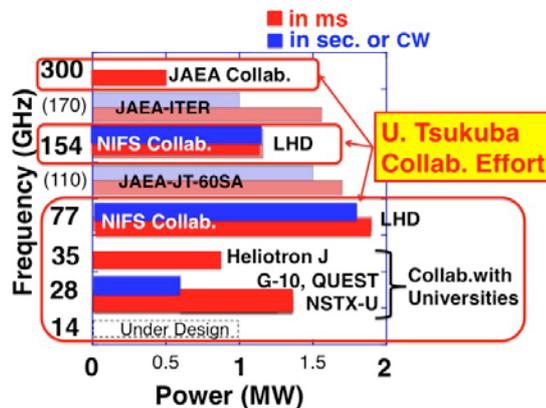


図 7 MW ジャイロトロン開発の現状。筑波大学プラズマ研究センターにおいてで開発されたものを赤枠で示している。

(5) 成果発表等

平成 27 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（第 1 回プラズマ物理クラスター・スクレープオフ層とダイバータサブクラスター、第 2 回炉工学クラスター・ブランケットサブクラスター、第 1 回炉工学クラスター・ダイバータサブクラスター）を 7 月にプラズマ研究センターシンポジウムと合同で開催した。また、11 月には、プラズマ・核融合学会第 32 回年会において全 34 件の発表を行った。国内外で開催された国際会議、及びワークショップについては、今年度合計 36 件の講演を行った。

【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。昨年度セントラル部中央に設置されているピエゾバルブタイプのガスパフ (GP#7) を用いて、高密度プラズマ生成を試した。今年度は同 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。この実験によりガスパフ入射やストレートノズルを用いた SMBI との比較のための詳細なデータを得ることを目的とする。

(2) 実験方法

GAMMA 10 における高速カメラシステムと、今回新たに導入されたストレートノズル付き 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

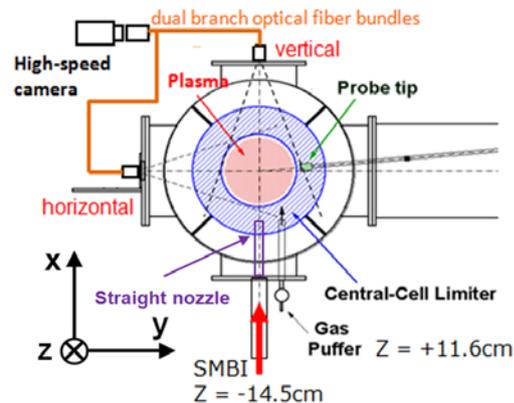


図 1 ストレートノズル付き SMBI と高速カメラの設置位置の模式図

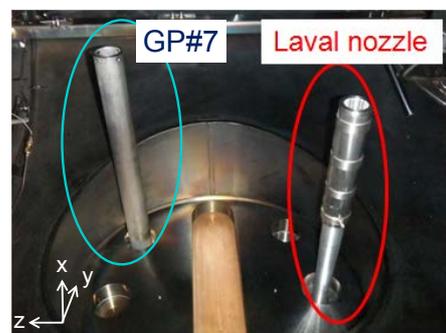


図 2 セントラル部中央付近に設置されている GP#7 および SMBI 用ラバールノズル

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_{α} 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。この放電では ICRF による加熱のみを行っている。SMBI の動作時間は 0.5ms で、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。ターゲットの線平均密度 ($1.4 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$: プラズマ半径を 18cm として算出) に対して、2.0MPa の場合にはピーク値でほぼ倍まで増加していることが観測された。一方でプラズマの蓄積エネルギーは SMBI 入射直後に大幅に低下していることが観測されているため、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 入射後の密度の増分および H_{α} 線発光強度の増分をプロットする。なお H_{α} 線強度検出器は、ほぼ SMBI の入射軸上に設置されており、SMBI のガスによる発光を直接見込むと考えられる。圧力の増加に伴って、電子線密度も H_{α} 線発光強度もほぼ直線的に増加しており、SMBI の粒子供給数はこの動作範囲ではプレナム圧力に対して線形に増えていることが予想される。

SMBI には指向性の高いガス供給が求められるため、ノズル形状に対する指向性の特性を調べることは、SMBI 入射の基礎特性を得る上で重要である。GAMMA10 では 2 方向からプラズマの発光を同時に観測できるシステムが構築されており、SMBI による発光強度の空間拡がりから、指向性を評価している。図 5(a) に GAMMA10 センtral部の水平方向視線、垂直方向視線から高速カメラで同時に観測した SMBI 入射中の発光イメージを示す。図中右側の垂直方向視線からのイメージの点線上の拡がりから半値全幅を評価し、指向性の指標とした。図 5(b) に今回取得したラバールノズルの半値全幅のプレナム圧依存性を示す。比較のため以前取得したストレートノズルのデータもプロットする。全体的にストレートノズルの場合の拡がりはラバールノズルと比べて 50%ほど大きく、ラバールノズルがより指向性の高い粒子補給をしていることが読み取れる。一方でプレナム圧力に対する依存性はほぼ同じであり、1MPa を超えるとほとんど変化しないことがわかった。

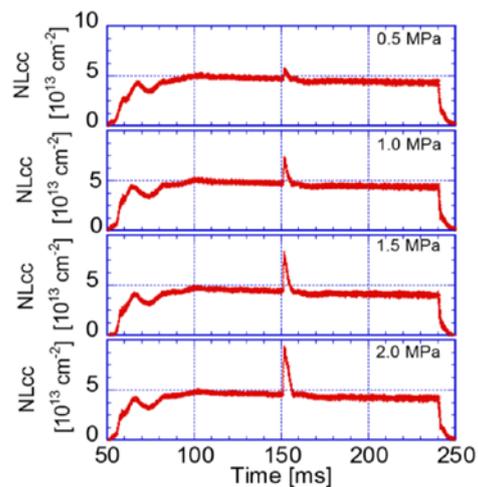


図 3 SMBI 導入実験におけるセンtral部電子線密度 (NLcc) 時間発展。プレナム圧を 0.5MPa から 2.0MPa まで変化させその応答を調べた。

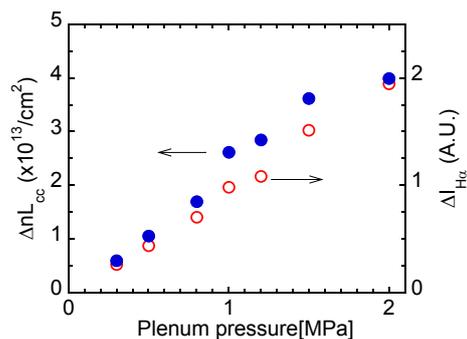


図 4 SMBI プレナム圧に対するセンtral部電子線密度および H_{α} 線発光強度の増加分の依存性。

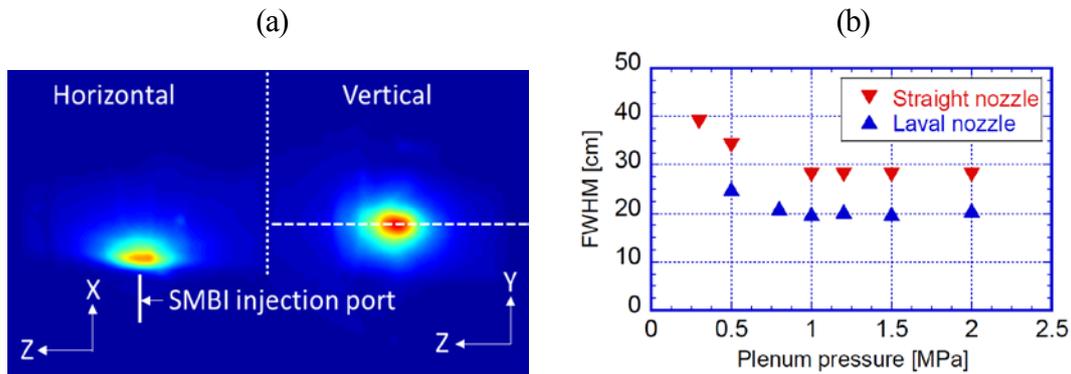


図5 (a) 水平方向および垂直方向から同時撮影した SMBI 入射中の発光イメージ、(b) 発光の空間拡がりのプレナム圧に対する依存性。

(4) まとめ

今回、SMBI 機器の改良により、ラバールノズルを用いた SMBI 実験を安定的に行えるようになった。ラバールノズルの粒子補給特性はストレートノズルのそれと比べると指向性が高い事が示された。一方で SMBI 入射時に大きなセントラル部蓄積エネルギーの低下が観測されたため、今後は ICRF や ECH 加熱の組み合わせにより、蓄積エネルギーの悪化を抑えた放電シナリオの構築を目指す。

【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、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ーラスプラズマの 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

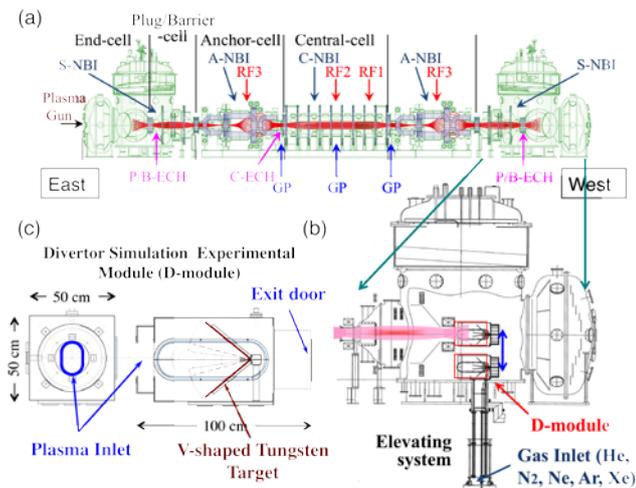


図1 (a) ガンマ 10/PDX 全体図, (b) 西エンド部真空容器, (c) 昨年度から稼働を開始したダイバータ模擬実験モジュール。

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に西エンド部真空容器と昨年度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

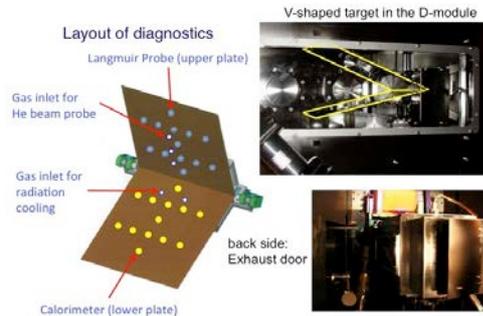


図2 ダイバータ模擬実験モジュールの概略図と写真。

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。

平成24年度から稼働を開始した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ア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。

(3) 実験結果

今年度はアンカー部に設置したICRF波動による追加熱用アンテナを用いた更なる端損失イオン流の大幅な増強を図った。図3は典型的な高周波波動(ICRF)生成プラズマ (セントラル部 $2\text{--}3 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$, イオン温度5 keV) に対し、東西に設置している両アンテナを用いて追加熱を行った場合の、各部のプラズマ密度と端損失イオン流の時間変化を示す。図から判るように、東西アンカー部加熱時に両アンカー部の線密度が3倍近く増加しており、それに伴ってセントラル部プラズマ線密度も $1 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ 台に上昇している。その結果、西側ELIEAによる端部イオン流は約2倍以上に増加している。更

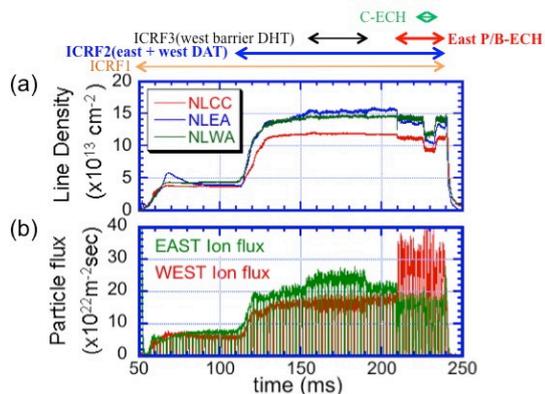


図3 プラズマ追加熱を用いた高粒子フラックス生成実験アンカー部。(a) セントラル部及びアンカー部プラズマ線密度、東西エンド部で測定したイオン流束の時間変化。

に東側のプラグバリア ECH を重畳することにより、セントラル部の密度に顕著な変化は無いにも拘わらず、西側の粒子束は2倍程度増加し、 $3.3 \times 10^{23} \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ の粒子束が達成された。これは、東側のECHにより生成された電位により端損失粒子が反射された為と、アンカー部とセントラル部電位が上昇した為に、西側へ向かう端損失イオンが加速されたためと推察される。また、セントラル部プラズマ電子密度と端損失粒子束密度との関係を調べたところ、粒子束密度は、すでにセントラル部の密度に対し、線形的に増加することが判っており、ECH印加による粒子束増加の顕著な効果が確認された。

また、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 模擬の実験を行った際に 15 MW/m^2 に到達した。端部ミラー出口においてカロリメータにより熱流束を測定したところ、ECH パワーの増加に伴い順調に増加していることが認められた。以上のことから、隣接するミラーセルにおけるプラズマ追加熱の有効性が示され、ICRF 並びに ECH を用いた更なる高粒子束密度発生への見通しを得ることが出来た。

Dモジュールに水素や希ガスを導入して、放射冷却を増加させることにより、RF 生成プラズマの非接触プラズマ化へ向けた実験が行われた。図4は、希ガス入射時に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のガス圧依存性を示している。図から、Ar ガスが Ne 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、 N_2 は低圧力状況下では Ar と同等以上の熱流粒子束の低減効果が得られることがわかった。また、図には示されていないが、Xe ガスが最も電子温度の低減効果も含め最も非接触プラズマ形成へ効果が高いことが判った。こ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 Dモジュール内に導入した不純物の上流（セントラル部）へ向かう不純物の輸送についての分光計測に基づく計測やなど、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、ガンマ 10 端部ミラー出口において、本共同研究の課題についての実験を開始した。その結果、ICRF を用いたアンカー部加熱と ECH パルスの重畳による端損失粒子束

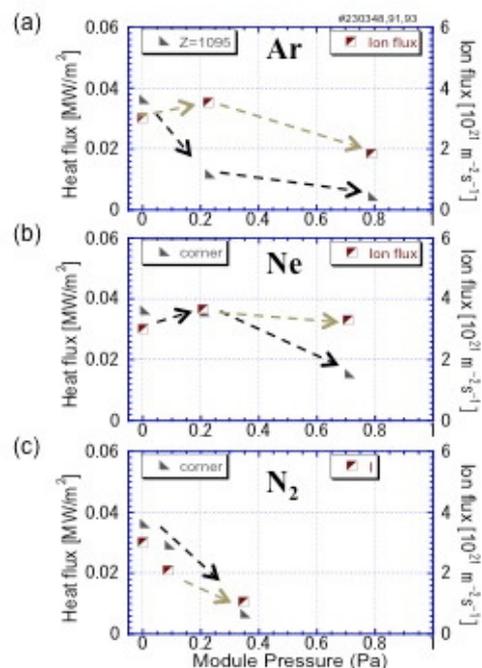


図4 Dモジュール内プラズマパラメータの導入不純物ガス圧依存性 (a) Ar、(b) Ne、(c) N_2 。

密度の大幅な増加に成功し、 $3.3 \times 10^{23} \text{ H/m}^2$ の粒子束を達成した。また、熱流束ではECHの短パルス入射により、 15 MW/m^2 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。

【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事や、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事から、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、各セルを經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、 H_2 原子については、ターゲット面上でのリサイクリングを想定した 10^{18}m^{-3} 台の高い密度からプラグバリアに向かって指数関数的に減少する分布を与えた。Ar 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2は計算結果の一例を示す。Ar 中性粒子密度を上述条件でシミュレーション空間内に満たした場合のプラズマ電子密度と温度の空間分布のシミュレーション結果を示す。この計算では、水素の中性粒子密度は $0.5 \times 10^{16} \text{m}^{-3}$ に固定されており、アルゴンは $1.8 \times 10^{16} \text{m}^{-3}$ である。イオン温度、電子温度の上流側境界条件がそれぞれ 100 eV, 30 eV に設定されているが、エンド部ターゲット上で Ti は数 10 eV, Te は 10eV 以下に低下しており、不純物ガス入射に起因する放射冷却効果の有意な効果として考えられる。

図3は、上記と同様の条件で入射 Ar 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。Ar の入射量の増加に伴い電子

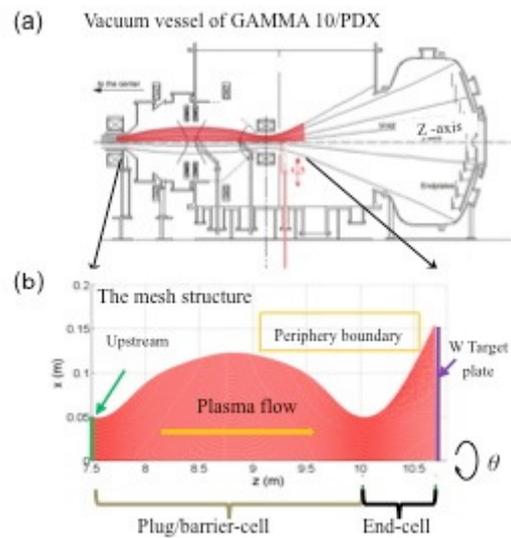


図1 GAMMA 10 エンド部に設定した数値シミュレーション計算空間 (a)エンド部真空容器とプラズマ形状, (b)同部に設定したシミュレーション空間のメッシュ形状と今回計算を行った領域

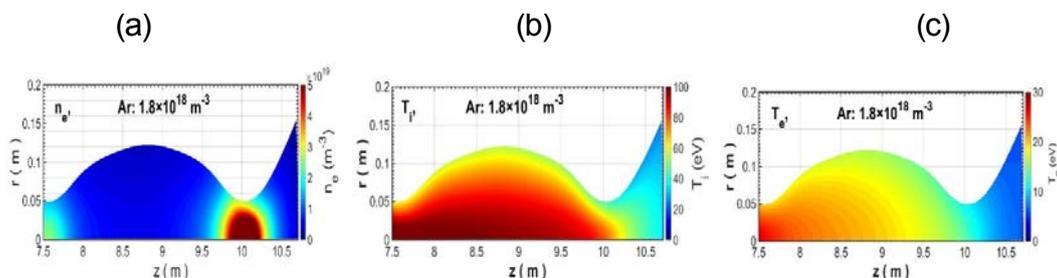


図2 Ar 中性粒子密度を $1.8 \times 10^{18} \text{m}^{-3}$ 、水素を $0.5 \times 10^{18} \text{m}^{-3}$ と与えた場合のプラズマ密度・温度の空間構造のシミュレーション結果

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。一方電子密度は、Ar 密度と共に増加し、 $1.2 \times 10^{16} \text{m}^{-3}$ 以上で飽和する傾向を示しており、ロールオーバーの傾向を示唆している。しかしながら、この密度・温度領域では、まだ3体再結合が支配的では無いため、更なる電子温度の冷却が必要となる。

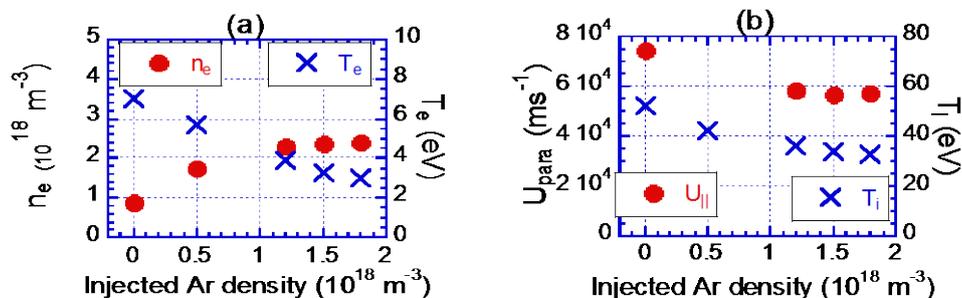


図3 ターゲット上のプラズマパラメータに対する入射 Ar 密度の依存性。(a) 電子密度、温度、(b) 磁力線に沿ったイオンの速度とイオン温度

(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 ガスの入射による放射冷却等、非接触プラズマ形成へ向けた初期的な特性が明らかになってきた。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】 エンド領域を活用した水素リサイクリング研究

プラズマ・壁相互作用と水素リサイクリングの理解は、核融合プラズマを安定して定常維持するための重要な課題である。本研究の目的は、プラズマ閉じ込め領域を有する開放端磁場配位GAMMA10/PDXの特長を活かして、タングステンにおける水素リサイクリング現象に関して包括的に研究を進めることである。

ダイバータ模擬実験装置(D-module)は、直方体のステンレス製容器 (0.5m x 0.5m x 0.7m) と V 字ターゲットから構成され、ステンレス容器前部には $\phi 0.16\text{m}$ 相当のプラズマ入射孔が開いている。側面には石英窓が取り付けられており、V 字ターゲット部のプラズマを観測する。V 字ターゲットのプラズマ対向面には厚さ 0.2mm のタングステン板 (0.3m x 0.35m) が取り付けられている。V 字ターゲットの開き角は遠隔操作にて、 15° から 80° まで変えることが可能である。今回は 45° にて実験を行った。D-module 入口部の 2 箇所に水素ガス供給用のノズルがあり、V-字ターゲットに向けて水素ガスを供給することが可能となっている。D-module 内のプラズマ特性を評価するために、D-module 入口付近に 2 個と上側ターゲット板に 13 個の静電プローブが設置されている。

水素ガスはプラズマ生成の約 300ms 前からプラズマ消滅直後まで供給した。ASDEX ゲージで測定された D-module 内の圧力は、プラズマ点火前にはほぼ一定となり、プラズ

マ生成により大きく増加することが分かった。これは、D-module 入口からプラズマが流入することにより、供給された水素ガスの D-module 外への流出が妨げられたことよると考えられる。ターゲット板上の電子温度は中性ガス圧力とともに減少し、D-module 入口付近では、約 30eV から約 8eV、ターゲットのコーナー付近では約 23eV から 1eV まで減少した。ターゲットコーナー付近の電子密度は、D-module 内圧力とともに増加して 1~2Pa でピークとなり、その後減少した。この密度の振る舞い (density role over) は、ターゲット板前面でプラズマが非接触化したことを示している。また、ターゲット板前面のプラズマからのバルマー線強度 (H_{α} 、 H_{β}) 測定からプラズマの非接触化は、分子活性化再結合に起因していることが明らかとなった。

【8】照射損傷タングステンの水素吸蔵に関する研究

タングステンは ITER のダイバータ板材料として使用され、原型炉のプラズマ対向壁材料の候補であり、その水素同位体吸蔵特性の研究は、これまで各国の研究機関で精力的に行われてきている。タングステンは水素を吸蔵しにくい材料であるが、中性子照射による材料内欠陥の生成により水素吸蔵特性変化が大きく変化することが知られている。本研究では、中性子照射に対する代替照射として重イオン (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の変化を明らかにし、中性子損傷効果を考察することを目的としている。

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、本研究の試料としては残留ひずみの少ない再結晶タングステんに重イオン照射を行った。重イオンのエネルギーは 2.4 MeV、フラックスは $1 \times 10^{19} \text{ m}^{-2}$ である。3つの損傷レベル (0.1, 0.4, 4 dpa) での重イオン照射した試料と未照射試料の 4 枚の試料に対して小型 PWI 模擬実験装置 APSEDAS を用いて重水素プラズマ照射を行った。重水素プラズマの試料へのフラックスは約 $3.7 \times 10^{21} \text{ D/m}^2\text{s}$ 、フルエンスは $2 \times 10^{25} \text{ D/m}^2$ であった。また、照射イオンエネルギーは約 30eV であり、プラズマ照射中の試料表面温度は約 480K であった。重水素プラズマ照射後に、試料を昇温脱離試験装置に移し、900°Cま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タングステン試料の昇温脱離スペクトルには、約 560K と約 740K 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 840K 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 TEM 観察した結果から、ナノボイドに起因するピークであると考えられる。また、試料中の重水素リテンションは、0.4dpa までは損傷レベルとともに増加するが、0.4dpa 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。

【9】 GAMMA 10/PDX におけるトムソン散乱計測システムの開発

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ト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てきた。これまでに空間5点、1時刻の電子温度・密度計測ができるようにトムソン散乱計測システムを改良してきたが、本年度は、空間測定点の増加、多時刻計測を可能とし、電子温度、密度の径方向6点、100 ms 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に、及び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目的とした。当該年度は、空間多点計測のためのプラズマ径方向外側のトムソン散乱信号の増強のための集光ミラーの設置、分光器、計測オシロスコープの増設、多時刻計測のための解析プログラムの構築、ダイバータ模擬部トムソン散乱計測システムの開発を進め、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。

図1にトムソン散乱計測システムを示す。メインの集光ミラーの上部に、追加集光ミラーを設置した。この追加集光ミラーの効果に関して調べるため、GAMMA 10 本体内に窒素ガスを封入して Raman 散乱計測を行った。図2に $X = -10, -15, -20$ cm の測定位置での追加集光ミラーの有無による散乱信号の変化を示す。(a), (b), (c)に $X = -10, -15, -20$ cm の位置での計測結果を示す。 $X = -10, -15, -20$ cm の位置で、追加ミラーにより、散乱信号は、1.1, 1.5, 2.4 倍に増加することが分かった。さらに、トムソン散乱に適用したところ、 $X = -10, -15$ cm の位置で1.2, 1.9 倍になっていることが分かった。これにより、径方向下側の散乱信号の増加が見込めることになった。

このシステムを用いて、径方向分布の多時刻計測を行った。図3に反磁性量 (赤点線)

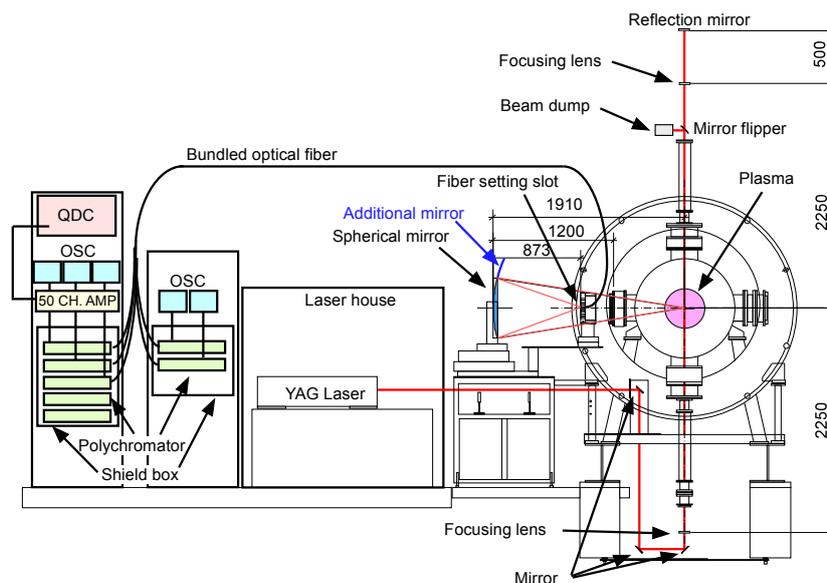


図1：トムソン散乱計測システム概略図

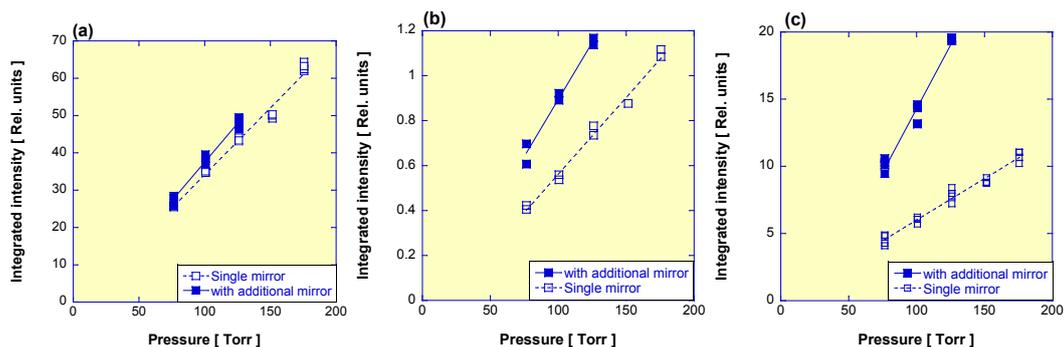


図2：追加ミラーの有無による Raman 散乱信号の変化。

と電子線密度 (青実線) の時間変化を示す。
 $t = 60, 160$ ms の 2 時刻に YAG レーザーが入射し、電子温度、密度の径方向分布を計測した。図4 (a), (b)に電子温度、密度の径方向分布を示す。プラズマ1ショットで径方向6点、2時刻の電子温度、密度計測が可能となった。また、プラズマ中心部で、 $t = 60$ ms の場合、電子温度と電子密度は、 32 eV と $1.4 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$ であり、 $t = 160$ ms の場合、 55 eV と $1.9 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$ であった。

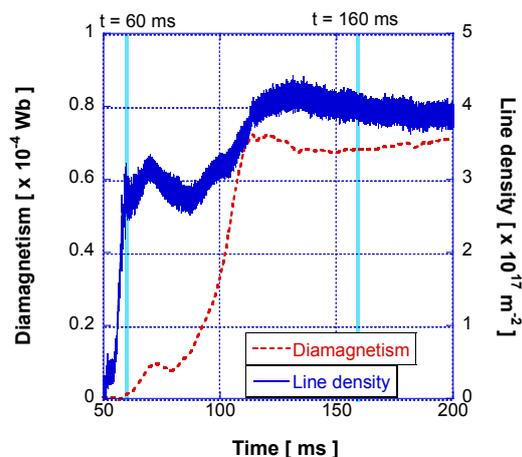


図3：反磁性量と電子線密度の時間変化

一方、ダイバータ模擬部トムソン散乱計測システムについては、セントラル部からエンド部までレーザーを伝送する光路を設置し、エンド部真空容器内に集光ミラーを設置した。また、集光した光伝送用の光ファイバーに関しても真空排気に問題ないことを確認した。今後、レーザー光の光路と集光光

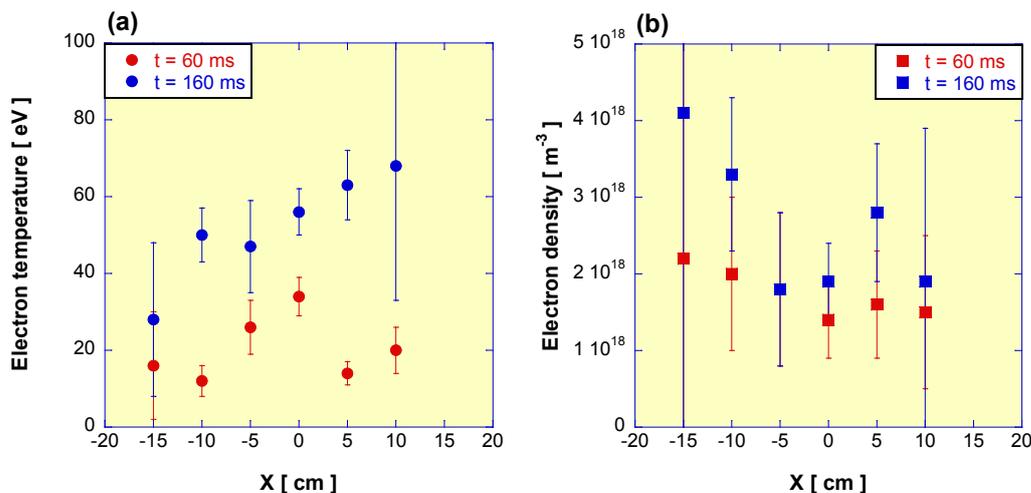


図4： $t = 60$ ms(赤)と $t = 160$ ms(青)の(a)電子温度分布と(b)電子密度分布

学系の調整を行っていく予定である。

本年度は、6パス以上のマルチパス・トムソン散乱信号を目指してマルチパス・システムの改良を進めた。パス毎にレーザービームパターンの確認を行い、安定したマルチパスを達成できるようにした。本マルチパス・システムをプラズマ電子温度計測に適用した結果を図5に示す。マルチパス・トムソン散乱信号は8パス以上まで確認できた。青線はシングルパス、緑線はダブルパス、赤線はマルチパス・システムでのトムソン散乱信号を示す。マルチパス・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6倍程度あり、測定した電子温度は、 22 ± 1 eV となり、シングルパスで測定した電子温度 23 ± 3 eV に比べ測定精度が上昇した。パス毎の散乱信号強度を求め、電子温度解析を行った結果を図6に示す。電子温度の30, 50 ns 間隔での測定ができた。電子温度は、測定時間内でほぼ一定であることがわかった。今後、マルチパス信号の解析方法を構築し、ショット毎に電子温度、密度の時間変化を解析できるようにしていく予定である。本マルチパス・トムソン散乱システムにより、当初の目的であった、散乱信号の増加、電子温度計測精度の向上が達成できた。

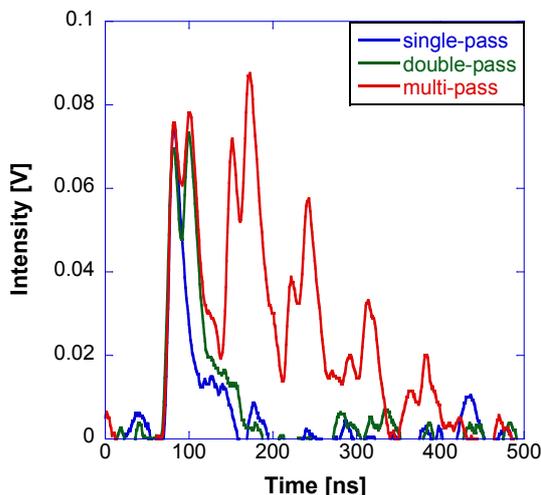


図5：マルチパス・トムソン散乱信号波形。シングルパス信号（青）、ダブルパス信号（緑）、マルチパス信号（赤）で示す。

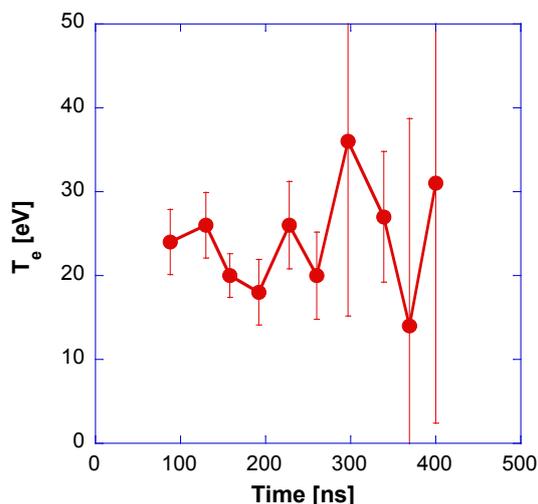


図6：高速時間分解電子温度測定

【10】 GAMMA 10/PDX 境界プラズマの放射スペクトルの研究

分光モデルである衝突・輻射モデルは、核融合プラズマ分光診断のための揺動が強力なツールとなる。しかし、プラズマ放射実験データとモデル計算結果との比較はまだ十分とはいえず、分光診断に直結したモデル構築が重要である。GAMMA 10/PDX では、境界プラズマ模擬のためのダイバータ模擬実験・モジュールを組み込み、境界プラズマ研究を本格化させている。本研究では、境界プラズマからの放射スペクトル、主に水素、ヘリウム、炭素、酸素からの放射に着目して衝突・輻射モデルを構築し、既存の計算機コード、プラズマ分光測定結果との比較を行い、分光診断のためのモデル構築、及び分光

測定データの解析方法の改良を目的としている。

本年度は、オランダ DIFFER 研究所にある直線型ダイバータ実験装置 Pilot-PSI のプラズマの2次元H α 線放射輝度分布をH α 線波長フィルター付きの高速カメラによって測定し、H α 線放射強度の揺動スペクトル解析を行った。その結果、電子線密度揺動スペクトルと同様の約10 kHzの揺動が観測された。図1に測定したH α 線放射輝度の2次元分布、図2に揺動スペクトルを示す。Pilot-PSI プラズマからのH α 線放射は主に再結合放射によるものと考えられており、観測されたイオン起因によるものか電子起因による放射かを今後確認していく必要が有る。そのためにも、時間発展型の衝突・輻射モデル計算を進めていく必要が有る。

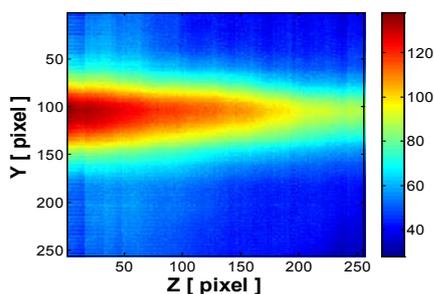


図1：高速カメラによる2次元H α 線放射輝度分布

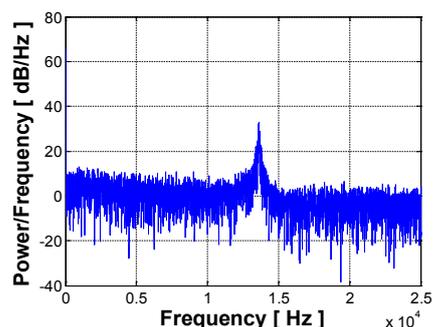


図2：揺動スペクトル解析結果

【11】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27年度は、アンカー部加熱の高効率化のためにセントラル部とアンカー部に設置したアンテナを同一周波数で駆動し、そのアンテナ間の位相差を制御する実験に関して、東西アンカー部同時入射による両アンカー部の高密度化とセントラル部の密度上昇の実験結果についての考察を進めた。また、アンカー部・バリア部に設置したアンテナを用いたプラズマ制御実験に併せて3次元波動励起コード解析を行った。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ベンイオンサイクロトロン(AIC)波動の特性を計測するため、マイクロ波反射計を利用した波動計測を行った。

(1) 東西アンカー部同時加熱実験

アンカー部加熱強化を目的として、東西両アンカー部のセントラル側アンテナ(EAI-DAT, WAI-DAT)とセントラル部Type-IIIアンテナとの位相差制御実験を進めている。特に東西アンカー部の同時加熱実験において、東西アンカー部の密度上昇に伴い従来の

2倍以上セントラル部密度が上昇し、端損失粒子束も増大することが観測されている(図1)。東西アンカー部同時加熱時(110–240 ms)に、西バリア部アンテナ(WB-DHT) ICRF 追加加熱(150–190 ms)、東プラグ/バリア電子サイクロtron加熱(ECH)による追加加熱(210–240 ms)を行ったところ、WB-DHT アンテナにより東側で従来の約3倍の端損失粒子束、東の ECH 加熱により今までの最大値となる $3.3 \times 10^{23} \text{m}^{-2} \text{sec}^{-1}$ の端損失粒子束が得られた。

このセントラル部高密度化の要因の一つとして、東西アンカー部における電位形成がセントラル部の閉じ込めを改善することが示唆された。図2にセントラル部線密度と東西アンカー部の(a)低密度側、(b)高密度側の線密度との関係を示す。図中の●(赤丸)は東西アンカー部同時加熱による実験点、●(青丸)は東西アンカー部のどちらか一方のみに位相差制御を適用した加熱、または追加加熱をしていない実験点を表している。セントラル部線密度と低密度側アンカー部線密度(図2(a))に正の相関があることが分かる。即ち、アンカー部の密度上昇による電位形成に伴いセントラル部の高密度化が促されたことが示唆された。

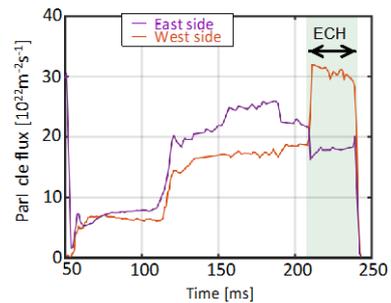


図1 両アンカー加熱時の端損失粒子束

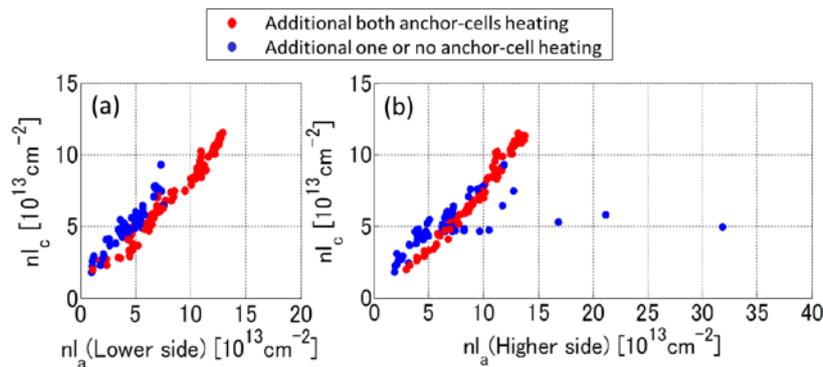


図2 セントラル部線密度と(a)低密度側アンカー部線密度、(b)高密度側アンカー部線密度との関係

(2) アンカー部及びバリア部の ICRF アンテナを用いたプラズマ制御実験

アンカー部は極小磁場配位のためイオンサイクロtron共鳴層は楕円体形状であり、共鳴層の大きさは印加周波数に依存する(図3(a))。有限要素法による3次元波動解析コードを用いてアンカー部における ICRF 吸収電力の半径方向周波数依存性を求めたところ(図3(b))、印加周波数が小さくなるほどイオンサイクロtron共鳴層は半径中心部に向かうことから、吸収電力の半径方向分布も周波数減少に伴い中心部で増大することが計算された。このことから、アンカー部アンテナ駆動周波数を変更することにより、プラズマパラメータの径方向分布制御が可能であることが示唆された。実際、EAI-DAT に 9.4 MHz の ICRF 波動を入射すると、セントラル部径方向中心部と周辺部で密度の上昇と

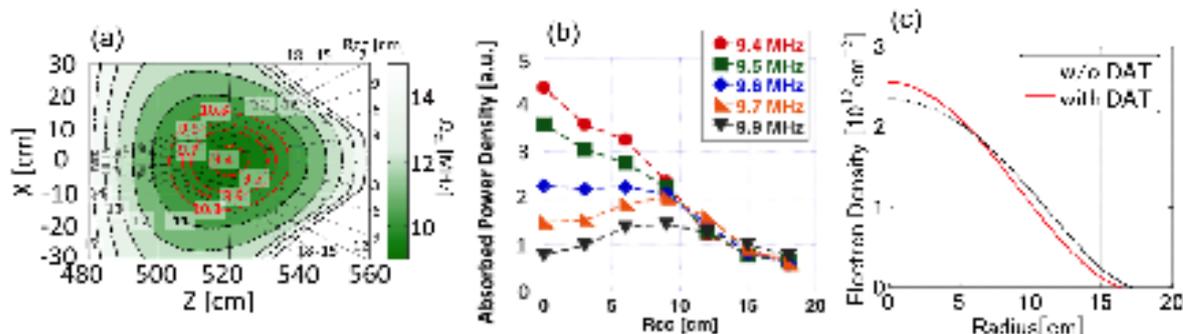


図3 (a)アンカー部のICRF波動周波数に対するイオンサイクロトロン共鳴位置とセントラル部ミッドプレーンにおける半径位置 R_{cc} から引いた磁力線形状。(b)波動解析コードによるアンカー部吸収電力密度の周波数依存性。(c)EAI-DATアンテナに9.4MHzのICRF波動を印加した時のセントラル部径方向密度分布変化。

減少が観測された(図3(c))。更に、効率的な中心部の加熱に伴い径方向電位分布の変化も観測された。

アンカー部にICRF波動加熱を行うことにより励起される波動と加熱効果を検証するため、西側アンカー部にマイクロ波反射計を設置した。プローブ周波数を放電毎に変更することにより、位相信号の時間変化からカットオフ層の径方向変動長が得られた。これは密度分布形状の変化に相当し、マイクロ波干渉計で計測された密度の線積分量がICRF追加熱により増減するのに対応して密度の増減が確認された。また、高周波波動に起因する揺動強度のアンカー部径方向分布が得られた。今後、セントラル部とアンカー部における高周波密度揺動の差異からセントラル部からアンカー部にかけた波動の空間構造の検討を進める。

端損失プラズマ制御のために設置したバリア部アンテナについては、波動解析コードを用いて効率的なICRF波動励起の検討を行うとともに、バリア部でより効率的にプラズマ生成を行うため、Type-IIIアンテナの設計・設置を行い、次年度の実験に備えた。

(3) 端損失高エネルギーイオンに対する自発励起ICRF波動の効果

ダイバータ模擬研究においては端損失エネルギー制御が不可欠であり、その輸送機構を解明し、制御に関する知見を得る必要がある。端損失粒子にはkeVオーダーの高エネルギーイオンが含まれ、その軸方向輸送には強い温度非等方性に起因して自発励起されるアルベンイオンサイクロトロン(AIC)波動が関係している。高エネルギーイオンがその波動と相互作用すると考えられるセントラル部において、マイクロ波反射計を用いた高温プラズマ内部における波動計測を行い、これまでにAIC波動間の差周波波動が特にコア領域において非線形的に励起されていることが確かめられている。しかし、波動粒子相互作用を詳細に調べるためには、波動の強度分布や位相分布の全体像を知る必要がある。そこで、本年度は反射計の調整、データ解析の改良を進め、MHz帯の高周波成分に対して有意義な測定が可能であることを示す結果を得た。

図4に、セントラル部磁力線方向に0.6m離れた2組の送受信アンテナを設置し、AIC

波動に伴う密度揺動を測定した結果を示す。図4 (a)は反射計出力の周波数スペクトルの時間発展であり、色の濃いピークがAIC波動に対応し、時間的に周波数や強度が変化している。図4 (b)は、ほぼ同じ磁力線上の0.6m離れた位置で計測した密度揺動の間のコヒーレンスの時間発展である。AIC波動の周波数においてコヒーレンスが強い時間帯も存在するが、安定していない。反射波に含まれる振幅・位相変調成分をヘテロダインシステムにより分離し、それぞれのコヒーレンスの時間発展を図4 (c), (d)に示した。振幅変調成分のコヒーレンスは低くノイズレベルであるが(図4 (c))、振幅変調成分のパワースペクトルにはAIC波動成分が確かに存在することから、振幅変調を引き起こす機構が磁力線方向に離れた位置ではコヒーレントに生じず、ランダムな位相で起こることを示唆している。一方、反射計で本来評価したい位相変調成分から求めたコヒーレンス(図4 (d))は高く、時間的に安定している。これらの結果は、GAMMA 10においてグローバルに励起されるAIC波動のコヒーレントな波動構造を、開発したマイクロ波反射計を用いて有意義に調べることができることを示している。AIC波動間の差周波波動が非線形的に励起されることが示唆されているより内側領域ではAIC波動構造が単純ではなく、2点相関で求めた位相差が時間的にも複雑な振る舞いを示すことがわかってきており、今後その詳細を粒子との相互作用に着目して整理する。

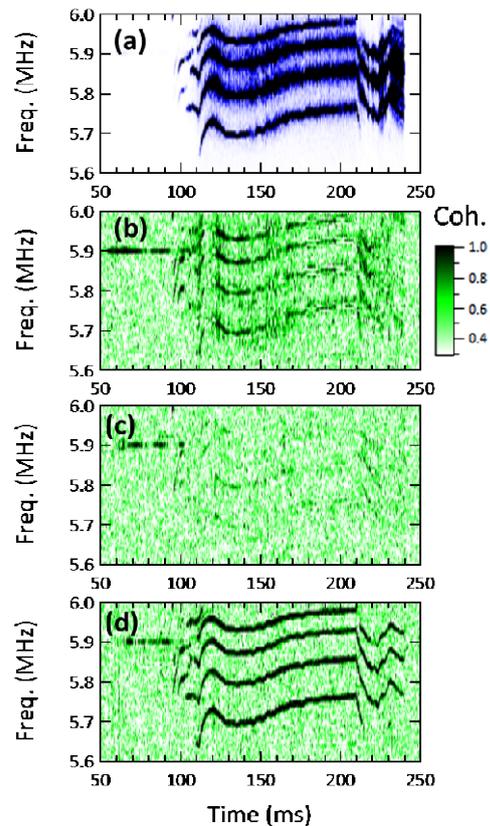


図4 AIC波動に起因する密度揺動の(a)スペクトル、磁力線方向に0.6m離れた二点間の反射計信号の(b)コヒーレンス、(c)振幅成分のコヒーレンス、(d)位相成分のコヒーレンスの時間発展。

【12】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、吸収位置制御の観点から、これまでのアンテナ系と比較して、共鳴層での放射分布形状がブロードとなるアンテナ・ミラーの設計(M5、電力密度の1/e半径が約8 cm、伝送効率95%)を実施し、ガンマ10実験に適用した(図1)。ブロード・アンテナ系M5の場合は、他のアンテナ系でプラズマの回転等の不安定性が見られた入射パワーと同等レベルのパワー入射でも、プラズマの回転等

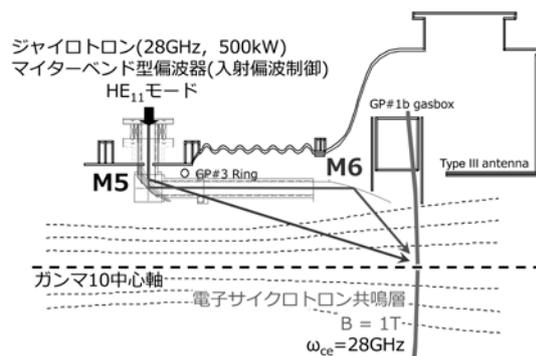


図1 セントラル部ECHアンテナ配位。

は見られずに安定に入射する事が出来、ECH印加時の不安定性の抑制に効果があったと考えられる。しかしながら、反磁性量の増加は、10-20%程度とそれ程大きくはなかった(図2)。また、トムソン散乱により計測した電子温度は、他のアンテナ系で得られた電子温度と比較して高くはなかった。以上より、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アンテナを設計(M6)した。その結果、電力密度の1/e半径が5 cm、伝送効率95%のアンテナ系を設計できた(図3)。

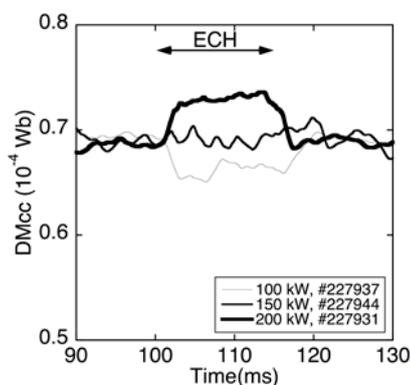


図2 M5アンテナによるECH印加時の反磁性量の時間変化。

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蓄積を行った。特に、径方向分布のデータ取得を詳細に行った。図4に、ガンマ10西側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。その結果、380

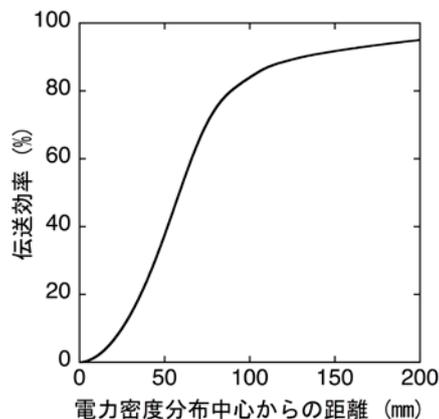


図3 新アンテナ(M6)の伝送効率。

kW 5 ms のプラグ部ECH入射で、0.05 MJ/m²を超えるエネルギー密度が得られた。ITERのType I ELMのエネルギー密度は、0.2 ~ 2 MJ/m²と想定されており、それと比較すると1オーダー程度低いが、入射パワーの増大に伴い、エネルギー密度が、飽和することなくおおよそ線形に増大することが明らかとなった。これに基づき、中心軸上のECHパワー放射分布を、1オーダー程度以上高くする必要があると考察し、ECHパワー放射分布のビーム半径を局在化させるミラー設計を行った。その結果、マイクロ波放射パワー密

度分布の1/e半径を、現有のミラーアンテナの6.3 cmから4.0 cmに局在化させたミラー形状が得られた(図5)。

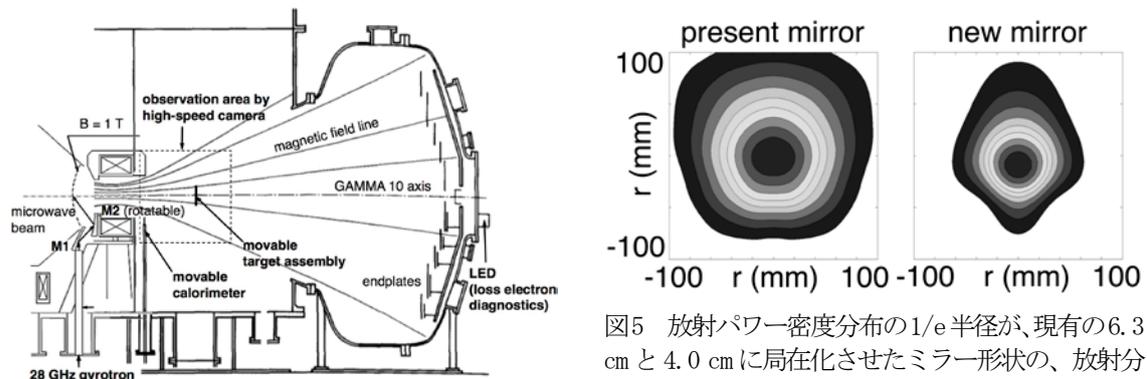


図4 西側プラグ部及びエンド部断面概略図。

図5 放射パワー密度分布の1/e半径が、現有の6.3 cmと4.0 cmに局在化させたミラー形状の、放射分布計算結果。

【13】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、日本原子力研究開発機構(JAEA)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の設計を完了し、ジャイロトロン製作を行った。ジャイロトロン搭載前に、主要コンポーネントの一つであるダブルディスク窓の性能試験を行った。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 ジャイロトロン開発を継続し、空洞共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1.2MW、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、60kAのプラズマ電流立上や、8.2GHzのカットオフ密度より高い $1 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$ を

超えるオーバードレンスプラズマの生成等の成果を得た。2015年度のQUEST実験適用前に発振調整を行い1.38MWの出力を得た。図1に、これまでに得られていたデータも含めた出力と効率のビーム電流依存性を示す。出力アップの要因は、電源調整によりビーム電流55Aまで出力調整が可能となったことによる。

次のステップとして、GAMMA10における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GAMMA10用28GHz-2MW-3sのジャイロトロンの開発を進めている。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28GHz-1.5~2MW-3s、Heliotron Jで必要とされる動作性能35GHz-1MW-0.5秒を1本のジャイロトロンで動作可能な、28GHz/35GHzの2周波ジャイロトロンである。

2015年度は、重要なコンポーネントの一つである出力窓の性能試験を、ジャイロトロン管搭載前に行った。2周波数ジャイロトロンの出力窓は、0.4MWでのCW動作が可能なサファイア製ダブルディスク窓である。ダブルディスク窓は、サファイア・ディスク厚や冷却媒体であるフロリナートの流路ギャップにより周波数帯域特性が変わるため、製造、組立精度により設計値よりずれる可能性がある。そのため、ジャイロトロンへの搭載に先立ち、窓の製作、性能評価試験を行った。スペーサーの厚みを1mm間隔で5パターン変えることで、窓反射率のフロリナート流路ギャップ依存性を測定した。低電力試験では、入射波源として2mWのガン発振器を用いた。放射アンテナとしてHE₁₁モード変換器を用い円形コルゲート導波管でガウシアンビームを放射した場合と、矩形ホーンアンテナでTE₀₁モードを放射した場合の測定を行った。受信アンテナとしては矩形ホーンアンテナを用いパワーメータで電力の測定を行い、窓有無での受信電力の違いより窓の反射率を算出した。加えて、受信アンテナの代わりにRF吸収体を置きその温度上昇をIRカメラで計測、窓有無での温度上昇分布の面積積分値の比より反射率の違いを算出した。大電力試験では、28GHzジャイロトロンで600kWの出力を出し、ジャイロトロン出力窓にダブルディスク窓を取付けた場合の出力を測定することで反射率を算出した。図2に低電力試験の結果を、図3に大電力試験の結果を計算値と共に示す。測定法により反射率の絶対値

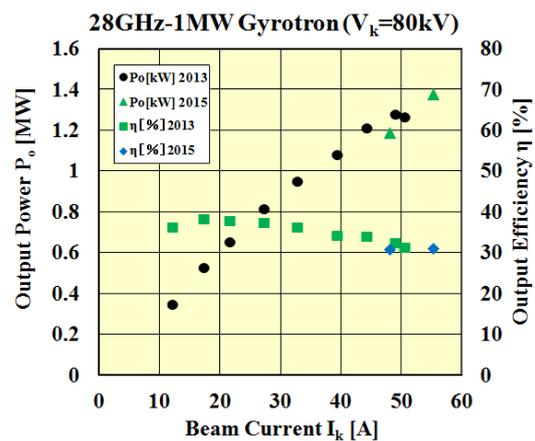


図1 28GHz-1MW ジャイロトロンの出力と効率のビーム電流依存性

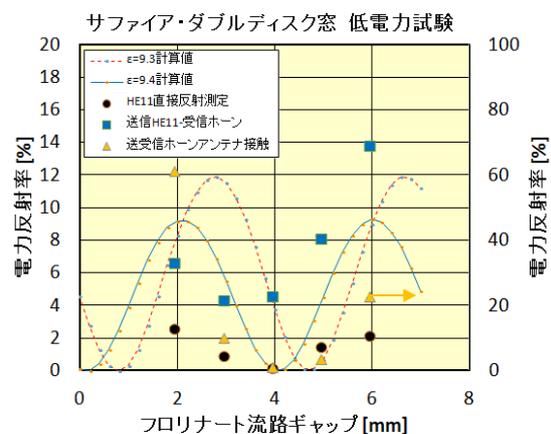


図2 ダブルディスク窓電力反射率のフロリナート流路ギャップ依存性 (2mW 低電力試験)

が違う要因として、屈折の影響や、反射波や位相ずれによる干渉の影響が考えられる。これらの結果より、サファイアの28GHzの誘電率は9.4に近いこと、フロリナート流路ギャップは4mm付近に最適値があることが確認できた。実機搭載後に出力が最大となる様に流路ギャップの微調整を34.8GHz発振の場合も合わせ行う予定である。

また、ダブルディスク窓での効率的な面冷却を行うためには、均一な流れと流速の確保が重要であり、2種類の流路形状において

フロリナート流れ試験を行い、その形状を決定した。窓以外のフロリナート循環システムの圧力損出を減らし、更に流速を上げる改良が必要な事を確認した。実機試験では、窓温度を測定し、必要な対策をしつつCW化を目指す予定である。

ジャイロトロンは設計を完了し、製作組み立てを行い、排気ベーキングまで完了した。今後、耐電圧、耐水圧試験等を実施し、2016年6月より発振試験を開始する予定である。

(3) 154/116GHz 2周波数ジャイロトロンの設計

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

2015年度は、LHDにおけるプラズマ実験領域拡大のため、154GHzと116GHzの両方で動作可能な2周波数ジャイロトロンの設計を開始した。154GHzと115.5GHz近傍の両周波数に対し、同一電子銃で良い電子ビームパラメータが得られるか、同一空洞共振器で発振可能か、同一放射器で同じ放射角を持つか、同一出力窓でマッチングが取れるか、同一コレクタで低熱負荷運転が可能か、を検討し空洞発振モードの組み合わせを154GHzで $TE_{38,9}$ モード、116GHzで $TE_{27,1}$ モードに決定した。両モードのピッチファクタ $\alpha=1$ における発振出力のビーム電流依存性を図4に示す。空洞共振器のQ値を下げ、ビームで電流10A程度の低電流では発振しないが、50A以上の大電流での発振効率を上げ、2MW以上の発振が可能な設計としている。

(4) 300GHz ジャイロトロンの開発

日本原子力研究開発機構(JAEA)との共同研究として、核融合発電に向けたDemo炉用

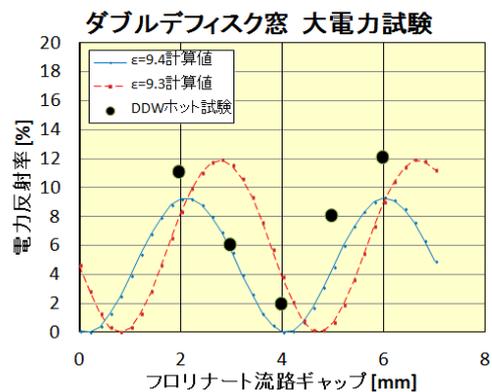


図3 ダブルディスク窓電力反射率のフロリナート流路ギャップ依存性 (600kW 大電力試験)

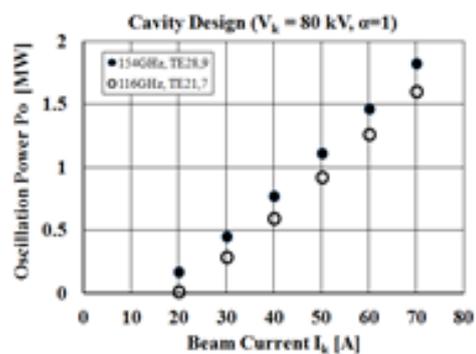


図4 154/116GHz ジャイロトロンの発振電力のビーム電流依存性 ($\alpha=1$)

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は、空洞磁場強度とガン磁場強度に関する発振モードマップを詳細に調べ、競合モードであるTE_{30,19}モード(301.8 GHz)の発振が、主モードであるTE_{32,18}モード(299.84 GHz)の発振を妨げていることを確認した。出力窓にSiO₂板を付加することで出力窓の周波数特性を調整することで、窓での反射はにより空洞の実効Q値が変わり、発振特性に影響していることを確認した。この反射の影響は、大電力、長パルス化に向け必須となるモード変換器を内蔵し、出力伝送系の工夫により除去できると考える。出力としては、299.84 GHz (TE_{32,18})で522 kW、295.65 GHz (TE_{31,18})で542kW、301.8 GHz (TE_{30,19})で528kWが得られた。300GHz帯における500kWを超えるmsオーダーの発振は、世界で最初の成果であり、Demo 炉の300GHz-MW-CW ジャイロトロン開発に向けての大きなステップである。

【14】核融合アーカイブズにおける筑波大学プラズマグループとしての活動

核融合研究界においてミラー研究の拠点と目されており、広く関連史料の保管に努めているが、学界からも歴史資料の保存の必要性が求められている。筑波大学プラズマグループは平成17年度より核融合科学研究所アーカイブ共同研究に加わったことで、一層体系的に整理保管する体制が整った。登録管理システムは核融合科学研究所の書式に倣った。原則公開できる紙史料は随時増え、現在も新たに加わった史料の登録を続けている。測定機等ハードウェアのアーカイブについては京都大学を手本に検討している。収集も併行して行って、整理している。歴史資料保存に対する大学の意識の高揚を望む。

平成26年11月以来毎年の大学の「筑波大学アーカイブズ設置に向けて法人文書管理に関するアンケート」への物理学専攻の回答に寄与した。

歴史資料の利用は検索調査、利用が2百数十件あった。12月4日核融合科学研究所主催の共同研究会に出席し発表、さらなる情報収集を行った。

〈論文〉

01. T. Yoshida, N. Ezumi, K. Sawada, Y. Tanaka, M. Tanaka and K. Nishimura,
Energy Density Dependence of Hydrogen Combustion Efficiency in Atmospheric Pressure Microwave Plasma,
Fusion Science and Technology **67**, 3 (2015) 650-653.
02. Y. Nakashima, M. Sakamoto, H. Takeda, K. Ichimura, Y. Hosoda, M. Iwamoto, K. Shimizu, K. Hosoi, K. Oki, M. Yoshikawa, M. Hirata, R. Ikezoe, T. Imai, T. Kariya, I. Katanuma, J. Kohagura, R. Minami, T. Numakura, X. Wang, M. Ichimura,
Recent results of divertor simulation experiments using D-module in the GAMMA 10/PDX tandem mirror,
Fusion Science and Technology **68** (2015) 28-35.
03. R. Ikezoe, M. Ichimura, M. Hirata, T. Yokoyama, Y. Iwamoto, T. Okada, S. Sumida, K. Takeyama, S. Jang, T. Oi, K. Ichimura, Y. Nakashima,
Extension of Operational Regimes with ICRF Heating on GAMMA 10/PDX,
Fusion Science and Technology **68** (2015) 63-69.
04. K. Oki, M. Sakamoto, Y. Nakashima, M. Yoshikawa, R. Nohara, K. Nojiri, A. Terakado, M. Mizuguchi, K. Ichimura, H. Takeda,

- Electron Temperature and Density Distributions in a Divertor Simulation Experimental Module with Gas Injection in GAMMA 10/PDX,
Fusion Science and Technology **68** (2015) 81-86.
05. Masayuki Yoshikawa, Xiaolong Wang, Masahiro Morishita, Yoriko Shima, Masayuki Chikatsu, Junko Kohagura, Mizuki Sakamoto, Ryutaro Minami, Masaki Iso, Yousuke Nakashima, Tsuyoshi Imai, Makoto Ichimura, Ryo Yasuhara, Ichihiro Yamada, Hisamichi Funaba, Takashi Minami,
Development of Thomson Scattering System in GAMMA 10,
Fusion Science and Technology **68** (2015) 99-104.
 06. K. Nojiri, M. Sakamoto, K. Oki, M. Yoshikawa, Y. Nakashima, M. Yoshikawa, A. Terakado, R. Nohara, M. Mizuguchi, T. Imai,
RELATION BETWEEN ELECTRON DENSITY AND TEMPERATURE OF DIVERTOR SIMULATION PLASMA AND UPSTREAM PLASMA IN GAMMA 10/PDX,
Fusion Science and Technology **68** (2015) 120-124.
 07. H. Tanaka, M. Sakamoto, K. Furutachi, K. Oki, M. Mizuguchi, Y. Nagatsuka, M. Yoshikawa, R. Nohara, M. Yoshikawa, J. Kohagura,
CORRELATION ANALYSIS OF 3-4 KILOHERTZ CORE AND EDGE DENSITY FLUCTUATIONS IN THE GAMMA 10 TANDEM MIRROR DEVICE,
Fusion Science and Technology **68** (2015) 125-129.
 08. K. Shimizu, Y. Nakashima, Y. Hosoda, K. Ichimura, H. Takeda, M. Iwamoto, K. Oki, M. Sakamoto, T. Imai and M. Ichimura,
SPECTROSCOPIC MEASUREMENTS IN THE EXPERIMENTS OF GAS INJECTION TO THE DIVERTOR SIMULATION EXPERIMENTAL MODULE OF GAMMA10/PDX,
Fusion Science and Technology **68** (2015) 130-135.
 09. S. Sumida, M. Ichimura, T. Yokoyama, M. Hirata, R. Ikezoe, Y. Iwamoto, T. Okada, K. Takeyama, S. Jang, M. Sakamoto, Y. Nakashima, M. Yoshikawa, R. Minami, K. Oki, M. Mizuguchi, K. Ichimura,
High-Density Plasma Production in the GAMMA 10 Central Cell with ICRF Heating on Both Anchor Cells,
Fusion Science and Technology **68** (2015) 136-141.
 10. R. Minami, T. Imai, T. Kariya, T. Numakura, T. Kato, M. Uehara, R. Goto, K. Tsumura, Y. Endo and M. Ichimura,
Design of Mirror Antenna and MW Gyrotron for Control of High Intermittent Heat Flux in GAMMA 10 Tandem Mirror,
Fusion Science and Technology **68** (2015) 142-146.
 11. T. Kariya, R. Minami, T. Imai, T. Kato, H. Idei, K. Hanada, H. Zushi, T. Numakura, Y. Endo, M. Ichimura,
Development of 28 GHz gyrotron for cooperative ECH study,
Fusion Science and Technology **68** (2015) 147-151.
 12. T. Okada, R. Ikezoe, M. Ichimura, M. Hirata, T. Yokoyama, Y. Iwamoto, S. Sumida, K. Takeyama, S. Jang, M. Yoshikawa, J. Kohagura, Y. Shima,
Internal Measurement of Propagation of ICRF Waves by Using Reflectometers on GAMMA 10,
Fusion Science and Technology **68** (2015) 161-165.
 13. X. Wang, S. Kanno, J. Kohagura, M. Yoshikawa, Y. Shima, Y. Nakashima, M. Sakamoto, K. Oki, T. Imai, M. Ichimura, Y. Nagayama, D. Kuwahara, A. Mase,
A Novel Frequency-Multiplied Interferometer System with 1-D Horn-Antenna Mixer Array in the GAMMA 10/PDX End Divertor Module,
Fusion Science and Technology **68** (2015) 178-184.
 14. T. Yokoyama, M. Ichimura, A. Fukuyama, S. Sumida, M. Hirata, R. Ikezoe, Y. Iwamoto, T. Okada, K. Takeyama, S. Jang,
Analysis of Wave Excitation of the Phase-Control ICRF Antennas with Three-Dimensional Full Wave Code on GAMMA 10,
Fusion Science and Technology **68** (2015) 185-189.
 15. Kensuke OKI, Mizuki SAKAMOTO, Yousuke NAKASHIMA, Motoki YOSHIKAWA, Kunpei NOJIRI, Ryo NOHARA, Akihiro TERAKADO, Masayuki YOSHIKAWA, Junko KOHAGURA, Hisato TAKEDA, Kazuya ICHIMURA, Tsuyoshi IMAI and Makoto ICHIMURA,
Measurements of Electron Temperature and Density Distribution on a V-Shaped Target of a Divertor Simulation Experimental Module in GAMMA 10/PDX,
Plasma and Fusion Research **10** (2015) 1402071.
 16. Y. Nakashima, H. Takeda, K. Ichimura, K. Hosoi, K. Oki, M. Sakamoto, M. Hirata, M. Ichimura, R. Ikezoe, T. Imai,

- M. Iwamoto, Y. Hosoda, I. Katanuma, T. Kariya, S. Kigure, J. Kohagura, R. Minami, T. Numakura, S. Takahashi, M. Yoshikawa, N. Asakura, M. Fukumoto, A. Hatayama, Y. Hirooka, S. Kado, H. Kubo, S. Masuzaki, H. Matsuura, S. Nagata, N. Nishino, N. Ohno, A. Sagara, T. Shikama, M. Shoji, A. Tonegawa, Y. Ueda,
Progress of divertor simulation research toward the realization of detached plasma using a large tandem mirror device,
Journal of Nuclear Materials **463** (2015) 537-540.
17. M. Yoshikawa, K. Ohta, X. Wang, M. Morishita, M. Chikatsu, Y. Shima, J. Kohagura, R. Yasuhara, M. Sakamoto, Y. Nakashima, T. Imai, M. Ichimura, I. Yamada, H. Funaba, K. Kawataha, and T. Minami,
Electron Temperature Measurements by the use of Multi-Pass Thomson Scattering System in GAMMA 10/PDX,
Journal of Instrumentation **10** (2015) T08003.
 18. X. Wang, Z. Ma, I. Sakagami, A. Mase and M. Yoshikawa,
Miniaturized Wilkinson Power Divider with Extra Coupled Line Section for Compensation,
Microwave and Optical Technology Letters **57**, 8 (2015) 1869-1873.
 19. A. Kuzmin, H. Zushi, I. Takagi, SK, Sharma, A. Rusinov, Y. Inoue, Y. Hirooka, H. Zhou, M. Kobayashi, M. Sakamoto,
Global gas balance and influence of atomic hydrogen irradiation on the wall inventory in steady-state operation of QUEST tokamak,
Journal of Nuclear Materials **463** (2015) 1087-1090.
 20. Gen MOTOJIMA, Naoaki YOSHIDA, Takanori MURASE, Hirohiko TANAKA, Suguru MASUZAKI, Ryuichi SAKAMOTO, Masayuki TOKITANI, Kenji MATSUMOTO, Mitsutaka MIYAMOTO, Miyuki YAJIMA, Mizuki SAKAMOTO, Hiroshi YAMADA, Tomohiro MORISAKI and LHD Experiment Group,
Preliminary Examination of Reflection Coefficient Measurement of RGB Lights on the First Wall in LHD,
Plasma and Fusion Research **10** (2015) 1202074.
 21. R. Ikezoe, M. Ichimura, T. Okada, M. Hirata, T. Yokoyama, Y. Iwamoto, S. Sumida, S. Jang, K. Takeyama, M. Yoshikawa, J. Kohagura, Y. Shima, and X. Wang,
Wave excitation by nonlinear coupling among shear Alfvén waves in a mirror-confined plasma,
Physics of Plasmas **22** (2015) 090701.
 22. T. Kariya, T. Imai, R. Minami, T. Numakura, T. Eguchi, T. Kato, Y. Endo, M. Ichimura, T. Shimosuma, S. Kubo, H. Takahashi, Y. Yoshimura, H. Igami, S. Ito, T. Mutoh, K. Sakamoto, H. Idei, H. Zushi, K. Nagasaki, F. Sano, M. Ono, Y. Mitsunaka,
Development of gyrotrons for fusion with power exceeding 1 MW over at wide frequency range,
Nuclear Fusion **55** (2015) 93009.
 23. Ida, K; Nagaoka, K; Inagaki, S; Kasahara, H; Evans, T; Yoshinuma, M; Kamiya, K; Ohdach, S; Osakabe, M; Kobayashi, M; Sudo, S; Itoh, K; Akiyama, T; Emoto, M; Dinklage, A; Du, X; Fujii, K; Goto, M; Goto, T; Hasuo, M; Hidalgo, C; Ichiguchi, K; Ishizawa, A; Jakubowski, M; Kawamura, G; Kato, D; Morita, S; Mukai, K; Murakami, I; Murakami, S; Narushima, Y; Nunami, M; Ohno, N; Pablant, N; Sakakibara, S; Seki, T; Shimosuma, T; Shoji, M; Tanaka, K; Tokuzawa, T; Todo, Y; Wang, H; Yokoyama, M; Yamada, H; Takeiri, Y; Mutoh, T ; Imagawa, S; Mito, T; Nagayama, Y; Watanabe, KY; Ashikawa, N; Chikaraishi, H; Ejiri, A; Furukawa, M; Fujita, T; Hamaguchi, S; Igami, H; Isobe, M ; Masuzaki, S; Morisaki, T; Motojima, G; Nagasaki, K; Nakano, H; Oya, Y; Suzuki, C; Suzuki, Y; Sakamoto, R; Sakamoto, M; Sanpei, A; Takahashi, H ; Tsuchiya, H; Tokitani, M; Ueda, Y; Yoshimura, Y; Yamamoto, S; Nishimura, K ; Sugama, H; Yamamoto, T; Idei, H; Isayama, A; Kitajima, S; Masamune, S ; Shinohara, K; Bawankar, PS; Bernard, E; von Berkel, M; Funaba, H; Huang, XL ; Ii, T; Ido, T; Ikeda, K; Kamio, S; Kumazawa, R; Kobayashi, T; Moon, C ; Muto, S; Miyazawa, J; Ming, T; Nakamura, Y ; Nishimura, S; Ogawa, K; Ozaki, T; Oishi, T; Ohno, M; Pandya, S; Shimizu, A; Seki, R; Sano, R; Saito, K; Sakaue, H; Takemura, Y; Tsumori, K; Tamura, N; Tanaka, H; Toi, K; Wieland, B ; Yamada, I; Yasuhara, R; Zhang, H; Kaneko, O; Komori, A,
Overview of transport and MHD stability study: focusing on the impact of magnetic field topology in the Large Helical Device,
Nuclear Fusion **55**, 10 (2015) 104018.
 24. M. Yoshikawa, H. V. D. Maiden, R. AL, K. Bystrov, J. Vernimmen, J. Kohagura, Y. Shima, X. Wang, M. Ichimura, M. Sakamoto, and Y. Nakashima,
Preliminary Measurements of Low Frequency Fluctuations by a Microwave Interferometer System and a Fast Camera in Pilot-PSI Device,
Plasma and Fusion Research **10** (2015) 1202088.
 25. X. Wang, M. Yoshikawa, J. Kohagura, Y. Shima, R. Ikezoe, M.Sakamoto, T. Imai, Y. Nakashima, Z. Ma, I. Sakagami and A. Mase,

- A Narrow Band-pass Filter Type Wilkinson Power Divider for I-Q Demodulator in Microwave Interferometer System,
Journal of Instrumentation **10** (2015) C11005.
26. M. Yoshikawa, K. Ohta, X. Wang, M. Chikatsu, J. Kohagura, Y. Shima, M. Sakamoto, T. Imai, Y. Nakashima, R. Yasuhara, I. Yamada, H. Funaba, and T. Minami,
Radial Electron Temperature and Density Measurements Using Thomson Scattering System in GAMMA 10/PDX,
Journal of Instrumentation **10** (2015) C11006.
27. J. Kohagura, X. Wang, S. Kanno, M. Yoshikawa, D. Kuwahara, Y. Nagayama, Y. Shima, M. Chikatsu, K. Nojiri, M. Sakamoto, T. Imai, Y. Nakashima, and A. Mase,
Development of microwave interferometer system for divertor simulation experiments in GAMMA 10/PDX,
Journal of Instrumentation **10** (2015) C12024.
28. D. Kuwahara, N. Ito, Y. Nagayama, H. Tsuchiya, M. Yoshikawa, J. Kohagura, T. Yoshinaga, S. Yamaguchi, Y. Kogi, A. Mase and S. Shinohara,
Development of local oscillator integrated antenna array for microwave imaging diagnostics,
Journal of Instrumentation **10** (2015) C12031.
29. Junko KOHAGURA, Tokihiko TOKUZAWA, Masayuki YOSHIKAWA, Kohei NARITA, Mizuki SAKAMOTO and Yousuke NAKASHIMA,
Doppler Reflectometer System for Measuring Rotation Velocity of Fluctuation in GAMMA 10,
Plasma and Fusion Research **11** (2016) 2402022.
30. Tomohiro KATSURA, Takahiro WAKAIZUMI, Hiromasa TAKENO, Kazuya ICHIMURA and Yousuke NAKASHIMA,
Studies on the Axial Position of the Decelerator in Traveling Wave Direct Energy Converter,
Plasma and Fusion Research **11** (2016) 2405013.
31. Masaki HAMABE, Hiroaki IZAWA, Hiromasa TAKENO, Satoshi NAKAMOTO, Kazuya ICHIMURA, Yousuke NAKASHIMA,
Studies on the effect of radio frequency field in a cusp-type charge separation device for direct energy conversion,
Plasma and Fusion Research **11** (2016) 2405028.

〈学位論文〉

学位論文（修士）[数理物質科学研究科]

01. 磯 将貴 [修士（理学），数理物質科学研究科物理学専攻]
多チャンネルマイクロ波干渉計を用いた GAMMA10 プラズマの揺動相関解析
02. 上原 真 [修士（理学），数理物質科学研究科物理学専攻]
GAMMA 10/PDX セントラル ECRH のプラズマ加熱特性とアンテナ改良研究
03. 菅野 傑 [修士（理学），数理物質科学研究科物理学専攻]
GAMMA 10/PDX ダイバータ模擬実験におけるマイクロ波イメージング干渉計を用いた線電子密度計測
04. 清水啓太 [修士（理学），数理物質科学研究科物理学専攻]
GAMMA 10/PDX ダイバータ模擬実験における分光計測を用いた不純物の挙動解析
05. 白石智洋 [修士（理学），数理物質科学研究科物理学専攻]
GAMMA 10/PDX 西プラグ部における位相イメージング干渉計を用いたプラズマ電子密度計測
06. 寺門明紘 [修士（理学），数理物質科学研究科物理学専攻]
GAMMA 10/PDX ダイバータ模擬プラズマへの水素ガス供給による非接触プラズマ生成時のバルマー線強度空間分布計測
07. 野尻訓平 [修士（理学），数理物質科学研究科物理学専攻]
GAMMA 10/PDX における水素ガス追加供給によるダイバータ模擬プラズマの非接触化時の静電プローブ計測
08. 岩本嘉章 [修士（理学），数理物質科学研究科物理学専攻]
GAMMA10 アンカー部高周波加熱時のセントラル周辺部浮遊電位解析
09. 岡田拓也 [修士（工学），数理物質科学研究科物理学専攻]
マイクロ波反射計を用いた高温ミラープラズマ中の高周波波動伝搬計測
10. 隅田脩平 [修士（工学），数理物質科学研究科物理学専攻]
GAMMA 10/PDX におけるアンカー部高周波加熱を用いたプラズマ高密度化
11. 小田弦之介 [修士（工学），数理物質科学研究科物理学専攻]

温度勾配駆動ドリフト波不安定性の研究

学位論文 (学士) [理工学群]

12. 新井瑞穂 [学士 (理学), 理工学群物理学類]
GAMMA 10/PDX における D-module へのガス入射時のセントラル部のプラズマ電子密度測定
13. 宮本泰平 [学士 (理学), 理工学群物理学類]
GAMMA 10/PDX ダイバータ模擬部における Thomson 散乱計測システムの導入
14. 板垣惇平 [学士 (理学), 理工学群物理学類]
GAMMA10 アンカー部における高周波加熱時の密度変動及び揺動計測
15. 伊能俊太郎 [学士 (理学), 理工学群物理学類]
GAMMA 10 セントラル部に長期設置されたセントラル部に長期設置されたタングステ試料の重水素吸蔵特性評価
16. 江橋優斗 [学士 (理学), 理工学群物理学類]
28/35GHz 2 周波数ジャイロトロン用ダブルディスク出力窓の性能評価試験
17. 大久保克朗 [学士 (理学), 理工学群物理学類]
GAMMA10 セントラル部周辺領域プラズマにおける高速駆動プローブを用いた分布測定
18. 小野寺悠斗 [学士 (理学), 理工学群物理学類]
波動計算コードを用いた GAMMA10/PDX バリア部高周波アンテナの検討
19. 梶野悟史 [学士 (理学), 理工学群物理学類]
GAMMA10/PDX セントラル ECRH アンテナの改良研究
20. 横土敬幸 [学士 (理学), 理工学群物理学類]
GAMMA 10/PDX エンド部における不純物ガス入射時のプラズマ分光計測
21. 根本紀也 [学士 (理学), 理工学群物理学類]
GAMMA 10/PDX におけるセントラル部 H α 線計測器を用いた非接触プラズマ生成時のコアプラズマへの影響の研究

<講演>

01. X. Wang, Z. Ma and I. Sakagami,
A compact and harmonic suppression Wilkinson power divider with general pi type structure,
IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest (Phoenix, AZ, USA, 2015.5.17-2015.5.22).
02. M. Sakamoto, H. Tanaka, A. Terakado. R. Ohyama, N. Yoshida, H. Watanabe, M. Tokitani,
Impact of Surface Modification on Hydrogen Isotope Retention in Tungsten,
15th International Conference on Plasma-Facing Materials and Components for Fusion Applications
(Aix-en-Provence, France, 2015.5.18-2015.5.22).
03. M. Sakamoto, R. Ohyama, A. Rusinov and N. Yoshida,
Impact of surface modification (He bombardment and W deposition) on hydrogen isotope retention in tungsten,
21st ITPA meeting on SOL/divertor physics (Princeton Plasma Physics Laboratory, Princeton, USA,
2015.6.9-2015.6.12).
04. Yasuhisa Oda, Tsuyoshi Kariya, Ryutarou Minami, Ryosuke Ikeda, Ken Kajiwara, Koji Takahashi, Kazuo Hayashi,
Tsuyoshi Imai, Keishi Sakamoto,
Progress of 300 GHz high order mode gyrotron development,
40th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (Hong Kong, 2015.8.23-2015.8.28)
TS-68.
05. H. Takahashi, T. Shimozuma, S. Kubo, Y. Yoshimura, H. Igami, T. Ii, R. Makino, S. Kamio, S. Ito, S. Kobayashi, Y.
Mizuno, K. Okada, T. Mutoh, T. Kariya, R. Minami, T. Imai,
ECRH system upgrade for high temperature plasma in the LHD,
Workshop on RF Heating Technology of Fusion Plasmas 2015 (Tokyo, 2015.8.31-2015.9.2).
06. T. Numakura, T. Imai, T. Kariya, R. Minami, M. Uehara, K. Tsumura,
Code Development for the Calculations of the Multi-frequency Oscillations in the Cavity of the Future High-Power
Gyrotrons,
Workshop on RF Heating Technology of Fusion Plasmas 2015 (Tokyo, 2015.8.31-2015.9.2).
07. R. Minami, T. Kariya, T. Imai, T. Numakura, Y. Endo, M. Ichimura, T. Shimozuma, S. Kubo, H. Takahashi, Y.
Yoshimura, H. Igami, S. Ito, T. Mutoh, K. Sakamoto, Y. Oda, R. Ikeda, K. Takahashi, H. Idei, H. Zushi, K. Nagasaki,
F. Sano, M. Ono, T. Eguchi, Y. Mitsunaka,

- Development of Over 1 MW and Multi-Frequency Gyrotrons in University of Tsukuba,
Workshop on RF Heating Technology of Fusion Plasmas 2015 (Tokyo, 2015.8.31-2015.9.2).
08. Y. Nakashima and GAMMA 10 group,
Recent results of divertor simulation experiments in the GAMMA 10/PDX tandem mirror,
5th International Workshop on Plasma Material Interaction Facilities for Fusion Research (Juelich, Germany,
2015.9.7-2015.9.9) I-5.
 09. K. Ichimura, Y. Nakashima, M. Fukumoto, M. M. Islam, M. S. Islam, K. Shimizu, K. Fukui, M. Ichimur R. Ikezoe,
M. Yoshikawa, N. Ezumi, M. Sakamoto and T. Imai,
Analysis of neutral particle recycling and pumping in detached plasma experiments in the D-module of GAMMA
10/PDX,
5th International Workshop on Plasma Material Interaction Facilities for Fusion Research (Juelich, Germany,
2015.9.7-2015.9.9) III-1.
 10. M. Sakamoto, H. Tanaka, S. Ino, H. Watanabe, M. Tokitani, R. Ohyama, A. Rusinov and N. Yoshida,
Hydrogen isotope retention in W irradiated by heavy ions and helium plasma,
IAEA 2nd Research Coordination Meeting of Coordinated Research Project on Plasma-Wall Interaction with
Irradiated Tungsten and Tungsten Alloys in Fusion Devices (Seoul National University, Seoul, Republic of Korea,
2015.9.8-2015.9.11).
 11. I. Katanuma and G. Oda,
Particle simulation on the growth of plasma blob in an open system,
15th International Workshop on Plasma Edge Theory in Fusion Devices (Nara, Japan, 2015.9.9-2015.9.11) P1-07.
 12. Naomichi Ezumi, K. Nojiri, A. Terakado, K. Narita, M. Sakamoto, K. Sawada, N. Ohno, H. Tanaka, M. Kobayashi, S.
Masuzaki, Y. Nakashima,
Anisotropy of Ion Temperature Measured by using Ion Sensitive Probe,
International Workshop on Electric Probes in Magnetized Plasmas (IWEP2015) (Sozopol, Bulgaria,
2015.9.16-2015.9.18) O1- Fri. 18 SEP.
 13. M. Yoshikawa, K. Ohta, X. Wang, M. Chikatsu, J. Kohagura, Y. Shima, M. Sakamoto, T. Imai, Y. Nakashima, R.
Yasuhara, I. Yamada, H. Funaba, T. Minami,
Radial Electron Temperature and Density Measurements Using Thomson Scattering System in GAMMA 10/PDX,
17th International Symposium on Laser-Aided Plasma Diagnostics (Gateaux Kingdom Sapporo, Hokkaido, Japan,
2015.9.27-2015.10.1) C4.
 14. D. Kuwahara, N. Ito, Y. Nagayama, H. Tsuchiya, M. Yoshikawa, J. Kohagura, T. Yoshinaga, S. Yamaguchi, Y. Kogi,
A. Mase, S. Shinohara,
Development of local oscillator integrated antenna array for microwave imaging diagnostics,
17th International Symposium on Laser-Aided Plasma Diagnostics (Gateaux Kingdom Sapporo, Hokkaido, Japan,
2015.9.27-2015.10.1) T8.
 15. X. Wang, M. Yoshikawa, J. Kohagura, Y. Shima, R. Ikezoe, M. Sakamoto, T. Imai, Y. Nakashima, Z. Ma, I.
Sakagami and A. Mase,
A Narrow Band-pass Filter Type Wilkinson Power Divider for I-Q Demodulator in Microwave Interferometer
System,
17th International Symposium on Laser-Aided Plasma Diagnostics (Gateaux Kingdom Sapporo, Hokkaido, Japan,
2015.9.27-2015.10.1) P1.01.
 16. H. Funaba, I. Yamada, R. Yasuhara, H. Hayashi, M. Yoshikawa, T. Minami and LHD Experiment Group,
Data processing for real-time measurement of electron temperature and density by Thomson scattering in the long
pulse plasmas on LHD,
17th International Symposium on Laser-Aided Plasma Diagnostics (Gateaux Kingdom Sapporo, Hokkaido, Japan,
2015.9.27-2015.10.1) P1.08.
 17. J. Kohagura, X. Wang, S. Kanno, M. Yoshikawa, D. Kuwahara, Y. Nagayama, Y. Shima, M. Chikatsu, K. Nojiri, M.
Sakamoto, T. Imai, Y. Nakashima, A. Mase,
Development of microwave interferometer system for divertor simulation experiments in GAMMA 10/PDX,
17th International Symposium on Laser-Aided Plasma Diagnostics (Gateaux Kingdom Sapporo, Hokkaido, Japan,
2015.9.27-2015.10.1) P2.18.
 18. T. Tokuzawa, Y. Kadoya, M. Tani, K. Yamamoto, M. Hangyo, H. Kitahara, J. Kohagura, M. Yoshikawa, H. Idei, M.
Nishiura, K. Tanaka, I. Yamada, and K. Kawahata,
Application study for magnetically confined fusion plasma diagnostics using pulsed terahertz waves,
17th International Symposium on Laser-Aided Plasma Diagnostics (Gateaux Kingdom Sapporo, Hokkaido, Japan,

- 2015.9.27-2015.10.1) P2.20.
19. Naomichi Ezumi, K. Nojiri, A. Terakado, K. Narita, M. Sakamoto, K. Sawada, N. Ohno, H. Tanaka, M. Kobayashi, S. Masuzaki, Y. Nakashima,
Ion temperature measured by probes in the D-module plasma of GAMMA 10/PDX,
Fusion Research (PMIF 2015) (Juelich, Germany, 2015.10.7-2015.10.9) III-2.
 20. K.Hanada, H.Idei, N.Yoshida, H.Zushi, K.Nakamura, A.Fujisawa, Y.Nagashima, M.Hasegawa, O.Watanabe,
T.Onchi, A.Kuzmin, H.Watanabe, K.Tokunaga, A.Higashijima, S.Kawasaki, H.Nakashima, T.Nagata, T.Kariya,
T.Imai, A.Ejiri, O.Mitarai, A.Fukuyama, Y.Takase, X.Gao, H.Liu J. Qian, M.Ono, R.Raman,
Recent progress on non-inductive current drive and particle balance control towards steady-state operation on
QUEST,
18th International Spherical Torus Workshop (Princeton University, 2015.11.3-2015.11.6).
 21. R. Minami, T. Kariya, T. Imai, T. Numakura, Y. Endo, M. Ichimura, T. Shimozuma, S. Kubo, H. Takahashi, Y.
Yoshimura, H. Igami, S. Ito, T. Mutoh, K. Sakamoto, Y. Oda, R. Ikeda, K. Takahashi, H. Idei, K. Nagasaki, M. Ono,
T. Eguchi, Y. Mitsunaka,
Development of Over 1 MW and Multi-Frequency Gyrotrons for Present ST and Fusion Experiments in University
of Tsukuba,
18th International Spherical Torus Workshop (Princeton University, 2015.11.3-2015.11.6).
 22. M. Sakamoto, A. Terakado, K. Nojiri, K. Oki, N. Ezumi, Y. Nakashima, K. Ichimura, K. Shimizu, M. Fukumoto, D.
Kato, H. Sakaue, M. Yoshikawa, J. Kohagura, T. Imai, M. Ichimura,
Hydrogen recycling in the divertor simulation plasma on GAMMA 10/PDX,
25th International Toki Conference (Ceratopia Toki, Toki-city, Gifu, Japan, 2015.11.3-2015.11.6) I-7.
 23. J. Kohagura, T. Tokuzawa, M. Yoshikawa, Y. Nakashima,
Doppler reflectometer system for measuring plasma rotation velocity in GAMMA 10,
25th International Toki Conference (Ceratopia Toki, Toki-city, Gifu, Japan, 2015.11.3-2015.11.6) P1-19.
 24. Masaki HAMABE, Hiroaki IZAWA, Hiromasa TAKENO, Satoshi NAKAMOTO, Kazuya ICHIMURA, Yousuke
NAKASHIMA,
Studies on the effect of radio frequency field in a cusp-type charge separation device for direct energy conversion,
25th International Toki Conference (Ceratopia Toki, Toki-city, Gifu, Japan, 2015.11.3-2015.11.6) P1-38.
 25. Tomohiro KATSURA, Takahiro WAKAIZUMI, Hiromasa TAKENO, Kazuya ICHIMURA, Yousuke
NAKASHIMA,
Studies on the Axial Position of the Decelerator in Traveling Wave Direct Energy Converter,
25th International Toki Conference (Ceratopia Toki, Toki-city, Gifu, Japan, 2015.11.3-2015.11.6) P1-39.
 26. 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 SMI Experiments,
25th International Toki Conference (Ceratopia Toki, Toki-city, Gifu, Japan, 2015.11.3-2015.11.6) P1-71.
 27. H. Takeda, Y. Nakashima, A. Hatayama, M.S. Islam, K. Ichimura, M.M. Islam, K. Shimizu, T. Fukui, M. Sakamoto,
T. Imai,
Numerical Simulation Study of Plasma Flow in the GAMMA10/PDX End-cell Using a Fluid Code,
25th International Toki Conference (Ceratopia Toki, Toki-city, Gifu, Japan, 2015.11.3-2015.11.6) P2-08.
 28. 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,
25th International Toki Conference (Ceratopia Toki, Toki-city, Gifu, Japan, 2015.11.3-2015.11.6) P2-15.
 29. 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,
25th International Toki Conference (Ceratopia Toki, Toki-city, Gifu, Japan, 2015.11.3-2015.11.6) P2-16.
 30. 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,
25th International Toki Conference (Ceratopia Toki, Toki-city, Gifu, Japan, 2015.11.3-2015.11.6) P2-71.

31. R. Ikezoe, M. Ichimura, T. Okada, M. Hirata, T. Yokoyama, Y. Iwamoto, S. Sumida, K. Takeyama, S. Jang, T. Oi, M. Yoshikawa, J. Kohagura, Y. Shima,
Excitation of low-frequency waves via coupling between slow Alfvén waves in the GAMMA 10 tandem mirror,
57th Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics (Savannah, US, 2015.11.16-2015.11.20) NP12.00042.
32. T. Okada, R. Ikezoe, M. Ichimura, M. Hirata, S. Sumida, Y. Iwamoto, S. Jang, J. Itagaki, Y. Onodera, M. Yoshikawa, J. Kohagura, Y. Shima,
Measurement of the ICRF wave propagation in the internal region of plasmas by using reflectometers on GAMMA10,
57th Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics (Savannah, US, 2015.11.16-2015.11.20) NP12.00043.
33. X. Wang, Z. Ma, I. Sakagami, M. Yoshikawa and A. Mase,
Wilkinson Power Divider with Band-pass Filter Response and Easy Structure,
Asia-Pacific Microw. Conf. (Nanjing, China, 2015.12.6-2015.12.9) TU2E-5.
34. H. Idei, K. Hanada, H. Zushi, T. Kariya, T. Imai, K. Mishra, T. Onchi, O. Watanabe, K. Nakamura, A. Fujisawa, Y. Nagashima, M. Hasegawa, T. Togashi, A. Ejiri, Y. Takase, A. Fukuyama, H. Igami, S. Kubo, S. Ide, S. Kawasaki, T. Nakashima, A. Higashijima,
Non-inductive Plasma Current Start-up and Sustainment with Microwave and Millimeter-wave in QUEST,
10th Asia Plasma & Fusion Association Conference (Gandhinagar, 2015.12.14-2015.12.18).
35. R. Minami, T. Kariya, T. Imai, T. Numakura, Y. Endo, Y. Nakashima, T. Shimosuma, S. Kubo, H. Takahashi, Y. Yoshimura, H. Igami, S. Ito, T. Mutoh, K. Sakamoto, Y. Oda, R. Ikeda, K. Takahashi, H. Idei, K. Nagasaki, M. Ono, T. Eguchi and Y. Mitsunaka,
Development of Over 1 MW Gyrotrons and ECH Systems in University of Tsukuba,
Japan-Korea Workshop on "Physics and Technology of Heating and Current Drive" (Hitachi, Japan, 2015.12.22-2015.12.23).
36. Y. Nakashima and GAMMA 10 group,
Progress of Detached Plasma Characterization Using a Large Tandem Mirror (Comparison of N₂ and Ne seeding),
22nd ITPA meeting on SOL/divertor physics (Frascati, Italy, 2016.1.25-2016.1.28).

<解説・紀要等>

01. N. Ezumi, K. Sawada, N. Ohno, H. Tanaka, M. Kobayashi, S. Masuzaki,
Investigation of Spatial Profile of the LHD Detached Plasma,
Annual Report of National Institute for Fusion Science **April 2014 - March 2015**, (2015) 9.
02. Nagasaki, K., Osakabe, M., Seki, T., Igami, H., Yoshimura, Y., Idei, H., Takase, Y., Saito, K., Okada, H., Mutoh, T., Kasahara, H., Ichimura, M., Ikezoe, R., Murakami, S., Seki, R., Kubo, S., Shimosuma, T., Takahashi, H., Imai, T., Kariya, T., Nishiura, M., Nagaoka, K., Tokuzawa, T., Kumazawa, R., Kamio, S., Takeiri, Y., Ii, T., Tsumori, K., Nakano, H., Ikeda, K., Kisaki, M., Ejiri, A.,
Exploration of Advanced Plasma Heating Scenarios in the Large Helical Device,
Annual Report of National Institute for Fusion Science **April 2014 - March 2015**, (2015) 126.
03. Mutoh, T., Saito, K., Kamio, S., Seki, R., Watanabe, T., Tsujii, N., Shinya, T., Nishiura, M., Ikezoe, R.,
Workshop on "Development and Reactor Application of ICRF Heating Device",
Annual Report of National Institute for Fusion Science **April 2014 - March 2015**, (2015) 194.
04. M. Yoshikawa, K. Ohta, X. Wang, M. Chikatsu, J. Kohagura, Y. Shima, T. Imai, M. Sakamoto, Y. Nakashima, T. Minami, R. Yasuhara, K. Kawahata, I. Yamada, H. Funaba,
Development of the Multi-pass Thomson Scattering System GAMMA 10 Tandem Mirror,
Annual Report of National Institute for Fusion Science **April 2014 - March 2015**, (2015) 207.
05. Sakamoto, M., Nohara, R., Yoshikawa, M., Terakado, A., Nojiri, K., Oki, K., Nakashima, Y., Ichimura, M., Imai, T., Kato, D., Sakaue, H.,
Impact of Excited States of Reflected Hydrogen Atoms on Hydrogen Recycling,
Annual Report of National Institute for Fusion Science **April 2014 - March 2015**, (2015) 207.
06. N. Ezumi, K. Sawada, Y. Tanaka, M. Tanaka, S. Takayama, K. Nishimura,
Hydrocarbon Combustion in Atmospheric Pressure Plasma,
Annual Report of National Institute for Fusion Science **April 2014 - March 2015**, (2015) 336.
07. M. Yoshikawa, A. Sugiyama, Y. Washo, I. Katanuma, Y. Shima, Y. Nakashima, H. Nakanishi, M. Ohsuna, M. Kojima, Y. Nagayama,
Data Transfer and Direct Data Acquisition from GAMMA 10/PDX to LHD Virtual Laboratory via SNET,
Annual Report of National Institute for Fusion Science **April 2014 - March 2015**, (2015) 449.

08. Ichimura, M., GAMMA 10/PDX Group,
Study of Boundary Plasmas in Making Use of Potential and Heat-flux Control Effect of High Power Gyrotrons
Coinciding with their Development and Open Magnetic Field Configuration,
Annual Report of National Institute for Fusion Science **April 2014 - March 2015**, (2015) 454.
09. Ando, A., Suzuki, K., Ichimura, M., Ikezoe, R., Yokoyama, T., Iimura, T., Saito, Y.,
Plasma Flow Measurement at Peripheral Region with ICRF Heating in GAMMA10,
Annual Report of National Institute for Fusion Science **April 2014 - March 2015**, (2015) 455.
10. M. Fukumoto, H. Kubo, Y. Nakashima, K. Ichimura, M. Sakamoto,
Effect of Neutrals on Decrease in Heat and Particle Loads on the V-shaped Target in GAMMA10,
Annual Report of National Institute for Fusion Science **April 2014 - March 2015**, (2015) 456.
11. H. Tanaka, M. Sakamoto, M. Mizuguchi, K. Oki, M. Yoshikawa, K. Nojiri, R. Nohara, A. Terakado, J. Kohagura, M. Yoshikawa, N. Ohno, Y. Tsuji,
Extraction of Spatial Plasma Structures by Analyzing Fluctuations in Core and Edge of GAMMA 10,
Annual Report of National Institute for Fusion Science **April 2014 - March 2015**, (2015) 457.
12. M. Yoshikawa, K. Nagasu, Y. Shimamura, Y. Shima, J. Kohagura, M. Sakamoto, T. Imai, M. Ichimura, Y. Nakashima, T. Minami, K. Kawahata, I. Yamada, H. Funaba,
Development of Thomson Scattering System in GAMMA 10/PDX,
Annual Report of National Institute for Fusion Science **April 2014 - March 2015**, (2015) 458.
13. H. Matsuura, Y. Nakashima, M. Sakamoto, K. Hosoi, H. Takeda, K. Ichimura, M. Iwamoto, Y. Hosoda, K. Shimizu, S. Nagaoka, M. Shoji,
Development of the Monitoring System for Divertor Heat Flux Distribution,
Annual Report of National Institute for Fusion Science **April 2014 - March 2015**, (2015) 460.
14. Minami, R., Imai, T., Kariya, T., Numakura, T., Nakashima, Y., Sakamoto, M., Oki, K., Kato, T., Kubo, S., Shimozuma, T., Yoshimura, Y., Igami, H., Takahashi, H.,
Experimental Study on Generation of High Heat Flux by ECH Modulation for ELM Simulation Experiments,
Annual Report of National Institute for Fusion Science **April 2014 - March 2015**, (2015) 461.
15. Y. Nakashima, T. Imai, M. Ichimura, R. Ikezoe, K. Oki, M. Sakamoto, I. Katanuma, M. Yoshikawa, T. Kariya, J. Kohagura, T. Numakura, M. Hirata, R. Minami, K. Hosoi, H. Takeda, S. Ichimura, M. Iwamoto, Y. Hosoda, K. Shimizu, N. Ohno, Y. Ueda, N. Asakura, H. Kubo, M. Fukumoto, A. Hatayama, A. Tonegawa, N. Nishino, S. Kado, H. Matsuura, T. Shikama, S. Nagata, A. Okamoto, A. Sagara, Y. Hirooka, S. Masuzaki, M. Shoji,
Study of Divertor Simulation Using End-region of a Tandem Mirror – Mechanisms of Radiation Cooling Divertor and Plasma Detachment –,
Annual Report of National Institute for Fusion Science **April 2014 - March 2015**, (2015) 462.
16. Y. Nakashima, M. Sakamoto, M. Hirata, H. Takeda, K. Ichimura, M. Iwamoto, Y. Hosoda, K. Shimizu, S. Nagata and T. Shikama,
Plasma irradiation effects on hydrogen behavior in nuclear fusion materials,
Annual Report of National Institute for Fusion Science **April 2014 - March 2015**, (2015) 463.
17. D. Kuwahara, M. Yoshikawa, J. Kohagura, Y. Morikawa, Y. Hasegawa, Y. Nagayama, H. Tsuchiya, N. Ito, Y. Kogi, A. Mase,
Development of 1-Dimensional Antenna Array for Microwave Imaging Interferometer in GAMMA 10 Divertor Simulation Experiments,
Annual Report of National Institute for Fusion Science **April 2014 - March 2015**, (2015) 464.
18. Y. Hirooka, H. Zhou, Y. Nakashima, M. Sakamoto,
Effects of Particle Control in the End Region on the Central Plasma Characteristics in GAMMA-10,
Annual Report of National Institute for Fusion Science **April 2014 - March 2015**, (2015) 465.
19. Shinohara, S., Kuwahara, D., Ishii, T., Otsuka, S., Nakagawa, T., Kishi, K., Sakata, M., Tanaka, E., Hada, T., Ichimura, M., Ikezoe, R., Yokoyama, T.,
Generation and Control of High-Density Flow in Open System Plasma,
Annual Report of National Institute for Fusion Science **April 2014 - March 2015**, (2015) 467.
20. H. Takeno, S. Nakamoto, J. Miyazawa, T. Goto, Y. Nakashima, I. Katanuma,
Experimental Verification of Constant Deceleration of TWDEC for its Miniaturization,
Annual Report of National Institute for Fusion Science **April 2014 - March 2015**, (2015) 469.
21. Fukuyama, A., Ichimura, M., Yokoyama, T., Hirata, M., Ikezoe, R.,
Wave Excitation in the Anchor Cell of GAMMA 10 with Nonaxisymmetric Configuration,
Annual Report of National Institute for Fusion Science **April 2014 - March 2015**, (2015) 470.

22. Ikezoe, R., Ichimura, M., Hirata, M., Iwamoto, Y., Okada, T., Sumida, S., Mutoh, T., Seki, T., Saito, K., Kasahara, H., Watanabe, T.,
Effect of Spontaneously Excited ICRF Waves on the End-loss Energetic Ions in GAMMA 10,
Annual Report of National Institute for Fusion Science **April 2014 - March 2015**, (2015) 473.
23. H. Watanabe, M. Sakamoto, M. Tokitani,
Study on Hydrogen Retention and Hydrogen Recycling in Radiation Damaged Tungsten,
Annual Report of National Institute for Fusion Science **April 2014 - March 2015**, (2015) 474.
24. T. Tokuzawa, Y. Nagayama, M. Yoshikawa, J. Kohagura, Y. Shima, A. Mase,
Developments of Advanced Microwave Diagnostics for Future Fusion Plasma Reactor Approaching by
Time-Domain Spectroscopy Technique,
Annual Report of National Institute for Fusion Science **April 2014 - March 2015**, (2015) 475.
25. S. Kobayashi, T. Mizuuchi, H. Okada, N. Kenmochi, T. Harada, M. Kurimoto, N. Nishino, Y. Nakashima, M. Sakamoto, K. Ichimura, M. Iwamoto, Y. Hosoda, K. Shimizu, M. Shoji,
Optimization of Fueling in Magnetically Confined Plasmas — Analysis of Neutral Behavior and Optimization of Particle Fueling in Open Magnetic Field Plasmas —,
Annual Report of National Institute for Fusion Science **April 2014 - March 2015**, (2015) 476.
26. Y. Nakashima, H. Takeda, K. Ichimura, M. Iwamoto, Y. Hosoda, K. Shimizu, M. Yoshikawa, J. Kohagura, S. Kobayashi, T. Mizuuchi, H. Okada, N. Nishino, M. Shoji, T. Morisaki, J. Miyazawa,
Optimization of Fueling in Magnetically Confined Plasmas (Fueling Optimization Using H Emission Measurements in Heliotron J),
Annual Report of National Institute for Fusion Science **April 2014 - March 2015**, (2015) 487.
27. Kariya T., Imai T., Minami R., Numakura T., Kato K., Zushi H., Hanada K., Idei H., Nagasaki K., Saito T., Tatematsu Y., Yamaguchi Y., Kubo S., Shimozuma T., Yoshimura Y., Igami H., Takahashi, H.,
Cooperative 28 GHz ECH study for high density plasma heating and development of 14 GHz and 28 GHz/35 GHz gyrotron,
Annual Report of National Institute for Fusion Science **April 2014 - March 2015**, (2015) 511.
28. Sakamoto, M., Watanabe, H., Yoshida, N., Tokitani, M.,
Microstructure and Thermal Desorption of Deuterium in Irradiated Pure Tungsten,
Annual Report of National Institute for Fusion Science **April 2014 - March 2015**, (2015) 535.
29. 江角直道,
LHD 非接触プラズマの空間特性の理解,
平成 26 年度核融合科学研究所一般共同研究成果報告書 (2016) 3.
30. 坂本瑞樹,
水素リサイクリングに対する反射水素励起状態の影響,
平成 26 年度核融合科学研究所一般共同研究成果報告書 (2016) 168.
31. 江角直道,
マイクロ波大気圧プラズマによる炭化水素の燃焼,
平成 26 年度核融合科学研究所一般共同研究成果報告書 (2016) 182.
32. 江角直道,
「境界領域プラズマ挙動の理解とその制御」研究会,
平成 26 年度核融合科学研究所一般共同研究成果報告書 (2016) 371-377.
33. 三好昭一、板倉昭慶、平田久子
筑波大学プラズマ研究センター設立の経過、
平成 27 年度第 2 回自然科学系アーカイブズ及び核融合アーカイブズ研究会 (平成 27 年 12 月 4 日、核融合科学研究所) .

XI 物理教育および物理教育の研究

【1】 物理教育

(1) 学類教育（都倉康弘）

平成 27 年度は、4 月には 62 名が 1 年次に入学し、また 60 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 27 年度の卒業生は 56 名であり、その進路は、大学院進学が 44 名、就職が 7 名（民間企業 5 名、公務員 2 名）、その他（進学準備中など）5 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 27 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、技術科学英語）を開設している。昨年度から引続き物理学実験を含む大部分の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 28 年度からは理学（物理学）学士プログラムという学位プログラムとして研究を進めて行く予定である。

本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）、国際バカロレア特別入試（志願者 1 名、合格者 1 名）、アドミッションセンター入試（志願者 11 名、合格者 0 名）、国際科学オリンピック特別入試（志願者 2 名、合格者 2 名）、推薦入試（志願者 37 名、合格者 16 名）、個別学力検査・前期日程（志願者 160 名、合格者 45 名）、私費外国人留学生入試（志願者 4 名、合格者 2 名）である。個別学力検査（前期日程）志願倍率は例年より増加し 3.7 倍と推薦入試が 2.5 倍であった。平成 28 年 4 月には 64 名が入学する。

(2) 大学院教育 (今井 剛)

物理学専攻では、専門分野における独創的な研究能力と科学技術に対する柔軟な応用力に加えて、近年は国際的な視野や俯瞰力を持ったグローバル性を具えた研究者・高度職業人を養成することを目標に教育活動を行っている。ダブル・デグリー、デュアル・デグリー、インターシップ、つくば地区の特徴を活かした連携大学院等、また、社会人を対象にした早期修了プログラム等の多様な教育に対応している。

教育の向上に関しては、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、教員会議に諮り最終的な審議、承認を行っている。作年度開始した仏国グルノーブル大学とのダブル・デグリープログラムが順調に軌道に乗り、今年度からスタートしたつくば共鳴プログラムも始動した。

大学院入試は、7月の推薦入試(前期課程のみ、定員15名)と、8月と2月に一般入試(前期課程定員35名、後期課程定員20名)を行っている。今年度の入試結果は下の表の通りであり、例年よりも多くの受験者が8月期に集まった。先の5月に行われたオープンキャンパスでも、昨年度同様に、例年の1.5倍近い参加者があり、大盛況であった。各研究室への研究室訪問等の広報活動もあり、筑波大学以外からの参加者が主体である。

入試	受験者数 (外部)	合格者数 (外部)
7月 (前期推薦)	41 (20)	27 (12)
8月+2月 (前期)	77+12 (40+7)	52+8 (25+5)
8月+2月 (後期)	5+10 (0+4)	5+10 (1+4)

平成27年度の就職進学状況は下の表のようになっている。前期課程から後期課程への進学率が高いことであるが、ここ数年は少し減少気味となっている。後期課程修了者では研究員等として研究を続ける学生が多いことが物理学専攻の特徴である。

前期課程

進学	企業	独法	教員	公務員	その他
8	35	0	1	2	5

後期課程

大学	研究員	企業	独法	公務員	その他
0	4	1	0	0	2

【2】体験学習（小沢 顕）

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 27 年度は、8 月 7 日（金）に実施し、58 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	都倉康弘
9:40～10:00	物理学類説明、実験内容説明、アンケート	小沢顕, 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	岡田 晋
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	【物理実験】 ① 水と固体の比熱 ② 放射線と宇宙線 ③ 極低温現象 ④ 光の干渉と回折	東山 和幸 森口 哲朗 大塚 洋一 富本 慎一
16:35～17:10	修了書授与、アンケートなど	都倉康弘 小沢顕
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。講義、実験に対して、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。一方で、少数ではあるが物足りないと感じた参加者もいた。今後改善していきたい。

【3】カリキュラム関係（小沢 顕）

平成 27 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」を除く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

総合科目の見直しを行い、既存の総合科目 I「現代物理学への招待 I~III」の内容を検討し、これを再編しその一部を発展させ平成 28 年度から総合科目 III として「現代物理学入門」を開講することとした。

（3）他学類向けの講義に関して

平成 27 年度、理工学群生向けに新たに「科学技術英語」という科目を新設し、外国人教員により秋 C モジュールに集中講義として行った。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。

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、物理学専攻からも積極的に参加し、平成 27 年度は 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を検討し、平成 28 年度からスタートすることとなった。

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。平成 27 年度には、科学英語担当の専任外国人 1 名を助教として採用した。

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」として開講する。
- (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 27 年 9 月 29, 30 日）に実施した。合計 11 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27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	4	3	2	0	0	9	0	0	0	9	9 { 0 } [9]
宇宙理論	5	5	2	2	2	16	8	0	2	7	24 { 2 } [7]
原子核理論	1	2	0	1	0	4	2	0	1	3	6 { 1 } [5]
量子物性理論	3	0	1	0	1	5	2	0	0	4	7 { 0 } [4]
ナノ量子物性	2	1	0	0	0	3	1	0	0	1	4 { 0 } [1]
表面界面物性	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0 0 0
ナノ構造物性 (D1ナノ, D2ナノ・D3ナノ)	3	2	0	2	3	10	3	0	1	5	13 { 1 } [5]
量子輸送研究 (D1ナノ, D2ナノ, D3ナノ)	3	2	0	1	2	8	3	0	0	5	11 { 0 } [5]
生命物理	1	0	0	0	0	1	1	1	0	1	3 { 0 } [1]
素粒子実験	7	6	2	2	2	19	2	0	1	12	21 { 1 } [12]
宇宙観測	6	6	0	1	1	14	4	0	1	13	18 { 1 } [13]
原子核高エネ	6	6	2	2	5	21	1	0	0	10	22 { 0 } [10]
原子核低エネ	0	1	1	1	3	6	4	0	1	4	10 { 1 } [4]
磁性物性	5	2	0	0	1	8	3	0	0	2	11 { 0 } [2]
ナノフォトニクス (D3ナノ)	6	5	0	0	1	12	4	0	0	7	16 { 0 } [7]
光ナノ物性 (D3創)	3	3	0	0	0	6	3	0	0	3	9 { 0 } [3]
強相関物性	3	4	0	1	1	9	2	0	0	6	11 { 0 } [4]
構造科学	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	3 0 0
低温物性	3	4	0	0	0	7	3	0	0	5	10 { 0 } [5]
プラズマ	7	8	2	0	1	18	11	0	0	9	29 { 0 } [9]
物質材料	0	2	/	/	/	2	0	0	0	0	2 { 0 } [0]
合計	68	62	12	13	23	178	60	1	7	106	239 { 7 } [106]
(ナノ・創)	0	0	0	3	6	9	0	0	1	3	9 { 1 } [3]

*学振欄の{ }内数字はDC1, DC2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) 安部 牧人 [梅村 雅之]
Three-Dimensional Radiation-Hydrodynamic Study on the Formation of Star Clusters Regulated by External Ultraviolet Radiation
(外部紫外線輻射場によって制御される星団形成に関する3次元輻射流体力学による研究)
- 2) 佐藤 駿丞 [矢花 一浩]
Time-dependent density functional theory for extremely nonlinear interactions of light with dielectrics
(光と誘電体の極限的非線形相互作用に対する時間依存密度汎関数理論)
- 3) 淵 遼亮 [受川 史彦]
Search for Higgs Boson Pair Production in the $hh \rightarrow \bar{b}b \tau^+\tau^-$ Channel with the ATLAS Detector
(アトラス検出器におけるボトムクォーク及びタウレプトン対に崩壊するヒッグス粒子対生成の探索)
- 4) 今田 大皓 [中井 直正]
Theoretical Study of Radio Telescope Optics with Wide Field of View
(広視野電波望遠鏡光学系の理論的研究)
- 5) 水野 三四郎 [江角 晋一]
Measurements of Direct Photon Higher Order Azimuthal Anisotropy in $\sqrt{s_{NN}}=200\text{GeV}$ Au+Au Collisions at RHIC-PHENIX
(RHIC-PHENIX実験における $\sqrt{s_{NN}}=200\text{GeV}$ 金・金衝突での直接光子の高次方位角異方性の測定)
- 6) 渡邊 大介 [江角 晋一]
Measurements of π^0 -jet correlations in $\sqrt{s} = 7 \text{ TeV}$ pp collisions and in $\sqrt{s_{NN}} = 2.76 \text{ TeV}$ central Pb-Pb collisions at ALICE experiment
(ALICE実験における $\sqrt{s} = 7 \text{ TeV}$ 陽子・陽子衝突及び $\sqrt{s_{NN}} = 2.76 \text{ TeV}$ 鉛・鉛中心衝突での π^0 -ジェット相関の測定)
- 7) Jihyun Bhom [江角 晋一]
Multiplicity dependence of two-particle correlation in $\sqrt{s} = 7 \text{ TeV}$ pp collisions at LHC-ALICE experiment
(LHC-ALICE実験における $\sqrt{s} = 7 \text{ TeV}$ 陽子・陽子衝突での2粒子相関の粒子多重度依存性の研究)

【論文博士】

<論文博士> [] 内は指導教員名
数理物質科学研究科 物理学専攻

1) 阿部 康志 [小沢 顕]

Study of isochronous field in Rare-RI Ring for high-precision mass measurements
(精密質量測定のための稀少RIリングの等時性磁場の研究)

数理物質科学研究科 物質創成先端科学専攻

1) 柴田 祐輔 [野村 晋太郎]

Weak-link Nb-based scanning nano-SQUID microscope system for local magnetic flux imaging
(弱結合型ニオブナノ超伝導量子干渉計走査型顕微鏡による局所磁束イメージング)

【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) 賀数 淳平 [山崎 剛]

Nf=2+1格子QCDによる微小な運動量移行での π 中間子形状因子計算へ向けた基礎研究

2) 三崎 博道 [石橋 延幸]

高階微分項を含む重力理論における因果律の破れ

3) 深山 陽平 [伊敷 吾郎]

メンブレンの幾何と行列模型

4) 木立 佳里 [梅村 雅之]

星間ダストにおけるアミノ酸生成の理論的研究

5) 土屋 将太郎 [梅村 雅之]

Vlasovシミュレーションにおける計算スキームの高次精度化

6) 結城 文香 [森 正夫]

矮小楕円銀河核の形成シミュレーション

7) 栗原 有輝 [矢花 一浩]

時間依存密度汎関数理論による非線形分極の時空間分析

8) 倪 放 [中務 孝]

Richardson模型における集団座標の量子化と 0^+ 集団励起状態の解明

9) 石山 佑 [岡田 晋]

電界下におけるカーボンナノチューブの電子物性

10) 成田 康平 [岡田 晋]

密度汎関数理論による1次元ナノカーボン構造体の物性解明

- 11) 森田 大地〔都倉 康弘〕
1次元光格子中のspin-1量子ウォークに関する研究
- 12) 安富 幸輝〔都倉 康弘〕
トポロジカル物質/超伝導体接合における熱輸送に関する理論
- 13) 浅野 麻莉〔受川 史彦〕
高エネルギー実験のための2層埋込酸化膜構造を持つSOIピクセル検出器の開発研究
- 14) 先崎 蓮〔原 和彦〕
ニュートリノ崩壊光探索のための超伝導トンネル接合光検出器及び極低温増幅器の開発研究
- 15) 高橋 和希〔原 和彦〕
大規模構造体内部透視に用いる低角度ミュオン粒子飛来数及び運動量分布の測定
- 16) 飛田 尚志〔受川 史彦〕
二層埋込酸化膜構造を持つSOIピクセル検出器回路の放射線損傷の補償
- 17) 森内 航也〔金 信弘〕
ニュートリノ崩壊光探索実験のためのニオブとアルミニウムを用いた超伝導トンネル接合光検出の性能評価
- 18) 朝倉 健〔中井 直正〕
Phase Retrieval Holography による南極10mテラヘルツ望遠鏡の鏡面測定の研究
- 19) 田中 伊織〔中井 直正〕
つくば32m電波望遠鏡を用いた銀河面のアンモニア分子輝線観測
- 20) 畠山 拓也〔久野 成夫〕
近傍矮小銀河NGC2976における分子ガス分布と星形成
- 21) 久松 俊輔〔中井 直正〕
野辺山45m電波望遠鏡搭載用超伝導電波カメラの観測システムの開発
- 22) 山田 淑乃〔中井 直正〕
野辺山45m電波望遠鏡搭載用の広帯域超伝導カメラ冷却光学系の開発
- 23) 市川 ゆきな〔小沢 顕〕
交差電磁場を利用したRIビーム飛行時間検出器の開発
- 24) 青山 遼〔江角 晋一〕
RHIC-STAR実験 $\sqrt{s_{NN}}=200\text{GeV}$ 金+金衝突実験における2粒子相関のラピディティおよび反応平面依存性の研究
- 25) 塩谷 知弘〔江角 晋一〕
RHIC-PHENIX実験 $\sqrt{s_{NN}}=200\text{GeV}$ $^3\text{He}+\text{Au}$ 衝突における方位角異方性の測定と長距離相関に関する研究

- 26) 杉浦 哲郎 [江角 晋一]
RHIC-STAR実験金+金衝突におけるnet-charge揺らぎの $\Delta \eta$ 依存性の研究
- 27) 平野 勝大 [江角 晋一]
ALICE実験高度化に向けた超前方光子測定用電磁カロリメータ Si PAD検出器のビームテスト実験による性能評価
- 28) 山本 大貴 [江角 晋一]
RHIC-PHENIX実験における小さく高密度な衝突系での集団膨張の探索
- 29) 李 準一 [江角 晋一]
LHC-ALICE実験 $\sqrt{s_{NN}}=2.76\text{TeV}$ 鉛・鉛衝突でのJet-Hadron相関分布を用いたhard-soft相互作用の研究
- 30) 新井 惇規 [小野田 雅重]
直方晶タボライト型 LiVOPO_4 の磁性と元素置換効果
- 31) 石井 勝也 [小野田 雅重]
三角格子型 Li_xCoO_2 におけるLi低濃度相のNMR
- 32) 杉山 岳 [池沢 道男]
(GeTe)/(Sb_2Te_3)超格子の光誘起相転移を用いたナノスリット構造の光導波変調
- 33) 鈴木 諒 [池沢 道男]
CdSe Nanoplateletsの合成と光学スペクトル
- 34) 山田 雄太 [池沢 道男]
GaAsフォトリソニック結晶共振器中の窒素不純物発光中心
- 35) 浦瀬 翔太 [守友 浩]
マンガンプルシアンブルー類似体の電池特性向上に関する研究
- 36) 柳田 歩 [守友 浩]
 Na_xCoO_2 薄膜を用いたNaインターカレーションの研究
- 37) 大平 智也 [野村 晋太郎]
液晶可変リターダを用いた近接場光プローブの偏光補正と円偏光変調
- 38) 青木 仁 [大塚 洋一]
金属で表面修飾したグラフェンの電気伝導
- 39) 伊藤 優 [大塚 洋一]
グラフェンの電気伝導に対する電極接続の影響の評価
- 40) 田中 宏和 [大塚 洋一]
SiCナノ構造上に形成したグラフェンナノリボンの電気伝導
- 41) 平出 璃音可 [大塚 洋一]
グラフェンへの周期一軸ひずみの導入と電気伝導測定

- 42) 礮 将貴 [吉川 正志]
多チャンネルマイクロ波干渉計を用いたGAMMA10プラズマの揺動相関解析
- 43) 岩本 嘉章 [今井 剛]
GAMMA10アンカー部高周波加熱時のセントラル周辺部浮遊電位解析
- 44) 上原 真 [今井 剛]
GAMMA 10/PDXセントラルECRHのプラズマ加熱特性とアンテナ改良研究
- 45) 菅野 傑 [吉川 正志]
GAMMA 10/PDXダイバータ模擬実験におけるマイクロ波イメージング干渉計を用いた線電子密度計測
- 46) 清水 啓太 [中嶋 洋輔]
GAMMA 10/PDXダイバータ模擬実験における分光計測を用いた不純物の挙動解析
- 47) 白石 智洋 [吉川 正志]
GAMMA 10/PDX西プラグ部における位相イメージング干渉計を用いたプラズマ電子密度計測
- 48) 寺門 明紘 [坂本 瑞樹]
GAMMA 10/PDXダイバータ模擬プラズマへの水素ガス供給による非接触プラズマ生成時のバルマー線強度空間分布計測
- 49) 野尻 訓平 [坂本 瑞樹]
GAMMA 10/PDXにおける水素ガス追加供給によるダイバータ模擬プラズマの非接触化時の静電プローブ計測
- 50) 飯田 頼嗣 [宇治 進也]
2次元電荷移動錯体 β'' -(BEDT-TTF)₄[(H₃O)M(C₂O₄)₃]Y (M=Ga, Fe, Y=C₆H₅NO₂)の超伝導相図
- 51) 藤井 友紀 [宇治 進也]
有機超伝導体 K -(BEDT-TTF)₂Cu(NCS)₂の渦系ダイナミクス

物理学セミナー

平成27年度

	開催日	講師	題目
第1回	10月7日	中井 直正 (宇宙観測)	南極からさぐる宇宙
第2回	10月14日	西堀 英治 (物性実験)	放射光 X 線構造計測
第3回	10月21日	山崎 剛 (素粒子理論)	素粒子標準模型を超える理論の探索
第4回	10月28日	相川 祐理 (宇宙理論)	惑星系形成の概要と最近の進展
第5回	11月4日	重田 育照 (生命物理)	第一原理に基づく生命機能解析とその手法
第6回	11月11日	江角 直道 (プラズマ・物理工学域)	気体の中のプラズマ, プラズマ-ガス複合系の物理と応用
第7回	11月18日	佐藤 構二 (素粒子実験)	LHC 加速器での素粒子物理研究
第8回	12月2日	橋本 幸男 (原子核理論)	原子核の三次元的回転運動
第9回	12月9日	江角 晋一 (原子核実験)	高エネルギー重イオン衝突実験におけるクォーク・グルーオン・プラズマ相転移

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 5,048,462 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
167,559 円

平成27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	公補助金	教授	岡田 晋	26107509	計算科学に基づく新奇原子層物質複合系の物性解明と物質設計	2,700
"	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	2,200
"	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	9,700
"	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	11,600
"	公補助金	准教授	神田 晶申	26107508	単層/多層グラフェンにおける超伝導近接効果	2,700
"	公補助金	准教授	寺崎 順	15H01029	原子核行列要素の方法による不一致問題の解決	900
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	9,400
"	"補助金	教授	岡田 晋	25246010	ナノ炭素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	8,000
"	"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	12,700
"	"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	9,800
"	"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	10,600
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	1,800
	助成金					1,300
"	"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	1,800
"	"補助金	教授	蔵増 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	3,500
"	"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	3,600
	助成金					2,200
"	"補助金	教授	中嶋 洋輔	24360378	タンデムミラー端部及び高出力中性粒子ビームを用いたダイバータ・ELM模擬研究	1,000
	助成金					500
"	"補助金	教授	中務 孝	25287065	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	4,300
	助成金					1,500
"	"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	4,900
"	"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	4,100
"	"補助金	准教授	神田 晶申	25286021	歪み誘起ゲージ場を用いたグラフェンのエネルギーギャップの生成と制御	3,000
	助成金					0
"	"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	6,300
"	"補助金	講師	中條 達也	25287047	LHC-ALICE実験・前方光子検出器のための高速読み出し系の開発	3,500
	助成金					900
基盤研究(C)	一般助成金	名誉教授	舛本 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	1,200
"	"助成金	教授	相川 祐理	23540266	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	500
"	"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	受川 史彦	25400295	ハドロン衝突における重いクォーク生成の物理	700
"	"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	1,000

平成27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	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	600
〃	助成金	准教授	寺崎 順	26400265	QRPAを用いたニュートリノレス二重ベータ崩壊の原子核行列要素計算	1,300
〃	助成金	准教授	原 和彦	25400294	アトラス実験でのヒッグス湯川結合の測定	1,200
〃	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	800
〃	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
挑戦的萌芽研究	助成金	教授	小沢 顕	26610056	不安定核電気双極子モーメント測定への挑戦	600
〃	助成金	教授	西堀 英治	25600148	ナノビーム回折による精密原子配列決定法の開発	200
〃	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ップレーション加速器質量分析法の開発	700
〃	助成金	准教授	野村晋太郎	26610079	ベクトル整形パルス励起による端電流制御	1,200
〃	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	2,000
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	3,400
	助成金					400
若手研究(B)	助成金	准教授	山崎 剛	25800138	量子色力学を基にしたクォーク多体系としての原子核の研究	700
〃	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	森口 哲朗	25871237	脳虚血性病態理解のための非侵襲的小動物0-15ガスPET検査システムの構築	500
〃	助成金	研究員	久保 敏弘	26870080	メソスコピック系における測定の反作用とトポロジカルな準粒子	800
〃	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	1,500
合 計					149,500	

※ 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27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	1,950,000
3	教授	中井 直正	大学共同利用機関法人自然科学研究機構	高精度VLBI観測による銀河系の構造及び進化の解明	5,420,000
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
5	教授	守友 浩	国立研究開発法人科学技術振興機構	水溶液中アニオンの高速・高密度貯蔵技術の開発	1,180,000
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	11,050,000
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					27,830,000

平成27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	重田 育照	株式会社MCHC R&Dシナジーセンター	蛋白質シミュレーション技術に関する学術指導	324,000
2	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)	360,000
3	教授	西堀 英治	(独)日本学術振興会	平成27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」	1,845,000
4	准教授	原 和彦	茨城県教育委員会	未来の科学者育成プロジェクト事業	30,000
5	講師	久保 敦	コニカミノルタ株式会社	回折格子結晶型-表面プラズモン増強蛍光分光の物理特性考察に関する学術指導	200,000
6	講師	中條 達也	(独)日本学術振興会	平成27年度二国間交流事業 : フランスとの共同研究(GNRS)「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」	2,250,000
7	助教	佐藤 勇二	(独)日本学術振興会	平成27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」	2,250,000
8	助教	庄司 光男	東洋紡株式会社	クレアチニナーゼの触媒反応機構の理論解明に関する学術指導	300,000
合 計					7,559,000

平成27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	守友 浩	TOTO株式会社	ブルシャンブルー類似体膜によるイオン吸脱着素子の開発	275,000
2	准教授	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	19,847,000
合 計					20,122,000

平成27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	公益財団法人双葉電子記念財団	「エネルギー材料のマルチスケール構造可視化システムの構築」に対する研究助成	900,000
2	教授	西堀 英治	西堀英治:(原寄附者)内藤記念科学振興財団	「医療粉末の湿度・温度変化下での構造決定法の開発」に関する研究助成	3,000,000
3	教授	守友 浩	公益財団法人日本板硝子材料工学研究会	「配位高分子をベースとしたリチウムおよびナトリウムイオン二次電池材料の開発」に関する研究	900,000
合 計					4,800,000

平成27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	1,000,000
合 計					1,000,000

平成27年度 各種受賞等

NO	職名	氏名	賞名	受賞論文等	受賞月
1	教授	相川祐理	2014年度地球惑星科学振興 西田賞	分子雲から原始惑星系円盤形成にいたる化学進化の統合的理論モデルの研究	5月
2	助教	庄司光男	新学術領域研究プロジェクト「3D活性サイト科学」第2回成果報告会 ポスター賞 (大門賞)	光化学系II酸素発生中心におけるS2 → S3 状態変化についての理論的解明	9月
3	助教	栢沼愛	平成27年度「第1回 黒田チカ賞」	量子計算科学による金属錯体の光異性化反応機構の解明に関する研究	1月

役割分担（平成27年度）

【物理学域】

物理学域長	矢花
グループ長	藏増、梅村、中務、初貝、重田、 受川、中井、小沢、守友、今井
理論グループ懇談会議長	石橋
実験系教授懇談会世話人	今井
カリキュラム委員長	小沢
カリキュラム委員	小沢、梅村、今井、中井、受川、 西堀、石橋、矢花、都倉
物理学域広報委員会	岡田
物理学域教育研究倫理委員会	
物理学域図書係	中務
学生支援対応チーム	矢花、今井、都倉、小沢
学域計算機委員会	橋本、谷口(裕)、中條、加藤
物理学域スペース調査検討委員会	藏増、梅村、中務、初貝、重田、 受川、中井、小沢、守友、中嶋
校正線源管理責任者	矢花
校正線源保管責任者	小沢
自然系学系液体窒素タンク管理委員	小野田
科学の芽賞	原、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	神田
高圧ガスゾーン管理者	西堀、小沢、神田

【数理物質系・数理物質科学研究科】

系長	伊藤(電物)
研究科長	木越(化学)
物理学専攻長	矢花
物理学専攻学務委員	今井
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	金谷、矢花
系人事委員会総会委員	矢花、都倉、中嶋、梅村
系運営委員会委員	矢花、都倉(、今井)
研究科運営委員会委員	矢花、今井(、都倉)
研究科学務委員会	今井
研究科就職委員会	今井
系広報委員会委員	矢花、今井
系図書委員会委員	中務
系施設・安全管理委員会委員	矢花
系情報環境委員会	矢花、笹(基盤セ)
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	今井
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	都倉
物理学類学務委員	小沢
物理学実験責任者	西堀
学類クラス担任(1年)	森、佐藤(構)
(2年)	坂本、谷口(裕)
(3年)	藏増、久保
(4年)	東山、久野

【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	大塚
研究基盤総合センター低温部門運営委員会	神田、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	藏増、中井
プラズマ研究センター運営協議会	藏増、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	矢花
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	大塚
キャリア支援室担当教員会議構成員	今井
FD委員会(物理学専攻FD窓口教員)	小沢、野村
つくばグローバルサイエンスウィーク実地委員	受川
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27. 4. 1～平28. 3. 31)

【物理学域に来られた方々】

氏名	職名	発令日	異動内容(前職)
Peter Henry SCHURY	助教	H27. 4. 1	理化学研究所
笠井 秀隆	助教	H27. 4. 1	理化学研究所
新田 冬夢	助教	H27. 4. 1	学振特別研究員
鈴木 伸司	助教	H27. 4. 1	放射線医学総合研究所
丹羽 秀治	助教	H27. 8. 1	東京大学物性研究所
相川 祐理	教授	H27. 4. 1	神戸大学
栢沼 愛	助教	H27. 4. 1	筑波大学システム情報
Iversen Bo, Brummerstedt	教授	H27. 3. 16	海外教育研究ユニット招致

【物理学域を去られた方々】

氏名	職名	発令日	異動内容
新井一郎	准教授	H28. 3. 31	定年退職
Peter Henry SCHURY	助教	H27. 12. 31	KEK
苅宿 俊風	助教	H28. 3. 31	物材機構
栢沼 愛	助教	H28. 3. 31	東京大学

	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 藏増嘉伸 石塚成人 谷口裕介 根村英克 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	計算科学セ 計算科学セ 計算科学セ 計算科学セ
	宇宙物理	教授	梅村雅之 相川祐理 森 正夫 吉川耕司
		准教授 講師 助教	Alexander Wagner 計算科学セ 計算科学セ 計算科学セ 計算科学セ
	原子核	教授	矢花一浩 中務 孝 寺崎 順 橋本幸男 日野原伸生
物性	教授	岡田 晋 都倉康弘 初貝安弘 小野倫也 谷口伸彦 苅宿俊風 吉田 恭	
	准教授 助教	TIMS 計算科学セ	
生命物理	教授 助教	重田育照 庄司光男 栢沼 愛	
実験	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
		准教授 講師 助教	

	グループ		担当センター
実験	宇宙観測	教授	中井直正 久野成夫 新田冬夢
		助教	
	原子核	教授	三明康郎 小沢 顕 新井一郎 江角晋一 笹 公和 中條達也
		准教授 講師 助教	SCHURY Peter 鈴木伸司 森口哲朗 Busch Oliver
	物性	教授	守友 浩 大塚洋一 西堀英治
准教授 講師 助教		Iversen Bo, Brummerstedt 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 冨本慎一 森下将史 小林 航 笠井秀隆 丹羽秀治	
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 プラズマセンター プラズマセンター プラズマセンター プラズマセンター プラズマセンター プラズマセンター

研究員

舛本泰章	物性実験
小鍋 哲	物性理論
柴田恭幸	物性実験
金子紘之	宇宙観測
武政健一	素粒子実験
SALAK Dragan	宇宙観測
友利 ひかり	物性実験
富田陽子	物性理論
池田義雅	原子核実験
温 凱	原子核理論

連係大学院

宇治進也	NIMS
迫田和彰	NIMS
胡 曉	NIMS

連携大学院

位地正年	NEC	物理, ナノ
河合孝純	NEC	物理, ナノ
山下 眞	NTT	物理, ナノ
後藤秀樹	NTT	物理, ナノ
和田道治	理研	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	
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
青木慎也	京都大学
宮崎州正	名古屋大学
白石賢二	名古屋大学

事務職員

飯村美智子	教務
米山啓子	総務
中泉弘子	会計・研究支援
石井浩子・石橋夕美	会計

年次研究報告 筑波大学数理物質系物理学域

2015（平成27）年度

発行 2016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