

ISSN 2189-7557

年次研究報告

ANNUAL REPORT OF DIVISION OF PHYSICS
THE UNIVERSITY OF TSUKUBA

2017（平成29）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	30
III	宇宙物理理論グループ	68
IV	宇宙観測グループ	86
V	原子核理論グループ	102
VI	原子核実験グループ	132
VII	物性理論グループ	
VII-1	量子物性理論グループ	159
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	177
VII-5	量子輸送研究グループ	185
VIII	生命物理グループ	191
IX	物性実験グループ	
IX-1	磁性物性グループ	204
IX-2	ナノフォトニクスグループ	209
IX-3	強相関物性グループ	216
IX-4	光ナノ物性グループ	224
IX-5	低温物性グループ	229
IX-6	構造科学グループ	240
X	プラズマ研究グループ	249

— 教育活動 —

XI	物理教育および物理教育の研究	285
	【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	301

I. 素粒子理論グループ

教授 石橋 延幸、金谷 和至、藏増 嘉伸

准教授 石塚 成人、谷口 裕介、山崎 剛、吉江 友照

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、滑川 裕介、吉村 友佑

大学院生（10名）

【人事異動】

大野浩史博士がテニユアを獲得し、計算科学研究センター助教として着任する（2018年4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。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（略称「OFP」：ピーク演算性能25PFLOPSの超並列クラスタ計算機、「京」を超える国内最高性能システム）が稼働を開始した。本年度は、筑波大学を中心としたPACS Collaborationに基づく共同研究体制のもと、OFPを用いた大型プロジェクト研究を推進した。これと並行して、有限温度・有限密度QCDの研究、 $K \rightarrow \pi\pi$ 崩壊におけるハドロン行列要素計算、テンソルネットワーク(TN)形式に基づく格子ゲージ理論・スピンモデルの研究、標準理論を超える物理の探求など、活発な研究活動を行った。さらに、格子QCD配位やその他のデータを共有する為のデータグリッドILDG/JLDGの構築・整備を推進した。

国内の計算科学全体の動向として、2015年度で終了したHPCI戦略プログラムの後継として、「ポスト「京」で重点的に取り組むべき社会的・科学的課題」に関するアプリケーション開発・研究開発が始まっている。現在9つの重点課題が設定されており、9番目の課題である「宇宙の基本法則と進化の解明」が素粒子物理・原子核物理・宇宙物理分野が対象とする基礎科学的研究課題である。その活動は、<http://www.jicfus.jp/jp>に詳しい。また、重点課題と並行して、2016年度から4つの萌芽的課題が設定され、1番目の課題である「基礎科学のフロンティア－極限への挑戦」は基礎科学における分野横断的な研究課題であり、本グループも分担機関として参加している。

超弦理論グループは弦の場の理論、行列模型、ゲージ重力対応という 3 つの 関連するテーマを中心として研究を進めている。弦の場の理論と次元正則化、弦の場の理論の古典解の研究、重力理論/ゲージ理論双対性とグルーオン散乱振幅、弦理論の非幾何学的背景時空、行列模型における古典極限と幾何学の関係、行列模型を用いた M5 プレーンの記述等の超弦理論に関連する様々な分野についての研究を行った。

【 1 】 格子場の理論

(金谷 和至、藏増 嘉伸、石塚 成人、谷口 裕介、山崎 剛、吉江 友照、浮田 尚哉、滑川 裕介、吉村 友佑)

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

2016 年秋に JCAHPC において Oakforest-PACS(OFP) が導入され、稼働を開始した。OFP はピーク演算性能が 25PFlops であり、「京」コンピュータを抜いて現在日本最速のスーパーコンピュータである。本年度は、PACS Collaboration に基づく共同研究体制のもと、OFP を用いて物理点における 2+1 フレーバー QCD の大規模シミュレーションを推進した。

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

2017 年度は、主に格子カットオフ $= 2.33\text{GeV}$ で $(10\text{fm})^3$ 超の空間体積を持つ 2+1 フレーバー QCD のゲージ配位生成を行った。より具体的には、物理点直上で (格子間隔, 格子サイズ) $= (0.085\text{fm}, 128^4)$ のゲージ配位を生成した。図 1(左) は、格子サイズ 128^4 と 64^4 (現在世界の格子 QCD 計算で典型的に採用されている格子体積) の配位上で計算された π 中間子の 2 点相関関数 $C_\pi(t)$ を用いて、それぞれについて時間 t における π 中間子の局所有効質量 $m_\pi^{\text{eff}}(t) = \ln(C_\pi(t)/C_\pi(t+1))$ をプロットしたものである。両者に差異が見えることから、明確な有限体積効果が存在することが見て取れる。また、図 1(右) は、格子サイズ 128^4 と 64^4 の配位上で計算された π 中間子崩壊定数を比較したものである。こちらについても明確な有限体積効果が存在することが確認できる。

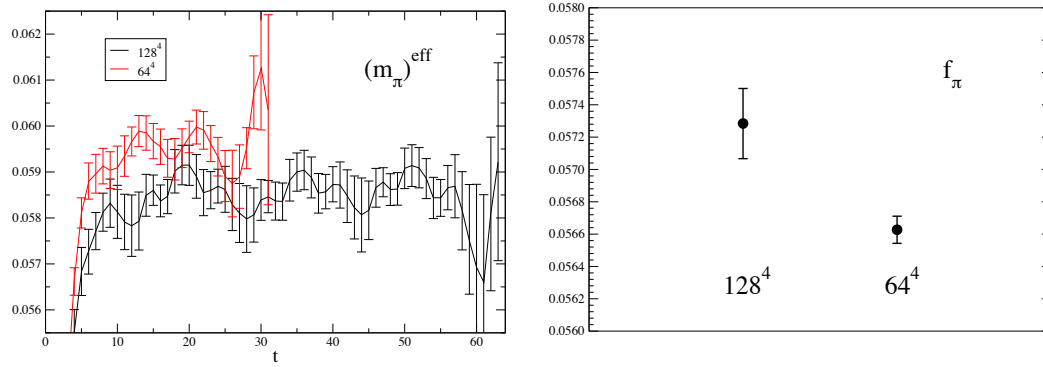


図 1: 格子サイズ 128^4 と 64^4 における π 中間子局所有効質量 (左) と π 中間子崩壊定数 (右)。両者ともに preliminary な結果。

(2) 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

蔵増、山崎は理研計算科学研究機構 (AICS) の宇川副機構長との共同研究により、2010 年世界で初めて格子 QCD によるヘリウム原子核の構成に成功し、そのうち 2 核子系の束縛状態である重陽子の構成にも成功した。これらの計算は、計算コストを抑えるためにクエンチ近似かつ重いクォーク質量を用いた試験的なものであった。その後、広島大学 石川健一准教授を共同研究者に加え、真空偏極効果を取り入れた 2+1 フレーバー QCD シミュレーションを行い、近似を排したより現実世界に近い状況でのヘリウム原子核および 2 核子系の束縛エネルギー計算に成功した。この計算は π 中間子質量 0.5 GeV と 0.3 GeV のクォーク質量を用いたものであり、物理点 (π 中間子質量 0.14 GeV に相当) よりもかなり重いものを用いていた。この成果を踏まえ、「京」で生成された 96^4 格子サイズのゲージ配位を用いた物理点近傍での軽原子核束縛エネルギー計算を行なっている。統計誤差を抑えることが難しく、ヘリウム原子核については有意な結果は得られていないが、重陽子については現状で実験値から予測された値を再現する結果が見え始めており、今後も統計誤差を小さくするための計算を継続していく。

また、これまでの計算に含まれる可能性のある励起状態からの系統誤差について、重いクォーク質量を用いた超高精度計算による調査を行った (論文 21)。図 2 には、指数型演算子とウォール型演算子を用いて計算した、二核子系有効エネルギー差 ($\Delta E_{NN}^{\text{eff}} = E_{NN}^{\text{eff}} - 2m_N^{\text{eff}}$) を示した。 E_{NN}^{eff} と m_N^{eff} は、それぞれ二核子有効エネルギーと核子有効質量である。異なる演算子の結果は小さな虚時間の領域では異なる値を取るが、正しい $\Delta E_{NN}^{\text{eff}}$ を求めるためには、 E_{NN}^{eff} と m_N^{eff} の両方が虚時間に依らなくなる領域を見なければならない。その領域が始まる虚時間は演算に依存し、ウォール型演算子を用いると、一般に大きな虚時間が必要になる。図中にそれぞれの演算子でのその領域が始まる虚時間を縦破線で示した。この領域から決めた各々の演算子の結果は誤差の範囲内で一致した。この結果を踏まえると、これまでの計算に用いた演算子は図の指数型演算子に対応するため、これまでの結果では励起状態の系統誤差は十分抑えられ

ていたと考えられる。

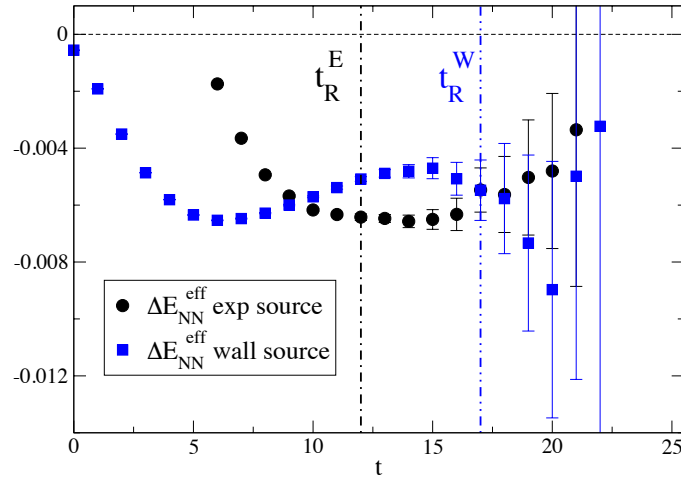


図 2: 指数型演算子 (exp source) とウォール型演算子 (wall source) を用いた有効二核子エネルギー (E_{NN}^{eff})。横軸は虚時間。破線はそれぞれの演算子の結果が虚時間に依らなくなる領域が始まる虚時間 t_R^O ($O = E$ (指数型演算子), W (ウォール型演算子)) を表す。

(3) 格子 QCD を用いた核子構造研究

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

藏増、山崎は、広島大学 石川健一准教授、東北大学 佐々木勝一准教授、東北大学大学院生 塚本夏基氏、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) を用いた核子形状因子計算を行なった (論文 4)。図 3 は電氣的形状因子と軸性ベクトル形状因子の結果である。電氣的形状因子は小さな運動量移行の領域で実験値に良く一致した結果が得られている。これはクォーク質量が大きなこれまでの計算で得られなかった結果である。一方、軸性ベクトル形状因子は実験値とは大きく異なる結果になっており、この原因を明らかにしていくのが一つの大きな目標になる。この計算結果により、平成 28 年度実施課題における HPCI 利用研究課題優秀成果賞を受賞した。

現在、理研計算科学研究機構 (AICS) 新谷栄悟研究員を共同研究者に加え、さらに大きな体積を用いた現実的クォーク質量での計算を実行している。

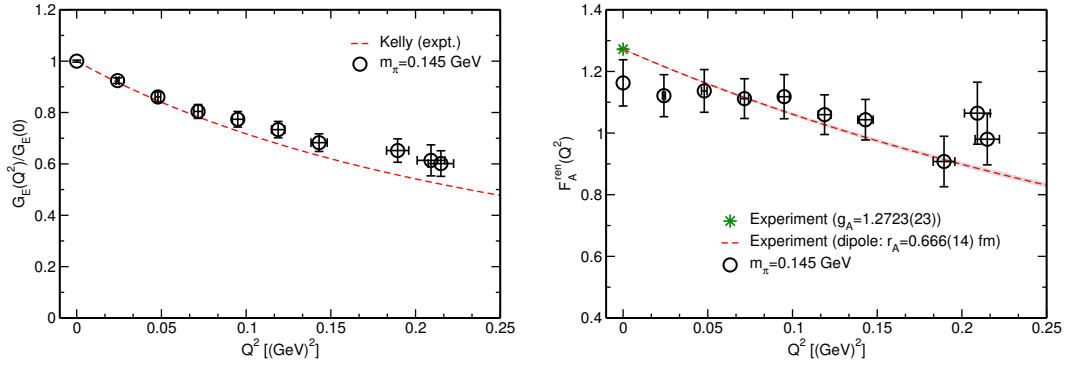


図 3: 電磁的核子形状因子 (左) と軸性ベクトル形状因子 (右)。横軸は運動量移行、破線は実験値を表す。

(4) 場の理論的相互作用範囲内の Bethe-Salpeter 波動関数

場の理論で定義される二体粒子 Bethe-Salpeter 波動関数は、二体相互作用範囲外では、量子力学の二体波動関数と同じ形を取ることが知られている。そのことを用いて、多くの格子 QCD 散乱位相差計算で使われてきた有限体積法が導出されていた。

藏増、山崎は、相互作用範囲内の Bethe-Salpeter 波動関数と散乱位相差の関係を再検討し (論文 2)、散乱位相差を求めるために必要な量が何かを明確にした。さらに、量子力学的ポテンシャルを Bethe-Salpeter 波動関数で定義した際に、正しい散乱位相差を求めるための条件を明らかにし、ポテンシャルの展開について議論した。

(5) 格子 QCD による相互作用範囲内の Bethe-Salpeter 波動関数を用いた散乱長計算

散乱長は、粒子間の相互作用を特徴づける基本的な物理量である。これまで、相互作用範囲外の Bethe-Salpeter 波動関数から導出された有限体積法により種々の散乱長が計算されてきた。

滑川、山崎は 2 パイ中間子系において、相互作用範囲外ではなく相互作用範囲内の Bethe-Salpeter 波動関数を用いて散乱振幅を決定した (論文 3)。得られた散乱振幅から散乱長を計算し、既存の手法で求められた結果との一致が確認できた。加えて、半オフシェル散乱振幅計算に世界で初めて成功した。

(6) 格子 QCD を用いた π 中間子形状因子の計算

山崎は大学院生 (博士後期課程 2 年) 賀数とともに、PACS Collaboration において、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 145 MeV) を用いた π 中間子電磁形状因子の計算を行った。この形状因子からは π 中間子の平均二乗荷電半径を見積もることができ、 π 中間子の構造を解明するためには非常に重要な物理量である。しかし、これまでの多くの π 中間子電磁形状因子の計算では、現実よりも大きなクォーク質量を用いていたため、実験値を再現できていなかった。

この研究は昨年度からの継続研究であり、昨年度からは統計を増やし、2 次のカイラル摂動論公式を用いた解析などから平均二乗荷電半径の系統誤差を見積った。それらの系統誤差は統計誤差よりは十分小さく、最終的な平均二乗荷電半径の結果は実験値をよく再現した。今後、これらの研究成果を論文としてまとめつつ、更に大きな体積を用いた計算を行う予定である。

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

Kaon B パラメーター B_K は K 中間子の $K^0 - \bar{K}^0$ 混合に対す QCD の寄与を抽出した量であり、QCD の非摂動論的な効果が主として効いてくる量であるため格子上の数値計算による測定が必須となる量である。この B_K を Wilson fermion を用いて計算しようとする、カイラル対称性の破れからくる余計な演算子混合に邪魔されて精度の良い測定が困難となる事情があった。このカイラル対称性の破れからくる余計な演算子混合の問題に対する解決策として、gradient flow を用いる方法が有力視されている。gradient flow は一種のくりこみ操作であり、あらゆる演算子に対して非常に簡単に実行することができる。gradient flow の優れた点として flow を課した演算子には紫外発散が現れないという点が挙げられる。そのため格子上のいかなる対称性の破れにも悩まされることなく、連続極限を単純な操作として取ることができるようになるのである。gradient flow を課した演算子は繰り込まれた演算子を含む有限な量となっているのであるが、鈴木と谷口は研究の第一歩として gradient flow を課した 4 fermi 演算子から、高エネルギー物理学で一般的に用いられる $\overline{\text{MS}}$ scheme で繰り込まれた演算子を取り出すための変換係数の計算を行なった。特に紫外発散が現れないという性質を調査する目的で、グルーオンに質量を導入した処方を採用し、変換係数の計算を行っている。(国際会議口頭発表 5,12,15) (国内研究会口頭発表 2,8)

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

金谷、谷口らは、新潟大学江尻信司准教授、広島大学梅田貴士准教授、九州大学鈴木博教授、大阪大学北沢正清助教らとの共同研究で、有限温度・有限密度 QCD 相構造とクォーク物質の熱力学的諸性質を、改良ウィルソン型格子クォークを用いた格子 QCD シミュレーションにより研究し、エネルギー運動量テンソルから、圧力、エネルギー密度、エントロピー密度などの熱力学量を評価し、カイラル凝集や位相感受率から、カイラル相転移やアクシオン質量の評価を行った。

格子上ではエネルギー運動量テンソルを並進対称性に伴う保存カレントとして定義できない。これに起因して、格子 QCD によるエネルギー運動量テンソルの評価には、5 種類の演算子の非自明な繰り込みと混合を非摂動論的に求めなければならないという理論的・数値的な困難が存在している。本研究は、この非摂動論的なくりこみの問題に関して、勾配流 (グラジエントフロー) を用いて根本的な解決を図る点に特徴がある。Lüscher らにより提案された勾配流は格子上の物理量計算に様々な革新をもたらしているが、特に、共同研究者である鈴木らにより、これまで格子での計算や定義に大きな困難が伴っていた様々

な物理量の非摂動論的評価に新しい方法が提案された。この方法は、ウィルソン型クォーク作用で大きな困難となっていたカイラル凝集や位相感受率などの評価にも有効である。我々は鈴木らの方法を動的クォークを含む full QCD シミュレーションに世界で初めて適用して、クォーク物質の熱力学特性を研究している。

2017 年度は、2016 年度に開始したクォークが重い場合の $N_F = 2 + 1$ QCD で最初の研究を完成させ、エネルギー運動量テンソルの一点関数やカイラル凝集、位相感受率に関して非常に良い結果を得た。この成果を受けて、次の段階の研究にむけて、 $N_F = 2 + 1$ QCD の物理点における研究を開始し、同時に、エネルギー運動量テンソルの 2 点関数から輸送係数などを引き出す研究も開始した。また、これまでに開発してきた多重点再重み付け法やヒストグラム法とグラジエントフロー法を組み合わせ、QCD のグルオン部分である SU(3) ゲージ理論における潜熱などの研究を進めた。

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

a) クォークが重い場合

第一段階の研究として、2016 年に、s クォーク質量は現実の値に近いが u,d クォークは現実より重く ($m_\pi/m_\rho \simeq 0.63$)、格子間隔が $a \simeq 0.07\text{fm}$ 1 つだけの場合について、固定格子間隔法による計算を開始した。2017 年度は、系統誤差評価などの一連の解析を行って、論文にまとめた。

我々の研究により、状態方程式の評価が動的クォークを含む場合でも精度良く遂行可能であることが示された。図 4 に状態方程式の最終結果を示す。赤丸がグラジエントフロー法による評価の結果で、黒三角は、同じ配位上で T-積分法を用いて評価した先行研究の結果である。 $T < 300\text{MeV}$ ($N_t > 8$, N_t は温度軸方向の格子点の数) で従来の方法による結果をよく再現することが示された。他方、この格子間隔では、 N_t が 8 程度より小さいと ($T > 300\text{MeV}$)、 $O(aT)$ の格子化誤差が大きく、両者が一致しなくなることもみてとれる。(論文 5)

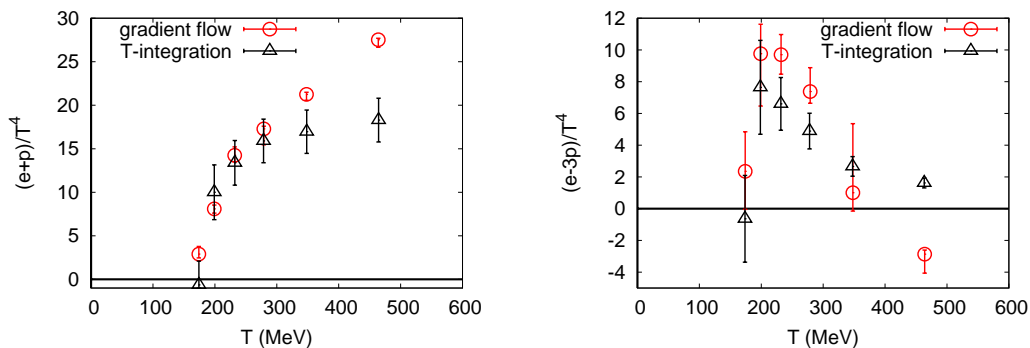


図 4: グラジエントフロー法による有限温度 (2+1)-flavor QCD の状態方程式の研究。クォークが重い場合の結果。左図: エントロピー密度 $\epsilon + p$ 。右図: トレース・アノマリ $\epsilon - 3p$ 。赤丸がグラジエントフロー法による評価の結果で、黒三角は、同じ配位上で T-積分法を用いて評価した先行研究の結果。横軸は温度 T 。(論文 5)

さらに、同じ有限温度配位を用いて、グラジエントフロー法を用いたカイラル凝集と位相感受率の評価も行った。格子 QCD ではこれらの物理量に複雑なくりこみが要求されるが、鈴木法を用いればくりこまれた量を直接評価可能となり、計算コストを大きく抑えられる可能性がある。図 5 の左図にカイラル感受率の結果を示す。我々は、カイラル感受率がクロスオーバー温度 $T \sim 190\text{MeV}$ でピークを示すことを示した。また、s クォークよりも、軽い u,d クォークのカイラル感受率の方がより強い特異性をしめしており、これも理論的期待と一体する。格子上でカイラル対称性を陽に壊してしまうウィルソン型クォークでこれらが示されたのは初めてである。(論文 5)

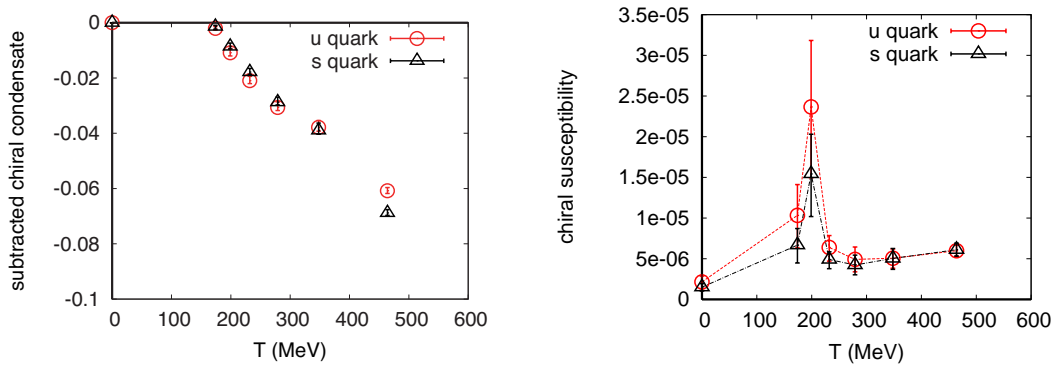


図 5: グラジエントフロー法による (2+1)-flavor QCD の熱力学特性の研究。クォークが重い場合の結果。左図: カイラル凝集。右図: カイラル感受率。赤丸は u,d クォーク、黒三角は s クォークのカイラル凝集/感受率。(論文 5)

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

b) 現実のクォーク質量の場合

グラジエントフロー法による状態方程式の評価は、従来の方法で必要であった、非摂動的ベータ関数の評価などが不要で、全体的計算コストを大きく抑えられる可能性がある。この結果は、計算コストの高い物理点での評価を推進する上で、グラジエントフロー法が大きな役割を担いうることを示唆している。クォークが重い場合にグラジエントフロー法が有効であるという前述の結果を受け、次の段階として、現実のクォーク質量での研究と格子間隔を変えたシミュレーションを開始し試験研究を行った。

PACS-CS Collaboration が生成した、改良ウィルソンクォークを用いた、格子間隔 $a \simeq 0.09 \text{ fm}$ の $32^3 \times 64$ 格子のゼロ温度配位を利用し、固定格子間隔法で $T \approx 160\text{--}550 \text{ MeV}$ ($N_t = 14, 13, \dots, 4$) の温度を研究した。クォークが重い場合は $T \approx 190 \text{ MeV}$ が臨界温度であったが、クォークが軽いのでより低温側にシフトすると予想される。しかし、この格子作用の場合の臨界温度はわかっていない。

まだ統計が十分ではないが、エネルギー運動量テンソルの 1 点関数やカイラル凝集について、クォークが重い場合とほぼ同様に有意な計算が可能であるとい

う中間結果を得た。ただし、格子化誤差が大きい傾向があり、高統計と精密な系統誤差評価が必要である。クォーク質量が小さい効果に加え、格子間隔がやや粗いことが影響しているものと思われる。

状態方程式の中間結果を図6に示す。クォークが重い場合の経験から、 $T > 247$ MeV ($N_t \leq 8$) では格子化誤差が大きいと予想される。クォークが重い場合と違って、同じ配位を用いた通常の方法による状態方程式の結果は無いが、改良スタガード型クォークを用いた連続極限の結果と比較すると、エントロピー密度はほぼ同じ値だが、トレース・アノマリは数倍大きくなっている。ただし、我々の結果はまだ連続極限が取られていないので、直接の比較はできない。

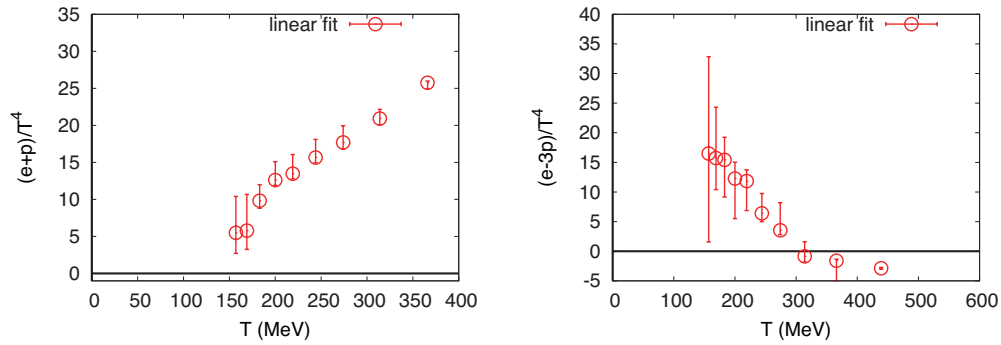


図 6: グラジエントフロー法による有限温度 (2+1)-flavor QCD の状態方程式の研究。現実のクォーク質量の結果。左図: エントロピー密度 $\epsilon + p$ 。右図: トレース・アノマリ $\epsilon - 3p$ 。横軸は温度 T 。(論文 6)

カイラル凝集についての中間結果を図7に示す。左図は u, d クォークのカイラル凝集、右図は s クォークのカイラル凝集である。図7の左図に示したクォークが重い場合には、クォーク質量に対する依存性は小さかったが、 u, d クォークの質量が下がると、軽いクォークのカイラル凝集の温度依存性が大きく変わることが見られる。 s クォークのカイラル凝集から、 $T \sim 130-150$ MeV を臨界温度と考えると、そこで軽いクォークのカイラル凝集はかなり急激に変化すると思われる。これまでシミュレーションした範囲では低温側のデータが無いので明確な結論は難しいが、クォークが軽くなればなるほどカイラル相転移が際立つだろうという理論的期待と矛盾しない。また、ここで示唆される低い臨界温度は、改良スタガード型クォークを用いた連続極限の結果 $T \sim 150$ MeV と一致している。(論文 6)

現在、より低い温度を含む配位生成と解析を進めている。

Gradient flow を用いた輸送係数などの研究

グラジエントフローに基づく鈴木らの方法では、エネルギー運動量テンソルそのものを直接評価することができるので、その相関関数から、輸送係数など、状態方程式以外の様々な熱力学量も評価可能になる。そこで、研究の別の展開方向として、クォークが重い $N_F = 2 + 1$ QCD の場合に、エネルギー運動量テンソルの2点関数の計算を開始した。

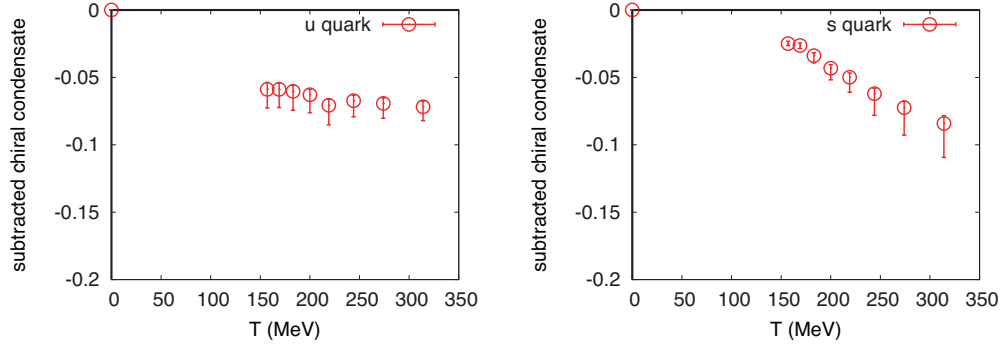


図 7: グラジエントフロー法による有限温度 (2+1)-flavor QCD の状態方程式の研究。現実のクォーク質量の結果。左図: u, d クォークのカイラル凝集。右図: s クォークのカイラル凝集。横軸は温度 T 。(論文 6)

2 点関数では格子化誤差が 1 点関数より大きくなる傾向があり、現在の統計では明確な結論は難しいが、クエンチ近似 QCD の場合に FlowQCD Collaboration が行った先行研究と同様に、有望な結果をいくつか得た (図 8)。現在、統計の

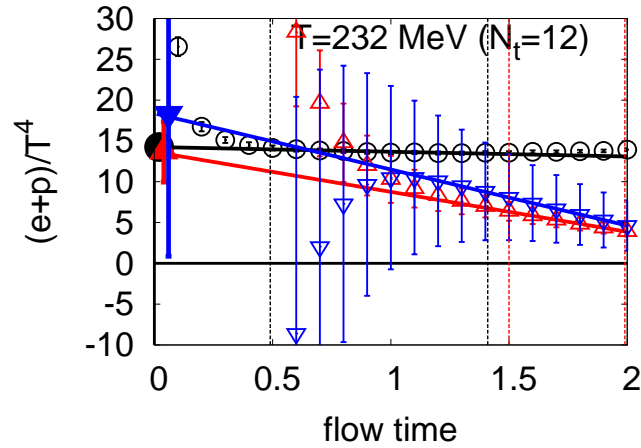


図 8: グラジエントフロー法による有限温度 (2+1)-flavor QCD のエントロピー密度の研究。クォークが重い場合の結果。黒丸はエネルギー運動量テンソルの一点関数から求めた結果 (論文 5)。赤丸と青三角は異なる二点関数から線形応答関係式を用いて引き出したエントロピー密度。横軸はフロー時間 t 。格子間隔依存性が取り除かれるフロー時間の極限 $t \rightarrow 0$ で、三つの結果が期待どおり一致することが見て取れる。(論文 7)

改善とともに、解析方法の改良を試みている。(論文 7)

我々の結果はまだ格子間隔 1 点で計算されただけであり、今後異なる格子間隔で同様の計算を行い、連続極限を取る必要がある。物理点での研究と並行して、格子間隔の違う点での研究も推進している。

また、フル QCD の研究と並行して、グラジエントフロー法を用いた SU(3) ゲージ理論の潜熱の研究も行い、中間結果を国際会議 Lattice 2017 等で報告した。

(9) 3、4 フレーバー有限温度 QCD における臨界終点

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。蔵増は、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 2015 年に $\mu = 0$ (密度ゼロ) での 3 フレーバー QCD の臨界終点における π 中間子質量 ($m_{\pi,E}$) を決定した (論文発表済)。われわれが用いた方法は、尖度 (kurtosis) 交叉法と呼ばれる有限サイズスケーリング解析手法の一種であり、一次相転移領域における物理量分布の尖度とクロスオーバー側の対応物が、異なる空間体積依存性を持つ性質を利用している。本研究において、世界で初めて 3 フレーバー QCD における臨界終点の決定に成功した。その後、 $m_{\pi,E}$ の精度向上を目指し、更に細かい格子間隔で計算を行った結果、連続極限において $m_{\pi,E}$ の値が非常に小さい、あるいはゼロになる可能性を示唆する結果を得た (論文 8)。この結果は従来の理論予想とは異なっており、大変興味深い。現在、更に細かい格子間隔の計算を実行し、連続極限における $m_{\pi,E}$ の値がゼロになる可能性の検証に取り組んでいる。また、並行して、大野と共に 4 フレーバー QCD における臨界終点の探索を開始した。理論的には、3、4 フレーバー QCD ともにクォーク質量 m_q が小さな領域での一次相転移が予想されているため、4 フレーバー QCD での臨界終点の結果を理論予想と比較検討することによって、3 フレーバー QCD の結果に対する新たな理解が得られると考えられる。

(10) 総バリオン数揺らぎとその高次キュムラントの計算

総バリオン数揺らぎとその高次キュムラントは、QCD 臨界点を探索する上で重要な量である。実際、RHIC のビームエナジースキャン計画でも同様の量が測られ、特に、高次キュムラントで観測されている特徴的振る舞いの理論的理解が必要となっている。

大野は、Frithjof Karsch 氏を中心とする BNL-Bielefeld-CCNU Collaboration に参加し、2+1 フレーバーの Highly Improved Staggered Quark 作用を用いた格子 QCD シミュレーションを行い、これらの量の計算を行った (図 9)。その結果、現在実験的に到達しているビームエナジーの範囲において、実験結果と同様の振る舞いが格子 QCD の理論計算でも得られることを示した (論文 10)。

(11) クォークコニウム相関関数及びスペクトル関数の計算

クォークと反クォークの束縛状態であるクォークコニウムは、RHIC や LHC 等で行われている重イオン衝突実験において生成される、クォーク・グルオン・プラズマの性質を調べるための重要なプローブのひとつである。従って、高温媒質中のクォークコニウム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必要不可欠である。

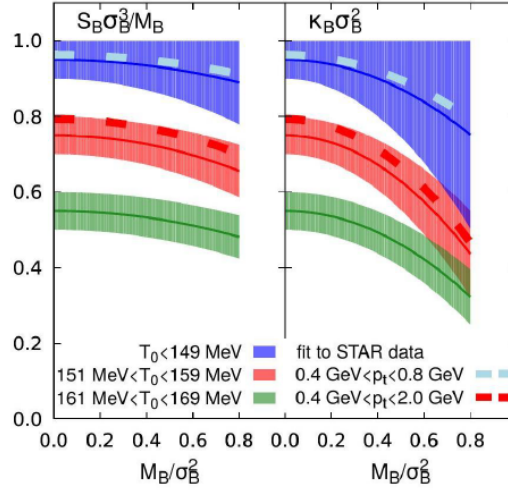


図 9: 総バリオン数の歪度（左図）及び尖度（右図）。ゼロバリオン化学ポテンシャルにおけるクロスオーバー温度の違いを色の違いで示す。また、STAR Collaboration の実験から得られた結果を破線で示す。

大野は、華中師範大の Heng-Tong Ding 教授、Bern 大の Mikko Laine 教授及び Bielefeld 大の Olaf Kaczmarek 氏らと共に、摂動論の手法等を用いて、擬スカラーチャンネルのクォークoniumスペクトル関数を計算した（論文 11）。また、クエンチ近似を用いた大規模格子 QCD 計算を行い、世界で初めて連続極限におけるクォークonium相関関数を計算し（論文 12,13）、上記摂動論の結果と比較した。そして、チャーモニウムに関しては臨界温度の 1.1 倍の温度で、既に束縛状態がなくてもよいことを示唆する結果を得た。一方、ボトモニウムに関しては少なくとも臨界温度の 1.5 倍の温度においても、束縛状態が存在することを示す結果が得られた（図 10）。

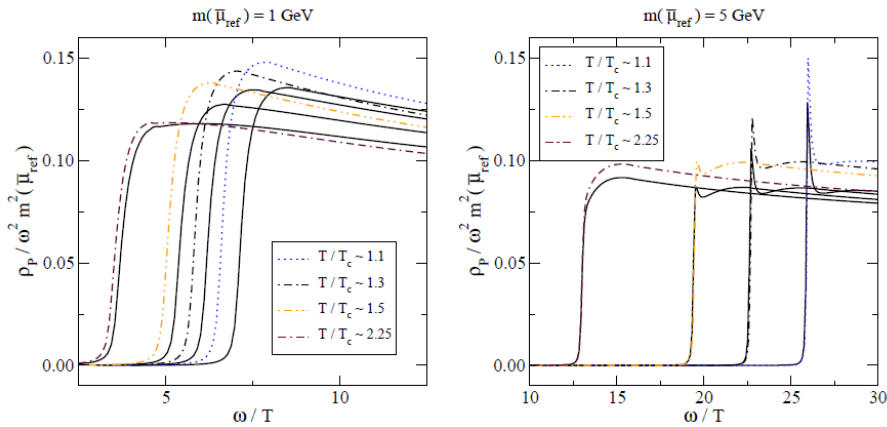


図 10: チャーモニウム（左図）及びボトモニウム（右図）スペクトル関数。摂動論の結果を実線、それを格子 QCD 計算で得られた相関関数を再現するように変更したものを破線で示す。

(12) QCD のカイラル相転移の数値的研究

QCD のクォーク・グルーオン相（高温相）の性質や、高温相からハドロン相（低温相）への相転移の性質の解明は、初期宇宙の進化に係わる重要な課題である。今日まで多くの研究が行われてきているが、この有限温度相転移の次数についてさえ、結論が得られていない。WMFQCD Collaboration (岩崎 (筑波)、石川 (広島)、中山 (Kavli IPMU)、吉江) は、今日まで、多フレーバ QCD の相構造を、『繰り込み群に基づくスケーリング則を数値的に検証する』事によって調べてきた。昨年度から、同じ手法を用いて、 $N_f = 2$ QCD のカイラル相転移の次数を調べている。

本研究では、まず、カイラル相転移が二次であると仮定して、体積の異なる格子上的相転移点での中間子伝搬関数のスケーリング則を導く。3 種の体積の異なる系を用いてスケーリング則が成り立っている事を数値的に示した。この事は、相転移次数が 2 次である事を強く示唆する。(論文 14)。

次に、相転移に関わるカイラル $SU(2) \times U(1)$ 対称性が、相転移（の高温側）でどう回復しているかを、カイラル多重項の中間子伝搬関数を比較する事によって。調べた。(技術的理由で、フレーバ 3 重項の中間子のみ調べた。) 高温側では、 $SU(2)$ 対称性が回復するだけでなく、量子補正によって破れている $U(1)$ 対称性も回復していると考えられるべき結果を得た。(論文 15)。

高温側で $U(1)$ 対称性が実質的に回復する場合、多くの理論モデルで一次転移を導くので、上記のスケーリング則の成立と $U(1)$ 多重項の縮退を矛盾無く説明する事が課題である。

(13) テンソルネットワーク形式に基づく格子ゲージ理論の研究

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

2014 年、藏増と理研計算科学研究機構 (AICS) の清水特別研究員は、テンソル繰り込み群をグラスマン数も扱えるように拡張し (グラスマンテンソル繰り込み群) 世界で初めてフェルミオン入りのゲージ理論への応用に成功した。具体的には、グラスマンテンソル繰り込み群を用いて、 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。また、並行して、素粒子物理にとって興味深い低次元モデルの解析も行う。2017年度の主要な研究成果は、2014年にSchwingerモデルの解析に用いたアルゴリズムを改良し、より高度な解析手法を用いて1フレーバーWilsonフェルミオンを持つ2次元格子Schwingerモデルの詳細な相構造解析を行ったことである(論文16)。図11(左)は、強結合極限($g \rightarrow \infty$)における $\langle P_{\text{odd}} \rangle$ (パリティ奇の部分空間への射影演算子の期待値)とセントラルチャージのフェルミオン質量依存性を表す。 $\langle P_{\text{odd}} \rangle$ の振る舞いから、 $-1.8 \leq m \leq -0.7$ の領域にパリティ対称性が破れている相が存在することがわかる。また、セントラルチャージの振る舞いから、 $m \approx -0.7$ で相転移が存在し、 $m \leq -1.8$ でBKT(Berezinskii-Kosterlitz-Thouless)転移が存在することがわかる。なお、2014年の研究ではカイラル感受率を用いた相構造解析を行っていたため、 $m \leq -1.8$ でのBKT転移を検知することはできなかった。図11(右)は、強結合極限($g \rightarrow \infty$)と有限の結合定数 g における解析結果と統合的に考察し得られた相図である。

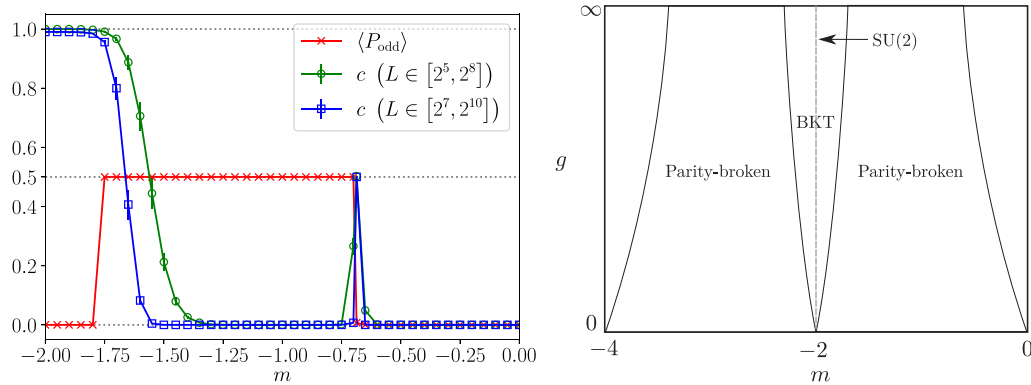


図 11: (左) 強結合極限における $\langle P_{\text{odd}} \rangle$ とセントラルチャージのフェルミオン質量依存性。(右) 解析結果に基づく相図。BKT は Berezinskii-Kosterlitz-Thouless 転移を表す。

(14) 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の一つである。この模型は、強結合ゲージ理論のダイナミクスにより、素粒子標準模型では手で与えられていた電弱対称性の自発的破れの起源を説明できる可能性がある。しかし、この模型を構築するために必要な強結合ゲージ理論には、近似的共形対称性を持つなど、特殊な条件が課されている。山崎は名古屋大学 山脇幸一名誉教授や KEK 青木保道特任准教授らと共に、LatKMI Collaboration において、格子ゲージ理論を用いた数値計算から、そのような条件を満たすゲージ理論が存在するかの探索を行っている。

これまでの4、8、12フレーバーSU(3)ゲージ理論の研究から、8フレーバー理論がそれら条件を満たす可能性があることを示唆した。今年度は、これまでよりも大きな体積、軽いフェルミオン質量のデータを含め、系統誤差を小さくした結果から得られた研究成果を論文としてまとめた(論文20)。さらに、8、12フレーバー理論の性質を調べるため、フレーバー1重項擬スカラー中間子の計算を行い、少ないフレーバー数のSU(3)ゲージ理論とは定性的に異なるフェルミオン質量依存性を示す結果が得られた(論文22)。

(15) 格子QCD研究用データグリッド JLDG/ILDG の運用

JLDG

JLDG (Japan Lattice Data Grid) は、国内の計算素粒子物理研究グループが日々の研究データを管理・共有する為のデータグリッドである。主システムは、国内の主要な格子QCD研究拠点7箇所に設置したファイルサーバを国立情報学研究所が提供するSINET VPNで接続し、グリッドファイルシステムソフトウェアGfarmで束ねたファイルシステムである。JLDGはサブシステムとして、HPCI共用ストレージとの連携システムとILDG (International Lattice Data Grid) との接続システムを備えている。JLDGの運用は、各拠点の代表者、研究グループの代表者、システム開発者、管理運用支援の委託先の業者の担当者、をメンバーとするJLDGチームが行っており、筑波大からは、建部、天笠(システム情報)と山崎、吉江が参加している。

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

本年度は、ハードウェアの増強、ソフトウェアのバージョンアップ、障害対応等の定型的作業に加えて、JCAHPCにJLDGの拠点を設置する計画を立案し、ファイルサーバを設置した。次年度以降、同所のスーパーコンピュータOakforest-PACSにJLDGクライアント機能を導入する計画である。

ILDG

ILDGは5つの地域グリッドを、『格子QCD配位の国際規模での共有』を目的として相互運用する仕組みであり、JLDGはILDGの日本の地域グリッドである。ILDGは2007年に運用を開始して以来、アンサンプルの記述言語の拡充、各地域グリッドでのシステム改良が行われてきたが、グリッドの相互運用の仕組みに変更はなく、実用システムとして研究者に利用されている。

ILDGには、「公開されている格子QCD配位アンサンプルの利用状況を把握する仕組みが無い」事が問題であった。論文の引用・被引用の記録とは別に、データの引用・被引用関係の記録を蓄積する目的で、ILDGに公開するQCDアンサンプルにDOI (Digital Object Identifier) 登録を行う事が提案され、米国地域グリッドでは、実施済である。

JLDGでは、天笠、松古(KEK)、吉江が中心となって、DOI登録の体制面の

検討と各関係機関との調整を行って、DOI 登録は JicFus (計算科学連携機構) の活動として位置付けること、筑波大計算科学研究センターが、DOI 登録機関の会員となり、実際の登録業務とデータへのアクセスを保証する仕組みに責任を持つこととなった。

今年度は、DOI 登録に必要なソフトウェア回りの開発 (登録フォーム、ILDG QCDml ensemble xml と補足情報からの landing page の生成) を完成させた。また、登録の規約や手続き (登録作業のフロー) についても検討を行い、JicFus に提案する規約案がほぼ完成した。

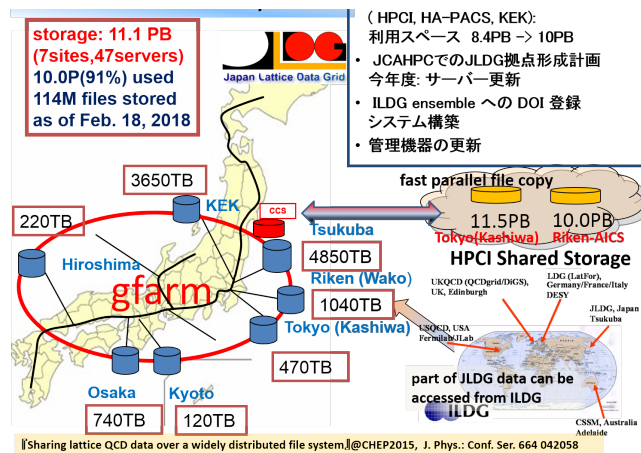


図 12: JLDG の運用状況。2018 年 2 月時点。

(16) 格子 QCD 共通コード開発

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

本年度は、インデックス、IO、フェルミオン、ゲージ固定など種々クラスの改良および修正が行われた。加えて、新規スーパーコンピュータ向けコード対応がなされた。これらの変更を含めた Bridge++ ver.1.4.4 へのアップデートが 2017 年 11 月に実施された。また、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 32 本の論文が共通コードを元に発表されている。共通コードはコミュニティコードとして重要な役割を果たしている。

【2】超弦理論

(石橋 延幸、伊敷 吾郎、佐藤 勇二、毛利 健司)

(1) 光円錐ゲージの超弦の場の理論の次元正則化とループ振幅

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

石橋は村上（釧路高専）らとのこれまでの研究で、様々な場合について光円錐ゲージの超弦の場の理論の次元正則化を用いた計算により、第一量子化の計算と一致する結果を得ることができることを示してきた。今年度は、外線が NS sector に属し、odd spin structure の世界面に対応する振幅の場合、次元正則化を用いた超弦の場の理論から計算される結果が第一量子化の結果を再現することを示した（論文 23）。

(2) Kodaira-Spencer 重力と Calabi-Yau 多様体の複素構造の変形

Calabi-Yau 多様体 X の poly-vector 場の空間 B は odd フーリエ変換により微分形式の空間 A とベクトル空間として同型対応する。毛利は、これを利用して、 A の Hodge 双対作用素 $*$ や $SU(2)$ の生成子を B に移植し、 $*$ は B にほぼ algebra 準同型として作用すること、及び B の積演算が $SU(2)$ を保存することを発見した。副産物として、Marcus-Yankielowicz が提出した謎の整合性条件が Kodaira-Spencer 方程式と等価であることが判った。更に B に、Barannikov-Kontsevich とは別の、differential Gerstenhaber-Batalin-Vilkovisky 代数の構造が入ることを示した。

Kodaira-Spencer 重力において、運動方程式の解による場の凝縮は Calabi-Yau 多様体 X に複素構造のカイラルな変形を誘導するが、これが数学的な X の複素構造の変形のカイラル極限で得られることを計算で示した（論文 24）。

(3) 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。

佐藤は、伊藤（東京工業大）、鈴木（静岡大）と共に、6 点強結合散乱振幅を与える Z_4 可積分模型の熱力学的ベーテ仮説方程式が、化学ポテンシャル・質量項が大きな極限で解析的に解けることを示し、対応する強結合 6 点散乱振幅を求めた。これは、散乱振幅の研究で重要な役割を果たしてきた Z_6 対称性を持つ運動学的配位および soft/collinear 極限での強結合散乱振幅を内挿する解析的表式を与えるものである。また、これまでに解析されてきた運動学的配位と対照的に、こうした運動学的配位においては強弱結合の散乱振幅の振舞いが大きく異なることを明らかにした（論文 25）。

(4) 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。過去に伊敷は、量子力学のコヒーレント状態を応用した行列幾何の定式化の方法を提案している。本年度、伊敷・村木・松本はこの方法について研究し、その結果、この方法が数学分野における Berezin-Toeplitz 量子化と呼ばれる方法と密接に関係していることが明らかになった(論文 26)。また、慶応大学の松浦教授、前橋工科大学の浅川嗣彦准教授らも共同研究に加わり、この方法の物理的な系への応用についての研究を行った。その結果、この方法が超弦理論におけるタキオン凝縮と呼ばれる現象において重要な役割を果たすことが示された(論文 27)。

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

弦の場の理論の運動方程式の厳密解は、Schnabl によるタキオン真空解の発見以来活発に研究されている。最近 Erler と Maccaferri は、時間に依らない運動方程式の解の場合、任意の BCFT に対応する厳密解を書き下すことができることを示した。石橋は、岸本(新潟大)、増田(ブラハ物理学研究所)、高橋(奈良女子大)らとともに、Erler と Maccaferri の方法を用いて構成された constant magnetic field に対応した弦の場の理論の厳密解のベクトル場の配位とトポロジーとの関係を調べた(論文 28)。

(6) 弦理論における非幾何学的背景時空と宇宙項問題

弦理論の対称性である弦双対性により、リーマン幾何学的な時空とは異なる非幾何学的な時空も弦理論の背景時空として可能となる。このような背景時空(非対称オービフォルド、T-fold など)は、弦理論の真空・対称性(双対性)を理解する上で重要であり、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、上床(立命館大学)と共に、弦の世界面の共形場理論に基づき、弦スケールでも有効な非幾何学的背景時空の解析を進め、非対称オービフォルド模型を用いて超対称性を破るが対応する円筒振幅が消える D-ブレーンが容易に構成できることを明らかにした(論文 29)。この結果を含むこれまでの我々の結果に基づき、超対称性を破るが小さな宇宙項を持つ興味深い弦の真空を得ることが可能となる。

(7) 行列模型を用いた M5 ブレーンの記述

M 理論には M2 ブレーンと M5 ブレーンと呼ばれる 2 種類の基本的な物体が存在することが知られている。行列模型はそのような M 理論の第二量子化を与えていると期待されているが、M5 ブレーンが行列模型の枠内でどのように記述されるのかはこれまで分かっていなかった。伊敷は島崎信二研究員(慶応大学)、浅野侑磨研究員(Dublin Institute for Advanced Studies)、寺嶋靖治助教(京都大学基礎物理学研究所)らとともにこの問題を研究し、行列模型に M5 ブレーンが含まれていることを初めて示した(論文 30, 31)。伊敷らは行列模型に局所化と呼ばれる計算方法を適用し、物理量の非摂動的な計算を実行した。

その結果、M5 プレーンが行列模型の低エネルギーの行列配位として実現されていることが明らかになった。また、伊敷・島崎・浅野らが執筆した、この研究の基礎となる過去の論文は 2017 年度の素粒子メダル奨励賞を受賞した。

論文

1. Taisuke Boku, Ken-Ichi Ishikawa, Yoshinobu Kuramashi and Lawrence Meadows, Mixed Precision Solver Scalable to 16000 MPI Processes for Lattice Quantum Chromodynamics Simulations on the Oakforest-PACS System, arXiv:1709.08785 [physics.comp-ph].
2. Takeshi Yamazaki and Yoshinobu Kuramashi, Relation between scattering amplitude and Bethe-Salpeter wave function in quantum field theory, Phys. Rev. D 96, No. 11 (2017) ref. 114511, pp.1-6.
3. Yusuke Namekawa and Takeshi Yamazaki, Scattering amplitude from Bethe-Salpeter wave function inside the interaction range, arXiv:1712.10141 [hep-lat].
4. Natsuki Tsukamoto, Ken-Ichi Ishikawa, Yoshinobu Kuramashi, Shoichi Sasaki, and Takeshi Yamazaki for PACS Collaboration, Nucleon structure from 2+1 flavor lattice QCD near the physical point, EPJ Web Conf., 175 (2018) 06007 pp.1-8.
5. Yusuke Taniguchi, Shinji Ejiri, Ryo Iwami, Kazuyuki Kanaya, Masakiyo Kitazawa, Hiroshi Suzuki, Takashi Umeda, and Naoki Wakabayashi (WHOT-QCD Collaboration), Exploring $N_f = 2 + 1$ QCD thermodynamics from gradient flow, Phys. Rev. D 96, No.1 (2017) ref.014509, pp.1-28.
6. Kazuyuki Kanaya, Shinji Ejiri, Ryo Iwami, Masakiyo Kitazawa, Hiroshi Suzuki, Yusuke Taniguchi and Takashi Umeda [WHOT-QCD Collaboration], Equation of state in $(2 + 1)$ -flavor QCD at physical point with improved Wilson fermion action using gradient flow, EPJ Web of Conferences 175 (2018) ref.07023, pp.1-8.
7. Yusuke Taniguchi, Shinji Ejiri, Kazuyuki Kanaya, Masakiyo Kitazawa, Asobu Suzuki, Hiroshi Suzuki, Takashi Umeda, for the WHOT-QCD Collaboration, Energy-momentum tensor correlation function in $N_f = 2 + 1$ full QCD at finite temperature, EPJ Web of Conferences 175 (2018) ref.07013, pp.1-8.
8. Xiao-Yong Jin, Yoshinobu Kuramashi, Yoshifumi Nakamura, Shinji Takeda and Akira Ukawa, Critical Point Phase Transition for Finite Temperature 3-Flavor QCD with Non-Perturbatively $O(a)$ -Improved Wilson Fermions at $N_t = 10$, Phys. Rev. D 96 (2017) ref. 034523.

9. Xiao-Yong Jin, Yoshinobu Kuramashi, Yoshifumi Nakamura, Shinji Takeda and Akira Ukawa, Continuum Extrapolation of Critical Point for Finite Temperature QCD with $N_f = 3$, arXiv:1710.08057 [hep-lat].
10. A. Bazavov, H.-T. Ding, P. Hegde, O. Kaczmarek, F. Karsch, E. Laermann, Swagato Mukherjee, H. Ohno, P. Petreczky, E. Rinaldi, H. Sandmeyer, C. Schmidt, Chris Schroeder, S. Sharma, W. Soeldner, R.A. Soltz, P. Steinbrecher, and P.M. Vranas [HotQCD Collaboration], Skewness and kurtosis of net baryon-number distributions at small values of the baryon chemical potential, Phys. Rev. D 96, no. 7 (2017) ref. 074510.
11. Y. Burnier, H.-T. Ding, O. Kaczmarek, A.-L. Kruse, M. Laine, H. Ohno and H. Sandmeyer, Thermal quarkonium physics in the pseudoscalar channel, JHEP 1711 (2017) ref. 206.
12. H.-T. Ding, O. Kaczmarek, A. l. Kruse, H. Ohno, and H. Sandmeyer, Continuum extrapolation of quarkonium correlators at non-zero temperature, EPJ Web Conf. 175 (2018) ref. 07010.
13. H.-T. Ding, O. Kaczmarek, A. l. Kruse, S. Mukherjee, H. Ohno, H. Sandmeyer and H.-T. Shu, Thermal modifications of charmonia and bottomonia from spatial correlation functions, EPJ Web Conf. 175 (2018) ref. 07021.
14. K.-I. Ishikawa, Y. Iwasaki, Yu Nakayama, T.Yoshie, RG scaling relations at chiral phase transition in two-flavor QCD arXiv:1704.03134 [hep-lat].
15. K.-I. Ishikawa, Y. Iwasaki, Yu Nakayama, T.Yoshie, Nature of chiral phase transition in two-flavor QCD arXiv:1706.08872 [hep-lat].
16. Yuya Shmizu and Yoshinobu Kuramashi, Berezinskii-Kosterlitz-Thouless Transition in Lattice Schwinger Model with One-Flavor of Wilson Fermion, Phys. Rev. D 97 (2018) ref. 034502.
17. Daisuke Kadoh, Yoshinobu Kuramashi, Yoshifumi Nakamura, Ryo Sakai, Shinji Takeda and Yusuke Yoshimura, Tensor Network Formulation for Two-Dimensional Lattice $N = 1$ Wess-Zumino Model, JHEP 1803 (2018) 141.
18. Yusuke Yoshimura, Yoshinobu Kuramashi, Yoshifumi Nakamura, Ryo Sakai and Shinji Takeda, Calculation of Fermionic Green Functions with Grassmann Higher-Order Tensor Renormalization Group, Phys. Rev. D 97 (2018) ref. 034502.
19. R. Sakai, D. Kadoh, Y. Kuramashi, Y. Nakamura, S. Takeda, and Y. Yoshimura, Application of Tensor Network Method to Two-Dimensional Lattice $N=1$ Wess-Zumino Model, EPJ Web Conf. 175 (2018) 11019.

20. Yasumichi Aoki, Tatsumi Aoyama, Ed Bennett, Masafumi Kurachi, Toshihide Maskawa, Kohtaroh Miura, Kei-ichi Nagai, Hiroshi Ohki, Enrico Rinaldi, Akihiro Shibata, Koichi Yamawaki, Takeshi Yamazaki (LatKMI Collaboration), Light flavor-singlet scalars and walking signals in $N_f = 8$ QCD on the lattice, Phys. Rev. D 96, No. 1 (2017) ref. 014508, pp.1-57.
21. Takeshi Yamazaki, Ken-Ichi Ishikawa, Yoshinobu Kuramashi for PACS Collaboration, Comparison of different source calculations in two-nucleon channel at large quark mass, EPJ Web Conf., 175 (2018) 05019 pp.1-8.
22. 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), Flavor-singlet spectrum in multi-flavor QCD, EPJ Web Conf., 175 (2018) 08023 pp.1-8.
23. N. Ishibashi and K. Murakami, Multiloop Amplitudes of Light-cone Gauge Superstring Field Theory: Odd Spin Structure Contributions, JHEP 1803 (2018) 063.
24. K. Mohri, Algebra of Kodaira-Spencer Gravity and Deformation of Calabi-Yau Manifold, Rev. Math. Phys. Vol.29 No.4 (2017) 1750010.
25. Katsushi Ito, Yuji Satoh and Junji Suzuki, MHV amplitudes for small conformal cross-ratios and linearized TBA equations, preprint UTHEP-718.
26. G. Ishiki, T. Matsumoto and H. Muraki, Information metric, Berry connection and Berezin-Toeplitz quantization for matrix geometry, arXiv:1804.00900 [hep-th], UTHEP-716.
27. T. Asakawa, G. Ishiki, T. Matsumoto, S. Matsuura and H. Muraki, Commutative Geometry for Non-commutative D-branes by Tachyon Condensation, arXiv:1804.00161 [hep-th], UTHEP-715 (PTEP に掲載決定).
28. N. Ishibashi, I. Kishimoto, T. Masuda and T. Takahashi, Vector profile and gauge invariant observables of string field theory solutions for constant magnetic field background, arXiv:1804.01284 [hep-th], UTHEP-717 (JHEP に掲載決定).
29. Yuji Satoh, Yuji Sugawara and Takahiro Uetoko, Non-supersymmetric D-branes with vanishing cylinder amplitudes in asymmetric orbifolds, JHEP **1708** (2017) 082.
30. Y. Asano, G. Ishiki, S. Shimasaki and S. Terashima, Spherical transverse M5-branes from the plane wave matrix model, JHEP 1802, 076 (2018).

31. Y. Asano, G. Ishiki, S. Shimasaki and S. Terashima, Spherical transverse M5-branes in matrix theory, Phys.Rev. D96 (2017) no.12, 126003.

学位論文

[博士論文]

1. 松本 高興
「Brane Geometry from Matrix Models」

[修士論文]

1. 川口 百
「双対性を明白に有する弦理論の新しい定式化とその応用」
2. 馬場 惇
「gradient flow による QCD の熱力学量の解析」

非常勤講師・集中講義

1. 藏増 嘉伸、神戸大学システム情報学研究科客員教授
2017 年 4 月から 2017 年 9 月まで。
「計算科学特論」(集中講義)を担当。
2. 石橋延幸、東京大学大学院総合文化研究科客員教授
2017 年 4 月から 2018 年 3 月まで (1 年間)。
「String field theory for closed superstrings」に関する講義を行った。

研究成果発表 (講演)

[国際会議]

1. Yoshinobu Kuramashi for PACS Collaboration 「A large scale simulation of 2+1 flavor lattice QCD」 The 35th International Symposium on lattice field theory (Lattice 2017) (Palacio de Congresos de Granada, Spain, June 19-24, 2017)
2. Takeshi Yamazaki, Ken-ichi Ishikawa, Yoshinobu Kuramashi for PACS Collaboration 「Comparison of different source calculations in two-nucleon channel at large quark mass」 The 35th International Symposium on lattice field theory (Lattice 2017) (Palacio de Congresos de Granada, Spain, June 19-24, 2017)

3. J. Kakazu, K.-I. Ishikawa, N. Ishizuka, Y. Kuramashi, Y. Nakamura, Y. Namekawa, Y. Taniguchi, N. Ukita, T. Yamazaki, and T. Yoshie for PACS Collaboration
「Electromagnetic pion form factor with strange quark mass reweighting in $N_f = 2 + 1$ lattice QCD」 The 35th International Symposium on lattice field theory (Lattice 2017) (Palacio de Congresos de Granada, Spain, June 19-24, 2017)
4. H. Ohno, Y. Kuramashi, Y. Nakamura and S. Takeda 「Critical endpoint of 4-flavor QCD with non-perturbatively $O(a)$ -improved Wilson quarks」, 35th International Symposium on Lattice Field Theory (Palacio de Congresos de Granada, Granada, Spain, June 18-24, 2017).
5. A. Suzuki, Y. Taniguchi, 「Calculation of B_K with Wilson fermion using gradient flow」, The 35th International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2017), (Palacio de Congresos, Granada, Spain, June 18-24, 2017)
6. TANIGUCHI, Yusuke; KITAZAWA, Masakiyo; SUZUKI, Asobu; SUZUKI, Hiroshi; UMEDA, Takashii; EJIRI, Shinji; KANAYA, Kazuyuki 「Energy-momentum tensor correlation function in $N_f=2+1$ full QCD at finite temperature」,
The XXXV International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2017) (Palacio de Congresos de Granada, Granada, Spain, June 18-24, 2017)
7. EJIRI, Shinji; KANAYA, Kazuyuki; KITAZAWA, Masakiyo; TANIGUCHI, Yusuke; IWAMI, Ryo; SUZUKI, Hiroshi; UMEDA, Takashi; SHIROGANE, Mizuki; WAKABAYASHI, Naoki 「Thermodynamics near the first order phase transition of $SU(3)$ gauge theory using gradient flow」,
The XXXV International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2017) (Palacio de Congresos de Granada, Granada, Spain, June 18-24, 2017)
8. KANAYA, Kazuyuki; EJIRI, Shinji; IWAMI, Ryo; KITAZAWA, Masakiyo; SUZUKI, Hiroshi; TANIGUCHI, Yusuke; UMEDA, Takashi 「Equation of state in $(2+1)$ -flavor QCD at physical point with improved Wilson fermion action using gradient flow」,
The XXXV International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2017) (Palacio de Congresos de Granada, Granada, Spain, June 18-24, 2017)
9. KANAYA, Kazuyuki; EJIRI, Shinji; IWAMI, Ryo; KITAZAWA, Masakiyo; SUZUKI, Hiroshi; TANIGUCHI, Yusuke; UMEDA, Takashi 「Thermodynamics of QCD at physical point with $(2+1)$ -flavors of improved Wilson quarks using gradient flow」,
The 15th International workshop on QCD in eXtreme conditions (XQCD 2017) (Univ. Pisa, Pisa, Italy, June 26-28, 2017)

10. TANIGUCHI, Yusuke; EJIRI, Shinji; KANAYA, Kazuyuki; KITAZAWA, Masakiyo; SUZUKI, Asobu; SUZUKI, Hiroshi; UMEDA, Takashi 「Energy-momentum tensor correlation function in $N_f=2+1$ full QCD at finite temperature」, The 15th International workshop on QCD in eXtreme conditions (XQCD 2017) (Univ. Pisa, Pisa, Italy, June 26-28, 2017)
11. H. Ohno, H.-T. Ding, O. Kaczmarek, Swagato Mukherjee, H. Sandmeyer and H.-T. Shu 「Quarkonium spectral functions at finite temperature on large quenched lattices and towards the continuum limit」, The 15th International Conference on QCD in Extreme Conditions (University of Pisa, Pisa, Italy, June 26-28, 2017).
12. A. Suzuki, Y. Taniguchi, 「Calculation of B_K with Wilson fermion using gradient flow」, The 15th International Conference on QCD in Extreme Conditions (XQCD 2017),(University of Pisa, Pisa, Italy, June 26-28, 2017)
13. Takeshi Yamazaki for PACS Collaboration 「Binding energy of light nucleus from lattice QCD」(招待講演) QCD Downunder 2017 (Novotel Cairns Oasis Resort, Australia, July 10-14, 2017)
14. J. Kakazu, K.-I. Ishikawa, N. Ishizuka, Y. Kuramashi, Y. Nakamura, Y. Namekawa, Y. Taniguchi, N. Ukita, T. Yamazaki, and T. Yoshie for PACS Collaboration 「Electromagnetic pion form factor at physical point from $N_f = 2 + 1$ QCD」 QCD Downunder 2017 (Novotel Cairns Oasis Resort, Australia, July 10-14, 2017)
15. A. Suzuki, Y. Taniguchi, 「Calculation of decay constant using gradient flow, towards Kaon bag parameter」, QCD Down Under III, (Novotel Cairns Oasis Resort, Queensland, Australia, July 10-14, 2017)
16. H. Ohno, Y. Kuramashi, Y. Nakamura and S. Takeda 「Critical endpoint of 4-flavor QCD on the lattice」, Critical Point and Onset of Deconfinement 2017 (Stony Brook University, New York, USA, August 7-11, 2017).
17. TANIGUCHI, Yusuke 「Energy-momentum tensor correlation function in $N_f=2+1$ full QCD at finite temperature」, The international workshop “QCD at nonzero baryon density” (The National Research center “Kurchatov Institute”, Moscow, Russia, Oct. 2-4, 2017)
18. H. Ohno, 「Quarkonium spectral functions on the lattice」(招待講演), Workshop on Heavy Flavor Production in High Energy Collisions (LBNL, Berkeley, USA, October 30-November 1, 2017).
19. TANIGUCHI, Yusuke 「Energy-momentum tensor correlation function in $N_f=2+1$ full QCD at finite temperature」,

CCS-EPCC Workshop (Center for Computational Sciences, University of Tsukuba, Tsukuba, Japan, Dec. 7-8, 2017)

20. Takeshi Yamazaki 「Relation between scattering amplitude and Bethe-Salpeter wave function in quantum field theory」(招待講演) Multi-Hadron Systems from Lattice QCD (University of Washington, USA, February 5-9, 2018)
21. Yusuke Namekawa 「Scattering length from Bethe-Salpeter wave function inside the interaction range」(招待講演) Multi-Hadron Systems from Lattice QCD (University of Washington, USA, February 5-9, 2018)
22. Yuji Satoh 「A world-sheet approach to T-folds」(招待講演)
New developments in AdS_3/CFT_2 holography, (Galileo Galilei Institute for Theoretical Physics, Florence, Italy, March 20, 2017)
23. Nobuyuki Ishibashi, 「Multiloop amplitudes of light-cone gauge superstring field theory: Odd spin structure contributions」(招待講演)
SFT@HIT, (Holon Institute of Technology, Holon, Israel, June 23-25, 2017).
24. Takaki Matsumoto, 「Information metric and Berry phase in matrix geometry」
YITP workshop "Strings and Fields 2017, (YITP, Kyoto, Aug. 7-11, 2017).
25. Goro Ishiki, 「Spherical transverse M5-branes from the plane wave matrix model」
APCTP workshop "Discrete Approaches to the Dynamics of Fields and Space-Time," (APCTP, Pohang, Korea, Sep. 19-23, 2017).
26. Hisayoshi Muraki, 「Contravariant Gravity -A Gravity on Poisson Manifolds-」
APCTP workshop "Discrete Approaches to the Dynamics of Fields and Space-Time," (APCTP, Pohang, Korea, Sep. 19-23, 2017).
27. Takaki Matsumoto, 「Information metric for matrix geometry」(招待講演)
APCTP workshop "Discrete Approaches to the Dynamics of Fields and Space-Time," (APCTP, Pohang, Korea, Sep. 19-23, 2017).
28. Takaki Matsumoto, 「Information metric for matrix geometry」
10th Taiwan String Workshop (NCTS, Taiwan, Oct. 26-29, 2017).
29. Takaki Matsumoto, 「Spectral action for large-N matrices」(ポスター)
East Asia Joint Workshop on Fields and Strings 2017 (KEK, Nov. 13-17, 2017).
30. Goro Ishiki, 「Spherical transverse M5-branes from the plane wave matrix model」(招待講演), International workshop "Nonperturbative and Numerical Approaches to Quantum Gravity, String Theory and Holography (ICTS, Tata institute, Bangalore, India, Jan. 29 - Feb. 2, 2018).
31. Goro Ishiki, 「Matrix geometry and string theory」(招待講演), Noncommutative Geometry and K-theory at Rits - The Fourth China-Japan Conference - (Ritsumeikan University, Mar. 26-28, 2018).

[国内学会、研究会]

1. 藏増 嘉伸, 「テンソルネットワーク法の素粒子物理学への応用」(招待講演), ポスト「京」萌芽的課題「基礎科学の挑戦」・「極限マテリアル」合同公開シンポジウム (東北大学, 仙台, 2017 年 7 月 18 日).
2. 鈴木遊, 谷口裕介「Gradient Flow を用いた相関関数の計算」, 原子核三者若手夏の学校, (国立オリンピック記念青少年総合センター, 東京, 2017 年 8 月 21 日-26 日)
3. 金谷 和至, 江尻 信司, 石見 涼, 北沢 正清, 鈴木 博, 谷口 裕介, 梅田 貴士「グラジエントフローによる $N_f=2+1$ QCD の状態方程式 – 物理点での評価に向けて」, 熱場の量子論とその応用 2017 (TQFT 2017) (基礎物理学研究所, 京都大学, 京都, 8.28-30, 2017)
4. 白銀 瑞樹, 江尻 信司, 石見 涼, 金谷 和至, 北沢 正清, 谷口 裕介, 鈴木 博, 梅田 貴士, 若林 直輝「Gradient flow 法でみる $SU(3)$ ゲージ理論における 1 次相転移付近の熱力学量」, 熱場の量子論とその応用 2017 (TQFT 2017) (基礎物理学研究所, 京都大学, 京都, 8.28-30, 2017)
5. 谷口 裕介, 江尻 信司, 石見 涼, 金谷 和至, 北沢 正清, 鈴木 遊, 鈴木 博, 梅田 貴士, 若林 直輝「Gradient flow で捉える $N_f=2+1$ 有限温度 QCD のエネルギー運動量テンソル相関関数」, 熱場の量子論とその応用 2017 (TQFT 2017) (基礎物理学研究所, 京都大学, 京都, 8.28-30, 2017)
6. 板垣 翔太, 石見涼, 梅田貴士, 江尻信司, 金谷和至, 北沢正清, 白銀瑞樹, 谷口裕介「格子 QCD の重いクォーク領域における臨界質量の連続極限について」, 熱場の量子論とその応用 2017 (TQFT 2017) (基礎物理学研究所, 京都大学, 京都, 8.28-30, 2017)
7. 山崎 剛, 藏増 嘉伸, 石川 健一, 佐々木 勝一, 塚本 夏基 for PACS Collaboration「ウィルソンフェルミオンを用いた物理点近傍での $2+1$ フレーバー QCD による核子形状因子の計算」日本物理学会 2017 年秋季大会 (宇都宮大学, 宇都宮, 2017 年 9 月 12-15 日)
8. 鈴木遊, 谷口裕介「Gradient Flow を用いた Wilson フェルミオンに対する B_K の計算」, 日本物理学会秋季大会 (宇都宮大学, 栃木, 2017 年 9 月 12 日-15 日)
9. 板垣 翔太, 石見 涼, 梅田 貴士, 江尻 信司, 金谷 和至, 北沢 正清, 白銀 瑞樹, 谷口 裕介「QCD の重いクォーク領域における臨界質量の格子間隔依存性」, 日本物理学会秋季大会 (宇都宮大学, 宇都宮, 栃木, 9.12-15, 2017)

10. 白銀 瑞樹, 江尻 信司, 石見 涼, 金谷 和至, 北沢 正清, 鈴木 博, 谷口 祐介, 梅田 貴士, 若林 直輝 「gradient flow 法を用いて見る一次相転移点近傍の熱力学量の性質」,
日本物理学会秋季大会 (宇都宮大学, 宇都宮, 栃木, 9.12-15, 2017)
11. 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 で捉えるエネルギー運動量テンソル相関関数」,
日本物理学会秋季大会 (宇都宮大学, 宇都宮, 栃木, 9.12-15, 2017)
12. 藏増 嘉伸 「Oakforest-PACS が切り拓く新たな格子 QCD シミュレーションの展開」(招待講演) 計算科学研究センター設立 25 周年記念シンポジウム「計算科学の発展と将来」(つくば国際会議場, つくば, 2017 年 10 月 10-11 日)
13. 山崎 剛, 藏増 嘉伸, 石川 健一, 浮田 尚哉, 中村 宜文, 滑川 裕介, 賀数 淳平 「格子 QCD を用いた軽い原子核計算」計算科学研究センター設立 25 周年記念シンポジウム「計算科学の発展と将来」(つくば国際会議場, つくば, 2017 年 10 月 10-11 日)
14. 山崎 剛 「格子量子色力学を用いた核子構造の研究」(招待講演) 第 4 回「京」を中核とする HPCI システム利用研究課題成果報告会 (コクヨホール, 東京, 2017 年 11 月 2 日)
15. 山崎 剛, 藏増 嘉伸, 石川 健一 「格子 QCD を用いた軽原子核の直接計算」第 4 回「京」を中核とする HPCI システム利用研究課題成果報告会 (コクヨホール, 東京, 2017 年 11 月 2 日)
16. 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) 「Theoretical exploration of the origin of mass of elementary particles」第 4 回「京」を中核とする HPCI システム利用研究課題成果報告会 (コクヨホール, 東京, 2017 年 11 月 2 日)
17. 滑川 裕介 「Successful prediction to charmed single baryons and attempt on two-hadron by lattice QCD」(招待講演) ヘビークォークハドロンとエキゾチックハドロンの構造 (J-PARC, 東海村, 2018 年 3 月 5-7 日)
18. 藏増 嘉伸, 「格子 QCD による陽子パズル解明のための理論的研究」(招待講演),
日本物理学会第 73 回年次大会, 実験核物理領域-素粒子論領域-素粒子実験領域-理論核物理領域 合同シンポジウム「多様な手法によって解き明かす陽子のパズル」(東京理科大学, 野田, 2018 年 3 月 22-25 日)
19. 山崎 剛 「格子 QCD における Bethe-Salpeter 波動関数を用いた散乱位相差の新しい計算方法」(企画講演) 日本物理学会第 73 回年次大会 (東京理科大学, 野

- 田, 2018 年 3 月 2 日日本物理学会 第 73 回年次大会 (東京理科大学野田キャンパス, 野田, 2018 年 3 月 22 日-25 日).
20. 金谷 和至, 石見 涼, 梅田 士, 江尻 信司, 北沢 正清, 鈴木 博, 谷口 裕介 「Gradient flow による $(2+1)$ -flavor QCD 状態方程式 - 物理点での試験研究」,
日本物理学会第 73 回年次大会 (東京理科大, 野田, 千葉, 3.22-25, 2018)
 21. 谷口 裕介, 梅田 貴士, 江尻 信司, 金谷 和至, 北沢 正清, 下条 昂礼, 鈴木 博, 馬場 惇 「 $N_f=2+1$ QCD における QGP 粘性係数の計算」,
日本物理学会第 73 回年次大会 (東京理科大, 野田, 千葉, 3.22-25, 2018)
 22. 馬場 惇, 梅田 貴士, 江尻 信司, 金谷 和至, 北沢 正清, 下条 昂礼, 鈴木 博, 谷口 裕介 「エネルギー運動量テンソル相関関数を使った線形応答関係式のテスト」,
日本物理学会第 73 回年次大会 (東京理科大, 野田, 千葉, 3.22-25, 2018)
 23. 板垣 翔太, 石見 涼, 梅田 貴士, 江尻 信司, 金谷 和至, 北沢 正清, 白銀 瑞樹 「再重み付け法を用いた $SU(3)$ ゲージ理論の重いクォーク領域における臨界質量の決定」,
日本物理学会第 73 回年次大会 (東京理科大, 野田, 千葉, 3.22-25, 2018)
 24. 白銀 瑞樹, 江尻 信司, 石見 涼, 金谷 和至, 北沢 正清, 鈴木 博, 谷口 裕介, 梅田 貴士, 若林 直輝 「 $SU(3)$ 格子ゲージ理論の 1 次相転移近傍での熱力学量の詳細な解析」,
日本物理学会第 73 回年次大会 (東京理科大, 野田, 千葉, 3.22-25, 2018)
 25. 伊敷吾郎, 松本高興, 村木久祥, 「行列幾何とベリー位相」日本物理学会 2017 年秋季大会 (宇都宮大学, 2017 年 9 月 12 日-15 日).
 26. 伊敷吾郎, 松本高興, 村木久祥, 「Spectral action for large- N matrices」, 日本物理学会第 73 回年次大会 (東京理科大学, 2018 年 3 月 22 日-25 日).

受賞

1. 岩崎 洋一 前学長・筑波大学名誉教授:
瑞宝重光章受章 (2017 年 4 月) 「教育研究功労」による。
2. 伊敷 吾郎:
2017 年度素粒子メダル奨励賞 (2017 年 9 月 14 日)
対象論文: Y. Asano, G. Ishiki, T. Okada and S. Shimasaki, “Emergent bubbling geometries in the plane wave matrix model” JHEP 1405 (2014) 075
3. 山崎 剛、藏増 嘉伸、浮田 尚哉、他 2 名:
平成 28 年度実施課題における HPCI 利用研究課題優秀成果賞 (2017 年 11 月)。

4. 鈴木 遊：
原子核三者若手夏の学校 優秀賞（2017年8月）。

国際会議・研究会の実施

国内外の共同組織への参加および顕著な学会の委員活動

1. 計算基礎科学連携拠点
<http://www.jicfus.jp/jp/>
2. 理化学研究所計算科学研究機構 (AICS)
<http://www.aics.riken.jp/>
3. International Lattice Data Grid (ILDG)
<http://ildg.sasr.edu.au/Plone>
4. Japan Lattice Data Grid (JLDG)
<http://www.jldg.org/jldg/>, <http://ws.jldg.org/QCDArchive/index.jsp>
5. 山崎 剛、計算科学ロードマップ 素粒子分野執筆担当
6. 石橋延幸、日本物理学会誌副編集委員長
7. 石橋延幸、日本物理学会若手奨励賞素粒子論領域選考委員長
8. 石橋延幸、京都大学基礎物理学研究所運営協議会委員
9. 石橋延幸、湯川記念財団・木村利栄理論物理学賞選考委員長
10. 石橋延幸、PTEP 編集委員

II. 素粒子実験グループ

教 授	受川 史彦
准教授	武内 勇司, 原 和彦
講 師	佐藤 構二
助 教	飯田 崇史, 大川 英希
研究員	武政 健一
特命教授	金 信弘
教 授	Soo-Bong KIM (海外教育研究ユニット招致)
教 授	吉田 拓生 (クロスアポイントメント教員)
准教授	池上 陽一 (クロスアポイントメント教員)
大学院生	10 名
学群 4 年次生	6 名

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

当グループの教員は数理解物融合科学センター (CiRfSE) 宇宙史国際研究拠点 (2017 年 10 月に改組により宇宙史研究センター (TCHoU)) に所属し、国内外機関との連携を深めて研究を強力に推進するための組織整備を行っている。平成 29 年度には、引き続き 3 名の研究者を本学教員として招き、より密接な共同研究の体制のもと、共同研究を行っている。

【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そのほとんどが終了し、論文の発表も終幕を迎えつつある。2017-18 年には 7 篇の原著論文が公表された。

【2】 LHC ATLAS 実験

欧州原子核研究機構 CERN の Large Hadron Collider (LHC) は、世界最高エネルギーでの陽子・陽子衝突型加速器である。2011-2012 年の Run-1 実験では重心系エネルギー 7 ~ 8 TeV での陽子・陽子衝突を行った。2013-2014 年のエネルギー増強のための改良を経て、2015 年からの Run-2 実験では、重心系エネルギー 13 TeV で衝突実験を続けている。図 1 に ATLAS 実験で取得したデータ量を、年ごとに示す。Run-2 実験では、2015 年に 3.7 fb^{-1} 、2016 年に 35.9 fb^{-1} の衝突データを取得したのに引き続き、2017 年には LHC 加速器、ATLAS 検

出器ともに順調に運転し、 46.8 fb^{-1} のデータを記録した。図 1 には、2018 年についても本稿執筆中の 5 月までの状況について示されている。

2017 年度にも、われわれは精力的に取得した衝突データを解析している。多くの物理解析では、2015～2016 年の 2 年間に取得した約 36 fb^{-1} のデータ¹ を用いて研究を行った。

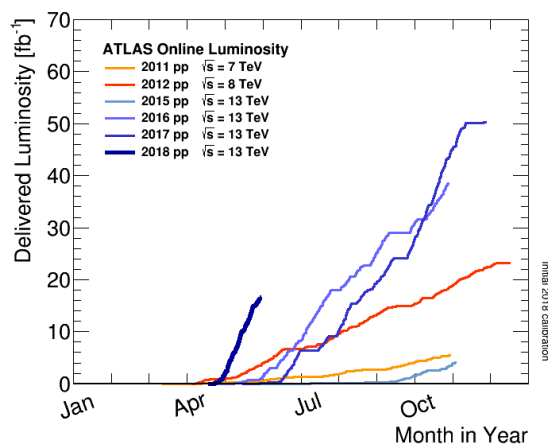


図 1: ATLAS 実験で取得したデータ量の推移を、年ごとに示している。

(1) ヒッグス粒子の精密測定

ヒッグス粒子は、2012 年に LHC 加速器で陽子・陽子衝突のデータを観測している ATLAS および CMS 両実験により約 $125 \text{ GeV}/c^2$ の質量をもって発見されていた。Run-1 のデータの解析によりすでに、スピン・パリティの測定結果が標準理論の预言値 0^+ と整合がよいことが確認された。また、ヒッグス粒子が弱ゲージボソン対に崩壊する $H \rightarrow ZZ^*$, $H \rightarrow WW^*$ の崩壊モードおよび、トップクォークのループ・ダイアグラムが寄与する $H \rightarrow \gamma\gamma$ 崩壊が、 5σ を超える有意度で観測された。とくに、 $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4\ell$ と $H \rightarrow \gamma\gamma$ の崩壊チャンネルは、バックグラウンドを抑えながら崩壊粒子をすべて検出できるため、ヒッグス粒子の精密測定に使いやすい。2017 年にこれら 2 崩壊チャンネルを解析した質量測定結果を図 2 に示す。ヒッグス粒子の質量は $124.97 \pm 0.28 \text{ GeV}/c^2$ と測定された。ATLAS 実験単独でのこの結果は、Run-1 データでの ATLAS, CMS 両実験の複合測定の結果 $125.09 \pm 0.24 \text{ GeV}/c^2$ に精度の上で迫っている。

これら Run-1 で確立した解析チャンネルは、Run-2 では事象数が大幅に増え、ヒッグス粒子の生成、崩壊過程の詳細な研究に用いられはじめるようになった。2017 年度には $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4\ell$ チャンネルではヒッグス粒子の生成および崩壊過程の詳細な研究結果が論文になった。ヒッグス粒子の生成断面積と $H \rightarrow ZZ^*$ 崩壊分岐比の積が標準理論预言値が $1.34 \pm 0.09 \text{ pb}$ のところ、 $1.73^{+0.24}_{-0.23}(\text{stat.})^{+0.10}_{-0.08}(\text{exp.}) \pm 0.04(\text{th.}) \text{ pb}$ と測定されたほか、図 3 に示すように、Run-1 では全解析チャンネルを複合することで行っていたヒッグス粒子の結合に関するフィッ

¹ 上記の記録された全データ量は 2 年間で 39.6 fb^{-1} だが、検出器に不具合がある中で取得したデータは物理解析には用いない。こうした検出器の運転状況の影響の重大性は解析ごとに異なるため、同じ 2 年間のデータであっても使用したデータ量は、解析ごとに多少異なる。

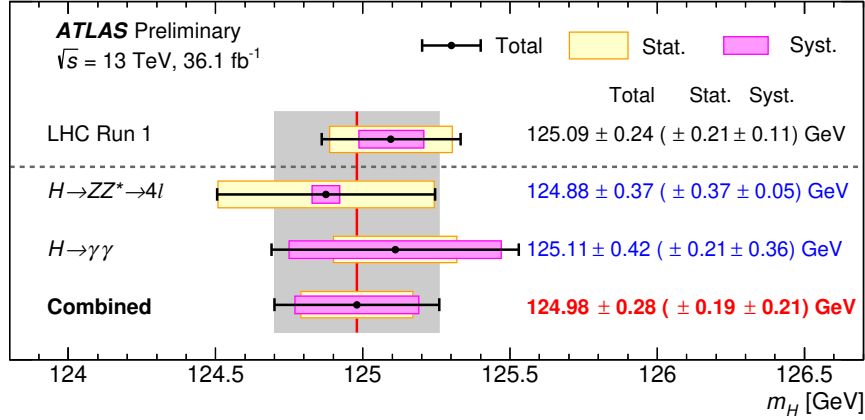


図 2: ATLAS 実験でのヒッグス粒子の質量測定結果。 $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4l$ と $H \rightarrow \gamma\gamma$ の 2 チャンネルを合わせて測定しているが、同時に各チャンネルの単独の結果はお互いによく一致している。

トが単独チャンネルのデータだけで行われた。2018 年度には、 $H \rightarrow \gamma\gamma$ 崩壊での同様な解析結果やヒッグス粒子事象の微分断面積も論文発表される予定である。

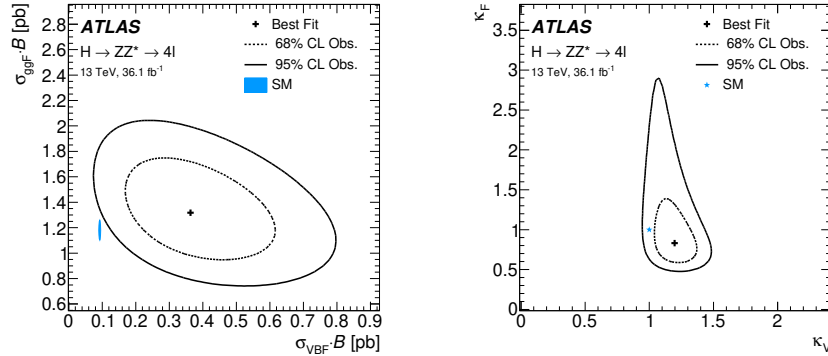


図 3: $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4l$ 事象の解析結果から得られた ggF と VBF 生成過程の生成断面積と $H \rightarrow ZZ$ 崩壊分岐比の積 $\sigma_{ggF} \cdot B$ と $\sigma_{VBF} \cdot B$ (左), およびヒッグス粒子のベクトル・ボソンとフェルミオンに対する結合の強さの測定結果を標準理論予測値で規格化した値 κ_V と κ_F (右) に対する制約。

(2) ヒッグス粒子のクォーク対への崩壊モードの観測

Run-1 のデータの詳細な解析により、 $H \rightarrow \tau\tau$ が ATLAS と CMS 両実験の複合結果で 5σ を超える有意度で観測され、Run-2 が始まる前には、ヒッグス粒子のフェルミオン対への崩壊も観測されていた。しかし、ヒッグス粒子とクォークとの結合を直接観測することは Run-2 での課題として残っていた。

標準理論では $125 \text{ GeV}/c^2$ のヒッグス粒子のボトムクォーク対への崩壊分岐比は 58% と予想されている。一方で、ボトムクォークに起因するジェットは陽子・陽子の QCD 反応で高い頻度で生成されるため、膨大なバックグラウンドに $H \rightarrow b\bar{b}$ 事象は埋もれてしまって観測が

難しい。ヒッグス粒子が弱ボソン W および Z を伴って生成される WH および ZH 生成過程で、 W や Z ボソンがレプトンまたはニュートリノに崩壊する事象を探すことでバックグラウンドは大幅に減らすことができる。ATLAS 実験ではこれら解析チャンネルで $H \rightarrow b\bar{b}$ 崩壊の観測を目指してきたが、2017 年度に Run-2 データの解析において 3.5σ の有意度で信号の兆候を観測した。標準理論の予言値で規格化した WH および ZH 過程の生成断面積の測定結果と、2つのボトムクォークの不変質量を図4に示す。

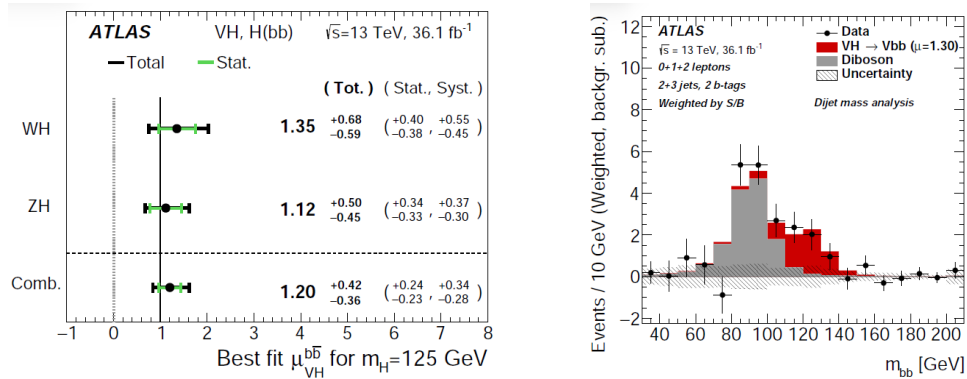


図 4: (左) WH および ZH 過程の生成断面積の測定結果。(右) 事象内の2つのボトムクォークの不変質量の分布。電弱相互作用で生成される WZ と ZZ バックグラウンド事象以外のバックグラウンドの寄与は差し引いた後の分布であり、灰色の部分がバックグラウンド。ヒッグス粒子の信号のベストフィットを赤いヒストグラムで表している。

トップクォークは、湯川結合によって質量を得るフェルミオンの中でもっとも重く、したがってヒッグス粒子との結合が強い。そして、フェルミオンの中で唯一、電弱対称性が敗れるエネルギー・スケールに質量がある。トップクォークとヒッグス粒子の結合を測定することは、とくに興味深い。これを直接測定できる解析チャンネルが、 $t\bar{t}H$ 生成過程で、ATLAS 実験ではこのトップクォーク対を伴ったヒッグス粒子生成過程の発見を目指してきた。2017 年度には、ヒッグス粒子 WW^* , ZZ^* , $\gamma\gamma$, $b\bar{b}$ に崩壊する解析チャンネルの解析結果を足し合わせることで、 4.3σ の有意度で信号の兆候を観測することができた。モンテ・カルロ事象を使った解析感度の予想では 3.8σ の有意度が予想されていた。事象の信号らしさを全チャンネルで一つにまとめてプロットした図と、 $t\bar{t}H$ 生成断面積と各崩壊モードの分岐比の積を標準理論の予言値で規格化した値を、図5に示す。

(3) ヒッグス粒子の稀崩壊の探索

ヒッグス粒子の稀崩壊事象の探索は、湯川結合と標準理論の検証を行う上で、極めて重要である。標準理論を超える物理が存在した場合に、既存の崩壊モードの比率が増大したり、標準理論では存在しえない崩壊モードが可能になるためである。ヒッグス粒子のミューオン対への崩壊は、背景事象の少ないクリーンなイベントトポロジーで測定することが可能で、第2世代粒子の湯川結合に対して、最も高い感度を持つチャンネルである。図6は、2015・2016年の全データを用いた、ベクターボソンフュージョン生成過程における、ミューオン対の不変質量分布である。昨年度の暫定的な結果を、査読付き論文に提出した。ヒッグス粒子のミューオン対への崩壊比は、95%の信頼度で標準理論からの予測の2.8倍以下であることがわかった。ヒッグス粒子のミューオン対への崩壊モードは、シグナル強度に対する不定

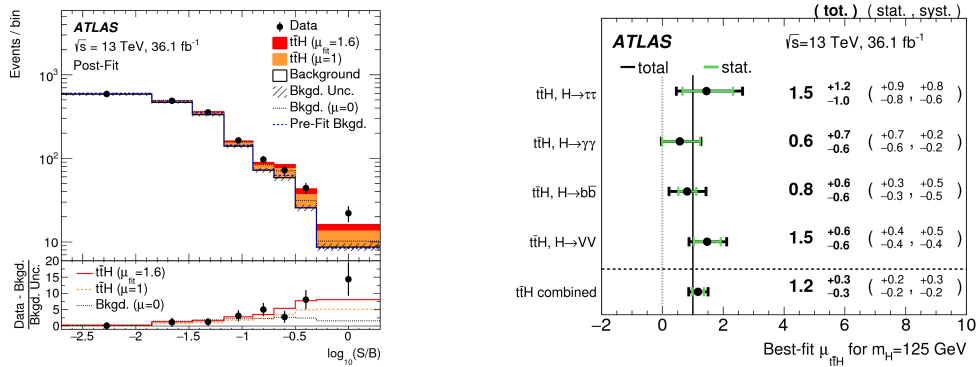


図 5: (左) $t\bar{t}H$ 事象探索の各解析チャンネルで評価した事象の信号らしさを、全チャンネルまとめてプロットしたもの。ここでの信号らしさは各解析の最終段階のヒストグラムの S/B の値を使っている。(右) ヒッグス粒子の崩壊モードごとに測定した $t\bar{t}H$ 生成断面積と各崩壊モードの分岐比の積と標準理論の予言値の比。

性が、100%に迫っており、近いうちに、観測又は、兆候を捉えることが可能になるかもしれない。

同じく第二世代の湯川結合に起因する、チャームクォークへの崩壊に対しても探索を行った。LHC Run 1 では、 $H \rightarrow J/\psi\gamma$ チャンネルを用いて探索が行われたが、Run 2 では、新たにチャームクォーク由来のジェットを同定する、 c -tagging が開発され、LHC で初めて $H \rightarrow cc$ チャンネルの探索が行われた(図 6(右))。標準理論の予測値通りであれば、LHC で $H \rightarrow cc$ を測定することは極めて困難であるが、新物理が存在すれば、その崩壊比が大きく増大する可能性があるため、その探索は大変に重要である。ヒッグス粒子のチャームクォーク対への崩壊比は、95%の信頼度で標準理論からの予測の 110 倍以下であることがわかった。

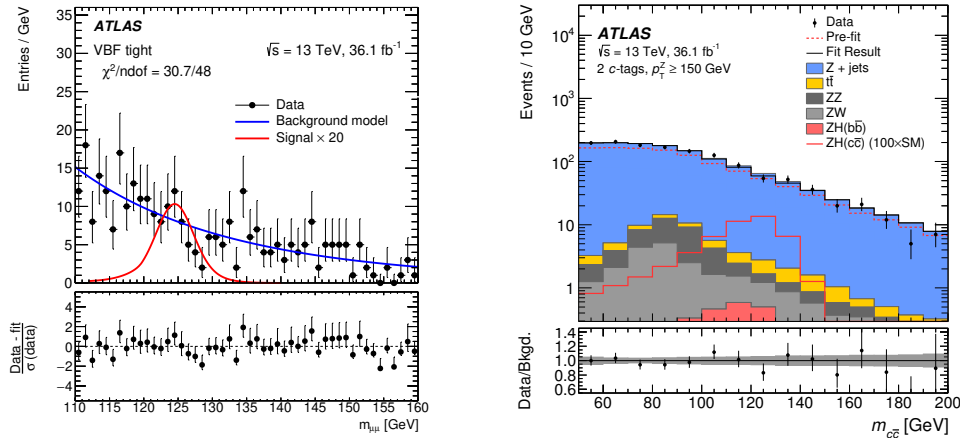


図 6: ATLAS 実験の Run-2 のデータを用いた、ヒッグス粒子の (左) ミューオン対崩壊事象および (右) チャームクォーク対崩壊事象の探索。

標準理論では存在しない(又は、ほぼ無視しうる)崩壊モードとして、非可視(インビジブル)崩壊や、未知のボソンを介した崩壊、フレーバー対称性が破れた崩壊などが挙げられる。

ヒッグス粒子のインビジブル崩壊の探索は、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、ヒッグスポータル暗黒物質モデルは、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。

2015 年と 2016 年の Run-2 の全データを用いて、ヒッグス粒子の Z/W ボソン随伴生成過程を用いた探索を行った。 Z ボソン随伴生成過程については、 Z ボソンのレプトン崩壊とハドロン崩壊の両者について考慮した。 W ボソン随伴生成過程については、ハドロン崩壊のみを考えて、探索を行った。ニュートリノや暗黒物質などの、弱い相互作用をする粒子の横運動量の間接測定である、消失横運動量 (E_T^{miss}) 分布において、標準理論予測からの若干の超過は見られたが、現時点では有意ではない (図 7)。非可視崩壊比への制限は、95%の信頼度で、 Z ボソンのレプトン崩壊を用いたチャンネル (図 7(左)) で、67% (期待感度 39%) 以下であり、 Z/W ボソンのハドロン崩壊を用いたチャンネル (図 7(右)) では、83% (期待感度 58%) であった。どちらのチャンネルでも、Run-1 での期待感度を超えるに至った。最もシグナル感度が高い vector boson fusion (VBF) 過程を用いた探索は、現在進行中である。

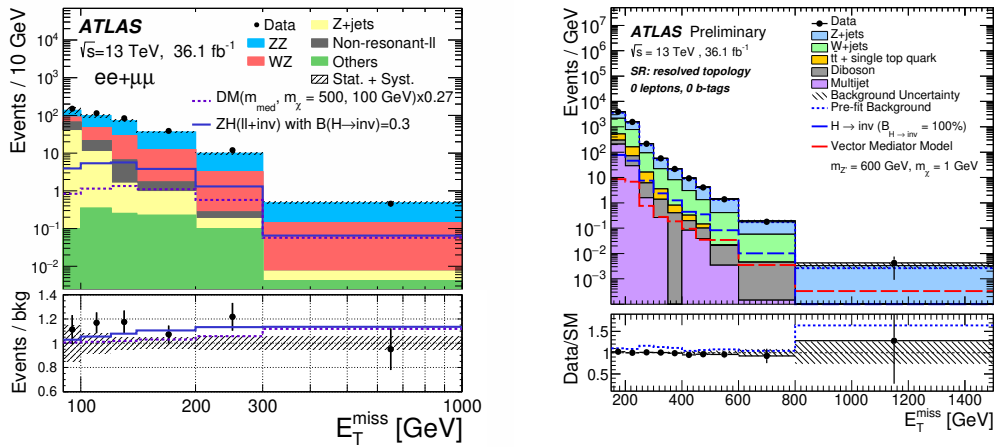


図 7: ATLAS 実験の Run-2 のデータを用いた、 Z ボソン随伴生成過程でのレプトン崩壊事象 (左), および Z/W ボソン随伴生成過程でのハドロン崩壊事象 (右) における、ヒッグス粒子のインビジブル崩壊の探索での消失横運動量分布。

(4) 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。2015 年と 2016 年の Run-2 の全データを用いて、 ZZ 共鳴事象の探索を行った。その際には、 Z ボソンの崩壊モードに対応して、 4ℓ , $\ell\ell\nu\nu$, $\ell\ell qq$, $\nu\nu qq$, $4q$ (ℓ : 電子又はミューオン, ν : ニュートリノ, q : クォーク) というように多様なチャンネルについて、探索を行った。 4ℓ では、不変質量が 250 GeV と 700 GeV 付近で、 3σ を超える超過が観測されたが (図 8), $\ell\ell\nu\nu$ チャンネルでは整合する超過は見られなかった。両チャンネルを合わせた結果、現時点で、質量域 200 GeV から 2.0 TeV にかけて、標準理論からの有意な逸脱は、観測されなかった (図 8)。 $\ell\ell\nu\nu$ チャンネルでは、bulk Randall-Sundrum Graviton について、 $\kappa/M_{\text{Pl}} = 1.0$ の条件下で、1.3 TeV の質量域を、95%の信頼度で棄却し、昨年度を超える結果を得た。

$\ell\ell qq$, $\nu\nu qq$, $4q$ チャンネルは、 ZZ だけでなく、 WZ や WW (後者は $4q$ チャンネルのみ) の共鳴事象にも感度がある。これらのチャンネルに加えて、 $\ell\nu qq$ チャンネルからも、 W' 粒

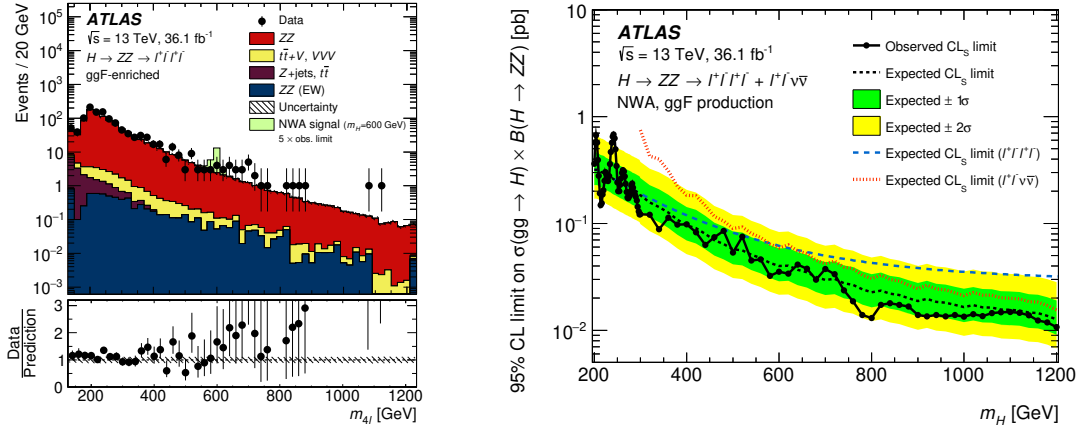


図 8: 4ℓ チャンネルにおける不変質量分布 (左) と 4ℓ と $\ell\ell\nu\nu$ チャンネルを合わせて得られた重いヒッグス粒子の生成断面積及び崩壊分岐比への制限 (右)。

子の探索が行われ、Heavy Vector Triplet モデルにおいて、ベクターボソンとの結合 g_V が 3 の場合に、3 TeV を超える質量域が 95% の信頼度で棄却された (図 9)。

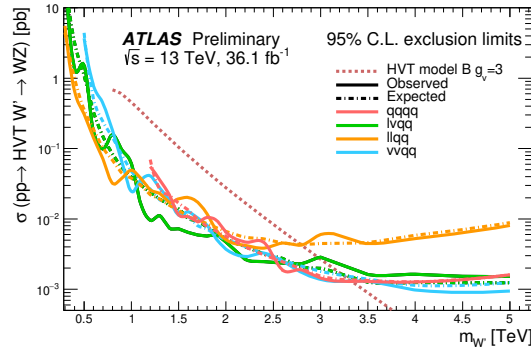


図 9: WZ 共鳴事象に対する W' の質量域への制限。

(5) 暗黒物質の探索

未発見である暗黒物質は、LHC における衝突で生成される可能性があり、現在に至るまで様々な新物理のシナリオを考慮した広範な探索が行われている。

暗黒物質が直接対生成されるシナリオでは、initial state radiation を伴った事象で、モデル依存性の少ない Simplified Models を用いた探索および解釈が行われてきた。このモデルは、媒介粒子と暗黒物質の質量、および 3 つの結合定数という、高々計 5 つのパラメータで記述される。この仮定のもとでは、興味深いことに、dijet 事象からも暗黒物質の存在可能領域に対して、強力な制限をつけることができる (図 10(左))。又、よりモデル依存性が生じるものの、ヒッグス粒子と未知の媒介粒子の相互作用を評価できる、mono-Higgs チャンネルについても探索を行った。この探索は、暗黒物質に対してヒッグス粒子が反跳するような

事象の発見を目指している。最もシグナルへの感度が優れているのは、mono- $H(\rightarrow bb)$ チャンネルである。現時点では、標準理論からの有意な逸脱はなく、 Z' -2HDM と呼ばれるモデルでの二つの媒介粒子の質量域に対して、強い制限を与えた (図 10(右))

この他にも、超対称性理論などのシナリオにおいても、暗黒物質の探索が精力的に行われている。

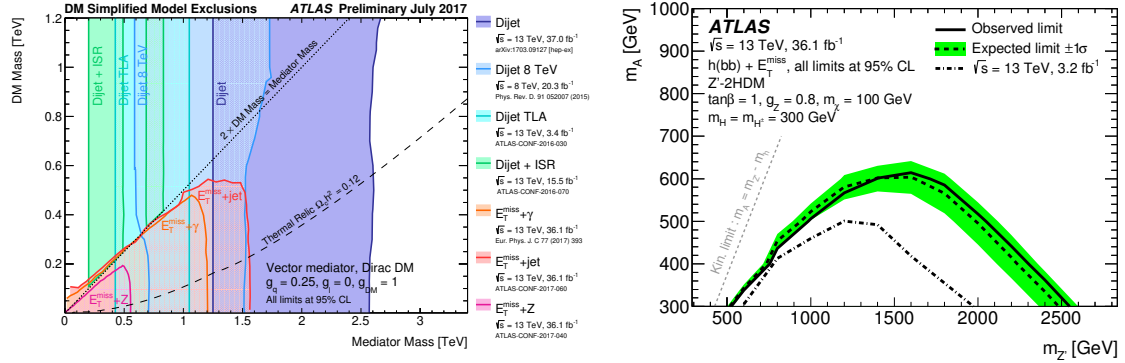


図 10: Simplified models における媒介粒子と暗黒物質の質量域に対する制限 (左) と、 Z' -2HDM モデルに対する mono- $H(\rightarrow bb)$ チャンネルから得られた棄却域 (右)。

[3] HL-LHC に用いる p 型シリコン検出器の開発

LHC 加速器は、継続して最大限の物理成果を生み出すために、2026 年から当初設計値を超え 3000 fb^{-1} のデータ量をめざす高輝度 LHC (HL-LHC) 加速器に増強される。放射線レベルも現在の検出器設計を超え、また、粒子数密度も増大する。ATLAS は 2016-17 年に内部飛跡検出器の技術設計書をまとめ、衝突点に近い内側 5 層には電極サイズが $50 \times 50 \mu\text{m}$ (または $25 \times 100 \mu\text{m}$) のピクセル型、その外側 4 層には $74 \mu\text{m} \times (2.4 \text{ または } 4.8) \text{ cm}$ のストリップ型のシリコン半導体検出器を配置する。

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

2017 年度は、エンドキャップ部に用いるストリップ型センサー設計の最終評価、 $50 \mu\text{m} \times 50 \mu\text{m}$ サイズのピクセルセンサーとピクセルモジュールを試作し評価を行った。

(1) ストリップ型センサー

2016 年に、ストリップ型センサーの実機を評価したところ、一部に暗電流の不安定性があることが確認された。その原因が湿度によるものであることを特定し、2017 年度には表

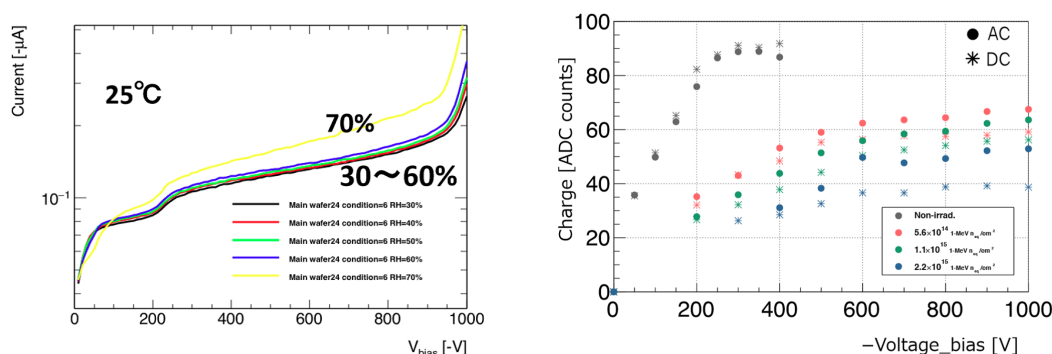


図 11: (左) 成膜法を改良した実寸センサーサンプルの暗電流を湿度を変えて測定した。湿度依存性がないことを示した。(右) 陽子線照射したサンプルと未照射サンプルの電荷収集量の比較。

面保護膜の生成法に改善を加えることで、図 11 (左) に見られるように湿度依存性がないサンプルの製造に成功した。当面は新生成法で試作をすすめ、統計的な評価を進める。

エンドキャップ用の最初の実機 (R0) を試作し、東北大学 CYRIC の 70 MeV 陽子ビームにより照射し、その評価を行った。図 11 (右) は電荷収集量の放射線による劣化の様子を示す。実際に用いる AC 結合のサンプルは 500 V のバイアス電圧で未照射からの劣化は 50% に抑えられ、十分に仕様を満たすことを示した。この結果は国際学会で発表された。同時に DC 結合のサンプルを初めて評価した。暗電流の増加により読出しアンプの特性が影響を受け、電荷収集量は AC サンプルに比べやや悪い結果となったが、その他の電氣的性能は予想通り優れた結果が得られた。暗電流の影響を受けにくいアンプ設計の改善により、今後は、より安価な DC 結合ストリップが大面積シリコンセンサーとして使用できる可能性を示した。

(2) ピクセル型センサー

ATLAS ではバレル部に 5 層のピクセルセンサーを設置するが、放射線量の違いから、最内層は 3D 技術によるもの、それ以外は通常のプラナー型ピクセルセンサーを用いる。日本グループは 3~5 層目に使用できるバイアス構造のある n^+ -on-p 型プラナーピクセルセンサーの設計を進めてきた。

ピクセル検出器は現行の ATLAS 読み出しチップである FE-I4 の仕様 (ピクセルサイズ $50 \times 250 \mu\text{m}$) のため、2016 年度までは、ピクセルサイズを非対称にして部分的に $50 \times 50 \mu\text{m}$ を実現して評価してきた。2017 年度は新しく開発された FE65 読み出しチップを用いて $50 \times 50 \mu\text{m}$ および $25 \times 100 \mu\text{m}$ のセンサーを試作しビーム試験評価をした。同時に、ATLAS への実装を念頭に、フレックス基板を用いたモジュール化 (図 12 左) も進めた。ピクセル設計に関しては、各ピクセルに配線するバイアス抵抗の経路に依存して検出効率が陽子線照射後に低下することが分かっているが、面積が小さなピクセルではその効果が相対的に顕著となる。そこで、劣化が少ないように経路を最適化した。図 12 右は、 $25 \times 100 \mu\text{m}$ ピクセル電極内の検出効率を位置依存性として示すもの (陽子線照射後) である。バイアス構造をもたないものはピクセル間での低下は見られない。バイアス構造のあるものは、劣化があるがバイアス電圧を上げることで劣化は低減できる。これはピクセル境界での電場低下に収集電荷量の劣化が起因する事を示唆する。

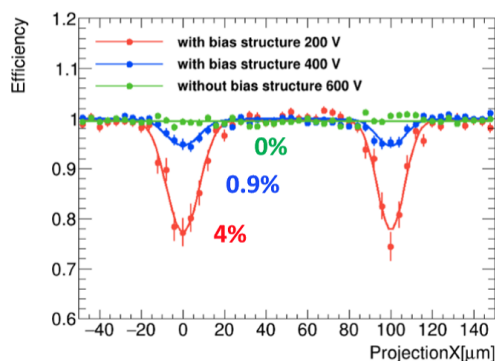
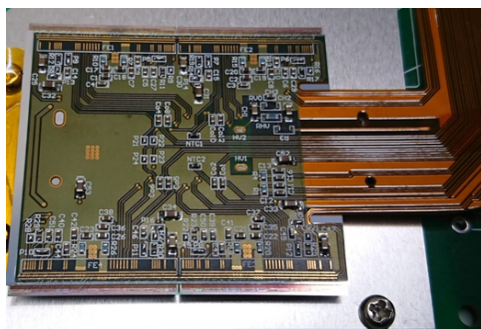


図 12: (左) パレル部への実装を想定した、フレックス基板によるピクセルセンサーモジュール。(右) $3 \times 10^{15} \text{ n/cm}^2$ を照射した $25 \times 100 \text{ } \mu\text{m}$ ピクセルセンサーのピクセル内位置での検出効率の場所依存性。バイアス構造のないものに比較して、2つの逆バイアス電圧設定に対する構造ありの場合の分布。

読出し ASIC にバンプボンドをすればバイアス構造は不要となるが、プロセスコストの高いバンプボンドの前に不良センサーを判別するための手法としてバイアス構造は有効となる。主導して進めてきた検出効率低下が小さくバイアス構造を有するピクセルセンサーの提案の意義は高い。ただし、バイアス抵抗のためにノイズがやや増える傾向にあり、バイアス抵抗値を高くするプロセスの採用、そもそも ASIC の閾値設定は妥当なのかなどの評価を継続して進めている。

【4】 LGAD センサー

LGAD (low-gain avalanche diode) は、読み出しの n^+ 電極の直下に高濃度の p^+ 層を形成することで、アバランシェ増幅を起こさせる増幅機能を持たせたシリコン検出器である。信号量が増えることに加え増幅率が 10 倍程度の低ゲインでは SN 比も向上する。信号形成が薄い pn 接合部で局所的に起きるため時間分解能が飛躍的に向上する。従来のシリコン検出器は電荷収集に 10 ns 程度を要するが LGAD では 20~30 ps 程度の時間分解能が可能であると考えている。優れた位置分解に加え時間情報を得ることができれば、HL-LHC やさらに高輝度の加速器実験で要請される、膨大な数の粒子生成の環境下での飛跡再構成に大きな役割を果たすことが期待できる。PET 等の医療機器への応用も視野にある。

2016 年度に浜松ホトニクスで試験用 LGAD ピクセルを試作し、ガンマ線、中性子線、陽子線を照射し LGAD の機能がどう保たれるかの評価を行った。2017 年度には、電極を細分化したセンサーについての応答の一様性をレーザーを用いて評価した (図 13 左)。この研究により不感領域の振舞いを定量的に評価でき、一定のゲインを確保しつつ細分化する設計を探るための最初のデータを得ることができた。時間分解能に対する評価は FNAL の 120 GeV 陽子ビームを用いて行った。ビームラインには 3 つの LGAD センサーを並べ、信号は DRS4 ASIC による 5 GHz の FADC で読み出した。3 つのうち任意の 2 つの時間差の分布から、個別の LGAD の時間分解能を評価した。図 13 右には、一例として 2 つの LGAD 間の時間差分布を示す。このような分布から評価できる時間分解能を、時間測定の際の閾値電圧と信号ピーク電圧の比 f の関数としてまとめた。室温でも 35 ps, 8 °C では 30 ps を切る優れた分解能を得た。

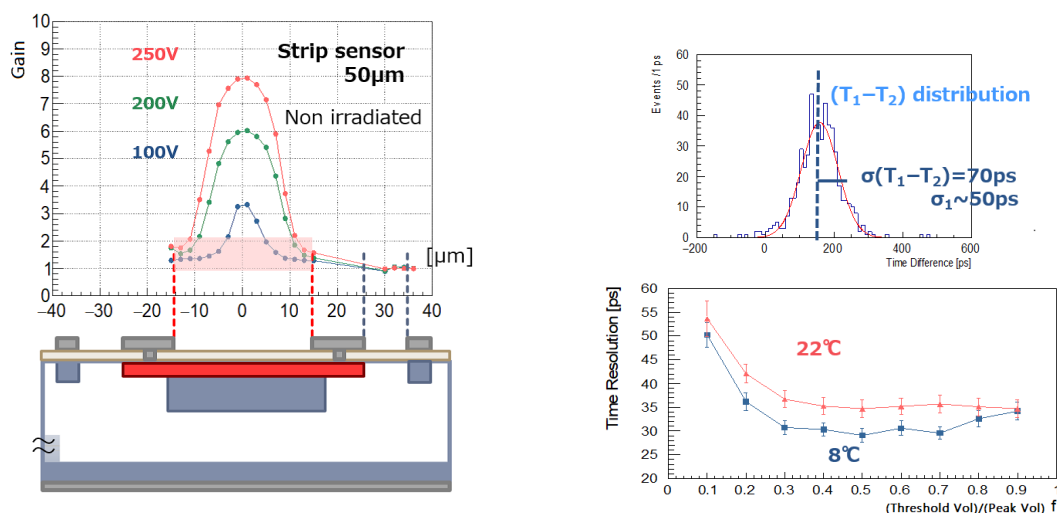


図 13: (左) 赤外レーザーを用いたストリップ型 LGAD の場所によるゲインの変化の測定結果。(右) 2 つの LGAD の時間差分布 (上に例を示す) から、閾値電圧の関数として達成した時間分解能を示す。

【5】 SOI を用いたモノリシック型ピクセル検出器の開発

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

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

筑波大学グループは開発当初より放射線損傷の研究を主導して進め、昨年度までに、最低 1 MGy までの放射線耐性があることを示すことに成功した。SOI 素子は当初は数 kGy で全く使い物にならなくなったが、この研究により TID に対して通常の CMOS 素子と同等の放射線耐性がある素子が作製できる事を示し、さらに優れた SEE 耐性を考慮すると、SOI は素粒子実験に極めて適した素子であるといえる。10 年におよぶ開発の経緯をまとめ国際学会で発表した。また、ピクセルサイズ 8 μm の FPIX2 で昨年度に達成した、世界で初めて半導体検出器で 1 μm 切る成果は、解析方法を改良し、最終的に 0.65 μm を得た。国際学会で発表し、大きな反響を受けた。

2017 年度は FPIX の有感面積を 4 倍に広げ、並列読み出し経路数を 2 倍の 16 ラインに改良した FPIX4 と読み出し用のサブボードを設計・製作した。これらと並行して、FPIX3 を用いた高位置分解能中性子検出のための基礎評価、ILC 用 SOFIST の FNAL でのテストビー

ム評価を実施した。

(1) 高位置精度中性子検出のための基礎研究

中性子の位置を精度よく求めることは中性子を用いた重力の検証実験やウラン濃縮度の検定などの実用面でも重要であり、従来は特殊なプラスチックにつく傷をエッチングで広げることで $1\mu\text{m}$ 程度の精度を実現している。FPIX の裏面に B 成膜をして、中性子との反応で発生する α 粒子を検出することで時間情報をもった高精度位置測定ができる可能性がある。図 14 に示す様にセンサーを $75\mu\text{m}$ 厚に薄化し、裏面から ^{241}Am 線源からの α 線を入射した。センサー直前にはシリコンの破断面をエッジとした α 線の遮へい材を設置し、測定するエッジ位置の広がりから位置分解能を評価した。図に示す様に、エッジの広がりから位置分解能は $3.9\pm 0.2\mu\text{m}$ と評価できた。この値には α 線が角度を持って入射する効果、エッジ部での散乱、シリコン遮へい材が一直線でない効果も含まれるので、こうした影響を排除した評価が今後必要となる。

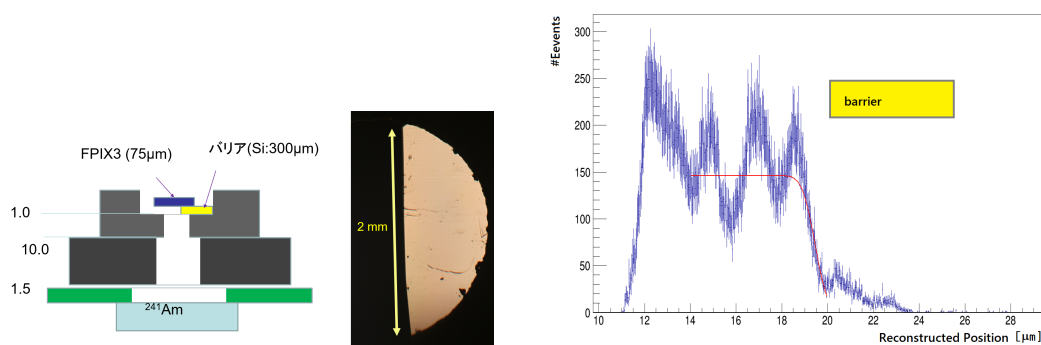


図 14: FPIX による中性子位置測定精度の評価のために α 線源の遮へい効果を測定した。(左) 測定セットアップ、(右) α 線測定数の位置依存性。電荷重心法で求める位置は収集電荷量がピクセル内で不均一であることから周期的な影響を受ける。この効果を評価することで位置分解能はさらに向上する。

(2) ILC 用 SOFIST のビーム試験

優れた時間分解能と位置分解能を同時に達成できるピクセル検出器を、国際リニア衝突器実験 ILC への応用を目指して開発している。位置情報は従来の電荷積分型増幅器で行うと同時に、電圧を一定割合でランプし、ビーム通過時のランプ電圧を測定することで時間情報を得ることを目指している。2016 年度は FPIX とともに位置測定評価のための SOFISTv1 を試験し、2017 年度は時間分解能を SOFISTv2 (センサー厚 $70\mu\text{m}$) を用いて評価した。FNAL でのビーム試験では SOFISTv2 を 3 台、飛跡再構成用に大面積の INTPIX4 を 4 台配置し、 120GeV 陽子を通過させた。図 15 左はセットアップの様子と INTPIX4 サイズの情報を示す。右は、2 つの SOFIST 間の時間測定の相関を示す。ビームに同期して $500\mu\text{s}$ のゲートを開き、その間の信号の通過時間を測定しているので、複数粒子の通過では $y=x$ の相関以外の組合せが発生するが、データに示す様に明らかな相関が得られた。この相関の時間差分布から暫定的に $4.5\mu\text{s}$ の時間分解能を得た。個別のピクセルの時間応答校正を施すことでさらに改善が期待できる。ILC では $0.55\mu\text{s}$ のバンチで衝突が起きるため、最終目標はバン

ちを区別できる分解能であるが、1 ms のトレイン間に起きる衝突事象に時間情報を加えられる技術の可能性を示すことができた意義は高い。

INTPIX4 のピクセルサイズ ($17\mu\text{m}$ 角) と有感面積の大きさは世界的にも有数である (他には欧州の EUDET $18.4\mu\text{m}$ 角が匹敵)。大面積の INTPIX4 をビームライン飛跡検出器として稼働させることも意義が高い。用いたシステムでの飛跡再構成の性能は現在評価中である。

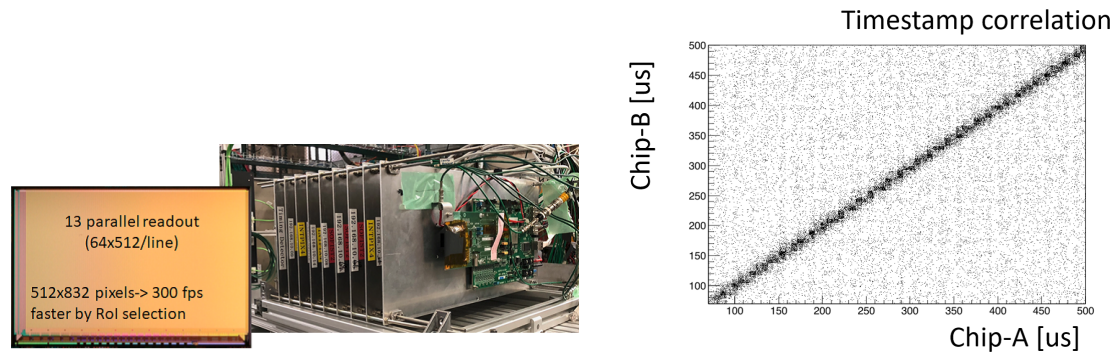


図 15: (左) FNAL でのビーム試験セットアップの配置と飛跡再構成に用いた INTPIX4 のセンサー部。INTPIX4 を 4 台, SOFIST 3 台に 120GeV 陽子を通して。 (右) 2 つの SOFIST で測定された時間相関分布,

[6] COBAND 実験

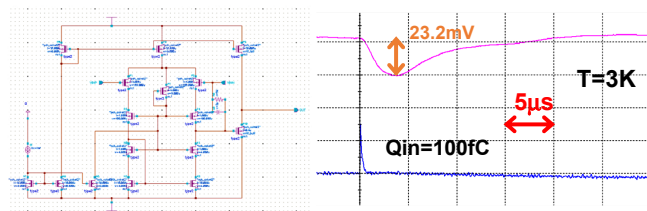


図 16: STJ 信号増幅のために開発したテレスコピックカスコード差動増幅回路をもつ低入力インピーダンス電荷積分型 SOI 極低温アンプ試作回路 (左)。3 ケルビンの極低温下におけるパルス電荷入力 (約 100fC) に対して時定数 $10\mu\text{s}$ 程度, 波高 23.3 mV の出力を得た (右)。

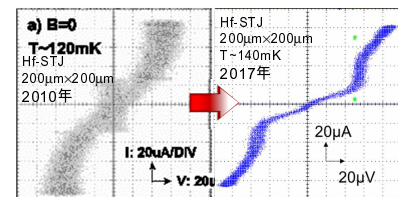


図 17: ハフニウム (Hf) を用いた超伝導トンネル接合素子の I-V カープ。左は, 2010 年に初めて Hf-HfO_x-Hf の構造をもつ素子によって, ジョセフソン電流を観測した。右は, 2017 年に作製された素子。Hf 成膜条件および酸化膜作製条件の最適化により, リーク電流が改善が見られる。

COBAND 実験は, 宇宙背景ニュートリノ崩壊探索を目的とした, 筑波大学素粒子実験室を中心とする国際共同実験である。宇宙初期に生成されたニュートリノの名残とされる宇宙背景ニュートリノは, 現在温度 1.9 K, 各質量固有状態の世代ごとに数密度 $110\text{個}/\text{cm}^3$ で宇宙全体にわたって存在していると予想されている。最も重い質量固有状態のニュートリノは, 軽い質量固有状態に波長約 $50\mu\text{m}$ の光子を放出して崩壊することが可能であり, 我々 COBAND 実験では, 現在観測値として与えられているニュートリノ寿命下限値 10^{12} 年を超える感度で宇宙背景ニュートリノの崩壊に伴う光子を観測する実験を計画中である。実験に要求される光検出器は, 波長 $50\mu\text{m}$ (エネルギー 25 meV) の光子をエネルギー分解能 2% 以下の精度で一光子ずつ測定可能な性能である。我々のグループでは, 観測ロケット実験で使用するニオブ (超伝導ギャップエネルギー $\Delta = 1.55\text{ meV}$, $T_c = 9.23\text{ K}$) とアルミニウ

$\Delta = 0.172 \text{ meV}$, $T_c = 1.20 \text{ K}$) を準粒子トラップ層として用いた超伝導トンネル接合素子 Nb/Al-STJ (Superconducting Tunnel Junction) や、更に衛星実験での使用を念頭に置いた超伝導ギャップエネルギーが更に小さいハフニウム ($\Delta = 20 \text{ } \mu\text{eV}$, $T_c = 0.165 \text{ K}$) を超伝導体として用いた Hf-STJ を光検出器の候補として研究開発を続けている。

Nb/Al-STJ 単体では、 25 meV の光子に対して必要なエネルギー分解能は期待できないが一光子検出が実現できれば、格子状に並べた Nb/Al-STJ ピクセルと回折格子の組み合わせによって分解能 2% 以下の一光子分光が可能となる。我々のグループでは産総研との共同研究による漏れ電流の少ない Nb/Al-STJ の開発、並びに STJ 信号極低雑音読み出し系として KEK, JAXA, 静岡大等との共同研究による FD-SOI (Fully Depleted Silicon On Insulator) プロセスによる極低温増幅器の開発を行っている。産総研の超伝導デバイス作製施設である CRAVITY で作製された Nb/Al-STJ 素子は、低漏れ電流性能をほぼ達成している。極低温増幅器の開発については、FD-SOI プロセスによる MOSFET を用いた増幅器の試作および測定を行い、 $300 \sim 400 \text{ mK}$ の極低温での動作を確認、並びに極低温で動作させた STJ のパルス光応答信号の極低温ステージ上での増幅に成功した。昨年度は、STJ のパルス光応答速度および STJ 測定系の静電容量を考慮したより実的な低入力インピーダンス増幅回路の試作および評価を行った。テレスコピックカスコード差動増幅に容量および抵抗の負帰還回路をつけることにより低入力インピーダンス電荷積分型 SOI 極低温増幅器 (図 16 左) を試作し、冷凍機内の 3 ケルビンの極低温下におけるパルス電荷入力 (約 100 fC) に対して時定数 $10 \text{ } \mu\text{s}$ 程度、波高 23.3 mV の出力を得た (図 16 右)。Nb/Al-STJ による分光測定のための回折格子を含むロケット実験用の光学系の開発は、昨年度着任した飯田助教が福井大、関西学院大等との共同研究により開始した。

Nb/Al-STJ の開発と並行して、KEK, 理研との共同研究によって Hf-STJ の開発を進めてきた。これまで、Hf 成膜、Hf 膜のパターン加工方法を確認し、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 (図 17 左)。また、2012 年度には Hf-STJ 試作サンプルでの可視域連続光入射に対する応答 (トンネル電流増加) を確認した。昨年度の成果としては、Hf 成膜の際、応力が最小になる条件ではなく表面粗さが小さくなる成膜条件 (表面粗さ $\text{RMS} = 2.5 \text{ nm}$) を使用して Hf-STJ を作製し漏れ電流密度を従来の値から大幅な改善に成功し、温度 $T = 140 \text{ mK}$, $200 \text{ } \mu\text{m}$ 角の Hf-STJ において漏れ電流 $6 \text{ } \mu\text{A} @ V = 40 \text{ } \mu\text{V}$ を達成した。今後、より接合面積の小さい素子の作製、漏れ電流の要因となり得る地磁気等の影響の排除、およびより低温での漏れ電流の測定による正確な漏れ電流の測定を行い漏れ電流改善に繋げることが重要なステップとなる。また、可視パルス光入射に対するパルス応答の詳細な測定も重要である。

【7】 ^{48}Ca の二重ベータ崩壊の研究

ニュートリノは物質の根源を司る素粒子の一種である。2002 年と 2015 年のノーベル物理学賞がニュートリノ研究に授与されるなど、ニュートリノ物理学は近年目覚ましい発展を遂げている。ニュートリノ研究に残された次なる課題は、質量の絶対値測定やマヨラナ性の検証であり、これは物質や宇宙の成り立ちを理解する上で欠かせない。ニュートリノを放出しない二重ベータ崩壊 ($0\nu\beta\beta$) の観測は、これらを一気に解明しうる現実的に唯一の手段である。ニュートリノがマヨラナであった場合、粒子・反粒子は同一であり、片方の核子から出たニュートリノがもう一方に吸収される $0\nu\beta\beta$ が起こりうる (図 18)。この崩壊率がニュートリノ有効質量の二乗に比例するため、 $0\nu\beta\beta$ の半減期から未だ不明なニュートリノ質量の

測定も可能である。また、マヨラナ粒子は右巻きと左巻きでそれぞれ別の質量項を持つことが出来る。我々の世界では左巻きニュートリノしか観測出来ないが、右巻きニュートリノの非常に重い質量を考えると、振動実験で示唆される極端に小さいニュートリノ質量を自然に説明できる（シーソー機構）。さらに粒子数保存則が破れ、宇宙初期に生成された重い右巻きニュートリノの崩壊に CP の破れを考慮することで現在の物質優勢宇宙を説明することが出来る（レプトジェネシス）。

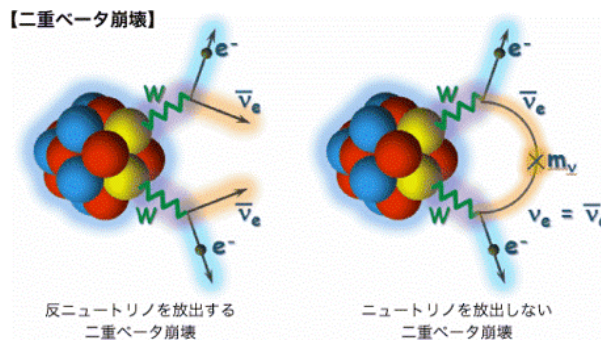


図 18: 二重ベータ崩壊の概念図

我々は大阪大学等と共同で岐阜県の神岡地下実験施設内に CANDLES 検出器を構築し、 ^{48}Ca の二重ベータ崩壊の研究を推進している。 ^{48}Ca は Q 値が 4,270 keV と全核中最大であり、あらゆる自然放射線のベータ線、ガンマ線よりも高いため、超低バックグラウンド観測が実現可能である。CANDLES は岐阜県神岡の地下 1000 m に約 300 kg の CaF_2 シンチレータ結晶を 2 m^3 の液体シンチレータ中に沈め、周囲に 62 本の光電子増倍管を配置したプロトタイプ検出器（図 19）を作り、将来計画に向けたスタディを行っている。CANDLES 実験では CaF_2 と液体シンチレータの時定数の違いを利用した波形弁別によって 2 桁以上のバックグラウンド低減を実現している。

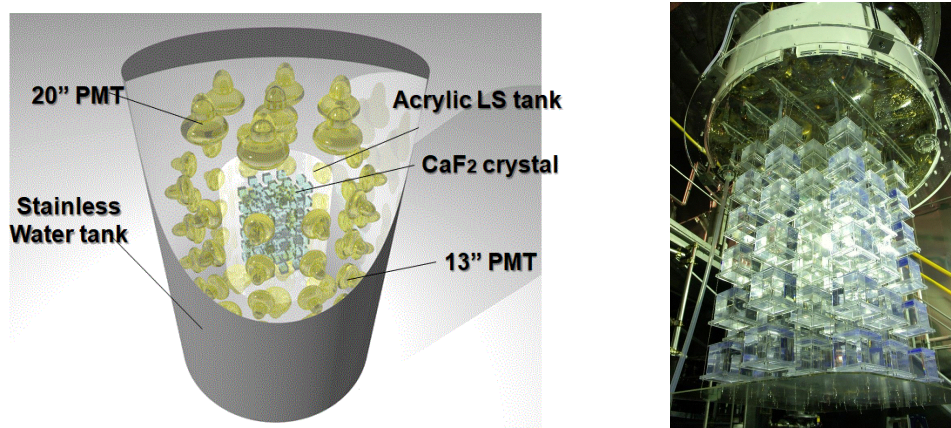


図 19: CANDLES 実験の概略図（左）と CaF_2 結晶の写真（右）

2016 年には実験室の環境中性子に起因するバックグラウンドを低減するため、鉛によるガンマ線遮蔽体、ホウ素入りゴムシートによる中性子遮蔽体が装置に導入された。それによ

りさらに二桁近くバックグラウンドが減少し、現在順調にデータを取得中である。2017 年度は前年度から取得した 131 日間のデータを用いて $0\nu\beta\beta$ 探索を行った。バックグラウンド除去のカットをかけた時のエネルギースペクトルを図 20 に示す。左が全結晶の場合、右が Th 系列の放射性不純物量が $10\ \mu\text{Bq}$ 以下の高純度結晶を抽出した場合である。高純度結晶を選んだ場合、すべてのカットかけた後、Q 値領域 ($4,170 - 4,480\ \text{keV}$) で残ったのは 0 事象であった。この結果から ^{48}Ca の 2 重ベータ崩壊に対する半減期の下限値を求めたところ、 $T_{1/2} > 6.2 \times 10^{22}$ 年 という値が得られた。これは ^{48}Ca に対して、これまでで世界最高感度の下限值となっている。

今後は引き続きデータを取得し統計をためていくとともに、バックグラウンドや系統誤差の見積もりをより高精度に行っていく。また並行して、同位体濃縮による ^{48}Ca の濃度向上など、将来のための R&D も進める予定である。

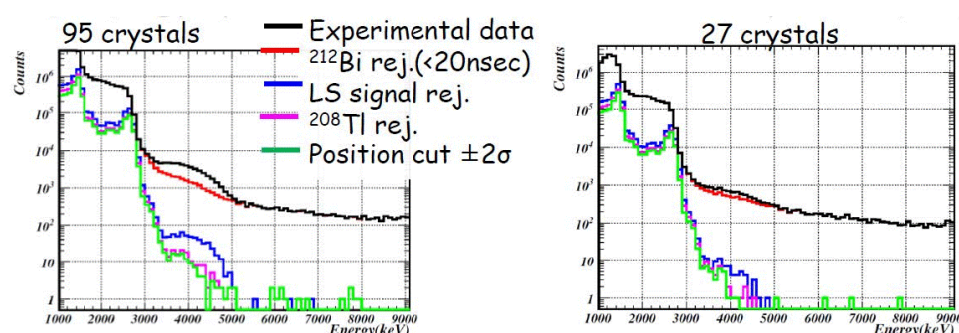


図 20: CANDLES 実験で得られたエネルギースペクトル。左が全結晶、右が不純物 $10\ \mu\text{Bq}$ 以下の綺麗な結晶を選んだ場合。各カットステップごとに載せているが、緑色の線が全てのカットをかけた後のスペクトルである。

【8】 新規大発光量シンチレータの開発

宇宙暗黒物質の直接探索実験やニュートリノを放出しない二重ベータ崩壊 ($0\nu\beta\beta$) 探索実験などの、低エネルギー極稀事象探索のための新規無機シンチレータ結晶の開発を東北大学と共同で行っている。暗黒物質のエネルギーは指数関数的に分布しており、どれだけ低いエネルギーまで観測出来るかが非常に重要になる。一方の $0\nu\beta\beta$ 探索実験では、ニュートリノを放出する二重ベータ崩壊 ($2\nu\beta\beta$) が究極の BG となるが、それを防ぐためにはエネルギー分解能を高める必要がある。また、どちらの事象も極めて稀なため、大量の標的を用意する必要がある。これらの問題を解決するためには、大発光量のシンチレータを開発することが一つの鍵となりうる。

ヨウ化カルシウム (CaI_2) 結晶は 1964 年に R. Hofstadter らによって発見されており、一般的に用いられる NaI(Tl) の 2 倍以上の発光量であることが知られている。しかし、当時の未熟な結晶育成・加工技術のせいで、一般に広まることなく技術が埋没してしまった。我々は、無機シンチレータの育成加工に高い実績を誇る東北大学金属材料研究所の吉川研究室と共同で、同研究室が所有する最新の装置と技術を駆使して CaI_2 を含む新規高性能シンチレータ結晶の技術を確立することを目指している。

2016 年度から 2017 年度にかけて二重ベータ崩壊核の ^{48}Ca を含むアルカリハライド結晶である $\text{CaI}_2, \text{CaBr}_2, \text{CaCl}_2$ の開発を行った。結晶作成には図 21 左に示すようなブリッジマ

ン結晶育成法を用いた。各種粉末原料を調合し、9N アルゴン雰囲気下で石英アンブルに投入し、300℃でのベーキングの後、石英アンブルを封止した。実際に作った結晶の写真を図 21 右に示したが、3 種類すべてにおいて無色透明な結晶が得られた。作製した結晶は、湿度 1 % 以下のドライルーム中での切断、研磨の後、発光、シンチレータ特性評価を行った。

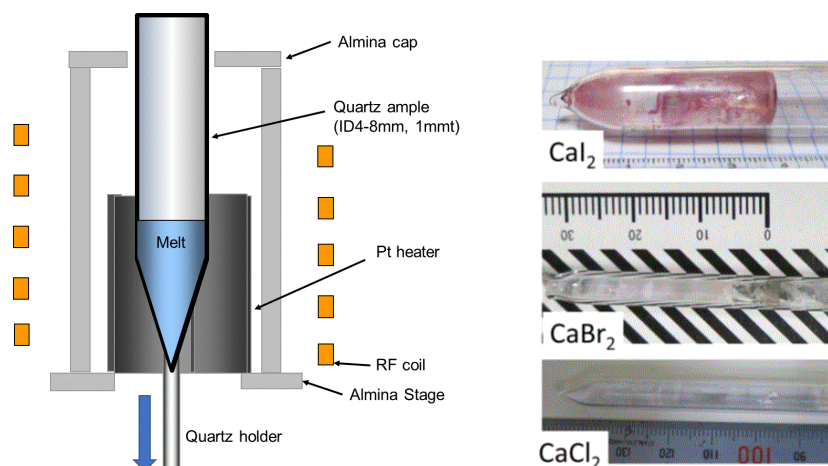


図 21: CaI_2 結晶を作成するのに用いたブリッジマン育成炉の概念図（左）と、作成した CaI_2 結晶、 CaBr_2 結晶、 CaCl_2 結晶の写真（右）。

3 種類の結晶のうち、 CaI_2 で NaI(Tl) の 2.7 倍、 CaF_2 と比べると約 10 倍となる 107,000 photon/MeV の大発光量が確認された（図 22）。発光波長は 410 nm と光電子増倍管の感度波長と一致しており、発光の時定数は 834 ns であった。総合的に見て非常に良い性能のシンチレータであることが分かった。

しかしながら CaI_2 結晶は、劈開性が極めて強く加工や取り扱いが困難であることが判明した。そこで我々は、 CaI_2 のヨウ素 (I) を一部臭素 (Br) で置き換えた、 $\text{Ca}(\text{Br}, \text{I})_2$ 結晶の開発も並行して進めることにした。石英封止型ブリッジマン法を用い作製した Eu 添加 $\text{Ca}(\text{Br}, \text{I})_2$ 結晶を図 22 右に示す。作成した 3 種類のうち、Eu2%: $\text{CaBr}_{0.5}\text{I}_{1.5}$ 、Eu2%: CaBrI の組成について透明性を有する結晶が得られた。全てにおいて劈開性は改善が見られたが、発光量特性などに関しては現在測定を進めているところである。今後は Br の割合を最適化することで、大発光量でかつ加工性に優れた結晶を開発していく。

【9】 福島第一原発燃料デブリの宇宙線ミュオンによる観測

ミュオン粒子が建物などを透過しやすい性質を利用し、宇宙線ミュオン粒子の飛来数分布を大規模構造物の背後で測定することで、構造物内部の様子を透視することが可能である（ミュオンラジオグラフィー法）。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、2011 年夏から KEK のグループと共同で検出器の技術設計を開始した。設計には、SSC 実験用に開発した波長変換ファイバーによるプラスチックシンチレータバーの読み出し、ILC 実験用に開発中の MPPC 光検出器、SOI で培った FPGA ベースの読み出しシステムを応用した。試作機での評価を経て、2015 年には国際廃炉機構（IRID）の支援を受けて福島第一原発 1 号機、2016-17 年度は東京電力の事業委託を受けた KEK に協力する体制で 2-3 号機の観測をした。

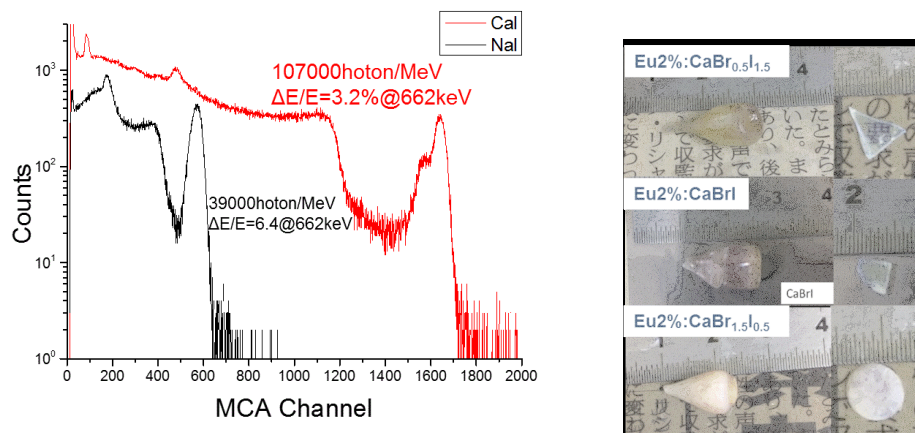


図 22: CaI_2 結晶に ^{137}Cs の 662 keV ガンマ線を当てた時の発光量分布 (左)。赤が CaI_2 、黒が NaI(Tl) であり、ピークの位置から 2.7 倍の発光量であることが確認された。 CaI_2 の光電ピークの左にある小さいピークは特性 X 線のエスケープピークである。右は作成した $\text{Ca}(\text{Br},\text{I})_2$ 結晶各種。Br の割合によって異なる性質が得られた。

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

1 号機での経験から測定器を小型化し、2 号機の観測では建屋に接するように設置し、3 号機ではタービン建屋内に設置し、ともに压力容器全体の様子を観測することを可能とした。観測結果から、2、3 号機ともに燃料装荷位置にはほとんど燃料デブリはないことが判明した。2 号機では压力容器の底部に過剰な吸収があり、背景となる原子炉の構造体を定量的に評価した結果、底部に残る燃料デブリ量は溶け落ちる前の燃料集合体とほぼ等しいと推定した。また、3 号機では、压力容器の底部にも強い吸収はなく、燃料デブリは格納容器へと解け落ちたと推定できる。

これらの観測により当初から予定していた 3 基の原子炉における評価を完遂した。最近ではカメラによる撮影が可能となっているが、压力容器内の燃料デブリを定量的に評価できる唯一の手法としてミュオンラジオグラフィーは重要な役割を果たした。筑波大チームは検出器の設計と建設を行い、データ解析でも主要な貢献を果たした。観測データの解析を進めると、水平方向のミュオン粒子の運動量分布の不定性が大きな系統誤差をあたえることが分かってきた。そこで、実際に、最大 9.5 m 長の鉄を検出器層の間に挟み、レンジを測定する装置を KEK に整備し、1 年間にわたる観測を経て、水平宇宙線ミュオン粒子の運動量分布を学術論文として発表した。図 23 には測定の設定アップと宇宙線ミュオンフラックスの主な測定結果を示す。

【10】 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

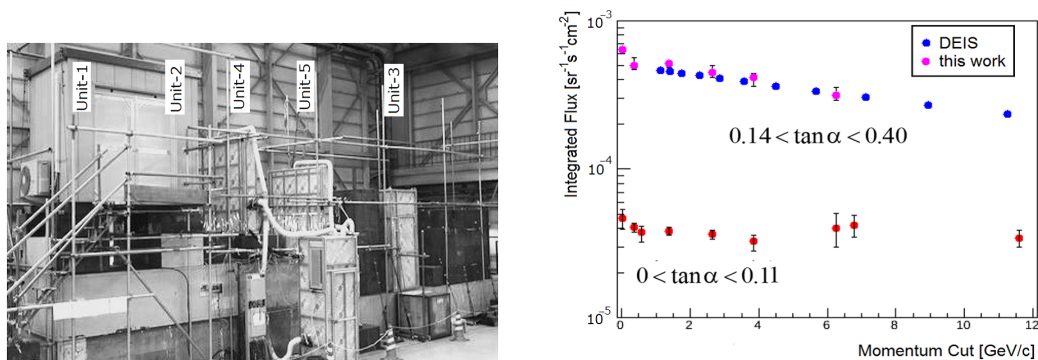


図 23: (左) 水平方向宇宙線ミュー粒子の運動量測定をするためのセットアップ。5 層の位置検出器の間に鉄ブロックをはさみ、レンジ法により運動量を求めた。(右) 宇宙線ミュー粒子のフラックス。天頂角 75° の領域では文献データと矛盾ない結果を得、水平方向のデータを新たに加えた。

発」，研究代表者：金 信弘，研究分担者：吉田拓生，武内勇司

12,090 千円（直接経費 9,300 千円，間接経費 2,790 千円）（2017 年度）

2. 科学研究費 挑戦的萌芽研究「半導体 SOI 回路と超伝導検出器 STJ の融合による革新的高感度検出器の開発」2016 – 2018 年度，研究代表者：武内勇司

1,300 千円（直接経費 1,000 千円，間接経費 300 千円）（2017 年度）

3. 日米科学技術協力事業（高エネルギー物理分野）特別枠

日本側研究代表者：武内 勇司

物件費 84 千円，派遣旅費 834 千円 （2017 年度）

4. 科学研究費 若手研究（B）「高発光量ヨウ化物シンチレータによる宇宙暗黒物質探索のための基礎研究」2016 – 2017 年度，研究代表者：飯田崇史

2,340 千円（直接経費 1,800 千円，間接経費 540 千円） （2017 年度）

5. 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」 公募研究「セルフトリガー可能な ^{24}Na 線源の開発と CaF_2 検出器の低バックグラウンド化」2016 – 2017 年度，研究代表者：飯田崇史

2,990 千円（直接経費 2,300 千円，間接経費 690 千円） （2017 年度）

6. 東北大学金属材料研究所共同利用研究・若手萌芽研究「ヨウ化カルシウム（ CaI_2 ）シンチレータ結晶の開発と基礎物理への応用」2017 年度，研究代表者：飯田崇史

230 千円（直接経費 230 千円） （2017 年度）

7. 科学研究費 新学術領域研究「ヒッグス粒子発見後の素粒子物理学の新展開～LHC による真空と時空構造の解明～」2016 – 2021 年度

計画研究 B01：「ヒッグス粒子で探る真空と世代構造」，研究分担者：受川史彦

10,530 千円（直接経費 8,100 千円，間接経費 2,430 千円）（2017 年度）

8. 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

1,560 千円（直接経費 1,200 千円，間接経費 360 千円）（2017 年度）

9. TIA かけはし「3次元積層半導体量子イメージセンサの調査研究」
2016 年度 – 継続中，連携機関代表者：原和彦
100 千円（直接経費 100 千円）（2017 年度）
10. TIA かけはし「簡単・便利な超伝導計測—100 倍精度の計測を非専門家の手で」
2016 年度 – 継続中，連携機関代表者：武内勇司
100 千円（直接経費 100 千円）（2017 年度）

【11】 研究発表

(1) 原著論文

1. T. Aaltonen, K. Hara, S. H. Kim, K. Sato, Y. Takeuchi, F. Ukegawa *et al.* [CDF Collaboration], “Observation of the $Y(4140)$ structure in the $J/\psi\phi$ mass spectrum in $B^\pm \rightarrow J/\psi\phi K^\pm$ decays,” *Mod. Phys. Lett. A* **32**, 1750139 (2017).
2. T. A. Aaltonen, K. Hara, S. H. Kim, K. Sato, Y. Takeuchi, F. Ukegawa *et al.* [CDF Collaboration], “Measurement of $\sin^2 \theta_{\text{eff}}^{\text{lept}}$ using e^+e^- pairs from γ^*/Z bosons produced in $p\bar{p}$ collisions at a center-of-momentum energy of 1.96 TeV,” *Phys. Rev. D* **93**, 112016 (2016) Addendum: [*Phys. Rev. D* **95**, 119901 (2017)].
3. T. A. Aaltonen, K. Hara, S. H. Kim, K. Sato, Y. Takeuchi, F. Ukegawa *et al.* [CDF Collaboration], “Measurement of the D^+ - Meson Production Cross Section at Low Transverse Momentum in $p\bar{p}$ Collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV,” *Phys. Rev. D* **95**, 092006 (2017).
4. T. Aaltonen, K. Hara, S. H. Kim, K. Sato, Y. Takeuchi, F. Ukegawa *et al.* [CDF Collaboration], “Measurement of the inclusive-isolated prompt-photon cross section in $p\bar{p}$ collisions using the full CDF data set,” *Phys. Rev. D* **96**, 092003 (2017).
5. T. A. Aaltonen, K. Hara, S. H. Kim, K. Sato, Y. Takeuchi, F. Ukegawa *et al.* [CDF Collaboration], “A search for the exotic meson $X(5568)$ with the Collider Detector at Fermilab,” *Phys. Rev. Lett.* **120**, 202006 (2018).
6. T. A. Aaltonen, K. Hara, S. H. Kim, K. Sato, Y. Takeuchi, F. Ukegawa *et al.* [CDF and D0 Collaborations], “Combined Forward-Backward Asymmetry Measurements in Top-Antitop Quark Production at the Tevatron,” *Phys. Rev. Lett.* **120**, 042001 (2018).
7. T. Aaltonen, K. Hara, S. H. Kim, K. Sato, Y. Takeuchi, F. Ukegawa *et al.* [CDF Collaboration], “Search for $B_s^0 \rightarrow \mu^+\mu^-$ and $B^0 \rightarrow \mu^+\mu^-$ decays with the full CDF Run II data set,” *Phys. Rev. D* **87**, 072003 (2013) Erratum: [*Phys. Rev. D* **97**, 099901 (2018)].

8. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Topological cell clustering in the ATLAS calorimeters and its performance in LHC Run 1,” *Eur. Phys. J. C* **77**, 490 (2017).
9. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Performance of the ATLAS Trigger System in 2015,” *Eur. Phys. J. C* **77**, 317 (2017).
10. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Jet energy scale measurements and their systematic uncertainties in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *Phys. Rev. D* **96**, 072002 (2017).
11. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for new high-mass phenomena in the dilepton final state using 36 fb^{-1} of proton-proton collision data at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *JHEP* **1710**, 182 (2017).
12. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for new phenomena in dijet events using 37 fb^{-1} of pp collision data collected at $\sqrt{s}=13$ TeV with the ATLAS detector,” *Phys. Rev. D* **96**, 052004 (2017).
13. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for lepton-flavour-violating decays of the Higgs and Z bosons with the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **77**, 70 (2017).
14. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the $t\bar{t}$ production cross-section using $e\mu$ events with b-tagged jets in pp collisions at $\sqrt{s}=13$ TeV with the ATLAS detector,” *Phys. Lett. B* **761**, 136 (2016) Erratum: [*Phys. Lett. B* **772**, 879 (2017).]
15. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Electron efficiency measurements with the ATLAS detector using 2012 LHC protonproton collision data,” *Eur. Phys. J. C* **77**, 195 (2017).
16. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Evidence for the $H \rightarrow b\bar{b}$ decay with the ATLAS detector,” *JHEP* **1712**, 024 (2017).
17. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Performance of algorithms that reconstruct missing transverse momentum in $\sqrt{s} = 8$ TeV proton-proton collisions in the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **77**, 241 (2017).
18. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Precision measurement and interpretation of inclusive W^+ , W^- and Z/γ^* production cross sections with the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **77**, 367 (2017).

19. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurements of long-range azimuthal anisotropies and associated Fourier coefficients for pp collisions at $\sqrt{s} = 5.02$ and 13 TeV and p +Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV with the ATLAS detector,” *Phys. Rev. C* **96**, 024908 (2017).
20. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the charge asymmetry in top-quark pair production in the lepton-plus-jets final state in pp collision data at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **76**, 87 (2016) Erratum: [*Eur. Phys. J. C* **77**, 564 (2017).]
21. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the inclusive cross-sections of single top-quark and top-antiquark t -channel production in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *JHEP* **1704**, 086 (2017).
22. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for new resonances decaying to a W or Z boson and a Higgs boson in the $\ell^+\ell^-b\bar{b}$, $\ell\nu b\bar{b}$, and $\nu\bar{\nu}b\bar{b}$ channels with pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *Phys. Lett. B* **765**, 32 (2017).
23. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of multi-particle azimuthal correlations in pp , p +Pb and low-multiplicity Pb+Pb collisions with the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **77**, 428 (2017).
24. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Evidence for light-by-light scattering in heavy-ion collisions with the ATLAS detector at the LHC,” *Nature Phys.* **13**, 852 (2017).
25. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the $t\bar{t}Z$ and $t\bar{t}W$ production cross sections in multilepton final states using 3.2 fb^{-1} of pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **77**, 40 (2017).
26. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for new phenomena in high-mass diphoton final states using 37 fb^{-1} of proton–proton collisions collected at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *Phys. Lett. B* **775**, 105 (2017).
27. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for dark matter at $\sqrt{s} = 13$ TeV in final states containing an energetic photon and large missing transverse momentum with the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **77**, 393 (2017).
28. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for a scalar partner of the top quark in the jets plus

missing transverse momentum final state at $\sqrt{s}=13$ TeV with the ATLAS detector,” JHEP **1712**, 085 (2017).

29. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for heavy resonances decaying to a Z boson and a photon in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” Phys. Lett. B **764**, 11 (2017).
30. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for direct top squark pair production in final states with two leptons in $\sqrt{s} = 13$ TeV pp collisions with the ATLAS detector,” Eur. Phys. J. C **77**, 898 (2017).
31. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for pair production of vector-like top quarks in events with one lepton, jets, and missing transverse momentum in $\sqrt{s} = 13$ TeV pp collisions with the ATLAS detector,” JHEP **1708**, 052 (2017).
32. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for supersymmetry in final states with two same-sign or three leptons and jets using 36 fb^{-1} of $\sqrt{s} = 13$ TeV pp collision data with the ATLAS detector,” JHEP **1709**, 084 (2017).
33. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for pair production of heavy vector-like quarks decaying to high- p_T W bosons and b quarks in the lepton-plus-jets final state in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” JHEP **1710**, 141 (2017).
34. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of jet fragmentation in Pb+Pb and pp collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV with the ATLAS detector at the LHC,” Eur. Phys. J. C **77**, 379 (2017).
35. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the cross section for inclusive isolated-photon production in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV using the ATLAS detector,” Phys. Lett. B **770**, 473 (2017).
36. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the prompt J/ψ pair production cross-section in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector,” Eur. Phys. J. C **77**, 76 (2017).
37. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for dark matter in association with a Higgs boson decaying to b -quarks in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” Phys. Lett. B **765**, 11 (2017).

38. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Fiducial, total and differential cross-section measurements of t -channel single top-quark production in pp collisions at 8 TeV using data collected by the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **77**, 531 (2017).
39. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for top quark decays $t \rightarrow qH$, with $H \rightarrow \gamma\gamma$, in $\sqrt{s} = 13$ TeV pp collisions using the ATLAS detector,” *JHEP* **1710**, 129 (2017).
40. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Reconstruction of primary vertices at the ATLAS experiment in Run 1 protonproton collisions at the LHC,” *Eur. Phys. J. C* **77**, 332 (2017).
41. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of forward-backward multiplicity correlations in lead-lead, proton-lead, and proton-proton collisions with the ATLAS detector,” *Phys. Rev. C* **95**, 064914 (2017).
42. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for new phenomena in a lepton plus high jet multiplicity final state with the ATLAS experiment using $\sqrt{s} = 13$ TeV proton-proton collision data,” *JHEP* **1709**, 088 (2017).
43. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the W boson polarisation in $t\bar{t}$ events from pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV in the lepton + jets channel with ATLAS,” *Eur. Phys. J. C* **77**, 264 (2017).
44. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “A measurement of the calorimeter response to single hadrons and determination of the jet energy scale uncertainty using LHC Run-1 pp -collision data with the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **77**, 26 (2017).
45. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for heavy resonances decaying to a W or Z boson and a Higgs boson in the $q\bar{q}^{(\prime)}b\bar{b}$ final state in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *Phys. Lett. B* **774**, 494 (2017).
46. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurements of the production cross section of a Z boson in association with jets in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **77**, 361 (2017).
47. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for new phenomena in events containing a same-flavour opposite-sign dilepton pair, jets, and large missing transverse momentum in $\sqrt{s} = 13$ pp collisions with the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **77**, 144 (2017).

48. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of $W^\pm W^\pm$ vector-boson scattering and limits on anomalous quartic gauge couplings with the ATLAS detector,” *Phys. Rev. D* **96**, 012007 (2017).
49. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for Heavy Higgs Bosons A/H Decaying to a Top Quark Pair in pp Collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS Detector,” *Phys. Rev. Lett.* **119**, 191803 (2017).
50. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for the dimuon decay of the Higgs boson in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *Phys. Rev. Lett.* **119**, 051802 (2017).
51. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurements of top-quark pair differential cross-sections in the $e\mu$ channel in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV using the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **77**, 292 (2017).
52. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “High- E_T isolated-photon plus jets production in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector,” *Nucl. Phys. B* **918**, 257 (2017).
53. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Searches for the $Z\gamma$ decay mode of the Higgs boson and for new high-mass resonances in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *JHEP* **1710**, 112 (2017).
54. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Probing the Wtb vertex structure in t-channel single-top-quark production and decay in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector,” *JHEP* **1704**, 124 (2017).
55. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for squarks and gluinos in events with an isolated lepton, jets, and missing transverse momentum at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *Phys. Rev. D* **96**, 112010 (2017).
56. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for Dark Matter Produced in Association with a Higgs Boson Decaying to $b\bar{b}$ using 36 fb^{-1} of pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS Detector,” *Phys. Rev. Lett.* **119**, 181804 (2017).
57. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the inclusive jet cross-sections in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector,” *JHEP* **1709**, 020 (2017).

58. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for supersymmetry in events with b -tagged jets and missing transverse momentum in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” JHEP **1711**, 195 (2017).
59. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for dark matter in association with a Higgs boson decaying to two photons at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” Phys. Rev. D **96**, 112004 (2017).
60. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurements of electroweak Wjj production and constraints on anomalous gauge couplings with the ATLAS detector,” Eur. Phys. J. C **77**, 474 (2017).
61. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurements of $\psi(2S)$ and $X(3872) \rightarrow J/\psi\pi^+\pi^-$ production in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector,” JHEP **1701**, 117 (2017).
62. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the ZZ production cross section in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV using the $ZZ \rightarrow \ell^-\ell^+\ell'^-\ell'^+$ and $ZZ \rightarrow \ell^-\ell^+\nu\bar{\nu}$ channels with the ATLAS detector,” JHEP **1701**, 099 (2017).
63. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of inclusive and differential cross sections in the $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4\ell$ decay channel in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” JHEP **1710**, 132 (2017).
64. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the $t\bar{t}\gamma$ production cross section in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector,” JHEP **1711**, 086 (2017).
65. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurements of integrated and differential cross sections for isolated photon pair production in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector,” Phys. Rev. D **95**, 112005 (2017).
66. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurements of top-quark pair to Z -boson cross-section ratios at $\sqrt{s} = 13, 8, 7$ TeV with the ATLAS detector,” JHEP **1702**, 117 (2017).
67. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for anomalous electroweak production of WW/WZ in association with a high-mass dijet system in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector,” Phys. Rev. D **95**, 032001 (2017).

68. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurements of top quark spin observables in $t\bar{t}$ events using dilepton final states in $\sqrt{s} = 8$ TeV pp collisions with the ATLAS detector,” JHEP **1703**, 113 (2017).
69. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurements of top-quark pair differential cross-sections in the lepton+jets channel in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV using the ATLAS detector,” JHEP **1711**, 191 (2017).
70. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of jet p_T correlations in Pb+Pb and pp collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV with the ATLAS detector,” Phys. Lett. B **774**, 379 (2017).
71. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Performance of the ATLAS Track Reconstruction Algorithms in Dense Environments in LHC Run 2,” Eur. Phys. J. C **77**, 673 (2017).
72. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Analysis of the Wtb vertex from the measurement of triple-differential angular decay rates of single top quarks produced in the t -channel at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector,” JHEP **1712**, 017 (2017).
73. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Determination of the strong coupling constant α_s from transverse energy-energy correlations in multijet events at $\sqrt{s} = 8$ TeV using the ATLAS detector,” Eur. Phys. J. C **77**, 872 (2017).
74. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for direct top squark pair production in events with a Higgs or Z boson, and missing transverse momentum in $\sqrt{s} = 13$ TeV pp collisions with the ATLAS detector,” JHEP **1708**, 006 (2017).
75. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of charged-particle distributions sensitive to the underlying event in $\sqrt{s} = 13$ TeV proton-proton collisions with the ATLAS detector at the LHC,” JHEP **1703**, 157 (2017).
76. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for triboson $W^\pm W^\pm W^\mp$ production in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector,” Eur. Phys. J. C **77**, 141 (2017).
77. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Studies of $Z\gamma$ production in association with a high-mass dijet system in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector,” JHEP **1707**, 107 (2017).

78. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Top-quark mass measurement in the all-hadronic $t\bar{t}$ decay channel at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector,” JHEP **1709**, 118 (2017).
79. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of jet activity produced in top-quark events with an electron, a muon and two b -tagged jets in the final state in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” Eur. Phys. J. C **77**, 220 (2017).
80. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of W boson angular distributions in events with high transverse momentum jets at $\sqrt{s} = 8$ TeV using the ATLAS detector,” Phys. Lett. B **765**, 132 (2017).
81. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the W^+W^- production cross section in pp collisions at a centre-of-mass energy of $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS experiment,” Phys. Lett. B **773**, 354 (2017).
82. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurements of charge and CP asymmetries in b -hadron decays using top-quark events collected by the ATLAS detector in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV,” JHEP **1702**, 071 (2017).
83. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for new phenomena with large jet multiplicities and missing transverse momentum using large-radius jets and flavour-tagging at ATLAS in 13 TeV pp collisions,” JHEP **1712**, 034 (2017).
84. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Femtoscopia with identified charged pions in proton-lead collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV with ATLAS,” Phys. Rev. C **96**, 064908 (2017).
85. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of lepton differential distributions and the top quark mass in $t\bar{t}$ production in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector,” Eur. Phys. J. C **77**, 804 (2017).
86. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of $WW/WZ \rightarrow \ell\nu qq'$ production with the hadronically decaying boson reconstructed as one or two jets in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with ATLAS, and constraints on anomalous gauge couplings,” Eur. Phys. J. C **77**, 563 (2017).
87. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Identification and rejection of pile-up jets at high pseudorapidity with the ATLAS detector,” Eur. Phys. J. C **77**, 580 (2017). Erratum: [Eur. Phys. J. C **77**, 712 (2017).]

88. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Jet reconstruction and performance using particle flow with the ATLAS Detector,” *Eur. Phys. J. C* **77**, 466 (2017).
89. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the cross-section for electroweak production of dijets in association with a Z boson in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *Phys. Lett. B* **775**, 206 (2017).
90. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Study of $WW\gamma$ and $WZ\gamma$ production in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV and search for anomalous quartic gauge couplings with the ATLAS experiment,” *Eur. Phys. J. C* **77**, 646 (2017).
91. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Study of the material of the ATLAS inner detector for Run 2 of the LHC,” *JINST* **12**, P12009 (2017).
92. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the k_t splitting scales in $Z \rightarrow \ell\ell$ events in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector,” *JHEP* **1708**, 026 (2017).
93. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of detector-corrected observables sensitive to the anomalous production of events with jets and large missing transverse momentum in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV using the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **77**, 765 (2017).
94. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of b-hadron pair production with the ATLAS detector in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV,” *JHEP* **1711**, 062 (2017).
95. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Study of ordered hadron chains with the ATLAS detector,” *Phys. Rev. D* **96**, 092008 (2017).
96. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the $t\bar{t}$ production cross section in the τ + jets final state in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV using the ATLAS detector,” *Phys. Rev. D* **95**, 072003 (2017).
97. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the Drell-Yan triple-differential cross section in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV,” *JHEP* **1712**, 059 (2017).
98. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Performance of the ATLAS Transition Radiation Tracker in Run 1 of the LHC: tracker properties,” *JINST* **12**, P05002 (2017).

99. M. Yamada, K. Hara *et al.*, “Development of monolithic pixel detector with SOI technology for the ILC vertex detector”, JINST 13 (2018) C01037.
100. T. Miyoshi, K. Hara *et al.*, “Front-end electronics of double SOI X-ray imaging sensors”, JINST 12 (2017) C02004.
101. Y. Unno, Y. Ikegami, K. Hara *et al.*, “Development of n^+ -in-p planar pixel quad-sensor flip-chipped with FE-I4 readout ASICs”, JINST 12 (2017) C01084.
102. H. Fujii, K. Hara, S. H. Kim *et al.*, “Detection of on-surface objects with an underground radiography system using cosmic-ray”, PTEP 2017, 053C01.
103. H. Fujii, K. Hara, S. H. Kim *et al.*, “Integrated cosmic muon flux in the zenith angle range $0 < \cos \theta < 0.37$ for momentum threshold up to 11.6 GeV/ c ”, PTEP 2017, 123C01.
104. K. Kamada, T. Iida, *et al.*, “Single crystal growth and scintillation properties of $\text{Ca}(\text{Cl}, \text{Br}, \text{I})_2$ single crystal”,
Ceramics International, 43 (Suppl. 1), S423-S427 (2017).
105. K. Nakajima, T. Iida, *et al.*, “Background studies of high energy γ rays from (n, γ) reactions in the CANDLES experiment”,
Astroparticle Physics, 100, 54-60 (2018).
106. 金 信弘, 受川史彦, 「CDF 実験 30 年の軌跡と物理成果」, 日本物理学会誌 60, 388 (2017).

(2) 会議・研究会報告書

1. 若狭玲那, 金信弘, 武内勇司, 飯田崇史, 武政健一, 永田和樹, 浅野千紗, 笠島誠嘉, 菅野洋信, COBAND 実験メンバー, “COBAND 実験に向けた極低温増幅器の研究開発”, 電子情報通信学会技術研究報告 SCE, **117(223)**, 5-8 (2017).
2. K. Nakajima, T. Iida, *et al.*, “Performance of updated shielding system in CANDLES”,
AIP Conference Proceedings 1921(1):060003 (2018).
3. W. M. Chan, T. Iida, *et al.*, “Development of CANDLES Low Background HPGe Detector and Half-life Measurement of $^{180}\text{Ta}^m$ ”,
AIP Conference Proceedings 1921, 030004 (2018).

(3) 学会・研究会での講演・ポスター発表（国内）

1. 浅野千紗：ニュートリノ崩壊光探索実験における STJ 検出器校正用光源の開発,
第 7 回高エネルギー春の学校（2017 年 5 月 18–20 日）, 滋賀県大津市北小松, 湖邸滋
びわこクラブ.

2. 原和彦：FNAL, Test Beam の結果 FPIX,
第8回新学術領域研究会「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」(2017年6月29-30日), 宮崎大学. (招待講演)
3. 鈴木淳貴：HL-LHC 実験 ATLAS 検出器のアップグレードに向けたプラナー型微細ピクセル検出器の性能評価1,
日本物理学会 2017 年秋季大会 (2017 年 9 月 12-15 日), 宇都宮大学.
4. 本多俊介：LHC-ATLAS 実験 Run2 における $H \rightarrow b\bar{b}$ 崩壊過程でのヒッグス粒子 $t\bar{t}H$ 生成過程探索,
日本物理学会 2017 年秋季大会 (2017 年 9 月 12-15 日), 宇都宮大学.
5. 大川英希：ATLAS 実験 13TeV データを使ったヒッグスなどの測定と新物理探索,
日本物理学会 2017 年秋季大会 (2017 年 9 月 12-15 日), 宇都宮大学. (企画講演)
6. 和田冴：ATLAS エンドキャップ用 R0 シリコンストリップセンサーの基礎特性評価,
日本物理学会 2017 年秋季大会 (2017 年 9 月 12-15 日), 宇都宮大学.
7. 浅野千紗：COBAND 実験のための SOI-STJ の研究開発 III,
日本物理学会 2017 年秋季大会 (2017 年 9 月 12-15 日), 宇都宮大学.
8. 若狭玲那：COBAND 実験のための SOI-STJ の研究開発 IV,
日本物理学会 2017 年秋季大会 (2017 年 9 月 12-15 日), 宇都宮大学.
9. 武政健一：COBAND 実験のための Hf-STJ の研究開発 II,
日本物理学会 2017 年秋季大会 (2017 年 9 月 12-15 日), 宇都宮大学.
10. 武政健一：COBAND 実験に用いる Hf-STJ の開発研究,
超伝導エレクトロニクス研究会 (SCE) (2017 年 10 月 4-5 日), 東北大学片平キャンパス.
11. 若狭玲那：COBAND 実験に向けた極低温増幅器の研究開発,
超伝導エレクトロニクス研究会 (SCE) (2017 年 10 月 4-5 日), 東北大学片平キャンパス.
12. 飯田崇史：CaI2 シンチレータの開発,
Scintillator for Medical, Astroparticle and Environmental Radiation Techniques 2017 (SMART2017) (2017 年 11 月 11 日), 蔵王温泉ホテル樹林. (招待講演)
13. 大川英希：素粒子実験における多変量解析・機械学習・深層学習などのビッグデータ解析ー LHC-ATLAS 実験を例に,
大規模複雑データの理論と方法論, 及び, 関連分野への応用 (2017 年 12 月 1-3 日), 筑波大学. (招待講演)
14. 金信弘：Introduction to Development of Superconducting Infrared Photon Detector for Cosmic Background Neutrino Decay Search,
新学術領域研究「ニュートリノフロンティア」研究会 2017 (2017 年 12 月 11-13 日), 滋賀県大津市琵琶湖グランドホテル.

15. 武内勇司 : Development of Far-infrared Spectrophotometers based on Superconducting Tunnel Junction (STJ) for COBAND Experiment,
新学術領域研究「ニュートリノフロンティア」研究会 2017 (2017 年 12 月 11–13 日),
滋賀県大津市琵琶湖グランドホテル.
16. 武内勇司 : Feasibility of sub-GeV mass dark matter search using STJ detector for COBAND experiment,
新学術領域研究「ニュートリノフロンティア」研究会 2017 (2017 年 12 月 11–13 日),
滋賀県大津市琵琶湖グランドホテル. (ポスター発表)
17. 武政健一 : R&D status of Hf-STJ,
新学術領域研究「ニュートリノフロンティア」研究会 2017 (2017 年 12 月 11–13 日),
滋賀県大津市琵琶湖グランドホテル.
18. 若狭玲那 : Development of cryogenic SOI amplifier for COBAND experiment,
新学術領域研究「ニュートリノフロンティア」研究会 2017 (2017 年 12 月 11–13 日),
滋賀県大津市琵琶湖グランドホテル.
19. 浅野千紗 : Single Photon Detection by Nb/Al-STJ with Cryogenic SOI Amplifier for COBAND experiment,
新学術領域研究「ニュートリノフロンティア」研究会 2017 (2017 年 12 月 11–13 日),
滋賀県大津市琵琶湖グランドホテル. (ポスター発表)
20. 原和彦 : ITK Strip Detector,
ATLAS 日本シリコンワークショップ (2017 年 12 月 20 – 21 日), 大阪大学.
21. 飯田崇史 : チュートリアル講演 : シンチレータの原理と応用例,
第 4 回超新星ニュートリノ研究会 (2018 年 1 月 9 日), 箱根・強羅青雲荘. (招待講演)
22. 原和彦, 他 : 宇宙線ミュー粒子を用いた福島第一原子力発電所 1 – 3 号炉の核燃料デブリの観測,
TIA 光量子シンポジウム (2018 年 2 月 7 日), つくば国際会議場. (ポスター発表)
23. 和田冨, 原和彦, 他 : 4 次元飛跡検出器のための内部増幅機能付きシリコン LGAD の開発研究,
TIA 光量子シンポジウム (2018 年 2 月 7 日), つくば国際会議場. (ポスター発表)
24. 岩波四季恵, 原和彦, 他 : SOI 技術を用いた高位置分解能中性子検出器の開発研究,
TIA 光量子シンポジウム (2018 年 2 月 7 日), つくば国際会議場. (ポスター発表)
25. 鈴木淳貴 : HL-LHC ATLAS 検出器アップグレードに向けたストリップセンサーにおける IV 長期安定性と湿度依存性,
日本物理学会第 73 回年次大会 (2018 年 3 月 22–25 日), 東京理科大学野田キャンパス.
26. 内山和貴 : ATLAS 検出器アップグレードに向けたピクセル検出器の性能評価,
日本物理学会第 73 回年次大会 (2018 年 3 月 22–25 日), 東京理科大学野田キャンパス.

27. 本多俊介：LHC-ATLAS 実験 Run2 における $H \rightarrow b\bar{b}$ 崩壊過程でのヒッグス粒子 $t\bar{t}H$ 生成過程探索結果，
日本物理学会第 73 回年次大会（2018 年 3 月 22–25 日），東京理科大学野田キャンパス。
28. 大鳴匡至：内部増幅機能つき半導体検出器 (LGAD) の中性子照射損傷の評価，
日本物理学会第 73 回年次大会（2018 年 3 月 22–25 日），東京理科大学野田キャンパス。
29. 和田冴：内部増幅機能付き検出器 (LGAD) の基礎特性評価，
日本物理学会第 73 回年次大会（2018 年 3 月 22–25 日），東京理科大学野田キャンパス。
30. 若狭玲那：COBAND 実験のための SOI-STJ の研究開発 VI，
日本物理学会第 73 回年次大会（2018 年 3 月 22–25 日），東京理科大学野田キャンパス。
31. 笠島誠嘉：COBAND 実験極低温増幅器開発に向けた FD-SOI FET 極低温特性の測定，
日本物理学会第 73 回年次大会（2018 年 3 月 22–25 日），東京理科大学野田キャンパス。
32. 武政健一：COBAND 実験のための Hf-STJ の研究開発 III，
日本物理学会第 73 回年次大会（2018 年 3 月 22–25 日），東京理科大学野田キャンパス。

(4) 国際会議・研究会での口頭発表

1. H. Okawa, “Search for Dark Matter in Events with a Single Boson and Missing Transverse Momentum using the ATLAS Detector”,
An Alpine LHC Physics Summit (ALPS) 2017, April 17 – 22, 2017, Tirol, Austria. (招待講演)
2. K. Sato, “Search for neutral and charged BSM Higgs Bosons with the ATLAS detector”,
Phenomenology 2017 Symposium, May 5 – 8, 2017, Pittsburgh, USA. (招待講演)
3. S. Honda, “Measurement of cross sections and couplings of the Higgs Boson using the ATLAS detector”,
QCD17, 20th High-Energy Physics International Conference in Quantum Chromodynamics, July 3 – 7, 2017, Montpellier, France. (招待講演)
4. S. Honda, “Search for the Standard Model Higgs boson produced in association with top quarks and decaying into $b\bar{b}$ in the ATLAS detector”,
3rd International Conference on Particle Physics and Astrophysics, October 2 – 5, 2017, Moscow, Russia. (招待講演)
5. H. Okawa, “Latest LHC Results & Prospects on Measurements & Searches in the Higgs Sector”,
20th New Higgs Working Group Meeting, August 18 – 19, 2017, Osaka, Japan. (招待講演)
6. H. Okawa, “Highlights of LHC Higgs Results, Related Searches & Prospects for Future”,

21st New Higgs Working Group Meeting, December 22 – 23, 2017, Osaka, Japan.
(招待講演)

7. K. Hara, “Fine Pixel Detector FPIX Developed Based on SOI Technology”,
Technology and Instrumentation in Particle Physics 2017 (TIPP 2017), May 22 –
26, 2017, Beijing, China.
8. S.H. Kim *et al.*, “Development of Superconducting Tunnel Junction Photon Detec-
tors with Cryogenic Preamplifier for COBAND experiment”,
Technology and Instrumentation in Particle Physics 2017 (TIPP 2017), May 22 –
26, 2017, Beijing, China.
9. Y. Takeuchi *et al.*, “Development of STJ with FD-SOI cryogenic amplifier as a far-
infrared single photon detector for COBAND experiment”,
17th International Workshop on Low Temperature Detectors (LTD-17), July 17 –
21, 2017, Fukuoka, Japan.
10. K. Hara, “Recent Development of Silicon-on-Insulator Pixel Devices”, VERTEX2017,
September 10 – 15, 2017, Les Caldas, Spain. (招待講演)
11. S. B. Kim, “New Results from RENO”,
Tsukuba Global Science Week 2017 (TGSW2017), September 25 – 27, 2017, EPOCHAL
Tsukuba, Tsukuba-shi, Japan. (招待講演)
12. T. Iida, “COBAND Project for Cosmic Background Neutrino Decay Search and
Rocket Experiment Design”,
Tsukuba Global Science Week 2017 (TGSW2017), September 25 – 27, 2017, EPOCHAL
Tsukuba, Tsukuba-shi, Japan. (招待講演)
13. K. Takemasa, “Status of Photo-Detector Development Based on STJs for COBAND
Project”,
Tsukuba Global Science Week 2017 (TGSW2017), September 25 – 27, 2017, EPOCHAL
Tsukuba, Tsukuba-shi, Japan. (招待講演)
14. H. Okawa, “Highlights from the ATLAS Experiment”,
Tsukuba Global Science Week 2017 (TGSW2017), September 25 – 27, 2017, EPOCHAL
Tsukuba, Tsukuba-shi, Japan. (招待講演)
15. Y. Takeuchi, “Superconducting Tunnel Junction Detectors”,
18th International Workshop on Next generation Nucleon Decay and Neutrino De-
tectors (NNN17), October 26 – 28, 2017, University of Warwick, Coventry, UK. (招
待講演)
16. K. Takemasa *et al.*, “Development of Superconducting Tunnel Junction Detector
and Cold Amplifier for COBAND experiment”,
International Workshop on Superconducting Sensors & Detectors (IWSSD2016),
Nov. 14 – 16, 2016, AIST Tsukuba Campus, Tsukuba-shi, Japan

17. S. H. Kim *et al.*, “Cosmic Background Neutrino Decay Search - COBAND experiment”,
Unification and Development of the Neutrino Science Frontier, March 5 – 6, 2018,
Kyoto University, Kyoto, Japan. (招待講演)
18. Y. Takeuchi, “Division of Elementary Particles”,
Inaugural Symposium, Tomonaga Center for the History of the Universe, March 26
– 27, 2018, Tsukuba, Japan. (招待講演)
19. K. Hara, “Division for Development of Photon and Particle Detectors”,
Inaugural Symposium, Tomonaga Center for the History of the Universe, March 26
– 27, 2018, Tsukuba, Japan. (招待講演)
20. S. B. Kim, “Reactor Neutrino Physics and Prospect”,
Inaugural Symposium, Tomonaga Center for the History of the Universe, March 26
– 27, 2018, Tsukuba, Japan. (招待講演)
21. Y. Takeuchi, “Introduction to COBAND project”,
Inaugural Symposium, Tomonaga Center for the History of the Universe, March 26
– 27, 2018, Tsukuba, Japan.
22. A. Kasajima, “Measurements of SOI FETs at Cryogenic Temperature”,
Inaugural Symposium, Tomonaga Center for the History of the Universe, March 26
– 27, 2018, Tsukuba, Japan.
23. C. Asano, “R&D Status of Nb/Al-STJ with Cryogenic SOI amplifier for COBAND”,
Inaugural Symposium, Tomonaga Center for the History of the Universe, March 26
– 27, 2018, Tsukuba, Japan.
24. K. Takemasa, “R&D Status of Hf-STJ for COBAND”,
Inaugural Symposium, Tomonaga Center for the History of the Universe, March 26
– 27, 2018, Tsukuba, Japan.
25. T. Yoshida, “R&D Status of FIR source for STJ calibration for COBAND”,
Inaugural Symposium, Tomonaga Center for the History of the Universe, March 26
– 27, 2018, Tsukuba, Japan.
26. J. Suzuki, “Development of ATLAS Pixel Detectors for the HL-LHC”,
Inaugural Symposium, Tomonaga Center for the History of the Universe, March 26
– 27, 2018, Tsukuba, Japan.
27. R. Wakasa, “R&D of quantum photo-sensor based on superconductor with cryo-SOI
readout”,
Inaugural Symposium, Tomonaga Center for the History of the Universe, March 26
– 27, 2018, Tsukuba, Japan.
28. S. Wada, “Low-Gain Avalanche Detector (LGAD) for 4D Tracking”,
Inaugural Symposium, Tomonaga Center for the History of the Universe, March 26
– 27, 2018, Tsukuba, Japan.

29. K. Hara, “Silicon-on-Insulator (SOI) Pixel Detector”,
Inaugural Symposium, Tomonaga Center for the History of the Universe, March 26 – 27, 2018, Tsukuba, Japan.
30. K. Sato, “Standard Model measurements at the ATLAS experiment”,
Inaugural Symposium, Tomonaga Center for the History of the Universe, March 26 – 27, 2018, Tsukuba, Japan.
31. H. Okawa, “Searches for physics beyond the Standard Model at the ATLAS experiment”,
Inaugural Symposium, Tomonaga Center for the History of the Universe, March 26 – 27, 2018, Tsukuba, Japan.
32. S. Honda, “Search for the Higgs boson produced in association with top quarks and decaying into bottom quarks with the ATLAS detector”,
Inaugural Symposium, Tomonaga Center for the History of the Universe, March 26 – 27, 2018, Tsukuba, Japan.
33. M. Hagihara, “Search for charged Higgs bosons decaying into top and bottom quarks in pp collisions at 13 TeV with the ATLAS detector”,
Inaugural Symposium, Tomonaga Center for the History of the Universe, March 26 – 27, 2018, Tsukuba, Japan.
34. Y. Ikegami, “Status of the ATLAS inner tracker for the Phase II upgrade”,
Inaugural Symposium, Tomonaga Center for the History of the Universe, March 26 – 27, 2018, Tsukuba, Japan.
35. H. Okawa, “Unveiling the Higgs & Dark Sectors at the LHC”,
Seminar at the University of Science and Technology of China, Hefei, China, January 11, 2018.
36. S. H. Kim, “Cosmic Background Neutrino Decay Search - COBAND Experiment -”,
NAPP Seminar, April 28, 2017, Seoul National University, Seoul, Korea.
37. S. H. Kim, “Cosmic Background Neutrino Decay Search - COBAND Experiment -”,
KASI Colloquium, July 19, 2017, KASI, Taejeong, Korea.
38. S. H. Kim, “Cosmic Background Neutrino Decay Search - COBAND Experiment - Continuous Spectral Measurement in Far-Infrared Region using STJ”,
Research Technique Seminar, November 21, 2017, FNAL, Illinois, USA.
39. K. Takemasa, “R&D status of Hf-STJ”,
Seminar at KAIST, March 16, 2018, KAIST, Taejeong, Korea.
40. S. H. Kim, “Cosmic Background Neutrino Decay Search - COBAND Experiment - Continuous Spectral Measurement in Far-Infrared Region using STJ”,
KNRC seminar, March 19, 2018, Seoul National University, Seoul, Korea.

(5) 国際会議・研究会でのポスター発表

1. K. Takemasa *et al.*, “Development of Superconducting Tunnel Junction Detector using Hafnium for COBAND experiment”,
Technology and Instrumentation in Particle Physics 2017 (TIPP 2017), May 22 – 26, 2017, Beijing, China. (ポスター発表)
2. T. Iida *et al.*, “Astro-particle physics with newly developed inorganic scintillator”,
8th International Conference on New Development In Photodetection (NDIP17),
July 3 – 7, 2017, Tours, France. (ポスター発表)
3. T. Iida *et al.*, “Multi-purpose detector using high light yield CaI2 crystal”,
XV International Conference on Topics in Astroparticle and Underground Physics (TAUP2017), July 24 – 28, 2017, Sudbury, Canada. (ポスター発表)
4. Y. Furuya, T. Iida *et al.*, “Crystal growth and scintillation properties of Eu doped $\text{Ca}(\text{Br}_x\text{I}_{1-x})_2$ solid solution”,
7th International Workshop on Photoluminescence in Rare Earths: Photonic Materials and Devices (PRE’ 17) , November 30 – December 2, 2017, Rome, Italy.
(ポスター発表)
5. C. Asano *et al.*, “STJ detector developments for the Cosmic Background Neutrino Decay experiment”,
TGSW-IWP2017, Interdisciplinary Workshop on Science and Patents, September 25 – 27, 2017, EPOCHAL Tsukuba, Tsukuba-shi, Japan. (ポスター発表)
6. R. Wakasa *et al.*, “R&D of cryogenic SOI amplifier for COBAND experiment”,
Unification and Development of the Neutrino Science Frontier, March 5 – 6, 2018, Kyoto University, Kyoto, Japan. (ポスター発表)

(6) 学位論文

博士論文

大学院 数理物質科学研究科 物理学専攻, 2018 年 2 月

1. 萩原 睦人 : Search for charged Higgs bosons decaying into top and bottom quarks in pp collisions at 13 TeV with the ATLAS detector (重心系エネルギー 13TeV の陽子陽子衝突における ATLAS 検出器を用いた tb に崩壊する荷電ヒッグス粒子の探索)
2. 本多 俊介 : Search for the Higgs Boson Produced in Association with Top Quarks and Decaying into Bottom Quarks with the ATLAS Detector (ATLAS 検出器を用いたトップクォーク・ヒッグス粒子随伴生成の $H \rightarrow b\bar{b}$ 崩壊様式での探索)

修士論文

大学院 数理物質科学研究科 物理学専攻, 2018 年 2 月

1. 遠藤 駿: テストビームによる高精細 SOI ピクセル検出器の性能評価
2. 鈴木 淳貴: HL-LHC 用 ATLAS シリコンピクセル検出器の微細化及びシリコン検出器における IV 長期安定性の研究
3. 若狭 玲那: COBAND 実験に向けた STJ 光応答信号増幅のための極低温電荷積分型前置増幅器の研究開発

【構成員の異動】

2018 年 4 月: 金信弘特命教授が着任.

III 宇宙物理理論グループ

1. メンバー

教授	梅村 雅之
准教授	森 正夫
講師	吉川 耕司
助教	古家 健次
助教	Wagner, Alexander
研究員	安部 牧人 (CCS)
	五十嵐 朱夏 (数理物質科学研究科)
	桐原 崇亘 (CCS)
	高水 裕一 (CCS)
	田中 賢 (ポスト京重点課題 9)
	三木洋平 (CREST)
学生	大学院生 13 名, 学類生 6 名

2. 概要

本年度、当グループは、重力波観測を説明する多重ブラックホール合体の研究、初代星形成における再結合放射の影響、銀河間物質における初代星由来の重元素汚染の研究、冷たいダークマターハローにおけるカス・コア遷移の物理過程、アンドロメダ銀河のステラーハロー形成過程、冷たいダークマターハロー重力場中の遷音速銀河風加速過程、活動銀河核からの輻射・ジェット・銀河核風による母銀河へのフィードバック、宇宙論的 Vlasov-Poisson シミュレーションによる大規模構造における有質量ニュートリノの影響、泡宇宙の衝突現象による初期宇宙のインフレーションへの示唆、星形成領域の窒素同位体分別過程、星形成領域における窒素原子存在量の推定法の開発の研究を行った。また、宇宙生命計算科学連携として、星間有機分子生成の第一原理分子動力学計算、原始惑星系円盤乱流中のダスト成長と微惑星形成の研究を行った。計算コード開発としては、銀河の多成分力学平衡分布生成コード MAGI の開発、SPH 粒子データを用いたライマン α 輝線輻射輸送計算コードの開発、GPU を用いた N 体計算コードの Pascal 向け性能最適化、高次精度移流スキームの開発、SPH 粒子データを用いた Lyman-alpha 輝線輻射輸送計算コードの開発、高精度流体シミュレーションコードの開発を進めた。

3. 研究成果

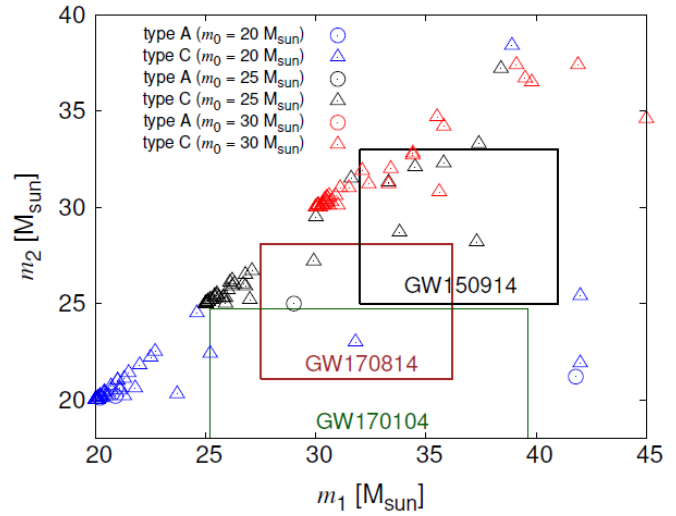
【1】重力波観測を説明する多重ブラックホール合体の研究

2016 年以降、aLIGO+aVIRGO による重力波観測により、5 つのブラックホール合体イベントが検出されている (GW150914, GW151226, GW170608, GW170814)。このうち、GW151226, GW170608 以外は、 $30M_{\odot}$ (M_{\odot} は太陽質量) 以上の大質量ブラックホール・ペアの合体である。星の進化論に従えば、このような大質量ブラックホールは、太陽組成の重元素量をもつ星の残骸としては考えづらく、重元素量が少ないか重元素量が 0 の初代星の残骸である可能性がある。ブラックホール合体の理論は、これまで連星の進化の結果としてできた連ブラックホールが合体するというシナリオが中心的であった。連星進化の理論に従うと、連ブラックホールのスピン軸は潮汐力の効果により同じ方向を向くことになるが、GW170104 のイベントで、スピンの軸方向のデータが初めて得られ、スピン軸が全く揃っていないことがわかった。これは、連ブラックホールが連星の進化以外のプロセスでできたことを示唆する。我々は、以前より、多重ブラックホールの中で連ブラックホールが形成され、最終的に重力波を放出して合体するという新たなシナリオを提唱し、合体のための条件

を理論的に解析してきた (Tagawa et al. 2015, 2016)。この解析では、近点移動や重力波放出といった一般相対論的な効果をポストニュートニアンで扱い、ガスによる力学的摩擦やホイル・リットルトン降着を入れた。そ

の結果、 $n \gtrsim 10^7 \text{cm}^{-3}$ の高いガス密度環境

下で、力学的摩擦が角運動量輸送に効果的に働いて、連ブラックホールが形成され、これが最終的に重力波を放出して合体することを示した。我々は、このシナリオで、重力波で検出された大質量ブラックホールの合体が説明できるか否かを調べるために、初期のブラックホール質量と質量降着率をパラメータとしたモデル計算を行った。観測されている連ブラックホールの質量に合致する合体条件を求めた。その結果、ブラックホール多体系の広がり 1pc よりも小さく、ガス密



度が $n \gtrsim 10^6 \text{cm}^{-3}$ のとき、力学的摩擦がブラックホールの 3 体相互作用を誘起し、その結果連

ブラックホールが作られ重力波により合体に至ることがわかった。また、合体までに降着するガス質量は、数 M_\odot であり、初期のブラックホール質量は $25M_\odot$ 以上でなければならないことが分かった (右図)。さらに、このような多重ブラックホールの中でのブラックホール合体が起こりうる場所として、銀河中心ガス円盤と、銀河内の高密度分子雲コアを考えイベント・レートを見積もった結果、全者で年間 1-2 イベント、後者では年間 0.02 イベントとなり、銀河中心ガス円盤での合体の可能性が高いことがわかった。この成果は、*Astrophysical Journal* に掲載された (Tagawa & Umemura 2018)。

【2】初代星形成における再結合放射の影響

本研究では、GPU を用いて高速化した 3 次元輻射流体力学シミュレーションコード ARGOT を用いて、宇宙初期の初代星の形成過程について、これまでの研究ではほとんど取り扱われてこなかった電離領域からの水素の再結合放射がどのように影響するかに着目した研究を行った。一般に初代星形成領域に対して近傍の星などの他の放射源からの電離光子はその初代星形成を抑制すると考えられるが、再結合放射を考慮すると周囲のガスを電離させる一方で、加熱を起こさず、ガスの冷却と紫外線の遮蔽の役割を担う水素分子を増やす効果もある。このように再結合放射が初代星形成を促進・阻害する条件を様々な設定で網羅的に調べるのが本研究の目的である。我々のグループが開発した再結合放射の効果を正しく取り入れることが可能なシミュレーションコード ARGOT を用いた計算の結果、再結合放射がある場合は周囲の中性領域を緩やかに電離させ、水素分子の自己遮蔽領域が形成され、再結合放射を考慮しない場合に比べ初代星の形成が促進される傾向があることを示した。今後はより現実的な条件、高解像度の数値シミュレーションを行うことで、再結合放射が初代形成性に与える影響を詳細に調べることで、再結合放射の影響をより一般的なケースに対して適用可能なモデル化を行うことを目指す。このようなモデル化は、宇宙論的なスケールでの初代星形成の数値シミュレーションに適用することで、宇宙再電離期の天体形成についてより現実的な予言を行うことが可能となり、近い将来観測が開始される中性水素の 21cm 線の観測と結びつけることが期待される。

【3】銀河間物質における初代星由来の重元素汚染の研究

銀河間物質(IGM)は、星形成・超新星爆発に伴うアウトフローにより組成が変化し、天体の形成進化の履歴を残すため重要な情報をもつ。我々は IGM の重元素汚染の起源に迫るなかで、とりわけ初代星由来の重元素汚染に注目した。初代星の形成過程については、輻射流体計算の手法を用いて精力的に研究されてきたが、初代星の痕跡を観測的に明らかにすることは未だ困難な状況である。本研究では初代星が超新星爆発を起こして放出したガスについて、背景光源のスペクトルに刻まれる吸収線の特徴について理論予測を行い、将来観測に活かすことを目標にしている。Ishiyama et al. 2016 により、初代星が形成される $10^6 M_\odot$ 程度の質量をもつダークマターミニハローを解像する 2048^3 粒子を用いた宇宙論的 N 体シミュレーションが行われ、 $z>10$ で初代星形成条件を満たすハローが抽出された。当データを用いて、初代星に特徴的な重元素組成で汚染される領域を設定することで、準解析的に初代星が放出した重元素の空間分布を得た。 $z=3$ における物質の分布と初代星由来の重元素の分布を解析したところ、低密度領域にも初代星由来の重元素が存在していることがわかった。さらに、アウトフローガスのトレーサーとして、 $z=3$ で可視光域に入る OVI($\lambda 103.2$ nm)と CIV($\lambda=154.8$ nm)に注目し、得られた重元素の空間分布に対して擬似観測を実行した。吸収線スペクトルを描き、銀河と重元素による吸収との空間相関を調査した。

【4】Cold dark matter halo における cusp-core 遷移の物理過程

現在の標準的な構造形成理論である cold dark matter(CDM)モデルは宇宙の大規模構造の統計的性質を説明することに成功した反面、1Mpc 以下の小さなスケールの構造においていくつかの問題が指摘されている。dark matter halo(DMH)の中心質量密度は CDM 理論では、発散する cusp 構造を预言するが、観測的には中心質量密度が一定となる core 構造が多数発見されている。また、質量の中心集中度が高い DMH を持つ大質量衛星銀河が見つからない(Too-big-to-fail 問題)等がある。本研究ではこれら二つの問題を、DMH とバリオンの力学的相互作用に起因した DMH の中心密度分布の進化過程に関わる問題として捉えて解析を行っている。活発な星形成活動が発生する以前の原始銀河の DMH は cusp 構造を持っているが、銀河形成期に発生する周期的な超新星爆発フィードバックによって core 構造へと遷移する、cusp-core 遷移過程の解析を行っている。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と、DMH の密度分布の中心付近の冪の関係について解析をおこなっている。これまでは線形解析及び N 体計算を用いた解析を行ってきたが、2017 年度は SCF 法を用いた大規模シミュレーションに着手し、Oakforest-PACS 上で動く計算コードの整備がほぼ完了した。

【5】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、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・ノースウェストストリームを生成した母天体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、母天体はこれまで考えられてきた球状星団のような軽い天体では観測を再

現できないことが判明し、少なくとも $10^7 M_\odot$ 程度以上の質量をもつ矮小銀河であることが、示唆された。

【6】 コールドダークマターハロー重力場中の遷音速銀河風加速過程

近年、観測技術の発達により、近傍星形成銀河でしか観測されていなかった銀河風速度が、スタッキング解析によって高赤方偏移星形成銀河でも観測可能になってきた。この銀河風によるガス流出量(質量流束)は、ダークマターハロー重力場と大質量星からのエネルギーの関係によって決まると考えられているが、詳しい加速過程などは明らかになっていない。そこで、銀河風速度などの観測値について、遷音速銀河風モデルを適用することで、質量流束やダークマターハロー質量を予想した。その結果、小質量銀河では、質量流束が減少するが、Mass Loading Rate (質量流束と星形成率との比)は増加することがわかった。これは、小質量銀河は、大質量銀河に比べて、銀河風による星形成抑制効果が大きいことを示している。また、小質量銀河では、星とダークマターハローの質量比が低下することがわかった。この傾向は、Abundance Matching など、他の手法による予測値とも一致している。さらに、赤方偏移ごとの比較を行うと、高赤方偏移銀河では、同じ銀河質量であっても Mass Loading Rate が低下することがわかった。これは、赤方偏移によって支配的な銀河風加速過程が異なる可能性を示している。

【7】 AGN feedback: The interactions of AGN radiation, jets and winds with the host galaxy

The supermassive black holes in the centers of galaxies accrete gas and launch jets, fast winds, or emit copious amounts of radiation. The jets, winds, and radiation may impact the gas in host galaxy on scales ranging from fractions of parsecs to hundreds of kiloparsec. This cycle of matter and energy affects the evolution of galaxies and is termed the “feedback cycle of galaxy formation”. It leads to a regulated history of star-formation, evidenced through the luminosity functions of galaxies, and to the coevolution of the central supermassive black hole and the galaxy, evidenced through the scaling relations such as the Magorrian relation. We are pursuing a numerically intensive project running 3-dimensional relativistic hydrodynamic and radiation-hydrodynamic simulations with multiphase gas aimed at elucidating the physics of the mass and energy transfer in the feedback cycle and the effects of jets, winds, and radiation on star-formation and black hole accretion. In recent work we have: 1) compared the feedback efficiency of jet-driven and radiation driven outflows and found that jets have a systematically higher feedback efficiency (Ciello, Bieri, Volonteri, Wagner, & Dubois 2018); 2) produced a sophisticated 3-dimensional model of a relativistic jet interacting with the galactic disc of the iconic radio galaxy IC 5063, explaining the physics behind the dispersion and outflow of molecular gas (Mukherjee, Wagner, Bicknell, et al. 2018); 3) investigated four radio-loud NLS1 galaxies with extreme emission-line shifts, indicating radial outflow velocities of the ionized gas of up to 2450 km/s, and interpreted these in terms of a large scale jet-driven wind (Komossa, Xu, & Wagner 2018); 4) calculated the radio spectra from simulations of young and frustrated radio galaxies that explain the origin and transition gigahertz-peaked spectrum sources to compact steep spectrum sources in terms of the free-free absorption characteristics of the multiphase interstellar medium (Bicknell, Mukherjee, Wagner et al 2018).

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

近年のニュートリノ振動の発見により、ニュートリノにも 0 ではない質量があることが示されており、宇宙の大規模構造形成においてニュートリノが力学的影響を与えることが示唆されている。しかしながら、ニュートリノの質量は小さく、速度分散が非常に大きいため従来の大規模構造形成計算で行われている N 体シミュレーションでは、無衝突減衰の扱いが難しくモンテカルロサンプリングにより物理量にショットノイズが混在するなど数値的に正しくニュートリノの効果を取り入れることが困難であった。そこで我々のグループではそのような問題が原理的に発生しない 6 次元位相空間上での無衝突 Boltzmann 方程式(Vlasov 方程式)を元に、高次精度宇宙論的 Vlasov-Poisson シミュレーションコードを開発し、有質量ニュートリノが大規模構造形成に及ぼす影響の計算を行った。この手法では速度分散が大きいニュートリノは Vlasov-Poisson シミュレーションで計算し、速度分散が非常に小さいコールドダークマターは N 体シミュレーションで計算するハイブリッド計算を行う。二つの手法を組み合わせることにより、 N 体シミュレーションの高解像度の利点を活かしつつ、ニュートリノの力学的影響を精度よく取り入れた計算が可能となった。本研究の結果、ニュートリノの free streaming スケールより大きなスケールではコールドダークマターと同じ振る舞いで構造形成を行うが、小さいスケールではニュートリノの大きな速度分散により細かい構造がかき消されることが確認できた。また、速度分散の小さなニュートリノが選択的にコールドダークマターの重力ポテンシャルに落ち込むことが示せた。今後は Vlasov シミュレーションで得られるニュートリノの速度成分や高次のモーメントから統計的な解析を行う。将来的には次世代の銀河サーベイ観測結果と比較し、より正確なニュートリノの質量を宇宙論の立場から予言することを目指す。

【9】泡宇宙の衝突現象による初期宇宙のインフレーションへの示唆

自然界には、様々な物理定数と呼ばれる基礎定数が存在し、全ての力の大きさなど物理法則の骨格を決めており、延いては我々の宇宙自体を特徴づけるパラメータであるとも言える。宇宙生成時に、これらの物理定数がランダムな値を取る機構が存在し、ある領域において我々の定数に近い値を取った場合にだけ、似たような宇宙の構造形成、延いては生物の発生が許されると考えることができる(人間原理)。泡宇宙は、このような背景物理に動機づけされた初期宇宙モデルであり、様々な真空期待値が存在する超弦理論的宇宙観においても重要である。実際、様々な宇宙定数を持った真空が多数生成され、それが泡宇宙となる。この様に、それぞれの泡宇宙が固有の宇宙項を持っていたとして、それらが衝突現象を起こすことで、一時的に衝突領域に本来の宇宙項の値とはオーダーの異なる加速膨張宇宙が実現することを数値計算で示した。まず簡単のため、数値的に 2 次元空間、つまり z 方向には対称の円筒対称座標を用いて解析した。静止解である泡宇宙をアインシュタイン方程式を解いて、メトリックとスカラー場で作成した。それらに初速度を持たせて、原点付近で衝突させた。泡宇宙同士の衝突現象により、その領域でメトリックが急劇に増大し、一時的な加速膨張領域ができた。これは本来持っている宇宙項とは異なる有効場としてのインフラトンが生成される可能性を示唆したことになる。インフレーションが泡宇宙のダイナミクスにより生成されることが示されれば、インフラトンと宇宙項の関連を探る重要な手掛かりと成り得ると期待される。

【10】星形成領域の窒素同位体分別過程

彗星氷などの太陽系形成初期の情報を保持すると考えられる物質(太陽系始原物質)は重水素に富むことが知られている。重水素濃縮には極低温環境が必要なため、太陽系始原物質は太陽系の母体となった分子雲で生成された物質を現在に至るまで保持しているのではない

かと議論されている。実際に、星形成領域において重水素に富んだ分子は普遍的に観測されている。重水素に加え、太陽系始原物質は重窒素(^{15}N)にも富んでいる。例えば彗星氷中の NH_3 や HCN は、元素存在度に比べ数倍程度 ^{15}N に富んでいる。一方で近年の分子雲コアの観測から、分子雲コア中の気相分子(N_2H^+ , NH_3 , HCN など)には顕著な ^{15}N 濃縮は見られず、むしろ ^{15}N に希釈した傾向を持つことが分かってきた。これは一見太陽系始原物質の分子雲起源説と矛盾するよう見えるが、必ずしもそうではない。気相分子と氷分子が同じ同位体組成を持つとは限らないためである。

上の観測事実から、星(・惑星)形成領域において窒素同位体分別が起こることは明らかであるが、その機構についてはよく分かっていない。窒素同位体分別過程として(1)同位体交換反応、(2) N_2 の同位体選択的光解離の2つが提案されているが、いずれも分子雲コアの観測結果を説明することは難しいと考えられてきた。我々は分子雲形成モデルにおいて ^{15}N を含む化学反応ネットワークモデルの数値計算を行った。 N_2 の同位体選択的光解離とダスト表面反応により分子雲の段階で気相と固相間で窒素同位体が分別され、気相は ^{15}N に希釈し、固相(氷)は ^{15}N に富むことが分かった。一度気相と固相間で窒素同位体が分別されると、この状態は氷の昇華が起こるまで保持されるため、分子雲コア気相分子の ^{15}N の希釈、および惑星系の材料となりうる固体物質は ^{15}N に富むことが説明できる。

【1 1】星形成領域における窒素原子存在量の推定法の開発

窒素は、宇宙において5番目に豊富に存在する元素であり、生命にとって不可欠な元である。星形成領域における窒素の研究は他の揮発性元素に比べて遅れており、窒素の主要存在形態(原子 or 分子 or 氷)すらよく分かっていない。その理由の一つは、窒素原子が星形成領域のような低温ガス中では直接観測が困難なためである。そこで本研究では、観測可能なアンモニア(NH_3)の重水素濃縮度から窒素原子存在量を推定する理論的手法を開発した。またALMAやVLAなどの大型電波干渉計を用いた観測によって、現実的な観測時間で近傍の小質量星形成領域における窒素原子存在量を推定可能なことを示した。

【1 2】星間有機分子生成の第一原理分子動力学計算(宇宙生命計算科学連携)

(1) 非ラジカル反応によるアミノ酸生成経路の解析

地球外環境下でのアミノ酸生成に関しては様々な反応経路が提唱されているが、我々は、アミノアセトニトリルからヒダントインが生成し(Bücherer-Bergs 反応)、ヒダントインが加水分解されてグリシンが生成する反応経路を、密度汎関数法(DFT)を用いて解析した。アミノアセトニトリルは星間雲で観測されており、また、ヒダントインも隕石から検出されているなど、ともに宇宙化学において重要な有機分子である。各反応ステップの反応障壁を計算して反応機構の詳細を明らかにし、また、触媒となる水分子の重要性を示した。しかし、反応障壁が高いことから、この反応が起こり得る環境として、隕石中など高温環境が考えられることを考察した。本研究の成果は*Chem. Phys. Lett.*に発表した。

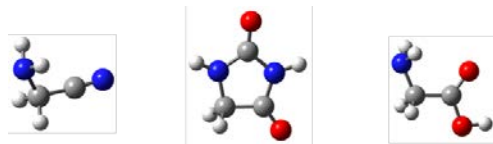


図1 アミノアセトニトリル、ヒダントイン、グリシンの構造

(2) ラジカル反応によるアミノ酸生成経路の解析

グリシンが生成する別の機構として、星間分子である CH_3OH , HCN , NH_3 のラジカル反応による生成経路が提案されている。その中から、 $\text{NH} + \text{CH}_2\text{COOH}$, $\text{NH}_2\text{CH}_2 + \text{COOH}$, $\text{NH}_2\text{CH}_2\text{CO} + \text{OH}$ の3つの反応経路をDFT法を用いて解析した。その結果、反応障壁が低い($\leq 7.75 \text{ kJ/mol}$)2つの反応経路を明らかにし、星間空間のように低温環境においてもグリシン生成が起こり得ることを示した。本研究の成果を*Mol. Astrophys.*に発表した。

(3) 有機分子の光解離反応によるラジカル生成機構の解析

宇宙環境下においてラジカルが生成する主な反応機構の一つに、紫外線による光解離反応がある。本研究では、星間空間において重要な有機分子の一つであるメタノール (CH_3OH) の、気相中での光解離反応の機構を明らかにするため、時間依存 DFT (TD-DFT) により、励起状態ダイナミクスシミュレーションを行った。実験的に、水素原子が解離する場合 (図 2), C-H 結合の解離よりも O-H 結合の解離の方が起こり易いことが報告されているが、その理由として第一励起状態が重要であることが示された。

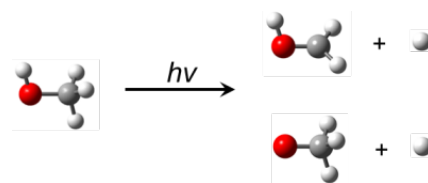


図 2 光照射によるメタノールからの水素原子の解離反応

(4) ダスト表面上でのラジカル反応の解析

ダスト表面上でのラジカル反応により生成した分子が、気相中に放出される機構に関して chemical desorption が提案されている。この機構を解析する為、シンプルな表面モデルとしてグラフェンを用い、HCO と H が反応して $\text{CO} + \text{H}_2$ または CH_2O が生成する反応について Car-Parrinello dynamics シミュレーションを行った。シミュレーションには、CPMD という、材料研究の大規模シミュレーションに用いられているプログラムを利用した。その結果、表面に化学吸着している CHO が H 原子と反応する場合、 $\text{CO} + \text{H}_2$ または CHOH が生成するという結果が得られた。また、この反応により $\text{CO} + \text{H}_2$ が生成する場合、CO は速やかにダスト表面から解離することが示された。

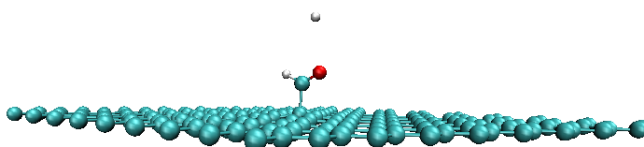


図 3 グラフェン表面における CHO と H の反応

【13】原始惑星系円盤乱流中のダスト成長と微惑星形成の研究 (宇宙生命計算科学連携)

(1) 非圧縮ナビエ・ストークス方程式の直接数値計算(DNS)を用いてダスト粒子の運動を追跡し、ダスト粒子の衝突付着成長過程を理解するためのデータ解析を実施した。微惑星形成過程において未解決である衝突破壊問題にターゲットを絞り、慣性の大きい岩石ダスト粒子が原始惑星系円盤のガス乱流の影響 (乱流によるダスト粒子のクラスタリング, 図 4 参照) を受けどのように衝突付着しうるのか、衝突速度、衝突頻度、付着確率等の統計、および、それらのレイノルズ数 (乱流の非線形性の強さ) 依存性を数値シミュレーションによって調べた。その結果、粒子の制動時間が乱流中の慣性小領域の渦の時間スケールのオーダーにおいて、慣性の大きい岩石ダスト粒子の衝突付着確率は従来の理論に基づくものより高いことを明らかにした。また、ダスト粒子の慣性が大きいほど衝突付着に関する統計のレイノルズ数依存性が弱いことを明らかにし、原始惑星系円盤の現実的な高レイノルズ数乱流中のダスト粒子の衝突付着成長の定量的な議論を可能にした(Ishihara et al. ApJ 2018)。

(2) 圧縮性乱流の高精度・高解像度な差分に基づく直接数値シミュレーションコードを開発し、計算結果のマッハ数 (圧縮性の強さ) 依存性を調べた。その結果、マッハ数が小さいときの結果 (乱流場の統計と粒子の統計) が非圧縮性乱流の結果と無矛盾であることを確認し、マッハ数が小さいときは、場の密度揺らぎや速度の発散等に顕著な変化があっても慣性の大きい粒子の衝突統計に大きな変化が生じないことを明らかにした。

(3) 粒子の付着成長シミュレーションのコード開発を行い、そのコードの高効率化を行った。その結果、格子点数 2048^3 の非圧縮性乱流 DNS 中で 512^3 個の岩石ダスト粒子の付着成長シミュレーションを実現した。得られたデータの解析により、乱流強度が強く粒子の限界

付着速度が小さい（衝突破壊しやすい）状況においても、大きく付着成長する粒子が存在することを明らかにした。

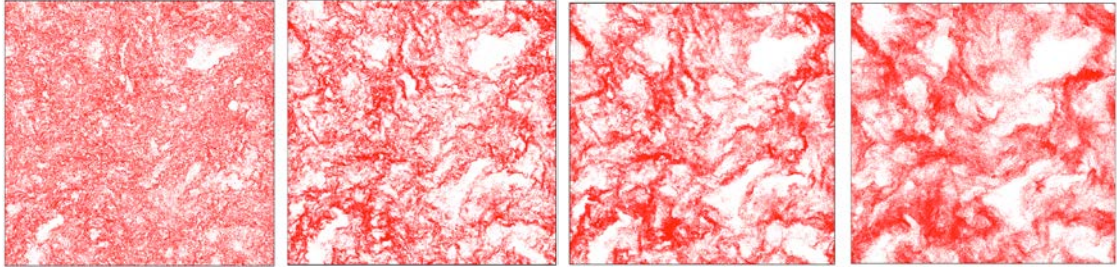


図 4：乱流の直接数値計算（格子点数：2048³, レイノルズ数：16100）によって得られた慣性粒子（左から $St=0.01, 0.06, 0.12, 0.24$ ）のクラスタリング. St はストークス数（粒子の制動時間をエネルギー保有渦のタイムスケールで規格化したもの）

【14】銀河の多成分力学平衡分布生成コード MAGI の開発

銀河どうしの衝突・合体や銀河円盤中の渦状腕の形成などの力学進化過程を詳細に調べるために、 N 体シミュレーションを用いた研究が精力的に進められている。こうした計算を行うためには適切な初期条件を生成する必要がある。しかしながら、一般に銀河はバルジ・ハロー・円盤からなる多成分系であり、これを力学平衡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。特に、天の川銀河に代表される円盤銀河の多くは厚い円盤と薄い円盤の 2 成分の円盤成分を持つことが知られているため、複数の円盤成分を表現できることが望ましい。さらに、銀河の質量やサイズ、各成分の質量分布に対する依存性を調べるためには、これらを手軽に変更できることも重要であるが、こうした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。そこで我々は、複数の球対称成分と軸対称成分を粒子系として表現する初期条件生成コード MAGI (MAny-component Galaxy_INITIALIZER) を開発した。球対称成分については、等方的な速度分布を仮定し Eddington formula を用い分布関数を作成、この分布関数に従う粒子分布を生成することで、Burkert, Einasto, Hernquist, King, Moore, NFW, Plummer model などの多様なモデルやその重ね合わせを力学平衡な粒子分布として表現できる。また円盤成分については高さ方向に等温モデルを仮定し、potential—density pair を数値的に求めている。さらに、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。以上の成果は Miki & Umemura (2018) として発表済みであり、またソースコードも公開している。

【15】SPH 粒子データを用いた Lyman-alpha 輝線輻射輸送計算コードの開発

観測から得られる高赤方偏移 Lyman-alpha (Ly α) 輝線銀河 (Lyman-alpha emitters, LAEs) の特性を理論的に検証するためには、流体力学計算によって得られた銀河モデルに対して Ly α 輝線の輻射輸送計算を行う必要がある。銀河形成シミュレーションでは、粒子法の一つであり広いダイナミックレンジを取り扱うことができる SPH 法がよく用いられる。その一方で、Ly α 輻射輸送計算コードはこれまで mesh ベースで開発されている。このため、従来の手法では輻射輸送計算の際に SPH 計算データの mesh 割り当てが必要であり、流体計算の解像度を損なう可能性があった。そこで本研究では、SPH 粒子を輻射輸送計算グリッドとして直接用いることで、SPH 計算の分解能で輻射輸送計算を行う meshfree の Ly α 輝線輻射輸送計算コードを開発した (SEURAT: SPH scheme Extended with UV line RAdiative Transfer, Abe et al. 2018)。テスト計算の結果、本コードは一様ガス球からの Ly α 光子脱出スペクトル, dusty slab からの Ly α 光子脱出確率の解析解をよく再現するこ

とを示し、meshfree で Ly α 輝線輻射輸送を正しく解けることを確かめた。輻射流体力学計算で得られた高赤方偏移銀河モデルに対して本コードを適用した結果、銀河内のガスの複雑な構造を反映し、Ly α 輝線の表面輝度分布や脱出光子スペクトルといった観測量は、同一の銀河であっても観測する方向によって変わることが分かった。さらに、従来の mesh ベースコードとの比較を行ったところ、mesh 割り当ての有無によってガスの速度構造に違いが生じるため、脱出光子スペクトルの形が変わり得ることを示した。

【16】GPUを用いたN体計算コードのPascal向け性能最適化

GPU 向けに最適化された N 体計算コード GOTHIC (Gravitational Oct-Tree code accelerated by Hierarchical time step Controlling) を Pascal 世代の GPU 向けに最適化した。GOTHIC は GPU 向けに開発された重力ツリーコードであり、階層化時間刻み法の採用に加えて自動最適化を用いた高速化がなされている。しかし、Miki & Umemura (2017) の研究において対象とされた GPU の世代は Fermi, Kepler, Maxwell の 3 世代のみであり、東京大学の Reedbush-H/L や東京工業大学の TSUBAME 3.0 といった最近導入されたスパコンに搭載されている Pascal 世代の GPU 向けの最適化は施されていない。本研究では Pascal 世代の GPU 向け最適化として、スレッドブロックあたりに割り当てるスレッド数などのコード内のパラメータを調整した。パラメータの調整については、Pre-PACS-X に搭載された NVIDIA Tesla P100 を用いた。NVIDIA Tesla P100 上での計算は、今まで用いていた NVIDIA Tesla M2090, K20X, GeForce GTX TITAN X と比べて常に高速であり、特に Fermi 世代の GPU である NVIDIA Tesla M2090 に比べて約 8 倍の高速化を達成した。この 8 倍という数字は両 GPU の単精度での理論ピーク性能比と丁度対応する数字であり、理想的な高速化が達成できていることを示唆する。

【17】高次精度移流スキームの開発

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

【18】高精度流体シミュレーションコードの開発

銀河形成シミュレーションを始めとして、宇宙物理の理論分野では Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) 法が流体計算に広く用いられている。しかしながら、SPH 法には流体の接触不連続面が上手く扱えないことや、離散化された方程式が空間ゼロ次の誤差項を持つことといった欠点が知られている。これらは流体の不安定性を扱う上で大きな障害となりうる問題であり、これまでに様々な解決策が提案されてきた。例えば、Riemann solver

を SPH 粒子の相互作用計算に組み込む Godunov SPH (GSPH) 法によって、接触不連続面を適切に扱えることが報告されている (Inutsuka 2002; Cha et al 2010)。GSPH 法は、通常の SPH 法で衝撃波を扱うために必要な人工粘性項を必要としないという長所も持っている。また、García-Senz et al. (2012) によって開発された Integral Approach (IA) には、物理量の一階微分を新しい手法で計算することで離散化によって発生する数値粘性を抑制し、空間ゼロ次の誤差を小さくする効果があることが確認されている。我々は GSPH 法と IA を組み合わせることによって、人工的な散逸項を必要としない高精度の Lagrange スキームの開発を目指した。その際に、IA を使用したときに強い膨張波が発生する領域で内部エネルギーが過小評価されることと、それが GSPH 法とは関係無く、IA が本質的に抱える問題であることを発見した。この問題を改善するために、我々は IA での微分計算に使用していた行列に対して改良を加えた。その結果、膨張波領域の問題を解決できるようになっただけでなく、複数のテスト問題において元の IA より良い結果を示した。

教育

【学位論文】

<博士論文>

なし

<修士論文>

1. 北澤 優也

星間分子の円偏光吸収特性から探るアミノ酸ホモキラリティ起源

2. 田沼 萌美

ダークマターハローのユニバーサルスケーリング則

3. 藤原 隆寛

Integral Approach を用いた新しい Godunov SPH 法の開発

4. 油井 夏城

再結合光子を考慮した初代星形成の輻射流体シミュレーション

<学士論文>

1. 曾我 健太

ライマン α 輝線天体における活動銀河核の寄与

2. 田崎 翼

銀河中心ガス円盤におけるブラックホールの力学進化：(1)円盤への捕獲条件

3. 竹澤 聞

銀河中心ガス円盤におけるブラックホールの力学進化：(2)円盤中の合体条件

4. 中村 帆南

星形成領域における有機分子生成過程の理論的研究

5. 日原 慧大

銀河形成初期の放射冷却過程における exact integration scheme の実装

6. 江本 直史

SIMD 命令による流体シミュレーションの高速化

4. 受賞, 外部資金, 知的財産権等

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」

(H29 年度 120 万円／全体 540 万円)

■科学技術試験研究委託事業, H28 年度～H32 年度: 梅村雅之

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

(H29 年度 1,250 万円／全体 4,874 万円)

■基盤研究 (C) (一般) H26 年度～H29 年度: 森正夫

「輻射流体シミュレーションによる銀河系統樹の構築」

(H29 年度 80 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)

(H28 年度分担金 2.5 万円／分担金全体 12.5 万円)

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

「一般相対論的 ART 法による超巨大ブラックホール形成と成長過程の研究」

(H28 年度分担金 10 万円／分担金全体 20 万円)

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

「すばる HSC と SDSS で探る宇宙論的スケールの物質循環」

(H29 年度分担金 40 万円／分担金全体 52.5 万円)

■若手研究 (B) (代表) H29 年度～H31 年度: 古家健次

「星間雲から原始惑星系円盤に至る分子組成進化の理論的研究」

(H29 年度 100 万円)

■挑戦的萌芽研究 (分担) H28 年度～H30 年度: 古家健次

「計算科学によるアストロバイオロジーへの理論的挑戦」

(H29 年度 30 万円)

5. 研究業績

(1) 研究論文

A) 査読付き論文

- 1) Ouchi, M. et al. (Umemura, M. and Mori, M.), 2018, “Exploration and Reionization Research Using Subaru HSC (SILVERRUSH). I. Program Strategy and Clustering Properties of $\sim 2,000$ Ly α Emitters at $z = 6-7$ over the $0.3-0.5$ Gpc 2 Survey Area”, Publications of the Astronomical Society of Japan, 70, Issue SP1, id.S13

- 2) Igarashi, A., Mori, M., Nitta, S., 2017, “Polytropic transonic galactic outflows in a dark matter halo with a central black hole”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 440, 2225
- 3) Hayashi, K., Ishiyama, T., Ogiya, G., Chiba, M., Inoue, S., and Mori, M., 2017, “Universal Dark Halo Scaling Relation for the Dwarf Spheroidal Satellites”, *The Astrophysical Journal*, 843, 97
- 4) Kirihara, T., Miki, Y., Mori, M., 2017, “The nature of the progenitor of the M31 North-western stream: globular clusters as milestones of its orbit”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 469, 3390
- 5) Sakai, T., Yanagida, T., Furuya, K., Aikawa, Y., Sanhueza, P., Nami Sakai, N., Tomoya Hirota, T., Jackson, J. M., Yamamoto, S., 2018, “ALMA Observations of the IRDC Clump G34.43+00.24 MM3: Complex Organic and Deuterated Molecules”, *The Astrophysical Journal*, 857, 35
- 6) Tanaka, S., Yoshikawa, K., Minoshima, T., Yoshida, N., “Multi-Dimensional Vlasov-Poisson Simulations with High-Order Monotonicity and Positivity Preserving Schemes”, 2017, *The Astrophysical Journal*, 849, 76
- 7) Akamatsu, H., Fujita, Y., Akahori, T., Ishisaki, Y., Hayashida, K., Hoshino, A., Mernier, F., Yoshikawa, K., Sato, K., Kaastra, J.S., “Properties of the cosmological filament between two clusters: A possible detection of a large-scale accretion shock by Suzaku”, 2017, *Astronomy & Astrophysics*, 606, A1
- 8) Bordoloi, R., Heckman, T. M., Wagner A. Y., Norman, C. A., *The Formation and Physical Origin of Highly Ionized Cooling Gas*, 2017, *Astrophysical Journal*, 848, 122–137
- 9) Toba, Y., Bae, H.-J., Nagao, T., Woo, J.-H., Wang, W.-H., Wagner, A. Y., Sun, A.-L., and Chang, Y.-Y., “Ionized Gas Outflows in Infrared-Bright Dust-Obscured Galaxies Selected with WISE and SDSS”, 2017, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 850, 140, 16pp
- 10) Bicknell, G. V., Mukherjee, D., Wagner, A. Y., Nesvadba, N. P. H., Sutherland, S. R., “Relativistic jet feedback II: Relationship to gigahertz peak spectrum and compact steep spectrum radio galaxies” 2018, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 475, 3493–3501
- 11) Mukherjee, D., Wagner, A. Y., Bicknell, G. V., Morganti, R., Oosterloo, T., Nesvadba, N. P. H., Sutherland, S. R., 2018, “The jet-ISM interactions in IC 5063”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 76, 1, p.80–95
- 12) Furuya, K., Persson, M. V., 2018, “Tracing the atomic nitrogen abundance in star-forming regions with ammonia deuteration”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 476, 4994
- 13) Furuya, K., Aikawa, Y., 2018, “Depletion of heavy nitrogen in the cold gas of star-forming regions”, *The Astrophysical Journal*, 857, 105
- 14) Aikawa, Y., Furuya, K., Hincelin, U., Herbst, E., 2018, “Multiple paths of deuterium fractionation in protoplanetary disks”, *The Astrophysical Journal*, 855, 119
- 15) Shimonishi, T., Nakatani, N., Furuya, K., Hama, T., 2018, “Adsorption energy of carbon, nitrogen, and oxygen atoms on the low-temperature amorphous water ice: A systematic estimation from quantum chemistry calculations”, *The Astrophysical Journal*, 855, 27

- 16) Megumi Kayanuma; Kaori Kidachi; Mitsuo Shoji; Yu Komatsu; Akimasa Sato; Yasuteru Shigeta; Yuri Aikawa; Masayuki Umemura, 2017, "A theoretical study of the formation of glycine via hydantoin intermediate in outer space environment", *Chemical Physics Letters*, 687, 178-183
- 17) Takashi Ishihara, Naoki Kobayashi, Kei Enohata, Masayuki Umemura, Kenji Shiraishi, 2018, "Dust Coagulation Regulated by Turbulent Clustering in Protoplanetary Disks", *The Astrophysical Journal*, 854, 81, 16 pp
- 18) Akimasa Sato, Yuya Kitazawa, Toshiro Ochi, Mitsuo Shoji, Yu Komatsu, Megumi Kayanuma, Yuri Aikawa, Masayuki Umemura, Yasuteru Shigeta, 2018, "First-principles study of the glycine radical formations from common interstellar species", *Molecular Astrophysics*, 10, 11-19
- 19) Abe, M., Yajima, H., "Suppression of globular cluster formation in metal-poor gas clouds by Lyman-alpha radiation feedback", accepted for *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*
- 20) Miki, Y., Umemura, M., 2018, "MAGI: many component galaxy initializer", *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 475, 2269-2281
- 21) Abe, M., Suzuki, H., Hasegawa, K., Semelin, B., Yajima, H., Umemura, M., 2018, "SEURAT: SPH scheme extended with ultraviolet line radiative transfer", accepted for *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*
- 22) Tagawa, H., Umemura, M., 2018, "Merger of multiple accreting black holes concordant with gravitational wave events", accepted for *The Astrophysical Journal*
- 23) Inoue, Akio K.; Hasegawa, Kenji; Ishiyama, Tomoaki; Yajima, Hidenobu; Shimizu, Ikkoh; Umemura, Masayuki; Konno, Akira; Harikane, Yuichi; Shibuya, Takatoshi; Ouchi, Masami; Shimasaku, Kazuhiro; Ono, Yoshiaki; Kusakabe, Haruka; Higuchi, Ryo; Lee, Chien-Hsiu, 2018, "SILVERRUSH. VI. A simulation of Ly alpha emitters in the reionization epoch and a comparison with Subaru Hyper Suprime-Cam survey early data, submitted to *Publications of the Astronomical Society of Japan*
- 24) Cielo, S., Bieri, R., Volonteri, M., Wagner, A. Y., & Dubois, Y. 2018, "AGN Feedback Compared: Jets versus Radiation", *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* accepted
- 25) Komossa, S., Wu, D. W., & Wagner, A. Y, 2018 "Extreme Gaseous Outflows in Radio-Loud Narrow-Line Seyfert 1 Galaxies" *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* submitted
- 26) Takamizu, Y., Chernoff, D., "Collisions of false vacuum bubbles in cylindrical symmetry", submitted to *Journal of Cosmology and Astroparticle physics*
- 27) Loomis, R. A., Cleaves, L. I., Öberg, K. I., Aikawa, Y., Bergner, J., Furuya, K., Guzman, V. V., Walsh, C., "The Distribution and Excitation of CH₃CN in a Solar Nebula Analog", Accepted by *The Astrophysical Journal*

B) 査読無し論文

- 1) Furuya, K., Isotopic fractionation in interstellar molecules, invited review to appear in "Astrochemistry VII – Through the Cosmos from Galaxies to Planets, *Proceedings of IAU Symposium* 332

- 2) Taquet, V., Furuya, K., Walsh, C., van Dishoeck, E. F., “On the origin of O₂ and other volatile species in comets”, appear in “Astrochemistry VII – Through the Cosmos from Galaxies to Planets, Proceedings of IAU Symposium 332

(2) 国際会議発表

A) 招待講演

- 1) Furuya, K., “Evolution of ices and deuteration in forming disks”, Disk formation workshop 2017, July 24-27, 2017, Leiden, Netherlands
- 2) Yoshikawa, K., “Vlasov-Poisson simulation of collisionless self-gravitating systems and its application to cosmological neutrinos in the large-scale structure of the universe”, Collisionless Boltzmann (Vlasov) Equation and Modeling of Self-Gravitating Systems and Plasmas, October 30-November 3, 2017, Marseille, France
- 3) Umemura, M., “Hybrid scheme for resonant line transfer”, Inverse Problems and Medical Imaging, Feb. 13-16, 2018, University of Tokyo, Japan

B) 一般講演

- 1) Furuya, K., “Exploring the main nitrogen reservoir in star-forming clouds with ammonia deuteration”, Symposium “Evolution of Molecules in Space”, June 27-29, 2017, Hokkaido, Japan
- 2) Furuya, K., “¹⁵N fractionation mechanism in the ISM”, 2nd ISSI meeting “From qualitative to quantitative: Exploring the early solar system by connecting comet composition to protoplanetary disk models”, January 29-February 2, 2018, Bern, Switzerland
- 3) Umemura, M., Abe, M., Kuki, N., Czaprynski, K. “A Novel Hybrid Scheme for Ly α Line Transfer”, Tokyo Spring Cosmic Lyman-Alpha Workshop, March 27-30, 2018, Tokyo, Japan
- 4) Igarashi, A., “Transonic galactic outflows in starburst galaxies”, Tokyo Spring Cosmic Lyman-Alpha Workshop, March 27-30, 2018, Tokyo, Japan
- 5) Abe, M., Hasegawa, K., Yajima, H., Umemura, M., Inoue, A. “SEURAT: A meshfree Monte Carlo Lyman-alpha line transfer code on SPH for modeling high-*z* LAEs”, Tokyo Spring Cosmic Lyman-alpha Workshop, March 27-30, 2018, Tokyo, Japan

(3) 国内学会・研究会発表

A) 招待講演

- 1) 吉川耕司「6次元ブラソフソルバー：自己重力系と電磁プラズマ系」, ポスト「京」時代の天体形成シミュレーション研究会 (2017年6月26日, 名古屋大学, 名古屋)
- 2) 古家健次, 「原始惑星系円盤内の揮発性物質：観測とモデル」, 基研研究会「原始惑星系円盤」 (2017年7月10日-12日, 京都大学 基礎物理学研究所, 京都)
- 3) 吉川耕司「線形移流方程式・無衝突ボルツマン方程式の数値解法」, 宇宙磁気流体・プラズマシミュレーションサマーセミナー (2017年8月21日-25日, 千葉大学, 千葉)
- 4) Wagner Alexander「Radiation-driven quasar-mode feedback」, 「超巨大ブラックホール研究推進連絡」第5回ワークショップ (2018年1月8日~9日, 東北大学, 仙台)

B) その他の発表

- 1) 安部牧人, SPH粒子データを直接用いた Ly α 輻射輸送計算コードの開発, 第4回銀河進化研究会, (2017年6月7~9日, 大阪大学, 大阪)

- 2) 三木洋平,『銀河ハロー中を漂う中間質量ブラックホール探査』, 学際大規模情報基盤共同利用・共同研究拠点 第9回 シンポジウム, ポスター (2017年7月13~14日, THE GRAND HALL, 品川, 東京)
- 3) 梅村 雅之, 「原始惑星系円盤乱流とダスト成長」, ポスト「京」萌芽的課題・計算惑星アプリケーション開発状況共有ワークショップ (2017年8月12, 神戸大学 CPS, 神戸)
- 4) 栢沼 愛, 「第一原理計算による星間分子の反応機構の解明」, ポスト「京」萌芽的課題・計算惑星 アプリケーション開発状況共有ワークショップ (2017年8月12, 神戸大学 CPS, 神戸)
- 5) 安部 牧人, SEURAT コードを用いた高赤方偏移 LAE の輻射輸送計算, CHORUS+Galaxy+IGM 研究会, 東京理科大学長万部キャンパス, 2017年9月8~10日
- 6) 櫻井幹記, 古谷眸, 小林直樹, 岡本直也, 石原卓, 白石賢二, 梅村雅之, 「原始惑星系円盤乱流場中のダスト粒子運動: 非圧縮性乱流と圧縮性乱流の比較」, 日本天文学会 2017年秋季年会 (2017年9月11日~13日, 北海道大学, 札幌)
- 7) 濱端航平, 石原卓, 白石賢二, 梅村雅之, 「乱流の直接数値計算を用いた原始惑星系円盤中の岩石ダストの衝突付着成長シミュレーション」, 日本天文学会 2017年秋季年会 (2017年9月11日~13日, 北海道大学, 札幌)
- 8) 高橋 芳太, 梅村雅之, 「相対論的流体における因果律を保った光子多重散乱の効果」, 日本天文学会 2017年秋季年会 (2017年9月11日~13日, 北海道大学, 札幌)
- 9) 郷田直輝, 辻本拓司, 矢野太平, 上田暁俊, 宇都宮真, 鹿島伸悟, 間瀬一郎, 亀谷 收, 浅利一善 (国立天文台), 山田良透, 吉岡諭, 穂積俊輔, 梅村雅之, 西亮一, 浅田秀樹, 長島雅裕, 石村康生, 中須賀真一, 酒匂信匡, ほか JASMINE ワーキンググループ一同, 「Nano-JASMINE と小型 JASMINE の進捗概要」, 日本天文学会 2017年秋季年会 (2017年9月11日~13日, 北海道大学, 札幌)
- 10) 松田有一, 伊王野大介, 川邊良平, 久保真理子, 中西康一郎, 太田耕司, 長尾透, 山田亨 (JAXA), 斎藤智樹, 林野友紀, 廿日出文洋, 加藤裕太, 河野孝太郎, 小野宜昭, 大内正己, 梅村雅之, 森正夫, 田村陽一, 谷口義明, 梅畑豪紀, 五十嵐創, 「アルマ望遠鏡による $z=3$ 巨大水素ガス天体のサブミリ連続波観測」, 日本天文学会 2017年秋季年会 (2017年9月11日~13日, 北海道大学, 札幌)
- 11) 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 MAGI の開発」, 日本天文学会 2017年秋季年会 (2017年9月11日~13日, 北海道大学, 札幌)
- 12) 安部 牧人, 長谷川賢二, Benoit Semelin, 矢島秀伸, 梅村雅之, 「SPH 粒子データを直接利用した Lyman-alpha 輻射輸送計算コードの開発」, 日本天文学会 2017年秋季年会 (2017年9月11日~13日, 北海道大学, 札幌)
- 13) 桐原崇亘, 梅村雅之, 森正夫, 長谷川賢二, 石山智明, 鈴木尚孝, 大内正己, 「低赤方偏移銀河間物質の観測による初代星起源金属汚染の検出可能性」, 日本天文学会 2017年秋季年会 (2017年9月11日~13日, 北海道大学, 札幌)
- 14) 吉川耕司, 「Vlasov-Poisson シミュレーションによる宇宙大規模構造形成におけるニュートリノの力学的影響」, 日本天文学会 2017年秋季年会 (2017年9月11日~13日, 北海道大学, 札幌)
- 15) 吉川 耕司, 「Vlasov-Poisson simulation of cosmic neutrinos in the large-scale structure formation in the universe」, 研究会「天体形成論 ~過去・現在・未来~」 (2017年9月19日~21日, 筑波大学 大学会館ホール, つくば)
- 16) 古家健次, 「Astrochemical simulations」, 宇宙生命計算科学連携拠点第3回ワークショップ (2017年11月20日~21日, 筑波大学, つくば)

- 17) Makito Abe, "Toward the FPGA acceleration of radiative transfer simulations in astrophysics", CCS-EPCC Workshop, (December 7-8, 2017, University of Tsukuba, Tsukuba)
- 18) 五十嵐朱夏, 森正夫, 新田伸也, 「遷音速銀河風モデルと星形成銀河への応用」, 研究会「天体形成論 ~過去・現在・未来~」, (2017年9月19~21日, 筑波大学, つくば)
- 19) 梅村雅之, 「宇宙物理学における輻射輸送計算の光診断学への適用」, 計算メディカルサイエンス・キックオフシンポジウム (2018年2月26日, 筑波大学計算科学研究センター, つくば)
- 20) 郷田直輝, 辻本拓司, 矢野太平, 上田暁俊, 宇都宮真, 鹿島伸悟, 間瀬一郎, 亀谷收, 浅利一善, 山田良透, 吉岡諭, 穂積俊輔, 梅村雅之, 西亮一, 浅田秀樹, 長島雅裕, 石村康生, 中須賀真一, 酒匂信匡, ほか JASMINE ワーキンググループ同, 「Nano-JASMINE と小型 JASMINE の全体的進捗」, 日本天文学会 2018 年春季年会 (2018 年 3 月 14~17 日, 千葉大学, 千葉)
- 21) 小島崇史, 大内正己, 林将央, 矢部清人, 梅村雅之, 天笠俊之, 北川博之, 他 10 名(HSC project 251), 「HSC-SSP データと Deep Learning で探る極金属欠乏銀河」, 日本天文学会 2018 年春季年会 (2018 年 3 月 14~17 日, 千葉大学, 千葉)
- 22) 加藤裕太, 松田有一, 伊王野大介, 川邊良平, 久保真理子, 但木謙一, 田中壺, 中西康一郎, 太田耕司, 長尾透, 山田亨, 斎藤智樹, 林野友紀, 廿日出文洋, 河野孝太郎, 小野宜昭, 大内正己, 梅村雅之, 森正夫, 田村陽一, 谷口義明, 梅畑豪紀, 五十嵐創, 「アルマ望遠鏡による SSA22-LAB18 の CO(J=4-3) 輝線と 3 mm 連続波観測」, 日本天文学会 2018 年春季年会 (2018 年 3 月 14~17 日, 千葉大学, 千葉)
- 23) 五十嵐朱夏, 森正夫, 新田伸也, 「遷音速銀河風モデルと星形成銀河への応用」, 日本天文学会 2018 年春季年会 (2018 年 3 月 14~17 日, 千葉大学, 千葉)
- 24) 藤原隆寛, 森正夫, 「Integral Approach を用いた新しい Godunov SPH 法の開発」, 日本天文学会 2018 年春季年会 (2018 年 3 月 14~17 日, 千葉大学, 千葉)
- 25) 桐原崇亘, 三木洋平, 森正夫, 他, 「アンドロメダ銀河 North-Western ストリームの形成過程」, 日本天文学会 2018 年春季年会 (2018 年 3 月 14~17 日, 千葉大学, 千葉)
- 26) 小宮山裕, 千葉柊司, 田中幹人, 田中賢幸, 桐原崇亘, 三木洋平, 森正夫, 他, 「Hyper Suprime-Cam で探るアンドロメダ銀河の恒星ストリームとハロー構造」, 日本天文学会 2018 年春季年会 (2018 年 3 月 14~17 日, 千葉大学, 千葉)
- 27) 古家健次, 相川祐理「星形成領域における窒素同位体分別過程」, 日本天文学会 2018 年春季年会 (2018 年 3 月 14~17 日, 千葉大学, 千葉)
- 28) 安部牧人, 「背景紫外線輻射場によって制御される星団形成過程の 3 次元輻射流体力学による研究」, 東北大学天文学教室談話会 (2017 年 10 月 23 日, 東北大学, 仙台)
- 29) 安部牧人, 「輻射輸送・拡散方程式結合スキームによる Lyman-alpha line transfer の加速」, 初代星・初代銀河研究会 (2018 年 2 月 10~12 日, 広まちづくりセンター, 呉)

(4) 著書, 解説記事等

- 1) 森正夫, 「地球と生命, 宇宙の全歴史」, Newton 6 月号増刊, 2017 年 5 月 18 日
- 2) 古家健次, 「重水素比から探る, 星・惑星形成領域における水の生成と輸送」, 天文月報 2018 年 1 月号
- 3) 森正夫, 「銀河のすべて」, ニュートン別冊, 2017 年 12 月 18 日
- 4) 吉川耕司「宇宙空間に広がる素粒子の運動を探る - ブラソフ方程式の高精度シミュレーション」, academist Journal, 2018 年 1 月 4 日

6. 異分野間連携・国際連携・国際活動等

- 1) LBNL/CRD - TSUKUBA/CCS Meeting, April 20-21, 2017, Lawrence Berkeley National Laboratory, USA, (April 20-21, 2017) (Miki)
- 2) “Recent Activities in CCS”, CCS-EPCC Workshop, University of Tsukuba, (December 7-8, 2017) (Umemura)
- 3) “Toward the FPGA acceleration of radiative transfer simulations in astrophysics”, CCS-EPCC Workshop, University of Tsukuba (December 7-8, 2016) (Abe)
- 4) “Vlasov simulations of collisionless self-gravitating systems and astrophysical plasmas”, CCS-EPCC Workshop, University of Tsukuba (December 7-8, 2016) (Yoshikawa)

7. シンポジウム, 研究会, スクール等の開催実績

- 1) 研究会開催「天体形成論 ～過去・現在・未来～」2017年9月19日(火)～21日(木), 筑波大学・大学会館ホール
- 2) 研究会開催「天体形成研究会」2017年10月13日(金), 14日(土), 筑波大学・計算科学研究センターワークショップ室
- 3) 研究会開催「宇宙生命計算科学連携拠点第3回ワークショップ」2017年11月20日(月), 21日(火), 筑波大学・計算科学研究センター会議室A

8. 管理・運営

組織運営や支援業務の委員・役員の実績

・梅村雅之

【本部】

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

【系・センター】

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

・森正夫

ハラスメント防止対策委員
アドミッションセンター専門委員

スポーツデー運営委員
カリキュラム委員会委員
物理学類3年担任
計算科学研究センター共同研究委員会学内委員
学際計算科学連携室室員
PPX2 システム調達仕様策定委員

9. 社会貢献・国際貢献

・梅村雅之

竹園東小学校講演会「宇宙の旅」，2017年10月24日
日本天文学会欧文研究報告編集顧問
国立天文台理論専門委員会委員長

10. その他

- 1) 海外長期滞在，三木洋平，Institut d'Astrophysique de Paris, France, (April 26–May 16, 2017)

IV. 宇宙観測グループ

教 授	中井直正
教 授	久野成夫
助 教	新田冬夢
助 教	渡邊祥正
研究員	齋藤弘雄
准教授	徂徠和夫（クロスアポイントメント教員）
学 生	大学院生 14 名（教育研究科 2 名）、学類生 9 名、研究生 1 名

宇宙観測グループでは、地上で最も天体観測に適した南極内陸部に 10m 級テラヘルツ望遠鏡を建設し、可視光では観測が困難な原始銀河の探査を行う計画を推進している。テラヘルツ望遠鏡に搭載する予定の広視野超伝導電波カメラへ向けた実機 1 号機として、野辺山宇宙電波観測所 45m 電波望遠鏡に搭載する電波カメラの開発を進めた。また、野辺山宇宙電波観測所 45m 鏡や ALMA など既存の望遠鏡を用いた銀河、銀河系、星形成領域などの観測を行ってきた。さらに、情報通信研究機構鹿島宇宙技術センター34m アンテナの性能評価、VLBI 観測に参加している。

【1】 南極天文学の推進

（1）南極 10m 級テラヘルツ望遠鏡計画

極寒の南極で、できるだけ簡単に鏡面を測定する方法として、点格子干渉計の検討を進めた。また、南極 10m 級テラヘルツ望遠鏡は、広視野を得るためにリッチー・クレチアン（RC）式の光学系を使用する予定であるが、RC 式の望遠鏡に近傍界の Phase Retrieval Holography 法を用いる方法の検討を進めた。

400-500GHz 帯には CO(J=4-3)と CI という二つの重要な輝線が存在するが、この 2 輝線が同時に観測できるよう、南極での観測を想定して開発した 30cm 望遠鏡のヘテロダイン受信機の広帯域化を進めた。

平成 30 年度概算要求について文部科学省との交渉を行ったが、認められるには至らなかった。

昨年に引き続き、南極望遠鏡計画について一般の人の理解と支持を得るために全国で講演会と署名集めを行った。また、南極 10m 級テラヘルツ望遠鏡に向けた超伝導電波カメラ開発のためのクラウドファンディングを実施し、期限までに目標額を達成することができた。

（2）超伝導電波カメラの開発

南極 10m 級テラヘルツ望遠鏡計画に向けた連続波観測装置（＝電波カメラ）の開発を進めている。実機 1 号機である野辺山 45m 電波望遠鏡搭載用の 100-GHz 帯超伝導電波カメ

ラは 2016 年 12 月末から 2017 年 1 月上旬にかけて 37 素子で搭載試験を行ったが、昨年の報告の通りビーム幅が予想値と一致しないことや、冷却時に生じる反射防止膜の破損等の課題が見つかった。本年度はこの対策に加え、素子数を 37 素子から 109 素子へ拡張する開発も行った。ビーム幅の問題については、伝送光学系の見直しおよび物理光学伝搬による無限遠でのビームパターンシミュレーションを行い、ビーム幅約 16" という結果を得た。次に、反射防止膜の破損は、レンズの材質であるシリコンと膜として使用しているエポキシ樹脂の熱膨張率の違いが原因である。この対策としてガラスビーズを用いた反射防止膜の開発を行い、0.1 K への冷却時でも破損しないことを確認した。検出素子である MKID は 3 インチシリコンウェハ上に 109 素子を配置したデザインとなっており、国立天文台先端技術センターのクリーンルームにて製作を行った。超伝導体にはアルミニウムを用いており、電子線蒸着により成膜した素子ではダーク環境にて Q 値(Qi)の平均は約 10^5 、検出器歩留まりは 87% となった。この他にも、データ取得システムの開発、ビームスイッチ観測のロックイン処理、観測の際の即時監視システムの開発、光学的厚みの解析、サブ波長構造を用いた反射防止膜の解析等を進めた。



図 1. 100-GHz 帯 MKID カメラと周辺システム

(3) 南極 30m 級テラヘルツ望遠鏡計画

南極 30m 級テラヘルツ望遠鏡による活動銀河およびスターバースト銀河の観測についての議論を深めるため、ワークショップ「南極 30m 級テラヘルツ望遠鏡による AGN と爆発的星形成銀河のサイエンス」を 3 月 27 日に筑波大学にて開催した。台湾からの参加を含め全国から銀河研究者が参加し、この分野における 30m 級テラヘルツ望遠鏡の持つ重要性を再確認することができた。

【2】 既存の観測装置を用いた研究

(1) 銀河面の ^{12}CO 、 ^{13}CO 、 C^{18}O 輝線によるサーベイ観測 FUGIN

FUGIN プロジェクトは、野辺山宇宙電波観測所 45m 電波望遠鏡に搭載されたマルチビーム受信機 FOREST を用いて、銀河系の ^{12}CO 、 ^{13}CO 、 C^{18}O 輝線（同時観測）によるサーベイを行い、分子ガスの物理状態、分布、運動を明らかにするという計画である。銀河系の渦状腕、棒状構造、分子ガスリングが含まれる第 1 象限 ($10^\circ \leq l \leq 50^\circ$, $|b| \leq 1^\circ$) および第 3 象限 ($198^\circ \leq l \leq 236^\circ$, $|b| \leq 1^\circ$) が観測領域である。FUGIN は、これまでの CO による銀河面サーベイでは最高の角分解を達成する。初期成果として、フィラメント構造など分子雲の詳細な内部構造が明らかになっている。

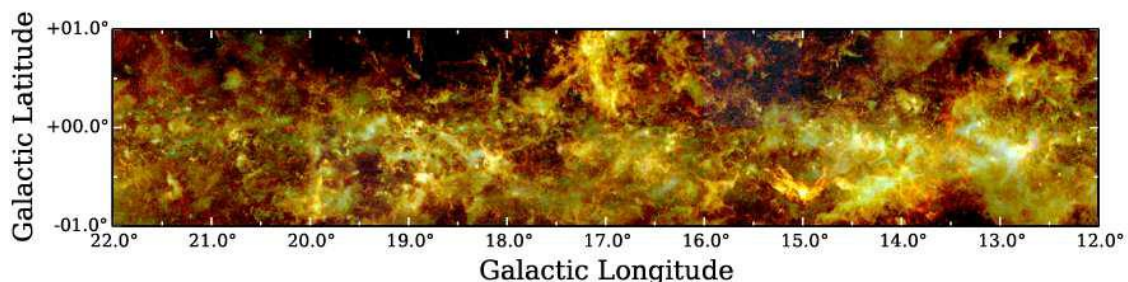


図 2. FUGIN によって観測された天の川の一部分。 ^{12}CO (赤)、 ^{13}CO (緑)、 C^{18}O (青) のピーク温度を重ねてある。(論文 10)

(2) 近傍銀河 NGC2976 の分子ガス観測

野辺山 45m 電波望遠鏡を用いた近傍銀河の ^{12}CO 、 ^{13}CO 、 C^{18}O 輝線サーベイ COMING プロジェクト (CO Multi-line Imaging of Nearby Galaxies) のサンプルの中から、近傍矮小銀河 NGC2976 の分子ガスの性質、星形成活動について調査した。その結果、分子ガスの割合は、渦状銀河同様に全ガスの面密度と星形成率に依存することがわかった。また、 $^{12}\text{CO}(J=3-2)$ と $^{12}\text{CO}(J=1-0)$ の強度比から、分子ガス面密度の減少に伴って分子ガスの温度が上昇することがわかった。これは、希薄な分子ガスの割合が増えるため輻射場による加熱が効きやすくなるためと考えられる。 $^{12}\text{CO}(J=1-0)$ と $^{13}\text{CO}(J=1-0)$ の強度比が 27 ± 11 と渦状銀河での値より有意に高いことも、光学的に薄い希薄なガスがこの銀河においては支配的であることを示唆する。

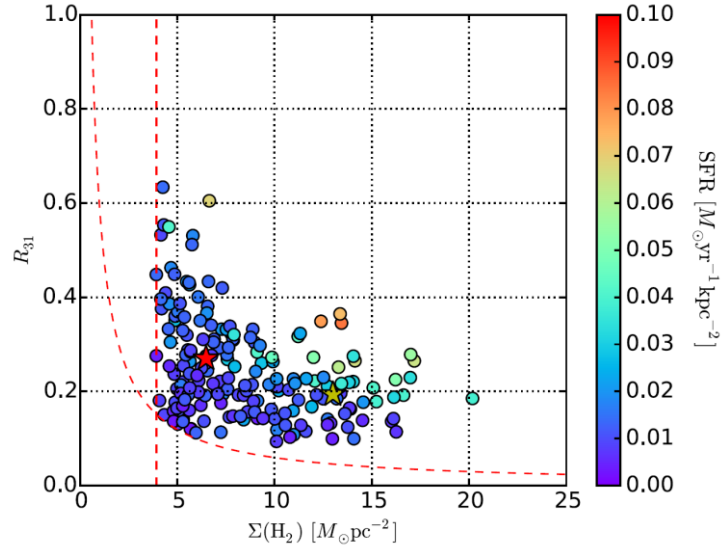


図 3. 分子ガスの面密度と $^{12}\text{CO}(J=3-2)/^{12}\text{CO}(J=1-0)$ の関係。カラーは星形成率 (SFR)。星印は、 $\text{SFR} > 10 M_\odot \text{yr}^{-1} \text{kpc}^{-2}$ と $\text{SFR} < 10 M_\odot \text{yr}^{-1} \text{kpc}^{-2}$ での平均値。(論文 3)

(3) NGC1808 中心部の高密度分子ガス観測

ALMA を用いて、銀河風をもつスターバースト銀河 NGC1808 の中心部の高密度ガストレーサーによる高角分解能観測 ($1'' \sim 50 \text{ pc}$) を行った。その結果、ALMA の性能を生かし HCN (1-0)、 $\text{H}^{13}\text{CN}(1-0)$ 、 $\text{HCO}^+(1-0)$ 、 $\text{H}^{13}\text{CO}^+(1-0)$ 、 $\text{HOC}^+(1-0)$ 、 $\text{HCO}^+(4-3)$ 、CS(2-1)、 $\text{C}_2\text{H}(1-0)$ 、SiO(2-1)、 $\text{HNCO}(4-3)$ といった分子輝線を検出することができた。輝線強度比から銀河中心部の円盤部に存在する分子ガスが高密度 ($n(\text{H}_2) \sim 10^5 \text{ cm}^{-3}$) で暖かい ($20 \text{ K} < T_k < 100 \text{ K}$) ことが示された。一方、アウトフロー内の分子ガスは、密度が $n(\text{H}_2) \sim 10^2\text{-}10^3 \text{ cm}^{-3}$ で温度が $T_k > 30 \text{ K}$ であることがわかった。また、アウトフローからも、HCN(1-0)、 $\text{HCO}^+(1-0)$ 、CS(2-1)、 $\text{C}_2\text{H}(1-0)$ といった高密度ガスのトレーサーが、今回始めて検出された。

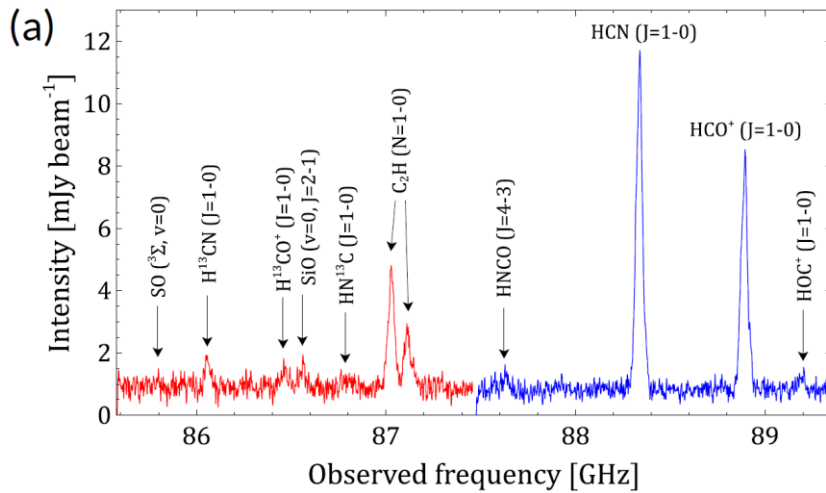


図 4. ALMA によって得られた NGC1808 中心部のスペクトル。高感度の ALMA によ

て多くの分子輝線が検出された。(論文 12)

(4) 巨大分子雲 W51 のマッピングスペクトル線サーベイ

Mopra 22m 電波望遠鏡を用いて、銀河系内の W51 領域の巨大分子雲の約 40pc×50pc の領域をマッピング観測した。周波数範囲は、85-101 GHz 及び 107-115 GHz である。スペクトルを観測領域全体で平均し、24 GHz という広い周波数帯域にわたり系統的に分子雲の化学組成を調べた。この観測では 16 種類の分子及びその同位体種を検出し、その存在量を求めた。さらに、観測領域を ^{13}CO の強度に応じて 5 つの領域に分割し、各分子輝線の全フラックスに対するそれぞれの領域からのフラックスの割合を見積もった。その結果、70%以上のフラックスは W51 の星形成領域ではない分子雲の広がった領域からの寄与であることを明らかにした。さらに、近傍銀河 M51 の渦状腕領域の分子ガスの化学組成と比較したところ、W51 の分子雲全体で平均した化学組成とよく似ていることも分かった。

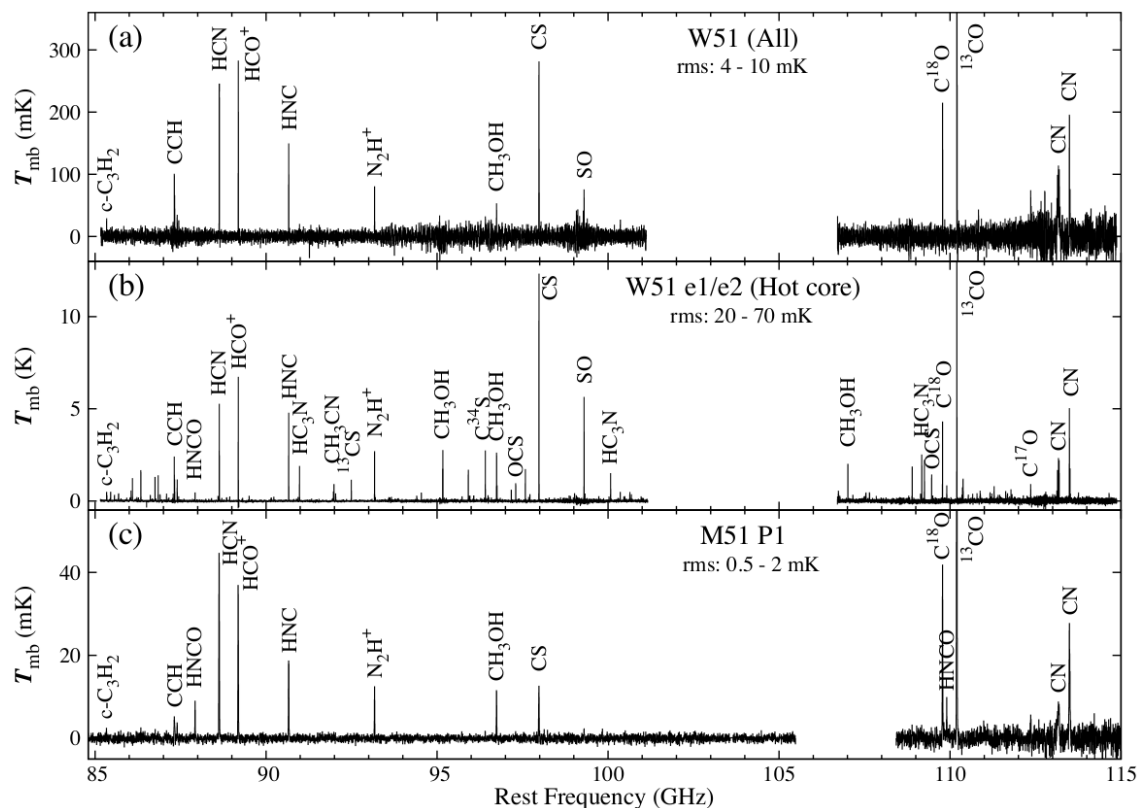


図 5. (a)Mopra 22m 望遠鏡で得られた観測領域全体で平均した W51 のスペクトル。(b) Mopra 22m 望遠鏡で得られた W51 の中の活発な星形成領域 e1/e2 のスペクトル。(c) IRAM 30m 望遠鏡で得られ M51 の渦状腕のスペクトル。(論文 8)

(5) 中間質量の原始星連星 NGC 2264 CMM3 の観測

ALMA を使い、非常に若い原始星 NGC 2264 CMM3 の観測を行った。これまでの観測は単一の連続波ピークのみが検出されていたことから、CMM3 は 1 つの大質量星の原始

星であると考えられてきた。しかし、今回の観測では CMM3A と CMM3B の 2 つの連続波ピークを検出した。この 2 つのピークにはそれぞれ双極分子流が付随していることから、既に原始星が形成されていると考えられる。このことから、CMM3 は単一の大質量星原始星ではなく、中間質量の原始星の連星であることが分かった。さらに、この 2 つの原始星のスペクトルパターンが大きく異なっていた。その原因として、原始星の進化段階、原始星の質量、原始星周りのエンベロープの傾きの違いなどが考えられる。今後この違いの原因を、ALMA を使った観測により検証する予定である。

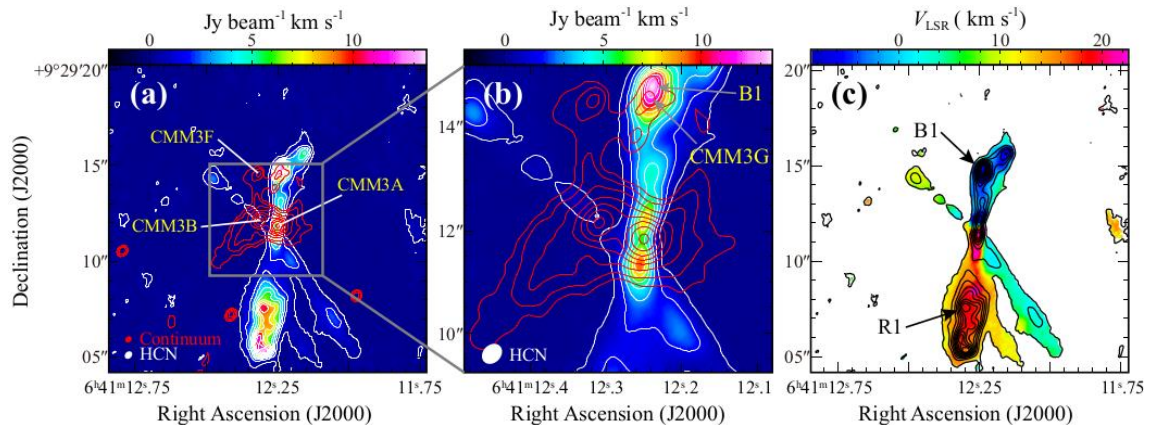


図 6. (a) NGC 2264 CMM3 における HCN の積分強度図。赤のコントアは 850 μm の連続波。(b) HCN の積分強度図の拡大図。(c) HCN の速度場マップ。CMM3A と CMM3B に双極分子流が付随している様子が見られる。(論文 13)

【3】情報通信研究機構 鹿島宇宙技術センター34m アンテナ

(1) 大学 VLBI 連携観測のサポート

大学 VLBI 連携による観測における鹿島宇宙技術センターの 34m アンテナの運用に参加した。今年度は、鹿島局アンテナも用いた VLBI 観測が 2017 年 11 月 27-28 日、2017 年 12 月 5-6 日の 2 度実施された。当日は、現地・鹿島宇宙技術センターに赴き、観測の実施、34m アンテナの監視等を行った。観測は無事成功し、現在 PI により解析中である。

(2) 鏡面能率測定による鏡面精度の算出

電波望遠鏡の鏡面精度を求める方法は複数ある。その一つに、複数の周波数帯域に対する電波望遠鏡の開口能率を測定し、その測定値からアンテナの鏡面精度を算出する方法がある。この手法を用いて鹿島局 34m アンテナの鏡面精度の算出を行った。2017 年 12 月 29-30 日に観測を実施し、データの取得に成功した。現在、過去の異なる周波数帯域のデータも踏まえて解析を行い、34m アンテナの鏡面精度の算出を行っているところである。

<論文>

1. Morokuma, T., Tanaka, M., Tanaka, Y. T., Itoh, R., Tominaga, N., Gandhi, P., Pian, E., Mazzali, P., Ohta, K., Matsumoto, E., Shibata, T., Akimoto, H., Akitaya, H., Ali, G. B., Aoki, T., Doi, M., Ebisuda, N., Essam, A., Fujisawa, K., Fukushima, H., Goda, S., Gouda, Y., Hanayama, H., Hashiba, Y., Hashimoto, O., Hayashida, K., Hiratsuka, Y., Honda, S., Imai, M., Inoue, K., Ishibashi, M., Iwata, I., Izumiura, H., Kanda, Y., Kawabata, M., Kawaguchi, K., Kawai, N., Kokubo, M., Kuroda, D., Maehara, H., Mito, H., Mitsuda, K., Miyagawa, R., Miyaji, T., Miyamoto, Y., Morihana, K., Moritani, Y., Morokuma-Matsui, K., Murakami, K., Murata, K. L., Nagayama, T., Nakamura, K., Nakaoka, T., Niinuma, K., Nishimori, T., Nogami, D., Oasa, Y., Oda, T., Ohshima, T., Saito, Y., Sakata, S., Sako, S., Sarugaku, Y., Sawada-Satoh, S., Seino, G., Sorai, K., Soyano, T., Taddia, F., Takahashi, J., Takagi, Y., Takaki, K., Takata, K., Tarusawa, K., Uemura, M., Ui, T., Urago, R., Ushioda, K., Watanabe, J., Watanabe, M., Yamashita, S., Yanagisawa, K., Yonekura, Y., Yoshida, M., "OISTER Optical and Near-Infrared Monitoring Observations of a Peculiar Radio-Loud Active Galactic Nucleus SDSS J110006.07+442144.3", Publications of the Astronomical Society of Japan, 69, pp.82:1-20, 2017
2. Motogi, K., Hirota, T., Sorai, K., Yonekura, Y., Sugiyama, K., Honma, M., Niinuma, K., Hachisuka, K., Fujisawa, K., Walsh, A. J., "A Face-on Accretion System in High-mass Star Formation: Possible Dusty Infall Streams within 100 AU", The Astrophysical Journal, 849, pp.23:1-13, 2017
3. Hatakeyama, T., Kuno, N., Sorai, K., Kaneko, H., Miyamoto, Y., Muraoka, K., Takeda, M., Yanagitani, K., Kishida, N., Umei, M., Tanaka, T., Tomiyasu, Y., Nakanishi, H., Saita, C., Ueno, S., Salak, D., Matsumoto, N., Morokuma-M., K., Pan, H.-A., Nakai, N., "CO Multi-line Imaging of Nearby Galaxies (COMING). II. Transitions between atomic and molecular gas, diffuse and dense gas, gas and stars in the dwarf galaxy NGC 2976", Publications of the Astronomical Society of Japan, 69, id.67, 2017
4. Yamauchi, A., Miyamoto, Y., Nakai, N., Terashima, Y., Okumura, T., Zhou, B., Taniguchi, K., Kaneko, H., Matsumoto, N., Salak, D., Nishimura, A., Ueno, S., "Discovery of H₂O megamasers in obscured active galactic nuclei", Publications of the Astronomical Society of Japan, 69, L6, 2017
5. Kaneko, H., Kuno, N., Iono, D., Tamura, Y., Tosaki, T., Nakanishi, K., Sawada, T., "Properties of molecular gas in galaxies in the early and mid stages of interaction. II. Molecular gas fraction", Publications of the Astronomical Society of Japan, 69, id.66, 2017
6. Matsuo, M., Nakanishi, H., Minamidani, T., Torii, K., Saito, M., Kuno, N., Sawada, T., Tosaki, T., Kobayashi, N., Yasui, C., Mito, H., Hasegawa, T., Hirota, A., "Discovery of a

- distant molecular cloud in the extreme outer Galaxy with the Nobeyama 45 m telescope”, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 69, L3, 2017
7. Pan, H.-A., Kuno, N., "Variation in GMC Association Properties across the Bars, Spiral Arms, Inter-arms, and Circumnuclear Region of M100 (NGC 4321) Extracted from ALMA Observations”, *The Astrophysical Journal*, 839, id. 133, 18 pp., 2017
 8. Watanabe, Y., Nishimura, Y., Harada, N., Sakai, N., Shimonishi, T., Aikawa, Y., Kawamura, A., Yamamoto, S., "Molecular-cloud-scale Chemical Composition. I. A Mapping Spectral Line Survey toward W51 in the 3 mm Band”, *The Astrophysical Journal*, 845, id. 116, 30 pp., 2017
 9. Sakai, N., Oya, Y., Higuchi, A., Aikawa, Y., Hanawa, T., Ceccarelli, C., Lefloch, B., López-S., A., Watanabe, Y., Sakai, T., Hirota, T., Caux, E., Vastel, C., Kahane, C., Yamamoto, S., "Vertical structure of the transition zone from infalling rotating envelope to disc in the Class 0 protostar, IRAS 04368+2557”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters*, 467, L76-L80, 2017
 10. Umemoto, T., Minamidani, T., Kuno, N., Fujita, S., Matsuo, M., Nishimura, A., Torii, K., Tosaki, T., Kohno, M., Kuriki, M., Tsuda, Y., Hirota, A., Ohashi, S., Yamagishi, M., Handa, T., Nakanishi, H., Omodaka, T., Koide, N., Matsumoto, N., Onishi, T., Tokuda, K., Seta, M., Kobayashi, Y., Tachihara, K., Sano, H., Hattori, Y., Onodera, S., Oasa, Y., Kamegai, K., Tsuboi, M., Sofue, Y., Higuchi, A. E., Chibueze, J. O., Mizuno, N., Honma, M., Muller, E., Inoue, T., Morokuma-M., K., Shinnaga, H., Ozawa, T., Takahashi, R., Yoshiike, S., Costes, J., Kuwahara, S., “FOREST unbiased Galactic plane imaging survey with the Nobeyama 45 m telescope (FUGIN). I. Project overview and initial results, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 69, id.78, 2017
 11. Ando, R., Nakanishi, K., Kohno, K., Izumi, T., Martín, S., Harada, N., Takano, S., Kuno, N., Nakai, N., Sugai, H., Sorai, K., Tosaki, T., Matsubayashi, K., Nakajima, T., Nishimura, Y., Tamura, Y., “Diverse Nuclear Star-forming Activities in the Heart of NGC 253 Resolved with 10-pc-scale ALMA Images”, *The Astrophysical Journal*, 849, article id. 81, 11 pp., 2017
 12. Salak, D., Tomiyasu, Y., Nakai, N., Kuno, N., Miyamoto, Y., Kaneko, H., “Evolution of Molecular Clouds in the Superwind Galaxy NGC 1808 Probed by ALMA Observations”, *The Astrophysical Journal*, Volume 849, Issue 2, article id. 90, 20 pp., 2017
 13. Watanabe, Y., Sakai, N., López-Sepulcre, A., Sakai, T., Hirota, T., Liu, S.-Y., Su, Y.-N., Yamamoto, S., ” Discovery of Striking Difference of Molecular-emission-line Richness in the Potential Proto-binary System NGC 2264 CMM3”, *The Astrophysical Journal*, 847, article id. 108, 8 pp., 2017
 14. Nishimura, Y., Watanabe, Y., Harada, N., Shimonishi, T., Sakai, N., Aikawa, Y., Kawamura, A., Yamamoto, S., “Molecular-cloud-scale Chemical Composition. II.

- Mapping Spectral Line Survey toward W3(OH) in the 3 mm Band”, The Astrophysical Journal, 848, article id. 17, 18 pp., 2017
15. Oya, Y., Moriwaki, K., Onishi, S., Sakai, N., López-Sepulcre, A., Favre, C., Watanabe, Y., Ceccarelli, C., Lefloch, B., Yamamoto, S., “Chemical and Physical Picture of IRAS 16293–2422 Source B at a Sub-arcsecond Scale Studied with ALMA”, The Astrophysical Journal, 854, article id. 96, 19 pp., 2018
 16. Soma, T., Sakai, N., Watanabe, Y., Yamamoto, S., “Complex Organic Molecules in Taurus Molecular Cloud-1”, The Astrophysical Journal, 854, article id. 116, 11 pp., 2018
 17. Nitta, T., Sekimoto, Y., Noda, K., Sekiguchi, S., Shu, S., Matsuo, H., Dominjon, A., Naruse, M., Kuno, N., Nakai, N., “Broadband Pillar-Type Antireflective Subwavelength Structures for Silicon and Alumina”, IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, Volume 7, Issue 3, pp.295—301, 2017
 18. Miyamoto, Y., Nakai, N., Seta, M., Salak, D., Nagai, M., Kaneko, H., “ALMA multiline observations toward the central region of NGC 613”, Publications of the Astronomical Society of Japan, 69, id.83, 2017
 19. López-Sepulcre, A., Saka, N., Neri, R., Imai, M., Oya, Y., Ceccarelli, C., Higuchi, A.E., Aikawa, Y., Bottinelli, S., Caux, E., Hirota, T., Kahane, C., Lefloch, B., Vastel, C., Watanabe, Y., Yamamoto, S., “Complex organics in IRAS 4A revisited with ALMA and PdBI: Striking contrast between two neighbouring protostellar cores”, Astronomy & Astrophysics, 606, article id. 121, 12 pp., 2017

〈学位論文〉

修士論文

数理物質科学研究科・物理学専攻

1. 飯田美幸：大質量星形成領域 W3 のアンモニア観測による星形成史の研究
2. 佐藤佑哉： ^{12}CO と ^{13}CO の観測による近傍銀河の分子ガスに関する統計的研究
3. 服部将吾：野辺山 45m 電波望遠鏡用 MKID カメラで用いるシリコンレンズの 100-GHz 帯反射防止膜の開発
4. 村山洋佑：野辺山 45 m 電波望遠鏡搭載用 100-GHz 帯電波カメラの 109 素子 MKID アレイの開発
5. 翟 光遠：野辺山 45 m 電波望遠鏡搭載用 MKID カメラのデータ取得系の開発

教育研究科教育専攻理科教育コース

1. 小田昌史：つくば 32m 電波望遠鏡を用いた銀河面の分子ガスの物理状態に関する研究

学士論文

1. 石田智大：サブミリ波帯 MKID カメラ用シリコンレンズのサブ波長構造を用いた反射防止コーティングの設計
2. 大塚宏樹：銀河のダスト放射スペクトルの解析精度に関する研究

3. 小野雄太：野辺山 45m 電波望遠鏡搭載用 MKID カメラの検出器雑音の評価
4. 小松崎龍聖：CO 観測による渦状銀河 NGC628 の分子ガスの物理状態に関する研究
5. 鈴木隆司：野辺山 45m 電波望遠鏡搭載用 MKID カメラの即時監視システムの開発
6. 樋川遼太郎：野辺山 45m 電波望遠鏡用 100GHz 帯 MKID カメラによる大気放射の特性評価
7. 山崎まどか：水蒸気メーザーのデータ解析による銀河 IC2560 のメーザー円盤と距離測定の研究
8. 渡邊祐也：水蒸気メーザーの解析による活動銀河核のブラックホールとメーザー円盤の質量の決定

<国際会議講演>

1. Dominjon, A., Sekimoto, Y., Noguchi, T., Nagai, M., Shan, W. L., Nakai, N., Kuno, N., Nitta, T., Murayama, Y., Hattori, S., Shu, S., Sekiguchi, S., "Development and Characterization of a MKID Camera for the Nobeyama Radio Observatory 45m Telescope", 16th International Superconductive Electronics Conference (ISEC), Sorrento, ITALY, 2017
2. Nitta, T., Sekimoto, Y., Noda, K., Hasebe, T., Sekiguchi, S., Matsuo, H., Nagai, M., Dominjon, A., Shan, W., Murayama, Y., Hattori, S., Naruse, M., Kuno, N., Nakai, N., "Pyramid-type Antireflective Structures on Silicon Lenses for Millimeter-wave Observations", 17th International Workshop on Low Temperature Detectors, Kurume, Fukuoka, Japan, July 17-21, 2017
3. Murayama Y., "Development of Microwave Kinetic Inductance Detector for Astronomical Observations," The inaugural symposium of the Tomonaga Center of the History of the Universe, Ibaraki, Japan, March 27, 2018

<学会・国内研究会での講演>

1. 飯田美幸, 中井直正, 齋藤弘雄, 瀬田益道, 永井誠, 他つくば 32m アンテナ観測グループ、「巨大分子雲 W3 のアンモニア観測」、日本天文学会 2017 年秋季年会、2017 年 9 月 11 日、北海道大学
2. 齋藤弘雄, 久野成夫, 梅本智文, 鳥居和史, 西村淳, 長谷川哲夫, 松尾光洋, 南谷哲宏, 河野樹人, 西村淳, 藤田真司, 半田利弘, 中西裕之, 瀬田益道, 小野寺幸子, 濤崎智佳, 大西利和, 徳田一起, 他 FUGIN チーム、「NRO 銀河面サーベイプロジェクト(FUGIN): 銀河系内域における分子雲同定」、日本天文学会 2017 年秋季年会、2017 年 9 月 11 日、北海道大学
3. 徂徠和夫, 久野成夫, 村岡和幸, 宮本祐介, 金子紘之, 中西裕之, 中井直正, 柳谷和希, 田中隆広, 佐藤佑哉, Dragan Salak, 梅井迪子, 諸隈佳菜, 松本尚子, 上野紗英子, Pan

- Hsi-An, 野間勇斗, 竹内努, 依田萌, 黒田麻友, 保田敦司, 矢島義之, 大井渚, 柴田修吾, 瀬田益道, 渡邊祥正, 馬路博之, 瀬川陽子, 田代貴美, 武田美保, 岸田望美, 畠山拓也, 富安悠人, 齊田智恵, 他 COMING メンバー、「NRO レガシープロジェクト COMING(11): 観測のまとめ」、日本天文学会 2017 年秋季年会、2017 年 9 月 12 日、北海道大学
4. 金子紘之, 宮本祐介, 徂徠和夫, 矢島義之, 柴田修吾, 中井直正, 久野成夫, 渡邊祥正, 田中隆広, 佐藤佑哉, 保田敦司, 大井渚, 諸隈佳菜, 竹内努, 依田萌, 村岡和幸, 黒田麻友, Dragan Salak, 野間勇斗, 瀬田益道, 松本尚子, 中西裕之, 上野紗英子, Pan Hsi-An, ほか COMING メンバー、「NRO レガシープロジェクト COMING (12): 銀河群による近傍銀河のガスの性質に与える環境効果の研究」、日本天文学会 2017 年秋季年会、2017 年 9 月 12 日、北海道大学
 5. 矢島義之, 徂徠和夫, 久野成夫, 村岡和幸, 宮本祐介, 金子紘之, 田中隆広, 柳谷和希, 佐藤佑哉, 他 COMING メンバー、「NRO レガシープロジェクト COMING(13): 棒渦巻銀河 NGC 4303 における分子ガスの物理状態」、日本天文学会 2017 年秋季年会、2017 年 9 月 12 日、北海道大学
 6. 黒田麻友, 村岡和幸, 徂徠和夫, 矢島義之, 柴田修吾, 中井直正, 久野成夫, 渡邊祥正, 田中隆広, 佐藤佑哉, 保田敦司, 諸隈佳菜, 宮本祐介, 金子紘之, 竹内努, 依田萌, Dragan Salak, 野間勇斗, 松本尚子, 中西裕之, 上野紗英子, Pan Hsi-An, 他 COMING メンバー、「NRO レガシープロジェクト COMING(14): 近傍棒渦巻銀河の円盤領域における分子ガス速度分散と星形成効率の関係」、日本天文学会 2017 年秋季年会、2017 年 9 月 12 日、北海道大学
 7. 佐藤佑哉, 久野成夫, 田中隆広, 保田敦司, 中井直正, 徂徠和夫, 矢島義之, 金子紘之, 宮本祐介, 村岡和幸, 黒田麻友, 依田萌, Dragan SALAK, 上野紗英子 他 COMING メンバー、「NRO レガシープロジェクト COMING(15): $^{12}\text{CO}(1-0)$ と $^{13}\text{CO}(1-0)$ を用いた星形成則の比較」、日本天文学会 2017 年秋季年会、2017 年 9 月 12 日、北海道大学
 8. 宮本祐介, 金子紘之, 徂徠和夫, 久野成夫, 中井直正, 田中隆広, 佐藤佑哉, 保田敦司, Dragan SALAK, 瀬田益道, 野間勇斗, 村岡和幸, 黒田麻友, 竹内努, 依田萌, 諸隈佳菜, 松本尚子, 中西裕之, 上野紗英子, Pan Hsi-An, 他 COMING メンバー、「NRO レガシープロジェクト COMING(16): 近傍渦巻銀河 NGC 628 におけるガスの速度ベクトル」、日本天文学会 2017 年秋季年会、2017 年 9 月 12 日、北海道大学
 9. Dragan Salak, Yuto Tomiyasu, Naomasa Nakai, Nario Kuno, Yusuke Miyamoto, Hiroyuki Kaneko、「Distribution of dense molecule」、日本天文学会 2017 年秋季年会、2017 年 9 月 12 日、北海道大学
 10. 中西康一郎, 松林和也, 徂徠和夫, 中井直正, 久野成夫, 河野孝太郎, 安藤亮, 菅井肇、「High angular resolution and high sensitivity millimeter-wave continuum imaging toward the NGC 253 starburst nucleus」、日本天文学会 2017 年秋季年会、2017 年 9 月 12 日、北海道大学

11. 安藤亮, 中西康一郎, 河野孝太郎, 泉拓磨, Sergio Martin, 原田ななせ, 高野秀路, 久野成夫, 中井直正, 菅井肇, 徂徠和夫, 濤崎智佳, 松林和也, 中島拓, 田村陽一, 西村優里, 「5pc 分解能で見た近傍星形成銀河 NGC 253 中心部の星形成活動の多様性(2)」, 日本天文学会 2017 年秋季年会、2017 年 9 月 13 日、北海道大学
12. 渡邊祥正, 西村優里, 坂井南美, 徂徠和夫, 原田ななせ, 久野成夫, 山本智, 「NGC 3627 における分子雲同士の相互作用の化学組成への影響」、日本天文学会 2017 年秋季年会、2017 年 9 月 13 日、北海道大学
13. 田中隆広, 徂徠和夫, 柳谷和希, 金子紘之, 藤田真司, 久野成夫, 村岡和幸, 宮本祐介, 佐藤佑哉, 矢島義之, 依田萌, 黒田麻友, 他 COMING メンバー, 「NRO レガシープロジェクト COMING (10): 自動リダクションシステムの開発」、日本天文学会 2017 年秋季年会、2017 年 9 月 11 日、北海道大学
14. 永井誠, 新田冬夢, 服部将吾, 村山洋佑, Zhai Guangyuan, Pranshu Mandal 中井直正, 久野成夫, 関本裕太郎, 木内等, 野口卓, 松尾宏, Dominjon Agnes, 福嶋美津広, 三ツ井健司, 福田武夫, 岩下光, 関口繁之, 成瀬雅人, 前川淳, 南谷哲宏, 御子柴廣, 藤茂, 宮澤千栄子, 齋藤正雄, 45m 運用メンバー, 「野辺山 45m 電波望遠鏡搭載用 MKID カメラの搭載試験」、日本天文学会 2017 年秋季年会、2017 年 9 月 11 日、北海道大学
15. Zhai Guangyuan, 永井誠, 新田冬夢, 中井直正, 久野成夫, Pranshu Mandal, 村山洋祐, 服部将吾, 関本裕太郎, 木内等, 野口卓, 松尾宏, Dominjon Agnes, 関口繁之, 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 カメラの解析パイプライン」、日本天文学会 2017 年秋季年会、2017 年 9 月 11 日、北海道大学
16. 米倉覚則, 秋田谷洋, 齋藤悠, 青木健悟, 山口貴大, 會川航平, 大島理穂, 齋藤偉, 百瀬宗武, 小川英夫, 藤沢健太, 高羽浩, 中井直正, 面高俊宏, 本間希樹, 小林秀行, 杉山孝一郎, 他大学間連携 VLBI group, 「高萩/ 日立 32 m 電波望遠鏡の整備状況(16)」, 日本天文学会 2017 年秋季年会、2017 年 9 月 11 日、北海道大学
17. 鳥居和史, 白崎裕治, Zapart Christopher, 宮本祐介, 金子紘之, 徂徠和夫, 南谷哲宏, 梅本智文, 大石雅寿, 「Japanese Virtual Observatory (JVO) を通じた野辺山 45m 電波望遠鏡レガシー プロジェクト COMING および FUGIN の観測データ公開プランについて」, 日本天文学会 2018 年春季年会, 2018 年 3 月 14 日-17 日, 千葉大学
18. 諸隈佳菜, 諸隈智貴, 児玉忠恭, 中西康一郎, 小山佑世, 小山舜平, 山下拓時, 中西裕之, 徂徠和夫, “HI & H₂ gas properties of ~80 Virgo galaxies on the phase-space diagram”, 日本天文学会 2017 年秋季年会, 2017 年 9 月 11 日, 北海道大学
19. 徂徠和夫, 他 COMING メンバー, “CO Multi-line Imaging of Nearby Galaxies, COMING”, NRO45m/ASTE Single Dish Science Workshop 2017, 2017 年 8 月 1 日, 国立天文台野辺山宇宙電波観測所
20. 久野成夫, “銀河スケールでの分子ガス分布”, Science Workshop 2018 on FUGIN: The Galactic Plane Legacy Survey for Molecular Clouds, 2018 年 2 月 26-27 日、名古屋大学

21. 久野成夫、“NRO 銀河面 CO サーベイ FUGIN”、天の川銀河研究会 2017、2017 年 10 月 24－26 日、鹿児島大学
22. 久野成夫、“南極望遠鏡”、宇宙電波懇談会シンポジウム FY2017:「未来を拓く技術開発とその将来展望」、2018 年 3 月 19－20 日、国立天文台
23. 村山洋佑、新田冬夢、服部将吾、中井直正、久野成夫、Pranshu Mandal, Guangyuan Zhai(筑波大学)、関本裕太郎(宇宙研)、永井誠、松尾宏、Dominjon Agnes、野口卓、Wenlei Shan、江崎翔平、宮地晃平(国立天文台)、成瀬雅人(埼玉大学) “野辺山 45m 電波望遠鏡用 100-GHz 帯カメラの 109 素子 Al-MKID の製作と評価”、第 18 回ミリ波サブミリ波受信機ワークショップ、2018 年 2 月 22－23 日、国立天文台
24. 河野樹人、立原研悟、藤田真司、西村淳、大浜晶生、福井康雄(名古屋大)、鳥居和史、梅本智文、南谷哲宏、松尾光洋(国立天文台野辺山)、久野成夫、栗木美香(筑波大)、津田裕也(明星大)、徳田一起(大阪府立大/国立天文台)、切通僚介、大西利和(大阪府立大)、FUGIN チーム、“NRO 銀河面サーベイプロジェクト(FUGIN): 爆発的星形成領域 W43 の CO 輝線観測 I”、日本天文学会 2018 年春季年会、2018 年 3 月 16 日、千葉大学
25. 藤田真司、西村淳、河野樹人、立原研悟、大浜晶生、佐野栄俊、林克洋、榎谷玲依、吉池智史、堤大陸、大河一貴、福井康雄(名古屋大)、久野成夫(筑波大)、梅本智文、南谷哲宏、鳥居和史(NAOJ)、山岸光義(ISAS/JAXA)、松尾光洋(鹿児島大)、濤崎智佳(上越教育大)、津田裕也(明星大)、他 FUGIN チーム、“NRO 銀河面サーベイプロジェクト(FUGIN): Spitzer Bubble N4 の星形成”、日本天文学会 2018 年春季年会、2018 年 3 月 16 日、千葉大学
26. 佐藤一樹(東京大学)、長谷川哲夫、梅本智文、南谷哲宏、鳥居和史、阪本成一(国立天文台)、久野成夫(筑波大学)、半田利弘(鹿児島大学)、瀬田益道(関西学院大学)、他 FUGIN チーム、“NRO 銀河面サーベイプロジェクト(FUGIN): ホットコアの無バイアスサーベイ (2) 解析手法の改良と銀経 10° - 20° の解析結果”、日本天文学会 2018 年春季年会、2018 年 3 月 16 日、千葉大学
27. 佐野栄俊、吉池智史、山根悠望子、長屋拓郎、西村淳、山本宏昭、田村陽一、立原研悟、福井康雄(名古屋大学)、久野成夫(筑波大学)、鳥居和史、南谷哲宏、梅本智文(国立天文台)、瀬田益道(関西学院大)、Nigel Maxted(ニューサウスウェールズ大学)、Gavin Rowell(アデレード大学)、他 FUGIN チーム、“シェル型 TeV ガンマ線超新星残骸 HESS J1912+101 に付随する分子雲の発見”、日本天文学会 2018 年春季年会、2018 年 3 月 16 日、千葉大学
28. 小出風人、中西裕之(鹿児島大学)、坂井伸行(国立天文台水沢)、倉山智春(帝京科学大学)、羽部朝男、島和宏(北海道大学)、梅本智文、南谷哲宏、鳥居和史、松尾光洋(国立天文台野辺山)、藤田真司、西村 淳、河野樹人(名古屋大学)、久野成夫、栗木美香(筑波大学)、津田裕也(明星大学)、FUGIN チーム、“野辺山 45m 鏡と VERA による銀河系外縁部星形成領域 WB886 の観測的研究”、日本天文学会 2018 年春季年会、2018 年 3 月 16 日、千葉大学
29. 野間勇斗、Dragan Salak、瀬田益道(関学大)、徂徠和夫、矢島義之、柴田修吾(北大)、宮本祐介、金子紘之(国立天文台)、田中隆広、佐藤佑哉、久野成夫、保田敦司、中井直正(筑

- 波大)、竹内 努、依田萌(名古屋大)、村岡和幸、黒田麻友 (大阪府立大)、中西裕之、上野紗英子(鹿児島大)、他 COMING メンバー、“NRO レガシープロジェクト COMING(17): 近傍銀河における分子ガス速度場 のフーリエ解析”、日本天文学会 2018 年春季年会、2018 年 3 月 14 日、千葉大学
30. 佐藤佑哉, 久野成夫, 田中隆広, 保田敦司, 中井直正, 渡邊祥正 (筑波大学), 徂徠和夫, 矢島義之, 柴田修吾(北海道大学), 金子紘之, 宮本祐介 (国立天文台), 村岡和幸, 黒田麻友 (大阪府立大学), 竹内努, 依田萌 (名古屋大学), Dragan SALAK, 野間勇斗 (関西学院大学), 中西裕之, 上野紗英子 (鹿児島大学) 他 COMING メンバー、“NRO レガシープロジェクト COMING(18):近傍銀河の $^{12}\text{CO}(J=1-0)/^{13}\text{CO}(J=1-0)$ 比に関する統計的研究”、日本天文学会 2018 年春季年会、2018 年 3 月 14 日、千葉大学
31. 宮本祐介 (国立天文台野辺山)、瀬田益道 (関西学院大)、中井直正、渡邊祥正 (筑波大学)、Dragan SALAK(関西学院大)、石井峻 (国立天文台)、“ALMA による近傍銀河 NGC 613 中心領域の [CI] 観測”、日本天文学会 2018 年春季年会、2018 年 3 月 15 日、千葉大学
32. 村山洋佑, 新田冬夢, 服部将吾, 中井直正, 久野成夫, Pranshu Mandal, Guangyuan Zhai (筑波大学), 関本裕太郎 (宇宙研), 永井誠, 野口卓, 江崎翔平, 宮地晃平, Wenlei Shan, Dominjon Agnes, 松尾宏 (国立天文台), 成瀬雅人 (埼玉大学), 関口繁之 (東京大学)、“野辺山 45 m 電波望遠鏡搭載用 100-GHz 帯電波カメラの MKID アレイ開発”、日本天文学会 2018 年春季年会、2018 年 3 月 15 日、千葉大学
33. 服部将吾、新田冬夢、村山洋佑、中井直正、久野成夫、Zhai Guangyuan、Mandal Pranshu (筑波大学)、関本裕太郎、長谷部孝 (宇宙航空研究開発機構)、永井誠、野口卓、松尾宏、福島美津広、三ツ井健司 (国立天文台)、“100 GHz 帯連続波カメラ冷却光学系で用いる Si レンズの反射防止コーティングの開発”、日本天文学会 2018 年春季年会、2018 年 3 月 15 日、千葉大学
34. 佐藤雄登, 中井直正, 久野成夫 (筑波大学), 瀬田益道 (関西学院大学), 長崎岳人 (KEK), 関本裕太郎 (ISAS/JAXA)、“南極望遠鏡用 500GHz 帯 2SB 受信機の間周波数 (IF) 帯域の広帯域化”、日本天文学会 2018 年春季年会、2018 年 3 月 15 日、千葉大学
35. 新田冬夢 他, “Development of 100-GHz band MKID camera for Nobeyama 45m telescope”, NRO45m/ASTE Single Dish Science Workshop 2017, 2017 年 8 月 2 日, 国立天文台野辺山宇宙電波観測所
36. 新田冬夢、“南極テラヘルツ望遠鏡計画に向けた広視野電波カメラの開発”、宇宙電波懇談会シンポジウム FY2017:「未来を拓く技術開発とその将来展望」、2018 年 3 月 19-20 日、国立天文台

＜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「大規模電波カメラによる「あかり」北極域の掃天観測」2014~2018 年度 (H29 交付金 90 万円)
2. 科学研究費補助金 (若手研究 B) : 渡邊祥正 (研究代表者)「巨大分子雲形成と星形成史

を繋ぐ化学診断法の開拓」2016～2017年度（H29 交付金 130 万円）

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（研究代表者）（交付金 32.9 万円）
4. 自然科学研究機構国立天文台：久野成夫（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」（交付金 548.2 万円）
5. 自然科学研究機構国立天文台共同開発研究：新田冬夢（研究代表者）「野辺山 45m 望遠
鏡用 90-110GHz 帯レンズ結合型 MKID カメラの開発」（交付金 240 万円）

＜研究会開催実績＞

1. 宇宙史センター発足シンポジウム部門別ワークショップ
「南極 30m 級テラヘルツ望遠鏡による AGN と爆発的星形成銀河のサイエンス」2018 年
3 月 27 日 筑波大学

＜社会貢献＞

1. 「天文学宇宙の七夕講演会」主催 2017 年 7 月 9 日 イーアスつくば
2. 附属高等学校大学訪問「望遠鏡を作ろう」2017 年 5 月 11 日 筑波大学
3. 南極天文学宇宙講演会「南極からさぐる宇宙」中井直正 2017 年 5 月 14 日 新潟勤労者
総合福祉センター
4. 附属高等学校大学訪問「望遠鏡を作ろう」2017 年 5 月 11 日 筑波大学
5. ひらめき☆ときめきサイエンス「自作の望遠鏡で宇宙を見よう」開催 2017 年 7 月 30
日 筑波大学
6. 南極天文学宇宙講演会「南極からさぐる宇宙」中井直正 2017 年 8 月 12 日 久喜市総合
文化会館
7. 「キッズ本格おしごと体験-天体望遠鏡作り」開催 2017 年 8 月 14 日 イオンモール
つくば
8. 日本天文学会公開講演会「南極で探る宇宙-南極望遠鏡でさぐる銀河の謎」中井直正
2017 年 9 月 10 日 北海道大学
9. PTA 主催講演会「宇宙の構造」中井直正 2017 年 11 月 11 日 竹園西小学校
10. 和歌山県高等学校理科学研究大会「太陽系の外の惑星の発見」中井直正 2017 年 11
月 24 日 和歌山県立教育センター学びの丘
11. 附属高等学校大学訪問「望遠鏡を作ろう」2017 年 5 月 11 日 筑波大学

＜外部委員等＞

中井直正

1. 日本天文学会欧文研究報告編集顧問 ～2019 年 5 月
2. 国立天文台 VLBI 小委員会委員 2010 年 7 月～2018 年 6 月
3. The SCAR AAA SRP Steering Committee 2017 年 1 月～2018 年 12 月

4. 国立極地研究所客員教授 2008 年 5 月～2019 年 3 月

久野成夫

1. 国立天文台プロジェクト評価委員会委員 2014 年 4 月～2018 年 6 月

2. 日本天文学会欧文研究報告編集委員 2009 年 4 月～2018 年 6 月

3. 国立天文台 ALMA 小委員会委員 2008 年 7 月～2017 年 7 月

4. 国立天文台電波専門委員会委員 2016 年 7 月～2018 年 6 月

5. 日本天文学会研究奨励賞選考委員会委員 2017 年 6 月～2019 年 5 月

V. 原子核理論グループ

1. メンバー

教授	矢花一浩、中務 孝
講師	橋本幸男
助教	日野原伸生（国際テニユアトラック）
研究員	鷺山広平、野村昂亮（PD 学振：2017.10 転出）、Guillaume Scamps
学生	大学院生 5 名（うち特別研究学生 1 名）

2. 概要

原子核理論グループは、大きく分けて、核子（陽子・中性子）の多体系である原子核や中性子星の構造・反応・応答などの多核子量子ダイナミクスの研究を推進するグループと、物質科学・光科学・レーザー場（強い電磁場）中における多電子ダイナミクスを研究するグループが存在する。前者では、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。後者では、時間依存密度汎関数理論に基づき、原子・分子と光、物質と強レーザー場との非摂動的な相互作用等、光科学分野の計算科学的研究を行なっている。これら 2 つの分野は、フェルミ粒子の量子多体系計算という観点で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、中性子星の誕生にも関わる爆発的天体現象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。さらに、原子力工学分野や応用分野との連携が重要になってきており、2014 年から、原子炉の高レベル廃棄物の資源化・低減化を最終目的とする ImPACT プログラムに参加し、基礎データへの理論的サポートを行ってきている。我々は、このような幅広い課題に取り組み、分野の枠を超えた研究を推進している。

3. 研究成果

【 1 】 元素合成アルファ過程とサブバリア核融合反応に対する微視的アプローチ（温（サリ－大）、中務）

太陽よりもはるかに重い大質量星の内部では、ヘリウム原子核（アルファ粒子）を種としたアルファ過程と呼ばれる元素合成が進行すると考えられている。これらの過程は、クーロン相互作用で反発する原子核同士を融合させる反応であるが、クーロンポテンシャルの障壁を量子トンネル効果ですり抜けることで核融合を実現させている。我々は、この問題に対する微視的アプローチとして、大振幅集団運動の理論である断熱自己無撞着集団座標法(ASCC 法)を用いた手法を開発してきた。原子核一般を記述するエネルギー密度汎関数

を出発点として、何の仮定も置かずに、低エネルギーの多核子反応ダイナミクスを記述する最適な反応経路を導出する。虚時間発展法と有限振幅法を組み合わせた反復法を用いて、アルファ反応や比較的軽い核同士の核融合反応経路を決定し、その上で核融合の集団ハミルトニアンを構築する。最後に量子化を行って量子トンネル融合断面積を計算した。図1には、astrophysical S 因子と呼ばれる核構造に関わる因子を示す。

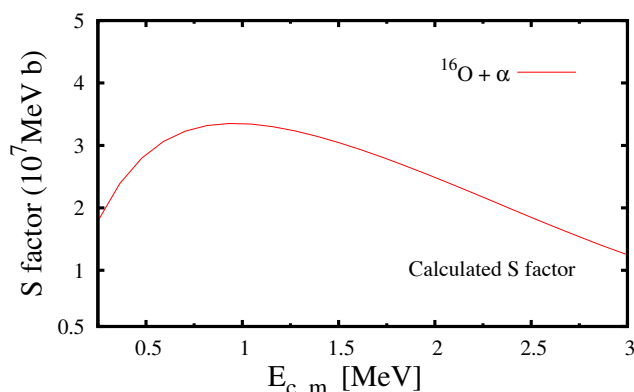


図1: $^{16}\text{O} + \alpha \rightarrow ^{20}\text{Ne}$ の核融合反応に対して計算された astrophysical S 因子。横軸は重心系での衝突エネルギーで単位は MeV。

【 2 】 原子核形状の系統的計算（江幡(北大)、中務）

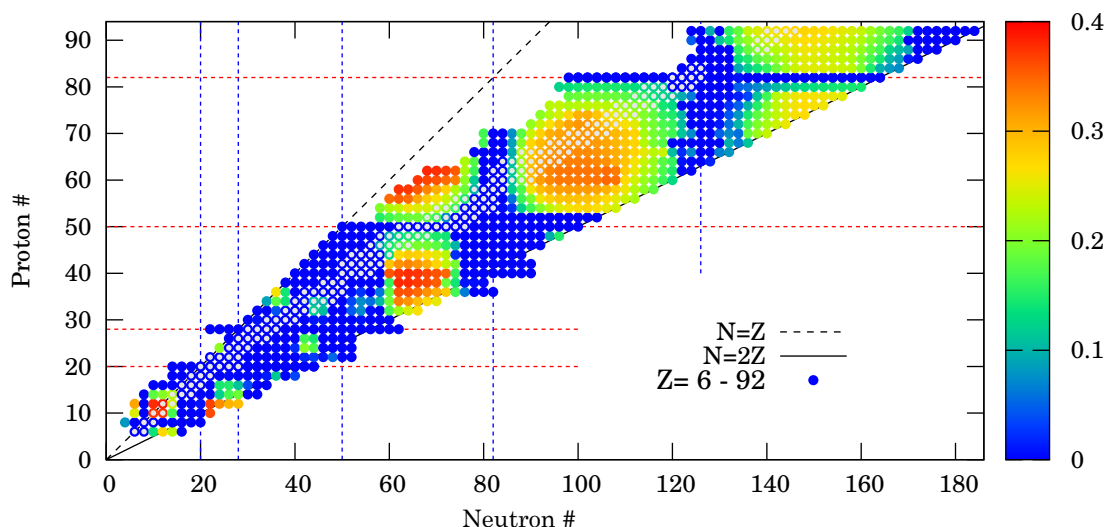


図2: 原子核の四重極変形の度合いを表すパラメータ β_2 の大きさを核図表の上に色分けで図示したもの。青が球形を表し、赤は大きく変形した原子核を表している。白抜きの円で表示されたものは自然界に存在する安定核。

原子核の形を系統的に調査するため、エネルギー密度汎関数に BCS 理論を組み合わせた理論を 3 次元空間表示によって計算し、基底状態に現れる形状を予言した。完全自己無撞着・非制限の計算であり、全エネルギーを最小化することを条件として課した変分により、球形、軸対称性を持ったプロレート型・オブレート型変形、軸対称性を破った三軸非対称

変形など、様々な形状が基底状態に出現した。特に核図表の上で、 $84 < N < 88$ 、 $54 < Z < 70$ の領域、 $130 < N < 136$ 、 $84 < Z < 92$ の領域にはパリティ対称性を自発的に破った八重極変形が現れることが示された。これらは実験データや過去の別の手法に基づく計算と矛盾しない結果である。今回は、これらに加えて、 $130 < N < 136$ 、 $60 < Z < 70$ といった中性子過剰領域にも八重極変形が現れることを予言した（図2）。

【3】対振動状態における集団座標(倪(D2)、中務)

原子核の励起状態の中で、スピン・パリティが 0^+ の状態にはその性質が解明されていない状態が多く存在する。その鍵を握っていると考えられる対相関の集団ダイナミクスを研究するため、これまで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）を用いた研究を行ってきた。今年度は特に、集団模型の微視的導出とその量子化に関する研究を行った。対振動状態は、ゲージ対称性を破る秩序パラメータであるエネルギー・ギャップの大きさが揺らぐ（振動する）集団的状态であると解釈することができるが、現実的な原子核においては、比較的集団性が小さいため、通常の正準量子化を用いた集団模型の量子化ではうまく記述できないことが多い。この問題点を解決することを目標に、時間依存ダイナミクスのフーリエ分解、経路積分法に基づく準古典量子化などを試みて、厳密解と比較した。この結果、経路積分に基づく準古典量子化法が、弱相関から強相関、関与する粒子数の多少に関わらず全ての領域において、厳密解と近い励起エネルギーおよび2粒子遷移確率を再現することを示した（図3）。現在、この手法の拡張と現実的な系への応用を進めている。

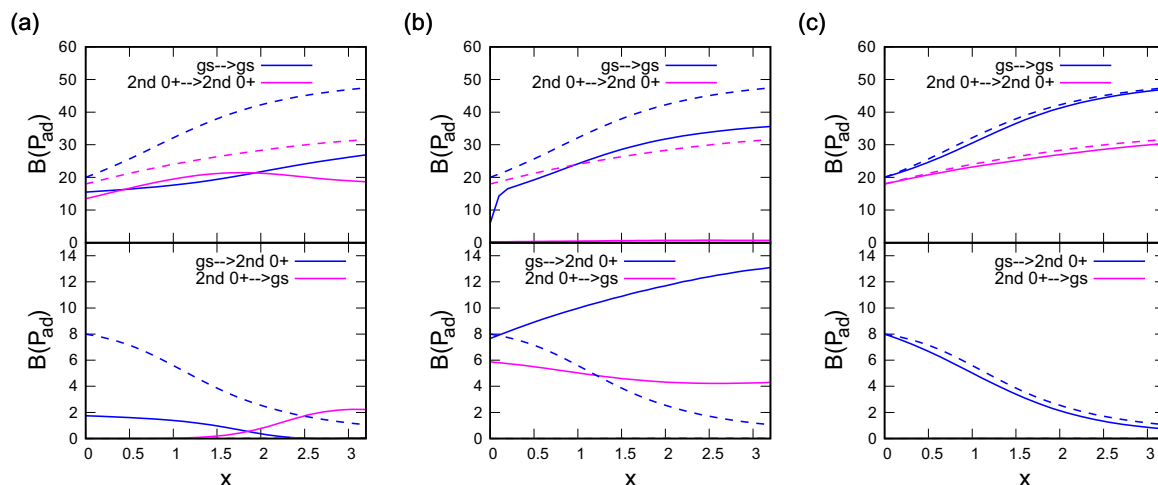


図3：対相関模型での2粒子移行反応に関わる行列要素の計算（粒子数が6から8への遷移）。集団ハミルトニアンをの量子化法として、(a) 正準量子化法、(b) フーリエ分解法、(c) 経路積分準古典近似法を用いた結果を示す。点線が厳密計算の結果を示している。

【4】中性子星内殻における1次元周期構造と有効質量(柏葉(D1)、中務)

中性子星の内殻（インナー・クラスト）と呼ばれる表面に近い領域では、中性子の海の中に原子核が周期的に配置された構造を取ると予想されている。中心に近づいていくと、やがて一様な核物質になると考えられるが、その直前には、パスタ相と呼ばれる奇妙な形の原子核が現れると考えられている。その中でも、スラブ相（ラザーニャ相）と呼ばれる板状の原子核が現れる領域があると予想されており、昨年度、このスラブ相に対して、厳密な境界条件を考慮した完全自己無撞着な密度汎関数計算を実行することに成功した。固体物理で行われているバンド計算を、自己無撞着に核子自身が作り出した周期的ポテンシャルの中での核子（陽子・中性子）の運動に応用したもので、自己無撞着な計算は世界初の成果である（図4）。様々な密度における計算を実行し、周期的ポテンシャルがもたらすブラッグ散乱の効果である巨視的な有効質量を求めた。その結果、内殻中で原子核からこぼれ落ちた中性子の一部は、原子核に引きずられており、有効質量が真空中の中性子質量に比べて5%から10%程度大きくなることが分かった。この有効質量の効果は、中性子星パルサーに観測されているグリッチの微視的メカニズムに関連して注目されている。特に、クラストに存在する超流動中性子の渦糸ダイナミクスに起源を求める解釈に対して、非常に大きな影響がある。

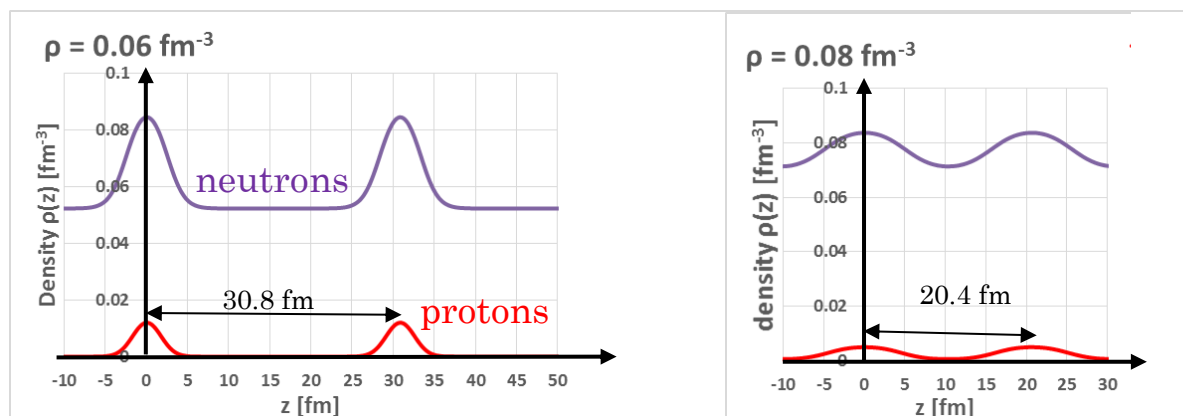


図4：中性子星インナー・クラストにおける板状の原子核が並んだスラブ相に対する密度汎関数バンド計算。左が平均核子密度 $\rho = 0.06 \text{ fm}^{-3}$ 、右が $\rho = 0.08 \text{ fm}^{-3}$ に対する結果、中性子および陽子の密度分布を板に垂直な方向をz軸としてプロット。密度が大きくなることによってスラブ間隔が小さくなり、一様な核物質に近づいていることがわかる。

【5】5次元集団模型による解析と結合チャンネルへの拡張(八百板(M2)、中務)

ボーア・モッテルソンの5次元集団模型は、静的・動的な四重極変形と回転運動を記述できる模型として、原子核の低エネルギー・スペクトルに成功した模型である。様々なデータが近年蓄積されたことで、振動・回転の単純な描像では説明できない状態が多々あることが指摘されている。その中の一つが変形核におけるベータ振動状態である。E2 遷移強度の非対称性や核子対移行反応などのデータから、平衡変形周りの変形度の振動という伝統的解釈に疑問が投げかけられている。我々は5次元集団模型を用いて、ベータ振動状態の性質を精査した。その結果、形状揺らぎの大きな遷移領域においては、実験データのE2 強度の振る舞いは模型の予言と矛盾しないことを明らかにした。また、模型の拡張にも取り組み、5次元空

間ポテンシャルに多重シートが存在する場合を想定した結合チャネル型の集団模型を開発し、簡単な場合を例に数値解析を実行した。その結果として、断熱・透熱型のダイナミクスを記述できることを確認した。

【 6 】アイソスピン不変な原子核密度汎関数による中性子—陽子対相関(日野原、Sheikh(カシミア大)、Nazarewicz(ミシガン州立大))

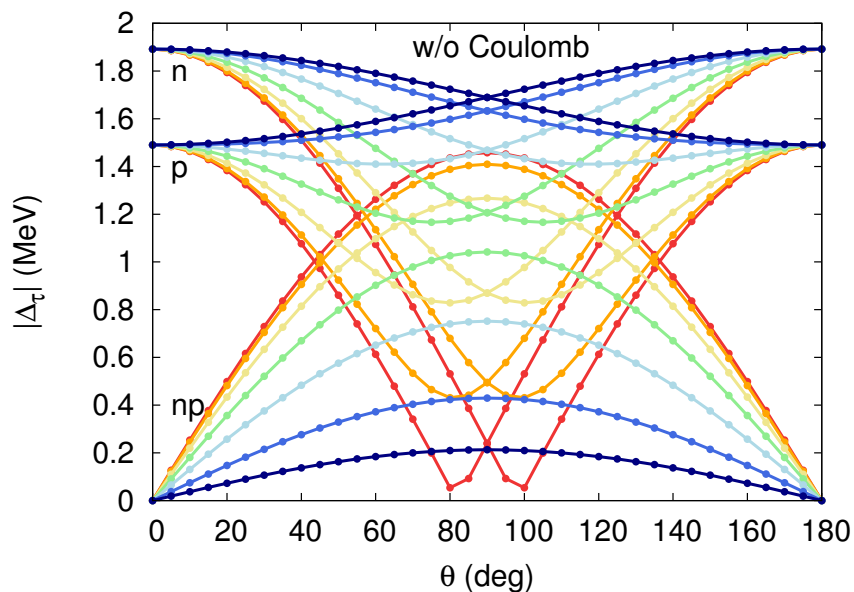


図 5： $A = 48$, $T = 4$ でのアイソバリックアナログ状態での対ギャップのアイソスピン回転での変化。色は最高重み状態($\theta = 0^\circ$)での相対ゲージ角に対応する。

核内の核子は基底状態ではクーパー対を形成し、対凝縮状態となっていることが多いが、中性子と陽子のフェルミエネルギーが異なることから、通常は同種粒子対が凝縮する。一方で陽子過剰不安定核のような中性子と陽子のフェルミエネルギーが近い場合においては中性子—陽子対が凝縮する可能性が議論されている。中性子—陽子対凝縮についてはこれまでは簡単な模型計算による議論のみであり、原子核密度汎関数法に中性子—陽子対密度汎関数を入れたような実際的なものはなかった。中性子と陽子をアイソスピンの固有状態とし、アイソスピン回転に対して不変な局所密度による汎関数の定式化を用いて、軸対称変形を扱える原子核密度汎関数計算コード **HFBTHO** への中性子—陽子対相関の実装を行った。これまでにアイソベクトル型の対相関(中性子対、陽子対、中性子—陽子対)の実装を完了した。アイソバリック・アナログ状態を、同種粒子対凝縮したアイソスピンの最高重み状態($T = T_z$)からのアイソスピン空間での回転として表現したときに、3つのアイソベクトル型の対相関がどのように出現するのかを分析した(図5)。 $T = T_z$ での中性子対相関、陽子対相関の相対ゲージ角のとり方にアイソベクトル型中性子—陽子対相関が強く依

存するが、アイソスピン対称性のため異なった中性子—陽子対相関を持った解が無限に縮退することを示した。この縮退は、アイソスピン対称性を破る Coulomb 力の汎関数を加えることによって破れることも示した。続いて中性子—陽子対相関が存在する場合に中性子および陽子の化学ポテンシャルをラグランジュ未定乗数として決定できるようにコード開発を行った。これを用いることで陽子過剰核の基底状態での対凝縮の計算が実行可能となった。

【 7 】 巨大共鳴のベンチマーク計算(日野原、Kortelainen(ユバスキュラ大)、Nazarewicz(ミシガン州立大))

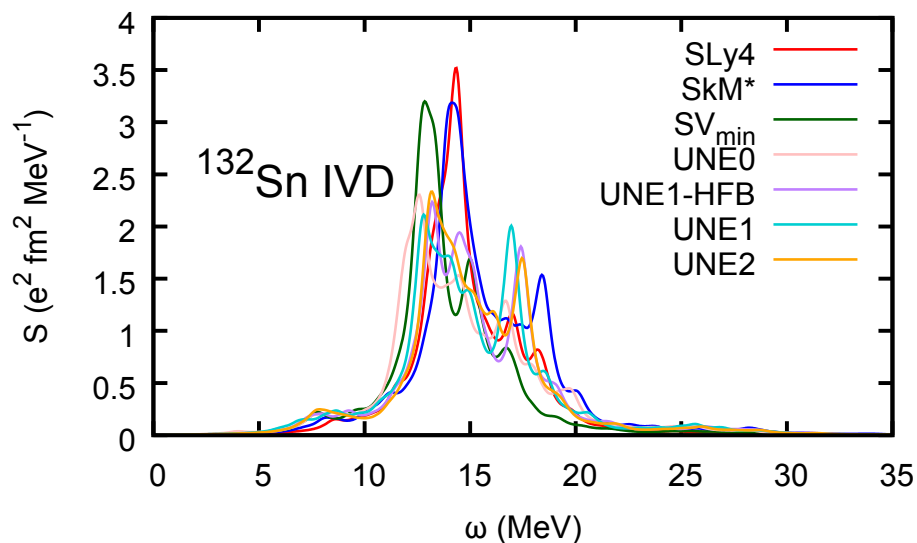


図 6： 様々な原子核密度汎関数を用いて計算した ^{132}Sn のアイソベクトル双極子巨大共鳴の強度関数。

原子核密度汎関数の結合定数は既知の基底状態の実験データや核物質の性質と整合性を持つように現象論的に決定される。米国 UNEDF プロジェクトでは多くの原子核の束縛エネルギーや荷電半径などの実験データを用いた結合定数の最適化が行われた。しかしながらアイソベクトル有効質量などの一部の結合定数は、基底状態の実験データとあまり相関がなく最適化できていない。励起状態の情報も用いることでこれらの基底状態量と相関が弱い結合定数も決定できる可能性がある。励起状態を代表する量としては、多重極巨大共鳴のピークエネルギーがあるが、まずは有限振幅法を用いて現在広く使われている原子核密度汎関数を用いたベンチマーク計算を、実験データが確立している二重閉殻 $^{40,48}\text{Ca}$, ^{56}Ni , ^{90}Zr , ^{132}Sn , ^{208}Pb で行った(図 6)。特に、UNEDF2 汎関数は多くの Skyrme EDF には入っていないテンソル密度汎関数を含んでいるため、この場合の線形応答が計算できるように有限振幅法計算コードの拡張を行った。また、効率的に結合定数を決定するためには和則比によって巨大共鳴ピークエネルギーの評価を行うことが望まれるが、どの原子核のどのモードにおいて、実験データと和則比の対応がよいかの系統的な分析を行った。

【 8 】二重ベータ崩壊原子核行列要素の精密計算に向けて(日野原、Engel (ノースカロライナ大))

二重ベータ崩壊探索実験により電子ニュートリノの有効質量を決定するために必要な原子核行列要素の計算を、生成座標法を用いて行っている。これまでに pf 殻領域の軽い原子核(Ti, Cr)での中性子—陽子対相関力による原子核行列要素の抑制を系統的に調べてきたが、実験が行われている $^{48}\text{Ca} \rightarrow ^{48}\text{Ti}$ では始状態の重要な生成座標法の基底が二重閉殻となっており、これまでに基底間の重なり積分計算で用いてきた Neergård-Wüst の方法が使えない(Bogoliubov 変換に対応する行列の逆行列を計算する必要があるが、閉殻ではこの行列にゼロ固有値が存在するため)。Bogoliubov 変換の行列に Bloch-Messiah 分解を行うことで固有値を分離し、それらに非常に小さい値を加えることによってゼロ固有値の問題を回避するという最近提唱された処方(Gao et al., PLB(2014))を実装し、この問題を回避することができた。現在 ^{48}Ca の原子核行列要素の計算を進めているが、中性子—陽子対相関力のみの場合では、殻模型計算から予想されるほど行列要素が抑制されないという計算結果を得ている。

また、原子核密度汎関数法を用いた二重ベータ崩壊の行列要素を計算するために、有限振幅法を用いた定式化を行った。準粒子乱雑位相近似による行列要素の計算では、大次元の行列対角化を行う必要があるが、有限振幅法を用いることによって、反復法によって複素エネルギーを用いた応答関数を計算し、これを二重複素積分することによって効率的に計算できることを示した。遷移演算子が簡単な二重 Gamow-Teller 遷移や2つのニュートリノを放出する二重ベータ崩壊原子核行列要素はこの方法によって効率的に計算することができることが期待される。

【 9 】超流動原子核の衝突から融合に至る過程の分析 (橋本)

昨年度までの時間依存 Hartree-Fock-Bogoliubov (TDHFB) による超流動原子核同士の衝突のシミュレーション (酸素 $^{20}\text{O} + ^{20}\text{O}$) において、二つの原子核の接触から融合に至る比較的短い時間の間に対相関エネルギーが滑らかに減少するが完全にゼロにはならない、という現象がみられた。この相対距離の領域においては、巨視的な摩擦係数が急速に増大し相対運動から内部励起・核子運動へとエネルギーの流れが生まれることが考えられた。この状況にある TDHFB の波動関数の構造とエネルギーの流れの微視的な背景を理解するために、硫黄 ^{40}S を二つの ^{20}O に断熱的に分裂させる過程を考え、その途中の波動関数を参照として融合過程にある TDHFB の波動関数を調べる方法をとった。対称分裂は $z = 0$ 平面の左右の“部分系”のそれぞれの重心の間の距離を拘束条件とする HFB 計算により実行した。図7には、重心間距離と全エネルギー・対相関エネルギーの関係を示した。図中の黒い矢印が酸素 ^{20}O 核の衝突の時の接触から融合への重心間距離の変化範囲である。エネルギー・対相関エネルギーのカーブから、相対距離が 6 fm 付近に構造変化による“障壁”があるように見える。今後は、これらの構造変化について TDHFB 軌道を用いて詳しく調べていく。

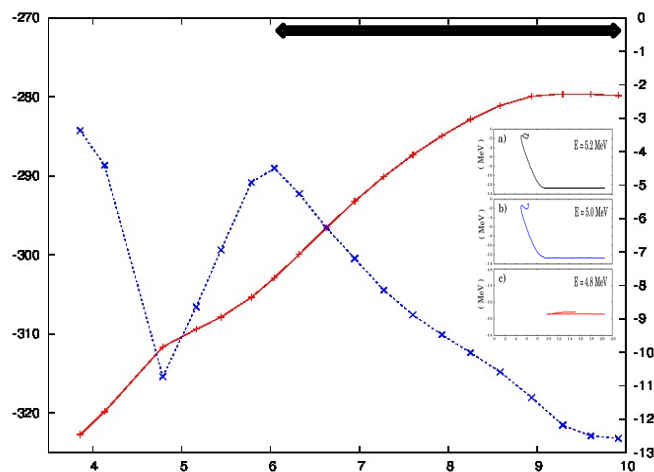


図 7： 硫黄 ^{32}S を 2 個の酸素 ^{16}O に分裂させる拘束条件付き HFB 計算。全エネルギー（左スケール（MeV））と対相関エネルギー（右スケール（MeV））が分離距離（fm）により変化する様子。

【 10 】 3 次元空間上の有限振幅法の開発（鷲山、中務）

本研究の目的は、小規模数値計算で非軸対称超流動原子核の低励起状態の性質を密度汎関数法に基づく準粒子乱雑位相近似(QPRA)法で評価することである。質量数 100 前後の原子核では、低励起エネルギー領域で複数の変形状態が共存し、陽子数・中性子数の変化に伴い基底状態や低励起状態が急激な構造変化を示すことが知られている。このような原子核を大振幅集団運動の観点から理解するために我々は密度汎関数法による四重極集団モデルの構築を目指している。その集団ハミルトニアンに現れる集団質量を密度汎関数法に基づく QPRA 法で評価するには非軸対称変形核に対する QRPA 計算が必要である。これが大規模数値計算となるため、これまでの QRPA 計算は球形及び軸対称変形核への応用に限られてきた。近年、大規模数値計算の要因である大次元の QRPA 行列要素の計算とその対角化を回避して外場に対する原子核の線形応答を記述する有限振幅法(FAM)が提案された。本研究では、昨年度に引き続き非軸対称変形を扱うための 3 次元空間 FAM-QRPA 計算の数値計算コードの開発を行なった。まず、先行研究の軸対称 FAM で得られた強度関数とのベンチマークを行ない本研究で開発したコードの妥当性を確認した。次に、非軸対称超流動原子核 ^{110}Ru , ^{190}Pt のアイソスカラー型四重極応答(Q_{2K})に応用し、四重極演算子の K 量子数に対する強度関数の分離とゼロエネルギー近傍での回転の spurious mode を得た（非軸対称核の 3 軸それぞれの周りでの回転）。さらに、比較的小規模の計算時間で非軸対称核の強度関数を得た（図 8）。

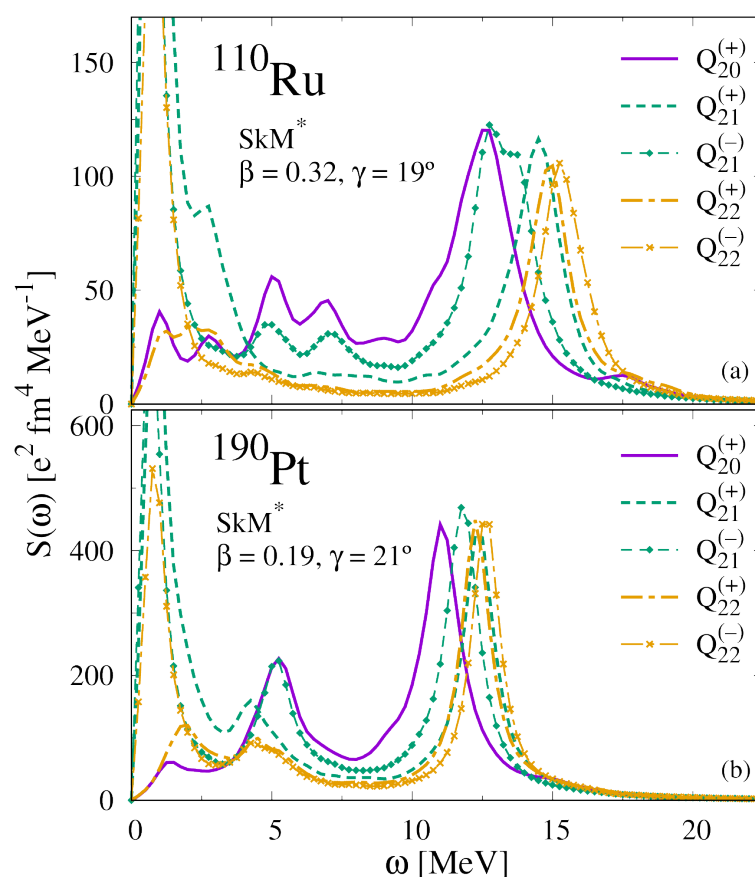


図 8：アイソスカラー型四重極(Q_{2K})外場に対する各 K 量子数に対する強度関数。

【 11 】 FAM-QRPA による回転の慣性モーメントの評価（鷺山、中務）

上述した FAM-QRPA 法を用いて集団ハミルトニアン of 集団質量の評価を行なった。その際、角運動量演算子を外場とした FAM-QRPA のゼロエネルギーでの強度関数が回転に対する慣性モーメントに対応することを用いた。変形核の慣性モーメントを異なる二つの手法、FAM-QRPA 法と cranking HFB 法、で同一の慣性モーメントが得られたこと、先行研究の軸対称変形核 FAM-QRPA 計算との比較、により我々の計算の妥当性を確認した。次に、 $^{106, 108}\text{Pd}$, ^{80}Se 等に対して各四重極変形度で拘束条件付の FAM-QRPA 計算を実行し、各変形度での慣性モーメントの評価を行なった。従来の密度汎関数法による四重極集団模型で用いられたクランキング法による慣性モーメントに比べて有意な増加(10-30%)が得られた。また、慣性モーメントの値が対相関のパラメータに強く依存することが分かった。

【 12 】 重イオン散乱の微視的光学ポテンシャルの評価（蓑茂（阪大）、鷺山、緒方（阪大））

核子当たり数十～数百 MeV の重イオン散乱では散乱系の光学ポテンシャルの評価が重要である。これまで巨視的な現象論的光学ポテンシャルが広く使われてきたが、近年は微視的畳み込み模型（微視的模型で計算した散乱核の密度を有効相互作用で畳み込み光学ポテ

ンシャルを構築する模型)が発展している。この模型は現象論的に決定するパラメータが無く、実験データが存在しない不安定核を用いた反応に適用できる。我々はそこで使われる近似(多重散乱理論での反対称化因子および局所化の手法)を再評価した。畳み込み模型には、原子核の密度としてSkyrme型密度汎関数法を用い、有効相互作用としてMelbourne g 行列を用いた。微視的模型における上記近似の妥当性を広い質量領域の核子-原子核散乱で調べた結果、核子当たり 25MeV 以上のエネルギー領域で良い近似であることを確認した。

この手法を基に、核図表の全領域の原子核に対して核子-原子核、原子核-原子核散乱の微視的光学ポテンシャル及び弾性散乱断面積を構築して、大阪大学核物理研究センターサーバー上で公開している。そこでは、入射核と標的核、入射エネルギーを指定すると微視的光学ポテンシャルと弾性散乱断面積や反応断面積が計算できる。現在、この操作をインタラクティブに行なえるウェブサイトを構築中である。

【 13 】 Gogny 力に基づいた IBM ハミルトニアンによる核構造計算 (野村、Rodriguez-Guzman (クウェート大)、Robledo (マドリッド自治大))

核子多体系の微視的理論である密度汎関数理論 DFT に基づいた相互作用するボソン模型 IBM の枠組みにおいて、原子核の集団励起を記述する研究を行った。特に、Gogny 型密度汎関数を用いた DFT 平均場計算から IBM ハミルトニアンを導き、不安定核ビームを用いた実験研究において重要な、中性子過剰 Ge, Se, Kr 同位体の分光的性質を記述した(図 9)。核子数の変化に伴う原子核形状と励起状態の遷移、いわゆる量子相転移と、異なる変形状態の共存(変形共存)状態を系統的に調べ、それらの特徴付ける励起状態エネルギーや電磁遷移などの物理量を計算した。理論的予言も行い、将来の不安定核実験のための重要な指針となりうる。

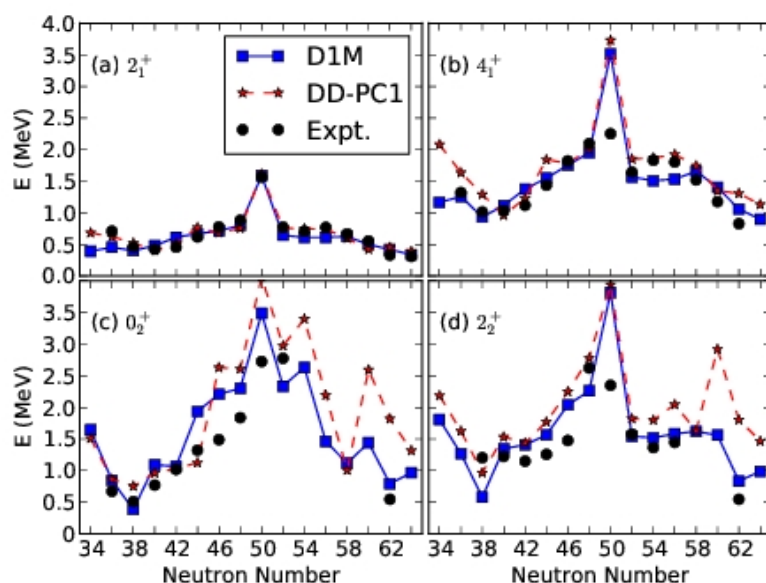


図 9：偶偶核 Kr 同位体の励起スペクトル。

【 14 】 偶奇核の分光学的性質に関する研究（野村、Vretenar（ザグレブ大）、Niksic（ザグレブ大）、Rodriguez-Guzman（クウェート大）、Robledo（マドリッド自治大））

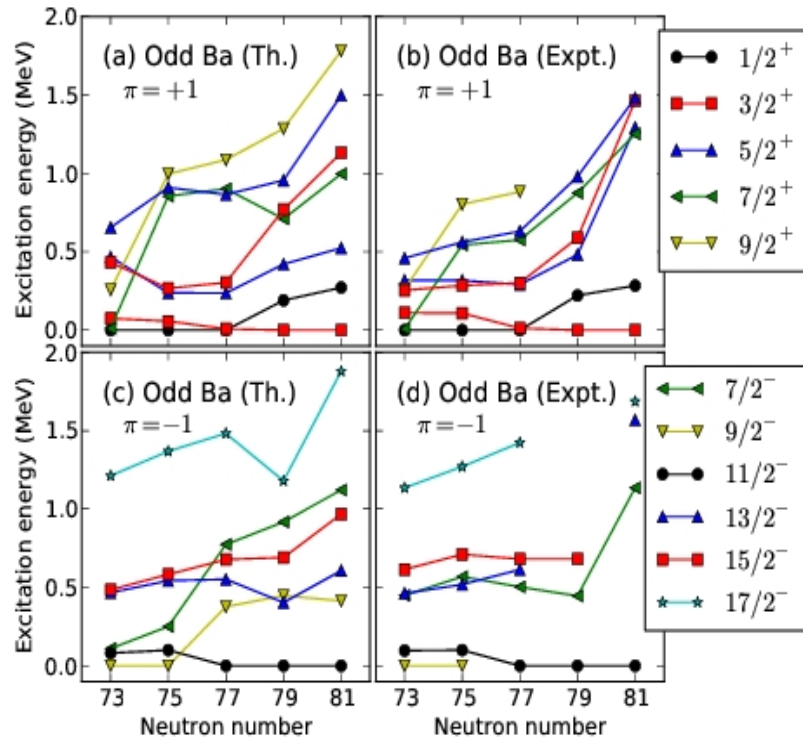


図 1 0： 偶奇核 Ba 同位体の励起スペクトル。

上記の方法を偶奇核に拡張する研究にも取り組んだ。具体的には、偶偶核をコアとしてそれに単一核子の自由度を加え、両者の間の相互作用を DFT 計算に基づいて決定する。今年度は、Ba, Xe などの、偶偶核コアが非軸対称変形した奇核の分光学的性質、特に量子相転移の秩序変数と考えられるいくつかの物理量の計算、および八重極変形の自由度を含んだ場合（中性子過剰 Ba 同位体）の分光学的計算に取り組んだ（図 1 0）。偶奇核構造の理解はベータ崩壊などの基本的な崩壊過程の記述にも不可欠である。近年、これらの分光学的性質に関する多くの実験データが生み出されている一方、それらの微視的かつ系統的な記述は、特に中重核領域では理論的に非常に困難である。本研究で開発した手法は、中重領域の偶奇核構造への有力なアプローチの一つといえる。

【 15 】 相互作用するボソン模型におけるニュートリノレス二重ベータ崩壊と中性子陽子対（Van Isacker（GANIL）、Engel（ノースカロライナ大）、野村）

対相関基底を用いた殻模型空間からアイソスピン自由度を取り入れた相互作用するボソン模型空間への写像によって、pf 殻領域の原子核のボソンハミルトニアンと 2 重ベータ崩壊演算子を構築し、同崩壊過程の核行列要素を計算する研究を行った。特に、ボソン模

型におけるアイソスカラー中性子陽子対の重要性を調べた。エネルギー準位の記述において中性子陽子対の効果は小さい一方、二重ベータ崩壊の行列要素の計算においては、（殻模型とコンシステントな結果を与えるという意味で）重要な役割を持つことが分かった（図11）。

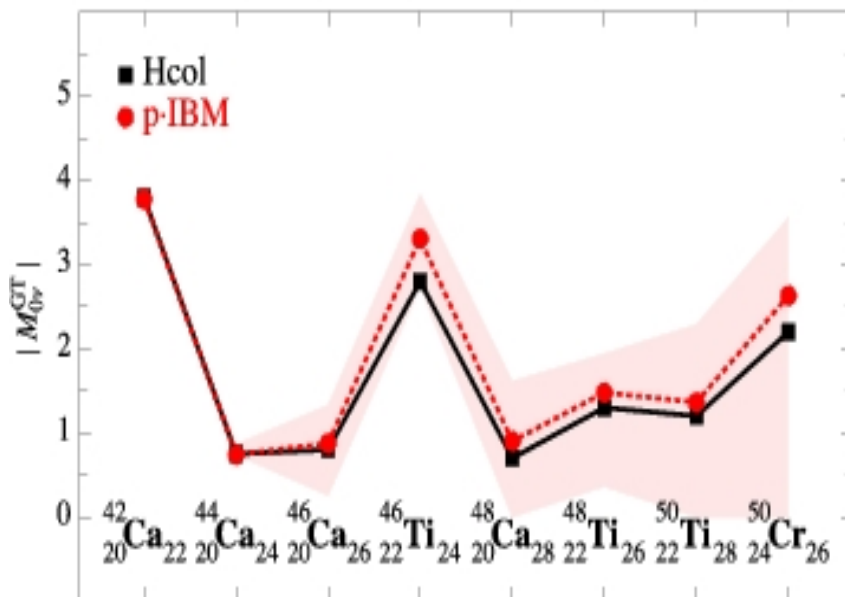


図11： 殻模型計算（Hcol）とアイソスカラー中性子陽子対を含んだ IBM 計算（p-IBM）によるニュートリノレス二重ベータ崩壊のガモフテラー遷移行列要素。影の部分は理論的不定性を示す。

【 16 】 Pair transfer study (Scamps and Hashimoto)

A beyond mean-field technique has been developed to obtain the one- and two-neutron transfer probabilities in reactions between superfluid nuclei. This method includes the complicated calculation of overlaps between different HFB states after the evolution. This calculation improves the comprehension of the nuclear Josephson effect in realistic calculations and the mechanism of pair transfer(図12). This method has been tested in the reactions $^{20}\text{O}+^{20}\text{O}$ and $^{20}\text{O}+^{14}\text{O}$.

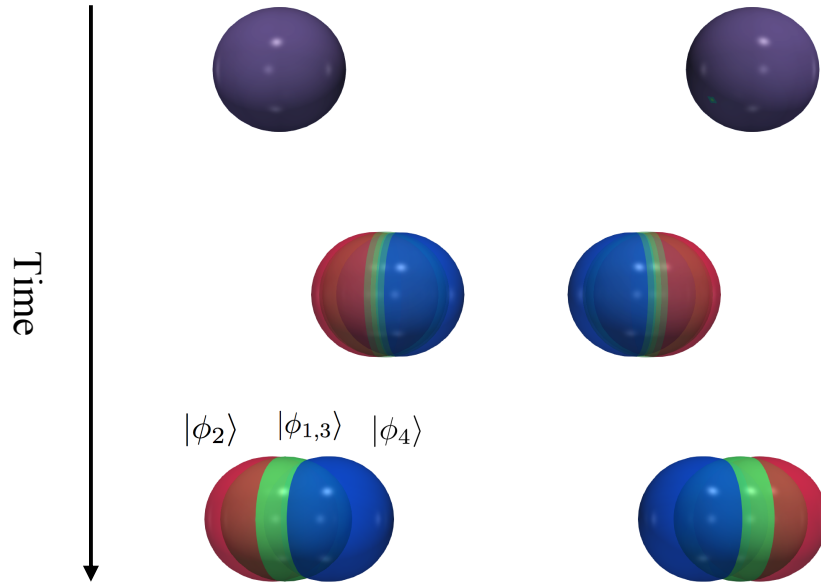


Fig. 1.2: Transfer reaction $^{20}\text{O}+^{20}\text{O}$, at energy below the Coulomb barrier. We can see a splitting of the trajectory due to the different initial relative gauge angle.

【 17 】 Empirical evidence of the effect of the superfluidity on fusion reaction (Scamps)

In a previous study, we showed that in the reaction between superfluid nuclei the fusion barrier depends on the relative gauge angle. In that study, I investigated the proof of this effect by making a systematic analysis of the fusion barrier on 115 reactions. A new method has been developed to determine the width of the fusion barrier (Fig. 1.3). The dependence of the width of the fusion barrier with respect to the superfluidity of the initial fragments show that the superfluidity enhance the fluctuations of the fusion barrier. That result is coherent with the effect that have been found with the TDHFB theory.

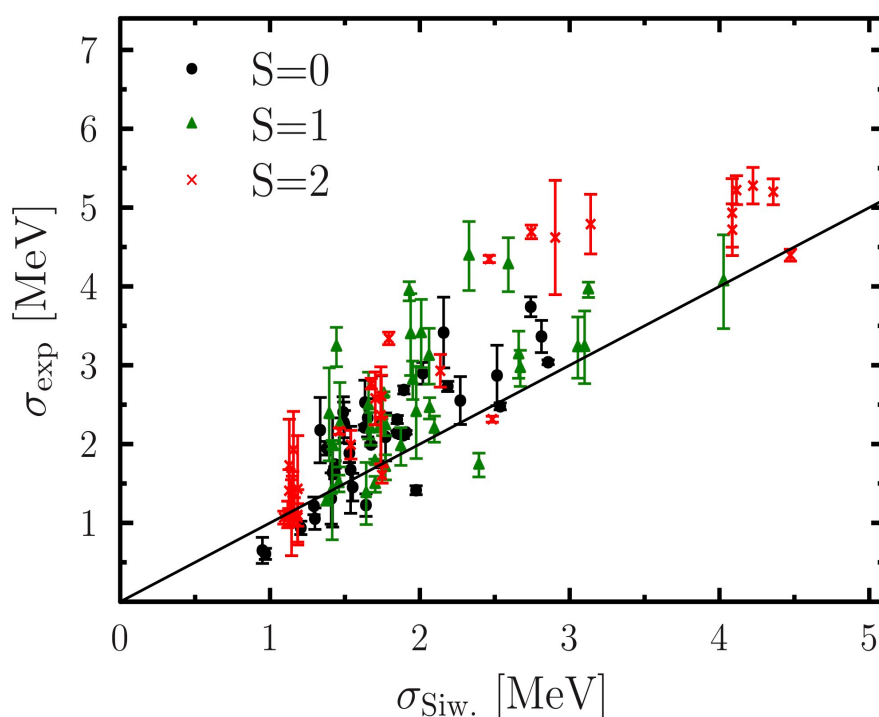
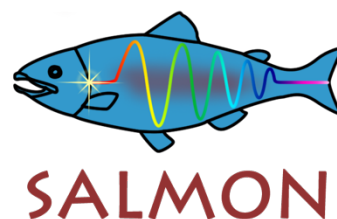


図 1 3: Comparison between the experimental width of the fusion barrier, with the result of the Siwek-Wilczynska model. The enhancement between the experimental value compared to the result of the model is expected to be due to the effect of the superfluidity for system with superfluidity ($S = 1$ and 2).

【 18 】 第一原理光科学ソフトウェア SALMON の開発（矢花、[植本、山田(篤)、山田(俊)、朴=計算科学研究センター]、廣川=システム情報工学研究科、[信定、野田、竹内=分子科学研究所]）

我々のグループで独自に開発してきた、時間依存密度汎関数理論に基づく固体中の電子ダイナミクス計算を対象とする第一原理計算コード ARTED と、分子科学研究所に於いて開発されてきた、ナノ物質や分子中の電子ダイナミクス計算を対象とする時間依存密度汎関数理論に基づく第一原理計算コード GCEED を統合し、SALMON (Scalable Ab-initio Light-Matter simulator for Optics and Nanoscience) と命名した。統合に際し、一般のユーザを含めたコード利用を容易とするため、Fortran の namelist 機能を用いた入力仕様とし、実行ファイルの生成では CMake を用いたコンパイルを行うなどの作業を行なった。SALMON のウェブサイト <http://salmon-tddft.jp> を開設し、コードのダウンロード、インストール及び実行方法の説明、計算例の紹介などを整備した。また、スパコンを用いたハンズオンを含む SALMON のチュートリアルを行い、コードの利用者を拡大する取り組みを行った。コード論文を執筆し、投稿した。



SALMON の開発においては、計算科学研究センターの朴グループと密接に協力し、主として大学院生の廣川氏の貢献により KNL プロセッサや GPU においても効率的に計算が可能となるようチューニングを行なった。

【 19 】マクスウェル方程式と時間依存密度汎関数を統合したシミュレーション法の拡張（矢花、[植本、山田(篤)、山田(俊)]）

SALMON において、光伝搬を記述するマクスウェル方程式・時間依存密度汎関数に基づき電子ダイナミクスを記述する時間依存コーン・シャム方程式・原子核の運動を記述するエーレンフェスト流のニュートン運動方程式を組み合わせ、光電磁場・電子・原子核のダイナミクスを同時に記述する機能の多様な実装を進めた。

3次元マクスウェル方程式と電子ダイナミクス計算をマルチスケール結合することにより、超高速ナノオプティクスを記述できるようコードの拡張を行い、Oakforest-PACS の全ノード計算など、大規模計算を進めた。また、薄膜にパルス光が斜方入射する場合の理論及び計算法について、検討を進めている。

金属などの吸収の強い物質や、極めて薄い薄膜、2次元物質などでは、これまで開発を進めてきた光電磁場と電子のダイナミクスで異なる空間スケールの格子を用意するマルチスケール結合による記述は不十分であり、単一の空間スケールを用いた記述が適切となる。このような場合の計算コードの実装を進め、現在シリコン薄膜を対象としてテスト計算を進めている。

電子ダイナミクスとともに原子核のダイナミクスに対して、エーレンフェスト力を用いて記述する実装も進め、コヒーレントフォノンや誘導ラマン効果の記述を試みるとともに、光構造相転移の記述を目指している。

【 20 】固体高次高調波発生における光伝搬効果 (I. Floss(ウィーン工科大)、矢花、他)

固体における高次高調波発生は、高強度パルス光を用いた新奇な光デバイス原理や、新たな X 線パルス線源を与えるものとして高い興味が持たれており、その発生メカニズムに関して活発な議論がなされている。固体中の高次高調波発生はバンド計算を取り入れた多様な電子ダイナミクス計算手法により記述が可能であるが、単純に計算すると原子の場合と異なり励起電子の波束が拡散しないために、実験で見られるようなクリアな高調波が得られないことが知られている。このため、非常に短い緩和時間を仮定した計算などが行われていた。本研究は、ウィーン工科大の大学院生である I. Floss 氏を中心になされ、固体中に発生した高次高調波が伝搬する効果を取り入れると、非常に短い緩和時間を仮定することなく、クリアな高調波が得られることを示したものであり、高次高調波の発生メカニズムに関して重要な指摘を行なったものである。

【 21 】内殻電子ダイナミクスの記述に向けた試み（矢花）

現在活発に研究が進んであるアト秒科学では、アト秒パルス光により起こる内殻電子のダイナミクスを観測することで、サブフェムト秒の時間スケールで起こる物質中の電子ダイナミクスを調べている。これらの現象の解析では、アト秒パルス光により生じる内殻電

子のダイナミクスを直接記述することが求められるが、空間的・エネルギー的に価電子と大きくスケールが異なるため、容易ではない。

内殻電子のダイナミクスを記述する方法として、我々は2通りの手法の検討を行っている。一つは、実空間の格子間隔を小さくすることで、現在の計算コードの範囲で記述を試みるものである。これは、マックスプランク物質構造動力学研究所のC.M. Wang氏が中心となり共同研究を進めている。もう一つは、より小さい空間スケールの現象に適した原子基底関数を用いた記述であり、こちらはSIESTAコードをベースとして、C.D. Pemmaraju氏を中心に共同研究を進めている。

4. 教育

学位論文

1. 齊藤貴之、修士（理学）、
“拡張Lagrange未定乗数法をもちいたHartree-Fock-Bogoliubov法による原子核四重極・八重極変形の研究”
2. 八百板恭介、修士（理学）、
“5次元四重極集団ハミルトニアンを用いた原子核低励起状態の解析”

集中講義

1. 矢花一浩、“超短パルス光と物質の相互作用を記述する第一原理計算—非熱レーザー加工のメカニズム解明に向けて”、光産業創生大学院大学特別講義2017、光産業創生大学院大学、2017年6月14日
2. 矢花一浩、“計算機シミュレーションの発展～先端分野のシミュレーション手法開発と異分野連携の実践～”、東京大学大学院工学系研究科先進原子力特別講義第三、2017年10月3日
3. 矢花一浩、東京大学大学院理学研究科集中講義、物理化学特論II、2017年12月7日

5. 受賞、外部資金、知的財産権等

受賞

筑波大学 BEST FACULTY MEMBER、矢花一浩、平成30年2月19日

外部資金

1. 科研費基盤研究(B)「第一原理計算に基づく極限パルス光と物質の相互作用の解明」、矢花一浩、代表、H27-30年度、2,300,000円（H29年度直接経費）

2. ポスト京重点課題7「次世代の産業を支える新機能デバイス・高性能材料の創成」サブ課題B「光・電子融合デバイス」、矢花一浩、分担、H28-32年度、7,469,000円（H29年度直接経費）
3. JST CREST「光・電子融合第一原理計算ソフトウェアの開発と応用」、矢花一浩、代表、H28-33年度、24,900,000円（H29年度直接経費）
4. 共同研究経費、株式会社IHI、「時間依存第一原理解析によるフェムト秒レーザと物質との相互作用に関する研究」、450,000円（H29年度直接経費）
5. 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、7,106,000円（H29年度直接経費）、「核構造計算による核反応モデルの高精度化」
6. 日本学術振興会二国間協力事業（JSPS-NSFC）、中務孝、日本側代表、2017-2019年、1,440,000円（H29年度直接経費）、「rプロセスの謎解明に向けた核質量と寿命の研究」
7. 日本学術振興会科学研究費・若手研究(B)、日野原伸生、代表、2016-2019年、2017年度直接経費700,000円、「中性子-陽子対相関・対凝縮の解明」
8. 日本学術振興会科学研究費・新学術領域研究(研究領域提案型：研究領域「宇宙の歴史をひもとく地下素粒子原子核研究」)(公募研究)日野原伸生、代表、2017-2018年、2017年度直接経費1,000,000円、「生成座標法による二重ベータ崩壊原子核行列要素の評価」

6. 研究業績

(1) 研究論文

A) 査読付き論文

1. I. Floss, C. Lemell, G. Wachter, V. Smejkal, S. A. Sato, X. M. Tong, K. Yabana, and J. Burgdörfer,
“Ab initio multiscale simulation of high-order harmonic generation in solids”, Phys. Rev. A **97**, 011401(R):1-5 (2018).
2. C.D. Pemmaraju, F.D. Vila, J.J. Kas, S.A. Sato, J.J. Rehr, K. Yabana, D. Prendergast,
“Velocity-gauge real-time TDDFT within a numerical atomic orbital basis set”, Comp. Phys. Comm. **226**, 30-38 (2018).
3. Y. Hirokawa, S. A. Sato, T. Boku, K. Yabana,
“Performance Evaluation of Large Scale Electron Dynamics Simulation under Many-core Cluster based on Knights Landing”, Proc. of the 1st International Conference on High Performance Computing in Asia-Pacific Region (HPCAsia2018), Tokyo, Jan. 2018.

4. M. Noda, S. A Sato, Y. Hirokawa, M. Uemoto, T. Takeuchi, S. Yamada, A. Yamada, Y. Shinohara, M. Yamaguchi, K. Iida, I. Floss, T. Otobe, K. M. Lee, T. Boku, G. F. Bertsch, K. Nobusada, K. Yabana,
“SALMON: Scable Ab-initio Light-Matter simulator for Optics and Nanoscience”,
arXiv:1804.01404.
5. S. Ebata, and T. Nakatsukasa
“Octupole deformation in the nuclear chart based on the 3D Skyrme Hartree-Fock plus BCS model”, Phys. Scr. **92**, 064005 (2017).
6. K. Wen and T. Nakatsukasa,
“Adiabatic self-consistent collective path in nuclear fusion reactions”, Phys. Rev. C **96**, 014610 (2017).
7. P. Baczyk, J. Dobaczewski, M. Konieczka, W. Satula, T. Nakatsukasa, and K. Sato,
“Isospin-symmetry breaking in masses of $N \simeq Z$ nuclei”, Phys. Lett. B **778**, 178-183 (2018).
8. N. Hinohara,
“Extending pairing energy density functional using pairing rotational moments of inertia”, J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. **45** (2018) 024004, Special Issue: emerging leaders [invited paper].
9. K. Washiyama, T. Nakatsukasa,
“Multipole modes of excitation in triaxially deformed superfluid nuclei”, Phys. Rev. C **96**, 041304(R) (2017).
10. K. Washiyama,
“Fusion hindrance in heavy systems with time-dependent Hartree-Fock”, Proceedings of International Conference on Heavy-ion Collisions at Near-Barrier Energies FUSION17; EPJ Web of Conferences **163**, 00064 (2017).
11. Y. Hirayama, M. Mukai, Y. X. Watanabe, M. Ahmed, S. C. Jeong, H. S. Jung, Y. Kakiguchi, S. Kanaya, S. Kimura, J. Y. Moon, T. Nakatsukasa, M. Oyaizu, J. H. Park, P. Schury, A. Taniguchi, M. Wada, K. Washiyama, H. Watanabe, and H. Miyatake,
“In-gas-cell laser spectroscopy of the magnetic dipole moment of the $N \sim 126$ isotope ^{199}Pt ”, Phys. Rev. C **96**, 014307 (2017).
12. K. Nomura, T. Niksic, and D. Vretenar,
“Signature of octupole correlations in neutron-rich odd-mass barium isotopes”, Phys. Rev. C **97**, 024317 (2018).
13. K. Nomura, R. Rodriguez-Guzman, and L. M. Robledo,
“Shape transitions in odd-mass γ -soft nuclei within the interacting boson-fermion model based on the Gogny energy density functional”, Phys. Rev. C **96**, 064316 (2017).

14. P. Van Isacker, J. Engel, and K. Nomura,
“Neutron-proton pairing and double-beta decay in the interacting boson model”, Phys. Rev. C **96**, 064305 (2017).
15. K. Nomura, R. Rodriguez-Guzman, Y. M. Humadi, L. M. Robledo, and H. Abusara,
“Structure of krypton isotopes within the interacting boson model derived from the Gogny energy density functional”, Phys. Rev. C **96**, 034310 (2017).
16. K. Nomura, R. Rodriguez-Guzman, and L. M. Robledo,
“Description of odd-mass nuclei within the interacting boson-fermion model based on the Gogny energy density functional”, Phys. Rev. C **96**, 014314 (2017).
17. K. Nomura, T. Niksic, and D. Vretenar,
“Shape-phase transitions in odd-mass γ -soft nuclei with mass $A \sim 130$ ”, Phys. Rev. C **96**, 014304 (2017).
18. K. Nomura, R. Rodriguez-Guzman, and L. M. Robledo,
“Structural evolution in germanium and selenium nuclei within the mapped interacting boson model based on the Gogny energy density functional”, Phys. Rev. C **95**, 064310 (2017).
19. G. Scamps, Y. Hashimoto,
“Superfluid effects in collision between systems with small particle number”, Proceeding Fusion 17, EPJ Web Conf. **163**, 00049 (2017).
20. G. Scamps, Y. Hashimoto,
“Transfer probabilities for the reactions $14,20\text{O}+20\text{O}$ in terms of multiple time-dependent Hartree-Fock-Bogoliubov trajectories”, Phys. Rev. C **96**, 031602(R) (2017).
21. D. Regnier, D. Lacroix, G. Scamps, Y. Hashimoto,
“Microscopic description of pair transfer between two superfluid Fermi systems: combining phase-space averaging and combinatorial techniques”, Phys. Rev. C **97**, 034627 (2018).
22. G. Scamps,
“Empirical evidence of the effect of superfluidity on the fusion barrier”, Phys. Rev. C **97**, 044611 (2018).
23. K. Washiyama, T. Nakatsukasa,
“Multipole Modes for Triaxially Deformed Superfluid Nuclei”, JPS Conf. Proc., in press, arXiv:1803.06828.
24. K. Wen and T. Nakatsukasa,
“Nuclear reaction path and requantization of TDDFT”, JPS Conf. Proc. in press, arXiv:1802.03124.
25. F. Ni, T. Nakatsukasa,

- “Comparative study of the requantization of the time-dependent mean field for the dynamics of nuclear pairing”, Accepted for Physical Review C, arXiv:1712.02954.
26. Y. Hirokawa, T. Boku, M. Uemoto, S. A. Sato, and K. Yabana,
“Performance Optimization and Evaluation of Scalable Optoelectronics Application on Large Scale KNL Cluster”, in press.
 27. K. Nomura, R. Rodriguez-Guzman, and L. M. Robledo,
“Prolate-to-oblate shape phase transitions in neutron-rich odd-mass nuclei”, Submitted to Phys. Rev. C, arXiv:1803.07802.
 28. K. Nomura, and J. Jolie,
“Structure of even-even Cadmium isotopes from the beyond-mean-field interacting boson model”, Submitted to Phys. Rev. C, arXiv:1802.02348.

(2) 国際会議発表

A) 招待講演

1. K. Yabana,
“Ab-initio calculations for energy transfer from ultrafast laser pulse to dielectrics”,
Ultrafast Bandgap Photonics II, SPIE Defense + Commercial Sensing, Anaheim, USA,
Apr. 21, 2017.
2. K. Yabana,
“First-principles description for initial stage of femtosecond laser processing”,
CLEO2017, San Jose, USA, May. 14, 2017.
3. K. Yabana,
“Maxwell + TDDFT multiscale simulation for strong pulsed-light propagation in dielectrics”, CECAM workshop on Bridging the Worlds of Electromagnetic and Quantum simulations, Tel Aviv, Israel, Jun. 19, 2017.
4. K. Yabana,
“Ab-initio simulation for dynamics of electrons and light electromagnetic fields in dielectrics”, NANO KOREA 2017, Ilsan, Korea, Jul. 12, 2017.
5. K. Yabana,
“Real-time TDDFT simulation for interactions of ultrashort laser pulses with solids, coupling to Maxwell’s equations”, Telluride Science Research Center Workshop Excited States: Electronic structure and dynamics, Telluride, USA, Jul. 17, 2017.
6. K. Yabana,
“First-principles calculations for ultrafast energy transfer from laser to solids”, SPIE Laser Damage, Boulder, USA, Sep. 24, 2017.
7. K. Yabana,
“First-principles simulation for ultrafast optical dynamics in dielectrics”,

ITCPS2017: Inter-Institutional Meeting in Interdisciplinary Theoretical and Computational Physical Sciences, Tokyo, Japan, Oct. 24, 2017.

8. K. Yabana,
“Ab-initio simulations for ultrafast electron dynamics in solids”, Ultrafast dynamics and metastability, Washington DC, USA, Nov.13, 2017.
9. T. Nakatsukasa,
“Nuclear structure physics and time-dependent approaches”, Lecture in School cum collaboration meeting on nuclear structure and reaction, Kolkata, India, Jan. 1-22, 2018.
10. T. Nakatsukasa,
“Nuclear structure physics in RIBF”, International symposium on RI beam physics in the 21st century: 10th anniversary of RIBF, Wako, Japan, Dec. 4-5, 2017.
11. T. Nakatsukasa,
“Isospin symmetry breaking effect on nuclear mass”, KLFTP/CAS-BLTP/JINR Joint Workshop on Physics of Strong Interaction, Shenzhen, China, Nov. 26 - Dec. 1, 2017.
12. T. Nakatsukasa,
“Nuclear reaction path and requantization of TDDFT”, Ito international research center symposium “Perspectives of the physics of nuclear structure”, Tokyo, Japan, Nov. 1 - 4, 2017.
13. T. Nakatsukasa,
“Quantization of mean-field dynamics”, Huzhou-CUSTIPEN workshop on Spectroscopy and reactions of exotic nuclei, Huzhou, China, Jul. 3 - 9, 2017.
14. T. Nakatsukasa,
“Quantized TDDFT dynamics”, Interdisciplinary symposium on modern density functional theory, Wako, Japan, Jun. 19 - 23, 2017.
15. T. Nakatsukasa,
“Collective coordinate, reaction path, and inertial mass in large-amplitude nuclear collective motion”, Probing fundamental interactions by low energy excitations - Advances in theoretical nuclear physics, Stockholm, Sweden, Jun. 5 - 9, 2017.
16. N. Hinohara,
“Pairing Nambu-Goldstone modes in nuclei”, XXIV Nuclear Physics Workshop, Kazimierz Dolny, Poland, Sep. 20-24, 2017.
17. N. Hinohara,
“Application of generator coordinate method with neutron-proton pairing amplitudes to nuclear matrix elements”, MEDEX'17 (Matrix Elements for the Double beta decay EXperiments) meeting, National Technical Library, Prague, Czech Republic, May 29 - Jun. 2, 2017.
18. K. Washiyama, T. Nakatsukasa,

- “Excitation modes in triaxial superfluid nuclei with finite amplitude method QRPA”,
2017 KLFTP/CAS-BLTP/JINR Joint Workshop on Physics of Strong Interaction,
Shenzhen, China, Nov. 27-30, 2017.
19. K. Nomura,
“Beyond-mean-field boson-fermion model for odd nuclei”, IVth Topical Workshop on
Modern Aspects in Nuclear Structure - The Many Facets of Nuclear Structure, Bormio,
Italy, Feb. 19-25, 2018.
 20. K. Nomura,
“Beyond-mean-field boson-fermion model for odd nuclei”, Prospects on the microscopic
description of odd mass nuclei and other multi-quasiparticle excitations with beyond-
mean-field and related methods, ECT*, Trento, Italy, Sep. 25-29, 2017.
 21. K. Nomura,
“Evolution of nuclear shapes in the microscopically-guided algebraic theory”, Probing
fundamental interactions by low energy excitations - Advances in theoretical physics,
Stockholm, Sweden, Jun. 5-9, 2017.
 22. G. Scamps,
“Restoration of symmetry in time-dependent calculations. Josephson effect study with the
Gogny TDHFB calculation”, GANIL, Caen, Nov. 3, 2017.
 23. G. Scamps,
“How to interpret the effects of the gauge angle in nuclear reactions?”, Warsaw
University of Technology, Warsaw, Poland, Nov. 15, 2017.
 24. G. Scamps,
“Study of the effect of the superfluidity on the fusion barrier”, 2017 KLFTP-BLTP
workshop, Shenzhen China, Nov. 27-30, 2017.
 25. G. Scamps,
“Superfluidity in fusion reactions, from TDHFB calculation to experimental evidence”,
Australian National University, Canberra Australia, Mar. 15, 2018.

B) 一般講演

1. T. Nakatsukasa,
“Isospin symmetry preserving energy density functional and its breaking effect on nuclear
mass”, China-Japan collaboration workshop on “Nuclear mass and life for unravelling
mysteries of r-process”, Tsukuba, Japan, Jun. 26-28, 2017.
2. N. Hinohara,
“Pairing rotational modes and binding-energy differences of even-even nuclei”, IIRC
symposium “Perspectives of the physics of nuclear structure”, Tokyo, Japan, Nov. 1-4,
2017.

3. N. Hinohara,
 “Pair condensation and Nambu-Goldstone modes in nuclei”, Workshop on Nuclear Cluster Physics 2017 (WNCP2017), Sapporo, Japan, Oct. 25-27, 2017.
4. N. Hinohara,
 “Neutron-proton pairing and double-beta decay nuclear matrix element”, Conference on Neutrino and Nuclear Physics (CNNP2017), Catania, Italy, Oct. 15-21, 2017.
5. N. Hinohara,
 “Extending pairing energy density functional using pairing rotational moments of inertia”, The International Symposium on Physics of Unstable Nuclei 2017 (ISPUN17), Halong City, Vietnam, Sep. 25-30, 2017.
6. N. Hinohara,
 “Generator coordinate method with neutron-proton pairing amplitudes for double-beta decay nuclear matrix elements”, XXXV Mazurian Lakes Conference on Physics, Piaski, Poland, Sep. 3-9, 2017.
7. N. Hinohara,
 “Binding energy differences of even-even nuclei as pairing indicators”, China-Japan collaboration workshop on “Nuclear mass and life for unravelling mysteries of r-process”, Tsukuba, Japan, Jun. 26-29, 2017.
8. N. Hinohara,
 “Nuclear matrix elements from generator coordinate method”, INT Program INT-17-2a Neutrinoless Double-beta Decay, Seattle, WA, USA, Jun. 13-Jul. 14, 2017.
9. N. Hinohara,
 “Pairing energy density functional constrained using pairing rotational moments of inertia”, Probing fundamental interactions by low energy excitations -- Advances in theoretical nuclear physics, Stockholm, Sweden, Jun. 5-9, 2017.
10. K. Washiyama, T. Nakatsukasa,
 “Finite amplitude method for triaxially deformed superfluid nuclei”, Interdisciplinary symposium on modern density functional theory, Wako, Japan, Jun. 19-23, 2017.
11. K. Washiyama,
 “Quadrupole modes of excitation and moment of inertia in triaxially deformed superfluid nuclei”, 3rd workshop on many-body correlations in microscopic nuclear model, Sado, Japan, Sep. 4-5, 2017.
12. K. Washiyama, T. Nakatsukasa,
 “Excitation modes of triaxial nuclei with finite amplitude method for QRPA”, ISPUN17, Halong, Vietnam, Sep. 25-30, 2017.

13. K. Washiyama, T. Nakatsukasa,
“Multipole modes for triaxially deformed superfluid nuclei” (poster presentation), IIRC Symposium “Perspectives of the physics of nuclear structure”, Tokyo, Japan, Nov. 1-4, 2017.
14. G. Scamps,
“Transfer probabilities for the reactions $^{14}\text{O}+^{20}\text{O}$ in terms of multiple Time-Dependent Hartree-Fock-Bogoliubov trajectories”, 3rd workshop on many-body correlations in microscopic nuclear model, Sado, Japan, Sep. 4-5, 2017.
15. G. Scamps,
“Restoration of symmetry in time-dependent calculations. Josephson effect study with the Gogny TDHFB calculation”, SSNET conference, Gif-sur-Yvette, France, Nov. 6-10, 2017.
16. F. Ni, T. Nakatsukasa,
“Theoretical approach for large amplitude pairing dynamics”, The 16th CNS International Summer School, Saitama, Japan, Aug. 23-29, 2017.
17. F. Ni, T. Nakatsukasa,
“Dynamics of nuclear pairing model”, Nuclear mass and life for unravelling mysteries of r-process, Tsukuba, Japan, Jun. 26-28, 2017.
18. F. Ni,
“Theoretical approach for pairing large amplitude motion”, 3rd workshop on many-body correlations in microscopic nuclear model, Sado, Japan, Sep. 4-5, 2017.
19. Y. Kashiwaba, T. Nakatsukasa,
“Self-consistent band calculation of inner crust of neutron star”, China-Japan collaboration workshop on “Nuclear mass and life for unravelling mysteries of r-process”, Tsukuba, Japan, Jun. 26-28, 2017.

(3) 国内学会・研究会発表

A) 招待講演

1. 矢花一浩、
“フェルミ多粒子系ダイナミクスのシミュレーション”、「物質階層原理」第一回春合宿、御殿場高原ホテル、2017年5月12日。
2. 矢花一浩、
“量子（波動）ダイナミクスの第一原理計算と光科学フロンティアへの展開”、サイエンティフィック・システム研究会 HPC フォーラム 2017「計算科学の新たな可能性」、日本、2017年8月30日。
3. 矢花一浩、

“電子ダイナミクス第一原理計算と光科学への応用”、第31回コンピュテーショナル・マテリアルズ・デザインワークショップ、大阪大学、2017年9月15日.

4. 矢花一浩、
“高強度パルス光と物質の相互作用—第一原理計算からのアプローチ”、「光操作の最前線」量子エレクトロニクス研究会、上智大学軽井沢セミナーハウス、2017年12月14日.
5. 中務 孝、
“時間依存平均場再量子化と核子集団ダイナミクス”、理研シンポジウム「非平衡物理の最前線」、理化学研究所、和光、2017年12月6–8日.
6. 日野原伸生、
“原子核密度汎関数理論による原子核構造とダイナミクス”、市大ワークショップ「原子核のダイナミクスの現状と展望」～Highlights and Outlooks on Dynamics of Atomic Nuclei～、大阪市立大学、2018年2月19–20日.
7. 日野原伸生、
“不安定核での変形、対相関による大振幅集団運動”、RIBF 理論若手放談会：エキゾチック核物理の広がり、理研神戸、2017年7月31日–8月2日.
8. 日野原伸生、
“生成座標法による二重ベータ崩壊原子核行列要素の評価”、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」2017年領域研究会、岡山大学、2017年5月21–23日.
9. 鷺山広平、
“原子核の形の揺らぎと大振幅集団運動”、つばめラウンジセミナー、東京工業大学、2018年1月22日.
10. 鷺山広平、
“低励起状態における原子核形状の揺らぎと大振幅集団運動”、市大ワークショップ「原子核のダイナミクスの現状と展望」、大阪市立大学、2018年2月19–20日.

B) その他の発表

1. K. Yabana,
“Real-time time-dependent density functional theory: Basics and applications”, Surface Science Colloquium, Institute of Physics, Chinese Academy of Science, Beijing, China, Sep. 11, 2017.
2. K. Yabana,
“Ab-initio simulation for attosecond spectroscopy in solids”, CSRC seminar, Beijing, China, Sep. 12, 2017.
3. K. Yabana,

- “Ab-initio density functional simulation for nano-optics”, CCS-EPCC Workshop, 筑波大学, Dec. 7, 2017.
4. 矢花一浩、
“高強度パルス光とナノ物質との相互作用の大規模シミュレーション”、第3回 CDMSI ポスト「京」重点課題（7）シンポジウム、東京大学伊藤謝恩ホール、2017 年 12 月 5 日.
 5. 矢花一浩、
“Ab-initio Density Functional Simulation for Nano-optics”, CCS-LBNL Collaborative Workshop, 筑波大学, Mar. 5, 2018.
 6. 中務 孝、
“中性子星クラストに対する自己無撞着バンド計算”、第6回「中性子星の核物質」研究会、理化学研究所、和光、2017 年 12 月 1–3 日.
 7. 中務 孝、
“微視的理論を用いた断面積計算”、日本原子力学会 2017 秋の大会、北海道大学、札幌、2017 年 9 月 13–15 日.
 8. 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、J S T 別館、東京、2017 年 10 月 4–5 日.
 9. 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、J S T 別館、東京、2018 年 3 月 23–24 日.
 10. 日野原伸生、
“有限原子核基底状態でのゲージ対称性の破れ”、KEK 理論センター研究会『ハドロン・原子核物理の理論研究最前線 2017』、高エネルギー加速器研究機構素粒子原子核研究所 KEK 理論センター、2017 年 11 月 20–22 日.
 11. 日野原伸生、
“対回転の慣性モーメントを用いた対密度汎関数の精密化”、日本物理学会 2017 年秋季大会、宇都宮大学峰キャンパス、2017 年 9 月 12–15 日.
 12. 日野原伸生、
“対相互作用の運動量依存項と関連する対相関観測量”、RCNP 研究会「核子・ストレンジネス多体系におけるクラスター現象」、大阪大学核物理研究センター、2017 年 8 月 3–5 日.
 13. 橋本幸男、関沢一之、矢花一浩、
“時間依存密度汎関数理論に基づく原子核ダイナミクスの研究”（ポスター）、第4回報告会（HPCI）、コクヨホール、2017 年 11 月 2 日.
 14. 橋本幸男、
“Gogny-TDHFB 法による ^{20}O 、 $^{34}\text{Mg} + ^{20}\text{O}$ の計算における対相関の効果”、日本物理学会第 73 回年次大会、東京理科大学野田キャンパス、2018 年 3 月 22–25 日.
 15. 鷺山広平、

- “核構造模型の高精度化と核反応との橋渡し”、ImPACT-OEDO workshop2017、理研、2017年7月13-14日。
16. 鷺山広平、
“原子核の形の揺らぎと大振幅集団運動”、RIBF 理論若手放談会：エキゾチック核物理の広がり、理研神戸、2017年7月31日-8月2日。
17. 鷺山広平、中務 孝、
“有限振幅法による3次元QRPAと集団質量の計算に向けて”、日本物理学会秋季大会、宇都宮大学、2017年9月12-15日。
18. 鷺山広平、
“密度汎関数法による原子核大振幅集団運動の記述に向けて”、KEK 理論センター研究会『ハドロン・原子核物理の理論研究最前線2017』、KEK、2017年11月20-22日。
19. 鷺山広平、中務 孝、
“3次元Skyrme-QRPAを用いた四重極集団ハミルトニアン慣性質量”、日本物理学会第73回年次大会、東京理科大学野田キャンパス、2018年3月22-25日。
20. 倪 放、中務 孝、
“自己無撞着な集団座標を用いた対振動状態の記述”、日本物理学会2017年秋季大会、宇都宮大学、2017年9月12-15日。
21. 倪 放、中務 孝、
“対相関による大振幅集団運動への理論的アプローチ”、RIBF 理論若手放談会：エキゾチック核物理の広がり、理研神戸、2017年7月31日-8月2日。
22. 柏葉 優、中務 孝、
“3次元実空間基底を用いたパスタ原子核のHFB状態の計算手法”、新学術領域「中性子星核物質」理論班主催研究会2018、熱海ニューフジヤホテル、2018年2月20-22日。
23. 柏葉 優、中務 孝、
“3次元実空間基底におけるHFB方程式の解法”、日本物理学会第73回年次大会、東京理科大学野田キャンパス、2018年3月22-25日。

7. 異分野間連携・国際連携・国際活動等

【国際連携】

1. ドイツ・マックスプランク量子光学研究所のアト秒科学実験グループと、高強度パルスレーザーと固体の相互作用に関する共同研究（矢花）
2. オーストリア・ウィーン工科大学の理論グループと、電子ダイナミクスの計算科学的研究に関する共同研究（矢花）
3. ドイツ・マックスプランク物質構造動力学研究所の理論グループと、電子ダイナミクスの計算科学的研究に関する共同研究（矢花）

4. ポーランド・ワルシャワ工科大学の原子核理論グループと共同で、実空間 TDHFB 計算（中務）
5. フランス・IN2P3 の原子核物理グループと共同で、Nd 核の低励起スペクトルの研究（中務）
6. 日本 JSPS-中国 NSFC 二国間協力事業「R プロセスの謎解明に向けた核質量と寿命の研究」（日本側代表：中務）
7. 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原子核行列要素に関する共同研究（日野原）。
8. 米国・ミシガン州立大学 Nazarewicz 教授およびフィンランド・ユバスキュラ大学の Kortelainen 研究員と原子核密度汎関数の諸問題に関する共同研究（日野原）
9. 韓国・ソウル国立大学の大学院生 Ha 氏と理化学研究所における中性子過剰 Mo 原子核の β - γ 核分光実験に関する共同研究（日野原）
10. クロアチア・ザグレブ大学の Vretenar 教授と Niksic 教授との偶奇核の構造に関する共同研究（野村）
11. スペイン・マドリード自治大学 Robledo 教授およびクウェート・クウェート大学 Rodriguez-Guzman 教授との、形状相転移と変形共存、および偶奇核に関する共同研究（野村）
12. ドイツ・ケルン大学の Jolie 教授とのカドミウム同位体構造に関する共同研究（野村）
13. フランス・GANIL の Van Isacker 博士と米国・ノースカロライナ大学 Engel 教授との二重ベータ崩壊に関する共同研究（野村）

8. シンポジウム、研究会、スクール等の開催実績

1. 第一回 SALMON チュートリアルの実施、2017 年 11 月 24 日筑波大学計算科学研究センター（矢花）
2. 国際会議 Recent Progress in Many-Body Theories (RPMBT-19) (Pohang, Korea, June 25-30, 2017) のプログラム委員を務めた（中務）。
3. 国際ワークショップ China-Japan collaboration workshop on nuclear mass and life for unravelling mysteries of r-process (Tsukuba, June 26-28, 2017) の組織委員長（中務）、および組織委員（日野原）を務めた。
4. 国際会議 The 16th International Symposium on Capture Gamma-Ray Spectroscopy and Related Topics (CGS16) (Shanghai, China, September 18-22, 2017) のプログラム委員を務めた（中務）。

5. 筑波大学計算科学研究センター25周年記念シンポジウム「計算科学の発展と将来」（つくば国際会議場、2017年10月10－11日）の組織委員長を務めた（中務）。

9. 管理・運営

矢花一浩

計算科学研究センター 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、
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 先端計算科学推進室長、
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 量子物性研究部門長
数理物質系物理学域 運営委員、
筑波大学50年史編纂専門委員会委員、
物理学類カリキュラム委員

中務孝

計算科学研究センター 原子核物理研究部門 部門主任
計算科学研究センター 運営委員会委員
計算科学研究センター 人事委員会委員
計算科学研究センター 運営協議会委員
計算科学研究センター 共同研究担当主幹
計算科学研究センター 共同研究委員会および共同研究運用委員会 委員長
計算科学研究センター 学際計算科学連携室員
最先端共同 HPC 基盤施設 大規模 HPC チャレンジ審査委員会 副委員長
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 理論グループ副議長

日野原伸生

計算科学研究センター 先端計算科学推進室員

10. 社会貢献・国際貢献

矢花一浩

平成 29 年度テニユアトラック普及・定着事業委員会委員
西宮湯川記念賞選考委員会委員長

中務 孝

Editor for Journal of Physical Society of Japan
Editor for International Journal of Modern Physics E
JAEA タンデム専門委員会委員
JAEA 黎明研究評価委員会委員
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
高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・常置人事委員会委員
高エネルギー加速器研究機構大型シミュレーション研究推進委員会委員
計算基礎科学連携拠点運営委員（ポスト京重点課題 9）
中村誠太郎賞選考委員

中務 孝、橋本幸男、日野原伸生

筑波大学エクステンションプログラム FORTRAN 初級講座でミクロ世界の物理学を学ぼう、2017 年 10 月 14－15 日

11. その他

海外長期滞在

1. 野村昂亮

Faculty of Science, University of Zagreb, Croatia,
2017 年 4 月 15 日－2017 年 10 月 31 日

VI. 原子核実験グループ

教授	三明康郎、小沢顕
准教授	江角晋一、笹公和
講師	中條達也
助教	Oliver Busch、坂井真吾、森口哲朗、鈴木伸司
研究員	渡辺 陽介、松中 哲也
技官	加藤純雄
大学院生	福岡翔太 (D3)、木村創大 (D3)、向井もも (D3)、田中直斗 (D3)、横山広樹 (D3)、 野中俊宏 (D3)、細川律也 (D3)、新井郁也 (D2)、Murad Ahmed(D2)、青山遼 (D2)、 杉浦哲郎 (D2)、金秉徹 (D1)、天野将道 (M2)、黒尾奈未 (M2)、細谷青児 (M2)、 佐藤一輝 (M2)、レバザ義美 (M2)、上岡大起 (M1)、高野健太 (M1)、市沢太地 (M1)、 加藤浩樹 (M1)、川名大地 (M1)、川村陽太 (M1)、鈴木刀真 (M1)、中川和也 (M1)
卒業研究生	落合悠太、齋藤大士、高村匡広、田所賢一、中川果南、畠山みな、星有輝子

【1】低エネルギー原子核実験グループ

(小沢顕、笹公和、森口哲朗、鈴木伸司)

(1) 稀少 RI リング

稀少 RI リング (R3) は、約 10 年間の開発研究の末、平成 27 年 3 月に完成した。平成 29 年度は 4 回目のコミッショニング実験を行った。平成 29 年度は、入射ラインの一部として利用している SHARAQ 上流に OEDO が導入され、入射ラインの磁石の配置が一部変更されたとともに、ビーム光学が変更された。一方、これまでのコミッショニング実験では、R3 への入射効率が、設計値より 1 桁以上小さい (約 0.14%) ことが問題であった。今回の入射ラインの変更に伴い、R3 へのビーム光学計算を再検討し、入射効率の改善を図った。実験セットアップおよび RI ビームを発生する BigRIPS の設定等は、平成 28 年度に行なった第 3 回コミッショニング実験とほぼ同じである。238U の一次ビームから核分裂破砕片として、78Ge 周辺の不安定核を生成した。生成直後に、エネルギー吸収板により、不安定核を約 180 A MeV まで減速させた。新しいビーム光学により、78Ge の入射効率を測定したところ、入射効率は、約 1.9% となり、以前より 1 桁以上改善されたとともに、ほぼ設計値の入射効率を得ることができた。今後は、この新しいビーム光学により質量測定を行う予定である。平成 29 年 10 月には、重元素合成過程解明に関連して、R3 による Sn の領域の質量測定のプロポーザルを理研 RI ビームファクトリーに提出した。プロポーザルは、12 月の PAC で審査され、採択された。平成 30 年度の秋以降に質量測定実験を行う予定である。

(2) 偏極陽子ビームによる不安定核の生成

我々は、不安定核の核モーメント測定を目標として、偏極陽子ビームによる核偏極した不安定核の生成を試みている。平成 29 年度は、平成 28 年 3 月から供用が開始された 6MV タンデム加速器で実験を行なった。不安定核の核モーメント測定は、不安定核からのベータ線の非対称放出を利用した核磁気共鳴法 (ベータ NMR) により行う。我々は、6MV タンデムの A6 コースに、ベータ NMR の実験装置

(静磁場、高周波磁場、ベータ線検出器などから構成) を設置し、実験を行なった。まずは、我々のベータ NMR 装置のシステムチェックとして、先行研究において、核偏極生成が確認されている偏極陽子 12MeV と Si 標的の系で実験を始めた。この系では、(p,n) 反応、(p, α) 反応により、それぞれ不安定核 29P ($T_{1/2}=4.2$ s) と 25Al ($T_{1/2}=7.2$ s) が生成される。これらの不安定核の核磁気モーメントは既知である。6MV タンデム加速器により 12 MeV に加速された偏極陽子ビームを、A6 コースのベータ NMR の実験装置内に設置した厚さ 0.5mm の Si 標的に照射した。偏極陽子ビーム (偏極度、約 70%、ビーム強度、約 20 nA) を 10 秒間照射後、 β 線の時間スペクトルを観測し、29P、25Al および 30P ($T_{1/2}=150$ s) の生成を確認した。生成した不安定核の核偏極量は、標的の上下に置いたベータ線検出器の非対称度から推定できる。今回の測定結果は、約 0.7% の非対称度を示した。この非対称度は、先行研究の結果と同程度である。先行研究と同程度の核偏極生成が確認できたので、今後は、29P および 25Al に対して核磁気共鳴を行い、我々のベータ NMR 実験装置のシステムチェックを進める。

(3) KISS の研究・開発状況

KEK Isotope Separation System (KISS) では、r-過程の解明に重要な中性子数 $N = 126$ 近傍の原子核の性質を多角的に調べるため、ガスジェット内レーザー共鳴イオン化核分光装置 (超微細構造測定)、低バックグラウンドかつ高効率な - 核分光測定系、多重反射型飛行時間測定式質量分析器 (MR-TOF-MS) (精密質量測定) の開発を行っている。

【中性子過剰 Os 同位体の - 核分光】 2017 年度には、198 Pt 回転標的と 136 Xe ビームを用いて 195 - 198 Os ($Z = 76$, $N = 119 - 122$) を生成し、レーザー共鳴イオン化により元素選択的にイオン源から引き出した後、新たに開発した低バックグラウンド複数分割型比例係数ガス検出器 (MSPGC) と高立体角なクローバー型 線検出器 (SCGe) で構成される検出器系で精密な - 核分光を行った。これにより、198 Os の 崩壊半減期 125(28) s を初めて測定することに成功した。また、多重度を考慮した MSPGC のイベントと同時測定した、線のエネルギースペクトル及び崩壊寿命測定から 195 Os の長寿命な準安定状態を発見した。基底状態からの 崩壊遅延 線も含めた、より詳細な解析が進行中である。

【線検出器の改良】 希少核種のより精密な 崩壊核分光のために、MSPGC の 3 次元位置読み出し化の開発を行っている。比例係数管の陽極線を BeCu 線から高抵抗な炭素線に変更し、両端から読みだされる電荷量の解析から 3 mm の位置分解能が得られた。オンライン実験に向けて本番機での性能試験が進行中である。

【ガスジェット内レーザー共鳴イオン化核分光】 原子核の電磁モーメントの精密測定に向けて、ガスジェット内レーザー共鳴イオン化核分光系を開発中である。速度の均一なガスジェット生成のためのラバルノズル、コリニアレーザー分光のために必要なイオン輸送装置である S 型 RFQ、高分解能なレーザー分光のための狭線幅ダイオードレーザー等を導入した。2018 年度より、本格的な性能試験を行う予定である。

【質量測定系の開発】 KISS から引き出した希少核種の精密質量測定のために MR-TOF を導入している。2017 年度には、- 核分光と両立するための二次ビームスイッチング偏向電極と、MR-TOF 入射のための二次ビーム再熱化用 He ガスセルを導入した。今後、MR-TOF へのイオンの導入に必要なイオントラップとバンチャー系を設置する予定である。

(4) 5480 BC 宇宙線イベントの原因究明に向けた長寿命放射性核種 ^{36}Cl の AMS 試験測定

5480BC 周辺で、宇宙線フラックスの増加が単年年輪中の ^{14}C (半減期 $T_{1/2} = 5,730 \text{ yr}$) 測定によって観測された。しかしその原因については大規模な太陽プロトン爆発現象の可能性が指摘されているが、詳細は不明である。同じ宇宙線生成核種である ^{36}Cl は、銀河宇宙線や太陽宇宙線などと地球大気の構成成分との相互作用により生成される放射性核種であり、大気中の生成過程や輸送過程が ^{14}C とは異なる。 ^{36}Cl 生成率は地球に入射する宇宙線の強度に依存して変化するため、海底堆積物やアイスコアに蓄積した ^{36}Cl フラックスの変動から過去の宇宙線強度の変動を復元することができる。そこで南極ドームふじで掘削されたアイスコア中の ^{36}Cl について加速器質量分析 (AMS) による測定を行い、5480 BC 周辺の宇宙線フラックスの変動について調査した。 ^{36}Cl の AMS 測定では同重体の ^{36}S が重大な妨害核種になる。そこで、同重体の ^{36}S を抑制するために AgBr を用いたバックングを行った。またこの AgBr について、 ^{36}S の混入が少ない作製方法を検討し、市販試薬の AgBr と比較を行った。その結果、 ^{36}S の混入量が少ない AgBr を得ることに成功し、検出限界は $^{36}\text{Cl}/\text{Cl} \sim 3 \times 10^{-15}$ を達成することができた。この AgBr をバックング材として用いて南極ドームふじアイスコア中の ^{36}Cl について AMS 試験測定を行い、宇宙線フラックスの変動について調査した。図 1 に南極ドームふじアイスコア中の 5480BC 付近の ^{36}Cl 濃度変動の測定結果を示す。5480BC 付近に ^{36}Cl 濃度の増大ピークが認められるが、今回測定を行ったサンプルでは時間分解能が不十分であった。今後は、より高時間分解能を持つサンプルを用いた測定を検討する予定である

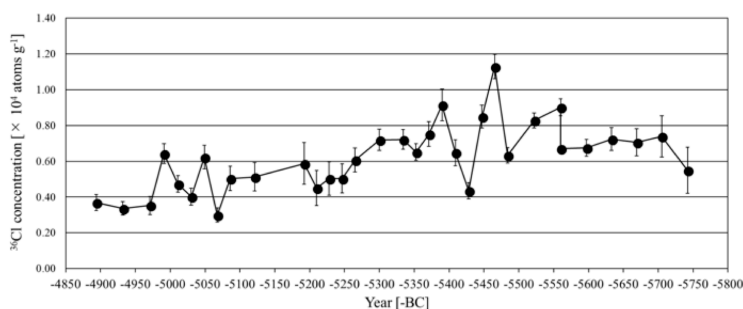


図 1 南極ドームふじアイスコア中の 5480BC 付近の ^{36}Cl 濃度の測定結果

(5) 構造材料計測用マイクロビーム分析装置による元素イメージング測定

筑波大学 6 MV タンデム加速器 A3 コースに構造材料計測用マイクロビーム分析装置を設計開発した。収束イオンビームスキャン照射の特長を生かせる透過型反跳粒子検出分析法 (Elastic Recoil Detection Analysis: ERDA) を実施して、構造材料中の水素についてマイクロメートルオーダーの位置分解能を有するイメージングを実現した。また、PIXE 測定と両立させることにより、水素を含む多元素同時イメージングを実用化した。図 2 (左) は、透過 ERDA-PIXE 同時測定の配置図である。水素を含んだ材料を模擬したものとして、電子顕微鏡調整用銅メッシュ、有機膜、アルミニウムの 3 層構造を持った試料 (全体厚さ約 $90 \mu\text{m}$) を作成した。銅メッシュ側からヘリウムビームをスキャン照射し、反跳水素 (透過 ERDA) と銅の特性 X 線 (PIXE) を観測した。測定結果の例を図 2 (右) に示す。照射領域は $250 \mu\text{m} \times 250 \mu\text{m}$ で、図左は透過 ERDA による水素分布図である。ヘリウムビームが銅メッシュに照射された位置には有機膜中の水素は反跳放出されず、直接有機膜に照射された位置でのみ反跳水素が検出されているのがわかる。図右には、PIXE による銅メッシュ (太さ $12 \mu\text{m}$) の像が見られる。本計測手法により、試料中の水素分布をマイクロメートルオーダーの精度でイメージング化することが可能

になった。また、他の元素分布も同時に取得することで、水素と他元素の分布の関連性についても情報を得られる。その他、非破壊分析という特長を生かして電子顕微鏡画像などの手法による情報とリンクさせることで、亀裂や結晶粒界など試料中の微細構造との関係についても情報を得ることが可能となった。

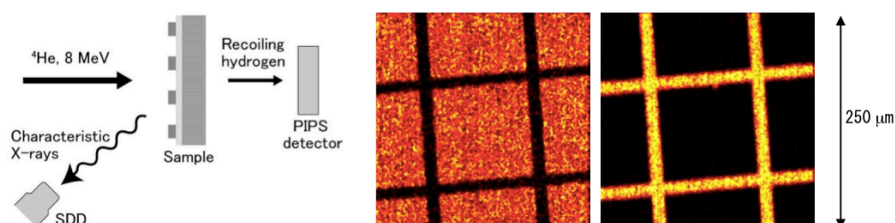


図2 (左図) 透過 ERDA-PIXE 同時測定配置図、(右図) 透過 ERDA-PIXE 同時測定の例 (左: 水素、右: 銅)

(6) 加速器質量分析法によるストロンチウム 90 の迅速定量法の開発

筑波大学 6 MV タンデム加速器質量分析装置を用いてストロンチウム 90 (^{90}Sr : 半減期 28.79 年) の迅速定量法の開発を進めている。 ^{90}Sr は、ウランやプルトニウムなどの核分裂生成物であり、原子力発電所での事故や 1950 年代に実施された大気圏内核実験により、環境中に供給された放射性核種である。しかし、純線放出核種である ^{90}Sr の分析には複雑な化学操作と時間が掛かるため、迅速な定量手法の開発が求められている。本研究では、 ^{90}Sr を加速することで、物質 (検出器内のガス) でのエネルギー損失差を利用して妨害となる同重体 (同重分子や ^{90}Zr など) を分離識別して、直接的に検出する手法を開発した。 Sr は電子親和力が低いために負イオンを形成し難い。そのため、フッ化ストロンチウム (SrF_2) から、負分子イオン SrF_3^- を引き出した。なお、 Cs^+ ビームのスパッタリングによるチャージアップを防ぐために、導電性の PbF_2 粉末を重量比 $\text{SrF}_2 : \text{PbF}_2 = 1 : 4$ で混合した。 $^{88}\text{SrF}_3^-$ のビーム電流として、最大で約 400 nA を得ている。相对比较検定のための標準試料は、IAEA の Proficiency Test 試料を希釈したものを用いた。 ^{90}Sr の AMS 測定では、加速電圧 6 MV により $^{90}\text{Sr}^{8+}$ を 51.8 MeV まで加速した。測定系では、5 枚電極型 E-E ガス電離箱についてガス圧力等の最適測定条件を調べて、同重体の ^{90}Zr との分離識別を試みた。標準試料 ($^{90}\text{Sr}/\text{Sr} = 3.38 \times 10^{-9}$) とブランク試料についての 2 次元スペクトルの測定図 3 (左) を示す。本研究成果として、国内初となる ^{90}Sr の AMS による直接検出に成功した。図 3 (右) に ^{90}Sr -AMS における検量線の結果を示す。 ^{90}Sr の検出限界として、 $^{90}\text{Sr}/\text{Sr} \sim 6 \times 10^{-13}$ ($\sim 3 \text{ mBq}$) を達成している。30 分程度の計測時間で、測定精度 $\sim 3\%$ ($^{90}\text{Sr}/\text{Sr} \sim 10^{-10}$) を得た。AMS による ^{90}Sr の測定性能として世界最高感度であり、従来の線計測による ^{90}Sr 定量方法と同等の検出限界を得ることができた。

(7) 宇宙線生成核種 ^{36}Cl 降下フラックスの変動評価

^{36}Cl (半減期 30.1 万年) は大気中で宇宙線と Ar との核反応 ($^{40}\text{Ar}(p, X)^{36}\text{Cl}$ など) によって生成され、地表へ降下する。このような核種は宇宙線生成核種と呼ばれており、その生成率は宇宙線強度変動に依存する。地球へ降り注ぐ宇宙線量は、主に太陽活動と地磁気の強度に依存することが知られている。よって、宇宙線生成核種の降下フラックスを測定することで、宇宙線強度変動の復元が期待されている。本研究では、降水中に含まれる ^{36}Cl について注目し太陽黒点数との比較をおこなった。降水中

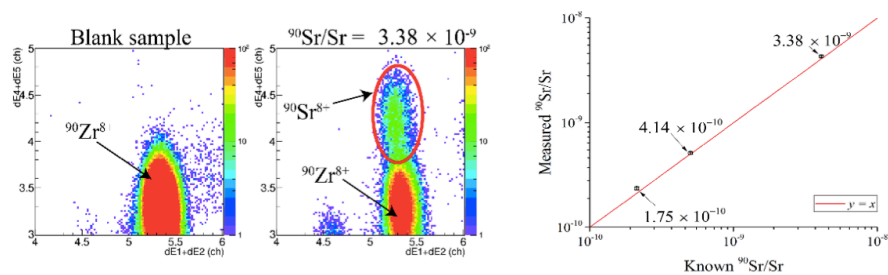


図3 (左図) 標準試料 ($^{90}\text{Sr}/\text{Sr} = 3.38 \times 10^{-9}$) とブランク試料の2次元スペクトル図、(右図) 標準試料を用いた ^{90}Sr 検量線の結果。横軸は既知の値で縦軸が測定値となる。

の ^{36}Cl を分析するにあたり、筑波大学構内で2010年1月から2014年9月まで一ヶ月ごとに降水を採取した。そして、筑波大学 AMS システムを用いて降水中 ^{36}Cl 同位体比 ($^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$) を測定し、結果から ^{36}Cl 降下フラックスを計算した。図4は測定から得られた一ヶ月ごとの ^{36}Cl 降下フラックスを一年ごとに平均した結果(2004年から2009年のデータは Y. Tosaki et al., 2012 による)と、太陽黒点数との比較を示している。ただし、2011年は3月に発生した福島第一原子力発電所事故によって放出された ^{36}Cl の影響が大きい。2011年および1月から9月までのみデータを取得した2014年を除いて、 ^{36}Cl 降下フラックスと太陽黒点数との相関係数を計算すると相関係数 $r = -0.4$ となった。なお、計算の際には ^{36}Cl が大気中で生成されてから地表へ降下するまで2年かかると仮定している。以上の結果より、 ^{36}Cl 降下フラックスと太陽黒点数は逆相関することが本研究において確認された。

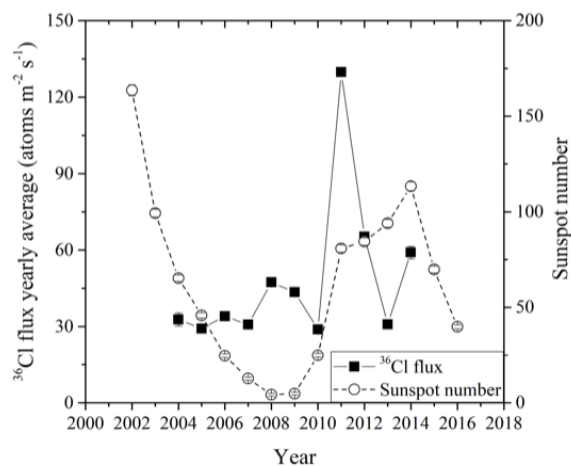


図4 ^{36}Cl 降下フラックスと太陽黒点数との比較

(8) Lamb シフト型偏極イオン源の偏極陽子ビームの偏極度測定

筑波大学研究基盤総合センター応用加速器部門のLamb シフト型偏極イオン源 (PIS) は、東日本大震災による大きな被害を受けたが、平成26年度末までに再構築を終え、その後、偏極ビームの生成を確認している。平成29年度は、主に、6MV タンデム加速器によって加速させた偏極陽子ビームの偏極度測定を行った。

本測定では、PIS からの偏極陽子を 12 MeV まで加速させ、測定室の A6 コースへと輸送させた。コースの末端には、 ^4He との弾性散乱を利用したポラリメータを設置した。ポラリメータの内部は ^4He ガス（約 1 気圧）で満たされており、左右には弾性散乱をした陽子を検出するためのシリコン半導体検出器が装填されている。偏極度 P は、 $A \cdot P = \frac{N_L - N_R}{N_L + N_R}$ によって表すことができる。 A は偏極分解能で、12 MeV の陽子と ^4He との弾性散乱の場合、 $A = 1$ と近似できる。 N_L と N_R は、それぞれポラリメータの左側と右側のシリコン半導体検出器で検出された弾性散乱陽子のイベント数である。図 5 は、左右のシリコン半導体検出器によって得られたエネルギースペクトルである。図 5 中のメインピークは弾性散乱イベントであり、スピンの上向き（下向き）の場合、左側（右側）の方が他方に比べてイベント数が多いのがわかる。この結果から、ビームコース末端における偏極陽子ビームの偏極度は約 44%（スピン上向き）と 37%（スピン下向き）だった。これらの偏極度は、PIS 下流における偏極度（約 80%）に比べると低い。この減偏極の原因としては、ビームライン中の残留ガスの影響が考えられるが、原因は調査中である。

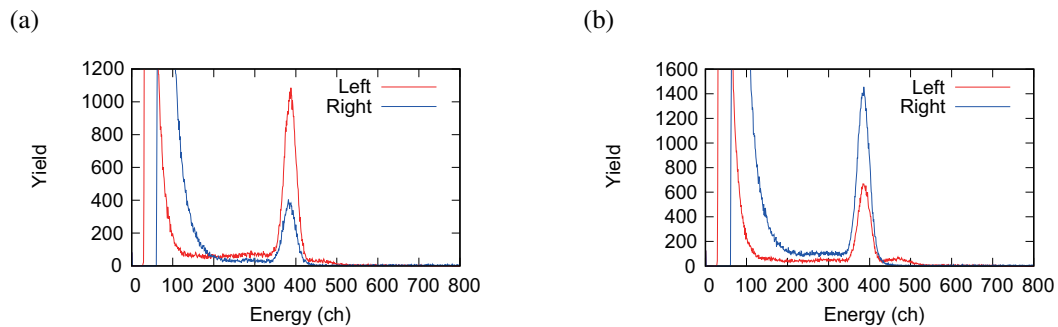


図 5 ポラリメータの左側（赤線）と右側（青線）のシリコン半導体検出器によって得られたエネルギースペクトル。(a) と (b) は、それぞれスピンの上向きと下向きの偏極陽子ビームを用いた場合の結果である。

(9) 固体水素標的を用いた不安定核のスキン厚導出手法の開発

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

実験は、放射線医学総合研究所のシンクロトロン施設 HIMAC で進めている。前年度はテスト実験を実施し、測定システムに問題ないことを確認した。平成 29 年度は、固体水素標的を用いて ^{17}Ne と ^{17}F の反応断面積測定を実施した。 ^{17}Ne のスキン厚は実験的に報告されており、本研究の結果と比較が可能である。一方、 ^{17}F のスキン厚の実験値はこれまでに報告されていない。一次ビームとして 180 MeV/u、もしくは、400 MeV/u の ^{20}Ne を Be 標的に照射し、 ^{17}Ne と ^{17}F の二次ビームを生成した。実験では、ビームエネルギーによって $\phi 50 \times 30 \text{ mm}^3$ と $\phi 50 \times 100 \text{ mm}^3$ の固体水素標的を使い分けた。プラスチックシンチレータやイオンチェンバー等の検出器を用いて、固体水素標的の上流と下流の粒子識別を行い、入射粒子数と出射粒子数の比から反応断面積を求めた。図 6 は、本研究で得た ^{17}Ne と ^{17}F の反応断面積のエネルギー依存性である。 ^{17}Ne に関しては、スキン厚導出にとって重要とされる 100 MeV/u 以下のデータを中心に取得した。また、 ^{17}F に関しては、100 MeV/u 以下のデータは今後取得する予定

である。現在、これらの実験データと Glauber モデルを用いた解析を進めており、スキン厚の導出を試みている。

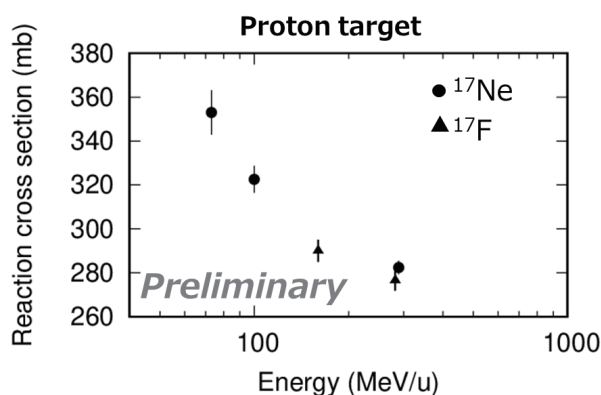


図 6 固体水素標的を用いた ^{17}Ne と ^{17}F の反応断面積。

(10) 稀少 RI リングでの精密質量測定に用いる飛行時間検出器の開発

稀少 RI リングを用いた質量測定では、飛行時間の測定から粒子の速度とリング内周期をそれぞれ決定して質量を求める。飛行時間検出器に求められる性能は、(1) 100 ps 以下の時間分解能、(2) 検出器内での速度変化が 10^{-4} 以下であること、(3) 100 % の検出効率、(4) $\phi 30$ mm 以上のアクセプタンスを有することである。これらの要請を満足する飛行時間検出器の開発を行なっている。開発中の検出器は、荷電粒子が薄膜を通過した時に等方的に放出される二次電子を、静電磁場を用いてマイクロチャンネルプレート (MCP) へと誘導し、荷電粒子の通過を検出する仕組みとなっている (図 7)。この検出器は、電磁場による二次電子の等時性輸送と薄膜を用いるため、上述の要求を満たすことが原理的に可能である。重イオンの薄膜通過においては十分な量の二次電子が生成されるため、理想的な検出効率も見込める。

昨年度は、 $\phi 45$ mm の薄膜と $\phi 42$ mm の MCP を備えることによりビームに対する有効領域を拡大を図った。重イオンビームを用いた性能試験では、時間分解能は $\sigma \sim 60$ ps であり、検出効率は最大 99 % を得ることができた。

今年度は、ビームに軸に対して検出器の前後に位置する正電極の薄膜を無くすことによって検出器内での速度変化をさらに抑えた。これにより、速度変化を 2×10^{-5} にすることができる。放射線医学総合研究所の HIMAC (Heavy Ion Accelerator in Chiba) から供給される ^{84}Kr ビームを用いた性能評価実験では、時間分解能は $\sigma = 53(2)$ ps であり、検出効率は最大 98(7) % を得た。しかしながら正電極の薄膜を薄膜を無くしたことによる電場の歪みは無視できず、二次電子の輸送時間には 150 ps 程度の位置依存性があり、満足できる性能ではなかった。

今後は、電極の形状を変化させることにより、二次電子の輸送時間を荷電粒子の通過位置に依らないよう改善し、質量測定に使用できるよう完成を目指す。

(11) 新しい準非破壊的な位置検出器の開発

稀少 RI リングを用いた質量測定実験では、飛行時間検出器の他に、粒子の磁気剛性率を測定するための位置検出器も必要である。位置検出器は、粒子の通過位置が運動量分散に依存する Dispersive な焦

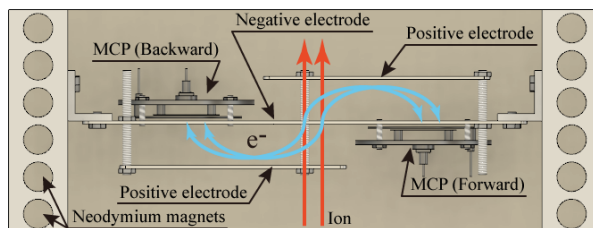


図7 飛行時間検出器の模式図。負電極中央に取り付けられた薄膜から発生した二次電子を検出する。

点面に置かれる。これまでの稀少 RI リングのコミッショニング実験では、RIBF で一般的に利用されている PPAC [Kumagai ら NIM2013] を用いてきた。PPAC はガス放電を検出原理とし、数 10 Torr のガスとガスを封じ込めるマイラー膜から構成されている低物質量の位置検出器である。しかし、それでも粒子の速度変化は約 1×10^{-3} と無視できず、粒子の速度から決定される質量精度に制限を与える。そこで本研究では、PPAC に置き換わる速度変化を無視できる薄膜を利用した位置検出器の開発を進めている。この位置検出器は、薄膜を用いた飛行時間検出器の原理を応用した全く新しいオリジナルの位置検出原理を持つ。どちらの検出器も、荷電粒子が薄膜を通過する際に放出される二次電子を電場と磁場を用いてマイクロチャンネルプレート (MCP) に導く。飛行時間検出器では、二次電子を 180 度偏向するため、荷電粒子の通過位置によらず二次電子の輸送時間はほぼ一定である。一方、位置検出器では、MCP の位置を薄膜に対して 90 度に設置することにより、二次電子の輸送時間に位置依存性を持たせている。そして、薄膜の前方及び後方に放出される二次電子の輸送時間の差から荷電粒子の薄膜通過位置を測定する (図 8)。

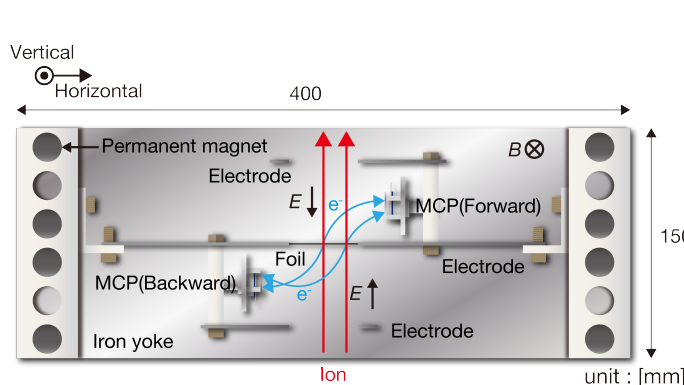


図8 新しい位置検出器の模式図。前方・後方の二次電子の輸送時間は荷電粒子の水平入射位置に依存する。

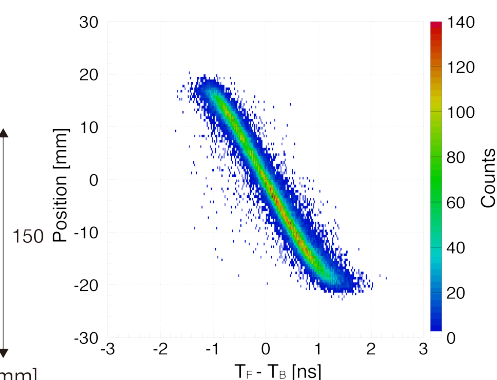


図9 荷電粒子の入射位置と前方・後方の二次電子の輸送時間差の相関を表す 2 次元ヒストグラム。

原理検証のため、 $\phi 45$ mm の薄膜と $\phi 15$ mm の MCP 検出器を備えた小型試作機を作成した。薄膜には $1 \mu\text{m}$ のマイラーの両面に約 100 nm のアルミニウムをコーティングしたものを使用し、PPAC と比べて約 $\frac{1}{45}$ の厚さに抑えられている。磁場と電場はそれぞれ、約 90 Gauss と約 230 V/mm である。重イオンビームを用いた検証実験では、 ± 20 mm の範囲で、約 2.5 ns の時間差を観測した (図 9)。これにより、前方と後方に輸送される二次電子の時間差から位置を測定できることを実証した。検出効率率は約 99%、位置分解能は 2 mm 以下と性能も良好であった。今後は、質量測定実験で使用する有効領域を拡大した大型実機の作成を行う。

【2】高エネルギー原子核実験グループ

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

(1)LHC-ALICE 実験における pp 及び Pb-Pb 衝突実験での荷電粒子ジェット生成についての研究

通常、ハドロン内に閉じ込め状態にあるクォークやグルーオン (パートン) は、高エネルギー原子核衝突によって生み出される超高温・高密度環境下では一定領域内を自由粒子のように振る舞うことができる Quark-Gluon Plasma(QGP) 相へと相転移する。衝突実験において高運動量を持つ粒子が一定領域内に束になって観測されることがあり、この現象はジェットと呼ばれる。ジェットは衝突初期におけるパートン間での高運動量移行を伴う相互作用過程を起源とし、衝突によって生成された QGP との相互作用を経て観測されると考えられ、QGP 物性を探る上での非常に良いプローブである。

我々は 2015 年に収集された $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV の pp 及び Pb-Pb 衝突実験の現在使用可能である全統計量を用いて荷電粒子生成量の測定を行った。原子核衝突における原子核効果を定量的に評価するため、pp 衝突における結果を基準として Nuclear modification factor(R_{AA}) を測定した。測定された荷電粒子ジェットの R_{AA} を図 10 に示す。 $R_{AA} < 1$ は pp 衝突と比較して Pb-Pb 衝突ではジェット収量が抑制されていることを示し、これは QGP との相互作用によるパートンのエネルギー損失があったためであると解釈できる。

本結果は今後、pp 衝突におけるジェット生成量や QGP 中でのエネルギー損失効果についての理論モデル計算との比較等を含め、査読付き論文としてまとめる予定である。

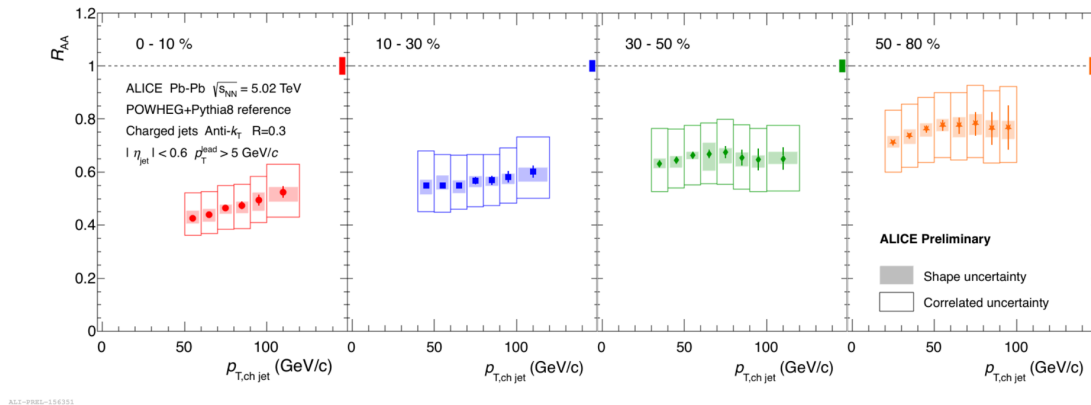


図 10 荷電粒子ジェットの R_{AA}

(2)LHC-ALICE 実験におけるチャーム・ボトムクォークの測定

チャームクォークやボトムクォークは質量が QGP の温度よりも大きいために熱的に生成されるのではなく、衝突初期のハード散乱によってのみ生成される。陽子-陽子衝突でのハード散乱によるチャーム・ボトムクォークの生成は QCD 計算で記述できその生成機構がよくわかっているため、高エネルギー重イオン衝突によって生成される高温高密度物質 (QGP) の性質を探索する上で重要な観測量として盛んに測定が行われている。図 11 は ALICE 実験で測定されたチャーム・ボトムクォークを含む D 中間子及び B 中間子の崩壊を起源とする電子の R_{AA} (重イオン衝突における粒子収量を陽子 + 陽子衝突

における収量 × 平均核子衝突回数で割ったもの) である。陽子-鉛衝突では R_{AA} は 1 と無矛盾である一方、鉛-鉛衝突においては $R_{AA} < 1$ であり、これはチャーム・ボトムクォークが QGP 通過中にエネルギーを失い、生成量が減少したことを示唆する。

また、7 TeV 陽子-陽子衝突においてチャームクォークを含むバリオンである Ξ_c^0 粒子が ALICE 実験において始めて測定された。図 12 は Ξ_c^0 粒子と D^0 中間子の生成断面積の比をとったバリオン/メソン比と呼ばれる量である。既存のモデル計算が実験結果を過小評価していることが分かり、より詳細なハドロン化機構の理解が必要であることを示した。今後は陽子-鉛衝突及び陽子-陽子衝突における D 中間子及び B 中間子の崩壊起源電子の高横運動量領域における詳細な測定や、チャーム・ボトムクォークを起源とするジェット (パートンが破碎した粒子群) の研究を推進する予定である。

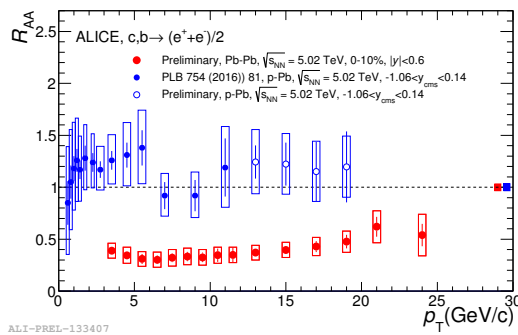


図 11 D 中間子及び B 中間子起源の電子の R_{AA} (赤:5.02 TeV 鉛-鉛衝突、青:5.02 TeV 陽子-鉛衝突)

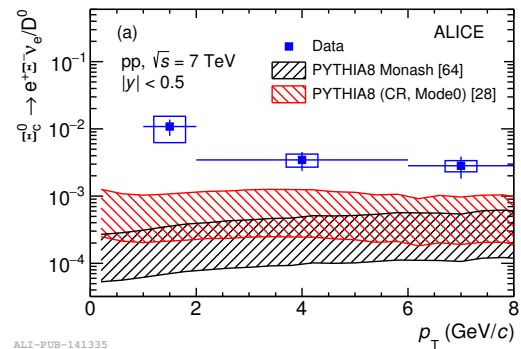


図 12 7 TeV 陽子-陽子衝突における Ξ_c^0/D^0 比

(3)LHC-ALICE 実験における HBT 測定

重イオン衝突では、発生するハドロン同士の量子力学的な干渉効果を測定することにより QGP のフリーズアウト時の大きさや衝突後の時空発展の描像を調べることのできる HBT 測定がある。QGP の性質の一つに、衝突に参加した粒子の空間的な異方性による、衝突後の楕円的な集団膨張運動が知られているが、フリーズアウト時の楕円的な空間的異方性は衝突初期の形状を反映しているということが、この HBT 測定により理解されている。

LHC-ALICE 実験では、さらにこの現象を理解するために集団膨張運動の大きさによって事象を選択する Event Shape Engineering 法を適用した。その結果、集団膨張運動のより大きい事象ではフリーズアウト時の楕円的な空間的異方性がより強く残っていることがわかった。この結果は、集団膨張運動とフリーズアウト時の空間的な異方性の起源が初期の形状によるものということを強く支持するものである。

(4)RHIC-STAR 実験における event shape engineering を用いた 2 粒子相関の反応平面依存性の測定

原子核衝突実験において初期に起こるパートン同士の二体散乱を起源とした高エネルギーの粒子群であるジェットが生成される。ジェットは QGP 中で相互作用し、そのエネルギーを損失する。このことから、ジェットは QGP 中でのエネルギー損失機構の解明のために用いられてきた。

近年、粒子多重度による中心衝突度の決定に加えて、集団膨張運動 (flow) の強度を用いて事象の形状を選択する手法として、Event Shape Engineering(ESE) が提案された [2]。これを用いることで、ジェッ

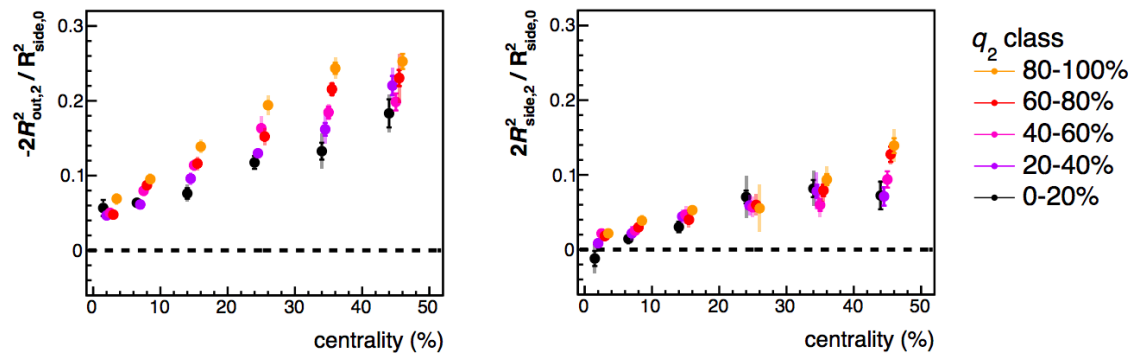


図 13 フリーズアウト時の楕円率 ($-2R^2_{out,2}/R^2_{side,0}, 2R^2_{side,2}/R^2_{side,0}$) と Centrality 及び q_2 selection との関係 [1]

トの QGP 中でのエネルギー損失の通過距離依存性および、QGP との相互作用によって失われたエネルギーの再分配と系の膨張運動に関してより詳細な測定を行うことができる。

図 14 は、2 粒子相関の反応平面依存性を楕円フローが強い事象と弱い事象で測定した結果である。反応平面方向の収量が増大しており、楕円フローがより強い方向、つまり通過距離が短い方向での収量が増大していることが明らかになった。

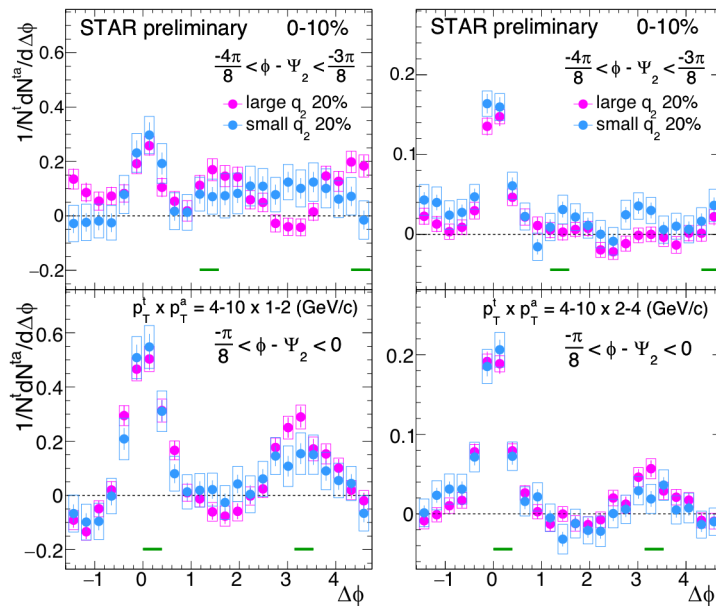


図 14 2 粒子相関分布の反応平面及び q_2 依存性

(5) RHIC-STAR 実験における unfolding を用いた net-proton 分布の高次キュムラント測定

QCD 相構造の解明および臨界点探索を目的として、理論的・実験的に様々なアプローチで研究が行われてきた。実験においては net-proton をはじめとした保存量の衝突事象ごとの高次揺らぎが重要な測定量の一つとして測定が行われてきた。[3]

また、近年実験によって得られた揺らぎに対する検出効率の補正に関する研究も進められており、その一つが unfolding (図 15) である。通常検出効率の補正として行われるのは二項分布を前提とした補正

であるが、実際の実験でこの前提が破れていた場合は正しく補正することができない。一方で unfolding を用いればシミュレーションの input と output の情報を用いて分布自体を再構成することができ、2 項分布を前提としない場合にも応用が可能であり、より正確な補正が期待される。実験の検出器を再現する詳細な Geant シミュレーションにより、検出器の応答関数が、従来の efficiency 補正と二項分布より広い分布を持つ beta-binomial 分布に違いことが示された。図 16 に示す様に、実験において測定された net-proton 分布から、その応答関数を用いて、unfolding を用いて C_6/C_2 を計算し比較した [4]。

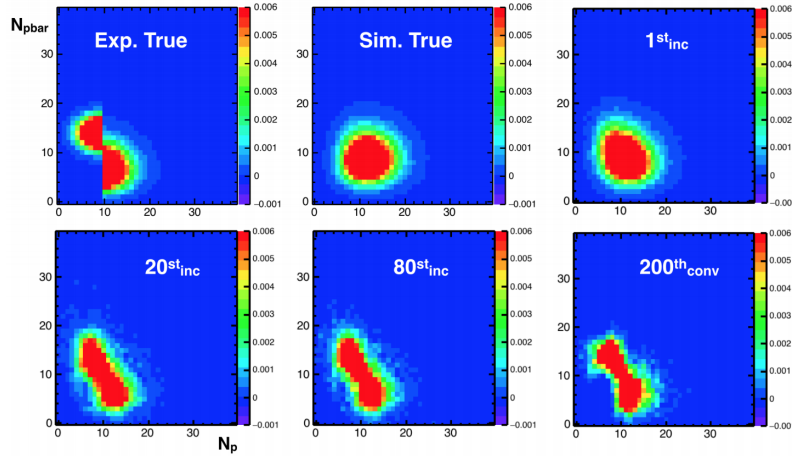


図 15 toy model simulation において unfolding を適用し、再構成された分布 [4]

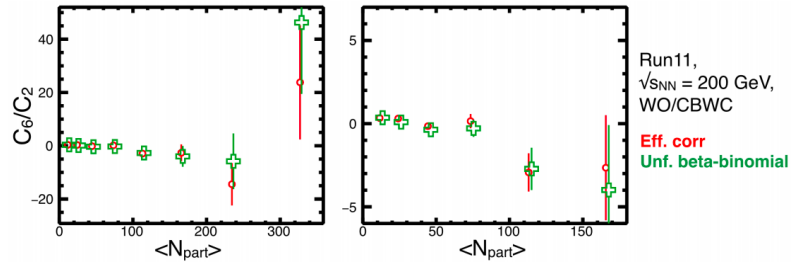


図 16 net-proton の C_6/C_2 における unfolding と efficiency 補正の比較 [4]

(6) RHIC-STAR 実験 $\sqrt{s_{NN}}=4.5\text{GeV}$ 固定標的における方位角異方性の測定

現在 RHIC-STAR 実験では衝突エネルギーを 7.7~200 GeV までスキャンすることで QCD 相図の臨界点やハドロン相とパートン相の相転移の境界についての研究が行われている (Beam Energy Scan)。

Cern の NA49 で行われた実験で、 $\sqrt{s_{NN}}=7.7\text{ GeV}$ において相転移と考えられるシグナルが観測された [5]。RHIC では固定標的に対してビームを衝突させることでより低い $\sqrt{s_{NN}}=4.5\text{ GeV}$ を実現し方位角異方性を測定し、AGS で取得された $\sqrt{s_{NN}}=4.9\text{ GeV}$ の結果と比較された。

粒子識別された荷電粒子ごとに 1 次の方位角異方性の傾きが測定された。 π と K_s^0 については BES の結果を支持するものとなり、proton の結果については AGS の proton と Λ の結果を支持するものとなり以前の結果を一通り再現する結果となった (図 17)。同様に 2 次の異方性の p_T 依存性についても AGS の結果を再現するものとなった (図 18)。

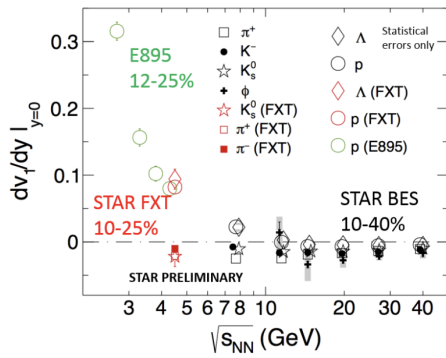


図 17 1 次の方角角異方性の傾きのエネルギー依存性 [6]

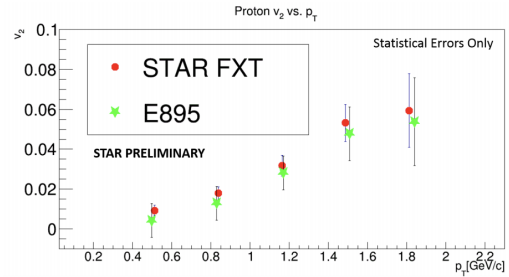


図 18 2 次の方角角異方性の p_T 依存性 [6]

(7) 飛行時間測定器 MRPC に対する構造による時間分解能の改善

J-PARC 重イオン衝突実験では、飛行時間測定器として MRPC が採用される予定である。広い検出面積を持ち、かつ高い時間分解能を有する大型 MRPC の開発が求められている。[7]

基本構造の MRPC には、信号誘起パッド部分での信号の反射による波形劣化や、雑音による信号劣化などの課題を抱えていた。そこで、金属導体の構造中への導入、信号誘起パッドの形状変更を施すことによって、高周波信号の伝送特性や、耐雑音特性の改善を目指した。

20 cm × 30 cm の検出面積を持つ、金属導体を導入した大型 MRPC を設計・制作し、宇宙線の TOF の測定実験を行った結果、信号を観測することに成功した。更に観測されたデータから TOF を解析した結果、 213.9 ± 6.6 ps の時間分解能を得た。

また新設計の信号誘起パッドの S パラメータ解析を行った結果、インピーダンス分布について顕著な改善が見られ、信号の伝送線路上での反射量の減少に成功したことが期待される。この信号誘起パッドを用いた MRPC を制作し、TOF 検出器としての性能を確認することが求められる。

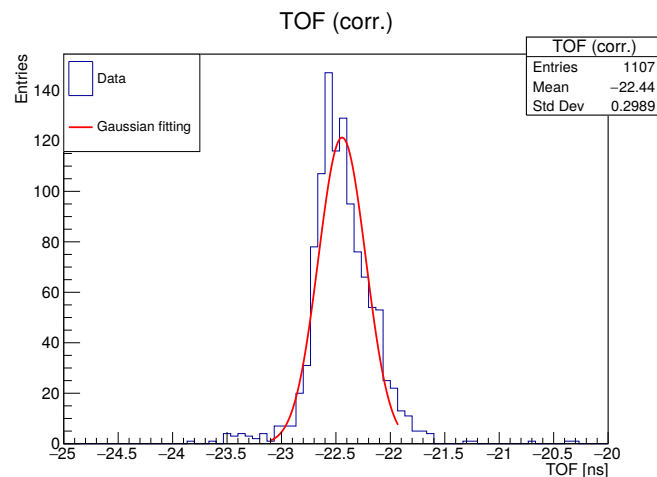


図 19 金属導体を導入した大型 MRPC によって測定された TOF の分布

(8)LHC-ALICE 実験 Si-W 型電磁カロリメータ実証機に向けた APV25 搭載 front-end 読み出しシステムの評価

QGP の性質の解明を目的として、スイス・ジュネーブにある欧州原子核機構 (CERN) では LHC 加速器を用いて ALICE 実験が行われている。この実験の改良を目的として、新たな検出器である FoCal を作る FoCal project がある。FoCal のは超前方方向に設置され、目的は重イオンの衝突後ビーム軸の前方方向に生成される高い運動量を持った光子・ハドロン・ジェットの測定である。この測定により QGP の生成の初期条件の解明が期待されている。この project は 4 年前に始動し、過去様々な試作機を作っては CERN でのテストを行ってきた。2017 年度は過去の結果をもとにノイズを減らす新たな読み出し方法を搭載した試作機を作り、東北大学電子光学研究センターの加速器施設でテストを行った。その結果として、ノイズを減らし MIP(最小電離損失粒子) の観測に成功した。図 20 電磁シャワーを起し読み出した信号は Geant4 でのシミュレーションと比較しても良い一致が見られた。今後は今回の結果を踏まえて、2018 年度に CERN で行われるテストに向けて新たな試作機を作っていく。

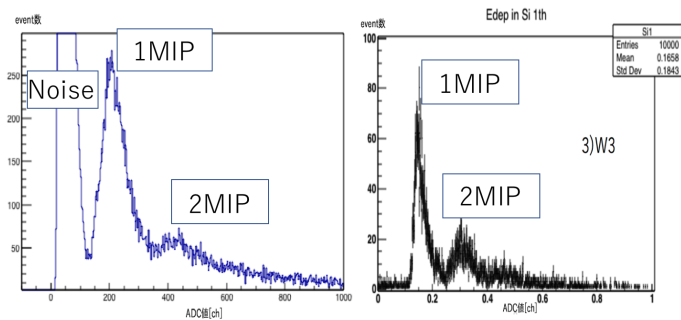


図 20 GEANT4 によるシミュレーションと実際の測定されたデータの比較

参考文献

- [1] 田中直斗, "Measurements of azimuthal angle dependence of HBT radii with respect to the event plane in $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV Pb-Pb collisions at LHC-ALICE", 筑波大学大学院数理物質科学研究科博士論文 (2017)
- [2] J. Schukraft, A. Timmins and S. A. Voloshin, Phys.Lett.B **719** (2013) 394-398
- [3] STAR collaboration, Phys. Rev. Lett. 113, 092301(2014)
- [4] T. Nonaka, "First measurement of the sixth order cumulant of net-proton multiplicity distributions in $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV Au+Au collisions at the STAR experiment", Ph.D Thesis at the University (2017)
- [5] NA49 Collaboration, Phys. Rev. C 77 (2008) 024903
- [6] Kathryn Meehan *et al.* (STAR Collaboration), Nucl.Phys. A 967 (2017) 808-811
- [7] H.Sako, T.Chujo, T.Gunji et al. "Towards the heavy-ion program at J-PARC"

原子核実験グループ研究業績リスト

< 原著論文 >

1. T. Tanaka, Y. Narikiyo, K. Morita, K. Fujita, D. Kaji, K. Morimoto, S. Yamaki, Y. Wakabayashi, K. Tanaka, M. Takeyama, A. Yoneda, H. Haba, Y. Komori, S. Yanou, B. J.-P. Gall, Z. Asfari, H. Faure, H. Hasebe, M. Huang, J. Kanaya, M. Murakami, A. Yoshida, T. Yamaguchi, F. Tokanai, T. Yoshida, S. Yamamoto, Y. Yamano, K. Watanabe, S. Ishizawa, M. Asai, R. Aono, S. Goto, K. Katori, and K. Hagino, Determination of fusion barrier distributions from quasielastic scattering cross sections towards superheavy nuclei synthesis, *J. Phys. Soc. Jpn.* 87, 014201/1-9 (2018).
2. Q. Zeng, M. Wang, X. H. Zhou, Y. H. Zhang, X. L. Tu, X. C. Chen, X. Xu, Yu. A. Litvinov, H. S. Xu, K. Blaum, R. J. Chen, C. Y. Fu, Z. Ge, W. J. Huang, H. F. Li, J. H. Liu, B. Mei, P. Shuai, M. Si, B. H. Sun, M. Z. Sun, Q. Wang, G. Q. Xiao, Y. M. Xing, T. Yamaguchi, X. L. Yan, J. C. Yang, Y. J. Yuan, Y. D. Zang, P. Zhang, W. Zhang, and X. Zhou, Half-life measurement of short-lived $^{94}\text{mRu}44+$ using isochronous mass spectrometry, *Physical Review C* 96, 031303(R)/1-5 (2017).
3. J. C. Zamora, T. Aumann, S. Bagchi, S. Boenig, M. Csatos, I. Dillmann, C. Dimopoulou, P. Egelhof, V. Eremin, T. Furuno, H. Geissel, R. Gernhaeuser, M. N. Harakeh, A.-L. Hartig, S. Ilieva, N. Kalantar-Nayestanaki, O. Kiselev, H. Kollmus, C. Kozhuharov, A. Krasznahorkay, Th. Kroell, M. Kuilman, S. Litvinov, Yu. A. Litvinov, M. Mahjour-Shafiei, M. Mutterer, D. Nagae, M. A. Najafi, C. Nociforo, F. Nolden, U. Popp, C. Rigollet, S. Roy, C. Scheidenberger, M. von Schmid, M. Steck, B. Streicher, L. Stuhl, M. Thuerauf, T. Uesaka, H. Weick, J. S. Winfield, D. Winters, P. J. Woods, T. Yamaguchi, K. Yue, and J. Zenihiro, Nuclear-matter radius studies from ^{58}Ni (,) experiments at the GSI Experimental Storage Ring with the EXL facility, *Physical Review C* 96, 034617/1-6 (2017).
4. E. Miyata, M. Takechi, T. Ohtsubo, M. Fukuda, D. Nishimura, K. Abe, K. Aoki, A. Ikeda, T. Izumikawa, H. Oikawa, K. Ohnishi, S. Ohmika, I. Kato, Y. Kanke, N. Kanda, R. Kanbe, H. Kikuchi, A. Kitagawa, S. Sato, H. Shimamura, J. Shimaya, S. Suzuki, T. Suzuki, R. Takagaki, H. Takahashi, Y. Takei, Y. Takeuchi, T. Takenouchi, N. Tadano, M. Tanaka, Y. Tanaka, K. Chikaato, H. Du, J. Nagumo, K. Nishizuka, T. Nishimura, S. Fukuda, M. Machida, A. Mizukami, M. Mihara, J. Muraoka, S. Yagi, S. Yamaoka, T. Yamaguchi, K. Yokoyama, Development of high resolution TOF detector for RI beams using Cherenkov radiation, *Acta Phys. Pol. B* 48, 409-412 (2017).
5. H. Du, M. Fukuda, D. Nishimura, M. Takechi, T. Suzuki, Y. Tanaka, I. Kato, M. Tanaka, K. Abe, T. Izumikawa, H. Oikawa, T. Ohtsubo, J. Ohno, Y. Kanke, H. Kikuchi, A. Kitagawa, S. Sato, U. Sayama, J. Shimaya, S. Suzuki, Y. Takeuchi, T. Takemoto, N. Tadano, R. Tamura, J. Nagumo, K. Nishizuka, S. Fukuda, K. Hori, S. Matsunaga, A. Mizukami, M. Mihara, E. Miyata, D. Murooka, S. Yamaoka, T. Yamaguchi, Nuclear structure of $^{15,16}\text{C}$ via reaction cross-section measurements, *Acta Phys. Pol. B* 48, 473-479 (2017).
6. M. Tanaka, M. Fukuda, D. Nishimura, M. Takechi, S. Suzuki, H. Du, Y. Tanaka, K. Aoki, S. Fukuda, A. Honma, T. Izumikawa, Y. Kamisho, N. Kanda, I. Kato, Y. Kanke, A. Kitagawa, J. Kohno, M. Machida, K. Matsuta, M. Mihara, E. Miyata, Y. Morita, J. Muraoka, D. Murooka, T. Nagai, M. Nagashima, K. Ohnishi, J. Ohno, T. Ohtsubo, H. Oikawa, S. Sato, H. Shimamura, T. Sugihara, T. Suzuki, N. Tadano, R. Takagaki, Y. Takei, A. Takenouchi, S. Yagi, T. Yamaguchi, S. Yamaki, S.

- Yamaoka, Reaction cross sections for 13-15B and one-neutron halo in 14B, *Acta Phys. Pol. B* 48, 461-466 (2017).
7. A. Homma, M. Takechi, T. Ohtsubo, D. Nishimura, M. Fukuda, T. Suzuki, T. Yamaguchi, T. Kuboki, A. Ozawa, S. Suzuki, H. Ooishi, T. Moriguchi, T. Sumikawa, H. Geissel, N. Aoi, R.-J. Chen, D.-Q. Fang, N. Fukuda, S. Fukuoka, H. Furuki, N. Inaba, N. Ishibashi, T. Ito, T. Izumikawa, D. Kameda, T. Kubo, M. Lantz, C. S. Lee, Y.-G. Ma, M. Mihara, S. Momota, D. Nagae, R. Nishikiori, T. Niwa, T. Ohnishi, K. Okumura, T. Ogura, M. Nagashima, H. Sakurai, K. Sato, Y. Shimbara, H. Suzuki, H. Takeda, S. Takeuchi, K. Tanaka, H. Uenishi, M. Winkler, Y. Yanagisawa, Measurements of interaction cross sections for 19-27F isotopes, *JPS Conf. Proc.* 14, 021010/1-3 (2017).
 8. K. Nishizuka, M. Takechi, T. Ohtsubo, D. Nishimura, M. Fukuda, K. Aoki, K. Abe, A. Ikeda, T. Izumikawa, H. Oikawa, K. Ohnishi, J. Ohno, S. Ohmika, I. Kato, Y. Kanke, S. Kanbe, N. Kanda, H. Kikuchi, A. Kitagawa, S. Sato, U. Sayama, J. Shimaya, T. Sugihara, S. Suzuki, T. Suzuki, H. Takahashi, Y. Taguchi, Y. Takei, Y. Takeuchi, A. Takenouchi, T. Takemoto, N. Tadano, M. Tanaka, Y. Tanaka, K. Chikaato, H. Du, T. Nagai, J. Nagumo, S. Fukuda, K. Hori, A. Honma, M. Machida, S. Matsunaga, A. Mizukami, M. Mihara, E. Miyata, D. Murooka, S. Yagi, S. Yamaoka, T. Yamaguchi, K. Yokoyama, Measurements of reaction cross sections for 9-11C, *JPS Conf. Proc.* 14, 021015/1-3 (2017).
 9. K. Sawahata, A. Ozawa, Y. Saito, Y. Abe, Y. Ichikawa, N. Inaba, Y. Ishibashi, A. Kitagawa, S. Matsunaga, T. Moriguchi, D. Nagae, S. Okada, S. Sato, S. Suzuki, T. Suzuki, Y. Takeuchi, T. Yamaguchi, J. Zenihiro, Investigations of charge-changing processes for light proton-rich nuclei on carbon and solid-hydrogen targets, *Nuclear Physics A* 961, 142-153 (2017).
 10. D. Kaji, K. Morita, K. Morimoto, H. Haba, M. Asai, K. Fujita, Z. Gan, H. Geissel, H. Hasebe, S. Hofmann, M. Huang, Y. Komori, L. Ma, J. Maurer, M. Murakami, M. Takeyama, F. Tokanai, T. Tanaka, Y. Wakabayashi, T. Yamaguchi, S. Yamaki, and A. Yoshida, Study of the Reaction $48\text{Ca} + 248\text{Cm} \rightarrow 296\text{Lv}^*$ at RIKEN-GARIS, *J. Phys. Soc. Jpn* 86, 034201/1-7 (2017)
 11. P. Zhang, X. Xu, P. Shuai, R.J. Chen, X.L. Yan, Y.H. Zhang, M. Wang, Yu.A. Litvinov, K. Blaum, H.S. Xu, T. Bao, X.C. Chen, H. Chen, C.Y. Fu, J.J. He, S. Kubono, Y.H. Lam, D.W. Liu, R.S. Mao, X.W. Ma, M.Z. Sun, X.L. Tu, Y.M. Xing, J.C. Yang, Y.J. Yuan, Q. Zeng, X. Zhou, X.H. Zhou, W.L. Zhan, S. Litvinov, G. Audi, T. Uesaka, Y. Yamaguchi, T. Yamaguchi, A. Ozawa, B.H. Sun, Y. Sun, F.R. Xu, High-precision QEC values of super allowed $0^+ \rightarrow 0^+$ -emitters 46Cr , 50Fe , and 54Ni , *Phys. Lett. B* 767, 20-24 (2017).
 12. X. L. Tu, A. Kelic-Heil, Yu. A. Litvinov, Zs. Podolyak, Y. H. Zhang, W. J. Huang, H. S. Xu, K. Blaum, F. Bosch, R. J. Chen, X. C. Chen, C. Y. Fu, B. S. Gao, Z. Ge, Z. G. Hu, D. W. Liu, S. A. Litvinov, X. W. Ma, R. S. Mao, B. Mei, P. Shuai, B. H. Sun, Y. Sun, Z. Y. Sun, P. M. Walker, M. Wang, N. Winckler, J. W. Xia, G. Q. Xiao, Y. M. Xing, X. Xu, T. Yamaguchi, X. L. Yan, J. C. Yang, Y. J. Yuan, Q. Zeng, W. Zhang, H. W. Zhao, T. C. Zhao, and X. H. Zhou, Application of isochronous mass spectrometry for the study of angular momentum population in projectile fragmentation reactions, *Physical Review C* 95, 014610/1-6 (2017).
 13. Y. Hirayama, Y.X. Watanabe, M. Mukai, M. Oyaizu, M. Ahmed, H. Ishiyama, S.C. Jeong, Y. Kakiguchi, S. Kimura, J.Y. Moon, J.H. Park, P. Schury, M. Wada, H. Miyatake, Doughnut-shaped gas cell for KEK Isotope Separation System, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B* 412, 11 (2017).

14. Y. Hirayama, M. Mukai, Y. X. Watanabe, M. Ahmed, S. C. Jeong, H. S. Jung, Y. Kakiguchi, S. Kanaya, S. Kimura, J. Y. Moon, T. Nakatsukasa, M. Oyaizu, J. H. Park, P. Schury, A. Taniguchi, M. Wada, K. Washiyama, H. Watanabe, and H. Miyatake, In-gas-cell laser spectroscopy of the magnetic dipole moment of the N 126 isotope 199Pt, *Physical Review C* 96 (2017) 014307.
15. Y. Hirayama, M. Mukai, Y. Watanabe, M. Oyaizu, M. Ahmed, Y. Kakiguchi, S. Kimura, Ionization cross section, pressure shift and isotope shift measurements of osmium H. Miyatake, P. Schury, M. Wada and Sun-Chan Jeong, Ionization cross section, pressure shift and isotope shift measurements of osmium, *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* 50 (2017) 215203.
16. M. Mukai, Y. Hirayama, Y.X. Watanabe, P. Schury, H.S. Jung, M. Ahmed, H. Haba, H. Ishiyama, S.C. Jeong, Y. Kakiguchi, S. Kimura, J.Y. Moon, M. Oyaizu, A. Ozawa, J.H. Park, H. Ueno, M. Wada, and H. Miyatake, High-efficiency and low-background multi-segmented proportional gas counter for α -decay spectroscopy, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* 884,1 (2018).
17. Yukihiro Satou, Keisuke Sueki, Kimikazu Sasa, Hideki Yoshikawa, Shigeo Nakama, Haruka Minowa, Yoshinari Abe, Izumi Nakai, Takahiro Ono, Kouji Adachi and Yasuhiro Igarashi, Analysis of two forms of radioactive particles emitted during the early stages of the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Station accident, *Geochemical Journal*, Vol. 52, 137-143, 2018. doi:10.2343/geochemj.2.0514
18. Masumi Matsumura, Kimikazu Sasa, Tetsuya Matsunaka, Keisuke Sueki, Tsutomu Takahashi and Hiroyuki Matsuzaki, Temporal variation of iodine-129 in rainwater at Tsukuba before and after the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident, *Geochemical Journal*, Vol. 52, 155-162, 2018. doi:10.2343/geochemj.2.0504
19. Seiji Hosoya, Kimikazu Sasa, Tetsuya Matsunaka, Tsutomu Takahashi, Masumi Matsumura, Hiroshi Matsumura, Mark Sundquist, Mark Stodola, Keisuke Sueki, Optimization of a $E - E$ detector for ^{41}Ca AMS, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, 406, 268-271, 2017. DOI: 10.1016/j.nimb.2017.03.161
20. A. Yamazaki, K. Sasa, S. Ishii, M. Kurosawa, S. Tomita, Y. Shiina, S. Shiki, G. Fujii, M. Ukibe, M. Ohkubo, A. Uedono, E. Kita, Development of a microbeam PIXE system for additive light elements in structural materials, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, 404 92-95 (2017).
21. Nami Kuroo, Kazuhito Ohmi, Katsunobu Oide, Demin Zhou, and Frank Zimmermann, Cross-wake force and correlated head-tail instability in beam-beam collisions with a large crossing angle, *Phys. Rev. Accel. Beams* 21, 031002 Published 15 March 2018.
22. K. Ohmi, N. Kuroo, K. Oide, D. Zhou, and F. Zimmermann, Coherent Beam-Beam Instability in Collisions with a Large Crossing Angle, *Phys. Rev. Lett.* 119, 134801 Published 26 September 2017.
23. Transverse spin-dependent azimuthal correlations of charged pion pairs measured in $p + p$ collisions at $\sqrt{s} = 500$ GeV, STAR collaboration, *Phys. Lett. B* 780 (2018) 332
24. Beam-Energy Dependence of Directed Flow of Lambda, Anti-Lambda, K plus, K minus, K0 short and phi in Au+Au Collisions, STAR collaboration, *Phys. Rev. Lett.* 120 (2018) 62301
25. Azimuthal transverse single-spin asymmetries of inclusive jets and charged pions within jets from polarized-proton collisions at $\sqrt{s} = 500$ GeV, STAR collaboration, *Phys. Rev. D* 97 (2018) 32004
26. Coherent diffractive photoproduction of ϕ mesons on gold nuclei at RHIC, STAR collaboration,

- Phys. Rev. C 96 (2017) 54904
27. Measurements of jet quenching with semi-inclusive hadron+jet distributions in Au+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV, STAR collaboration, Phys. Rev. C 96 (2017) 24905
 28. Bulk Properties of the Medium Produced in Relativistic Heavy-Ion Collisions from the Beam Energy Scan Program, STAR collaboration, Phys. Rev. C 96 (2017) 44904
 29. Measurement of D0 azimuthal anisotropy at mid-rapidity in Au+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV, STAR collaboration, Phys. Rev. Lett. 118 (2017) 212301
 30. Global Lambda hyperon polarization in nuclear collisions: evidence for the most vortical fluid, STAR collaboration, Nature 548 (2017) 62
 31. Measurement of the cross section and longitudinal double-spin asymmetry for di-jet production in polarized pp collisions at $\sqrt{s} = 200$ GeV, STAR collaboration, Phys. Rev. D 95 (2017) 71103
 32. Di-Jet Imbalance Measurements at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV at STAR, STAR collaboration, Phys. Rev. Lett. 119 (2017) 62301
 33. Charge-dependent directed flow in Cu+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV, STAR collaboration, Phys. Rev. Lett. 118 (2017) 12301
 34. Energy dependence of J/psi production in Au+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 39, 62.4$ and 200 GeV, STAR collaboration, Phys. Lett. B 771 (2017) 13
 35. Direct virtual photon production in Au+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV, STAR collaboration, Phys. Lett. B 770 (2017) 451
 36. Measurements of two-pion Bose-Einstein correlations and their Levy parameters in 200 GeV Au+Au collisions, PHENIX collaboration, Phys. Rev. C 97 (2018) 064911
 37. Measurement of identified particle azimuthal anisotropy in p+Au and $^3\text{He}+\text{Au}$ collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV, PHENIX collaboration, Phys. Rev. C 97 (2018) 064904
 38. Measurements of multiparticle correlations in d+Au collisions at 200, 62.4, 39, and 19.6 GeV and implications for collective behavior, PHENIX collaboration, Phys. Rev. Lett. 120 (2018) 062302
 39. Nuclear dependence of the transverse-single-spin asymmetry for forward neutron production in polarized p+A collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV, PHENIX collaboration, Phys. Rev. Lett. 120 (2018) 022001
 40. Measurements of azimuthal anisotropy in d+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200, 62.4, 39,$ and 19.6 GeV, PHENIX collaboration, Phys. Rev. C 96 (2017) 064905
 41. B-meson production at forward and backward rapidity in p+p and Cu+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV, PHENIX collaboration, Phys. Rev. C 96 (2017) 064901
 42. Measurements of e+e- pairs from open heavy flavor in p+p and d+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV, PHENIX collaboration, Phys. Rev. C 96 (2017) 024907
 43. Cross section and transverse single-spin asymmetry of single muons from open heavy flavor decays in polarized p+p collisions at $\sqrt{s} = 200$ GeV, PHENIX collaboration, Phys. Rev. D 95 (2017) 112001
 44. Angular Decay Coefficients of J/psi Mesons at Forward Rapidity from p+p Collisions at $\sqrt{s} = 510$ GeV, PHENIX collaboration, Phys. Rev. D 95 (2017) 092003
 45. Measurements of B-meson decayed J/psi at forward rapidity in p+p collisions at $\sqrt{s} = 510$ GeV, PHENIX collaboration, Phys. Rev. D 95 (2017) 092002
 46. Nonperturbative Transverse Momentum Evolution Effects in Dihadron and Direct Photon Hadron

- Angular Correlations at $\sqrt{s}=510$ GeV, PHENIX collaboration, Phys. Rev. D 95 (2017) 072002
47. ϕ production in pp collisions at $\sqrt{s}=7$ TeV and in p-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}}=5.02$ TeV, ALICE collaboration, JHEP 04 (2018) 108
 48. First measurement of ϕ production in pp collisions at $\sqrt{s}=7$ TeV, ALICE collaboration, Phys. Lett. B 781 (2018) 8
 49. Measurement of Z0-boson production at large rapidities in Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}}=5.02$ TeV, ALICE collaboration, Phys. Lett. B 780 (2018) 372
 50. Longitudinal asymmetry and its effect on pseudorapidity distributions in Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}}=2.76$ TeV, ALICE collaboration, Phys. Lett. B 781 (2018) 20
 51. Production of ^4He and $^4\bar{\text{He}}$ in Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}}=2.76$ TeV at the LHC, ALICE collaboration, Nucl. Phys. A 971 (2018) 1
 52. Production of deuterons, tritons, ^3He nuclei and their anti-nuclei in pp collisions at $\sqrt{s}=0.9, 2.76$ and 7 TeV, ALICE collaboration, Phys. Rev. C 97 (2018) 024615
 53. Search for collectivity with azimuthal J/ψ -hadron correlations in high multiplicity p-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}}=5.02$ and 8.16 TeV, ALICE collaboration, Phys. Lett. B 780 (2018) 7
 54. J/ψ elliptic flow in Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}}=5.02$ TeV, ALICE collaboration, Phys. Rev. Lett. 119 (2017) 242301
 55. Constraining the magnitude of the Chiral Magnetic Effect with Event Shape Engineering in Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}}=2.76$ TeV, ALICE collaboration, Phys. Lett. B 777 (2018) 151
 56. The ALICE Transition Radiation Detector: construction, operation, and performance, ALICE collaboration, Nucl. Instr. Meth. A881 (2018) 88
 57. Kaon femtoscopy in Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}}=2.76$ TeV, ALICE collaboration, Phys. Rev. C96 (2017) 064613
 58. Systematic studies of correlations between different order flow harmonics in Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}}=2.76$ TeV, ALICE collaboration, Phys. Rev. C 97 (2018) 024906
 59. ϕ and ω meson production in proton-proton collisions at $\sqrt{s}=8$ TeV, ALICE collaboration, Eur. Phys. J. C 78 (2018) 263
 60. Charged-particle multiplicity distributions over a wide pseudorapidity range in proton-proton collisions at $\sqrt{s}=0.9, 7$ and 8 TeV, ALICE collaboration, Eur. Phys. J. C 77 (2017) 852
 61. Measurement of deuteron spectra and elliptic flow in Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}}=2.76$ TeV at the LHC, ALICE collaboration, Eur. Phys. J. C 77 (2017) 658
 62. Searches for transverse momentum dependent flow vector fluctuations in Pb-Pb and p-Pb collisions at the LHC, ALICE collaboration, JHEP 09 (2017) 032
 63. D-meson azimuthal anisotropy in mid-central Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}}=5.02$ TeV, ALICE collaboration, Phys. Rev. Lett. 120 (2018) 102301
 64. Measuring K^0_S \pm interactions using Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}}=2.76$ TeV, ALICE collaboration, Phys. Lett. B 774 (2017) 64
 65. Linear and non-linear flow modes in Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}}=2.76$ TeV, ALICE collaboration, Phys. Lett. B773 (2017) 68
 66. J/ψ production as a function of charged-particle pseudorapidity density in p-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}}=5.02$ TeV, ALICE collaboration, Phys. Lett. B 776 (2018) 91
 67. Flow dominance and factorization of transverse momentum correlations in Pb-Pb collisions at the

- LHC, ALICE collaboration, Phys. Rev. Lett. 118 (2017) 162302
68. Production of muons from heavy-flavour hadron decays in p-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}}=5.02$ TeV, ALICE collaboration, Phys. Lett. B 770 (2017) 459
 69. Azimuthally differential pion femtoscopy in Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}}=2.76$ TeV, ALICE collaboration, Phys. Rev. Lett. 118 (2017) 222301
 70. Production of ϕ and ω mesons up to high transverse momentum in pp collisions at 2.76 TeV, ALICE collaboration, Eur. Phys. J. C 77 (2017) 339
 71. Energy dependence of forward-rapidity J/ψ and $\psi(2S)$ production in pp collisions at the LHC, ALICE collaboration, Eur. Phys. J. C 77 (2017) 392
 72. Measurement of D-meson production at mid-rapidity in pp collisions at $\sqrt{s}=7$ TeV, ALICE collaboration, Eur. Phys. J. C 77 (2017) 550
 73. First measurement of jet mass in Pb-Pb and p-Pb collisions at the LHC, ALICE collaboration, Phys. Lett. B 776 (2018) 249
 74. $K(892)^0$ and (1020) meson production at high transverse momentum in pp and Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV, ALICE collaboration, Phys. Rev. C 95 (2017) 064606
 75. Production of $(1385)^{\pm}$ and $(1530)^0$ in p-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}}=5.02$ TeV, ALICE collaboration, Eur. Phys. J. C 77 (2017) 389
 76. Insight into particle production mechanisms via angular correlations of identified particles in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV, ALICE collaboration, Eur. Phys. J. C 77 (2017) 569
 77. Centrality dependence of the pseudorapidity density distribution for charged particles in Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}}=5.02$ TeV, ALICE collaboration, Phys. Lett. B 772 (2017) 567
 78. W and Z boson production in p-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV, ALICE collaboration, JHEP 02 (2017) 077
 79. Determination of the event collision time with the ALICE detector at the LHC, ALICE collaboration, Eur. Phys. J. Plus 132 (2017) 99
 80. Measurement of the production of high-pT electrons from heavy-flavour hadron decays in Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV, ALICE collaboration, Phys. Lett. B 771 (2017) 467
 81. Evolution of the longitudinal and azimuthal structure of the near-side jet peak in Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}}=2.76$ TeV, ALICE collaboration, Phys. Rev. C 96 (2017) 034904
 82. Anomalous broadening of the near-side jet peak in Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV, ALICE collaboration, Phys. Rev. Lett. 119 (2017) 102301
 83. Measurement of electrons from beauty-hadron decays in p-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}}=5.02$ TeV and Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}}=2.76$ TeV, ALICE collaboration, JHEP 07 (2017) 052
 84. Recent Flow Results in d+Au Collisions from Beam Energy Scan at RHIC-PHENIX, Shin'ichi Esumi for the PHENIX collaboration, PoS CPOD2017 (2018) 018
 85. Collective flow measurements at RHIC energies, Shin'ichi Esumi, EPJ Web Conf. 141 (2017) 05001
 86. More efficient formulas for efficiency correction of cumulants and effect of using averaged efficiency, T. Nonaka, M. Kitazawa, S. Esumi, Phys. Rev. C 95 (2017) 064912

< レビュー、解説、書籍等 >

1. 笹 公和、イオンビーム多目的利用研究のための筑波大学 6 MV タンデム型静電加速器、日本加速器学会誌「加速器」、14 巻 1 号 5-14 (2017)

< 学位論文 (博士) >

1. 数理物質科学研究科・博士 (理学) 横山 広樹 (Hiroki Yokoyama)、Measurement of jet spectra reconstructed with charged particles in Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02 \text{ TeV}$ with the ALICE detector at the LHC (LHC-ALICE 実験 $\sqrt{s_{NN}} = 5.02 \text{ TeV}$ 鉛鉛衝突実験における荷電粒子ジェット の測定)
2. 数理物質科学研究科・博士 (理学) 田中 直斗 (Naoto Tanaka)、Measurements of azimuthal angle dependence of HBT radii with respect to the event plane in $\sqrt{s_{NN}} = 2.76 \text{ TeV}$ Pb-Pb collisions at LHC-ALICE (LHC-ALICE 実験 $\sqrt{s_{NN}} = 2.76 \text{ TeV}$ 鉛・鉛衝突における量子力学的干渉効果のイベント平面に対する方位角依存性の研究)
3. 数理物質科学研究科・博士 (理学) 野中 俊宏 (Toshihiro Nonaka)、First measurement of the sixth order cumulant of net-proton multiplicity distributions in $\sqrt{s_{NN}} = 200 \text{ GeV}$ Au+Au collisions at the STAR experiment (STAR 実験 $\sqrt{s_{NN}} = 200 \text{ GeV}$ 金・金衝突における陽子-反陽子数分布の 6 次キュムラントの初測定)
4. 数理物質科学研究科・博士 (理学) 木村 創大 (Souta Kimura)、Precision mass measurements of neutron-deficient nuclei in $A \sim 60-80$ region via multireflection time-of-flight mass spectrograph (多重反射型飛行時間式質量分析器を用いた $A \sim 60-80$ 領域中性子欠乏核の精密質量測定)
5. 数理物質科学研究科・博士 (理学) 向井もも (Momo Mukai)、In-gas-cell laser resonance ionization spectroscopy of $^{196-198}\text{Ir}$ ($^{196-198}\text{Ir}$ のガスセル内レーザーイオン化核分光)

< 学位論文 (修士) >

1. 数理物質科学研究科・修士 (理学) 佐藤 一輝、RHIC-PHENIX 実験における $\sqrt{s_{NN}} = 200, 62.4, 39, 19.6 \text{ GeV}$ 重陽子・金衝突の前方、後方における楕円の集団運動の測定
2. 数理物質科学研究科・修士 (理学) レバザ 義美、ALICE 実験 $\sqrt{s_{NN}} = 2.76 \text{ TeV}$ Pb-Pb 衝突におけるジェットと反応平面を用いたソフト・ハード相関の研究
3. 数理物質科学研究科・修士 (理学) 細谷青児 (Seiji HOSOYA)、6 MV タンデム加速器を用いた難測定核種における加速器質量分析法の開発, Development of hard-to-measure nuclides measurements by Accelerator Mass Spectrometry with the 6 MV tandem accelerator
4. 数理物質科学研究科・修士 (理学) 天野将道 (Masamichi Amano)、固体水素標的を用いた陽子ドリップライン核 ^{17}Ne の反応断面積測定 (Reaction Cross-section Measurement of proton drip line nucleus ^{17}Ne using Solid Hydrogen Target)

< 学位論文 (学士) >

1. 物理学類・学士 (理学) 齊藤 大士、HIMAC H355 実験 400A MeV Xe+CsI 衝突における陽子および中性子の指向的方位角異方性の研究
2. 物理学類・学士 (理学) 高村 匡広、飛行時間測定器 Multi-gap Resistive Plate Chamber(MRPC) の開発 ; 信号誘起パッド形状変更による高周波特性と耐雑音特性の改善
3. 物理学類・学士 (理学) 田所 賢一、LHC-ALICE 実験 Si-W 型電磁力カリメータ実証機に向けた APV25 搭載 front-end 読み出しシステムの評価
4. 物理学類・学士 (理学) 中川 果南、LHC-ALICE 実験 O2 計画におけるシリコン飛跡検出器のためのマルチスレッド処理による飛跡再構成アルゴリズムの高速化
5. 物理学類・学士 (理学) 畠山 みな、LHC-ALICE 実験 超前方電磁力カリメータ開発に向けた Si-PAD 検出器用プリアンプ試作機の製作とその性能評価
6. 物理学類・学士 (理学) 星 有輝子、MCP-PMT を用いた高時間分解能クォーツチェレンコフ検出器のビームテスト実験による性能評価
7. 物理学類・学士 (理学) 落合悠太 (Yuta Ochiai) , 宇宙線生成核種 ^{36}Cl 降下フラックスの変動評価, Evaluation of temporal variation of cosmogenic ^{36}Cl flux

< 国際会議 (招待講演) >

1. A. Ozawa, “ Rare-RI Ring in RIKEN RI Beam Factory ” China-Japan collaboration workshop on “ Nuclear mass and life for unravelling mysteries of r-process ” 2017, 6/26-28, University of Tsukuba, Tsukuba, Japan
2. A. Ozawa, “ Past and future of Rare-RI Ring ”, The 10th International Conference on Nuclear Physics at Storage Rings (STORI ' 17), 2017, 11/13-18, Kanazawa theater, Kanazawa, Japan
3. T. Yamaguchi, “ Storage-ring mass spectrometry of exotic nuclei ” , International symposium on RI beam physics in the 21st century: 10th anniversary of RIBF, RIKEN, Wako, Japan, 4-5 Dec., 2017.
4. T. Yamaguchi, “ ILIMA project: isomeric beams, lifetimes and masses at the FAIR storage rings ” , 10th International Conference on Nuclear Physics at Storage Rings, Kanazawa, Japan, 13-18 Nov., 2017.
5. T. Yamaguchi, “ ILIMA status report ” , NUSTAR week 2017, Jozef Stefan Institute, Ljubljana, Slovenia, 25-29 Sep., 2017.
6. Kimikazu Sasa, Tsutomu Takahashi, Seiji Hosoya, Kenta Takano, Yuta Ochiai, Maki Honda, Yuki Ohta, Aya Sakaguchi, Tetsuya Matsunaka, Hongtao Shen and Keisuke Sueki, Progress in Multi-nuclide AMS for the 6 MV AMS System at the University of Tsukuba, The 7th East Asia Accelerator Mass Spectrometry Symposium (EA-AMS 7), Guangxi Normal University, Guilin, China, November 20th to 25th 2017.
7. S. Esumi, “Recent Flow Results in d+Au Collisions from Beam Energy Scan at RHIC-PHENIX”, CPOD2017 Critical Point and Onset of Deconfinement, Stony Brook Univ., New York, USA, 7-11/Aug/2017
8. S. Esumi, “Unfolding of net-distribution to look for a critical fluctuation”, Phases of QCD and Beam Energy Scan Program With Heavy Ion Collisions, Fudan Univ, Shanghai, China, 15-18/Aug/2017

9. S. Esumi, "Unfolding the unknown net-distribution with volume fluctuation", EMMI workshop, Wuhan, China, 10-14/Sep/2017
10. T. Nonaka, "Correction methods for detector effects on cumulants", EMMI workshop, Wuhan, China, 10-14/Sep/2017

< 国際会議発表 >

1. T. Moriguchi et al., Lamb-shift Polarized Ion Source at UTTAC, The 2017 International Workshop on Polarized Sources, Targets & Polarimetry(PSTP2017), KAIST Munji Campus, Dajeon, Republic of Korea, Oct 16-20, 2017
2. S. Suzuki, Performance of time-of-flight detector and demonstration of completely new position detector for mass measurements with the Rare-RI Ring, 10th International Conference on Nuclear Physics at Storage Rings (STORI ' 17), Kanazawa, Japan, 13- 18 November 2017.
3. M. Mukai, Beta-ray detector in KISS, The inaugural symposium of the Tomonaga Center of the History of the Universe, University of Tsukuba, Mar. 26-27, 2018.
4. Kimikazu Sasa, Seiji Hosoya, Tetsuya Matsunaka, Tsutomu Takahashi, Masumi Matsumura, Hangtao Shen, Yasuji Oura, Keisuke Sueki, Isobar separation techniques of ^{41}Ca AMS with the 6 MV tandem accelerator, The Fourteenth International AMS Conference (AMS14), Ottawa (Canada), August 14-18, 2017.
5. Kimikazu Sasa, Tsutomu Takahashi, Tetsuya Matsunaka, Seiji Hosoya, Masumi Matsumura, Shen Hangtao, Maki Honda, Aya Sakaguchi, Keisuke Sueki, Mark Stodola, Mark Sundquist, Performance of the 6 MV multi-nuclide AMS system at the University of Tsukuba, The Fourteenth International AMS Conference (AMS14), Ottawa (Canada), August 14-18, 2017.
6. Seiji HOSOYA, Kimikazu SASA, Tsutomu TAKAHASHI, Tetsuya MATSUNAKA, Masumi MATSUMURA, Hongtao SHEN, Keisuke SUEKI, Isobar suppression for ^{36}Cl -AMS with the 6 MV tandem accelerator, The Fourteenth International AMS Conference (AMS14), Ottawa (Canada), August 14-18, 2017.
7. Hongtao SHEN, Kimikazu SASA, Ming HE, Baojian HUANG, Masumi MATSUMURA, Seiji HOSOYA, Tetsuya MASUNAKA, Tsutomu TAKAHASHI, Maki HONDA, Keisuke SUEKI, Qingzhang ZHAO, Qi MENG, Kejun DONG, Xiaoming WANG, Yijun PANG, Xianlin YANG, Xiangdong RUAN, Shan JIANG, Study on Multiple radionuclides for Exposure Age Dating of Chinese Tiankeng, The Fourteenth International AMS Conference (AMS14), Ottawa (Canada), August 14-18, 2017.
8. Seiji Hosoya, Kimikazu Sasa, Tsutomu Takahashi, Maki Honda, Yukihiro Satou, Kenta Takano, Yuta Ochiai, Koji Yamaguchi, Keisuke Sueki, Calcium-41 and Strontium-90 measurements with 6MV AMS, The 7th East Asia Accelerator Mass Spectrometry Symposium (EA-AMS 7), Guangxi Normal University, Guilin, China, November 20th to 25th 2017.
9. Hongtao Shen, Kimikazu Sasa, Qi Meng, Masumi Matsumura, Tetsuya Masunaka, Tsutomu Takahashi, Seiji Hosoya, Keisuke Sueki, Ming He, Baojian Huang, Qingzhang Zhao, Kejun, Dong, Xiangdong Ruan, Jiang Shan, Study on Cl-^{36} for Exposure Age Dating of Chinese Tiankeng, The 7th East Asia Accelerator Mass Spectrometry Symposium (EA-AMS 7), Guangxi Normal University, Guilin, China, November 20th to 25th 2017.

10. Yuta Ochiai, Kimikazu Sasa, Yuki Tosaki, Tsutomu Takahashi, Masumi Matsumura, Satomi Abe, Seiji Hosoya, Kenta Takano, Yuki Ohta, Keisuke Sueki, Correlation between the ^{36}Cl deposition flux and solar activity, The 7th East Asia Accelerator Mass Spectrometry Symposium (EA-AMS 7), Guangxi Normal University, Guilin, China, November 20th to 25th 2017.
11. Kenta Takano, Kimikazu Sasa, Tsutomu Takahashi, Yuki Tosaki, Yuki Ota, Seiji Hosoya, Yuta Ochiai, Keisuke Sueki, Kazuho Horiuchi, ^{36}Cl record in the Antarctic ice core around the cosmic-ray event of 5480 BC and improved ^{36}Cl AMS at the University of Tsukuba, The 7th East Asia Accelerator Mass Spectrometry Symposium (EA-AMS 7), Guangxi Normal University, Guilin, China, November 20th to 25th 2017.
12. T. Nonaka, Measurement of the sixth order cumulant of net-proton multiplicity distribution in Au+Au collisions at $\sqrt{s_{\text{NN}}}=200\text{GeV}$ from the STAR experiment, WPCF2017, Nikhef, Amsterdam, Netherlands, 12-16/June/2017
13. N. Tanaka, Azimuthally differential pion femtoscopy with respect to second and third order event planes and event shape engineering in Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{\text{NN}}} = 2.76\text{ TeV}$, WPCF2017, Nikhef, Amsterdam, Netherlands, 12-16/June/2017
14. Y. Kawamura, A Si-PAD and Tungsten based electromagnetic calorimeter for the forward direct photon measurement at LHC, TIPP2017 International Conference on Technology and Instrumentation in Particle Physics 2017, Beijing, China, 21-26/May/2017
15. S. Sakai, Measurement of heavy-flavour production, correlations and jets with ALICE, SQM2017 Strangeness in Quark Matter 2017, Utrecht, Netherlands, 10-17/July/2017

< 国内会議発表（招待講演） >

1. 笹公和、「加速器質量分析法（AMS）による極微量放射性核種の高感度分析手の開発」、京都大学原子炉実験所専門研究会「放射化分析及び中性子を用いた地球化学的研究 -1-」、京都大学原子炉実験所（大阪府熊取市）2018年1月10日（水）
2. 笹公和、「タンデム・静電加速器を用いた先端研究の現状と将来展望 第30回「タンデム加速器及びその周辺技術の研究会」を記念して」、第30回「タンデム加速器及びその周辺技術の研究会」セラトピア土岐、岐阜県土岐市、日本原子力研究開発機構東濃地科学センター、2017年7月6-7日
3. 小沢顕、不安定核の質量測定、第61回放射化学討論会 核化学分科会、2017, 9/7, 筑波大学
4. 中込宇宙、フローのまとめ、第33回 Heavy Ion Cafe 並びに第23回 Heavy Ion Pub 合同研究会、2017年4月8日（土）、名古屋大学 ES 総合館 6 階
5. 渡辺陽介、重クオークのまとめ、第33回 Heavy Ion Cafe 並びに第23回 Heavy Ion Pub 合同研究会、2017年4月8日（土）、名古屋大学 ES 総合館 6 階
6. 坂井真吾、ジェットのまとめ、第33回 Heavy Ion Cafe 並びに第23回 Heavy Ion Pub 合同研究会、2017年4月8日（土）、名古屋大学 ES 総合館 6 階
7. 渡辺陽介、高エネルギー重イオン衝突実験の現状と展望、シンポジウム「高エネルギー重イオン衝突実験と諸分野の協奏と発展」日本物理学会第73回年次大会、東京理科大学（野田キャンパス）2018年3月22日（木）～25日（日）
8. 江角晋一、”Status of Beam-Energy-Scan at RHIC”, J-PARC Heavy-Ion Physics meeting, 11/Sep/2017, Tokai, Japan

< 国内会議発表 >

1. 笹 公和, 細谷青児, 本多真紀, 高橋 努, 佐藤志彦, 高野健太, 落合悠太, 末木啓介, 加速器質量分析法によるストロンチウム 90 の迅速定量法の開発, 日本原子力学会「2018 年春の年会」, 大阪大学吹田キャンパス (大阪市), 2018 年 3 月 26 日 28 日.
2. 森口哲朗, 筑波大学タンデム加速器施設 UTTAC の現状(2016 年度) 第 30 回タンデム加速器及びその周辺技術の研究会、日本原子力研究開発機構 東濃地科学センター(岐阜県) 2017/07/06-07
3. 森口哲朗, 偏極陽子ビームを用いた陽子吸収反応による不安定核の核偏極、日本物理学会 2017 秋季大会、宇都宮大学峰キャンパス、2017/09/12-15
4. 森口哲朗, 固体水素標的を用いた不安定核のスキン厚導出手法の開発、H28 年度 HIMAC 共同利用研究成果発表会、ホテルポートプラザ千葉、2017/04/17-18
5. 鈴木伸司, RI 質量測定用の薄膜を用いた準非破壊的位置検出器の開発、日本物理学会第 73 回年次大会、東京理科大学野田キャンパス、2018 年 3 月 22-25 日.
6. 鈴木伸司, 質量測定用飛行時間検出器の大型実機の開発、日本物理学会秋季大会、宇都宮大学、2017 年 9 月 12-15 日.
7. 向井もも, KISS II: 196-198Ir のレーザー共鳴イオン化核分光筑波、日本物理学会第 73 回年次大会、宇都宮大学、9 月 12 日 ~ 15 日、2017 年
8. 山口貴之、Storage-ring mass spectrometry at GSI/FAIR、日本物理学会 2017 年秋季大会、宇都宮大学 (峰キャンパス) 2017.9.12-15.
9. 森口 哲朗、石井 聡、大島 弘行、高橋 努、田島 義一、大和 良広、関場 大一郎、笹 公和、上殿 明良、筑波大学タンデム加速器施設 UTTAC の現状 (2016 年度) 第 30 回「タンデム加速器及びその周辺技術の研究会」、セラトピア土岐、岐阜県土岐市、日本原子力研究開発機構東濃地科学センター、2017 年 7 月 6-7 日
10. 笹 公和、高橋 努、細谷 青児、高野 健太、落合 悠太、松中 哲也、末木 啓介、極微量放射性核種を超高感度で検出可能な 6 MV タンデム加速器質量分析装置の開発、第 14 回日本加速器学会年会、北海道大学、2017 年 8 月 1 日 ~ 3 日 .
11. 笹 公和、石井 聡、大島 弘行、高橋 努、田島 義一、大和 良広、森口 哲朗、上殿 明良、筑波大学タンデム加速器施設の現状報告、第 14 回日本加速器学会年会、北海道大学、2017 年 8 月 1 日 ~ 3 日 .
12. 笹 公和、高橋 努、細谷 青児、高野 健太、落合 悠太、本多 真紀、太田 祐貴、松尾 一樹、松中 哲也、坂口 綾、末木 啓介、6 MV タンデム加速器質量分析装置を用いた長寿命放射性核種の超高感度検出技術の開発、2017 年日本放射化学学会年会・第 61 回放射化学討論会、筑波大学、2017 年 9 月 6 日 ~ 8 日.
13. 落合 悠太、笹 公和、高橋 努、戸崎 裕貴、松村 万寿美、安部 聡美、細谷 青児、高野 健太、末木 啓介、福島第一原子力発電所事故前後における降水中の塩素 36 同位体比変動、2017 年日本放射化学学会年会・第 61 回放射化学討論会、筑波大学、2017 年 9 月 6 日 ~ 8 日.
14. 細谷 青児、笹 公和、高橋 努、本多 真紀、佐藤 志彦、高野 健太、落合 悠太、末木 啓介、加速器質量分析法を用いた ^{90}Sr 測定の試み、2017 年日本放射化学学会年会・第 61 回放射化学討論会、筑波大学、2017 年 9 月 6 日 ~ 8 日.
15. 高野 健太、笹 公和、太田 裕貴、高橋 努、細谷 青児、落合 悠太、末木 啓介、6MV タンデム加速器質量分析装置における長寿命放射性核種 ^{36}Cl の検出感度の改善、2017 年日本放射化学学会年

会・第 61 回放射化学討論会、筑波大学、2017 年 9 月 6 日～8 日。

16. 笹 公和、山崎明義、石井 聡、黒澤正紀、富田成夫、左高正雄、檜本 洋、工藤 博、構造材料計測用マイクロイオンビーム分析装置によるビーム収束試験と材料組成分析、日本原子力学会「2017 年秋の大会」、北海道大学、2017 年 9 月 13 日～15 日。
17. 笹 公和、高橋 努、松中 哲也、細谷 青児、太田 祐貴、高野 健太、落合 悠太、本多 真紀、末木 啓介、筑波大学 6 MV タンデム加速器質量分析装置による多核種 AMS と応用研究の現状、第 20 回 AMS シンポジウム、セラトピア土岐（岐阜県土岐市）、2017 年 12 月 14 日～15 日。
18. 細谷 青児、笹 公和、高橋 努、本多 真紀、佐藤 志彦、高野 健太、落合 悠太、末木 啓介、6 MV タンデム加速器による 90Sr-AMS、第 20 回 AMS シンポジウム、セラトピア土岐（岐阜県土岐市）、2017 年 12 月 14 日～15 日。
19. 落合悠太、笹公和、戸崎裕貴、高橋努、松村万寿美、本多真紀、細谷青児、高野健太、太田祐貴、末木啓介、つくば市における福島第一原子力発電所事故前後の ^{36}Cl 降下フラックス変動、第 20 回 AMS シンポジウム、セラトピア土岐（岐阜県土岐市）、2017 年 12 月 14 日～15 日。
20. 落合悠太、笹公和、戸崎裕貴、高橋努、松村万寿美、細谷青児、高野健太、太田祐貴、末木啓介、つくば市における ^{36}Cl 降下フラックス変動、第 19 回「環境放射能」研究会、高エネルギー加速器研究機構、2018 年 3 月 13 日～15 日。
21. 笹 公和、アイスコア中の宇宙線生成核種 Cl-^{36} の測定 - 宇宙線強度変動および環境変動と年代の指標として、研究集会「南極ドームふじ氷床深層アイスコアの解析による気候・環境変動の研究の新展開」、国立極地研究所 3 F 多目的会議室、2018 年 3 月 28 - 29 日。
22. 加藤浩樹、飛行時間測定器 Multi-gap Resistive Plate Chamber; 陽電子ビームを用いた読み出しパッド形状の最適化に向けた性能評価、日本物理学会 2017 秋季大会、宇都宮大学峰キャンパス、2017/09/12-15
23. 市沢太地、飛行時間測定器 Multi-gap Resistive Plate Chamber(MRPC) の開発; J-PARC 実験に向けた $30 \times 20\text{cm}^2$ 大型試作機の性能評価、日本物理学会 2017 秋季大会、宇都宮大学峰キャンパス、2017/09/12-15
24. 川名大地、ALICE 実験 陽子 - 鉛衝突における単電子測定法を用いた重クォークの測定、日本物理学会 2017 秋季大会、宇都宮大学峰キャンパス、2017/09/12-15
25. 青山遼、RHIC-STAR 実験金 + 金衝突における 2 粒子相関の反応領域の幾何学形状に対する依存性の研究、日本物理学会 2017 秋季大会、宇都宮大学峰キャンパス、2017/09/12-15
26. 杉浦哲郎、RHIC-STAR 実験金 + 金衝突における粒子種に依存した efficiency 補正を用いた net-charge 揺らぎの解析、日本物理学会 2017 秋季大会、宇都宮大学峰キャンパス、2017/09/12-15
27. 野中俊宏、分布再構成法による高次キュムラント解析、日本物理学会 2017 秋季大会、宇都宮大学峰キャンパス、2017/09/12-15
28. 川村陽太、LHC-ALICE 実験超前方光子測定用新型電磁カロリメーター製作に向けた Si PAD の基礎特性評価、日本物理学会 2017 秋季大会、宇都宮大学峰キャンパス、2017/09/12-15

< 科学研究費、外部資金取得状況 >

1. 科学研究費 若手研究 (B)、スキン構造理解のための不安定原子核の陽子及び中性子密度分布の研究、代表（森口哲朗）、3200（千円）、960（千円）
2. 科学研究費 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，2017 年度：10,790 千円（直接経費：8,300 千円、間接経費：2,490 千円），研究代表者：笹公和，研究分担者：末木啓介、坂口綾、松崎浩之、松四 雄騎、松村宏、國分陽子
3. 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：2017 年度 150 千円
 4. 科学研究費 基盤研究 (B)「高感度顕微分析を実現する高速クラスター 2 次イオン質量分析における照射技術の高度化」，研究代表者：平田浩一（産総研），研究分担者：笹公和、富田成夫，分担金：2017 年度 150 千円
 5. 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：上殿明良，副代表：笹 公和、事業参加者：12，平成 26 年度～平成 30 年度 配分経費：250,000 千円，分担金：2017 年度 28,000 千円
 6. 科学研究費 基盤研究 (B)「Di-Jet 識別装置を用いたグルオン衝撃波の探索」研究代表者：三明康郎、4,160 千円
 7. 科学研究費 基盤研究 (A)「ALICE 実験ジェットと前方光子で探る高温クォーク物質生成の起源」研究代表者：中條達也、9,490 千円
 8. 科学研究費 挑戦的萌芽研究「高エネルギー実験のための 10 ピコ秒 飛行時間測定器の開発」研究代表者：中條達也、438 千円
 9. 日仏素粒子物理学研究”Measurements of Jets and Photons in Heavy Ion Collisions at the Highest Beam Energy during the LHC-Run 2 by ALICE”、研究代表者：中條達也、500 千円
 10. 日米科学技術協力事業「相対論的重イオン加速器を用いたクォーク・グルーオン・プラズマと QCD 相図の研究」研究代表者：江角晋一、5,200 千円
 11. 伊藤科学振興会研究助成「原子核衝突ビームエネルギー走査による高密度クォーク核物質の研究」研究代表者：江角晋一、1,000 千円

VII-1. 量子物性理論

教授：初貝 安弘

助教：溝口 知成 (H30.3～)

大学院生：6名 (博士2名，修士6名)

卒論学生：2名

1 多体相互作用の格子系での擬ポテンシャルの構成とトポロジカル数 [1]

近年研究が活発化しているトポロジカル相であるが，その多くは電子間相互作用を含まない系に対してであり，電子間相互作用とトポロジカル相との関連は未開の多くの問題を含んでいる。その一方トポロジカル相の典型例である量子ホール効果特に分数量子ホール効果は電子間相互作用由来のものであり，ランダウ準位に射影した相互作用（擬ポテンシャル）の研究が古くから行われている。そこで，多様な周期構造つまりエネルギーバンドを持つ系に対して，特定のバンドに射影した擬ポテンシャルを構成することは，トポロジカル相における電子相関の問題において本質的に重要である。本年は，この問題に関して，格子上の擬ポテンシャルを構成する手法を具体的に与え，その有効性を示した。

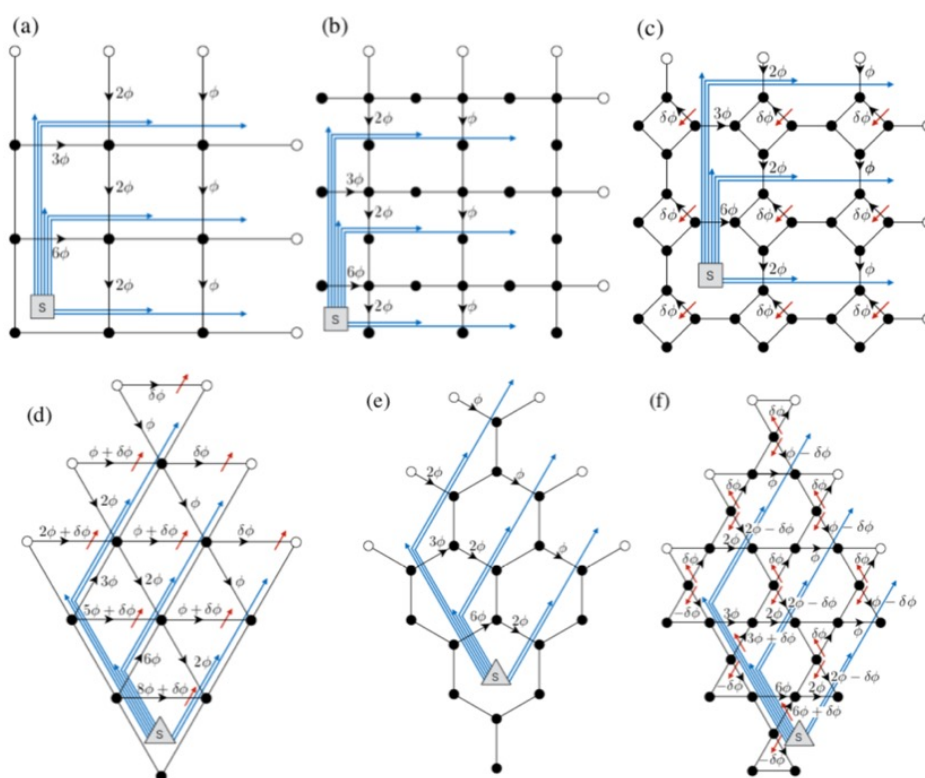


図 1: 多様な格子系における string gauge

更に系のトポロジカルな特性を確定するために，トポロジカル縮退した（擬似）基底状態に対して，擬ポテンシャルの手法と整合的な射影した系におけるトポロジカル数の計算手法を確立し具体的な格子上的分数量子ホール系（奇数分母，偶数分母状態）に対して適用した。

2 エンタングルメントハミルトニアンのワイル点の偶奇とトポロジカル絶縁体 [2]

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 数と呼びそのトポロジカル絶縁体の分類における有効性を我々は近年明らかとした。

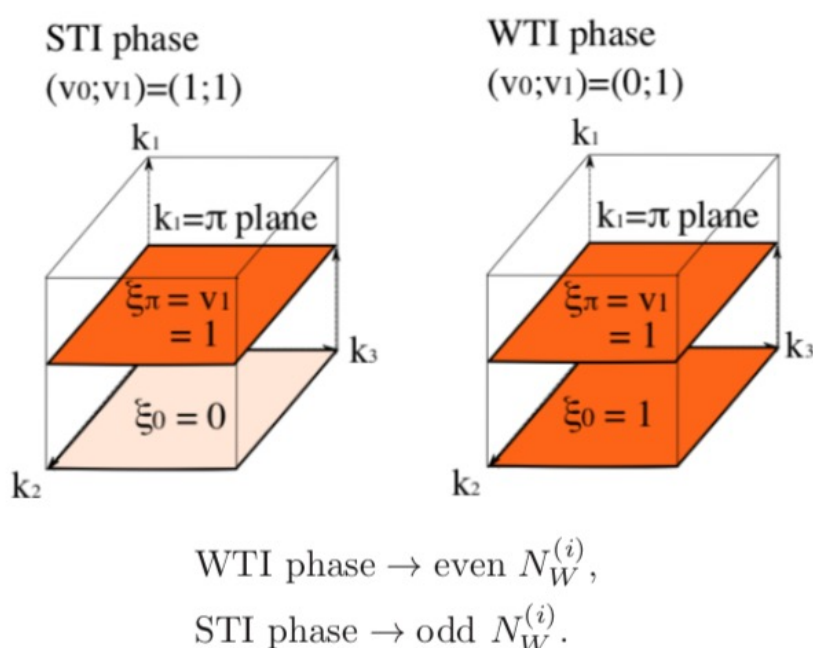


図 2: エンタングルメントハミルトニアンの作るワイル点のハーフブリルアンゾーン内の偶奇とトポロジカル絶縁体の自明/非自明の関係

これを一般に拡張すれば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をつくったエンタングルメントハミルトニアンの基底状態は非自明なトポロジカル数を持ち得て、もとの基底状態の相分類に有効となる。部分系に縮約する事で一般には縮約密度行列は有限温度のものとなるため、エンタングルメントハミルトニアンの基底状態を考えることは有効温度を下げて量子化するトポロジカル数を定義することに対応する。

本年度はこのエンタングルメントチャーン数を三次元のブリルアンゾーン内の二次元断面に対して定義したセクションチャーン数を具体的模型に関して計算した。セクションチャーン数が不連続に変化するため

にはエンタングルメントハミルトニアンにギャップレス点つまりワイル点が存在することが必要である。既存の理論により三次元トポロジカル絶縁体の自明－非自明は時間反転不変な2つの二次元の波数平面で定義されるトポロジカル指数の関係できまるとされるが、我々の立場では、2つの時間反転不変面ではさまれたハーフブリルアンゾーン内でのエンタングルメントハミルトニアンのワイル点の偶奇と関連することをあきらかとした。

3 トポロジカル相におけるバルク・エッジ対応の普遍性について

我々は、物性物理学において急速に進展しつつあるトポロジカル物質を用いた新機能につながる基礎的な研究を進めている。特にトポロジカル物質の特性であるエッジ状態と呼ばれる系の境界や不純物近傍に局在する状態とバルクのトポロジカル相との普遍的な関係である「バルクエッジ対応」に関する研究を進めている。

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。

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

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

以下関連した研究に関する本年度の結果を例示する。

3.1 フォトニック結晶（ウッドパイル構造）におけるワイル点とセクションチャーン数

電子系以外のトポロジカル相が多く興味を集めているがその一つの例として、周期構造を持つ誘電体中の古典電磁場とトポロジカル相に着目した研究をおこなった。特にねじれた円柱状の誘電体を用いたメタマテリアル中の電磁場の分散にはワイル点と呼ばれる特異点が存在することをセクション・チャーン数と呼ばれるトポロジカル数を計算することで確立するとともに、対応するエッジ状態の存在を予言した。今年度は東大生研荒川・岩本研との共同研究で具体的なウッドパイル構造におけるワイル点とセクションチャーン数、エッジ状態（フェルミアーク）の関係を明らかとした。

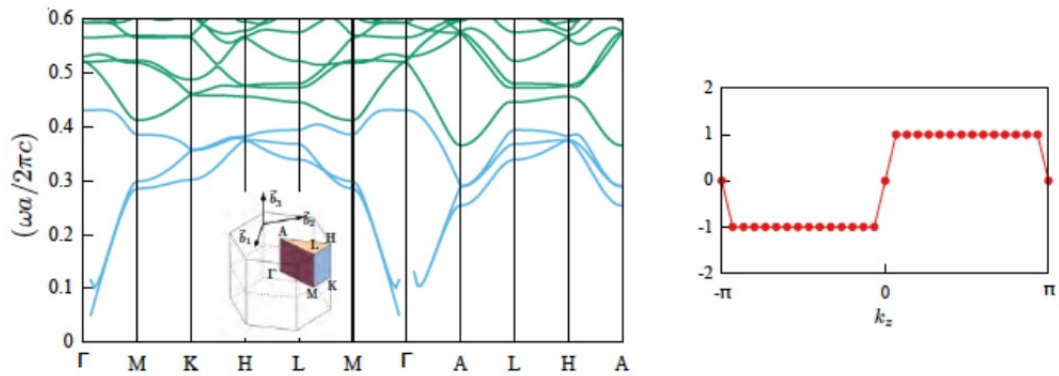


図 3: ウッドパイル構造としてのフォトニック結晶中のワイル点とセクションチャーン数 [大野修平博士論文より引用]

3.2 1次元の断熱ポンプにおけるバルクエッジ対応, 特に乱れの効果の研究 [3]

30 年程前に D.J.Thouless により考案された 1 次元の断熱ポンプは周期的な時間を波数に読み直すことにより量子ホール系と考えられ、今日トポロジカルポンプと呼ばれている。その理論的な提案から 30 年程経過して、この系は冷却原子系において実際に実験的に実現した。近年、我々はこの実験に強く動機づけられこの問題を理論的に再考察し、トポロジカル相において近年広く確立したバルクエッジ対応の観点からトポロジカルポンプにおけるエッジ状態の意義とポンプされる電荷の量子化の起源を世界で初めて明らかにした。本年度はその研究を進展させるとともに、特にランダムネスによる、局在状態が存在する場合を数値的に検討した。アンダーソン局在による局在状態はポンピングにおける飛びに対して、 $\pm 1/2$ 以外の寄与をするが、一周期全体を見たときはその寄与は打ち消されることとなり、ポンピングには寄与しない。これがトポロジカルポンピングにおける安定性である。

3.3 古典力学系でのワイル点とフェルミアーキ：メカニカルダイヤモンド [4]

ハニカム格子ならびにダイヤモンド格子上の力学系はカイラル対称性をもち、非量子系のトポロジカル物質となる典型的な系である。本年度は特に 3 次元系に関して、線状の特異分散並びにカイラル対称性の破れにともなうワイル点に関して、トポロジカル数の理論計算並びにエッジ状態との比較をおこない理論的な整合性を確立した。

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。昨年、我々は、2 次元ハニカム格子上の単純なバネー質点系、つまり連成振動系（メカニカルグラフェン）においてもバルクエッジ対応が成立することを明らかにした。

このメカニカルグラフェンの 3 次元への拡張と考えられるメカニカルダイヤモンドにおいて、カイラル対称性を破ることによりワイル点が生成消滅することをベリー接続が定義するディラック単磁極を福井-初貝-鈴木の方法にて計算することで具体的に示した（図）。

更にはワイル点の存在に伴いセクションチャーン数が非自明な二次元の波数空間の平面が存在するが、この非自明なチャーン数に対応するエッジ状態がワイル点にて生成消滅する、電子系でいうところのフェルミアーキの力学系での類似現象を具体的に示した。これはバルク・エッジ対応の普遍性の一つの例である。

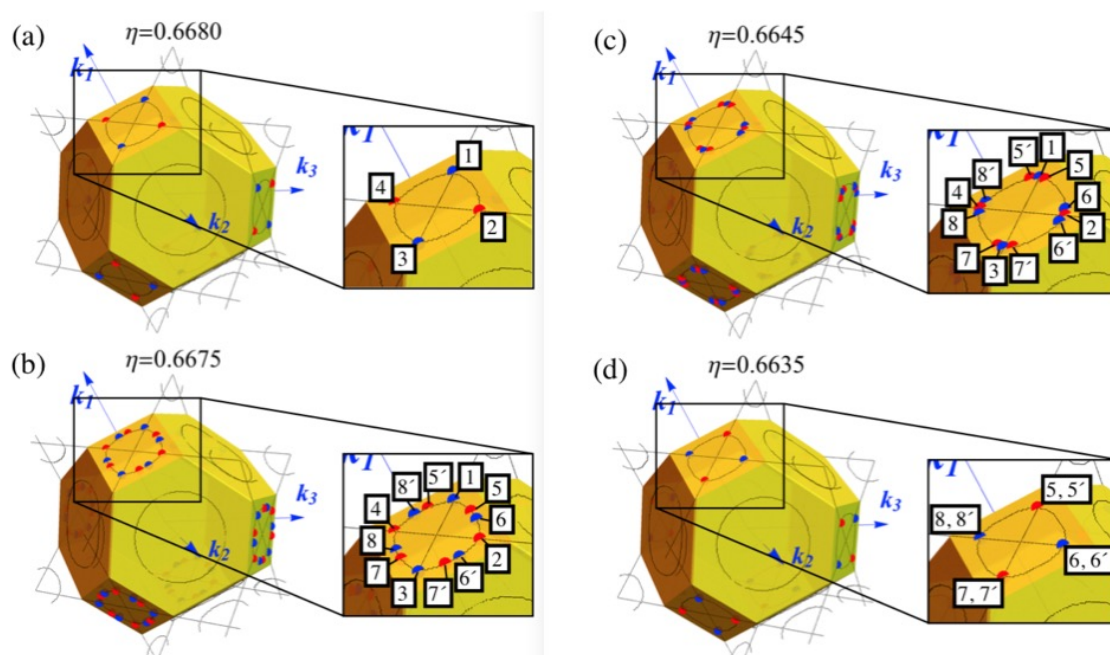


図 4: 生成消滅するワイル点 [論文 [4]]

3.4 トポロジカル相に関する解説 [1–5]

近年、トポロジカル相は専門分野以外でも広く興味をもたれており、特に非専門家、学部大学生、大学院初年度程度の学生に対する教育を目的とする解説を 5 編執筆した。

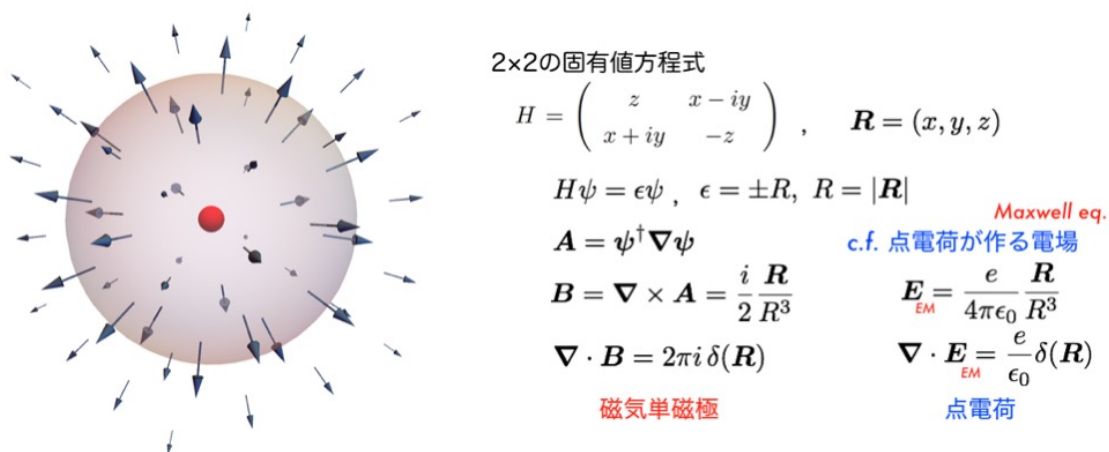


図 5: 2×2 行列エルミート行列が定義するベリー接続の Dirac 単磁極 [解説 [1]]

<論文>

1. K. Kudo, T. Kariyado and Y. Hatsugai, "Many-Body Chern Numbers of $\nu=1/3$ and $1/2$ States on Various Lattices", J. Phys. Soc. Jpn 86, 103701 (1-4) (2017), DOI:10.7566/JPSJ.86.103701,

(arXiv:1707.06722)

2. H. Araki, T. Fukui and Y. Hatsugai, "Entanglement Chern number for three-dimensional topological insulators: Characterization by Weyl points of entanglement Hamiltonians", Phys. Rev. B96 (1-8), (2017), DOI:10.1103/PhysRevB.96.165139, (arXiv:1708.03722)
3. K.-I. Imura, Y. Yoshimura, T. Fukui and Y. Hatsugai, "Bulk-edge correspondence in topological transport and pumping", Journal of Physics: Conf. Series 969, 012133 (1-6) (2018), DOI:10.1088/1742-6596/969/1/012133 (arXiv:1706.04493)
4. Yuta Takahashi, T. Kariyado and Y. Hatsugai, "Weyl points of mechanical diamond", (arXiv:1801.06784)
5. K. Kudo and Y. Hatsugai, "Fractional Quantum Hall Effect in $n=0$ Landau Band of Graphene with Chern Number Matrix", J. Phys. Soc. Jpn 87, 063701 (1-5) (2018), DOI: 10.7566/JPSJ.87.063701, (arXiv:1803.09978)
6. T. Kariyado, T. Morimoto and Y. Hatsugai, " Z_N Berry Phases in Symmetry Protected Topological Phases", Phys. Rev. Lett. 120, 247202 (2018), (arXiv:1709.01546), DOI: 10.1103/PhysRevLett.120.247202

<著書, 解説等>

1. 初貝安弘, 「特集: 物理学と数学のつながり, 物理学と線形代数」～量子力学での展開～, 数理科学 55, 5月号 15-22 (2017) サイエンス社
2. 初貝安弘, 「トポロジカル物質におけるバルク・エッジ対応」科研費 NEWS, vol.3 8-8, (2017) 日本学術振興会
3. 初貝安弘, 「2016年ノーベル物理学賞について/物質中に普遍的に存在するトポロジカルな構造」数学セミナー 4月号-666, 36-41 (2017) 日本評論社
4. 初貝安弘, 「コラム: メイドインジャパン物理用語 物性編 TKNN 数」, パリティ 32, 7月号 41-41 (2017) 丸善
5. 初貝安弘, 「特集: トポロジーによる新しい物性物理, 物質内部と表面状態の深い関係: バルクエッジ対応」, パリティ 32, 7月号 14-18 (2017) 丸善

<講演: 国際会議>

1. (基調講演) Y. Hatsugai, "Welcome! Bulk edge correspondence: quantum Hall effects to mechanics", Variety and universality of bulk-edge correspondence in topological phases: From solid state physics to transdisciplinary concepts (BEC2018)/2018-01-04-2018-01-08, Tsukuba, Japan
2. (基調講演) Y. Hatsugai, "Welcome speech", Trends in Theory of Correlated Materials (TTCM2017)/2017-10-10-2017-10-13, Tsukuba, JAPAN
3. (招待講演) Y. Hatsugai, "Uses of edge states of topological material and meta-material", JSPS-EPSRC core to core program seminar/2017-07-10-2017-07-11, Paris, France

4. (招待講演) K. Shiraishi, A. Hattori, S. Tanaya, K. Yada, M. Araidani, Y. Hatsugai, M. Sato and Y. Tanaka, "Electronic Structures of Group IV Two Dimensional Materials", 13th International Conference on Diffusion in Solids and Liquids - DSL2017/2017-06-26–2017-06-30, Viena, Austria
5. (招待講演) S. Oono and Y. Hatsugai, "Topological edge modes in broken inversion 3D photonic crystals", EMN Summer Meeting 2017/2017-05-04–2017-05-07, Havana, Cuba
6. (招待講演) Y. Hatsugai, "New Paradigm of Topological Materials", 2018 Joint Symposium on Energy Materials Science and Technology/2018-03-08–2018-03-08, Tsukuba, Japan
7. 口頭発表, K. Koji, Y. Hatsugai, "Chern matrices associated with chiral basis for FQH system in graphene", APS March Meeting 2018/2018-03-05–2018-03-09, Los Angeles, USA
8. 口頭発表, H. Araki, T. Fukui and Y. Hatsugai, "Weyl Points of the Entanglement Spectrum for Topological Insulators from First Principles", APS March Meeting 2018/2018-03-05–2018-03-09, Los Angeles, USA
9. 口頭発表, S. Takahashi, S. Oono, S. Iwamoto, Y. Hatsugai and Y. Arakawa, "Optical Weyl Points below the Light Line in Semiconductor Chiral Woodpile Photonic Crystals", Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO)/2017-05-14–2017-05-19, San Jose, USA
10. ポスター, T. Kariyado, T. Morimoto and Y. Hatsugai, "ZN Berry phase as a topological index for correlated systems: application to SU(N)", "Variety and universality of bulk-edge correspondence in topological phases: From solid state physics to transdisciplinary concepts (BEC2018)" /2018-01-04–2018-01-08, Tsukuba, Japan
11. ポスター, H. Araki, T. Fukui and Y. Hatsugai, "Section entanglement Chern number for Bi and Sb based on first principles calculations", Variety and universality of bulk-edge correspondence in topological phases: From solid state physics to transdisciplinary concepts (BEC2018)/2018-01-04–2018-01-08, Tsukuba, Japan
12. ポスター, K. Koji and Y. Hatsugai, "Chern matrices associated with chiral basis for FQH system in graphene", Variety and universality of bulk-edge correspondence in topological phases: From solid state physics to transdisciplinary concepts (BEC2018)/2018-01-04–2018-01-08, Tsukuba, Japan
13. ポスター, Yuta Takahashi, T. Kariyado and Hatsugai, "Weyl points and edge states of mechanical diamond", Variety and universality of bulk-edge correspondence in topological phases: From solid state physics to transdisciplinary concepts (BEC2018)/2018-01-04–2018-04-08
14. ポスター, S. Fubasami and Y. Hatsugai, "Sequential topological transitions of J1-J2 integer spin chain characterized by Z2", Variety and universality of bulk-edge correspondence in topological phases: From solid state physics to transdisciplinary concepts (BEC2018)/2018-01-04–2018-01-08
15. ポスター, K. Kudo, and Y. Hatsugai, "The fractional quantum hall effect and chirality on honeycomb lattice", Novel Quantum States in Condensed Matter 2017 (NQS2017)/2017-10-30–2017-11-03
16. ポスター, H. Araki, T. Fukui and Y. Hatsugai, "Section entanglement Chern number for strong and weak topological insulators", Novel Quantum States in Condensed Matter 2017 (NQS2017)/2017-10-30–2017-11-03
17. ポスター, H. Araki, T. Fukui, Y. Hatsugai, "Section entanglement Chern number for the Fu-Kane-Mele model and the Wilson-Dirac model", Trends in Theory of Correlated Materials (TTCM2017)/2017-10-10–2017-10-13

18. ポスター, K. Kudo and Y. Hatsugai, "Many-body states of a nearly flat band with kagome lattice", Trends in Theory of Correlated Materials (TTCM2017)/2017-09-10–2017-09-13
19. ポスター, H. Araki, T. Fukui and Y. Hatsugai, "Characterization of topological phases by the Weyl points of the entanglement Hamiltonian", 28th International Conference on Low Temperature Physics/2017-08-09–2017-08-16
20. ポスター, K. -I. Imura, Y. Yoshimura, T. Fukui and Y. Hatsugai, "Bulk-edge correspondence in topological transport and pumping", 28th International Conference on Low Temperature Physics/2017-08-09–2017-08-16
21. ポスター, K. Kudo and Y. Hatsugai, "Characterization of topological phases by the Weyl points of the entanglement Hamiltonian", 22nd International Conference on Electronic Properties of Two Dimensional Systems (EP2DS-22)/2017-07-31–2017-08-04
22. ポスター, T. Kawarabayashi, H. Aoki, Y. Hatsugai, "Topological Description of Tilted Dirac Fermions with/without Mass", 22nd International Conference on Electronic Properties of Two Dimensional Systems (EP2DS-22)/2017-07-31–2017-08-04
23. ポスター, S. Oono, S. Takahashi, S. Iwamoto, Y. Hatsugai and Y. Arakawa, "Topological edge modes of light in all dielectric chiral woodpile structures stacked with $\pi/4$ in-plane rotation", 18th International Conference on Physics of Light-Matter Coupling in Nanostructures (PIMCN18)/2017-07-09–2017-07-14
24. ポスター, K., Kudo; T. Kariyado and Y. Hatsugai, "Projected electron-electron interaction of Landau-Hofstadter bands on several lattices", Variety and universality of bulk-edge correspondence in topological phases: From solid state physics to transdisciplinary concepts, startup meeting/2017-06-25–2017-06-25
25. ポスター, T. Kariyado and Y. Hatsugai, "ZN Berry phase and symmetry protected topological phase in spin chain", International conference on topological materials science 2017/2017-05-09–2017-05-13

<主催:国際会議>

1. "Trends in theory of correlated material", Sep. 10-13, 2017, Tsukuba International Congress Center (EPOCHAL TSUKUBA), Tsukuba, Japan.
2. "Variety and universality of bulk-edge correspondence in topological phases: From solid state physics to transdisciplinary concepts" (BEC2018), January 5- 8, 2018, University of Tsukuba, Public lecture room B110, Tsukuba, Japan.

<講演:国内会議>

1. (基調講演) 初貝 安弘, 「はじめに : バルク・エッジ対応の多様性と普遍性」, Variety and universality of bulk-edge correspondence in topological phases: From solid state physics to transdisciplinary concepts, startup meeting/2017-06-25–2017-06-25, Tokyo, Japan
2. (招待講演) 初貝 安弘, "Device design and new functions based on bulk-edge correspondence", Pre-Strategic Initiatives: Strategic Development Center of Next generation Material & Device workshop/2018-01-16–2018-01-16, Tsukuba, Japan

3. 口頭発表, 工藤 耕司; 初貝 安弘, 「Chern 行列によるグラフェンの分数量子ホール相の特徴付け」, 日本物理学会第 73 回年次大会 /2018-03-22-2018-03-25, 東京理科大, 千葉
4. 口頭発表, 文挾 彰太, 初貝 安弘, 「J1-J2 整数スピン鎖における逐次量子相転移の Z2 ベリー位相による特徴づけ」, 日本物理学会第 73 回年次大会 /2018-03-22-2018-03-25, 東京理科大, 千葉
5. 口頭発表, 河原林 透, 石井 航太, 初貝 安弘, 「カゴメ格子上の異方的 XXZ スピン系における量子相とベリー位相」, 日本物理学会第 73 回年次大会 /2018-03-22-2018-03-25, 東京理科大, 千葉
6. 口頭発表, 荒木 広夢, 福井 隆裕, 初貝 安弘, 「第一原理計算に基づくエンタングルメントハミルトニアンによるトポロジカル絶縁体の分類」, 日本物理学会第 73 回年次大会 /2018-03-22-2018-03-25, 東京理科大, 千葉
7. 口頭発表, 荒木 広夢, 福井 隆裕, 初貝 安弘, 「3 次元トポロジカル絶縁体相のエンタングルメント・ハミルトニアンによる特徴付け」, 日本物理学会 2017 年秋季大会 /2017-09-21-2017-09-24, 岩手大学, 盛岡
8. 口頭発表, 工藤 耕司, 初貝 安弘, 「カゴメ格子の平坦バンドにおける電子間相互作用」, 日本物理学会 2017 年秋季大会 /2017-09-21-2017-09-24, 岩手大学, 盛岡
9. 口頭発表, 河原林 透, 青木 秀夫, 初貝 安弘, 「フラットバンド格子模型におけるディラック電子系の代数的変形」, 日本物理学会 2017 年秋季大会 /2017-09-21-2017-09-24, 岩手大学, 盛岡
10. 口頭発表, 高橋 雄太, 苅宿 俊風, 初貝 安弘, 「メカニカルダイヤモンドのワイル点とエッジ状態」, 日本物理学会 2017 年秋季大会 /2017-09-21-2017-09-24, 岩手大学, 盛岡
11. 口頭発表, 大野 修平; 高橋 駿, 岩本 敏, 初貝 安弘, 荒川 泰彦, 「ウッドパイル型カイラルフォトリック結晶における構造変形とバルク・エッジ対応」, 日本物理学会 2017 年秋季大会 /2017-09-21-2017-09-24, 岩手大学, 盛岡
12. 口頭発表, 高橋 雄太, 苅宿俊風, 初貝安弘, 「メカニカルグラフェンの多様なエッジ状態とそのトポロジカルな起源」, 日本物理学会 2016 年秋季大会/2017-09-13-2017-09-16, 岩手大学, 盛岡
13. ポスター, 荒木 広夢, 初貝 安弘, 「エンタングルメントチャーン数とそのトポロジカル絶縁体の相分類への適用」, 第 62 回物性若手夏の学校/2017-07

<受賞>

1. 高橋 雄太: 平成 29 年度数理物質科学研究科長表彰 (修士優秀論文)

<外部委員等>

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

<卒業論文>

1. 磯部 拓磨: フォトリックバンドのトポロジーの研究
2. 鴨田 涼: シリセンにおける時間反転対称性の破れとチャーン数

<修士論文>

1. Koji Kudo, “Topological numbers of fractional quantum Hall states on various latticesEntanglement Chern numbers for 2D and 3D topological insulators” (工藤 耕司「種々の格子上的分数量子ホール効果のトポロジカル数」)(数理物質科学研究科物理学専攻, 修士論文, 2018.3)
2. Yuta Takahashi, “Weyl points and edge states of 3D mechanical systems” (高橋 雄太「3次元力学系におけるワイル点とエッジ状態」)(数理物質科学研究科物理学専攻, 修士論文, 2018.3)

<博士論文>

1. Shuhei Oono, “Topological edge modes in photonic crystals”, (大野修平「フォトニック結晶におけるトポロジカルエッジモード」)(数理物質科学研究科, 物理学専攻, 博士論文, 2018.2)

<大学院・卒業研究学生>

博士3年. 大野 修平

博士1年. 荒木 広夢

修士2年. 工藤耕司, 高橋雄太, 保田 和馬

修士1年. 文挾 彰太, 鈴木 仙里, 西沢 駿

卒業研究. 磯部 拓磨, 鴨田 涼

<外部資金>

1. 科学研究費 基盤研究 (S)「トポロジカル相でのバルク・エッジ対応の多様性と普遍性：固体物理を越えて分野横断へ」(2017-05-31 – 2022-03-31) 研究課題番号：17H06138 (研究代表者: 初貝安弘)
総額：205,140 千円 (直接経費：157,800 千円、間接経費：47,340 千円)
2017 年度：45,370 千円 (直接経費：34,900 千円、間接経費：10,470 千円)
2. 科学研究費 基盤研究 (A)「トポロジカル相でのバルク・エッジ対応の多様性と普遍性：固体物理を越えて分野横断へ」(2017-04-01 – 2020-03-31) 研究課題番号：17H01146 (研究代表者: 初貝安弘)
総額：44,850 千円 (直接経費：34,500 千円、間接経費：10,350 千円)
2017 年度：16,640 千円 (直接経費：12,800 千円、間接経費：3,840 千円)
基盤研究 (S) 採択により辞退
3. 科学研究費 挑戦的萌芽研究「四元数のトポロジカル相での意義の解明への挑戦：多体問題と時間反転の破れ」(2016 年度～2018 年度) 研究課題番号：26247064 (研究代表者: 初貝安弘)
総額：3,510 千円 (直接経費：2,700 千円、間接経費：810 千円)
2017 年度：1,040 千円 (直接経費：800 千円、間接経費：240 千円)
4. 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セミナー, Trends in Theory of Correlated Materials (TTCM2017), 2,400 千円
5. 井上科学振興財団, 国際研究集会開催経費の一部援助, Trends in Theory of Correlated Materials (TTCM2017), 400 千円

VII-2 ナノ量子物性グループ

准教授 谷口 伸彦

大学院生 3 名（修士課程 3 名）

本研究グループでは、量子ナノ構造系で特に顕著に現れる、電子相関効果と非平衡性が織りなす「非平衡電子相関現象」を調べるため、場の量子論の手法に基づき、基礎物理の理解と様々な解析法・近似法の開発を行っている。ナノ量子系に現れる非平衡電子相関現象を理解することは、ナノ系量子デバイスの物性理解のために重要なだけでなく、強相関電子系全般に現れるさまざまな相関現象を理解する上でも不可欠である。本年度は、これまで進めてきたプロジェクトについて、その総括とともに、得られた成果の再検討等を中心に研究活動を行った。本年度の具体的な成果は以下のとおりである。

【1】局所相関系の汎関数積分評価とモット絶縁性（外部資金 [1], 論文 [1]）

経路積分は物性分野の様々な分野で使われている大変強力な方法である。特にコヒーレント状態を用いたコヒーレント状態経路積分法は、生成消滅演算子の N 積でかけられるハミルトニアンと直接対応するため極めて有用である。このような大きな利点を持つ経路積分法であるが、経路積分自体の厳密評価は演算子順序や発散的無限積の問題のためそれほど容易ではなく、実質的にガウス型モデル＝自由粒子モデルに限られている。このようなこともあり、相互作用系の有効場理論とは、Hubbard-Stratonovich 変換により導入された「系を特徴づける本質的な自由度」についてガウス型モデルを構築することを意味する。しかし、例えば（磁気秩序を伴わない）強相関モット絶縁体系を記述するガウス型有効理論は未だ確立されていない。

本研究では経路積分法による局所相関系経路積分の厳密評価を考察した。具体的な局所相関ハミルトニアンとして、モット絶縁体の原子極限に相当する $H = \sum_{\alpha} \epsilon_{\alpha} \hat{n}_{\alpha} + \frac{U}{2} \hat{N}(\hat{N} - 1)$ を考える [ここで $\hat{N} = \sum_{\alpha} \hat{n}_{\alpha} = \sum_{\alpha} \hat{\psi}_{\alpha}^{\dagger} \hat{\psi}_{\alpha}$; α は軌道/スピン自由度]。この局所相関系は、演算子法で可解であるが、経路積分法により評価すると誤った結果を導くことが知られていた。本研究では、経路積分の連続時間極限では相互作用項に特有の演算子順序の問題があり、それを解決する具体的処方箋を提案することで、局所相関系に対するコヒーレント状態経路積分法の正しい評価方法を確立した。

経路積分の評価を確立することで現れた物理描像は、局所相関系を動的位相揺らぎが付与された「動的複合粒子」としてみなすことができることを示す。これは、場の演算子 $\psi_{\alpha}(t)$ がゲージ変換により $e^{i\theta(t)} \Psi_{\alpha}(t)$ と変換され、孤立局所相関系では θ と Ψ_{α} の寄与が分離することで厳密評価が可能となることによる。このような「動的複合粒子」描像は、一粒子スペクトル関数は複数ピーク構造と非対称的な電子/正孔励起を持ち、従来のフェルミ流体論、伝統的な準粒子描像の範疇外にあり、モット絶縁性が特徴づける「非フェルミ流体固定点」の簡単なモデル化になっていると期待できる。

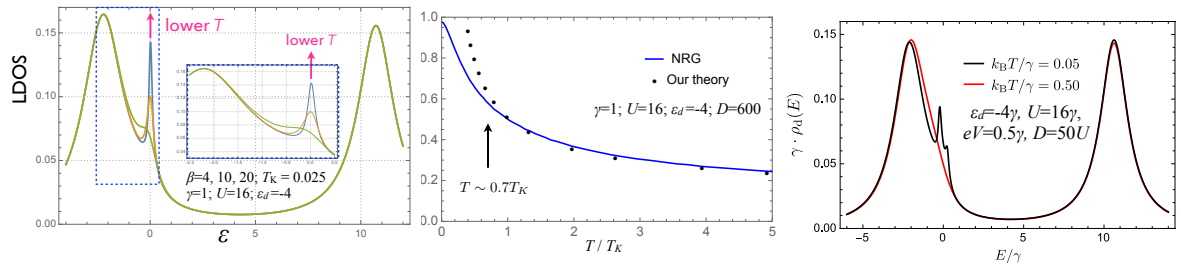


図1 (左) 動的複合粒子描像による平衡系局所状態密度スペクトルの温度変化。低温において $\epsilon \approx 0$ 付近に近藤ピークが現れる。挿入図は $\epsilon \approx 0$ 付近の拡大図。(中央) 線形コンダクタンスの温度依存性。Costi-Zlatic (2010) らによる数値くりこみ群による結果との比較。 $T \gtrsim 0.7T_K$ の温度領域では、解析結果が定量的にも良く一致する。(右) 有限バイアスにおける非平衡局所状態密度スペクトル。低温で現れる $\epsilon \approx 0$ 付近の近藤ピークが有限バイアスにより分裂する。

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

ナノ構造系の量子輸送を電子間相互作用を摂動として非平衡摂動計算を行うと、非平衡電流保存則を満たさない結果が得られることが知られている。これは、電子相関効果を局所ゲージ不変性を破らずに考慮するためには非摂動的寄与が不可欠なためである。我々は孤立相関系で成功した複合粒子描像を局所相関系 (=量子ドット) と環境が結合する開放系/非平衡定常状態へと拡張することで、電子相関の非摂動効果を考慮した非平衡ナノ系量子輸送現象の研究を進めている。

(1) ゲージ不変性はガウス近似を越えた動的位相ゆらぎを取り込むことにより保証される。我々は、Keldysh 経路積分法に位相演算子の方法を援用することで、電子系への繰り込み効果を解析的に近似した。このようにして得られた電子の自己エネルギーは比較的単純な構造を持ちながら、クーロン閉塞現象・近藤効果という競合する異なる電子相関効果を統一的に理解することが可能である (図1左)。得られた近似結果の信頼性を定量的に評価するため、平衡ドット系の数値繰り込み群結果と比較検討を行うと、高温から近藤温度 T_K 程度の温度領域に対しては定量的にもかなり良い一致を示すことが確認できた (図1中央)。この解析的近似法は有限バイアスをかけた非平衡相関量子ドット系に対して適用可能である。その結果、近藤ピークが有限バイアスにより分裂することがわかる (図1右)。

(2) 動的位相ゆらぎにより電子相関を取り込む解析法が、柔軟な拡張性を持つことを確認するため、「サイド結合 T 字型二重量子ドット系」 (図2左) への適用を行った。近似により得られた各ドットのスペクトル関数および線形コンダクタンスは、低温領域において相互作用により2個の量子ドット間でスペクトル関数の乗り移りが起きる反近藤効果共鳴が現れていることが確認できた (図2右)。

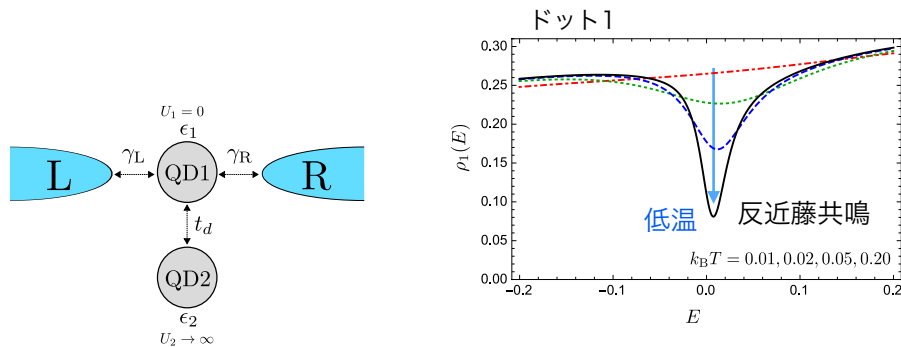


図2 (左) サイド結合 T 字型二重量子ドット系の模式図。(右) 量子ドット 1(QD1) の状態密度の温度変化。量子ドット 2(QD2) の近藤効果により、半行動共鳴が低温で現れる。

【3】ナノ量子系の量子熱力学 (外部資金 [1], 論文 [2], 講演 [1,2])

定常状態 (steady state) は時間に依存しない状態であるが、平衡状態とは異なり、外部環境の駆動により様々な定常流が内部に存在する。そのため、系の内部エントロピーは時間とともに増大する不可逆状態である。このような不可逆状態に対し、一貫した熱力学・統計力学の枠組みを構築可能か否か、という問題は、理論物理が長く取り組む基礎的難題の1つである。

我々はナノ系「量子熱力学」の側面より、この定常状態熱力学の構築に取り組んでいる。ナノ系の量子輸送で使われる量子ドット系は、異なる温度と化学ポテンシャルを持つ複数の外部環境系 (=リード) に強く結合される非平衡定常状態にある (図3)。また、ナノ系はいわゆる「熱力学極限」とは対極にある微小系であるが、熱力学法則が成立することが知られている。ナノ量子系の特性は量子力学を基本法則として完全に決定されるため、量子力学に基づき非平衡熱力学を構築する「量子熱力学」の考え方に沿う形でナノ系定常状態の熱力学を構築可能である。本研究では、相互作用がないナノ量子系、および単一準位アンダーソン模型に対して、定常状態を特徴づける熱力学関数として還元密度演算子に付随する熱力学関数を考察した。得られた結果は以下の通りである。

ナノ定常状態の熱力学関数 任意の非線形領域で、定常状態の熱力学量のみならず量子輸送現象をも特徴づける熱力学関数として、時間不変な Massieu-Planck 関数 (の定常状態拡張) Φ_{ss} が存

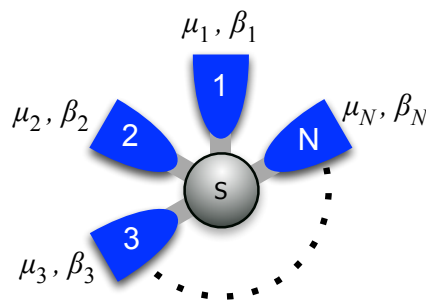


図3 異なる化学ポテンシャル・温度をもつ外部環境 (端子) と線形結合する量子ドット系の模式図。

在し、次のような熱力学関係式（の定常状態拡張）が成立する。

$$d\Phi_{ss} = \hat{N}d(\bar{\beta}\mu) - \bar{E}d\bar{\beta} + \frac{\hbar}{2\gamma} \sum_a (I_a dA_a^N + J_a dA_a^E)$$

ここで、 A_a^N, A_a^E は外部環境によるアフィニティー（親和力）を表し、端子 a からドットへ流入する非線形粒子流 I_a 、非線形エネルギー流 J_a はランダウアー公式で得られるものと一致する。この微分関係式に基づき、非線形領域に Maxwell 関係式や Onsager の相反定理を拡張することが可能である。

低温領域における臨界熱揺らぎ

統計力学における大偏差原理によると、熱力学エネルギーは平均のみならずその揺らぎもキュムラント生成関数として特徴づけることが知られている。相互作用のない量子ドット系については、完全計数統計として電流・熱流のキュムラント生成関数 $F(\lambda)$ が Levitov-Lesovik 公式として知られているが、定常状態の熱力学関数とどのように関係付けられるのかは、現時点ではまだわかっていない。我々は、特に非平衡共形場理論やホログラフィック理論を用いて考察されてきた低温領域における臨界的熱流に注目し、 $F(\lambda)$ は定常状態熱力学関数 Φ_{ss} と次のような簡単な関係があるのを見出した。

$$F(\lambda) = \frac{\gamma}{\hbar} [\Phi_{ss}(\bar{\beta}, A^E + 2i\lambda) - \Phi_{ss}(\bar{\beta}, A^E)],$$

ここで熱流は異なる逆温度 $\beta_{1,2}$ をもつ端子間に流れ、 $\bar{\beta} = (\beta_1 + \beta_2)/2$, $A^E = -\beta_1 + \beta_2$ である。この場合、揺らぎの定理は親和力 A^E の反転対称性に対応することが明らかになった。

研究業績

<論文>

1. Nobuhiko Taniguchi, *Exact path integral evaluation of locally interacting systems: the subtlety of operator ordering*, Phys. Rev. A **96** 042105 (2017) [arXiv:1709.09303].
2. Nobuhiko Taniguchi, “Quantum thermodynamics of nanoscale steady states far from equilibrium” Phys. Rev. B **97** 155404 (2018) [arXiv:1710.07385].

<学位論文>

1. 修士論文：新井和明：「非平衡量子ドット系の非摂動効果：位相演算子法による解析」筑波大学数理物質科学研究科 2017 年度 修士（理学）。

<講演>

1. 谷口伸彦「ナノ系定常状態の非平衡量子熱力学」日本物理学会 2017 年 秋季大会（2017 年 9 月 24 日，岩手大学）。
2. N. Taniguchi, *Quantum thermodynamics of nanoscale steady states far from equilibrium*, March Meeting, American Physical Society (2018 年 3 月 8 日 LA Convention Center, USA).

<外部資金>

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

VII-3 表面界面物性グループ

1. メンバー

准教授	小野 倫也
D2	岩瀬 滋
M2	高木 謙介
B4	種崎 智貴
B4	中西 健太

2. 概要

実空間差分法に基づく第一原理電子状態・伝導特性計算コード RSPACE を開発している。コード開発に関しては、伝導特性計算の自己エネルギー計算部の高速化を行った。RSPACE を使ったアプリケーションでは、パワーデバイス用として期待されている SiC/SiO₂ 界面の原子構造の特定を、実験グループと協力して行った。

3. 研究成果

【1】実空間差分法に基づく第一原理電気伝導・伝導特性計算コード RSPACE の開発

波動関数接合法を用いた電気伝導計算法では、現実的な時間内で電極の一般化ブロッホ波を計算することは困難である。そのため、進行波と緩やかに減衰もしくは増大するエバネッセント波のみを計算する方法が用いられるが、透過率の計算精度が低下することが報告されている。本年度は、連分数を用いた伝導計算に用いる自己エネルギーの計算法の開発と連分数の物理的な意味づけ、ならびに進行波と緩やかに減衰もしくは増大するエバネッセント波のみ精度劣化を引き起こすことなく透過率を計算する方法の開発を行った。

【2】SiC-MOSFET 開発における界面電子状態シミュレーション

SiC/SiO₂ 界面はパワーデバイス用途で期待されているものの、キャリア移動度が低いことが実用化に向けた課題となっている。原因解明のために界面原子構造・電子状態とキャリア散乱機構の解明が必要であるが、SiC/SiO₂ 界面は Si/SiO₂ 界面よりも実験・計算データが少なく、原子構造の解明にも至っていない。本年度は、走査型透過電子顕微鏡(STEM)像を援用し、第一原理電子状態・伝導特性計算のモデルに用いる界面原子構造の探索を行った。まず、図 1(a)に示す実験で得られた STEM 像より、界面における

原子層間隔を測定した。実験で得られたデータを用いて、界面における原子面の間隔を調べた。次に、候補となる SiO_2 の結晶多形の中から、 $\text{SiC}(0001)$ 面に格子定数が概ね一致するものを選び出し、STEM 像との格子間隔の一致、界面の形成エネルギーを比較し、図 1(b)に示す原子構造を得た。STEM より、図 1(a)の D-D'部と E-E'部は原子構造が異なることが分かっている。これはそれぞれ図 1(b)の左側、右側に対応するものと考

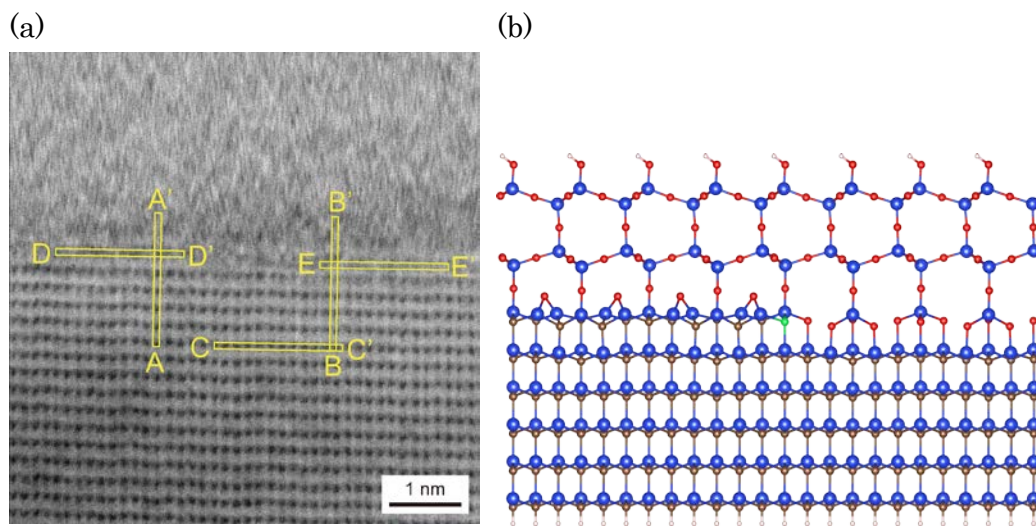


図 1 SiC/SiO_2 界面の STEM 像(a)と第一原理計算により得られた界面原子構造(b)。青球は Si 原子、茶球は C 原子、赤球は O 原子、緑球は N 原子、白球は H 原子である。

えられる。平成 30 年度は、この原子構造を用いて界面のキャリア移動特性評価を行う。

4. 受賞、外部資金、知的財産権等

1. 科学技術振興機構、先導的物質変換領域、小野倫也、分担、2012 年度より継続、0 円、「二酸化炭素活性化機構の学理に基づくメタノール室温合成触媒の創成」
2. 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、2017 年度 0 円、「次世代の産業を支える新機能デバイス・高性能材料の創成」
3. 日本学術振興会、基盤研究(B)：小野倫也、代表、2017 年、2000 千円、「大規模第一原理スピン輸送シミュレーターの開発と革新的デバイス用界面構造の設計」
4. 民間企業、共同研究：小野倫也、代表、2017 年、900 千円

5. 研究業績

(1) 研究論文

A) 査読付き論文

1. T. Ono, C. J. Kirkham, S. Saito, Y. Oshima, "Theoretical and experimental investigation of the atomic and electronic structures at the 4H-SiC(0001)/SiO₂ interface", Phys. Rev. B 96 115311 (2017).
2. S. Sato, S. Iwase, K. Namba, T. Ono, K. Hara, A. Fukuoka, K. Uosaki, K. Ikeda, "Electrical Matching at Metal/Molecule Contacts for Efficient Heterogeneous Charge Transfer", ACS Nano 12 1228-1235 (2018).
3. S. Tsukamoto, T. Ono, S. Bluegel, "Improvement of accuracy in the wave-function-matching method for transport calculations", Phys. Rev. B 97 115450 (2018).

(2) 国際会議発表

A) 招待講演

1. T. Ono, "Density functional theory calculation for interface electronic structure of SiC power electronic devices", EMN Meeting on Quantum, (June 18-21, 2017, Vienna, Austria).
2. T. Ono, "DFT calculation for electronic structure and carrier scattering property at SiC-MOS interface", European Advanced Energy Materials Congress, (March 25-28, 2018, Stockholm, Sweden).

B) 一般講演

1. T. Ono, C. J. Kirkham, S. Iwase, "First-principles study on carrier scattering property at 4H-SiC(0001)/SiO₂", 2016 International Conference on Solid State Devices and Materials, September 26-29, 2016, Tsukuba, Japan.
2. T. Ono, C. J. Kirkham, "First-principles study on atomic and electronic structures of 4HSiC(0001)/SiO₂ interface", APS March Meeting 2017, March 13-17, 2017, New Orleans, USA.

(3) 国内学会・研究会発表

A) 招待講演

1. 小野倫也, "第一原理計算と高速計算機を用いた材料探索・デバイス設計", 情報機構セミナー, (2017年6月13日, 東京).
2. 小野倫也, "第一原理計算によるデバイス用界面の電子状態とキャリア伝導解析", 日本物理学会 2017年秋季大会, (2017年9月21日～24日, 岩手).

B) その他の発表

1. T. Ono, S. Tsukamoto, "Improvement of accuracy of wave-function-matching technique for first-principles electron-transport calculation", APS March Meeting 2018, (March 5-9, 2018, Los Angeles, USA).
2. S. Iwase, Y. Futamura, A. Imakura, T. Sakurai, T. Ono, "Efficient and Scalable Calculation of Complex Band Structure Using Sakurai-Sugiura Method", International Conference for High Performance Computing, Networking, Storage and Analysis (SC17), (November 12-17, 2017, Denver, USA).
3. 小野倫也, 第一原理計算による窒化処理後の SiC/SiO₂ 界面構造探索, 応用物理学会秋季学術講演会, (2017 年 9 月 5 日～8 日, 福岡).
4. 高木謙介, 小野倫也, HfO₂/SiO₂ 界面における酸素空孔欠陥が及ぼすリーク電流の第一原理計算, 応用物理学会秋季学術講演会, (2017 年 9 月 5 日～8 日, 福岡).
5. 岩瀬滋, 二村保徳, 今倉暁, 櫻井鉄也, 塚本茂, 小野倫也, 周回積分法を用いた電極の自己エネルギーの計算方法の提案と第一原理伝導計算への応用, 日本物理学会 第 73 回年次大会, (2018 年 3 月 22 日～25 日, 千葉).

VII-4 ナノ構造物性

1. メンバー

教授 岡田 晋

学生 博士後期課程学生：2名、修士課程学生：5名、学群生：5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】 グラフェンの圧縮/伸張による C₆₀ への電荷移動と極性制御

グラフェンと C₆₀ 分子はともに、sp³ 混成をした炭素原子から構築される炭素同素体で、それぞれ2次元と0次元のネットワーク構造を有する。両者の違いは、C₆₀に含まれる12個の5角形にあり、このためC₆₀は閉じた籠状構造をとる。また、5角形の存在はC₆₀分子が他の環状炭化水素分子と比べて非常に深い最低空状態の起源となっている。このため、グラフェンの上にC₆₀分子を2次元的に敷き詰めた、C₆₀とグラフェンからなるヘテロ

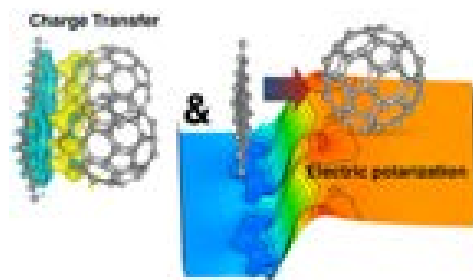


図 1: C₆₀ 分子膜とグラフェンからなる vdW ヘテロ構造における電荷移動と分極

層状物質では、グラフェンから C60 への電荷移動の可能性が期待される。本研究では、グラフェンに等方的な圧縮歪みを印加することで、グラフェンのディラック点が C60 の最低空状態の上にシフトし、グラフェンから C60 への電荷移動が生じることを明らかにした。また、C60 とグラフェンの間の相互作用もグラフェンに印加された圧縮／伸張歪み強く依存することを明らかにし、グラフェンの構造延長による、物性制御の可能性を予言した。

【2】グラフェン FET への電荷蓄積現象における荷電不純物の影響

デバイス構造中のグラフェンは、基板や電極との複合構造に加えて、種々の不純物との複合構造を形成しています。このような複合構造は、グラフェンの電子物性の変調を誘起することが知られている。ここでは、電界効果トランジスタ構造を有するグラフェンに着目し、グラフェンに吸着した Al ナノ粒子がゲート電極によるグラフェンへの電荷蓄積に及ぼす影響の解明を行った(図 2)。計算の結果、蓄積電荷分布は Al ナノ粒子のグラフェンへの吸着配置に強く依存することが明らかになった。また、Al ナノ粒子の吸着構造依存に起因して、ディラック点のフェルミレベルに対するエネルギーに特徴的な振る舞いが見られることも明らかにした。すなわち、Al ナノ粒子が電極とグラフェンに挟まれた場合、ディラック点が電荷蓄積に対してピン留めされる。他方、Al ナノ粒子が電極と反対側に吸着されている場合、グラフェンへのゲート電界によるグラフェンへの電荷注入がなされ、ディラック点の注入電荷量に応じ、単調にシフトすることが明らかになった。

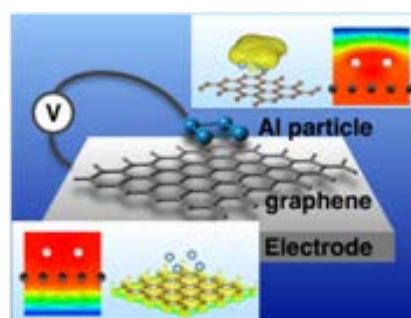


図 2、荷電ナノ粒子吸着グラフェン

FET の蓄積電荷分布と電位分布

【3】グラフェン端からの電界電子放出現象の吸着官能基依存性

グラフェンは sp² 炭素原子が互いに共有結合した 2 次元シート構造を有している。このため、高い電気伝導性と化学的/機械的安定性を有している。このため、電界放出源としての可能性が古くから示唆され、実際に単層や多層のグラフェンは電界電子放出源として振舞うことが示されている。ここでは、密度汎関数理論と有効遮蔽媒質法を用いて、高い定常電界が印加されたグラフェン端の電子物性の端に吸着した化学官能基種依存性を調べた。その結果、電界放出

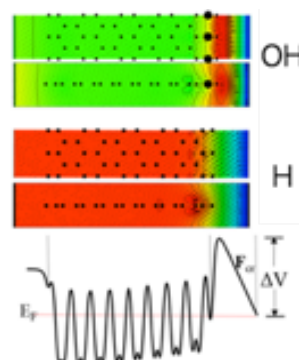


図 4 GNR 端の電界下における電位分布と電気力線。

に要する臨界電界は官能基かされたグラフェン端の仕事関数と基本的に比例することが明らかになった。一方、水酸基かされたグラフェン端では、低い水酸基の作る強い双極子モーメントのため、電子の真空領域への染み出しが誘起される。このため、水酸化化端が非常に小さな仕事関数を有するが、染み出した電子によるクーロン反発により電界放出に要する臨界電界が大きくなることを示した。また、たの官能基化端においても、強電界下においては、真空領域への電荷染み出しによるポテンシャル障壁の増大が見られることを示した。

【4】 2次元炭化水素ネットワークにおけるカゴメバンドのフィリング制御

炭素からなるネットワーク物質の電子物性は、その π 電子の形成するネットワーク構造に強く依存することが知られている。例えば、蜂の巣格子では線形の分散を有するバンド（ディラックコーン）がフェルミレベルに出現する。ここでは、3回対象を有する立体形状を有する炭化水素分子である、[444]プロペランとトリプチセンを構成単位として、それらを互いに結合することで実現される2次元蜂の巣格子ネットワーク物質の物質設計を

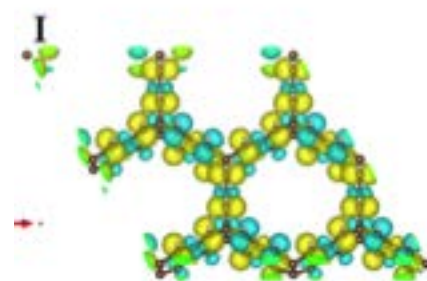


図5 2次元炭化水素ネットワークのスピン密度分布

おこなった。この炭素-炭素ネットワークの π 電子系は、アセン構造が sp^3 炭素で結合されたネットワークであり、一見、 π 電子系が sp^3 炭素により分断されているように見えます。しかしながら、 sp^3 炭素周に3つのアセンが互いに120度の角度で接合していることから、アセン間の電子トランスファーが無視できない系である。このため、 π 電子系のトポロジーに着目すると、この系は内部自由度（アセン構造）を有するカゴメ格子系とみなすことが可能で、実際フェルミレベルにカゴメ平坦バンドが出現し磁気的な秩序が誘起されることを予言した。

【5】 電界印加下におけるPCBM分子の電子構造

C60をはじめとするフラーレン分子は、ナノスケールの表面曲率に起因する適度な化学反応性を有しており、種々の化学官能基の分子表面への吸着が可能である。化学官能基化は表面の π 電子

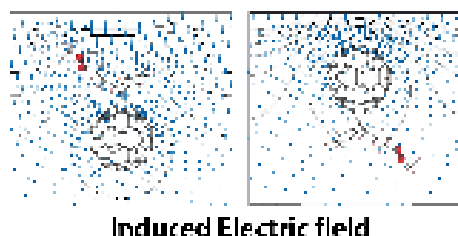


図6：PCBMの静電ポテンシャル図

系の形状を変調させるため、これらの化学官能基化フラーレン誘導体は非修飾フラーレンとは異なります。これらの、化学官能基化フラーレンは、その深い非占有状態から、誘起薄膜光電変換素子（太陽電池）の電子受容体として用いられている。ここでは、[6, 6]-phenyl-C61-butyric acid methyl ester fullerene と silylmethylfullerene に着目し、電子ドーピング下での蓄積電子分布とフラーレン分子近傍の静電ポテンシャル分布の解析を行った。電子ドーピングは平行平板からなる対向電極から行った。計算の結果、蓄積電子の分布はフラーレン分子種には依存せず、フラーレン分子の対向電極に対する配向につよく依存することが明らかになった。このため、分子近傍の電界も分子配向に依存し、特に電極とフラーレン部位が正対している場合、非常に強い電界集中が誘起される。

4. 学位論文

修士：

1. 古谷匠，“フラーレン誘導体の物性探索”（2018 年 3 月）
2. 長澤裕也，“微細空孔内包多環芳香族炭化水素分子の構造解析と物性探索”（2018 年 3 月）

5. 受賞、外部資金、知的財産権等

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

6. 研究業績

(1) 研究論文

1. Ken Kishimoto and Susumu Okada, "Fermi level pinning for the carrier accumulation in bilayer graphene with atomic defects by an external electric field", Applied Physics Letters Vol. 110, 011601 (2017). (DOI: 10.1063/1.4973426).
2. Manaho Matsubara and Susumu Okada, "Effect of a charged impurity on carrier accumulation into graphene by an external electric field", Applied Physics Express Vol. 10, 025101 (2017). (DOI: 10.7567/APEX.10.025101).
3. Nguyen Thanh Cuong and Susumu Okada, "Suppression of conductivity deterioration of Cu thin films by coating atomic layer materials", Applied Physics Letters Vol. 110, 131601 (2017). (DOI: 10.1063/1.4979038).

4. Ayaka Yamanaka and Susumu Okada, "Polarity control of h-BN nanoribbon edges by strain and edge termination", *Physical Chemistry Chemical Physics* Vol. 19, 9113-9117 (2017). (DOI: 10.1039/C6CP08818J).
5. Sho Furutani and Susumu Okada, "Electronic properties of electron-doped [6,6]-phenyl-C61-butyric acid methyl ester and silylmethylfullerene", *Chemical Physics Letters* Vol. 678, 5-8 (2017). (DOI: 10.1016/j.cplett.2017.04.032)
6. Yanlin Gao and Susumu Okada, "Electrostatic potential barrier for electron emission at graphene edges induced by the nearly free electron states", *Applied Physics Express* Vol. 10, 055104 (2017). (DOI: 10.7567/APEX.10.055104).
7. Yanlin Gao and Susumu Okada, "Energetics and electronic structures of thin films and heterostructures of a hexagonal GaN sheet", *Japanese Journal of Applied Physics* Vol. 56, 065201 (2017). (DOI: 10.7567/JJAP.56.065201).
8. Ken Kishimoto and Susumu Okada, "Electronic structure of bilayer graphene with defects under an external electric field", *Japanese Journal of Applied Physics* Vol. 56, 06GE01 (2017). (DOI: 10.7567/JJAP.56.06GE01)
9. Jun-ya Sorimachi and Susumu Okada, "Porous hydrocarbon networks of pyramidal molecules", *Japanese Journal of Applied Physics* Vol. 56, 06GE03 (2017). (DOI: 10.7567/JJAP.56.06GE03).
10. Taketo Kochi and Susumu Okada, "Electronic Structure of CNT Thin Films with Nanoscale Interfaces under an Electric Field", *Japanese Journal of Applied Physics* Vol. 56, 06GE02 (2017). (DOI: 10.7567/JJAP.56.06GE02).
11. Taketo Kochi and Susumu Okada, "Asymmetric carrier accumulation in double-walled carbon nanotube by an external electric field", *Applied Physics Express* Vol. 10, 075101 (2017). (DOI: 10.7567/APEX.10.075101).
12. Manaho Matsubara and Susumu Okada, "Carrier injection in nonbonding states of N-doped graphene by an external electric field", *Japanese Journal of Applied Physics* Vol. 56, 075101 (2017). (DOI: 10.7567/JJAP.56.075101).
13. Satoshi Yasuda, Ryosuke Takahashi, Ryo Osaka, Ryota Kumagai, Yasumitsu Miyata, Susumu Okada, Yuhei Hayamizu, and Kei Murakoshi, "Out-of-Plane Strain Induced in a Moire Superstructure of Monolayer MoS₂ and MoSe₂ on Au(111)", *Small* Vol. 13, 1700748 (2017). (DOI: 10.1002/smll.201700748).
14. Remi Taira, Ayaka Yamanaka, and Susumu Okada, "Electronic structure and polarity of edge functionalized graphene nanoribbons", *Japanese Journal of Applied Physics* Vol. 56, 085103 (2017). (DOI: 10.7567/JJAP.56.085103)

15. Jun-ya Sorimachi and Susumu Okada, "Electron filling control of Kagome flat band in 2D hydrocarbon networks of sp² and sp³ C atoms", *Physical Review B* Vol. 96, 024103 (2017). (DOI: 10.1103/PhysRevB.96.024103)
16. Yamato A. Saucier, Susumu Okada, and Mina Maruyama, "Strain-induced charge transfer and polarity control of a van der Waals heterosheet comprising C60 and graphene", *Applied Physics Express* Vol. 10, 095101 (2017). (DOI: 10.7567/APEX.10.095101).
17. Miki Akiba and Susumu Okada, "Mechanical properties of nano-rotors: Energetics of triptycene derivatives", *Japanese Journal of Applied Physics* Vol. 56, 105201 (2017). (DOI: 10.7567/JJAP.56.105201).
18. Terunobu Nakanishi, Ryo Kitaura, Takazumi Kawai, Susumu Okada, Shoji Yoshida, Osamu Takeuchi, Hidemi Shigekawa, Hisanori Shinohara, "Modulation of the Local Density of States of Eu-Nanowires Encapsulated in Carbon Nanotubes as Observed by Scanning Tunneling Microscopy and Spectroscopy", *The Journal of Physical Chemistry C* Vol. 121, 18195–18201 (2017). (DOI: 10.1021/acs.jpcc.7b04047).
19. Yuya Nagasawa and Susumu Okada, "Energetics and electronic structures of inclusion compounds of large fullerenes and cycloparaphenylenes", *Journal of the Physical Society of Japan* Vol. 86, 104702 (2017). (DOI: 10.7566/JPSJ.86.104702)
20. Mina Maruyama and Susumu Okada, "Interplay between Kagome Flat band and Dirac cone in porous graphitic networks", *Carbon* Vol. 125, 530–535 (2017). (DOI: 10.1016/j.carbon.2017.08.040)
21. Hiroaki Nishino, Takeshi Fujita, Nguyen Thanh Cuong, Satoshi Tominaka, Masahiro Miyauchi, Soshi Iimura, Akihiko Hirata, Naoto Umezawa, Susumu Okada, Eiji Nishibori, Asahi Fujino, Tomohiro Fujimori, Shin-ichi Ito, Junji Nakamura, Hideo Hosono, and Takahiro Kondo, "Formation and Characterization of Hydrogen Boride Sheets Derived from MgB₂ by Cation Exchange", *Journal of the American Chemical Society* Vol. 139, 13761–13769 (2017). (DOI: 10.1021/jacs.7b06153)
22. Hiroki Kinoshita, Il Jeon, Mina Maruyama, Kenji Kawahara, Yuri Terao, Rika Matsumoto, Kazu Suenaga, Susumu Okada, Yutaka Matsuo, and Hiroki Ago, "Highly Conductive and Transparent Large-Area CVD-Grown Bilayer Graphene Sheets Realized by MoCl₅ Intercalation", *Advanced Materials* Vol. 29, 1702141 (2017). (DOI: 10.1002/adma.201702141)

23. Tomoe Yayama, Yanlin Gao, Susumu Okada, and Toyohiro Chikyow, "Polarization control of nanotrenches in GaN(0001)/(000-1) by surface hydrogenation", Japanese Journal of Applied Physics Vol. 56, 111002 (2017). (DOI: 10.7567/JJAP.56.111002)
24. Manaho Matsubara and Susumu Okada, "Geometric structures of Al nanoparticle adsorbed on graphene under the external electric field", Japanese Journal of Applied Physics Vol. 56, 125101 (2017). (DOI: 10.7567/JJAP.56.125101).

(2) 国際会議発表

1. M. Maruyama, S. Okada, "Magnetic properties of porous graphene networks", 28th International Conference on Diamond and Carbon Materials, 3 - 7 September 2017, Gothia Towers (Gothenburg)
2. Y. Gao, S. Okada, "Electrostatic potential barrier for electron emission at graphene edges induced by the nearly free electron states", 28th International Conference on Diamond and Carbon Materials, 3 - 7 September 2017, Gothia Towers (Gothenburg)
3. Mina Maruyama and Susumu Okada, "Magnetism and Electronic Polarity of Two-Dimensional Network Consisting of C40 Fullerene", 9th International Conference on Recent Progress in Graphene and 2D Material Research, September 19-22, 2017, Singapore (Singapore).
4. Yanlin Gao and Susumu Okada, "Electrostatic properties of edge-functionalized graphene nanoribbon under the lateral electric field", 9th International Conference on Recent Progress in Graphene and 2D Material Research, September 19-22, 2017, Singapore (Singapore).
5. Manaho Matsubara and Susumu Okada, "Fermi level tuning of N-doped graphene by an external electric field", 9th International Conference on Recent Progress in Graphene and 2D Material Research, September 19-22, 2017, Singapore (Singapore).
6. Sho Furutani and Susumu Okada, "Electronic properties of two-dimensional molecular sheets of chemically decorated fullerenes under an external electric field", 9th International Conference on Recent Progress in Graphene and 2D Material Research, September 19-22, 2017, Singapore (Singapore).
7. Hisaki Sawahata, Mina Maruyama, and Susumu Okada, "Energetics and electronic properties of B3N3-doped graphene: Semiconducting graphene heterostructures", 9th International Conference on Recent Progress in Graphene and 2D Material Research, September 19-22, 2017, Singapore (Singapore).
8. Airi Yasuma, Ayaka Yamanaka, and Susumu Okada, "Stability of edge oxidized graphene nanoribbons", 9th International Conference on Recent Progress in Graphene and 2D Material Research, September 19-22, 2017, Singapore (Singapore).

9. Yanlin Gao and Susumu Okada, "Field Emission Properties of Edge-Functionalized Graphene Nanoribbon", MNC2017, 30th International Microprocesses and Nanotechnology Conference, November 6 -9, 2017, Ramada Plaza Jeju, (Jeju). Sho Furutani and Susumu Okada, "Energetics and Electronic Structures of Chemically Decorated C60 Chains", MNC2017, 30th International Microprocesses and Nanotechnology Conference, November 6 -9, 2017, Ramada Plaza Jeju, (Jeju).
10. Airi Yasuma, Ayaka Yamanaka, and Susumu Okada, "Energetics of Edge Oxidization of Graphene Nanoribbons", MNC2017, 30th International Microprocesses and Nanotechnology Conference, November 6 -9, 2017, Ramada Plaza Jeju, (Jeju).
11. Hisaki Sawahata, Mina Maruyama, Ngyen Thanh Cuong, Haruka Omachi, Hisanori Shinohara, and Susumu Okada, "Energetics and Electronic Structure of Graphene Heterostructures via Substitutional Doping with B3N3", MNC2017, 30th International Microprocesses and Nanotechnology Conference, November 6 -9, 2017, Ramada Plaza Jeju, (Jeju).
12. Hisaki Sawahata, Mina Maruyama, Ngyen Thanh Cuong, Haruka Omachi, Hisanori Shinohara, and Susumu Okada, "Band-Gap Engineering of Graphene Heterostructures via Substitutional Doping with B3N3", 2017 Workshop on Innovative Nanoscale Devices and Systems (WINDS), November 26-December 1, 2017, Hapuna Beach Prince Hotel (Hawaii).
13. Yanlin Gao and Susumu Okada, "Electrostatic Potential Properties of Edge-Functionalized Graphene Nanoribbon Under the External Electric Field", 2017 Workshop on Innovative Nanoscale Devices and Systems (WINDS), November 26-December 1, 2017, Hapuna Beach Prince Hotel (Hawaii).
14. Manaho Matsubara and Susumu Okada, "Geometric Structures of Al Nanoparticles Adsorbed on Graphene Under an External Electric Field", 2017 Workshop on Innovative Nanoscale Devices and Systems (WINDS), November 26-December 1, 2017, Hapuna Beach Prince Hotel (Hawaii).
15. Mina Maruyama, Nguyen Thanh Cuong, and Susumu Okada, "Coexistence of Dirac Cones and Kagome Flat Bands in Porous Graphene", 2017 Workshop on Innovative Nanoscale Devices and Systems (WINDS), November 26-December 1, 2017, Hapuna Beach Prince Hotel (Hawaii).
16. Nguyen Thanh Cuong and Susumu Okada, "High Thermoelectric Power of Borazine (B3N3)-embedded Graphene", 2017 Workshop on Innovative Nanoscale Devices and Systems (WINDS), November 26-December 1, 2017, Hapuna Beach Prince Hotel (Hawaii).

VII-5. 量子輸送研究

教授: 都倉康弘

助教: 吉田恭

研究員: Giorgos Giavaras

大学院生: 前期課程 7 名

【1】量子状態制御と非平衡統計物理

(1) 過剰エントロピー生成 (中嶋、都倉、論文[5]、国際講演[2]、国内講演[16])

時間依存するポテンシャルの下での量子伝導現象に継続して取り組んでいる。熱浴の温度や科学ポテンシャルをゆっくり変動させた時の、過剰エントロピー生成に関して古典系では活発に議論されている。今回量子系での扱いについて、新しい方法を提案し、いくつかの極限条件で従来研究と整合していることを確かめた。また従来時間反転対称性がある場合に限定されていた解析を一般化した。

(2) メゾスコピック系の物性と伝導現象 (都倉 論文[2,4,6]、国際講演[12]、国内講演[18,23,24])

ジョセフソン接合における位相滑り現象に対する周期的な空間変調の効果を検討し、空間不均一性に敏感であることを示した。また量子ホールエッジ状態や InAs ナノワイアの非平衡励起のダイナミクスを朝永・ラッティンジャーモデルを用いて解析を進めた。擬二次元量子ドットに閉じ込められた電子スピンの様々なスピン・軌道相互作用がスペクトルや位相干渉効果に与える影響について検討を加えた。

(3) カーボンナノチューブの光吸収 (都倉 論文[3])

配向したカーボンナノチューブ系は光吸収特性に大きな偏光依存性を持つ。従来ディラック点近傍にフェルミ面があるカーボンナノチューブ系ではナノチューブ方向の電場成分が主に吸収されることが分かっていた。しかし、今回電荷ドープを行うことにより、その吸収偏光特性が 90 度回転する事を理論的に示した。

(4) 量子ドットの高周波特性 (Giavaras、都倉、横浜 国際講演[4,8]、国内講演[3,22])

離散的なエネルギースペクトルを持つ量子ドットに周期的な電場や磁場を印加すると様々な共鳴や干渉特性が期待される。複数の量子準位が関与する量子ドット系の動的特性を Floquet 理論や摂動論を用いて解析を行い、実験結果と比較を行った。また古典的な Rabi モデルにおいて、従来の回転波近似を適用できない強励起条件において、正確な π パルスを実現する条件について詳しく調べた。

【2】量子測定と量子系のデコヒーレンス、エンタングルメント

(1) 測定理論と量子連続測定 (浅井、都倉 国際講演[7,11]、国内講演[1,4])

また量子測定理論における、弱値とその測定過程である弱測定は量子力学の特徴が明瞭に現れる研究課題である。弱値は量子力学的平均を一般化したものであり、量子測定の感度向上や通常測りにくい物理量へアクセスできる可能性から注目を集めている。今回、この弱値を混合状態へ拡張する方法について提案を行った。また線形応答理論に本研究結果を適用した。

(2) 量子ビットと光子場の相互作用 (都倉 国際講演[13]、国内講演[2,19])

光子の偏光状態を電子スピン状態にコヒーレントに転写を行う場合の忠実度に関して、検討を加えた。忠実度を阻害する原因である交換相互作用を抑制するために、強い遮蔽効果と大きな閉じ込めポテ

ンシャルが有効であることを示し、忠実度 90%以上が可能であることを示した。

(3) 量子系のコヒーレンスの制御(鈴木、竹村、辻、澤口、吉田、都倉 国際講演[6,9],国内講演[5,6,8,9,15,18,20])

量子状態を阻害するデコヒーレンスを回避するために、連続弱測定を用いた量子フィードバック、量子蒸留回路を用いたエンタングルメントの蒸留、表面コードを改良したフォールトレラント量子回路、および量子通信の情報容量の高精度見積りのためのより良いエンタングルメントの指標の検討を開始した。

(4) 超強結合回路量子電磁気学(加藤、吉田、都倉 国際講演[5]、国内講演[10,21])

キャビティ光子と結合した量子 2 準位系は典型的な複合量子系で実験・理論ともに活発に研究が行われている。特に、その結合定数が他のパラメタに比べて非常に大きくなった超強結合系が最近実験的に実現され、新しい物性が期待されている。この系の量子状態を測定、制御するために、Landau-Zener 効果や Landau-Zener-Stuckelberg 干渉効果を適用する方法を提案し、具体的な計算を行った。また実験グループとの議論も開始した。

【3】統計力学と乱流の物理

(1) 古典・量子場の系のマイクロ状態量としてのエントロピー(吉田 国際講演 [10], 国内講演[7,14])

統計力学のアンサンブル描像の基礎付けにおいて重要となる典型性の概念を基に、マイクロ状態量としてのエントロピーを考察した。昨年度までに古典場の系についてマイクロ状態量としてのエントロピーの表式を得たが、本年度は量子場の系についてマイクロ状態量としてのエントロピーの表式を提案した。

(2) 乱流中の慣性粒子分布に対する統計法則(吉田 論文[1], 国際講演 [1,14], 国内講演 [13,26])

大気中の雲粒、太陽系惑星形成時のダストの運動等は、乱流中の慣性粒子の運動でモデル化される。本研究では、有木健人研究員(名古屋大学)らとの共同研究で、乱流中の慣性粒子分布に対して、緩和時間をパラメタとする摂動解析で大スケールにおける相似則を導いた。また、慣性粒子密度場の定量的解析を行うために、ヘッシンアン場に基づく完結近似手法を開発した。

(3) 量子流体乱流の統計法則(吉田 国際講演 [3], 国内講演 [11,12,25])

液体ヘリウムの超流動状態や Bose-Einstein 凝縮体(BEC)の流動などの量子流体の運動は、適切な近似のもと Gross-Pitaevskii (GP)方程式により支配される。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、非線形性の強い波数領域の場のスペクトルを求め、粒子数密度が低波数から高波数へと輸送されていることを示した。

＜論文＞

1. Taketo Arika, Kyo Yoshida, Keigo Matsuda, and Katsunori Yoshimatsu, “Scale-similar clustering of heavy particles in the inertial range of turbulence”, Phys. Rev. E **97**, 033109 (2018).
2. Aleksandr E. Svetogorov, Masahiko Taguchi, Yasuhiro Tokura, and Denis M. Basko, “Theory of coherent quantum phase-slip in Josephson junction chains with periodic spatial modulations”, Phys. Rev. B **97**, 104514 (2018).
3. Ken-ichi Sasaki and Yasuhiro Tokura, ”Theory of a Carbon-Nanotube Polarization Switch”, accepted for

publication in Phys. Rev. Applied. **9**, 034018 (2018).

4. Masahi Inui, Tatsuki Tojo, Kyoaburo Takeda, and Yasuhiro Tokura, “Spin-flip quantum transition driven by the time-oscillating Rashba field”, J. Phys. Commun. **2**, 015021 (2018).

5. Satoshi Nakajima and Yasuhiro Tokura, “Excess entropy production in quantum system: Quantum master equation approach”, J. Stat. Phys. **169**, 902–928 (2017).

6. Tatsuki Tojo, Masashi Inui, Ryo Ooi, Kyoaburo Takeda, and Yasuhiro Tokura, “Effect of isotropy and anisotropy of the confinement potential on the Rashba spin-orbit interaction for an electron in two-dimensional quantum system”, Jpn. J. Appl. Phys **56**, 075201–1–15 (2017).

<書籍>

<講演:国際会議>

1. Taketo Arika, Kyo Yoshida, Keigo Matsuda, and Katsunori Yoshimatsu, “Self-similarity of heavy-particle clustering in the inertial range of turbulence”, 5th International Conference on Mathematical Theory of Turbulence via Harmonic Analysis and Computational Fluid Dynamics, Nagoya Univ., Nagoya, Japan, 13 Mar. (2018).

2. Yasuhiro Tokura, “Excess entropy production in quantum systems”, APS March Meeting 2018, Los Angeles, California, USA Mar. 5–9 (2018).

3. Kyo Yoshida, Yoshiyuki Tsuji, and Hideaki Miura, “Spectrum of turbulence in nonlinear Schrödinger (Gross-Pitaevskii) equation”, 5th International Conference on Mathematical Theory of Turbulence via Harmonic Analysis and Computational Fluid Dynamics, Nagoya Univ., Nagoya, Japan, 13 Mar. (2018).

4. G. Giavaras, Y. Tokura and K. Ono, “Spin resonance in spin-orbit-coupled quantum dots in the weak and strong driving regimes” 2017 Workshop on Innovative Nanoscale Devices and Systems (WINDS), Hapuna Beach Prince Hotel, Hawaii, USA, Nov.30 (2017).

5. Sumiya Kato, Suzuki, Kyo Yoshida, Yasuhiro Tokura, “Effect of strong atom-cavity coupling on the entanglement dynamics of two atoms”, poster presentation. International School and Symposium on Nanoscale Transport and phoTonics (ISNTT) 2017, NTT Atsugi R&D Center, Atugi, Japan, 14 Nov. (2017).

6. K. Tsuji, and Y. Tokura, “Upper Bound on the Two-way Assisted Private Capacity of Various Quantum Channels”, poster presentation. International School and Symposium on Nanoscale Transport and phoTonics (ISNTT) 2017, NTT Atsugi R&D Center, Atugi, Japan, 14 Nov. (2017).

7. K. Asai, and Y. Tokura, “Non-unitary Transformation of the Square Root of Density Matrices”, poster presentation. International School and Symposium on Nanoscale Transport and phoTonics (ISNTT) 2017, NTT Atsugi R&D Center, Atugi, Japan, 14 Nov. (2017).

8. K. Yokohama, and Y. Tokura, “Spin Resonance beyond the Rotating Wave Approximations”, poster presentation. International School and Symposium on Nanoscale Transport and phoTonics (ISNTT) 2017, NTT Atsugi R&D Center, Atugi, Japan, 14 Nov. (2017).

9. A. Takemura, and Y. Tokura, “Two-way Quantum Computer”, poster presentation. International School and Symposium on Nanoscale Transport and phoTonics (ISNTT) 2017, NTT Atsugi R&D Center, Atugi, Japan, 14 Nov. (2017).

10. Kyo Yoshida, “Microscopic entropy for classical and quantum free field systems”,

poster presentation. YITP Workshop "Quantum Thermodynamics: Thermalization and Fluctuations", Kyoto Univ., Kyoto, Japan, 28 Sep. (2017).

11. Kaito Asai and Yasuhiro Tokura, "The definition and an observation of a weak value in density matrix form", VI Quantum Information School and Workshop, Paraty, Brazil, Aug. 14-18, (2017).

12. Yasuhiro Tokura, "Binary energy spectrum of counter-propagating Tomonaga-Luttinger liquid", 28th Int. Conf. on Low Temperature Physics (LT-28), Gothenburg, Sweden Aug. 9-16 (2017).

13. Yasuhiro Tokura, "The Coherence of a Photo-Generated Electron Spin in an Electrostatically-Confined Quantum Dot", 22nd Int. Conf. on Electronic Properties of Two Dimensional Systems (EP2DS-22), Pennsylvania State University, USA, July 31-Aug. 4 (2017).

14. Taketo Arika, Kyo Yoshida, Keigo Matsuda, Katsunori Yoshimatsu, "Scale similarity of the particle clustering in the inertial range of turbulence", Turbulence Colloquium at Mauna Kea (TCM2017): Recent advances in turbulence research, 98th Annual Meeting of the Pacific Division of the American Association for the Advancement of Science, Hawai'i Preparatory Academy, Waimea, Big Island, Hawai'i, 23 June (2017).

<講演:国内会議>

1. Kaito Asai and Yasuhiro Tokura, "The definition and an observation of a weak value in density matrix form", 第36回量子情報技術研究会(QIT36)、立命館大学朱雀キャンパス、京都、2017年5月29日。
2. Yasuhiro Tokura, "The coherence of a photo-generated electron spin in an electrostatically-confined quantum dot", 第7回半導体量子効果と量子情報の夏期研修会、ホテルラフォーレ修善寺、伊豆、2017年8月27日。
3. K. Ono, G. Giavaras, T. Tanamoto, T. Ohguro, X. Hu, and F. Nori, "Hole spin resonance and spin-orbit coupling in a Si MOSFET", 第7回半導体量子効果と量子情報の夏期研修会、ホテルラフォーレ修善寺、伊豆、2017年8月28日。
4. Kaito Asai, "The weak value in a mixed state represented by the square root of density matrix", 第7回半導体量子効果と量子情報の夏期研修会、ホテルラフォーレ修善寺、伊豆、2017年8月28日。
5. Akihito Takemura and Yasuhiro Tokura, "How to make the Toffoli gate by using a one-way quantum computer", poster presentation. 第7回半導体量子効果と量子情報の夏期研修会、ホテルラフォーレ修善寺、伊豆、2017年8月27日。
6. Kyohei Tsuji and Yasuhiro Tokura, "Entanglement measures", poster presentation. 第7回半導体量子効果と量子情報の夏期研修会、ホテルラフォーレ修善寺、伊豆、2017年8月27日。
7. Kyo Yoshida, "Microscopic entropy for quantum free field systems", poster presentation. 第7回半導体量子効果と量子情報の夏期研修会、ホテルラフォーレ修善寺、伊豆、2017年8月27日。
8. Shuhei Sawaguchi, "Entanglement distillation for mixed state", poster presentation. 第7回半導体量子効果と量子情報の夏期研修会、ホテルラフォーレ修善寺、伊豆、2017年8月27日。
9. Ryosuke Suzuki, Tokura Yasuhiro, Kyo Yoshida, Sumiya Kato, "Entanglement measure", poster presentation. 第7回半導体量子効果と量子情報の夏期研修会、ホテルラフォーレ修善寺、伊豆、2017年8月27日。
10. Sumiya Kato, Yasuhiro Tokura, Kyo Yoshida, Ryosuke Suzuki, "Theory of relaxation process of qubits by time-convolutionless master equation", poster presentation. 第7回半導体量子効果と量子情報の夏期研修会、ホテルラフォーレ修善寺、伊豆、2017年8月27日。

11. 吉田恭、辻義之、三浦英昭「量子流体乱流のシミュレーションにおけるスペクトル」、プラズマシミュレータシンポジウム 2017、ポスター発表、核融合科学研究所、土岐、2017 年 9 月 7 日。
12. 吉田恭、辻義之、三浦英昭「量子流体乱流の理論・実験・シミュレーション」、第 12 回名工大・核融合研共同セミナー、名古屋工業大学、名古屋、2017 年 9 月 11 日。
13. 有木健人、吉田恭、松田景吾、芳松克則「乱流慣性領域における粒子分布のスケール相似性」、日本物理学会 2017 年秋季大会、岩手大学、盛岡、2017 年 9 月 23 日。
14. 吉田恭、「量子場におけるマイクロ状態量としてのエントロピー」、第 37 回量子情報技術研究会(QIT37)、ポスター発表、埼玉大学、さいたま、2017 年 11 月 16 日。
15. 澤口修平、都倉康弘「混合状態の量子もつれの蒸留における電子スピンのコヒーレンスを取り入れた評価」、第 37 回量子情報技術研究会(QIT37)、ポスター発表、埼玉大学、さいたま、2017 年 11 月 16 日。
16. 中嶋慧、都倉康弘「量子マスター方程式による過剰エントロピー生成の解析的研究:経路依存性とBSNベクトル」、日本物理学会第 73 回年次大会、2018 年 3 月 22 日、東京理科大野田キャンパス、千葉。
17. 鈴木遼介、加藤澄也、吉田恭、都倉康弘「電流ゆらぎの量子フィードバック制御プロセス」、日本物理学会第 73 回年次大会、2018 年 3 月 23 日、東京理科大野田キャンパス、千葉。
18. 羽田野剛司、久保敏弘、天羽真一、都倉康弘、樽茶清悟「磁場中の並列結合 2 重量子ドットにおける並列及び直列電流経路の混成」、日本物理学会第 73 回年次大会、2018 年 3 月 23 日、東京理科大野田キャンパス、千葉。
19. 都倉康弘「静電閉じ込め量子ドットに生成された電子スピンのコヒーレンス」、日本物理学会第 73 回年次大会、2018 年 3 月 23 日、東京理科大野田キャンパス、千葉。
20. 澤口修平、都倉康弘「改善された混合状態のもつれの蒸留」、日本物理学会第 73 回年次大会、2018 年 3 月 23 日、東京理科大野田キャンパス、千葉。
21. 加藤澄也、鈴木涼介、吉田恭、都倉康弘「補助量子ビットによる超強結合状態の量子状態制御」、日本物理学会第 73 回年次大会、2018 年 3 月 24 日、東京理科大野田キャンパス、千葉。
22. 横浜一輝, Giorgos Giavaras, 都倉康弘「古典 Rabi モデルにおける共鳴条件」、日本物理学会第 73 回年次大会、2018 年 3 月 24 日、東京理科大野田キャンパス、千葉。
23. 佐藤洋介、松尾貞茂、上田健斗、武重有祐、鎌田大、J. S. Lee, B. Shojaei, C. Palmstrom, 都倉康弘、樽茶清悟「InAs 量子井戸に形成された 1 次元電子系の朝永 ラッティンジャー液体的性質」、日本物理学会第 73 回年次大会、2018 年 3 月 24 日、東京理科大野田キャンパス、千葉。
24. 久保敏弘、都倉康弘「Coulomb 相互作用を介した電子スピンのベリー位相の間接的な獲得」、日本物理学会第 73 回年次大会、2018 年 3 月 25 日、東京理科大野田キャンパス、千葉。
25. 吉田恭、辻義之、三浦英昭「量子流体乱流の強乱流領域におけるスペクトル」、日本物理学会第 73 回年次大会、東京理科大学、野田、2018 年 3 月 25 日。
26. 有木健人、吉田恭、芳松克則「Hessian 場に基づく passive scalar 乱流の完結近似」、日本物理学会第 73 回年次大会、東京理科大学、野田、2018 年 3 月 24 日。

<学位論文>

(修士論文) 数理物質科学研究科

1. 浅井海図

「Weak Values Defined with Mixed States and Their Behaviours (混合状態における弱値とその振る舞い)」

〈外部資金〉

1. 科学研究費 基盤研究(A) 課題番号: 26247051「量子ホールエッジチャネルの非平衡電荷ダイナミクス」(分担)平成 29 年度:直接経費:1,207 千円(平成26年度～平成30年度、研究代表者:藤澤利正)
2. 国立研究開発法人科学技術振興機構 戦略的創造研究推進事業(チーム型研究(CREST))研究領域「新たな光機能や光物性の発現・利活用を基軸とする次世代フォトニクスの基盤技術」(研究代表者:大岩顕)研究課題「電子フォトニクス融合によるポアンカレインターフェースの創製」研究題目「光子-電子スピン量子変換理論」平成 29 年度:10,000 千円(平成27年12月1日～平成32年度)

〈社会還元等〉

1. 吉田恭、GFEST 物理特別実習、2017 年 12 月 27 日。

VIII 生命物理グループ

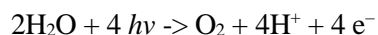
教授 重田 育照
助教 庄司 光男
助教 栢沼 愛
助教 Hessein Assadi
研究員 原田 隆平 (学術振興会特別研究員)
研究員 鬼頭 宏任 (JST PREST さきがけ)
研究員 佐藤 竜馬
研究員 Bui Thi Kieu My
研究員 Gao Xichan
学生 大学院生 4 名、学類生 2 名

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。平成 29 年度は、光合成酸素発生中心(PSII-OEC)の反応機構 (主に庄司助教)、地球外環境における有機分子の生成・分解機構の解明 (主に栢沼助教)、分子動力学シミュレーションによるナノキューブ形成機構(主に原田研究員)、三重項-三重項消滅に基づくフォトン・アップコンバージョンの理論的研究 (主に佐藤竜馬研究員)、シングレットフィッシュン過程の理論研究(主に鬼頭研究員)、ナトリウム含有遷移金属酸化物の物性解明 (主に Assadi 助教)、GaIn 表面上のアンモニア分解と窒素結合過程の第一原理解析 (主に My 研究員)、ジアリルエタン誘導体の MM および QM 計算(おもに Gao 研究員)について大きな進展があった。

【1】 光合成酸素発生中心(PSII-OEC)の反応機構

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、生命が約 3 億年かけて洗練させてきた優れた化学反応系である。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。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、量子古典混合計算法(QM/MM)を用いて、PSII-OEC の重要な反応中間体の電子状態、及び反応機構について理論解析を実施した。具体的には、酸素-酸素結合形成がなされる $\text{S}_3 \rightarrow \text{S}_0$ 過程にける、可能な反応機構を検討し、新たな O-O 結合形成反応経路を見つけた。本反応では、Mn クラスタから Yz ラジカルへの電子移動が O-O 結合形成の反応の引き金となる。これまでの機構と区別するため、Non-adiabatic one-electron transfer (NA-OET) 機構と命名して反応機構を詳細に調べた。他にも S_2 , S_3 状態での Mn_4Ca クラスタの特長的構造変化について電子状態から理論解析を行った。

また、 $S_4 \rightarrow S_0$ 過程の反応機構の解析及び、これまでの反応経路解析法を元に独自の自動経路探索法(GLAS)を考案した。今後は、GLAS 法を PSII や他の酵素系に適用し、実証と改良を行っていく予定である。GLAS は Python プログラムで実装しているので、高い拡張性が有る。その為、並列化と種々のルーチン(構造最適化)の高速化を図る。京コンピュータや OFP, COMA での実行も今後実施していきたい。

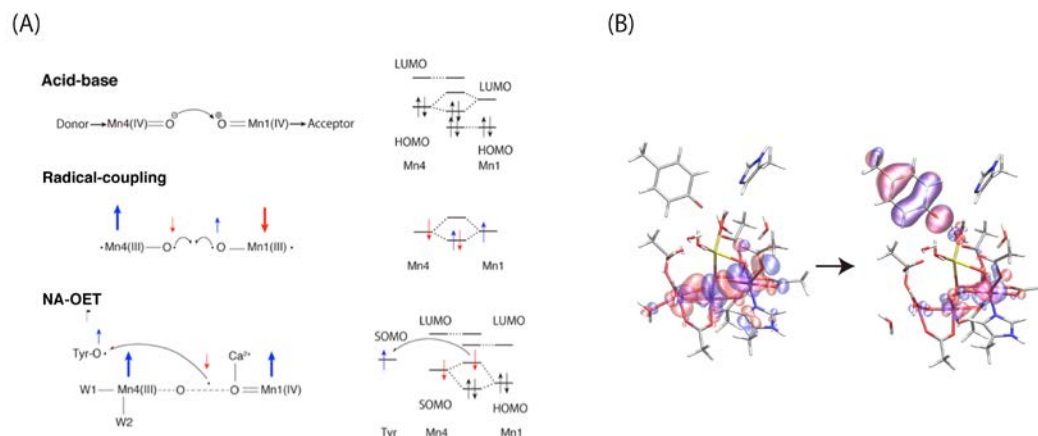


図 1. (A)PSII-OEC における 3 つの O-O 結合形成経路

(B)NA-OET 機構における β 電子の移動 (遷移状態近傍での β HOMO の変化)

【2】 地球外環境における有機分子の生成・分解機構の解明 (栢沼)

(1) ヒダントインを経由するグリシン生成機構の解明

宇宙空間におけるアミノ酸生成機構として、アミノアセトニトリルから Bücherer-Bergs 反応によりヒダントインが生成し、ヒダントインが加水分解されてグリシンが生成する経路 (図 1) を、密度汎関数法 (DFT、Density Functional Theory) により解析した。触媒



図 2-1. アミノアセトニトリルからヒダントインを経てグリシンが形成する反応機構

となる水分子を 2 個考慮した場合、最大反応障壁は 160 kJ/mol 減少したことから、本反応において触媒となる水分子を考慮することが重要であることが示された。しかし、反応障壁は依然として高く、この反応は低温の星間空間では起こらず、隕石中など高温環境で起こると考えられる。

(2) メタノールの光解離反応機構の解明

星間空間において重要な有機分子の一つであるメタノールの光解離反応の機構を明らかにするため、時間依存 DFT (TD-DFT) を用いて、ポテンシャルエネルギー曲面の解析および励起状態ダイナミクスシミュレーションを行った。先行研究において、気相中における vacuum ultraviolet (UVU) 照射によるメタノールの光解離反応で水素原子が解離する場合 (図 2)、C-H 結合より O-H 結合の方が解離しやすいと報告されていることから、この 2 つの反

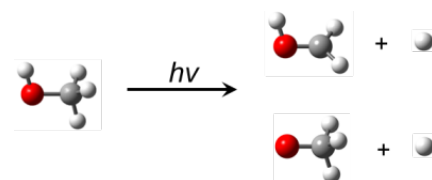


図 2-2. 光照射によるメタノールからの水素原子の解離反応

応経路に注目して解析を行った。その結果、第一励起状態が重要であることが示唆された。

【3】 分子動力学シミュレーションによるナノキューブ形成機構

生体分子に限らず有機分子も自己集合により凝集し、機能を有する分子集合体を形成する。自己集合過程において、単量体間の様々な相互作用を介して多量体を形成するそのメカニズムを解明することは、将来における機能性分子設計の貴重な設計指針となる。本年度は、有機分子が自己集合により形成する6量体の複合体構造であるナノキューブ(1₆)に着目し、その形成機構を分子動力学(MD)シミュレーションにより解析し

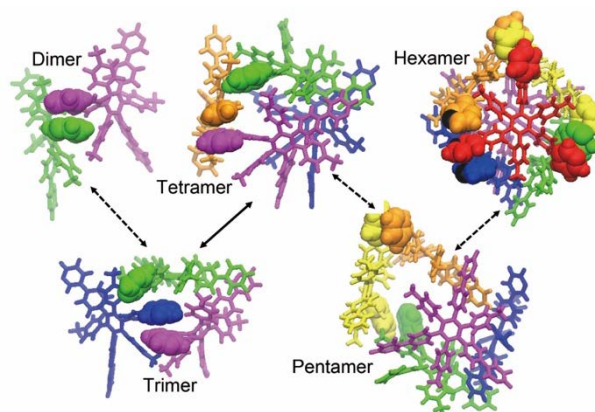


図3 ナノキューブ(1₆)の解離過程

た。計算科学的な問題として、ナノキューブが形成される時間スケールはMDシミュレーションで追跡可能な時間スケールとして遥に長時間スケールであり、通常のMDシミュレーションでは抽出することが極めて困難である。また、その形成機構は確率的であるため不確定性が常に伴うレアイベントであり、長時間のMDシミュレーションが実現したとしても、確実に抽出することが出来る保証がない。そこで、ナノキューブ形成機構を抽出するために、本来、生体分子の機能発現に関係する長時間の構造変化を抽出するために開発した構造探索法である Structural dissimilarity sampling (SDS)を有機分子の自己集合過程に適用した。SDSは、お互いに構造類似性が低い初期構造を選択し、短時間のMDシミュレーションで構造探索を繰り返していくことで可能な限り重複を避けた効率的な構造探索を実現し、生体分子のレアイベントを抽出する目的で開発された。本研究では、ナノキューブ(6量体)を初期構造とし、探索構造を多次元空間における高次元ベクトルとみなし、探索構造間の内積を定義することで構造類似性を表現した。具体的には、探索構造間の内積が小さい初期構造を選択し直し、短時間MDシミュレーションをリスタートしていくことで、ナノキューブ構造を逐次的に解離させることに成功した。具体的には、サイクルあたり25個の初期構造を探索構造間の内積を参照にして選択し、初期構造あたり100psの短時間MDシミュレーションをリスタートさせることで構造探索を繰り返した。

図3にSDSを適用することで得られたナノキューブの解離過程を示す。中間体状態として、5量体、4量体、3量体、2量体構造が存在し、各々の中間体構造において芳香族環のスタッキングやメチル基間の疎水性相互作用を介して準安定状態として安定的に存在していることが明らかになった。今後は、本研究により得られた詳細な解離機構の知見を機能性有機分子設計へ応用していく予定である。

【4】 三重項-三重項消滅に基づくフォトン・アップコンバージョンの理論的研究

低エネルギーの光を高エネルギーの光に変換する技術としてフォトン・アップコンバージョン(UC)が知られている。近年、三重項-三重項消滅(TTA)を利用したUCに注目が集まっている。現在、太陽光を利用した技術は多く開発されているがそれらの技術は太陽光に多く含まれている赤外・近赤外領域の光を利用できていない。そこでTTA-UCを用いて赤外・近赤外領域の光を可視・紫外領域の光へ変換することでこれまで以上の反応効率を実現できると期待されている。

本年度は、溶液系における9,10-ジフェニルアントラセン(DPA)およびその誘導体(C_n-sDPAs)に対して分子動力学(MD)計算および量子化学計算を用いてその反応機構を調べた。TTAは二つの三重項状態の分子が接近した際にそれぞれの分子から電子が移動することで反応が進行する。本研究では、それぞれの分子の二量体モデルに対してフラグメント分子軌道(FMO)法および

FMO-linear combination of molecular orbitals (FMO-LCMO) 法を用いて電子の移動速度を算出した (図 4)。その結果、従来用いられている DPA よりも新たに提案された Cn-sDPAs のほうが電子移動時間が短いことがわかった。特に分子間距離が離れていてもある程度短い時間で電子が移動できることを示しており、この結果は反応効率の上昇を示唆している。また接近する際の分子配向の依存性についても DPA に比べて Cn-sDPAs は広い範囲で電子移動時間が短いこともわかった。実際、実験によって C7-sDPA が DPA よりも反応効率が高いことが報告されている。

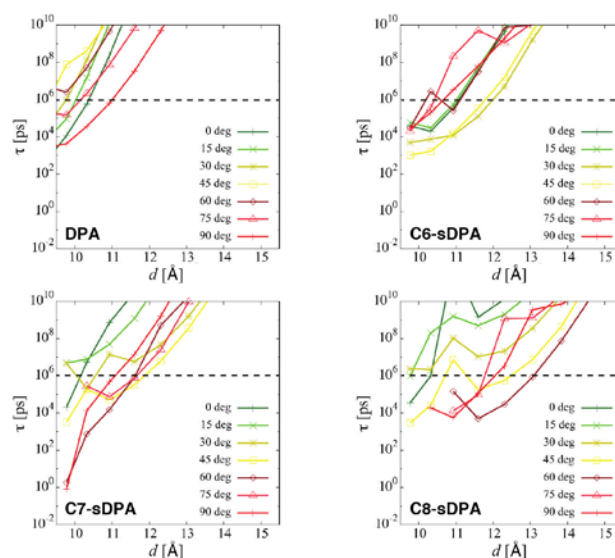


図 4. DPA および Cn-sDPAs の TTA における電子移動時間

今後は溶液系では実用化することが困難であることから固体系の適用が考えられており、固体系における反応機構の解析および高効率を実現できる新たな誘導体を提案する予定である。

【5】 シングレットフィッシュン過程の理論研究

シングレットフィッシュン(SF)とは、一重項励起子が2つの三重項励起子に分裂する現象で、アセン分子結晶で観測される。この現象を利用すると、単一接合太陽電池の持つ約 34%の太陽エネルギー利用効率限界を、最大で約 46%まで改善する可能性が理論的に示されている。そこで、より良いエネルギー変換効率を持つ太陽電池を分子スケールで設計するためには、SF の微視的メカニズムを理解することが重要になる。

本研究では、SF 反応速度の測定値と分子結晶構造データが存在する、9 種類のテトラセン/ペンタセンアトラセン誘導体の分子結晶中の SF 反応に対して、準透熱波動関数に基づくモデルハミルトニアンを構築し、その微視的メカニズムを第一原理的に調べた。代表的な透熱基底変換法として Nakamura & Truhlar の”fourfold-way”法があるが、今回新たに ORMAS-CI 計算を利用した、より計算コストの低い透熱基底変換法を提案し、両者を比較・検討した。

まず、電荷移動励起状態(CT)をヴァーチャルに介した超交換機構によって生成される、局在一重項励起状態(FE)ともつれ合った三重項励起状態(TT)の間の電子的相互作用(SF 相互作用)を、完全活性空間(CAS)-SCF レベルで計算した。その結果、SF 相互作用の計算値は、SF 反応速度の実験値の傾向を再現した。また、適用した二種類の透熱基底変換法は、ほぼ同様の結果を生み出した。次に、動的電子相関の影響を調べるために、擬縮退摂動理論(XMCQDPT2)レベルで SF 相互作用を計算し

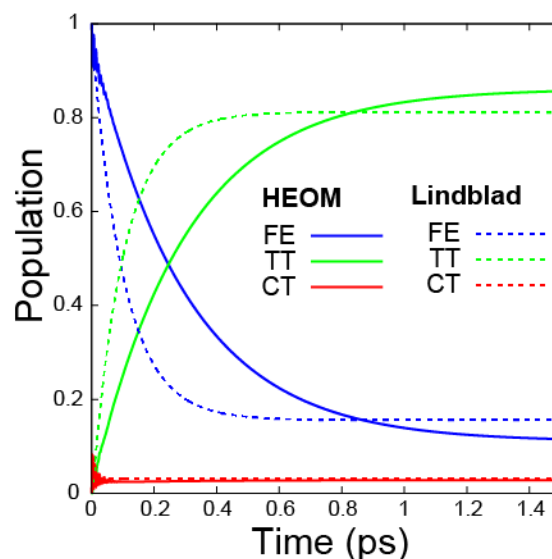


図 5. 量子マスター方程式を用いたペンタセン 2 量体 SF の Population ダイナミクス

ス。代表的な透熱基底変換法として Nakamura & Truhlar の”fourfold-way”法があるが、今回新たに ORMAS-CI 計算を利用した、より計算コストの低い透熱基底変換法を提案し、両者を比較・検討した。

た。XMCQDPT2 は、CASSCF が CT 状態のエネルギーレベルを過少評価した場合に、結果を大きく改善することが分かった。

最後に構築したモデルハミルトニアンに量子マスター方程式を適用して、量子散逸効果を考慮した電子状態ダイナミクスシミュレーションを実行した。図 5 は、ペンタセン二量体に対して、マルコフ近似を用いた Lindblad マスター方程式と、非マルコフ効果を考慮した階層方程式(HEOM)を用いた計算結果である。CT 状態をヴァーチャルに使うため、CT 状態に Population を持たず、FE/TT の Population が単一指数関数的に減少/増大する。また図 5 から、マルコフ近似を用いた Lindblad マスター方程式が、HEOM による SF 速度の見積もり約 2.5ps^{-1} を、 6.7ps^{-1} と過大評価することとも分かる。

【6】 ナトリウム含有遷移金属酸化物の物性解析

電気自動車による長距離移動や、再生可能エネルギー源のメガワット貯蔵などの技術確立するためには、高性能なバッテリーが必要となる。従来の Li イオン電荷キャリアに関しては、リチウム資源が希少かつ地球全体に不均一に分布することから、将来的に厳しい制約を受けることが考えられる。一方、Li の代替として Na イオンを用いることも有望であるが、多くの課題が山積している。例えば、Na は Li に比べてイオン半径が大きくイオン化ポテンシャルが小さいため、Na 系陰極ではエネルギー密度が低下する。したがって、Na イオンベースの陰極を Li レベルにするには、あらゆる性能向上メカニズムについて注意深く調整する必要がある。

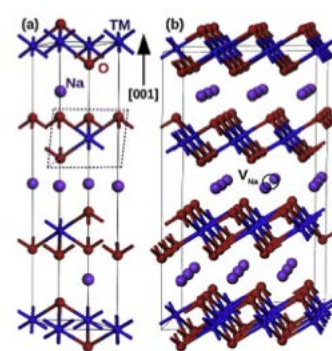


図 6. NaTMO₃ の結晶構造

本研究では、右図の構造を持つ第 4 周期から第 5 周期の遷移金属(TM)を含むナトリウム含有遷移金属酸化物 (NaTMO₃) の密度汎関数計算法によるバンド計算を行い、酸化状態と還元状態のエネルギー差から電極電位を評価した。計算結果より、測定結果のある会に関してはその実測値をよく再現していることを示した。また、TM-O 結合のイオン性よりもむしろ、酸化に伴う TM 周りの酸素配位の歪みとそれに付随する磁気的な交換相互作用が、陰極電位を支配していることを明らかにした。本研究を通じて、従来のイオン化ポテンシャルに基づく物質設計指針に代わる、遷移金属の電子配置とその変化に基づく設計指針を提案した。

【7】 First-principle study of ammonia decomposition and nitrogen incorporation on the GaN surface in Metal Organic Vapor Phase Epitaxy

We study first-principle total-energy electronic-structure calculations that clarify reaction pathways and corresponding energy barriers for the decomposition of NH₃ and the subsequent N incorporation on the growing GaN surface in Metal Organic Vapor Phase Epitaxy (MOVPE). On the contrary to a prevailed picture in the past, we find that the reaction is catalyzed by the presence of the surface. All the calculations have been performed in the density-functional theory with the generalized gradient approximation. We utilize our own code named RSDFT. Reaction pathways and corresponding energy barriers are calculated with the hyper-plane constraint method. After identifying growing surface which is Ga rich in general, we have determined adsorbed structure of NH₃ on the Ga rich surface. On the Ga-rich surface, relatively weak Ga-Ga bonds exist. We have indeed found that the reaction, [NH₃ on GaN] → [NH in GaN] + [H₂ in gas phase],

takes place with the energy barrier of 0.48 eV. After this reaction, N in NH₃ intervenes in the weak Ga-Ga back bond, forming the network of –Ga adatom – N(H) – Ga –. Then we have explored the possible reaction when this configuration is formed at the same Ga-adatom site. We have found a reaction pathway in which two H atoms in the two NH unit get together and desorbed in the gas phase and the remaining N atoms form Ga-N bonds. One of the two N atoms even becomes 4-fold coordinated with neighboring Ga atoms, thus forming a new basic unit constituting the GaN film. The energy barrier for the reaction is found to be lower than 1.5 eV at zero temperature. Evaluating the hydrogen chemical potential at 1300 K in gas phase, we have found that the whole reaction of the formation of GaN unit and the H₂ desorption is highly plausible in GaN MOVPE.

【8】 MM and QM study of photoswitchable molecules, diarylethene derivatives

Recently, molecular photoswitches have attracted enormous attention due to their potential applications in modulating physical and chemical properties of materials upon photoirradiation. Among various photoswitchable molecules, the diarylethene derivatives got special interests, which are capable to be applied in the future optoelectronic devices, such as high capacity optical memories and ultrafast switches. To reveal the properties and the photoinduced transformation mechanism of the diarylethene derivatives, many experiments have been done, however, there is still a long way to achieve this goal. Computer simulations are complementary to experiments. They can provide invaluable insights and give more mechanistic details that cannot be gained by experiments alone. Herein, I concentrate my research on learning the photoinduced reversible morphological transformation of diarylethene derivative through MM and QM methods.

I utilized AMBER99 force field to study the structures and properties of the bilayer system composed of diarylethene derivatives. The calculations were carried out by using AMBER and GROMACS molecular modeling packages. The simulation can get the bilayer structure through AMBER99 force field, the results can be used to do qualitative analysis. It showed that hydrogen bonding and stacking interactions play an important effort in bilayer system, however, due to AMBER99 force field underestimated the stacking interactions, there is an error in thickness bilayer between the calculated result and the experimental value.

Recently, many research about the photochromic mechanism of diarylethene have been done, however, there was some debate about the genuine reaction pathway of photocyclization and photoreversion. One view is that the reaction pathway is completed via the excited S₁ state after the photoirradiation. Another point of view, the reaction path is through the S₁ state to S₂ state and finally returned to S₀ state. I want to find the pathway that occupies a higher possibility. Firstly, I need to find the conical intersections between two excited states. Secondly, I will calculate the reaction energy barriers in different reaction pathway to explain which path occupies a higher possibility.

〈研究論文〉

査読付き論文

1. R. Harada, Y. Shigeta, "Self-Avoiding Conformational Sampling (SACS) Based on Histories of Past Conformational Searches", *Journal of Chemical Information and Modeling* **57**, 3070-3078 (2017). DOI: 10.1021/acs.jcim.7b00573.

2. M. Hada, S. Saito, S. Tanaka, R. Sato, M. Yoshimura, K. Mouri, K. Matsuo, M. Hara, Y. Hayashi, Y. Shigeta, S. Yamaguchi, K. Onda, R. J. D. Miller, "Structural monitoring of the onset of excited-state aromaticity in a liquid crystal phase", *Journal of the American Chemical Society* **139**, 15792–15800 (2017). DOI: 10.1021/jacs.7b08021
3. Y. Sasano, R. Sato, Y. Shigeta, N. Yasuda, H. Maeda, "H-aggregated π -systems based on disulfide-linked dimers of dipyrrolyldiketone boron complexes", *The Journal of Organic Chemistry* **82**, 11166–11172 (2017). DOI: 10.1021/acs.joc.7b02185
4. M. Kayanuma, K. Kidachi, M. Shoji, Y. Komatsu, A. Sato, Y. Shigeta, Y. Aikawa, M. Umemura, "A theoretical study of the formation of glycine via hydantoin intermediate in outer space environment", *Chemical Physics Letters* **687**, 178-183 (2017). DOI: 10.1016/j.cplett.2017.09.016
5. T. Matsui, Y. Shigeta, K. Morihashi, "Assessment of Methodology and Chemical Group Dependences in the calculation of the pK_a Value and Gibbs Energy of a Proton", *Journal of Chemical Theory and Computation* **13**, 4791-4803 (2017). DOI: 10.1021/acs.jctc.7b00587
6. H. Konishi, M. Matsubara, K. Mori, T. Tokiwa, S. Arulmozhiraja, Y. Yamamoto, Y. Ishikawa, H. Hashimoto, Y. Shigeta, H. Tokiwa, K. Manabe, "Controlling CO Generation: Mechanistic Insight into Weak-Base-Catalyzed Generation of Carbon Monoxide from Phenyl Formate and Its Application to Catalytic External-CO-Free Carbonylation at Room Temperature", *Advanced Synthesis & Catalysis*, **359**, 3592-3601 (2017). DOI: 10.1002/adsc.201700751
7. R. Harada, Y. Shigeta, "An Assessment of Optimal Time Scale of Conformational Resampling in Parallel Cascade Molecular Dynamics", *Molecular Simulation* **44**, 206-212 (2017). DOI: 10.1080/08927022.2017.1362696
8. R. Harada, Y. Shigeta, "Dynamic Specification of Initial Structures in Parallel Cascade Selection Molecular Dynamics (PaCS-MD) Efficiently Promotes Biologically Relevant Rare Events", *Bulletin of the Chemical Society of Japan*, **90**, 1236-1243 (2017). DOI: 10.1246/bcsj.20170177
9. R. Harada, Y. Shigeta, "Temperature-shuffled parallel cascade selection molecular dynamics accelerates the structural transitions of proteins", *Journal of Computational Chemistry (Rapid Communication)* **38**, 2671–2674 (2017). DOI: 10.1002/jcc.25060
10. H. Yotsuji, K. Higashiguchi, R. Sato, Y. Shigeta, K. Matsuda, "Phototransformative Supramolecular Assembly of Amphiphilic Diarylethenes Realized by the Combination of Photochromism and Lower Critical Solution Temperature Behavior", *Chemistry - A European Journal*, **23**, 15059-15066 (2017). DOI: 10.1002/chem.201702202.
11. R. Harada, Y. Shigeta, "Structural Dissimilarity Sampling with Dynamically Self-Guiding Selection", *Journal of Computational Chemistry* **38**, 1921-1929 (2017). DOI: 10.1002/jcc.24837
12. Y. Shigeta, R. Harada, R. Sato, H. Kitoh-Nishioka, T. K. M. Bui, A. Sato, A. Kyan, Y. Ishii, M. Kimatsuka, S. Yamasaki, M. Kayanuma, M. Shoji, "Classical Cumulant Dynamics for Statistical Chemical Physics", *Molecular Simulation* **43** (13-16), 1260-1268 (2017). DOI: 10.1080/08927022.2017.1315770
13. Y. Kitagawa, M. Asaoka, Y. Natori, K. Miyagi, R. Teramoto, T. Matsui, Y. Shigeta, M. Okumura, M. Nakano, "Theoretical study on relationship between spin structure and electron conductivity of one-dimensional tri-nickel (II) complex", *Polyhedron* **136**, 125-131 (2017). DOI: 10.1016/j.poly.2017.02.020
14. Y. Ujiie, W. Tanaka, K. Hanaoka, R. Harada, M. Kayanuma, M. Shoji, T. Murakawa, T. Ishida, Y. Shigeta, H. Hayashi, "Molecular Mechanism of the Reaction Specificity in Threonine Synthase: Importance of the Substrate Conformations", *Journal of Physical Chemistry B* **121**, 5536-5543 (2017). DOI: 10.1021/acs.jpcc.7b02932
15. J. Fujita, R. Harada, Y. Maeda, Y. Saito, E. Mizohata, T. Inoue, Y. Shigeta, H. Matsumura, "Identification of the key interactions in structural transition pathway of FtsZ from *Staphylococcus aureus*", *Journal of Structural Biology* **198**, 65-73 (2017). DOI: 10.1016/j.jsb.2017.04.008
16. Y. Kobayashi, H. Okajima, H. Sotome, T. Yanai, K. Mutoh, Y. Yoneda, Y. Shigeta, A. Sakamoto, H. Miyasaka, J. Abe, "Direct Observation of the Ultrafast Evolution of Open-Shell Biradical in Photochromic Radical Dimer", *Journal of the American Chemical Society* **139**, 6382-6389 (2017). DOI: 10.1021/jacs.7b01598
17. R. Sato, H. Kitoh-Nishioka, T. Yanai, Y. Shigeta, "Theoretical Analyses on Triplet-triplet Annihilation Process of 9,10-diphenylanthracene in Solution", *Chemistry Letters* **46**, 873-875 (2017). DOI: 10.1246/cl.170161

18. R. Harada, Y. Shigeta, "How does the number of initial structures affect the conformational sampling efficiency and quality in Parallel Cascade Selection Molecular Dynamics (PaCS-MD)?", *Chemistry Letters* **46**, 862-865 (2017). DOI: 10.1246/cl.170207
19. R. Harada, Y. Shigeta, "Efficient conformational search based on Structural Dissimilarity Sampling: Applications to reproductions of structural transitions on Maltodextrin Binding Protein", *Journal of Chemical Theory and Computation* **13**, 1411-1423 (2017). DOI: 10.1021/acs.jctc.6b01112
20. R. Yamakado, Y. Ashida, R. Sato, Y. Shigeta, N. Yasuda, H. Maeda, "Cooperatively Interlocked [2+1]-Type π -System-Anion Complexes", *Chemistry A European Journal*, **23**, 4160-4168 (2017). DOI: 10.1002/chem.201605765
21. R. Harada, Y. Takano, Y. Shigeta, "Common folding processes of mini proteins: Partial formations of secondary structures initiate the immediate protein folding", *Journal of Computational Chemistry* **38 (Front Cover)**, 790-797 (2017). DOI: 10.1002/jcc.24748
22. M. Shoji, H. Isobe, T. Nakajima, Y. Shigeta, M. Suga, F. Akita, J.-R. Shen, K. Yamaguchi, "Large-scale QM/MM calculations of the CaMn_4O_5 cluster in the S_3 state of the oxygen evolving complex of photosystem II. Comparison between water-inserted and no water-inserted structures", *Faraday Discussions* **198**, 83-106 (2017). DOI: 10.1039/C6FD000230G
23. Y. Abe, M. Shoji, Y. Nishiyama, H. Aiba, T. Kishimoto, K. Kitaura, "Reaction mechanism of sarcosine oxidase elucidated using FMO and QM/MM methods", *Physical Chemistry Chemical Physics* **19**, 9811-9822 (2017), DOI: 10.1039/C6CP08172J.
24. H. Kitoh-Nishioka, K. Welke, Y. Nishimoto, D. G. Fedorov, S. Irle "Multiscale Simulations on Charge Transport in Covalent Organic Frameworks Including Dynamics of Transfer Integrals from FMO-DFTB/LCMO", *The Journal of Physical Chemistry C*, **121**, 17712-17726 (2017).
25. A. Sato, Y. Kitazawa, T. Ochi, M. Shoji, Y. Komatsu, M. Kayanuma, Y. Aikawa, M. Umemura, Y. Shigeta, "First-principle study of the formation of glycine-producing radicals from common interstellar species", *Mol. Astrophys.*, **10**, 11-19 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.molap.2018.01.002>
26. R. Sato, H. Kitoh-Nishioka, K. Kamada, T. Mizokuro, K. Kobayashi, Y. Shigeta. "Does Inactive Alkyl Chain Enhance Triplet-Triplet- Annihilation of 9,10-Diohenylanthracene Derivatives" *J. Phys. Chem. C*, **122**, 5334-5340 (2018).
27. R. Sato, R. Harada, Y. Shigeta. "The binding structure and affinity of photodamaged duplex DNA with members of the photolyase/cryptochrome family: A computational study", *Biophys and Physicobiol.*, **15**, 18-27 (2018).
28. R. Harada, Y. Shigeta, "Analyses on Dynamic Ordering of Protein Functions by means of Cascade Selection Molecular Dynamics", *Journal of Computer Chemistry Japan*, **17** 45-46 (2018).
29. R. Harada, Y. Shigeta, "An assessment of optimal time scale of conformational resampling for parallel cascade selection molecular dynamics, *Molecular Simulation*, **44**(3) 206-212 (2018).
30. M H N Assadi, Y Shigeta "Dominant role of orbital splitting in determining cathode potential in O_3 NaTMO_2 compounds" *Journal of Power Sources*, **388**, 1-4 (2018).

査読無し論文

1. Y. Imai, T. Yamamoto, Y. Okano, R. Sato, Y. Shigeta, "Molecular Dynamics Simulation of the Nano-scale Solutal Marangoni Convection", *Asean Journal of Chemical Engineering* **17**, 29-36 (2017).

<卒業研究発表>

1. 石川航平、Cytochrome *c* dimer の構造安定性と物性に関する理論的研究
2. 佐藤雄太、束縛条件下での構造最適化

<修士修了研究発表>

1. 喜屋武茜、テルペンの生成機構の理論研究：ワインラクトン生成の立体選択性

<学位論文>

1. 佐藤皓允、First-Principle Studies on the Origin of Amino Acid Chirality in Interstellar Space

<会議発表>

国際学会招待講演

1. Y. Shigeta, "Theoretical Analyses on Triplet-triplet Annihilation Processes of 9,10- diphenylanthracene and derivatives in solution", 8th *Asia-Pacific Conference of Theoretical and Computational Chemistry (APCTCC 8)*, Dec. 15th-17th 2017, Mumbai, India.
2. Y. Shigeta, "An Enhanced Sampling Method for Searching Conformational Changes of Proteins and Supramolecules", 22nd *International Workshop on Quantum Systems in Chemistry, Physics and Biology (QSCP-XXII)*, Oct.16th-24th 2017 Hunan Province, P.R. China.
3. Y. Shigeta, "Triplet-triplet Annihilation Processes of 9,10-diphenylanthracene and derivatives in solution", *The 9th Conference of the Asian Consortium on Computational Materials Science*, Aug. 8th-11th 2017, Kuala Lumpur, Malaysia.
4. Y. Shigeta, "Simple conformational search methods for understanding biological functions", 10th *China-Japan Joint Symposium on Functional Supramolecular Architecture*, May 14th-17th 2017, Wuhan, China.
5. M. Kayanuma, M. Shoji, Y. Shigeta, "QM/MM Studies of the Reaction Mechanisms of Metalloenzymes", *International Congress on Pure & Applied Chemistry 2018 (ICPAC2018)*, Mar. 7th-10th 2018, Siem Reap, Cambodia.

一般講演

1. Y. Shigeta, K. Okuno, R. Kishi, M. Nakano, "Theoretical Studies on Nonlinear Optical and Solvatochromism Switches of Diarylethenes" (**Oral**), 12th Phenics International Network Symposium, University of Strasbourg, Strasbourg, France.
2. M. Shoji, Y. Kitazawa, A. Sato, Y. Shigeta, M. Umemura, "A quantum chemical study of the glycine formation reactions in interstellar medium" (**Oral**), *AstroBiology Center international workshop*, Mar. 21st-23rd 2017, Hiroshima University, Hiroshima, Japan.
3. M. Kayanuma, M. Shoji, Y. Aikawa, M. Umemura, Y. Shigeta, "Theoretical study on the photodissociation of methanol in the interstellar medium", *The 28th International Conference on Photochemistry (ICP2017)*, Strasbourg (France), 2017. 7., Poster.
4. Kieu My Bui, Junichi Iwata, Atsushi Oshiyama, Yasuteru Shigeta; "First principle Analyses of ammonia adsorption and desorption on GaN surface", *The 20th Asian workshop on First-Principles Electronic Structure Calculations*, October 30 – November 1; Nanjing, China.
5. R. Sato, H. Kitoh-Nishioka, Y. Shigeta, "Theoretical Analyses on Triplet-triplet Annihilation Processes of 9,10-diphenylanthracene and derivatives in solution" (**Oral**), 28th *International Conference on Photochemistry*, July 16th-21st, Strasbourg Convention + Exhibition Centre, Strasbourg, France.

国内学会・研究会発表

招待講演

1. Y. Shigeta, "Computational Studies on Tautomerism in Protein Environment ", 第55回生物物理学会シンポジウム「タンパク質科学におけるケトエノール異性」、September 19th-21st 2017、熊本大学黒髭キャンパス、熊本.
2. 庄司光男、"星間空間におけるアミノ酸生成と光不斉化についての量子化学的探究"、天体形成論 ~ 過去・現在・未来~, Sep. 21st 2017, 筑波大学大学会館、つくば.
3. M. Shoji, S. Yamasaki, M. Kayanuma, Y. Shigeta, "Reaction mechanisms of iron-containing proteins elucidated using QM/MM calculations", *The 55th annual meeting of the biophysical Society of Japan*, Sep. 19th 2017, Kumamoto Univ., Kumamoto, Japan.
4. 原田隆平, "生物学的レアイベントを効率的に再現・予測する構造サンプリング手法の開発", 物性研究所スパソコン共同利用 CCMS 合同研究会「計算物質科学の今と未来」 Apr. 4th 2017, 東京大学, Kashiwa, Japan.
5. 原田隆平, "生物学的レアイベントを再現/予測する効率的構造サンプリング手法の開発", 新学術領域「柔らかな分子系」ワークショップ「若手研究者が描く分子理論の未来」 Sep. 14th 2017, 東北大学, Sendai, Japan.
6. 原田隆平, "生物学的レアイベントを再現/予測する効率的構造サンプリング手法の開発", 第3回近電セミナー, Dec. 13th 2017, 電気通信大, Fuchu, Japan.

7. 原田隆平, “タンパク質の機能発現を解明する分子混雑シミュレーション手法およびカスケード型超並列シミュレーション手法の開発”, 第98回日本化学会春季大会 第67回日本化学会 進歩賞 受賞講演, 2018年3月20日(招待講演).
8. 原田隆平, “生体分子シミュレーションによる機能解析と計算生体分子医科学への展開”, 筑波大学計算科学研究センター 計算メディカルサイエンス キックオフシンポジウム 2018年2月26日, 筑波大学計算科学研究センター (招待講演).

その他の発表

1. Y. Shigeta, "Simple conformational search methods for understanding biological functions: Application to conformational changes of GDP bound SaFitZ" (**Poster**), *Swedish-Japanese Workshop on Nano-Structure Science by Novel Light Sources*, Oct. 2nd-3rd Lund University, Lund, Sweden.
2. Bui Thi Kieu My, Y. Shigeta, J. Iwata, A. Oshiyama, “RSDFTによるGa_N表面反応解析、およびRSCPM_DのGPU実装” (**Oral**), 第2回 CDMSI (ポスト「京」重点課題 (7)) 研究会, July 11th-12th 2017, 東京大学, Tokyo, Japan.
3. Y. Shigeta, "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" (**Oral, Poster**), 新学術領域研究「高次複合光応答」第2回領域会議, May 19th-20th 2017, 大阪大学, Toyonaka, Japan.
4. Y. Shigeta, "実空間密度汎関数法に基づくCar-Parrinello分子動力学法のGPGPU実装" (**Poster**), 物性研究所スパコン共同利用・CCMS合同研究会「計算物質科学の今と未来」, Apr. 3rd-4th 2017, 東京大学, Kashiwa, Japan.
5. Y. Shigeta, "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" (**Oral, Poster**), 新学術領域研究「高次複合光応答」第5回公開シンポジウム, Jan. 20th-21st 2017, 大阪大学, Toyonaka, Japan.
6. 庄司光男、村川武志、岡島俊英、重田育照、”銅含有アミン酸化酵素における触媒反応中のプロトン化状態についての理論的解明” (**Poster**), 第17回日本蛋白質科学会年会, Jun. 22nd 2017, 仙台国際センター, 仙台.
7. M. Shoji, H. Isobe, Y. Shigeta, T. Nakajima, J.-R. Shen, K. Yamaguchi, "Large-scale QM/MM study on the S1 state structures of the oxygen-evolving complex in photosystem II" (**Poster**), *The 67th Japan Society of Coordination Chemistry Symposium*, Sep. 18th 2017, Sapporo Hokkaido, Japan.
8. M. Shoji, H. Isobe, Y. Shigeta, T. Nakajima, K. Yamaguchi, "QM/MM study on the O₂ release mechanism of the oxygen-evolving complex in photosystem II" (**Oral**), *The 55th annual meeting of the biophysical Society of Japan*, Sep. 20th 2017, Kumamoto Univ., Kumamoto, Japan.
9. M. Shoji, H. Isobe, Y. Shigeta, T. Nakajima, K. Yamaguchi, "QM/MM study on a S₄ -> S₀ reaction of the Oxygen Evolving Complex in Photosystem II" (**Poster**), *Car-Parrinello Molecular Dynamics in 2017*, Oct. 19th 2017, Tsukuba International Congress Center, Tsukuba, Japan.
10. M. Kayanuma, M. Shoji, Y. Aikawa, M. Umemura, Y. Shigeta, "Surface Hopping Simulation on the Photodissociation of Methanol" (**Poster**), CPMD2017 Workshop, 2017. 10., Tsukuba (Japan),
11. M. Kayanuma, M. Shoji, Y. Aikawa, M. Umemura, Y. Shigeta, "Theoretical study on the photodissociation of methanol in the interstellar medium" (**Poster**), *28th International Conference on Photochemistry*, July 16th-21st, Strasbourg Convention + Exhibition Centre, Strasbourg, France.
12. 原田隆平, 重田育照, "生物学的レイアイイベントを再現/予測するタンパク質構造サンプリング手法の開発" (**Poster**), 第17回日本蛋白質科学会年会, Jun. 22nd 2017, 仙台国際センター, Sendai, Japan.
13. 佐藤竜馬、重田育照, "Theoretical Analyses on Triplet-Triplet Annihilation Based Photon Upconversion Mechanism for Solution and Crystal States" (**Poster**), 第5回分子システム科学国際シンポジウム, Dec. 5th-6th 2017, 九州大学, Fukuoka, Japan.
14. 佐藤竜馬、原田隆平、重田育照, "光回復酵素と DASH 型クリプトクロムにおける紫外線損傷二本鎖 DNA の結合に寄与する因子の特定" (**Oral**), 第55回日本生物物理学会年会, Sep. 19th-21st 2017, 熊本大学, Kumamoto, Japan.
15. 佐藤竜馬、鬼頭-西岡宏任、鎌田賢司、柳井 毅、重田育照, "三重項-三重項消光によるフォトン・アップコンバージョンの高効率化に向けた反応機構の理論的解析" (**Oral**), 第11回分子科学討論会, Sep. 15th-18th 2017, 東北大学, Sendai, Japan.
16. 佐藤竜馬、重田育照, "9,10-ジフェニルアントラセン誘導体の三重項-三重項消滅に基づくフォトン・アップコンバージョンに関する理論的研究" (**Poster**), 第3回「高次複合光応答」若手の会, Sep. 11th-12th, 晴海グランドホテル, Tokyo, Japan.
17. 佐藤竜馬、鬼頭-西岡宏任、鎌田賢司、溝黒登志子、柳井 毅、小林健二、重田育照, "9,10-ジフェニルアントラセン誘導体の三重項-三重項消光アップコンバージョン過程に対する理論的研究" (**Oral**), 2017年光化学討論会, Sep. 4th-6th 2017, 東北大学, Sendai, Japan.
18. 佐藤竜馬、重田育照, 「三重項-三重項消滅に基づくフォトン・アップコンバージョン機構の理論的解析」 (**Oral, Poster**), 新学術領域研究「高次複合光応答分子システムの開拓と学理の構築」第2回領域会議・第6回若手セミナー, May 19th-20th 2017, 大阪大学, Toyonaka, Japan.

19. Kieu My Bui, Junichi Iwata, Atsushi Oshiyama, Yasuteru Shigeta; "First-principles analysis of ammonia adsorption and desorption on GaN surface"(**Poster**), *The 20th Asian workshop on First-Principles Electronic Structure Calculations*, Oct. 30th – Nov. 1st, Nanjing, China.
20. Kieu My Bui, Junichi Iwata, Atsushi Oshiyama, Yasuteru Shigeta; "First-principles analysis of ammonia adsorption and desorption on GaN surface"(**Poster**), *The 3rd CDMSI Symposium: Creation of new functional Devices and high-performance Materials to Support next-generation Industries (CDMSI)*, Dec. 5th-6th, 2017, Tokyo, Japan.
21. 鬼頭宏任, "生体系と有機半導体における電荷移動現象の量子化学計算とシミュレーション", 神戸大学大学院システム情報学研究科セミナー, Dec. 27th 2017, 神戸大学.
22. 鬼頭宏任, "シングレットフィッションの理論解析手法の開発"(**Oral**), 第一回プレ戦略研究会「次世代物質・デバイス戦略開発拠点」, Dec. 11th 2017, 筑波大学.
23. 鬼頭(西岡)宏任, 佐藤竜馬, 重田育照, "CASSCF法を用いた一重項励起子分裂の電子相互作用計算"(**Oral**), 第11回分子科学討論会, Sep. 15th-18th 2017, 東北大学 川内北キャンパス.
24. S. Yamasaki, M. Shoji, Y. Shigeta, "A QM/MM study on the oxygen-binding structure of alternative oxidase"(**Poster**), CPMD2017, Oct. 18th-20th 2017, Tsukuba International Congress Center, Tsukuba, Japan.
25. S. Yamasaki, M. Shoji, Y. Shigeta, "QM/MM study on the oxygen-binding structure of trypanosome alternative oxidase (TAO)"(**Poster**), TGSW-IWP2017, Sep. 25th-27th 2017, Tsukuba International Congress Center, Tsukuba, Japan.
26. 山崎笙太郎, 庄司光男, 重田育照, "シアン耐性酸化酵素における酸素分子結合構造についての理論的研究"(**Oral**), 第11回分子科学討論会, Sep. 15th-18th 2017, 東北大学, Sendai, Japan.
27. 木間塚政人, 庄司光男, 重田育照, "分子動力学法を用いた不凍タンパク質と水分子間の相互作用に関する理論研究"(**Poster**), 第11回分子科学討論会, Sep. 15th-18th, 東北大学, Sendai, Japan.
28. Masato Kimatsuka, Mitsuo Shoji, Yasuteru Shigeta, "Molecular Dynamics Studies on Interaction of Anti-Freeze Protein (AFP) with Water Molecules"(**Poster**), TGSW2017, Sep. 20th-22nd, EPOCAL TSUKUBA, Tsukuba, Japan.
29. Masato Kimatsuka, Mitsuo Shoji, Yasuteru Shigeta, "Molecular Dynamics Studies on the effects of Anti-Freeze Protein (AFP) on ice growth"(**Poster**), CPMD2017, Oct. 18th-20th, EPOCAL TSUKUBA, Tsukuba, Japan.
30. Masato Kimatsuka, Mitsuo Shoji, Yasuteru Shigeta, "Molecular Dynamics Studies on growth of ice crystal bound by Anti-Freeze Protein"(**Poster**), APCTCC8, Dec. 15th-17th, IIT, Mumbai, India.
31. 喜屋武茜, 栢沼愛, 庄司光男, 重田育照, "ワインラクトンの立体選択的生成機構の理論研究"(**Poster**), 第31回分子シミュレーション討論会, Nov. 29th-Dec. 1st, 金沢商工会議所, Kanazawa, Japan.
32. 常盤恭樹, 庄司光男, 柴田直樹, 樋口芳樹, 片岡邦重, 重田育照, 美齊津文典, "QM/MM法によるビリルビンオキシダーゼにおける構造変化と酸化還元電位に関する理論的研究" (**Oral**), 第7回日本生物物理学会関東支部会, Mar. 13th-14th 2018, 東京大学駒場, Tokyo, Japan.
33. Takaki Tokiwa, Mitsuo Shoji, Naoki Shibata, Yoshiki Higuchi, Kunishige Kataoka, Yasuteru Shigeta, and Fuminori Misaizu, "A Theoretical Study on the T1Cu Site in Bilirubin Oxidase (BOD): Relation between Structural Changes and Redox Potentials" (**Poster**), The 58th Sanibel Symposium, Feb. 18th-23rd 2018, St. Simons Island, Georgia, USA.
34. Takaki Tokiwa, Mitsuo Shoji, Naoki Shibata, Yoshiki Higuchi, Kunishige Kataoka, Yasuteru Shigeta, and Fuminori Misaizu, "QM/MM Study on the T1 Cu site structures and the Redox Potentials in Bilirubin Oxidase (BOD)" (**Poster**), CPMD2017 Workshop, Oct. 18th-20th 2017, EPOCHAL TSUKUBA, Tsukuba, Japan.
35. 常盤恭樹, 庄司光男, 柴田直樹, 樋口芳樹, 片岡邦重, 重田育照, 美齊津文典, "ビリルビンオキシダーゼの構造と酸化還元電位に関する理論的研究" (**Oral**), 第11回分子科学討論会, Sep. 15th-18th 2017, 東北大学, Sendai, Japan.
36. M H N Assadi, Y Shigeta, "Effect of Na excess and cation disorder on voltage and capacity of Na_xRuO₃ as Na ion battery cathode" (POSTER) The 42nd Condensed Matter and Materials Meeting of Australia, 30th January to 2nd of March. Wagga Wagga, New South Wales, Australia.

<著書、解説記事等>

1. 岩田潤一, 松下雄一郎, 澤田啓介, 重田育照, 押山 淳, 「実空間差分法による大規模計算: 半導体表面・ナノ構造への応用」、固体物理 (特集号) **52**, 581-591 (**invited**) (2017).
2. T. Baba, K. Kamiya, Y. Shigeta, "Integrated Computational Studies on Mutational Effects of A Nylon-degrading Enzyme", *Quantum Systems in Physics, Chemistry, and Biology: Advances in Concepts and Applications*, Progress in Theoretical Chemistry and Physics Vol. **30**, 317-330, Springer (2017). DOI:10.1007/978-3-319-50255-7_19.

＜シンポジウム、研究会、スクール等の開催実績＞

1. 研究会「レア・イベントの計算科学」、志賀基之、藤崎弘士、重田育照、森下徹也、君塚肇、Aug. 28th–30th 2017, 伊豆山研修センター.

＜管理・運営＞

重田育照

物理学類学務委員、広報委員、カリキュラム委員、FD 委員、全学教育会議委員

計算科学研究センター運営委員会委員、人事委員会委員、生命科学研究部門長

＜社会貢献・国際貢献＞

集中講義・海外の大学におけるセミナー

1. 重田育照、「反応量子化学」集中講義、2017 Dec. 10、立教大学大学院理学研究科.
2. 重田育照、「計算化学」集中講義、Nov. 27th–28th 2017、大阪市立大学大学院工学研究科.
3. Y. Shigeta, "A Simple Conformational Sampling Algorithm for Understanding Functions of Biomolecules", 11th Sep. 2017, Institute of Chemistry, Slovakia Academy of Science, Slovakia.
4. Y. Shigeta, "A Simple Conformational Sampling Algorithm for Understanding Functions of Biomolecules", Central European Institute of Technology (CEITEC), 8th Sep. 2017, Masaryk University, Czech.
5. 重田育照、「生物物理学」集中講義、Sep 1st 2017、秋田大学大学院工学研究科.
6. 重田育照、「計算医工学」集中講義、August 3rd–4th, 2017、広島市立大学大学院情報科学研究科.
7. 重田育照、「効率的な構造サンプリング手法の開発と生命機能の解析」、27th 2017、千葉大学理学研究科. 「物性理論」集中講義、June 26th–27th 2017、千葉大学理学研究科.
8. Y. Shigeta, "Efficient Sampling Methods for Rare Event: Applications to Chemistry & Structural Biology", 18th April 2017, Department of Chemistry, Southern California University, USA.

＜講義＞

重田育照、計算物理学 3、物理学類専門科目、秋 ABC

重田育照・庄司光男、生物物理学 I、物理学類専門科目、秋 AB

重田育照、生物物理科学、物理学類専門科目、春 ABC

重田育照、物性理論 I、物理学専攻専門科目、春 ABC

庄司光男、計算物理学 2、物理学類専門科目、春 ABC

＜外部資金＞

【研究代表者】

1. 新学術領域研究「複合光応答」計画研究、重田育照（代表者）（平成 26～30 年度）「実験と理論の協奏的アプローチによる多重スピン励起子変換制御」
2. 若手研究 (A)：庄司光男（研究代表者）（平成 29 年～31 年度）「光化学系 II 酸素発生中心における水分解反応の全反応経路解明」
3. 若手研究 (A)：原田隆平（研究代表者）（平成 28 年～30 年度）「G タンパク質共役受容体におけるシグナル伝達機構の解明」

【分担研究者】

1. Post K 重点課題 7A、重田育照（代表者：押山淳 教授）（平成 28～31 年度）「構成の半導体デバイス」
2. 基盤研究(B)、庄司 光男（代表者：岡島 俊英）（平成 28～31 年度）、「酵素活性中心の構造変化とゆらぎにリンクする触媒反応遷移状態の制御機構」
3. 挑戦的萌芽研究、庄司 光男（代表者：相川 祐理）（平成 28～31 年度）「計算科学によるアストロバイオロジーへの理論的挑戦」

〈受賞〉

1. Y. Shigeta, "22nd QSCP (*Quantum Systems in Chemistry, Physics, and Biology*) Promising Scientist Award", Centre de Mécanique Ondulatoire Appliquée (CMOA) (2017). Oct. 19th 2017.
2. 原田隆平, 第 67 回日本化学会進歩賞(2018 年 3 月 21 日)
3. R. Sato, R. Harada, Y. Shigeta, 4th *Biophysics and Physicobiology Editors' Choice Award*. "Theoretical analyses on a flipping mechanism of UV-induced DNA damage", *Biophysics and Physicobiology* **13**, 311-319 (2016), The Biophysical Society of Japan (2017). 19th Jul. 2017

IX-1. 磁性物性グループ

准教授 小野田 雅重

大学院生 5 名 (数理物質科学研究科 前期課程 5 名)

卒研究生 1 名

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

この報告書では, 本グループによる「バナジウムセラミックス系」「バナジウムポリアニオン系」などの研究状況を簡潔に整理する. 2017 年度, 本グループが対象とした物質群を図 1 に示す.

【1】バナジウムセラミックス系

(1) 金属-絶縁体転移系および熱電変換系

バナジウムブロンズ $M_xV_2O_5$ に関し, 特に金属-非金属転移機構および熱電変換系の見地から研究を進めている. またスピネル型 LiV_2O_4 の重い電子系に関し, ソフト化学的手法により Li 脱離・挿入相を作成して研究を行った (論文 2; 学位論文 1, 4; 学会発表 2; 継続)

(2) 量子スピン系

幾何学的競合系として, スピネル格子, 三角格子, トレリス格子などを対象に研究を進めている. 本年度はトレリス格子を有する $\delta-Li_xV_2O_5$, $\epsilon-Li_xV_2O_5$, $\epsilon-Cu_xV_2O_5$ などを対象とした (学位論文 2, 3; 学会発表 3; 継続)

(3) 2 次電池正極活物質系

研究室オリジナルの複合結晶 $\alpha-Cu_xV_4O_{11}$ ($2 \leq x \leq 2.33$) および α 相からソフト化学的手法により Cu を部分的に脱離した超格子型 $\beta-Cu_xV_2O_5$ ($1.2 \leq x < 2$) を主な対象としている. 特に β 相は, 2 V 以上の領域において, バナジウムセラミックス系で最大の $C \approx 300$ A h kg⁻¹ を有しており, 現在さらなる高性能化を検討している. 並行して, $Li_xV_2O_5$ 系の研究も進めている (継続)

(4) 固体電解質系

2 次イオン電池の性能向上に関しては, バナジウムセラミックスおよびポリアニオン系を対象とした開発研究を進めている. 一方で, 有機溶媒系電解質に代わりうる固体電解質への期待が高まっており, 室温で $10^{-3} \Omega^{-1} \text{cm}^{-1}$ を超えるイオン伝導率を持つ酸化物, 硫化物などの無機リチウム高速イオン伝導材料や代表的錯体水素化物 $LiBH_4$ などが候補として挙げられている.

現在, リチウム 2 次電池の固体電解質として, 低い粒界抵抗, 高い電気化学的安定性, 金属電極に対する低い分極性などの利点を持つ $LiBH_4$ および関連系を対象とした研究を進めている (論文 1; 学会発表 1; 産学連携; 継続)

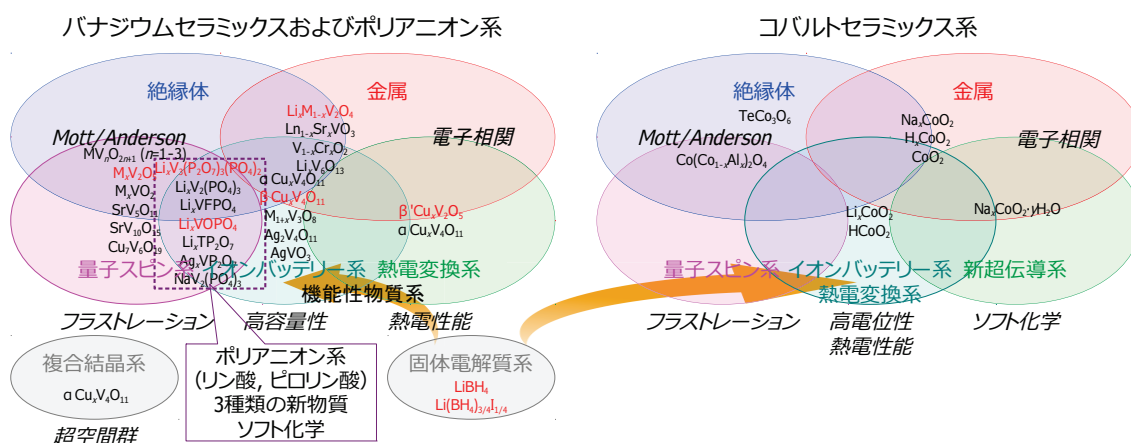


図 1: 2017 年度, 本グループが研究対象としたバナジウムセラミックス系, ポリアニオン系ならびにコバルトセラミックス系の物質群.

【2】バナジウムポリアニオン系

2 次電池正極性能を示す物質系として, 2010 年度より, ポリアニオン系を対象とした研究を進めている. 実用的目標は高容量化と充放電のサイクル特性向上である. 充放電組成は一般の固相反応では得がたいので, その結晶構造および物性を多角的に追究した例はほとんどない. また過放電試料は, 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, 量子スピントロニクスあるいは相関電子系における物質探索の観点からも興味深い.

本研究室で発明された $Li_9V_3(P_2O_7)_3(PO_4)_2$ の初充電は 2 電子反応を示し, 電位 3 V 以上の領域において $C \approx 170 \text{ A h kg}^{-1}$ を与える. この値は, 既に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, $Li_9V_3(P_2O_7)_3(PO_4)_2$ のスピン・イオンダイナミクスを詳細に検討した. (論文 3; 学会発表 4; 継続)

(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 相があり, それぞれ高温, 低温合成で得られる. α 相は高温で 1 次元反強磁性的磁性を示し, 10 K で一種のスピンパイエルス状態に転移する. 15 ~ 10 K の温度領域でスピン 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 相は 1 次元反強磁性的磁性を示すのみで磁気秩序を持たない. 充放電容量は 150 A h kg^{-1} である. 現在, β 相の微視的研究を進めている (学位論文 5; 継続)

$LiVFPO_4$ は, V-F-V の超交換相互作用を介した 1 次元反強磁性的磁性を示し, 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 に基づくスピンダイナミクスは, 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

性によるエネルギーギャップを介した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． $x \neq 1$ に対する磁気秩序およびスピンドYNAMICSを検討している（保留）

(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 置換系を作製し，電位および電気容量の変化を追跡した．

(4) Na 含有ポリアニオン系

Na 含有ポリアニオン系の代表的物質である NASICON 型 $\text{Na}_x\text{V}_2(\text{PO}_4)_3$ は，V-O-P-O-V 経路の超交換相互作用を考えると，3 次元的に強く結合した蜂巢格子を持つ．約 9 K における帯磁率極大が，蜂巢格子間で結合した V^{3+} のスピン 1 重項 2 量体に基づいて説明され，反強磁性状態 ($T_N = 4$ K) 周辺のスピンドYNAMICSが LiVFPO_4 の場合と類似の機構で定量的に理解された．

ナトリウム 2 次電池への応用も念頭に入れて新しく $\text{Na}_7\text{V}_3(\text{P}_2\text{O}_7)_4$ ， $\text{Na}_3\text{V}(\text{PO}_4)_2$ などを作製し，それらの評価を行った（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．現在，全濃度域における物性解析を進めている（継続）

【4】その他の遷移金属化合物系

(1) ペロブスカイト格子 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 $\text{SrTiO}_{3-\delta/2}$ 系などの輸送機構を検討してきた． BaTiO_3 の最高安定相である六方晶型 $\text{BaTiO}_{3-\delta/2}$ およびペロブスカイト関連格子 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, 大竹尚人, 野上玄器, 川上功太郎, LiBH_4 系の相転移とイオンドYNAMICS 第 20 回超イオン導電体物性研究会講演集 (2017) pp. 31-34.
2. Masashige Onoda and Takuma Sato, Polaronic nonmetal-correlated metal crossover system $\beta'\text{-Cu}_x\text{V}_2\text{O}_5$ with anharmonic copper oscillation and thermoelectric conversion performance Journal of the Physical Society of Japan **86** (12), 124801 [9pp] (2017).

3. 小野田雅重, リン酸ピロリン酸バナジウムリチウム正極活物質の開発
次世代電池用電極材料の高エネルギー密度, 高出力化 (技術情報協会, 東京, 2017) pp. 112-123.

〈学位論文〉

1. 射場慧, 重い電子系 LiV_2O_4 のリチウム挿入・脱離効果
数理物質科学研究科修士 (理学) 論文, 2018 年 3 月
スピネル型 LiV_2O_4 は重い電子の挙動を示す。これはバナジウムイオン上の 3d 電子の性質に帰着されることから, この電子数を変化させることで物性の大きな変化が期待できる。実際, Li^+ を Mg^{2+} 等で置換させ d 電子数を増加させた系では, 構造転移, 反強磁性転移, スピンガラス等が起こる。一方, d 電子数が減少した系の物性報告はない。本研究では, LiV_2O_4 に対しソフト化学的に Li を挿入・脱離させることで d 電子数が増減した系 $\text{Li}_{1+y}\text{V}_2\text{O}_4$, $\text{Li}_{1-x}\text{V}_2\text{O}_4$ を作成し, 新規物性の探索, ひいては重い電子系の理解に繋がる情報を得ることを目的とした。 $\text{Li}_{1-x}\text{V}_2\text{O}_4$ では $0 \leq x \leq 0.36$, $\text{Li}_{1+y}\text{V}_2\text{O}_4$ では $y \geq 1.4$ で単相となった。 $\text{Li}_{1-x}\text{V}_2\text{O}_4$ の帯磁率は, 重い電子の特徴である $T^* \approx 20 \text{ K}$ での緩やかな極大現象から, Li 濃度の減少に伴い単調増加に変化した。 $x = 0.3$ の比熱から電子の有効質量比は 120 となった。
2. 大竹尚人, 2 重トレリス格子系 $\epsilon\text{-Cu}_x\text{V}_2\text{O}_5$ の磁性
数理物質科学研究科修士 (理学) 論文, 2018 年 3 月
本研究は, 銅バナジウムブロンズの Cu 高濃度相である 2 重トレリス格子系 $\epsilon\text{-Cu}_x\text{V}_2\text{O}_5$ を対象とし, 結晶構造および電子状態を追究することを目的とした。 $0.78 \leq x \leq 1.05$ で単相が得られ, $x \approx 1$ と $x \approx 0.90$ で Cu イオンの秩序-無秩序化に応じて結晶系が異なることが明らかにされた。また $T_c \approx 140 \text{ K}$ で 1 次相転移が確認された。熱電能は, V 価数が $\text{V}^{4.5+}$ に近づくにつれ急激に増加した。帯磁率は 100 K 付近および 20~40 K に極大・極小を示した。これは, トレリス格子格部分における V - V 間分子軌道による 1 次元鎖磁性および Cu 脱離による鎖端間スピン 1 重項対を仮定することで説明できた。
3. 齋藤健太, V_2O_5 の高ドーブ相の磁性
数理物質科学研究科修士 (理学) 論文, 2018 年 3 月
 V_2O_5 は V-O-V 結合からなるトレリス格子を有しており, 2 本脚梯子格子系と密接に関係づけられる。本研究は $\epsilon\text{-Li}_x\text{V}_2\text{O}_5$ および $\delta\text{-Li}_x\text{V}_2\text{O}_5$ の磁気的性質の解明を目的とし, 試料合成, X 線粉末回折, 帯磁率測定, ESR を行った。ソフト化学的合成より, $x = 0.5 \sim 0.7$ は ϵ 相, また $x = 0.9 \sim 1.2$ は δ 相の単相であることが確認された。帯磁率の温度依存性に対し, ESR で決定された g 因子を考慮に入れることで, ϵ 相はトレリス格子格間の分子軌道による 1 次元鎖モデルあるいは 3 次元的に結合した 2 本脚梯子格子モデルでほぼ説明できた。一方, δ 相では 2 本脚梯子格子由来のスピンギャップの存在が示唆された。
4. 武安大彬, $\beta'\text{-Li}_x\text{V}_2\text{O}_5$ の物性と Cu 置換効果
数理物質科学研究科修士 (理学) 論文, 2018 年 3 月
最近, $\beta'\text{-Cu}_x\text{V}_2\text{O}_5$ の Cu イオンが広範囲の Cu 濃度領域で非調和型振動を示し, 金属 - 非金属相境界近傍の非金属組成 ($x = 0.4$) が有力な熱電変換材料であることが実証された。本研究は, $\beta'\text{-Li}_x\text{V}_2\text{O}_5$ における Li-Cu 固溶系の構築, 非調和型振動と質量密度変調による熱伝導度の抑制および熱電変換性能の向上を目的とした。全域固溶系 $\text{Li}_x\text{Cu}_{0.45-x}\text{V}_2\text{O}_5$ を対象に伝導・磁気物性を追究した結果, 電気抵抗率と熱電能について, 高温側がスモールポーロンモデル, 低温側が変長ホッピングモデルを適用することで説明され, 帯磁率からも 3d 電子の局在性が示唆された。 $\text{Cu}_{0.45}\text{V}_2\text{O}_5$ の物理量との比較から, Li-Cu 固溶による熱電変換性能の向上が示唆された。
5. 福沢直也, 低次元磁性体 LiVOPO_4 のリチウム挿入・脱離効果
数理物質科学研究科修士 (理学) 論文, 2018 年 3 月
次世代 2 次電池正極活物質の一つであるバナジウムポリアニオン系では 3d 電子が強く局在し, また低次元スピンネットワークを有することが多い。 LiVOPO_4 には 3 斜晶 α 相と直方晶 β 相が存在し, とともに V-O-V の 1 次元鎖を持つ。充放電容量が高い 相は 1 次元鎖的である。高い容量は電子スピン数を大きく変化できることを示唆しており, 1 次元量子スピン系のさらなる研究舞台を提供する可能性がある。本研究は, β 相を対象に, Li の挿入・脱離を通して V イオンの電子数を変化させることで, 磁性の変化を追究することを目的とした。帯磁率測定および ESR の結果, Li_2VOPO_4 において 3 次元的反強磁性転移が示唆された。また VOPO_4 では格子欠陥により放電特性が低下することを示した。

〈学会発表など〉

1. 小野田雅重, 大竹尚人, 野上玄器, 川上功太郎, LiBH_4 系の相転移とイオンダイナミクス
第 20 回超イオン導電体物性研究会 1B-3, くまもと県民交流館パレア, 熊本県熊本市, 2017 年 7 月 1 日
2. 小野田雅重, 佐藤拓磨, β' - $\text{Cu}_x\text{V}_2\text{O}_5$ の非調和型 Cu 振動と熱電変換
日本物理学会 2017 年秋季大会 21aF11-2, 岩手大学上田キャンパス, 岩手県盛岡市, 2017 年 9 月 21 日
3. 小野田雅重, 大竹尚人, ϵ - $\text{Cu}_x\text{V}_2\text{O}_5$ の結晶構造と磁性
日本物理学会 2017 年秋季大会 21aF11-3, 岩手大学上田キャンパス, 岩手県盛岡市, 2017 年 9 月 21 日
4. 小野田雅重, 高田慧, $\text{Li}_9\text{V}_3(\text{P}_2\text{O}_7)_3(\text{PO}_4)_2$ のスピンダイナミクス
日本物理学会第 73 回年次大会 22aK403-9, 東京理科大学野田キャンパス, 千葉県野田市, 2018 年 3 月 22 日

〈高校生・中学生対象授業, 講演など〉

1. 小野田雅重, 次世代 2 次電池正極材料の開発
科学技術週間事業-環境・エネルギーのための科学と技術: 体験実験とポスター展, 筑波大学, 茨城県つくば市, 2017 年 4 月 22 日
2. 小野田雅重, 物性実験研究と物質科学 - 物理学の基礎から学際領域研究まで -
平成 29 年度筑波大学説明会, 筑波大学, 茨城県つくば市, 2017 年 8 月 6 日

〈産学連携など〉

1. 小野田雅重, LiBH_4 系のイオンダイナミクスに関する研究, 2016 年 4 月-2019 年 3 月

〈特許公開・出願〉

なし

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	16名
卒研生	5名
研究生	1名

【1】0次元半導体の分光研究（池沢道男、舛本泰章）

(1) 単一窒素等電子トラップの偏光異方性（池沢道男、佐久間芳樹^A, ^A物質・材料研究機構）

GaAs に希薄ドーピングされた窒素不純物による等電子トラップは、数百 ps 程度の短い寿命を持つ明るい単一光子源や、エネルギーが良く揃った単一光子源などとして有用である。我々はこれまで、GaAs(001)面に窒素ドーピングした際に形成される発光中心を主に研究してきたが、その発光スペクトルには微細分裂と偏光異方性が見られるのが一般的であった。他方、GaAs(111)A 面上への窒素ドーピングではシングルピークを示す発光中心が得られるという報告があり、ランダム偏光の光子発生に利用できる可能性がある。そこで、今回、GaAs(111)A 上に窒素ドーピングした試料を用いて、単一発光中心の発光の偏光異方性を調べた。

試料は、MOCVD 法で GaAs (111)基板上に GaAs バッファ層を成長させ、その上に窒素デルタドーピング層を 1~3 層成長させ、GaAs でキャップしたものである。励起には波長 532nm のレーザー光を用い、共焦点光学系で単一の発光中心を選択した。試料温度は 5K である。その結果、(111)面上でも、(001)面に見られる NN_A 発光中心に近いエネルギーを持つピークが観測されたが、(001)面の場合のように、同じエネルギーに繰り返し観測される訳ではなく、エネルギーには比較的大きなばらつきが見られたため、同じ原子配置を持った NN_A 発光中心と結論することが出来なかった。微細構造についても、分裂幅や強度比にいくつかのパターンが見られたが、期待されたようなシングルピークになるものは観測されなかった。他方、(111)面では、微細分裂が伴うものの偏光異方性がほとんど見られない発光中心が少数ながら観測された。このような等方的な発光を示す発光中心は、これまで(001)面の GaAs:N では全く観測されていなかったものであるため、面方位を変えた試料についての単一発光中心の偏光異方性の研究が、応用面からも今後重要になると考えられる。

(2) 単一窒素等電子トラップの電荷制御（池沢道男、佐久間芳樹^A, ^A物質・材料研究機構）

様々な半導体量子ドットについて、量子ドットの電荷状態を印加電圧によって制御する技術が確立しており、正や負の様々な荷電励起状態が発光スペクトル中に観測されている。量子ドットに類似の系である GaAs:N 中の窒素発光中心では、N が As を置換しているものと考えられ、電子親和力の差に起因して、電子を近距離的な力で引き付けるとされている。このような等電子不純物の電荷状態が量子ドットと同様に制御できるかどうかは基礎と応用両面から興味深い。GaAs 中の窒素発光中心についても、近年、負の荷電励起状態が観測されたという報告があったことから、発光中心の荷電状態の制御が期待できる。

我々は、昨年度までに電荷制御量子ドットに用いられる試料構造を用いて、単一発光中心の電荷制御を試み、試料に印加したバイアス電圧に依存した単一発光中心のスペクトル変化を観測していた。しかし、原因不明のバックグラウンド発光が重畳するなど、より詳細な研究には問題があった。そこで、今年度はバックグラウンド発光をおさえるべく、構造のパラメータを変更した類似の試料を作製した。n ドーピング層から 30 nm 離れた位置に窒素デルタドーピング層を形成し、その後に 20~100 nm の GaAs 層、100 nm の AlGaAs ブロッキング層、20 nm の GaAs 層を成長させ、表面には ITO 透明電極をスパッタ製膜した。裏面はオーミックコンタクトとした。昨年度はブロッキング層とド

ープ層が近すぎたため、ポテンシャルの段差部分に蓄積した正孔がバックグラウンド発光の原因ではないかと考えていたが、低温での顕微発光観測の結果、ブロッキング層を遠ざけた試料でもバックグラウンド発光は観測されたため、原因については再検討が必要となった。一方で、バイアス電圧に依存したスペクトルの離散的変化は観測され、この現象の再現性は確認することが出来た。

(3) 窒素等電子トラップの四光波混合測定 (池沢道男, 佐久間芳樹^A, ^A物質・材料研究機構)

区別のつかない光子を得るためには、コヒーレンス時間 T_2 が発光寿命 T_1 の2倍で与えられるフーリエ変換限界値に達している必要がある。これまで、単一発光中心の発光の干渉測定によってコヒーレンス時間を評価してきたが、この方法は簡単であるものの、遅いスペクトル拡散の影響を受けてしまう事が問題であった。我々は、図に示すように、GaAs 中の窒素発光中心に関して、初めて四光波混合(Four-wave mixing, FWM)信号を得ることに成功した。コヒーレンス時間の有力な測定法である FWM 法は信号強度が弱いため、単一光子源として利用可能なような、低密度で存在する発光中心について信号を取得する事はこれまで難しかった。我々は、ヘテロダイン検出法を用いることによって、光学顕微鏡で個別の発光中心を区別できる程度に低濃度のデルタドーブ(1原子層のみの窒素ドーブ)試料について初めて信号を検出することができた。しかし、中段に示すように、位相緩和時間は 60ps 程度であり、より長波長側の発光中心について期待された数百ピコ秒に比べてずっと短い。この結果は、 T_2 が発光中心の種類(あるいは束縛エネルギー)に強く依存していることを示唆しているのかも知れない。信号が検出できる励起波長に制限があったため、研究期間内には長波長領域の発光中心について測定ができていないが、スペクトル拡散の影響を排除して T_2 が測れる FWM 法が可能になったことは大きな意義がある。

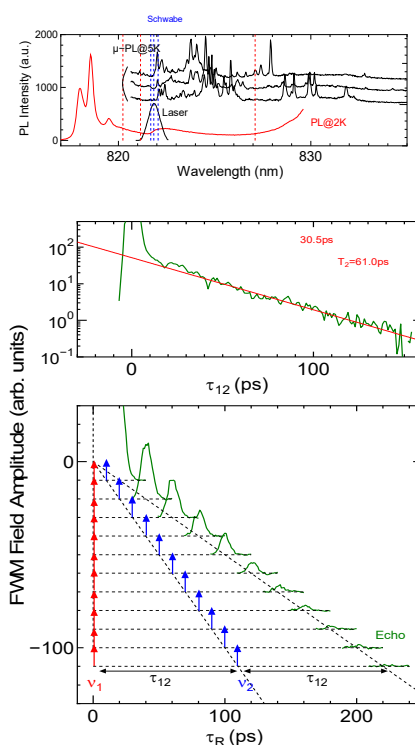


図: (上) 窒素をデルタドーブした GaAs 試料の発光スペクトルと顕微発光スペクトル。(中) 波長 822nm のピコ秒光パルスで励起した場合の時間積分 FWM 信号。 T_2 が 60ps 程度と分かる。(下) 時間分解 FWM 信号。↑で示した2つの励起パルスから同じ時間だけ遅れたフォトンエコーが観測されている事が分かる。

(4) セレン化カドミウムナノプレートレットの単一観測 (池沢道男, 舩本泰章)

近年、CdSe, CdS, CdTe などのカドミウムカルコゲナイドのナノメートルサイズの板状結晶(Nano)を化学的手法で合成できるようになってきた。これらは原子層レベルでフラットな構造になっており、原子層厚さに対応した離散的な吸収スペクトル変化が見られる。また球形の量子ドットに比べて非常に高速の応答が観測されており、超高速の単一光子発生に利用できる可能性がある。我々は、今年度、室温で単一 CdSe NPL を観測する事に成功した。まず、セレン化カドミウム(CdSe) NPL を化学的に合成し、6モノレイヤー(ML)、または5ML厚さのCdSe NPLsを得た。透過電子顕微鏡観察では、厚さ 1.8nm 程度、横方向の広がり が 15~20nm 程度の NPLs が積み重なったものが観測されている。適切な化学的処理の後、カバーガラス上に NPLs を分散させ、油浸対物レンズと共焦点顕微鏡を用いた顕微分光を行った。単一 NPL の発光は、単一量子ドットにも共通して見られる

強い明滅現象を示した。さらに、10MHz の 50ps パルス励起の下で Hanbury-Brown and Twiss 測定を行ったところ、明瞭なアンチバンチング特性が観測されたことから、このサイズの CdSe NPL から単一光子が発生していることが確認された。さらに、低温での共鳴励起の実験を進めるために、温度 5K での顕微観測も行い、温度低下に伴うスペクトルの幅の減少、発光の明滅現象の兆候を観測することが出来た。この系では、低温で巨大振動子効果のために発光寿命の大幅な減少が起こることが期待されており、それを観測することが次のステップである。

(4) 量子リングのコヒーレンス (池沢道男, Kwangseuk Kyhm^A, ^APusan National University) 半導体量子リング(Quantum Ring, QR)は Aharanov-Bohm 効果(AB 効果)のような他の量子構造には見られないような独特な性質を持つことで注目を集めている。リム高に異方性を持つ火山型の構造のリングでは、鉛直方向の量子数 $k=1,2,3$ の異なる束縛状態が存在する。これにより局在状態の励起子と非局在状態の励起子、さらには励起子分子の発光が観察される。しかし、この量子構造において位相緩和時間(T_2)の研究はあまり行われてこなかった。そこで、単一の QR からの発光の干渉測定を行い、 T_2 を求めた。用いた GaAs QR は分子線エピタキシー法により、AlGaAs 上に成長され AlGaAs でキャップされている。QR のサイズは半径~20nm、高さ~10nm 程度である。励起光として 517nm のレーザー光を用い、マイケルソン干渉計を通した後、焦点距離 75cm のスペクトロメータとマルチチャンネル検出器で発光の干渉スペクトルを得た。温度 5K での単一の QR の発光スペクトル線幅は分光器の分解能以下であり、干渉法が有効に働く。この発光は、そのエネルギーから、励起子が量子リング内に三日月状に局在した状態からの発光と考えられる。干渉の明瞭度は干渉計の光路差の増加とともに指数関数的に減衰し、その時定数から位相緩和時間が約 25ps と分かった。またコヒーレンス時間が 5K から 20K の範囲において温度に強く依存し、その温度係数は量子ドットのそれと比べて大きい事も分かった。このようにデコヒーレンスが強く起こる原因の一つとして、異なる k 状態間の散乱が考えられる。

【2】表面プラズモンダイナミクス・プラズモニクス (久保敦)

(1) ナノキャビティとフェムト秒表面プラズモン波束の相互作用ダイナミクス (大竹, 大野, 伊知地, 久保)

ナノスケールの微細加工技術を駆使することにより、光の振動数の電磁場に対し電氣的/磁氣的共鳴を有する微細構造を集積し、天然物質にはない巨視的な電磁氣的特性（屈折率、透磁率など）を有する「メタマテリアル」と呼ばれる物質群を作製することが可能である。メタマテリアルの構成要素を「メタ原子」と呼ぶ。メタマテリアルが示す特異な光学特性はひとつひとつのメタ原子の電磁波との相互作用の集積の効果であり、メタマテリアルによる自在な光制御を実現する上でメタ原子の光学応答の微視的なダイナミクスの解明は不可欠である。しかしながらほとんどの場合、メタマテリアルの研究は遠隔場 (far-field) における光線光学的な計測による光学特性の評価に限られている。

本研究は、入射波が単一のメタ原子と相互作用し変調を生じる過程を微視的に映像化する事を目的とし、金属膜上を伝搬するフェムト秒表面プラズモン波束が同一平面上に形成されたメタ原子に入射し、光学的相互作用を経由して再び波束として出射する様子の時間分解顕微鏡法による映像化を行った。その結果から、単一のメタ原子によりプラズモン波束に生じる位相変調量を実験的に決定することに成功した。メタ原子は Au 蒸着膜上に形成した金属-絶縁体-金属 (MIM) 型ナノキャビティである。このナノキャビティはフィッシュネット型メタマテリアルの単位構造であると共に磁場に対し共鳴するメタ原子でもある。様々な幅のキャビティを作製し、共鳴周波数を系統的に変化させたメタ原子に対しプラズモン波束の位相変調量を評価した結果、波束の搬送波周波数に対する共鳴周波数の離調量を操作することにより位相変調量を正負両方に調整できることが明らかになっ

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。

(2) 誘電体体積型導波路における光通信帯波長 $1.55\ \mu\text{m}$ 表面プラズモンの導波(宮崎, 組澤, 久保)

小型・高速情報処理素子としてのプラズモニックデバイスは、既存のフォトニックデバイスを補完することが期待されているため、光通信帯波長 ($\lambda=1.55\ \mu\text{m}$) で動作する必要がある。我々の研究室では、今までに波長 $1.55\ \mu\text{m}$ のフェムト秒パルスレーザーを用いた時間分解顕微鏡法を構築し、Au のストライプ型導波路を伝搬する SPP 波束の動的可視化、ならびに波束のダイナミカルな特性の評価を行ってきた。

今回、表面プラズモンモードの空間的な閉じ込めがより強固で、導波路の“曲げ”や“分岐”等の構造における散乱損失がより低いプラズモン導波路の開発を目的とし、誘電体堆積型表面プラズモンポラリトン導波路 (Dielectric Loaded SPP Waveguide; DLSPPW) の作製、ならびに同導波路におけるプラズモン導波の顕微観察を行った。Zayats らの報告によれば、金属膜上に高さ、幅とも $600\ \text{nm}$ の誘電体を堆積した構造が、波長 $1.55\ \mu\text{m}$ の入射光に対するシングルモードプラズモン導波路として機能する。今回、Au 蒸着膜上にコートしたネガ型フォトリソ SU-8 に対し電子線リソグラフィ法による導波路のパターニングを行い、現像処理後にさらに集束イオンビームエッチングによる表面プラズモン結合部の追加工を施すことで、DLSPPW の作製を行った。導波路に対し波長 $1.55\ \mu\text{m}$ フェムト秒レーザーを照射し、蛍光顕微鏡法による導波路中を伝搬するプラズモンモードの観察を行った。顕微像は時間領域差分 (FDTD) 法による導波路内部のモード分布と対応し、目的とするプラズモニック導波路が構築された事の証左を得た。なお本研究の試料作製は筑波大微細加工プラットフォームで行った。

(3) 半導体量子ドットを用いた $1.55\ \mu\text{m}$ 帯表面プラズモンの誘導放出による増幅(尾島, 藤本, 久保)

光励起により反転分布した利得媒質を金属表面に近接させ SP モードの空間分布と整合させることで、励起子から SP への誘導放出による SP のコヒーレントな増幅 (Surface Plasmon Amplification by Stimulated Emission of Radiation : SPASER) が生じる。本研究では、光通信帯波長 $1.55\ \mu\text{m}$ における SP の増幅と評価を目的とし、波長 $1.55\ \mu\text{m}$ を含む近赤外域における Kretschmann 配置を用いた発光/反射スペクトルの角度分解測定システムの構築を行った。本システムはスペクトル計測に InGaAs マルチチャンネル検出器を使用し、波長 $900\text{--}1700\ \text{nm}$ の近赤外域のスペクトルを角度分解能 0.01° で取得することを可能にする。膜厚 $30\text{--}40\ \text{nm}$ の Au 薄膜を蒸着したガラスプリズムに対し角度分解反射率スペクトルを測定した結果は、表面プラズモン励起に対応する非常に狭線幅の反射率ディップを示し、本手法が近赤外域の表面プラズモン分散の計測に有効であることが示された。次に、近赤外域に発光を有する PbS 量子ドットをガラス基板上に薄膜化した試料に対し Nd:YAG レーザー第 2 高調波 (波長 $532\ \text{nm}$) による励起を行い、同装置による発光スペクトルの計測が可能であることを確認した。SPASER による表面プラズモン増幅は、利得層/金属/プリズム試料を光ポンプして生じる、SP 共鳴角方向へ放射される発光スペクトル幅の狭帯域化として観察される。今回の研究では Pb-QD/Au/プリズム試料からの発光は検出されず、安定した Pb-QD 薄膜の形成方法に課題を残した。

(4) カルコゲン超格子を用いたアクティブプラズモニクス(杉山, 久保)

$(\text{GeTe})_2/(\text{Sb}_2\text{Te}_3)_1$ 超格子 (GST-SL) の電圧パルス誘起相転移に基づくプラズモニック変調素子の構築を目標に、現在までに、最表面側から金属/絶縁体/GST-SL の順に積層した多層膜に導波路や電極を付加したデバイスを作製し、電圧パルスを用いた R-V 測定の結果から、GST-SL の RESET-SET/SET-RESET 相転移動作を確認している。その後、金属層と GST-SL 層を逆転した、最表面側から GST-

SL/絶縁体/金属の順に積層した多層膜構造を考案した。当構造におけるプラズモンモードの導波特性についてFDTD法による評価を行い、各層の積層膜厚の最適値を決定した。実際に作製した積層基板からテスト試料を切り出し、パルス電圧印加によるGST-SLの相転移動作の実現を確認した。これにより新デザインの多層膜でプラズモニック変調素子を製作する見込みがついたので、より実際のデバイスに近いミクロンスケールの微小素子を設計し、作製のプロセスを考案した。作製プロセスは複数回のパターン描画やドライエッチングの工程からなり、つくば地区（筑波大学、NIMS、産総研）の微細加工プラットフォーム群を利用する。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試料の提供を受け、加工に筑波大学微細加工プラットフォーム、NIMS微細加工プラットフォームを利用した。

（5）カルコゲン超格子の中赤外プラズモン観察用光学系の開発（佐藤, 久保）

本研究はGST超格子の中赤外域でのスピン偏極プラズモンの励起・観察を目的とする。今までに波長可変フェムト秒中赤外光源の構築、ならびに中赤外パルスのパワーやスペクトルの分光学的な評価が完了している。H29年度はこれに引き続き、中赤外パルスをポンプ、波長800nmパルスをプローブ光とする、ポンプ-プローブ蛍光顕微鏡光学系の構築を行った。チタン・サファイア再生増幅器の出力により光パラメトリック増幅器（OPA）を励起し、シグナル光とアイドラー光の差周波発生（DFG）により中赤外パルスを発生する（ポンプ光）。また、OPA励起後の残余の800nmパルスを光学遅延（H29年度導入）に引き入れ、時間的な同期を取った上で、中赤外パルスとほぼ同軸に光路を調整し、試料表面に照射する（プローブ光）。中赤外パルス照射による、GST-SLのバルクバンドギャップ内に出現するトポロジカル状態の共鳴的な励起の実現を想定している。

<論文>

（査読論文）

1. M. Ikezawa, L. Zhang, Y. Sakuma, and Y. Masumoto: “Quantum interference of two photons emitted from a luminescence center in GaAs:N”, Appl. Phys. Lett. **110**, 152102 (2017).
2. T. Sugiyama, A. Kubo, T. Nakano: “Optical modulator driven by electrical pulse-induced phase transition of $[(\text{GeTe})_2/(\text{Sb}_2\text{Te}_3)]_{120}$ superlattice”, Proceedings of the 29th Symposium on Phase Oriented Science PCOS 2017, 1, pp. 51-52 (2017)
3. A. Kubo, T. Sugiyama, T. Nakano: “Active-controlled plasmonic waveguides using GeSbTe superlattice”, Proceedings of the 29th Symposium on Phase Oriented Science PCOS 2017, 1, pp. 37-40 (2017)

（学位論文）

1. 修士論文 安藤 玄樹、「CdSe ナノプレートレットの単一分光」
2. 修士論文 福島 峻太、「窒素をデルタドープしたGaAsにおける縮退四光混合」
3. 修士論文 大竹 祐香、「金属-絶縁体-金属積層型ナノキャビティを配置した金属表面におけるフェムト秒表面プラズモン波束の伝搬」
4. 修士論文 尾島 隆也、「半導体量子ドットを用いた1.55 μm 帯表面プラズモンの誘導放出による増幅」
5. 卒業論文 北尾 貴之、「2次元物質での強結合状態形成のための光共振器の作製」
6. 卒業論文 松山 亨平、「窒素デルタドープGaAsにおける単一不純物発光中心の偏光異方性」
7. 卒業論文 伊知地 直樹、「金属-誘電体-金属型ナノキャビティとフェムト秒表面プラズモン波束の相互作用ダイナミクス」
8. 卒業論文 組澤 悠真、「誘電体堆積型導波路におけるフェムト秒レーザー励起表面プラズモンポラリトンの観察」

9. 卒業論文 藤本 拳、「Kretschmann 配置型角度分解近赤外発光・反射スペクトル測定システムの構築」

<書籍>

1. A. Kubo, "Time-Resolved Photoemission Electron Microscopy" in "Compendium of Surface and Interface Analysis", Ed. by The Surface Science Society of Japan, pp. 741-748, Springer (2018)

<国際会議>

1. M. Ikezawa: "Single Photon emission from nitrogen isoelectronic traps in GaAs", International Symposium on Functional Materials (吉林師範大学, 2017/10) [招待講演]
2. A. Kubo, T. Sugiyama, T. Nakano, "Active-controlled plasmonic waveguides using GeSbTe superlattice", The 29th Symposium on Phase Change Oriented Science PCOS2017, 2017 年 11 月 16-17 日, Atami, Japan [招待講演]
3. T. Sugiyama, A. Kubo, T. Nakano: "Optical modulator driven by electrical pulse-induced phase transition of $[(\text{GeTe})_2/(\text{Sb}_2\text{Te}_3)_1]_{20}$ superlattice", The 29th Symposium on Phase Change Oriented Science PCOS2017, 2017 年 11 月 16-17 日, Atami, Japan

<国内会議>

1. 福島峻太, 田久保悠一, 佐久間芳樹, 池沢道男:「窒素をデルタドープした GaAs の四光波混合測定」応用物理学会 第 65 回応用物理学会春季学術講演会 (早稲田大学西早稲田キャンパス、2018 年 3 月)
2. 山下勇真, 池沢道男, Seongho Park, Kwangseuk Kyhm, Jindong Song :「GaAs 量子リングの位相緩和時間測定」応用物理学会 第 78 回 応用物理学会 秋季学術講演会 (福岡国際会議場、2017 年 9 月)
3. 王若曦, 松山亨平, 佐久間芳樹, 池沢道男, 舩本泰章:「窒素をデルタドープした GaAs(111)A 面上の発光中心の偏光異方性」応用物理学会 第 78 回 応用物理学会 秋季学術講演会 (福岡国際会議場、2017 年 9 月)
4. 久保敦, 「フェムト秒時間領域における表面プラズモン波束の動的振舞い」, CPEC seminar, 2018 年 2 月 20 日, 東京大学生産技術研究所 [招待講演]
5. 久保敦, 「フェムト秒時間領域における表面電磁波の振る舞い」, 第 14 回原子・分子・光科学 (AMO) 討論会, 2017 年 6 月 30 日-7 月 1 日, 電気通信大学 [招待講演]
6. 大竹祐香, 伊知地直樹, 久保敦, 「金属-絶縁体-金属積層型ナノキャビティを配置した金属表面における フェムト秒表面プラズモン波束の伝搬」, 第 65 回応用物理学会春季学術講演会, 2018 年 3 月 17-20 日, 早稲田大学
7. 大竹祐香, 伊知地直樹, 久保敦, 「単一ナノキャビティのコヒーレント応答によるフェムト秒表面プラズモン波束の位相変調」, 第 15 回プラズモニクスシンポジウム, 2018 年 2 月 2-3 日, 大分コンパルホール
8. 大竹祐香, 久保敦, 「MIM 型ナノキャビティを有する金属表面におけるフェムト秒表面プラズモン波束の挙動」, Optics & Photonics Japan 2017, 2017 年 10 月 30 日-11 月 2 日, 筑波大学東京キャンパス文京校舎
9. 杉山岳, 久保敦, 中野隆志, 「 $[(\text{GeTe})_2(\text{Sb}_2\text{Te}_3)_1]_{20}$ 超格子の可逆的相転移を用いたプラズモン変調素子」, 2017 年第 78 回応用物理学会秋季学術講演会, 2017 年 9 月 5 日-8 日, 福岡国際会議場・国際センター・福岡サンパレス

<集中講義>

1. 久保敦, 「プラズモニクス研究の基礎と応用」, 東京理科大学 大学院共通特別講義, 2017 年 6 月 22 日, 東京理科大学葛飾キャンパス

<外部資金>

1. 公益財団法人住友電工グループ社会貢献基金, H28~29, 「半導体ナノ構造の共鳴光励起による区別のつかない光子の発生」 : 池沢
2. 科研費 基盤(B), 研究代表者, H29~31, 「0次元および2次元的に閉じ込められた励起子の共鳴励起による区別のつかない光子発生」 : 池沢
3. 科研費 基盤(B), 研究分担者, H29~32, 「MOCVD法による遷移金属ダイカルコゲナイドの成長技術開発とフォトニクス機能探索」 : 池沢
4. 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
5. 科研費 国際共同研究加速基金, 研究代表者, H29~31, 「高空間分解・時間分解イメージング法によるメタマテリアルの新奇な波束伝搬機構の解明」 : 久保
6. 科学技術振興機構 CREST, 共同研究者, H26~H31, 「カルコゲン化合物・超格子のトポロジカル相転移を利用した二次元マルチフェロイック機能デバイスの創製」(担当課題名:「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
7. TIA 連携プログラム探索推進事業かけはし, 共同研究者, H29, 「アト秒光電子顕微鏡のための基礎技術と応用に関する調査研究」 : 久保

I X-3 強相関物性グループ

教授	守友 浩
講師	東山和幸
助教	小林 航 (H22.9 -)
助教	丹羽秀治 (H27.8 -)
大学院生	D3 米澤宏平
	D1 福住勇矢
	M2 天羽 薫
	M2 中田 光彦
	M2 樋口 翔馬 (H29.4 -)
	M1 伊王野慎司 (休学)
	M1 岡崎 慶彦
卒業研究生	藤原 祐介
	守屋 利昭
	伊藤 徹
事務員	木村京子 (H26.5 -)

【1】 ペロブスカイト酸化物の遷移金属周りの局所構造 [1] 赤間 (M2)、小林、丹羽、内山 (JASRI)、守友

ペロブスカイト層状酸化物は、遷移金属サイトを部分置換すると物性性能が著しく変化することが知られている。しかしながら、遷移金属周りの局所構造がどのようなになっているか、系統的に調べたら例はない。われわれは、一連のペロブスカイト酸化物を合成し、EXAFS 局所構造解析により、M-O 結合長を決定した。その結果、ゲスト遷移金属周りの M-O 結合長は、ホスト格子の M-O 結合長ではなく、ゲスト遷移金属しか含まない層状酸化物の M-O 結合長に近いことがわかった。ただし、格子歪を緩和するために、ホストの M-O 結合長に近づいていることが分かった。

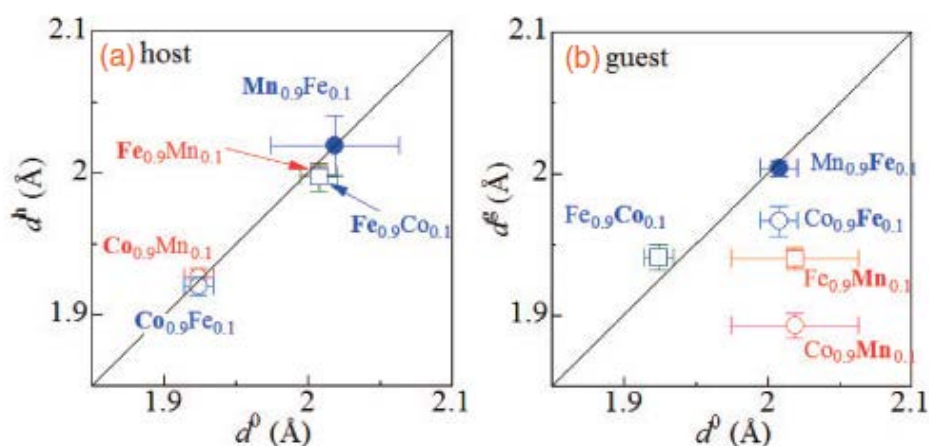


図1: ペロブスカイト酸化物中の(a)ホストおよび(b)ゲスト遷移金属周りの M-O 長。横軸はゲスト遷移金属しか含まない層状酸化物の M-O 長。

【2】 プルシャンブルー類似体の遷移金属周りの局所構造 [2] 丹羽、小林、柴田 (群

馬高専)、仁谷 (KEK)、守友

プルシャンブルー類似体 (PBA) は、遷移金属サイトを部分置換すると物性性能が著しく変化することが知られている。しかしながら、遷移金属周りの局所構造がどのようなになっているか、系統的に調べられた例はない。われわれは、一連のペロブスカイト酸化物を合成し、EXAFS 局所構造解析により、M-O 結合長を決定した。その結果、ゲスト遷移金属周りの M-O 結合長は、ホスト格子の M-O 結合長ではなく、ゲスト遷移金属しか含まない層状酸化物の M-O 結合長にほぼ一致していることがわかった。

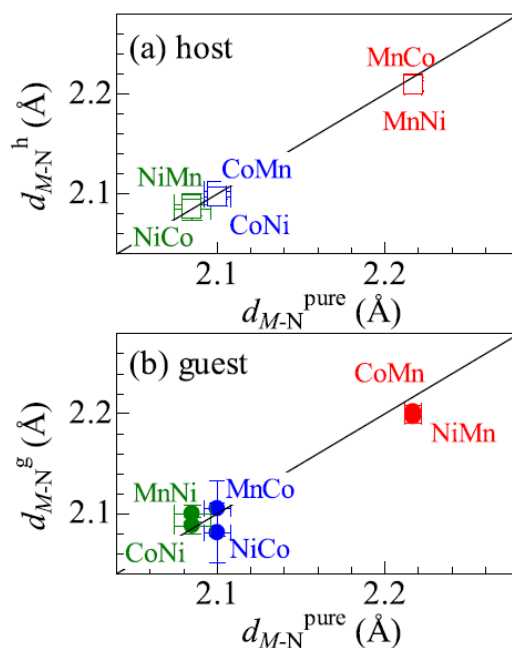


図 2: PBA 中の(a)ホストおよび(b)ゲスト遷移金属周りの M-O 長。横軸はゲスト遷移金属しか含まない層状酸化物の M-O 長。

【3】 ポテンシャルの温度係数の差を利用した熱発電 [3] 柴田 (群馬高専)、福住 (D1)、小林、守友

我々は、二次電池材料のポテンシャルの温度係数の差を利用することにより熱発電が可能であることを提唱している。温度係数の異なる二種類の PBA を正極と負極に配置した熱セルを作成し、295K と 323K の温度サイクルで熱発電に成功した。熱効率は 1%であり、この効率はカルノー効率の 11%に対応する。

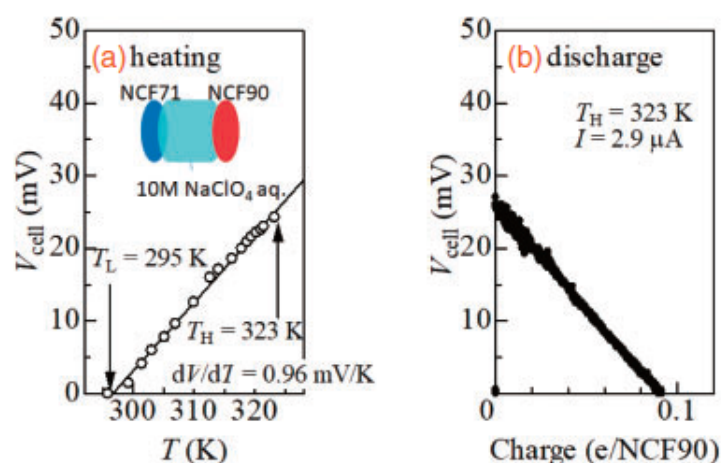


図 3:(a)温度変化による熱セルの充電、(b)充電された電力の取り出し

【4】 層状酸化物へのホール導入と電子状態の変化-酸素 K 吸収端スペクトルと第一原理計算の比較- [4] 丹羽、東山、天羽 (M2)、小林、守友

ナトリウムイオン電池の正極材料として、層状酸化物 (Na_xCoO_2) は有望視されている。しかしながら、ホール導入に伴う電子状態の変化はよくわかっていない。我々は、酸素 K 吸収端スペクトルと第一原理計算を組み合わせることにより、酸素 p 軌道にホールが導入されることを明らかにした。電池材料の電子状態の理解にとって、酸素 K 吸収端スペクトルと第一原理計算の組み合わせは極めて有効であると考えられる。

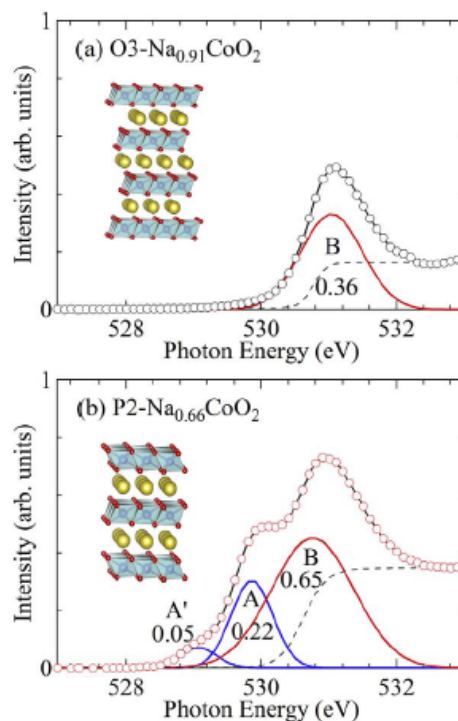


図 3 : 酸素 K 吸収端スペクトルのプリエッジ部分の拡大図 : (a) $\text{Na}_{0.91}\text{CoO}_2$ と (b) $\text{Na}_{0.66}\text{CoO}_2$

【5】 剛体球モデルによる層状酸化物の異方的熱膨張係数の理解 [5] 小林、柳田 (修

了)、赤羽 (修了)、下野 (修了)、棚辺 (修了)、守友

二次電池の正極材料として、層状酸化物は極めて有望である。我々は、この化合物系の異方的熱膨張係数を系統的に決定した。その結果、熱膨張係数の異方性は2で、遷移金属サイトのイオン半径にあまりよらないことが分かった。さらに、剛体球モデルを適用し、フィッティングパラメーターなしで、この異方性 (α_c/α_a) を再現することに成功した。さらに、この剛体球モデルは、フィッティングパラメーターなし、結晶構造の異方性 (c/a) を再現する。

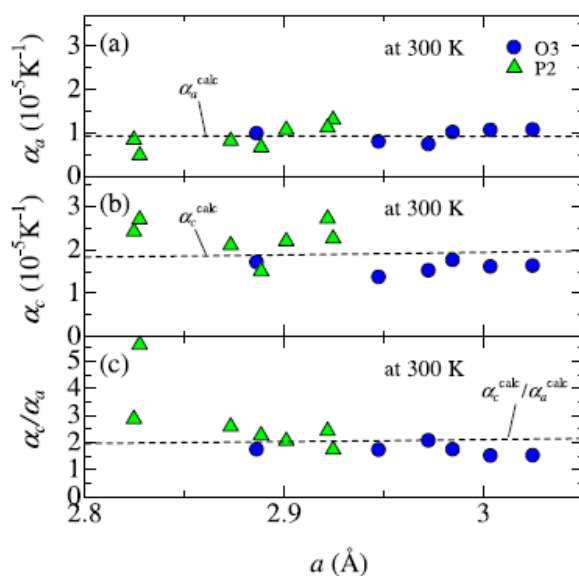


図4:層状酸化物の熱膨張係数:(a) a 軸方向 (α_a)、(b) c 軸方向 (α_c)、(c) 異方性 (α_c/α_a)

【6】放射光物質科学コースの開設 (西堀研と共同)

西堀教授と共同で放射光物質学コースを開設した。本年度は、修士課程1年が3名、修士課程2年が4名、博士課程1年が1名、博士課程2年が2名、計10名の学生が在籍した。「放射光物質科学概論」では、放射光等の知識・技術を系統的に習得されるだけでなく、放射光施設の利用方法(課題申請の方法)を習得する。今年度は、X線構造解析(笠井助教)および EXFAS 解析(丹羽助教)の実習を行った。1名のコース学生が大学院生提案課題 (SPring-8) に採択した。また、本コースの博士課程大学院生が、日本学術振興会特別研究員 (DC2) に採択された。

- ① 福住勇矢 (物理学専攻: 博士課程1年) 二次電池材料 Na_xCoO_2 の構造相図の作成 (2017A1649) 6シフト

<論文>

1. S. Akama, W. Kobayashi, H. Niwa, T. Uchiyama, and Y. Moritomo, "Local distortion around the guest ion in perovskite oxides", Appl. Phys. Express. **19** (2017) 051101
2. H. Niwa, W. Kobayashi, T. Shibata, H. Nitani, and Y. Moritomo, Invariant nature of substituted element in metal-hexacyanoferrate, Sci. Reps. **7**, 13225 (2017).
3. T. Shibata, Y. Fukuzumi, W. Kobayashi, and Y. Moritomo, Thermal power generation during heat cycle near room temperature, Appl. Phys. Express. **11**, 078101 (2018).

4. H. Niwa, K. Higashiyama, K. Amaha, W. Kobayashi, Y. Moritomo, Electronic states in oxidized Na_xCoO_2 as revealed by X-ray absorption spectroscopy coupled with ab initio calculation J. Power Source, (2018), 384, 156-158
5. W. Kobayashi, A. Yanagita, T. Akaba, T. Shimono, D. Tanabe, and Y. Moritomo, Thermal Expansion in Layered Na_xMO_2 , Sci. Reps., (2018) 8, 3988.
6. Z. C. Wang, X. Y. Zhong, L. Jin, X. F. Chen, Y. Moritomo, J. Mayer, "Effects of dynamics diffraction condition on magnetic parameter detection in a double perovskite $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_6$ using electron energy-loss magnetic chiral dichroism", Ultramicroscopy (2017), 176, 212-217.
7. Z. Wang, A. H. Tavabi, L. Jin, J. Rusz, D. Tyutyunnikov, H. Jiang, Y. Moritomo, J. Mayer, R. E. Dunin-Borkowski, R. Yu, J. Zhu and X. Zhong, Atomic scale imaging of magnetic circular dichroism by achromatic electron microscopy, Nature Materials (2018).17, 221-225,
8. F. Pfaff, H. Fujiwara, G. Berner, A. Yamasaki, H. Niwa, H. Kiuchi, A. Gloskovskii, W. Drube, J. Gabel, O. Kirilmaz, A. Sekiyama, J. Miyawaki, Y. Harada, S. Suga, M. Sing, and R. Claessen, "Raman and fluorescence contributions to resonant inelastic soft x-ray scattering on $\text{LaAlO}_3/\text{SrTiO}_3$ heterostructures", Phys. Rev. B, 97 (2018) 035110.
9. Y.-T. Cui, Y. Harada, H. Niwa, T. Hatanaka, N. Nakamura, M. Ando, T. Yoshida, K. Ishii, D. Matsumura, H. Oji, H. Ofuchi, M. Oshima, Wetting Induced Oxidation of Pt-based Nano Catalysts Revealed by In Situ High Energy Resolution X-ray Absorption Spectroscopy, Sci. Rep. 7 (2017) 1482.
10. K. Ishii, T. Tohyama, S. Asano, K. Sato, M. Fujita, S. Wakimoto, K. Tustsui, S. Sota, J. Miyawaki, H. Niwa, Y. Harada, J. Pelliciari, Y. Huang, T. Schmitt, Y. Yamamoto, and J. Mizuki, "Observation of momentum-dependent charge excitations in hole-doped cuprates using resonant inelastic x-ray scattering at the oxygen K-edge", Phys. Rev. B 96 (2017) 115148.
11. Y. Harada, J. Miyawaki, H. Niwa, K. Yamazoe, L.G.M. Pettersson, A. Nilsson, "Probing the OH Stretch in Different Local Environments in Liquid Water", J. Phys. Chem. Lett. 8 (2017) 5487.
12. J. Miyawaki, S. Suga, H. Fujiwara, M. Urasaki, H. Ikeno, H. Niwa, H. Kiuchi and Y. Harada, "Dzyaloshinskii-Moriya Interaction Induced Magnetic Circular Dichroism in SX-RIXS", Phys. Rev. B 96 (2017) 214420.

<著書>

<学位論文>

1. 修士論文 中田 光彦、「粉末プルシャンブルー類似体の組成制御と物性評価」
2. 修士論文 天羽 薫、「電池材料に関する構造と温度特性」
3. 修士論文、樋口 翔馬、「アルカリ金属が吸着した Pd 表面状態の第一原理計算」

<講演>

1. (Invited) Y. Moritomo, "Prussian blue analogues as battery material for energy science", EuroChem2017, Barcelona, Spain, 2017/5/11-1
2. (Invited) Y. Moritomo "Thermal power generation in heat cycle near room temperature", TREMS symposium, Tsukuba, 2018/3/8
3. Y. Fukuzumi, W. Kobayashi, and Y. Moritomo, "Size Dependent Ion Diffusion in $\text{Na}_2\text{Ti}_3\text{O}_7$ and $\text{Na}_2\text{Ti}_6\text{O}_{13}$ ", 8th Lithium Battery Discussions (LiBD2017), le Palais des Congrès d' Arcachon, France, 2017/6/11-16
4. W. Kobayashi, R. L. Magnússon, Y. Okazaki, Y. Fukuzumi, and Y. Moritomo, "Electrochemical thermoelectric effects in several intercalation compounds", Lithium Battery Discussions - Electrode Materials (LiBD2017), le Palais des Congrès d' Arcachon, France, 2017/6/11-16
5. W. Kobayashi, S. Iouno, K. Amaha, S. Akama, and Y. Moritomo, "Pressure effect on battery voltage in layered NaMO_2 ", Lithium Battery Discussions - Electrode Materials (LiBD2017), 2017/6/11-2017/6/16, Arcachon, France
6. H. Niwa, M. Takachi, J. Okamoto, W.-B. Wu, D.-J. Huang, Y. Moritomo, "Local electronic states of Co-Fe Prussian blue analogues for Na-ion battery cathodes investigated by Co L-edge RIXS", 10th International Conference on Inelastic X-ray Scattering (IXS2017), DESY, Hamburg, Germany, 2017/8/30
7. Y. Fukuzumi, Wataru Kobayashi, and Yutaka Moritomo, "Thermal Coefficient of Redox Voltage in Na_xCoO_2 ", TGSW Student Poster Presentation on Materials Research, Epochal Tsukuba, 2017/9/25 (poster)
8. Y. Fukuzumi, Wataru Kobayashi, and Yutaka Moritomo, "Thermoelectric Coefficient of Redox Voltage in Na_xCoO_2 ", TGSW Interdisciplinary Workshop on Science and Patents 2017 (TGSW-IWP2017), Epochal Tsukuba, 2017/9/26 (poster)
9. 小林 航, R. L. Magnússon, 岡崎慶彦, 福住勇矢, 守友 浩「インターカレーション化合物における電気化学熱電効果」第15回環境研究シンポジウム、学術総合センター、2017/11/22、
10. 守友 浩「新しい熱発電デバイス」エネルギー物質科学センタースタートアップシンポジウム、筑波大学総合研究棟 B0110、2017/11/25
11. 守友 浩「排熱をエネルギー変換する熱発電セル」 第一回プレ戦略研究会「次世代物質・デバイス戦略開発拠点」、筑波大学、2017/12/11
12. 丹羽秀治「エネルギー材料の X 線分光」、第一回プレ戦略研究会「次世代物質・デバイス戦略開発拠点」、筑波大学、2017/12/11
13. 福住勇矢, 小林航, 丹羽秀治, 守友浩「プルシャンブルー類似体の熱起電力係数」第3回プレ戦略研究会/第2回かけはし研究会、筑波大、2018/01/15
14. 丹羽秀治, 小林航, 柴田恭幸, 仁谷浩明, 守友浩「遷移金属置換したプルシャンブルー類似体の XAFS 解析」第31回日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム、つくば国際会議場、2018/1/9. (poster)
15. 丹羽秀治「ナトリウム電池正極用プルシャンブルーの局所構造解析」、平成29年度 CORE ラボ 研究成果報告会、東北大学片平キャンパス、2018/3/14
16. 丹羽秀治「ナトリウム電池正極用配位高分子錯体の局所構造解析」 TIA かけはしミニシンポジウム「量子ビームを用いた熱電変換素子の解析技術」、KEK、2018/2/14

17. Y. Fukuzumi, A. Kaoru, W. Kobayashi, H. Niwa, and Y. Moritomo, "Temperature Coefficient of Electrode Potential of Prussian Blue Analogues", 2018 Joint Symposium on Energy Materials Science and Technology (Workshop of Pre-Strategic Initiatives), University of Tsukuba, 2018/3/8-9
18. 柴田 恭幸、福住 勇矢、小林 航、守友 浩「プルシャンブルー類似体を用いた二次電池構造型熱発電セルの作製とその評価」第 65 回応用物理学会春季学術講演会、早稲田大学、2018/3/17
19. 福住勇矢、天羽薫、小林航、丹羽秀治、守友浩「プルシャンブルー類似体の酸化還元電位の温度係数」第 65 回応用物理学会春季学術講演会、早稲田大西早稲田キャンパス、2018/3/17.
20. 丹羽 秀治、小林 航、柴田 恭幸、仁谷 浩明、守友 浩「遷移金属置換したプルシャンブルー類似体の不変的な局所構造」第 65 回応用物理学会春季学術講演会、早稲田大西早稲田キャンパス、2018/3/19 (poster)
21. 柴田恭幸、福住勇矢、小林航、守友浩「プルシャンブルー類似体を用いた二次電池型熱セルにおける熱発電」日本物理学会第 73 回年次大会、東京理科大学 (野田キャンパス)、2018/3/23
22. 樋口翔馬、東山和幸、守友浩「Cs 吸着 Pd(110)1×2 再構成表面の第一原理計算」日本物理学会第 73 回年次大会、東京理科大学野田キャンパス、2018/3/22
23. 小林航、福住勇矢、丹羽秀治、守友浩「プルシャンブルー類似体の電気化学熱電係数」日本物理学会第 37 回年次大会 (2018 年)、東京理科大野田キャンパス、2018/3/23
24. 福住勇矢、小林航、丹羽秀治、守友浩「プルシャンブルー類似体の電気化学熱電係数」日本物理学会第 37 回年次大会 (2018 年)、東理科大野田キャンパス、2018/03/23

<特許出願>

<特許取得>

<外部資金>

1. 科研費・基盤 A 平成 29 年度～32 年度「イオン注入に伴い局所構造をその構造発展の解明」(代表：守友 浩)：研究費 580 万
2. 科研費・若手 B 平成 28 年度～29 年度「非白金燃料電池触媒の活性点分布の解明」(代表：丹羽秀治)；研究経費 210 万円
3. TIA 架け橋 平成 29 年度「温度変化で発電するモバイル発電器」(代表：守友 浩)：経費 80 万円
4. TIA 架け橋 平成 29 年度「放射光 X 線解析に基づく革新的クリーンエネルギー材料の設計へ向けた調査研究」(筑波大学機関代表：丹羽秀治)、；経費 10 万円
5. プレ戦略「次世代物質・デバイス戦略開発拠点」(代表者：守友 浩)：経費 200 万
6. 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)；研究費 200 万円
7. 谷川熱技術振興基金 平成 28 年度～29 年度；「電池型熱発電素子の開発と排熱利用」(代表：守友 浩)；研究費 120 万円

<その他>

<受賞>

1. 守友 浩：2017 年度、筑波大学 SS 教員
2. 守友 浩： 2017 年度、筑波大学 BESTFACULTY MEMBER
3. Yuya Fukuzum “TGSW-IWP2017 Award Student Presentations” , 2017/9/26.

IX - 4. 光ナノ物性グループ

准教授 野村 晋太郎

大学院生 4名

【1】 ベクトル電場波形整形波の二次元電子系への照射効果（中野、野村）

電子系への光照射によって光ドレスト状態を形成し物質のトポロジカル的性質を制御する提案が理論的に示されたことを契機に、光照射による物質の量子相状態の動的制御の試みが最近注目を集めている。私たちは単一光パルス内で偏光状態を時間領域で自在にコントロールするベクトル波形整形パルスを用いて二次元電子系の光照射効果の研究を進めている。この手法はベクトル的に光パルスの時間発展を制御するものであり、従来にはない自由度と可能性をもたらした。フェムト秒レーザを用いて発生させる THz パルス波は電場強度の極大化とパルスあたりのエネルギーの極小化とを兼ね備え、無磁場下円偏光照射による光誘起ホール効果の発現のための有力な方法である。

本年度、ベクトル波形整形の手法により発生させたねじれ偏光パルスを二次元電子系へ照射し、その結果生じる円二色性について調べた。図1に二次元電子系に対する波形整形ねじれ偏光パルス照射の概略図を示す。フェムト秒モード同期チタンサファイアレーザからのパルス光を波形整形して発生させた右・左まわりねじれ偏光パルスをヘリウムクライオスタット中の(001)GaAs/Al_xGa_{1-x}As 変調ドープ量子井戸試料に斜め入射した。ねじれ偏光パルス光照射によってホールバー端子間に誘起される偏光回転方向に同期した電圧を検出した。その結果、光パルスの二次分散量、偏光方位角回転振動数、回転の向きに依存した光起電力を観測した。特に、電場包絡線の THz 回転の向きの反転による検出信号の符号の反転が観測された。さらにホールバー上の光照射位置に依存して検出信号の符号の反転が観測された。以上の結果は試料の端を流れる“エッジ”電流と試料の中央部でも観測される“バルク”電流からなるモデルで理解された。今回、ねじれ偏光パルスをホールバー試料に照射した結果、偏光方位角回転振動数とその回転の向きに依存した“エッジ”電流“の観測に成功したことは、無磁場下での量子ホール状態の観測、ひいては光照射による物質の量子相状態の動的制御のための重要なステップである。

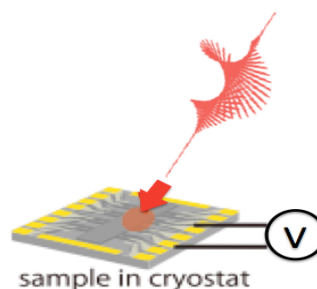


図1：二次元電子系に対する波形整形ねじれ偏光パルス照射法の概略図。

本研究は東京農工大学三沢和彦氏のグループとの共同研究である。

【2】 ダイヤモンド窒素不純物-欠陥中心を用いた高感度磁場測定(木村、野元、野村)

直接的磁場イメージングは、ナノ構造半導体、トポロジカル物質、超伝導体等の物性研究において有力な手法である。最近、ダイヤモンド中窒素不純物-欠陥(NV) 中心を用いた高感度磁場測定が注目を集めている。これは、ダイヤモンド中の NV 中心からの発光強度の電子スピン共鳴(ESR)から磁場を検出するものである。高い空間分解能、高い磁場感度、広い動作温度範囲という特徴をもつ。さらに、常温での量子スピン操作が可能であり、量子アニーリングのプラットフォームとして有力な候補である。

本年度、図2に示すような広い温度範囲でトポロジカル候補物質を評価するためのダイヤモンド NV センターESR イメージングシステムを構築し、トポロジカル候補物質のまわりの磁場の空間分布に関する研究を実施した。また、パルスレーザー光とマイクロ波パルスをダイヤモンドに照射するシステムを開発し、量子スピン操作に関する研究を開始した。

低温での測定ではマイクロ波照射による温度上昇を避ける必要がある。本研究では、マイクロ波照射によるヘリウムクライオスタット試料ステージの温度上昇を最小限とするため、2.9 GHz 近傍においてインピーダンスマッチングしたマイクロ波アンテナを設計・製作し、クライオスタットの外部から試料にマイクロ波を照射するシステムを開発した。高速 sCMOS カメラを用いた独自の方式の広視野光学顕微鏡を用いて超高感度磁場測定に十分な性能を得た。トポロジカル絶縁体薄膜に外部磁場を印加して磁化させた後に、その磁化によって生じる磁場ベクトルを、4方向の結晶軸の NV センターの電子スピン共鳴位置から再構成された。複数の試料温度において薄膜試料に水平、垂直方向の磁場を印加して磁化させたそれぞれの場合について、磁化により生じた磁場ベクトルを得た。その結果、バルクでは c 軸方向であった磁化ベクトルが薄膜では c 軸と垂直の面内方向であることが示された。

ダイヤモンド NV センターのユニークな特徴の一つはレーザー光照射により量子スピン状態を $|0\rangle$ 状態に初期化可能である点である。NV 電子スピンの $m = 0$ と $m = 1$ の準位間のエネルギーに共鳴した振動数のマイクロ波パルスを照射すると、図3(a)の赤の太い矢印で示した量子スピンはブロッホ球内を回転運動する。パルス照射時間の増大と共に回転角 θ は増大し、量子スピン状態 $|\Psi\rangle$ は $|0\rangle$ と $|1\rangle$ の二状態間を振動する。このラビ振動をダイヤモンド NV センターから放出される光を高速 sCMOS カメラを用いた独自の方式の広視野光学顕微鏡用いて検出することに成功した(図3(b))。

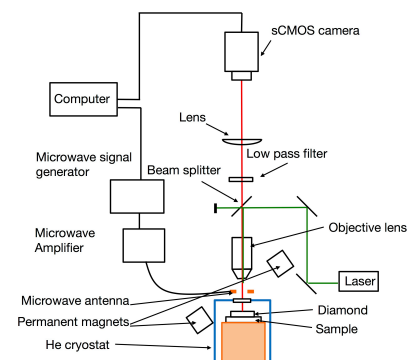


図2. ヘリウム温度から室温までの広い範囲で動作可能なダイヤモンド NV センター広視野磁気顕微鏡の概略図。

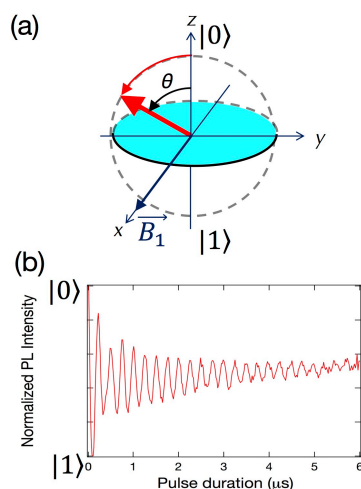


図3. (a) ブロッホ球の概略図。(b) NV センター発光により検出した電子スピン系のラビ振動。

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。

【3】 遷移金属ダイカルコゲナイド薄膜の光応答（綾野、野村）〔論文2〕

遷移金属ダイカルコゲナイドは遷移金属元素 M(Mo, W, Nb 等)と2個のカルコゲナイド X(S, Se, Te)が結合した物質である。グラフェンと同様の手法により劈開され、原子層オーダーの薄膜が得られる。例えば二硫化モリブデン MoS_2 では蜂の巣構造が2種類の元素から構成され、空間反転対称性が破れているためバンドギャップが開く。この有限の大きさのバンドギャップにより高い on/off 比の電界効果トランジスタ(FET)が作製され、発光素子・光検出器としても有望とされている。さらにスピン-バレーロッキングによりスピントロニクス素子としても興味深い性質をもつ。

これまで、私たちは遷移金属ダイカルコゲナイド MoS_2 薄膜を利用した FET 構造を作製し研究を進めてきた。前年度に引き続き、 MoS_2 薄膜チャネルと絶縁膜の間の界面ラフネス散乱、 SiO_2 絶縁膜中の固定電荷等による散乱等の影響を低減するために、六方晶窒化ボロン(h-BN)で MoS_2 薄膜チャネルの上下を挟んだ構造の試料を作製し、電気伝導特性と光応答特性に関する研究を本年度実施した。

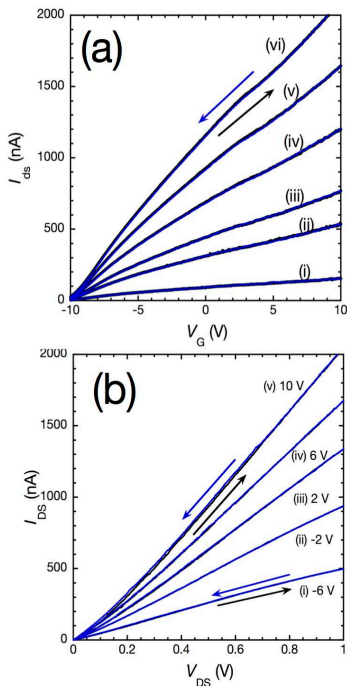


図4. ドライトランスファー法により作製した $\text{MoS}_2/\text{h-BN}$ 積層構造電界効果トランジスタの線形領域、レーザ光非照射下室温における (a) $I_{\text{DS}}-V_{\text{G}}$ 特性 (i) $V_{\text{DS}}=0.1$, (ii) 0.3 , (iii) 0.4 , (iv) 0.6 , (v) 0.8 , (vi) 1.0 V、(b) $I_{\text{DS}}-V_{\text{DS}}$ 特性 (i) $V_{\text{G}}=-6$, (ii) -2 , (iii) 2 , (iv) 6 , (v) 10 V。

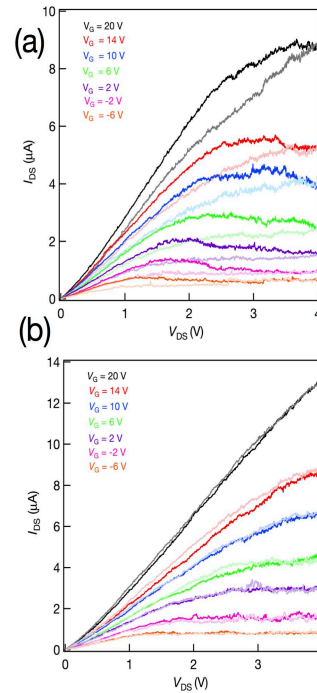


図5. ドライトランスファー法により作製した $\text{MoS}_2/\text{h-BN}$ 積層構造電界効果トランジスタの $I_{\text{DS}}-V_{\text{DS}}$ 特性。(a) レーザ光非照射, (b) レーザ光照射下 ($P = 1.6 \mu\text{W}$)。

図 4 (a) にドライトランスファー法により作製した $\text{MoS}_2/\text{h-BN}$ 積層構造 FET の線形領域、レーザ光非照射下室温におけるドレイン電流 (I_{DS})-ゲート電圧 (V_{G}) 特性を示す。従来型の SiO_2 上 MoS_2 FET で見られていたヒステリシスが $\text{MoS}_2/\text{h-BN}$ 積層構造 FET ではほぼ消失していることがわかる。これは従来型の SiO_2 上 MoS_2 FET においては MoS_2 - SiO_2 界面に吸着された水分子によるトラップ状態の影響が大きかったが、 $\text{MoS}_2/\text{h-BN}$ 積層構造 FET ではその伝導特性への影響を避けられたためであると考えられる。同様にドレイン電圧が 1 V 以下の線形領域における I_{DS} -ドレイン-ソース電圧 (V_{DS}) 特性 (図 4(b)) においても、ヒステリシスをほぼ消失させることに成功した。

図 5 に $\text{MoS}_2/\text{h-BN}$ 積層構造 FET の非線形-飽和領域におけるドレイン-ソース電流 $I_{\text{DS}}-V_{\text{DS}}$ 特性を示す。レーザ光非照射の場合、飽和電圧はゲート電圧 V_{G} の減少に伴い、減少することがわかる。また、 $I_{\text{DS}}-V_{\text{DS}}$ 特性には MoS_2/hBN 界面近傍の電荷トラップ状態へのホットキャリアの注入と放出によると考えられるヒステリシスが見られた。このヒステリシスは図 5 (b) に示すように、レーザ光照射下では顕著に低減した。これはレーザ光照射によってホットキャリアの注入、放出時間が短くなったためであると考えられる。

<査読論文>

1. Daisuke Sakuma, Yusuke Nago, Ryosuke Ishiguro, Satoshi Kashiwaya, Shintaro Nomura, Kimitoshi Kono, Yoshiteru Maeno, Hideaki Takayanagi, “Investigation of the Vortex States of Sr_2RuO_4 -Ru Eutectic Microplates Using DC-SQUIDS”, J. Phys. Soc. Jpn. **86**, 114708 (2017).
2. Akihisa Saito, Tomoki Ayano, and Shintaro Nomura, “Photoresponse in h-BN/ MoS_2 /h-BN thin-film transistor”, Jpn. J. Appl. Phys. **57**, 045201 (2018).
3. Y. Nago, D. Sakuma, R. Ishiguro, S. Kashiwaya, S. Nomura, K. Kono, Y. Maeno, and H. Takayanagi, “Magnetization measurements of Sr_2RuO_4 -Ru eutectic microplates using dc-SQUIDS”, J. Phys.: Conf. Ser. (in press).

<学位論文>

数理物質科学研究科物理学専攻修士論文 (2018 年 3 月)

1. 木村 龍典: 「ヘリウム温度下電流・磁気イメージングのための広視野磁気顕微鏡システムの開発と評価」
2. 中野 徹生: 「二次元電子系試料のねじれ偏光パルス照射効果」

<国際会議>

1. (invited) Shintaro Nomura, “Local spin injection and detection for investigations of nanostructures and topological materials”, International Workshop Top-Spin 3 (IFW Dresden, Dresden, Germany, April 25-28, 2017).
2. S. Nomura, Y. Miura, S. Nomoto, and S. Kashiwaya, “Magnetic field imaging for topological materials”, International Conference on Topological Materials Science, (Tokyo Institute of Technology, May 10, 2017).
3. Y. Miura, S. Nomoto, S. Kashiwaya, and S. Nomura, “Wide-field Magnetometry by Frequency Modulation of Microwaves Based on Nitrogen-vacancy Centers in Diamond”, SPINTECH IX, (Fukuoka International Congress Center, June 4-6, 2017).
4. Y. Nago, D. Sakuma, R. Ishiguro, S. Kashiwaya, S. Nomura, K. Kono, Y. Maeno, and H. Takayanagi, “Magnetization measurements of Sr_2RuO_4 -Ru eutectic microplates using dc-SQUIDS”, 28th International Conference on Low Temperature Physics (Swedish Exhibition Centre, Aug. 9-16, 2017).

5. A. Saito, T. Ayano, and S. Nomura, “Photocurrent in h-BN/MoS₂/h-BN Heterostructures”, 22nd International Conference on Electronic Properties of Two Dimensional Systems (Pennsylvania State University, July 31-August 4, 2017).
6. H. Tanikawa, T. Nakano, H. Ito, S. Nomura, and K. Misawa, “Selective Excitations of Two-dimensional Electron Systems by Arbitrary Vector Shaped Optical Pulse”, 22nd International Conference on Electronic Properties of Two Dimensional Systems (Pennsylvania State University, July 31-August 4, 2017).
7. T. Ayano, A. Saito, and S. Nomura, “Characterizations of a Hexagonal BN-encapsulated Multilayer MoS₂ Photodetector”, JSAP-OSA Joint Symposia 2017 (Fukuoka International Congress Center, Sep. 7, 2017).
8. Shuhei Nomoto, Ryusuke Kimura, Satoshi Kashiwaya, and Shintaro Nomura, “Optical magnetic field imaging on magnetic film with Nitrogen-Vacancy center in diamond”, Interdisciplinary Work Shop on Science and Patents 2017 (International Congress Center Tsukuba, Sep. 26, 2017).
9. T. Nakano, H. Tanikawa, H. Ito, S. Nomura, and K. Misawa, “Optical Excitation of Two-dimensional Electron Gas by Chirp Controlled Ultrafast Pulses”, Interdisciplinary Work Shop on Science and Patents 2017 (International Congress Center Tsukuba, Sep. 26, 2017).
10. T. Ayano, A. Saito, and S. Nomura, “High photoresponsivity Hexagonal BN Encapsulated Multilayer MoS₂ Photodetector”, Interdisciplinary Work Shop on Science and Patents 2017 (International Congress Center Tsukuba, Sep. 26, 2017).

<講演>

1. 野元嵩平, 木村龍典, 柏谷聡, 野村晋太郎「ダイヤモンドNVセンターを用いた磁性体の広範囲磁気イメージング」日本物理学会2017年秋季大会, 21pPSA-31 (岩手市, 岩手大学, 2017年9月21日)
2. 齋藤明央, 綾野智貴, 野村晋太郎「MoS₂/h-BN薄膜積層構造の光応答」日本物理学会2017年秋季大会, 23pB31-8 (岩手市, 岩手大学, 2017年9月23日)
3. (招待講演) 野村晋太郎「ベクトル波形整形波による二次元電子系の光励起効果」東北大学電気通信研究所共同プロジェクト研究会, (仙台市, 茂庭荘, 2017年11月2日)
4. 中野徹生, 伊藤宙陸, 野村晋太郎, 三沢和彦「ベクトル電場波形整形パルス照射による二次元電子系試料光起電力の円二色性」日本物理学会年次大会, 23pB402-10, (野田市, 東京理科大学, 2018年3月23日)

<社会貢献>

1. 野村晋太郎「光の科学」(茨城県立並木中等教育学校, SSH特別講義, 2017年12月14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29年度: 直接経費 2,300,000 円 (研究代表者: 野村 晋太郎)
2. 科学研究費 新学術領域研究 「先端ナノプローブ分光測定によるトポロジカル物質の解明」研究課題番号: 16H00978, 平成29年度: 直接経費 2,000,000 円 (研究代表者: 野村 晋太郎)
3. 科学研究費 基盤研究 A 「ベクトル電場波形整形パルスによる時間反転対称性の破れた量子系の生成と制御」研究課題番号: 15H02117, 平成29年度: 直接経費 6,300,000 円 (分担金 1,500,000 円) (研究代表者: 三沢 和彦)

IX－ 5． 低温物性グループ

教 授	神田晶申
准教授	森下將史
研究員	大塚洋一（名誉教授）
共同研究員	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	梅本匡敏、園田大樹、中村和史、堀江彩叶、矢部大輔（数理工質科学研究科博士前期課程 2 年） 星直樹（同 1 年）
学類生	田中貴弘（物理学類 4 年）

低温物性グループでは、『メゾスコピック量子科学』をテーマに掲げ、電子、渦糸、ヘリウムという 3 つの量子が微小な系（メゾスコピック系）に閉じ込められたときに発現する新規物性の解明とその応用展開を目指した研究を行っている。

【1】 グラフェン等の原子層物質とその複合構造における物性開拓とデバイス応用への基盤技術開発

層状物質を劈開して得られる単～数原子の厚さの清浄な原子層膜を任意の順序、角度で積層する技術が発達したのに伴い、これまで存在しなかった新規物質を人工的に形成することが可能になり、さまざまな新規物性が明らかになっている。我々は、以下の原子層膜特有の性質に焦点を絞って研究を行っている。

(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中の伝導電子は、ディラック方程式に従って運動する。これに関連し、グラフェンの六方格子のひずみはベクトルポテンシャルと同等の効果を持つという不思議な性質がある。このひずみ効果をうまく使うと、グラフェンを高速電子デバイスに应用するために不可欠となる質の良いエネルギーギャップを生成できることが理論予測されているが、これまで実現されてない。我々は、格子ひずみを使ってグラフェンに実用化可能な大きさのエネルギーギャップを生成することを目的とした研究を行っている。

ひずみ誘起のエネルギーギャップをグラフェンに生成する方法として、周期ひずみ構造、局所ひずみ構造の 2 種類がこれまでに提案されている。昨年度までの研究で、それぞれの

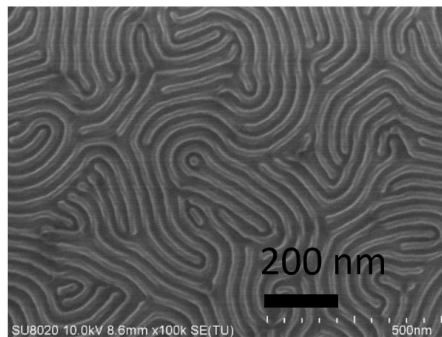


図 1：PS-*b*-PMMA のラメラ構造を用いて形成したポリスチレンの凹凸構造。

構造を持つ電界効果トランジスタにおいてエネルギーギャップを観測することに世界ではじめて成功した。さらに、実用化可能な大きさの伝導ギャップを実現するためには、周期ひずみ構造において、ひずみ周期を微細化する手法が適していることを明らかにした。今年度は、電子線リソグラフィなどの半導体微細加工技術では実現不可能な微細な周期ひずみ構造を形成することを目指し、ポリスチレンとポリメタクリル酸メチルのブロック共重合体(PS-*b*-PMMA)からなる自己組織化膜を用いてグラフェンに周期ひずみ構造を導入する方法を考案し、実際に、PS-*b*-PMMA のラメラ構造(図1)を用いてグラフェンに周期 40 nm の(準)周期ひずみを導入できることを顕微ラマン分光で確認した。現在、電気伝導測定の前準備を進めている。

(2) グラフェンの超伝導近接効果

グラフェンと超伝導体との界面では、通常とは異なる超伝導近接効果(鏡面アンドレーエフ反射)が起こることが理論予測されているが、現在まで実験では観測されていない。我々は、その主たる原因として、超伝導体とグラフェンの仕事関数差に起因する電荷ドーピングに着目している。今年度は、この電荷ドーピングが電気伝導特性に与える影響を子細に検討し、低温物理国際会議(LT28)で口頭発表すると共にプロシーディングス論文として公表した。また、昨年度理論を構築したクリーンな2層グラフェン/超伝導接合の鏡面アンドレーエフ反射を実験で観測すべく、新しい作製法を用いた試料の電気伝導を測定した。その結果、理論予測と一部定性的に合致する非対称な電流電圧特性やゲート電圧依存性・磁場依存性における共鳴ピーク構造が見られた(図2)。今後、試料作製法をさらに改良し、鏡面アンドレーエフ反射の有無を検証する。

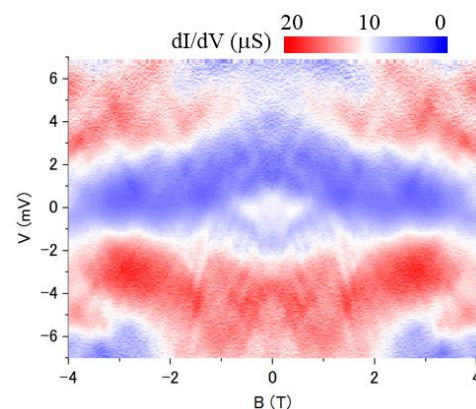


図2：2層グラフェン/超伝導体(NbSe₂)接合における微分コンダクタンスのバイアス電圧-磁場依存性。

(3) 低温強磁場中における折り曲げグラフェンの電気伝導

強磁場中の2次元電子系は量子ホール効果をはじめとした多くの興味深い現象発現の舞台である。この強磁場が空間的に激しく変化する状況での電気伝導を調べる目的で実験を行った。実験方法は以下の通りである。銅箔上CVD単層グラフェンにネガ型レジストSU-8膜をコートした後、銅箔を塩化第2鉄溶液でエッチング除去し、純水で洗浄する。これをフッ素樹脂系の細い糸を用いた水中操作でグラフェンが表側になるように折り曲げ、その両面の合計18箇所電極を取り付けた。試料作成上の課題であった折り畳みグラフェンの両面への配線については、穴あきガラス基板に転写した後、

開口部において銀ペーストを用いて金線を接続するという方法が有効であった。この折り畳みグラフェン試料を 4.2K に冷却し、8.5T までの磁場を加えて伝導測定を行った。このとき、折り畳まれた上側のグラフェンと下側のグラフェンでは表裏が入れ替わるため、電子の軌道運動に対する実効的な磁場は反転することになる。実験では約 $5\mu\text{m}$ で 8.5T から -8.5T に磁場が反転する極めて急峻な空間変化を実効的に実現できた。

表面と裏面では期待通り逆符号のホール電圧が観測され、また表面・裏面をまたぐ端子間抵抗は特有な磁場変化を示した。すなわち、側辺の表裏間縦抵抗では磁場の正負に関する反対称な成分が大きな割合を占め、しかもそれは両辺で逆の傾きを持つ。これに対して、対向側辺を結ぶホール配置的な端子間抵抗には磁場に対して反対称な成分はむしろ少ない。有限要素法による数値シミュレーションを行い、これらの測定結果は有効磁場の反転によって半定量的に理解できることがわかった。残念ながら今回の実験条件では量子ホール効果の観測には至らなかった。伝導は正孔型でキャリア密度は $2 \times 10^{16} \text{m}^{-2}$ 、移動度は $0.1 \text{m}^2/\text{Vs}$ であった。今後量子ホール効果を実現するには、試料の質、特にキャリア密度の制御が重要な課題となる。また磁場反転部に生じると考えられる界面量子状態を調べるにはさらに格段に薄いスペーサーをもつ折り曲げの実現が必要である。最近の報告によればグラフェンの折り曲げ曲率はかなり小さくできるとされており、実現の可能性はあると考えている。

【2】メゾスコピック超伝導体における少数渦糸状態の制御と量子デバイスへの応用

微小な第2種超伝導体では、量子磁束（渦糸）の配置は試料形状に依存し、巨大渦糸状態や多重渦糸状態（図3）といった新しい渦糸状態が生じる。我々はこれまで、独自に開発した微小トンネル接合法を用いて、新規渦糸状態の様々な性質を明らかにしてきた。特に、局所電流注入による渦糸状態間転移の観測に成功し、これまで古典的に扱われてきた渦糸状態の量子トンネルを示唆する実験結果を得た。通常、渦糸の移動はエネルギー散逸を伴うために量子トンネルの確率は小さいと考えられるが、メゾスコピック超伝導体特有の巨大渦糸状態をうまく制御すると、巨視的量子コヒーレンスを実現し、量子デバイスに応用できる可能性がある。ここで、従来の超伝導体の蒸着膜に代えて、原子オーダーで厚さが均一であり臨界温度の高い層状超伝導体の劈開膜を用いることで、渦糸状態の制御性が格段に向上すると期待される。今年度は、理論研究者と渦糸状態の量子性について検討すると共に、層状超伝導体の劈開膜を用いた実験のための基盤技術の開発を以下のとおり行った。

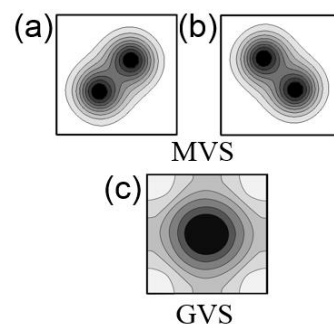


図3：正方形薄膜超伝導体の渦度 $L = 2$ の渦糸状態。（クーパ対密度の等高線表示。黒が中心核。）(a)(b) 多重渦糸状態、(c) 巨大渦糸状態。

(1) 層状超伝導体劈開膜の超伝導特性

昨年度に引き続き、層状超伝導体を用いたメゾスコピック試料を作製する上で重要となる、微細加工が超伝導特性に与える影響を調べた。今年度は、産総研の収束イオンビーム(FIB)装置を用いて膜厚 10 nm 程度の層状超伝導体 NbSe₂ の加工を行い、加工前後の超伝導特性の比較を行った。その結果、FIB 加工による超伝導転移温度の減少、転移幅の増大、臨界磁場の減少が観測された。

(2) 層状高温超伝導体 BSCCO 薄膜の超伝導探索

昨年度に引き続き、層状高温超伝導体 Bi2212 を劈開法によって薄膜化した試料の超伝導転移の観測を試みたが、様々な構造を持つ試料のすべてで、絶縁体的な振舞いが見られた。バルク試料の測定において、115 K、80 K における抵抗の跳びと低温における絶縁体的振舞いが見られたことから、用いた結晶には Bi2223 相、Bi2212 相、絶縁相が混在していることがわかった。劈開法で、絶縁相が選択的に得られると推察される。

(3) NbSe₂ における渦糸侵入・排出の観測

劈開法で得た層状超伝導体 NbSe₂ の微細な薄片に微小なトンネル接合を取り付け、微小トンネル接合法による渦糸の侵入・排出の検出を行った。アルミニウム試料の場合と同様、渦糸の出入りに伴う電圧の変化が観測されたが、その特徴はアルミニウムの場合とは大きく異なるものであった。これは、NbSe₂ が多バンド超伝導体であることを反映している可能性がある。

【3】グラファイト上ヘリウム単原子層薄膜における2次元量子物性

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。面密度(単位表面積当たりの吸着量)により、吸着構造が多彩に変化することも、この系の特徴である。低面密度領域では大きな零点振動のために、ヘリウム原子は局在せず、流体として振る舞う。面密度を増していくと、原子間のハードコア斥力、吸着ポテンシャルの凹凸、の2つの効果の協力により $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ 相と呼ばれる整合相に固化する。さらに面密度を増大させると、ヘリウム4(⁴He)薄膜の場合には、図4に示すような domain wall 構造をとると考えられている。

⁴He 単原子層薄膜に少量の ³He を溶解させた系の熱容量測定において、従来固相と考えられていた、 $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ 相より高い面密度領域で、有限の熱容量が観測され、さらに、honeycomb domain wall 構造が期待される面密度領域では、温度の自乗に比例する熱容量が観測された。ここで観測される熱容量は主に ³He の運動によるものであるが、⁴He 単原子層薄膜が融解していても固化していても、観測された熱容量は説明できない。我々は、domain wall 内のみが流動性を示し、³He 原子はこの中を運動する可能性を指摘している。striped domain wall 構造では1次元 Fermi 流体として振る舞い、honeycomb domain wall 構造では蜂の巣構造内を反映し、線形分散をもつ Dirac 粒子系として振る舞うことが期待される。線形

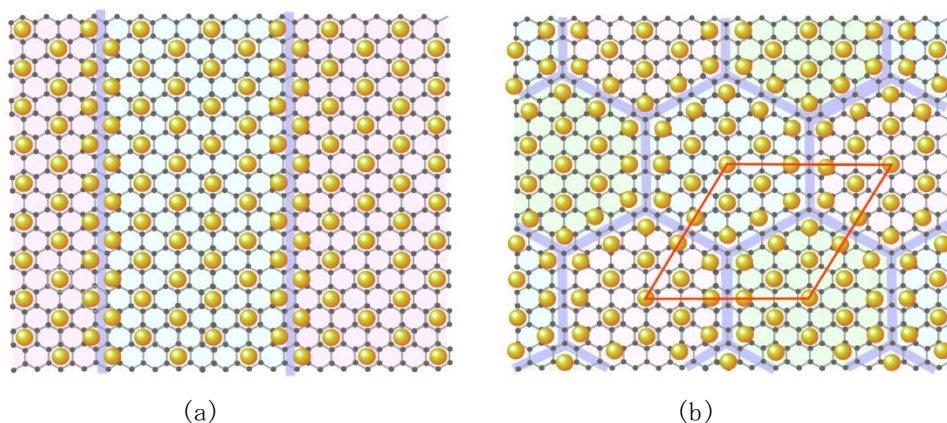


図 4. (a) striped domain wall 構造 と (b) honeycomb domain wall 構造。複数の $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ 相が隣接した構造であり、境界部である domain wall（図中青太線）では面密度が高く、ヘリウム原子は安定サイトからずれて吸着する。

分散を持つ Dirac 粒子系の熱容量は温度の自乗に比例するため、観測された温度の自乗に比例するという異常な熱容量が説明される。

本年度は、domain wall の流動性について、より直接的な証拠を得ることを目的に、 ^4He 単原子層薄膜の動的応答測定を行った。従来、 ^4He 薄膜や多孔質媒質中の ^4He の超流動転移の研究には、ねじれ振子と呼ばれる手法が用いられてきた。しかし、この手法は graphite 上の ^4He に限っては、感度良く観測することができないことが知られている。ここでは、微視的摩擦現象の研究に用いられる水晶マイクロバランズ法(QCM) と呼ばれる手法を採用した。音叉型水晶振動子の先端に graphite を取り付け、ここに ^4He を吸着させ、共鳴周波数と共鳴線幅を測定する手法である。例えば、超流動などにより吸着した ^4He が振動子から decouple すると、軽くなる分だけ共鳴周波数が高くなる。測定結果を図5に示す。1 K 以上の温度域で急激な温度変化が観測されているが、これは bare graphite でも観測される background の変化である。

面密度を増すと約 7 nm^{-2} あたり 0.1 Hz 共鳴周波数が減少することが期待されるが、400 mK 以上の温度領域では面密度に依らず、ほぼ同じ温度依存性を示している。これは、吸着系で観測される「スリップ」と呼ばれる、降温による摩擦の減少に伴う decouple 現象で説明される。一方、300 mK 以下では $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ 相の面密度 6.4 nm^{-2} を超えると共鳴周波数が降温とともに減少している。同様の減少はヘリウム多層膜においても観測されている。比較的高温で、吸着第1原子層と2原子層の間のスリップが生ずるが、さらに降温すると3層目以上が超流動転移する。このとき、3層目以上が2層目に対して対向流を生じ、正味の decouple がなくなるため、共鳴周波数が降温とともに減少すると説明されている。同様の対抗流が単原子層面内で生じている可能性が高い。即ち、 $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ 以下の面密度では固相と流体相が共存していても、固相の中に流体相の droplet が取り込まれているため対抗流は生じ得ないが、 $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ 相より高面密度領域では、domain wall 内が超流動転移すると、薄膜内の広い領域にわたり対抗流

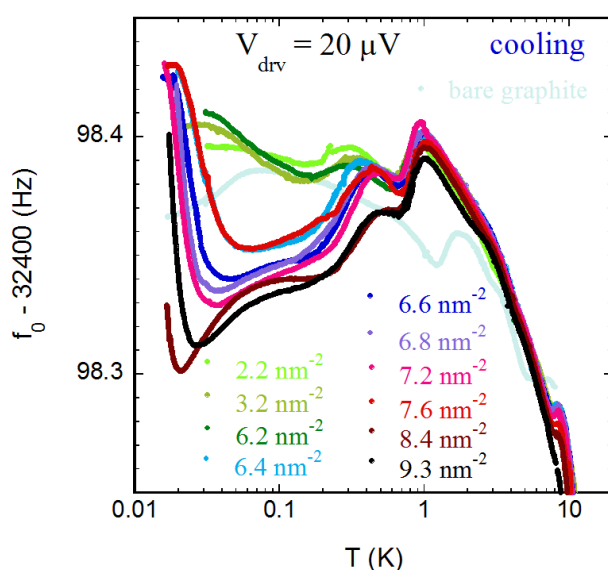


図5. グラファイト上 ^4He 単原子層膜の QCM 測定における共鳴周波数の温度変化。 6.2 nm^{-2} と 6.4 nm^{-2} のわずかな面密度の変化で、 0.1 K 近傍の振る舞いが全く異なることは、単原子層の一部の構造のみが超流動状態になっていることを強く支持する結果。最低温度付近の増大は、新奇な現象を示唆する。

が生じ、正味の decouple が消失し、共鳴周波数が下がるとして説明できる。即ち、domain wall が流動性を有するとの仮説は、動的応答測定からも強く示唆される。

さらに温度を下げると再び共鳴周波数が増大している。これは、ヘリウム薄膜全体が graphite 基盤から再び decouple したことを示す。domain wall 構造の消失や、薄膜全体が流体となり超流動転移している可能性も指摘できるが、このような低温で構造が変化することは考えにくい。QCM の振動振幅を増大させるほど decouple を生じる温度が高くなる、即ち擾乱を強く与えるほど基底状態に高温で落ち込む、という不思議な現象が生じている。また、降温に伴う decouple はエネルギー散逸のピークを伴うが、散逸の大きさは、散逸ピークの温度に反比例するという不思議な依存性も観測されている。新奇な現象が生じている可能性が高く、引き続いての詳細な調査が必要である。

<学位論文>

(修士論文) 数理解物質科学研究科、2018 年 3 月

1. 梅本匡敏：動的応答測定によるグラファイト上単原子層ヘリウム異常比熱の解明
2. 園田大樹：劈開法で得た高温超伝導体薄膜の電気伝導
3. 中村和史：格子ひずみを導入したグラフェンの物性評価
4. 堀江彩叶：折り曲げたグラフェンの低温・強磁場における電気伝導
5. 矢部大輔：劈開法で得た層状超伝導体 NbSe_2 の超伝導特性とグラフェンとの接合における超伝導近接効果

(卒業論文) 物理学類、2018 年 3 月

1. 田中貴弘：ブロック共重合体を用いたグラフェンへのひずみ導入

<論文>

1. Y. Takane, K. Yarimizu, and A. Kanda, “Andreev Reflection in a Bilayer Graphene Junction: Role of Spatial Variation of the Charge Neutrality Point”, J. Phys. Soc. Jpn 86, 064707 (2017) (8 pages).
2. K. Yarimizu, H. Tomori, K. Watanabe, T. Taniguchi, and A. Kanda, “Electron transport in a bilayer graphene/layered superconductor NbSe₂ junction: effect of work function difference”, J. Phys: Conf. Ser. 969 (2018) 012147 (5 pages).
3. Y. Takane and A. Kanda, “Andreev reflection in a proximity junction of graphene: Influence of a naturally formed pn junction”, J. Phys: Conf. Ser. 969 (2018) 012155 (5 pages).

<講演>

(国際会議)

1. (招待講演) Akinobu Kanda, “Search for unusual Andreev reflection in a graphene/superconductor interface”, Collaborative Conference on Material Science (CCMR 2017), Jeju Island (Korea), Jun. 26-30, 2017.
2. K. Yarimizu, H. Tomori, K. Watanabe, T. Taniguchi, A. Kanda. “Electron transport in a bilayer graphene/layered superconductor NbSe₂ junction”, 28th International Conference on Low Temperature Physics (LT28), Gothenburg (Sweden), Aug. 9-16 (2017).
3. Y. Takane, A. Kanda, “Andreev reflection in a proximity junction of graphene: influence of a naturally formed pn junction”, 28th International Conference on Low Temperature Physics (LT28), Gothenburg (Sweden), Aug. 9-16 (2017).
4. H. Tomori, M. Hayashi, H. Yoshioka, K. Watanabe, T. Taniguchi, Y. Ootuka, A. Kanda, “Introducing uniaxial local strain to graphene encapsulated with hBN”, 28th International Conference on Low Temperature Physics (LT28), Gothenburg (Sweden), Aug. 9-16 (2017).
5. H. Tomori, R. Hiraide, Y. Ootuka, A. Kanda, “Gap formation by periodic strain in graphene field effect devices”, 28th International Conference on Low Temperature Physics (LT28), Gothenburg (Sweden), Aug. 9-16 (2017).
6. Kazushi Nakamura, Hikari Tomori, Akinobu Kanda, “Simplified estimation of crystallographic orientation of strained graphene by micro-Raman spectroscopy”, The 2nd International Symposium on Hybrid Quantum Systems (HQS2017), Zao (Miyagi), Sep. 10 – 13 (2017).
7. D. Yabe, K. Yarimizu, H. Sonoda, Y. Ootuka, H. Tomori, K. Watanabe, T. Taniguchi, K. Ueno, A. Kanda, “Process Dependence of Superconducting Transition of Thin Layered Superconductor NbSe₂”, The 2nd International Symposium on Hybrid Quantum Systems

(HQS2017), Zao (Miyagi), Sep. 10 – 13 (2017).

8. H. Tomori, R. Hiraide, K. Nakamura, N. Hoshi, T. Kichikawa, T. Tanaka, K. Watanabe, T. Taniguchi, A. Kanda, “Graphene strain engineering for band gap opening”, The 2nd International Symposium on Hybrid Quantum Systems (HQS2017), Zao (Miyagi), Sep. 10 – 13 (2017).
9. Naoki Hoshi, Hiroki Sonoda, Daisuke Yabe, Hikari Tomori, Akinobu Kanda, “Detecting Vortices in Thin Layered Superconductor NbSe₂ Using Small Tunnel Junctions”, The 9th annual Recent Progress in Graphene and Two-dimensional Materials Research Conference (RPGR2017), Singapore, Sep. 19-22 (2017).
10. Kazushi Nakamura, Hikari Tomori, Akinobu Kanda, “Simplified estimation of crystallographic orientation of strained graphene by micro-Raman spectroscopy”, The 9th annual Recent Progress in Graphene and Two-dimensional Materials Research Conference (RPGR2017), Singapore, Sep. 19-22 (2017).
11. Hiroki Sonoda, Daisuke Yabe, Katsuhide Yarimizu, Hikari Tomori, Yoshihiko Tanano, Akinobu Kanda, “Atmosphere Dependence of Normal State Resistance of BSCCO Thin Films Obtained with Micromechanical Exfoliation”, The 9th annual Recent Progress in Graphene and Two-dimensional Materials Research Conference (RPGR2017), Singapore, Sep. 19-22 (2017).
12. D. Yabe, K. Yarimizu, H. Sonoda, H. Tomori, K. Watanabe, T. Taniguchi, A. Kanda, “Superconducting Transition of Thin Layered Superconductor NbSe₂: Influence of Device Structures”, The 9th annual Recent Progress in Graphene and Two-dimensional Materials Research Conference (RPGR2017), Singapore, Sep. 19-22 (2017).
13. Akinobu Kanda, Katsuhide Yarimizu, Daisuke Yabe, Kenji Watanabe, Takashi Taniguchi, Hikari Tomori, “Search for Unusual Andreev Reflection in a Bilayer Graphene/Layered Superconductor NbSe₂ Junction”, The 9th annual Recent Progress in Graphene and Two-dimensional Materials Research Conference (RPGR2017), Singapore, Sep. 19-22 (2017).
14. Hikari Tomori, Rineka Hiraide, Youiti Ootuka, Akinobu Kanda, “Band gap formation in graphene by periodic strain”, Graphene Week 2017, Athens (Greece), Sep. 25-29 (2017).
15. Ayato Horie and Youiti Ootuka, Electrical Conduction of Folded Graphene in Magnetic Field, 9th annual Recent Progress in Graphene and Two-dimensional Materials Research Conference (RPGR2017)(2017.9.19-22、シンガポール)

(国内会議)

1. 友利ひかり, 神田晶申, 「グラフェンのひずみ効果」, グラフェン-量子ドット研究会, 茨城大学工学部 (茨城県日立市), 2017 年 4 月 12 日。
2. 園田大樹, 矢部大輔, 鍵水勝秀, 友利ひかり, 渡邊賢司, 谷口尚, 高野義彦, 神田晶申, 「劈開法で得た層状超伝導体 BSCCO 薄膜の常伝導抵抗の雰囲気依存性」, 第 78 回応用物理学会秋季学術講演会 (福岡県福岡市), 2017 年 9 月 5 日～8 日。
3. 中村和史, 友利ひかり, 神田晶申, 「顕微ラマン分光を使ったグラフェンのひずみ方位の簡単な決定法」, 第 78 回応用物理学会秋季学術講演会 (福岡県福岡市), 2017 年 9 月 5 日～8 日。
4. 矢部大輔, 鍵水勝秀, 園田大樹, 友利ひかり, 渡邊賢司, 谷口尚, 神田晶申, 「層状超伝導体 NbSe₂ 薄膜の超伝導特性のデバイス構造依存性」, 第 78 回応用物理学会秋季学術講演会 (福岡県福岡市), 2017 年 9 月 5 日～8 日。
5. 神田晶申, 友利ひかり, 星直樹, 「メゾスコピック超伝導体を用いた量子渦糸操作の可能性」, 新学術領域「ハイブリッド量子科学」 第五回領域会議, 大阪府大阪市, 2017 年 10 月 12 日～13 日。
6. 矢部大輔, 鍵水勝秀, 園田大樹, 友利ひかり, 渡邊賢司, 谷口尚, 神田晶申, 「層状超伝導体 NbSe₂ 薄膜の超伝導特性の デバイス構造依存性」, 新学術領域「ハイブリッド量子科学」 第五回領域会議, 大阪府大阪市, 2017 年 10 月 12 日～13 日。
7. 友利ひかり, 中村和史, 田中貴弘, 神田晶申, 「グラフェンにおけるひずみエンジニアリング」, 新学術領域「ハイブリッド量子科学」 第五回領域会議, 大阪府大阪市, 2017 年 10 月 12 日～13 日。
8. 神田晶申, 友利ひかり, 矢部大輔, 星直樹, 林正彦, 「メゾスコピック超伝導体における渦糸状態操作の可能性」, 第 25 回渦糸物理国内会議, 沖縄科学技術大学院大学 (沖縄県国頭郡), 11 月 27 日～29 日。
9. 神田晶申, 「原子膜積層化により形成した超伝導システムの物性探索」, 新学術領域研究「原子層科学」最終回全体会議, 東北大学理学部 (宮城県仙台市), 2018 年 2 月 19 日～21 日。
10. 矢部大輔, 鍵水勝秀, 友利ひかり, 神田晶申, 渡邊賢司, 谷口尚, 高根美武, 「2 層グラフェン/層状超伝導体 NbSe₂ 接合の超伝導近接効果」, 日本物理学会第 73 回年次大会, 東京理科大学 (千葉県野田市), 2018 年 3 月 22 日～25 日。
11. 友利ひかり, 平出璃音可, 大塚洋一, 神田晶申, 「周期ひずみによるグラフェンへのバンドギャップ生成」, 日本物理学会第 73 回年次大会, 東京理科大学 (千葉県野田市), 2018 年 3 月 22 日～25 日。

12. 梅本匡敏, 森下將史, 「グラファイト上単原子層ヘリウム薄膜の固相領域における動的応答測定」、日本物理学会 2017 年秋季大会 (岩手大学, 2017 年 9 月 23 日).
13. Chenhua Geng, Masashi Morishita, and Masaki Oshikawa, “Band structure of a thin layer of Helium-3 on graphene”, 日本物理学会 2017 年秋季大会 (岩手大学, 2017 年 9 月 23 日).
14. 梅本匡敏, 鈴木 勝, 森下將史, 「グラファイト上ヘリウム単原子層薄膜における動的応答測定」、日本物理学会第 73 回年次大会 (東京理科大学, 2018 年 3 月 25 日).
15. Chenhua Geng, Masashi Morishita, and Masaki Oshikawa, “Spectrum of honeycomb structure in monolayer Helium film on graphite”, 日本物理学会第 73 回年次大会 (東京理科大学, 2018 年 3 月 25 日).
16. 大塚洋一, 堀江彩叶, 田村啓, 表面修飾した CVD グラフェンの電気伝導 II、日本物理学会 2017 年秋季大会(2017.9.21、岩手大学)
17. 武政健一, 金信弘, 武内勇司, 飯田崇史, 永田和樹, 浅野千紗, 笠原宏太, 八木俊輔, 若狭玲那, 大塚洋一, 美馬寛, 木内健司, 新井康夫, 倉知郁生, 羽澄昌史, 石野宏和, 樹林敦子, 吉田拓生, 坂井誠, 中村昂弘, 西村航, 加藤幸弘, 池田博一, 和田武彦, 長勢晃一, 馬場俊祐, 松浦周二, 川人祥二, 志岐成友, 浮辺雅宏, 藤井剛, 大久保雅隆, Erik Ramberg, Mark Kozlovsky, Paul Rubinov, Dmitri Sergatskov, Soo-Bong Kim、COBAND 実験のための Hf-STJ の研究開発 II、日本物理学会 2017 年秋季大会(2017.9.13、宇都宮大学)
18. 近藤一史, 北原和夫, 荒木美菜子, 東辻浩夫, 大塚洋一、物理チャレンジ 2017 報告 : I 全体報告、日本物理学会 2017 年秋季大会(2017.9.23、岩手大学)
19. 大塚洋一, 石川真理代, 市原光太郎, 一宮彪彦, 井通暁, 海老崎功, 右近修治, 大嶋孝吉, 川村康文, 岸澤眞一, 毛塚博史, 小牧研一郎, 近藤泰洋, 櫻井一充, 下田正, 真梶克彦, 末元徹, 鈴木功, 瀬川勇三郎, 武士敬一, 遠山潤志, 長谷川修司, 林壮一, 深津晋, 松本益明, 松本悠, 味野道信、物理チャレンジ 2017 報告:IV 第 2 チャレンジ実験問題、日本物理学会 2017 年秋季大会(2017.9.23、岩手大学)
20. 大塚洋一, 堀江彩叶、低温・高磁場中における折り曲げグラフェンの電気伝導、日本物理学会第 73 回年次大会 (2018.3.22、東京理科大野田キャンパス)
21. 武政健一, 金信弘, 武内勇司, 飯田崇史, 永田和樹, 浅野千紗, 若狭玲那, 笠島誠嘉, 菅野洋信, 大塚洋一, 美馬寛, 新井康夫, 倉知郁生, 羽澄昌史, 石野宏和, 樹林敦子, 吉田拓生, 坂井誠, 中村昂弘, 西村航, 加藤幸弘, 池田博一, 和田武彦, 長勢晃一, 松浦周二, 川人祥二, 志岐成友, 浮辺雅宏, 藤井剛, 大久保雅隆, Erik Ramberg, Paul Rubinov, Dmitri Sergatskov, Soo-Bong Kim, 木内健司、COBAND 実験のための Hf-STJ の研究開発 III、日本物理学会第 73 回年次大会 (2018.3.25、東京理科大野田キャンパス)
22. 大塚洋一, 堀江彩叶, 低温強磁場中における折り曲げグラフェンの電気伝導、新学術

領域研究「原子層科学」最終回全体会議(2018.2.20、東北大学)

<外部資金>

1. 神田晶申：科学研究費補助金 新学術領域研究 「原子層積層化により形成した超伝導システムの物性探索」(H28～H29)、直接経費 280 万円
2. 神田晶申：科学研究費補助金 新学術領域研究 「電荷／スピンハイブリッド量子科学の研究」(H27～H31)、直接経費 590 万円
3. 神田晶申：(共同研究受入) 戦略的創造研究推進事業さきがけ(科学技術振興機構)「ひずみ誘起ゲージ場を用いた単原子層膜の伝導制御とエレクトロニクス応用」(友利ひかり)(H26～H29)、直接経費 490 万円
4. 大塚洋一：科学研究費補助金 新学術領域研究「折り畳みグラフェンを利用した階段型磁場中の二次元電子系の電気伝導の研究」(H28～H29)、直接経費 100 万円
5. 森下將史：科学研究費補助金 基盤研究(C)「2次元量子固体の構造操作による量子現象の発現と解明」(H28～H30)、直接経費 120 万円

IX-6. 構造科学グループ

教授 西堀 英治

教授 Iversen, Bo (海外教育研究ユニット招致)

助教 笠井 秀隆

助教 Hathwar, Venkatesha Rama (海外教育研究ユニット招致)

大学院生 6名

【 1 】 原子のシート間にはたらく相互作用の観測に成功 ～層状物質の機能発現に関与する電子分布を可視化する～

近年、炭素原子のシートであるグラフェンに代表されるような、原子のシートやそれらが積み重なった層状物質が注目され、研究が盛んに行われている。これらの物質の重要な性質の一つは、「ファンデルワールス力」と呼ばれる原子のシートとシート間の弱い相互作用であり。この力が弱いために、黒鉛のグラファイトからスコッチテープで1枚の原子からなるシートであるグラフェンをはがすことができる。また、異なる原子のシートを積み重ねたり、原子シートの中に原子や分子を挟んで、様々な機能を発現させることもできる。こうした材料設計のためには、原子のシート間の相互作用を正確に予測・観測することが重要である。

理論計算は、現代の物質の設計、機能予測に不可欠であり。中でも、物質科学において現在広く使われている密度汎関数理論は、基底状態の電子密度の計算によって多くの物質の性質の予測に成功しており、例えば、グラフェンが筒状に丸まったカーボンナノチューブの原子配列によって電気的性質が異なることを、実験より先に予測している。密度汎関数理論は汎関数の改善によって精度が向上し、実験データ解析に理論計算で得たパラメータを用いるほどになってきている。

しかしながら、現状の理論計算方法は、ファンデルワールス力の予測には適していない。シート状物質においてファンデルワールス力が生じる原因は、電子分布の瞬間的なゆらぎが離れた原子の電子分布の偏りを誘起することが1つ挙げられる。こうした瞬間的なゆらぎによる長距離の電子相関は、安定した電子の分布に基づく理論では予測が難しく、いまだ手法の開発が続けられている。また、開発した手法の成否は、実験による証明が望ましいものの、このような弱い力を原子や電子のスケールで観測した例はまだ報告されておらず、現時点では、シート間の距離や、シートのはがしやすさから推察するにとどまっている。

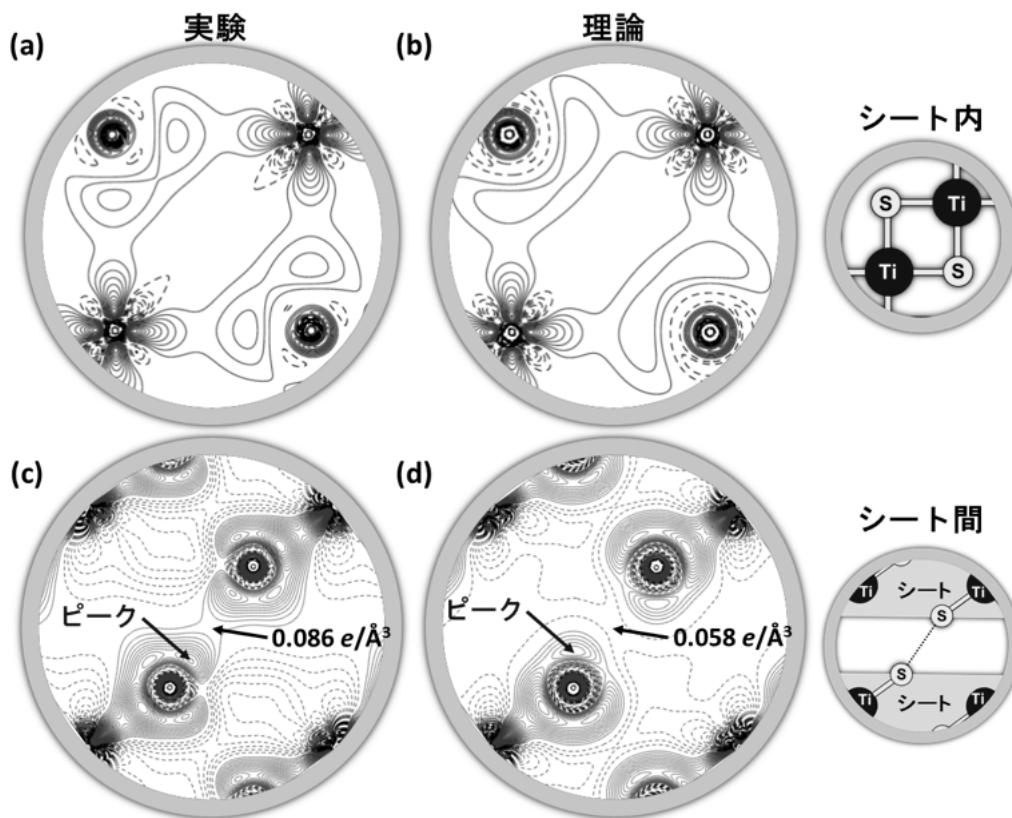
本研究では、世界最高性能の放射光を発生することができる SPring-8 の放射光により、原子のシート間にはたらく相互作用の観測を行った。

大型放射光施設 SPring-8 の単結晶構造解析ビームライン BL02B1 の大型湾曲イメージングプレートカメラを用いて、波長 0.248\AA の高エネルギーX線により、層状物質 TiS_2 の単結晶X線回折データを測定した。多極子展開解析を用いて TiS_2 全体の電子密度分布を観測し、トポロジカル解析などの解析手法により化学結合を評価した。また、観測値を検証するため

に、理論計算でも TiS_2 の電子密度分布を求め、観測値と同じ手法で解析した。

図 1 に(a)実験と(b)理論計算で観測されたシートを構成する Ti 原子と S 原子の電子の分布を示す。Ti 原子から S 原子の方向に電子のピークがあり、S 原子から Ti 原子の方向にも電子のピークがある。このピークは実験と理論の両方で存在する。ピークとピークの間の原子間の鞍点の電子密度の値は観測値が $0.429 \text{ e}/\text{\AA}^3$ で理論計算が $0.421 \text{ e}/\text{\AA}^3$ であり、高い精度で一致した。このことから、観測した電子の分布が 0.1 立方ナノメートルの空間中に電子 1 個の精度であることと、理論予測の正確性が裏付けられた。

図 1 に(c)実験と(d)理論計算で観測されたシート間の電子分布を示す。実験にはシート間の S 原子の間に電子のピークがある。一方、理論ではシート間の S 原子の間から少しずれたところにピークがある。原子間の鞍点の電子密度の値は観測値が $0.086 \text{ e}/\text{\AA}^3$ で理論計算が $0.058 \text{ e}/\text{\AA}^3$ であり、その差は $0.03 \text{ e}/\text{\AA}^3$ である。実験の方が理論よりもシート間の S 原子同士の電子のつながりが強いことがわかった。また、トポロジカル解析からは S 原子の電荷の偏りが 10 倍異なることも観測された。



本研究は、理論計算が難しい、原子のシート間の弱い相互作用を精密に観測することに成功した。ファンデルワールス力などの弱い相互作用を予測する計算方法は、これまで、計算結果を検証するための実験データが存在しなかったために、開発が進んでいなかった。今回観測した電子分布は、そのような理論計算法の検証に有用な実験データとなり得る。

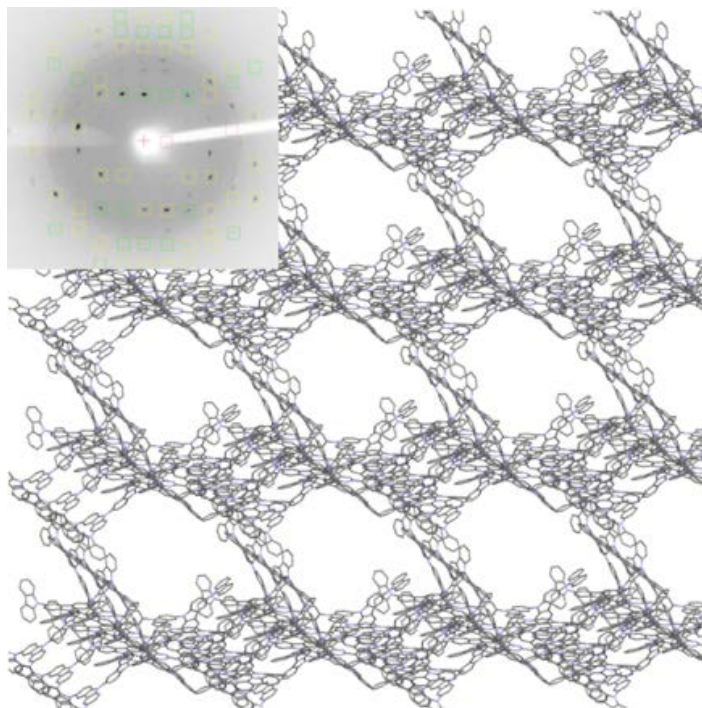
本研究は Nature Materials 誌に掲載され、筑波大学、SPring-8 の共同でプレスリリースを行った。

【 2 】 溶媒蒸気の識別が可能な新しい分子集合体材料を作成 ―取り込む分子に応じて蛍光が大きく変化する多孔性 dendrimer 結晶―

蛍光プローブは、神経ガスや重金属イオン、蛋白質、遺伝物質など、さまざまな分子の識別に用いられる。蛍光センシングは、蛍光消光、発現、強度変化、励起エネルギー移動型などのタイプに分けられる。蛍光発現型で、固体状態で使用可能な蛍光センサーは実用的に重要である。発光色変化を伴う蛍光センシングは、複数の検体を識別可能であることから、その特性をもつ材料開発が進められている。特に、表面積が大きくてナノメートルサイズのチャンネルを有する多孔性材料が、ガスや蒸気のセンシングで期待されている。

物質工学域の山本洋平教授の研究グループは、 π 共役 dendrimer とよばれる巨大分子から、多孔質の結晶性ファイバーを作成した。dendrimer のコア部位には電子受容性のトリアジンが、シェル部位には電子供与性のカルバゾール dendron が用いられている。この分子は、熱活性化遅延蛍光を示し、塗布型有機 EL 素子のホール輸送層／発光層の応用が検討されている。溶液中における自己組織化挙動を検討した結果、蒸気拡散法によりファイバー状の構造体を形成することが分かった。

ファイバーの単結晶および粉末 X 線回折を SPring-8 の BL02B1、BL02B2、BL26B2 の複数のビームラインを使用して行った。その結果、ファイバーは長軸方向に 1 次元のナノサイズのチャンネルを有することが明らかになった。



窒素ガス吸着測定より、このファイバーは 650 m²/g 以上の BET 表面積を示した。この多孔性ファイバーを様々な溶媒蒸気に晒して蛍光観察を行ったところ、ほとんどの溶媒蒸気で蛍光発現が観測され、溶媒の種類により色が変わることがわかった。

本研究は Chem. Comm 誌に掲載され、筑波大学でプレスリリースが行われた。

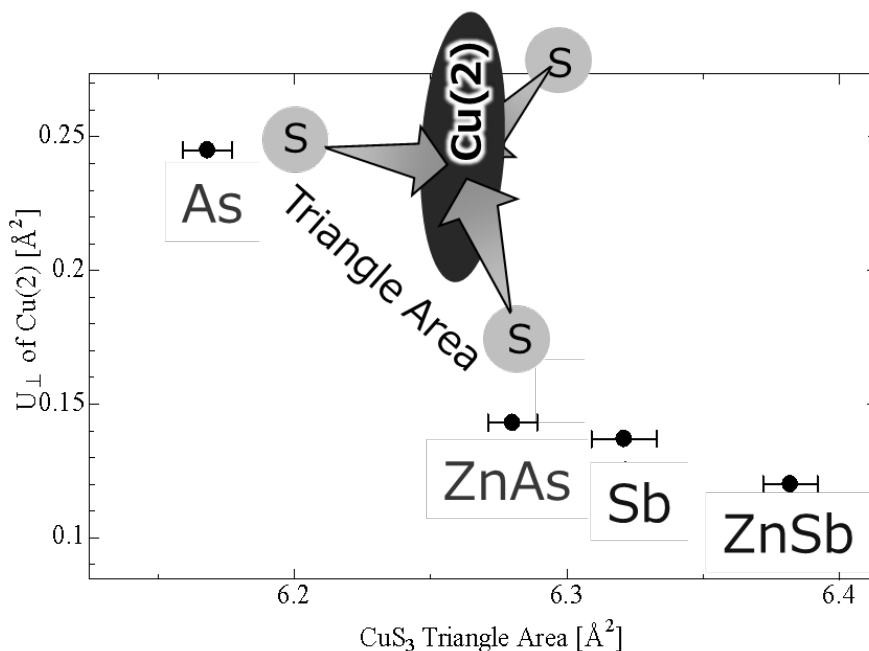
【 3 】 高効率な熱電変換を可能にする新しいタイプの大振幅原子振動の検出

エネルギー問題の解決法として、光・熱・振動などを利用する発電技術の研究開発が盛んに行われている。熱電発電は、熱電材料（固体）を用いて未利用廃熱を電力として回収する技術であり、省スペース・長寿命などの長所がある。高効率な熱電発電には、ゼーベック係が大きく、電気伝導率は高く、熱伝導率は低い材料が必要ある。

産総研と北陸先端科学技術大学院大学、広島大、九大、理研などのグループは天然に存在する硫化銅鉱物のテトラヘドライト ($\text{Cu}_{12}\text{Sb}_4\text{S}_{13}$) が高効率な熱電材料であることを発見した。さらに、この材料ではイオウ原子からなる三角形内の銅原子が面外方向にラットリングすることが低い熱伝導率の起源であると提案した。しかし、何故ラットリングが生じるのか原因は分からなかった。

今回、4種類のテトラヘドライト $\text{Cu}_{12}\text{Sb}_4\text{S}_{13}$, $\text{Cu}_{10}\text{Zn}_2\text{Sb}_4\text{S}_{13}$, $\text{Cu}_{12}\text{As}_4\text{S}_{13}$, $\text{Cu}_{10}\text{Zn}_2\text{As}_4\text{S}_{13}$ を合成し、それらの結晶構造を大型放射光施設 SPring-8 の BL02B2 における粉末X線回折実験で、格子振動を大強度陽子加速器施設 J-PARC の BL14 AMATERAS における粉末中性子非弾性散乱実験で調べた。さらに、電子状態を第一原理計算で調べた。

これらの実験から、すべての試料で Cu 原子は S 原子の三角形 (S3 三角形) に垂直な方向にラットリングし、振幅とエネルギーが試料ごとに異なることが分かった。結晶構造パラメーターとラットリングの振幅を比較したところ、S3 三角形の面積が小さいほど、振幅の大きさを表す原子変位パラメーターが大きいことが分かった。また、S3 三角形の面積が小さいほど、ラットリングエネルギーが下がることも分かった。これらの結果から、テトラヘドライトにおける Cu 原子のラットリングは、S3 三角形内で化学的圧力を受けた Cu 原子が三角形の面外に逃れようとして生じたものと判明した。



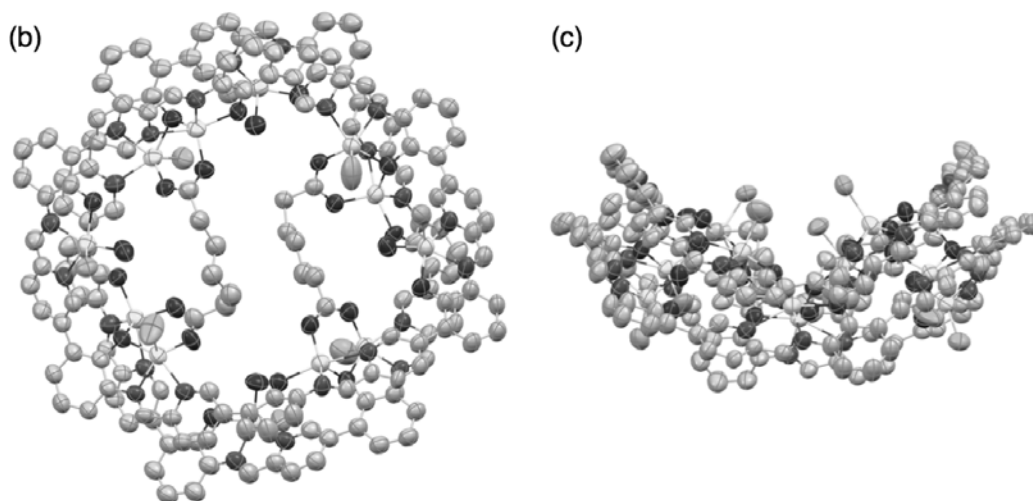
また、Cu 原子の振幅が大きくなると、振動の先に位置する Sb 原子または As 原子の振幅も大きくなることも観測された。第一原理計算により Sb 原子や As 原子がローンペアを持つことが知られている。このローンペアを介して Cu 原子のラットリングが Sb および As 原子を揺らしていると考えられる。以上のように、Cu 原子のラットリングとローンペアを介した原子振動によって格子振動が乱され熱が散乱されることが、テトラヘドライトの熱伝導率が低いことの原因と考えられる。

この研究は *Advanced Materials* 誌に掲載され、JST でプレスリリースが行われた。

【 4 】多数の金属で分子を捕まえる大環状分子の構造決定

他の分子を捕まえる能力を持つ分子はホスト分子と呼ばれ捕まえる分子（ゲスト分子）に合う、形・大きさのポケットを持つことが知られている。適切な設計により、狙ったゲスト分子との特異的な相互作用を生み出すことができ、物質の選択的な分離や反応、化学センサー、薬物送達システムなどに利用されている。天然および人工のホスト分子の多くは、水素結合など弱い相互作用を分子認識に使用する。より強い結合や相互作用を組み合わせれば精密な分子認識が可能になる反面、反応性が高くなり合成が困難になる。

筑波大学数理物質系化学域の鍋島教授のグループは *o*-アミノフェノールと 2-ホルミルピリジンから作られる 3 座のキレート配位部位 pap を 6 つもつ大環状配位子 hexapap を設計・合成した。この大型分子の構造決定を SPring-8 の生体高分子用ビームライン BL26B2 で行った。



その結果、明らかにした構造から大環状分子 Zn-hexapap は、特定の長さのジカルボン酸を配位結合で捕まえると、双極放物面状に歪んだ形で 2 分子が積み重なる興味深い構造をつくることがわかった。元の Zn-hexapap は対称性の高い分子で六角形とみなすことができ、6 つの亜鉛原子はそれぞれ同一の結合状態にある。波状に積層した構造を作ること、Zn-hexapap の亜鉛原子は分子内で 3 種類の異なる結合状態におかれ、亜鉛原子はそれぞれ異なった様式でジカルボン酸分子と相互作用することができることが分かった。Zn-hexapap の 2 量体の内孔には 12 個の亜鉛と 20 個の結合可能な配位サイトが集積されていた。2 分

子のジカルボン酸は、そのうち特定の亜鉛原子の配位サイトに選択的に結合していた。

この研究は、Nature Communications に掲載され、2017 年 7 月に筑波大学よりプレスリリースされた。

【 5 】 SPring-8 パートナーユーザー活動

SPring-8 において、粉末回折ビームライン BL02B2 および単結晶 X 線回折ビームライン BL02B1 でパートナーユーザーに指定され活動を行っている。装置の高度化とユーザー利用の拡大が主目的である。本年度は 2015 年より立ち上げに協力してきた粉末回折ビームラインにおいて、新しいピクセル型半導体検出器 MYTHEN の立ち上げに一区切りをつけ、論文発表を行った。

単結晶 BL では、今年度で最終年度であった。昨年筑波大学でワークショップを行い、意見を集約して施設に要求してきた新しい半導体検出器の納入が決定した。このため、単結晶のパートナーユーザー課題をさらに 1 年延長することになった。来年度 1 年間の計画を施設に提出した。

【 6 】 海外教育研究ユニット招致

デンマーク・オーフス大学材料結晶学センター (Center for Materials Crystallography: CMC) のセンター長 Bo Iversen 教授を筑波大学海外教育研究ユニット招致の PI として承知し研究を進めている。本年度 7 月に笠井秀隆助教が国際テニユアトラック教員としての派遣期間を終了し日本に戻った。笠井は派遣期間中に放射光施設の装置の立ち上げ、ドイツ Petra-III での超臨界ナノ材料合成その場観察、構造研究、電子密度研究など多くの研究成果を上げた。

今年も、SPring-8 のパートナーユーザー活動を始め多くの国際連携を行った。今年度の 10 月にはデンマークで CMC の Annual Meeting が開催され、西堀、笠井、出口（大学院生）、佐々木（大学院生）が参加した。西堀、笠井、出口は口頭発表を行い CMC のメンバーとの親交を深めた。また、CMC で進められている超臨界ナノ材料合成その場観察のプロジェクトを日本で立ち上げ、開始した。

< 論文 >

(査読論文)

1. Sae Nakajima, Ken Albrecht, Soh Kushida, Eiji Nishibori, Takashi Kitao, Takashi Uemura, Kimihisa Yamamoto, Uwe H. F. Bunz, Yohei Yamamoto. A fluorescent microporous crystalline dendrimer discriminates vapour molecules. Chemical Communications 54, 2534-2537, 2018.
2. H. Kasai, K. Tolborg, M. Sist, J. Zhang, V. R. Hathwar, M. Ø.Filsø, S. Cenedese, K. Sugimoto, J. Overgaard, E. Nishibori and B. B. Iversen. X-ray electron density investigation of chemical bonding in van der Waals materials, Nat. Mater.,17, 249, 2018. Feb.
3. K. Suekuni, C. H. Lee, H. I. Tanaka, E. Nishibori, A. Nakamura, H. Kasai, H. Mori, H. Usui, M. Ochi, T. Hasegawa, M. Nakamura, S. Ohira-Kawamura, T. Kikuchi, K. Kaneko, H. Nishiate, K.

- Hashikuni, Y. Kosaka, K. Kuroki and T. Takabatake. Retreat from Stress: Rattling in a Planar Coordination. *Adv. Mater.*, inpress.
4. T. Usuki, M. Shimada, Y. Yamanoi, T. Ohto, H. Tada, H. Kasai, E. Nishibori, and H. Nishihara. Aggregation-Induced Emission Enhancement from Disilane-Bridged Donor–Acceptor–Donor Luminogens Based on the Triarylamine Functionality. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, in press.
 5. M. Fugel, D. Jayatilaka, E. Hupf, J. Overgaard, V. R. Hathwar, P. Macchi, M. J. Turner, J. A. K. Howard, O. V. Dolomanov, H. Puschmann, B. B. Iversen, H-B. Burgi, S. Grabowsky, Probing the accuracy and precision of Hirshfeld atom refinement with HART interfaced with Olex2. *IUCRJ*, 5, 32, 2018
 6. H. Kasai, L. Song, H.L. Andersen, H. Yin & B.B. Iversen. Multi-temperature structure of thermoelectric Mg₂Si and Mg₂Sn. *Acta Crystallographia B* **73**, 1158, 2017
 7. Hiroaki Nishino, Takeshi Fujita, Nguyen Thanh Cuong, Satoshi Tominaka, Masahiro Miyauchi, Soshi Iimura, Akihiko Hirata, Naoto Umezawa, Susumu Okada, Eiji Nishibori, Asahi Fujino, Tomohiro Fujimori, Shin-ichi Ito, Junji Nakamura, Hideo Hosono and Takahiro Kondo. Formation and Characterization of Hydrogen Boride Sheets Derived from MgB₂ by Cation Exchange. *J. Am. Chem. Soc.* 139, 13761-13769, 2017.
 8. K. Tolborg, M. R. V. Jørgensen, S. Christensen, H. Kasai, J. Becker, P. Walter, A.-C. Dippel, J. Als-Nielsen & Bo B. Iversen, Accurate charge densities from powder X-ray diffraction - a new version of the Aarhus vacuum imaging-plate diffractometer *Acta Crystallogr. B* **73**, 521, 2017.
 9. Takamasa Tsukamoto, Risa Aoki, Ryota Sakamoto, Ryojun Toyoda, Masaki Shimada, Yohei Hattori, Yasutaka Kitagawa, Eiji Nishibori, Masayoshi Nakano and Hiroshi Nishihara. Mechano-, thermo-, solvato-, and vapochromism in bis(acetato- κ^{1O}) [4'-(4-(diphenylamino)phenyl)-] (2,2':6',2''-terpyridine- κ^3N, N', N'')zinc(II) and its polymer. *Chem. Comm.* 53, 9805-9808, 2017.
 10. Shogo Kawaguchi, Michitaka Takemoto, Keiichi Osaka, Eiji Nishibori, Chikako Moriyoshi, Yoshiki Kubota, Yoshihiro Kuroiwa, and Kuniyoshi Sugimoto. High-throughput powder diffraction measurement system consisting of multiple MYTHEN detectors at beamline BL02B2 of SPring-8. *Rev. Sci. Instr.* 88, 085111, 2017.
 11. Shunsuke Kitou, Tatsuya Fujii, Tadashi Kawamoto, Naoyuki Katayama, Sachiko Maki, Eiji Nishibori, Kuniyoshi Sugimoto, Masaki Takata, Toshikazu Nakamura, and Hiroshi Sawa. Successive Dimensional Transition in (TMTTF)₂PF₆ Revealed by Synchrotron X-ray Diffraction. *Phys. Rev. Lett.* 119, 065701, 2017.
 12. T. Nakamura, Y. Kaneko, E. Nishibori, T. Nabeshima, Molecular recognition by multiple metal coordination inside wavy-stacked macrocycles. *Nature Communications*, 8, 129, 2017 doi: 10.1038/s41467-017-00076-8.2017

13. M. Tsuchiya, R. Sakamoto, M. Shimada, Y. Yamanoi, Y. Hattori, K. Sugimoto, E. Nishibori, H. Nishihara, beta-IminoBODIPY oligomers: facilely accessible pi-conjugated luminescent BODIPY arrays. Chem. Comm. 53, 3509-7512, 2017

<国際会議>

1. Eiji Nishibori, "Accurate structural studies of functional materials using synchrotron radiation X-ray powder diffraction" The International Conference on High-Performance Ceramics (CICC-10), Crowne Plaza Nanchang Riverside, Nanchang, China. 4-7, Nov. 2017 (**Plenary lectures**)
2. Eiji Nishibori, " Observation of π electron in metal hexaboride through X-ray charge density ". 2nd International Conference on Applied Crystallography, Hilton Chicago North Shore Conference Center, Chicago, USA, October 16-17, 2017
3. Eiji Nishibori, " High resolution charge density of metal hexaborides." 24th Congress and General Assembly of the International Union of Crystallography, Hyderabad International Convention Centre, Hyderabad, India. 21-28 August 2017.
4. Yuka Deguchi, "Accurate structures of diamond under high- pressure and temperature." 24th Congress and General Assembly of the International Union of Crystallography, Hyderabad International Convention Centre, Hyderabad, India. 21-28 August 2017.
5. Hidetaka Kasai, "Charge density study of van der waals-layered MoS₂ and TiS₂" 24th Congress and General Assembly of the International Union of Crystallography, Hyderabad International Convention Centre, Hyderabad, India. 21-28 August 2017.
6. Tomoaki Sasaki, "Ultra-high reciprocal resolution X-ray diffraction of Al and Cu" 24th Congress and General Assembly of the International Union of Crystallography, Hyderabad International Convention Centre, Hyderabad, India. 21-28 August 2017.
7. Yuka Deguchi, "High pressure studies of Diamond", Center for Materials Crystallography, Annual Meeting, Aarhus University, DK-8000 Aarhus C, Denmark, October 2nd – 3rd, 2017
8. Eiji Nishibori, "Accurate structural studies using SPring-8 data.", Center for Materials Crystallography, Annual Meeting, Aarhus University, DK-8000 Aarhus C, Denmark, October 2nd – 3rd, 2017
9. Hidetaka Kasai, "Charge density of ZnSb", Center for Materials Crystallography, Annual Meeting, Aarhus University, DK-8000 Aarhus C, Denmark, October 2nd – 3rd, 2017
10. Hidetaka Kasai, "X-ray Electron Density Investigation of van der Waals Gap Interaction in TiS₂", APS March Meeting 2018, Los Angeles Convention Center (LACC), Los Angeles, CA, March 5-9, 2018

<国内会議>

1. Eiji Nishibori, Bo Iversen et al, "Application of synchrotron radiation in materials crystallography", SPring-8 シンポジウム 2017, 広島大学 東千田未来創生センター, 平成 29 年 9 月 4-5 日
2. 笠井秀隆, X-ray Electron Density Investigation of Weak Interlayer Interaction in TiS₂, 平成 29 年度日本結晶学会年会、JMS アステールプラザ (広島市) 平成 29 年 11 月 23-24 日

3. 出口裕佳”量子結晶学によるダイヤモンドの精密構造決定” 平成 29 年度日本結晶学会年会、JMS アステールプラザ（広島市）平成 29 年 11 月 23-24 日
4. 中村篤”熱電材料テトラヘドライト $\text{Cu}_{12}\text{Sb}_4\text{S}_{13}$ の Zn 置換によるディスオーダー構造” 平成 29 年度日本結晶学会年会、JMS アステールプラザ（広島市）平成 29 年 11 月 23-24 日
5. Venkatesha Hathwar, “Unravelling low-temperature crystal structures of thermoelectric materials, $\text{Cu}_{12}\text{Sb}_4\text{S}_{13}$ and $\text{Cu}_{12}\text{As}_4\text{S}_{13}$ ”, 平成 29 年度日本結晶学会年会、JMS アステールプラザ（広島市）平成 29 年 11 月 23-24 日
6. 西堀 英治 “放射光 X 線粉末回折による確度の高い構造因子の計測および未知構造決定” 平成 29 年度日本結晶学会年会、JMS アステールプラザ（広島市）平成 29 年 11 月 23-24 日（学術賞受賞講演）
7. 笠井秀隆 “超臨界水熱合成によるナノ粒子生成のその場観察” 第 31 回放射光学会年会放射光科学合同シンポジウム つくば国際会議場、つくば、平成 30 年 1 月 10 日

<修士論文>

- 1.小沢帆太郎：「X 線散乱に基づくナノ粒子の原子配列解析法の開発」（数理物質科学研究科物理学専攻，修士論文，2018.3）
- 2.唐津秀一：「スキルミオン発現物質 Cu_2OSeO_3 の相転移と結晶構造」（数理物質科学研究科物理学専攻，修士論文，2018.3）
- 3.中村篤：「硫化銅鉍物熱電材料 $\text{Cu}_{12}(\text{Sb}/\text{As})_4\text{S}_{13}$ に Zn 置換がもたらす構造物性相関」（数理物質科学研究科物理学専攻，修士論文，2018.3）

<外部資金>

1. 平成 28 年～平成 29 年度 公益財団法人カシオ科学振興財団 研究助成「粒子内原子配列の実空間モデリングによる階層構造科学の創成」500 万円 代表者 西堀 英治
2. 平成 28 年～平成 29 年度 公益財団法人住友電工グループ社会貢献基金 「金属材料の電子密度分布からの機能構造相関抽出法の開発」110 万円 代表者 西堀 英治
3. 平成 28 年～平成 29 年度 科学研究費補助金・挑戦的萌芽研究「弾性・非弾性散乱データ同時解析による計測物質科学の創成」270 万円 代表者 西堀 英治
4. 平成 29 年～平成 30 年度 日本学術振興会・二国間交流事業共同研究「先端量子ビームによるエネルギー材料の構造科学研究」500 万円 代表者 西堀 英治
5. 平成 29 年～平成 30 年度 科学研究費補助金・新学術領域研究(公募研究)「先端 X 線利用による回折結晶学の再構築」290 万円 代表者 西堀 英治

<受賞>

1. 平成 29 年 11 月 23 日 日本結晶学会学術賞「放射光 X 線粉末回折による確度の高い構造因子の計測および未知構造決定」 西堀 英治

X プラズマ研究グループ

教授	中嶋洋輔、坂本瑞樹
准教授	吉川正志、假家 強、南龍太郎
講師	小波蔵純子、平田真史、沼倉友晴
助教	池添竜也
シニアスタッフ	大川和夫
大学院生(物理学専攻)	20名
学群学生(物理学類)	8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、今井 剛、東郷 訓、飯島貴朗

研究協力者

技術専門官	杉山昭彦
技術専門職員	和所保規、遠藤洋一、嶋 頼子、千勝雅之
研究支援推進員	岡崎 昇
大学院生(電子・物理工学)	2名
学群学生(応用理工学類)	2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、下記の様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、数理工学科学研究科の中期目標・中期計画の推進はもとより、国立大学法人筑波大学第Ⅲ期中期目標・中期計画の「4 世界トップレベルの研究の推進に向けての目標を達成するための措置」として、第Ⅱ期に引き続き明記されていることは、本学のプラズマ研究の歴史を拓いた当該グループとしても、その責務を重く受け止め、応分の貢献を行うことを目指すことは、法人化後の一貫した研究姿勢である。

また、上記「筑波大学 中期計画」等に基づき、平成16年度から開始した双方向型共同研究の枠組みを背景に、第Ⅲ期中期計画においても、核融合科学研究所と、筑波大学、京都大学、大阪大学、九州大学の4大学を中心に、新たに加わった富山大学、更に講座単位の各大学との共同研究を積極的に推進し、普遍性の高い学術成果と、それに基づく核融合実用への基盤研究を進めており、第Ⅲ期中期計画の2年目である平成29年度においても、更に双方向型共同研究の深化と国内外の共同研究の強化に務めている。

学内にあっては、プラズマ研究センターをはじめとする連携協力研究・教育、その他の学内の関連グループとの共同研究、更には国内・国外のプラズマ研究グループとの緊密な連携・研究協力の基に、顕著な成果の創造・推進を図ることを基本理念・基本目標・基本方針に掲げ、教職員学生一丸となり、日夜努力を積み重ねている。

【2】プラズマ研究の研究目的と意義・位置づけ

物理学専攻のプラズマ実験グループが主体となって研究しているプラズマ研究センターでは、「プラズマ物理学、特に電位／電場によるプラズマ閉じ込めの向上、並びにプラズマの高性能化に係る教育・研究」等を行うことが、中期計画・新しい筑波大学規則・規定に則した研究目的の柱である。本研究目的は、核融合実用に必要不可欠で喫緊の課題である「数億度の高性能プラズマと常温壁の両立の理工学研究」を行い、プラズマ物理・核融合研究の進展に本質的且つ普遍的な貢献を行うという、プラズマ核融合分野全体に広く役立つ、重要な位置づけを持つ。

この研究は、国際熱核融合実験炉 ITER の心臓部である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の制御、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の解決という意義・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、ミラー端部における電子フローの一部を制御し、これによりプラズマ内部の電位／電場を自在に形成・制御が可能、また、ミラー特有の端損失の制御という、「ミラーにしかできないこと、ミラーならば他形式プラズマ装置にも普遍的な物理機構解明を含めてできること」、こうしたミラー装置独自の特色を活かした研究を推進している。

これらの研究を具体的に推進するために、ジャイロトロンやビームプローブといった世界最先端の加熱機器や計測機器の開発研究を進めるとともに、それらを用いた研究により、上記で述べた研究課題に関する物理機構解明に不可欠な、プラズマ半径方向 (径方向) の電位分布制御、電場分布の精密な測定による輸送研究、また、ミラー端部で発生する高熱流束によるダイバータ模擬研究が可能となり、学術普遍性の高い極めて重要な本研究課題の更なる究明を進めている。

当プラズマグループの電位閉じ込めの研究は、インスブルックで開催された国際連合の原子力部門である国際原子力機関 (IAEA) の「第7回プラズマ物理並びに制御核融合研究に関する国際会議」において、当研究グループが世界で初めて電位閉じ込めの有効性を実証した、先駆的な実績を持つテーマであることは、斯界では広く知られており、かつて米国のサイエンス誌の表紙を筑波大学のガンマ6装置が飾ったように、先駆的な電位閉じ込め研究の成果を挙げてきた。また、最近では、電位制御の強力なツールであるミリ波帯のマイクロ波源、ジャイロトロンの開発研究も進展し、当センターのみならず、核融合科学研究所の大型ヘリカル装置 (LHD) にも大きく貢献し、国際原子力機関 (IAEA) の「第23回～26回核融合エネルギー国際会議」で高く評価され、九州大学やプリンストン大学など、他大学や海外との共同研究へと発展しつつある。また、これらの成果の新展開とも言える境界プラズマの研究では、ITERの定常熱流束密度レベルを達成し、「第24回核融合エネルギー国際会議」等で斯界の注目を浴び、これを応用した共同研究が大きく進展している。

国際熱核融合実験炉ITERをはじめ、トカマク・ヘリカル型プラズマ閉じ込め形式をも含む、核融合実用に必要不可欠な研究課題という意義・位置づけを持った研究課題を、プラズマグループは推進し、発展・展開を見ている。すなわち、輸送障壁形成の物理機構の解明と境界プラズマ物理の解明は、核融合装置の実用的経済的なコンパクト化・高信頼化・核融合プラズマの定常制御のために、必要欠くべからざる研究内容であるという意義を持つばかりでなく、プラズマ特性の学術研究・応用研究という観点からも、大学の研究の在り方として最適な学術研究内容とその意義、研究規模であると位置づけられる。

【3】研究成果の概要

(1) はじめに

物理学域プラズマグループでは、大学の第II期中期目標・中期計画からの方針に沿って双方向型共同研究を充実し、大型タンデムミラー装置 GAMMA 10/PDX を用いた高性能プ

プラズマと低壁熱負荷の両立をめざして「開放端磁場と電位／電場効果を活かしたプラズマ輸送制御と境界プラズマ現象の解明研究」を進展させている。第Ⅲ期の２年度である平成 29 年度より、双方向型共同研究の更なる質的向上と高度化を目指し、原型炉へ向けた研究として、開放端プラズマとなるトラス系のスクレップオフ層やダイバータ・プラズマを模擬するとともに、境界プラズマの様々な現象、物理機構解明とそれを通じた熱負荷の軽減法とプラズマ壁相互作用の研究を実施している。平成 28 年度までに、ITER の定常熱負荷に相当する 10 MW/m^2 を大幅に上回る 30 MW/m^2 の端損失熱流束を達成し、端損失プラズマ流の特性を詳細に調べるとともに、本格的なダイバータ模擬実験に向けた V 字ターゲット板を持つ閉構造ダイバータ模擬モジュール（D モジュール）の実験を開始し、水素ガスや希ガスの入射による非接触プラズマ生成・制御の実験を進展させてきた。GAMMA 10/PDX が、これまでにダイバータ模擬の基礎実験を担ってきた小型線形装置と比べて特長的な点は、高磁場下において高温のイオン束を発生・制御できることにあり、この特長を活かしてダイバータ開発における最大の課題である非接触プラズマの制御に関するイオン温度依存性等のデータ取得が可能となっている。これらの模擬実験の基盤となるプラズマ生成に関して、主として用いられる ICRF 加熱アンテナ系やガス入射方法を工夫することにより、端損失イオン束増大の実験を進めている。また、小型のプラズマ生成装置 APSEDAS を用いてプラズマと材料との相互作用に関する研究を進め、ダイバータプラズマに匹敵する低エネルギー・高フラックスのプラズマを材料に照射して、材料表面改質や材料の水素同位体吸蔵に関する研究を進めている。

プラズマグループのもう一つの特長である大電力ジャイロトロンに関して、14 GHz から 300 GHz 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物理学研究所とのセンター間連携を推進し、同研究所の球状トカマク装置 QUEST での電流駆動実験に大きく貢献してきた。また、米国プリンストン大学との国際共同研究に関しても、着実に進展させている。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の研究と並行して、京都大学、九州大学との連携を進めている。

平成 29 年度では、これまで精力的に進めてきたダイバータ模擬実験とジャイロトロン開発研究という大きな 2 つの柱を元に、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、各大学の研究者の多様な視点、豊富な経験と双方向型共同研究の特徴を活かした研究を進めつつ、核融合炉に向けた必須かつ緊急の課題解決の為の研究を進展させることを本研究の目的とした。

（２）ダイバータ模擬実験

図 1 は、GAMMA 10/PDX 全体図、西エンド部の真空容器と内部に設置された昇降式のダイバータ模擬実験モジュール（D モジュール）の概略図を示している。図 2 の写真で示すように、SUS 製の容器の前面から端損失プラズマ流が導入される D モジュール内部には、V 字型の 0.2 mm 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。ターゲット板には、電子温度、密度計測のための多チャンネル静電プローブや多チャンネルカロリメーターが取り付けられている。また、図

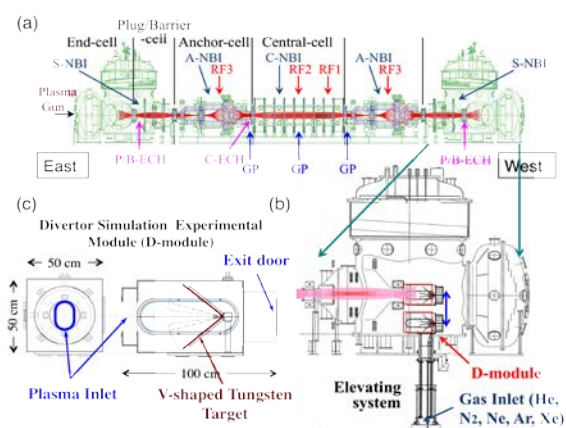


図 1 (a) GAMMA 10/PDX 全体図，(b) 西側エンド部に設置されたダイバータ模擬実験モジュール（D モジュール）の模式図。昇降機構により、従来の配位でのミラー実験が可能である。(c) D モジュールの概略図。

中に示したように、水素ガスや希ガス導入等による放射冷却や不純物輸送などの周辺プラズマを模擬したプラズマ研究や PWI 研究が、高速イオンゲージ (ASDEX Gauge) や各種分光器、高速カメラ等により制御された形で可能となっている。

平成 26 年度から 28 年度にかけて、放射冷却用の不純物ガスとして様々な希ガスや新たに窒素ガスを用い、それぞれのプラズマ冷却効果や非接触プラズマ形成を目差したイオン束、熱流束の低減効果について検証した。今年度は、非接触プラズマに対するプラズマ追加熱系の影響評価を行った。図 3 は、東プラグ ECH を用いた実験の概略図を示す。実験では、Ar, Kr, Xe ガスにより非接触プラズマ状態を形成した後、短パルスの東プラグ ECH による上流部からプラズマ流、もしくは高温の電子流を流入させ、非接触プラズマの状態変化をカロリメータ、ラングミュアプローブ、高速カメラ、分光器等を用いて計測した。

図 4 は上流プラズマの線密度 (N_{LC}) と D-module 内 V 字ターゲットコーナー部に設置したプローブで測定したイオン飽和電流 (I_{i-sat}) の時間変化を示す。図から分かるように、ECH 印加前 ($t < 275$ ms) では、非接触プラズマ状態が得られており、 I_{i-sat} は、Xe, Kr, Ar, の順に強く抑制されており、これまでの非接触プラズマに対する各種ガスの効果を再現する結果が得られている。一方、ECH 入射時 (175 ~ 300 ms) は、ECH 入射開始と共に急激なイオン束の上昇が観測され、カロリメータの変化も ECH 入射を伴うショットと ECH 抜きのショットでの大幅な相違が認められている。この結果から、プラグ ECH による非接触から接触への遷移を示唆する結果が得られた。また、V 字コーナー部前面を観測している分光器による測定結果から、Xe ガスの場合、ECH 時に Xe の 1 価イオンからの発光の急激な増加や高速カメラによるコーナー部領域における発光イメージの強度増加が認められ、コーナー部近傍における再結合反応から電離反応への遷移を示唆する結果が得られた。以上のように、様々な非接触プラズマに対する上流プラズマの変化に対する影響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。

非接触プラズマ生成に対する水素リサイクリング効果の研究では、主に D-module の背面に設置した排気扉の開閉による D-module 内中性ガスの流出のプラズマ非接触化への影響について調べた。今回の実験では、プラズマ持続時間を 400 ms とし、D-module 内への水素ガス供給は、プラズマ点火 ($t = 50$ ms) とほぼ同時に開始してプラズマ終了まで行った。その結果、排気扉が全閉の場合でも全開の場合でも、ガス供給量の増加とともに電子温度が約 2eV 程度まで減少し、電子密度は一旦増加した後に減少するロールオーバーが観測された。ただ

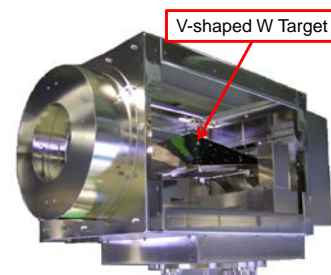


図 2 D モジュールの写真。

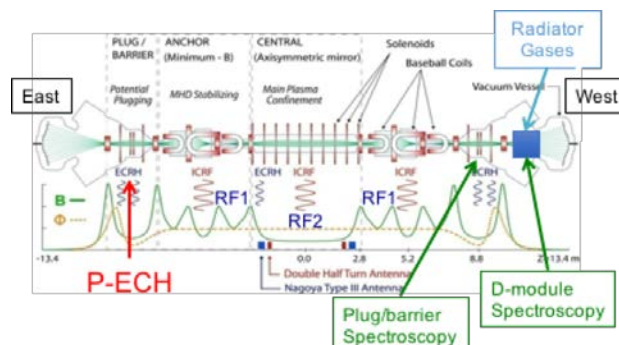


図 3 東プラグ ECH を用いた非接触プラズマへの影響評価実験の概略図

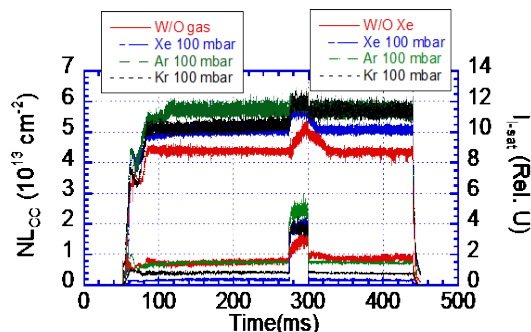


図 4 東プラグ ECH 入射を用いた非接触プラズマへの影響評価実験時の上流プラズマ線密度とコーナー部イオン飽和電流の時間変化

し、電子温度が約 2eV まで減少するのに必要なプレナム圧は、排気扉全閉の場合は 800 mbar であるのに対し、排気扉全開の場合は 1200 mbar であった。この違いは、排気扉を開けることで D-module 内の中性粒子が外部へ排出され、新たな水素ガスが D-module 内に供給されたことによる。考えられるメカニズムとしては、イオン温度の低下、水素原子温度の低下、水素分子の回転、振動励起状態の変化（励起準位の減少）等が複合的に分子活性化再結合に影響を与えたものと考えられる。

（３）マルチバستمソン散乱計測システム

タンデムミラー GAMMA 10/PDX では、主閉じ込め領域であるセントラル部の電子温度・密度の径方向分布計測のため、YAG-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 7 点、10 Hz 間隔での時間変化計測を 1 プラズマショットで調べることを可能としてきた。また、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進めてきた。図 5 にシステムの概略図を示す。当該年度は、セントラル部の径方向分布の詳細計測のため、散乱光集光システムを改良し、受光用光ファイバー設置部の光学台を可動式のものに変更することによって、5 cm 間隔でしか分布計測ができなかったところ、2.5 cm 間隔にて空間分布計測を可能とした。また、プラズマ径方向上側からの散乱信号強度を増加させるために、追加の集光ミラーを設置した。さらに、実験途中でトムソン光学素子等の交換を行った場合の電子密度校正法として、多チャンネルマイクロ波干渉計を用いた電子密度その場校正を行った。

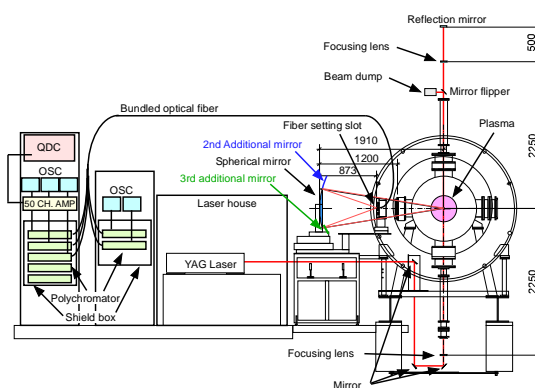


図 5 トムソン散乱計測システムの概略図

また、プラズマ径方向上側からの散乱信号強度を増加させるために、追加の集光ミラーを設置した。さらに、実験途中でトムソン光学素子等の交換を行った場合の電子密度校正法として、多チャンネルマイクロ波干渉計を用いた電子密度その場校正を行った。

（４）大出力長パルスジャイロトロンの開発

筑波大学の大きな特徴である大電力ジャイロトロンに関しては、これまでの NIFS、九大等との共同研究及び QST との連携研究をより強化し、14-300 GHz と周波数範囲を大きく拡張し開発を進めている。平成 29 年度では、昨年度に引き続き 28/35 GHz の 2 周波数ジャイロトロンの開発において順調な進展があった。窓出力 0.45 MW で 2 秒動作時、及び出力停止後の出力窓のサファイア・ディスク温度の時間変化を、整合器 (MOU) に取付けたフッ化バリウム製ビューイングポートを通し赤外線カメラで測定した (図 6)。

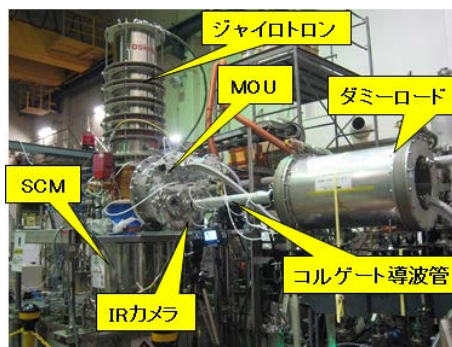


図 6 28/35 GHz ジャイロトロン評価試験

図 7 に、2 枚のサファイア板間に流す冷却材であるフロリナートの各流量に対し、窓温度の時間変化の測定値を示す。冷却材の流量が多いほど、出力停止後の温度低下が速いことが分かった。冷却時間帯の温度変化の測定値と計算値の比較を行うことにより求めたサファイア板から冷却材への熱伝達率を評価すると、出力 0.4 MW に対し、熱伝達率 $h = 0.15 \text{ W/cm}^2\text{K}$ とした時の窓温度変化の計算結果は、ほぼ 80℃で飽和しており（初期温度 20℃）、冷却材の流量を 30L/min 以上取れば、28 GHz-0.4 MW-CW 動作が

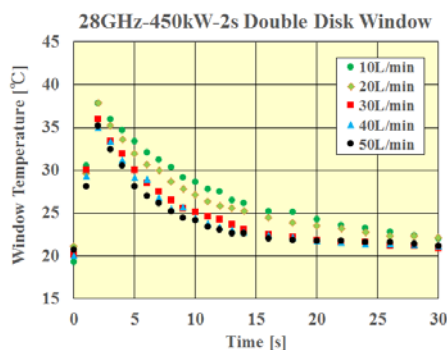


図 7 サファイア窓温度の時間変化

可能と考えられる。今年度は、0.46MW-2.8 秒までの動作を確認しており、来年度に CW ダミーの整備等を行い、準 CW 動作確認の予定である。また現在、電子ビームの分散改善のため、電子銃の改造を進めており、来年度、28 GHz で 1.5 MW 以上、35 GHz で 1 MW 以上の出力を目指す予定である。

筑波大学と九州大学間のセンター間連携研究に基づき、筑波大学で開発した 28 GHz-1 MW ジャイロトロンを九州大学の QUEST 装置に適用しプラズマ実験が行われている。今年度は、将来の CW 運転をも視野に、QUEST 本体窓をダブル・ディスク型窓に変更するため、その製作組立と周波数帯域調整を行った。ダブル・ディスク窓は 2 枚の誘電体板の間に、RF 吸収の小さい冷却材を流すことで高い冷却効率を得る構造の窓である。誘電体板間距離により周波数帯域が変わるため、前記 2 周波数ジャイロトロンを電力源として、28GHz で整合が得られるように誘電体板間距離を調整した。ダブル・ディスク窓は、組立/調整後、QUEST 本体に取付けられ、プラズマ実験が行われている。QUEST プラズマ実験では、九州大学と NIFS で改良された偏波器の導入やプラズマ調整等により、世界最大となる 86 kA の無誘導プラズマ電流の駆動が達成された。このことは、NIFS 双方向型共同研究におけるセンター間連携研究としての大きな成果と考えられる。以上のほかにも、将来の QUEST や GAMMA 10/PDX 中央部加熱への適用を見込み 14 GHz ジャイロトロンの設計検討を進めている。

(5) プラズマ材料表面相互作用

核融合炉のプラズマ対向壁材料の候補となっているタングステンの水素同位体吸蔵特性の研究を、小型プラズマ生成装置 APSEDAS を用いて進めている。中性子照射を模擬した高エネルギー重イオン照射によって生成されるタングステン中の欠陥の水素捕獲特性を調べるために、再結晶タングステンに対して 2.4 MeV の銅イオンを 0.4 dpa 照射後に重水素プラズマを照射してから SIMS 計測を行い、銅イオンと重水素イオンの深さ方向分布を測定した。銅原子の深さ方向分布は SRIM コードにより計算された分布と同様であること、重水素原子の深さ方向分布は銅イオンの存在する領域にほぼ限られていることが明らかとなった。一方、銅イオンを照射していない再結晶タングステン試料に対して、同様の重水素プラズマ照射を行った後の SIMS 計測では重水素原子は低濃度ではあるが銅イオン照射した試料の場合よりも奥深くまで存在していることが示された。これらの結果は、照射損傷による欠陥が水素を捕獲するとともに水素の拡散を阻害している可能性を示唆している。また、水素同位体吸蔵量低減を目的として、タングステン基材表面にクロム層とタングステン層を蒸着した試料を開発して、その水素吸蔵特性の初期結果を得た。さらに、プラズマ照射中の表面改質のその場観測を行うために、APSEDAS において分光エリプソメトリー測定システムを構築して初期計測結果を得た。

(6) 成果発表等

平成 29 年度には、平成 23 年度から筑波大学およびつくば地区で毎年開催している全国のダイバータに代表される境界領域プラズマ、壁材料等に係る多く研究者が参加した研究会として、8 月にプラズマ研究センターシンポジウムを核融合エネルギーフォーラムダイバータ研究開発ワーキンググループのフォローアップ会合との合同で行い、参加者も約 90 名と昨年度を上回る盛況であった。また、本学総合研究棟 B において、11 月にセンターが主催で、ドイツ ユーリッヒ総合研究機構および米国オークリッジ国立研究所共催、国際エネルギー機関の後援により、「第 6 回核融合研究のためのプラズマ-材料相互作用実験装置に関する国際ワークショップを開催し、国内外から約 60 名の研究者（うち海外からは 23 名）の参加のもと、センターより 13 件の報告を行った。11 月開催されたプラズマ・核融合学会第 34 回年会では 37 件の講演を行い、そのうちの博士課程大学院生の発表した 1 件が若手学会発表賞を受賞した。また、同会議ではセンターにおいて現在検討している将来計画を議論するインフォーマルミーティングを主催し、広く核融合コミュニティーに向けて発信した。上記国際会議を含む国際発表は 43 件（内招待講演は 2 件）、国内の会議は全 72 件に達し、学術雑誌では 17 編の発表を行った。

【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プラズマ閉じ込め装置 GAMMA 10 では、高密度プラズマ生成・維持が課題であり、超音速分子性ガスビーム入射(SMBI)法を用いたガス供給や、ICRF 周波数帯加熱等の工夫により研究が進められてきた。特に近年、GAMMA 10 装置は端損失粒子を用いたダイバータ模擬装置への改造および実験が進められており、本研究の推進によりパラメータ領域が拡大できれば、主閉じ込め領域のプラズマ性能向上だけでなく、ダイバータ模擬実験への貢献も期待される。

本研究においては、近年ラバールノズルを用いたSMBI実験を開始し、指向性の高い粒子供給が可能であることが分かった。本研究の目的は、新たに導入したラバールノズルの効果を、実験とシミュレーションの両面において検証することである。昨年度はセントラル部GP付近に設置されているラバールノズルを用いたSMBIによる高密度プラズマ生成実験を行った。今年度は、新たに東アンカー部内側変換領域にSMBIを設置し、その応答を調べた。また、GAMMA 10端部へ損失するイオン束(端損失粒子束)の解析を本格的に開始し、SMBIによる密度上昇と粒子束挙動との関係を調べた。

(2) 実験方法

GAMMA10 には種々のガスパフ(GP)が設置されており、用途に応じて使い分けることができる。セントラル部中央付近に設置されている SMBI に加え、今回東アンカー部内側変換領域に SMBI を設置した(図 1 参照)。SMBI 用ラバールノズルの設計に関しては核融合科学研究所の協力を得た。セントラル部中央付近の SMBI と異なり、ポートの制約から高速カメラが設置できず、単視線の H α 線強度検出器が設置されている。端損失粒子束は両エンド部に設置されている端損失イオンエネルギー分析器(ELIEA)を用いた。これは端損失イオンのエネルギー分析が可能な装置で有り、粒子束だけでなく閉じ込め電位の評価も可能である。

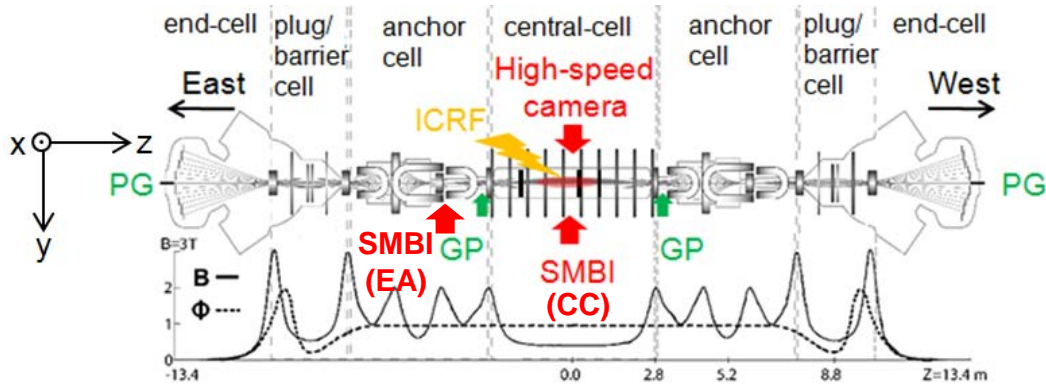


図1 GAMMA 10 に設置されているガスパフおよび SMBI 装置。SMBI はセントラル部中央部(CC)および東アンカー部内側変換領域(EA)に設置されている。

(3) 実験結果

SMBI は ICRF 加熱プラズマ中($t = 150$ ms)に入射し、その動作時間を 0.5 ms とした。SMBI のプレナム圧を 0.3 MPa から 2.0 MPa まで変化させて密度の応答を観測した。図 2 にプレナム圧力が 1.0 MPa の場合の放電波形を示す。SMBI 入射直前のターゲットの線平均密度はセントラル部で $1.4 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$ (プラズマ半径を 18 cm として算出) であり、 1.0 MPa のプレナム圧力の場合にはピーク値で 1.4 倍の増加が見られた。東アンカー部(EA)、セントラル部(CC)、西アンカー部(WA)のそれぞれの密度の時間発展を比較すると、最初に EA で

の増加が見られ、ピーク密度の時刻はSMBI 設置位置 ($z=-370$ cm)での H_α 線発光強度のそれにほぼ等しい。EA での密度増加に伴い CC での密度増加が見られた。特徴的なこととして、1 ms 程度遅れて WA での密度増加も観測された。一方でセントラル部での中性粒子密度の増加がないにもかかわらずセントラル部の蓄積エネルギー (DM_{cc}) が低下しており、これはアンカー部での中性粒子密度の増加に伴う蓄積エネルギーの過渡的な低下が MHD 不安定性を増加させた事に起因すると思われる。これら動的な密度・温度変化については今後輸送を考慮した解析が必要である。

東アンカー部 SMBI により期待される効果として、セントラル部における荷電交換損失の緩和が挙げられる。SMBI のプレナム圧力を 0.3 MPa から 2.0 MPa まで変化させて、SMBI 直後のセントラル部電子線密度の増分、及び蓄積エネルギーの最低値を、セントラル部 SMBI 実験と比較したところ、セントラル部 SMBI の場合には、0.3 MPa の場合でも蓄積エネルギーは 0.2×10^{-4} Wb と低く、プレナム圧力に対する依存性が弱いことが分かった。一方で、東アンカー部 SMBI の場合にはプレナム圧力が低いほど蓄積エネルギーの低下が抑えられた。例えばプレナム圧力が 0.8 MPa の場合ではセントラル部電子密度の増分はほとんど同じであるが蓄積エネルギーは 3 倍近く大きい。ただしプレナム圧力が 1.5 MPa 以上の場合には蓄積エネルギーの低下はセントラル部 SMBI とほぼ変わらず、ある圧力範囲内では東アンカー部 SMBI の効果があることがわかった。

また、端損失粒子束は SMBI に応答した変化を観測した。一方で、この時には ELIEA の偏向電界強度 V_{def} をスイープさせて粒子束のエネルギー分布を計測したため、SMBI のような速い時定数を持つ現象の場合、ピーク値を計測できていない問題がある。そのため今後は放電中の偏向電界を一定とし、放電毎にスキャンした計測が必要である。なお端損失粒子束の $1/e$ 減衰時間はおおよそ 1.5 ms 程度であった。このような過渡的な粒子束変化はダイバータ模擬実験における ELM 模擬にも用いることが可能であると考えられる。一方で ELM 時の熱・粒子束の総量だけでなくイオン・電子のエネルギー分布をどのように模擬するかは重要な課題であり、この点からも端損失粒子束の時空間・速度分布計測が重要となる。

(4) まとめ

今回初めてセントラル部以外での SMBI を東アンカー部内側変換領域にて試験することができ、プレナム圧力が 1 MPa 以下の場合には蓄積エネルギーの低下を緩和しつつ、セントラル部 SMBI と同等の電子線密度の増加が得られた。また端損失粒子束の解析を開始し、SMBI 供給量に対する端損失粒子束の増加を得た。今後は SMBI の ELM 模擬への適用を検討するため、端損失粒子束の詳細な時空間・速度分布計測を行う予定である。

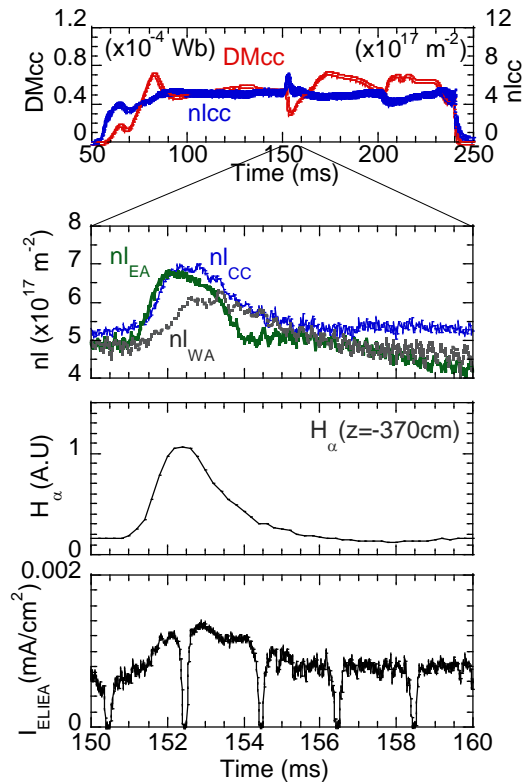


図 2 東アンカー部 SMBI 導入実験(1.0MPa)におけるセントラル部電子線密度(nl_{cc})および蓄積エネルギー(DM_{cc})時間発展。セントラル部(CC)、東アンカー部(EA)、西アンカー部(WA)の電子線密度、 H_α 線発光強度および端損失粒子束。

【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 GAMMA 10/PDX のダイバータプラズマの模擬装置としての可能性を探るために、実験的及び数値計算に基づいた検討を行うことである。これによって、開放端磁場配位を活かし、ダイバータ開発における課題解決に向けた貢献を行う。

(2) 実験装置

図 1 に GAMMA 10/PDX 全体図及び、西エンド部真空容器と平成 24 年度から稼働を開始したダイバータ模擬実験モジュール (Dモジュール) の配置を示す。平成 23 年度までに設置した計測器は、端部ミラーコイルの中心から中心軸外側に向かって 30 cm の位置 ($Z_{EXIT} = 30$) にあるカロリメータと方向性プローブの複合計測器、複数のターゲット及び計測器を備えて、 $Z_{EXIT} = 70$ cm に設置されている回転式ターゲットアセンブリ、エンドタンクに設置されている端損失イオンエネルギー分析器 (ELIEA) などある。また、ターゲット材とプラズマとの相互作用光は、高速カメラを用いて計測されている。

Dモジュールの概略図を図 1 (b) 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 $\phi 20$ 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 \times 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。

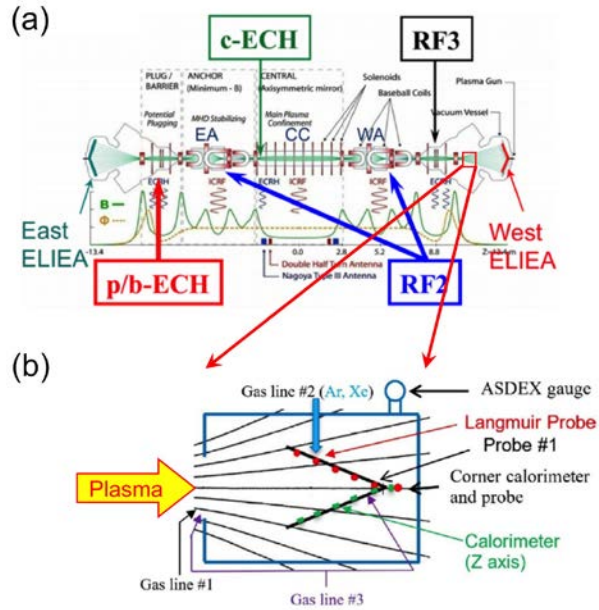


図 1 GAMMA 10/PDX 装置の概略図と西エンド部に設置した D-module

(3) 実験結果

今年度は、非接触プラズマに対するプラズマ追加熱系の影響評価を行った。実験では、Ar, Kr, Xe ガスにより非接触プラズマ状態を形成した後、短パルスの東プラグ ECH による上流部からプラズマ流、もしくは高温の電子流を流入させ、非接触プラズマの状態変化をカロリメータ、ラングミュアプローブ、高速カメラ、分光器等を用いて計測した。

図 2 は、上流プラズマの線密度 (N_{Lc}) と D-module 内 V 字ターゲットコーナー部に設置したプローブで測定したイオン飽和電流 (I_{i-sat}) の時間変化を示す。図から分かるように、ECH 印加前 ($t < 275$ ms) では、非接触プラズマ状態が得られており、 I_{i-sat} は、Xe, Kr, Ar, の順に強く抑制されており、これまでの非接触プラズマに対する各種ガスの効果を再現する結果が得られている。一方、ECH 入射時 (175~300 ms) は、ECH 入射開始と共に急激なイオ

ン束の上昇が観測され、カロリメータの変化も ECH 入射を伴うショットと ECH 抜きのショットでの大幅な相違が認められている。この結果から、プラグ ECH による非接触から接触への遷移を示唆する結果が得られた。

図 3 は、Xe ガス入射による非接触プラズマ時において高速カメラでとらえた ECH 入射前後の D-module 内部のプラズマ発光画像を示す。ECH 入射前に暗かった V 字コーナー付近が ECH 入射と共に局所的に強く発光していることが分かる。また、V 字コーナー部前面を観測している分光器による測定結果から、Xe ガスの場合、ECH 時に Xe の 1 価イオンからの発光の急激な増加や高速カメラによるコーナー部領域における発光イメージの強度増加が認められ、コーナー部近傍における再結合反応から電離反応への遷移を示唆する結果が得られた。

以上のように、様々な非接触プラズマに対する上流プラズマの変化に対する影響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。

(4) まとめ

ダイバータ模擬実験装置 D モジュールを用いた本格的ダイバータ模擬実験において、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、今回不純物ガス導入による非接触プラズマ形成時の ECH によるプラズマ加熱効果が及ぼす影響について詳細に検証された。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、非接触プラズマの特性とその定常維持に関する機構解明へ向けて研究を進めてゆく。

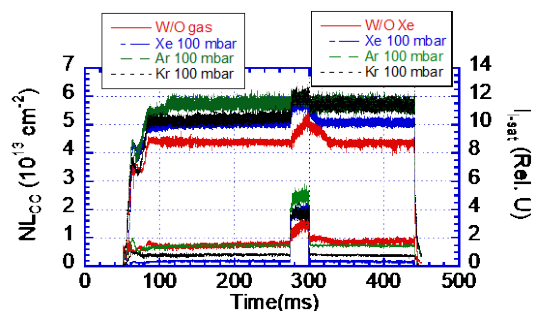


図 2 東プラグ ECH 入射を用いた非接触プラズマへの影響評価実験時の上流プラズマ線密度とコーナー部イオン飽和電流の時間変化

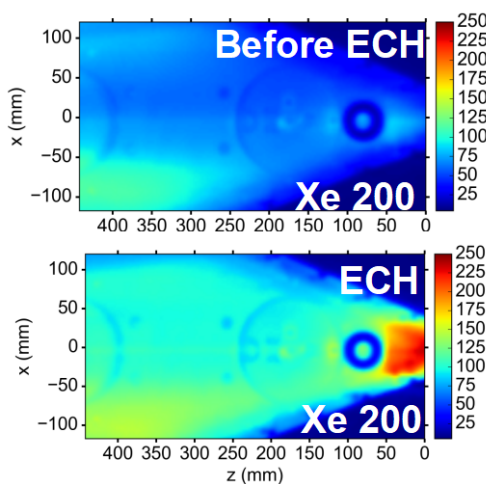


図 3 高速カメラでとらえた D-module 内部のプラズマ発光画像

【6】 GAMMA 10 E-div 領域における多流体コードによる数値シミュレーション解析

(1) はじめに

直線型装置は、定常状態での実験が可能であることや、磁場構造が単純な為、観測ポート設置の利便性が非常に高い事などの環状装置には無い有利な特徴があることから、直線型装置を使用した周辺プラズマ研究が、広く世界中で行われている。これらの直線型装置は、トカマク装置に匹敵する粒子束で研究可能である PSI-II の様に、其々の特徴を生かした研究を行っている。そこで、数値計算シミュレーションによって、プラズマにどの物理過程が強く影響を及ぼしているのかを評価する事が非常に重要となる。筑波大学に設置されているタンデムミラー型装置 GAMMA 10/PDX の西エンド部においても、ダイバータ模擬実験が行われている。

本研究の目的は、他の直線型装置と比較してイオン温度が非常に高いプラズマで実験可能である GAMMA 10/PDX を用いたダイバータ模擬実験に対して、新たに構築した数値計

算コードを用いて数値シミュレーションによる解析を行う事によって、高イオン温度プラズマ下におけるプラズマ挙動を解明する事である。また、高イオン温度プラズマに不純物粒子や中性粒子の外部ガスパフを行った際の背景プラズマ挙動並びに、ターゲット板への熱・粒子負荷について数値計算コードを用いて評価する事である。これにより、GAMMA 10/PDX で行われているダイバータ模擬実験で現れる物理機構に対する理解や、トカマク、及びヘリカル型装置における周辺プラズマ挙動の研究に大きく貢献できる。

(2) メッシュおよび物理モデル

本研究で開発した流体コード LINDA (LInear Divertor Analysis with fluid code) は、トカマク等で広く用いられている B2 コードと同様の物理モデルで構築された方程式を使用している。図 1 に GAMMA 10 プラグバリア部及びエンド部の真空容器プラズマ形状の概略図と同部に設定した数値シミュレーション計算空間のメッシュ構造を示す。

GAMMA 10/PDX は、セントラルセル、アンカーセル、プラグ・バリアセルとエンドセルの 4 つのセルによって、構成されている。プラズマは、主としてセントラルセルにおいて生成され、ロスコーンに落ち込んだ荷電粒子がセントラルセルから、各セルを経由してエンドセルに流出する。

GAMMA 10/PDX では、この端損失プラズマを利用してダイバータ模擬実験を行っている。その為、エンド部における磁力線構造を基に計算空間内のメッシュを作成する必要がある。また、エンド部に存在するプラズマは、セントラルセルから流出したプラズマであるので、エンド部に流入するプラズマパラメータは常に一定であり、軸対称性を持つと仮定した。ターゲット板は、計算空間終端に、タングステン製の円形ターゲット板を設置していると仮定した。一方、プラズマ内不純物中性粒子のモデルとしてエンド部に一様な分布を与え、プラグバリアに向かって指数関数的に減少する分布とした。

以上の様に、GAMMA 10/PDX の磁力線構造と各境界条件を、新たに開発した数値計算コードに適用させた上で、テスト計算を行った。その結果、非線形性が強い系で計算される全ての変数について、より良い収束性が確認されたことから、開発した本計算コードは、GAMMA 10/PDX の環境下においても、正しく稼働している事を確認している。

(3) 計算結果

今回のシミュレーション解析では、不純物ガスとして、Ar、Kr と Xe という比較的重い希ガスを導入した際の放射冷却の挙動を調べた。図 2 は、Ar、Kr、Xe ガスを $5 \times 10^{16} \text{ m}^{-3}$ の密度を与えた場合の (a) : 電子温度 T_e 、(b) : イオン温度 T_i 、(c) : 電子密度 n_e の各々の 2 次元プロファイルを示している。電子温度の冷却効果については、図 3 (a) に示すように Xe が最も強く、Ar の効果が弱く Kr がその中間程度であることを示している。イオン温度についても、同様の結果を示しているが、Ar と Kr の違いは電子温度に比べて少ないことが判った。図 2 (c) に示す電子密度は、上流端部と途中の端部ミラースロート領域 ($Z=10 \text{ m}$) の 2 個所で強いピークが観測されているが、後者は磁束管内がミラースロート部で収縮さ

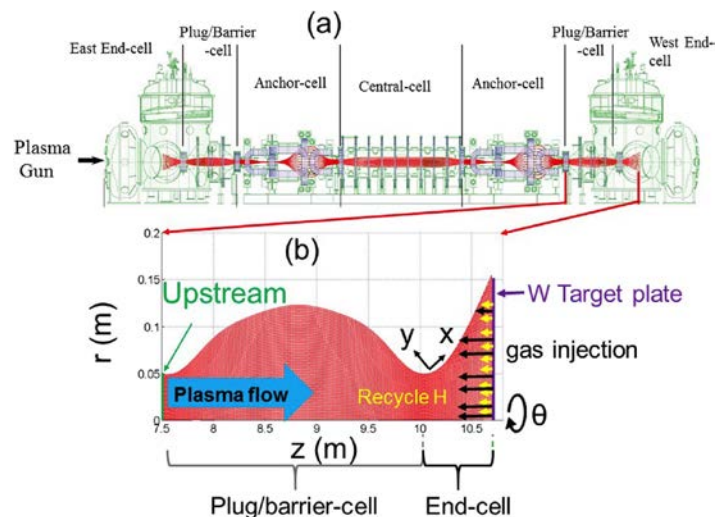


図 1 GAMMA 10/PDX エンド部に設定した数値シミュレーション計算空間 (a) GAMMA 10/PDX 全体の真空容器とプラズマ形状, (b) 西エンド部に設定したシミュレーション空間のメッシュ形状、各種境界条件

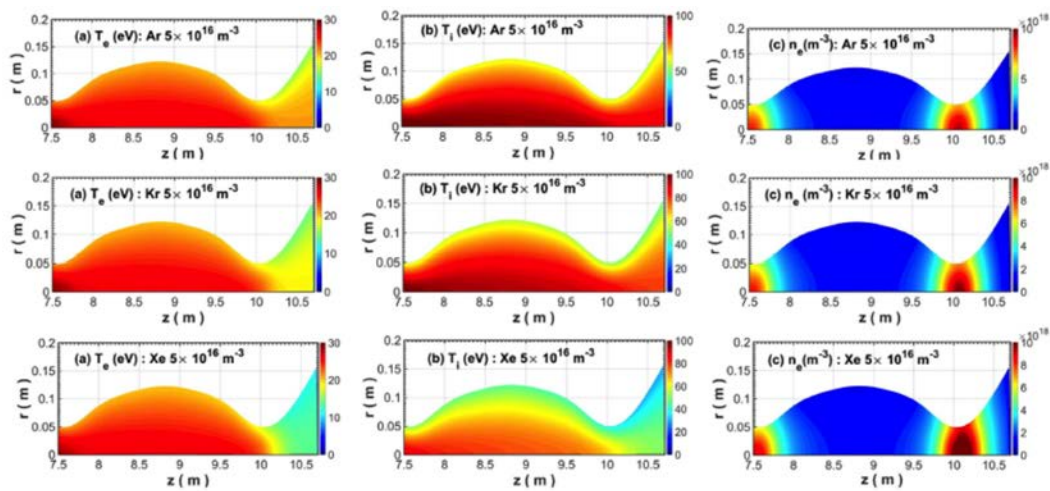


図2 Ar : $5.0 \times 10^{16} \text{ m}^{-3}$ Kr : $5.0 \times 10^{16} \text{ m}^{-3}$ 及び Xe : $5.0 \times 10^{16} \text{ m}^{-3}$ を導入した場合のプラズマ温度・密度の空間構造のシミュレーション解析結果

れる効果による粒子バランスから密度が上昇したものと考えられる。いずれの場合も Xe ガスが最も高い密度を示している。

図3は、上記とシミュレーション解析の結果得られたイオンと電子のパワー損失量と放射損失の体積分量を各ガス種（ガス導入密度： $5.0 \times 10^{16} \text{ m}^{-3}$ ）で比較したものである。図で示すように Ar, Kr, Xe の順で、イオン・電子の損失量は増加している。また、本シミュレーション解析から、イオンの損失機構について荷電交換損失が重要な役割を果たしていることも明らかになっている。一方、図3(b)に示すように、放射損失が、Xe が他のガスに比べて、3倍以上大きい値を示していることが判る。このことから、Xe ガスのプラズマ冷却効果が高いことをシミュレーションでも再現することが出来た。

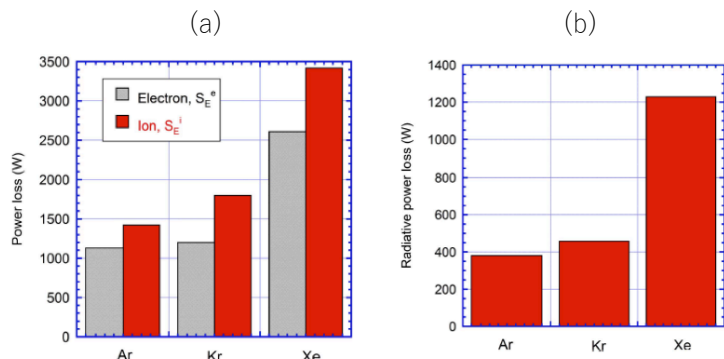


図3 イオンと電子のパワー損失量(a)と放射パワー(b)の各ガス種における比較

(4) まとめ

本研究で開発している多流体数値計算コード LINDA を用いて、GAMMA 10 エンド部におけるダイバータ模擬実験におけるプラズマ流の挙動を調べている。今回 Ar ガス Kr ガス及び Xe ガス入射による放射冷却等、非接触プラズマ形成へ向けた特性の比較が可能となり、Xe ガスの冷却効果が他に比べて高いことがシミュレーションでも確認できた。今後は、分子に起因する再結合過程 (MAR) など、より詳細な原子分子過程等や、系内における中性粒子の輸送についても厳密に考慮した計算を進めてゆく。

【7】 GAMMA 10/PDX におけるトムソン散乱計測システムによる電子温度・密度計測

タンデムミラー GAMMA 10/PDX では、主閉じ込め領域であるセントラル部の電子温度・密度の径方向分布計測のため、YAG-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 7 点、10 Hz 間隔での電子温度・密度計測を 1 プラズマショットで調べることを可能とした。また、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進めた。本年度は、セントラル部の径方向分布の詳細計測のため、散乱光集光システムを改良し、受光用光ファイバー設置部の光学台を可動式のものに変更することによって、5 cm 間隔でしか分布計測ができなかったところ、2.5 cm 間隔にて空間分布計測を可能とした。また、プラズマ径方向上側からの散乱信号強度を増加させるために、追加の集光ミラーを設置した。さらに、実験途中でトムソン光学素子等の交換を行った場合の電子密度較正法として、多チャンネルマイクロ波干渉計を用いた電子密度その場校正を行った。

GAMMA 10/PDX のセントラル部のトムソン散乱計測システムは、プラズマからの 90° 散乱光を集光する。これまでは直径 60 cm の凹面集光ミラー、直径 20 cm の下部測定用追加集光ミラーに加えて、新たに 12×30 cm の上部測定用追加集光ミラーを設置した。これにより、プラズマ上部からの散乱信号強度を増強できることになる。予定では、 $x = 10, 15, 20$ cm の位置で 20, 50, 70 % の増加となる。現在のところ、ラマン・ガス散乱実験で確認したところ、5, 10, 12 % の増加となっており、さらなる追加ミラーの設置位置の最適化が必要である。プラズマ径方向分布の詳細計測のため、集光光学系の光ファイバーアレイを設置している光学台を上下可動可能なラボジャッキ (Thorlabo, L490) に交換した。これにより、プラズマショット毎ではあるが、径方向測定位置を 5 cm 間隔、空間 7 点であったところを、2.5 cm 間隔、空間 15 点で測定可能とした。

トムソン散乱計測システムの電子密度その場校正には、GAMMA 10/PDX セントラル部中心部 $Z = 0$ cm に設置した多チャンネルマイクロ波干渉計を用いた。多チャンネルマイクロ波干渉計は、70 GHz のミリ波を用いたヘテロダイン型干渉計であり、電子線密度を Y 方向空間 6 点計測する。そして、プラズマ電子線密度分布から Abel 変換を用いて電子密度分布を導出可能である。この電子線密度と、トムソン散乱計測で求めた電子密度分布の径方向積分と比較して、トムソン散乱計測による密度の校正値を求めることができる。以上の改良を進めて、GAMMA 10/PDX セントラル部のプラズマ電子温度、電子密度分布計測を行った。図 1 に、プラズマ 3 ショットで計測したプラズマ電子温度(a)、密度分布(b)を示す。これらの改良によって、空間 15 点の電子温度・密度の空間分布計測が可能となった。

エンド部のトムソン散乱計測システムは、セントラル部に設置してある YAG レーザーの光を分岐して、エンド部までレーザー光を伝送した。エンド部のトムソン散乱光学系の散乱点までの距離は、約 21 m である。YAG レーザーは、高さ 1.8 m から水平にエンド部のポートに入射し、真空容器の中に凹面集光ミラーを設置して散乱光を光ファイバーへと集光する。光ファイバーによって真空容器から取り出された散乱光は、低温測定用に開発した

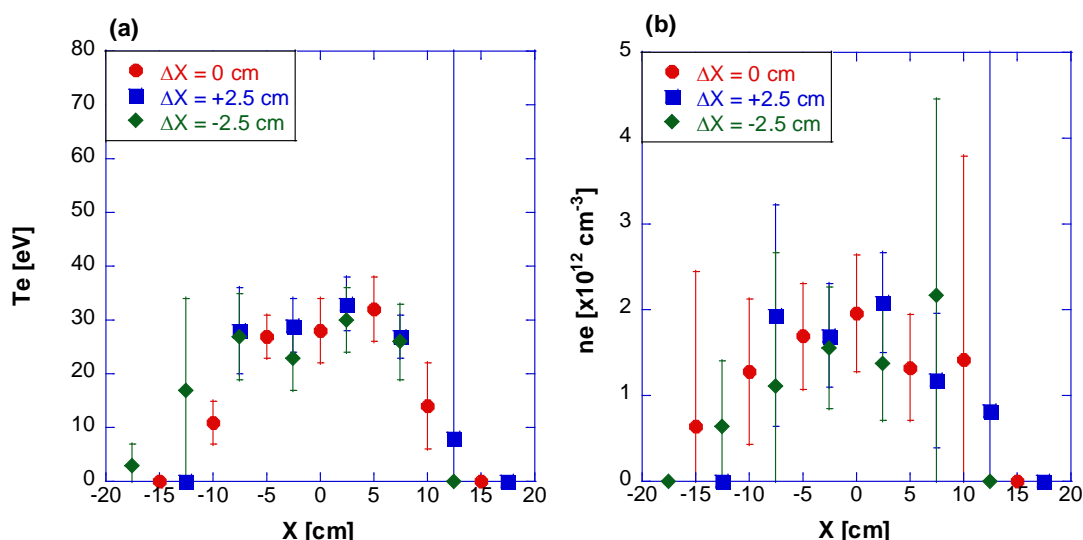


図 1. 電子温度(a)、電子密度分布(b)

ポリクロメーターに取り付け、ポリクロメーターからの出力信号はオシロスコープで収集する。エンド部トムソン散乱計測システムは、後方 160° 散乱で測定し、立体角は、約 70 mstr である。本年度は、集光光学系の周りに迷光防止用の遮光板を取り付け、レーザーのビームダンプ位置を集光ミラーの視野からはずす等の迷光対策を行ったが、ラマンガス散乱実験でも迷光成分が大きくさらなる対策が必要であった。

【8】アンプ付きマルチパス・トムソン散乱システムの開発

プラズマの電子温度・密度を高時間分解能で計測することは、ペレット入射実験、ELM模擬実験など、電子温度、電子密度が高速で変化するプラズマにおいてその物理機構を解明するために重要である。トムソン散乱計測では、電子温度を直接測定できるため非常に有効な手法であるが、時間分解能は使用するレーザー発振周期で制限されており、kHzオーダーでの測定が上限となっている。本研究では、MHzオーダーの時間分解能をもつ高時間分解トムソン散乱計測システムを開発することを目的とした。この高時間分解能を達成するため、プローブレザーをプラズマ中に何度も往復させてパス毎の散乱信号を測定するマルチパス・トムソン散乱計測システムを構築することとした。しかしながら、レーザー装置外にマルチパスの機構を設置したものでは、パス数の増加とともに散乱信号強度が減衰していき、6パス程度以上では、半分以下になってしまう。そこで、本研究では、レーザー強度が減衰したところでレーザーアンプを用いてプローブレザーのパワーを増強し、散乱信号を安定して測定できるようなマルチパス・システムを新たに構築することとする。増幅方法には、再生レーザー増幅方式を用いることとした。

本年度は、レーザーアンプを導入したマルチパス・システムの光学系を構築し、ビームプロファイラーを用いつつ、レーザーアンプを設置した光路の調整を行った。マルチパス・システムは、像転送光学系と偏光制御素子を用いてレーザーをプラズマ通過後に折り返すミラーと偏光素子によって折り返されたレーザーを再度折り返すミラーへと導き、これらの2枚のミラー間でレーザーを閉じ込める。偏光素子には、高電圧を高速で掛けることで偏光を90° 変えることができるポッケルスセルと偏光によってビームを分岐するキューブ型ビームスプリッターを使用した。この閉じ込められたレーザーは、何度かプラズマを通過して往復している間、トムソン散乱光を放射するので、散乱光信号は、その分1回のパスで放射するよりも大きくなり、また、パス毎に解析すると、高時間分解計測が可能となる。レーザーアンプを用いたマルチパス・システムでは、レーザーを閉じ込めるミラーの前に、新たな偏光素子を挟んで、レーザーパワーが減衰したときに、レーザーアンプへと導くようなパスを構築する。これにより、6パス以降にレーザーアンプへとプローブレザーを通すようにできた。この時、レーザーアンプに導く前に、レーザーのビーム径を調整するため、凸レンズと凹レンズを組み合わせたビーム調整機構を通し、ビーム径をφ9 mm以下に調整した。

図2にレーザーアンプへの入射レーザーパワーとアンプ通過後のレーザーパワー、及び増幅率について示す。これにより、アンプへの入射レーザーパワーが5 W程度のとき、レーザーアンプで増幅すると初期レーザーパワー約18 W程度にまで戻すことが可能であることが確認できた。従って、マルチパス・システムにおいては6パス以降にレーザーアンプを用いてレーザー増幅を行うことで初期のレーザー強度を確保できることを確認した。

次に、レーザーアンプシステムを用いたマルチパス・システムをレーリガス散乱実験に適用して、マルチパス信号の取得目指して、レーザーパスの調整を行った。図3にレーザーアンプを導入したマルチパス・システムを用いてレーリガス散乱実験を行ったマルチパス信号測定結果を示す。レーザーアンプにレーザーを導く前のマルチパスによって、レーザー強度が減衰し、その結果弱くなったレーリ散乱信号強度が、レーザーアンプを通した後に、再度強い散乱信号となりその後マルチパス信号が観測できている。よって、本レーザーアンプを用いたマルチパス・トムソン散乱システムの構築が可能であることが確認できた。今後、レーザーパスの調整を進め、レーザーパワーを強くして、安定的にマルチパス信号が取得できるようにしていく必要がある。

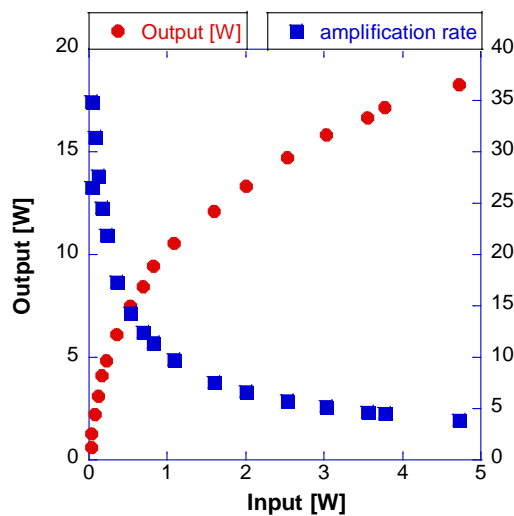


図 2：レーザーアンプへの入射パワーと射出パワー、及び増幅率

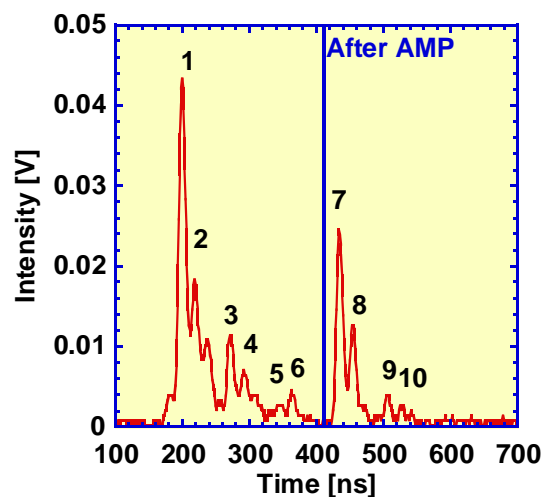


図 3. レーザーガス散乱実験におけるマルチパス信号

【 9 】 GAMMA 10/PDX におけるドップラー反射計の開発と密度揺動の回転計測

(1) ECH 重畳時の密度揺動回転分布計測

本研究では GAMMA 10/PDX セントラル部において、ドップラー反射計を用いた密度揺動の周方向回転計測を行った。イオン・サイクロトロン周波数帯 (ICRF) の高周波で生成・加熱されたプラズマに、バリア部単独、あるいはバリア部・プラグ部両者の電子サイクロトロン加熱 (ECH) を重畳した場合について密度揺動の回転の様子を調べた。

時刻 $t=180\text{--}200\text{ms}$ にバリア ECH 100kW、または、バリア ECH 100kW とプラグ ECH 150kW を重畳する放電を実施した。ドップラー反射計の入射波の設定入射角度は $+2^\circ$ である。得られたドップラー反射計信号のスペクトルより、プラズマ周辺部 (入射周波数 13.7 GHz) のドップラー周波数シフト (密度揺動回転速度に比例) を求めた。ICRF 時間帯ではプラズマが立ち上がりからほぼ定常になった後は低周波数側へのシフトが維持されており、これは電子反磁性方向への回転に対応する。バリア ECH 重畳時は同じく電子反磁性方向への回転を示すが、直前の ICRF 時間帯に比べ速度が若干増加した。一方、バリア・プラグ ECH では ECH 印加後から徐々に電子反磁性方向の速度が小さくなり、更にイオン反磁性方向へと速度が反転した。

また、入射周波数を放電毎にスキャンし、プラズマ半径位置 r に対する回転速度 V_{perp} のプラズマ周辺部付近での空間分布を調べた。一方、重イオンビームプローブ (HIBP) により計測した電位分布は、ICRF 時間帯、バリア ECH 単独重畳時共に中心付近で頂点をもつ下に凸の形状をしていた。 $V_{E \times B}$ は電子反磁性方向となり、ドップラー反射計で得た V_{perp} と方向が一致した。観測する揺動速度は $V_{\text{perp}} = V_{E \times B} + V_{\text{phase}}$ で表され、ここで V_{phase} は揺動 (乱流) の位相速度である。 $r < 13\text{ cm}$ においては、 V_{perp} と $V_{E \times B}$ が近い値を示すデータもあるが、両者の差が有意であるかは検討を要する。 $r > 15\text{ cm}$ からリミター (内径 $r=18\text{ cm}$) 付近は圧力勾配が小さく $V_{\text{perp}} \approx V_{E \times B}$ と仮定すると、リミター近くでは -10V/cm 程度の電場生成の可能性が示された。この周辺部については、最近導入された高速駆動プローブによる電位計測との比較を行う予定である。バリア・プラグ ECH 重畳時の電位は今回取得できなかったが、以前の同様な実験では上に凸の電位分布が計測されている。その場合 $V_{E \times B}$ はイオン反磁性方向の速度となるが、 V_{perp} もイオン反磁性方向の回転を示しており $V_{E \times B}$ の寄与が示唆された。

(2) 周波数コム・ドップラー反射計の開発

揺動や乱流等の発生・抑制機構の解明には種々の情報の多点同時計測が不可欠である。本研究では、径方向多点同時計測が可能なドップラー反射計の開発を行っている。システムには、多周波数のプローブ信号を同時入射可能なコム・ジェネレータを用いている。製作中のドップラー反射計では、入射マイクロ波は 11-18GHz の X モードとなっており、GAMMA 10/PDX の典型的な電子密度分布の例ではプラズマ半径 a (18 cm) に対し $r/a=0.4-1$ 程度の観測位置に対応する。前年度は主に送信回路系を構築し、今年度は受信回路の製作を進めた。コム・ジェネレータの発振周波数間隔は 200MHz である。これらの信号のうち 11.8, 12.8, 13.8, ..., 17.8GHz まで 1GHz 間隔 (一部は 0.4GHz 間隔) の 8 周波数の使用を当面は予定している。各周波数信号は 10.8GHz の局部発振器 (LO) 信号により 1, 2, 3, ..., 7GHz の中間周波数 (IF) 信号に変換される。BPF はこれらの信号を抽出するため、中心周波数まわりで急峻であり、且つ広帯域にわたり良好な減衰特性を有する必要がある。今年度は受信部の製作がまだ一部残っているため引き続き製作を進めており、来年度には本システムをプラズマ実験に適用する予定である。

【10】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 29 年度は、アンカー部アンテナについて、セントラル部電位上昇、及び端損失プラズマ制御に関する考察を進めた。また、セントラル部周辺浮遊電位上昇のメカニズム解明のため、アンカー部周辺浮遊電位計測を行った。バリア部アンテナについては、アンテナ形状の違いに対するプラズマ生成・加熱効果の違いを実験と 3 次元波動解析コードにより検討した。更に、励起 ICRF 波動や温度非等方性により自発励起されるアルベンイオンサイクロトロン (AIC) 波動、低周波揺動の特性を調べるため、マイクロ波反射計を利用した波動計測システムの高度化を進め、揺動の空間構造を計測した。また、AIC 波動間の差周波揺動による高エネルギーイオンの軸方向輸送に関する検討を進めた。一方、直線型装置における高密度プラズマのイオン加熱に関する知見を得るため、新規加熱手法開発を目指した取り組みを開始した。

(1) アンカー部アンテナを用いた端損失プラズマ制御

東、西アンカー部のセントラル側アンテナ (EAI-DAT, WAI-DAT) に 7.7 MHz の高周波をそれぞれ印加すると、東西両端部の端損失イオン束の上昇、高エネルギー側へのエネルギー分布のシフト、高周波を印加した側の端損失イオン温度の上昇が端損失イオンエネルギー分析器 (ELIEA) により測定されている。この時、装置東側に設置されている端損失エネルギー成分分析器 (ELECA) を用いて、端損失イオンのピッチ角分布を測定したところ、低エネルギーイオンのピッチ角 0° 付近の電流の上昇、セントラル部電位の上昇も合わせて測定された。数値計算との比較から、端損失イオン束の上昇は電位上昇に伴うミラープラズマの損失領域拡張によることが明らかになった。また、高いエネルギーイオン電流のピッチ角分布は、高周波印加側のロスコーン内で上昇するが、反対側では変化しないことから、高周波によるイオンのピ

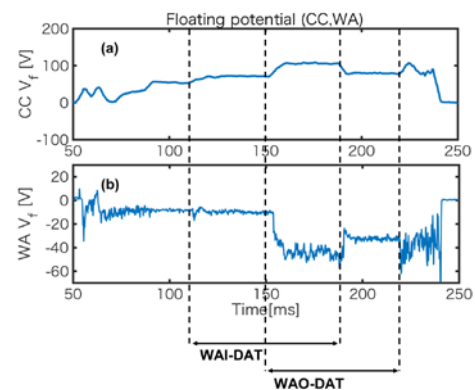


図 1 アンカー部追加加熱時の (a) セントラル部周辺 (b) アンカー部リミター浮遊電位

タッチ角散乱に起因することが明らかになった。即ち、アンカー部アンテナで励起された 7.7 MHz の高周波波動はセントラル側に伝搬し、セントラル部スロート付近のイオンサイクロトロン共鳴層において吸収される。この時、ドップラー効果を含めた共鳴領域は、(A) セントラル部中心からアンテナ側(強磁場側)に向かうイオンの場合、共鳴層からアンテナ側に、(B) アンテナ側からセントラル部中心(弱磁場側)に向かうイオンの場合、共鳴層から中心側に広がって存在する。(B) の場合はアンテナから伝搬した波動は共鳴層で吸収され、イオンと共鳴できない。従って東、西アンカー部アンテナによる端損失イオン温度の差異は、アンカー部アンテナで励起された高周波波動とセントラル部スロート付近のイオンとの共鳴の有無に起因する。以上により、アンカー部アンテナに 7.7 MHz の高周波を印加した場合のイオンの軸方向輸送機構が明らかになった。

(2) アンカー部アンテナによるセントラル部周辺浮遊電位上昇

アンカー部アンテナにより追加熱を行うと、セントラル部中心付近周辺部の浮遊電位が上昇することが観測されている。アンテナに印加する高周波が共鳴条件を持たない周波数でも浮遊電位の上昇が確認されたことから、浮遊電位上昇にイオンサイクロトロン共鳴現象は本質的ではなく、プラズマ中に励起された波動、もしくはアンテナ近傍の高周波電場と電子との相互作用が本質的であると考えられる。そこでアンカー部リミターに中心に各所で周辺浮遊電位計測を行ったところ、アンカー部追加熱により浮遊電位の減少が一部で確認された(図 1)。従って、セントラル部周辺浮遊電位の上昇は、アンカー部における電子の径方向損失が関与していると考えられる。更に非軸対称部であるアンカー磁場変換部においても浮遊電位を計測し、電子の径方向損失の解明を進める。

(3) バリア部アンテナにおける波動励起効率の計算

ダイバータ模擬実験を行う西エンド部に隣接しているバリア部を直接加熱することにより、端損失プラズマ制御が期待される。平成 29 年度は、新たにアンテナに隣接するガス導入部からのガスを遮蔽する板を設置し、磁場に垂直な電流を流す Double Half Turn (DHT) アンテナと、磁場に平行な電流を流す Nagoya Type-III アンテナの 2 種類の加熱条件が異なるアンテナを使用した。アンテナにバリア部中心付近の共鳴層を持つ 7.7 MHz の高周波を印加したところ、プラズマ生成に対しては DHT アンテナが、イオン加熱に対しては Type-III アンテナが効果的であることがわかった。実験結果との比較を行うため 3 次元波動解析コードを用いた波動伝播解析を行ったところ、共鳴領域でイオンが吸収する電力は、Type-III アンテナの方が大きくなった。これは磁場に平行な電流を流すことによりイオン加熱に有効な遅波が強く励起されたためであり、実験結果と矛盾しない結果である。また、端損失粒子束の増大に必要な高密度プラズマに対する波動励起に対する計算も進めた。

(4) 反射計を用いたイオンサイクロトロン周波数帯波動の計測

ICRF 加熱の最適化や制御に活用するため、高温プラズマ内部領域における ICRF 波動の分布をマイクロ波反射計により計測している。現在、3 台のマイクロ波発振器および反射計としての計測システムがあり、そのうちの 1 台の発振器は高速周波数掃引が可能である。この速い周波数応答性を利用し、GAMMA 10 の放電時間 200 ms の間に、多段のステップ状に周波数を変化させて、ICRF 波動に伴う密度揺動の細かい径方向分布を取得した。アンカー部においては、二つのアンテナ(WAI-DAT, WAO-DAT)から同一周波数の波動を印加した際の干渉効果をマイクロ波反射計で計測した(図 2)。共鳴による波動減衰効果を除くために共鳴層を持たない 6.0 MHz を用いた所、アンテナ間の位相差に対して正弦状の変化が観測された。一方、セントラル部、アンカー部に共鳴層がある 6.3 MHz, 9.9 MHz, 10.3 MHz の周波数を印加する実験において、アンカー部

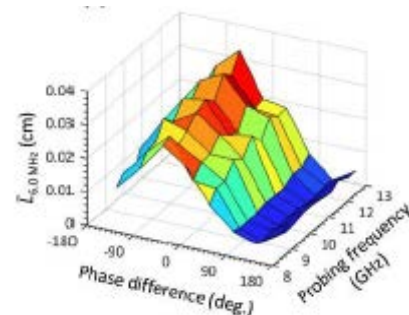


図 2 外部励起 ICRF 波動の干渉の様子

で ICRF 波動の径方向多点計測を行ったところ、9.9, 10.3 MHz の波動は径方向に複数のピークを持つことが明らかになった。セントラル部との比較から、アンカー部中央面に対して両側にある楕円形状の非軸対称磁場部が高次構造に寄与している可能性がある。

セントラル部ではこれまでに整備してきたマイクロ波ホーンアンテナアレイに加えて、 $z = 82 \text{ cm}$ の断面に、方位角方向モード数を同定するためのアンテナペアを設置した。これにより、過去に磁気プローブペアで調べられていたアルベンイオンサイクロトロン波動の方位角モード数が $m = -1$ であることがプラズマ内部領域において示された。この方位角方向アンテナペアを用いて、GAMMA 10 セントラル部で不安定になるドリフト揺動とフルート型揺動の方位角モード数、径方向強度分布、さらに軸方向アンテナアレイを用いた軸方向波数の計測を行った。4-7 kHz の低周波揺動は $m = -1$ 、 ~ 10 , $\sim 15 \text{ kHz}$ は $m = +2$ 、 $\sim 15 \text{ kHz}$, $\sim 23 \text{ kHz}$ は $m = +3$ であることが同定された。また同一位相速度をもつ $m = +1$ の揺動も観測された。これらのモードは磁力線方向に波数を持ち伝搬していること、 $m = -1$ のモードは磁力線方向に波数を持たないフルート型であることが軸方向アンテナアレイから示された。径方向強度分布に関しては、ドリフト揺動、フルート様揺動共に内側で低く、外側で高くなる分布であった。以上のように、プラズマ内部領域でのモード特定に反射計が使えることが示された。

(5) 高エネルギーイオンの AIC 差周波揺動による軸方向輸送の研究

セントラル部の反射計で評価した AIC 波動間の非線形結合から、AIC 波動間の差周波揺動がプラズマ中心領域で顕著に励起され、その差周波の周期で高エネルギーイオンが軸方向に輸送されていることが装置端部での粒子計測から明らかになっている。この波動粒子相互作用を詳細に調べるため、MCP を用いた新しいイオン検出器を整備している。従来の半導体検出器では見えていなかった異なる波動間の差周波揺動成分の観測、径方向内側と外側での差異、セントラル部の反磁性量に対する揺動強度依存性を得た。特に AIC 差周波と高エネルギーイオンとの波動粒子相互作用は径方向内側領域で顕著であること、AIC の差周波数に対して相互作用するイオンエネルギー帯が異なることが明らかになった。今後、更に議論を進める。

(6) 高密度プラズマのイオン加熱に向けた取り組み

高密度直線プラズマ実験装置を用いて、デモ炉設計に必要なダイバータ物理および PWI に関する要素研究が世界中で行われている。特にイオン温度の向上が重要かつ共通の課題であるが、イオンのビーチ加熱に用いられるアルベン遅波は高密度化に伴い遮蔽されることが知られており、高密度プラズマにおけるイオン加熱手法の確立は重要である。そこで、複数の高出力 ICRF 加熱装置を有する GAMMA 10/PDX 装置を用い、高密度領域における遅波励起および加熱効率に関する知見を得ること、高密度領域に適した新規加熱手法を開発すること等を目指した取り組みを開始した。平成 29 年度は、高密度生成が可能な ECR プラズマに対するイオン加熱、速波を利用した新しいイオン加熱手法を目指した実験を試行した。

【11】ガンマ 10 セントラル部及びプラグ部における ECH 加熱実験

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。

本研究で用いるセントラル部に設置された ECH の入射配位を図 1 に示す。セントラル部 ECH では 28 GHz の電磁波を用いるため、基本波共鳴層は、磁場強度 1 T、第二高調波共鳴層は、磁場強度 0.5 T の位置となる。プラズマによる電磁波吸収率の計算結果から、異常波 (X-mode) の偏波でおよそ 100% 吸収され、正常波 (O-mode) の偏波で数%程度の吸収とい

う結果が得られていた。しかし、実験的には0-modeの電磁波入射によって、より高い電子温度まで加熱されることが確認された。そこで、プラズマから放射される軟X線のエネルギースペクトルを計測する軟X線波高分析器（PHA：Pulse Height Analyzer）をセントラル部 ECH 実験に適用した。高周波加熱によって生成・維持されたプラズマに対し、ECH を入射パワー100 kW、偏波を X-mode と 0-mode でそれぞれ入射した時の PHA の計測結果を図2に示す。0-mode 入射によって高温成分が生成される原因の一つとして、1 T 層を透過した電磁波が伝播経路にある金属平板の ICRF アンテナによって反射され、0.5 T 層で電磁波が吸収される可能性が考えられる。反射板の役割を果たす ICRF アンテナを取り外して 0-mode の入射実験を行った結果、アンテナ取り外し後で低温成分は変わらず、高温成分の温度のみが低下する結果が確認された。基本波共鳴層における高温成分の生成と、第二高調波によるパワー吸収の可能性があることが分かった。

プラグ部では、既存の 500 kW ジャイロトロンを用いた ECH システムにおいて、入射パワー変調実験を行い、熱流データ及び端損失電子データの取得を行った。図3に、ガンマ10 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。これまでに、ECH 放射パワー密度分布を中心軸上に局在化させたミラー・アンテナを適用した ECH パワー(P_{P-ECH})変調実験の結果、 $P_{P-ECH} = 450$ kW, 3 ms のプラグ部 ECH 入射で、 30 MW/m^2 を超える高熱流束が得られている。ECH は東西両プラグ部で入射しており、より効率的な電子加熱が実現している。一方で、ECH による閉じ込め電位が生成されるため、ECH 印加中は、端損失によるイオン流束は大きく減少する。そのため、生成されるプラズマ流束としては、高温の電子流束が流入した後、ECH オフにより、閉じ込められていたプラズマ流が継続して流入することとなる。そこで、ECH の入射を両側ではなく片側のみに行う事で、ECH 生成電位によるプラ

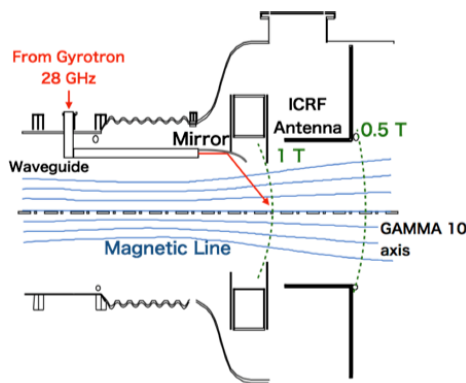


図1 セントラル部 ECH アンテナ配位。

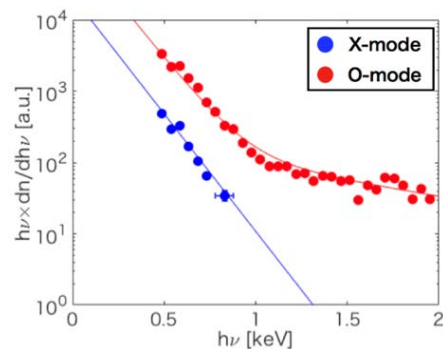


図2 軟X線エネルギースペクトルの入射偏波依存性。

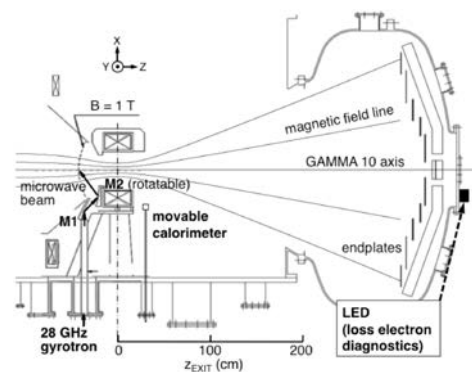


図3 西側プラグ部及びエンド部断面概略図。

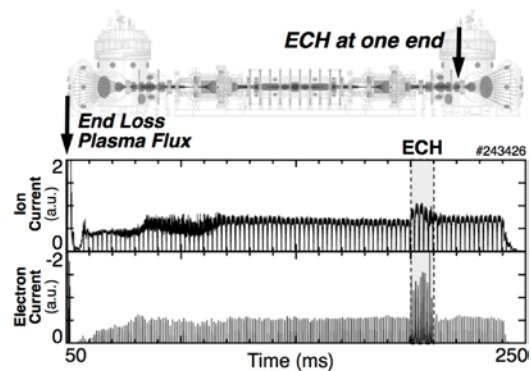


図4 ECH 生成電位による端損失プラズマ流束の制御。

ズマ流束の制御を行うことを試みた。図 4 に、西プラグ部のみに ECH 入射を行い、反対側の東端部での端損失プラズマの計測を行なった結果を示す。ECH の印加により、イオン電流及び電子電流が、同時に増加している。以上より、両プラグ部 ECH 入射時ほどの高熱流束ではないものの、電子流束のみだけでなくイオン流束も同時に増大させることが、ECH 生成電位制御により可能であることが分かった。この手法を用いることで、ECH 印加中に、更に ICRF 加熱の重量を行うことで、生成されるイオンの熱流束及び粒子束の増大が期待出来る。

【12】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共鳴加熱(ECRH)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、ECRH システムの大電力化、長パルス化を進めている。ECRH/ECCD(電子サイクロトロン電流駆動)用大電力マイクロ波源である大電力ジャイロトロンの開発は、プラズマ研究センター(PRC)における研究開発の大きな柱の一つと成っており、共同研究として、核融合科学研究所(NIFS)の LHD 用、九州大学の QUEST 用、プリンストン大学の NSTX-U 用、京都大学の Heliotron J 用ジャイロトロンの開発も進めているところである。さらに、量子科学技術研究開発機構(QST)との共同研究として DEMO 用 300GHz ジャイロトロンの開発も開始した。

(2) 28/35GHz 2 周波数ジャイロトロンの開発

PRC では 28GHz-1MW ジャイロトロンを開発し、最大出力で 1.38MW、長パルス運転で 0.6MW-2s を達成した。本ジャイロトロンは、共同研究として、九州大学の QUEST 装置に適用され、2017 年度のプラズマ実験において世界最大となる 86kA の無誘導プラズマ電流立上を達成した。次のジャイロトロン開発として、GAMMA10/PDX のダイバータ模擬研究において、より高い熱流束を生成するために 28GHz-2MW-3s のジャイロトロン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 28 GHz-1.5~2 MW-3s、Heliotron J で必要とされる動作性能 35 GHz-1 MW-0.5 秒を 1 本のジャイロトロンで動作可能な、2 周波ジャイロトロンである。

2017 年度は、QUEST で要求される 28GHz-0.4MW-CW(連続)動作の検証のため、サファイア製ダブル・ディスク窓の冷却性能評価試験を実施した。図 1 に試験状況の写真を示す。窓出力 0.45MW で 2 秒動作時、及び出力停止後の出力窓のサファイア・ディスク温度の時間変化を、整合器(MOU)に取付けたフッ化バリウム製ビューイングポートを通し赤外線カメラで測定した。測定は、2 枚のサファイア板間に流す冷却材であるフロリナートの流量を変えて行った。冷却時間帯の温度変化の測定値と計算値の比較を行うことにより求めた、サファイア板から冷却材への熱伝達率を図 2 に示す。出力 0.4MW に対

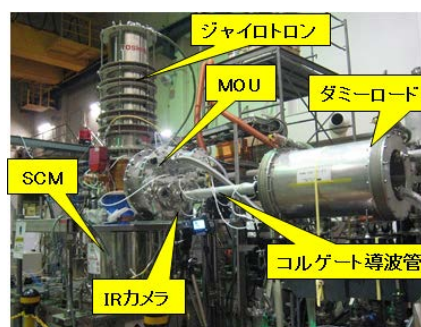


図 1 28/35GHz ジャイロトロン評価試

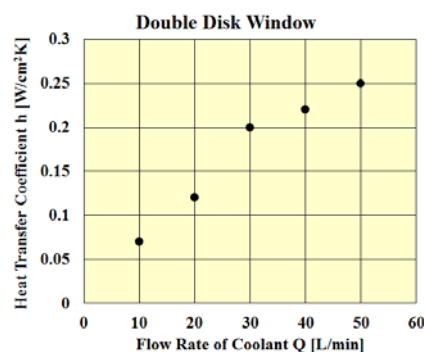


図 2 ダブルディスク窓の冷却流量に対する熱伝達率

し、熱伝達率 $h=0.15\text{W}/\text{cm}^2\text{K}$ とした時の窓温度変化の計算結果は、ほぼ 80°C で飽和しており（初期温度 20°C ）、冷却材の流量を $30\text{L}/\text{min}$ 以上取れば、 $28\text{GHz}-0.4\text{MW}-\text{CW}$ 動作が可能と考えられる。2017 年度は、 $0.46\text{MW}-2.8$ 秒までの動作を確認しており、2018 年度に CW ダミーの整備等を行い、準 CW 動作確認の予定である。また、電子ビームの分散改善のため、電子銃の改造を終え、2018 年度より、 28GHz で 1.5MW 以上、 35GHz で 1MW 以上の出力を目指す予定である。

（３）14GHz ジャイロトロンの設計

将来の QUEST や GAMMA 10/PDX 中央部加熱への適用を見込み 14GHz ジャイロトロンの設計検討を進めている。これまでに、14GHz と 28GHz の 2 周波数で動作が可能な 2 周波数ジャイロトロンの検討を行ったが、動作可能な発振モードの組合せが無いため、14GHz の単一発振ジャイロトロンの設計検討を進めてきた。

2017年度より、実際にジャイロトン製作を行うことを前提に、より詳細な設計検討を開始した。空洞共振器の発振モードは、発振特性、電子銃動作特性、放射器特性を考慮し $\text{TE}_{4,2}$ モードに決定した。空洞共振器で発振した円形導波管モードの電磁波は、放射器によりガウス状ビームに変換、4枚の内蔵ミラー系で伝送し、出力窓より放射する。放射されたガウス状RFビームは整合器(MOU)に内蔵されたミラーにより、分布・位相整形を行いコルゲート導波管に HE_{11} モードとして結合、プラズマまで伝送する事になる。既設28GHzジャイロトンの内蔵ミラー配位を基本に計算された放射器から出力窓までの伝送効率、69%と低い結果と成った。周波数の低い14GHzの電磁波ビームの発散が大きく、光路長の長い伝送ミラー3-4間、ミラー4と出力窓間での減衰が大きいのが原因である。そこで伝送損失の大きい部分の光路長を短くするよう構造を見直し、RF伝送効率改善に向けて検討を進めている。コルゲート導波管をジャイロトン管内に入れ、第4ミラーと導波管カップリング位置間距離を大幅に短くすることも検討していく。これが実現できればMOUが不用となり、システムの低コスト化にとっても大きなメリットがある。

（４）77/51GHz 2 周波数ジャイロトロンの設計

NIFS とのジャイロトン共同研究において、2014 年度までに開発した 3 機の 77GHz ジャイロトンと 2 機の 154GHz ジャイロトンは、LHD 実験に供されている。全入力電力は 5.4MW に達し、LHD における電子系内部輸送障壁(electron ITB)実験等に大きく貢献している。これらの実績を踏まえ 2015 年度より、154GHz と 116GHz の両方で動作可能な 2 周波数ジャイロトンの開発を開始した。

2017 年度は、LHD の重水素実験のプラズマスタートアップ用として、77/51GHz 2 周波数ジャイロトンの設計を開始した。空洞共振器の発振モードの組合せとして、($77\text{GHz}-\text{TE}_{18,6}$, $49.69\text{GHz}-\text{TE}_{12,4}$) と ($77\text{GHz}-\text{TE}_{18,7}$, $51.88\text{GHz}-\text{TE}_{12,5}$) で初期検討を行った。既設の 77GHz ジャイロトン ($\text{TE}_{18,6}$ モード) と同じ空洞共振器構造において、 $49.69\text{GHz}-\text{TE}_{12,4}$ は 1.3MW の発振が可能であった。既設の 77GHz ジャイロトンと同じ放射器/ミラー系において、 49.69GHz の RF ビームの窓までの伝送効率は 91% だった。厚み 2.46mm のダイヤモンド窓を搭載した場合、 46.69GHz の窓での電力反射率は 3.6% であった。77GHz を $\text{TE}_{18,7}$ モードで発振させる新規設計の場合、 $51.88\text{GHz}-\text{TE}_{12,5}$ モードの 1MW 以上の発振が可能である事を確認した。 51.88GHz の RF ビームの窓での電力反射率は 0.5% である。

（５）300GHz ジャイロトロンの開発

量子科学技術研究開発機構(QST)との共同研究として、2014 年度より核融合発電に向けた原型炉(Demo)用 300GHz 帯ジャイロトンの開発を進めている。これまでの動作試験において、 299.84GHz ($\text{TE}_{32,18}$) で 522kW 、 295.65GHz ($\text{TE}_{31,18}$) で 542kW 、 301.8GHz ($\text{TE}_{30,19}$) で 528kW を達成、周波数 $226\sim 254\text{GHz}$ での 300kW 程度の 7 つ

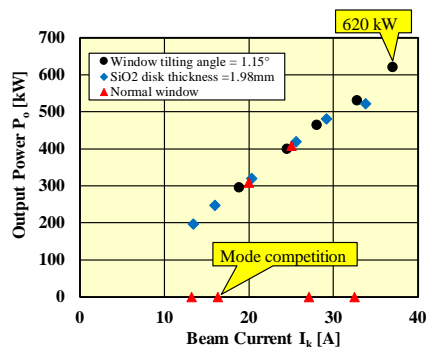


図 3 300GHz ジャイロトン発振試験

の発振の確認等、サブミリ波領域での周波数可変 MW ジャイロトロン開発の基礎となる成果を得ている。

2017 年度試験においては、出力窓構造を改造し、RF 伝送軸に対し出力窓を傾ける事により、窓反射の空洞共振器発振への影響を抑制し、0.62MW の出力を得た（図 3）。

<論文>

01. T. Kariya, T. Imai, R. Minami, K. Sakamoto, Y. Oda, R. Ikeda, T. Shimozuma, S. Kubo, H. Idei, T. Numakura, K. Tsumura, Y. Ebashi, M. Okada, Y. Nakashima, Y. Yoshimura, H. Takahashi, S. Ito, K. Hanada, K. Nagasaki, M. Ono, T. Eguchi, Y. Mitsunaka, Development of over-MW gyrotrons for fusion at 14 GHz to sub-THz frequencies, *Nuclear Fusion* **57** (2017) 066001-1-066001-9.
02. Y. Takeiri, T. Morisaki, M. Osakabe, M. Yokoyama, S. Sakakibara, H. Takahashi, Y. Nakamura, T. Oishi, G. Motojima, S. Murakami, K. Ito, A. Ejiri, S. Imagawa, S. Inagaki, M. Isobe, S. Kubo, S. Masamune, T. Mito, I. Murakami, K. Nagaoka, K. Nagasaki, K. Nishimura, M. Sakamoto, R. Sakamoto, T. Shimozuma, K. Shinohara, H. Sugama, K.Y. Watanabe, J.W. Ahn, N. Akata, T. Akiyama, N. Ashikawa, J. Baldzuhn1, T. Bando, E. Bernard, F. Castejón, H. Chikaraishi, M. Emoto, T. Evans, N. Ezumi, K. Fujii, H. Funaba, M. Goto, T. Goto, D. Gradic, Y. Gunsu, S. Hamaguchi, H. Hasegawa, Y. Hayashi, C. Hidalgo, T. Higashiguchi, Y. Hirooka, Y. Hishinuma, R. Horiuchi, K. Ichiguchi, K. Ida, T. Ido, H. Igami, K. Ikeda, S. Ishiguro, R. Ishizaki, A. Ishizawa, A. Ito, Y. Ito, A. Iwamoto, S. Kamio, K. Kamiya, O. Kaneko, R. Kanno, H. Kasahara, D. Kato, T. Kato, K. Kawahata, G. Kawamura, M. Kasaki, S. Kitajima, W.H. Ko, M. Kobayashi, S. Kobayashi, T. Kobayashi, K. Koga, A. Kohyama, R. Kumazawa, J.H. Lee, D. López-Bruna, R. Makino, S. Masuzaki, Y. Matsumoto, H. Matsuura, O. Mitarai, H. Miura, J. Miyazawa, N. Mizuguchi, C. Moon, S. Morita, T. Moritaka, K. Mukai, T. Muroga, S. Muto, T. Mutoh, T. Nagasaka, Y. Nagayama, N. Nakajima, Y. Nakamura, H. Nakanishi, H. Nakano, M. Nakata, Y. Narushima, D. Nishijima, A. Nishimura, S. Nishimura, T. Nishitani, M. Nishiura, Y. Nobuta, H. Noto, M. Nunami, T. Obana, K. Ogawa, S. Ohdachi, M. Ohno, N. Ohno, H. Ohtani, M. Okamoto, Y. Oya, T. Ozaki, B.J. Peterson, M. Preynas, S. Sagara, K. Saito, H. Sakaue, A. Sanpei, S. Satake, M. Sato, T. Saze, O. Schmitz, R. Seki, T. Seki, I. Sharov, A. Shimizu, M. Shiratani, M. Shoji, C. Skinner, R. Soga, T. Stange, C. Suzuki, Y. Suzuki, S. Takada, K. Takahata, A. Takayama, S. Takayama, Y. Takemura, Y. Takeuchi, H. Tamura, N. Tamura, H. Tanaka, K. Tanaka, M. Tanaka, T. Tanaka, Y. Tanaka, S. Toda, Y. Todo, K. Toi, M. Toida, M. Tokitani, T. Tokuzawa, H. Tsuchiya, T. Tsujimura, K. Tsumori, S. Usami, J.L. Velasco, H. Wang, T.-H. Watanabe, T. Watanabe, J. Yagi, M. Yajima, H. Yamada, I. Yamada, O. Yamagishi, N. Yamaguchi, Y. Yamamoto, N. Yanagi, R. Yasuhara, E. Yatsuka, N. Yoshida, M. Yoshinuma, S. Yoshimura and Y. Yoshimura, Extension of the operational regime of the LHD towards a deuterium experiment, *Nuclear Fusion* **57** (2017) 102023-1-102023-10.
03. H. Idei, T. Kariya, T. Imai, K. Mishra, T. Onchi, O. Watanabe, H. Zushi, K. Hanada, J. Qian, A. Ejiri, M.M. Alam, K. Nakamura, A. Fujisawa, Y. Nagashima, M. Hasegawa, K. Matsuoka, A. Fukuyama, S. Kubo, T. Shimozuma, M. Yoshikawa, M. Sakamoto, S. Kawasaki, H. Nakashima, A. Higashijima, S. Ide, T. Maekawa, Y. Takase and K. Toi, Fully non-inductive second harmonic electron cyclotron plasma ramp-up in the QUEST spherical tokamak, *Nuclear Fusion* **57** (2017) 126045-1-126045-11.
04. Y. Nakashima, K. Ichimura, M.S. Islam, M. Sakamoto, N. Ezumi, M. Hirata, M. Ichimura, R. Ikezoe, T. Imai, T. Kariya, I. Katanuma, J. Kohagura, R. Minami, T. Numakura, M. Yoshikawa, T. Iijima, M. M. Islam, K. Nojiri, K. Shimizu, A. Terakado, S. Togo, N. Asakura, M. Fukumoto, A. Hatayama, Y. Hirooka, S. Kado, H. Kubo, S. Masuzaki, H. Matsuura, T. Nakano, S. Nagata, N. Nishino, N. Ohno, A. Sagara, S. Sawada, M. Shoji, A. Tonegawa and Y. Ueda, Recent progress of divertor simulation research using the GAMMA 10/PDX tandem mirror, *Nuclear Fusion* **57** (2017) 116033-1-116033-10.
05. M. S. Islam, Y. Nakashima and Hatayama, Investigation of Plasmas Behavior During Noble Gas Injection in the End-cell of GAMMA 10/PDX by Using the multi-fluid code LINDA,

- Plasma Physics and Controlled Fusion **59**, 12 (2017) 125010(1-11).
06. T. Takimoto, F. Ishikawa, T. Iijima, Y. Tanaka, A. Tonegawa, K. N. Sato, K. Kawamura, Experimental simulation of the Super-X divertor for detached plasma using TPD-Sheet IV, *Fusion Engineering and Design* **124** (2017) 235-238.
 07. M.S. Islam, Y. Nakashima, A. Hatayama, K. Ichimura, M. M. Islam, K. Fukui, M. Ohuchi, T. Yokodo, G. Lee, S. Togo, N. Ezumi, M. Sakamoto and T. Imai, Numerical Simulation of Detached Plasma in the End-Cell of GAMMA 10/PDX for Divertor Simulation Study, *Fusion Engineering and Design* **124** (2017) 216-221.
 08. K. Ichimura, Y. Kitahara, Y. Nonda, S. Nakamoto. H. Takeno, H. Matsuura, Y. Nakashima, Development of calorimeter system for conceptual study of CuspDEC divertor, *Fusion Engineering and Design* (2018) doi:10.1016/j.fusengdes.2018.02.046.
 09. Md. Maidul Islam, Yousuke Nakashima, Shinji Kobayashi, Nobuhiro Nishino, Kazuya Ichimura, Takaaki Iijima, Md. Shahinul Islam, Takayuki Yokodo, Guanyi Lee, Tsubasa Yoshimoto, Sotaro Yamashita, Masayuki Yoshikawa, Junko Kohagura, Mafumi Hirata, Ryutaro Minami, Tsuyoshi Kariya, Ryuya Ikezoe, Makoto Ichimura, Mizuki Sakamoto, Tsuyoshi Imai, Study of Plasma Behavior during ECRH Injection in the GAMMA 10 SMBI Experiments, *Journal of Physics: Conference Series* **959** (2017) 012007(1-4).
 10. M. S. Islam, Y. Nakashima, A. Hatayama, R. Tatsumi, M. M. Islam and T. Iijima, Numerical Simulation Study towards Plasma Detachment in the End-Cell of GAMMA 10/PDX by a Coupled Fluid-Neutral Code, *Contributions to Plasma Physics* (2018) 201700122, doi:10.1002/ctpp.201700122.
 11. M. Sakamoto, A. Terakado, K. Nojiri, N. Ezumi, Y. Nakashima, K. Sawada, K. Ichimura, M. Fukumoto, K. Oki, K. Shimizu, N. Ohno, S. Masuzaki, S. Togo, J. Kohagura, M. Yoshikawa, Structural Change of Plasma at Various Ambient Pressures in 28 GHz Millimeter-Wave Discharges, *Frontier of Applied Plasma Technology* **10**, 1 (2017) 7-10.
 12. M. Sakamoto, A. Terakado, K. Nojiri, N. Ezumi, Y. Nakashima, K. Sawada, K. Ichimura, M. Fukumoto, K. Oki, K. Shimizu, N. Ohno, S. Masuzaki, S. Togo, J. Kohagura, M. Yoshikawa, Molecular activated recombination in divertor simulation plasma on GAMMA 10/PDX, *Nuclear Materials and Energy* **12** (2017) 1004-1009.
 13. G. Motojima, N. Yoshida, S. Masuzaki, R. Sakamoto, M. Tokitani, H. Tanaka, T. Murase, D. Nagata, K. Matsumoto, M. Miyamoto, M. Yajima, M. Sakamoto, H. Yamada, T. Morisaki, the LHD Experiment Group, Wide-range evaluation of the deposition layer thickness distribution on the first wall by reflection coefficient measurements, *Nuclear Materials and Energy* **12** (2017) 1219-1223.
 14. M. Osakabe, Y. Takeiri, T. Morisaki, G. Motojima, K. Ogawa, M. Isobe, M. Tanaka, S. Murakami, A. Shimizu, K. Nagaoka, H. Takahashi, K. Nagasaki, H. Takahashi, T. Fujita, Y. Oya, M. Sakamoto, Y. Ueda, T. Akiyama, H. Kasahara, S. Sakakibara, R. Sakamoto, M. Tokitani, H. Yamada, M. Yokoyama, Y. Yoshimura & LHD Experiment Group, Current Status of Large Helical Device and Its Prospect for Deuterium Experiment, *Fusion Science and Technology* **72**, 3 (2017) 199-210.
 15. X. Wang, Z. Ma, M. Yoshikawa, J. Kohagura, T. Tokuzawa, D. Kuwahara, and A. Mase, Mixed p type structure in Wilkinson power divider design with 3rd haemonic suppression, *Microwave and Optical Technology Letters* **59**, 6 (2017) 1245-1248.
 16. R. Ikezoe, M. Ichimura, J. Itagaki, M. Hirata, S. Sumida, S. Jang, K. Izumi, A. Tanaka, R. Sekine, Y. Kubota, Y. Shima, J. Kohagura, M. Yoshikawa, M. Sakamoto, and Y. Nakashima, Measurement of ICRF wave propagation using a microwave reflectometer with fast antenna switching on GAMMA 10, *Journal of Instrumentation* **12** (2017) C12017(1-8).
 17. S. Sumida, K. Shinohara, R. Ikezoe, M. Ichimura, M. Sakamoto, M. Hirata, and S. Ide, Comparison of Dispersion Model of Magneto-Acoustic Cyclotron Instability with Experimental Observation of ^3He Ion Cyclotron Emission on JT-60U, *Journal of Physical Society of Japan* **86**, 12 (2017) 124501.

＜学位論文＞

学位論文（博士）〔数理物質科学研究科〕

01. Md. Maidul Islam [博士（理学），数理物質科学研究科物理学専攻]
Study of Fueling by Supersonic Molecular Beam Injection in the GAMMA 10 Tandem Mirror
02. Md. Shahinul Islam [博士（理学），数理物質科学研究科物理学専攻]
Study of Plasma Behavior Based on Particle and Heat Flux Measurements and Numerical Simulation in the GAMMA 10/PDX End-Cell

学位論文（修士）〔数理物質科学研究科〕

03. 伊能俊太郎 [修士（理学），数理物質科学研究科物理学専攻]
金属蒸着により表面改質されたタングステンの重水素吸蔵特性及び GAMMA 10 の壁表面改質
04. 横土敬幸 [修士（理学），数理物質科学研究科物理学専攻]
GAMMA 10/PDX におけるエンド部への希ガス類入射時の分光計測に基づく不純物挙動に関する研究
05. 梶野悟史 [修士（理学），数理物質科学研究科物理学専攻]
X 線計測を用いた GAMMA 10/PDX セントラル部 ECRH 偏波制御による加熱効果の研究
06. 板垣惇平 [修士（理学），数理物質科学研究科物理学専攻]
GAMMA 10 高周波位相制御実験時のマイクロ波反射計を用いた波動計測
07. 李冠億 [修士（理学），数理物質科学研究科物理学専攻]
GAMMA 10 セントラル部におけるヘリウムを用いた中性粒子ビーム入射の効果に関する研究

学位論文（学士）〔理工学群〕

08. 関根諒 [学士（理学），理工学群物理学類]
GAMMA 10 セントラル部における 2 チャンネルマイクロ波反射計を用いた低周波揺動解析
09. 久保田裕士 [学士（理学），理工学群物理学類]
GAMMA 10/PDX バリア部における波動励起効率の波動計算コードを用いた評価
10. 今野直斗 [学士（理学），理工学群物理学類]
GAMMA 10 での ECH 偏波制御実験における金中性粒子ビームプローブを用いた電位計測
11. 松崎亨平 [学士（理学），理工学群物理学類]
小型プラズマ生成装置 APSEDAS においてヘリウムプラズマ照射されたタングステンの表面観察
12. 須藤駿 [学士（理学），理工学群物理学類]
GAMMA 10/PDX ダイバータ模擬プラズマへの水素ガスとアルゴン供給による非接触プラズマ生成時の線電子密度計測
13. 北條俊孝 [学士（理学），理工学群物理学類]
GAMMA 10/PDX セントラル部 ECRH 配位による電子加熱特性の解析
14. 本吉郁哉 [学士（理学），理工学群物理学類]
28/35 GHz 2 周波数ジャイロトンの定常動作に向けたサファイア製ダブルディスク窓の特性評価
15. 毛利友弥 [学士（理学），理工学群物理学類]
再生レーザ増幅方式による長時間マルチパストムソン散乱計測システムの開発
16. 安藤泰斗 [学士（工学），理工学群物理学類]
高密度プラズマ源試験装置におけるガス圧力分布の解析的評価
17. 原利樹 [学士（工学），理工学群物理学類]
GAMMA 10/PDX におけるダイバータ模擬プラズマ上流部の静電プローブ計測

<講演>

01. H. Idei, T. Kariya, T. Onchi, K. Hanada, T. Imai, A. Ejiri, T.I. Tsujimura, S. Kubo, O. Watanabe, H. Ohwada, K. Yamazaki, K. Nakamura, A. Fujisawa, Y. Nagashima, M. Hasegawa, A. Higashijima, T. Nagata, S. Kawasaki, H. Zushi, Y. Takase, A. Fukuyama, Fully Non-inductive Plasma Current Start-up by Focused Millimeter-Wave Beam in QUEST, The 22nd Topical Conference on Radiofrequency Power in Plasmas (Aix en Provence, France, 2017.5.30-2017.6.2).
02. M. Sakamoto, H. Tanaka, S. Ino, H. Watanabe, M. Tokitani, Deuterium retention in tungsten irradiated by heavy ions, 3rd Research Coordination Meeting of the CRP on “Plasma-Wall Interaction with Irradiated Tungsten and Tungsten Alloys in Fusion Devices” (Vienna, Austria, 2017.6.27-2017.6.30).
03. M. Fukunari, T. Yamaguchi, Y. Nakamura, T. Harada, K. Komurasaki, Y. Oda, R. Ikeda, K. Kajiwara, K. Takahashi, K. Sakamoto, R. Minami, T. Kariya, T. Imai, Experiments on the Millimeter-wave Discharge in Atmosphere at 170 GHz and 28 GHz in the Subcritical Condition, The 10th International Workshop “Strong Microwaves and Terahertz Waves: Sources and Applications” (Nizhny Novgorod, Russia, 2017.7.17-2017.7.22).
04. K. Sakamoto, R. Ikeda, T. Kariya, Y. Oda, T. Kobayashi, K. Kajiwara, K. Hayashi, R. Minami, K. Takahashi, T. Imai, S. Moriyama, Study of High Power and High Frequency Gyrotron for Fusion Reactor, 42 International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves (IRMMW-THz 2017) (Cancun, Mexico, 2017.8.27-2017.9.1).
05. T. Shimozuma, S. Kubo, Y. Yoshimura, H. Igami, H. Takahashi, T. Tsujimura, R. Makino, S. Ito, Y. Mizuno, H. Takubo, S. Kobayashi, R. Minami, T. Kariya, T. Imai, Current Status of the LHD ECRH System and Development of Dual-Frequency Gyrotrons, 2017 US-EU-JPN RF Heating Technology Workshop and the US-JPN RF Physics Workshop (Santa Monica, California, USA, 2017.9.5-2017.9.8).
06. H. Idei, T. Kariya, T. Onchi, K. Hanada, T. Imai, A. Ejiri, T.I. Tsujimura, S. Kubo, O. Watanabe, H. Ohwada, K. Yamazaki, K. Nakamura, A. Fujisawa, Y. Nagashima, M. Hasegawa, A. Higashijima, T. Nagata, S. Kawasaki, H. Zushi, Y. Takase, A. Fukuyama, Fully Non-inductive Plasma Current Start-up by Focused Millimeter-Wave Beam in QUEST, 2017 US-EU-JPN RF Heating Technology Workshop and the US-JPN RF Physics Workshop (Santa Monica, California, USA, 2017.9.5-2017.9.8).
07. T. Numakura, T. Kariya, R. Minami, Y. Ebashi, S. Kajino, M. Okada, T. Imai, Code Development for the Calculation of Time-dependent Multimode Oscillations in the Cavity of the Future High-Power Gyrotrons, 2017 US-EU-JPN RF Heating Technology Workshop and the US-JPN RF Physics Workshop (Santa Monica, California, USA, 2017.9.5-2017.9.8).
08. Md. M. Islam, Y. Nakashima, S. Kobayashi, N. Nishino, K. Ichimura, T. Iijima, Md. S. Islam, T. Yokodo, G. Lee, T. Yoshimoto, S. Yamashita, M. Yoshikawa, J. Kohagura, M. Hirata, R. Minami, T. Kariya, R. Ikezoe, M. Ichimura, M. Sakamoto and T. Imai, Study of Plasma Behavior during ECRH Injection in the GAMMA 10 SMBI Experiments, International Conference on Research and Applications of Plasmas (Warsaw, Poland, 2017.9.18-2017.9.22) P2.3.
09. M. Sakamoto, N. Ezumi, Y. Nakashima, A. Terakado, K. Nojiri, K. Sawada, K. Ichimura, M. Yoshikawa, J. Kohagura, M. Fukumoto, N. Ohno, S. Masuzaki, M. Ichimura, T. Imai, Divertor Simulation and Hydrogen Recycling Study Utilizing End Region of the Tandem Mirror GAMMA 10/PDX, 1st Asia-Pacific Conference on Plasma Physics (Chengdu, China, 2017.9.18-2017.9.23). [Invited]
10. R. Ikezoe, M. Ichimura, J. Itagaki, M. Hirata, S. Sumida, S. Jang, K. Izumi, A. Tanaka, R. Sekine, Y. Kubota, Y. Shima, J. Kohagura, M. Yoshikawa, M. Sakamoto, Y. Nakashima, Measurement of ICRF wave propagation using a microwave reflectometer with fast antenna switching on GAMMA 10, 18th Laser Aided Plasma Diagnostics Conference (LAPD18) (Prague, Czech Republic, 2017.9.24-2017.9.28).
11. J. Itagaki, R. Ikezoe, M. Ichimura, M. Hirata, S. Sumida, S. Jang, K. Izumi, A. Tanaka,

- R. Sekine, Y. Kubota, Y. Shima, J. Kohagura, M. Yoshikawa, M. Sakamoto, Y. Nakashima, Correction of time varying offset in a heterodyne reflectometer for fluctuation measurement on GAMMA 10, 18th Laser Aided Plasma Diagnostics Conference (LAPD18) (Prague, Czech Republic, 2017.9.24-2017.9.28).
12. K. Ichimura, Y. Kitahara, Y. Nonda, S. Nakamoto, H. Takeno, H. Matsuura, Y. Nakashima, Development of calorimeter system for a conceptual study of CuspDEC divertor, 13th International Symposium on Fusion Nuclear Technology (Kyoto, 2017.9.25-2017.9.29) P1-121.
 13. M.S. Islam, Y. Nakashima, R. Tatsumi, A. Hatayama, M.M. Islam and T. Iijima, Numerical Simulation Study towards Plasma Detachment in the End-cell of GAMMA 10/PDX by a Coupled Fluid-Neutral Code, 16th International Workshop on Plasma Edge Theory in Fusion Devices (Marseille, France, 2017.9.27-2017.9.29) P1-02.
 14. S. Togo, T. Takizuka, K. Hoshino, K. Ibano, Y. Li, Y. Ogawa, M. Sakamoto, N. Ezumi, Y. Nakashima, SOL-divertor plasma simulation based on a generalized fluid model incorporating ion temperature anisotropy and mirror effect, 16th International Workshop on Plasma Edge Theory in Fusion Devices (Marseille, France, 2017.9.27-2017.9.29) O-05.
 15. T. Onchi, H. Idei, M. Hasegawa, T. Nagata, K. Kuroda, K. Hanada, T. Kariya, S. Kubo, T.I. Tsujimura, S. Kobayashi, Electron cyclotron heating/current-drive system using high power tubes for QUEST spherical tokamak, 59th Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics (Milwaukee, USA, 2017.10.23-2017.10.27).
 16. R. Ikezoe, M. Ichimura, S. Jang, M. Hirata, S. Sumida, J. Itagaki, K. Izumi, A. Tanaka, Y. Kubota, R. Sekine, M. Sakamoto, Y. Nakashima, Studies on ion heating of the GAMMA 10/PDX plasma in a higher density regime toward a future divertor simulating linear device, 59th Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics (Milwaukee, USA, 2017.10.23-2017.10.27).
 17. R. Ikezoe, M. Ichimura, S. Jang, M. Hirata, S. Sumida, J. Itagaki, K. Izumi, A. Tanaka, Y. Kubota, R. Sekine, M. Sakamoto, Y. Nakashima, ICRF heating based approach for production of a linear plasma with high ion temperature, 6th International Workshop on Plasma Material Interaction Facilities for Fusion Research (PMIF2017) (Tsukuba, Japan, 2017.11.1-2017.11.3).
 18. S. Jang, M. Ichimura, M. Hirata, R. Ikezoe, M. Sakamoto, S. Sumida, J. Itagaki, K. Izumi, A. Tanaka, Y. Kubota, R. Sekine, Y. Nakashima, Additional ICRF heating experiments to control end-loss ions on GAMMA 10/PDX, 6th International Workshop on Plasma Material Interaction Facilities for Fusion Research (PMIF2017) (Tsukuba, Japan, 2017.11.1-2017.11.3).
 19. Y. Nakashima and the GAMMA 10/PDX Team, Current status and future plan of divertor simulation experiments in the University of Tsukuba, 6th International Workshop on Plasma Material Interaction Facilities for Fusion Research (PMIF2017) (Tsukuba, Japan, 2017.11.1-2017.11.3).
 20. T. Iijima, M. S. Islam, K. Nojiri, A. Terakado, T. Yokodo, T. Yoshimoto, S. Yamashita, N. Ezumi, M. Sakamoto and Y. Nakashima, Characteristics of detached plasma produced by simultaneously injection of H₂ and radiator gas in GAMMA 10/PDX, 6th International Workshop on Plasma Material Interaction Facilities for Fusion Research (PMIF2017) (Tsukuba, Japan, 2017.11.1-2017.11.3).
 21. M.S. Islam, Y. Nakashima, A. Hatayama, K. Ichimura, T. Iijima, M.M. Islam, T. Yokodo, G. Lee, T. Yoshimoto, Y. Yamashita, S. Togo, N. Ezumi and M. Sakamoto, Numerical Simulation Study of Plasma Behavior in the End-cell of GAMMA 10/PDX by Using a Multi-Fluid Code,

- 6th International Workshop on Plasma Material Interaction Facilities for Fusion Research (PMIF2017) (Tsukuba, Japan, 2017.11.1-2017.11.3).
22. R. Minami, T. Kariya, T. Numakura, Y. Ebashi, S. Kajino, M. Okada, Y. Endo, T. Imai, Y. Nakashima,
Experimental Study on Generation of High Intermittent Heat Flux by ECH Modulation in GAMMA 10 Tandem Mirror,
6th International Workshop on Plasma Material Interaction Facilities for Fusion Research (PMIF2017) (Tsukuba, Japan, 2017.11.1-2017.11.3).
 23. M. Sakamoto, N. Nakashima, N. Ezumi, R. Ikezoe, I. Katanuma, T. Kariya, M. Yoshikawa, R. Minami, M. Hirata, J. Kohagura, T. Numakura, S. Togo, T. Iijima, T. Imai, M. Ichimura
R&D of high temperature and high density divertor plasma simulator with mirror confinement, PMIF2017,
6th International Workshop on Plasma Material Interaction Facilities for Fusion Research (PMIF2017) (Tsukuba, Japan, 2017.11.1-2017.11.3).
 24. N. Ezumi, K. Nojiri, A. Terakado, Y. Kinoshita, K. Kobayashi, T. Iijima, M.S. Islam, T. Yokodo, S. Togo, J. Kohagura, M. Yoshikawa, M. Sakamoto and Y. Nakashima,
Energy Loss Process during Detached Plasma Operation in Divertor Simulation Experimental Module of GAMMA 10/PDX,
6th International Workshop on Plasma Material Interaction Facilities for Fusion Research (PMIF2017) (Tsukuba, Japan, 2017.11.1-2017.11.3).
 25. S. Togo, D. Reiser, P. Börner, Y. Nakashima, M. Sakamoto, N. Ezumi,
Mirror Effect on Plasma Profiles in Open-Field Systems,
6th International Workshop on Plasma Material Interaction Facilities for Fusion Research (PMIF2017) (Tsukuba, Japan, 2017.11.1-2017.11.3).
 26. A. Terakado, M. Sakamoto, N. Ezumi, K. Nojiri, T. Yokodo, T. Iijima, S. Togo, S. Kado, K. Sawada, Y. Nakashima,
Measurement of rovibrational temperatures of hydrogen molecule in divertor simulation plasma on GAMMA 10/PDX,
6th International Workshop on Plasma Material Interaction Facilities for Fusion Research (PMIF2017) (Tsukuba, Japan, 2017.11.1-2017.11.3).
 27. K. Nojiri, M. Sakamoto, N. Ezumi, A. Terakado, S. Togo, T. Iijima, T. Yokodo, M. Yoshikawa, J. Kohagura and Y. Nakashima,
Effect of Neutral Particle Exhaust on Plasma Detachment in Divertor Simulation Experiment on GAMMA 10/PDX,
6th International Workshop on Plasma Material Interaction Facilities for Fusion Research (PMIF2017) (Tsukuba, Japan, 2017.11.1-2017.11.3).
 28. S. Ino, M. Sakamoto, H. Watanabe, M. Tokitani, N. Ashikawa, Y. Oya, A. Terakado, N. Ezumi, Y. Nakashima,
Deuterium retention in tungsten irradiated by 2.4 MeV Cu²⁺,
6th International Workshop on Plasma Material Interaction Facilities for Fusion Research (PMIF2017) (Tsukuba, Japan, 2017.11.1-2017.11.3).
 29. M. Yoshikawa, J. Kohagura, Y. Shima, H. J. van der Maiden, M. Sakamoto, N. Ezumi, Y. Nakashima,
Detached plasma fluctuation study in the linear plasma device,
6th International Workshop on Plasma Material Interaction Facilities for Fusion Research (PMIF2017) (Tsukuba, Japan, 2017.11.1-2017.11.3).
 30. Y. Nakashima, M. Sakamoto, I. Katanuma, T. Kariya, M. Yoshikawa, N. Ezumi R. Minami, M. Hirata, J. Kohagura, T. Numakura, R. Ikezoe, S. Togo, T. Iijima, M.S. Islam, M.M. Islam, T. Yokodo, K. Nojiri, A. Terakado, S. Jang, S. Yamashita, T. Yoshimoto, T. Imai, M. Ichimura.,
Current Status of Divertor Simulation Research in the GAMMA 10/PDX Tandem Mirror, Joint meeting of 26th International Toki Conference and 11th Asia Plasma & Fusion Association Conference (Toki, Japan, 2017.12.5-2017.12.8). [*Invited*]
 31. M. Yoshikawa, A. Sugiyama, Y. Washo, I. Katanuma, Y. Shima, Y. Nakashima, H. Nakanishi, M. Ohsuna, M. Kojima, Y. Nagayama,
Development of Thomson scattering system in GAMMA 10/PDX,
Joint meeting of 26th International Toki Conference and 11th Asia Plasma & Fusion

- Association Conference (Toki, Japan, 2017.12.5-2017.12.8).
32. J. Kohagura, T. Tokuzawa, M. Yoshikawa, Y. Shima, K. Nojiri, A. Terakado, N. Ezumi, M. Sakamoto, Y. Nakashima,
Measurement of azimuthal velocity profile of density fluctuations in the central cell of GAMMA 10 using Doppler reflectometry,
Joint meeting of 26th International Toki Conference and 11th Asia Plasma & Fusion Association Conference (Toki, Japan, 2017.12.5-2017.12.8).
 33. K. Nojiri, M. Sakamoto, N. Ezumi, T. Takizuka, S. Togo, A. Terakado, Y. Kinoshita, Y. Nakashima,
Evaluation of ion temperature of the end-loss plasma using a Langmuir probe in GAMMA 10/PDX tandem mirror,
Joint meeting of 26th International Toki Conference and 11th Asia Plasma & Fusion Association Conference (Toki, Japan, 2017.12.5-2017.12.8).
 34. S. Togo, D. Reiser, P. Börner, M. Sakamoto, N. Ezumi, Y. Nakashima,
Benchmarking of B2 Code with a One-Dimensional Plasma Fluid Code Incorporating Anisotropic Ion Temperature on Simple Mirror Configurations,
Joint meeting of 26th International Toki Conference and 11th Asia Plasma & Fusion Association Conference (Toki, Japan, 2017.12.5-2017.12.8).
 35. M.S. Islam, Y. Nakashima, A. Hatayama¹, K. Ichimura², T. Iijima, M.M. Islam, T. Yokodo, G. Lee, T. Yoshimoto, Y. Yamashita, N. Ezumi and M. Sakamoto,
Investigation of E-Divertor Plasma during Simultaneous Injection of Hydrogen and Impurity Gas in GAMMA 10/PDX by Using the LINDA Code,
Joint meeting of 26th International Toki Conference and 11th Asia Plasma & Fusion Association Conference (Toki, Japan, 2017.12.5-2017.12.8).
 36. D. Kuwahara, N. Ito, H. Tsuchiya, Y. Nagayama, T. Yoshinaga, T. Yoshinaga, M. Yoshikawa, J. Kohagura, S. Yamaguchi, Y. Kogi, A. Mase, X. Wang,
Development of Local Oscillator Integrated Antenna Array for E-band Microwave Imaging Interferometer,
Joint meeting of 26th International Toki Conference and 11th Asia Plasma & Fusion Association Conference (Toki, Japan, 2017.12.5-2017.12.8).
 37. T. Yokodo, Y. Nakashima, T. Iijima, T. Yoshimoto, K. Ichimura, M.M. Islam, M.S. Islam, G. Lee, S. Yamashita, A. Terakado, K. Nojiri, M. Yoshikawa, J. Kohagura, N. Ezumi, M. Sakamoto and T. Imai,
Impact of the Upstream Plasma Parameters on Spectroscopic Measurement in the GAMMA 10/PDX Divertor Simulation Experiments,
Joint meeting of 26th International Toki Conference and 11th Asia Plasma & Fusion Association Conference (Toki, Japan, 2017.12.5-2017.12.8).
 38. A. Terakado, M. Sakamoto, N. Ezumi, K. Nojiri, T. Mikami, S. Togo, T. Iijima, T. Yokodo, K. Sawada, S. Kado, Y. Nakashima,
Measurements of hydrogen molecular rovibrational temperature with high temperature target in divertor simulation plasma on GAMMA 10/PDX,
Joint meeting of 26th International Toki Conference and 11th Asia Plasma & Fusion Association Conference (Toki, Japan, 2017.12.5-2017.12.8).
 39. T. Iijima, M. S. Islam, K. Nojiri, A. Terakado, T. Yokodo, T. Yoshimoto, S. Yamashita, N. Ezumi, M. Sakamoto and Y. Nakashima,
Study on produce of detached plasma by H₂ and Ar injection in GAMMA 10/PDX,
Joint meeting of 26th International Toki Conference and 11th Asia Plasma & Fusion Association Conference (Toki, Japan, 2017.12.5-2017.12.8).
 40. K. Ichimura, S. Yamashita, Y. Nakashima, M. Fukumoto, M. Shoji, M. Sakamoto, N. Ezumi, Md. M. Islam, Md. S. Islam, T. Yokodo, G. Lee, A. Terakado, K. Nojiri, T. Yoshimoto, T. Hara, H. Takeno,
Sensitivity Calibrations of ASDEX Type Fast Ionization Gauges in Mixed Gas Environment of Hydrogen and Noble Gases,
Joint meeting of 26th International Toki Conference and 11th Asia Plasma & Fusion Association Conference (Toki, Japan, 2017.12.5-2017.12.8).
 41. Y. Honda, H. Yamada, Y. Kitahara, K. Ichimura, S. Nakamoto, H. Takeno, H. Matsuura, Y. Nakashima,

- Measurement of Heat Quantity in a Small Cusp-type Direct Energy Converter for Divertor Thermal Load Reduction,
Joint meeting of 26th International Toki Conference and 11th Asia Plasma & Fusion Association Conference (Toki, Japan, 2017.12.5-2017.12.8).
42. M. Suzuki, M. Matsukura, K. Shimamura, S. Yokota, T. Kariya, R. Minami, S. Minakawa, S. Suganuma, S. Mizojiri,
High Power and Long Distance Microwave WPT using 300kW Gyrotron at 28GHz,
Asia International Workshop on Wireless Power Transfer Workshop (AWPT2017) (National University of Singapore, Singapore, 2017.12.9-2017.12.11).
 43. R. Ikezoe, M. Ichimura, M. Hirata, S. Sumida, S. Jang, J. Itagaki, K. Izumi, A. Tanaka, Y. Kubota, R. Sekine, J. Kohagura, Y. Shima, M. Yoshikawa, R. Minami, M. Sakamoto, and Y. Nakashima,
Recent studies toward ICRF heating of a high density linear plasma on GAMMA 10/PDX,
Japan-Korea Workshop on “Physics and Technology of Heating and Current Drive in Fusion Plasmas” (Uji, Japan, 2018.2.27-2018.2.28).
 44. Y. Harada, Y. Nakamura, K. Komurasaki, R. Minami, T. Kariya, T. Imai,
Structural Change of Plasma at Reduced Pressures in 28 GHz Millimeter-Wave Discharge,
24th Annual Meeting of Institute of Applied Plasma Science (IAPS 2017) & 10th International Workshop on Plasma Application and Hybrid Functionally Materials (Hanoi University of Science Technology, Vietnam, 2017.3.10-2017.3.14).
 45. 中嶋洋輔,
筑波大学プラズマ研究センターにおける双方向型共同研究の成果概要と研究計画,
平成 29 年度筑波大学プラズマ研究センターシンポジウム [核融合エネルギーフォーラム ITER・BA 技術推進委員会 ダイバータ研究開発加速戦略方策検討評価ワーキンググループフォローアップ会合第 3 回会合 (オープン合同)] , (つくばイノベーションプラザ, 2017. 8. 3-2017. 8. 4).
 46. 假家強, 今井剛, 南龍太郎, 沼倉友晴, 津村康平, 江橋優斗, 梶野悟史, 下妻隆, 久保伸, 吉村泰夫, 高橋裕巳, 伊神弘恵, 出射浩, 花田和明, 長崎百伸, 斉藤輝雄, 立松芳典, 山口裕資,
電子サイクロトロン高密度プラズマ加熱連携研究における 2 周波数 (28/35GHz, 14/21GHz) ジャイロトロンの開発と ECH 実験への適用,
平成 29 年度筑波大学プラズマ研究センターシンポジウム [核融合エネルギーフォーラム ITER・BA 技術推進委員会 ダイバータ研究開発加速戦略方策検討評価ワーキンググループフォローアップ会合第 3 回会合 (オープン合同)] , (つくばイノベーションプラザ, 2017. 8. 3-2017. 8. 4).
 47. 坂本瑞樹,
定常高密度プラズマ装置計画,
平成 29 年度筑波大学プラズマ研究センターシンポジウム [核融合エネルギーフォーラム ITER・BA 技術推進委員会 ダイバータ研究開発加速戦略方策検討評価ワーキンググループフォローアップ会合第 3 回会合 (オープン合同)] , (つくばイノベーションプラザ, 2017. 8. 3-2017. 8. 4).
 48. 吉川正志,
GAMMA 10/PDX におけるトムソン散乱計測システムの進展,
平成 29 年度筑波大学プラズマ研究センターシンポジウム [核融合エネルギーフォーラム ITER・BA 技術推進委員会 ダイバータ研究開発加速戦略方策検討評価ワーキンググループフォローアップ会合第 3 回会合 (オープン合同)] , (つくばイノベーションプラザ, 2017. 8. 3-2017. 8. 4).
 49. 江角直道, プラズマ研究センター将来計画検討 WG,
高密度ダイバータプラズマ模擬に向けたパイロット装置の開発,
平成 29 年度筑波大学プラズマ研究センターシンポジウム [核融合エネルギーフォーラム ITER・BA 技術推進委員会 ダイバータ研究開発加速戦略方策検討評価ワーキンググループフォローアップ会合第 3 回会合 (オープン合同)] , (つくばイノベーションプラザ, 2017. 8. 3-2017. 8. 4).

50. 東郷訓, 坂本瑞樹, 江角直道, Dirk Reiser, Petra Börner, 中嶋洋輔,
磁場構造の非一様性に着目したダイバータプラズマシミュレーション,
平成 29 年度筑波大学プラズマ研究センターシンポジウム [核融合エネルギーフォー
ラム ITER・BA 技術推進委員会 ダイバータ研究開発加速戦略方策検討評価ワーキング
グループフォローアップ会合第 3 回会合 (オープン合同)], (つくばイノベーション
プラザ, 2017. 8. 3-2017. 8. 4).
51. 池添竜也, 他,
GAMMA 10/PDX における端損失イオン束の制御と高密度直線プラズマのイオン加熱に向
けた取り組み,
平成 29 年度筑波大学プラズマ研究センターシンポジウム [核融合エネルギーフォー
ラム ITER・BA 技術推進委員会 ダイバータ研究開発加速戦略方策検討評価ワーキング
グループフォローアップ会合第 3 回会合 (オープン合同)], (つくばイノベーション
プラザ, 2017. 8. 3-2017. 8. 4).
52. 江角直道, プラズマ研究センター将来計画検討 WG,
筑波大プラズマ研究センターにおける新装置計画の概要,
NIFS 共同研究 平成 29 年度第 1 回「境界プラズマ挙動の理解と異分野間融合による新
展開」研究会, (核融合科学研究所, 2017. 8. 9- 2017. 8. 10).
53. 東郷 訓, 坂本瑞樹, 江角直道, 中嶋洋輔, 滝塚知典, 伊庭野健造, 小川雄一,
磁場の非一様性が開放端磁場プラズマのパラメータに与える影響の解析,
NIFS 共同研究 平成 29 年度第 1 回「境界プラズマ挙動の理解と異分野間融合による新
展開」研究会, (核融合科学研究所, 2017. 8. 9- 2017. 8. 10).
54. 寺門明紘,
GAMMA 10/PDX ダイバータ模擬プラズマにおける Fulcher- α 帯発光スペクトルを用い
た水素分子振動温度評価,
NIFS 共同研究 平成 29 年度第 1 回「境界プラズマ挙動の理解と異分野間融合による新
展開」研究会, (核融合科学研究所, 2017. 8. 9- 2017. 8. 10).
55. 野尻訓平,
GAMMA 10/PDX における分子活性化再結合による非接触プラズマ形成に対する中性粒子
排気の影響,
NIFS 共同研究 平成 29 年度第 1 回「境界プラズマ挙動の理解と異分野間融合による新
展開」研究会, (核融合科学研究所, 2017. 8. 9- 2017. 8. 10).
56. 飯島貴朗,
GAMMA 10/PDX における H₂-Ar 入射による非接触プラズマ生成とその基礎特性,
NIFS 共同研究 平成 29 年度第 1 回「境界プラズマ挙動の理解と異分野間融合による新
展開」研究会, (核融合科学研究所, 2017. 8. 9- 2017. 8. 10).
57. 木下洋輔, 江角直道, 野尻訓平, 寺門明紘, 三上智弘, 小林楓, 坂本瑞樹, 東郷訓,
中嶋洋輔,
イオンセンシティブプローブによる GAMMA10/PDX ダイバータ模擬プラズマのイオン温
度計測,
第 56 回プラズマ若手夏の学校, (赤穂ハイツ, 2017. 8. 29- 2017. 9. 1).
58. 三上智弘, 坂本瑞樹, 江角直道, 寺門明紘, 野尻訓平, 木下洋輔, 東郷訓,
南龍太郎, 仲野友英, 中嶋洋輔,
タンデムミラー装置 GAMMA 10/PDX における HeI 強度比法を用いた電子温度・電子密
度計測,
第 56 回プラズマ若手夏の学校, (赤穂ハイツ, 2017. 8. 29- 2017. 9. 1).
59. 小林楓, 木下洋輔, 野尻君平, 寺門明紘, 東郷訓, 江角直道, 坂本瑞樹,
Md. Shahinul ISLAM, 横土敬幸, 小波蔵純子, 吉川正志, 中嶋洋輔, 澤田圭司,
桑原大介, 篠原俊二郎, 増崎貴,
レーザー誘起蛍光法を用いた GAMMA10/PDX ダイバータ模擬プラズマのイオン・中性粒
子速度分布計測システムの構築,
第 56 回プラズマ若手夏の学校, (赤穂ハイツ, 2017. 8. 29- 2017. 9. 1).

60. 坂本瑞樹,
プラズマ科学と先端技術 ―核融合プラズマと材料開発―,
第 15 回 高校生シンポジウム, (東海大学 湘南キャンパス, 2017. 8. 29).
61. 東郷 訓, 滝塚知典, 星野一生, 伊庭野健造, 李躍, 小川雄一, 細川哲成,
D. Reiser, P. Börner, 坂本瑞樹, 江角直道, 中嶋洋輔,
ミラー効果によるエネルギー遷移を考慮した一次元プラズマ輸送シミュレーション,
理論共同研究「過渡現象を含んだ壁面一周辺・炉心プラズマ相互作用モデリング」研究
作業会, (核融合科学研究所, 2017. 9. 12- 2017. 9. 13).
62. 江角直道, GAMMA10/PDX 実験グループ、将来計画 WG,
GAMMA 10 実験および新装置計画概要,
原型炉特別チーム共同研究 「原型炉における熱・粒子制御に関する物理課題の検討
とモデル化」第一回会合, (慶応大学, 2017. 9. 14-2017. 9. 15).
63. M. S. Islam,
Present Status of Numerical Simulation Study towards the plasma detachment
in the End-Cell of GAMMA 10/PDX,
原型炉特別チーム共同研究 「原型炉における熱・粒子制御に関する物理課題の検討
とモデル化」第一回会合, (慶応大学, 2017. 9. 14-2017. 9. 15).
64. 中嶋洋輔,
GAMMA 10/PDX を用いたダイバータ研究の現状と次期装置による将来計画,
「ダイバータの学理と応用」研究会, (核融合科学研究所, 2017. 9. 20).
65. M. S. Islam,
Present Status of Numerical Simulation Study in the E-Divertor Region GAMMA
10/PDX,
「ダイバータの学理と応用」研究会, (核融合科学研究所, 2017. 9. 20).
66. 飯島貴朗,
GAMMA 10/PDX における不純物・水素入射による非接触プラズマ生成実験,
「ダイバータの学理と応用」研究会, (核融合科学研究所, 2017. 9. 20).
67. 中嶋洋輔, 坂本瑞樹, 江角直道, 飯島貴朗, Md. Shihabul Islam, 横土敬幸, 野尻訓平,
寺門明紘, 山下双太郎, 吉本翼, 朝倉伸幸, 市村和也, 大野哲靖, 門信一郎,
坂本隆一, 澤田圭司, 畑山明聖, 福本正勝, 松浦寛人, 片沼伊佐夫, 假家強,
小波蔵純子, 沼倉友晴, 平田真史, 南龍太郎, 吉川正志, 池添竜也, 東郷訓,
今井 剛, 市村真,
筑波大学における大型タンデムミラー装置を用いたダイバータ模擬研究の最近の進展
と将来計画,
Plasma Conference 2017, (姫路商工会議所, 2017. 11. 20-2017. 11. 24) 21Cp-02.
68. 東郷 訓, 坂本瑞樹, 江角直道, 滝塚知典, 小川雄一, 伊庭野健造, 野尻訓平,
李冠億, 中嶋洋輔,
非一様磁場に伴うミラー効果と超音速流に着目したダイバータプラズマシミュレーシ
ョン,
Plasma Conference 2017, (姫路商工会議所, 2017. 11. 20-2017. 11. 24) 22Ca-04.
69. 出射浩, 恩地拓己, 假家強, 長谷川真, 中村一男, 江尻晶, 松本直希, 川又裕也,
Mishra Kishore, 福山雅治, 柚木美羽, 小島信一郎, 黒田賢剛, 渡辺理, 花田和明,
辻村亨, 久保伸,
Fully non-inductive electron cyclotron plasma ramp-up with focusing mirror
launcher system in the QUEST spherical tokamak,
Plasma Conference 2017, (姫路商工会議所, 2017. 11. 20-2017. 11. 24) 22Ca-04.
70. 江角直道, 増崎貴, 利根川昭, 大野哲靖, 澤田圭司, 門信一郎, 難波慎一,
西島大輔, 飯島貴朗, 高木誠, 安藤泰斗, 東郷訓, 木下洋輔, 小林楓, 野尻訓平,
寺門明紘, 三上智弘, 坂本瑞樹, 吉川正志, 小波蔵純子, 池添竜也, 中嶋洋輔,
原型炉級ダイバータ模擬実験に向けた TPD 型定常高密度プラズマ源の開発,
Plasma Conference 2017, (姫路商工会議所, 2017. 11. 20-2017. 11. 24) 22Ep-03.

71. 隅田脩平, 篠原孝司, 池添竜也, 市村 真, 坂本瑞樹, 平田真史, 井手俊介,
JT-60U における D-D 反応生成物に起因するイオンサイクロトロン放射の励起機構,
Plasma Conference 2017, (姫路商工会議所, 2017.11.20-2017.11.24) 22P-46.
72. 板垣惇平, 池添竜也, 市村 真, 平田真史, 隅田脩平, ジャンソウオン, 泉 昂希,
田中温人, 関根 諒, 久保田裕士, 嶋 頼子, 小波蔵純子, 吉川正志, 坂本瑞樹,
中嶋洋輔,
GAMMA 10 における位相制御 ICRF 加熱時のプラズマ内部波動の評価,
Plasma Conference 2017, (姫路商工会議所, 2017.11.20-2017.11.24) 22P-47.
73. 池添竜也, 市村真, ジャンソウオン, 平田真史, 隅田脩平, 板垣惇平, 泉昂希,
田中温人, 久保田裕士, 関根諒, 坂本瑞樹, GAMMA 10/PDX group,
GAMMA 10/PDX を用いた高密度直線プラズマ振動のイオン加熱に向けた取り組み,
Plasma Conference 2017, (姫路商工会議所, 2017.11.20-2017.11.24) 22P-49.
74. 田中温人, 平田真史, 市村真, 池添竜也, 隅田脩平, ジャンソウオン, 板垣惇平,
泉昂希, 久保田裕士, 関根諒, 坂本瑞樹, 中嶋洋輔,
GAMMA 10 アンカー部 ICRF 加熱によるセントラル部浮遊電位の上昇,
Plasma Conference 2017, (姫路商工会議所, 2017.11.20-2017.11.24) 22P-50.
75. 泉昂希, 池添竜也, 市村真, 平田真史, 坂本瑞樹, 隅田脩, ジャンソウオン,
板垣惇平, 田中温人, 久保田裕士, 関根諒, 中嶋洋輔,
GAMMA 10 における自発励起 ICRF 波動に起因する端損失高エネルギーイオンの測定,
Plasma Conference 2017, (姫路商工会議所, 2017.11.20-2017.11.24) 22P-51.
76. ジャンソウオン, 市村真, 平田真史, 池添竜也, 坂本瑞樹, 隅田脩平, 板垣惇平,
泉昂希, 田中温人, 久保田裕士, 関根諒, 中嶋洋輔,
GAMMA 10/PDX における ICRF 高周波を用いた端損失イオンの制御,
Plasma Conference 2017, (姫路商工会議所, 2017.11.20-2017.11.24) 22P-52.
77. S. Kajino, T. Imai, T. Kariya, R. Minami, T. Numakura, Y. Ebashi, M. Okada,
M. Sakamoto, M. Yoshikawa, Y. Nakashima,
Experimental Results of Wave Polarization Change in GAMMA 10/PDX Central
Cell ECRH,
Plasma Conference 2017, (姫路商工会議所, 2017.11.20-2017.11.24) 22P-53.
78. Md. S. Islam, Y. Nakashima, A. Hatayama, K. Ichimura, T. Iijima, MD M. Islam,
T. Yokodo, K. Lee, T. Yoshimoto, S. Yamashita, T. Hara, N. Ezumi, M. Sakamoto
Present Status of Numerical Simulation Study in the End-cell of GAMMA 10/PDX
by Using the LINDA Code,
Plasma Conference 2017, (姫路商工会議所, 2017.11.20-2017.11.24) 22P-81.
79. 三上智弘, 坂本瑞樹, 江角直道, 寺門明紘, 野尻訓平, 木下洋輔, 東郷訓,
飯島貴朗, 横土敬幸, 南龍太郎, 梶野悟史, 仲野友英, 中嶋洋輔,
Measurement of electron temperature and density with ratios of HeI line
intensities of divertor simulation plasma in ECH on GAMMA 10/PDX,
Plasma Conference 2017, (姫路商工会議所, 2017.11.20-2017.11.24) 22P-88.
80. 横土敬幸, 中嶋洋輔, 飯島貴朗, 吉本翼, M. M. Islam, M. S. Islam, 李冠億,
山下双太郎, 原利樹, 寺門明紘, 野尻訓平, 吉川正志, 小波蔵純子, 江角直道,
坂本瑞樹,
GAMMA 10/PDX における分光計測に基づいたプラズマ追加熱が不純物輸送へ及ぼす影響
評価,
Plasma Conference 2017, (姫路商工会議所, 2017.11.20-2017.11.24) 22P-90.
81. 飯島貴朗, M. S. Islam, M. M. Islam, 寺門明紘, 野尻訓平, 横土敬幸, 李冠億,
吉本翼, 山下双太郎, 原利樹, 小波蔵純子, 江角直道, 坂本瑞樹, 中嶋洋輔,
GAMMA 10/PDX における不純物・水素同時入射での非接触プラズマ生成過程,
Plasma Conference 2017, (姫路商工会議所, 2017.11.20-2017.11.24) 22P-94.
82. 木下洋輔, 江角直道, 野尻訓平, 寺門明紘, 東郷訓, 三上智弘, 小林楓, 坂本瑞樹,
中嶋洋輔, 飯島貴朗, 小波蔵純子, 吉川正志, 利根川昭, 田中宏彦, 増崎貴,

- イオンセンシティブプローブを用いた GAMMA10/PDX 端損失領域における非接触プラズマのイオン温度計測,
Plasma Conference 2017, (姫路商工会議所, 2017.11.20-2017.11.24) 22P-96.
83. 小林楓、木下洋輔、野尻訓平、寺門明紘、東郷訓、江角直道、坂本瑞樹、
ISLAM Shahinul、横土敬幸、小波蔵純子、吉川正志、中嶋洋輔、澤田圭司、
桑原大介、篠原俊二郎、増崎貴、
レーザー誘起蛍光法を用いた GAMMA10/PDX ダイバータ模擬プラズマのイオン・中性粒子速度分布計測システムの構築,
Plasma Conference 2017, (姫路商工会議所, 2017.11.20-2017.11.24) 22P-97.
84. 吉本翼、中嶋洋輔、飯島貴朗、横土敬幸、イスラムマイドゥル、
イスラム シャヒヌル、李冠億、山下双太郎、原利樹、寺門明紘、野尻訓平、
吉川正志、小波蔵純子、江角直道、坂本瑞樹、
GAMMA 10/PDX におけるコアプラズマ加熱による不純物挙動の分光計測,
Plasma Conference 2017, (姫路商工会議所, 2017.11.20-2017.11.24) 22P-100.
85. 寺門明紘、坂本瑞樹、江角直道、野尻訓平、三上智弘、東郷訓、飯島貴朗、
横土敬幸、澤田圭司、門 信 一郎、中嶋 洋輔、
GAMMA 10/PDX ダイバータ模擬プラズマにおける過渡的熱流束による非接触-接触遷移時のプラズマ計測,
Plasma Conference 2017, (姫路商工会議所, 2017.11.20-2017.11.24) 22P-102.
86. 野尻訓平、坂本瑞樹、江角直道、寺門明紘、飯島貴朗、東郷訓、横土敬幸、
三上智弘、吉本翼、木下洋輔、小林楓、小波蔵純子、吉川正志、中嶋洋輔、
GAMMA 10/PDX における分子活性化再結合に起因する非接触プラズマ形成への中性粒子排気の影響,
Plasma Conference 2017, (姫路商工会議所, 2017.11.20-2017.11.24) 22P-104.
87. 鈴木雅敏、松倉真帆、嶋村耕平、横田茂、南龍太郎、假家強、
28GHz ジャイロトロンによる移動体ワイヤレス給電への応用,
Plasma Conference 2017, (姫路商工会議所, 2017.11.20-2017.11.24) 22P-129.
88. 吉川正志、小波蔵純子、嶋頼子、千勝雅之、坂本瑞樹、南龍太郎、江角直道、
中嶋洋輔、安原亮、山田一博、舟場久芳、南貴司、釧持尚輝、
タンデムミラーGAMMA 10/PDX におけるトムソン散乱計測システムの進展,
Plasma Conference 2017, (姫路商工会議所, 2017.11.20-2017.11.24) 23Da-02.
89. 桑原大介、五十嵐明彦、篠原俊二郎、伊藤直樹、土屋隼人、徳沢季彦、長山好夫、
吉永智一、吉川正志、小波蔵純子、山口聡一朗、近木祐一郎、間瀬淳、
マイクロ波イメージング計測用局部発振器内蔵型アンテナアレイの開発,
Plasma Conference 2017, (姫路商工会議所, 2017.11.20-2017.11.24) 23Da-03.
90. Md. M. Islam, Y. Nakashima, S. Kobayashi, N. Nishino, K. Ichimura, T. Iijima,
Md. S. Islam, T. Yokodo, G. Lee, T. Yoshimoto, S. Yamashita, T. Hara,
M. Yoshikawa, J. Kohagura, M. Hirata, R. Minami, T. Kariya, R. Ikezoe,
M. Ichimura, M. Sakamoto, T. Imai,
Recent Results of SMBI Experiment in GAMMA 10,
Plasma Conference 2017, (姫路商工会議所, 2017.11.20-2017.11.24) 23P-11.
91. M. Okada, T. Kariya, T. Imai, R. Minami, T. Numakura, Y. Endo, F. Motoyoshi,
Y. Nakashima,
The Performance Test of 28/35 GHz Dual Frequency-Gyrotron Output Window for
CW Operation,
Plasma Conference 2017, (姫路商工会議所, 2017.11.20-2017.11.24) 23P-39.
92. T. Kariya, R. Minami, T. Imai, T. Numakura, Y. Ebashi, T. Shimosuma, S. Kubo,
K. Sakamoto, H. Idei, K. Hanada, T. Eguchi, Y. Mitsunaka, Y. Nakashima,
Status of Collaborative Research of Gyrotron Developments at University of
Tsukuba,
Plasma Conference 2017, (姫路商工会議所, 2017.11.20-2017.11.24) 23P-40.

93. 李冠億, 中嶋洋輔, M. M. Islam, 飯島貴朗, M. S. Islam, 横土敬幸, 山下双太郎, 吉本翼, 原利樹, 大川和夫,
低密度水素プラズマにおけるヘリウム NBI の効果に関する研究,
Plasma Conference 2017, (姫路商工会議所, 2017.11.20-2017.11.24) 23P-42.
94. T. Numakura, T. Kariya, R. Minami, Y. Ebashi, S. Kajino, M. Okada, T. Hojo, F. Motoyoshi, T. Imai, Y. Nakashima,
Code Development for the Mode Competition in the Cavity of Future High-Power Gyrotrons,
Plasma Conference 2017, (姫路商工会議所, 2017.11.20-2017.11.24) 23P-45.
95. K. Ichimura, S. Yamashita, M. Fukumoto, Y. Nakashima, M. Shoji, M. Sakamoto, N. Ezumi, T. Iijima, Md. M. Islam, Md. S. Islam, T. Yokodo, G. Lee, K. Nojiri, A. Terakado, H. Takeno,
水素・希ガス混合条件における ASDEX ゲージを用いたガス圧計測,
Plasma Conference 2017, (姫路商工会議所, 2017.11.20-2017.11.24) 23P-71.
96. 伊能俊太郎, 坂本瑞樹, 鈴木佑, 渡辺英雄, 芦川直子, 時谷政行, 寺門明紘, 江角直道, 中嶋洋輔,
タングステン蒸着層の水素同位体吸蔵特性,
Plasma Conference 2017, (姫路商工会議所, 2017.11.20-2017.11.24) 23P-96.
97. 松浦寛人, 大内理人, 山本優矢, イスラム シャヒヌール, 中嶋洋輔,
ガンマ 10/PDX のプラズマ熱流束測定のための評価モデルの比較,
Plasma Conference 2017, (姫路商工会議所, 2017.11.20-2017.11.24) 24P-02.
98. 鈴木佑, 坂本瑞樹, 伊能俊太郎, 坂本隆一, 宮本光貴, 江角直道, 中嶋洋輔,
GAMMA 10 極小磁場部における反射計を用いた高周波揺動計測壁表面の実時間その場測定に向けた分光エリプソメトリーシステムの開発,
Plasma Conference 2017, (姫路商工会議所, 2017.11.20-2017.11.24) 24P-60.
99. H. Takeno, F. Kondo, T. Wakaizumi, K. Ichimura, S. Nakamoto, Y. Nakashima,
進行波型直接エネルギー変換模擬実験装置における集群イオンの電解による散乱に関する研究,
Plasma Conference 2017, (姫路商工会議所, 2017.11.20-2017.11.24) 24P-91.
100. 小波蔵純子, 徳沢季彦, 吉川正志, 嶋頼子, 野尻訓平, 寺門明紘, 王小龍, 江角直道, 坂本瑞樹, 中嶋洋輔,
ドップラー反射計を用いた GAMMA10 の密度揺動回転計測,
Plasma Conference 2017, (姫路商工会議所, 2017.11.20-2017.11.24) 24P-128.
101. 山下双太郎, 市村和也, 中嶋洋輔, 福本正勝, 飯島貴朗, M. M. Islam, M. S. Islam, 横土敬幸, 李冠億, 吉本翼, 原利樹,
D-module における各種放射冷却ガスを用いた ASDEX ゲージの較正実験,
Plasma Conference 2017, (姫路商工会議所, 2017.11.20-2017.11.24) 24P-130.
102. 坂本瑞樹,
周辺プラズマと壁との相互作用 [シンポジウム「固体、気体、プラズマを通じた核融合燃料水素循環の理解と制御」],
Plasma Conference 2017, (姫路商工会議所, 2017.11.20-2017.11.24) S7-4.
103. 中嶋洋輔,
筑波大学プラズマ研究センターにおけるダイバータ模擬研究の展開と新計画 (はじめに) [インフォーマルミーティング],
Plasma Conference 2017, (姫路商工会議所, 2017.11.20-2017.11.24).
104. 東郷訓, 滝塚知典, 坂本瑞樹, 江角直道, 小川雄一, 伊庭野健造, 野尻訓平, 李躍, 中嶋洋輔,
Study of mirror effect on SOL-divertor plasma based on a generalized fluid model incorporating ion temperature anisotropy,
15th Burning Plasma Simulation Initiative (BPSI) Meeting, (九州大学応用力学研究所, 2017.11.29-2017.11.30) 2-2.

105. ジャンソウォン, 市村真, 平田真史, 池添竜也, 坂本瑞樹, 隅田脩平, 板垣惇平, 泉昂希, 田中温人, 久保田裕士, 関根諒, 中嶋洋輔,
GAMMA 10/PDX における ICRF 追加熱に起因した端損失イオンの評価,
第 7 回 ICRF 加熱研究会「ICRF 加熱装置の高性能化と将来応用」, (核融合科学研究所, 2017. 12. 19).
106. 隅田脩平, 篠原孝司, 池添竜也, 市村真, 坂本瑞樹, 平田真史, 井手俊介,
JT-60U におけるイオンサイクロトロン放射を励起する DD 核融合生成物の速度分布,
第 7 回 ICRF 加熱研究会「ICRF 加熱装置の高性能化と将来応用」, (核融合科学研究所, 2017. 12. 19).
107. 横土敬幸, 中嶋洋輔, M. S. Islam, 吉本翼,
GAMMA 10/PDX における不純物挙動の端損失粒子束変化による発光量への影響評価,
平成 29 年度「原子分子過程研究と受動・能動分光計測の高度化のシナジー効果によるプラズマ科学の展開」「原子分子データ応用フォーラムセミナー」合同研究会,
(核融合科学研究所, 2017. 12. 20-2017. 12. 22).
108. 三上智弘, 坂本瑞樹, 江角直道, 寺門明紘, 横土敬幸, 仲野友英, GAMMA 10 Group,
GAMMA10/PDX における He I 線強度比法を用いたダイバータ模擬プラズマ計測,
平成 29 年度「原子分子過程研究と受動・能動分光計測の高度化のシナジー効果によるプラズマ科学の展開」「原子分子データ応用フォーラムセミナー」合同研究会,
(核融合科学研究所, 2017. 12. 20-2017. 12. 22).
109. 吉川正志,
再生レーザー増幅方式による高時間分解電子温度計測システムの開発,
平成 29 年度 LHD 計画共同研究成果報告会 (プラズマ分野), (核融合科学研究所, 2018. 1. 16).
110. 原田祐貴, 田畑邦佳, 中村友祐, 小紫公也, 假家強, 南龍太郎,
亜臨界領域における 28GHz ミリ波放電の進展,
宇宙輸送シンポジウム, (宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所, 2018. 1. 18-2018. 1. 19) STEP-2017-057.
111. 吉川正志,
KSTAR プラズマにおける分光診断,
平成 29 年度日韓核融合協力事業報告会, (核融合科学研究所, 2018. 2. 9).
112. ジャンソウォン, 市村真, 平田真史, 池添竜也, 坂本瑞樹, 隅田脩平, 板垣惇平, 泉昂希, 田中温人, 久保田裕士, 関根諒, 中嶋洋輔,
GAMMA 10/PDX におけるイオンエネルギー分析器を用いたイオンの軸方向輸送の研究,
プラズマ流の基礎と応用に関する研究会, (東北大学工学研究科, 2018. 2. 23-2018. 2. 24).
113. 東郷 訓, 滝塚知典, Dirk Reiser, 小川雄一, 李躍, 伊庭野健造, 野尻訓平,
江角直道, 坂本瑞樹, 中嶋洋輔,
先進ダイバータの磁気ノズル効果による超音速プラズマ流のシミュレーション研究,
第 21 回 若手科学者によるプラズマ研究会, (量子科学技術研究開発機構 那珂核融合研究所, 2018. 3. 14-2018. 3. 16).
114. 寺門明紘, 坂本瑞樹, 江角直道, 野尻訓平, 三上智弘, 東郷訓, 飯島貴朗, 横土敬幸, 澤田圭司, 門信一郎, 中嶋洋輔,
GAMMA 10/PDX における高温タングステンターゲットを用いた水素リサイクリングに関する研究,
第 21 回 若手科学者によるプラズマ研究会, (量子科学技術研究開発機構 那珂核融合研究所, 2018. 3. 14-2018. 3. 16).
115. 野尻訓平, 坂本瑞樹, 江角直道, 寺門明紘, 飯島貴朗, 東郷訓, 横土敬幸, 木下洋輔, 三上智弘, 吉本翼, 山下双太郎, 小波蔵純子, 吉川正志, 中嶋洋輔,
GAMMA 10/PDX における非接触プラズマ形成へのガス供給および粒子排気の影響,
第 21 回 若手科学者によるプラズマ研究会, (量子科学技術研究開発機構 那珂核融合研究所, 2018. 3. 14-2018. 3. 16).

116. 出射浩, 恩地拓己, 假家強, 長谷川真, 中村一男, 江尻晶, 松本直希, M. Kishore, 福山雅治, 柚木美羽, 小島信一郎, 黒田賢剛, 渡辺理, 花田和明, 永島芳彦, 東島亜紀, 永田貴大, 辻村亨, 久保伸, Taylor Gary, Bertell Nicola, 小野雅之, 高瀬雄一, 福山淳, 村上定義,
QUEST における 28 GHz 電子サイクロトロン加熱システムを用いた非誘導プラズマ電
流立ち上げ実験,
日本物理学会第 73 回年次大会, (東京理科大学, 2018. 3. 22-2018. 3. 25).

〈解説・紀要等〉

01. 小田靖久, 今井剛,
小特集: ギガワット出力ミリ波ビーム源開発のための技術課題,
プラズマ・核融合学会誌 **93**, 10 (2017) 473-477.

〈受賞〉

01. ジャン ソウオン,
GAMMA 10/PDX における ICRF 高周波を用いた端損失イオンの制御,
プラズマ・核融合学会賞 若手学会発表賞, 2017. 11. 24.
02. Md. Shahinul Islam,
Study of Plasma Behavior Based on Particle and Heat Flux Measurements and
Numerical Simulation in the GAMMA 10/PDX End-Cell,
研究科長賞 (博士), 2018. 3. 23.
03. 横土敬幸,
GAMMA 10/PDX におけるエンド部への希ガス類入射時の分光計測に基づく不純物挙動に
関する研究,
研究科長賞 (修士), 2018. 3. 23.
04. 久保田裕士,
GAMMA 10/PDX バリア部における波動励起効率の波動計算コードを用いた評価,
理工学群長賞, 2018. 3. 23.

【1】物理教育

（1）学類教育（小沢顕）

平成 29 年度は、4 月には 63 名が 1 年次に入学し、また 62 名の 4 年次学生が各研究室に配属され卒業研究を行った。平成 29 年度の卒業生は 59 名であり、その進路は、大学院進学が 49 名、就職が 7 名、その他（進学準備中など）3 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っている。平成 29 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るため、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、科学技術英語）を開設している。平成 28 年度から卒業研究を含む全ての学類科目について授業評価を実施し、その評価結果を担当教官にフィードバックし、クラス連絡会等で教員・学生の参加のもと教育の質の向上のための議論を行った。平成 29 年度は、クラス連絡会を 2 回開催した。

平成 29 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 14 名、合格者 1 名）、アドミッションセンター入試（志願者 9 名、合格者 0 名）、推薦入試（志願者 34 名、合格者 15 名）、個別学力検査・前期日程（志願者 137 名、合格者 47 名）、私費外国人留学生入試（志願者 21 名、合格者 1 名）である。個別学力検査（前期日程）志願倍率は 3.2 倍で、推薦入試は 2.3 倍であった。

(2) 大学院教育 (蔵増 嘉伸)

本学の教育面で特に力を入れている点として、グローバル化と幅広い専門性・学際性が挙げられる。物理学専攻でも、宇宙史一貫プログラム・つくば共鳴教育プログラム・ダブルデGREEプログラム・デュアルデGREEプログラム等の様々な特色あるプログラムを用意し、学生に多様な学修機会を提供している。教育の質の向上に関しては、学類と同様にカリキュラム委員会にてその内容を審議し、専攻教育会議に諮り最終的な審議・承認を行っている。今後も、継続して更なる大学院教育の充実を目指していく。

平成 29 年度の在籍者数の内訳は以下の表の通りである。

M1	M2	D1	D2	D3
65	66	9	13	20

博士前期課程の在籍者数は定員よりも多いが、博士後期課程の方は定員よりも少ない状態が続いている。社会人を対象とした博士後期課程の早期修了プログラムであれば最短 1 年で学位取得が可能であり、今後もこのような特色ある制度の周知・活用を図ることによって博士後期課程の充足率向上を目指したい。

大学院入試に関しては、7 月の推薦入試（定員 15 名）と、8 月と 2 月に一般入試（定員 35 名）を行っている。今年度の入試の結果は下の表の通り。5 月に行われるオープンキャンパスや各研究室への研究室訪問等の広報活動もあり、筑波大学以外からも多くの受験生を集めている。例えば、今年度のオープンキャンパスでは、物理学専攻の見学に 62 名（うち外部 49 名）の参加者があり、大変盛況であった。

入試	受験者数 (外部)	合格者数 (外部)
7 月 (前期推薦)	38 (19)	25 (9)
8 月 (前期)	76 (38)	52 (26)
8 月 (後期)	4 (2)	4 (2)
2 月 (前期)	13 (6)	9 (3)
2 月 (後期)	5 (2)	4 (1)

平成 29 年度の就職進学状況は下の表の通り。物理学専攻の特徴は、他専攻と比較して前期課程から後期課程への進学率が高いことである。博士後期課程の教育は、わが国全体の研究・技術開発の発展にとって重要であると考えており、今後も更に発展させて

いくことが肝要と考えている。

前期課程

進学	企業	独法	教員	公務員	その他
5	44	1	1	5	2

後期課程

大学	研究員	企業	独法	公務員	その他
1	3	3	1	0	2

【2】体験学習(重田育照)

物理学類では、大学における物理学の教育内容を高校生に知ってもらうために、体験学習を毎年実施している。平成29年度は、8月7日(月)に実施し、33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、質疑応答と修了式を行い、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。

時 間	項 目	担当教員等	教室等
9:15～ 9:30	受 付	体験学習補助者	総合研究棟B棟 110室
9:30～ 9:40	物理学類長挨拶 および 事務連絡	物理学類長 小沢 顕 事務局	総合研究棟B棟 110室
9:40～10:00	物理学類説明、実験内容説明、アンケート	体験学習補助者 (引率) 重田 育照, 西堀 英治	総合研究棟B棟 110室
10:05～10:40	【講義1】素粒子	山崎 剛	総合研究棟B棟 110室
10:45～11:20	【講義2】原子核	矢花 一浩	
11:25～12:00	【講義3】宇宙	中井 直正	
12:00～13:00	昼 食	体験学習補助者	学内食堂等
13:00～13:35	【講義4】物性・生命	都倉 康弘	総合研究棟B棟 110室
13:40～13:50	実験の組み分け	西堀 英治	総合研究棟B棟 110室
13:50～16:30	【物理実験】 (4グループに分かれて実験) ① 水と固体の比熱 ② 放射線と宇宙線 ③ 光の干渉と回折 ④ 電流の作る電場	体験学習補助者 (引率) 東山 和幸 森口 哲朗 富本 慎一 西堀 英治	1D104 1C118 1D109 1C113
16:35～17:00	修了書授与、アンケートなど	小沢 顕 重田 育照 体験学習補助者	総合研究棟B棟 110室
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	体験学習補助者 (引率)	各センター

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ようであるが、例年同様必ずしも内容を理解できた訳ではない。今後改善していきたい。

【3】カリキュラム関係(重田育照)

平成29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

全ての講義に関してアンケートを作成し、実施した。

(2) 学位プログラム化に関して

SF教育に伴い導入される学位プログラム化について検討し、1年次の進級要件、および卒業要件となる授業の検討を行った。

(3) SFTに関して

平成31年度より始まるSF教育に関して、「力学1」「力学2」「力学3」「電磁気学1」「電磁気学2」「電磁気学3」に関して内容を検討し、教科書等の選定を行った。

(4) 大きくくり入試に関して

平成32年度より始まる大きくくり入試に関して、それぞれの入試定員や科目などを検討した。

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。

3. 新たな教育方法の開拓と実践

(1) 学生の能動的な学習を喚起させるために、前年度に引き続いて「課題探求実習」を実施している。

(2) 物理学の教育では、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、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29年度は、科学英語担当の専任外国人1名を助教として採用し、授業担当を。

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。

(2) 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29年9月28, 29日)に実施した。合計5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29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	5	3	0	1	2	11	4	0	{ 0 }	[10]	15 { 0 } [10]
宇宙理論	5	6	0	0	2	13	6	0	{ 0 }	[2]	19 { 0 } [2]
原子核理論	1	2	1	1	0	5	0	0	{ 0 }	[3]	5 { 0 } [3]
量子物性理論	3	3	1	0	1	8	2	0	{ 0 }	[5]	10 { 0 } [5]
ナノ量子物性	1	2	0	0	0	3	0	0	{ 0 }	[1]	3 { 0 } [1]
表面界面物性	0	1	0	1	0	2	2	0	{ 1 }	[1]	4 { 1 } [1]
ナノ構造物性 (D2ナノ)	3	2	0	(2)	0	7	5	0	{ 0 }	[2]	12 { 0 } [2]
量子輸送研究	7	2	0	0	0	9	0	0	{ 0 }	[1]	9 { 0 } [1]
生命物理	2	1	0	0	1	4	2	0	{ 0 }	[2]	6 { 0 } [2]
素粒子実験	3	3	1	0	3	10	6	0	{ 1 }	[7]	16 { 1 } [7]
宇宙観測	3	5	3	1	0	12	9	0	{ 0 }	[12]	21 { 0 } [12]
原子核高エネ	6	2	1	3	4	16	7	0	{ 0 }	[10]	23 { 0 } [10]
原子核低エネ	2	3	0	1	4	10	1	0	{ 0 }	[4]	11 { 0 } [4]
磁性物性	0	5	0	0	0	5	1	0	{ 0 }	[2]	6 { 0 } [2]
ナノフォトンクス	9	5	1	1	0	16	6	0	{ 0 }	[12]	22 { 0 } [12]
光ナノ物性	2	2	0	0	0	4	0	0	{ 0 }	[4]	4 { 0 } [4]
強相関物性	1	4	1	0	1	7	3	0	{ 0 }	[3]	10 { 0 } [3]
構造科学	2	3	0	1	0	6	0	0	{ 1 }	[1]	6 { 1 } [1]
低温物性	1	5	0	0	0	6	1	0	{ 0 }	[4]	7 { 0 } [4]
プラズマ	8	6	1	2	2	19	10	0	{ 0 }	[9]	29 { 0 } [9]
連携大学院 (D2ナノ)	0	1	0	1	0	2	0	0	{ 0 }	[0]	2 { 0 } [0]
物質材料	2	0	0	/	/	2	0	0	{ 0 }	[0]	2 { 0 } [0]
合 計	66	66	10	15	20	177	65	0	3	95]	242 { 3 } [95]
(ナノ)	0	0	0	2	0	2	0	0	0	2]	2 { 0 } [2]

*学振欄の{ }内数字はDC1～DC3で内数、{ }なし数字は、PDで外数

*[]は大学院生のため内数

学位論文取得者一覧

【博士論文】

<課程博士> [] 内は指導教員名
数理解物科学研究所 物理学専攻

- 1) 松本 高興〔石橋 延幸〕
Brane Geometry from Matrix Models
(行列模型におけるブレーンの幾何学)
- 2) 大野 修平〔初貝 安弘〕
Topological edge modes in photonic crystals
(フォトニック結晶におけるトポロジカルなエッジモード)
- 3) 佐藤 皓允〔重田 育照〕
First-Principle Studies on the Origin of Amino Acid Chirality in Interstellar Space
(第一原理計算に基づく星間空間におけるアミノ酸キラリティの起源に関する研究)
- 4) 萩原 睦人〔受川 史彦〕
Search for charged Higgs bosons decaying into top and bottom quarks in pp collisions at 13 TeV with the ATLAS detector
(重心系エネルギー13TeVの陽子陽子衝突におけるATLAS検出器を用いたtbに崩壊する荷電ヒッグス粒子の探索)
- 5) 本多 俊介〔原 和彦〕
Search for the Higgs Boson Produced in Association with Top Quarks and Decaying into Bottom Quarks with the ATLAS Detector
(ATLAS検出器を用いたトップクォーク・ヒッグス粒子随伴生成の $H \rightarrow b\bar{b}$ 崩壊様式での探索)
- 6) 木村 創大〔小沢 顕〕
Precision mass measurements of neutron-deficient nuclei in $A \sim 60-80$ region via multireflection time-of-flight mass spectrograph
(多重反射型飛行時間式質量分析器を用いた $A \sim 60-80$ 領域中性子欠乏核の精密質量測定)
- 7) 向井 もも〔小沢 顕〕
In-gas-cell laser resonance ionization spectroscopy of $^{196-198}\text{Ir}$
($^{196-198}\text{Ir}$ のガスセル内レーザーイオン化核分光)
- 8) 野中 俊宏〔江角 晋一〕
First measurement of the sixth order cumulant of net-proton multiplicity distributions in $\sqrt{s_{\text{NN}}} = 200$ GeV Au+Au collisions at the STAR experiment
(STAR実験 $\sqrt{s_{\text{NN}}} = 200\text{GeV}$ 金・金衝突における陽子・反陽子数分布の6次キュムラントの初測定)

- 9) ISLAM MD SHAHINUL [中嶋 洋輔]
Study of Plasma Behavior Based on Particle and Heat Flux Measurements and Numerical Simulation in the GAMMA 10/PDX End-cell
 (GAMMA 10/PDXエンドセルにおける粒子・熱流束計測および数値シミュレーションに基づくプラズマ挙動に関する研究)
- 10) ISLAM MD MAIDUL [中嶋 洋輔]
Study of Fueling by Supersonic Molecular Beam Injection in the GAMMA 10 Tandem Mirror
 (GAMMA 10タンデムミラーにおける超音速分子性ビームによる燃料補給に関する研究)

【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) 川口 百 [石橋 延幸]
 双対性を明白に有する弦理論の新しい定式化とその応用
- 2) 馬場 惇 [谷口 裕介]
 gradient flowによるQCDの熱力学量の解析
- 3) 北澤 優也 [梅村 雅之]
 星間分子の円偏光吸収特性から探るアミノ酸ホモキラリティ起源
- 4) 田沼 朋美 [森 正夫]
 ダークマターハローのユニバーサルスケーリング則
- 5) 藤原 隆寛 [森 正夫]
 Integral Approachを用いた新しいGodunov SPH法の開発
- 6) 油井 夏城 [梅村 雅之]
 再結合光子を考慮した初代星形成の輻射流体シミュレーション
- 7) 齋藤 貴之 [中務 孝]
 拡張Lagrange未定乗数法をもちいたHartree-Fock-Bogoliubov法による原子核四重極・八重極変形の研究
- 8) 八百板 恭介 [中務 孝]
 5次元四重極集団ハミルトニアンを用いた原子核低励起状態の解析
- 9) 工藤 耕司 [初貝 安弘]
Topological numbers of fractional quantum Hall states on various lattices
 (種々の格子上の分数量子ホール効果のトポロジカル数)
- 10) 高橋 雄太 [初貝 安弘]
Weyl points and edge states of 3D mechanical systems
 (3次元力学系のワイル点とエッジ状態)

- 11) 保田 和馬〔初貝 安弘〕
格子上の超伝導相の局在状態の研究
- 12) 新井 和明〔谷口 伸彦〕
非平衡相関量子ドット系の非摂動効果：位相演算子法による解析
- 13) 高木 謙介〔小野 倫也〕
電子デバイス界面における欠陥起因の電子状態変化が伝導電子に及ぼす影響の第一原理計算による解析
- 14) 長澤 裕哉〔岡田 晋〕
微細空孔内包多環芳香族炭化水素分子の構造解析と物性探索
- 15) 古谷 匠〔岡田 晋〕
フラーレン誘導体の物性探索
- 16) 浅井 海図〔都倉 康弘〕
Weak Values Defined with Mixed States and Their Behaviours
(混合状態における弱値とその振る舞い)
- 17) 喜屋武 茜〔重田 育照〕
テルペンの生成機構の理論研究：ワインラクトン生成の立体選択性
- 18) 遠藤 駿〔受川 史彦〕
テストビームによる高精細SOIピクセル検出器の性能評価
- 19) 鈴木 淳貴〔原 和彦〕
HL-LHC用ATLASシリコンピクセル検出器の微細化及びシリコン検出器におけるIV長期安定性の研究
- 20) 若狭 玲那〔武内 勇司〕
COBAND実験に向けたSTJ光応答信号増幅のための極低温電荷積分型前置増幅器の研究開発
- 21) 飯田 美幸〔中井 直正〕
大質量星形成領域W3のアンモニア観測による星形成史の研究
- 22) 佐藤 佑哉〔中井 直正〕
 ^{12}CO と ^{13}CO の観測による近傍銀河の分子ガスに関する統計的研究
- 23) 服部 将吾〔中井 直正〕
野辺山45 m電波望遠鏡用MKIDカメラで用いるシリコンレンズの100-GHz帯反射防止膜の開発
- 24) 村山 洋佑〔中井 直正〕
野辺山45m電波望遠鏡搭載用100-GHz帯電波カメラの109素子MKIDアレイの開発
- 25) 翟 光遠〔中井 直正〕
野辺山45m電波望遠鏡用MKIDカメラの観測データ取得系の開発

- 26) 天野 将道 [小沢 顕]
固体水素標的を用いた陽子ドリップライン核 ^{17}Ne の反応断面積測定
- 27) 黒尾 奈未 [笹 公和]
大交差角ビームビーム衝突によって生じるWake Field及びHead-Tail不安定性
- 28) 細谷 青児 [笹 公和]
6 MVタンデム加速器を用いた難測定核種における加速器質量分析法の開発
- 29) 佐藤 一輝 [江角 晋一]
RHIC-PHENIX実験における $\sqrt{s_{\text{NN}}} = 200, 62.4, 39, 19.6 \text{ GeV}$ 重陽子・金衝突の前方、後方における楕円的集団運動の測定
- 30) レバザ 義美 [江角 晋一]
ALICE実験 $\sqrt{s_{\text{NN}}} = 2.76 \text{ TeV}$ Pb-Pb衝突におけるジェットと反応平面を用いたソフト・ハード相関の研究
- 31) 射場 慧 [小野田 雅重]
重い電子系 LiV_2O_4 のリチウム挿入・脱離効果
- 32) 大竹 尚人 [小野田 雅重]
2重トレリス格子系 $\varepsilon\text{-Cu}_x\text{V}_2\text{O}_5$ の磁性
- 33) 齋藤 健太 [小野田 雅重]
 V_2O_5 のリチウム高ドーパ相の磁性
- 34) 武安 大彬 [小野田 雅重]
 $\beta\text{-Li}_x\text{V}_2\text{O}_5$ の物性とCu置換効果
- 35) 福沢 直也 [小野田 雅重]
低次元磁性体 LiVOPO_4 のリチウム挿入・脱離効果
- 36) 安藤 玄樹 [池沢 道男]
 CdSe ナノプレートレットの単一分光
- 37) 大竹 祐香 [池沢 道男]
金属・絶縁体-金属積層型ナノキャビティを配置した金属表面におけるフェムト秒表面プラズモン波束の伝搬
- 38) 尾島 隆也 [池沢 道男]
半導体量子ドットを用いた $1.55 \mu\text{m}$ 帯表面プラズモンの誘導放出による増幅
- 39) 福島 峻太 [池沢 道男]
窒素をデルタドーパしたGaAsにおける縮退四光波混合
- 40) 木村 龍典 [野村 晋太郎]
ヘリウム温度下電流・磁気イメージングのための広視野磁気顕微鏡システムの開発と評価

- 41) 中野 徹生〔野村 晋太郎〕
二次元電子系試料のねじれ偏光パルス照射効果
- 42) 天羽 薫〔守友 浩〕
電池材料に関する構造と温度特性
- 43) 中田 光彦〔守友 浩〕
粉末プルシャンブルー類似体の組成制御と物性評価
- 44) 樋口 翔馬〔守友 浩〕
アルカリ金属が吸着したPd表面状態の第一原理計算
- 45) 小沢 帆太郎〔西堀 英治〕
X線散乱に基づくナノ粒子の原子配列解析法の開発
- 46) 唐津 秀一〔西堀 英治〕
スキルミオン発現物質 Cu_2OSeO_3 の相転移と結晶構造
- 47) 中村 篤〔西堀 英治〕
硫化銅鉍物熱電材料 $\text{Cu}_{12}(\text{Sb/As})_4\text{S}_{13}$ にZn置換がもたらす構造物性相関
- 48) 梅本 匡敏〔神田 晶申〕
動的応答測定によるグラファイト上単原子層ヘリウム異常比熱の解明
- 49) 園田 大樹〔神田 晶申〕
劈開法で得た高温超伝導体薄膜の電気伝導
- 50) 中村 和史〔神田 晶申〕
格子ひずみを導入したグラフェンの物性評価
- 51) 堀江 彩叶〔神田 晶申〕
折り曲げたグラフェンの低温・強磁場における電気伝導
- 52) 矢部 大輔〔神田 晶申〕
劈開法で得た層状超伝導体 NbSe_2 の超伝導特性とグラフェンとの接合における超伝導近接効果
- 53) 板垣 惇平〔坂本 瑞樹〕
GAMMA 10高周波位相制御実験時のマイクロ波反射計を用いた波動計測
- 54) 伊能 俊太朗〔坂本 瑞樹〕
金属蒸着により表面改質されたタングステンの重水素吸蔵特性及びGAMMA 10の壁表面改質
- 55) 横土 敬幸〔中嶋 洋輔〕
GAMMA 10/PDXにおけるエンド部への希ガス類入射時の分光計測に基づく不純物挙動に関する研究

56) 李 冠億〔中嶋 洋輔〕

GAMMA 10 セントラル部におけるヘリウムを用いた中性粒子ビーム入射の効果に関する研究

57) 梶野 悟史〔南 龍太郎〕

X線計測を用いたGAMMA 10/PDX セントラル部ECRH偏波制御による加熱効果の研究

58) 塩田 健斗〔河合 孝純〕

欠陥を有するグラフェンへのリチウム原子の吸着と拡散：第一原理電子状態計算

物理学セミナー

平成29年度

	開催日	講師	題 目
第1回	10月 4日	中井 直正 (宇宙観測)	過疎の町の再生
第2回	10月11日	笠井 秀隆 (物性実験)	放射光X線回折を用いた構造物質科学
第3回	10月18日	伊敷 吾郎 (素粒子理論)	超弦理論とホログラフィック原理
第4回	10月25日	梅村 雅之 (宇宙理論)	重力波の検出とブラックホール合体の意義
第5回	11月 8日	谷口 伸彦 (物性理論)	ナノスケール系の非平衡量子熱力学
第6回	11月15日	井手 俊介 (プラズマ) (連携大学院)	核融合にむけた新たな装置の建設と物理研究
第7回	11月22日	高橋 徹 (素粒子実験) (広島大学)	宇宙創成の謎に迫る国際リニアコライダー計画
第8回	11月27日	矢花 一浩 (原子核理論)	強い光・短い光を用いた科学のフロンティア
第9回	12月 6日	佐甲 博之 (原子核実験) (クロスアポイントメント)	J-PARC におけるハドロン・原子核研究と超高密度バリオン物質研究への展望

大学院関係経費

1. TA経費 数理物質科学研究科 物理学専攻分 4,374,850 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
119,750 円

**平成29年度科学研究費助成事業交付決定一覧
(科学研究費補助金・学術研究助成基金助成金)**

研究種目		職 名	研究代表者	課題番号	研 究 題 目	金額 (千円)		
新学術領域研究	計	補助金	教授	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	9,300	
	〃	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	12,400
	〃	公	補助金	教授	大塚 洋一	16H00896	折りたたみグラフェンを利用した階段型磁場中の二次元電子系の電気伝導の研究	1,000
	〃	公	補助金	教授	岡田 晋	16H00898	計算科学による原子層物質の新物性デザインとデバイス設計指針の提示	2,800
	〃	公	補助金	教授	西掘 英治	17H05328	先端X線利用による回折結晶学の再構築	1,500
	〃	公	補助金	教授	神田 晶申	16H00897	原子膜積層化により形成した超伝導システムの物性探索	2,800
	〃	公	補助金	准教授	野村 晋太郎	16H00978	先端ナノプローブ分光測定によるトポロジカ物質の解明	2,000
	〃	公	補助金	助教	飯田 崇史	16H00870	セルフトリガー可能な24Na線源開発とCaF2検出器の底バックグラウンド化	2,300
	〃	公	補助金	助教	日野原 伸生	17H05194	生成座標法による二重ベータ崩壊原子核行列要素の評価	1,000
基盤研究(S)	一般	補助金	教授	初貝 安弘	17H06138	トポロジカル相でのバルク・エッジ対応の多様性と普遍性：固体物理を越えて分野横断へ	34,900	
基盤研究(A)	一般	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	1,000	
〃	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	3,900	
〃	一般	補助金	教授	守友 浩	17H01137	イオン注入に伴う物質の局所構造とその構造発展の解明	5,800	
〃	一般	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	8,300	
〃	一般	補助金	講師	中條 達也	17H01122	ALICE実験 ジェットと前方光子で探る高温クォーク物質生成の起源	13,300	
基盤研究(B)	一般	補助金	教授	三明 康郎	17H02876	Di-Jet識別装置を用いたグルオン衝撃波の探索	3,200	
〃	〃	補助金	教授	坂本 瑞樹	26289352	照射損傷タングステンの水素吸蔵とその低減法の開発	1,200	
		助成金					700	
〃	〃	補助金	教授	梅村 雅之	15H03638	一般相対論的輻射流体によるブラックホール超臨界降着流と超大質量星の研究	1,200	
〃	〃	補助金	教授	藏増 嘉伸	15H03651	テンソルネットワーク形式による格子ゲージ理論の研究	4,600	
〃	〃	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	2,300	
〃	〃	補助金	准教授	野村 晋太郎	15H03673	ヘリカルTHz波による二次元電子系局所励起効果の解明	2,300	
〃	〃	補助金	准教授	池沢 道男	17H02909	0次元および2次元的に閉じ込められた励起子の共鳴励起による区別のつかない光子発生	6,000	
〃	〃	補助金	准教授	石塚 成人	15H03650	格子QCDによる K中間子崩壊の直接的CP非保存パラメータの決定	3,500	
〃	〃	補助金	准教授	小野 倫也	16H03865	大規模第一原理スピン輸送シミュレーターの開発と革新的デバイス用界面構造の設計	2,000	
国際共同研究強化	助成金	講師	久保 敦	16KK0093	高空間分析・時間分析イメージング法によるメタマテリアルの新奇な波束伝搬機構の解明	10,200		
基盤研究(C)	一般	助成金	教授	石橋 延幸	25400242	弦の場の理論を用いた超弦理論・D-ブレーンの研究	800	
〃	〃	助成金	教授	金谷 和至	15K05041	有限温度・有限密度クォーク物質の物性と相構造	800	
〃	〃	助成金	准教授	森下 將史	16K05432	2次元量子固体の構造操作による量子現象の発現と解明	1,200	
〃	〃	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	17K05406	ゲージ理論-重力理論双対性の可積分性を用いた強結合ゲージ理論の研究	900	
〃	〃	助成金	研究員	滑川 裕介	15K05068	格子量子色力学による新たなハドロン存在形態の解明	700	
挑戦的萌芽研究	助成金	教授	西堀 英治	16K13660	弾性・非弾性散乱データ同時解析による計測物質科学の創成	700		
〃	助成金	教授	初貝 安弘	16K13845	四元数のトポロジカル相での意義の解明への挑戦：多体問題と時間反転の破れ	800		

**平成29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	武内 勇司	16K13797	半導体SOI回路と超伝導検出器STJの融合による革新的高感度検出器の開発	1,000
"	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	300
若手研究(A)	助成金	准教授	山崎 剛	16H06002	量子色力学を基にした原子核構造の解明へ向けた基礎研究	7,400
"	補助金	講師	久保 敦	26706018	通信帯フェムト秒表面プラズモン波束の顕微映像化と非線形増幅	2,000
"	助成金	助教	庄司 光男	17H04866	光化学系Ⅱ酸素発生中心における水分解反応の全反応経路解明	16,700
若手研究(B)	助成金	助教	池添 竜也	15K17797	ミラー磁場配位における自発励起アルベン波動の境界条件および非等方性緩和の研究	500
"	助成金	助教	渡邊 祥正	16K17657	巨大分子雲形成と星形成史を繋ぐ化学診断法の開拓	1,000
"	助成金	助教	森口 哲朗	16K17678	スピン構造理解のための不安定原子核の陽子及び中性子密度分布の研究	800
"	助成金	助教	伊敷 吾郎	16K17679	超弦理論の非摂動的定式化についての研究	600
"	助成金	助教	飯田 崇史	16K17700	高発光量ヨウ化物シンチレータによる宇宙暗黒物質探索のための基礎研究	1,800
"	助成金	助教	丹羽 秀治	16K20940	非白金燃料電池触媒の活性点分布の解明	1,200
"	助成金	助教	日野原 伸生	16K17680	中性子一陽子対相関・対凝縮の解明	700
"	助成金	助教	古家 健次	17K14245	星間雲から原始惑星系円盤に至る分子組成進化の理論的研究	1,000
合 計						181,200

※ 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29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	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	10,000,000
2	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	4,650,000
3	教授	久野 成夫	(共)自然科学研究機構 国立天文台	大学間連携VLBI観測事業に係る研究 先端的天文学研究の推進－高精度VLBI観測による銀河系の構造及び進化の解明－	5,482,000
4	教授	岡田 晋	国立研究開発法人科学技術振興機構	計算科学によるフレキシブルマテリアルのナノ界面動態の研究	400,000
合 計					20,532,000

平成29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	西堀 英治	(独)日本学術振興会	学振OP共同研究	220,800
2	教授	西堀 英治	(独)日本学術振興会	学振OP共同研究	2,400,000
3	教授	初貝 安弘	(独)日本学術振興会	学振スイスセミナー	2,400,001
4	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	329,000
合 計					5,349,801

平成29年度 共同研究

NO	職 名	氏 名	共同研究相手方名	研 究 題 目	金 額 (円)
1	教授	神田 晶申	(独) 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	4,710,000
2	准教授	小野田 雅重	三菱瓦斯化学㈱	LiBH ₄ 系のイオンダイナミクスに関する研究	1,000,000
3	助教	新田 冬夢	大学共同利用機関法人自然科学研究機構	野辺山45m 望遠鏡用 90-110GHz 帯レンズ結合型 MKID カメラの開発	2,400,000
合 計					8,110,000

平成29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	中井 直正	READYFOR株式会社	南極からの暗黒銀河探索に向けた電波カメラの開発	12,263,000
2	教授	江角 晋一	伊藤科学振興会	「原子核衝突ビームエネルギー走査による高密度クォーク核物質の研究」に対する研究助成	1,000,000
合 計					13,263,000

平成29年度 その他

NO	職 名	氏 名	機関等名	事 業 名 称 等	金 額 (円)
1					
2					
合 計					0

平成29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	西堀 英治	平成29年度日本結晶学会 学術賞	「放射光X線粉末回折による確度の高い構造因子の計測および未知構造決定」	H29. 11
2	教授	藏増 嘉伸	平成28年度実施課題における HPCI利用研究課題優秀成果賞	格子QCDを用いた原子核構造計算へ向けた基礎研究	29. 11
3	准教授	山崎 剛	平成28年度実施課題における HPCI利用研究課題優秀成果賞	格子QCDを用いた原子核構造計算へ向けた基礎研究	29. 11

役 割 分 担 （ 平 成 2 9 年 度 ）

【物理学域】

物理学域長	矢花
グループ長	石橋、梅村、中務、都倉、重田、 受川、中井、三明、西堀、坂本
理論グループ懇談会議長	都倉
実験系教授懇談会世話人	受川
カリキュラム委員長	重田
カリキュラム委員	小沢、重田、西堀、森、矢花、 中井、坂本、受川、藏増
物理学域広報委員会	重田
物理学域教育研究倫理委員会	必要に応じて
物理学域図書係	岡田
学生支援対応チーム	守友、藏増、小沢、重田
学域計算機委員会	武内(委員長)・サブネットワーク委員
物理学域スペース調査検討委員会	守友、石橋、梅村、中務、都倉、 重田、受川、中井、江角、西堀、中嶋
校正線源管理責任者	守友
校正線源保管責任者	小沢
自然系学系液体窒素タンク管理委員	小野田
科学の芽賞	武内、沼倉
朝永記念室	金谷、受川
実験廃棄物取扱責任者	東山
工作室管理担当	池沢
高圧ガスゾーン管理者	神田(1F)、小沢(自然E)、神田(自然D)

【数理物質系・数理物質科学研究科】

系長	伊藤(電物)
研究科長	鈴木(物分)
物理学専攻長	守友
物理学専攻学務委員	藏増
ナノサイエンス・ナノテクノロジー専攻長	黒田(質工)
系長室会議構成員	守友、初貝、金谷
系人事委員会総会委員	守友、小沢、中嶋、梅村
系運営委員会委員	守友、小沢、(藏増)
研究科運営委員会委員	守友、藏増、(小沢)
研究科学務委員会	藏増
研究科就職委員会	藏増
系 広報委員会委員	藏増
系 図書委員会委員	岡田
系 施設・安全管理委員会委員	守友
系 情報環境委員会	守友、武内
系 総合研究棟B棟管理委員会委員	
系 総合研究棟B棟ドラフト管理委員会	
系 研究倫理委員会委員	藏増
研究科 学生相談室員	石塚
専攻eラーニング担当教員	江角

【物理学類】

物理学類長	小沢
物理学類学務委員	重田
物理学実験責任者	西堀
学類クラス担任 (1年)	久野、山崎
(2年)	中務、中條
(3年)	森、佐藤(構)
(4年)	坂本、谷口(裕)

【理工学群】

入学試験実施委員会	南、小野
全学学群教育課程委員会	重田
全学学群教職課程委員会	森下
学生担当教員	中條
スポーツ'-運営委員会	森
理工学群FD委員(FD窓口教員)	重田
理工学群総合政策室委員	都倉
理工学群広報委員会	重田
アドミッションセンター専門委員	森
教職実践演習担当教員	森下
ハラスメント相談員	
教育実習校訪問指導教員	(4年担任)
キャリア支援室員	
キャリア支援担当教員	谷口(裕)
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	小沢
研究基盤総合センター低温部門運営委員会	野村
研究基盤総合センター工作部門運営委員会	池沢
研究基盤総合センター分析部門運営委員会	守友
アイトープ環境動態研究センター運営委員会	小沢
プラズマ研究センター運営委員会	石橋、中井
プラズマ研究センター運営協議会	石橋、中井
計算科学研究センター運営委・運営協議会	都倉
計算科学研究センター人事委員会	都倉
学際物質科学研究センター運営委員会	守友
学生生活支援室員	

【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	
ハラスメント防止対策委員会	森
キャリア支援室担当教員会議構成員	藏増
FD委員会(物理学専攻FD窓口教員)	重田
つくばグローバルサイエンスウイーク実地委員	久野
産学連携推進プロジェクト審査委員会委員	

物理学域人事異動

(平 2 9 . 4 . 1 ~ 平 3 0 . 3 . 3 1)

【物理学域に來られた方々】

氏 名	職名	発令日	異 動 内 容 (前職)
AL ASSADI	助教	H29. 4. 1	National Institute for Materials Science
飯田崇史	助教	H29. 4. 1	大阪大学物理研究センター
渡邊祥正	助教	H29. 4. 1	東京大学理学系研究科
溝口 知成	助教	H30. 3. 1	学習院大学科研費研究員
van Leeuwen, Marco	教授	H30. 3. 1	ユニット招致
Peitzmann, Thomas	教授	H30. 3. 1	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
中井 直正	教授	H30. 3. 31	関西学院大学
鈴木 伸司	助教	H30. 3. 31	近代物理学研究所 (中国)
坂井 真吾	助教	H30. 3. 31	客員研究員
中込宇宙	博士特別研究員	H29. 9. 30	㈱東芝電力・社会システム技術開発センター
永田和樹	研究員	H30. 3. 15	中部プラントサービス株式会社
AL ASSADI	助教	H30. 3. 31	NIMS
Busch Oliver	助教	H30. 3. 31	死亡

	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	計算科学セ 計算科学セ 計算科学セ
		准教授	石塚成人 谷口裕介 山崎 剛	
		助教	吉江友照 佐藤勇二 毛利健司 伊敷吾郎 大野浩史	
	宇宙物理	教授	梅村雅之	計算科学セ 計算科学セ 計算科学セ 計算科学セ 計算科学セ
		准教授	森 正夫	
		講師 助教 助教	吉川耕司 古家健次 Alexander Wagne	
	原子核	教授	矢花一浩	計算科学セ 計算科学セ 計算科学セ 計算科学セ
		講師	中務 孝	
		助教	橋本幸男 日野原伸生	
	物性	教授	岡田 晋	TIMS 計算科学セ
		准教授	都倉康弘 初貝安弘 小野倫也 谷口伸彦 溝口知也 吉田 恭	
		助教		
	生命物理	教授	重田育照	計算科学セ 計算科学セ
		助教	庄司光男 AL ASSADI	
実験	素粒子	教授	受川史彦	国際テニュア教員
		准教授	原 和彦	
		講師 助教 名誉教授 教授	武内勇司 佐藤構二 大川英希 飯田崇史 金 信弘 Kim. Soo. Bong	

	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 渡邊祥正	
		助教		
	原子核	教授	三明康郎	研究基盤セ
		准教授	小沢 颯 江角晋一 笹 公和 中條達也 鈴木伸司 森口哲朗 坂井真吾	
		講師 助教	van Leeuwen, Marco Peitzmann, Thomas Busch Oliver	研究基盤セ
				海外ユニット 海外ユニット 国際テニュア教員
	物性	教授	守友 浩 神田晶申 西堀英治 小野田雅重 池沢道男 野村晋太郎 森下将史 東山和幸 久保 敦 富本慎一 小林 航 笠井秀隆 丹羽秀治 Hathwar Rama 大塚洋一 舩本泰章 Iversen Bo. Brummerstedt	TIMS
		准教授		国際テニュア教員
		講師 助教		
		名誉教授 名誉教授 教授		海外ユニット 海外ユニット
	プラズマ	教授	中嶋洋輔 坂本瑞樹 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 今井 剛	プラズマセンター長 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 プラズマセンター

研究員

滑川裕介	素粒子理論
渡辺陽介	宇宙観測
武政健一	素粒子実験
齋藤弘雄	宇宙観測
丸山実那	物性理論
Georgios Giavaras	物性理論
村木 久祥	素粒子理論

客員教員

新井康夫	KEK
大見和史	KEK
西堀俊幸	宇宙航空
幅 淳二	KEK
宮武宇也	KEK
田中真伸	KEK
笠井康子	総務省
若杉昌徳	
秋葉康之	
杉立 徹	
濱垣秀樹	
松浦周二	

連携大学院

位地正年	NEC	物理, ナノ
河合孝純	NEC	物理, ナノ
佐々木健一	NTT	物理, ナノ
後藤秀樹	NTT	物理, ナノ
西村俊二	理化学	物理
坂本慶司	原研	物理
仲野友英	NEC	物理, ナノ
丸山敏毅	原研	物理
井手俊介	原研	物理
宮本良之	産総研	物理
山本 剛	NEC	物理, ナノ
横尾 篤	NTT	物理, ナノ

連係大学院

宇治進也	NIMS
迫田和彰	NIMS
胡 曉	NIMS
山口尚秀	物質・材料機構

技術職員

大川和夫	シニアスタッフ
加藤純雄	

クロスアポイント

吉田拓生	福井大学
山口貴之	埼玉大学
小沢恭一郎	J-PARC
池上陽一	高エネルギー
佐甲博之	日本原子力研究所
徂徠和男	北海道大学

事務職員

飯村美智子	教務
米山啓子	総務
矢口美佐子	研究支援
谷島有美	会計
新 悦子	会計

～4. 30
6. 1～

年次研究報告 筑波大学数理物質系物理学域

2017（平成29）年度

発行 2018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 029-853-6525

FAX 029-853-6618

ISSN 2189-7557