

筑波大学 数理物質系
数理物質融合科学センター

平成28年度
年次報告書



数理物質融合科学センター

平成29年6月

はじめに

筑波大学数理物質融合科学センター (Center for Integrated Research in Fundamental Science and Engineering) は、筑波大学が目指す国際的に存在感のある研究大学への強化方策の一環である学術センターの一つとして、平成26年9月1日に数理物質系に発足した。物質の本質の統一的理解を数理的手法によって進める世界的研究拠点を形成し、宇宙史の統一的理解と、環境エネルギー材料の研究による新物質の創出を飛躍的に推進させることを目的としている。

この年次報告は、上記目的に向けた、平成28年度の活動実績をまとめたものである。

なお、センターの英語名は“CiRfSE”と略記し、「サーフス」と読む。センターの最新の活動状況や追加情報については、センターのホームページ

<http://www.pas.tsukuba.ac.jp/~CiRfSE/>

も参照されたい。これまでの活動資料や年次報告書などもアーカイブされている。

目次

1	センター活動概要	4
1.1	センター設置の経緯と目的	5
1.2	センターの構成	7
1.3	センターの構成教員	7
1.4	研究活動支援体制の整備	8
1.5	運営協議会	8
1.6	運営室会議	10
1.7	その他の会議	11
1.8	宇宙史の暗黒を照らす国際研究拠点形成	11
1.9	平成28年度予算	13
1.10	平成29年度以降に向けて：数理物質系附属センターの改組・再編	14
2	研究集会等開催実績	16
2.1	国際会議 TGSW 2016	17
2.2	第3回 CiRfSE ワークショップ	18
2.3	2017 TIMS-CENIDE-NTHU Joint Symposium on Nanoscience and Nanotechnology / Workshop of Pre-Strategic Initiatives: Ensemble of Light with Matter and Life for Discovery and Insights of Novel Phenomena / Workshop of CiRfSE, Research Core for Developing Energy and Environment-friendly Materials	19
2.4	第5回 連携サロン	20
2.5	第6回 連携サロン	20
2.6	第1回 宇宙史サロン	21
2.7	第2回 宇宙史サロン	22
3	学生・一般向け広報活動	23
3.1	筑波大学学園祭「雙峰祭」における企画展示	23
3.2	南極望遠鏡プロジェクトに関する講演会等	24
4	宇宙史国際研究拠点 活動報告	27
4.1	南極天文部門	29
4.2	素粒子構造部門	36
4.3	クォーク・核物質部門	68
5	環境エネルギー材料研究拠点 活動報告	95
5.1	物質変換材料部門	97
5.2	エネルギー貯蔵・変換物質部門	115
5.3	バイオエネルギー研究チーム	129

6	逆問題研究推進室/数理科学研究推進室 活動報告	139
7	光量子計測器開発推進室 活動報告	146
8	資料	151
8.1	センター細則	151
8.2	競争的資金獲得状況	155
8.3	共同研究・受託研究	158
8.4	研究員・研究生等の受け入れ	161
8.5	各種受賞等	162
8.6	学会活動・各種委員等	163
8.7	新聞等報道・特記事項	166

1 センター活動概要

2016年度活動概要

研究体制の強化・展開

- 海外教育・研究ユニット招致：Bo Iversen教授 (デンマーク オーフス大学), 副PI V. R. Hathwar 助教採用
環境エネルギー材料研究拠点 西堀教授, 国際TT笠井助教と協力して、エネルギー関連材料の精密電子状態解析法の開発と利用研究
- H28筑波大学プレ戦略イニシアティブ「光と物質・生命科学のアンサンブルによる新現象の発掘と解明」(山本洋平准教授)
2016/11 キックオフ
- 数理学研究推進室 (2017/1)：逆問題研究推進室を改組・再編し、AI など、より広範な融合研究・連携を準備
- 公募スペース (人文社会学系B棟1階10部屋) 採択： CiRfSE活動中心として整備

国立大学機能強化経費「宇宙史の暗黒を照らす国際研究拠点形成」

- 2016年度概算要求 (2015/夏) => 採択
- 国立大学機能強化経費 (2016-2021)
2016年度：24,800,000円
計算科学研究センターと協力して推進
- 海外教育・研究ユニット招致
- クロスアポイントメント教員
- 助教、研究員
- 客員教員



新たな展開に向けて

- 概算要求「革新的エネルギーデバイス開発拠点」
CiRfSE環境エネルギー材料拠点+TIMS+パワエレで、
基礎研究と産業応用を繋ぐ研究・開発センター構築。
国際連携とTIAを通じた産学連携を接続。
- 南極天文台計画の推進：ドームC (フランス・イタリア) を使う計画に修正し、予算を大幅に削減。
全国で講演会、つくばEXPOセンターでの展示開始、など、一般広報活動を強化。



研究集会

- 2016/9/17-19 国際会議TGSW2016 セッション6 (宇宙史) + セッション7 (Green Energy) (参加者：約80)
- 2017/1/23-24 第3回CiRfSEワークショップ (参加者：37)
- 連携サロン 2回 (2016/6, 2016/12)
- ほか多数 (センターホームページ参照)

図1 数理物質融合科学センター 平成28年度活動概要

平成28年度には、26年度・27年度に引き続き、CiRfSEの国際研究拠点としての研究体制の強化と展開を進めた。また、平成29年度に予定されている、数理物質系センターの拡充的改組・再編に向けて、準備を進めた。

準備を進めていた環境エネルギー材料分野の海外教育研究ユニット招致として、デンマーク・オーフス大学のIversen教授の研究拠点分室を設置し、副PIとしてHathwar助教を採用した。また、計算科学研究センターと共同で提出した概算要求「宇宙史の暗黒を照らす国際研究拠点形成」の採択により配分された「平成28年度機能強化経費 (機能強化促進分)」に基づき、宇宙史分野の海外教育研究ユニット招致 (韓国ソウル大学 Soo-Bong Kim 教授) や、助教、研究員の採用、クロス・アポイントメント制度を活用した連携教員雇用、客員教員採用などを推進した。これにより、宇宙史国際連携拠点の実体化を進める。同時に、環境エネルギー材料分野の研究体制強化をめざして、学際物質科学研究センター (TIMS)、パワエレ寄附講座と共同で、概算要求「革新的エネルギーデバイス開発拠点」を提出した。大学の国際連携とTIAを通じた産学連携を接続し、基礎研究から応用までを融合した開発・研究体制をめざしている。この概算要求も採択され、筑波大学

2015年度までの活動概要

2014/9/1 発足

- 系への投資の attractor/receptor、外部資金獲得の活動中心として
- 系(大学)の「とんがり」の発展形への接続中心として

全学戦略枠

- 逆問題研究推進室(数理科学研究推進室) 教授
- 環境エネルギー材料研究拠点/TIMS 教授

国際TT助教

- 大川英希(素粒子) 14/8/1 着任 => スイス・CERN
- Oliver Busch(QGP) 14/12/18 着任 => ドイツ・ハイデルベルク大学
- 笠井秀隆(エネルギー貯蔵変換) 15/4/1 着任 => デンマーク・オーフス大学
- 金子元(逆問題) 部局国際TT 14/7/1 着任 => フランス・ストラスブール大学

デンマーク・オーフス大CMCとは、2015海外ユニット招致(西堀)でも連携。

コンソーシアムの立ち上げ

融合研究の国際的ハブ構築を目指し:

研究集会

- 国際会議TGSW2014, TGSW2015
- CiRfSEワークショップ/運営協議会 3回
- その他 研究会・WS 主催4回
- 連携サロン 4回



研究体制の強化・展開

- 2015/10 「光量子計測器開発推進室」設置
- 2015/10 環境エネルギー材料研究拠点「バイオエネルギー研究チーム」設置

外部資金獲得に向けて

- 2015 概算要求「宇宙史の暗黒を照らす国際研究拠点形成」: 計算科学研究センターと連携して申請 => 採択
- 2015 文部科学省海外若手研究者中短期招聘プログラム => 採択(20万円) 江角
- 2015 JSPS2国間交流事業 => 採択(H27:184万円) 西堀
- その他いろいろ申請(=> 不採択)



図2 数理物質融合科学センター 平成27年度までの活動概要

の中期計画に従って、2つの概算要求プロジェクトを推進するために、数理物質系センターの拡充的改組・再編を平成29年度中に実行することとなった。研究集会としては、国際会議1回、連携サロン2回その他、多数の研究集会を主催・共催した。年度末には、拠点・部門等の成果発表と運営協議会への全体報告を兼ねた第3回 CiRfSE ワークショップを開催した。

平成28年度の活動概要を、図1に示す。

1.1 センター設置の経緯と目的

筑波大学数理物質融合科学センターは、平成25年8月に文部科学省により採択された「国立大学法人 筑波大学 研究力強化実現構想」に基づき、筑波大学に設置されることになった3つの学術センター(「地球・人類共生科学センター」、「数理物質融合科学センター」、「人文社会国際比較センター」)のひとつとして、平成26年9月1日に数理物質系に設置された。

研究力強化実現構想を受け、数理物質系で研究力の分析と新センター設立の検討を行った結果、日本の大学ベンチマーキング2011でQ1V2に評価された物理学分野の研究力をさらに強化して宇宙史解明を推進する宇宙史国際研究拠点と、つくば地区連携・TIA連携を活用した独自の基礎研究による革新的環境エネルギー材

料創出を目指した環境エネルギー材料研究拠点を2つのコアとして、物質の本質の統一的理解を数理的手法によって進める世界的研究拠点を形成し、宇宙史の統一的理解と、環境エネルギー材料の研究による新物質の創出を飛躍的に推進させることを目的とする融合科学センターを構想することとなった。また、「融合研究企画室」を置き、新たな学際融合分野の開拓とそれによる研究のさらなる展開の可能性を探索するための分野間交流を企画し、新展開に向けた研究を推進するための融合研究推進室を設置することとした。融合研究推進室としては、センター発足時には、2つの研究拠点や学内のアクティビティを融合させた新たな展開を数学的視点を導入して推進させるために、逆問題研究推進室を置いた。

数理物質融合科学センターは、数理物質系では、学際物質科学研究センター (TIMS) に継ぐ第2の部局センターとなる。CiRfSE の環境エネルギー材料研究拠点は、TIMS の将来計画の核と位置付け、将来的には、TIMS と一体化して世界的研究拠点を目指すこととした。

平成27年度までの活動概要を、図2に示す。詳細は「数理物質融合科学センター 平成26年度年次報告書」および「数理物質融合科学センター 平成27年度年次報告書」を参照。

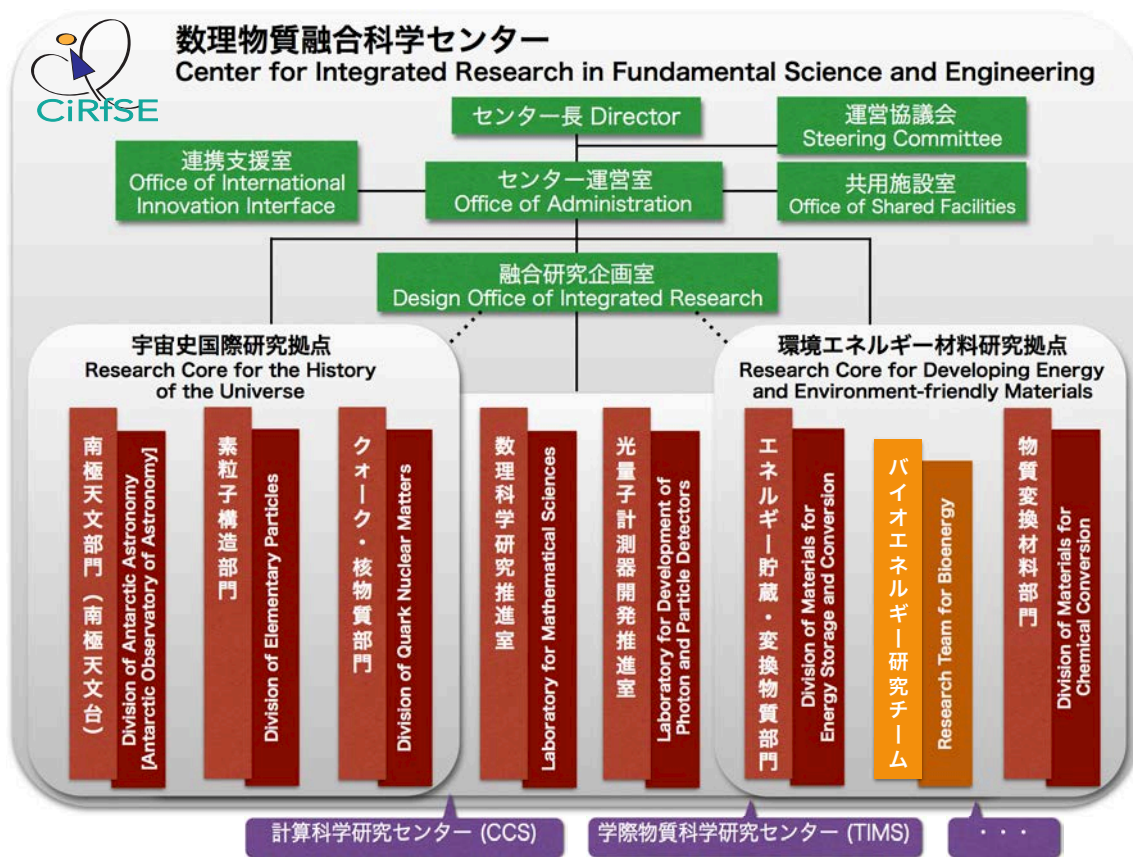


図3 数理物質融合科学センターの構成 (平成28年度末現在)

表1 センター構成教員（平成28年度末時点）

職名等	氏名	域	職名	備考	
センター長	金谷和至	物理学	教授		
宇宙史国際研究拠点長	金信弘	物理学	教授		
環境エネルギー材料研究拠点長	鍋島達弥	化学	教授		
南極天文部門長	中井直正	物理学	教授		
南極天文部門構成教員	久野成夫	物理学	教授		
南極天文部門構成教員	新田冬夢	物理学	助教		
素粒子構造部門長	受川史彦	物理学	教授		
素粒子構造部門構成教員	石橋延幸	物理学	教授		
素粒子構造部門構成教員	吉田拓生	物理学	教授	福井大学	
素粒子構造部門構成教員	Kim Soo-Bong	物理学	教授	(ユニット招致PI)	
素粒子構造部門構成教員	原和彦	物理学	准教授		
素粒子構造部門構成教員	池上隼一	物理学	准教授	高エネルギー加速器研究機構	
素粒子構造部門構成教員	武内勇司	物理学	准教授		
素粒子構造部門構成教員	佐藤 構二	物理学	講師		
素粒子構造部門構成教員	大川英希	物理学	助教		国際TT
素粒子構造部門構成教員	伊敷吾郎	物理学	助教		
クォーク・核物質部門長	江角 晋一	物理学	准教授		
クォーク・核物質部門構成教員	中條 達也	物理学	講師		
クォーク・核物質部門構成教員	小澤 顕	物理学	教授		
クォーク・核物質部門構成教員	山口 貴之	物理学	准教授	埼玉大学	
クォーク・核物質部門構成教員	小沢 恭一郎	物理学	准教授	高エネルギー加速器研究機構	
クォーク・核物質部門構成教員	BUSCH, Oliver	物理学	助教		国際TT
クォーク・核物質部門構成教員	坂井 真吾	物理学	助教		
クォーク・核物質部門構成教員	金谷和至	物理学	教授	(センター長)	

職名等	氏名	域	職名	備考	
エネルギー貯蔵・変換物質部門長	守友 浩	物理学	教授		
エネルギー貯蔵・変換物質部門構成教員	西堀 英治	物理学	教授		
エネルギー貯蔵・変換物質部門構成教員	岡田 晋	物理学	教授		
エネルギー貯蔵・変換物質部門構成教員	小林 航	物理	助教		
エネルギー貯蔵・変換物質部門構成教員	丹羽 秀治	物理	助教		
エネルギー貯蔵・変換物質部門構成教員	笠井 秀隆	物理学	助教		国際TT
エネルギー貯蔵・変換物質部門構成教員	HATHWAR Venkatesha Rama	物理学	助教	(ユニット招致PI)	
物質変換材料部門長	中村 酒見	物質工学	教授		
物質変換材料部門構成教員	神原 貴樹	物質工学	教授		
物質変換材料部門構成教員	山本 洋平	物質工学	准教授		
物質変換材料部門構成教員	近藤 剛弘	物質工学	准教授		
数理学研究推進室長	青嶋 誠	数学	教授		
数理学研究推進室構成教員	秋山 茂樹	数学	教授		
数理学研究推進室構成教員	木下 保	数学	准教授		
数理学研究推進室構成教員	田崎 博之	数学	准教授		
数理学研究推進室構成教員	照井 章	数学	准教授		
数理学研究推進室構成教員	金子 元	数学	助教		国際TT
数理学研究推進室構成教員	磯崎 洋	数学	教授		
光量子計測器開発推進室長	金信弘	物理学	教授	(宇宙史国際研究拠点拠点長)	
光量子計測器開発推進室構成教員	西堀 英治	物理学	教授	(エネルギー貯蔵・変換物質部門構成教員)	
光量子計測器開発推進室構成教員	富田 成夫	物質工学	准教授		
光量子計測器開発推進室構成教員	江角 晋一	物理学	准教授	(クォーク・核物質部門部門長)	
光量子計測器開発推進室構成教員	原 和彦	物理学	准教授	(素粒子構造部門構成教員)	
光量子計測器開発推進室構成教員	近藤 剛弘	物質工学	准教授	(物質変換材料部門構成教員)	

1.2 センターの構成

センターの構成や各部の機能は「国立大学法人筑波大学数理物質融合科学センター規則」(8章参照)で定義されている。平成27年10月に、さらなる融合と展開を目指して、「光量子計測器開発推進室」と「バイオエネルギー研究チーム」を新設した。平成29年1月には、ビッグデータやAIやなど、今後期待されるより広い範囲の分野との数学関連の融合研究・連携を準備し、平成29年度に予定されている数理物質系付属センターの改組・再編(1.10節参照)の中での数学分野の対応体制を確立するために、逆問題研究推進室を拡充して「数理科学研究推進室」に再編した。図3に、現在のセンター構成図を示す。

1.3 センターの構成教員

表1に平成28年度末の時点におけるセンター構成教員表を示す。連携教員は、各部門の報告を参照。

本センターには、合計4枠の「国際テニュアトラック教員」が配置されている。国際テニュアトラック教員は、「国立大学法人 筑波大学 研究力強化実現構想」に基づいて導入された教員枠で、海外連携機関に一定期間以上派遣し、国際共同研究体制の強化を目的としている。筑波大学から、研究力強化を重点的に推進する学術センターとして3枠が配置された。また、数理物質系から、部局で配置する国際テニュアトラック教員として、さらに1枠が配置された。これを受け、素粒子構造部門、クォーク・核物質部門、エネルギー貯蔵・変換物質部門、逆問題研究推進室に各1枠が配置され、大川英希助教、Oliver Busch 助教、笠井秀隆助教、金子元助教がそれぞれ採用された。大川助教はスイス・CERN 研究所に、Busch 助教はドイツ・ハイデルベルク大

学に、笠井助教はデンマーク・オーフス大学に、金子助教はフランス・ストラスブール大学に派遣され、国際連携研究を推進している。国際テニュアトラック教員に関しては、平成27年度末に中間審査を行い、平成29年度の最終審査に向けて、4名とも順調に進捗していることを確認した。

平成26年度から準備を進めていた環境エネルギー材料分野の海外教育研究ユニット招致として、デンマーク・オーフス大学の Center for Materials Crystallography (CMC) センター長 Bo Iversen 教授の研究拠点分室を設置した。Iversen 教授は平成27年3月にPIに着任し、また、その副PIとして、Venkatesha Rama Hathwar 氏が平成27年5月に任期付き助教として採用され、環境エネルギー材料研究拠点の各研究室との密接な連携のもと、海外教育研究ユニットとしての活動を開始した。

また、平成28年度には、国立大学強化促進経費「宇宙史の暗黒を照らす国際研究拠点形成」に基づき、宇宙史分野で、海外教育・研究ユニット招致によるPI教授採用、クロス・アポイントメント教員採用を行い、数理工学系の任期付き助教採用、客員教員採用、研究員雇用などを進めた（一部は、平成29年4月以降の着任）。また、全学戦略ポイントにより助教1名を採用した（平成29年4月着任）。詳細は、1.8節を参照されたい。

平成27年度末に定年退職された磯崎洋 前逆問題研究推進室長には、特命教授（筑波大学数理工学系）として、引き続きセンターの活動に協力していただいた。

1.4 研究活動支援体制の整備

CiRfSE は当初は専用スペースを持たない組織として発足し、外部資金獲得や分野融合の活動を蓄積してきたが、宇宙史概算要求の採択など、プロジェクト活動をより具体的に支援する必要性が高まったことを受け、平成28年2月に筑波大学の公募スペースに応募した。その結果、人文社会学系棟 B 棟 1 階 10 部屋のまとまったスペースが採択された。光熱水料とスペースチャージ以外の使用料は免除されている。

運営室会議でその活用方法について審議し、センター長室兼事務室、セミナー室、教員居室・研究室を置くこととした。対応して、インターネットや電話回線、テレビ会議システムなどを整備した。また、平成28年度には、急増するセンターの事務を処理するため、センター専属の非常勤職員（事務補佐員）1名を公募し、選考の結果、瀧真子さんを採用した。これらにより、研究支援体制の充実も進めた。教員居室・研究室は、クロスアポイントメント教員や客員教員の居室としても活用している。（図4参照。）

1.5 運営協議会

センターの運営方針やセンター事業の実施状況の点検及び評価に関する重要事項などを審議するために、運営協議会が設置されている。その委員は、センター長（センター細則第9条2(1)）、研究担当副学長が指名する者（同(2)）、研究拠点長（同(3)）、学外の学識経験者（同(4)）、数理工学系長（同(5)）、およびセンター長が指名する本学の職員（同(6)）から構成される。

平成28年度末現在の運営協議会委員名簿を表2に示す。

環境エネルギー材料分野における「学外の学識経験者」としてセンター発足時以来 CiRfSE 運営協議会に参加してこられた東京理科大学名誉教授の荒川裕則先生が、事情により平成27年12月に退職され、後任の検討の結果、物質・材料研究機構主任研究者の魚崎浩平先生が、平成28年4月から運営協議員に就任された。「研究担当副学長が指名する者」は、評価・検証すべきセンターの活動実績がある程度蓄積されるまで、センター発足時からしばらく空席としていたが、3年目の平成28年度に入り、11月から、筑波大学研究戦略室長の櫻井鉄也教授に就任していただくことになった。「センター長が指名する本学の職員」としては、当セン

CiRfSE活動拠点

2016/2 公募スペース申請 => 承認

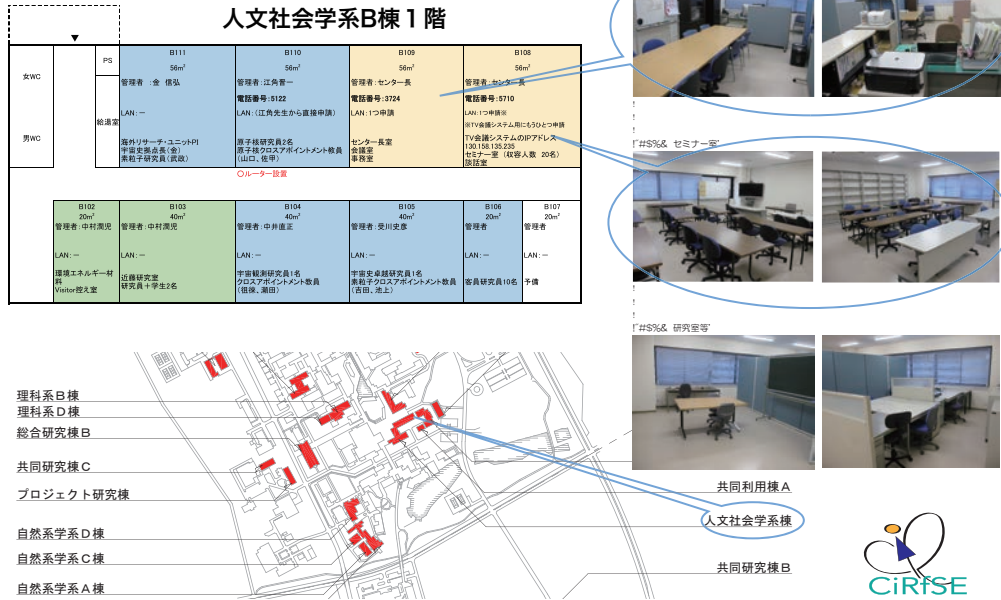


図4 CiRfSE 活動スペースの整備

表2 センター運営協議員 (平成28年度末時点)

選出根拠	役職名	氏 名	域	職 名	備 考
第9条第2項第1号	センター長	金 谷 和 至	物理学	教 授	
第9条第2項第2号	システム情報系、研究戦略室長	櫻 井 鉄 也		教 授	研究担当副学長が指名する者
第9条第2項第3号	宇宙史国際研究拠点長	金 信 弘	物理学	教 授	
第9条第2項第3号	環境エネルギー材料研究拠点長	鍋 島 達 弥	化 学	教 授	
第9条第2項第4号	高エネルギー加速器研究機構	新 井 康 夫		教 授	学外の学識経験者
第9条第2項第4号	物質・材料研究機構	魚 崎 浩 平		主任研究者	学外の学識経験者
第9条第2項第5号	数理物質系長	伊 藤 雅 英	物理工学	教 授	
第9条第2項第6号	計算科学研究センター長	梅 村 雅 之	物理学	センター長	センター長が指名する大学の職員

ターが目標とする重点研究センターであり、当センターと密接な連携がある計算科学研究センターのセンター長である、梅村雅之教授に引き続き務めていただいた。

1.5.1 第3回運営協議会

日時	2017年1月23日～24日
場所	筑波大学 総合研究棟 B202、他
出席者	金谷、櫻井、金、鍋島、新井、魚崎、伊藤、梅村

第3回運営協議会を、1月23～24日に開催した。全体的報告や活動成果報告部分は第3回 CiRfSE ワークショップの一部として公開し、1月23日の午後に、上記運営協議会出席者と支援室メンバーで、非公開の会議が総合研究棟 B202 室で行われた。公開部分のプログラムは、2.2 節を参照のこと。

都合による荒川委員の辞任の報告、国際テニュアトラック教員活動報告、平成26年度年次報告書、光量子計測器開発推進室設置趣旨説明、バイオエネルギー研究チーム設置趣旨説明、予算執行状況報告、外部資金獲得に向けての活動状況報告などが行われ、それらについて質疑応答が行われた。また、逆問題推進室長の磯崎教授が平成27年度末で定年退職するため、逆問題研究室の今後の体制と研究課題をどうするかについての検討が進められている旨報告され、その検討状況が説明された。

1月23日の夕方には、運営協議会と CiRfSE ワークショップの合同懇親会が行われ、今後の活動に向けた意見交換や若手教員との交流が行われた。

1.6 運営室会議

センター運営室は、センター長、拠点長、部門長、推進室長、数理物質系長、及びセンター長が指名する者から構成され、センターの運営と研究の実施・予算の使い方・研究会などの企画から、外部資金獲得に向けての活動や広報に関わることまで、センターのほぼすべての活動について審議・決定する、センターの意思決定の中心機関である。また、オブザーバーとして、関係支援室員・URA 等も出席する。

表3 センター運営室会議構成員（平成28年度末時点）

選出根拠	役職名	氏名	域	
第6条第2項第1号	センター長	金谷和至	物理学	教授
第6条第2項第2号 第6条第2項第5号	宇宙史国際研究拠点長 光量子計測器開発推進室長	金信弘	物理学	教授
第6条第2項第3号	環境エネルギー材料研究拠点長	鍋島達弥	化学	教授
第6条第2項第4号	数理科学研究推進室長	青嶋誠	数学	教授
第6条第2項第6号	南極天文部門長	中井直正	物理学	教授
第6条第2項第6号	素粒子構造部門長	受川史彦	物理学	教授
第6条第2項第6号	クォーク・核物質部門長	江角晋一	物理学	准教授
第6条第2項第6号	エネルギー貯蔵・変換物質部門長	守友浩	物理学	教授
第6条第2項第6号	物質変換材料部門長	中村潤児	物質工学	教授
第6条第2項第7号	数理物質系長	伊藤雅英	物理工学	教授

平成28年度も、月に1回のペースで、毎回2～3時間程度、数理物質系長室にて開催された。

- 第1回 2016/04/12
- 第2回 2016/05/10
- 第3回 2016/06/07
- 第4回 2016/07/14
- 第5回 2016/10/13
- 第6回 2016/11/17
- 第7回 2016/12/08
- 第8回 2017/01/11
- 第9回 2017/02/09
- 第10回 2017/03/09

1.7 その他の会議

融合研究企画室は、センター長、各拠点長、推進室長から構成され、センターの2つの研究拠点にまたがる課題の分析、学術動向の検討に基づき、新たな融合研究の可能性の探索やセンターの将来構想の検討を行うことを目的としている。融合研究企画室会議は、議題に応じて不定期に招集されるが、平成28年度は、

第1回融合研究企画室会議 2016/05/30

が開催され、センター細則の改定、公募スペースの利用計画、逆問題研究推進室の将来構想などが話し合われた。

また、平成29年度に予定されている数理工質系センター改組・再編に向けて

第1回数理工質系付属センターの改組・再編に向けた合同設置準備委員会 2017/01/13

第2回数理工質系付属センターの改組・再編に向けた合同設置準備委員会 2017/02/10

第3回数理工質系付属センターの改組・再編に向けた合同設置準備委員会 2017/03/14

も開催された。センター改組・再編については、1.10節を参照。

1.8 宇宙史の暗黒を照らす国際研究拠点形成



図5 宇宙史の暗黒を照らす国際研究拠点形成プロジェクト

平成27年夏に計算科学研究センターと協力して提出した平成28年度概算要求が採択され、国立大学機能強化経費「宇宙史の暗黒を照らす国際研究拠点形成」(2016-2021)が配分された。これは、素粒子・宇宙・原子核分野の大型実験プロジェクトを宇宙史の観点で融合させて、計算科学研究センターで進められている理論面での融合研究と合わせることにより、宇宙史の暗黒部分の解明を飛躍的に加速させ、生命誕生に至る宇宙の物質創生プロセスの全貌理解に向けた新たな学問分野を牽引することを目的とした国際連携拠点を形成しようとするものである(図5)。筑波大学が主導し学術会議マスタープラン大型研究計画2014で採択されている5つの大型プロジェクト(うち3つは筑波大学が中核機関)を融合させ、各プロジェクトで進められている国際共同研究を、宇宙史の暗黒部分を解明する方向で融合するために、つくば地区の分野間連携体制を活用するとともに、国内外の研究ユニット招致と研究員の交換を行うことを計画した。なお、学術会議マスタープラン大型研究計画2017では、これら5つに加えて、計算科学研究センターが中心機関となって推進するコスモシミュレータ計画も採択された。

平成28年度には、機能強化経費として運営費交付金24,800,000円が配分された。機能強化経費の配分額に対応して計画を調整するために、計算科学研究センターと合同で、宇宙史プロジェクト会議を

第1回 2016/04/12

第2回 2016/05/10

第3回 2016/06/07

第4回 2016/07/07

を開催した。これに基づき、平成28年度には、宇宙史分野の拠点形成事業として、以下の人事を行い、その活動サポートと国際交流促進を行った。

海外教育研究ユニット招致 宇宙背景ニュートリノ探索 COBAND プロジェクトの推進のため、ソウル国立大学ニュートリノ研究センター(KNRC) Soo-Bong Kim 教授をPIとして、数理物質系 海外教育研究ユニットを招致した。Kim 教授は、平成28年9月16日に着任した。

任期付き助教採用 機能強化経費の研究員雇用経費の一部を活用した数理物質系の任期付き助教枠(3年間)の使用希望が承認され、宇宙観測分野の渡邊祥正氏を採用した(平成29年4月1日着任)。

クロス・アポイントメント教員採用 宇宙史研究の拠点形成に向け、国内連携体制を強固なものとするために、密接な共同研究を進めている連携先の教員とその所属機関と交渉し、合意が得られた6名について、クロス・アポイントメントの協定を結び、その雇用を進めた。筑波大学におけるエフォート率は10%である。

南極天文部門では徂徠和夫准教授(北海道大学、平成29年4月1日着任)が、素粒子構造部門では吉田拓生教授(福井大学、平成28年10月16日着任)、池上陽一准教授(KEK、平成28年12月1日着任)が、クォーク・核物質部門では山口貴之准教授(埼玉大学、平成28年12月1日着任)、小沢恭一郎准教授(KEK、平成28年12月1日着任)、佐甲博之教授(原研、平成29年4月1日着任)が、それぞれ採用された。

客員教員 クロスアポイントメント教員採用と並行して、従来の客員教員の制度も活用して、国内連携体制を強化した。平成28年度には、南極天文部門の西堀俊幸准教授(JAXA、平成29年3月1日着任)が採用され、平成29年度にも南極天文部門とクォーク・核物質部門で5名が採用予定で、その他にも、計算科学研究センターでの受け入れも含め、数名と交渉を進めている。

研究員 平成28年度には、計算科学研究センターでの1名を含む、5名の研究員を採用した。4名は平成28年度中に着任し、1名は平成29年4月1日に着任した。

また、数理物質融合科学センターとして全学戦略ポイントを申請し、その採択により、素粒子構造部門で飯田崇史助教（平成29年4月1日着任）を採用した。

これらの教員・研究員と、既に雇用している国際テニュアトラック教員らを活用して、国際連携拠点の実体確立を推進した。

1.9 平成28年度予算

表4 平成28年度 CiRfSE 予算執行報告

平成28年度予算及び執行報告
—CiRfSE 共通分—

H29.3.31

収入		支出	
項目	金額	項目	金額
運営費交付金	4,000,000円	光子計測器開発推進室、スタート支援(研究員2ヶ月雇用)【人件費】	700,000円
CiRfSE 活動支援経費(系)	4,000,000円	環境エネルギー材料研究拠点、招へい旅費支援【旅費】	300,000円
TGSW 実施経費(本部支援)	771,401円	光沢紙(CiRfSEパンフレット印刷用)【消耗品費】	2,632円
TGSW 実施経費(系支援)	771,401円	逆問題研究推進室、理研 iTHES シンポジウム情報収集【旅費】	3,660円
		事務補佐員1名(4-8月)【人件費】	280,000円
		事務補佐員1名【人件費】	1,560,085円
		共用スペース整備	1,467,232円
		スペースチャージ(入社10部履分)	121,200円
		平成27年度年次報告書【印刷製本費】	209,412円
		第3回 CiRfSE ワークショップ・運営協議会【旅費、謝金、会議費】	323,652円
		数理連携サロン(第5回)【旅費、謝金、会議費】	35,716円
		数理連携サロン(第6回)【旅費、謝金、会議費】	42,789円
		TGSW(CiRfSE 国際会議)【旅費、会議費、短期雇用】	1,357,213円
		磯崎特命教授【人件費】【旅費】	162,851円
		国際テニュアトラック旅費貸付(BUSCH Oliver 助教)	300,000円
		クオーク核物質部門旅費貸付	200,000円
		クロスアポイントメント交渉【旅費】	39,180円
		クロスアポイントメント教員環境整備	850,920円
		任期付助教スタートアップ(2名)	1,000,000円
		環境エネルギー材料研究拠点TIMSジョイントワークショップ【旅費、謝金】	110,000円
		かけはし研究会茶菓子補助	1,770円
		学園祭短期雇用	39,445円
		宇宙史サロン	6,425円
		郵便料金	27,707円
		環境拠点 支援	400,000円
		本部へ返還	913円
合計	9,542,802円	合計	9,542,802円

平成28年度予算及び執行報告
—宇宙史プロジェクト(機能強化経費)分—

H29.3.31

収入		支出	
項目	金額	項目	金額
運営費交付金	24,800,000円	海外研究ユニット招致 PI(1名)【人件費】	3,994,399円
		クロスアポイントメント教員(4名)【人件費】	1,769,769円
		研究員(ポストドク)(5名)【人件費】	8,921,556円
		外国旅費	970,801円
		国内旅費	306,380円
		役務費	368,712円
		消耗品費	627,481円
		その他	34,000円
		搭載クライオスタット真空外箱一式【設備費】	3,996,000円
		次年度繰越額	3,810,902円
合計	24,800,000円	合計	24,800,000円

平成28年度のセンター経費として、研究戦略イニシアティブ推進機構から4,000,000円と、TGSW 招聘旅費の半額(771,401円)が配分された。これらだけではセンターとしての十分な活動ができないため、数理物質系から、CiRfSE 活動支援経費として4,000,000円、及びTGSW 実施経費として771,401円が支給された。これらセンター共通費分の収入と執行実績を、表4の左表に示す。運営協議会、ワークショップ、連携サロン、研究集会の開催費用や事務補佐員の雇用経費のほか、採択された公募スペースの整備などを行った。

また、1.8節で述べた国立大学機能強化経費「宇宙史の暗黒を照らす国際研究拠点形成」の平成28年度分として、運営費交付金(機能強化経費)24,800,000円が配分され、1.8節に記した拠点形成事業を遂行した。宇宙史機能強化経費の収入と使用実績を表4の右表に示す。

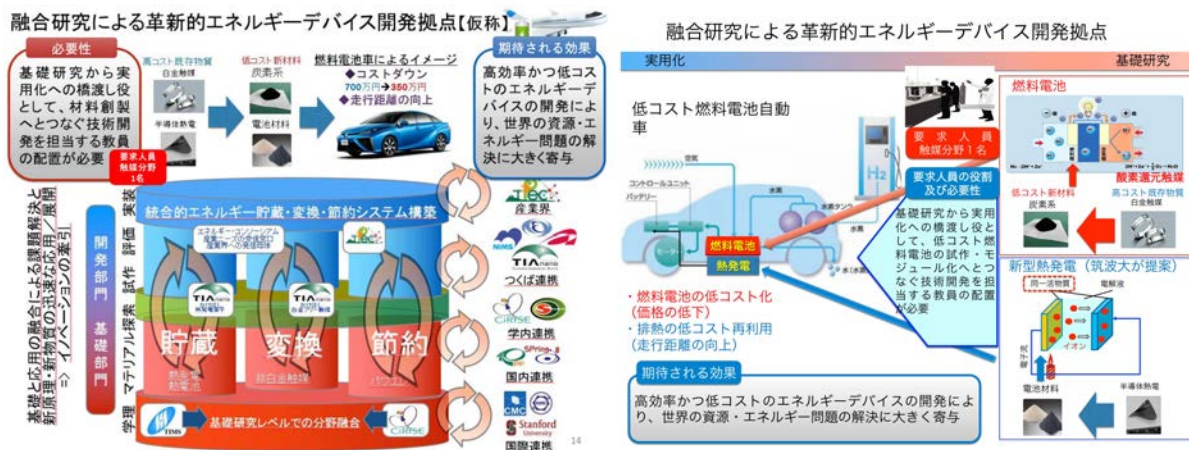


図6 概算要求「融合研究による革新的エネルギーデバイス開発拠点(仮称)」

1.10 平成29年度以降に向けて：数理物質系附属センターの改組・再編

環境エネルギー材料分野における外部資金獲得に向け、平成29年度概算要求「融合研究による革新的エネルギーデバイス開発拠点(仮称)」を、学際物質科学研究センター(TIMS)と共同で、平成28年度夏に提出した。これは、持続可能な社会実現の要請を受け、元素転換による高効率・低コスト・高性能なエネルギーデバイス技術の開発・実用化が期待されている中で、科学と技術とのシームレスな接続による“物質科学の社会還元”をめざし、それをより戦略的に推進するために、エネルギー材料分野を中心とした既存センターである学際物質研究センターと数理物質融合科学センターの二つの研究センターを改組・再編し、物質創成、材料科学に重点をおいた環境エネルギー材料研究拠点を整備するものである(図6)。これにより、基礎的なエネルギー変換分野とユビキタス元素を利用した革新的デバイス開発分野の融合を推進し、物質創成、材料科学に重点をおいた環境エネルギー材料研究拠点を整備する。対応して、材料科学分野の教員配置要望も行った。

これを受け、また、1.8節で述べた国立大学機能強化経費「宇宙史の暗黒を照らす国際研究拠点形成」に基づく国際共同研究拠点の確立を加速するために、宇宙史分野の独立センター化も前倒しに進めることとなった。宇宙史研究に集中した独立センターとすることにより、宇宙史研究拠点としての外からの視認性を上げ、ハブとしての求心力を強化する。

これらのセンター再編が組み込まれた平成29年度概算要求が筑波大学から文部科学省に提出され、承認された。

その後の検討と調整の結果、図7に示す形で、数理物質系附属センターの改組・再編を平成29年度中に実施することになった： CiRfSE 環境エネルギー材料研究拠点と学際物質科学研究センター、及びパワーエレクトロニクス寄付講座を統合した「エネルギー物質科学研究センター」と、CiRfSE 宇宙史国際研究拠点と光量子計測器開発推進室を核とする「宇宙史研究センター(Tomonaga Center for the History of the Universe)」を設立する。また、CiRfSE 数理科学研究推進室を発展させ、外部機関との連携強化による社会還元型研究の推進と、データ解析の基本的知識を有し、ビッグデータやAI等の新しい課題の発見・解決に活用できるような若手人材の育成をめざして、「数理科学研究コア」を数理物質系に設置する。さらに、CiRfSEの融合研究推進に向けた様々な取り組みを引き継ぎ、上記新センター・コアと、系内のその他の研究グループ、

計算科学研究センター、藻類バイオマス・エネルギー開発研究センター、人工知能科学センター等の学内研究組織、TIA、AIST、NIMS、KEK、RIKENなどの学外機関・企業との密接で協奏的な連携体制を実現し、融合研究の創出戦略の策定を企画・推進する為に、「融合研究企画室」を数理物質系に設置する。現在、この改組・再編に向けた具体的作業が進行中である。

数理物質系附属センターの改組・再編（2017年度）

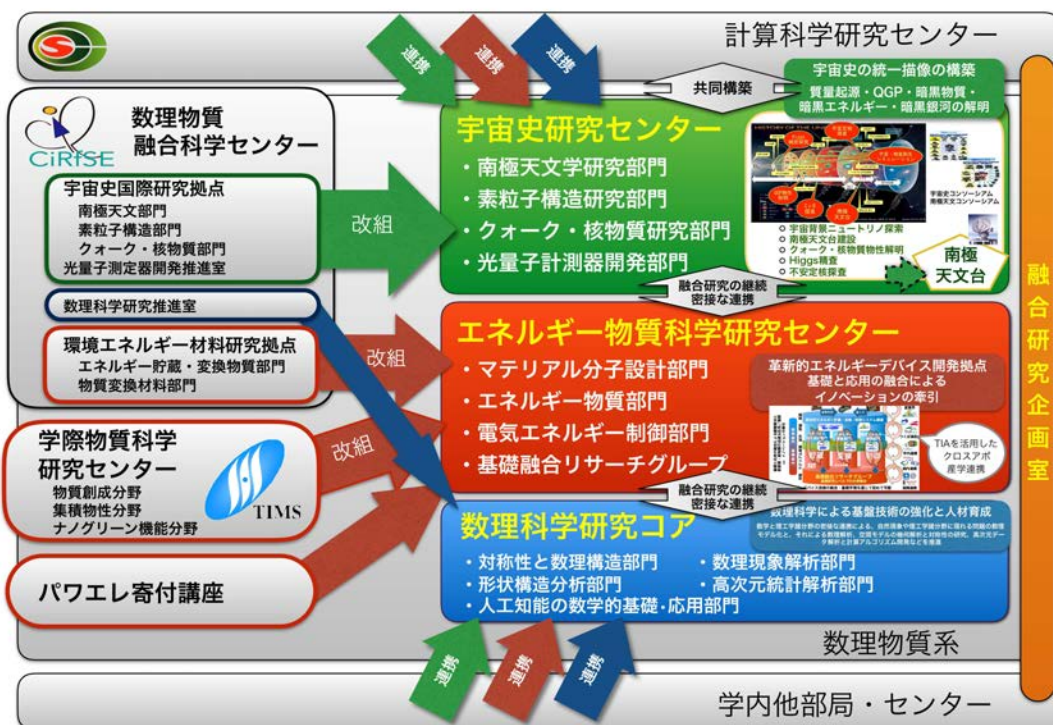


図 7 数理物質系附属センターの改組・再編

2 研究集会等開催実績

平成28年度に開催した研究集会・講演会などを、表5にまとめる。

以下では、CiRfSE主催の研究集会等のうち、主要なものについて、概要を報告する。各ワークショップのプログラムの詳細や発表資料、写真等については、CiRfSE ホームページのニュースコーナーを参照されたい。

表5 平成28年度開催研究集会・講演会等。参加者数の括弧内の数値は、海外からの参加者数(内数)。

開催日	部門	会議名	会場	講演数	参加者数	世話人教員	主催/共催
2016/5/20	エネルギー貯蔵・変換物質部門	放射光物質科学コース キックオフシンポジウム	総合研究棟B0110	11	35名	守友 浩	共催
2016/6/7	クオーク・核物質部門	Open Informal Seminar (Oliver Busch助教)	1F201	1	約15名(1)	江角 晋一	共催
2016/6/16	逆問題研究推進室	第5回数理解連携サロン	自然系学系棟 D509	3	39名	青嶋 誠	主催
2016/7/1	環境エネルギー材料研究拠点	平成28年度TIMS研究交流会	3B402	7	69名	鍋島 達弥	共催
2016/9/2	光量子計測器開発推進室	第1回SOI-STJ研究会	自然系学系棟B118	7	16名	金 信弘	主催
2016/9/12	宇宙史国際研究拠点	物理学専攻公開セミナー「超弦理論への離散的アプローチ」(伊数吾郎助教)	自然系学系棟B114	1	約20名	金谷 和至	共催
2016/9/17-9/19	宇宙史国際研究拠点 環境エネルギー材料研究拠点	Tsukuba Global Science Week (TGSW) 2016	つくば国際会議場 エボカル	12+6	77名(9)	江角 晋一 守友 浩	主催
2016/10/31	物質変換材料部門	白金フリーカーボン触媒ワークショップ	大学会館国際会議室	3	50名	中村 潤児	共催
2016/11/1	環境エネルギー材料研究拠点	ブレ戦略イニシアティブ「光と物質・生命科学のアンサンブルによる新現象の発掘と解明」キックオフ研究会	総合研究棟B0110	14	54名	山本 洋平	共催
2016/11/10	光量子計測器開発推進室	第2回TIA光・量子計測シンポジウム	つくば国際会議場 エボカル	11	約100名	金 信弘	共催
2016/11/16	物質変換材料部門	物質科学セミナー「剪開できないシリコンから二次元シリコン物質を創る技術」(中野秀之主席研究員)	3B 213	1	約20名(5)	近藤 剛弘	共催
2016/11/19	エネルギー貯蔵・変換物質部門	Workshop on Advanced Structural Study using SPring-8	自然系学系棟B118	12	16名(6)	西堀 英治	共催
2016/11/21	エネルギー貯蔵・変換物質部門	TIAかけはし「未利用熱エネルギーを変換する熱発電素子」第1回研究会	自然系学系棟B118	5	18名	守友 浩	共催
2016/11/22	物質変換材料部門	物質科学セミナー「Copper Catalysts in Methanol Synthesis: From Understanding to new Material」(Malte Behrens教授)	3B 213	1	約20名(1)	山本 洋平	共催
2016/11/24	物質変換材料部門	物質科学セミナー「Eley-Rideal reactions of hot atoms and molecules at surfaces」(Aart W. Kleijn教授)	3B 213	1	約20名(6)	近藤 剛弘	共催
2016/11/27	南極天文部門	つくばエキスポセンター第33回ミーティング・ザ・サイエンス「南極からさぐる宇宙」(中井直正教授)	つくばエキスポセンター	1	44名	中井 直正	共催
2016/12/5	逆問題研究推進室	第6回数理解連携サロン	自然系学系棟 D509	3	46名	青嶋 誠	主催
2016/12/12	宇宙史国際研究拠点	第1回 宇宙史サロン	自然系学系棟B118	4	22名	金 信弘	主催
2017/1/4	宇宙史国際研究拠点	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」研究会	物質・材料研究機構	7	27名	金 信弘	共催
2017/1/20	宇宙史国際研究拠点	宇宙史セミナー (Soo-Bong Kim教授)	CiRfSE セミナー室	1	14名(1)	金 信弘	主催
2017/1/23-24	数理物質融合家学センター	第3回CiRfSEワークショップ	総合研究棟B110 ほか	48	のべ132名	金谷和至	主催
2017/3/10-11	環境エネルギー材料研究拠点	2017 TIMS-CENIDE-NTHU Joint Symposium on Nanoscience and Nanotechnology / Workshop of Pre-Strategic Initiatives: Ensemble of Light with Matter and Life for Discovery and Insights of Novel Phenomena / Workshop of CiRfSE, Research Core for Developing Energy and Environment-friendly Materials	総合研究棟B110	21	72名(7)	鍋島 達弥	主催
2017/3/21	宇宙史国際研究拠点	第2回 宇宙史サロン	自然 B118	3	22名	金 信弘 水野三四郎	主催

2.1 国際会議 TGSW 2016

セッション6	「宇宙進化と物質起源」
日時	2016年9月17日(土)-18日(日)
場所	つくば国際会議場 エポカル 小会議室 304
講演数	12
参加者	47名
セッション7	「グリーンイノベーション」
日時	2016年9月19日(月)
場所	つくば国際会議場 エポカル 小会議室 402
講演数	6
参加者	約30名



図8 国際会議 TGSW2016 「宇宙進化と物質起源」及び「グリーンイノベーション」セッション (2016年9月)

平成26年度から筑波大学主催で毎年夏に開催されている国際会議 Tsukuba Global Science Week (TGSW) に、CiRfSE は毎年参画している。平成28年度には、TGSW 2016 の一貫として、セッション6「宇宙進化と物質起源」とセッション7「グリーンイノベーション」を、つくば国際会議場 エポカルで開催した。

セッション6「宇宙進化と物質起源」は、CiRfSE 宇宙史国際研究拠点が目指す、素粒子・原子核・宇宙物理学の融合による宇宙史の統一的理解を飛躍的に推進させるために、海外研究者と国内研究者との宇宙史研究の情報交換と議論を行うことを目的として、第3回宇宙史国際ワークショップとして開催した。宇宙・素粒子・原子核の3分野から、2日間に渡り、12の講演が行われた。招待講演者には、宇宙史分野海外研究ユニット招致PIのS.-B. Kim教授(ソウル大学)ほか、宇宙物理のDenis Burgarella教授(エクスマルセイユ大学)、LHC-ATLAS実験のHong Ma博士(ブルックヘブン国立研究所)、LHC-CMS/RHIC-STAR実験のFuqiang Wang教授(Purdue大学)、FAIR-CBM実験のNorbert Herrmann教授(Heidelberg大学)が含まれる。

セッション7「グリーンイノベーション」は、エネルギー物質科学をテーマとして、CiRfSE 環境エネルギー材料研究拠点が学際物質科学研究センター(TIMES)と共催して開催した。台湾放射光施設では世界最高輝度を誇るTaiwan Photon Sourceという放射光施設が稼働し、今年からビームラインを一般ユーザー開

放しており、この施設の最新の情報を得るために、この施設でナノ構造解析ビームラインを立ち上げている Ching-Shun Ku 博士を招聘し、施設の紹介を依頼した。Hathwar 博士は、Iversen ユニット招致の副 PI で、筑波大学着任後、20% のエネルギー変換効率を示すペロブスカイト化合物の構造解析に成功した。講演では、この仕事を紹介した。Pirmin A. Ulmann 博士は、企業でリチウムイオン二次電池の負極材の研究を紹介した。Xike Gao 教授、Wei-Shi Li 教授は機能性高分子の開発を行っており、その高分子の輸送特性、太陽電池特性を講演した。いずれの講演でも活発な討論がなされた。筑波大学からは、神原教授が講演を行った。

2.2 第3回 CiRfSE ワークショップ

日時	2017年1月23日～24日	
場所	筑波大学 総合研究棟 B 110	
参加者	のべ 132 名	
2017/1/23 (月)		
	センター活動報告：全体、拠点、推進室	
09:30-10:15	全体報告	金谷
10:15-11:00	宇宙史国際研究拠点	金
11:00-11:50	環境エネルギー材料研究拠点+バイオエネルギー研究チーム	鍋島
11:50-13:30	昼食	
13:30-13:50	逆問題研究推進室	青嶋
15:00-17:30	運営協議会	[総 B202] 非公開
18:00-20:00	懇親会	[スーパファクトリー]
2017/1/24 (火)		
	センター各部門成果報告	
09:00-09:30	南極天文部門	中井
09:30-10:00	素粒子構造部門	受川
10:00-10:30	クォーク・核物質部門	江角
10:30-11:00	休憩	
11:00-11:30	物質変換材料研究部門	中村
11:30-12:00	エネルギー貯蔵・変換部門	守友
13:00-	分野別パラレルワークショップ	
	Session 1: 素粒子構造部門 (16 講演)	[総 B110]
	Session 2: 南極天文部門 (9 講演)	[総 B112]
	Session 3: クォーク・核物質部門 (10 講演)	[総 B107]
	Session 4: 逆問題研究推進室 (3 講演)	[総 B108]
	「数理科学の話題の話題と研究の可能性」	

CiRfSE をハブとした融合研究の交流と今年度の成果発表会・運営協議会を兼ねた第3回 CiRfSE ワークショップを開催した。1日目から2日目の午前中にかけて、センターの活動報告と各部門の成果報告を行った。



図9 第3回 CiRfSE ワークショップ (2017年1月)

2日目の午後には、引き続き、各分野に分かれての平行ワークショップを開催した。(環境エネルギー材料分野では、これに代えて、2017/3/10-11に、TIMSと共催のジョイントシンポジウムを開催した。)

Session 1では、素粒子構造部門の研究について、のべ16人が最新の結果を報告した。活発な議論を通じて、各プロジェクトの現状の把握と、今後の研究の方向性の確立に大きく役立った。

Session 2では、南極30m級テラヘルツ望遠鏡計画の実現に向けて、望遠鏡計画や観測装置計画に加えて特に大きな課題となる南極大陸への輸送および建設候補地である新ドームふじ基地への輸送および電力、建物建設などの検討状況を報告し議論した。特に輸送に関しては近年の大規模輸送技術の向上には目を見張るものがあり、当該計画の実現に向けて大いに勇気付けられた。

Session 3では、LHC及び、RHICにおける高エネルギー重イオン実験によるクォーク・グルーオン・プラズマに関する物理研究の報告発表と質疑討論を行い、揺らぎや方位角異方性などのソフトな指針を使った物理研究によるQGPのバルクな流体的性質と、ジェットや光子、重いクォーク等のハードな指針を使ったQGP中でのエネルギー損失に関する研究や、さらにそれらの相関(ソフト・ハード間の相関)を議論した。また、これらの研究のための将来実験や、検出器開発に関する議論を行った。若手研究者によって、異なる実験からの研究成果を議論する有意義な会議ができた。

Session 4では、「数理科学の話題と研究の可能性」と題して、様々な質問が飛び交う活発な議論の場となり、数学の応用と将来の連携研究の可能性を探る有益な会となった。このワークショップは、新しい学際的分野を創生するための第一歩を成功させた。

2.3 2017 TIMS-CENIDE-NTHU Joint Symposium on Nanoscience and Nanotechnology / Workshop of Pre-Strategic Initiatives: Ensemble of Light with Matter and Life for Discovery and Insights of Novel Phenomena / Workshop of CiRfSE, Research Core for Developing Energy and Environment-friendly Materials

日時	2017年3月10日~11日
場所	筑波大学 総合研究棟B 110
講演数	21
参加者	72名

第3回 CiRfSE ワークショップの、環境エネルギー材料分野の平行ワークショップおよびブレ戦略イニシアティブ「光と物質・生命科学のアンサンブルによる新現象の発掘と解明」のワークショップを兼ねて、TIMS、ドイツ Duisburg-Essen 大学 Center for Nanointegration (CENIDE)、台湾の国立清華大学



図 10 2017 TIMS-CENIDE-NTHU Joint Symposium / Workshop of Pre-Strategic Initiatives / Workshop of CiRfSE, Research Core for Developing Energy and Environment-friendly Materials (2017年3月)

(NTHU) とのジョイントシンポジウムを、TIMS, CENIDE, NTHU, CiRfSE の共催で開催した。

2.4 第5回 連携サロン

日時 2016年6月16日 15:15-17:15
 場所 筑波大学 自然系学系棟 D509
 主催 逆問題研究推進室
 参加者 39名

講演者	所属	タイトル
谷垣文章	宇宙航空研究開発機構	「国際宇宙ステーションの使い方」
吉川耕司	筑波大学計算科学研究センター	「宇宙大規模構造」
木下保	筑波大学数理物質系数域	「Wave equation in Einstein and de Sitter space-time」

「宇宙」をキーワードに、谷垣先生、吉川先生、数学からは木下先生（微分方程式）に講演をお願いした。

2.5 第6回 連携サロン

日時 2016年12月5日 15:15-17:15
 場所 筑波大学 自然系学系棟 D509
 主催 逆問題研究推進室
 参加者 46名

講演者	所属	タイトル
櫻井鉄也	筑波大学 システム情報系	「大規模固有値解析エンジンの開発とそのシミュレーション・データ解析への応用」
岩根秀直	富士通/国立情報学研究所	「限量記号消去を推論器とする数学入試問題の自動解答器」
照井章	筑波大学数理物質系数域	「大学入試の数値問題を解く自動推論アルゴリズム」

「人工知能」をキーワードに、3名の講師に講演をお願いした。



図 11 第6回 連携サロン (2016年12月)

2.6 第1回 宇宙史サロン

日時 2016年12月12日 15:15-17:45
 場所 筑波大学 自然系学系棟 B118
 主催 宇宙史国際研究拠点
 参加者 22名

講演者	所属	タイトル
金谷和至	CiRfSE	「宇宙史プロジェクトの概要」
水野三四郎	CiRfSE	「高エネルギー原子核実験における直接光子を用いた QGP 研究」
武政健一	CiRfSE	「宇宙背景ニュートリノ崩壊探索 COBAND 実験とその超伝導光検出器開発」
高水裕一	CCS	「初期宇宙における物理定数の選択と泡宇宙モデル」

CiRfSE と計算科学研究センター (CCS) が協力して推進する宇宙史プロジェクト内での素粒子・原子核・宇宙分野間および実験・理論間の連携を深めていくために、宇宙史サロンを定期的を開催することを決定した。宇宙史国際研究拠点に新しく入ってきた研究員・助教を核にして、互いの分野の研究内容を報告して、議論を行うことによって、新たな連携を生み出すことを目的とする。第1回 宇宙史サロンでは、22名の教員・学生が参加し、宇宙史プロジェクト内の研究の説明がおこなわれ、それにつづいて活発な議論がなされ、連携を推進するための意義深いものとなった。



図 12 第1回 宇宙史サロン (2016年12月)

2.7 第2回 宇宙史サロン

日時 2017年3月21日 15:15-17:15
場所 筑波大学 自然系学系棟 B118
主催 宇宙史国際研究拠点
参加者 22名

講演者	所属	タイトル
渡辺陽介	東大 原子核科学研究センター	「高エネルギー重イオン衝突実験における稀少プローブを用いた超高温物質の性質解明」
齋藤弘雄	CiRfSE	「星団形成領域における分子ガス構造の観測的研究」
安部牧人	CCS	「高赤方偏移宇宙の Ly α 輝線銀河と Ly α 光子の輻射輸送」

第2回 宇宙史サロンでは、22名の教員・学生が参加し、QGP、星団形成、高赤方偏移宇宙の Ly α 輝線 simulation の研究報告がおこなわれた。それぞれについて活発な議論がなされ、連携を推進するための意義深いものとなった。



図13 第2回 宇宙史サロン (2017年3月)

3 学生・一般向け広報活動

学生向け、一般向けにも、様々な広報活動を行った。

3.1 筑波大学学園祭「雙峰祭」における企画展示

日時 2016年11月5日～6日 10:00-16:00
 場所 筑波大学 第3エリア

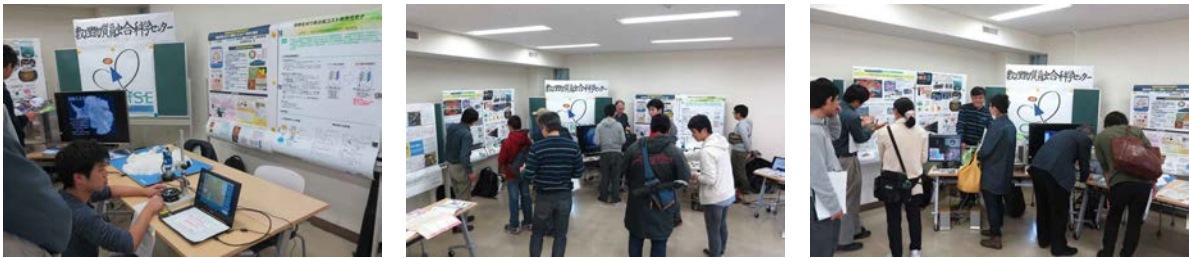


図 14 筑波大学学園祭「雙峰祭」における企画展示 (2016年11月)



図 15 筑波大学学園祭「雙峰祭」における企画展示：テーマ (1) 宇宙の歴史の暗黒部分を解明する (2016年11月)

「雙峰祭」の企画「つくば研究紹介」で、CiRISEの研究活動紹介(ブース展示)を行った。展示内容は、以

下のとおり。

テーマ（1）宇宙の歴史の暗黒部分を解明する：

CiRfSE 宇宙史国際研究拠点では、南極望遠鏡を用いた暗黒銀河の研究、ロケット実験による宇宙背景ニュートリノの探索、CERN LHC 加速器を用いた質量起源のヒッグス粒子の研究、クォークグルオンプラズマの研究、宇宙元素合成の研究、の5大プロジェクトを推進し、ビッグバンから生命発生に至る宇宙史の解明と、暗黒物質、暗黒銀河の謎の解決を目指している。

テーマ（2）触媒は世界を変える！／排熱を刈り取る低コスト熱発電素子：

CiRfSE 環境エネルギー材料研究拠点では、CO₂を有用化合物に変換して削減する技術や燃料電池などの水素社会を構築するための科学技術において常に登場する触媒に関して、基礎科学に基づいた触媒設計に取り組んでいる。また、二次電池技術を転用した、従来型の熱発電方式と原理が異なる新しいタイプの熱電変換素子（二次電池型熱発電）を提案している。

物質変換材料研究部門
触媒学理に基づく環境エネルギー材料の創成

PI: 中村潤児 共同研究者: 神原教授、山本准教授、近藤准教授
他連携研究員11名

二酸化炭素のメタノールへの転換
JST ACT-Cプロジェクト実行中 平成24~29年
排ガス中のCO₂を化学的に転換する
最も力手法

白金を代替する燃料電池触媒
カーボン触媒で国際的にリード
Nano Lett (2009), Sci.Rep.(2014),
Sci.Rep.(2015), Science (2016)
燃料電池の普及に貢献

物質変換材料部門の研究内容

- CO₂のメタノールへの転換
CO₂活性化機構解明、グラフェン触媒の応用、計算科学(阪大)と放射光実験(物性研)の共同研究
- 燃料電池用カーボン触媒の開発
炭素/白金界面相互作用の解明、カーボンアロイ触媒の機能と設計
- 触媒機能の学理構築
グラファイト系炭素の酸塩基性の起源、担体効果の解明、物性物理と反応性の連携
- 資源産生油の触媒的転換
C₃₀-C₄₀化学の構築、クラッキング、異性化、重合、ハイブリッド化
- 光デバイスのための材料合成
ポリマーやグラフェンを用いた発光・レーザー、太陽電池材料
- 新分光法と新物質
テラロティン分光法のSTSへの応用、新二次元物質の創出

排熱を刈り取る低コスト熱発電素子

概要
我々は、二次電池技術を転用した新しいタイプの熱電変換素子（二次電池型熱発電）を提案する。二次電池型熱発電は、二次電池の正極と負極に同じ活性物質を置き、温度差により発生する熱起電力で発電を行う。本熱発電方式は、従来型の熱発電方式と原理が異なり、無限の可能性を秘めている。二次電池、材料開発、計算科学、放射光科学、ナノテクノロジー専門家を結集し、デバイスの実現を目指す。

二次電池型熱発電素子

二次電池型熱発電素子とは
二次電池は、正極と負極に違う活性物質を配置し、その起電力の差を利用して、発電を行う。
二次電池型熱発電素子は、二次電池の正極と負極に同じ活性物質を配置し、正極と負極の温度差による起電力の差を利用して、発電を行う。

従来技術に対する本発電方式の利点
極めて低コストである二次電池活性物質が利用できる。(セーベック係数の大きな半導体は重元素を含むため高価である)
一次電池型熱発電技術 - インフラを転用できる。
シート型熱発電素子であるため、人体発電、熱源(太陽パネル、建物の壁、車体、...)へ貼り付け等の用途がある。
室温付近の排熱を利用するので、他の発電方式と競合しない。
性能指標の理論上限が高い。(熱伝導を扱う電解質層と起電力を扱う活性物質層を独立に開発できる。)
熱起電力発生条件は、1) 高い熱起電力と2) 高い電気導電率である。この観点からの材料探索・開発は全くなされていない。
電解質層の構造転写を利用することで、超巨大熱起電力の発生が可能である。

本研究の目的
二次電池型熱電変換の実証
巨大熱起電力材料を探索
熱起電力の発生メカニズムの解明

実験経過

二次電池型セルの開発

熱起電力の評価

排熱を刈り取る低コスト熱発電素子
筑波大学 数理工学系 CiRfSE 守 守 造
Moritomo.yutaka.gf@u.tsukuba.ac.jp

図 16 筑波大学学園祭「雙峰祭」における企画展示：テーマ（2）触媒は世界を変える！／排熱を刈り取る低コスト熱発電素子（2016年11月）

3.2 南極望遠鏡プロジェクトに関する講演会等

南極望遠鏡プロジェクトを解説する一般向け講演会を、全国で開催した（表6）。

つくば市では、つくばエキスポセンターで、つくばエキスポセンター第33回ミーツ・ザ・サイエンス「南極からさぐる宇宙」を開催した。学生及び一般向けに、水蒸気の少ない南極で目には見えない「暗黒銀河」の

表6 南極望遠鏡プロジェクトに関する講演会等の実績と予定

日時	場所	会場	講演者等	対象	来場数	備考
2016年						
3月5日(土)	茨城県土浦市	茨城県県南生涯学習センター	中井直正(筑波大)	一般	100	県生涯学習講座
7月9日(土)	茨城県つくば市	つくば国際会議場	久野成夫(筑波大)、関口雄一郎(東邦大)	一般	75	七夕講演会
7月31日(日)	兵庫県三田市	関西学院大学	瀬田益道(関西学院大)	高校、一般	約150	オープンキャンパス
10月22日(土)	東京都三鷹市	国立天文台	関本裕太郎(国立天文台)、新田冬夢(筑波大)	一般	約200	一般公開
11月5日(土)	茨城県つくば市	筑波大学	金谷、新田、永井、中井、他(筑波大)	一般	約150	学園祭
11月16日(水)	茨城県水戸市	茨城大学	中井直正(筑波大)	大学院生	24	講義1回
11月24日(木)	兵庫県三田市	三田ホテル	瀬田益道(関西学院大)	一般	約40	講演会、神戸新聞
11月27日(日)	茨城県つくば市	つくばエキスポセンター	中井直正(筑波大)	一般、子供	44	講演会
12月3日(土)	北海道函館市	函館北洋ビル	俣俣和夫(北大)、中井直正(筑波大)	一般	41	講演会
12月4日(日)	愛媛県松山市	愛媛大学	長尾透(愛媛大)、中井直正(筑波大)	一般	82	講演会
12月11日(日)	茨城県いわき市	中央公民館文化センター	中井直正(筑波大)、金高義(福島高専)	一般	31	講演会
12月17日(土)	兵庫県神戸市	神戸市教育会館	瀬田益道(関西学院大)、中井直正(筑波大)	一般	37	講演会
12月18日(日)	石川県金沢市	石川県生涯学習センター	香川博之(金沢大)、中井直正(筑波大)	一般	41	講演会
12月23日(祭)	福岡県福岡市	福岡国際会議場	中井直正(筑波大)	一般	39	講演会
2017年						
1月8日(日)	宮城県仙台市	仙台市天文台	中井直正(筑波大)	一般	58	講演会
1月30日(月)	大阪府箕面市	千里国際中等部	瀬田益道(関西学院大)	中学生保護者	約80	講演会
2月21日(火)	東京都中央区	ロイヤルパークホテル	中井直正(筑波大)	財界	25	日本生産性本部講演
3月8日(水)	東京都文京区	筑波大学東京キャンパス	中井直正(筑波大)	他分野研究者	約170	光の日研究会
3月19日(日)	岐阜県岐阜市	岐阜大学岐阜駅サテライト	若松謙一(岐阜大)、中井直正(筑波大)	一般	約100	講演会
3月26日(日)	秋田県秋田市	秋田県民会館ジョイナス	中井直正(筑波大)	一般	39	講演会
4月15日(土)	東京都港区	赤坂浅田	中井直正(筑波大)	財界	15	東京マスタートーククラブ
4月22日(土)	茨城県つくば市	筑波大学	新田冬夢(筑波大)、他	一般	約80+	科学技術週間、講演+
5月14日(日)	新潟県新潟市	新潟勤労者総合福祉センター	中井直正(筑波大)	一般	44	講演会
7月9日(日)	茨城県つくば市	イーアスつくば	竹内努(名古屋大)、中井直正(筑波大)	一般		七夕講演会
8月11日(祭)	埼玉県久喜市	久喜総合文化会館	中井直正(筑波大)	一般		講演会
8月(日)	富山県砺波市		中井直正(筑波大)	一般		七夕講演会
9月10日(日)	北海道札幌市	北海道大学	望月優子(理研)、中井直正(筑波大)	一般		天文学会講演会
11月4日(土)	茨城県つくば市	筑波大学		一般		学園祭
11月24日(木)	和歌山県和歌山市		中井直正(筑波大)	高校教員		講演会

探査を行い宇宙の歴史や銀河の進化を調べる計画について、南極現地調査の様子や楽しい実験を交えて解説した。

また、つくばエキスポセンターでは、南極10m テラヘルツ望遠鏡の模型と南極天文台プロジェクトの解説パネルの常設展示が開始され、平成29年年3月12日に除幕式が行われた。

つくばエキスポセンター
第33回ミーツ・ザ・サイエンス

「南極からさぐる宇宙」

水蒸気の少ない南極で目には見えない「暗黒銀河」の探査を行い、宇宙の歴史や銀河の進化を調べる計画について、南極現地調査の様子や楽しい実験を交えて分かりやすく解説します。「南極の水」のプレゼントもあります！

講師 中井 直正 氏 (筑波大学・教授) **講演+実験**

日時 2016年11月27日(日) 13:30~14:30

会場 つくばエキスポセンター 2階 創造の森“ワンダーラボ”
(つくばエクスプレス つくば駅から徒歩5分)

対象 一般 30名 (内容は専門的なものも含まれます。)
申込 10/27(木)よりエキスポセンターHPで受付
参加費 無料 (エキスポセンター入館券が必要)
協力 筑波大学、国立極地研究所
問合せ つくばエキスポセンター 029-858-1100

当日15:30からのプラネタリウムは「南極 遙かなる星空」を上映します。

南極にあるイタリアの電波望遠鏡

ドームふじ付近の夕暮れ

つくばエキスポセンター
TSUKUBA EXPO CENTER

茨城県つくば市吾妻2-9 TEL 029-858-1100
http://www.expo-center.or.jp
入館券 おとな410円/こども210円(中学生以下無料)
プラネタリウム券 (入館券含む) おとな820円/こども410円



図 17 つくばエキスポセンター第 33 回ミーツ・ザ・サイエンス (2016 年 11 月)、及び、南極天文台の模型展示除幕式 (2017 年 3 月)

4 宇宙史国際研究拠点 活動報告

拠点長 金 信弘 (数理物質系物理学域 教授)

宇宙史国際研究拠点では、素粒子・原子核・宇宙物理学の研究を融合させ、実験的アプローチと理論的アプローチの協調により、ビッグバンから物質創生、天体形成、生命の発生に至る「宇宙史」を統一的に理解し、未解明部分の解明を目指した新たな学問分野「宇宙史分野」を創設し、宇宙史研究を主導する。そのため、南極天文部門（南極天文台）、素粒子構造部門、クォーク・核物質部門の3つの部門を持ち、計算科学研究センターとの密接な連携のもと、3部門の研究を融合させた宇宙史研究コンソーシアムの形成と国際的融合研究体制のハブ機能の実現を目指している。

平成28年度は、筑波大学チームを核として築かれた、素粒子・原子核分野の宇宙史研究を推進する宇宙史コンソーシアム(図18)と南極天文台建設・観測を推進する南極天文コンソーシアム(図19)のもとに国際融合研究を進めてきた。この二つのコンソーシアムを形成する海外の大学研究所の代表者らを招待して、平成28年9月17、18日に、国際会議 Tsukuba Global Science Week 2016(TGSW2016)の宇宙進化・物質起源(Universe Evolution and Matter Origin)セッションをつくば国際会議場エポカルで開催し、宇宙史国際研究拠点が目指す素粒子・原子核・宇宙物理学の融合による宇宙史の統一的理解を飛躍的に推進させるために、多数の海外研究者を含めて宇宙史研究の情報交換と議論を行った。宇宙進化・物質起源セッションには、47名の研究者が参加し、約7時間にわたって研究内容の講演と活発な議論が行われ、宇宙史研究推進に向けて実りの多い研究会となった。数理物質融合科学センター宇宙史国際研究拠点では素粒子物理学・原子核物理学・宇宙物理学の研究を推進し、これらを宇宙の歴史の観点から統一的に理解することを目標としている。いずれの分野においても国際協力のもとで研究を進めており、当セッションでは、関係する研究者による各研究の現状の報告がなされるとともに、今後の進め方についての議論を行った。

平成29年1月23、24日に開催されたCiRfSE ワークショップでは、二つのコンソーシアムを形成する国内の大学研究所の代表者を含めて約50名が参加した。宇宙史国際研究拠点に関する講演と議論が4時間にわたって行われた後に、それにつづいて、各部門に分かれた約4時間のミニ研究会において、各プロジェクトを推進するために、研究報告が行われ、それについての活発な議論が行われた。

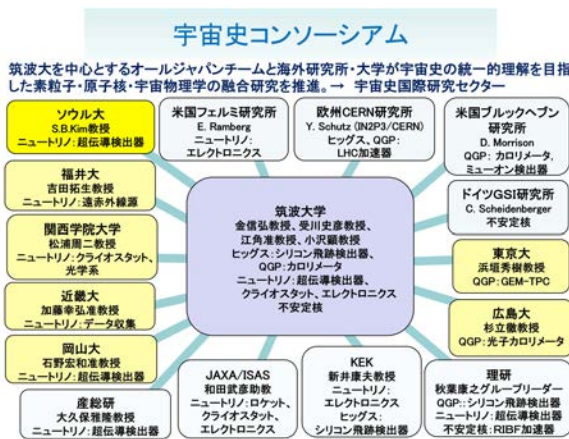


図18 宇宙史コンソーシアム

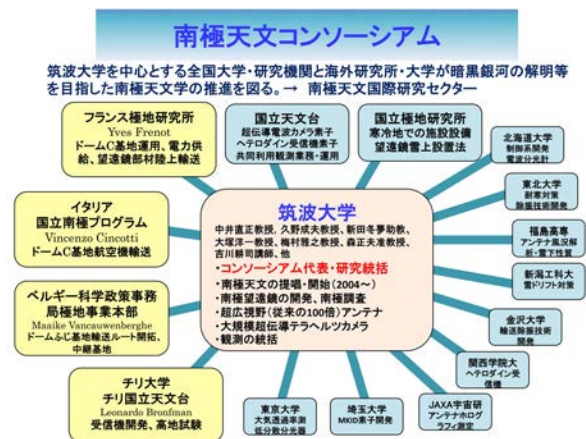


図19 南極天文コンソーシアム

平成28年12月12日、平成29年3月21日に開催された第1回、第2回宇宙史サロンでは、宇宙史プロジェクト内での素粒子・原子核・宇宙分野および実験・理論間の連携を深めていくために、研究員・助教の若手研究者を核にして、互いの分野の研究内容を報告して活発な議論を行った。これによって新たな連携を生み出すことに貢献した。

上記の国際会議とワークショップによって、宇宙史コンソーシアムと南極天文コンソーシアムにおける議論と情報交換を進め、宇宙史研究を推進させる基礎となる情報共有の環境を築いた。

また平成27年度に CiRfSE と計算科学研究センターが連携して応募した平成28年度概算要求「宇宙史の暗黒を照らす国際研究拠点形成」事業（平成28～33年度、代表：金谷和至）が採択された。その機能強化経費（機能強化促進分）を用いて、Kim Soo-Bong 教授（ソウル大学）を PI とする海外研究ユニットを招致し、また4名のクロスアポイントメント教員と5名の研究員を雇用し、宇宙史国際研究拠点の整備・拡充に向けた作業を進めた。これらの研究力強化の基盤のもとに、CiRfSE と計算科学研究センターが連携して宇宙史研究を推進した。さらに、平成29年度における CiRfSE 組織再編改組により、宇宙史国際拠点を独立したセンターに発展・強化する概算要求を行い採択された。これに基づき、光量子計測器開発推進室と合わせて、平成29年度に「宇宙史研究センター (Tomonaga Center for the History of the Universe)」を設立し、これを基盤として、宇宙史の研究力強化を推進する。

本拠点における平成28年度の特筆すべき成果を以下にあげる。

(1) 南極天文部門の研究

南極 10m テラヘルツ望遠鏡の技術開発を継続するとともに、平成29年度概算要求を行ったが認められるまでに至らなかった。当該望遠鏡計画は日本学術会議の「大型研究計画マスタープラン2017」に採択された。南極望遠鏡の暗黒銀河の検出の心臓部である超伝導電波カメラの実機一号機を開発し、国立天文台の野辺山 45m 電波望遠鏡に搭載し、試験観測を行った。その後、さらに改良を施している。南極 30m 級テラヘルツ望遠鏡計画の技術的検討を行うとともに計画書の作成に向けた準備を行った。長く観測に使用してきた国土地理院つくば 32m 望遠鏡が運用を停止し、解体された。国立天文台野辺山 45m 電波望遠鏡やアルマ等の既存の共同利用望遠鏡にも観測提案を行い、系外銀河や銀河系形成領域等の観測を行った。

(2) 素粒子構造部門の研究

平成28年度より宇宙背景ニュートリノ崩壊探索ロケット実験のための超伝導赤外線検出器の開発の共同研究に静岡大グループがあらたに参加し、12研究機関の国際共同研究となり、極低ノイズ読み出し系として、極低温で動作する SOI (Silicon On Insulator) プロセスによる増幅器および、SOI 上に直接 STJ を形成する SOI-STJ の開発を推進している。SOI 極低温増幅器プロトタイプを用いて STJ 信号の増幅試験を行った結果、極低温で STJ 信号を 70 倍程度の増幅度で増幅できること、および増幅器への入力の信号雑音比が増幅後の出力では向上しているのが確認された。

欧州 CERN 研究所の LHC 加速器 (Large Hadron Collider) を用いた ATLAS 実験グループはトップクォーク対を伴うヒッグス粒子生成過程の探索を行った。この生成断面積の測定により、トップクォークとヒッグス粒子の結合の強さを測ることができる。2016年夏の解析により、生成断面積は標準模型予言値の 1.8 ± 0.7 倍であることがわかった。信号の有意度は 2.8σ なり、標準模型と誤差内で一致した。

(3) クォーク・核物質部門の研究

CERN の LHC 加速器と、BNL の RHIC 加速器を用いた高エネルギー原子核衝突によるクォーク・グ

ルーオン・プラズマ (QGP) の実験的研究を行い、宇宙初期から中性子内部を表す高温領域から高密度領域の QCD 相図の性質を研究した。ジェットや重クォーク等のハードな指針を用いた研究と、集団運動的な非等方的な膨張や多粒子相関、揺らぎ測定等のソフトな指針を用いた研究を推進した。

また理研の RI ビームファクトリーを用いた不安定核の研究を行い、超新星爆発や中性子衝突による元素合成の期限や謎を探る研究を行った。

重イオン衝突実験データから QGP 生成の明確な証拠とその熱力学特性を引き出すためには、格子 QCD による QCD 第一原理からの理論計算が不可欠である。格子 QCD の大規模シミュレーションによる有限温度・有限密度 QCD の研究を行い、相構造の解明とクォーク物質の熱力学的性質の計算を遂行し、またそのための計算手法開発を進めた。

〈その他特記事項〉

1. 海外リサーチユニット PI: Kim Soo-Bong 教授 (ソウル大学) 9月16日着任
2. クロスアポイントメント教員: 吉田拓生教授 (福井大) 10月16日着任、山口貴之准教授 (埼玉大) 12月1日着任、池上陽一准教授 (KEK) 12月1日着任、小沢恭一郎准教授 (KEK) 12月1日着任
3. 研究員: 武政健一 10月1日着任、斎藤弘雄 10月1日着任、水野三四郎 10月1日着任、高水祐一 10月1日着任、永田和樹 2月1日着任

4.1 南極天文部門

部門長

中井 直正 (数理物質系物理学域 教授)

構成教員

久野 成夫 (数理物質系物理学域 教授)

新田 冬夢 (数理物質系物理学域 助教)

連携教員

大塚 洋一 (数理物質系物理学域 教授)

磯崎 洋 (数理物質系数学域 教授)

梅村 雅之 (計算科学研究センター 教授)

森 正夫 (計算科学研究センター 准教授)

吉川 耕司 (計算科学研究センター 講師)

瀬田 益道 (関西学院大学工学部 教授)

関本 裕太郎 (国立天文台先端技術センター 准教授)

西堀 俊幸 (宇宙航空研究開発機構 主幹研究開発員)

宇宙航空研究開発機構の西堀俊幸氏が2017年3月1日付けで客員准教授として着任し、連携教員としてアンテナ鏡面測定等の開発に参画した。南極天文学の推進においては、南極望遠鏡の技術開発を継続するとともに、10m テラヘルツ望遠鏡の平成29年度概算要求を行ったが認められるまでには至らなかった。当該望遠鏡計画は日本学術会議の「大型研究計画マスタープラン2017」に採択された。また30m級テラヘルツ望遠鏡計画の技術的検討を行うとともに計画書の作成に向けた準備を行った。

長く観測に使用してきた国土地理院つくば 32m 鏡が運用を停止し、解体された。国立天文台野辺山 45m 電波望遠鏡やアルマ等の既存の共同利用望遠鏡にも観測提案を行い、系外銀河や銀河系星形成領域等の観測を行った。

(1) 南極天文学の推進

南極 10m テラヘルツ望遠鏡

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

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

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

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

超伝導電波カメラの開発

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

南極 30m 級テラヘルツ望遠鏡計画

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

(2) 国土地理院つくば 32m 鏡アンテナ

観測

(VLBI 観測)

X 帯および K 帯の大学連携 VLBI 観測を 9 回実施した。

(単一鏡観測)

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

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



図 20 国土地理院つくば 32m 鏡アンテナ：左から 2017 年 1 月 4 日（解体前日）、1 月 22 日（解体中）、4 月 14 日（解体後）

理量を求めた。

アンテナの運用停止・解体

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

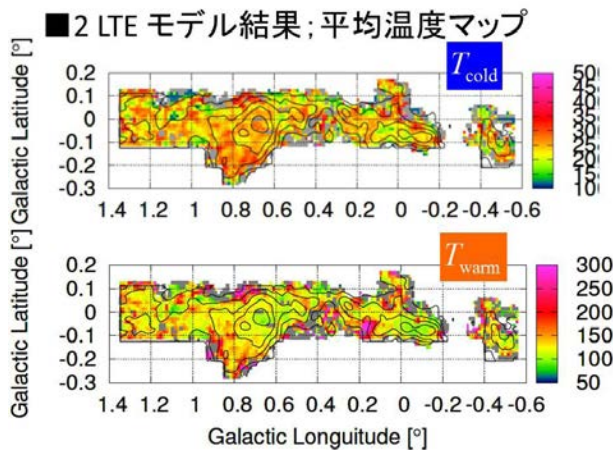


図 21 2 温度成分に分けて求めた回転温度の分布。

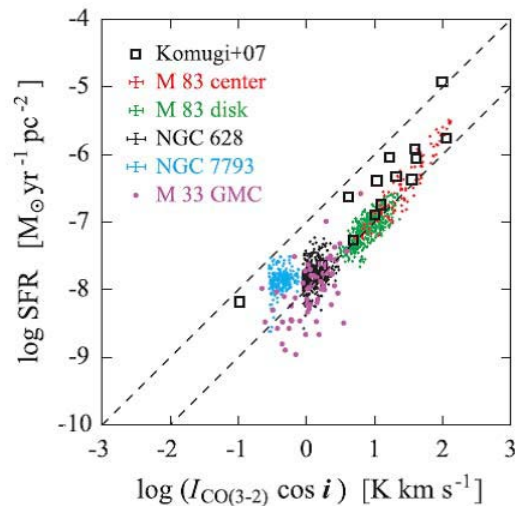


図 22 いくつかの銀河における CO(3-2) 積分強度と星形成率の関係。点線は線形関係。

(3) 銀河等の観測的研究

銀河系中心部のアンモニア観測

銀河系中心部のおよそ銀経 $l = -0.5^\circ \sim +1.3^\circ$ 、銀緯 $b = -0.1^\circ \sim +0.1^\circ$ の領域のアンモニア輝線 (J,K)=(1,1)-(6,6) を国土地理院 32m アンテナでマッピングした結果を出版した。これらの輝線間の強度比から回転温度を求めた結果、典型的には低温 (20K) と高温 (100K) の 2 成分の分子ガスから成り立っていることがわかった。(図 21, 論文 4)

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

南米チリの ASTE 望遠鏡を用いて、NGC 628 と NGC 7793 の CO(3-2) 輝線によるマッピングを行った。これらの銀河では、CO(3-2) 強度と星形成率の間に線形関係が成り立つことを明らかにした。また、他の銀河とも比較し、この関係が近傍銀河から遠方の赤外線で見える銀河を含めても成り立つことを示した。(図 22, 論文 7)

〈論文〉

1. De Looze, Ilse; Baes, Maarten; Cormier, Diane; Kaneko, Hiroyuki; Kuno, Nario; Young, Lisa; Bendo, George J.; Boquien, Mdric; Fritz, Jacopo; Gentile, Gianfranco; Kennicutt, Robert C.; Madden, Suzanne C.; Smith, Matthew W. L.; Wilson, Christine D., “The interstellar medium in Andromeda’s dwarf spheroidal galaxies - II. Multiphase gas content and ISM conditions”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 465, p.3741-3758, (2017).
2. Sekiguchi, S; Sugimoto, M; Shu, S; Sekimoto, Y; Mitsui, K; Nishino, T; Okada, N; Kubo, K; Takahashi, T; Nitta, T, ”Broadband Corrugated Horn Array with Direct Machined Fabrication”, *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 7(1), pp.3641 (2017)
3. Muraoka, Kazuyuki; Sorai, Kazuo; Kuno, Nario; Nakai, Naomasa; Nakanishi, Hiroyuki; Takeda, Miho; Yanagitani, Kazuki; Kaneko, Hiroyuki; Miyamoto, Yusuke; Kishida, Nozomi; Hatakeyama, Takuya; Umei, Michiko; Tanaka, Takahiro; Tomiyasu, Yuto; Saita, Chey; Ueno, Saeko; Matsumoto, Naoko; Salak, Dragan; Morokuma-Matsui, Kana, “CO Multi-line Imaging of Nearby Galaxies (COMING). I. Physical properties of molecular gas in the barred spiral galaxy NGC 2903”, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 68, id.89 14 pp (2016).
4. Arai, Hitoshi; Nagai, Makoto; Fujita, Shinji; Nakai, Naomasa; Seta, Masumichi; Yamauchi, Aya; Kaneko, Hiroyuki; Hagiwara, Kenzaburo; Mamyoda, Koh-ichi; Miyamoto, Yusuke; Horie, Masaaki; Ishii, Shun; Koide, Yusuke; Ogino, Mitsutoshi; Maruyama, Masaki; Hirai, Katsuaki; Oshiro, Wataru; Nagai, Satoshi; Akiyama, Daiki; Konakawa, Keita; Nonogawa, Hiroaki; Salak, Dragan; Terabe, Yuki; Nihonmatsu, Yoshiki; Funahashi, Fumiyoshi, “A multi-line ammonia survey of the Galactic center region with the Tsukuba 32 m telescope. I. Observations and data”, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 68, id.76 12 pp. (2016).
5. Yonekura, Yoshinori; Saito, Yu; Sugiyama, Koichiro; Soon, Kang Lou; Momose, Munetake; Yokosawa, Masayoshi; Ogawa, Hideo; Kimura, Kimihiro; Abe, Yasuhiro; Nishimura, Atsushi; Hasegawa, Yutaka; Fujisawa, Kenta; Ohyama, Tomoaki; Kono, Yusuke; Miyamoto, Yusuke; Sawada-Satoh, Satoko; Kobayashi, Hideyuki; Kawaguchi, Noriyuki; Honma, Mareki; Shibata, Katsunori M.; Sato, Katsuhisa; Ueno, Yuji; Jike, Takaaki; Tamura, Yoshiaki; Hirota, Tomoya; Miyazaki, Atsushi; Niinuma, Kotaro; Sorai, Kazuo; Takaba, Hiroshi; Hachisuka, Kazuya; Kondo, Tetsuro; Sekido, Mamoru; Murata, Yasuhiro; Nakai, Naomasa; Omodaka, Toshihiro, “The Hitachi and Takahagi

- 32 m radio telescopes: Upgrade of the antennas from satellite communication to radio astronomy” , Publications of the Astronomical Society of Japan, 68, id.74 16 pp. (2016).
6. Salak, Dragan; Nakai, Naomasa; Hatakeyama, Takuya; Miyamoto, Yusuke, “Gas Dynamics and Outflow in the Barred Starburst Galaxy NGC 1808 Revealed with ALMA” , The Astrophysical Journal, 823, id. 68, 28 pp. (2016).
 7. Muraoka, Kazuyuki; Takeda, Miho; Yanagitani, Kazuki; Kaneko, Hiroyuki; Nakanishi, Kouichiro; Kuno, Nario; Sorai, Kazuo; Tosaki, Tomoka; Kohno, Kotaro, “CO(J = 3-2) on-the-fly mapping of the nearby spiral galaxies NGC 628 and NGC 7793: Spatially resolved CO(J = 3-2) star-formation law” , Publications of the Astronomical Society of Japan, 68, id.18, 13 pp. (2016).
 8. Baba, J.; Morokuma-Matsui, K.; Miyamoto, Y.; Egusa, F.; Kuno, N., “Gas velocity patterns in simulated galaxies: observational diagnostics of spiral structure theories” , Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 460, p.2472-2481 (2016).
 9. Dominion, Agnes; Sekine, Masakazu; Karatsu, Kenichi; Noguchi, Takashi; Sekimoto, Yutaro; Shu, Shibo; Sekiguchi, Shigeyuchi; Nitta, Tom, ”Study of Superconducting Bilayer for Microwave Kinetic Inductance Detectors for Astrophysics” , IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 26(3), pp. 2400206 (2016).
 10. Karatsu, K; Dominjon, A; Fujino, T; Funaki, T; Hazumi, M; Irie, F; Ishino, H; Kida, Y; Matsumura, T; Mizukami, K; Naruse, M; Nitta, T; Noguchi, T; Oka, N; Sekiguchi, S; Sekimoto, Y; Sekine, M; Shu, S; Yamada, Y; Yamashita, T, ”Radiation Tolerance of Aluminum Microwave Kinetic Inductance Detector” , Journal of Low Temperature Physics, 184(3), pp.540546 (2016).

〈国際研究集会集録等〉

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

Kohno, Mikito; FUGIN Team, “A survey of molecular clouds in the outer Galaxy with the highest spatial resolution”, Proceedings of the International Astronomical Union, IAU Symposium, 321, pp. 44-44. (2016).

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

〈研究成果発表〉

[国際会議]

1. Kuno, Nario, ” Activities of the Observational Astronomy Group at University of Tsukuba”, Chile- Japan Academic Forum 2016, (Chile, Patagonia. 2016年11月10日) (一般講演)
2. Nitta, Tomu, “Development of MKID cameras for astronomical observations”, TGSW2016, ”Universe Evolution and Matter Origin”, (Univ. of Tsukuba, 2016年9月17日) (一般講演)
3. Nakai, Naomasa, “Construction of the Antarctic 10-m THz Telescope”, TGSW2016, ”Universe Evolution and Matter Origin”, (Univ. of Tsukuba, 2016年9月17日) (一般講演)

[国内学会・研究会]

1. 栗木美香, 久野成夫, 永井誠, 佐野栄俊, 稲葉哲大, 山根悠望子, 吉池智史, 福井康雄, 瀬田益道 「超新星残骸 Kes 79 に付随する星間ガス」、日本天文学会 2017 年春季年会、2017 年 3 月 18 日、九州大学
2. 齋藤弘雄, 土橋一仁, 齋藤正雄 「W3 Main における分子ガス構造と星団形成との関係の解明 3」、日本天文学会 2017 年春季年会、2017 年 3 月 18 日、九州大学
3. 伊佐見薫, 中井直正, 山内彩 「高感度 VLBI 観測から探る 2 型セイファート銀河 IC2560 中心核の回転メーザー円盤」、日本天文学会 2017 年春季年会、2017 年 3 月 16 日、九州大学
4. 米倉覚則, 杉山孝一郎, 齋藤悠, 青木健悟, 山口貴大, 足立弘, 大橋拓人, 佐藤宏樹, 柴田裕輝, 宮本祐輔, 百瀬宗武, 小川英夫, 藤沢健太, 高羽浩, 中井直正, 面高俊宏, 本間希樹, 小林秀行, 他大学間連携 VLBI group 「高萩/ 日立 32 m 電波望遠鏡の整備状況 (15)」、日本天文学会 2017 年春季年会、2017 年 3 月 17 日、九州大学
5. 奥村大志, 今田大皓, 永井誠, 新田冬夢, 中井直正, 久野成夫 「電波点回折干渉計 (II)」、日本天文学会 2017 年春季年会、2017 年 3 月 17 日、九州大学
6. 栗木美香, 久野成夫, 永井誠, 藤田真司, 佐野栄俊, 稲葉哲大, 山根悠望子, 吉池智史, 西村淳, 河野樹人, 福井康雄, 瀬田益道, 梅本智文, 南谷哲宏, 鳥居和史, 松尾光洋, ほか FUGIN チーム 「NRO 銀河面サーベイプロジェクト (FUGIN) : 超新星残骸に付随する星間ガスに関する研究」、日本天文学会 2016 年秋季年会、2016 年 9 月 16 日、愛媛大学
7. 中西康一郎, 中井直正, 久野成夫, 河野孝太郎, 安藤亮, 徂徠和夫, 松林和也, 菅井肇 「Ionized gas properties in the starburst region of NGC 253 uncovered by ALMA high spatial resolution millimeter observations」、日本天文学会 2016 年秋季年会、2016 年 9 月 14 日、愛媛大学
8. Dragan Salak1, Yuto Tomiyasu, Naomasa Nakai, Yusuke Miyamoto, Nario Kuno, Hiroyuki Kaneko

- 「Circumnuclear gas torus and star-forming regions in the starburst galaxy NGC 1808 imaged by ALMA」、日本天文学会 2016 年秋季年会、2016 年 9 月 14 日、愛媛大学
9. 宮本祐介、瀬田益道、Dragan SALAK、中井直正、永井誠、金子紘之「ALMA による近傍銀河 NGC 613 中心領域の多輝線観測」、日本天文学会 2016 年秋季年会、2016 年 9 月 14 日、愛媛大学
 10. 徂徠和夫、久野成夫、村岡和幸、中井直正、宮本祐介、金子紘之、中西裕之、柳谷和希、田中隆広、富安悠人、齊田智恵、上野紗英子、諸隈佳菜、松本尚子、Dragan SALAK、武田美保、畠山拓也、岸田望美、江副聡一、PAN, Hsi-An, 他 COMING メンバー、「NRO レガシープロジェクト COMING (7) : プロジェクトの進捗状況報告」、日本天文学会 2016 年秋季年会、2016 年 9 月 15 日、愛媛大学
 11. 村岡和幸、武田美保、柳谷和希、岸田望美、徂徠和夫、畠山拓也、田中隆広、富安悠人、久野成夫、中井直正、齊田智恵、上野紗英子、中西裕之、金子紘之、宮本祐介、諸隈佳菜、松本尚子、Dragan SALAK, 他 COMING メンバー、「NRO レガシープロジェクト COMING (8) : 棒渦巻銀河 NGC 2903 における分子ガス密度と星形成効率の関係」、日本天文学会 2016 年秋季年会、2016 年 9 月 15 日、愛媛大学
 12. 田中隆広、久野成夫、畠山拓也、富安悠人、中井直正、徂徠和夫、岸田望美、村岡和幸、武田美保、柳谷和希、中西裕之、齊田智恵、上野紗英子、江副聡一、金子紘之、宮本祐介、諸隈佳菜、松本尚子、Dragan SALAK, PAN Hsi-An, 他 COMING メンバー、「NRO レガシープロジェクト COMING(9) : 棒渦巻銀河 NGC 4088 における分子ガスの分布と運動」、日本天文学会 2016 年秋季年会、2016 年 9 月 15 日、愛媛大学
 13. 新田冬夢、中井直正、久野成夫、永井誠、村山洋佑、関本裕太郎、福嶋美津広、三ツ井健司、都築俊宏、野口卓、松尾宏、Agnes Dominjon, Wenlei Shan, 長谷部孝、関口繁之、Shibo Shu, 清水貴之、成瀬雅人、伊藤和雅、増田聖、川崎繁男、宮地晃平、岡田則夫、「野辺山 45m 電波望遠鏡搭載に向けた 90/150-GHz 帯 MKID カメラの開発」、日本天文学会 2016 年秋季年会、2016 年 9 月 15 日、愛媛大学
 14. 中井直正、久野成夫、新田冬夢、永井誠、瀬田益道、Dragan SALAK、関本裕太郎、徂徠和夫、南極天文コンソーシアム、「南極 10m テラヘルツ望遠鏡計画：建設場所」、日本天文学会 2016 年秋季年会、2016 年 9 月 15 日、愛媛大学
 15. 瀬田益道、中川直登、Dragan SALAK、中井直正、久野成夫、永井誠、新田冬夢、関本裕太郎、今田大皓 (ISAS/JAXA)、南極天文コンソーシアム、「南極 10m テラヘルツ望遠鏡ヘテロダイン受信機系の基本設計」、日本天文学会 2016 年秋季年会、2016 年 9 月 15 日、愛媛大学
 16. 村山洋佑、新田冬夢、中井直正、久野成夫、永井誠、関本裕太郎、都築俊宏、関口繁之、Shibo Shu, 今田大皓、瀬田益道、成瀬雅人、「南極 10 m テラヘルツ望遠鏡搭載用超伝導電波カメラの機械熱設計」、日本天文学会 2016 年秋季年会、2016 年 9 月 15 日、愛媛大学
 17. 永井誠、今田大皓、「相反とは限らないアンテナの送受信特性の定式化」、日本天文学会 2016 年秋季年会、2016 年 9 月 15 日、愛媛大学
 18. 久野成夫、中井直正、新田冬夢、永井 誠、瀬田益道、関本裕太郎、徂徠和夫、ほか南極天文コンソーシアムメンバー、「南極 30 m テラヘルツ望遠鏡計画」、日本天文学会 2016 年秋季年会、2016 年 9 月 15 日、愛媛大学
 19. 米倉覚則、齋藤悠、青木健悟、山口貴大、足立弘、大橋拓人、佐藤宏樹、柴田裕輝、宮本祐輔、杉山孝一郎、澤田-佐藤聡子、百瀬宗武、吉田龍生、小川英夫、藤沢健太、高羽浩、徂徠和夫、中井直正、面高俊宏、本間希樹、小林秀行、他大学間連携 VLBI group、「高萩/ 日立 32 m 電波望遠鏡の整備状況 (14)」、日本天文学会 2016 年秋季年会、2016 年 9 月 15 日、愛媛大学
 20. 梅本智文、南谷哲宏、鳥居和史、水野範和、本間希樹、Muller, E., 亀谷和久、井上剛志、廣田明彦、諸隈佳

菜, 久野成夫, 藤田真司, 栗木美香, 半田利弘, 面高俊宏, 中西裕之, 新 永浩子, 松尾光洋, 小澤武揚, 小出 胤人, 松本尚子, 大西利和, 徳田一起, 高橋諒, 濤崎智佳, 小林幸典, 小野寺幸子, 津田裕也, 立原研悟, 西村淳, 佐野栄俊, 服部有祐, 吉池智史, 河野樹人, 樋口あや, 大朝由美子, 大橋聡 史, 桑原翔, 祖父江義明, 坪井昌人, 山岸光義, Chibueze, J., 「NRO 銀河面サーベイプロジェクト (FUGIN) : 2015 年度進捗」、日本天文学会 2016 年秋季年会、2016 年 9 月 16 日、愛媛大学

21. 鳥居和史, 南谷哲宏, 梅本智文, 藤田真司, 栗木美香, 久野成夫, 松尾光洋, 服部有祐, 西村淳, 河野樹人, 立原研悟, 福井康雄, 濤崎智佳, 津田裕也, 大橋聡史, FUGIN チーム, 「NRO 銀河面サーベイプロジェクト (FUGIN) : Spitzer バブル N18 における分子雲衝突と大質量星形成」、日本天文学会 2016 年秋季年会、2016 年 9 月 16 日、愛媛大学
22. 永井誠, 金高義, 今井大皓, 中井直正, 久野成夫, 瀬田益道, 「南極 10m 級テラヘルツ望遠鏡の設計 — 風荷重の計算 —」, 第 32 回寒地技術シンポジウム, 2016 年 11 月 17 日, 札幌コンベンションセンター

4.2 素粒子構造部門

部門長

受川 史彦 (数理物質系物理学域 教授)

構成教員

石橋 延幸 (数理物質系物理学域 教授)

原 和彦 (数理物質系物理学域 准教授)

武内 勇司 (数理物質系物理学域 准教授)

佐藤 構二 (数理物質系物理学域 講師)

大川 英希 (数理物質系物理学域 国際テニュアトラック助教) スイス連邦 CERN 研究所在駐

伊敷 吾郎 (数理物質系物理学域 助教)

KIM, Soo-Bong (数理物質融合科学センター 教授) 海外教育研究ユニット招致 PI

吉田 拓生 (数理物質融合科学センター 教授) クロスアポイントメント教員

池上 陽一 (数理物質融合科学センター 准教授) クロスアポイントメント教員

連携教員

金 信弘 (数理物質系物理学域 教授)

佐藤 勇二 (数理物質系物理学域 助教)

素粒子構造部門では、大きく分けて3つの研究を行っている。それらは、(1) ビーム衝突型の高エネルギー粒子加速器を用いた衝突実験、(2) 宇宙背景ニュートリノを用いたニュートリノ崩壊探索、(3) 超弦理論の研究である。

(1) は、欧州原子核研究機構 (CERN 研究所) の LHC 加速器での陽子・陽子衝突実験 ATLAS において、世界最高エネルギーでの素粒子反応を観測し、素粒子とその性質の実験的研究を行っている。特に、ヒッグス粒子の性質の詳細な研究は、電弱対称性の破れと素粒子質量の起源を明らかにするとともに、素粒子標準理論を超える物理への手がかりを与える。LHC 加速器は、ビームエネルギーを本来の設計値で運転するために 2013-2014 年の 2 年間の改造・調整を行ってきたが、平成 27 年度には、重心系エネルギー 13 TeV での運転が開始され、ATLAS 実験も新たなエネルギー領域での衝突事象データを取得し、物理成果も生みだしている。さらに 2020 年代半ばには LHC 加速器の輝度の大幅な向上が予定されており、ATLAS 検出器も増強が必要

となる。そのための粒子飛跡検出器の開発を並行して行っている。この研究領域には国際テニュアトラック助教が配置されている。同助教は CERN 研究所に常駐して、衝突実験を遂行し物理解析を行うとともに、検出器増強を行った。実験の現場に滞在することは極めて重要であり、現地の研究者との連絡を密にして連携を深め研究を推進し、また、現地に滞在する大学院生の教育を行った。

(2) は、ニュートリノがクォークやレプトンと比べてはるかに小さな質量を持つことに着目し、その質量の絶対値を決定して素粒子質量の起源を解明することを目標とする。ニュートリノの輻射崩壊で生じる赤外線領域の光子を観測するために、超伝導接合素子 (Superconducting Tunnel Junction, STJ) を用いた、高いエネルギー分解能を持つ光検出器を開発している。将来は、宇宙背景ニュートリノの観測のために、ロケットおよび人工衛星を利用した実験を計画している。なお、宇宙背景ニュートリノが観測されれば、素粒子物理学を超えて、宇宙論にも大きな影響を与える。

(3) は、素粒子が点でなく弦 (ひも) であるという考えに基づき、重力を含めた素粒子の基礎理論を構築しようという研究である。現在の素粒子標準理論は、相対論的な場の量子論をその枠組みとしているが、重力の量子論はまだ作られていない。超弦理論はその可能性を持つ最も有力な理論である。

当部門では、これらの研究を通して、宇宙を構成する基本要素としての素粒子と、それらの間に働く相互作用について、その構造と本質を明らかにし、統一的な描像を得ることを目標とする。ひいては、ビッグバンに始まる宇宙の歴史の最初期を解き明かすことにつながる。以下に、平成 28 年度に行われた研究活動をより詳しく述べる。

当センター宇宙史国際研究拠点では、国内外の研究機関・研究者との連携をより緊密にして研究を強力に推進するための、密接な共同研究の体制を構築している。素粒子構造部門において、平成 28 年度には、以下の 3 名の研究者を本学教員として招き、活動を開始した。

教授 KIM, Soo-Bong 国際教育研究ユニット招致 PI (韓国ソウル国立大学)

教授 吉田 拓生 (クロスアポイントメント教員, 福井大学)

准教授 池上 陽一 (クロスアポイントメント教員, 高エネルギー加速器研究機構)

また、大川英希 (国際テニュアトラック助教) は欧州原子核研究機構 (CERN 研究所) に常駐し、現地研究者と連携して、ATLAS 実験の検出器運転、データ取得、および物理解析に従事している。

(1) LHC ATLAS 実験 (受川, 原, 佐藤構二, 大川, 池上, 金)

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

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

本学グループの物理解析への取り組み

ヒッグス粒子は発見されたばかりの粒子であり、その性質を精密に測定して理解することは重要である。ヒッグス粒子が標準理論の予言するおりの性質なのか、標準理論からずれがあるのかをはっきり

させ、標準理論を超える物理の発見へのヒントにつなげる意味で、ヒッグス粒子の精密測定は大変意義がある。また、ヒッグス粒子が標準理論を超える物理現象と結合している可能性を積極的に探することも大切である。

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

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

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

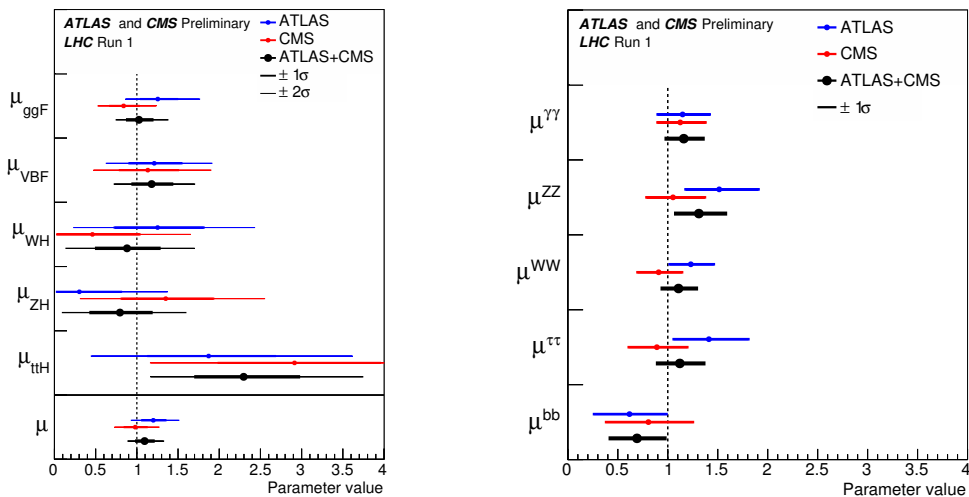


図 23 ATLAS および CMS 実験の Run-1 での測定結果を複合して得られた (左) ヒッグス粒子の様々な生成過程での信号の強さ μ (生成断面積を標準理論の予言値で規格化したもの)。 (右) ヒッグス粒子の様々な崩壊過程での信号の強さ μ (崩壊分岐比を標準理論の予言値で規格化したもの)。

ヒッグス粒子の崩壊と種々の粒子との結合

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

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

LHC Run-1 での ATLAS および CMS 両実験で種々の終状態を用いて測定したヒッグス粒子の信号の強さ μ (生成断面積および崩壊分岐比を標準理論の予言値で割ったもの) を図 23 に示す。両実験で個々の測定結果について矛盾は認められず、統合することで測定精度が向上した。

発見に使われた様式 $H \rightarrow \gamma\gamma$, $H \rightarrow Z^0 Z^{*0}$, $H \rightarrow W^\pm W^{*\mp}$ において予言との一致度はよい。ヒッグス粒子が W/Z 粒子 (ゲージ粒子) と結合することは発見時に確立した。2014 年度には ATLAS 実験

で初めてレプトン (τ) とも結合することが高い精度で判明していたが、2015年度のCMS実験との統合により $H \rightarrow \tau\tau$ 崩壊の信号の有意度は 5σ に達した。

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

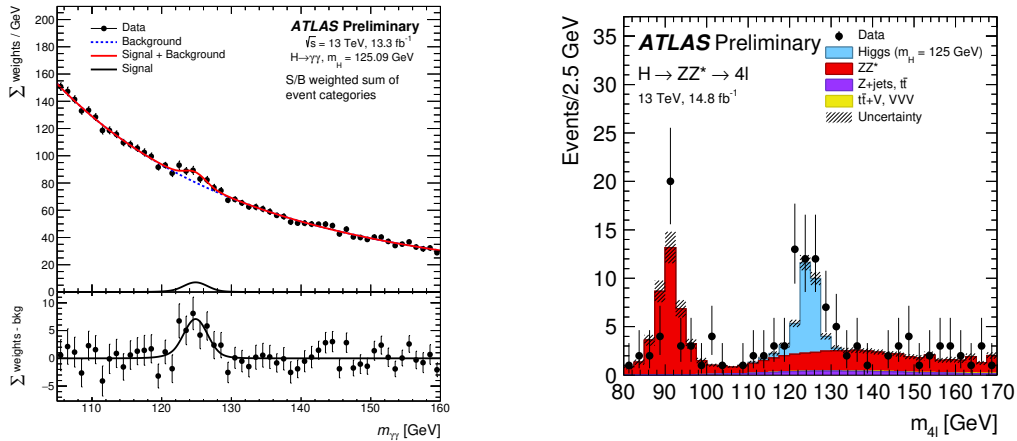


図 24 ATLAS 実験の Run-2 のデータを用いた、(左) 二光子崩壊事象および (右) 4レプトン崩壊事象におけるヒッグス粒子の「再発見」。

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

LHC Run-2 の 2016 年夏までの 13.3 fb^{-1} のデータを用いて、二光子崩壊事象と、4レプトン崩壊事象の両チャンネルにおいて、ヒッグス粒子を「再発見」した (図 24)。また、二光子崩壊事象においては、ヒッグス粒子の横運動量分布や、ジェット数分布などの微分断面積の測定を行い、摂動 QCD (量子色力学) の精密検証及び、標準理論を超える新物理の兆候を探索した (図 25)。現時点では、各ヒッグス粒子生成過程におけるシグナル強度も含めて、標準理論からの逸脱は見られない (図 25)。

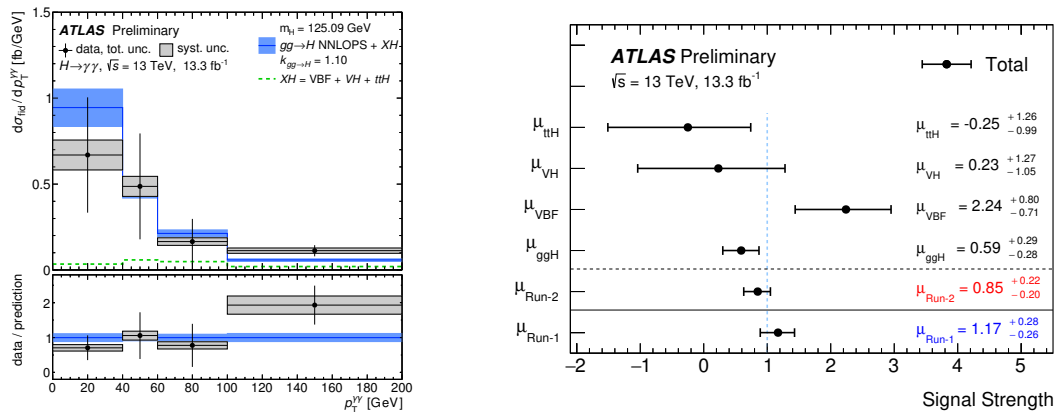


図 25 ATLAS 実験の Run-2 のデータを用いた、二光子崩壊事象におけるヒッグス粒子の横運動量についての微分断面積 (左) と各生成過程についてのシグナル強度の測定。

弱ボソンとの随伴生成によるヒッグス粒子のボトムクォーク対への崩壊の探索

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

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

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

ATLAS 実験では、 $\sqrt{s} = 13$ TeV のデータ 13.2 fb^{-1} を解析した結果を 2016 年夏に発表した。Run-1 の解析と同様に、 W または Z ボソンと随伴してヒッグス粒子が生成され、 $W \rightarrow \ell\nu$ または $Z \rightarrow \ell\ell/\nu\bar{\nu}$ 、および $H \rightarrow b\bar{b}$ と崩壊する事象を探索した。荷電レプトン（電子またはミュー粒子）が終状態に 0, 1, または 2 個存在し、ヒッグス粒子が崩壊したボトムクォークを起源とする b ジェットを 2 つ以上含む事象を解析した。解析感度をあげるため、2 つの b ジェットの不变質量をはじめとするさまざまな測定量を使って多変数解析により信号・バックグラウンド事象間の分離を最適化した。図 26 に、荷電レプトンを 0, 1, 2 個含む終状態での、多変数解析の出力分布を示す。

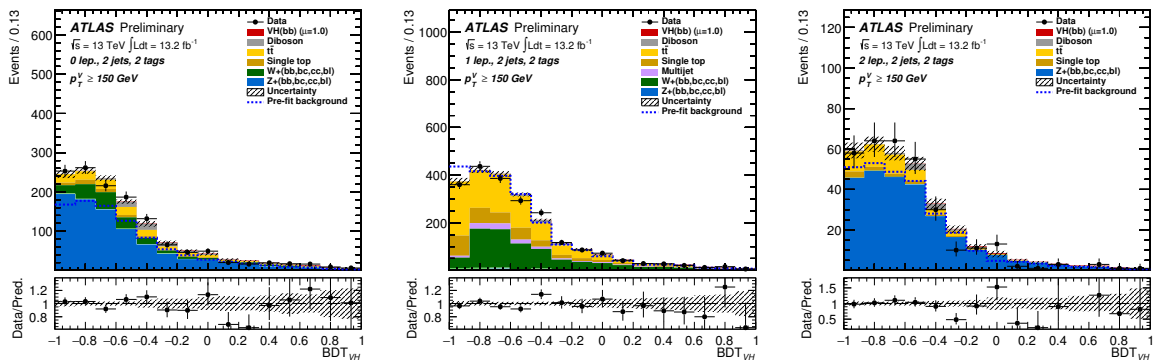


図 26 $(Z/W)H \rightarrow (\nu\bar{\nu}/\ell\nu/\ell\ell)b\bar{b}$ 事象の探索解析での多変数解析の出力分布。 b タグされたジェットを 2 つ含む事象に対するもの。左からそれぞれ、電子またはミュー粒子を 0, 1, 2 個含む終状態での分布を示す。この出力を、信号・バックグラウンドの識別変数として用いた。

本解析では、ヒッグス粒子の質量 $m_H = 125 \text{ GeV}/c^2$ としたときに、95% の信頼度で、 $pp \rightarrow (W/Z)(H \rightarrow b\bar{b})$ 信号の強さ（生成断面積と崩壊分岐比の積の標準理論の予言値との比）に対して、1.2 の上限値を得た。また、信号の強さを $\mu = 0.21^{+0.36}_{-0.35}$ (stat) ± 0.36 (syst) と測定した（図 27）。期待された信号の有意度は 1.94σ であったが、観測された有意度は 0.42σ であった。

トップクォーク対を伴うヒッグス粒子生成過程の探索

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

トップクォークとヒッグス粒子の結合の強さを測るには、ヒッグス粒子がトップクォーク対を伴って生成する $t\bar{t}H$ 事象の生成断面積を測定する。2015 年度には、ATLAS 実験では Run-1 データを解析し、

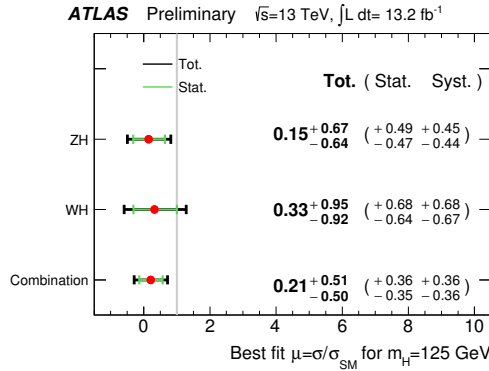


図 27 $(Z/W)H, H \rightarrow b\bar{b}$ 過程の信号の強さ μ (生成断面積と崩壊分岐比の積, 標準理論の予言値で規格化したもの)。

はじめての $t\bar{t}H$ 過程の探索結果を発表した。その結果を CMS 実験と統合した探索結果では, 信号の有意度は, 4.4σ に達していた。標準理論通りの場合に予想された 2.0σ よりも高い有意度が結論されたことは大変興味深い。

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

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

図 28 に, $t\bar{t}H, H \rightarrow b\bar{b}$ チャンネルでの探索の様子を示す。この探索チャンネルでは, ヒッグス粒子と一緒に生成されたトップクォーク対が電子またはミュー粒子 1, または 2 個を含む終状態に崩壊した事象を解析した。さらに解析に用いる事象サンプルを, ジェットおよび b タグされたジェットの数によって細分化することで信号に対する解析の向上し, さらには多変数解析を応用することで信号・バックグラウンドの分離を最適化している。

ATLAS 実験の Run-2 での $b\bar{b}, \gamma\gamma, WW/ZZ/\tau\tau$ 崩壊チャンネルおよびこれらを統合した場合の $t\bar{t}H$ 過程の探索における信号の有意度を表 7 にまとめる。また, それぞれのチャンネルで測定された信号強度 (生成断面積と崩壊分岐比の積の標準理論による予言値との比) を図 29 に示す。

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

表 7 $t\bar{t}H$ 過程の探索解析での観測および予想された, バックグラウンドのみの仮定に対する信号の有意度。

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

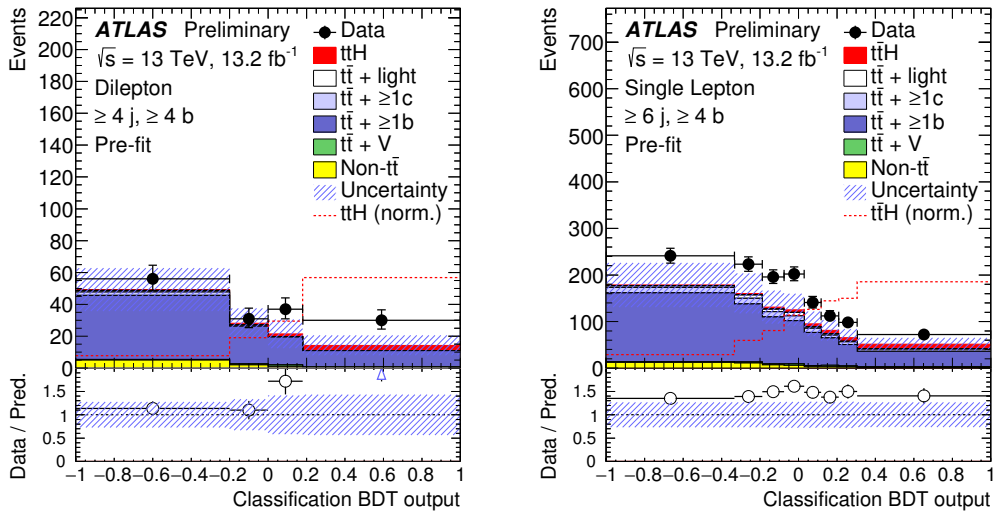


図 28 $t\bar{t}H, H \rightarrow b\bar{b}$ 事象の探索解析における, 多変数解析の出力の分布。(左) 終状態に電子またはミュー粒子が 2 個あり, b タグしたジェットが 4 つ以上ある事象に対する分布。(右) 終状態に電子またはミュー粒子が 1 個, ジェットが 6 個以上, b タグしたジェットが 4 つ以上ある事象に対する分布。

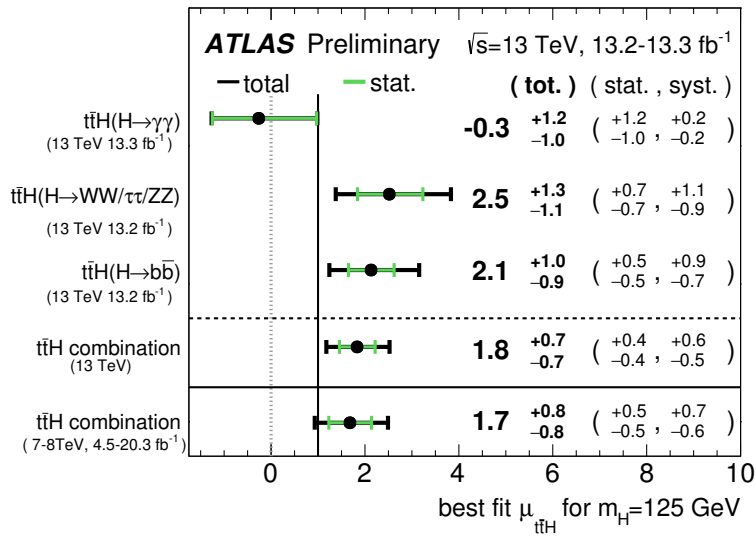


図 29 $t\bar{t}H$ 生成過程の生成断面積の測定結果。

深い。

ヒッグス粒子の稀崩壊の探索

ヒッグス粒子の稀崩壊事象の探索は, 湯川結合と標準理論の検証を行う上で, 極めて重要である。ヒッグス粒子のミューオン粒子対への崩壊は, 第 2 世代粒子との結合を, クリーンなイベントトポロジーで測定することを可能にする。図 30 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。現時点では, ヒッグス粒子のミューオン粒子対への崩壊は, 観測されず, 標準理論から予測される生成断面積の 3.0 倍を, 95% の信頼度で棄却した。

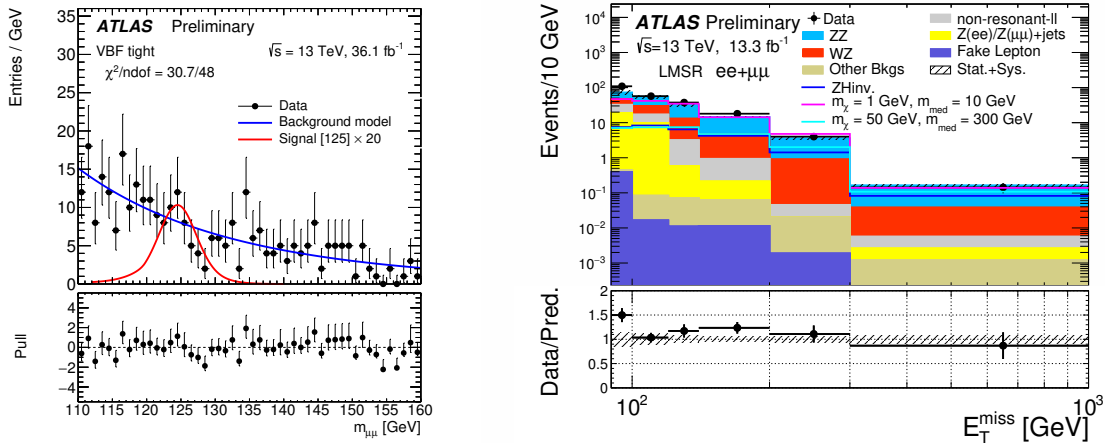


図 30 ATLAS 実験の Run-2 のデータを用いた、ヒッグス粒子の (左) ミューオン対崩壊事象および (右) 非可視崩壊事象の探索。

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

Run-2 のデータを用いて、Z ボソン随伴生成過程を用いた探索を行った。ニュートリノや暗黒物質などの、弱い相互作用をする粒子の横運動量の間接測定である、消失横運動量分布において、標準理論からの有意な逸脱は見られなかった (図 30)。非可視崩壊比への制限は、95% の信頼度で、98% (期待感度 65%) であり、Run-1 からの制限には至らなかった。より高統計での追跡調査が待たれる。

標準理論を超えたダイボソン共鳴事象の探索

標準理論を超えた物理の多くのモデルにおいて、複数のヒッグス粒子が存在することが示唆されている。その中でも、ZZ モードへの崩壊は、多くのモデルで予測されるため、探索チャンネルとして重要である。Run-2 のデータを用いて、ZZ 共鳴事象の探索を行った。その際には、Z ボソンの崩壊モードに対応して、 $4l$, $ll\nu\nu$, $llqq$, $\nu\nu qq$, $4q$ というように多様なチャンネルについて、探索を行った。現時点では、標準理論からの有意な逸脱は、観測されなかった。 $ll\nu\nu$ チャンネルでは、bulk Randall-Sundrum Graviton について、 $\kappa/M_{\text{Pl}} = 1.0$ の条件下で、1.03 TeV の質量域を、95% の信頼度で棄却した (図 31)。 $llqq$, $\nu\nu qq$ チャンネルからも、同程度の質量域が棄却されている。

$llqq$, $\nu\nu qq$, $4q$ チャンネルは、ZZ だけでなく、 WW や WZ の共鳴事象にも感度がある。図これらのチャンネルに加えて、 $lvqq$ からも、 W' 粒子の探索が行われ、Heavy Vector Triplet モデルにおいて、ベクターボソンとの結合 g_V が 1 の場合に、2 TeV を超える質量域が棄却された (図 31)。

トップクォークとボトムクォークに崩壊する荷電ヒッグス粒子の探索

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

2016 年夏には、トップクォークとボトムクォークに崩壊する荷電ヒッグス粒子を Run-2 データ

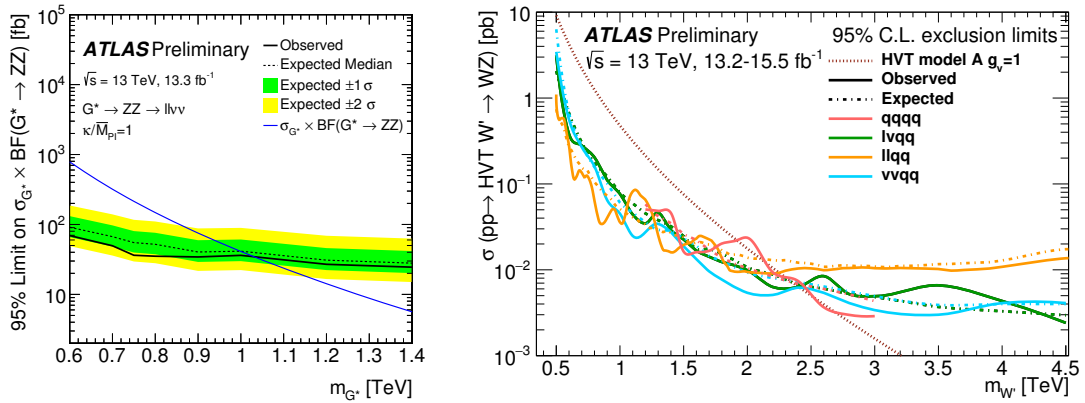


図 31 ATLAS 実験の Run-2 のデータを用いた、(左) $ll\nu\nu$ チャンネルでの ZZ 共鳴事象の探索における、bulk Randall-Sundrum Graviton モデルへの制限と、(右) WZ 共鳴事象に対する W' の質量域への制限。

13.2 fb^{-1} を使って探索した。図 32 に、300 および 800 GeV/c^2 の質量を持つ荷電ヒッグス粒子を探索したときの、Boosted Decision Tree 出力の分布を示す。Boosted Decision Tree は、仮定する荷電ヒッグス粒子の質量ごとにトレーニングしなおしている。

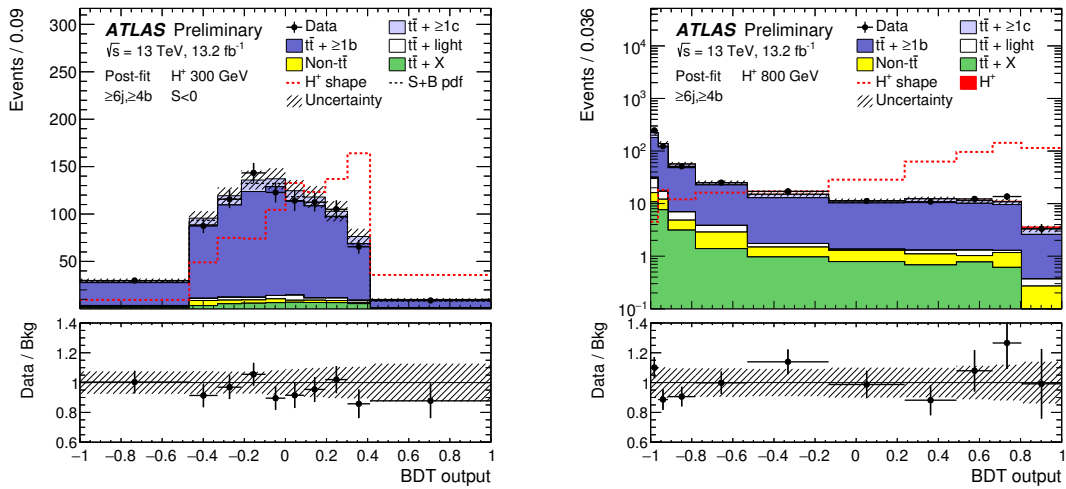


図 32 質量 300 GeV/c^2 (左) および 800 GeV/c^2 (右) の荷電ヒッグス粒子信号のバックグラウンドからの分離を最適化した Boosted Decision Tree 出力の分布。信号とバックグラウンドの大きさは、データへのフィットの結果で規格化してある。信号の形をバックグラウンドと比較するために、赤線で示している。

データがバックグラウンドの予想とよく一致しており、信号事象の有意な超過を観測しなかった。図 33 に、荷電ヒッグス粒子の生成断面積とトップクォークとボトムクォークへの崩壊分岐比の積に対して本研究が与えた上限値、および、本解析が棄却した MSSM の m_h^{mod-} シナリオでのパラメータ領域を示す。

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。我々は HL-LHC で使用できる放射線耐性に優れたシリコン半導

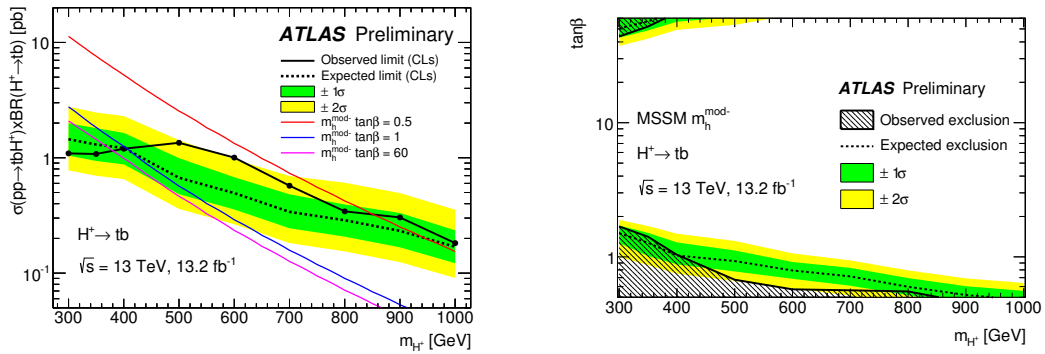


図 33 (左) 荷電ヒッグス粒子の生成断面積とトップクォークとボトムクォークへの崩壊分岐比の積に対して、本研究が与えた上限値。荷電ヒッグス粒子の質量の関数としてプロットしている。(右) 本解析により得られた、MSSM の m_h^{mod-} シナリオに対する制約。

体検出器を用いた新しい内部飛跡検出器の開発研究を継続して行っている。

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

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

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

エンドキャップ部ストリップ型センサー

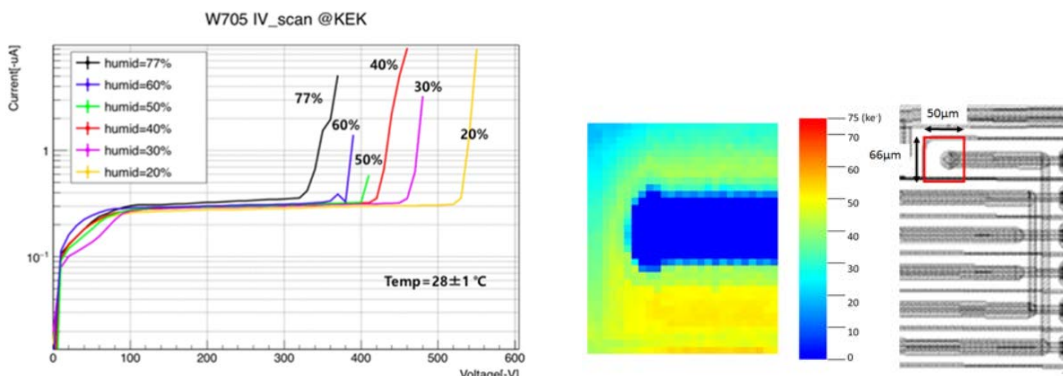


図 34 (左) 実機センサーの電流-バイアス電圧依存性を湿度を変えて測定。(右) ギャングした電極まわりの収集電荷一様性。信号は反対側 (左側) の端から読み出す。

ストリップ型センサーの実機を試作評価したところ、一部に暗電流の不安定性が見られた。この評価は

イギリス、ドイツなどのグループとともに協力して進めているが、その原因を系統的に探り、湿度が影響を与えていること、暗電流発生がガードリング外側のポイントにあることを逸早く解明した。図 34 (左) は湿度を変えながら、電圧-電流特性を実機センサーに対して測定したもので、湿度が高いほどブレークダウン電圧が下がることを示す。この結果から、湿度ゼロで稼働させる ATLAS 環境では動作に問題は発生しないが、製造元と協議して被膜製法を最適化する対策を進めている。

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

エンドキャップセンサーの設計によっては、扇型に広がるセンサー形状とステレオ角を持たせるための電極配置の兼ね合いから一部のストリップが読み出し端まで届かない場合が生じ、これらの電極は近傍の電極にギャングさせることで信号を読み出す。1 μm 角に絞った赤外レーザーでこれらの電極周辺を走査し電荷収集一様性の評価を行った。大きな電荷収集の劣化のないことを示した (図 34 (右))。

ピクセル型センサー

ピクセル検出器は読み出しチップである FE-I4 の仕様からピクセルサイズ $50 \times 250 \mu\text{m}$ が基本設計である。2 cm 角の FE-I4 読み出しチップ 4 枚に対し 4 cm 角のピクセルセンサー 1 枚を金属バンプで接合したモジュール (4-chip module, 図 35 左) や 2-chip module を試作した。特に 2016 年度は実機への実装を念頭に、フレックス基板を用い、機械強度等の温度サイクル試験の後に、CYRIC で陽子線の照射をし、CERN の陽子ビームで未照射のサンプルと比較して検出器性能を評価した。昨年度までの試験から、照射後には各ピクセルに配線するバイアス抵抗の経路で検出効率が低下することが判明し、経路をピクセル電極の内側に配置することで照射後も 98% 以上の検出効率の目標を達成した。フレックス基板での金属バンプ形成の機械的安定性について評価を重ね、十分に仕様に満たすモジュールが製作できることを確立した。

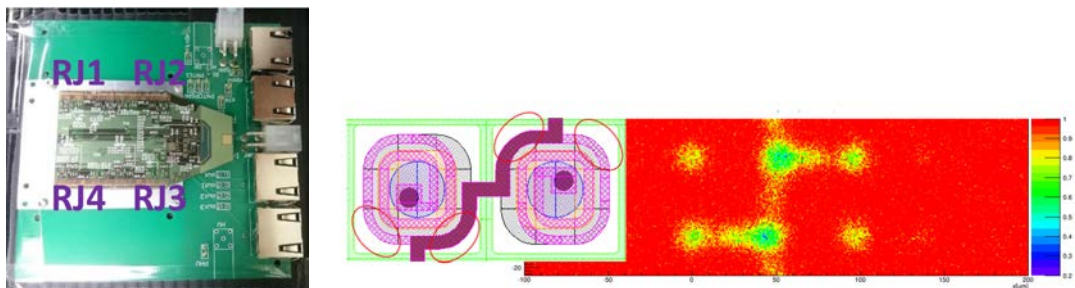


図 35 (左) 4-chip flex module. 中央 4cm 角のセンサーをフレックス基板で読み出す。この形状では信号はさらに 4 つの RJ 端子をもつ基板を介して出力されるが、実機ではこの部分はシリンダー部に実装される。(右) は $3 \times 10^{15} \text{ n/cm}^2$ を照射した $50 \times 50 \mu\text{m}$ ピクセルに相当するセンサーのピクセル内位置での検出効率の分布。左には隣接する 2 つのピクセル電極と低抵抗のバイアスライン (濃い実線部) と高抵抗のバイアス抵抗の経路を示す。丸で囲った部分で検出効率が低下し、設計変更により低下が抑えられる見込みが得られた。

2016 年度は、ピクセルサイズの小さなセンサーに移行することを見越して、同じ FE-I4 で対応できる $50 \times 50 \mu\text{m}$ と $50 \times 450 \mu\text{m}$ ピクセルの組み合わせにし、 $50 \times 50 \mu\text{m}$ ピクセルを隣接させることで $50 \mu\text{m}$ 角センサーの検出効率を評価した。ピクセル面積が狭いのでバイアス抵抗の占める面積比が高くなり、図 35 右に示すように照射後の検出効率は目標値を達成できない。しかしこの詳細な検出効率のマップから、バイアス抵抗を細くしピクセル電極の内側に経路を取ることで 98% 以上の効率を達成できるこ

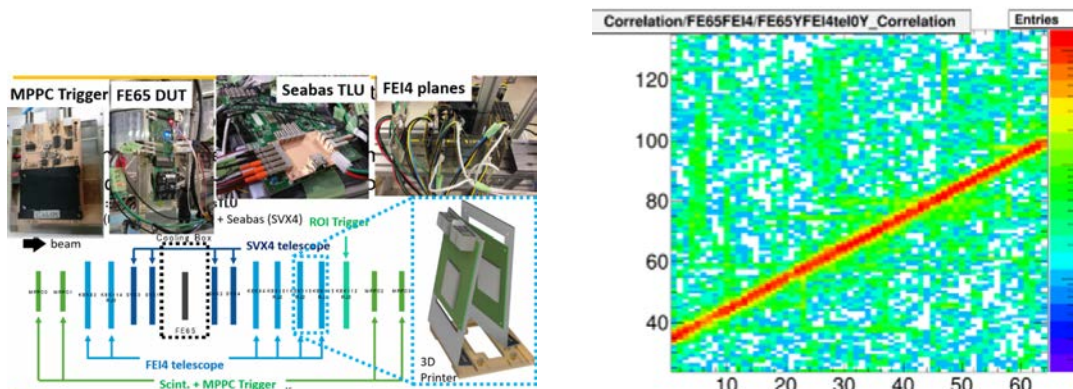


図 36 (左)FNAL でのビーム試験に用いたモジュールと配置。(右)FE-I4 モジュール (縦軸) と FE65 モジュール (横軸) のヒットチャンネルの相関。

とが見込めることを初めて示した。

実際に $50 \times 50 \mu\text{m}$ ピクセルにするには読み出しチップも対応させる必要がある。CERN グループにより 65 nm CMOS プロセスによる FE65-p2 チップが使えるようになり、実際に $50 \times 50 \mu\text{m}$ ピクセルモジュールと $25 \times 100 \mu\text{m}$ ピクセルモジュールを試作し、FNAL でテストビーム試験を行った。テストビームでは FE-I4 モジュールを前後に配置し、中央に FE65 モジュールを設置することで 120 GeV 陽子を用いて評価した (図 36 左)。解析は進行中であり、図 36 右には、FE65 からのヒットチャンネル番号と FE-I4 のヒットチャンネル番号の相関を示す。FE-I4 はビームに対して意図的に傾けることで位置分解能を向上させているため、 $y = x$ からはやや外れるがビームによる強い相関が確認できる。FE65 チップはさまざまな機能も試す試作段階の読み出しチップであるが、ピクセルモジュールとして実際に信号を読み出すことに成功した初めてのデータである。

LGAD センサー

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

浜松ホトニクスで試験用 LGAD ピクセルを試作し、ガンマ線、中性子線、陽子線を照射し LGAD の機能がどう保たれるかの評価を行った。図 37 左は、増幅機能のない場所とある場所にレーザーを入射した場合にバイアス電圧を変えて得られる電荷量を測定した結果である。増幅機能のない場所では一定の電荷分布を示すのに対して増幅機能のある場所では 100 V を超えると増幅される。図 37 右は陽子線により $1 \times 10^{15}/\text{cm}^2$ 照射した後の結果である。増幅に必要な電圧は上がるが増幅機能が保持されていることが分かる。さらに元々増幅機能がない場所でも増幅が確認される。これは陽子線照射によりシリコンバルクがより濃い p 型に変わるためであり、あたかも p^+ 層を n^+ 電極直下に形成したのと同様な特性を示すからである。

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

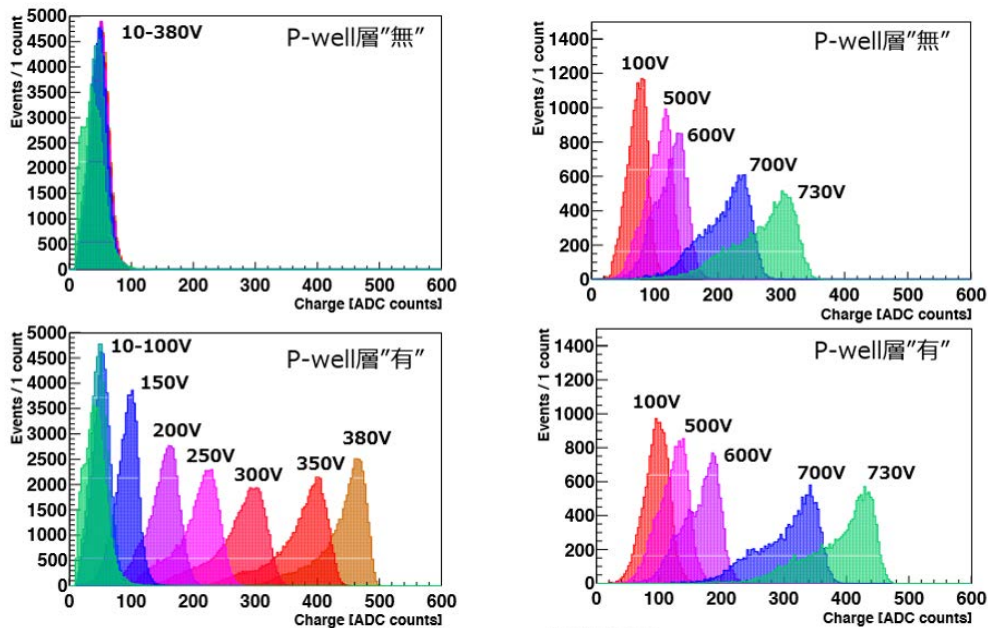


図 37 (左) 増幅機能のない場所 (上) とある場所 (下) に赤外レーザーを入れた場合の得られる電荷分布のバイアス電圧依存性。未照射サンプル。(右) 増幅機能のない場所 (上) とある場所 (下) に赤外レーザーを入れた場合の得られる電荷分布のバイアス電圧依存性。 $1 \times 10^{15} / \text{cm}^2$ 照射サンプル。

(2) COBAND 実験 (武内, 吉田, 金)

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。実験に使用される光検出器は、波長 $50 \mu\text{m}$ (エネルギー 25 meV) の光子を分解能 2% の精度で一光子ずつ測定可能な性能である。我々のグループでは、観測ロケット実験での使用予定であるニオブ (超伝導ギャップエネルギー $\Delta = 1.55 \text{ meV}$, $T_c = 9.23 \text{ K}$) と準粒子トラップ層としてアルミニウム ($\Delta = 0.172 \text{ meV}$, $T_c = 1.20 \text{ K}$) を用いた Nb/Al-STJ (超伝導トンネル接合素子 STJ, Superconducting Tunnel Junction) や、更に衛星実験での使用を念頭に置いた Δ の小さいハフニウム ($\Delta = 0.020 \text{ meV}$, $T_c = 0.165 \text{ K}$) を超伝導体として用いた Hf-STJ を光検出器の候補として研究開発を続けている。

Nb/Al-STJ 単体では、 25 meV の光子に対して十分なエネルギー分解能は期待できないが一光子検出が実現できれば、格子状に並べた Nb/Al-STJ ピクセルと回折格子の組み合わせによって分解能 2% 以下の一光子分光が可能となる。我々のグループでは産総研との共同研究による漏れ電流の少ない Nb/Al-STJ の開発、並びに STJ 信号極低雑音読み出し系として KEK, JAXA 等との共同研究による FD-SOI (Fully Depleted Silicon On Insulator) プロセスによる極低温増幅器の開発を行っている。産総研の超伝導デバイス作製施設である CRAVITY で作製された Nb/Al-STJ 試料は、遠赤外一光子検出に要求される低漏れ電流性能をほぼ達成した。極低温増幅器の開発については、FD-SOI プロセスに

よる MOSFET を用いた増幅器の試作および測定を行い、300~400 mK の極低温での動作を確認している。更に、昨年度においては、この試作増幅器を用い、極低温で動作させた STJ のパルス光応答信号の極低温ステージ上での増幅に成功した (図 38)。STJ のパルス光応答速度および STJ 測定系の静電容量を考慮すると、より低い入力インピーダンスへの改善が必要であることから、低入力インピーダンスの電荷積分型増幅器の試作を行い、現在、極低温における測定を行っている。

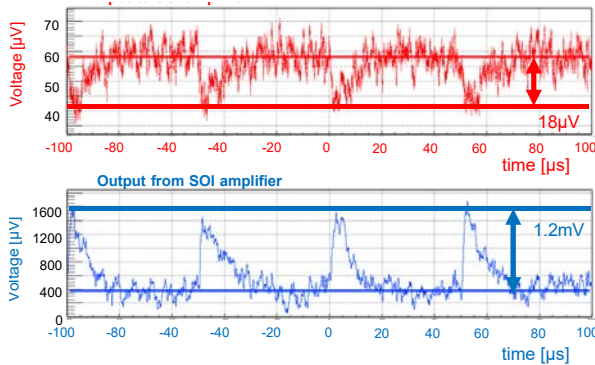


図 38 SOI 極低温アンプによる Nb/Al-STJ 信号の冷凍機内増幅。産総研 CRAVITY 製 20 μ m 角 Nb/Al-STJ の可視光パルス (波長 465 nm) に対する応答信号を同じく冷凍機内に配置された SOI 極低温増幅回路によって増幅信号を読み出すことに成功した。

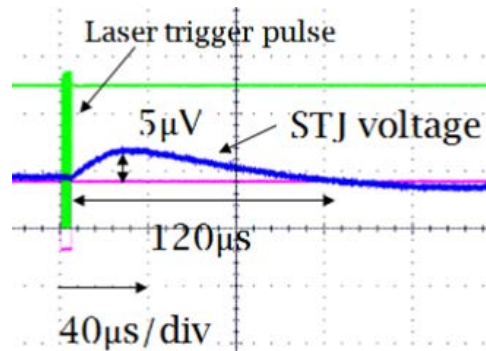


図 39 ハフニウムを用いた超伝導トンネル接合素子によるパルス応答の確認。ハフニウム酸化層の上に薄いアルミニウム層を用い、従来の Hf-STJ よりリーク電流密度を約 1/16 に低減に成功。このサンプルで可視光パルス (波長 465nm) 応答を確認。

Nb/Al-STJ の開発と並行して、KEK 測定器開発室のプログラムの一つとして、KEK、理研との共同研究によって Hf-STJ の開発を進めてきた。これまで、Hf 成膜、Hf 膜のパターン加工方法を確立し、2010 年度には、Hf-HfO_x-Hf による SIS 構造の作製に成功してジョセフソン電流を確認した。また、2012 年度には Hf-STJ 試作サンプルでの可視域連続光入射に対する応答 (トンネル電流増加) を確認した。実用化に向けた重要なステップとして、漏れ電流の改善、および可視パルス光入射に対するパルス応答の確認が挙げられる。昨年度、絶縁層 HfO_x の上に薄いアルミニウム層 (< 10 μ m) を追加することで漏れ電流密度を従来の 1/16 という大幅な改善に成功した。この Hf/Al-STJ サンプルを用い、可視域 (波長 465nm) レーザーパルス光照射試験により、Hf/Al-STJ からのパルス応答を得た (図 39)。

(3) 超弦理論の研究 (石橋, 伊敷, 佐藤勇二)

超弦理論グループは弦の場の理論, ゲージ・重力対応という 2 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等, 超弦理論に関連する様々な分野についての研究を行った。

弦の場の理論の次元正則化とループ振幅

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

石橋は村上 (釧路高専) らとのこれまでの研究で, 次元正則化を用いた計算により, tree 振幅については第一量子化の計算と一致する結果を得ることができていることを示している。今年度は超弦の場合にこの結果を拡張するため, 非臨界次元の超弦に現れる世界面上の理論の相関関数の計算を行った (論文

134)。点粒子の場の理論の場合と同様に、時空の次元を変化させると、カイラルフェルミオンを扱う際に様々な問題がある。弦の場の理論の次元正則化においては時空の次元を変化させる代わりに、世界面上の理論の central charge を変化させることによって正則化を実現できる。この方法により、散乱振幅を有限にできることを示した。(論文 135)。これらの結果を用いて、外線が NS sector に属し、even spin structure の世界面に対応する振幅の場合、次元正則化を用いた超弦の場の理論から計算される結果が第一量子化の結果を再現することを示した。(論文 136)。

ゲージ-重力双対性と可積分性に基づく強結合ゲージ理論の研究

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

佐藤は Z. Bajnok, J. Balog, G.Z. Toth (Wigner Research Centre), 伊藤 (東京工業大学) と共に、量子可積分系を解析する新たな手法を開発し、2 次元的な運動量を持つ粒子の 10 点強結合散乱振幅を与える可積分模型である $su(3)_2/u(1)^2$ 等質サインゴルドン模型の厳密な質量-結合関係式を導いた。これは、複数のスケールを持つ量子可積分模型に対する初めての結果であり、当該分野の 20 年来の問題を解決するものである。また、この質量-結合関係式により、強結合散乱振幅を解析的に評価する我々の定式化が (対応する 10 点振幅の場合に) 完結した (論文 137, 138)。

M 理論の行列模型による定式化についての研究

M 理論の行列模型を用いた定式化において、M 理論の基本的物体の一つである M5-brane の記述法はこれまで分かっていなかった。伊敷は、浅野 (DIAS), 島崎 (慶応大), 寺嶋 (京大基研) らとともに、局所化の方法を行列模型に適用し、この問題を議論した (論文 139)。その結果、M5-brane が行列模型の低エネルギー領域における固有値分布によって構成されていることが初めて示された。

Sine-square deformation と共形場の理論

一次元スピン系において、隣のスピンの相互作用を位置のサイン関数の 2 乗に比例するようにとった場合、その基底状態は相互作用が位置に寄らない場合と一致することが桂 (東大) らの研究によってわかっている。石橋は多田 (理研) とともに、この現象を共形対称性がある場合について調べ、この理論に現れる演算子・状態の性質を調べた (論文 140)。

弦理論における非幾何学的背景時空と宇宙項問題

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

佐藤は菅原, 和田, 上床 (立命館大学) と共に、弦の世界面の共形場理論に基づき、弦スケールでも有効な非幾何学的背景時空の解析を進めた。まず、T-fold タイプの非幾何学的背景時空中の弦に対して、ボソン場の運動量格子を用いてモジュラー不変な分配関数を系統的に構成する方法を提示した (論文 141)。これは、一般にモジュラー不変量を構成する際に用いられる、自由フェルミオンによる構成を拡張するものともなっている。また、同様の非対称オービフォールド模型により、超対称性を破るが対応する円筒振幅が消える D-ブレーンが容易に構成できることを示した (論文 142)。これらの結果に基づき、超対称性を破るが小さな宇宙項を持つ興味深い弦の真空を得ることが可能となる。

ゲージ/重力対応の数値的検証

伊敷は、超弦理論と対応すると期待される 1 次元のゲージ理論の数値計算を行い、ゲージ/重力対応の

数値的検証を行った。特に、理論の内部エネルギー等の熱力学量に注目し、数値計算で得られた結果を超弦理論から解析的に計算される結果と比較し、対応関係を検証した。論文 143, 144 において伊敷は、Berkowitz, Rinaldi, Vranas (LLNL), 花田 (京大基研), 島崎 (慶応大) らとともに、ゲージ群のランクが無大の極限における検証を行った。また、論文 145 において伊敷は、花田 (京大基研), 百武 (茨城大), 西村 (KEK, 総研大) らとともに、ゲージ群のランクが比較的小さい場合における検証を行った。どちらの場合においても、超弦理論から期待される内部エネルギーの振る舞いが、ゲージ理論側からも再現されることが示された。

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

弦の場の理論の運動方程式の厳密解は、Schnabl によるタキオン真空解の発見以来活発に研究されている。特に、最近 Erler と Maccaferri は、時間に依らない運動方程式の解の場合、任意の BCFT に対応する厳密解を書き下すことができることを示した。石橋は、岸本 (新潟大), 高橋 (奈良女子大) らとともに、Erler と Maccaferri の方法を用いて constant magnetic field に対応した弦の場の理論の厳密解を構成した (論文 146)。この解は、非可換幾何学等と関係があり、様々な応用が期待される。

コヒーレント状態を用いた行列幾何の研究

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

Poisson 構造を尊重した新しい重力理論の構成

アインシュタインの一般相対性理論は、時空の様子を記述する物理理論として成功を取っている。一般相対性理論には、理論の適用限界となるスケール (プランクスケール) が含まれている。そのスケールよりもミクロなスケールでは一般相対性理論はもはや通用せず、時空の様子は、今日までに我々が知るものとは違ったものになるだろうと考えられている。非可換空間は、そのような新たな時空描像の一つの可能性として研究されている。非可換空間とは、その名の示す通り、空間座標同士が非可換な演算子として捉えられるような対象のことである。このような対象の研究は、量子力学の出現以来、空間座標と共役運動量が非可換な演算子として捉えられたことを契機に、多くの研究者によって取り組まれてきた。そのような文脈における非可換座標の一つの見方として、Poisson 括弧の量子化として捉えるという視点がある。村木は、金児, 綿村 (東北大学) らとともに、Poisson 括弧を指導原理として構成された幾何学、及びそれに基づく重力理論を議論し、アインシュタインの一般相対性理論との比較を与えた (論文 150)。この成果により、非可換空間上の重力理論と、アインシュタインの一般相対性理論とをつなぐ理論的枠組みの一つの可能性を示すことができた。

〈論文〉

1. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “A measurement of material in the ATLAS tracker using secondary hadronic interactions in 7 TeV pp collisions,” JINST **11**, P11020 (2016).

2. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Luminosity determination in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV using the ATLAS detector at the LHC,” *Eur. Phys. J. C* **76**, 653 (2016).
3. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of W^+W^- production in association with one jet in proton–proton collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector,” *Phys. Lett. B* **763**, 114 (2016).
4. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for dark matter produced in association with a hadronically decaying vector boson in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *Phys. Lett. B* **763**, 251 (2016).
5. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Study of hard double-parton scattering in four-jet events in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS experiment,” *JHEP* **1611**, 110 (2016).
6. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for Minimal Supersymmetric Standard Model Higgs bosons H/A and for a Z' boson in the $\tau\tau$ final state produced in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS Detector,” *Eur. Phys. J. C* **76**, 585 (2016).
7. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Dark matter interpretations of ATLAS searches for the electroweak production of supersymmetric particles in $\sqrt{s} = 8$ TeV proton-proton collisions,” *JHEP* **1609**, 175 (2016).
8. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the $b\bar{b}$ dijet cross section in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **76**, 670 (2016).
9. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for new phenomena in different-flavour high-mass dilepton final states in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **76**, 541 (2016).
10. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of top quark pair differential cross-sections in the dilepton channel in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ and 8 TeV with ATLAS,” *Phys. Rev. D* **94**, 092003 (2016).
11. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the total cross section from elastic scattering in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector,” *Phys. Lett. B* **761**, 158 (2016).
12. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for squarks and gluinos in events with hadronically decaying tau leptons, jets and missing transverse momentum in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV recorded with the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **76**, 683 (2016).
13. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of exclusive $\gamma\gamma \rightarrow W^+W^-$ production and search for exclusive Higgs boson production in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV using the ATLAS detector,” *Phys. Rev. D* **94**, 032011 (2016).

14. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for high-mass new phenomena in the dilepton final state using proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *Phys. Lett. B* **761**, 372 (2016).
15. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for Higgs and Z Boson Decays to $\phi\gamma$ with the ATLAS Detector,” *Phys. Rev. Lett.* **117**, 111802 (2016).
16. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for supersymmetry in a final state containing two photons and missing transverse momentum in $\sqrt{s} = 13$ TeV pp collisions at the LHC using the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **76**, 517 (2016).
17. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of jet activity in top quark events using the $e\mu$ final state with two b -tagged jets in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector,” *JHEP* **1609**, 074 (2016).
18. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for bottom squark pair production in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **76**, 547 (2016).
19. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for the Higgs boson produced in association with a W boson and decaying to four b -quarks via two spin-zero particles in pp collisions at 13 TeV with the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **76**, 605 (2016).
20. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “The performance of the jet trigger for the ATLAS detector during 2011 data taking,” *Eur. Phys. J. C* **76**, 526 (2016).
21. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for heavy long-lived charged R -hadrons with the ATLAS detector in 3.2 fb^{-1} of proton-proton collision data at $\sqrt{s} = 13$ TeV,” *Phys. Lett. B* **760**, 647 (2016).
22. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Searches for heavy diboson resonances in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *JHEP* **1609**, 173 (2016).
23. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for pair production of Higgs bosons in the $b\bar{b}b\bar{b}$ final state using proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *Phys. Rev. D* **94**, 052002 (2016).
24. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the $W^{\pm}Z$ boson pair-production cross section in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS Detector,” *Phys. Lett. B* **762**, 1 (2016).
25. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for new resonances in events with one lepton and missing transverse momentum in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *Phys. Lett. B* **762**, 334 (2016).
26. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS

- Collaboration], “Search for top squarks in final states with one isolated lepton, jets, and missing transverse momentum in $\sqrt{s} = 13$ TeV pp collisions with the ATLAS detector,” *Phys. Rev. D* **94**, 052009 (2016).
27. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for resonances in diphoton events at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *JHEP* **1609**, 001 (2016).
 28. 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).
 29. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the Inelastic Proton-Proton Cross Section at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS Detector at the LHC,” *Phys. Rev. Lett.* **117**, 182002 (2016).
 30. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS and CMS Collaborations], “Measurements of the Higgs boson production and decay rates and constraints on its couplings from a combined ATLAS and CMS analysis of the LHC pp collision data at $\sqrt{s} = 7$ and 8 TeV,” *JHEP* **1608**, 045 (2016).
 31. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for TeV-scale gravity signatures in high-mass final states with leptons and jets with the ATLAS detector at $\sqrt{s} = 13$ TeV,” *Phys. Lett. B* **760**, 520 (2016).
 32. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for the Standard Model Higgs boson produced by vector-boson fusion and decaying to bottom quarks in $\sqrt{s} = 8$ TeV pp collisions with the ATLAS detector,” *JHEP* **1611**, 112 (2016).
 33. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the top quark mass in the $t\bar{t} \rightarrow$ dilepton channel from $\sqrt{s} = 8$ TeV ATLAS data,” *Phys. Lett. B* **761**, 350 (2016).
 34. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the photon identification efficiencies with the ATLAS detector using LHC Run-1 data,” *Eur. Phys. J. C* **76**, 666 (2016).
 35. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the double-differential high-mass Drell-Yan cross section in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector,” *JHEP* **1608**, 009 (2016).
 36. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Charged-particle distributions at low transverse momentum in $\sqrt{s} = 13$ TeV pp interactions measured with the ATLAS detector at the LHC,” *Eur. Phys. J. C* **76**, 502 (2016).
 37. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the angular coefficients in Z -boson events using electron and muon pairs from data taken at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector,” *JHEP* **1608**, 159 (2016).
 38. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for pair production of gluinos decaying via stop and sbottom in events with

- b -jets and large missing transverse momentum in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” Phys. Rev. D **94**, 032003 (2016).
39. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the relative width difference of the B^0 - \bar{B}^0 system with the ATLAS detector,” JHEP **1606**, 081 (2016).
 40. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Transverse momentum, rapidity, and centrality dependence of inclusive charged-particle production in $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV $p + \text{Pb}$ collisions measured by the ATLAS experiment,” Phys. Lett. B **763**, 313 (2016).
 41. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for scalar leptoquarks in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS experiment,” New J. Phys. **18**, 093016 (2016).
 42. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for gluinos in events with an isolated lepton, jets and missing transverse momentum at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” Eur. Phys. J. C **76**, 565 (2016).
 43. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for squarks and gluinos in final states with jets and missing transverse momentum at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” Eur. Phys. J. C **76**, 392 (2016).
 44. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the inclusive isolated prompt photon cross section in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector,” JHEP **1608**, 005 (2016).
 45. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for new phenomena in final states with an energetic jet and large missing transverse momentum in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV using the ATLAS detector,” Phys. Rev. D **94**, 032005 (2016).
 46. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurements of the charge asymmetry in top-quark pair production in the dilepton final state at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector,” Phys. Rev. D **94**, 032006 (2016).
 47. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurements of $Z\gamma$ and $Z\gamma\gamma$ production in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector,” Phys. Rev. D **93**, 112002 (2016).
 48. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for metastable heavy charged particles with large ionization energy loss in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV using the ATLAS experiment,” Phys. Rev. D **93**, 112015 (2016).
 49. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Study of the rare decays of B_s^0 and B^0 into muon pairs from data collected during the LHC Run 1 with the ATLAS detector,” Eur. Phys. J. C **76**, 513 (2016).
 50. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for the Standard Model Higgs boson decaying into $b\bar{b}$ produced in association with top quarks decaying hadronically in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector,”

- JHEP **1605**, 160 (2016).
51. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of fiducial differential cross sections of gluon-fusion production of Higgs bosons decaying to $WW^* \rightarrow e\nu\mu\nu$ with the ATLAS detector at $\sqrt{s} = 8$ TeV,” JHEP **1608**, 104 (2016).
 52. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for new phenomena in events with a photon and missing transverse momentum in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” JHEP **1606**, 059 (2016).
 53. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of W^\pm and Z -boson production cross sections in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” Phys. Lett. B **759**, 601 (2016).
 54. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for charged Higgs bosons produced in association with a top quark and decaying via $H^\pm \rightarrow \tau\nu$ using pp collision data recorded at $\sqrt{s} = 13$ TeV by the ATLAS detector,” Phys. Lett. B **759**, 555 (2016).
 55. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Beam-induced and cosmic-ray backgrounds observed in the ATLAS detector during the LHC 2012 proton-proton running period,” JINST **11**, P05013 (2016).
 56. M. Aaboud, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for resonances in the mass distribution of jet pairs with one or two jets identified as b -jets in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” Phys. Lett. B **759**, 229 (2016).
 57. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Muon reconstruction performance of the ATLAS detector in proton-proton collision data at $\sqrt{s} = 13$ TeV,” Eur. Phys. J. C **76**, 292 (2016).
 58. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Identification of high transverse momentum top quarks in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector,” JHEP **1606**, 093 (2016).
 59. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Charged-particle distributions in pp interactions at $\sqrt{s} = 8$ TeV measured with the ATLAS detector,” Eur. Phys. J. C **76**, 403 (2016).
 60. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurements of $W^\pm Z$ production cross sections in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector and limits on anomalous gauge boson self-couplings,” Phys. Rev. D **93**, 092004 (2016).
 61. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of total and differential W^+W^- production cross sections in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector and limits on anomalous triple-gauge-boson couplings,” JHEP **1609**, 029 (2016).
 62. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collab-

- oration], “Search for supersymmetry at $\sqrt{s} = 13$ TeV in final states with jets and two same-sign leptons or three leptons with the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **76**, 259 (2016).
63. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of event-shape observables in $Z \rightarrow \ell^+\ell^-$ events in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector at the LHC,” *Eur. Phys. J. C* **76**, 375 (2016).
64. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for new phenomena in final states with large jet multiplicities and missing transverse momentum with ATLAS using $\sqrt{s} = 13$ TeV proton-proton collisions,” *Phys. Lett. B* **757**, 334 (2016).
65. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for single production of a vector-like quark via a heavy gluon in the $4b$ final state with the ATLAS detector in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV,” *Phys. Lett. B* **758**, 249 (2016).
66. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for single production of vector-like quarks decaying into Wb in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **76**, 442 (2016).
67. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Test of CP Invariance in vector-boson fusion production of the Higgs boson using the Optimal Observable method in the ditau decay channel with the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **76**, 658 (2016).
68. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Charged-particle distributions in $\sqrt{s} = 13$ TeV pp interactions measured with the ATLAS detector at the LHC,” *Phys. Lett. B* **758**, 67 (2016).
69. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the charged-particle multiplicity inside jets from $\sqrt{s} = 8$ TeV pp collisions with the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **76**, 322 (2016).
70. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “A search for top squarks with R-parity-violating decays to all-hadronic final states with the ATLAS detector in $\sqrt{s} = 8$ TeV proton-proton collisions,” *JHEP* **1606**, 067 (2016).
71. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “A search for an excited muon decaying to a muon and two jets in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector,” *New J. Phys.* **18**, 073021 (2016).
72. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Probing lepton flavour violation via neutrinoless $\tau \rightarrow 3\mu$ decays with the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **76**, 232 (2016).
73. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the CP-violating phase ϕ_s and the B_s^0 meson decay width difference with $B_s^0 \rightarrow J/\psi\phi$ decays in ATLAS,” *JHEP* **1608**, 147 (2016).
74. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the charge asymmetry in highly boosted top-quark pair production in $\sqrt{s} = 8$ TeV pp collision data collected by the ATLAS experiment,” *Phys. Lett. B* **756**, 52 (2016).

75. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Reconstruction of hadronic decay products of tau leptons with the ATLAS experiment,” *Eur. Phys. J. C* **76**, 295 (2016).
76. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for new phenomena with photon+jet events in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *JHEP* **1603**, 041 (2016).
77. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the ZZ Production Cross Section in pp Collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS Detector,” *Phys. Rev. Lett.* **116**, 101801 (2016).
78. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Combination of searches for WW , WZ , and ZZ resonances in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector,” *Phys. Lett. B* **755**, 285 (2016).
79. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for charged Higgs bosons in the $H^\pm \rightarrow tb$ decay channel in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV using the ATLAS detector,” *JHEP* **1603**, 127 (2016).
80. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the differential cross-sections of prompt and non-prompt production of J/ψ and $\psi(2S)$ in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ and 8 TeV with the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **76**, 283 (2016).
81. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of $D^{*\pm}$, D^\pm and D_s^\pm meson production cross sections in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector,” *Nucl. Phys. B* **907**, 717 (2016).
82. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for strong gravity in multijet final states produced in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV using the ATLAS detector at the LHC,” *JHEP* **1603**, 026 (2016).
83. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the transverse momentum and ϕ_η^* distributions of Drell-Yan lepton pairs in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **76**, 291 (2016).
84. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for new phenomena in dijet mass and angular distributions from pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector,” *Phys. Lett. B* **754**, 302 (2016).
85. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Performance of b -Jet Identification in the ATLAS Experiment,” *JINST* **11**, P04008 (2016).
86. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the dependence of transverse energy production at large pseudorapidity on the hard-scattering kinematics of proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 2.76$ TeV with ATLAS,” *Phys. Lett. B* **756**, 10 (2016).
87. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],

- ration], “Search for the Standard Model Higgs boson produced in association with a vector boson and decaying into a tau pair in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector,” *Phys. Rev. D* **93**, 092005 (2016).
88. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Evidence for single top-quark production in the s -channel in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector using the Matrix Element Method,” *Phys. Lett. B* **756**, 228 (2016).
 89. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “A search for prompt lepton-jets in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector,” *JHEP* **1602**, 062 (2016).
 90. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurements of top-quark pair differential cross-sections in the lepton+jets channel in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV using the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **76**, 538 (2016).
 91. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Dijet production in $\sqrt{s} = 7$ TeV pp collisions with large rapidity gaps at the ATLAS experiment,” *Phys. Lett. B* **754**, 214 (2016).
 92. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the correlations between the polar angles of leptons from top quark decays in the helicity basis at $\sqrt{s} = 7$ TeV using the ATLAS detector,” *Phys. Rev. D* **93**, 012002 (2016).
 93. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for dark matter produced in association with a Higgs boson decaying to two bottom quarks in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector,” *Phys. Rev. D* **93**, 072007 (2016).
 94. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Identification of boosted, hadronically decaying W bosons and comparisons with ATLAS data taken at $\sqrt{s} = 8$ TeV,” *Eur. Phys. J. C* **76**, 154 (2016).
 95. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Performance of pile-up mitigation techniques for jets in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV using the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C* **76**, 581 (2016).
 96. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the differential cross-section of highly boosted top quarks as a function of their transverse momentum in $\sqrt{s} = 8$ TeV proton-proton collisions using the ATLAS detector,” *Phys. Rev. D* **93**, 032009 (2016).
 97. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for anomalous couplings in the Wtb vertex from the measurement of double differential angular decay rates of single top quarks produced in the t -channel with the ATLAS detector,” *JHEP* **1604**, 023 (2016).
 98. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the production cross-section of a single top quark in association with a

- W boson at 8 TeV with the ATLAS experiment,” JHEP **1601**, 064 (2016).
99. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for the production of single vector-like and excited quarks in the Wt final state in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector,” JHEP **1602**, 110 (2016).
 100. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for magnetic monopoles and stable particles with high electric charges in 8 TeV pp collisions with the ATLAS detector,” Phys. Rev. D **93**, 052009 (2016).
 101. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurements of four-lepton production in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector,” Phys. Lett. B **753**, 552 (2016).
 102. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for the electroweak production of supersymmetric particles in $\sqrt{s}=8$ TeV pp collisions with the ATLAS detector,” Phys. Rev. D **93**, 052002 (2016).
 103. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of jet charge in dijet events from $\sqrt{s} = 8$ TeV pp collisions with the ATLAS detector,” Phys. Rev. D **93**, 052003 (2016).
 104. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for new phenomena in events with at least three photons collected in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector,” Eur. Phys. J. C **76**, 210 (2016).
 105. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for direct top squark pair production in final states with two tau leptons in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector,” Eur. Phys. J. C **76**, 81 (2016).
 106. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “A new method to distinguish hadronically decaying boosted Z bosons from W bosons using the ATLAS detector,” Eur. Phys. J. C **76**, 238 (2016).
 107. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Observation of Long-Range Elliptic Azimuthal Anisotropies in $\sqrt{s} = 13$ and 2.76 TeV pp Collisions with the ATLAS Detector,” Phys. Rev. Lett. **116**, 172301 (2016).
 108. 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).
 109. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for a high-mass Higgs boson decaying to a W boson pair in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector,” JHEP **1601**, 032 (2016).
 110. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for single top-quark production via flavour-changing neutral currents at 8 TeV with the ATLAS detector,” Eur. Phys. J. C **76**, 55 (2016).
 111. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for invisible decays of a Higgs boson using vector-boson fusion in pp collisions at

- $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector,” JHEP **1601**, 172 (2016).
112. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurements of fiducial cross-sections for $t\bar{t}$ production with one or two additional b -jets in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV using the ATLAS detector,” Eur. Phys. J. C **76**, 11 (2016).
 113. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for flavour-changing neutral current top-quark decays to qZ in pp collision data collected with the ATLAS detector at $\sqrt{s} = 8$ TeV,” Eur. Phys. J. C **76**, 12 (2016).
 114. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Searches for scalar leptoquarks in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector,” Eur. Phys. J. C **76**, 5 (2016).
 115. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Constraints on non-Standard Model Higgs boson interactions in an effective Lagrangian using differential cross sections measured in the $H \rightarrow \gamma\gamma$ decay channel at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector,” Phys. Lett. B **753**, 69 (2016).
 116. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the centrality dependence of the charged-particle pseudorapidity distribution in proton-lead collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV with the ATLAS detector,” Eur. Phys. J. C **76**, 199 (2016).
 117. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Study of the $B_c^+ \rightarrow J/\psi D_s^+$ and $B_c^+ \rightarrow J/\psi D_s^{*+}$ decays with the ATLAS detector,” Eur. Phys. J. C **76**, 4 (2016).
 118. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for an additional, heavy Higgs boson in the $H \rightarrow ZZ$ decay channel at $\sqrt{s} = 8$ TeV in pp collision data with the ATLAS detector,” Eur. Phys. J. C **76**, 45 (2016).
 119. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurements of the Higgs boson production and decay rates and coupling strengths using pp collision data at $\sqrt{s} = 7$ and 8 TeV in the ATLAS experiment,” Eur. Phys. J. C **76**, 6 (2016).
 120. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Centrality, rapidity and transverse momentum dependence of isolated prompt photon production in lead-lead collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV measured with the ATLAS detector,” Phys. Rev. C **93**, 034914 (2016).
 121. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “ATLAS Run 1 searches for direct pair production of third-generation squarks at the Large Hadron Collider,” Eur. Phys. J. C **75**, 510 (2015), Erratum: [Eur. Phys. J. C **76**, 153 (2016)].
 122. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Study of the spin and parity of the Higgs boson in diboson decays with the ATLAS detector,” Eur. Phys. J. C **75**, 476 (2015), Erratum: [Eur. Phys. J. C **76**, 152 (2016)].
 123. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Search for massive supersymmetric particles decaying to many jets using the ATLAS

- detector in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV,” Phys. Rev. D **91**, 112016 (2015), Erratum: [Phys. Rev. D **93**, 039901 (2016)].
124. G. Aad, K. Hara, Y. Ikegami, S. H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration], “Measurement of the $t\bar{t}$ production cross-section using $e\mu$ events with b -tagged jets in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ and 8 TeV with the ATLAS detector,” Eur. Phys. J. C **74**, 3109 (2014), Addendum: [Eur. Phys. J. C **76**, 642 (2016)].
 125. S. Ohmura, K. Hara *et al.*, “Reduction of cross-talks between circuit and sensor layer in the Kyoto’s X-ray astronomy SOI pixel sensors with Double-SOI wafer”, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A831, 61-64 (2016).
 126. Y. Unno, Y. Ikegami, K. Hara, K. Sato *et al.*, “Development of n+-in-p planar pixel sensors for extremely high radiation environments, designed to retain high efficiency after irradiation”, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A831, 122-132 (2016).
 127. K. Kimura, K. Hara, Y. Ikegami, K. Sato *et al.*, “Test beam evaluation of newly developed n-in-p planar pixel sensors for use in a high radiation environment”, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A831, 140-146 (2016).
 128. L. B. A. Hommels, Y. Ikegami, K. Hara, K. Sato *et al.*, “Detailed studies of full-size ATLAS12 sensors”, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A831, 167-173 (2016).
 129. K. Hara, Y. Ikegami, K. Sato *et al.*, “Charge collection and field profile studies of heavily irradiated strip sensors for the ATLAS inner tracker upgrade”, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A831, 181-188 (2016).
 130. M. Mikesikova, Y. Ikegami, K. Hara, K. Sato *et al.*, “Study of surface properties of ATLAS12 strip sensors and their radiation resistance”, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A831, 197-206 (2016).
 131. R. Mori, Y. Ikegami, K. Hara *et al.*, “Evaluation of the performance of irradiated silicon strip sensors for the forward detector of the ATLAS Inner Tracker Upgrade”, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A831, 207-212 (2016).
 132. M. Ullan, Y. Ikegami, K. Hara *et al.*, “Embedded pitch adapters: A high-yield interconnection solution for strip sensors”, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A831, 221-228 (2016).
 133. K. Todome, Y. Ikegami, K. Hara, K. Sato *et al.*, “Noise evaluation of silicon strip super-module with ABCN250 readout chips for the ATLAS detector upgrade at the High Luminosity LHC”, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A831, 229-234 (2016).
 134. N. Ishibashi and K. Murakami, “Worldsheet theory of light-cone gauge noncritical strings on higher genus Riemann surfaces”, JHEP 1606087 (2016).
 135. N. Ishibashi, “Light-cone gauge superstring field theory in a linear dilaton background”, PTEP 2017 033B01 (2017).
 136. N. Ishibashi and K. Murakami, “Multiloop amplitudes of light-cone gauge NSR string field theory in noncritical dimensions”, JHEP 1701 034 (2017).
 137. Zoltán Bajnok, János Balog, Katsushi Ito, Yuji Satoh and Gábor Zolt Tóth, “Exact mass-coupling

- relation for the homogeneous sine-Gordon model”, *Phys. Rev. Lett.* 116 (2016) 181601.
138. Zoltán Bajnok, János Balog, Katsushi Ito, Yuji Satoh and Gábor Zsolt Tóth, “On the mass-coupling relation of multi-scale quantum integrable models”, *JHEP* 1606 (2016) 071.
139. Y. Asano, G. Ishiki, S. Shimasaki and S. Terashima, “On the transverse M5-branes in matrix theory”, arXiv:1701.07140 [hep-th]
140. N. Ishibashi and T. Tada, “Dipolar quantization and the infinite circumference limit of two-dimensional conformal field theories”, *International Journal of Modern Physics A*31, 160170 (2016).
141. Yuji Satoh and Yuji Sugawara, “Lie algebra lattices and strings on T-folds”, *JHEP* 1702 (2017) 024.
142. Yuji Satoh, Yuji Sugawara and Takahiro Uetoko, “Non-supersymmetric D-branes with vanishing cylinder amplitudes in asymmetric orbifolds”, preprint UTHEP-702, arXiv: 1704.05262 [hep-th].
143. E. Berkowitz, E. Rinaldi, M. Hanada, G. Ishiki, S. Shimasaki and P. Vranas, “Precision lattice test of the gauge/gravity duality at large- N ”, *Phys. Rev. D* 94, no.9, 094501 (2016)
144. E. Berkowitz, E. Rinaldi, M. Hanada, G. Ishiki, S. Shimasaki and P. Vranas, “Supergravity from D0-brane Quantum Mechanics”, arXiv:1606.04948 [hep-th], LLNL-JRNL-694846, UTHEP-690, YITP-16-74
145. M. Hanada, Y. Hyakutake, G. Ishiki and J. Nishimura, “Numerical tests of the gauge/gravity duality conjecture for D0-branes at finite temperature and finite N ”, *Phys. Rev. D* 94, no.8, 086010 (2016)
146. N. Ishibashi, I. Kishimoto and T. Takahashi, “String field theory solution corresponding to constant background magnetic field”, *PTEP* 2017 013B06 (2017).
147. G. Ishiki, T. Matsumoto and H. Muraki, “Kähler structure in the commutative limit of matrix geometry”, *JHEP* 1608, 042 (2016)
148. G. Ishiki, “Matrix Geometry and Coherent States”, *PoS CORFU 2015*, 113 (2016).
149. G. Ishiki, “Matrix Geometry and Coherent States”, *PoS LATTICE 2015*, 295 (2016).
150. Y. Kaneko, H. Muraki, S. Watamura, “Contravariant gravity on Poisson manifolds and Einstein gravity”, *Class.Quant.Grav.* in press.

〈研究成果発表〉

[国際会議]

1. Y. Takeuchi, “The COBAND project to search for the cosmic background neutrino decay”, Seminar at Fermilab, Aug. 11, 2016, Fermilab, Illinois, USA.
2. K. Hara, “Long-term stability of ATLAS12 main sensors”, ATLAS ITk Workshop, Sept 12 – 16, 2016, Valencia, Spain. (一般講演)
3. S. B. Kim, “Neutrino Physics”, Tsukuba Global Science Week 2016 (TGSW2016), Sep. 17 – 19, 2016, EPOCHAL Tsukuba, Tsukuba-shi, Japan. (招待講演)

4. H. Okawa, “Searches for Diboson Resonances at the ATLAS Experiment”,
Tsukuba Global Science Week 2016 (TGSW2016), Sep. 17 – 19, 2016, EPOCHAL Tsukuba,
Tsukuba-shi, Japan. (招待講演)
5. Y. Takeuchi *et al.*, “Development of Far-infrared Spectrophotometers based on Superconducting
Tunnel Junction for the Cosmic Background Neutrino Decay (COBAND) Experiment”,
Tsukuba Global Science Week 2016 (TGSW2016), Sep. 17 – 19, 2016, EPOCHAL Tsukuba,
Tsukuba-shi, Japan. (招待講演)
6. K. Takemasa *et al.*, “Development of Superconducting Tunnel Junction Detector and Cold Am-
plifier for COBAND experiment”,
International Workshop on Superconducting Sensors & Detectors (IWSSD2016), Nov. 14 – 16,
2016, AIST Tsukuba Campus, Tsukuba-shi, Japan
7. H. Okawa, “Measurements and BSM Searches in the Higgs Sector at the LHC”,
3rd International Workshop on Higgs as a Probe of New Physics (HPNP2017), March 1 – 5, 2017,
University of Toyama, Toyama, Japan. (招待講演)
8. H. Okawa, “Quark-Gluon Tagging at the LHC-ATLAS Experiment”,
Theoretical and Experimental Issues on Jet Structure at Hadron Colliders, January 12 – 13, 2017,
Kavli-IPMU, University of Tokyo, Kashiwa, Japan. (招待講演)
9. Nobuyuki Ishibashi, 「Light-cone gauge superstring field theory in linear dilaton background」(招
待講演)
VIII Workshop on String Field Theory and Related Aspects, (ICPT-SAIFR, Sao Paulo, Brazil,
May 31-June 3, 2016).
10. Nobuyuki Ishibashi, 「Light-cone gauge superstring field theory and dimensional regularization」
(招待講演)
Recent Developments on Light Front, (Arnold Sommerfeld Center for Theoretical Physics, Munich,
Germany, March 14-16, 2017).
11. Yuji Satoh 「Conformal field theories for non-geometric backgrounds in string theory」(招待講演),
New trends in low dimensional physics: Quantum integrability and applications (Institute of
Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, China, September 1 – 15, 2016).
12. Goro Ishiki, 「Spherical transverse M5-branes from the plane wave matrix model」Workshop on
String and M-theory in Okinawa(招待講演)(Okinawa Institute of Science and Technology Graduate
University (OIST), 6-9 Mar, 2017)
13. Goro Ishiki, 「Spherical transverse M5-branes from the plane wave matrix model」6th Bangkok
workshop on high-energy theory (招待講演)(Chulalongkorn University, Bangkok, Thailand, 9-13
Jan, 2017)
14. Goro Ishiki, 「Matrix Geometry and Kähler Structure」NORDITA conference in Stockholm 「Aspects
of Membrane Dynamics」(招待講演)(NORDITA, Stockholm, Sweden, 13-17 Jun, 2016)

[国内学会・研究会]

1. 八木俊輔：LDD 濃度改良後の SOI-FET 極低温環境下で異常特性の改善,

- 新学術研究領域研究「3次元半導体検出器で切り拓く新たな量子イメージングの展開」第6回研究会 (2016年6月28-29日), 北海道大学. (一般講演)
2. 伊藤史哲: LHC-ATLAS 実験 Run-2 における $WH \rightarrow l\nu b\bar{b}$ 崩壊過程を用いたヒッグス粒子の探索 – 多変量解析による信号感度の向上 –,
日本物理学会 2016 年秋季大会 (2016 年 9 月 21-24 日), 宮崎大学木花キャンパス. (一般講演)
 3. 本多俊介: LHC-ATLAS 実験 Run2 におけるヒッグス粒子 $b\bar{b}$ 崩壊モードでの $t\bar{t}H$ 生成過程探索のための信号領域最適化の研究,
日本物理学会 2016 年秋季大会 (2016 年 9 月 21-24 日), 宮崎大学木花キャンパス. (一般講演)
 4. 佐藤和之: HL-LHC 実験 ATLAS 検出器のアップグレードに向けたピクセル検出器の放射線損傷の評価,
日本物理学会 2016 年秋季大会 (2016 年 9 月 21-24 日), 宮崎大学木花キャンパス. (一般講演)
 5. 鈴木淳貴: HL-LHC 実験 ATLAS 検出器のアップグレードに向けたピクセル検出器の磁場中での性能評価,
日本物理学会 2016 年秋季大会 (2016 年 9 月 21-24 日), 宮崎大学木花キャンパス. (一般講演)
 6. 八木俊輔: ニュートリノ崩壊光探索のための SOI-STJ の研究開発 V,
日本物理学会 2016 年秋季大会 (2016 年 9 月 21-24 日), 宮崎大学木花キャンパス. (一般講演)
 7. 武政健一: COBAND 実験のための Hf-STJ 研究開発 I,
日本物理学会 2016 年秋季大会 (2016 年 9 月 21-24 日), 宮崎大学木花キャンパス. (一般講演)
 8. 武内勇司: 宇宙背景ニュートリノ崩壊探索実験 COBAND に向けた SOI-STJ 開発,
超伝導エレクトロニクス研究会 (2016 年 10 月 26-27 日), 東北大学電気通信研究所. (招待講演)
 9. 金信弘: 超伝導トンネル接合素子 STJ を用いた光・量子計測,
第 2 回 TIA 光・量子計測シンポジウム (2016 年 11 月 10 日), つくば国際会議場. (一般講演)
 10. 武政健一: 可視～遠赤外域単一光子検出のための超伝導トンネル接合素子検出器 (STJ) の開発,
第 2 回 TIA 光・量子計測シンポジウム (2016 年 11 月 10 日), つくば国際会議場. (ポスター発表)
 11. 若狭玲那: ニュートリノ崩壊光探索に向けた極低温増幅器の開発と現状,
新学術領域研究「ニュートリノフロンティアの融合と進化」研究会 2016 (2016 年 11 月 28-30 日), 石川県加賀市ゆのくに天祥. (ポスター発表)
 12. 武内勇司: Development of Far-infrared Spectrophotometers based on Superconducting Tunnel Junction (STJ) for COBAND Experiment,
新学術領域研究「ニュートリノフロンティアの融合と進化」研究会 2016 (2016 年 11 月 28-30 日), 石川県加賀市ゆのくに天祥. (一般講演)
 13. 武内勇司: 超電導検出器によるニュートリノ質量+暗黒物質,
新学術領域研究「ニュートリノフロンティアの融合と進化」研究会 2016 (2016 年 11 月 28-30 日), 石川県加賀市ゆのくに天祥. (パネルディスカッション)
 14. 武政健一: R&D status of Hf-STJ,
新学術領域研究「ニュートリノフロンティアの融合と進化」研究会 2016 (2016 年 11 月 28-30 日), 石川県加賀市ゆのくに天祥. (一般講演)
 15. 八木俊輔: R&D Status of Nb/Al-STJ with SOI cryogenic preamplifier,
新学術領域研究「ニュートリノフロンティアの融合と進化」研究会 2016 (2016 年 11 月 28-30 日), 石川県加賀市ゆのくに天祥. (一般講演)

16. 武内勇司：冷却エレクトロニクスー S T J 読み出し用 SOI 極低温アンプー,
TIA かけはし事業「簡単・便利な超伝導計測」ミニ研究会 (2017 年 1 月 4 日), つくば市物質・材料研
究機構 (NIMS). (一般講演)
17. 受川史彦：素粒子構造部門 成果報告,
第 3 回 CiRfSE ワークショップ (2017 年 1 月 23-24 日), 筑波大学. (招待講演)
18. 武内勇司：COBAND 実験概要,
第 3 回 CiRfSE ワークショップ (2017 年 1 月 23-24 日), 筑波大学. (招待講演)
19. 八木俊輔：COBAND 実験における SOI-STJ 開発 1,
第 3 回 CiRfSE ワークショップ (2017 年 1 月 23-24 日), 筑波大学. (招待講演)
20. 若狭玲那：COBAND 実験における SOI-STJ 開発 2,
第 3 回 CiRfSE ワークショップ (2017 年 1 月 23-24 日), 筑波大学. (招待講演)
21. 武政健一：Hf-STJ 開発,
第 3 回 CiRfSE ワークショップ (2017 年 1 月 23-24 日), 筑波大学. (招待講演)
22. 佐藤構二：ATLAS 実験の概要,
第 3 回 CiRfSE ワークショップ (2017 年 1 月 23-24 日), 筑波大学. (招待講演)
23. 大川英希：ATLAS 実験におけるヒッグス・電弱セクターでの新物理探索,
第 3 回 CiRfSE ワークショップ (2017 年 1 月 23-24 日), 筑波大学. (招待講演)
24. 永田和樹：ATLAS 実験における重心系衝突エネルギー 8 TeV での陽子-陽子衝突のデータを用いた
トップクォークとボトムクォークに崩壊する荷電ヒッグス粒子の探索,
第 3 回 CiRfSE ワークショップ (2017 年 1 月 23-24 日), 筑波大学. (招待講演)
25. 伊藤史哲：LHC ATLAS 実験における b クォークの湯川結合の測定,
第 3 回 CiRfSE ワークショップ (2017 年 1 月 23-24 日), 筑波大学. (招待講演)
26. 笠原宏太：CNew physics searches in Z + MET events,
第 3 回 CiRfSE ワークショップ (2017 年 1 月 23-24 日), 筑波大学. (招待講演)
27. 萩原睦人：Charged Higgs in Run 2,
第 3 回 CiRfSE ワークショップ (2017 年 1 月 23-24 日), 筑波大学. (招待講演)
28. 池上陽一：HL-LHC 内部飛跡検出器増強 全体像,
第 3 回 CiRfSE ワークショップ (2017 年 1 月 23-24 日), 筑波大学. (招待講演)
29. 佐藤和之：HL-LHC へ向けたピクセル検出器のビームテスト解析,
第 3 回 CiRfSE ワークショップ (2017 年 1 月 23-24 日), 筑波大学. (招待講演)
30. 岩瀬周平：HL-LHC ATLAS 実験用シリコンストリップセンサーの放射線耐性評価,
第 3 回 CiRfSE ワークショップ (2017 年 1 月 23-24 日), 筑波大学. (招待講演)
31. 和田冴：Measurements of LGAD,
第 3 回 CiRfSE ワークショップ (2017 年 1 月 23-24 日), 筑波大学. (招待講演)
32. 大川英希：HL-LHC に向けた HV-CMOS センサーの開発,
第 3 回 CiRfSE ワークショップ (2017 年 1 月 23-24 日), 筑波大学. (招待講演)
33. 萩原睦人：LHC-ATLAS 実験 Run-2 における tb へ崩壊する荷電ヒッグス粒子の探索,
日本物理学会第 72 回年次大会 (2017 年 3 月 17-20 日), 大阪大学豊中キャンパス. (一般講演)
34. 大川英希：LHC-ATLAS 実験 Run-2 における Z+Missing ET 終状態を用いたヒッグスセクターでの
新物理探索,

- 日本物理学会第 72 回年次大会 (2017 年 3 月 17-20 日), 大阪大学豊中キャンパス. (一般講演)
35. 本多俊介: LHC-ATLAS 実験 Run2 における $H \rightarrow b\bar{b}$ 崩壊過程でのヒッグス粒子 $t\bar{t}H$ 生成過程探索のための発見感度向上の研究,
日本物理学会第 72 回年次大会 (2017 年 3 月 17-20 日), 大阪大学豊中キャンパス. (一般講演)
36. 鈴木淳貴: HL-LHC 実験 ATLAS 検出器のアップグレードに向けた新型 ASIC 搭載 $50 \mu\text{m}$ 角ピクセル検出器のビーム試験,
日本物理学会第 72 回年次大会 (2017 年 3 月 17-20 日), 大阪大学豊中キャンパス. (一般講演)
37. 佐藤和之: HL-LHC 実験 ATLAS 検出器のアップグレードに向けた $50 \mu\text{m}$ 角ピクセル検出器の開発,
日本物理学会第 72 回年次大会 (2017 年 3 月 17-20 日), 大阪大学豊中キャンパス. (一般講演)
38. 和田牙: 内部増幅機能付き検出器 (LGAD) の放射線耐性の評価,
日本物理学会第 72 回年次大会 (2017 年 3 月 17-20 日), 大阪大学豊中キャンパス. (一般講演)
39. 八木俊輔: COBAND 実験のための SOI-STJ の研究開発 I,
日本物理学会第 72 回年次大会 (2017 年 3 月 17-20 日), 大阪大学豊中キャンパス. (一般講演)
40. 若狭玲那: COBAND 実験のための SOI-STJ の研究開発 II,
日本物理学会第 72 回年次大会 (2017 年 3 月 17-20 日), 大阪大学豊中キャンパス. (一般講演)
41. 石橋延幸, 「Light-cone gauge superstring field theory in linear dilaton background」,
日本物理学会 2016 年秋季大会 (2016 年 9 月 21-24 日), 宮崎大学木花キャンパス. (一般講演)
42. 佐藤勇二, 菅原祐二, 上床隆弘, 「Non-SUSY D-branes with vanishing cylinder amplitudes in asymmetric orbifolds」,
日本物理学会 2016 年秋季大会 (2016 年 9 月 21-24 日), 宮崎大学木花キャンパス. (一般講演)
43. 伊敷吾郎, 松本高興, 村木久祥 「非可換球空間上の Dirac 演算子について」,
日本物理学会 2016 年秋季大会 (2016 年 9 月 21-24 日), 宮崎大学木花キャンパス. (一般講演)
44. 伊敷吾郎, 松本高興, 村木久祥 「摂動を加えた非可換球面における Kähler 構造の解析」,
日本物理学会 2016 年秋季大会 (2016 年 9 月 21-24 日), 宮崎大学木花キャンパス. (一般講演)
45. 佐藤勇二, 菅原祐二, 「Lie algebra lattices and strings on T-folds」,
日本物理学会第 72 回年次大会 (2017 年 3 月 17-20 日), 大阪大学豊中キャンパス. (一般講演)
46. 佐藤勇二, 菅原祐二, 上床隆弘, 「Non-SUSY D-branes with vanishing cylinder amplitudes in asymmetric orbifolds II」,
日本物理学会第 72 回年次大会 (2017 年 3 月 17-20 日), 大阪大学豊中キャンパス. (一般講演)
47. 伊敷吾郎, 松本高興, 村木久祥 「行列幾何における情報計量について」,
日本物理学会第 72 回年次大会 (2017 年 3 月 17-20 日), 大阪大学豊中キャンパス. (一般講演)

〈その他特記事項〉

1. 石橋延幸: 日本学術振興会学術システム研究センター専門委員
2. 石橋延幸: PTEP 編集委員
3. 佐藤勇二: 欧州の学際研究教育ネットワーク「Gauge Theory as an Integrable System (GATIS)」(<http://gatis.desy.eu/>) のグローバルネットワークへの参加
4. 佐藤勇二: Hungarian Academy of Sciences (HAS) との二国間交流事業 (共同研究)
「ゲージ-重力双対性と可積分性に基づく強結合ゲージ理論ダイナミクスの展開」(代表)

4.3 クォーク・核物質部門

部門長

江角 晋一 (数理物質系物理学域 准教授)

構成教員

中條 達也 (数理物質系物理学域 講師)

小澤 顕 (数理物質系物理学域 教授)

Oliver Busch (数理物質系物理学域 国際テニュアトラック助教) ドイツ国ハイデルベルグ大学在駐

坂井 真吾 (数理物質系物理学域 助教)

金谷 和至 (数理物質系物理学域 教授 数理物質融合科学センター長)

山口 貴之 (数理物質系物理学域 准教授, 埼玉大学 准教授)

小沢 恭一郎 (数理物質系物理学域 准教授, 高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所 准教授)

連携教員

蔵増 嘉伸 (数理物質系物理学域 教授)

谷口 祐介 (数理物質系物理学域 准教授)

鈴木 伸司 (数理物質系物理学域 助教)

杉立 徹 (広島大学・理学研究科 教授)

浜垣 秀樹 (長崎総合科学大学 新技術創成研究所 教授)

秋葉 康之 (理化学研究所・仁科加速器研究センター・延與放射線研究室 副主任研究員)

佐甲 博之 (日本原子力研究開発機構・先端基礎研究センター・ハドロン原子核物理研究グループ 研究主幹)

永宮 正治 (高エネルギー加速器研究機構 名誉教授、理化学研究所 研究顧問)

郡司 卓 (東京大学・理学系研究科・附属原子核科学研究センター 助教)

志垣 賢太 (広島大学・理学研究科 准教授)

スイス・フランスの欧州共同原子核研究機構 (CERN) の LHC 加速器と、アメリカ・ブルックヘブン国立研究所 (BNL) の RHIC 加速器を用いた高エネルギー原子核衝突によるクォーク・グルーオン・プラズマの実験的研究を行い、宇宙初期のような高温領域から中性子内部のような高密度領域へ広がる QCD 相図の性質を研究した。ジェットや重クォーク等のハードな指針を用いた研究と、集団運動的な非等方的な膨張や多粒子相関、揺らぎ測定等のソフトな指針を用いた研究を推進した。また理研の RI ビームファクトリーを用いた不安定核の研究を行い、超新星爆発や中性子星衝突による元素合成の起源や謎を探る研究を行った。

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

- (1) LHC-ALICE 実験 重心系衝突エネルギー 5.02TeV 陽子-陽子衝突における荷電粒子ジェット生成量測定
本研究では、以下の 2 点を主目的として、2015 年に LHC-ALICE 実験において収集された重心系衝突

エネルギー 5.02 TeV での陽子-陽子実験における荷電粒子ジェットの生成量測定を行った。

(a) 摂動論的量子色力学 (pQCD) による理論計算及び高エネルギー粒子衝突実験に用いられる
モンテカルロ (MC) イベントジェネレータのテスト

(b) 同じ重心系衝突エネルギーにおける重イオン衝突実験に対して基準となる結果の確立

図 40 はジェット半径 $R=0.4$ として測定した荷電粒子ジェット生成微分断面積である。pQCD 計算に基づく MC イベントジェネレータを用いたシミュレーション (PYTHIA 及び POWHEG) は実験結果をよく再現し、特に、NLO の精度での計算 (POWHEG) は非常によく実験結果と一致した。また、図 41 はジェット半径 $R=0.4$ 及び $R=0.2$ として測定した荷電粒子ジェット生成微分断面積の比である。この量は生成されたジェットの空間的発展に鋭敏な量の一つであり、高横運動量を持つジェットほど収束した形となることが示されている。加えて、この高横運動量ジェットの収束及びその度合いもシミュレーションによってよく再現された。以上を測定するにあたり、実験データに含まれる検出効率や運動量分解能といった検出器効果は、Geant3[1] を用いたシミュレーションによって検出器応答を見積もり、SVD unfolding method[2] を用いて補正した。これらの結果は同じ重心系衝突エネルギーでの鉛-鉛衝突実験における測定結果との比較を合わせ、Hard Probes 2016 及び Quark Matter 2017 国際会議において発表された。

高エネルギー鉛+鉛衝突におけるジェット抑制効果の測定

重イオン衝突を用いたクォーク・グルーオン・プラズマ相 (QGP) の物性探索において、衝突初期に作られる高運動量パートンは有用なプローブとなりうる。このパートンは QGP との相互作用を経てジェット事象として観測されるため、重イオン衝突におけるジェットの形状変化測定はパートンを用いた QGP のトモグラフィーと考えられる。本年は、LHC にて 2015 年 11 月より行われた $\sqrt{s_{NN}} = 5.02\text{TeV}$ の陽子 + 陽子及び鉛+鉛衝突実験でのデータを用いて、QGP に起因する荷電粒子ジェット抑制の測定を行った。重イオン衝突実験における、ジェット形状変化を示唆する測定量として、陽子 + 陽子衝突と鉛+鉛衝突での生成量比 (R_{AA} , 式 1) が代表的である。

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

本研究にて得られた R_{AA} の中心衝突度依存性を図 42 に示す。ここで、鉛 + 鉛衝突の中心衝突において、ジェットの強い収束抑制が観測された。この結果に関して、国際会議 (Hard Probes 2016, 中国武漢, 2016 年 9 月) にて議論を行った。その後、ジェットの広がり方の評価のため、ジェット半径依存性の評価を開始した。

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

相対的重イオン衝突により、誕生した直後の宇宙に存在したとされるクォーク・グルーオン・プラズマを再現し π 中間子を用いた HBT 測定から、クォーク・グルーオン・プラズマの集団運動的な発展や粘性、初期幾何学的形状が関係する終状態の系の幾何学的形状を調べた。しかし、HBT 半径は終状態の幾何学的形状だけでなく系の膨張にも敏感な測定量である。そこで、近年注目されている方位角異方性の強度を示すベクトルを用いて衝突毎に方位角異方性の強い (または弱い) 事象を選ぶ手法 (Event Shape Engineering)[3] を HBT 測定と組み合わせ、終状態の形状と系の膨張に敏感である方位角異方性との関係を調べた。

図 43 に、HBT 測定より求めた終状態における系の楕円形状 (赤・黄) と三角形状 (青・緑) の中心衝突度依存性を示した。黄、緑はそれぞれ 2 次、3 次の方位角異方性が大きな事象における形状である。

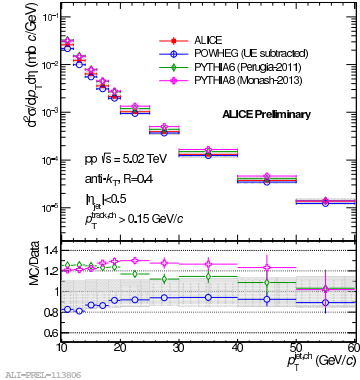


図 40 ジェット生成微分断面積 (R=0.4)

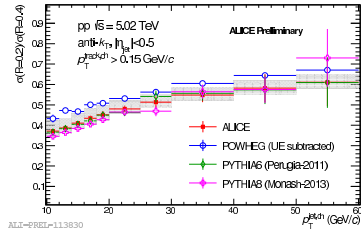


図 41 ジェット生成微分断面積の比 ($\sigma(R=0.2)/\sigma(R=0.4)$)

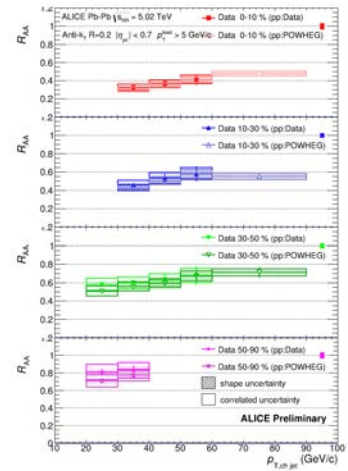
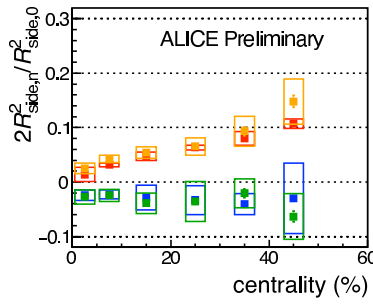
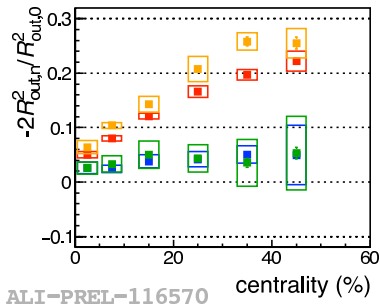


図 42 $\sqrt{s_{NN}} = 5.02\text{TeV}$ 鉛 + 鉛衝突、荷電粒子 Jet の R_{AA}

楕円形状は中心衝突度に大きく依存し周辺衝突ではより楕円形状となる。また、方位角異方向性が大きな事象では終状態の形状がより楕円形となる。三角形形状は中心衝突度にはあまり依存しない。 R_{side} は 2 次のイベント平面依存性と異なり、負の値を持つ。また 3 次の方位角依存性の大きな事象を選んででも大きな変化は観測できなかった。



Pb-Pb $\sqrt{s_{NN}}=2.76\text{TeV}$
 $\pi^+\pi^+$ and $\pi^-\pi^-$ pair combined
 $k_T=0.2-1.5(\text{GeV}/c)$
q vector cut via FMD A+C side
— 20% large q_2 cut, n=2
— No q_2 cut, n=2
— 20% large q_3 cut, n=3
— No q_3 cut, n=3

ALI-PREL-116570

図 43 $\sqrt{s_{NN}} = 2.76\text{TeV}$ 鉛 + 鉛原子核衝突における HBT 半径の 2 次・3 次の振幅の中心衝突度依存性

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

チャームクォークやボトムクォークは質量が大きいので、主に衝突初期の hard scattering によって生成される。高エネルギー原子核衝突では衝突初期に作られたチャームクォークやボトムクォークは、衝突によって生成される高温高密度物質 (QGP) を通過してくるため、その測定は QGP の性質を調べる上で有用なプローブだと考えられている。チャームクォークやボトムクォークはその重い質量のため、 u, d, s などの軽いクォークと比べて QGP 中での振る舞いが違うことが予想されている。図は LHC-ALICE 実験での鉛 + 鉛衝突 5.02TeV における D meson と D meson 及び B meson から崩壊してくる電子の R_{AA} (陽子 + 陽子衝突と鉛 + 鉛衝突の比) の測定結果である。測定結果はともに R_{AA} が 1 より小さく、これは鉛 + 鉛衝突において D meson 及び B meson の生成量が抑制されていることを示唆している。この原因はチャームクォークやボトムクォークが QGP 中でエネルギーを失うためだと考えられ

ている。今後は電子の測定においてチャームクォークとボトムクォーク起源の電子を分けることによりボトムクォークのエネルギー損失の研究、 Λ_c などのチャームクォークを含む粒子、さらにチャームクォークとボトムクォーク起源の jet を測定することによりパートンレベルでの重いクォークを用いた QGP の研究を行う予定である。

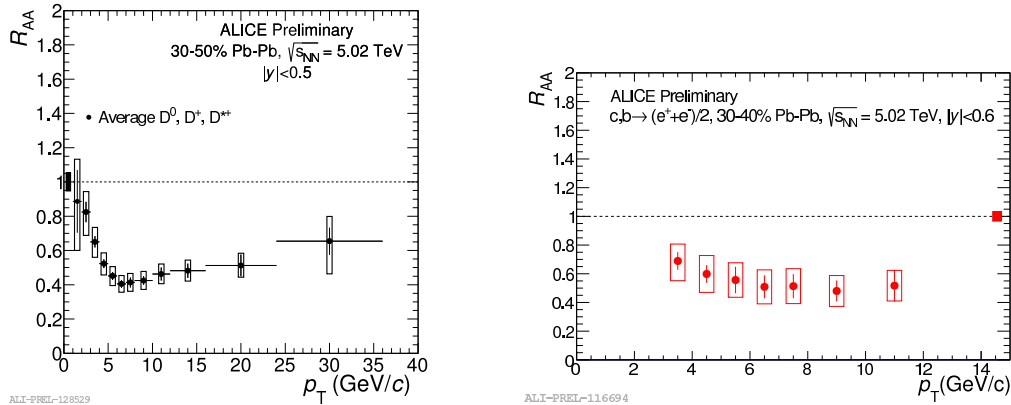


図 44 D meson(右) と D 及び B meson 起源の電子の R_{AA}

(2) RHIC-PHENIX 実験における銅・金衝突での方位角異方性測定

米国 BNL の RHIC-PHENIX 実験では、相対論的速度での重イオン衝突実験が行なわれており、QGP 物性の研究が進められている。重イオン衝突での QGP 研究に有効なプローブとして発生粒子の方位角異方性測定がある。衝突後の系は、衝突初期形状が崩れる前に中のパートンが激しく散乱し熱平衡状態に達し、初期形状に起因した内部圧力を生み膨張する。衝突初期形状が楕円型ならば楕円型の膨張をし、三角形型ならば三角形型の膨張をするため、発生粒子の方位角異方性は衝突初期形状を起源とし QGP の膨張に影響を受ける測定量となる。RHIC ではこの衝突初期条件形状の為に、非対称系の銅・金衝突が行なわれた [4]。銅・金衝突では金と銅原子核の衝突関与部の形状が異なるため、銅/金原子核が進む領域（前方/後方）での衝突初期形状が異なる可能性がある。図 45 の左の図は前方/後方領域での楕円型異方性の強度 v_2 の多重度依存性を示す。横軸の多重度は中心衝突度時に決まる平均値を表しており、金側の方が銅側よりも v_2 及び多重度が同一イベントで平均的に大きい。共に高多重度から低多重度にかけて v_2 が大きくなっており、これは初期の形状が中心衝突からかすり衝突にかけて円型から楕円型へ変化している事から来ると考えられる。右の図は v_2 を初期形状の楕円型異方性強度 ε_2 で割った値の多重度依存性を表す。この図では、金側と銅側の v_2 は共通の ε_2 で割っており、綺麗にスケールしている。これは前方/後方ともに共通の初期形状の異方性を表しており、3 次元的初期形状の理解に向けた結果となる。

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

高エネルギー原子核衝突実験における課題の一つに重陽子・金原子核衝突等の小さな系での方位角異方性の起源の理解がある [5]。これまで方位角異方性は原子核衝突においてのみ観測される現象であると考えられていたが、高多重度の小さな衝突系でも同様な強度の異方性が測定された。原子核衝突での方位角異方性は衝突初期形状を起源に流体的な集団運動の結果観測されるが小さな系での方位角異方性の起源は分かっていない。RHIC-PHENIX 実験では、この小さな系での方位角異方性理解の為に、重陽子・金原子核衝突の衝突エネルギー走査実験が行なわれた。図 46 は重陽子・金衝突での衝突エネルギー

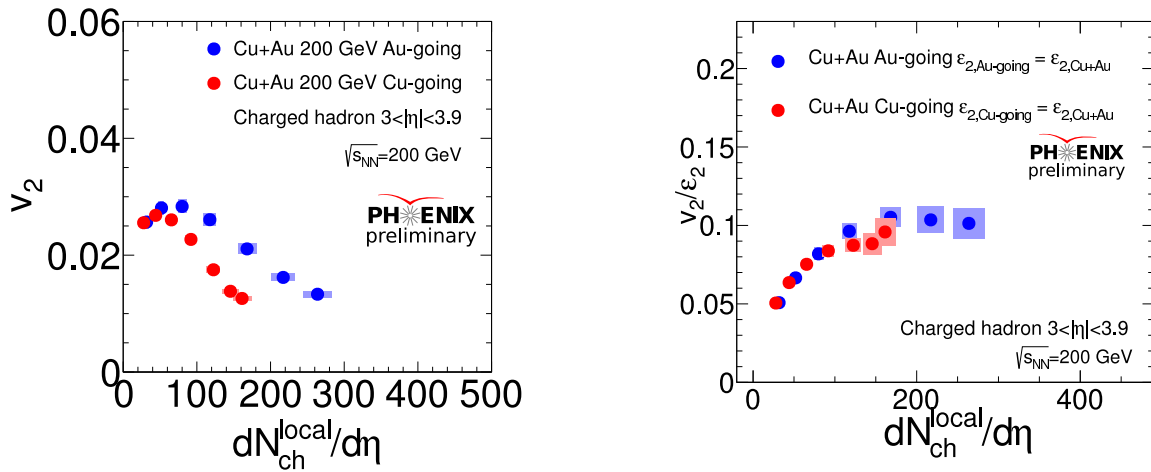


図 45 銅・金衝突における前方/後方領域での楕円型異方性強度 v_2 と初期形状の楕円型異方性強度 ϵ_2 との比の多重度依存性

ギ-事の楕円型方位角異方性強度 v_2 の横運動量依存性の図である。実験データが黒いデータ点を示し、その他の橙色と紫色の線が流体モデル、緑の線がパートンカスケードモデルの計算結果となる。200GeV と 62.4GeV の領域では v_2 は同程度の大きさ及び似た様な横運動量依存性を示しているが、39GeV 以降では振る舞いが異なっている。低横運動量では v_2 の強度はたいして変わらないが、高運動量領域では横運動量とともに線形的に大きくなっている。これは、ジェットなどの集団運動以外の寄与から来ていると考えられており、理論計算とも高横運動量の領域では合っていない。PHENIX 実験ではさらにこの小さな系での集団運動を理解する為に、多粒子相関や前方/後方領域での異方性測定も進められている。

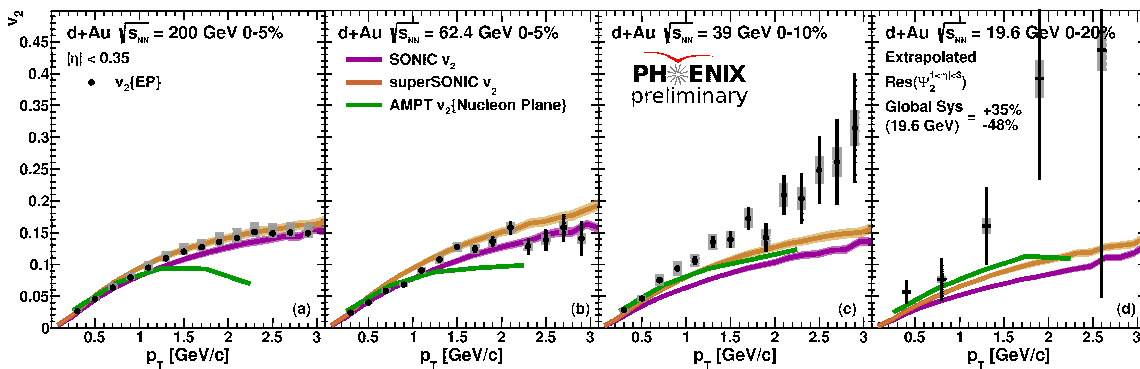


図 46 重陽子・金衝突における楕円型異方性強度 v_2 の横運動量依存性

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

QCD 相構造、特に QGP 相からハドロン相への相転移の仕組みを明らかにするために、理論的・実験的に様々なアプローチで研究が行われてきた。格子ゲージ理論によると、バリオン密度が小さい領域での相転移は、明確な境界の無いクロスオーバーであると言われている。しかし、いまだ直接的に相転移

を示す実験結果は無い。そこで、相転移に敏感な観測量として net-charge 分布および net-baryon 分布の高次ゆらぎが提唱された [6]。

近年 RHIC-STAR 実験において、QCD 臨界点を探するために、保存量分布の 4 次までのゆらぎが測定されている [7]。しかし、金 + 金衝突 $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV において、4 次ゆらぎは $C_4/C_2 \approx 0.92$ であり、ハドロンガスからのずれは観測されていない。一般的に、より高次のゆらぎほどより相関長に敏感になるため、6 次ゆらぎを測定することによって相転移の信号が観測されることが期待される。

図 47 は、 C_6/C_2 の中心衝突度依存性である。周辺衝突から中心衝突にかけて、ポアソン分布の予測値である 1 からのずれが見え始め、負の値を示していることがわかる。しかし、中心衝突では統計誤差が大きくなり、系統的な議論は難しい。引き続き実験を行い、誤差を減らす努力が必要である。

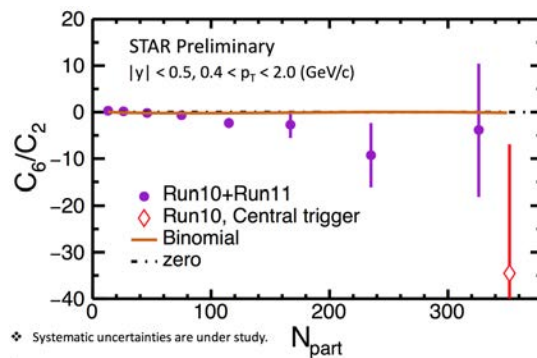


図 47 C_6/C_2 の中心衝突度依存性

RHIC-STAR 実験における横運動量分布のエネルギー依存性測定

RHIC 加速器を用いた STAR 実験において、2010 年から 2014 年にかけて Beam Energy Scan 1 (BES1) が行われた。BES の目的は QGP の物性の理解と QCD 相図の解明である。今回金 + 金衝突における衝突エネルギーが $\sqrt{s_{NN}} = 7.7, 11.5, 19.6, 27, 39$ GeV の π 、 K 、 p とその反粒子それぞれについて粒子数分布が測定された。[8] 中央ラビディティにおける粒子多重度密度と平均横運動量、そして粒子種ごとの粒子数の比がそれぞれのエネルギーについて報告された。また粒子の p_T 分布や粒子数比をフィットすることで、QGP 物性を理解する上で重要となるフリーズアウト時の温度や化学ポテンシャル、平均膨張速度などのパラメータが測定された。図 48 は横軸が衝突エネルギー、縦軸が上下それぞれフリーズアウト時の温度と膨張速度を表している。運動学的凍結温度は BES のエネルギー領域ではほぼ一定であり、化学的凍結温度はエネルギーとともに上昇するが、11.5 GeV 以降緩やかになることがわかった。また、平均膨張速度はエネルギーとともに上昇する傾向があるが、BES のエネルギー領域では一定に近い振る舞いがみられた。

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

STAR 実験の $\sqrt{s_{NN}}=200$ GeV の金 + 金中心衝突および陽子 + 陽子衝突において直接光子 (γ_{dir}) および中性パイ中間子 (π^0) と荷電粒子との方位角相関が測定された。クォークは媒質中で相互作用してエネルギーを損失するが、光子は色荷を持たないため、高温高密度物質とは相互作用せずに検出器まで到達する。そのため、パイ中間子、光子をトリガー粒子とした時のアソシエイト粒子の、トリガー粒子と反対方向 (away-side) における粒子の取量を比較することで、ハドロンが媒質中を通過した距離と色荷による効果を見積もることができる。金 + 金中心衝突において、1 トリガー粒子あたりの荷電粒

子の収量が陽子 + 陽子衝突に比べて抑制されていることが確認された [9]。トリガー粒子と反対方向 (away-side) における、直接光子 1 粒子に対する荷電粒子の収量の抑制は、直接光子の運動量は依存していなかった。一方で、荷電粒子の運動量が小さくなると収量の抑制が小さくなることが明らかになった (図 49)。直接光子と中性パイ中間子との間の抑制の割合の違いは誤差の範囲内であった。この研究結果は、低運動量領域ではエネルギーの再分配が支配的であり、トリガー粒子のエネルギーには依存しないという STAR 実験の以前の結果を支持するものである。

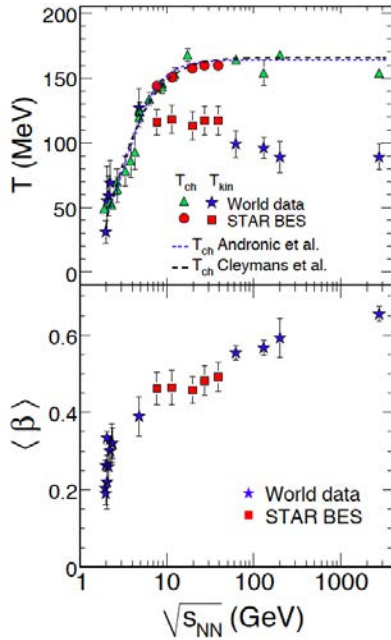


図 48 凍結温度と平均膨張速度の衝突エネルギー依存性

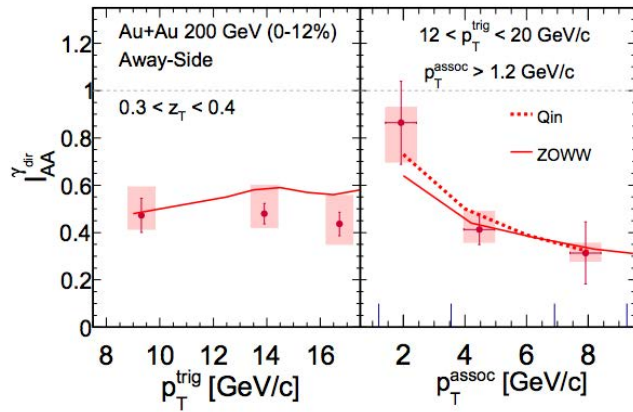


図 49 直接光子 Trigger に対する、Associate 荷電粒子の I_{AA}^{dir}

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

RHIC 加速器をもちいた STAR 実験において Λ 粒子と、 $\bar{\Lambda}$ 粒子の反応平面に対する偏極を測定し、それらがともに正の偏極を示し、衝突ビームエネルギーを下げる程大きくなる事を観測した。これは、原子核衝突の角運動量による渦の生成を史上始めて観測した事に対応する。また、 $\bar{\Lambda}$ 粒子の偏極が、 Λ 粒子の偏極よりも僅かに大きい事は、原子核衝突による角運動量と同じ方向に生成される可能性のある強磁場による寄与である可能性を示唆しているが、統計及び系統誤差の範囲で有意な差があるとは言えないため、今後の実験による高統計で高精度の測定に期待が寄せられる。図 50 は、原子核衝突の反応領域の角運動量による渦の生成と、 Λ 粒子の偏極の方向を模式的に表している。図 51 は、 Λ 粒子と、 $\bar{\Lambda}$ 粒子それぞれの偏極度の衝突ビームエネルギー依存性に関する測定結果を示す [10]。

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

欧州原子核研究機構 CERN の LHC 加速器を用いた ALICE 実験において、超前方領域 (擬ラピディティ領域 $3.5 < \eta < 5.3$) における光子測定のために FoCal (Forward Calorimeter) 検出器を導入する計画がある。光子は色荷を持たず QGP 中を相互作用せずに通過するため、衝突初期の情報を含んでいると予想されている。また前方で直接光子を検出することで、QGP 早期熟化の原因の解明やカラーガラス凝縮理論の検証、重イオン衝突初期条件の決定などが期待できる。FoCal 検出器は電磁カロリ

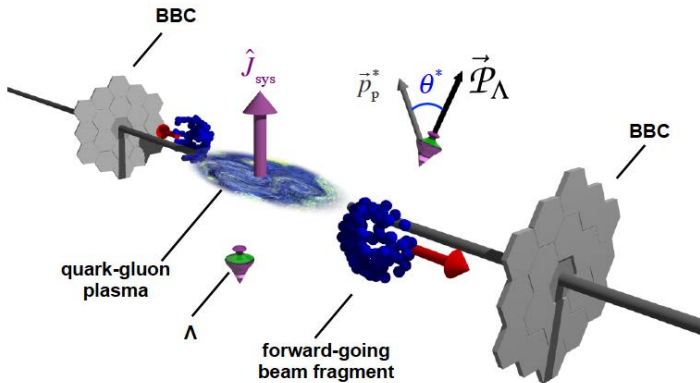


図 50 反応平面による QGP の角運動量と Λ 粒子のグローバルな偏極

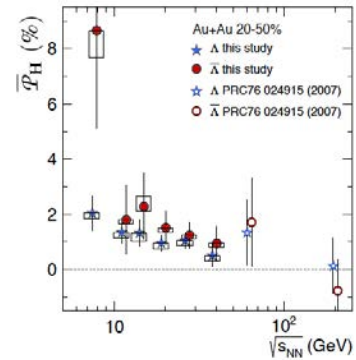


図 51 $\Lambda, \bar{\Lambda}$ 粒子の偏極の衝突ビームエネルギー依存性

メータ (FoCal-E) とハドロンカロリメータ (FoCal-H) から構成され、FoCal-E はエネルギー測定を行う $1 \times 1 \text{ cm}^2$ の Si PAD 部と、シャワーの位置・形状を観測する $30 \times 30 \mu\text{m}^2$ の Si pixel 部からなる。平成 27 年度までに 2 度のテストビーム実験を実施し、ノイズレベルの削減や 50 GeV までのエネルギーに対する性能評価を行ってきた。

平成 28 年度は CERN-SPS 加速器において FoCal-E 試作機のテストビーム実験を行い、新たに高エネルギー領域 (50 ~ 130 GeV) における検出器の性能評価実験を行った。課題であった高エネルギービームにおける信号の飽和を加算回路においてシグナルの波高を減衰させることにより解決し、130 GeV/c までのシグナルの取得に成功した (図 52)。不感領域の影響を考慮したシミュレーションを行い、取得したシグナルとの整合性を確認した (図 53)。また、トリガー情報を共有させることにより独立の DAQ を持つ PAD 部と pixel 部のイベントデータ照合をし、同一のイベントを観測することに成功した (図 54)。加算回路を変更したことにより今後は FoCal-E 実機の開発に向けて、実機製作やデザインの最適化を物理シミュレーションと並行して行い、ALICE 実験への導入を目指す。

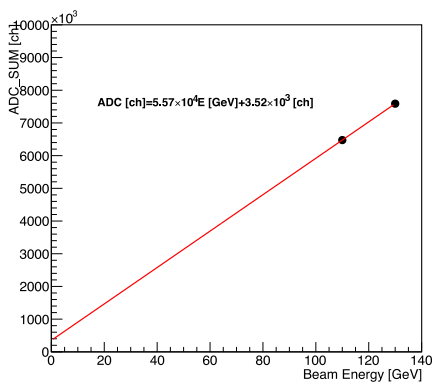


図 52 PAD 部におけるシグナルのエネルギー依存性

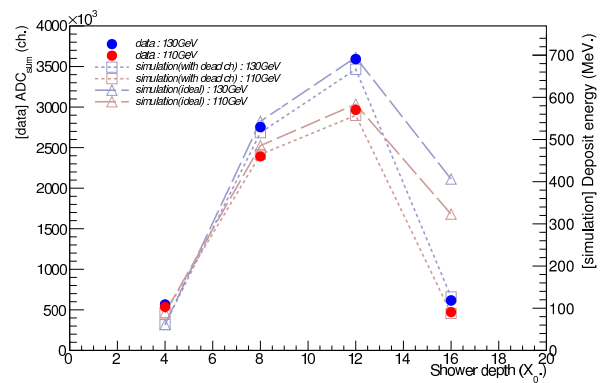


図 53 PAD 部における縦方向のシャワープロファイルとシミュレーションとの比較

陽電子ビームを用いた MRPC の性能評価

Multi-gap Resistive Plate Chamber(MRPC) というガス検出器は現在 TOF 検出器として広く浸透し

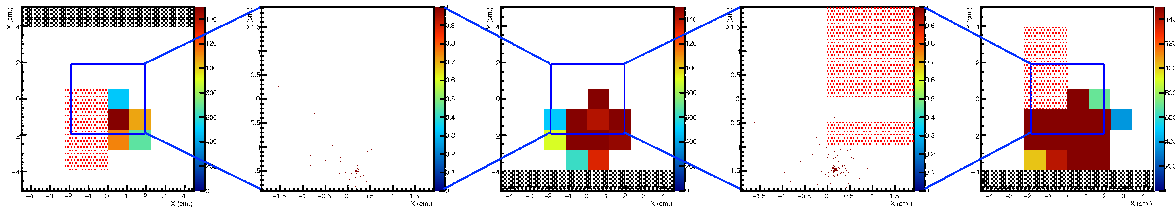


図 54 PAD 部及び pixel 部のイベントデータ照合によるヒットマップ

ており、非常に安価でかつ単純な構造で設計の自由度が高く優れた時間分解能を持っているという特徴を持つ。現在、日本の J-PARC においても重イオン衝突実験を行う計画が進んでおり、MRPC はその TOF 検出器として採用される見込みとなっている。今年度は、ソニーグローバルマニュファクチャリング&オペレーションズ株式会社による電磁界シミュレーションを元に制作した、読み出しパッド形状の最適化により高い時間分解能を追求する機体と、J-PARC への導入を見据えた $20 \times 30 \text{ cm}^2$ の基板を用いた機体 (以降大型 MRPC とする) について 2016 年 11 月に東北大学電子光学研究センター (ELPH) で行われた陽電子ビームを用いた実験により性能評価を行った。前者の機体についてはパッドの幅が 2.4 cm のものと、1.2 cm のものを制作し、評価を行った。前者については図 55 にあるようにパッド幅が細い方で時間分解能 $78.9 \pm 1.8 \text{ ps}$ を達成した (1 段型)。一方大型 MRPC について、パッド部分と読み出しの間のインピーダンス整合が取れず、シグナルが反射してしまう影響が強くと見られ図 56 にあるように時間分解能は $79.5 \pm 1.8 \text{ ps}$ であった (4 段型)。

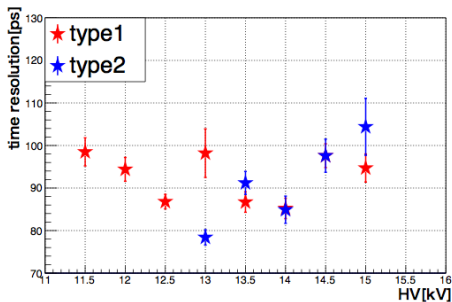


図 55 時間分解能の印加電圧依存性。type1(赤)がパッド幅の太い方、type2(青)がパッド幅の細い方を示している。

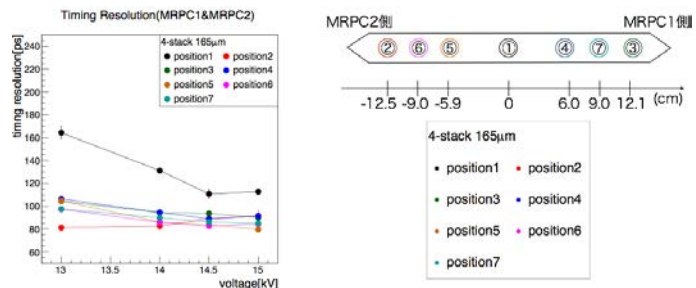


図 56 大型 MRPC の時間分解能の印加電圧依存性。右はパッドに対するビームの入射位置を表している。

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

RHIC では QCD 相図の解明を目的として Beam Energy Scan phaseII が 2018 年に行われる予定である。EPD は半径方向に 16 個のセグメント、方位角方向に 24 個のセクターで構成されているシンチレーション検出器であり、BBC(Beam Beam Counter) よりも粒子の位置分解能が良いこと、中心ラビディティ領域での測定における CTB(Central Trigger Barrel) との自己相関が軽減されるなどの理由から、BBC に替わって稼働する予定である。現在、East 側に全方位角の 1/4 を覆うように proto-type が図 57 のように置かれ、 pp 衝突において ADC(図 58) 等のデータが取られており、EPD の本格的な稼働に向けて読み出しの調整が行なわれている。

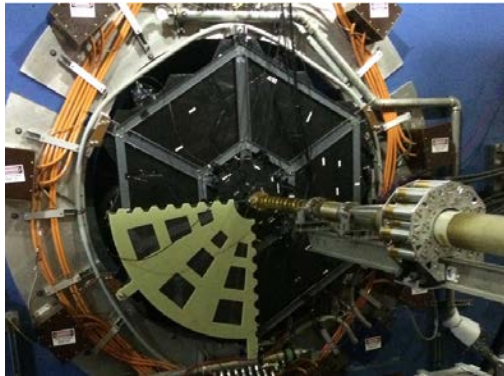


図 57 EPD の proto-type

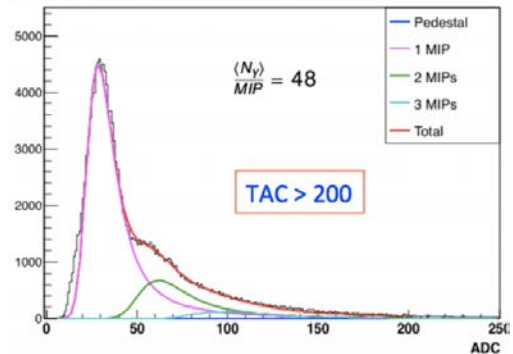


図 58 EPD の Tile4 で測定された ADC 分布

(5) 理化学研究所の RIBF における元素合成の研究

理研 RI ビームファクトリーでの稀少 RI リング (R3) での質量測定プロジェクトに現状について記述する。R3 は、約 10 年間の開発研究の末、平成 27 年 3 月に完成した。これまで 3 回のコミッションング実験を行なっている。平成 28 年度は、3 回目のコミッションング実験として、不安定核 ^{78}Ge 周辺の質量既知核の質量測定を試みた。 ^{238}U の一次ビームから核分裂破砕片として、 ^{78}Ge 周辺の不安定核を生成した。生成直後に、エネルギー吸収板により、不安定核を約 180 A MeV まで減速させた。 ^{78}Ge を基準とし、 ^{78}Ge が R3 の入射ラインである BigRIPS、SHARAQ の中心軌道を通るように、ビームラインの磁場を設定した。さらに、個別入射のためのキッカー磁石のタイミングも、 ^{78}Ge に調整した。これらの調整により、 ^{78}Ge 及び、その周辺の 4 つの不安定核 (^{79}As 、 ^{77}Ga 、 ^{76}Zn 、 ^{75}Cu) を R3 に入射させ、さらに出射させることができた。今回の実験で R3 から出射できた BigRIPS での不安定核の粒子識別を図 59 に示した。F2、F3 は BigRIPS での 2 番目、3 番目の焦点面である。F2、F3 には、プラスチックシンチレーターを置き、飛行時間 (TOF) を測定し、F3 にはイオンチェンバーを置き、エネルギー損失 (ΔE) を測定した。質量測定のためには、R3 は等時性にならなければならない。基準となる ^{78}Ge (約 180 A MeV) に対して等時性が成り立つように R3 内のトリムコイルを調整した。 ^{78}Ge に対する運動量と R3 内の飛行時間の相関を図 60 に示した。BigRIPS の F6 焦点は、運動量分散を持っており、X 方向の位置は運動量に対応している。図 60 より、 ^{78}Ge では運動量の違いに対して、飛行時間の差はほとんどなく、等時性が実現できていることがわかる。今回の実験では、入射ラインで、各不安定核の速度も測定しており、イベントごとに、速度の補正が可能である。速度補正を施すことにより、 ^{78}Ge を質量の基準として、飛行時間の測定から ^{79}As などの不安定核の質量が導出できる。質量導出については解析中である。

平成 28 年 10 月には、重元素合成過程解明に関連して、R3 による Ni 同位体の質量測定のプロポーザルを理研 RI ビームファクトリーに提出した。プロポーザルは、12 月の PAC で審査され、採択された。平成 29 年度以降、Ni 同位体の質量測定を予定している。

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

金谷、谷口らは、有限温度・有限密度 QCD 相構造とクォーク物質の熱力学的諸性質を、ウィルソン型格子クォークを用いた格子 QCD シミュレーションにより導くことを目的として、新潟大学江尻信司准教授、広島大学梅田貴士准教授、九州大学鈴木博教授、大阪大学北沢正清助教らとの共同研究を引き続き推進した。2016 年度は、グラジエントフロー法を応用した研究を大きく進展させた。また、多重

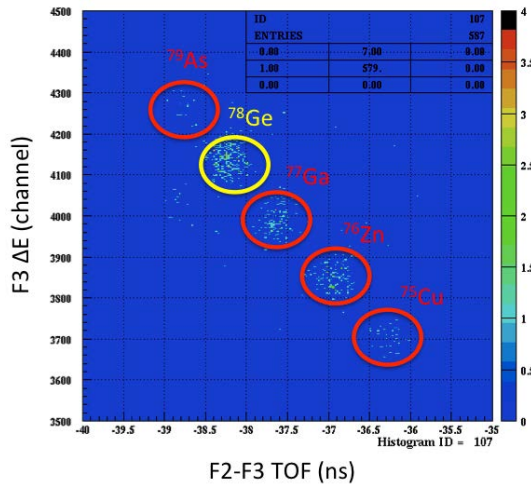


図 59 R3 から出射したイベントに対する BigRIPS での粒子識別。

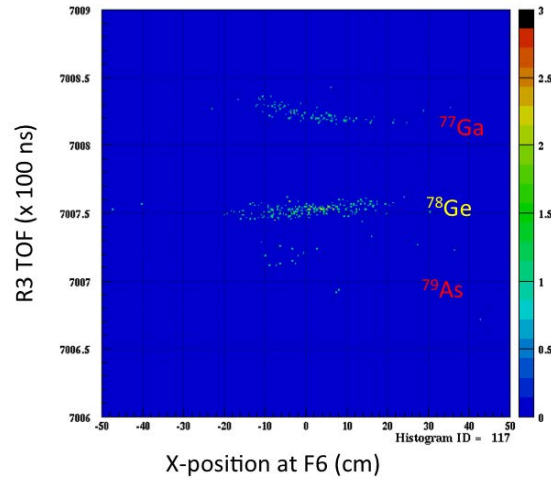


図 60 R3 での全飛行時間 (R3 TOF) と運動量との相関。

点再重み付け法とヒストグラム法を使った手法開発も進め、その応用として、QCD のグルオン部分である SU(3) ゲージ理論で 1 次相転移点における潜熱の研究や、 $N_F = 2$ QCD のカイラル相転移転動帽のスケリングの研究を行った。並行して、次の段階の研究にむけて、改良 Wilson クォークによる $N_F = 2 + 1$ QCD の物理点における有限温度配位生成を進めた。

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

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

我々の研究により、状態方程式の評価が動的クォークを含む場合でも精度良く遂行可能であることが示された。図 61 に状態方程式の結果を示す。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とれる。グラジエントフロー法による評価は、従来の方法で必要であった、非摂動的ベータ関数の評価などが不要で、全体的計算コストを大きく抑えられる可能性がある。この結果は、計算コストの高い物理点での評価を推進する上で、グラジエントフロー法が大きな役割を担うことを示唆している。(論文 99, 103)

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 62 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

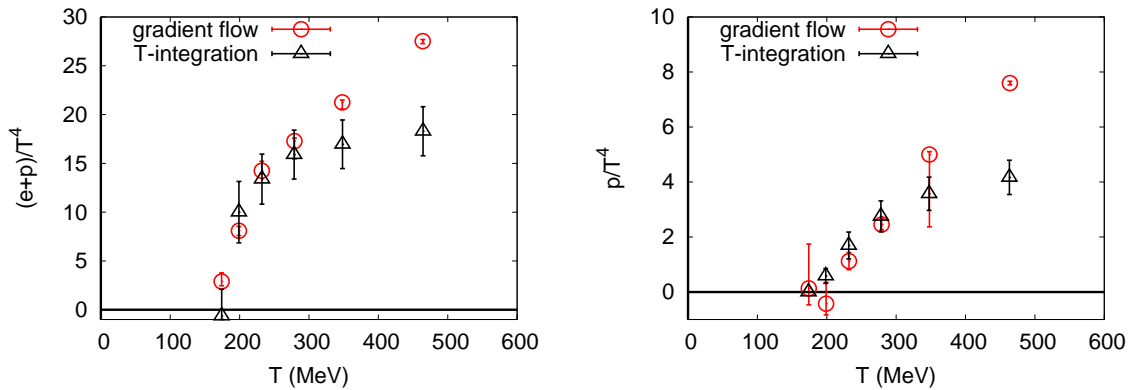


図 61 グラジエントフロー法による有限温度 (2+1)-flavor QCD の状態方程式の研究。左図：エントロピー密度 $\epsilon + p$ 。右図：圧力 p 。赤丸がグラジエントフロー法による評価の結果で、黒三角は、同じ配位上で T -積分法を用いて評価した先行研究の結果。横軸は温度 T 。(論文 103)

ことを示した。また、 s クォークよりも、軽い u, d クォークのカイラル感受率の方がより強い特異性をしめしており、これも理論的期待と一体する。格子上でカイラル対称性を陽に壊してしまうウィルソン型クォークでこれらが示されたのは初めてである。

さらに、位相電荷と位相感受率の評価も実行した。位相感受率はアクシオン質量と関係しており、アクシオンが冷たい暗黒物質の候補となるかを判定する上で、その温度依存性が重要な情報となる。位相感受率には、ゲージ場を用いた定義による評価とクォークを用いた定義による評価の 2 種類の計算方法がある。両者は連続理論では一致すべきであるが、格子上では、カイラル対称性などの破れにより、しばしば大きなズレを示し、結果の信頼性に問題を投げかけている。鈴木法を用いればこれらの量も物理的評価を直接行うことができると期待される。図 62 の右図に我々の位相感受率の結果を示す。赤丸はゲージ場を用いた定義の結果で、黒三角はクォークを用いた定義の結果である。両者の一致が格子上で直接示されたのは初めてである。赤と黒の曲線は高温側でかつ $N_t > 8$ を充たす 3 点を T の冪関数でフィットした結果で、希薄インスタントンガス模型 (DIGA) から予想される冪をよく再現することを示した。(論文 100, 102)

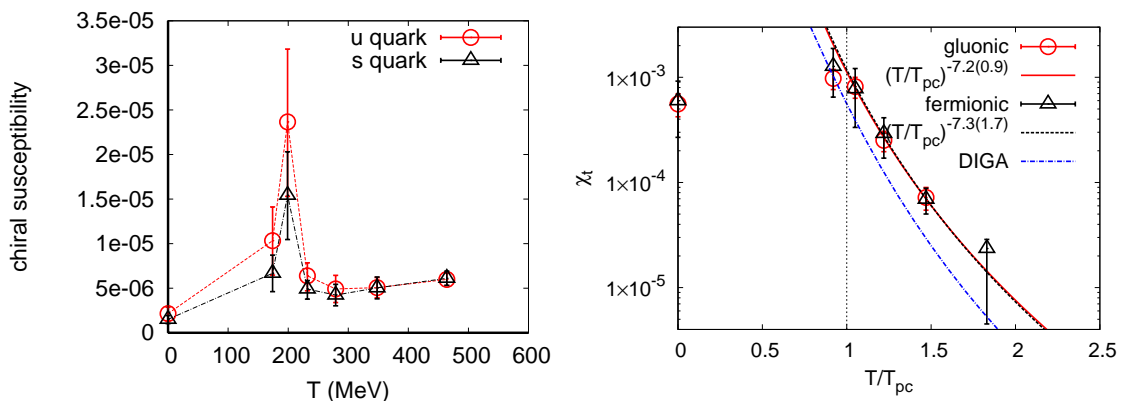


図 62 グラジエントフロー法による (2+1)-flavor QCD の熱力学特性の研究。左図：カイラル感受率。赤丸は u, d クォークのカイラル感受率で、黒三角は s クォークのカイラル感受率。(論文 103) 右図：位相感受率。赤丸はゲージ場を用いた定義による評価の結果で、黒三角はクォークを用いた定義による評価の結果。(論文 102)

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

SU(3) ゲージ理論の潜熱

QCD でクォークを取り除いた SU(3) ゲージ理論は、低温の閉じ込め相と高温の非閉じ込め相との間が弱い 1 次相転移であることが知られている。有限密度 QCD でも 1 次相転移が現れることが理論的に予想されており、その位置や性質をシミュレーションで効率良く評価する手法の開発は重要である。我々は、これまで、多重点再重み付け法とヒストグラム法を組み合わせ、1 次相転移やその端点の簡便な検出方法の開発を進めてきた。この研究では、SU(3) ゲージ理論の 1 次相転移点での潜熱を研究した。状態方程式（エネルギー密度と圧力）を評価する方法として、この論文では「微分法」を採用した。相転移点はポリアコフープ感受率の極大点として定義できるが、多重点再重み付け法を使って、非等方結合定数空間 (β_s, β_t) におけるポリアコフープ感受率（図 63 の左図を参照）を計算することにより、感受率の極大線の傾きから、微分法に必要な非等方係数の評価を実行した。次に、シミュレーションヒストリーを高温相と低温相に分離し、状態方程式の 2 相間の差として潜熱の評価を行った。同じ評価を 2 種類の空間体積と、 $N_t = 6, 8, 12$ の 3 種類の格子間隔で実行し、空間体積依存性を確認しつつ、連続極限外挿を実行した。調べた格子間隔の範囲では、体積依存性は小さく、図 63 右図のように連続極限外挿を行って、 $\Delta\epsilon/T^4 = 0.75(17)$ と $\Delta(\epsilon - 3p)/T^4 = 0.623(56)$ を得た。圧力のギャップは、期待どおり、誤差の範囲でゼロと矛盾しない。（論文 95, 98）

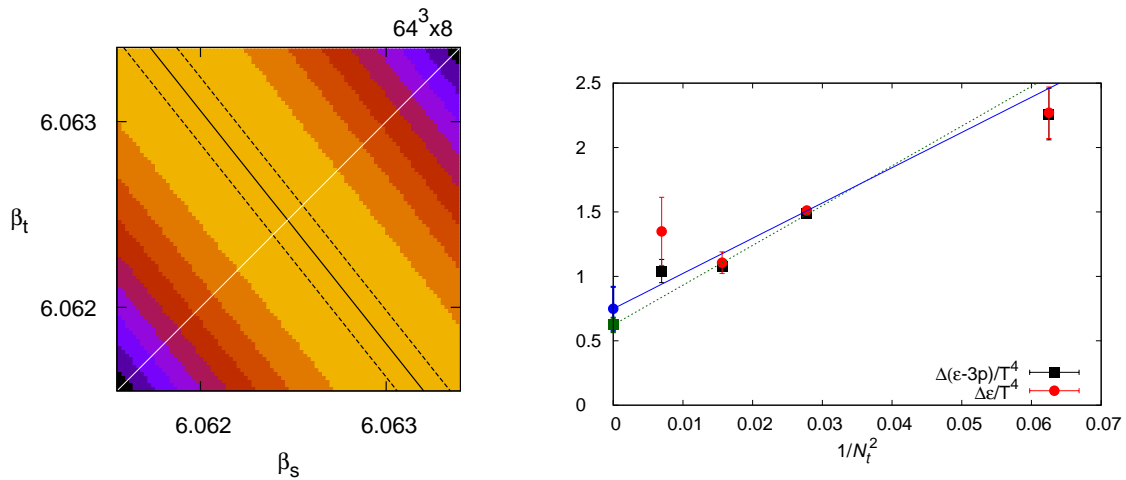


図 63 SU(3) ゲージ理論における潜熱の研究。左図：ポリアコフープ感受率の (β_s, β_t) 依存性。等高線図で、明るい色ほど感受率が高い。 $64^3 \times 8$ 格子の結果。右図：潜熱の連続極限外挿。（論文 95）

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

有限密度 QCD の研究

鈴木と谷口はカノニカル法を用いた有限密度 QCD の研究を行った。有限密度格子 QCD には複素作用の問題があり、単純なモンテカルロ計算は不可能である。この複素作用の問題を避ける方法として、カノニカル分配関数の導出を主なターゲットとするカノニカル法が有力視されている。カノニカル法を用いると確かに有限密度 QCD が数値計算可能となり、具体的な熱力学量としてカノニカル分配関数を求

められるようになる。ところが、物理的には実かつ正定値となるべきカノニカル分配関数が複素数になってしまうという形で符号問題が現れることがわかってきた。これはカノニカル法が克復すべき問題であるが、位相それ自体の性質についてはあまりよく知られていない。そこで鈴木と谷口は、以下の2つの点を目標に研究を行った。

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

高温側の結果では位相は0と等しく問題はないことがわかるが、低温側の結果では位相は $\pi/2$ を超えており符号問題が強く現れていることが示唆される。また、位相がバリオン数 N_B におおよそ比例して大きくなっていることが確かめられた。この位相を減らすため、そのもっとも素朴な方法として統計数を上げた計算を試みた。統計が少ない場合は位相が激しく現れるが、統計を上げた場合は $\pi/2$ を超えない領域もあることが見て取れる。この結果から、統計を上げることによってバリオン数が少ない領域ではある程度位相を抑えることができるということがわかった。(論文 104-107, 国際会議発表 33-35,

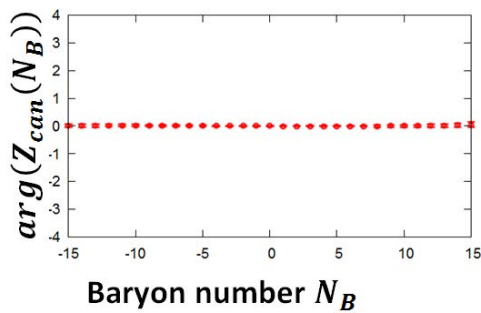


図 64 高温 $T = 1.68T_c$ における分配関数の位相。結果は0と等価で位相は十分制御されている。

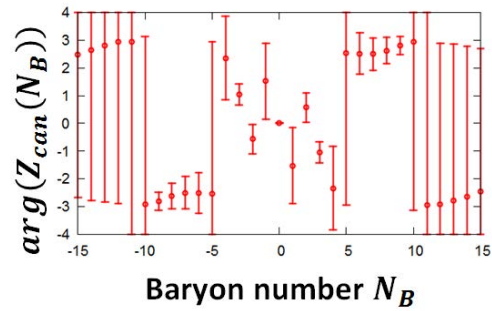


図 65 低温 $T = 0.81T_c$ における分配関数の位相。位相が $\pi/2$ を超えてしまう。カノニカル分配関数は実で正になるべき量である。

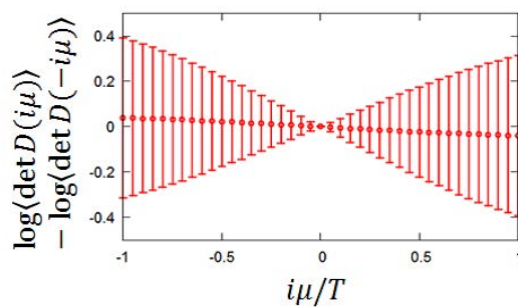


図 66 $\langle \det D(i\mu) \rangle$ と $\langle \det D(-i\mu) \rangle$ の対数同士の差をとった。図は低温 $T = 0.81T_c$ での結果。これは0になるべき量であるが、モンテカルロ計算においては破れている。

国内学会発表 38, 40)

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 $K^0 - \bar{K}^0$ 混合に対する QCD の寄与を抽出した量であり、QCD の非摂動的な効果が主として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

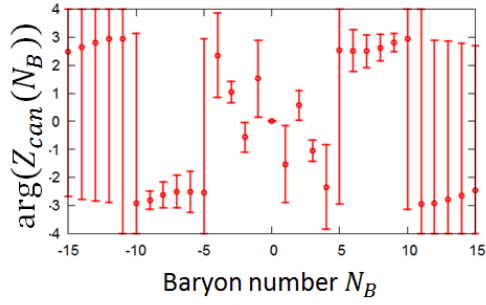


図 67 低温 $T = 0.81T_c$ で配位数 100 で計算を行った結果。

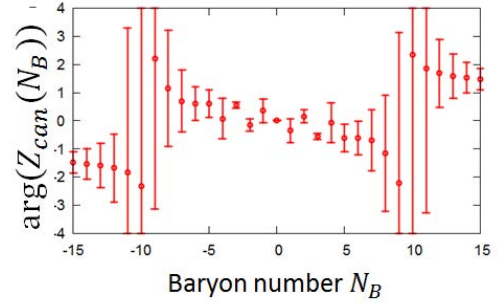


図 68 低温 $T = 0.81T_c$ で配位数 900 で計算を行った結果。

量である。この B_K を Wilson fermion を用いて計算しようとする、カイラル対称性の破れからくる余計な演算子混合に邪魔されて精度の良い測定が困難となる事情があった。このカイラル対称性の破れからくる余計な演算子混合の問題に対する解決策として、gradient flow を用いる方法が有力視されている。gradient flow は一種のくりこみ変換であり、あらゆる演算子に対して非常に簡単に変換を実行することができる。gradient flow の優れた美点として flow を課した演算子には紫外発散が現れないという点が挙げられる。そのため格子上のいかなる対称性の破れにも悩まされることなく、連続極限を単純な操作として取ることができる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。(国内学会発表 39)

〈論文〉

1. R. Brun *et al.*, "GEANT: Detector Description and Simulation Tool", CERN-W5013 (1994)
2. A. Hoecker, V. Kartvelishvili, "SVD Approach to Data Unfolding", Nucl. Instrum. Meth. **A372** 469 (1996)
3. J. Schukraft, A. Timmins, and S. A. Voloshin, "Ultra-relativistic nuclear collisions: event shape engineering," Phys. Lett. **B719** (2013) 394-398
4. A. Adare *et al.* (PHENIX Collaboration), "Measurements of directed, elliptic, and triangular flow in Cu+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}}=200$ GeV", Phys. Rev. C **94** (2016) 054910
5. A. Adare *et al.* (PHENIX Collaboration), "Measurement of long-range angular correlation and quadrupole anisotropy of pions and (anti)protons in central d+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV", Phys. Rev. Lett. **114** (2015) 192301
6. B. Friman, F. Karsch, K. Redlich, V. Skokov, "Fluctuations as probe of the QCD phase transition and freeze-out in heavy ion collisions at LHC and RHIC", Eur. Phys. J. C (2011) 71:1694
7. L. Adamczyk *et al.* (STAR Collaboration), "Beam energy dependence of moments of the net-charge multiplicity distributions in Au+Au collisions at RHIC", Phys. Rev. Lett. **113** (2014) 092301

8. L. Adamczyk et al. (STAR Collaboration), "Bulk Properties of the Medium Produced in Relativistic Heavy-Ion Collisions from the Beam Energy Scan Program", arXiv:1701.07065v1
9. L. Adamczyk et al. (STAR Collaboration), "Jet-like correlations with direct-photon and neutral-pion triggers at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV", Phys. Lett. B 760 (2016) 689
10. L. Adamczyk et al. (STAR Collaboration), "Global Λ hyperon polarization in nuclear collisions: evidence for the most vortical fluid", arXiv:1701.06657
11. S. He, X. Luo, Y. Nara, S. Esumi, N. Xu, Effects of Nuclear Potential on the Cumulants of Net-Proton and Net-Baryon Multiplicity Distributions in Au+Au Collisions at $\sqrt{s_{NN}}=5$ GeV, Phys. Lett. B762 (2016) 296-300
12. J. Adam et al. (ALICE collaboration), Higher harmonic flow coefficients of identified hadrons in Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}}=2.76$ TeV, JHEP 1609 (2016) 164
13. J. Adam et al. (ALICE collaboration), Elliptic flow of electrons from heavy-flavour hadron decays at mid-rapidity in Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}}=2.76$ TeV, JHEP 1609 (2016) 028
14. J. Adam et al. (ALICE collaboration), Pseudorapidity dependence of the anisotropic flow of charged particles in Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}}=2.76$ TeV, Phys.Lett. B762 (2016) 376-388
15. D. Adamov et al. (CERES/NA45 collaboration), Triangular flow of negative pions emitted in PbAu collisions at $\sqrt{s_{NN}}=17.3$ GeV, Nucl. Phys. A957 (2017) 99-108
16. T. Nonaka, T. Sugiura, S. Esumi, H. Masui, X. Luo, Importance of separated efficiencies between positively and negatively charged particles for cumulant calculations, Phys. Rev. C94 (2016) no.3, 034909
17. J. Adam et al. (ALICE collaboration), Anisotropic flow of charged particles in Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}}=5.02$ TeV, Phys. Rev. Lett. 116 (2016) no.13, 132302
18. A. Adare et al. (PHENIX collaboration), Single electron yields from semileptonic charm and bottom hadron decays in Au+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}}=200$ GeV, Phys. Rev.C93 (2016) 034904
19. S. Esumi, Collective flow measurements at RHIC energies, EPJ Web Conf. 141 (2017) 05001
20. J. Adam et al. (ALICE collaboration), Flow dominance and factorization of transverse momentum correlations in Pb-Pb collisions at the LHC, Phys.Rev.Lett. 118 (2017) no.16, 162302
21. C. Aidala et al. (PHENIX collaboration), Measurements of $B - j$ J/ψ at forward rapidity in p+p collisions at $\sqrt{s}=510$ GeV, Phys.Rev. D95 (2017) no.9, 092002
22. A. Adare et al. (PHENIX collaboration), Angular decay coefficients of J/ψ mesons at forward rapidity from p+p collisions at $\sqrt{s}=510$ GeV, Phys.Rev. D95 (2017) 092003
23. J. Adam et al. (ALICE collaboration), W and Z boson production in p-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV, JHEP 1702 (2017) 077
24. L. Adamczyk et al. (STAR Collaboration), Measurement of the cross section and longitudinal double-spin asymmetry for di-jet production in polarized pp collisions at $\sqrt{s} = 200$ GeV, Phys.Rev. D95 (2017) no.7, 071103
25. J. Adam et al. (ALICE collaboration), Determination of the event collision time with the ALICE detector at the LHC, Eur.Phys.J.Plus 132 (2017) no.2, 99
26. Y. Akiba, S. Esumi, K. Fukushima, H. Hamagaki, T. Hatsuda, T. Hirano, K. Shigaki, Proceedings, 25th International Conference on Ultra-Relativistic Nucleus-Nucleus Collisions (Quark Matter

- 2015) : Kobe, Japan, September 27-October 3, 2015, Nucl.Phys. A956 (2016) pp.1-974
27. H. Sako et al. (J-PARC Heavy-Ion Collaboration), Studies of high density baryon matter with high intensity heavy-ion beams at J-PARC, Nucl.Phys. A956 (2016) 850-853
 28. A. Adare et al. (PHENIX collaboration), Measurement of the relative yields of ψ (2S) to ψ (1S) mesons produced at forward and backward rapidity in p+p, p+Al, p+Au, and $^3\text{He}+\text{Au}$ collisions at $\sqrt{s_{\text{NN}}}=200$ GeV, Phys.Rev. C95 (2017) no.3, 034904
 29. A. Adare et al. (PHENIX collaboration), Non-perturbative-transverse-momentum effects and evolution in dihadron and direct photon-hadron angular correlations in p+p collisions at $\sqrt{s}=510$ GeV, Phys.Rev. D95 (2017) no.7, 072002
 30. C. Aidala et al. (PHENIX collaboration), Measurement of long-range angular correlations and azimuthal anisotropies in high-multiplicity p+Au collisions at $\sqrt{s_{\text{NN}}}=200$ GeV, Phys.Rev. C95 (2017) no.3, 034910
 31. J. Adam et al. (ALICE collaboration), Jet-like correlations with neutral pion triggers in pp and central PbPb collisions at 2.76 TeV, Phys.Lett. B763 (2016) 238-250
 32. L. Adamczyk et al. (STAR Collaboration), Υ production in U + U collisions at $\sqrt{s_{\text{NN}}} = 193$ GeV measured with the STAR experiment, Phys.Rev. C94 (2016) no.6, 064904
 33. L. Adamczyk et al. (STAR Collaboration), Charge-dependent directed flow in Cu+Au collisions at $\sqrt{s_{\text{NN}}} = 200$ GeV, Phys.Rev.Lett. 118 (2017) no.1, 012301
 34. L. Adamczyk et al. (STAR Collaboration), Direct virtual photon production in Au+Au collisions at $\sqrt{s_{\text{NN}}} = 200$ GeV, Phys.Lett. B770 (2017) 451-458
 35. J. Adam et al. (ALICE collaboration), J/ψ suppression at forward rapidity in Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{\text{NN}}}=5.02$ TeV, Phys.Lett. B766 (2017) 212-224
 36. J. Adam et al. (ALICE collaboration), Enhanced production of multi-strange hadrons in high-multiplicity proton-proton collisions, Nature Phys. (2017)
 37. A. Adare et al. (PHENIX collaboration), Measurements of double-helicity asymmetries in inclusive J/ψ production in longitudinally polarized p+p collisions at $s\sqrt{s}=510$ GeV, Phys.Rev. D94 (2016) no.11, 112008
 38. J. Adam et al. (ALICE collaboration), D-meson production in p-Pb collisions at $\sqrt{s_{\text{NN}}}=5.02$ TeV and in pp collisions at $s\sqrt{s}=7$ TeV, Phys.Rev. C94 (2016) no.5, 054908
 39. J. Adam et al. (ALICE collaboration), Measurement of azimuthal correlations of D mesons and charged particles in pp collisions at $s\sqrt{s}=7$ TeV and p-Pb collisions at $\sqrt{s_{\text{NN}}}=5.02$ TeV, Eur.Phys.J. C77 (2017) no.4, 245
 40. J. Adam et al. (ALICE collaboration), Correlated event-by-event fluctuations of flow harmonics in Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{\text{NN}}}=2.76$ TeV, Phys.Rev.Lett. 117 (2016) 182301
 41. J. Adam et al. (ALICE collaboration), Measurement of transverse energy at midrapidity in Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{\text{NN}}}=2.76$ TeV, Phys.Rev. C94 (2016) no.3, 034903
 42. J. Adam et al. (ALICE collaboration), Centrality dependence of charged jet production in pPb collisions at $\sqrt{s_{\text{NN}}} = 5.02$ TeV, Eur.Phys.J. C76 (2016) no.5, 271
 43. J. Adam et al. (ALICE collaboration), Centrality dependence of ψ (2S) suppression in p-Pb collisions at $\sqrt{s_{\text{NN}}} = 5.02$ TeV, JHEP 1606 (2016) 050

44. J. Adam et al. (ALICE collaboration), Measurement of D-meson production versus multiplicity in p-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}}=5.02$ TeV, JHEP 1608 (2016) 078
45. J. Adam et al. (ALICE collaboration), Particle identification in ALICE: a Bayesian approach, Eur.Phys.J.Plus 131 (2016) no.5, 168
46. J. Adam et al. (ALICE collaboration), Anisotropic flow of charged particles in Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}}=5.02$ TeV, Phys.Rev.Lett. 116 (2016) no.13, 132302
47. J. Adam et al. (ALICE collaboration), Production of $K^*(892)^0$ and (1020) in pPb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV, Eur.Phys.J. C76 (2016) no.5, 245
48. J. Adam et al. (ALICE collaboration), Multiplicity dependence of charged pion, kaon, and (anti)proton production at large transverse momentum in p-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV, Phys.Lett. B760 (2016) 720-735
49. J. Adam et al. (ALICE collaboration), Multipion Bose-Einstein correlations in pp, p-Pb, and Pb-Pb collisions at energies available at the CERN Large Hadron Collider, Phys.Rev. C93 (2016) no.5, 054908
50. J. Adam et al. (ALICE collaboration), Multi-strange baryon production in p-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}}=5.02$ TeV, Phys.Lett. B758 (2016) 389-401
51. J. Adam et al. (ALICE collaboration), Centrality dependence of the charged-particle multiplicity density at midrapidity in Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV, Phys.Rev.Lett. 116 (2016) no.22, 222302
52. J. Adam et al. (ALICE collaboration), Charge-dependent flow and the search for the chiral magnetic wave in Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV, Phys.Rev. C93 (2016) no.4, 044903
53. A. Adare et al. (PHENIX collaboration), Inclusive cross section and double-helicity asymmetry for π^0 production at midrapidity in p+p collisions at $\sqrt{s}=510$ GeV, Phys.Rev. D93 (2016) no.1, 011501
54. J. Adam et al. (ALICE collaboration), Measurement of an excess in the yield of J/ψ at very low pT in Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV, Phys.Rev.Lett. 116 (2016) no.22, 222301
55. J. Adam et al. (ALICE collaboration), Pseudorapidity and transverse-momentum distributions of charged particles in protonproton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV, Phys.Lett. B753 (2016) 319-329
56. J. Adam et al. (ALICE collaboration), Inclusive quarkonium production at forward rapidity in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV, Eur.Phys.J. C76 (2016) no.4, 184
57. A. Adare et al. (PHENIX collaboration), Azimuthally anisotropic emission of low-momentum direct photons in Au+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}}=200$ GeV, Phys.Rev. C94 (2016) no.6, 064901
58. J. Adam et al. (ALICE collaboration), Charged-particle multiplicities in protonproton collisions at $\sqrt{s}=0.9$ to 8 TeV, Eur.Phys.J. C77 (2017) no.1, 33
59. J. Adam et al. (ALICE collaboration), Measurement of electrons from heavy-flavour hadron decays in p-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV, Phys.Lett. B754 (2016) 81-93
60. J. Adam et al. (ALICE collaboration), Azimuthal anisotropy of charged jet production in $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV Pb-Pb collisions, Phys.Lett. B753 (2016) 511-525
61. J. Adam et al. (ALICE collaboration), Direct photon production in Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV, Phys.Lett. B754 (2016) 235-248

62. J. Adam et al. (ALICE collaboration), Centrality evolution of the charged-particle pseudorapidity density over a broad pseudorapidity range in Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV, Phys.Lett. B754 (2016) 373-385
63. J. Adam et al. (ALICE collaboration), Measurement of D_s^+ production and nuclear modification factor in Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV, JHEP 1603 (2016) 082
64. J. Adam et al. (ALICE collaboration), Multiplicity and transverse momentum evolution of charge-dependent correlations in pp, pPb, and PbPb collisions at the LHC, Eur.Phys.J. C76 (2016) no.2, 86
65. J. Adam et al. (ALICE collaboration), Transverse momentum dependence of D-meson production in Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV, JHEP 1603 (2016) 081
66. A. Adare et al. (PHENIX collaboration), Scaling properties of fractional momentum loss of high-pT hadrons in nucleus-nucleus collisions at $\sqrt{s_{NN}}$ from 62.4 GeV to 2.76 TeV, Phys.Rev. C93 (2016) no.2, 024911
67. A. Adare et al. (PHENIX collaboration), Transverse energy production and charged-particle multiplicity at midrapidity in various systems from $\sqrt{s_{NN}} = 7.7$ to 200 GeV, Phys.Rev. C93 (2016) no.2, 024901
68. A. Adare et al. (PHENIX collaboration), meson production in the forward/backward rapidity region in Cu+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV, Phys.Rev. C93 (2016) no.2, 024904
69. A. Adare et al. (PHENIX collaboration), Forward J/ψ production in U+U collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 193$ GeV, Phys.Rev. C93 (2016) no.3, 034903
70. A. Adare et al. (PHENIX collaboration), Dielectron production in Au+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV, Phys.Rev. C93 (2016) no.1, 014904
71. A. Adare et al. (PHENIX collaboration), Single electron yields from semileptonic charm and bottom hadron decays in Au+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV, Phys.Rev. C93 (2016) no.3, 034904
72. A. Adare et al. (PHENIX collaboration), Centrality-dependent modification of jet-production rates in deuteron-gold collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV, Phys.Rev.Lett. 116 (2016) no.12, 122301
73. A. Adare et al. (PHENIX collaboration), Study of cosmic ray events with high muon multiplicity using the ALICE detector at the CERN Large Hadron Collider, JCAP 1601 (2016) no.01, 032
74. J. Adam et al. (ALICE collaboration), Event shape engineering for inclusive spectra and elliptic flow in Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV, Phys.Rev. C93 (2016) no.3, 034916
75. J. Adam et al. (ALICE collaboration), Elliptic flow of muons from heavy-flavour hadron decays at forward rapidity in PbPb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV, Phys.Lett. B753 (2016) 41-56
76. J. Adam et al. (ALICE collaboration), Production of light nuclei and anti-nuclei in pp and Pb-Pb collisions at energies available at the CERN Large Hadron Collider, Phys.Rev. C93 (2016) no.2, 024917
77. J. Adam et al. (ALICE collaboration), Λ -meson production at forward rapidity in p-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV and in pp collisions at $\sqrt{s} = 2.76$ TeV, Phys.Lett. B768 (2017) 203-217
78. J. Adam et al. (ALICE collaboration), ${}^3_\Lambda H$ and ${}^3_\Lambda \bar{H}$ production in Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV, Phys.Lett. B754 (2016) 360-372

79. J. Adam et al. (ALICE collaboration), Differential studies of inclusive J/ψ and $\psi(2S)$ production at forward rapidity in Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}}=2.76$ TeV, JHEP 1605 (2016) 179
80. J. Adam et al. (ALICE collaboration), Forward-central two-particle correlations in p-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV, Phys.Lett. B753 (2016) 126-139
81. A. Adare et al. (PHENIX collaboration), Measurement of higher cumulants of net-charge multiplicity distributions in Au+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}}=7.7 - 200$ GeV, Phys.Rev. C93 (2016) no.1, 011901
82. J. Adam et al. (ALICE collaboration), Search for weakly decaying $\bar{\Lambda}\bar{n}$ and $\Lambda\Lambda$ exotic bound states in central Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV, Phys.Lett. B752 (2016) 267-277
83. J. Adam et al. (ALICE collaboration), Centrality dependence of the nuclear modification factor of charged pions, kaons, and protons in Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}}=2.76$ TeV, Phys.Rev. C93 (2016) no.3, 034913
84. A. Adare et al. (PHENIX collaboration), Measurement of parity-violating spin asymmetries in W^\pm production at midrapidity in longitudinally polarized p+p collisions, Phys.Rev. D93 (2016) no.5, 051103
85. R. Knobel, M. Diwisch, F. Bosch, D. Boutin, L. Chen, C. Dimopoulou, A. Dolinskii, B. Franczak, B. Franzke, H. Geissel, M. Hausmann, C. Kozhuharov, J. Kurcewicz, S.A. Litvinov, G. Martinez-Pinedo, M. Matos, M. Mazzocco, G. Munzenberg, S. Nakajima, C. Nociforo, F. Nolden, T. Ohtsubo, A. Ozawa, Z. Patyk, W.R. Pla, C. Scheidenberger, J. Stadlmann, M. Steck, B. Sun, T. Suzuki, P.M. Walker, H. Weick, M.-R. Wu, M. Winkler, T. Yamaguchi, "First direct mass measurements of stored neutron-rich $^{129,130,131}\text{Cd}$ isotopes with FRS-ESR", Physics Letters B 754 (2016) 288293.
86. A. Kusoglu, G. Georgiev, C. Sotty, D. L. Balabanski, A. Goasduff, Y. Ishii, Y. Abe, K. Asahi, M. Bostan, R. Chevrier, M. Chikamori, J. M. Daugas, T. Furukawa, H. Nishibata, Y. Ichikawa, Y. Ishibashi, R. Lozeva, H. Miyatake, D. Nagae, T. Nanao, M. Niikura, T. Niwa, S. Okada, A. Ozawa, Y. Saito, H. Shirai, H. Ueno, D. T. Yordanov, and N. Yoshida, "Magnetic moment of the $13/2^+$ isomeric state in ^{69}Cu : Spin alignment in the one-nucleon removal reaction", PHYSICAL REVIEW C 93, 054313 (2016).
87. R. Knobel, M. Diwisch, H. Geissel, Yu.A. Litvinov, Z. Patyk, W.R. Pla, C. Scheidenberger, B. Sun, H. Weick, F. Bosch, D. Boutin, L. Chen, C. Dimopoulou, A. Dolinskii, B. Franczak, B. Franzke, M. Hausmann, C. Kozhuharov, J. Kurcewicz, S.A. Litvinov, M. Matos, M. Mazzocco, G. Munzenberg, S. Nakajima, C. Nociforo, F. Nolden, T. Ohtsubo, A. Ozawa, J. Stadlmann, M. Steck, T. Suzuki, P.M. Walker, M. Winkler, and T. Yamaguchi, "New results from isochronous mass measurements of neutron-rich uranium fission fragments with the FRS-ESR-facility at GSI", Eur. Phys. J. A (2016) 52: 138 (11 page).
88. D. Q. Fang, Y. G. Ma, X. Y. Sun, P. Zhou, Y. Togano, N. Aoi, H. Baba, X. Z. Cai, X. G. Cao, J. G. Chen, Y. Fu, W. Guo, Y. Hara, T. Honda, Z. G. Hu, K. Ieki, Y. Ishibashi, Y. Ito, N. Iwasa, S. Kanno, T. Kawabata, H. Kimura, Y. Kondo, K. Kurita, M. Kurokawa, T. Moriguchi, H. Murakami, H. Ooishi, K. Okada, S. Ota, A. Ozawa, H. Sakurai, S. Shimoura, R. Shioda, E. Takeshita, S. Takeuchi, W. D. Tian, H. W. Wang, J. S. Wang, M. Wang, K. Yamada, Y.

- Yamada, Y. Yasuda, K. Yoneda, G. Q. Zhang, and T. Motobayashi, "Proton-proton correlations in distinguishing the two-proton emission mechanism of ^{23}Al and ^{22}Mg ", *PHYSICAL REVIEW C* 94, 044621 (2016).
89. X. Xu, P. Zhang, P. Shuai, R. J. Chen, X. L. Yan, Y. H. Zhang, M. Wang, Yu. A. Litvinov, H. S. Xu, T. Bao, X. C. Chen, H. Chen, C. Y. Fu, S. Kubono, Y. H. Lam, D. W. Liu, R. S. Mao, X. W. Ma, M. Z. Sun, X. L. Tu, Y. M. Xing, J. C. Yang, Y. J. Yuan, Q. Zeng, X. Zhou, X. H. Zhou, W. L. Zhan, S. Litvinov, K. Blaum, G. Audi, T. Uesaka, Y. Yamaguchi, T. Yamaguchi, A. Ozawa, B. H. Sun, Y. Sun, A. C. Dai, and F. R. Xu, "Identification of the Lowest $T = 2, J \pi = 0+$ Isobaric Analog State in ^{52}Co and Its Impact on the Understanding of β -Decay Properties of ^{52}Ni ", *Physical Review Letters*, 117, 182503 (2016).
 90. D. T. Tran, H. J. Ong, T. T. Nguyen, I. Tanihata, N. Aoi, Y. Ayyad, P. Y. Chan, M. Fukuda, T. Hashimoto, T. H. Hoang, E. Ideguchi, A. Inoue, T. Kawabata, L. H. Khiem, W. P. Lin, K. Matsuta, M. Mihara, S. Momota, D. Nagae, N. D. Nguyen, D. Nishimura, A. Ozawa, P. P. Ren, H. Sakaguchi, J. Tanaka, M. Takechi, S. Terashima, R. Wada, and T. Yamamoto, "Charge-changing cross-section measurements of ^{12}C at around 45A MeV and development of a Glauber model for incident energies 10 A2100 A MeV", *PHYSICAL REVIEW C* 94, 064604 (2016).
 91. S. Kimura, H. Ishiyama, H. Miyatake, Y. Hirayama, Y.X. Watanabe, H.S. Jung, M. Oyaizu, M. Mukai, S.C. Jeong, A. Ozawa, "Development of the detector system for b-decay spectroscopy at the KEK Isotope Separation System", *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B* 376 (2016) 338340.
 92. P. Schury, M. Wada, Y. Ito, D. Kaji, F. Arai, M. MacCormick, I. Murray, H. Haba, S. Jeong, S. Kimura, H. Koura, H. Miyatake, K. Morimoto, K. Morita, A. Ozawa, M. Rosenbusch, M. Reponen, P.-A. Soderstrom, A. Takamine, T. Tanaka, and H. Wollnik, "First online multireflection time-of-flight mass measurements of isobar chains produced by fusion-evaporation reactions: Toward identification of superheavy elements via mass spectroscopy", *PHYSICAL REVIEW C* 95, 011305(R) (2017).
 93. 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 (2017) 142153.
 94. M. Mukai, Y. Hirayama, H. Ishiyama, H. S. Jung, H. Miyatake, M. Oyaizu, Y. X. Watanabe, S. Kimura, A. Ozawa, S. C. Jeong, T. Sonoda, "Search for efficient laser resonance ionization schemes of tantalum using a newly developed time-of-flight mass-spectrometer in KISS", *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B* 376 (2016) 73-76.
 95. Mizuki Shirogane, Shinji Ejiri, Ryo Iwami, Kazuyuki Kanaya, Masakiyo Kitazawa, "Latent heat at the first order phase transition point of SU(3) gauge theory", *Phys. Rev. D* 94, No.1 (2016) ref.014506, pp.1-14
 96. S. Motoki, S. Aoki, T. Aoyama, K. Kanaya, H. Matsufuru, T. Miyamoto, Y. Namekawa, H. Nemura, Y. Taniguchi, S. Ueda, and N. Ukita, "Lattice QCD code Bridge++ on arithmetic accelerators", *PoS (LATTICE 2015) 040* (2016) 1-7

97. T. Umeda, S. Ejiri, R. Iwami, K. Kanaya, "Towards the QCD equation of state at the physical point using Wilson fermion", PoS (LATTICE 2015) 209 (2016) 1-7
98. Shinji Ejiri, Ryo Iwami, Mizuki Shirogane, Naoki Wakabayashi, Kazuyuki Kanaya, Masakiyo Kitazawa, Hiroshi Suzuki, Yusuke Taniguchi, Takashi Umeda, "Determination of latent heat at the finite temperature phase transition of SU(3) gauge theory", PoS (LATTICE 2016) 058 (2017) 1-7
99. Kazuyuki Kanaya, Shinji Ejiri, Ryo Iwami, Masakiyo Kitazawa, Hiroshi Suzuki, Yusuke Taniguchi, Takashi Umeda, Naoki Wakabayashi, "Equation of state in (2+1)-flavor QCD with gradient flow", PoS (LATTICE 2016) 063 (2017) 1-7
100. Yusuke Taniguchi, Shinji Ejiri, Kazuyuki Kanaya, Masakiyo Kitazawa, Hiroshi Suzuki, Takashi Umeda, Ryo Iwami, Naoki Wakabayashi, "Temperature dependence of topological susceptibility using gradient flow", PoS (LATTICE 2016) 064 (2017) 1-7
101. T. Umeda, S. Ejiri, R. Iwami, K. Kanaya, H. Ohno, A. Uji, N. Wakabayashi, S. Yoshida, "O(4) scaling analysis in two-flavor QCD at finite temperature and density with improved Wilson quarks", PoS (LATTICE 2016) 376 (2017) 1-7
102. Yusuke Taniguchi, Kazuyuki Kanaya, Hiroshi Suzuki, Takashi Umeda, "Topological susceptibility in finite temperature (2+1)-flavor QCD using gradient flow", Phys. Rev. D 95, No.5 (2017) ref.054502, pp.1-8
103. Yusuke Taniguchi, Shinji Ejiri, Ryo Iwami, Kazuyuki Kanaya, Masakiyo Kitazawa, Hiroshi Suzuki, Takashi Umeda, and Naoki Wakabayashi (WHOT-QCD Collaboration), "Exploring $N_f = 2 + 1$ QCD thermodynamics from gradient flow", arXiv:1609.01417[hep-lat], submitted
104. QCD phase transition at real chemical potential with canonical approach, A. Nakamura, S. Oka and Y. Taniguchi, Journal of High Energy Physics, 2016(2), 1-19
105. Study of high density phase transition in lattice QCD with canonical approach, A. Nakamura, S. Oka and Y. Taniguchi, PoS LATTICE **2015** (2016) 165.
106. A. Nakamura, S. Oka, A. Suzuki and Y. Taniguchi, Calculation of high-order cumulants with canonical ensemble method in lattice QCD PoS LATTICE **2015** (2016) 168.
107. R. Fuluda, A. Nakamura, S. Oka, S. Sakai, A. Suzuki and Y. Taniguchi, Beating the sign problem in finite density lattice QCD PoS LATTICE **2015** (2016) 208.

〈研究成果発表〉

[国際会議]

1. T. Chujo, "Operation and Plan, Hiroshima and Tsukuba", Sixth Annual ALICE Tire-1/Tire-2 Workshop, the Bergen University College, Bergen, Norway, April 18-20, 2016
2. O. Busch, "Jet Properties in Pb-Pb collisions at ALICE", LHC seminar, CERN, May 10 2016
3. T. Chujo, "Measurements of Jets and Photons in Heavy Ion Collisions at the Highest Beam Energy during the LHC-Run 2 by ALICE", 2016 Joint Workshop of the France-Korea (FKPPL) and France-Japan (TYL/FJPPL) Particle Physics Laboratories, Korea Institute for Advanced Study

- (KIAS), Seoul, May 18, 2016
4. O. Busch, "Jet Physics at ALICE", seminar PBM 70th birthday "QCD thermodynamics - pressure and passion", Mainz, Germany, August 24-26 2016
 5. O. Busch, "Jets in Pb-Pb collisions at ALICE", XII Quark confinement and the hadron spectrum, Makedonia Palace conference centre, Thessaloniki, Greece, August 28 - September 4 2016
 6. S. Sakai, "Heavy-flavour productions in the relativistic heavy ion collisions at the LHC", XII Quark confinement and the hadron spectrum, Makedonia Palace conference centre, Thessaloniki, Greece, August 28 - September 4 2016
 7. S. Esumi, "Collective flow measurements at RHIC energies", XLVI International Symposium on Multi particle Dynamics (ISMD2016), Jeju island, South Korea, August 29 - September 2, 2016
 8. S. Esumi, "Experimental Research On Quark Gluon Plasma With Relativistic Heavy-ion Collisions At RHIC", 26th International Nuclear Physics Conference (INPC 2016), Adelaide Convention Centre, Adelaide, Australia, 11-16 September 2016
 9. T. Chujo, "Forward Calorimeter upgrade in ALICE", ALICE Calo meeting, NRC Kurchatov Institute, 12-13 September 2016, NRC Kurchatov Institute, Moscow, Russia
 10. R. Hosokawa, "Recent jet spectra mesurement results and future prospects in ALICE with analysis level QA", ALICE Calo meeting, NRC Kurchatov Institute, 12-13 September 2016, NRC Kurchatov Institute, Moscow, Russia
 11. K. Ito, "Isolated photon-hadron correlations in pp collisions at 7 TeV in ALICE with EMCAL", ALICE Calo meeting, NRC Kurchatov Institute, 12-13 September 2016, NRC Kurchatov Institute, Moscow, Russia
 12. O. Busch, "Strangeness production and nuclear modification at LHC energies", TGSW 2016, Tsukuba International Congress Center, Tsukuba, Sep 17 - 19 2016
 13. T. Nonaka, "Fluctuation of Conserved Quantities to look for a Critical Point in Phase Diagram", TGSW 2016, Tsukuba International Congress Center, Tsukuba, Sep 17 - 19 2016
 14. H. Yokoyama, "Measurement of Inclusive Charged Jet Production in pp and Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV with ALICE", Hard Probes 2016, Wuhan, China, Sep 22-27 2016
 15. O. Busch, "Strangeness Production and Nuclear Modification at LHC energies", Hard Probes 2016, Wuhan, China, Sep 22-27 2016
 16. S. Esumi, "Collective flow measurements at RHIC energies", Korean Physics Society meeting, Gwangju, Korea, 19 - 21 October 2016
 17. S. Esumi, "Beam Energy Scan studies at RHIC and Flow studies in small system", Heavy-Ion Meeting, Chonnam National University, Gwangju, Korea, 22 October 2016
 18. T. Chujo, "Forward Calorimeter upgrade in ALICE", France-Japan SAKURA Workshop on small-x physics at the LHC, The University of Tokyo, Komaba campus, 2016-Oct-29
 19. H. Nakagomi, "Forward/Backward asymmetry of v_n in Cu+Au at RHIC-PHENIX", Quark Matter 2017, Hyatt Regency Chicago, USA, February 6-11, 2017
 20. T. Moriguchi, "Density distribution of ^{14}Be from reaction cross-section measurements" ., Nuclear chemistry 2016, Hilton San Antonio Airport, San Antonio, Texas, USA, 2016/12/08-09, (Invited, Oral presentation).

21. S. Suzuki, “Development of Secondary Electron Time Detector for Ion Beams” , International Nuclear Physics Conference (INPC2016), Adelaide Convention Center, Australia, 11-26 September 2016 (Oral presentation)
22. T. Moriguchi, “Density Distributions of ^{11}Li Deduced from Reaction Cross Section Measurements” , The International Nuclear Physics Conference(INPC)2016, Adelaide Convention Centre, Australia, 2016/09/11-16. (Poster)
23. S. Suzuki, “Development of time-of-flight detector for mass measurements of short-lived nuclei with the rare-RI ring”, International Symposium on Neutron Star Matter (NSMAT2016), 21-24 November 2016 (Poster)
24. Kazuyuki Kanaya 「Recent results of particle physics simulations at Tsukuba」 , Collaboration workshop between Tsukuba and Edinburgh universities (Univ. Edinburgh, Edinburgh, UK, June 16-17, 2016)
25. Kazuyuki Kanaya, Shinji Ejiri, Ryo Iwami, Masakiyo Kitazawa, Hiroshi Suzuki, Yusuke Taniguchi, Takashi Umeda, Naoki Wakabayashi 「Equation of state in (2+1)-flavor QCD with gradient flow」 , The XXXIV International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2016) (Univ. Southampton, Southampton, UK, July 24-30, 2016)
26. Yusuke Taniguchi, Shinji Ejiri, Ryo Iwami, Kazuyuki Kanaya, Masakiyo Kitazawa, Hiroshi Suzuki, Takashi Umeda, Naoki Wakabayashi 「Temperature dependence of topological susceptibility using gradient flow」 , The XXXIV International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2016) (Univ. Southampton, Southampton, UK, July 24-30, 2016)
27. Takashi Umeda, Shinji Ejiri, Ryo Iwami, Kazuyuki Kanaya, Hiroshi Ohno, Atsushi Uji, Naoki Wakabayashi, Shinsuke Yoshida 「O(4) scaling analysis in two-flavor QCD at finite temperature and density with improved Wilson quarks」 , The XXXIV International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2016) (Univ. Southampton, Southampton, UK, July 24-30, 2016) (poster)
28. Shinji Ejiri, Ryo Iwami, Kazuyuki Kanaya, Masakiyo Kitazawa, Hiroshi Suzuki, Mizuki Shirogane, Yusuke Taniguchi, Takashi Umeda, Naoki Wakabayashi 「Determination of latent heat at the finite temperature phase transition of SU(3) gauge theory」 , The XXXIV International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2016) (Univ. Southampton, Southampton, UK, July 24-30, 2016)
29. Kazuyuki Kanaya, Shinji Ejiri, Ryo Iwami, Masakiyo Kitazawa, Hiroshi Suzuki, Yusuke Taniguchi, Takashi Umeda, Naoki Wakabayashi 「Topological susceptibility in finite-temperature (2+1)- flavor QCD with gradient flow」 , The 14th International workshop on QCD in eXtreme conditions (XQCD 2016) (Plymouth Univ., Plymouth, UK, Aug. 1-3, 2016)
30. Yusuke Taniguchi, Shinji Ejiri, Ryo Iwami, Kazuyuki Kanaya, Masakiyo Kitazawa, Hiroshi Suzuki, Takashi Umeda, Naoki Wakabayashi 「QCD energy momentum tensor at finite temperature using gradient flow」 , The 14th International workshop on QCD in eXtreme conditions (XQCD 2016) (Plymouth Univ.,

Plymouth, UK, Aug. 1-3, 2016)

31. K. Kanaya 「Thermodynamics in (2+1)-flavor QCD with gradient flow method」, Phase structure of lattice field theories, Japanese-German Seminar 2016 (Niigata Univ., Niigata, Japan, Sept. 26-28, 2016) (invited)
32. Y. Taniguchi 「Temperature dependence of topological susceptibility using gradient flow」, Phase structure of lattice field theories, Japanese-German Seminar 2016 (Niigata, Japan, Sept. 26-28, 2016) (invited)
33. Study of sign problem in canonical approach, R. Fukuda, A. Nakamura, S. Oka, A. Suzuki and Y. Taniguchi
The 34th International Symposium on Lattice Field Theory (LATTICE2016), University of Southampton, UK, 24-30 July 2016
34. R. Fukuda, A. Nakamura, S. Oka, A. Suzuki and Y. Taniguchi, 「Study of the sign problem in canonical approach」, (Monte Carlo methods in computer simulations of complex systems, 2016.11.9)
35. Complex phase problem in the canonical approach, Asobu Suzuki, Phase structure of lattice field theories— Japanese-German Seminar 2016 —, Niigata University, 26-28 September, 2016

[国内学会・研究会]

1. 稲葉 基 「LHC-ALICE 実験のための FoCal-E PAD 検出器プロトタイプの前段信号処理回路の開発」、日本物理学会 2016 年秋季大会, 宮崎大学木花キャンパス、2016 年 9 月 21 日 (水)~24 日 (土)
2. 野中 俊宏 「Measurement of Sixth Order Cumulant of Net-Proton Multiplicity Distribution at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV from the STAR experiment」、日本物理学会 2016 年秋季大会, 宮崎大学木花キャンパス、2016 年 9 月 21 日 (水)~24 日 (土)
3. 田中 直斗 「LHC-ALICE 実験 $\sqrt{s_{NN}}2.76$ TeV Pb+Pb 衝突における量子力学的干渉効果のイベント平面に対する方位角依存性の研究」、日本物理学会 2016 年秋季大会, 宮崎大学木花キャンパス、2016 年 9 月 21 日 (水)~24 日 (土)
4. 細川 律也 「LHC-ALICE 実験 $\sqrt{s_{NN}}5.02$ TeV pp 衝突におけるジェット横運動量スペクトル測定」、日本物理学会 2016 年秋季大会, 宮崎大学木花キャンパス、2016 年 9 月 21 日 (水)~24 日 (土)
5. 杉浦 哲郎 「RHIC-STAR 実験金 + 金衝突における net-charge 揺らぎの $\Delta \eta$ 依存性」、日本物理学会 2016 年秋季大会, 宮崎大学木花キャンパス、2016 年 9 月 21 日 (水)~24 日 (土)
6. S. Esumi, "Experimental results on collective flow and correlation at RHIC and LHC", 30th Heavy Ion Cafe, June 11, 2016, RIKEN, Wako.
7. O. Busch, "Exploring the QGP with Jets at ALICE", 32nd Heavy Ion cafe, RIKEN, Wako, Jan. 23, 2017
8. T. Chujo, "Forward Calorimeter upgrade in ALICE", CiRfSE workshop, Jan 24, 2017 Univ. of Tsukuba
9. S. Mizuno, "Prompt identified particle spectra at RHIC-STAR", CiRfSE workshop, Jan 24, 2017 Univ. of Tsukuba
10. S. Sakai, "Heavy flavor measurements at LHC-ALICE", CiRfSE workshop, Jan 24, 2017 Univ. of

Tsukuba

11. H. Nakagomi, "Azimuthal anisotropy in CuAu collisions at RHIC-PHENIX", CiRfSE workshop, Jan 24, 2017 Univ. of Tsukuba
12. T. Nonaka, "Fluctuations at RHIC-STAR", CiRfSE workshop, Jan 24, 2017 Univ. of Tsukuba
13. N. Tanaka, "Azimuthally sensitive HBT measurements at LHC-ALICE", CiRfSE workshop, Jan 24, 2017 Univ. of Tsukuba
14. R. Aoyama, "Multi-particle correlations at RHIC-STAR", CiRfSE workshop, Jan 24, 2017 Univ. of Tsukuba
15. R. Hosokawa, "Jet measurements at LHC-ALICE", CiRfSE workshop, Jan 24, 2017 Univ. of Tsukuba
16. J. Lee, "Jet-hadron correlations at LHC-ALICE", CiRfSE workshop, Jan 24, 2017 Univ. of Tsukuba
17. K. Sato, "MRPC-TOF development for future experiments", CiRfSE workshop, Jan 24, 2017 Univ. of Tsukuba
18. 江角 晋一, 『RHIC における QCD 相転移領域の実験研究』、シンポジウム「原子核コライダーにおける QCD 物理: クォーク・グルーオンプラズマの発見を中心に」、日本物理学会第 72 回年次大会, 大阪大学 豊中キャンパス, 2017 年 3 月 17 日-20 日
19. 江角 晋一, 「RHIC ビームエネルギー走査実験と STAR 実験のアップグレード計画」, 日本物理学会第 72 回年次大会, 大阪大学 豊中キャンパス, 2017 年 3 月 17 日-20 日
20. 横山 広樹, 「The nuclear modification of charged jets in $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV Pb-Pb collisions at LHC-ALICE」, 日本物理学会第 72 回年次大会, 大阪大学 豊中キャンパス, 2017 年 3 月 17 日-20 日
21. 野中 俊宏, 「Centrality and Acceptance Dependence of Sixth Cumulant of Net-Proton Multiplicity Distribution at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV at the STAR experiment」, 日本物理学会第 72 回年次大会, 大阪大学 豊中キャンパス, 2017 年 3 月 17 日-20 日
22. 杉浦 哲郎, 「RHIC-STAR 実験金+金衝突における net-charge 揺らぎの $\Delta \eta$ 依存性」, 日本物理学会第 72 回年次大会, 大阪大学 豊中キャンパス, 2017 年 3 月 17 日-20 日
23. 工藤 咲子, 「RHIC-PHENIX 実験 3He+Au 衝突における 高運動量の荷電ハドロン生成量の測定」, 日本物理学会第 72 回年次大会, 大阪大学 豊中キャンパス, 2017 年 3 月 17 日-20 日
24. 川名 大地, 「LHC-ALICE 実験 超前方光子測定用電磁カロリメータ Si PAD 及び Si Pixel 統合型試作機のテストビーム実験による性能評価」(学部学生ポスターセッション), 日本物理学会第 72 回年次大会, 大阪大学 豊中キャンパス, 2017 年 3 月 17 日-20 日
25. 向井 もも, "Development of low-background gas-counter for the beta spectroscopy at KISS", 第 9 回 停止・低速不安定核ビームを用いた核分光研究会 (2017 年 3 月、原子力機構) (口頭発表)
26. 木村 創大, "Precision mass measurements of proton-rich nuclei in A~60 - 80 region with the multireflection time-of-flight mass spectrometer", 第 9 回 停止・低速不安定核ビームを用いた核分光研究会 (2017 年 3 月、原子力機構) (口頭発表)
27. 森口 哲朗, "筑波大学 12UD ベレトロンタンデム加速器の廃止措置", 第 29 回タンデム加速器及びその周辺技術の研究会, 筑波大学, 2016/06/30-07/01. (口頭発表)
28. 金谷 和至, 「Gradient flow 法で探る $N_f=2+1$ QCD 熱力学」, 熱場の量子論とその応用 2016 (TQFT 2016) (理化学研究所 iTHES, 和光, 8.22-24, 2016)

29. 白銀瑞樹, 江尻信司, 石見涼, 金谷和至, 北沢正清, 鈴木博, 谷口裕介, 梅田貴士, 若林直輝 「gradient flow による SU(3) ゲージ理論の 1 次相転移点付近での状態方程式」,
日本物理学会 (宮崎大学木花キャンパス, 宮崎, 9.20-24, 2016)
30. 金谷和至, 石見涼, 梅田貴士, 江尻信司, 北沢正清, 鈴木博, 谷口裕介, 若林直輝 「Gradient flow による (2+1)-flavor QCD 状態方程式」,
日本物理学会 (宮崎大学木花キャンパス, 宮崎, 9.20-24, 2016)
31. 谷口裕介, 石見涼, 梅田貴士, 江尻信司, 金谷和至, 北沢正清, 鈴木博, 若林直輝 「Gradient flow で探る topological susceptibility の温度依存性」,
日本物理学会 (宮崎大学木花キャンパス, 宮崎, 9.20-24, 2016)
32. 若林直輝, 谷口裕介, 石見涼, 梅田貴士, 江尻信司, 金谷和至, 北沢正清, 鈴木博 「有限温度クエンチ QCD における微分法による状態方程式の研究」,
日本物理学会 (宮崎大学木花キャンパス, 宮崎, 9.20-24, 2016)
33. 石見涼, 江尻信司, 金谷和至, 大野浩史, 宇治敦史, 梅田貴士, 若林直輝, 吉田信介 「O(4) スケーリングを用いた有限温度・密度 QCD の相転移線の曲率」,
日本物理学会 (宮崎大学木花キャンパス, 宮崎, 9.20-24, 2016)
34. 谷口裕介, 石見涼, 梅田貴士, 江尻信司, 金谷和至, 北沢正清, 鈴木博, 若林直輝 「Gradient flow を課したら中間子相関関数はどうなる?」,
日本物理学会第 72 回年次大会 (大阪大学, 大阪, Mar. 17-20, 2017)
35. 石見涼, 江尻信司, 金谷和至, 大野浩史, 宇治敦史, 梅田貴士, 吉田信介 「クロスオーバースケーリングを用いた有限温度・密度 QCD の相構造」,
日本物理学会第 72 回年次大会 (大阪大学, 大阪, Mar. 17-20, 2017)
36. 白銀瑞樹, 江尻信司, 石見涼, 金谷和至, 北沢正清, 鈴木博, 谷口裕介, 梅田貴士, 若林直輝 「Gradient flow を用いた SU(3) ゲージ理論における相転移近傍の熱力学量の研究」,
日本物理学会第 72 回年次大会 (大阪大学, 大阪, Mar. 17-20, 2017)
37. 若林直輝, 江尻信司, 石見涼, 金谷和至, 北沢正清, 鈴木博, 谷口裕介, 梅田貴士, 白銀瑞樹 「SU(3) 格子ゲージ理論における相転移点での二相共存状態」,
日本物理学会第 72 回年次大会 (大阪大学, 大阪, Mar. 17-20, 2017)
38. カノニカル法における符号問題の研究, 鈴木遊, 岡将太郎, 谷口裕介, 中村純
日本物理学会 2016 年秋季大会, 宮崎大学, 2016 年 9 月 21 日-24 日
39. 鈴木遊, 谷口裕介, 「Gradient Flow を用いた K 中間子の B パラメータの計算」, (日本物理学会第 72 回年次大会, 2017.3.17)
40. カノニカル法における分配関数の位相の研究, 鈴木遊, 岡将太郎, 谷口裕介, 中村純,
理研シンポジウム・iTHES 研究会 「熱場の量子論とその応用」, 理化学研究所, 2016 年 8 月 22 日-24 日

5 環境エネルギー材料研究拠点 活動報告

拠点長 鍋島 達弥 (数理物質系化学域 教授)

環境エネルギー材料研究拠点では、高効率なエネルギー変換や物質変換およびエネルギー貯蔵、さらには再生可能エネルギーの高効率利用を可能にする革新的物質・素材・材料開発に関する先導的な研究を行い、持続可能な社会の構築に貢献することを重要なミッションとしている。また独自の基礎的で萌芽的な研究と応用研究をつなぐ学理の構築も本拠点の重要な使命である。本拠点は物質変換材料部門とエネルギー貯蔵・変換物質部門の二つの部門からなるが、異分野融合による研究の推進を旨とし、数理科学研究推進室、計算科学研究センター、特に学際物質科学研究センターとの密接な連携や、つくば地区にある高エネルギー加速器研究機構、物質・材料研究機構、産業技術総合研究所との積極的な連携にも重きを置いている。また平成 27 年度立ち上げた、バイオエネルギー研究チームの活動も活発であり、より多角的な観点から連携融合型の研究を推進している。また 2016 年 9 月には TGSW でのシンポジウムの開催、2017 年 3 月には TIMS との共同開催でドイツの CENIDE、台湾の国立清華大学とのジョイントシンポジウムを行うなど、国際的な連携もさらに推進することができた。本拠点はこうした活動を通じてつくば地区の環境エネルギー研究のハブ的役割も担う組織となることを目指し、取り組みをさらに活性化している。

(1) 物質変換材料部門の研究

物質変換材料部門では、レアメタルの白金に代わる燃料電池炭素触媒、CO₂ の吸蔵材料、CO₂ の活性化に関する不均一系触媒の研究、 π 共役分子の設計を基本とする電子・光機能性高分子の創製と応用に関する研究、自己組織化ポリマー光共振器、および人工光合成に関する研究を行った。

主な成果として、中村らは Cu 触媒表面での CO₂ 活性化に関する研究で成果を挙げた。Cu 表面でのホルメート (HCOO) 吸着種の分解のダイナミクスを詳細に調べた。分解で CO₂ 分子が生成するが、その並進速度の角度分布および温度依存性を測定した。脱離 CO₂ は Cu 表面と熱的非平衡状態にあり、かつ並進エネルギーが 0.1 eV と小さいことがわかり、振動が励起した CO₂ の脱離が示唆された。この結果は、その逆反応である CO₂ 水素化の新しい反応ダイナミクスの存在を示唆している。神原らは、均一系 Pd 触媒を利用したアトム・ステップエコノミカルな高分子半導体の合成手法に関する研究で成果を挙げた。有機光電子デバイスに利用される高分子半導体に要求される純度は極めて高く、製造過程の段階から極力不純物を排除する生産プロセスが強く望まれている。従って、この合成手法は、簡便で実用的な高分子半導体製造プロセスとして、利用価値は非常に高い。山本らは、 π 共役有機分子・高分子の自己組織化により形成するマイクロ球体光共振器を用いた長距離光エネルギー伝搬に関する研究を行い、光閉じ込めにより 10 ミクロン以上に及ぶ高効率なエネルギー移動と波長変換を実現した。また、酸化グラフェン-ペプチド-白金ナノ粒子の段階的な自己組織化により酸化グラフェン表面に高密度に白金ナノ粒子を固定化し、光触媒効果の増強や効率的な水素発生を実現した。

(2) エネルギー貯蔵・変換物質部門の研究

チタン酸化物同一ホストに対するイオン拡散係数とその活性化エネルギーのイオン種依存性を明らかにした。Na₂Ti₃O₇ では、伝導パスが同一であるにもかかわらず、イオン拡散係数とその活性化エネルギーのイオン種依存性が小さいことが分かった。マンガンをプルシャンブルー類似体のマンガサイトを他の遷移金属に部分置換することにより、電池特性 (レート特性、サイクル特性) が著しく向上することを見出した。これは、元素置換がマンガサイトの不安定性を抑制するためと考えられ

る。層状酸化物 $\text{NaCo}_{1/2}\text{Fe}_{1/2}\text{O}_2$ の合成条件が、放電曲線のサイクル特性に著しい影響を及ぼすことを見出した。遷移金属の組成揺らぎがサイクル特性に重要な影響を及ぼしていることが、明らかとなった。マンガン・プルシャンブルー類似体同一ホストに対するイオン拡散係数とその活性化エネルギーのイオン種依存性を明らかにした。得られた結果を、イオン伝導パスの違いで説明した。コバルト・プルシャンブルー類似体の二つの相が異なった色を示すことに着目し、受電プロセスにおける相分離ダイナミクスのその場観察に成功した。その結果、 $10\ \mu\text{m}$ といったマクロな相分離が起こり、相境界が活性点であることが明らかとなった。 Na_xCoO_2 薄膜試料を作成し、X線マイクロ回折を用いて、各相のサイズを決定した。O3'相のドメインサイズは粒子サイズと同程度であることが明らかとなった。一連の層状酸化物を合成し、EXAFS局所構造解析により、M-O結合長を決定した。その結果、ゲスト遷移金属周りのM-O結合長は、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。プルシャンブルー類似体はリチウムに対して、1V程度の低電圧動作を示すことが報告されている。この定電圧動作の機構を明らかにするために、放射光X線を利用したX線回折とX線吸収を系統的に行った。低電圧動作の起源は、主に、プルシャンブルー類似体が分解して生成したFe金属のコンバージョン反応であることが分かった。

SPring-8のBL03XUビームラインで10~100ミリ秒間隔で製膜中の回折パターン変化を調べ、スピントコートによる高分子膜生成プロセスを解明した。紫から青、緑、黄色までの様々な発光を、溶媒を変えるだけで示す新しいZnを含む化合物の構造決定を行った。金属六ホウ化物 LaB_6 と半導体の物性を示す BaB_6 の精密電子密度分布解析から、物性の違いに起因する電子密度の検出を行った。

[国際会議]

1. 平成28年9月17日~19日、つくば国際会議場エポカルで開催されたTGSW2016 (Tsukuba Global Science Week 2016)において、数理物質融合科学センターの活動の一環としてシンポジウムを開催した。9月19日に行われたSession 7:グリーンイノベーションのシンポジウムでは、Ching-Shun Ku(NSRRC, Taiwan)、Pirmin A. Ulmann (IMERYS Graphite & Carbon, Switzerland)、Xike Gao (Shanghai Institute of Organic Chemistry, China)、Wei-Shi Li (Shanghai Institute of Organic Chemistry, China)の4名の海外からの招待講演者と2名の学内招待講演者が研究発表を行った。参加人数30名。
2. 平成29年3月10日~11日、筑波大学総合研究棟B棟0110公開講義室において、2017 TMS-CENIDE-NTHU Joint Symposium on Nanoscience and Nanotechnology(Workshops of CiRfSE and Pre-Strategic Initiatives)を開催した。ドイツCENIDEより5名、台湾国立清華大学より1名の招待講演者、国内では北陸先端大学院大学、慶應義塾大学、NIMS、NECより4名の招待講演者が講演を行った。筑波大学からは11名の教員が講演を行った。参加人数72名。

[国内学会・研究会]

1. 平成28年5月20日、数理物質科学研究科で分野横断的に新設される大学院教育コース「放射光物質科学コース」のキックオフとして、CiRfSE、TMS共催で「放射光物質科学コース キックオフシンポジウム~放射光利用による科学者・技術者としてのキャリアアップ」を開催した。教員6名のほか、外部組織より5名の専門家を招き放射光利用についての最新の講演を行った。また、多数の学生が積極

- 的に参加し活発なシンポジウムとなった。参加人数 35 名
2. TIMS 研究交流会（平成 28 年 7 月 1 日、第三エリア 3 B 402 室）を共催した。TIMS のメンバーによる 4 件の発表と、京都大学の中條善樹教授、および東北大学の京谷隆教授の招待講演を行った。参加人数 69 名。
 3. TIA かけはしプロジェクトとの共催で、「白金フリー燃料電池カーボン触媒イノベーション」ワークショップを平成 28 年 10 月 31 日、筑波大学 大学会館国際会議室で開催した。豊開真之氏（帝人）、山田泰弘氏（千葉大学）、羽島浩章氏（産総研）の 3 名が講演を行った。参加人数 50 名
 4. 平成 28 年 10 月に発足した筑波大学プレ戦略イニシアティブ「光と物質・生命科学のアンサンプルによる新現象の発掘と解明」との共催でキックオフシンポジウムを開催した。学内より 12 名の研究発表が行われた。参加人数 54 名。
 5. 物質科学セミナーの共催として、平成 28 年 11 月 16 日、(株) 豊田中央研究所の中野秀之氏の講演会を筑波大学 3 B 213 プレゼンルームで行った。講演タイトルは「劈開できないシリコンから二次元シリコン物質を創る技術」 参加人数 20 名。
 6. 平成 28 年 11 月 19 日、Workshop on Advanced Structural Study using Spring-8 を筑波大学自然系学系 B 棟 118 講義室で行った。放射光、中性子など最先端量子ビームを利用した研究に関して活発な議論が行われた。参加人数 16 名。
 7. 平成 28 年 11 月 21 日、筑波大学自然系学系 B 棟 114 会議室において、かけはし「未利用熱エネルギーを変換する熱発電素子」第一回研究会が開催された。山本淳氏（産総研）、田中喜典氏（物材機構）、小野寛太氏（KEK）、筑波大学より小林航助教が研究成果を報告した。参加人数：18 名
 8. DAAD-筑波大学パートナーシッププログラムの一環として、平成 28 年 11 月 22 日、筑波大学 3 B 213 において、ドイツ Duisburg-Essen 大学化学科 Malte Behrens 教授を講師に招き、銅-亜鉛触媒によるメタノール合成に関するセミナーを開催した。参加人数 20 名
 9. 物質科学セミナーの共催として、平成 28 年 11 月 24 日、Professor Dr. Aart W. Kleijn（Director, Center of Interface Dynamics for Sustainability, Institute of Materials, CAEP）の講演会を筑波大学 3 B 213 において開催した。参加人数 20 名
 10. 平成 29 年 1 月 23 日、24 日、第 3 回 CiRfSE ワークショップを開催した。23 日は各拠点の成果発表会および運営協議会が行われ、24 日は部門別成果発表会と、午後は各部門に分かれて講演会を行った。

5.1 物質変換材料部門

部門長

中村 潤児（数理物質系物質工学域 教授）

構成教員

神原 貴樹（数理物質系物質工学域 教授）

山本 洋平（数理物質系物質工学域 准教授）

近藤 剛弘（数理物質系物質工学域 准教授）

連携教員

鍋島 達弥（数理物質系化学域 教授）

西堀 英治（数理物質系物理学域 教授）

藤田 淳一 (数理物質系理工学域 教授)
木島 正志 (数理物質系物質工学域 教授)
岡田 晋 (数理物質系物理学域 教授)
後藤 博正 (数理物質系物質工学域 教授)
小笠原 寛人 (米・スタンフォード大学・スタンフォード放射光研究所 教授)
Mathias Ulbricht (ドイツ University of Duisburk-Essen 教授)
Stephan Barcikowski (ドイツ University of Duisburk-Essen 教授)
吉信 淳 (東京大学物性研究所 教授)
森川 良忠 (大阪大学大学院工学研究科 教授)
藤谷 忠博 (産業技術総合研究所 触媒化学融合研究センター 総括研究主幹)
周 豪慎 (産業技術総合研究所 省エネルギー研究部門エネルギー界面技術グループ グループ長)
森 利之 (物質・材料研究機構 環境・エネルギー材料部門電池材料ユニット燃料電池材料グループ
グループリーダー)
竹口 雅樹 (物質・材料研究機構 中核機能部門電子顕微鏡ステーション ステーション長)

物質変換材料部門では、レアメタルの白金に代わる燃料電池炭素触媒、CO₂の吸蔵材料、CO₂の活性化に関する不均一系触媒の研究、 π 共役分子の設計を基本とする電子・光機能性高分子の創製と応用に関する研究、自己組織化ポリマー光共振器、および人工光合成に関する研究を行った。

主な成果として、中村らは Cu 触媒表面での CO₂ 活性化に関する研究で成果を挙げ、Angewandte Chemie のホットペーパー (トップ 10%) に選ばれる論文を発表した。本研究では、Cu 表面でのホルメート (HCOO) 吸着種の分解のダイナミクスを詳細に調べた。分解で CO₂ 分子が生成するが、その並進速度の角度分布および温度依存性を測定した。脱離 CO₂ は Cu 表面と熱的非平衡状態にあり、かつ並進エネルギーが 0.1 eV と小さいことがわかり、振動が励起した CO₂ の脱離が示唆された。この結果は、その逆反応である CO₂ の水素化の新しい対応のダイナミクスの存在を示唆している。そのことは現在進行中の実験および DFT 計算によって確かめられつつある。

神原らは、均一系 Pd 触媒を利用したアトム・ステップエコノミカルな高分子半導体の合成手法に関する研究で成果を挙げ、アメリカ化学会、英国化学会の高分子化学の学術雑誌 (Macromolecules, Polymer Chemistry) に論文を発表した。有機光電子デバイスに利用される高分子半導体に要求される純度は極めて高く、製造過程の段階から極力不純物を排除する生産プロセスが強く望まれている。従って、この合成手法は、簡便で実用的な高分子半導体製造プロセスとして、利用価値は非常に高い。

山本らは、 π 共役有機分子・高分子の自己組織化により形成するマイクロ球体光共振器を用いた長距離光エネルギー伝搬に関する研究を行い、光閉じ込めにより 10 ミクロン以上に及ぶ高効率なエネルギー移動と波長変換を実現し、ACS Nano 誌に 2 報の論文を発表した。また、酸化グラフェンペプチド-白金ナノ粒子の段階的な自己組織化により酸化グラフェン表面に高密度に白金ナノ粒子を固定化し、光触媒効果の増強や効率的な水素発生を実現した (ACS Appl. Mater. Interfaces)。

(1) 窒素ドーパカーボン触媒

燃料電池の酸素還元 (ORR) 用白金代替触媒として、窒素ドーパカーボン触媒が注目を集めている。しかし、未だ実用化し得る活性に到達していないのが現状である。さらに、窒素ドーパカーボン触媒の活性点やメカニズムが明らかになっていない。我々の研究グループは 2016 年にピリジン型窒素が活性点を形成することを明らかにし Science 誌で報告した。この研究成果によって、触媒設計の方向性が導か

れた。しかし、さらなる高活性化を目指すためには、ピリジン型窒素近傍の局所構造と活性の関係を明らかにすることが必要である。そこで、我々は、ピリジン型窒素を含有する π 共役系分子（図 69）をカーボンブラックなどの炭素担体に付着させ、回転電極実験によって、次式の酸素還元反応を行った。

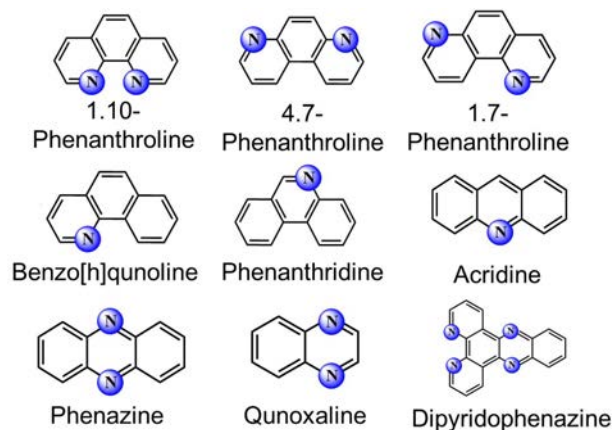


図 69 種々のピリジン型窒素含有共役系分子

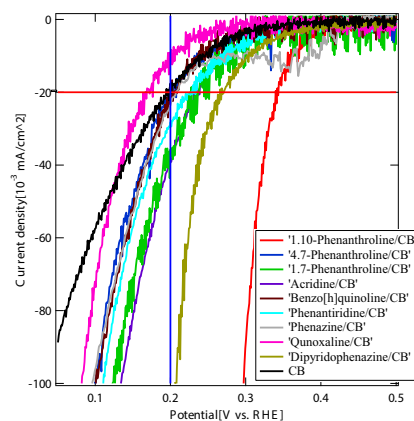


図 70 種々のピリジン型窒素を含む分子の ORR 活性

その結果、図 70 に示すように、ORR 活性を観測し、ピリジン型窒素分子のみでも触媒活性を有することがわかった。さらに、窒素原子 2 個を含む 1,10-フェナントロリンが高活性を示すことがわかった。0.1 M H₂SO₄ 中では、1,10-フェナントロリンの窒素原子はプロトンが付加することが XPS の結果からわかった。さらに、0.2 V の電位を印加すると N1s のピークは 2 本に分裂し、フェナントロリンの 2 個の窒素原子の内、1 つは水素と結合し、もう 1 つはピリジン型窒素原子の状態が存在することが示された。窒素種の状態が ORR 活性に大きく影響するものとして詳細なメカニズムを研究中である。

(2) 窒素をドーブしたグラファイト系炭素による CO₂ 吸着の研究

大気中の CO₂ 分子を吸着する材料の研究が広く行われている。我々は、窒素をドーブしたグラファイト系炭素による CO₂ 吸着の研究を進めている。炭素材料は常温常圧では CO₂ の吸着能が全くないが、窒素をドーブすると CO₂ 吸着能が生成することが知られている。我々は最近、ピリジン型窒素と呼ばれる窒素種（炭素と二配位で結合した窒素種）が、炭素材料への CO₂ 吸着サイト形成に必要な窒素種であることを、モデル触媒を用いた解析から明らかにした。そこで本研究では炭素材料の中でも表面積が大きく扱いやすいグラフェン粉末に着目し、ピリジン型窒素をドーブしたグラフェン粉末を調製し、二酸化炭素吸着に対する基礎的な知見や、どのような混合ガスにおいてどのくらいの分離選択性が得られるかなどの基礎的な知見を昇温脱離法と呼ばれる実験手法を中心に調べた。即ち本研究の目的は窒素をドーブしたグラフェン粉末を用いた新しい CO₂ 分離吸着材料を開発することである。

試料はグラファイト粉末を酸化した後に剥離し還元するという手順でグラフェン粉末を得たのち、アンモニア雰囲気加熱することで調製した。X 線光電子分光によりピリジン型窒素が支配的であることが確認できた窒素ドーブグラフェン粉末では二酸化炭素が常温常圧で吸着し、約 100 °C で脱離することがわかった（図 71）。また、この二酸化炭素の吸脱着は 500 °C までの加熱を伴う数十回以上の連続使用に耐える耐久性を有しており、メタン、窒素、酸素による被毒を受けないことがわかった。一方で二酸化炭素の室温における初期吸着確率が 10^{-13} と低いことが昇温脱離計測の解析（図 71(b)）からわかった。この初期吸着確率はグラファイト基板をモデルとした測定で得られた初期吸着確率 (1×10^{-2}) と比べて 10 ケタ以上も低い値である。これは、酸素官能基の影響や CO₂ が室温で脱離するような弱い CO₂

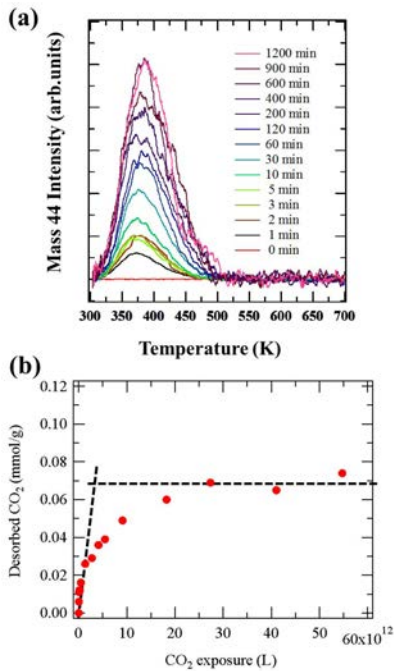


図 71 窒素ドープグラフェン粉末における (a)CO₂ 昇温脱離スペクトルと (b) ピーク強度の CO₂ 曝露量依存性

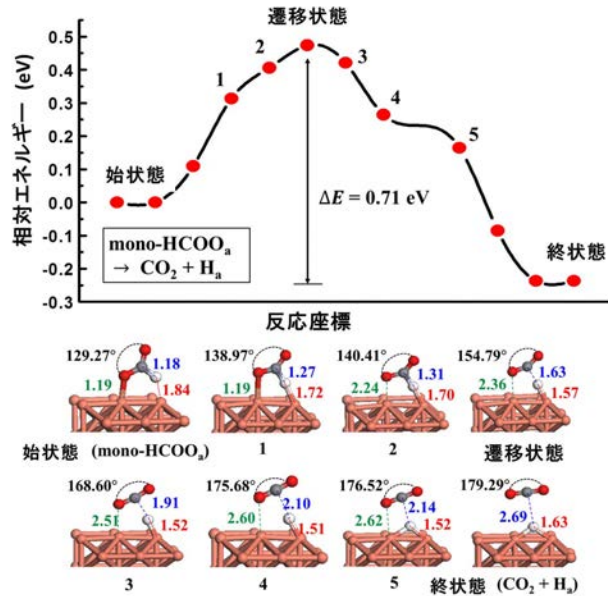


図 72 DFT 計算により得られた単座フォルメート種 (mono-HCOOa) の分解反応におけるエネルギーダイアグラム.

吸着サイトの存在やグラフェンのチャージの不均一性などに由来するものと考えられる。いずれにしても、本研究により、窒素ドープ炭素材料が極めて有用な CO₂ 吸着材として利用できる可能性が具体的に示され、また、この初期吸着確率の改善が実用化に向けた重要な課題であることも明らかとなった。

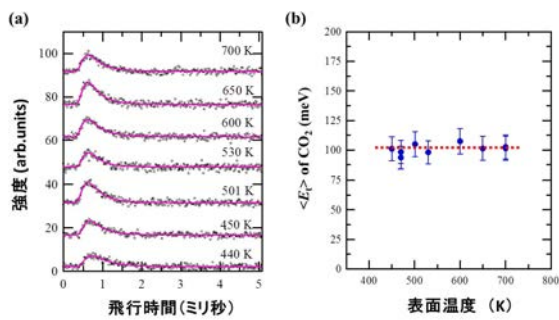


図 73 定常状態角度分解飛行時間計測の表面温度依存性. (a) 表面垂直方向 ($\theta = 0^\circ$) へ脱離する CO₂ の並進エネルギー分布の表面温度依存性. (b) エネルギー分布の平均値

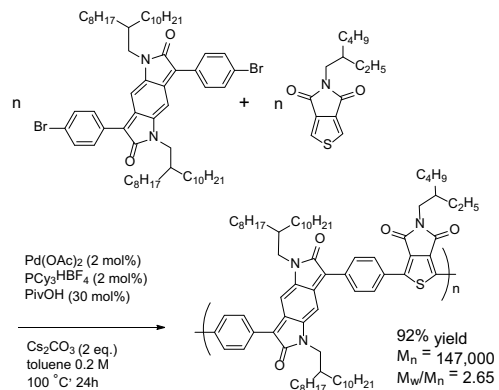


図 74 Scheme 1: Polymer 1 の合成

(3) 銅触媒表面における特異なエネルギー移動のダイナミクスを解明

メタノール合成は CO₂ の最も有効な変換方法の 1 つであるが、現行の合成プロセスは 250 °C・50 気圧という高温・高圧で行われており、低コスト化が強く望まれている。CO₂ は銅触媒表面上で、まずフォルメート種という中間生成物を形成することが知られているが、この最初の重要な反応のメカニズムが明らかとなっておらず、触媒反応としては稀な Eley-Rideal 型のメカニズムであるという提案が

これまでの研究によってなされていた。これは CO_2 が銅触媒表面には吸着せずに直接銅表面上の水素原子 (Ha) と化学反応をしてフォルメート種を形成するという反応メカニズムである ($\text{CO}_2 + \text{Ha} \rightarrow \text{HCOOa}$)。

本研究では触媒反応が定常的に起こっている状況で、化学反応生成物の分子が放出してくる方向やその並進エネルギーを測定することが可能な、定常状態角度分解飛行時間計測法という方法を用いて、銅触媒表面におけるフォルメート種の分解反応 ($\text{HCOOa} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{Ha}$) の反応熱がどのように散逸するかを調べた。この結果、フォルメート種が分解する際に発生する反応熱 (図 72) は触媒表面には散逸せず、 CO_2 の並進エネルギーや振動エネルギーに移動していることが明らかとなった (図 73)。フォルメート種の分解反応がこのような熱非平衡的に進行していることが解明したことにより、 CO_2 からフォルメート種を生成する触媒反応が、Eley-Rideal 型のメカニズムであるという過去の提案が強力に支持される結果となった。これは、触媒を加熱しなくても CO_2 だけにエネルギーを与えてあげればフォルメート種が生成できることを示唆しており、 CO_2 からのメタノール室温合成を実現する道筋が開かれた。

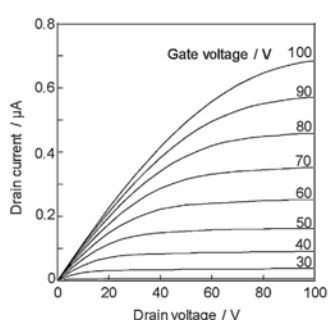


図 75 Polymer 1 の FET 特性

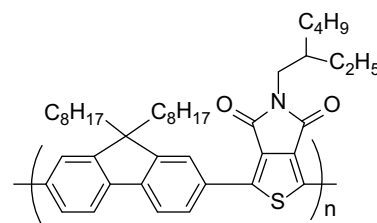
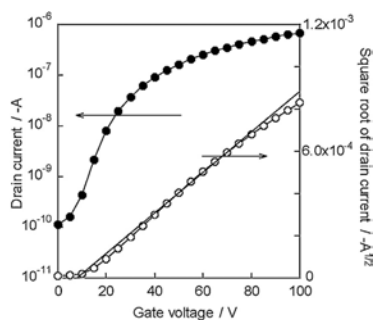


図 76 Scheme 2: Polymer 2

(4) 直接的アリール化重合法を利用した n 型高分子半導体の合成

π 共役高分子は高分子半導体として機能することから、近年、有機 EL 素子や有機薄膜太陽電池などの光電子デバイスへの応用が期待され、国内外で広範な研究が進められている。我々は近年、芳香族化合物の C-H 結合を直接反応点として利用する直接的アリール化反応に注目し、 π 共役高分子を効率よく合成する手法の開発に取り組んでいる。本年度は、この簡便で低環境負荷な合成法を利用して、n 型高分子半導体の設計・合成を行った。

対象モノマーとして 5-(2-ethylhexyl)-thieno- [3,4c]-pyrrole-4,6-dione (TPD) を、カップリングパートナーとして 3,7-bis(4-bromophenyl)- 1,5-bis(2-octyldecyl)benzo[1,2-b:4,5-b']dipyrrole-2,6(1H,5H)-dione (Br₂-BDP) を選択し、Scheme 1 (図 74) に示す反応条件で目的のポリマー (Polymer 1) を高収率で得た。

得られた Polymer 1 は電界効果型トランジスタ (FET) に組み込むことで、n 型半導体として機能することを確認した (図 75)。一方、対照試料として、BDP ユニートをフルオレンに置き換えた Polymer 2 (Scheme 2 (図 76)) を用いて作製した FET では n 型半導体特性は観測されなかった。従って、電子親和力の大きな芳香族ユニットの選択が n 型半導体特性発現のポイントであることが確認できた。

(5) 構造欠陥のない高分子半導体材料の合成

これまで開発してきた C-H 結合を反応点とするカップリング反応を用いた直接的アリール化重縮合は、

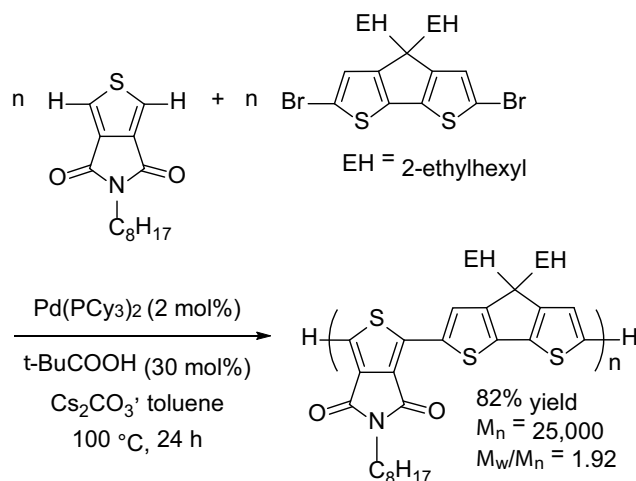


図 77 Scheme 3: 構造欠陥のない Polymer 3 の合成

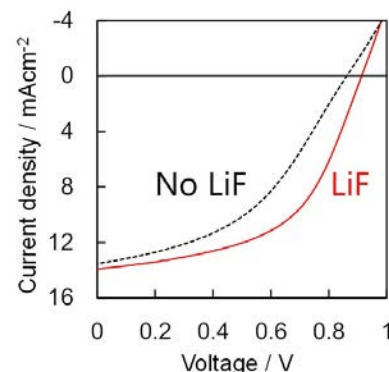


図 78 Polymer 3 の OPV 特性。中間層 (LiF) の導入により特性が向上する。

有機薄膜太陽電池などの材料合成法として、従来法よりも優位性があることを見出してきた。しかし、ドナー・アクセプター構造を有する高分子半導体材料の合成に応用した際に、繰り返し構造に乱れが生じるという問題があった。この構造欠陥は材料特性の低下につながることから、構造欠陥のない高分子半導体材料の合成手法の確立を行った。特に、Pd 触媒と反応の溶媒に着目して検討を行ったところ、Pd(PCy₃)₂ を用いること、反応溶媒に低極性のトルエンを用いることが構造欠陥の低減に有効であることが明らかになった。Scheme 3 (図 77) に示すドナー・アクセプターポリマー (Polymer 3) の合成では、収率 82% で分子量 25000 のポリマーが得られる (表 8)。この結果は、過去に報告された右田-小杉-Stille カップリングを用いた従来法の結果と比較して高分子量かつ高収率であり、十分な効率であることを示した。さらに特性を低下させる Br が末端に残っておらず、元素分析からも高純度であることが確認された。この高い純度は再沈殿と溶媒での洗浄のみで得られており、ソックスレー抽出や HPLC による精製の必要はない。このポリマーの太陽電池特性を、過去の報告と同じ素子構成で評価したところ光電変換効率は最大で 5.5% であった。これは過去の報告にある 5.2% と同程度である。従来法ではソックスレー抽出によって精製されていることから、本手法では簡便な精製手法でも従来法と同等の品質が得られることが明らかになった。さらに、素子構造を最適化し、LiF 層を導入することによって最大で 6.8% の変換効率が得られた。合成法の改善により高品質な材料が簡便に得られるようになり、さらにデバイス構造の最適化と組み合わせることで高い変換効率が達成された。

表 8 Polymer 3 の重合結果および太陽電池特性

	収率	分子量	光電変換効率 ^{a)} [/%]
従来法	50	15000	5.2
本手法	82	25000	5.5
			6.8 (LiF 層)

^{a)} ITO/PEDOT:PSS/Polymer 3:PC70BM(1:2)/Interlayer/Al

(6) ワンポット合成技術による高分子半導体の合成

(4) (5) で示した芳香族モノマーの C-H 結合を反応点とする直接的アール化重合は、従来法に比べて環

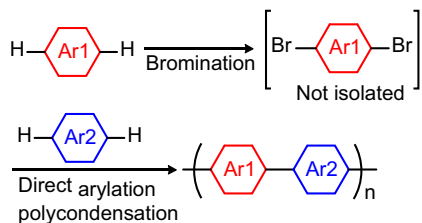


図 79 Scheme 4: π 共役高分子のワンポット合成技術

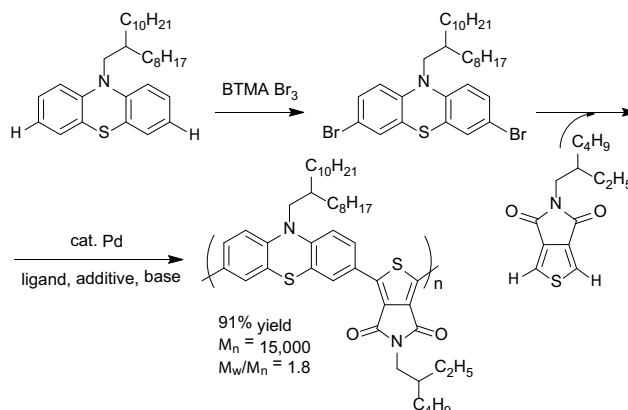


図 80 Scheme 5: Polymer 4 の合成

境調和性が高く、安価で入手容易な原料を利用して π 共役高分子を合成することができる。しかし、この合成法では、依然として純度の高いジハロゲン化芳香族化合物を事前に合成単離する必要がある。この課題に対して、我々は芳香族化合物の臭素化と直接的アリール化反応を連続的に進行させるワンポット合成技術を開発した (Scheme 4(図 79))。本年度は、この合成法の基質適用範囲の拡張を図るとともに、発光性高分子半導体の設計・合成を行った。

対象モノマーとしてフェノチアジン誘導体を選択し、ベンジルトリメチルアンモニウムトリブロミド (BTMA Br₃) を臭素化剤に用いて臭素化-直接的アリール化重合を連続的に行ったところ、目的のポリマー (Polymer 4) を収率良く得ることができた (Scheme 5(図 79))。

得られた Polymer 4 は有機 EL 素子 (OLED) に組み込むことで、蛍光スペクトルと同様なオレンジ色の発光を示し、OLED の発光層として機能することを確認した (図 81)。

この手法では、基質を反応容器に順に投入することで、有機金属のみならず、有機ハロゲン化物の事前調製も必要とせず、2 種類の芳香族化合物を出発原料として利用して π 共役高分子を合成できることから、従来法よりもさらに高分子半導体合成の省ステップ化が達成できる。

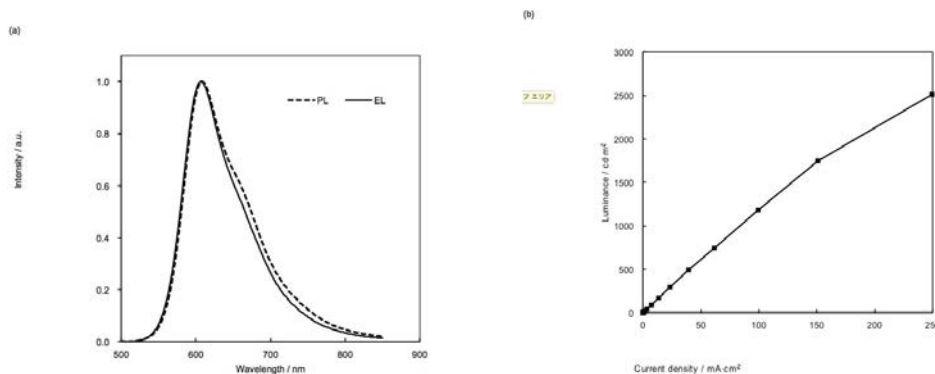


図 81 Polymer 4 の OLED 特性

(7) 効率的で長距離の光エネルギー移動が可能な共役ポリマーブレンドマイクロ球体

互いにエネルギー供与性、受容性の関係にある高発光性 π 共役高分子を用い、溶液中での自己組織化により、マイクロ球体を作製した。また、これらの高分子を混合して同時自己組織化を行うことにより、

相分離することなく非常に高い双溶性で混合したポリマーブレンド球体の形成に成功した。球体 1 粒子の顕微発光計測から、発光が球体内部に閉じ込められ、自己干渉により増強するウィスピングギャラリーモード (WGM) 発光が、作製したいずれの球体からも観測された。興味深いことに、ブレンド球体の方が、各ポリマー単体からなる球体よりも蛍光量子収率 (ϕ PL) が高く、エネルギーアクセプターポリマーの混合比が 20% のときに最大値 ϕ PL = 0.22 を示した。また、球体間においても WGM を介した効率的な光伝搬が起こることを、同種および異種ポリマー球体間において観測し、光伝搬の際に、波長変換が起こることを見出した。一般に、放射型エネルギー移動はロスが大きいが、WGM を介することで球体間での効率的な光伝搬と光エネルギー変換を実現した。マイクロ球体による光閉じ込め効果を利用した、新しい超広域光捕集の構築が期待できる。(図 82)

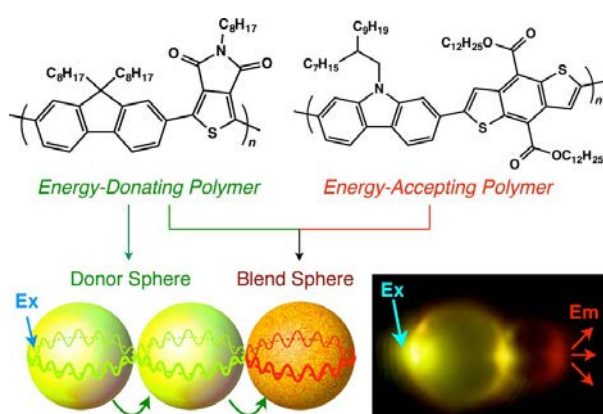


図 82 共役ポリマーブレンド球体における、球体内および球体間における高効率光エネルギー移動の模式図

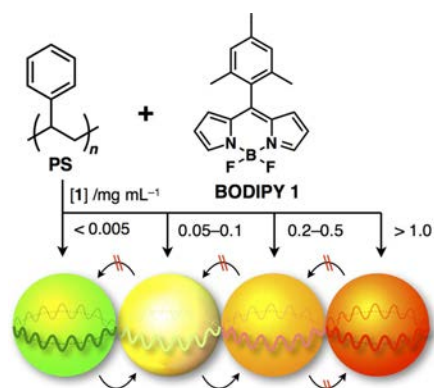


図 83 蛍光色素 (BODIPY) を添加したポリスチレン球体による多色共鳴発光および球体間エネルギーカスケードの模式図

(8) 発光色を変調可能な共鳴発光とキャビティーを介した多段階エネルギー移動

蛍光色素 BODIPY が凝集状態の違いにより異なる発光色を示すことを利用し、ポリスチレン (PS) マイクロ球体共振器への BODIPY のみの添加で、緑・黄・橙・赤など発光色の異なる WGM 共鳴発光を観測した。このマルチカラー発光球体は、液液界面における PS の析出により作製され、溶媒条件を適切に調整することにより、BODIPY 添加量を制御した粒径 310 nm 程度の形状の整った球体を形成した。また、マイクロマニピュレーションにより異なる発光色の球体を連結し、その一端をレーザー励起することで、発光が球体間を WGM を介して伝搬し、多段階発光波長変換を実現した。(図 83)

(9) レーザーの連続照射による π 共役ポリマー球体の作製

レーザーの連続照射による球体表面の電子状態の変化により、可視光領域全般に WGM を示す π 共役ポリマー球体の作製に成功した。また、球体表面を参加グラフェン (GO) で被覆することによる、水分散性共役ポリマー球体の形成に成功した。(図 84)

(10) ペプチド架橋剤による酸化グラフェン上への白金ナノ粒子の高分散固定化と光触媒効果の増強

金属ナノ粒子 (MNP) は、特異な電子状態に起因して、バルクとは異なる触媒機能を発現することが知られている。その中でも、白金ナノ粒子 (PtNP) は、燃料電池やポリマー合成の触媒として機能することから、実用材料としての期待が高く、応用を見据えた研究が活発に進められている。触媒としての MNP の性能を引き出すためには、MNP を高い分散状態を保持した状態で担体へ担持する必要がある。近年、大きな表面積と高い導電性を併せもつ、2次元ナノシート状構造体であるグラフェンや還元酸化グラフェン (RGO) 表面への MNP の担持も検討されている。しかしながら、これらに担持した際

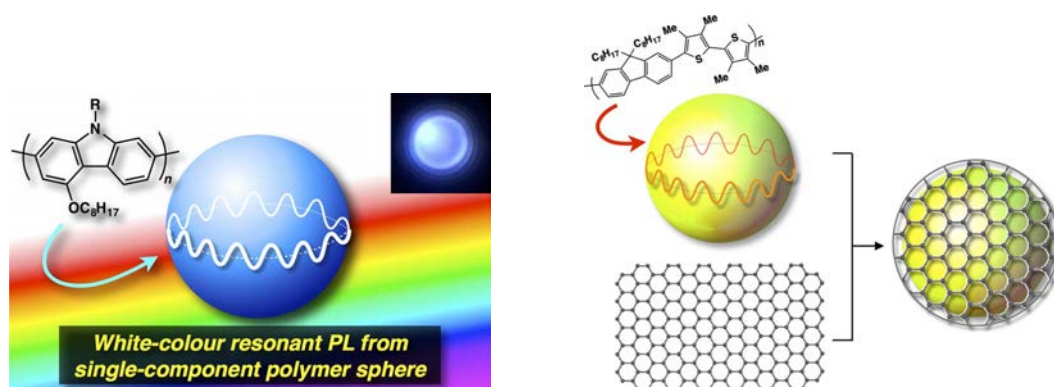


図 84 白色 WGM 発光球体 (左) および GO による共役ポリマー球体の被覆 (右)

に、MNP の凝集や 2 次元シートそのものの凝集、また、担持した MNP の脱離により、触媒特性が期待していた程に向上しないという問題に直面している。従って、2 次元シートの表面に高分散状態で確実に MNP を固定化する手法や技術が求められている。

本研究では、ペプチドを PtNP と酸化グラフェン (GO) を連結する架橋剤として用い、PtNP を高分散状態で 2 次元シートに固定化することにより、高い光触媒効果が発現することを見出した。ペプチドは生体内において電子伝達やプロトン輸送に関して重要な役割を担う生体分子である。また、生体機能を発現する上で、ペプチドの高次構造が重要な役割を果たす。従って、ペプチドのシーケンス (1 次構造) と集合構造 (2 次・3 次構造) を適切に制御することで、機能発現の位置と効率を制御することが可能となる。今回用いたペプチドは、金属配位能をもつシステイン残基 (C) および GO と静電的に相互作用するリシン残基 (K) を有し、PtNP と GO を効率的に架橋する。さらに、ペプチド N 末端に付与した Fluorenyl methoxy carbonyl (Fmoc) 基が β シート形成を促進し、PtNP を高効率・高分散に GO 表面に固定化できる。この GO/peptide/PtNP 複合体を用いて、ローダミン B (RhB) の光退色実験を行った結果、GO や PtNP 単体、およびペプチドを用いずに作製した GO/PtNP 混合体と比較して明らかな光退色効果の増大を確認した。さらに、このペプチドリンカーを用い、最適化した条件での疑似太陽光下での水分解による水素発生を確認した。本結果は、ボトムアッププロセスによる階層的な構造形成による効率的な光触媒材料の開発に指針を与えると期待できる。(図 85)

〈論文〉

1. Yusuke Aikyo, Soh Kushida, Daniel Braam, Junpei Kuwabara, Takahiro Kondo, Takaki Kanbara, Junji Nakamura, Axel Lorke, Yohei Yamamoto “Enwrapping Conjugated Polymer Microspheres with Graphene Oxide Nanosheets”, Chem. Lett., 2016, 45, 1024-1026 (2016).
2. Xiaorui Zhang, Wataru Ooki, Yoshinori R. Kosaka, Akinori Okonogi, Galina Marzun, Philipp Wagener, Stephan Barcikowski, Takahiro Kondo, Junji Nakamura “Effect of pH on the Spontaneous Synthesis of Palladium Nanoparticles on Reduced Graphene Oxide”, Appl. Surf. Sci., 389, 911-915 (2016).
3. Jiamei Quan, Takahiro Kondo, Guichang Wang, and Junji Nakamura “Energy Transfer Dynamics of Formate Decomposition on Cu(110)”, Angewandte Chemie, 56, 13, 3496-3500 (2017).

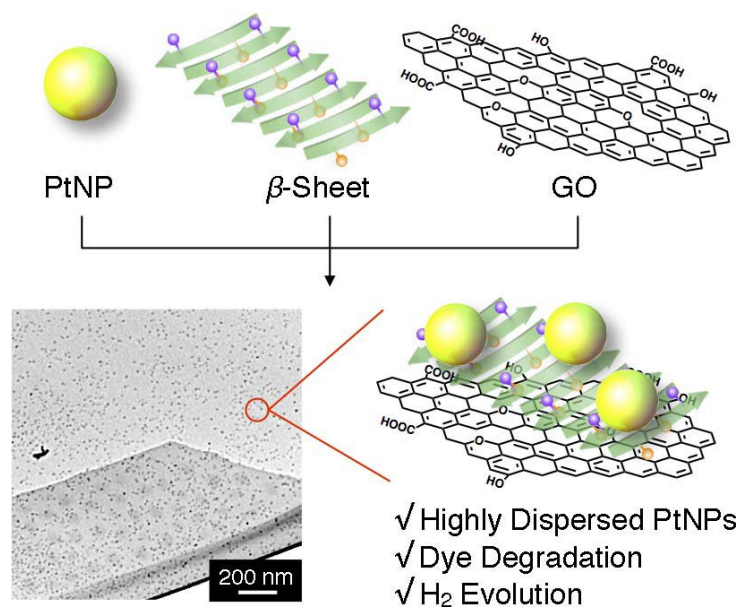


図 85 白金ナノ粒子-ペプチド-酸化グラフェン複合体による光触媒材料の形成

4. Tsukasa Mizutaru, Galina Marzun, Sebastian Kohsakowski, Stephan Barcikowski, Dachao Hong, Hiroaki Kotani, Takahiko Kojima, Takahiro Kondo, Junji Nakamura, and Yohei Yamamoto "Peptide Crosslinkers: Immobilization of Platinum Nanoparticles Highly Dispersed on Graphene Oxide Nanosheets with Enhanced Photocatalytic Activities", *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 9 (11), 9996-10002 (2017)
5. Hitoshi Saito, Junpei Kuwabara, Takeshi Yasuda, and Takaki Kanbara, Synthesis of Pyrrole-based Poly(arylenevinylene)s via Rh-Catalyzed Dehydrogenative Direct Alkenylation, *Polym. Chem.*, 7, 2775-2779 (2016).
6. Junpei Kuwabara, Naoto Takase, Takeshi Yasuda, and Takaki Kanbara, Synthesis of Conjugated Polymers Possessing Diketopyrrolopyrrole (DPP) Units Bearing Phenyl, Pyridyl, and Thiazolyl Groups by Direct Arylation Polycondensation: Effects of Aromatic Groups in DPP on Physical Properties, *J. Polym. Sci.: Part A: Polym. Chem.*, 54, 2337-2345 (2016).
7. Takeshi Yasuda, Junpei Kuwabara, Liyuan Han, and Takaki Kanbara, Photovoltaic Properties of Bithiazole-Based Polymers Synthesized by Direct C-H Arylation, *J. Photopolym. Sci. Technol.*, 29, 347-352 (2016).
8. Zhi An Wang, Junpei Kuwabara, Akito Ichige, Takeshi Yasuda, and Takaki Kanbara, Synthesis of n-type semiconducting polymer consisting of benzodipyrrolidone and thieno-[3,4-c]-pyrrole-4,6-dione via C-H direct arylation, *Synth. Met.*, 222, 383-387 (2016).
9. Junpei Kuwabara, Yohei Fujie, Keisuke Maruyama, Takeshi Yasuda, and Takaki Kanbara, Suppression of Homo-coupling Side Reactions in Direct Arylation Polycondensation for Producing High Performance OPV Materials, *Macromolecules*, 49, 9388-9395 (2016).
10. Junpei Kuwabara, Masahiro Kuramochi, Songlin Liu, Takeshi Yasuda, and Takaki Kanbara, Direct Arylation Polycondensation for Synthesis of Bithiazole-based Conjugated Polymers and Their

- Physical Properties, Polym. J., 49, 123-131 (2017).
11. S. Kushida, D. Braam, T. D. Dao, H. Saito, K. Shibasaki, S. Ishii, T. Nagao, A. Saeki, J. Kuwabara, T. Kanbara, M. Kijima, A. Lorke, Y. Yamamoto, "Conjugated Polymer Blend Microspheres for Efficient, Long-Range Light Energy Transfer" ACS Nano 10, 55435549 (2016).
 12. S. Kushida, S. Okabe, T. D. Dao, S. Ishii, T. Nagao, A. Saeki, M. Kijima, Y. Yamamoto, "Self-assembled polycarbazole microspheres as single-component, white-colour resonant photoemitters" RSC Adv. 6, 5285452857 (2016).
 13. D. Okada, T. Nakamura, D. Braam, T. D. Dao, S. Ishii, T. Nagao, A. Lorke, T. Nabeshima, Y. Yamamoto, "Color-Tunable Resonant Photoluminescence and Cavity-Mediated Multistep Energy Transfer Cascade" ACS Nano 10, 70587063 (2016).
 14. K. Shibasaki, T. Yasuda, Y. Yamamoto, M. Kijima, "Dual Substitution at 4,9-Positions of Carbazole in Donor- π -Acceptor Copolymer Enhances Performance of Bulk-heterojunction Organic Solar Cells" Polymer 108, 305312 (2017).
 15. T. Nakayama, K. Tashiro, T. Takei, Y. Yamamoto, "Controlled Self-Assembly of Oligopeptides Bearing Electron Donor and Acceptor Units on the Side Chains to Form β -Sheets with Selective π -Stacking Configuration" Chem. Lett. 46, 423425 (2017).

<著書・総説等>

1. 中村潤児, 近藤剛弘, 「酸化グラフェンの機能と応用 Functions and Applications of Graphene Oxide」, (松本泰道監修) シーエムシー出版 (2016), p. 150-161 第5章3 「燃料電池の酸素極への応用」
2. 近藤剛弘, 中村潤児, 「二次元物質の科学 グラフェンなどの分子シートが生み出す新世界」, 日本化学会編 化学同人 (2017), p.94-100 「窒素ドーピンググラフェンの触媒活性点」
3. 渋谷陸, 近藤剛弘, 中村潤児, 「白金代替触媒の活性点が特定された! -モデル研究で明らかにされた窒素ドーピング炭素触媒」, 化学 (2016), Vol. 71, No.8, p. 68-69.
4. 安田剛, 桑原純平, 韓礼元, 神原貴樹, 「有機薄膜太陽電池材料の低コスト化技術」, 応用物理学会 有機分子・バイオエレクトロニクス分科会誌, (2016), 27(2), p. 86-89.
5. 藤本 信貴, 桑原 純平, 神原貴樹, 「金属を含まない金属調光沢の高分子フィルムの開発」, “触り心地” (分担), 技術情報協会 (2017).
6. 藤本 信貴, 桑原 純平, 神原貴樹, 「赤色高分子色素から成る鮮やかな緑色光沢フィルムの開発」, 塗装工学, 日本塗装技術協会, (2017), 52(1), p. 17-22.
7. Y. Yamamoto, "Spherical resonators from π -conjugated polymers" Polym. J. 48, (2016), p.1045-1050. (Focus Review)

<研究成果発表>

[国際会議]

1. Donghui Guo, Takahiro Kondo, Junji Nakamura, "Active Sites of Nitrogen-doped Carbon Materials for Oxygen Reduction Reaction", Carbon2016, The Penn Stater Conference Center Hotel

- (USA), July 14, 2016. (Oral) (招待講演)
2. Riku Shibuya, Takahiro Kondo, Junji Nakamura, “Lewis Basic Sites Created on Nitrogen-doped Graphite Surfaces”, Carbon2016, The Penn Stater Conference Center Hotel (USA), July 15, 2016. (Oral) (一般講演)
 3. Junji Nakamura, “Model catalyst studies using surface science techniques”, CINF Summer School 2016 “Reactivity of nanoparticles for efficient and sustainable energy production-IV”, Conference Center Kysthusene (Denmark), August 11, 2016. (招待講演)
 4. Junji Nakamura, “Active site of nitrogen-doped carbon catalysts for fuel cells”, IVC-20, BEXCO (Korea), August 24, 2016. (招待講演)
 5. Junji Nakamura, “Active sites of nitrogen-doped carbon materials for oxygen reduction reaction”, ECOSS-32, ALPEXPO (France), August 30, 2016. (一般講演)
 6. H. Nishino, T. Fujimori, A. Fujino, T. Fujita, N. Umezawa, S. Okada, E. Nishibori, S. Ito, J. Nakamura, H. Hosono, T. Kondo, “Room Temperature Synthesis of Two-Dimensional Boron Sheets”, 29th International Microprocesses and Nanotechnology Conference (MNC 2016), ANA Crowne Plaza Kyoto (Japan), November 9, 2016. (一般講演)
 7. T. Kondo, “Fundamental Properties and Applications of Two-Dimensional Materials”, 29th International Microprocesses and Nanotechnology Conference (MNC 2016), ANA Crowne Plaza Kyoto (Japan), November 10, 2016. (招待講演)
 8. J. Qian, T. Kozarashi, T. Ogawa, T. Kondo, Junji Nakamura, “Dynamics of Formate Synthesis from CO₂ and Formate Decomposition on Cu Surfaces”, American Vacuum Society (AVS) 63rd International Symposium & Exhibition, Music City Center (USA), November 10, 2016. (一般講演)
 9. Junji Nakamura, “Activation of CO₂ using Heterogeneous Catalysts”, The Pacific Rim Symposium on Surfaces, Coatings and Interfaces (PacSurf 2016), Hapuna Beach Prince Hotel (USA), December 12, 2016. (招待講演)
 10. Junji Nakamura, “Active sites of nitrogen-doped carbon materials for oxygen reduction reaction”, International Symposium on Dynamic Process of Chemical Reaction and Catalysis on Surfaces, Xiamen University (China), December 23, 2016. (招待講演)
 11. Takaki Kanbara, “Synthesis of fluorene-based conjugated polymers via direct arylation polycondensation”, TGSW2016 Session 7: Green Innovation, Tsukuba, Japan, September 19, 2016 (依頼講演) .
 12. Atsushi Ebata, Junpei Kuwabara, Takaki Kanbara, “Polymerization of algal oil model compounds using metal complex catalysts”, TGSW 2016, Tsukuba, Japan, September 2016 (Poster).
 13. Faradhiyani Alanna, Zhang Qiao, Kuwabara Junpei, Kanbara Takaki, “Synthesis of Thiazole-based Polymers via Cu-catalyzed Aerobic Oxidative Coupling Reaction”, TGSW2016-IWP, Tsukuba, Japan, September 2016.
 14. Yohei Yamamoto “Conjugated Polymer Spherical Microcavities for Energy Conversion” The Electrochemical Society 229th meeting (サンディエゴ、アメリカ合衆国) 2016年5月29日–6月3日
 15. Yohei Yamamoto, “Conjugated Polymer Spheres for Fluorescent Microcavities” Seminar in UC Santa Barbara (サンタバーバラ、アメリカ合衆国) 2016年6月3日
 16. Yohei Yamamoto, “Self-Assembled Conjugated Polymer Spherical Microresonators” ICSM2016

- (Guangzhou, China) 2016 年 6 月 28 日 7 月 1 日 (Poster)
17. Yohei Yamamoto, “Conjugated Polymer Spheres for Micro-Lighting and Lasers” Zing Conference, Organic Semiconductors (Dubrovnik, Croatia) 2016 年 9 月 22–25 日
 18. Yohei Yamamoto “Conjugated Polymer Spheres as Fluorescent Microcavities” Univ. Duisburg-Essen Seminar (Duisburg, Germany) 2016 年 9 月 27 日
 19. Daichi Okada, Yohei Yamamoto, “Colloidal Crystallization and b-Phase Transformation of Poly(Vinylidene Fluoride) Nanoparticles” Material Research Society Fall Meeting (Boston, USA) Nov.27–Dec.2, 2016. (Poster)
 20. Daichi Okada, Takashi Nakamura, Daniel Braam, Thang D. Dao, Satoshi Ishii, Tadaaki Nagao, Axel Lorke, Tatsuya Nabeshima, Yohei Yamamoto, “Cavity-Mediated Long-Range FRET Cascade from Polymorphic Dye-Doped Polymer Microspheres” Material Research Society Fall Meeting (Boston, USA) Nov.27–Dec.2, 2016.
 21. Soh Kushida, Yohei Yamamoto, “Conjugated Polymer Blend Microspheres for Long-Range Energy Transfer Cascade” Material Research Society Fall Meeting (Boston, USA) Nov.27–Dec.2, 2016.
 22. Yohei Yamamoto, “Self-Assembled Conjugated Polymer Microspherical Resonators for Laser Application” Material Research Society Fall Meeting (Boston, USA) Nov.27–Dec.2, 2016. (Poster)
 23. Daichi Okada, Takashi Nakamura, Tatsuya Nabeshima, Yohei Yamamoto, “Direction-Selective Photon Transfer between Polymorphic BODIPY-Doped Polystyrene Microcavities” 2nd International Symposium on π -System Figuration (Urawa Community Center) 2016 年 4 月 14-15 日 (Poster)
 24. Sae Nakajima, Soh Kushida, Ken Albrecht, Eiji Nishibori, Kimihisa Yamamoto, Yohei Yamamoto, “Microporous dendrimer crystals with one-dimensional nanochannels” 2nd International Symposium on π -System Figuration (Urawa Community Center) 2016 年 4 月 14-15 日 (Poster)
 25. Soh Kushida and Yohei Yamamoto, “Directional radiative energy transfer in conjugated polymer blend microcavities for long-range, efficient light energy conversion” 2nd International Symposium on π -System Figuration (Urawa Community Center) 2016 年 4 月 14–15 日 (Poster)
 26. Keita Suzuki, Yohei Yamamoto, “Resonant Photoluminescence from Semiconductor Nanocrystal-Doped Polymer Microspheres” IWP2016 (筑波大学) 2016 年 9 月 2 日 (Poster)
 27. Osamu Oki, Soh Kushida, Yohei Yamamoto, “Near-Infrared Whispering Gallery Mode Photoluminescence from Conjugated Polymer Blend Microspheres via FRET” IWP2016 (筑波大学) 2016 年 9 月 2 日 (Poster)
 28. Sae Nakajima, Soh Kushida, Yohei Yamamoto, “Microporous Crystals from Carbazole Dendrimers” IWP2016 (筑波大学) 2016 年 9 月 2 日 (Poster)
 29. Kazuki Saito, Tohru Nakayama, Tsukasa Mizutaru, Yohei Yamamoto, “Oligopeptide β -Sheets with RGD Side Chain” IWP2016 (筑波大学) 2016 年 9 月 2 日 (Poster)
 30. Jooyoung Yoo, Mizutaru Tsukasa, Yohei Yamamoto, “Confinement of Chemical Luminescence Inside Polymer Microcavities” IWP2016 (筑波大学) 2016 年 9 月 2 日 (Poster)
 31. Zakarias Seba Ngara, Yohei Yamamoto, “Self-assembled microspheres from fluorene-terpyridine copolymer” IWP2016 (筑波大学) 2016 年 9 月 2 日 (Poster)
 32. Kota Takahashi, Yohei Yamamoto, “Synthesis of 2D Conjugated Polymers by Chemical Vapor

- Deposition Method” IWP2016 (筑波大学) 2016年9月2日 (Poster)
33. Daichi Okada, Takashi Nakamura, Daniel Braam, Thang Dao, Satoshi Ishii, Tadaaki Nagao, Axel Lorke, Tatsuya Nabeshima, Yohei Yamamoto, “Polymorphic Dye-Doped Polymer Microcavities with Tunable Multicolor Resonant Photoemission and Long-Range Energy Transfer Cascade” KJF-ICOME2016 (ACROS Fukuoka, Japan) 2016年9月4-7日
 34. Soh Kushida and Yohei Yamamoto, “Conjugated Polymer Blend Microresonators for Efficient, Long-Range Energy Transfer” KJF-ICOME2016 (ACROS Fukuoka, Japan) 2016年9月4-7日
 35. Tsukasa Mizutaru, Sebastian Kohwalcowski, Galina Marzun, Stephan Barcikowski, Yohei Yamamoto, “Peptide Crosslinkers: Redispersion of Agglomerated Metal Nanoparticles and Enhanced Photocatalytic Properties” AsiaNano2016 (Sapporo, Japan) 2016年10月10-13日 (Poster)
 36. Daichi Okada, Takashi Nakamura, Daniel Braam, Dao Thang, Satoshi Ishii, Tadaaki Nagao, Axel Lorke, Tatsuya Nabeshima, Yohei Yamamoto, “Polymorphic BODIPY-Doped Polymer Microcavities with Multicolor Resonant Photoluminescence and Color Conversion” AsiaNano2016 (Sapporo, Japan) 2016年10月10-13日 (Poster)
 37. Yohei Yamamoto, “Conjugated Polymer Microspheres for Long-Range Energy Transfer Cascade and Whispering Gallery Mode Lasing” AsiaNano2016 (Sapporo, Japan) 2016年10月10-13日
 38. Sae Nakajima, Soh Kushida, Ken Albrecht, Kimihisa Yamamoto, Eiji Nishibori, Yohei Yamamoto, “Incorporation of Functional Molecules into Microporous Crystals from Carbazole Dendrimers” (Poster) IPC2016 (Fukuoka, Japan) 2016年12月13-16日 (Poster)
 39. Tsukasa Mizutaru, Sebastian Kohwalcowski, Galina Marzun, Stephan Barcikowski, Yohei Yamamoto, “Enhanced Photocatalytic Properties of Graphene Oxide-Platinum Nanoparticle Complex Crosslinked by Peptides” IPC2016 (Fukuoka, Japan) 2016年12月13-16日 (Poster)
 40. Yohei Yamamoto, “Conjugated Polymer Spheres for Microresonators and Lasers” IPC2016 (Fukuoka, Japan) 2016年12月13-16日
 41. Yohei Yamamoto, “Conjugated Polymer Microspheres for Resonators and Lasers” MRS-J (Yokohama, Japan) 2016年12月19-22日
 42. Yohei Yamamoto, “Conjugated Polymer Microspheres for Optical Resonators and Lasers” 3rd International Symposium on π -System Figuration (Nagoya University, Nagoya) 2017年1月28-29日
 43. T. Mizutaru, D. Hong, H. Kotani, T. Kojima, T. Kondo, J. Nakamura, Y. Yamamoto, S. Kohwalcowski, G. Marzun, S. Barcikowski, “Peptide Crosslinkers: Immobilization of Platinum Nanoparticles on Graphene Oxide Nanosheets with Enhanced Photocatalytic Properties” ICARP2017 (Ritsumeikan University, Kyoto) 2017年3月2-5日 (Poster)
 44. Yohei Yamamoto, Daichi Okada, Takashi Nakamura, Tatsuya Nabeshima, “Cavity-Mediated Long-Range Energy Transfer through Fluorescent Dye-Doped Polymer Microspheres” ICARP2017 (Ritsumeikan University, Kyoto) 2017年3月2-5日
 45. Yohei Yamamoto, “Optical and Laser Microcavities by Self-Assembly of Conjugated Molecules and Polymers” CeNIDE-NTHU-TIMS Joint Symposium (University of Tsukuba) 2017年3月10-11日

[国内学会・研究会]

1. 中村潤児、「窒素ドーパカーボンの反応性と電極触媒活性点」第 23 回 燃料電池シンポジウム、タワーホール船堀、2016 年 5 月 27 日。(招待講演)
2. 中村潤児、「表面科学的手法による触媒メカニズムの解明とその応用」第 54 回触媒研究懇談会、湯田温泉 西の雅 常盤、2016 年 7 月 28 日～29 日。(招待講演)
3. 白石一真、中村潤児、近藤剛弘、藤谷忠博「藻類産生油由来スクアレンの接触クラッキング」第 118 回触媒討論会、岩手大学 (岩手)、2016 年 9 月 22 日。(ポスター発表)
4. 古晒大絢、小川哲矢、全家美、近藤剛弘、中村潤児「超音速 CO₂ 分子線を用いた Cu(100) 表面でのフォルメート生成反応」第 118 回触媒討論会、岩手大学 (岩手)、2016 年 9 月 21 日。(一般講演)
5. 中村潤児、「白金フリー燃料電池カーボン触媒実現のシナリオ」第 8 回 TIA シンポジウム、イイノホール&カンファレンスセンター、2016 年 10 月 11 日。(招待講演)
6. Jiamei Quan, Taijun Kozarashi, Tomoyasu Mogi, Takahiro Kondo, Junji Nakamura “Eley-Rideal type mechanism of CO₂ converting into formate on Cu catalysts” 表面界面スペクトロスコーピー 2016、仙台 秋保温泉 岩沼屋 (宮城)、2016 年 11 月 25 日。(一般講演 + ポスター)
7. Riku Shibuya, Takahiro Kondo, Junji Nakamura “CO₂ chemisorption on nitrogen doped carbon surfaces” 表面界面スペクトロスコーピー 2016、仙台 秋保温泉 岩沼屋 (宮城)、2016 年 11 月 25 日。(ポスター)
8. 下山雄人、渋谷陸、近藤剛弘、中村潤児「ピリジン型窒素含有炭素の酸素還元反応に対する触媒活性 Catalyst Activity of Pyridinic Nitrogen Contained Carbon for Oxygen Reduction Reaction」第 26 回日本 MRS 年次大会、横浜情報文化センター (神奈川)、2016 年 12 月 19 日。(ポスター)
9. 中村潤児、「窒素ドーパカーボン燃料電池触媒の活性サイト」物性研究所短期研究会「原子層上の活性サイトで発現する局所機能物性」、東京大学柏キャンパス 物性研究所、2016 年 12 月 20 日。(招待講演)
10. 西野弘晃、藤田武志、Nguyen Thanh Cuong、宮内雅浩、飯村壮史、梅澤直人、岡田晋、西堀英治、藤森智博、藤野朝日、伊藤伸一、中村潤児、細野秀雄、近藤剛弘「イオン交換法による水素化ホウ素シートの大量生成」日本化学会第 97 春季年会 2017、慶應義塾大学 (神奈川)、2017 年 3 月 17 日。(一般講演)
11. SHIRAISHI, Kazuma; KONDO, Takahiro; FUJITANI, Tadahiro; NAKAMURA, Junji “Catalytic cracking of squalene derived from algae-producing oil” 日本化学会第 97 春季年会 2017、慶應義塾大学 (神奈川)、2017 年 3 月 17 日。(一般講演)
12. 藤森智博、藤田武志、西野弘晃、藤野朝日、中村潤児、細野秀雄、近藤剛弘「窒素で機能化された新規二次元ホウ素シートの生成」日本化学会第 97 春季年会 2017、慶應義塾大学 (神奈川)、2017 年 3 月 17 日。(一般講演)
13. 藤野朝日、伊藤伸一、西野弘晃、藤森智博、中村潤児、細野秀雄、近藤剛弘「水素化ホウ素シートの触媒特性の解明」日本化学会第 97 春季年会 2017、慶應義塾大学 (神奈川)、2017 年 3 月 17 日。(一般講演)
14. 下山雄人、渋谷陸、近藤剛弘、森利之、中村潤児「ピリジン型窒素含有分子を用いた燃料電池カソード触媒の設計」日本化学会第 97 春季年会 2017、慶應義塾大学 (神奈川)、2017 年 3 月 18 日。(一般講演)
15. 茂木智泰、古晒大絢、全家美、近藤剛弘、中村潤児「超音速分子線を用いた Cu 表面における CO₂ と表面水素の反応ダイナミクス解析」日本化学会第 97 春季年会 2017、慶應義塾大学 (神奈川)、2017 年 3 月 19 日。(一般講演)
16. 桑原純平、藤江陽平、神原貴樹「直接アリアル化重縮合における副反応の検証」第 65 回高分子学会年

次大会、神戸、2016年5月25-27日.

17. 陳 捷然、齋藤 仁志、桑原 純平、神原 貴樹「連続的な臭素化-直接的アリール化反応に基づくフェノチアジン誘導体を基質とした共役高分子の合成」第65回高分子学会年次大会、神戸、2016年5月25-27日 (Poster).
18. Faradhiyani Alanna, Zhang Qiao, Kuwabara Junpei, Kanbara Takaki, “Polycondensation via Cu-catalyzed Aerobic Oxidative Coupling Affording Thiazole-based Conjugated Polymers”, 第65回高分子学会年次大会、神戸、2016年5月25-27日 (Poster).
19. 神原貴樹「金属を含まない金属調光沢の高分子材料の開発」技術情報協会セミナー、東京、2016年9月13日 (依頼講演).
20. 桑原純平、藤江陽平、丸山啓輔、安田剛、神原貴樹「直接アリール化重縮合を用いて合成した共役高分子の光電変換特性」第65回高分子討論会、横浜、2016年9月14-16日.
21. 齋藤 仁志、陳 捷然、桑原 純平、神原 貴樹「連続的な臭素化-直接的アリール化重縮合に基づく共役高分子の合成」第65回高分子討論会、横浜、2016年9月14-16日 (Poster).
22. 齋藤 仁志、桑原 純平、神原 貴樹「Pd触媒を用いた脱水素型直接的アルケニル化反応に基づくポリアリーレンビニレンの合成」第65回高分子討論会、横浜、2016年9月14-16日.
23. Faradhiyani Alanna, Zhang Qiao, Kuwabara Junpei, Kanbara Takaki, “Synthesis of Thiazole-based Polymers via Cu-catalyzed Aerobic Oxidative Coupling Reaction”, 第65回高分子討論会、横浜、2016年9月14-16日.
24. 桑原純平「C-H結合の直接アリール化反応を利用した共役高分子の合成」産業技術総合研究所触媒化学融合研究センター講演会、つくば、2016年10月7日 (依頼講演).
25. 桑原純平「直接アリール化反応を利用した共役高分子合成と太陽電池特性」第31回高分子学会関東支部茨城地区若手の会、つくばみらい、2016年11月10-11日 (Poster).
26. 齋藤 仁志、桑原 純平、神原 貴樹「脱水素型直接的アルケニル化反応によるポリアリーレンビニレンの合成」第31回高分子学会関東支部茨城地区若手の会、つくばみらい、2016年11月10-11日 (Poster).
27. 齋藤 仁志、陳 捷然、桑原 純平、神原 貴樹「 π 共役高分子の少ステップ合成法の開発」第31回高分子学会関東支部茨城地区若手の会、つくばみらい、2016年11月10-11日.
28. 土田渉、桑原純平、神原貴樹「二元系触媒を用いた直接アリール化重縮合反応」第31回高分子学会関東支部茨城地区若手の会、つくばみらい、2016年11月10-11日 (Poster).
29. 青木 英晃、齋藤 仁志、桑原 純平、神原 貴樹「脱水素型クロスカップリング反応による π 共役高分子の合成」第31回高分子学会関東支部茨城地区若手の会、つくばみらい、2016年11月 (Poster).
30. 木村拓也、崔星集、桑原純平、神原貴樹「NCNピンサー型白金錯体の水素結合の強度変化による発光色変化」第31回高分子学会関東支部茨城地区若手の会、つくばみらい、2016年11月10-11日 (Poster).
31. 市毛明斗、齋藤仁志、桑原純平、神原貴樹「直接的アリール化重縮合における水分・酸素の影響の調査」第31回高分子学会関東支部茨城地区若手の会、つくばみらい、2016年11月10-11日 (Poster).
32. 江幡篤、桑原純平、神原貴樹「金属錯体触媒を用いた藻類オイルモデル化合物の重合と評価」第31回高分子学会関東支部茨城地区若手の会、つくばみらい、2016年11月10-11日 (Poster).
33. 小野瀬悠佑、大嶽和久、桑原純平、神原貴樹「藻類オイルモデル化合物の重合及び構造制御」第31回高分子学会関東支部茨城地区若手の会、つくばみらい、2016年11月10-11日 (Poster).
34. 山口佳歩、桑原純平、神原貴樹「長鎖アルコキシアミド基を持つNCNピンサー型白金二核錯体の合成」、第6回CSJ化学フェスタ2016、東京、2016年11月14-16日 (Poster).

35. 土田渉、桑原純平、神原貴樹「二元系触媒を用いた直接アリアル化重縮合反応」第6回CSJ化学フェスタ2016、東京、2016年11月14-16日(Poster).
36. 川崎龍矢、桑原純平、神原貴樹「超分子相互作用を有するジケトピロロピロール誘導体の合成と物性」第6回CSJ化学フェスタ2016、東京、2016年11月14-16日(Poster).
37. 神原貴樹「直接的アリアル化重縮合：高分子半導体の製造プロセスを志向した重合触媒反応の開発」触媒学会重合触媒設計研究会セミナー、東京、2017年1月27日(依頼講演).
38. 桑原純平「有機薄膜太陽電池の実用化を支える材料合成技術の開発」日本化学会第97回春季年会(慶應義塾大学)2017年3月16-19日
39. 榊田創、Daniel Braam、Dao Thang、柴崎浩輔、齋藤仁志、石井智、長尾忠昭、佐伯昭紀、桑原純平、神原貴樹、木島正志、Axel Lorke、山本洋平「共役高分子ブレンド球体の構築とWGMを介した高効率放射エネルギー移動」第65回高分子学会年次大会(神戸国際会議場)2016年5月25-27日(Poster)
40. 中山徹、田代健太郎、山本洋平「 π 共役分子を有するオリゴペプチドの自己組織化と電荷輸送特性」第65回高分子学会年次大会(神戸国際会議場)2016年5月25-27日
41. 中島紗英、榊田創、アルブレヒト建、山元公寿、西堀英治、山本洋平「自己組織化による多孔質カルバゾール dendrimer 結晶」第65回高分子学会年次大会(神戸国際会議場)2016年5月25-27日
42. 岡田大地、中村貴志、ブラーム ダニエル、タン ダオ、石井智、長尾忠昭、ロルケ アクセル、鍋島達弥、山本洋平「Polymorphic Dye-Doped Polymer Microcavities with Tunable Multicolor Resonant Photoluminescence」第65回高分子学会年次大会(神戸国際会議場)2016年5月25-27日
43. 榊田創、岡部真之介、佐伯昭紀、ダオタン、石井智、長尾忠昭、木島正志、山本洋平「White-Color Whispering Gallery Mode Photoluminescence from Single-Component Conjugated Polymer Microcavities」第65回高分子学会年次大会(神戸国際会議場)2016年5月25-27日
44. 山村正樹、助川公哉、岡田大地、山本洋平、鍋島達弥「キラルお椀型分子の液晶相におけるキラル特性」第27回基礎有機化学討論会(広島国際会議場)2016年9月1-3日
45. 山本洋平「自己組織化共役ポリマー球体からの共鳴発光とレーザー発振」九州大学先端研セミナー(九州大学)2016年9月7日
46. 岡田大地、西岡拓紀、辻勇人、佐々木史雄、中村栄一、山本洋平「炭素架橋フェニレンビニレンによる自己組織化マイクロ共振器」第77回応用物理学会秋季学術講演会(朱鷺メッセ、新潟)2016年9月13-16日
47. 山本洋平、榊田創、岡田大地、佐々木史雄「共役ポリマー球体マイクロ共振器からのレーザー発振」第77回応用物理学会秋季学術講演会(朱鷺メッセ、新潟)2016年9月13-16日
48. 大木理、榊田創、武田洋平、南方聖司、桑原純平、神原貴樹、Thang Dao、石井智、長尾忠昭、山本洋平「ポリマーブレンド共振器における球体内FRETを介した近赤外WGM発光」第65回高分子討論会(神奈川大学横浜キャンパス)2016年9月14-16日(Poster)
49. 中嶋紗英、榊田創、アルブレヒト建、山元公寿、西堀英治、山本洋平「多孔質カルバゾール dendrimer 結晶への機能性分子の導入」第65回高分子討論会(神奈川大学横浜キャンパス)2016年9月14-16日(Poster)
50. 水垂司、Sebastian Kohsakowski、Galina Marzun、Stephan Barcikowski、山本洋平「ペプチド架橋金属ナノ粒子-酸化グラフェン複合体による増強光触媒効果」第65回高分子討論会(神奈川大学横浜キャンパス)2016年9月14-16日
51. 愛敬雄介、桑原純平、神原貴樹、山本洋平「多色発光 π 共役高分子マイクロディスクアレイ」第65回

- 高分子討論会（神奈川大学横浜キャンパス）2016年9月14-16日
52. 櫛田創、桑原純平、神原貴樹、山本洋平「自己組織化共役ポリマー球体の形成メカニズム」第65回高分子討論会（神奈川大学横浜キャンパス）2016年9月14-16日 (Poster)
 53. 山本洋平、櫛田創、岡田大地、佐々木史雄「共役ポリマー球体からのWGMレーザー発振」第65回高分子討論会（神奈川大学横浜キャンパス）2016年9月14-16日
 54. 山本洋平「共役ポリマー球体の形成メカニズムとWGMレーザー発振」 π 造形科学第3回公開シンポジウム（東北大学）2016年10月20日 (Poster)
 55. 大木理、櫛田創、武田洋平、南方聖司、桑原純平、神原貴樹、Thang Dao、石井智、長尾忠昭、山本洋平「球体内FRETを介した近赤外WGM発光ポリマーブレンド共振器」高分子学会関東支部茨城地区若手交流会（つくばセミナーハウス）2016年11月10-11日 (Poster)
 56. 中嶋 紗英、櫛田 創、アルブレヒト 建、山元 公寿、西堀 英治、山本 洋平「多孔質カルバゾール dendroリマー結晶への分子導入」高分子学会関東支部茨城地区若手交流会（つくばセミナーハウス）2016年11月10-11日 (Poster)
 57. 愛敬 雄介、桑原 純平、神原 貴樹、山本洋平「多色発光ポリマーマイクロディスクアレイの作製」高分子学会関東支部茨城地区若手交流会（つくばセミナーハウス）2016年11月10-11日 (Poster)
 58. 水垂司、Galina Marzun、Sebastian Kohsakowski、Stephan Barcikowski、山本洋平「ペプチド架橋材を用いた金属ナノ粒子-酸化グラフェン複合体の形成と増強光触媒効果」高分子学会関東支部茨城地区若手交流会（つくばセミナーハウス）2016年11月10-11日 (Poster)
 59. 中嶋紗英、櫛田創、アルブレヒト建、山元公寿、西堀英治、山本洋平「多孔質カルバゾール dendroリマー結晶の形成と細孔への分子導入」第6回CSJ化学フェスタ（タワーホール船堀）2016年11月14-16日 (Poster)
 60. 愛敬雄介、桑原純平、神原貴樹、山本洋平「多色発光 π 共役ポリマーマイクロディスクアレイの作製」第6回CSJ化学フェスタ（タワーホール船堀）2016年11月14-16日 (Poster)
 61. 水垂司、S. Kohsakowski、G. Marzun、S. Barcikowski、山本洋平「ペプチド架橋による白金ナノ粒子-酸化グラフェン複合体の増強光触媒効果」第6回CSJ化学フェスタ（タワーホール船堀）2016年11月14-16日 (Poster)
 62. 山本洋平「自己組織化共役ポリマー球体からのWGMレーザー発振」レーザー学会第497回研究会「有機固体レーザー」（福岡）2016年11月18日
 63. 山本洋平「ペプチド架橋白金ナノ粒子-酸化グラフェン複合体による増強光触媒効果」新学術領域「人工光合成」第5回最終シンポジウム（東工大大岡山）2017年1月29-30日
 64. 山本洋平「Self-assembled optical microcavities from conjugated polymers and macromolecules（ π 共役ポリマーおよび巨大分子からなる自己組織化マイクロ光共振器）」九州大学 OPERA セミナー（九州大学伊都キャンパス）2017年3月8日
 65. 大木理、櫛田創、武田洋平、南方聖司、桑原純平、神原貴樹、Thang Dao、石井智、長尾忠昭、山本洋平、「共役ポリマーブレンド球体内におけるFRETを介した近赤外WGM発光」日本化学会第97回春季年会（慶應義塾大学）2017年3月16-19日
 66. 愛敬雄介、桑原純平、神原貴樹、三成剛生、山本洋平、「発光性 π 共役高分子マイクロディスクアレイの作製」日本化学会第97回春季年会（慶應義塾大学）2017年3月16-19日
 67. 中山徹、田代健太郎、山本洋平、「電子供与性および受容性分子を側鎖に付与したペプチド β シート」日本化学会第97回春季年会（慶應義塾大学）2017年3月16-19日

5.2 エネルギー貯蔵・変換物質部門

部門長

守友 浩（数理物質系物理学域 教授）

構成教員

西堀 英治（数理物質系物理学域 教授）

岡田 晋（数理物質系物理学域 教授）

笠井 秀隆（数理物質系物理学域 国際テニュアトラック助教） デンマーク国オーフス大学在駐

小林 航（数理物質系物理学域 助教）

丹羽 秀治（数理物質系物理学域 助教）

Venkatesha Rama Hathwar（数理物質系物理学域 助教） 海外教育研究ユニット招致副 PI

連携教員

Bo Iversen（数理物質系 海外教育研究ユニット招致 PI / オーフス大学 教授）

櫻井 岳暁（数理物質系理工学域 准教授）

末益 崇（数理物質系理工学域 教授）

柳原 英人（数理物質系理工学域 准教授）

丸本 一弘（数理物質系物質工学域 准教授）

重田 育照（数理物質系物理学域 教授）

関口 章（数理物質系化学域 教授）

小島 隆彦（数理物質系化学域 教授）

安田 剛（数理物質系 客員准教授/NIMS 主任研究員）

Ashraful Islam（NIMS 主幹研究員）

韓 礼元（NIMS 太陽発電材料ユニット長）

竹口 雅樹（数理物質系 客員教授/NIMS 電子顕微鏡ステーション長）

坂田 修身（数理物質系 客員教授/NIMS 高輝度放射光ステーション長）

梅澤 直人（NIMS 主任研究員）

大谷 実（数理物質系 客員准教授/AIST グループリーダー）

雨宮 健太（数理物質系 客員教授/KEK 物構研 教授）

神山 崇（KEK 物構研 教授）

大石 泰生（SPRING-8/JASRI グループリーダー）

Valerie Pralong（CRISMAT Research Director）

岡本 淳（NSRRC Research Scientist）

Di-Jing Huang（NSRRC Group Leader）

駒場 慎一（数理物質系 客員教授/東京理科大学 教授）

荒川 裕則（数理物質系 客員教授/東京理科大学 名誉教授）

エネルギー貯蔵・変換物質部門の使命は、(1) エネルギーサイエンスの推進、(2) エネルギーイノベーション

ンの実現、(3) 国際エネルギー研究拠点の構築の3つである。まず、エネルギーサイエンスを推進するには、エネルギー現象を電子論的・微視的に解明する必要がある。この目的のために、物質(守友)、計測(西堀)、計算(岡田)の専門家が部門形成している。具体的成果は、研究成果を参照していただきたい。次に、エネルギーイノベーションを実現し、その成果を社会に還元するには、産学連携を推進する必要がある。この目的のために、エネルギーサイエンスの旗印のもとに TIA 連携を推進する。守友は、TIA の7つのコアの一つである TIA-ACCELERATE の委員として、活動を行っている。さらに、本部門は国際エネルギー研究拠点を目指す。今年度は、下記に示すような(3) 国際エネルギー研究拠点の構築に向けた活動を行った。

全学戦略枠として着任した西堀と笠井(国際テニユアトラック教員)は、自らの研究を推進することはもちろん、国際エネルギー研究拠点の構築に尽力している。笠井秀隆助教は、デンマークオーフス大学の Iversen 教授のもとで、ヨーロッパの最先端放射光施設における装置開発とエネルギー物質の機能解明の研究を推進している。さらに、オーフス大 Center for Materials Crystallography のセンター長である Iversen 教授を著名外国人ユニット招致の PI として迎え、副 PI として Hathwar Rama Venkatesha 氏を任期付助教として迎え入れた。Venkatesha 氏は筑波大学に常駐し、SPring-8 等の最先端施設を利用し、結晶学の frontier の開拓をおこなっている。小林は、二次電池材料に関して、フランスの CRISMAT 研究所の Valerie Pralong 博士と共同研究を行った。また、守友と丹羽は、二次電池材料に関して、台湾放射光施設(NSRRC)の岡本淳博士と Di-Jing Huang 博士との共同研究を行った。さらに、放射光を駆使した物質科学の教育・研究を推進するために、物理学専攻を責任専攻とした放射光物質科学コースを開設した。このコースでは、自らの研究テーマで、国内放射光施設である KEK/PF、KEK/PF-AR、SPring-8 に課題申請・採択を目指す。もちろん、海外の放射光施設の利用も視野に入っている。

(1) ナトリウムイオン二次電池に関する研究

ナトリウムイオン二次電池は低コスト次世代蓄電素子として、有望である。

チタン酸化物のイオン拡散係数のイオン種依存性

チタン酸化物はインターカレーションタイプの二次電池負極として有力である。この物質の特徴は、イオン半径の小さなリチウムイオンとイオン半径の大きなナトリウムイオンのインターカレーションが可能であることである。この特徴を利用して、同一ホストに対するイオン拡散係数とその活性化エネルギーのイオン種依存性を明らかにした。Na₂Ti₃O₇ では、伝導パスが同一であるにもかかわらず、イオン拡散係数とその活性化エネルギーのイオン種依存性が小さいことが分かった。(図 86)

マンガン・プルシャンブルー類似体の電池特性の向上

マンガン・プルシャンブルー類似体はナトリウムイオン電池正極材として有望である。我々は、マンガンサイトを他の遷移金属に部分置換することにより、電池特性(レート特性、サイクル特性)が著しく向上することを見出した。これは、元素置換がマンガンイオンのヤンテラー不安定性を抑制するためと考えられる。

層状酸化物の電池特性と構造との相関

層状酸化物 NaCo_{1/2}Fe_{1/2}O₂ は、有力なナトリウムイオン二次電池の正極材料である。我々は、合成条件は放電曲線のサイクル特性に著しい影響を及ぼすことを見出した。そこで、徐冷した試料と急冷した試料の構造を放射光 X 線回折、高分解 SEM で詳細に調べた。その結果、遷移金属の組成揺らぎがサイクル特性に重要な影響を及ぼしていることが、明らかとなった。(図 87)

マンガン・プルシャンブルー類似体のイオン拡散係数のイオン種依存性

マンガン・プルシャンブルー類似体は二次電池正極として有力である。この物質の特徴は、イオン半径

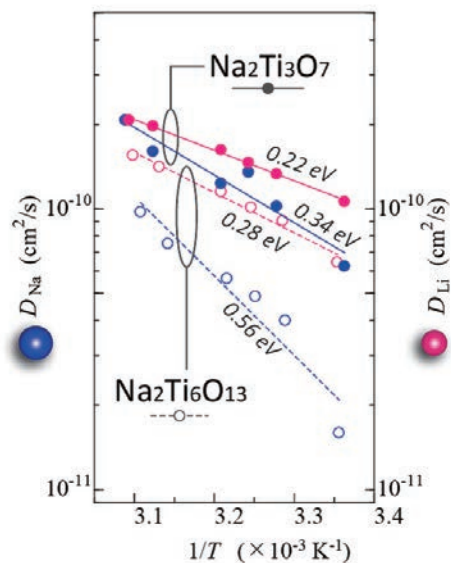


図 86 チタン酸化物のイオン拡散係数のイオン種依存性

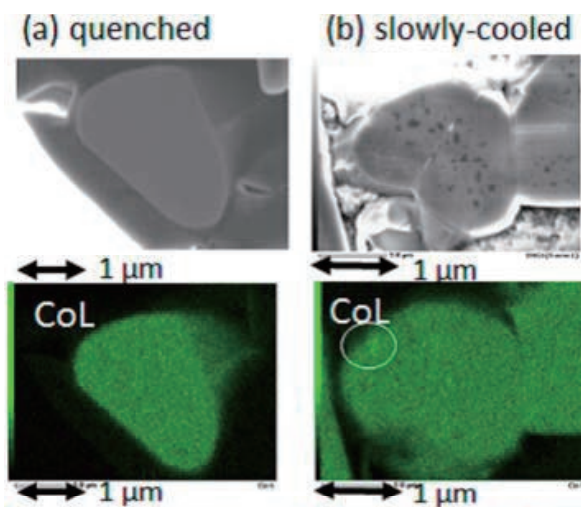


図 87 (a) 急冷試料と (b) 徐冷試料の SEM 像と Co イオンの分布。測定は NIMS の TEM ステーションを利用した。

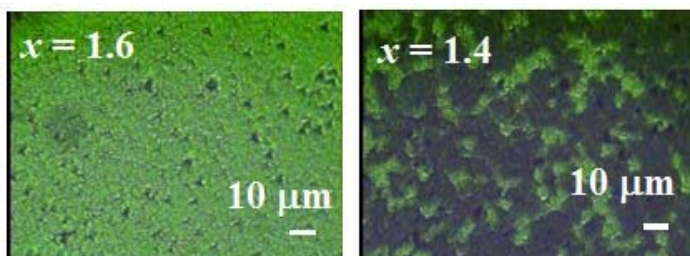


図 88 コバルト・プルシャンブルーの相分離。左図は充電前、右図は充電の途中。

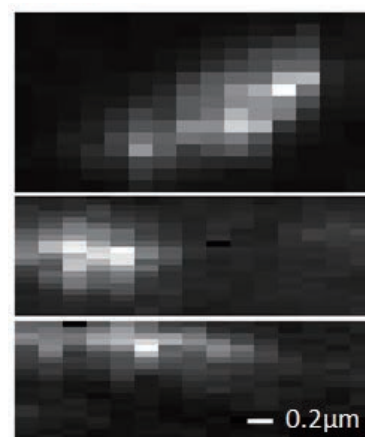


図 89 Na_xCoO_2 の O_3' ドメインの X 線マイクロ回折像。

の小さなリチウムイオンとイオン半径の大きなナトリウムイオンのインターカレーションが可能であることである。この特徴を利用して、同一ホストに対するイオン拡散係数とその活性化エネルギーのイオン種依存性を明らかにした。得られた結果を、イオン伝導パスの違いで説明した。

リチウムイオン電池材料の充電過程におけるマクロな二相分離

大部分の二次電池材料は、充電または放電過程において二相状態が出現することが知られている。しかしながら、各相の長さスケールや成長様式は全く分かっていない。我々は、コバルト・プルシャンブルー類似体の二つの相が異なった色を示すことに着目し、受電プロセスにおける相分離ダイナミクスのその場観察に成功した。その結果、 $10 \mu\text{m}$ といったマクロな相分離が起こり、相境界が活性点であることが明らかとなった。(図 88)

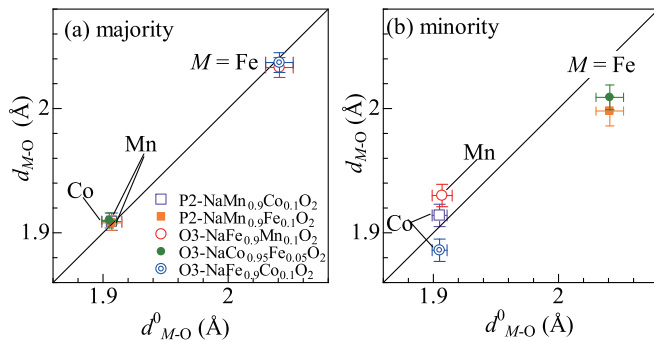


図 90 層状酸化物中のホストおよびゲスト遷移金属周りの M-O 長。横軸はゲスト遷移金属しか含まない層状酸化物の M-O 長。

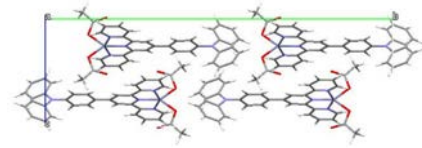


図 91 結晶構造模式図。

X 線マイクロビームを利用した相分離の観測

Na_xCoO_2 は、 O_3 と O'_3 相に相分離することが知られている。我々は、良質薄膜試料を作成し、X 線マイクロ回折を用いて、各相のサイズを決定した。 O'_3 相のドメインサイズは粒子サイズと同程度であることが明らかとなった。(図 89)

層状酸化物の遷移金属周りの局所構造

二次電池材料である層状酸化物は、遷移金属サイトを部分置換すると電池性能が著しく向上することが知られている。しかしながら、遷移金属周りの局所構造がどのようになっているか、系統的に調べた例はない。われわれは、一連の層状酸化物を合成し、EXAFS 局所構造解析により、M-O 結合長を決定した。その結果、ゲスト遷移金属周りの M-O 結合長は、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。

マンガン・プルシャンブルー類似体の低電圧動作の機構解明

プルシャンブルー類似体はリチウムに対して、1V 程度の低電圧動作を示すことが報告されている。我々は、この定電圧動作の機構を明らかにするために、放射光 X 線を利用した X 線回折と X 線吸収を系統的に行った。結果、低電圧動作の起源は、主にプルシャンブルー類似体が分解して生成した Fe 金属のコンバージョン反応であることが分かった。(図 90)

(2) 機能性材料に関する研究

スピコート高分子膜の生成プロセス可視化の研究

スピコートによる高分子膜生成は、有機太陽電池を含めた幅広い高分子を利用したデバイス開発等に広く用いられている。この膜の品質を高めるには、スピコートプロセスにおいて高分子の配向の変化を調べ、制御することが望まれる。本研究では、poly(styrene-*b*-2vinylpyridine) (PS-*b*-P2VP) 薄膜のスピコートによる成膜過程を in situ grazing incidence small angle X-ray scattering (GISAXS) によって調べた。

SPring-8 の BL03XU ビームラインで 10–100 ミリ秒間隔で製膜中の回折パターン変化を調べたところ、製膜開始後 1000–2000 ミリ秒後領域に結晶相と思われるピークが現れることが分かった。このピークは、3000 ミリ秒では完全に消失することも分かった。このことは、製膜で溶媒が蒸発する途中に結晶的に高分子が配列する領域があることを示している。

我々のグループで、高分子結晶用の回折パターン解析ソフトを作成し、回折ピークの配列を調べたとこ

ろ、途中の領域で高分子が体心格子に配列することが明らかになった。

多機能、多色発光を示す Zn 錯体の粉末 X 線回折による構造決定

東京大学西原研究室のグループにより、紫から青、緑、黄色までの様々な発光を、溶媒を変えるだけで示す新しい Zn を含む化合物が合成された。この物質については、その機能性より構造が望まれたが、単結晶試料を得ることができず、構造決定が全くできていなかった。我々のグループで開発してきた遺伝的アルゴリズムを用いた構造決定法を利用し、この物質の構造決定を行った。

試料を直径 0.4mm ϕ のキャピラリーに詰め、SPring-8 の BL02B2 ビームラインで粉末回折データを測定した。回折線のうち低角から 19 本を利用することで、C2/c 空間群をもつ monoclinic の結晶系であることが分かった。遺伝的アルゴリズムによる構造決定で初期構造を決定した。最終的に Rietveld 解析で $d > 0.94 \text{ \AA}$ の分解能で構造を決定することに成功した。結晶構造を調べたところ、分子内に mirror が存在し、対称性の高い配列を持つことも分かった。(図 91)

超高分解能粉末 X 線回折データによる、金属六ホウ化物の π 電子可視化

分子性結晶や低次元化合物において、分子の持つ π 電子は、電気伝導など物性に重要な役割を果たすことはよく知られている。エネルギー的に、フェルミ面近傍に位置する π 電子の空間分布は軟 X 線などを利用して配向を見る研究はあるものの実験的に観測することは難しい。

機能性材料の物質科学において、同一の構造を持ち、機能・物性が異なる物質群は多数存在する。例えば、超伝導を示す金属酸化物などはその典型例であり、わずかな組成の違いで、ほぼ同じ構造をとるにも関わらず、金属、絶縁体、超伝導体が現れる。この違いを生み出す電子は、通常、全体の数%以下のわずかな電子であることが多く、その実験的観測は困難である。

本研究では、同一の構造を持ち、金属的な物性を示す金属六ホウ化物 LaB_6 と半導体の物性を示す BaB_6 の精密電子密度分布解析から、物性の違いに起因する電子密度の検出を行った。理論的には、 B_6 クラスタを分子として捉えた際のクラスタ間の π 電子が金属伝導を担うと考えられており、 π 電子の空間分布の実験的可視化にもつながっている。

SPring-8 にて $d > 0.2 \text{ \AA}$ の知りうる限り世界最高分解能の粉末 X 線回折データを LaB_6 と BaB_6 について同一条件で測定した。 $d > 0.25 \text{ \AA}$ を超えた領域では、一般の構造解析に利用される原子散乱因子の近似が破綻し通常のソフトウェアを利用しての解析ができない。本研究では、国際結晶学連合 (IUCr) の電荷、スピン、運動量密度委員会の委員長 P. Macchi 博士の力を借りて、相対論的原子散乱因子のデータとそれを利用可能にした多極子展開解析ソフトウェア XD2006 を利用して解析した。

LaB_6 と BaB_6 の電子密度分布では、イオンの金属イオンと、 B_6 分子間に強い共有結合、 B_6 分子内に分子間より弱い共有結合電子が観測された。一方で両者の違いについては全電子密度分布および電子密度分布では検出できなかった。そこで LaB_6 と BaB_6 の価電子密度の差密度を求めた。その結果、 B_6 分子間に分子をつなぐ方向に垂直にピークの存在が確認された。第一原理計算で求めた電子密度分布との比較から、この電子が LaB_6 に存在する B_6 分間の π 電子であることが分かった。同一構造を持つ物質の超高分解能データの精密構造解析の差分により、単位格子 100 電子中 1 電子の空間分布を検出できることを示した。

〈論文〉

1. Y. Fukuzumi, W. Kobayashi, and Y. Moritomo, "Size Dependent Ion Diffusion in $\text{Na}_2\text{Ti}_3\text{O}_7$ and $\text{Na}_2\text{Ti}_6\text{O}_{13}$ ", J. Adv. Nanomaterials 1 (2016)

2. Y. Moritomo, S. Urase, and T. Shibata, "Enhanced battery performance in manganese hexacyanoferrate by partial substitution", *Electrochimica Acta* 210 (2016)963-969
3. K. Amaha, W. Kobayashi, S. Akama, K. Mitsuishi, and Y. Moritomo, "Interrelation between inhomogeneity and cyclability in $\text{O}_3\text{-NaFe}_{1/2}\text{Co}_{1/2}\text{O}_2$ ", *Phys. Status Solidi RRL*, (2016)1-6 DOI 10.1002/pssr.201600284
4. M. Takachi, Y. Fukuzumi, and Y. Moritomo, "Concentration dependence of Li^+/Na^+ diffusion in manganese hexacyanoferrates", *Jpn. J. Appl. Phys.*, 53(2016)067101.
5. Y. Moritomo, K. Yonezawa, and T. Yasuda, "Carrier formation dynamics in prototypical organic solar cells as investigated by transient absorption spectroscopy", *International Journal of Photoenergy* 2016, Article ID 9105460 (2016).
6. T. Nomura, Y. Harada, H. Niwa, K. Ishii, M. Ishikado, S. Shamoto, and I. Jarrige, "Resonant inelastic X-ray scattering study of entangled spin-orbital excitations in superconducting $\text{PrFeAsO}_{0.7}$ ", *Phys. Rev. B* 94, 035134 (2016).
7. M. Takachi and Y. Moritomo, "In situ observation of macroscopic phase separation in cobalt hexacyanoferrate film", *Sci. Reps.* 7, 42694 (2017).
8. H. Niwa, T. Shibata, Y. Imai, S. Kimura, and Y. Moritomo, "Domain size of phase-separated Na_xCoO_2 as investigated by X-ray microdiffraction", *Batteries* 3 (2017) 5.
9. S. Akama, W. Kobayashi, H. Niwa, T. Uchiyama, and Y. Moritomo, "Local distortion around the guest ion in perovskite oxides", *Appl. Phys. Express.* 19 (2017) 051101
10. T. Shibata, M. Takachi, and Y. Moritomo, "Low voltage charge/discharge behavior of manganese hexacyanoferrate", *Batteries* 3 (2017) 7.
11. Jun Miyawaki, Shigemasa Suga, Hidenori Fujiwara, Hideharu Niwa, Hisao Kiuchi and Yoshihisa Harada, "A Compact permanent-magnet system for measuring magnetic circular dichroism in resonant inelastic soft X-ray scattering", *J. Synchrotron Rad.* 24, 449-455 (2017).
12. R. L. Magnusson, W. Kobayashi, M. Takachi, and Y. Moritomo, "Temperature effect on redox voltage in $\text{Li}_x\text{Co}[\text{Fe}(\text{CN})_6]_y$ ", *AIP advance*, 7 (2017) 045002
13. S. Akama, W. Kobayashi, K. Amaha, H. Niwa, H. Nitani, and Y. Moritomo, "Local structures around the substituted elements in mixed layered oxides", *Sci. Reps.* 7, 43791(2017)
14. Z. C. Wang, X. Y. Zhong, L. Jin, X. F. Chen, Y. Moritomo, J. Mayer, "Effects of dynamics diffraction condition on magnetic parameter detection in a double perovskite $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_6$ using electron energy-loss magnetic chiral dichroism", *Ultramicroscopy* (2017), in press.
15. S. E. M. J. Hedegaard, S. Christensen, N. Bindzus, K. F. F. Fischer, H. Kasai, K. Sugimoto, B. B. Iversen, "Carrier concentration dependence of structural disorder in thermoelectric Sn_{1-x}Te ", *MRS Advances* (2016), 3, 377-388.
16. Satomi Ogura, Yuki Idobata, Biao Zhou, Akiko Kobayashi, Rina Takagi, Kazuya Miyagawa, Kazushi Kanoda, Hidetaka Kasai, Eiji Nishibori, Chikatoshi Satoko, Bernard Delley, "Antiferromagnetic Ordering in the Single-Component Molecular Conductor, $[\text{Pd}(\text{tmdt})_2]$ ", *Inorg. Chem.* 2016, 55, 7709-7716.
17. Mizuho Tsuchiya, Ryota Sakamoto*, Masaki Shimada, Yoshinori Yamanoi, Yohei Hattori, Kuni-hisa Sugimoto, Eiji Nishibori, Hiroshi Nishihara*. "Bis(dipyrrinato)zinc(II) complexes: emission in

- the solid state. *Inorg. Chem.*(2016) 55, 5732-5734.
18. K. Kato, H. Kasai, A. Hori, M. Takata, H. Tanaka, S. Kitagawa, A. Kobayashi, N. Ozawa, M. Kubo, H. Arikawa, T. Takeguchi, M. Sadakiyo, M. Yamauchi, Superionic Conduction in Co-Vacant $P2-Na_xCoO_2$ Created by Hydrogen Reductive Elimination, *Chemistry-An Asian Journal* (2016), 11, 1537-1541
 19. Hiroki Ogawa*, Mikihiro Takenaka, Tsukasa Miyazaki, Keisuke Shimokita, Akihiko Fujiwara, Eiji Nishibori, Masaki Takata, Direct observation of spin-coating process in PS-b-P2VP thin films. *Macromolecules* (2016), 49, 3471-3477.F.
 20. Yasuyo Ogino, Tetsuro Kusamoto, Yohei Hattori, Masaki Shimada, Mizuho Tsuchiya, Yoshinori Yamanoi, Eiji Nishibori, Kunihisa Sugimoto, and Hiroshi Nishihara. Solvent-Controlled Doublet Emission of an Organometallic Gold(I) Complex with a Polychlorinated Diphenyl(4-pyridyl)methyl Radical Ligand: Dual Fluorescence and Enhanced Emission Efficiency. *Inorg. Chem.*, (2017), 56, 3909-3915; DOI: 10.1021/acs.inorgchem.6b02864
 21. Takamasa Tsukamoto, Risa Aoki, Ryota Sakamoto, Ryojun Toyoda, Masaki Shimada, Yohei Hattori, Mizuki Asaoka, Yasutaka Kitagawa, Eiji Nishibori, Masayoshi Nakano and Hiroshi Nishihara. A simple zinc(II) complex that features multi-functional luminochromism induced by reversible ligand dissociation. *Chem. Commun.*, (2017),53, 3657-3660; DOI: 10.1039/C6CC10190A, Communication
 22. H. Kasai, and E. Nishibori, Spatial distribution of electrons near the Fermi level in the metallic LaB6 through accurate X-ray charge density study. *Sci. Rep.* 7, 41375; doi: 10.1038/srep41375 (2017).
 23. Ken Kishimoto and Susumu Okada, "Influence of the Defects on the Electronic Structures of Bilayer Graphene", *Surface Science* Vol. 644, pp. 18 – 23 (2016).
 24. Ayaka Yamanaka and Susumu Okada, "Energetics and electronic structures of graphene nanoribbons under a lateral electric field", *Carbon* Vol. 96, pp. 351– 361 (2016).
 25. Mina Maruyama and Susumu Okada, "Magnetic Properties of Graphene Quantum Dots Embedded in h-BN Sheet", *The Journal of Physical Chemistry C* Vol. 120, 1293-1302 (2016).
 26. Ayaka Yamanaka and Susumu Okada, "Influence of electric field on electronic states of graphene nanoribbons under a FET structure", *Japanese Journal of Applied Physics* Vol. 55, 035101 (2016).
 27. Pablo Solis-Fernandez, Susumu Okada, Tohru Sato, Masaharu Tsuji, and Hiroki Ago, "Gate-Tunable Dirac Point of Molecular Doped Graphene", *ACS Nano* Vol. 10, pp. 2930 - 2939 (2016).
 28. Jun-ya Sorimachi and Susumu Okada, "Influence of fullerene cages on energetics of dipole moment of encapsulated water molecule", *Japanese Journal of Applied Physics* Vol. 55, 04EP02 (2016).
 29. U Ishiyama, Nguyen Thanh Cuong, and Susumu Okada, "Anomalous electrostatic potential properties in CNT thin films under a weak external electric field", *Applied Physics Express* Vol. 9, 045101 (2016).
 30. Kohei Narita and Susumu Okada, "Geometric and electronic structures of corannulene polymers: Ultra narrow graphene ribbons with corrugation and topological defects", *Chemical Physics Letters* Vol. 650, pp 76 - 81 (2016).
 31. Akiko Hasegawa and Susumu Okada, "Effect of structural deformation on carrier accumulation in

- semiconducting carbon nanotubes under an external electric field”, Japanese Journal of Applied Physics Vol. 55, 045101 (2016).
32. Taketo Kochi and Susumu Okada, ”Energetics and electronic structure of tubular Si nanoscale vacancies filled by carbon nanotubes”, Japanese Journal of Applied Physics Vol. 55, art. no. 055101 (2016).
 33. Kohei Narita and Susumu Okada, ”Geometric and electronic structures of one-dimensionally polymerized coronene molecules”, Japanese Journal of Applied Physics Vol. 55, 06GF02 (2016).
 34. Ken Kishimoto and Susumu Okada, ”Electron-state tuning of bilayer graphene by defects”, Japanese Journal of Applied Physics Vol. 55, 06GF06 (2016).
 35. Mitsunari Sugahara, Yohei Yomogida, Hideki Kawai, Yutaka Maniwa, Susumu Okada, and Kazuhiro Yanagi, ”Ambipolar Transistor of WS₂ Nanotube Random Networks”, Applied Physics Express Vol. 9, 075001 (2016).
 36. Jun-ya Sorimachi and Susumu Okada, ”Electrostatic properties of fullerenes under an external electric field: First-principles calculations of energetics for all IPR isomers from C₆₀ to C₇₈”, Chemical Physics Letters Vol. 659, 1-5 (2016).
 37. Hidekazu Takahashi, Masaaki Araidai, Susumu Okada, and Kenji Shiraishi, ”Theoretical Investigation on Electronic and Magnetic Structures of FeRh”, Journal of the Magnetics Society of Japan Vol. 40, 77-80 (2016).
 38. Yuichiro Takesaki, Kenji Kawahara, Hiroki Hibino, Susumu Okada, Masaharu Tsuji, and Hiroki Ago, ”Highly Uniform Bilayer Graphene on Epitaxial Cu-Ni(111) Alloy”, Chemistry of Materials Vol. 28, 4583-4592 (2016).
 39. Taketo Kochi and Susumu Okada, ”Effect of an intersection of carbon nanotubes on the carrier accumulation under an external electric field”, Applied Physics Express Vol. 9, 085103 (2016).
 40. Jiang Pu, Kaito Kanahashi, Nguyen Thanh Cuong, Chang-Hsiao Chen, Lain-Jong Li, Susumu Okada, Hiromichi Ohta, and Taishi Takenobu, ”Enhanced thermoelectric power in two-dimensional transition metal dichalcogenide monolayers”, Physical Review B Vol. 94, 014312 (2016).
 41. Ayaka Yamanaka and Susumu Okada, ”Energetics and electronic structure of h-BN nanoribbons”, Scientific Reports Vol. 6, 30653 (2016).
 42. Yanlin Gao, Tomoe Yayama, and Susumu Okada, ”Polar properties of a hexagonally bonded GaN sheet under biaxial compression”, Applied Physics Express Vol. 9, 095201 (2016).
 42. Mina Maruyama, Nguyen Thanh Cuong, and Susumu Okada, ”Coexistence of Dirac cones and Kagome flat bands in two-dimensional network of hydrocarbon molecules”, Carbon Vol. 109, 755-763 (2016).
 43. Remi Taira, Ayaka Yamanaka, and Susumu Okada, ”Electronic structure modulation of graphene edges by chemical functionalization”, Applied Physics Express Vol. 9, 115102 (2016).
 44. Sho Furutani and Susumu Okada, ”Electronic properties of pentaorgano [60]fullerenes under an external electric field”, Applied Physics Express Vol. 9, 115103 (2016).
 45. Kieu My Bui, Van An Dinh, Susumu Okada, and Takahisa Ohno, ”Na-ion diffusion in NASICON-type solid electrolyte: a density functional study”, Physical Chemistry Chemical Physics Vol. 18, 27226-27231 (2016).

46. Hideyuki Jippo, Taisuke Ozaki, Susumu Okada, and Mari Ohfuchi, "Electronic Transport Properties of Graphene Channel with Foreign Materials in 10 nm-scale devices", *Journal of Applied Physics* Vol. 120, 154301 (2016).

〈著書・総説等〉

1. 1. 守友 浩、安田剛、米澤宏平、桜井岳暁「有機デバイスへの応用：ナノ構造と機能性」*放射光* 29(2016)313-319

〈研究成果発表〉

[国際会議]

1. (Invited) Yutaka Moritomo "Carrier formation dynamics in organic solar cells as investigated by transient absorption spectroscopy" GREEN2016, taipei, Taiwan, 2016/12/24
2. Yutaka Moritomo "Structural properties of transition metal hexacyanoferrate as secondary battery material", AsCa2016, hanoi, Vietnam, 2016/12/6
3. Yutaka Moritomo "Structural properties of transition metal hexacyanoferrate as secondary battery material", APenergy2016, hsinchu, Taiwan, 2016/9/7
4. Yutaka Moritomo "Visualization of Li⁺ deintercalation dynamics in cobalt hexacyanoferrate", ICMM2016, Sendai, 2016/9/5
5. Eiji Nishibori, Hidetaka Kasai, "Charge density studies of metallic and semiconductor hexaborides." AnalytiX-2017, Fukuoka, Japan, 2017.03.22 (oral)
6. Eiji Nishibori, Hidetaka Kasai, Takayuki Shibata, Wataru Kobayashi, Yutaka Moritomo, "X-ray charge density study of positive electrodes for secondary battery. " AsCA2016, Hanoi, Vietnam, 2016.12.04-07(posters)
7. Hidetaka Kasai, "Electron Density of a Layered Transition Metal Dichalcogenide" , ECM-30, Basel, Switzerland, 2016. 08.26-09.01.(oral)
8. Hidetaka Kasai, "Advanced Charge Density Studies of TiS₂ and LaB₆ Using High-Resolution X-Ray Diffraction Data" 2017 TIMS-CENIDE-NTHU Joint Symposium on Nanoscience and Nanotechnology, Tsukuba, Japan, 2017.03.10-11
9. Mina Maruyama and Susumu Okada, "Coexistence of Dirac Cone and Kagome Band in Two-Dimensional Network of Hydrocarbon Molecules", Seventeenth International Conference on the Science and Application of Nanotubes and Low-Dimensional Materials - NT16, August 7–13, 2016, University of Vienna (Vienna).
10. Ayaka Yamanaka and Susumu Okada, "Tuning of polarization of h-BN nanoribbons by the edge hydrogenation", Seventeenth International Conference on the Science and Application of Nanotubes and Low-Dimensional Materials - NT16, August 7–13, 2016, University of Vienna (Vienna).
11. Yanlin Gao and Susumu Okada, "Energetics and electronic structures of GaN thin films", Seventeenth International Conference on the Science and Application of Nanotubes and

- Low-Dimensional Materials - NT16, August 7–13, 2016, University of Vienna (Vienna).
12. Jun-ya Sorimachi and Susumu Okada, "Magnetic properties of triangular pyramidal hydrocarbon molecule", 8th International Conference on Recent Progress in Graphene/2D Research, September 25-29, 2016, Sungkyunkwan University (Seoul).
 13. Taketo Kochi and Susumu Okada, "Electronic structure of CNT thin films with nanointerfaces under an electronic field", 8th International Conference on Recent Progress in Graphene/2D Research, September 25-29, 2016, Sungkyunkwan University (Seoul).
 14. Ken Kishimoto and Susumu Okada, "Electronic structure of graphene thin films with atomic and topological defects", 8th International Conference on Recent Progress in Graphene/2D Research, September 25-29, 2016, Sungkyunkwan University (Seoul).
 15. Yanlin Gao and Susumu Okada, "Geometric and electronic properties of a hexagonally bonded sheet of GaN", 8th International Conference on Recent Progress in Graphene/2D Research, September 25-29, 2016, Sungkyunkwan University (Seoul).
 16. Mina Maruyama and Susumu Okada, "Coexistence of Dirac cones and Kagome bands on a porous graphene", 8th International Conference on Recent Progress in Graphene/2D Research, September 25-29, 2016, Sungkyunkwan University (Seoul).
 15. Ayaka Yamanaka and Susumu Okada, "Electronic structure of h-BN nanoribbons", 8th International Conference on Recent Progress in Graphene/2D Research, September 25-29, 2016, Sungkyunkwan University (Seoul).
 16. Susumu Okada, "Electronic Properties of Nanoscale Materials under a Finite Electric Field", The 19th Asian workshop on First-Principles Electronic Structure Calculations, October 31 - November 2, 2016, National Chiao Tung University (Hsinchu). (Invited)
 17. M. Sugahara, H. Kawai, Y. Yomogida, Y. Maniwa, S. Okada, and K. Yanagi, "Ambipolar Transistors Based on Random Networks of WS₂ Nanotubes", 29th International Microprocesses and Nanotechnology Conference, November 8- 11, 2016, ANA Crown Plaza Hotel (Kyoto)
 18. M. Maruyama, N.T. Cuong, and S. Okada, "Coexistence of Dirac Cones and Kagome Flat Bands in Porous Graphene", 29th International Microprocesses and Nanotechnology Conference, November 8- 11, 2016, ANA Crown Plaza Hotel (Kyoto)
 19. H. Nishino, T. Fujimori, A. Fujino, T. Fujita, N. Umezawa, S. Okada, E. Nishibori, S. Ito, J. Nakamura, H. Hosono, and T. Kondo, "Room Temperature Synthesis of Two-Dimensional Boron Sheets", 29th International Microprocesses and Nanotechnology Conference, November 8- 11, 2016, ANA Crown Plaza Hotel (Kyoto)
 20. S. Furutani and S. Okada, "Electronic Properties of PCBM under an External Electric Field", 29th International Microprocesses and Nanotechnology Conference, November 8- 11, 2016, ANA Crown Plaza Hotel (Kyoto)
 21. . Kawai, S. Okada, and M. Otani, "Diffusion of Li Atom from a Solvated State to Interlayer of Graphite through Carbonylic Edge Termination for Fast Charge/Discharge of Li Ion Battery: First-Principles Calculations", 29th International Microprocesses and Nanotechnology Conference, November 8- 11, 2016, ANA Crown Plaza Hotel (Kyoto)
 22. K. Kishimoto and S. Okada, "Electronic Structure of Bilayer Graphene with Defects under an External Electric Field", 29th International Microprocesses and Nanotechnology Conference, Novem-

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

[国内学会・研究会]

1. (招待) 守友 浩「プルシャンブルー類似体の光誘起現象と構造物性」錯体討論会、福岡大学、2016/9/10
2. (招待) 守友 浩「電池型セルによる排熱利用」第二回光・量子シンポジウム、筑波国際会議場、2016/11/10
3. (招待) 守友 浩「電池型熱セルによる排熱利用」第一回かけはしシンポジウム、筑波大学、2016/11/21
4. (招待) 小林航「二次電池材料の起電力の圧力効果」第一回かけはしシンポジウム、筑波大学、2016/11/21
5. (Invited) 守友 浩、「エネルギー変換・貯蔵部門」, 第三回 CiRfSE シンポジウム、筑波、2017/1/23-24
6. 福住 勇矢、小林 航、守友 浩「熱セルを用いた P2 型 Na_xCoO_2 の熱電変換効果の計測」第 7 7 回応用物理学会秋季学術講演会、新潟県、2016/9/16
7. 天羽 薫、守友 浩、小林 航「O3 型 $\text{NaFe}_{0.5}\text{Co}_{0.5}\text{O}_2$ 固溶体の構造-電池特性相関」第 7 7 回応用物理学会秋季学術講演会、新潟県、2016/9/16
8. 赤間 翔太、天羽 薫、小林 航、丹羽 秀、守友 浩「層状酸化物固溶体の EXAFS 解析」第 7 7 回応用物理学会秋季学術講演会、新潟県、2016/9/16
9. 小林 航、伊王野 慎司、天羽 薫、赤間 翔太、守友 浩「層状酸化物 NaMO_2 における起電力の静水圧効果」第 7 7 回応用物理学会秋季学術講演会、新潟県、2016/9/16
10. 丹羽秀治、天羽薫、小林航、守友 浩「軟 X 線分光によるナトリウムイオン電池用層状酸化物の電子状

- 態観察」第 57 回電池討論会、幕張メッセ、2016/11/29
11. 柴田恭幸、浦瀬翔太、守友 浩「異種遷移金属部分置換によるマンガ・プルシアンブルー類似体の電気化学特性の向上」第 57 回電池討論会、幕張メッセ、2016/11/29
 12. 丹羽秀治、高地雅光、岡本淳、Wen-Bin Wu, Di-Jing Huang, 守友浩「共鳴軟 X 線発光分光によるナトリウムイオン電池正極活物質の局所電子状態測定」第 30 回日本放射光学会年会放射光科学合同シンポジウム、神戸芸術センター、2017/1/8
 13. 赤間翔太、小林 航、丹羽 秀治、守友 浩「ペロブスカイト型酸化物固溶体の EXAFS 解析」第 64 回応用物理学会春季学術講演会、神奈川県、2017/3/17
 14. 小林 航、天羽 薫、守友 浩「高圧力下における LiMPO₄ (M=Fe, Co) の結晶構造解析」第 64 回応用物理学会春季学術講演会、神奈川県、2017/3/17
 15. 福住 勇矢、小林 航、守友 浩「P2 型 Na_xCoO₂ の起電力の温度依存性」第 64 回応用物理学会春季学術講演会、神奈川県、2017/3/17
 16. 丹羽 秀治、高地 雅光、岡本 淳、Wu Wen-Bin, Huang Di-Jing, 守友 浩「ナトリウムイオン電池正極プルシアンブルー類似体の局所電子状態観測」第 64 回応用物理学会春季学術講演会、神奈川県、2017/3/17
 17. 丹羽秀治、平成 28 年度 CORE ラボ 研究成果報告会 「次世代エネルギーデバイスの放射光オペランドナノ顕微分光解析」、ナトリウム電池正極材料の放射光解析、東北大学多元研南総合研究棟 2, 1F 大会議室、2017 年 3 月 24 日。(口頭発表)
 18. 小沢帆太郎、西堀英治・柴田恭幸・守友浩「プルシアンブルー類似体のナノ領域原子配列解析法の開発」平成 28 年度 日本結晶学会年会、水戸、2016.11.17-18
 19. Lorraine A. Malaspina・Simon Grabowsky・杉本邦久・西堀英治「Towards precise and accurate determination of hydrogen positions with X-ray diffraction data utilizing hydrogen maleate salts」平成 28 年度 日本結晶学会年会、水戸、2016.11.17-18
 20. 唐津秀一・西堀英治・関真一郎・十倉好紀「スキルミオン発現物質 Cu₂OSeO₃ の放射光 X 線回折による構造研究」平成 28 年度 日本結晶学会年会、水戸、2016.11.17-18
 21. 中村篤・西堀英治・末國晃一郎・田中博己・高島敏郎「熱電材料テトラヘドライトの Sb lone-pair 電子の観測」平成 28 年度 日本結晶学会年会、水戸、2016.11.17-18
 22. 山中 綾香、岡田 晋, ”一軸歪み印加による h-BN ナノリボンの極性変調”, 第 51 回フラーレン・ナノチューブ・グラフェン総合シンポジウム, かでる 2・7 (札幌)2016 年 9 月 7 日-9 日
 23. 古谷 匠, 岡田 晋, ”電場下における PCBM の電子物性”, 第 51 回フラーレン・ナノチューブ・グラフェン総合シンポジウム, かでる 2・7 (札幌)2016 年 9 月 7 日-9 日
 24. 反町 純也, 岡田 晋, ”炭化水素ネットワークの電子状態と磁性”, 第 51 回フラーレン・ナノチューブ・グラフェン総合シンポジウム, かでる 2・7 (札幌)2016 年 9 月 7 日-9 日
 25. 松原 愛帆, 岡田 晋, ”金属ナノ粒子が吸着したグラフェンの電場応答”, 第 51 回フラーレン・ナノチューブ・グラフェン総合シンポジウム, かでる 2・7 (札幌)2016 年 9 月 7 日-9 日
 26. 丸山 実那, 岡田 晋, ”トポロジカル欠陥を有するグラフェンの分極と磁性状態”, 第 51 回フラーレン・ナノチューブ・グラフェン総合シンポジウム, かでる 2・7 (札幌)2016 年 9 月 7 日-9 日
 27. 古地 健人, 岡田 晋, ”マット構造を有する CNT 薄膜の電界下での電子物性”, 第 51 回フラーレン・ナノチューブ・グラフェン総合シンポジウム, かでる 2・7 (札幌)2016 年 9 月 7 日-9 日
 28. 平 麗実, 山中 綾香, 岡田 晋, ”化学修飾によるグラフェン端の仕事関数変調”, 第 51 回フラーレン・ナノチューブ・グラフェン総合シンポジウム, かでる 2・7 (札幌)2016 年 9 月 7 日-9 日

29. 菅原 光成, 河合 英輝, 蓬田 陽平, 真庭 豊, 岡田 晋, 柳 和宏, "WS2 ナノチューブネットワークにおける両極性トランジスタ", 第 51 回フラーレン・ナノチューブ・グラフェン総合シンポジウム, かでる 2・7 (札幌)2016 年 9 月 7 日-9 日
30. Yanlin Gao, Susumu Okada, "Energetics and electronic structures of hexagonal GaN thin films and heterostructures", 第 51 回フラーレン・ナノチューブ・グラフェン総合シンポジウム, かでる 2・7 (札幌)2016 年 9 月 7 日-9 日
31. Nguyen Thanh Cuong, Susumu Okada, "Suppression of Electrical Conductivity Deterioration of Cu Nanowire by Coating 2D-layered Materials", 第 51 回フラーレン・ナノチューブ・グラフェン総合シンポジウム, かでる 2・7 (札幌)2016 年 9 月 7 日-9 日
32. 古谷 匠, 岡田 晋, "C60 シャトルロックの電界下での電子物性", 日本物理学会 2016 年秋季大会、金沢大学、2016 年 9 月 13 日-16 日
33. 長澤 裕哉, 岡田 晋, "フラーレンと環状炭化水素分子からなる複合構造分子のエネルギー論と電子状態", 日本物理学会 2016 年秋季大会、金沢大学、2016 年 9 月 13 日-16 日
34. 西野 弘晃, 藤野 朝日, 藤森 智博, 伊藤 伸一, 藤田 武志, 西堀 英治, 岡田 晋, 梅澤 直人, 細野 秀雄, 中村 潤児, 近藤 剛弘, "新規 2 次元ホウ素シートの大量合成と特性評価", 日本物理学会 2016 年秋季大会、金沢大学、2016 年 9 月 13 日-16 日
35. 山中 綾香, 岡田 晋, "一軸歪み印加による h-BN ナノリボンの極性変調", 日本物理学会 2016 年秋季大会、金沢大学、2016 年 9 月 13 日-16 日
36. 反町 純也, 岡田 晋, "立体ラジカル分子を用いた多孔炭化水素ネットワークの電子状態", 日本物理学会 2016 年秋季大会、金沢大学、2016 年 9 月 13 日-16 日
37. 丸山 実那, 岡田 晋, "フェナレニルを構成単位とした 2 次元炭化水素ネットワーク物質の電子状態", 日本物理学会 2016 年秋季大会、金沢大学、2016 年 9 月 13 日-16 日
38. 古地 健人, 岡田 晋, "マット構造を有する CNT 薄膜の電界下での電子物性", 日本物理学会 2016 年秋季大会、金沢大学、2016 年 9 月 13 日-16 日
39. 岸本 健, 岡田 晋, "2 層グラフェンへの電界効果に対する欠陥の影響", 日本物理学会 2016 年秋季大会、金沢大学、2016 年 9 月 13 日-16 日
40. 古地 健人, 岡田 晋, "2 層カーボンナノチューブにおける非対称な電荷蓄積", 第 52 回フラーレン・ナノチューブ・グラフェン総合シンポジウム, 東京大学 (東京) 2017 年 3 月 1 日-3 日
41. 反町 純也, 岡田 晋, "二次元炭化水素ネットワークの磁性", 第 52 回フラーレン・ナノチューブ・グラフェン総合シンポジウム, 東京大学 (東京) 2017 年 3 月 1 日-3 日
42. 澤畑 恒来, 丸山 実那, 岡田 晋, "BN ドープグラフェンのエネルギー論と電子状態", 第 52 回フラーレン・ナノチューブ・グラフェン総合シンポジウム, 東京大学 (東京) 2017 年 3 月 1 日-3 日
43. 米山 和文, 山中 綾香, 岡田 晋, "グラフェンナノリボンの力学特性", 第 52 回フラーレン・ナノチューブ・グラフェン総合シンポジウム, 東京大学 (東京) 2017 年 3 月 1 日-3 日
44. ソーシアー アレキサンダー大和, 丸山 実那, 岡田 晋, "C60 が吸着したグラフェンのエネルギー論と電子状態", 第 52 回フラーレン・ナノチューブ・グラフェン総合シンポジウム, 東京大学 (東京) 2017 年 3 月 1 日-3 日
45. 古谷 匠, 岡田 晋, "1 次元 SIMEF 鎖のエネルギー論と電子状態", 第 52 回フラーレン・ナノチューブ・グラフェン総合シンポジウム, 東京大学 (東京) 2017 年 3 月 1 日-3 日
46. 岡田 晋, "Energetics and electronic properties of fullerenes consisting of fused pentagonal rings",

- 第 52 回フラーレン・ナノチューブ・グラフェン総合シンポジウム, 東京大学 (東京) 2017 年 3 月 1 日-3 日
47. 平 麗実, 山中 綾香, 岡田 晋, "端の水酸化によるグラフェンリボンへの自由電子注入", 第 52 回フラーレン・ナノチューブ・グラフェン総合シンポジウム, 東京大学 (東京) 2017 年 3 月 1 日-3 日
 48. 松原 愛帆, 岡田 晋, "電場による N ドープグラフェンの電子構造制御", 第 52 回フラーレン・ナノチューブ・グラフェン総合シンポジウム, 東京大学 (東京) 2017 年 3 月 1 日-3 日
 49. 秋葉 実樹, 岡田 晋, "トリプチセン誘導体の力学特性", 第 52 回フラーレン・ナノチューブ・グラフェン総合シンポジウム, 東京大学 (東京) 2017 年 3 月 1 日-3 日
 50. Mina Maruyama, Susumu Okada, "Geometric and electronic structures of polymerized C40 fullerene", 第 52 回フラーレン・ナノチューブ・グラフェン総合シンポジウム, 東京大学 (東京) 2017 年 3 月 1 日-3 日
 51. 木下 博貴, 河原 憲治, 寺尾 友里, Il Jeon, 丸山 実那, 松本 里香, 岡田 晋, 松尾 豊, 吾郷 浩樹, "CVD 成長した大面積二層グラフェンへの MoCl_5 のインターカレーションと透明導電膜応用", 第 52 回フラーレン・ナノチューブ・グラフェン総合シンポジウム, 東京大学 (東京) 2017 年 3 月 1 日-3 日
 52. 安間 愛莉, 山中 綾香, 岡田 晋, "グラフェン端への酸素吸着のエネルギー論", 第 52 回フラーレン・ナノチューブ・グラフェン総合シンポジウム, 東京大学 (東京) 2017 年 3 月 1 日-3 日
 53. 山中 綾香, 岡田 晋, "グラフェン端形成過程のエネルギー論", 第 52 回フラーレン・ナノチューブ・グラフェン総合シンポジウム, 東京大学 (東京) 2017 年 3 月 1 日-3 日
 54. 岸本 健, 岡田 晋, "単原子空孔を有する二層グラフェンの電導特性", 第 52 回フラーレン・ナノチューブ・グラフェン総合シンポジウム, 東京大学 (東京) 2017 年 3 月 1 日-3 日
 55. Terunobu Nakanishi, Ryo Kitaura, Takazumi Kawai, Susumu Okada, Shoji Yoshida, Osamu Takeuchi, Hidemi Shigekawa, Hisanori Shinohara, "An experimental and theoretical study on the scanning spectroscopy of europium nanowires encapsulated in carbon nanotubes", 第 52 回フラーレン・ナノチューブ・グラフェン総合シンポジウム, 東京大学 (東京) 2017 年 3 月 1 日-3 日
 56. Ryosuke Takahashi, Ryo Osaka, Yasumitsu Miyata, Susumu Okada, Yuhei Hayamizu, Satoshi Yasuda, Kei Murakoshi, "Out-of-Plane Strain Generation of Monolayer MoS_2 and MoSe_2 Formed a Moire? Superstructure on the Au(111) Surface", 第 52 回フラーレン・ナノチューブ・グラフェン総合シンポジウム, 東京大学 (東京) 2017 年 3 月 1 日-3 日
 57. 丸山実那, 岡田晋, "トポロジカル欠陥を埋め込んだグラフェンの極性と磁性状態", 日本物理学会第 72 回年次大会, 大阪大学 (豊中市)2017 年 3 月 17 日-20 日
 58. 松原愛帆, 岡田晋, "グラフェンへの電荷注入に対する吸着不純物の影響", 日本物理学会第 72 回年次大会, 大阪大学 (豊中市)2017 年 3 月 17 日-20 日
 59. 山中綾香, 岡田晋, "グラフェン端形成過程のエネルギー論", 日本物理学会第 72 回年次大会, 大阪大学 (豊中市)2017 年 3 月 17 日-20 日
 60. 古谷匠, 岡田晋, "C60 フラーレン誘導体の電界下での電子物性", 日本物理学会第 72 回年次大会, 大阪大学 (豊中市)2017 年 3 月 17 日-20 日

<知財>

1. 守友 浩、大村彩子、特許 6015891 「セシウムイオンの除去方法およびセシウムイオンの除去装置」、筑

波大学、2016/10/7

2. 守友 浩、松田智行、特許 6004540 「バインダーフリー電池」、筑波大学、2016/9/16
3. 守友 浩、小林航、特許 5988172 「酸化還元反応を利用した熱電変換方法および熱電変換素子」、筑波大学、2016/8/19
4. 守友 浩、小林航、特願 2016-211227 「熱発電素子」、筑波大学、2016/10/28

〈その他特記事項〉

1. 教育コース開設:常陽新聞 2016.5.2 「放射光物質科学コースを開設」
2. 高地雅光:数理物質科学研究科長賞
3. 福住勇矢:数理物質科学研究科長賞
4. 小林 航助教:筑波大学若手奨励賞
5. 福住勇矢:TGSW2016 ポスター賞受賞

5.3 バイオエネルギー研究チーム

チームリーダー

鍋島 達弥 (数理物質系化学域 教授)

連携教員

北 将樹 (数理物質系化学域 准教授)

辻村 清也 (数理物質系物質工学域 准教授)

加納 英明 (数理物質系理工工学域 准教授)

バイオエネルギー研究チームは、天然物や酵素などの機能性バイオ関連物質の特性に着目したエネルギー変換やその応用を検討する若手研究者リサーチグループであり、資源天然物化学、生命エネルギーに関わる機能性物質の発見、バイオ関連非線形フォトニクス、電気化学バイオデバイスなどを中心テーマとして取り組み、学内外の組織との共同研究を積極的に行うことでバイオ関連物質を利用した新しい機能性物質・材料の創製を目指す。これにより、バイオエネルギー物質の作用機序の解明(学理の構築)と、本拠点の二部門だけでは実現が困難な、分野融合的な機能をもつエネルギー材料の創出に貢献することを目的とする。本年度は光エネルギーを利用した生体分子や生体組織の構造解析・生体計測、生体エネルギーを利用したバイオエネルギー変換デバイスの創製などを中心に波及効果の高い独創的な研究成果をいくつも挙げた。

平成 28 年度のバイオエネルギーチームの研究実績について以下の通りである。

(1) 北将樹准教授

LA-LDI-MS を用いた標的生体分子の結合部位解析法の開発

強力な生理活性を示す化合物(リガンド)の標的分子の同定や結合位置の解明は、ケミカルバイオロジーや創薬研究において重要である。その解析法の一つに、リガンドに反応基と検出基を導入した誘導体(ケミカルプローブ)を用いる方法がある。本研究では、ラベル支援レーザー脱離イオン化質量分析法(LA-LDI MS)を用いて、標的タンパク質の光ラベル化反応と酵素消化という2つの操作だけで、プローブと結合した断片ペプチドを選択的かつ高効率に検出できる光親和性プローブを創出し、新たな結合位置解析法を開発することを目指した。

これまでに開発した LA-LDI MS に適した蛍光タグである 6-アミドピレン基と、光反応基であるジアジリン基を抗腫瘍性リガンドであるアプリーニン A (5) に導入した誘導体 ApAPaP (6) を合成した。本プローブは 5 の強力な活性を保持しており、メタノールや水中で紫外光を照射することで、40% 以上という高い収率で溶媒分子と共有結合し、365 nm に強い吸収を持つアミドピレン基の存在下でも、光反応基が機能することを確認した。しかし、このプローブを標的タンパク質アクチンと実際に結合させて光反応を行ってもタンパク質-リガンド複合体は得られず、主にアクチン内部に取り込まれている水分子と反応したことが分かった (Org Biomol Chem 誌に発表、2016 年)。

そこで反応性官能基を N-ヒドロキシスクシニル (NHS) 基に変更したアプリーニン A のアミドピレンプローブ ApAapyOSu (7) を合成し、ラベル化と酵素消化を検討したところ、アクチンの定量的なラベル化とラベル化ペプチドの LA-LDI MS による高感度検出に成功した。現在、NHS 基をリガンドとアミドピレン基の間に挿入したりリガンド解離型プローブの合成、および標的分子の効率的なラベル化を検討している。(図 92)

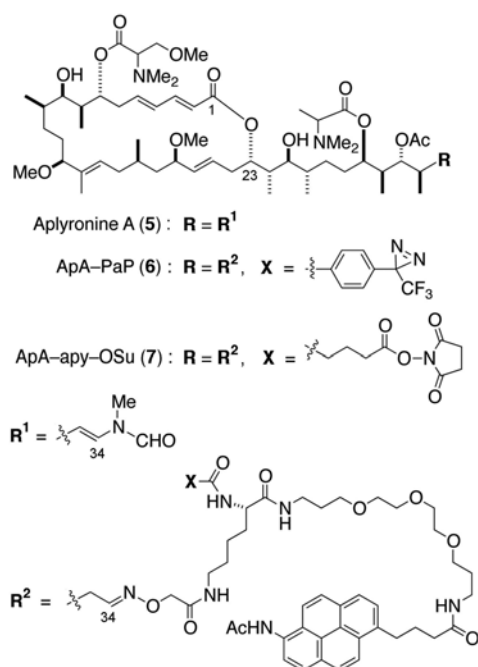


図 92 抗腫瘍性物質アプリーニン A およびアミドピレン誘導体の構造

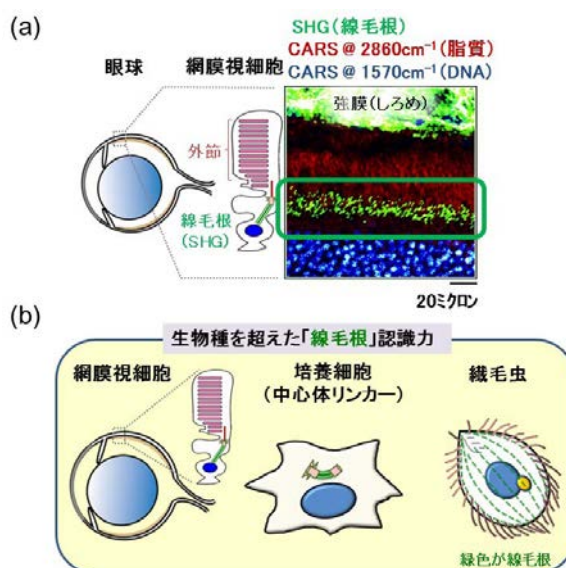


図 93 (a) 網膜視細胞における線毛根 (緑) の可視化 (緑枠), (b) 視細胞、培養細胞、繊毛虫における線毛根 (ルートレティン・ファイバー) の可視化。

(2) 辻村清也准教授

酵素の電極触媒活性、利用効率、安定性の革新的な向上を達成することで、生体エネルギー変換系を模倣したバイオエネルギー変換デバイスの創製を進める。

ハイドロゲル型酵素電極の高性能化

酵素と電極間の電子移動を担うメディエータが結合したポリマーをベースとしたハイドロゲル型酵素電極の電流密度と安定性の向上を目指して、メソ孔を有する多孔質炭素の構造および電解質溶液の酵素電極反応にもたらす影響について明らかにした。

1) ハイドロゲルと基板との相互作用を制御しメソ孔内部にハイドロゲルをナノメートルスケールで薄

く修飾することで、平滑な電極基板にハイドロゲルを厚く修飾する場合に比較して安定性が向上した。
2) 添加する電解質の特性により、ハイドロゲルを適度に脱水・収縮させることで、応答電流の安定性および電流密度が向上することが分かった。1) の多孔質炭素構造と合わせることで、従来の平滑電極を用いた系に比較して、飛躍的な安定性と電流密度の向上（酵素利用効率の向上）が達成できた。

酸化マグネシウム鋳型炭素の開発

酵素を3次元構造電極上に固定化するためには、酵素を担持するメソ孔および物質輸送を考慮したマクロ孔構造のバランスのとれた電極構造設計が重要となる。メソ孔構造が制御された多孔質炭素材料について、酸化マグネシウム鋳型炭素に注目し、開発を進めてきた。今年度においては細孔サイズが酵素電極反応応答に及ぼす影響を明らかにしたうえで、マクロメソ構造を有する炭素材料を開発した。具体的には、異なる結晶子サイズの酸化マグネシウム鋳型（40nmと150nm）を適当な比率で混合させたものを鋳型とし、炭素前駆体を混ぜて、炭素化した。酸により鋳型を除去することで、目的とする炭素を得た。高い物質輸送性と高い比表面積により、高電流密度を達成することに成功した。

バイオ燃料電池の開発

藻類光合成機能を利用した電池：海洋性藻類の光合成反応と電極反応をカップリングした“太陽電池”の高性能化に向けて、電極表面をレドックスポリマーで被覆することで、藻類バイオフィルムの形成および藻類内代謝系からの電子移動を促進させることに成功した。

酵素触媒機能を活用した電池：これまで紙基板上に多孔質炭素インクを印刷することで作製した酵素をベースとするバイオ電池を発表してきたが、単セルでは、様々なデバイスを駆動させるには起電力が低い。そこで印刷技術の利点を活かし、一枚の紙上に同様の電池を2セル印刷し、「折り紙」の要領で直列に組み込んだセルユニットの起電力はおよそ1Vに向上した。

電子伝達メディエータの開発に向けた基礎検討（速度と反応駆動力の関係）

グルコースを酸化する酵素から電極に電子を運搬する役割を果たす「メディエータ」の性能が、グルコースセンサやグルコースを燃料とする電池の性能を左右する。そこで、メディエータの構造、酸化還元電位、反応特性等が酵素（特に、フラビンを活性中心に持つグルコース脱水素酵素）からメディエータへの電子移動反応速度に与える影響を調べた。電子移動速度は反応の駆動力（酵素とメディエータの電位差）に大きく依存するが、その中でも酵素活性中心にどれだけメディエータ分子が近づけるかが重要な因子となっていることが分かった。得られた知見により、酵素活性中心ポケットの構造や表面に出ているアミノ酸側鎖との相互作用を考慮した分子構造や π 電子、分子間力、静電等の相互作用を考慮したメディエータ分子設計によりデバイスの高性能化が期待される。

(3) 加納英明准教授

生体計測

網膜における線毛根の「そのまま」見える化に成功

線毛根は感覚器に顕著な線維構造で、視力・聴覚・触覚・力覚など様々な感覚受容に寄与することが知られている。この感覚寄与は哺乳類のみならず、ハエや線虫そして繊毛虫などの微生物においても保存されており、生物種を越えて存在する機能であるため、線毛根の直接可視化はヒトでの病態評価やモデル生物での感覚機能の理解に大きく役立つと考えられている。しかしながら、これまで直接可視化の手段がなかった。我々は、附属病院眼科との共同研究の過程で、網膜視細胞の線毛根の可視化に成功した（図93）。すなわち、マルチカラー非線形光学イメージング装置のSHGチャンネルで、微弱ながら明瞭な多数のフィラメント状構造物を可視化した。線毛の専門家との共同研究により、この信号がルーレットインというタンパク質に由来すること（分子同定）、そしてそれがフィラメント状構造をとったオル

ガネラ、すなわち線毛根を可視化していること（オルガネラ同定）を突き止めた。さらに、視細胞の線毛根に限らず、培養細胞の中心体リンカーや繊毛虫の体表に存在する線毛根部など、ルートレチンにより構成された別種のオルガネラについても SHG により可視化可能であることを示し、幅広い生物種において本手法が普遍的に適用可能であることを実証した。今後、用いるレーザーの低出力化等、低侵襲化の検討を進めることで、網膜変性疾患等の眼病診断や、種を越えて線毛根が担う“力覚”研究等への展開が期待される。

「石油」を産生する藻類の生細胞イメージング

微細藻類の産生する脂質（藻類バイオマス）は、化石燃料や陸上植物バイオマスに代わるエネルギー資源として近年注目され、実用化に向けた開発が盛んに進められている。藻類バイオマスは非耕地での生産が可能であり、脂質蓄積能が高いことから、陸上植物よりも高効率で生育が可能である。様々な藻類の中で特に注目を集めているのが、オーランチオキトリウム (*Aurantiochytrium*) という藻類である。この藻類は、亜熱帯から熱帯のマングローブ域に多く生息し、従属栄養生物であるものの、高い増殖速度や脂質蓄積能を併せ持っている。オーランチオキトリウムは、主にスクアレンを主成分とする炭化水素系オイルを、乾燥重量あたり 20% 以上合成する。これは同様に炭化水素系オイルを産生するボトリオコッカス (*Botryococcus braunii*) の 1/3 の産生量に相当するが、増殖時間を考慮すると 16 倍のオイル産生効率をもっており、将来のエネルギー資源の候補として有望視されている。

その一方で、藻類バイオマスの資源実用化には課題も存在する。オーランチオキトリウムの場合、スクアレンがどのような環境条件でどの培養時期に最も多く産生するか、という培養条件を検討する際、現在は破壊検査による組成分析を行っている。しかしながら、スクアレンを多く産生する細胞を効率的にスクリーニングするためには、細胞一つ一つを生きのまま、そのままの状態での分析することが必須である。そこで、マルチモーダル非線形光学イメージングによる細胞内脂質の識別・同定を行った。

実験にはスクアレン産生能の最も高い *Aurantiochytrium mangrovei* 18W-13a 株を用いた。細胞の光学像を図 94(a) に示す。培養後 96 時間後の細胞内には凹んだ丸い形状のオルガネラが複数観察されるが、これらは液胞である。細胞内の各点におけるスペクトルを解析し、各々の振動モード毎の CARS イメージを再構成した結果を図 94(b-i) に示す。これらはそれぞれ、2996(b), 2914(c), 2840(d), 1738(e), 1439(f), 1379(g), 1324(h), 1265(i) cm^{-1} にピークを持つ振動バンドの CARS イメージである。一点あたりの露光時間は 50 ms、トータルの測定時間は 201×201 ピクセルのイメージで約 35 分であった。この中で、図 94(b), (d), (e), (f), (i) では細胞内に数マイクロメートルスケールの粒子状の構造物が多数観察されている。この位置（図 94(d) の A 点）における $\text{Im}[\chi^{(3)}]$ スペクトルを図 95(a) に示す。このスペクトルは藻類の産生するトリアシルグリセロール (triacylglyceride; TAG) のモデル物質であるトリオレインの $\text{Im}[\chi^{(3)}]$ スペクトル（同一条件で測定; 図 95(c)）と良く一致しているため、粒子状の構造物は藻類が産生した油滴 (TAG) であると同定できる。従って、2996, 2840, 1738, 1439, 1265 cm^{-1} における各々のバンドはそれぞれ C=C-H 結合の C-H 伸縮振動、 CH_2 伸縮振動、エステル由来の C=O 伸縮振動、CH 変角振動、C=C-H 結合の CH 変角振動にアサインできる（藻類の脂質の特徴として、不飽和度が高いことが挙げられる）。

細胞内には、他にも CH_2 伸縮振動がよく見える領域がある。図 94(d) の B 点における $\text{Im}[\chi^{(3)}]$ スペクトルを図 95(b) に示す。このスペクトルと標品のスクアレンの $\text{Im}[\chi^{(3)}]$ スペクトル（図 95(d)）との比較から、このスペクトルを与える分子は藻類の産生するスクアレンであると同定した。スクアレンの細胞内局在は、1379 及び 1324cm^{-1} のバンドでも可視化されている（図 94(g) 及び (h)）。これらの脂質のバンドのうち、C=C 伸縮振動である 1650cm^{-1} 付近のバンドは、TAG（図 95(a): 青）、スクア

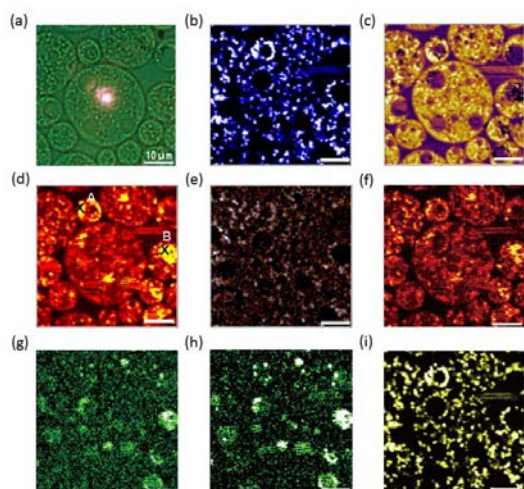


図 94 クアレレン産生能の最も高い *Aurantiochytrium mangrovei* 18W-13a 株の細胞の光学像 (a) と振動モード毎の CARS イメージ。

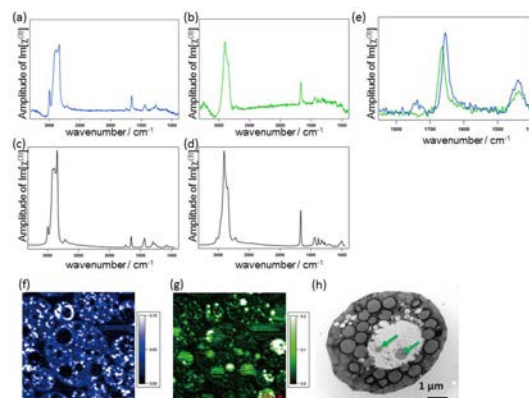


図 95 図 94(d) の点 A 及び B における $\text{Im}[\chi^{(3)}]$ スペクトル [(a) 及び (b)], TAG (トリオレン) 及びスクアレレン標品の $\text{Im}[\chi^{(3)}]$ スペクトル [(c) 及び (d)], C=C 伸縮領域の拡大図 (e), C=C 伸縮振動により分割した TAG (f) 及びスクアレレン (g) の CARS イメージ, オーランチオキトリウムの電子顕微鏡写真 (h)。 図中矢印がスクアレレンの油滴。

レン (図 95(b): 緑) でピーク位置が異なるため (図 95(e))、このバンドを分割することで TAG 及びスクアレレンの CARS イメージを再構成した (図 95(f) 及び (g))。これらと光学像 (図 94(a)) との比較から、スクアレレンは細胞内で TAG とは別の場所、すなわち液胞内に局在していることがわかった。実際に光学像においても、よく見ると液胞内に小さな粒がいくつか確認でき、これらがスクアレレンの油滴であることが予想される。液胞内の油滴の存在は、図 95(h) に示された電子顕微鏡のイメージでも確認できた (スクアレレンは液胞中で小さい油滴として存在・分布しているため、測定中に laser tweezing の効果により引きずられたと考えられる)。スクアレレンが液胞に局在する理由としては、過剰に産生されたスクアレレンの一時貯蔵、およびオートファジーによるエネルギー源や炭素源としての利用等の可能性が考えられる。

〈論文〉

1. Yuichiro Hirayama, Kota Yamagishi, Tomohiro Suzuki, Hirokazu Kawagishi, Masaki Kita and Hideo Kigoshi "Analysis of the Aplyronine A-induced Protein-protein Interaction between Actin and Tubulin by Surface Plasmon Resonance", *Bioorg. Med. Chem.*, 24, 2809-2814 (2016).
2. Jun J. Sato, Satoshi D. Ohdachi, Lazaro M. EcheniqueDiaz, Rafael BorrotoPez, Gerardo BeguQuiala, Jorge L. DelgadoLabaino, Jorgelino GmezDez, Jos AlvarezLemus, Son Truong Nguyen, Nobuyuki Yamaguchi and Masaki Kita "Molecular Phylogenetic Analysis of Nuclear Genes Suggests A Cenozoic Over-water Dispersal Origin for the Cuban Solenodon", *Sci. Rep.*, 6, 31173 (2016).
3. Kozo Yoneda, Yaping Hu, Rei Watanabe, Masaki Kita and Hideo Kigoshi "Binding Position Analysis of Target Proteins with the Use of Amidopyrene Probes as LA-LDI Enhancing Tags", *Org. Biomol. Chem.*, 14, 8564-8569 (2016).
4. Aiko Sakai, Emiko Noguchi, Takashi Fukushima, Manabu Tagawa, Atsushi Iwabuchi, Masaki Kita,

- Keisuke Kakisaka, Akio Miyasaka, Yasuhiro Takikawa and Ryo Sumazaki "Identification of Amino Acids in Antigen-binding Site of Class II HLA Proteins Independently Associated with Hepatitis B Vaccine Response", *Vaccine*, 35, 703-710 (2017).
5. Suzuki, A., Tsujimura, S., "Long-term continuous operation of FAD-dependent glucose dehydrogenase hydrogel-modified electrode at 37° C", *Chem. Lett.*, 45(4) 484-486 (2016).
 6. Suzuki, A., Tsujimura, S., "Hofmeister effects on the glucose oxidase hydrogel-modified electrode", *Electrochim. Acta*, 201, 228-232 (2016).
 7. Inagaki, M., Toyoda, M., Soneda, Y., Tsujimura, S., Morishita, T., "Templated mesoporous carbons: Synthesis and applications", *Carbon*, 107, 448 (2016).
 8. Darus, L., Sadakane, T., Ledezma, P., Tsujimura, S., Osadebe, I., Leech, D., Gorton, L., Freguia, S., "Redox-Polymers Enable Uninterrupted Day/Night Photo-Driven Electricity Generation in Biophotovoltaic Devices", *J. Electrochem. Soc.*, 164(3), H3037-H3040 (2017).
 9. Funabashi, H., Takeuchi, Tsujimura, S., "Hierarchical meso/macro-porous carbon fabricated from dual MgO templates for direct electron transfer enzymatic electrodes", *Sci. Rep.*, 7, 45147 (2017).
 10. Shitanda, I., Kato, S., Tsujimura, S., Hoshi, Y., Itagaki, M., "Screen-printed, Paper-based, Array-type, Origami Biofuel Cell", *Chem. Lett.*, 46, 726-728 (2017).
 11. Suzuki, A., Mano, N., Tsujimura, S., "Lowering the potential of electroenzymatic glucose oxidation on redox hydrogel-modified porous carbon electrode", *Electrochim. Acta*, 232, 581-585 (2017).
 12. Tsuruoka, N., Sadakane, T., Hayashi, R., Tsujimura, S., "Bimolecular Rate Constants for FAD-dependent Glucose Dehydrogenase from *Aspergillus terreus* and Organic Electron Acceptors", *Int. J. Mol. Sci.*, 18(3), 604 (2017)
 13. Yamada, M., Hashimoto, Y., Kumano, T., Tsujimura, S., Kobayashi, M., "New function of aldoxime dehydratase: Redox catalysis and the formation of an expected product", *PLOS ONE*, in press
 14. Rie Fujisawa, Tomoya Ohno, Philippe Leproux, Vincent Couderc, Kiyoshi Fukusaka, Hiroshi Kita, and Hideaki Kano, "Effect of a waterproofing agent on the penetration process of water into a cellulose acetate film by time-resolved coherent anti-Stokes Raman scattering (CARS) microscopy", *Chemistry Letters*, DOI: 10.1246/cl.170120.
 15. Toshihiro Akiyama, Akihito Inoko, Yuichi Kaji, Shigenobu Yonemura, Kisa Kakiguchi, Hiroki Segawa, Kei Ishitsuka, Masaki Yoshida, Osamu Numata, Philippe Leproux, Vincent Couderc, Tetsuro Oshika, Hideaki Kano, "SHG-specificity of cellular Rootletin filaments enables *nave* imaging with universal conservation", *Scientific Reports* 7, 39967 (2017), DOI: 10.1038/srep39967.
 16. Rie Fujisawa, Tomoya Ohno, Philippe Leproux, Vincent Couderc, Kiyoshi Fukusaka, Hiroshi Kita, and Hideaki Kano, "Effect of a Stretching Procedure on the Penetration Process of Water into a Cellulose Acetate Film by Coherent Anti-Stokes Raman Scattering (CARS) Microspectroscopy", *Chemistry Letters* 46(1), 92-94 (2017), DOI: 10.1246/cl.160765
 17. Kei Ishitsuka, Masahiro Koide, Masaki Yoshida, Hiroki Segawa, Philippe Leproux, Vincent Couderc, Makoto M. Watanabe and Hideaki Kano, "Identification of intracellular squalene in living algae, *Aurantiochytrium mangrovei* with hyper-spectral coherent anti-Stokes Raman microscopy using a sub-nanosecond supercontinuum laser source", *Journal of Raman Spectroscopy* 48(1), 815

(2017) DOI:10.1002/jrs.4979.

18. Erwan Capitaine, Nawel Ould Moussa, Christophe Louot, Claire Lefort, Dominique Pagnoux, Jean-Ren Duclre, Junya F. Kaneyasu, Hideaki Kano, Ludovic Duponchel, Vincent Couderc, and Philippe Leproux, "Coherent anti-Stokes Raman scattering under electric field stimulation", *Physical Review B* 94, 245136(2016), DOI: 10.1103/PhysRevB.94.245136.
19. Rie Fujisawa, Tomoya Ohno, Junya F. Kaneyasu, Philippe Leproux, Vincent Couderc, Hiroshi Kita, and Hideaki Kano, "Dynamical study of the water penetration process into a cellulose acetate film studied by coherent anti-Stokes Raman scattering (CARS) microspectroscopy", *Chemical Physics Letters* 655656(1), 8690 (2016), DOI: 10.1016/j.cplett.2016.05.038
20. Claire Lefort, Rodney P. O'Connor, Vronique Blanquet, Laetitia Magnol, Hideaki Kano, Vincent Tombelaine, Philippe Lvque, Vincent Couderc, and Philippe Leproux, "Multicolor multiphoton microscopy based on a nanosecond supercontinuum laser source", *Journal of Biophotonics* 9, 709-714 (2016).
21. Hideaki Kano, Hiroki Segawa, Masanari Okuno, Philippe Leproux, and Vincent Couderc, "Hyperspectral coherent Raman imaging principle, theory, instrumentation, and applications to life sciences", *Journal of Raman spectroscopy*, 47(1), 116-123 (2016)

〈著書・解説・総説等〉

1. 北将樹 「毒を持つ哺乳類：珍獣キューバソレノドンとは？」 国立科学博物館雑誌 *Milsil*, 52, 17-19 (2016).
2. 北将樹 「アクチン結合性天然物の新展開」 *化学工業*, 67, 647-653 (2016).
3. 北将樹 巨大海洋分子の魅力 天然物の化学魅力と展望 第7章, pp. 46-52, 上村大輔 編, 東京化学同人 (2016).
4. 北将樹 動物毒の世界 天然物の化学魅力と展望 第15章, pp. 105-111, 上村大輔 編, 東京化学同人 (2016).
5. Tsujimura, S., 「Functional Electrodes for Enzymatic and Microbial Bioelectrochemical Systems.」 Flexer, V. and Brun, N. (Eds.). Imperial College Press. Chap.10, Carbonaceous electrodes featuring tunable mesopores for use as enzyme electrodes.
6. 辻村清也、四反田功、「ヘルスケア・ウェアラブルデバイスの開発 (Advances in Healthcare Wearable Devices)」, 監修：菅沼克昭, シーエムシー出版 (2017/03/10) ISBN 978-4-7813-1239-2、第4章 電源・電池、5 ウェアラブル電源としてのバイオ電池 (pp.133-140) (教科書)
7. 辻村清也、「応用微生物学 第3版」, (横田篤, 大西康夫, 小川順編), 文英堂出版 (2016/7/31) ISBN 978-4-8300-4131-0、第7章, 3. 2) センサ (pp.239-243)

〈研究成果発表〉

[国際会議]

1. Masaki Kita, Hideo Kigoshi "PPI-inducing marine macrolide" 8th US-Japan Symposium in Ma-

- rine Bioorganic Chemistry: 21st Century Innovations in Natural Products, University of Hawaii, Honolulu, Hawaii, UAS, November 14-17, 2016 (Invited)
2. Tsujimura, S., “Enzyme-based biofuel cell” , The Japan-America Frontiers of Engineering 2016 (日米先端工学シンポジウム, JAFOE), Irvine, CA, USA, June 17,2016, (Invited) (Best Speaker Award 受賞)
 3. Tsujimura, S., “Enzymatic biofuel cell based on MgO-templated carbon” , Seminar, Bioenergetique et Ingenierie des Proteines, Marseilles, France, August 29-31, 2016 (Invited)
 4. Tsujimura, S., “Enzymatic biofuel cell based on porous carbon materials” , France-Japan Meeting on (bio)-functionalization of nanostructured carbon and (bio)-electrocatalytic applications, University of Grenoble-Alps, Grenoble, France, September 1-2, 2016 (Invited)
 5. Tsujimura, S., “Enzymatic biofuel cell based on porous carbon materials” (Keynote), PRiME2016, Honolulu, HI, USA, October 3, 2016
 6. Seiya Tsujimura, Aimi Suzuki , “Hofmeister Effects on Glucose oxidase-Redox Hydrogel Electrode” , 19th Topical Meeting of the International Society of Electrochemistry ”Electrochemistry at Modified Interfaces”, The University of Auckland, Auckland, New Zealand, April 17- 20, 2016
 7. Seiya Tsujimura, “MgO-templated mesoporous carbon for enzyme electrode” , Elecnano7, Lille University, Lille, France, May 23-26, 2016
 8. Seiya Tsujimura, Ayumu Niiyama, “Glucose/O₂ enzymatic biofuel cell beased on MgO-templated porous carbon” , 67th ISE meeting, World Forum, The Hague, The Netherlands, August 21-25, 2016
 9. Hiroto Funabashi, Seiya Tsujimura, “Designing macro-meso pore structure of MgO-templated carbon for DET-based Enzyme electrodes” , PRiME2016 Honolulu, HI, USA, October 3, 2016
 10. Ayumu Niiyama, Seiya Tsujimura, “Glucose/O₂ biofuel cell constructed from MgO-templated carbon modified carbon cloth” , PRiME2016 Honolulu, HI, USA, October 3, 2016
 11. Hideaki Kano, “Coherent nonlinear optical spectroscopic imaging using a white-light laser source” Japan-Taiwan Medical Spectroscopy International Symposium, Awaji, Hyogo, December 4-7 , 2016 (Invited) .
 12. Hideaki Kano, “ Label-free, Multi-color Imaging of Live Cells and Tissues Using a White-Light Laser Source” , 10th International Symposium on Nanomedicine, Tsukuba, Ibaraki, November 24-26 , 2016 (Invited)
 13. Yuki Shimodaira , Masahiro Ando, Hiro-o Hamaguchi , Aya Fukuda, Koji Hisatake, and Hideaki Kano, “CARS spectroscopic imaging and multivariate curve resolution analysis of brown adipocytes” Japan-Taiwan Medical Spectroscopy International Symposium , Awaji, Hyogo, December 4-7 , 2016

[国内学会・研究会]

1. 胡亜萍・米田耕三・渡邊礼・北将樹・木越英夫「タンパク質-リガンド相互作用を解析するアミドピレンプローブの開発」新規素材探索研究会第15回セミナー、新横浜フジビューホテル、横浜、2016年6月3日（ポスター）

2. 北将樹・胡亜萍・米田耕三・渡邊礼・木越英夫「LA-LDI MS を用いた標的タンパク質の結合位置解析法の開発」日本ケミカルバイオロジー学会第 11 回年会、京都テレサ、京都、2016 年 6 月 15-17 日（口頭）
3. 渡邊礼・胡亜萍・米田耕三・北将樹・木越英夫「タンパク質-リガンド相互作用を解析するアミドピレンプローブの開発」第 27 回新薬創製談話会、江戸屋、つくば、2016 年 8 月 30-31 日（ポスター）
4. 北将樹「タンパク質-生物活性リガンド相互作用を解析するケミカルプローブの開発」第 89 回日本生化学会大会 シンポジウム「生物活性と創薬のケミカルバイオロジー」仙台国際センター／東北大学川内北キャンパス、仙台、2016 年 9 月 25-27 日（招待講演）
5. 北将樹「生理活性蛍光リガンドを用いた標的分子の結合様式解析」平成 28 年度筑波大学プレ戦略イニシアティブ「光と物質・生命科学のアンサンブルによる新現象の発掘と解明」キックオフシンポジウム、筑波大学、つくば、2016 年 11 月 1 日（口頭）
6. 北将樹「タンパク質間相互作用を誘導する有機小分子」第 54 回日本生物物理学会年会 菱化システム(株) ランチョンセミナー、つくば国際会館、つくば、2016 年 11 月 25-27 日（招待講演）
7. 瀬口由宇・山岸航大・土屋幸太・中根玄貴・北将樹・木越英夫「蛍光プローブを用いた抗腫瘍性マクロリド、アプリロニン A の標的タンパク質における結合位置解析」第 34 回メディシナルケミストリーシンポジウム、つくば国際会館、つくば、2016 年 11 月 30 日-12 月 2 日（ポスター）
8. 北将樹・米田耕三・胡亜萍・渡邊礼・木越英夫「LA-LDI MS を用いた標的タンパク質の結合位置解析法の開発」第 34 回メディシナルケミストリーシンポジウム、つくば国際会館、つくば、2016 年 11 月 30 日-12 月 2 日（ポスター）
9. 渡邊礼・胡亜萍・米田耕三・飯尾啓太・北将樹・木越英夫「タンパク質-リガンド相互作用を解析するピレンプローブの開発」日本化学会第 97 春季年会 2017、慶応大学日吉キャンパス、横浜、2017 年 3 月 16-19 日（口頭）
10. 胡亜萍・飯尾啓太・渡邊礼・米田耕三・北将樹・木越英夫「タンパク質-リガンド相互作用を解析するリガンド解離型アミドピレンプローブの開発」日本化学会第 97 春季年会 2017、慶応大学日吉キャンパス、横浜、2017 年 3 月 16-19 日（口頭）
11. 高橋桃子・二木健太郎・田邊健太・北将樹・木越英夫「年会構造簡略化を指向したアプリロニン A の人工類縁体の設計・合成と生物活性」日本化学会第 97 春季年会 2017、慶応大学日吉キャンパス、横浜、2017 年 3 月 16-19 日（口頭）
12. 辻村清也、「バイオ燃料電池とウェアラブルデバイス関連」、つくば研究会：つくばにおけるイノベーションエコシステム、つくばイノベーションプラザ、茨城県つくば市、2016 年 4 月 25 日（招待講演）
13. 辻村清也、「酵素燃料電池の開発」、第 118 回 有機エレクトロニクス研究センター講演会、山形大有機エレクトロニクス研究センター、山形県米沢市、2016 年 4 月 26 日（招待講演）
14. 辻村清也、「酵素を電極触媒に用いる燃料電池の開発」、セミナー「バイオ電池・生体電池の設計、高効率化、新しい応用展開」、情報技術協会、東京都品川区、2016 年 5 月 27 日（招待講演）
15. 辻村清也、「水系（生体関連）有機レドックス反応とバイオ燃料電池への応用」、新レドックス系エネルギー技術研究WG 第一回講演会、電気化学会本部会議室、東京都千代田区、2016 年 9 月 13 日（招待講演）
16. 辻村清也、「酵素型バイオ燃料電池の最新動向」、電気化学セミナー 最先端電池技術 2017、タワーホール船堀、東京都江戸川区、2017 年 1 月 20 日（招待講演）
17. 安立 翼、相原和法、辻村清也、「FAD 依存性グルコース脱水素酵素と電子受容体との反応に及ぼす電解質の影響」、第 62 回ポーラログラフィーおよび電気分析討論会、宮古島市中央公民館大ホール、2016

年 11 月 19-20 日

18. 船橋広人、竹内聖詞、辻村清也、「マクロメソ階層構造を有する酸化マグネシウム鋳型炭素の酵素電極への応用」、第 84 回電気化学学会大会、首都大学東京、東京都八王子市、2017 年 3 月 25-27 日
19. 石居周二、船橋広人、辻村清也、「酸化マグネシウム鋳型炭素を用いたビリルビンオキシダーゼ酸素還元カソード」、第 84 回電気化学学会大会、首都大学東京 東京都八王子市、2017 年 3 月 25-27 日
20. 加納英明「Coherent nonlinear optical imaging using a white-light laser source (白色レーザーによるコヒーレント非線形光学イメージング)」、第 54 回生物物理学会年会・科研費新学術領域「レゾナンスバイオ」共催シンポジウム、茨城県つくば市、2016 年 11 月 26 日 (招待講演)
21. 山田慶春、加納英明「波長可変ピコ秒レーザーを用いたハイパーラマン顕微分光装置の開発と二酸化チタンへの応用」第 10 回分子科学討論会、兵庫県神戸市、2016 年 9 月 13~15 日
22. 藤澤理枝、大野智哉、兼安惇哉、北弘志、加納英明、「CARS 分光顕微鏡によるセルロースアセテートフィルムの水含浸過程の実時間追跡」第 10 回分子科学討論会、兵庫県神戸市、2016 年 9 月 13~15 日
23. 木村将大、米山弘亮、江川麻里子、岩永慎也、細井純一、加納英明、「マルチプレックス CARS 顕微分光装置を用いたランゲルハンス細胞の分子分光イメージング」第 10 回分子科学討論会、兵庫県神戸市、2016 年 9 月 13~15 日
24. 木村将大、米山弘亮、江川麻里子、岩永慎也、細井純一、加納英明、「マルチモーダル非線形光学顕微鏡を用いたヒト皮膚の分子分光イメージング」平成 28 年度 日本分光学会年次講演会、大阪府豊中市、2016 年 5 月 24 日~26 日

6 逆問題研究推進室/数理科学研究推進室 活動報告

推進室長

青嶋 誠 (数理物質系数域 教授)

構成教員

秋山 茂樹 (数理物質系数域 教授)

木下 保 (数理物質系数域 准教授)

田崎 博之 (数理物質系数域 准教授)

照井 章 (数理物質系数域 准教授)

金子 元 (数理物質系数域 国際テニュアトラック助教)

磯崎 洋 (数理物質系 特命教授)

連携教員

矢田 和善 (数理物質系数域 准教授)

佐垣 大輔 (数理物質系数域 准教授)

竹山 美宏 (数理物質系数域 准教授)

梁 松 (数理物質系数域 准教授)

久保 隆徹 (数理物質系数域 講師)

守屋 克洋 (数理物質系数域 助教)

中井 直正 (数理物質系数域 教授)

2017年度に予定されている数理物質系センター改編に向けて、新たな連携体制を構築するために、2017年1月に「逆問題研究推進室」を改組して「数理科学研究推進室」を設置した。大規模複雑データ等の解析に関する課題を、理論と方法論の両面から数学的に俯瞰し、研究の新たな展開を目指すものである。数理科学研究推進室は、統計・数理解析・幾何・代数の4つの部門からなり、それぞれにテーマを掲げて分野融合型の研究を推進している。各部門の具体的な活動と成果は、以下の通りである。なお、分野横断的な研究交流の一助となることを目指し、相互理解を推進する場として「数理連携サロン」を6月と12月に開催した。

(1) 統計部門：大規模複雑データの統計数理

統計部門は、大規模複雑データの統計数理を、理論と方法論の両面から総合的に研究している。モデルの構築だけでなく、モデルの理論的な評価・改良も担ったモデリング技法の開発を目指している。本年度は、巨大なノイズをもった高次元データについて、様々な統計解析手法を提案した。提案手法は、潜在構造が壊れるほどの巨大なノイズがあっても高い精度を保証でき、実データ解析においてもその性能が評価できた。統計部門の研究成果は国内外から高く評価されており、国際会議等での複数の招待講演は顕著な業績といえる。社会貢献も活発に行った。青嶋が代表をする科研費基盤研究(A)によるシンポジウムを、久留米大学・金沢大学・名古屋大学で開催した。ゲノム・金融・環境・情報工学における大規模複雑データの統計数理に関して、研究成果や問題提起が多数発表され、多種多様な分野の研究者から高い関心を集めた。さらに、筑波大学で国際シンポジウムを開催し、大規模複雑データの第一線で活躍する著名な外国人研究者を4名招聘し、国内のトップ研究者を多数交えて、国際的視点から活発な意見交換を行った。これら4つのシンポジウムのどれもが大変に盛況であったことから、大規模複雑データの統計数理に対して、世の中の期待感が高まっていることを肌で感じた。

(2) 数理解析部門：微分方程式の解の構造とその応用

ユークリッド空間上のバークマン型変換とよばれる積分変換に関連して、楕円に付随した正準変換や非可換調和振動子に関連する知見、および、エルミート関数系についての展開の計算法に関する提案について、成果が得られた。無限に広がった多様体上の波動方程式に対するハイゼンベルグの S 行列から多様体を定める逆問題、格子上のシュレーディンガー作用素に対する逆散乱問題、特にグラフエンの場合のポテンシャル・格子欠損の同定の問題において重要な結果が得られた。可積分確率過程の代数的構造について研究を進め、 q -ボゾン系と呼ばれる 1 次元確率過程について、その拡張 (多種粒子版) をアフィンヘッケ代数の変形を用いて構成した。ノンランダムな力学系を用いて結晶確率モデルを説明するという研究課題において、二つの重粒子が同じタイプでありかつ粒子の挙動に相対効果がない場合を研究するために、対応している確率微分方程式を考査し、ポテンシャル項の係数が無限大に行くとき位置の分布の確率過程が収束することを証明した。

(3) 幾何部門：多様体上の幾何学

幾何部門では、(1) 4 次元ユークリッド空間内の超共形曲面の正則関数と類似した性質の研究、(2) 四元数的正則幾何を用いた可積分系と極小曲面の関連についての研究、(3) 曲面のツイスター空間へのリフトを用いた曲面の研究、(4) 四元数的正則幾何の高余次元化の研究、(5) コンパクトリー群の極大対蹠部分群の分類を完成、(6) (5) を利用してコンパクト対称空間の極大対蹠集合の分類に応用する研究、を行いそれぞれ成果を得た。なお、以下の研究集会を世話人として開催した。第 16 回 秋葉原微分幾何セミナー「平均曲率ベクトル平行曲面、その過去・現在そして未来」2016 年 10 月 2 日、研究集会「部分多様体論・湯沢 2016」2016 年 12 月 1 日から 3 日。

(4) 代数部門：ランダムネスと数論

代数部門では、数理解析の研究を推し進めた。特に結晶構造やそのコロナ極限や結晶基底の組み合わせ論的解釈などで大きな進展があった。逆問題との関係では秋山は広島大の今井克暢との共同でペンローズタイリングのコロナ極限は正十角形であることを証明した。この証明はペンローズタイルの特殊性に依存しており一般の場合に拡張できない。これを拡張し、様々なタイル張りを含む形で秋山-J.Caalim-金子-今井の共同研究が現在進んでいる。佐垣は量子アフィン代数上の表現論に用いられる結晶基底の組み合わせ論的研究を進めた。金子は数の表示のランダム性の研究をさらに発展させ空隙級数の代数的独立性に関する結果を導いた。

〈論文〉

統計部門

1. Aoshima, M., Yata, K., Two-sample tests for high-dimension, strongly spiked eigenvalue models, *Statistica Sinica* (2017), in press.
2. Aoshima, M., Shen, D., Shen, H., Yata, K., Zhou, Y.-H., Marron, J.S., A survey of high dimension low sample size asymptotics, *Australian & New Zealand Journal of Statistics*, to appear.
3. Yata, K., Aoshima, M., High-dimensional inference on covariance structures via the extended cross-data-matrix methodology, *Journal of Multivariate Analysis*, 151 (2016), 151-166.
4. Yata, K., Aoshima, M., Reconstruction of a high-dimensional low-rank matrix, *Electronic Journal of Statistics*, 10 (2016), 895-917.

5. Nakayama, Y., Yata, K., Aoshima, M., Support vector machine and its bias correction in high-dimension, low-sample-size settings, *Journal of Statistical Planning and Inference*, to appear.
6. Ishii, A., Yata, K., Aoshima, M., Asymptotic properties of the first principal component and equality tests of covariance matrices in high-dimension, low-sample-size context, *Journal of Statistical Planning and Inference*, 170 (2016), 186-199.
7. Ulyanov, V.V., Aoshima, M., Fujikoshi, Y., Non-asymptotic results for Cornish-Fisher expansions, *Journal of Mathematical Sciences*, 218 (2016), 363-368.
8. Wada, Y., Matsuzaki, T., Terui, A., Arai, N.H., An automated deduction and its implementation for solving problem of sequence at university entrance examination, *Proceedings of the 5th International Congress on Mathematical Software (ICMS 2016)*. *Lecture Notes in Computer Science* 9725, Springer, 2016, 82-89.

数理解析部門

1. Isozaki, H., Korotyaev, E., Global transformations preserving Sturm-Liouville spectral data, *Russian J. of Math. Phys.*, 24 (2017), 51-68.
2. Ando, K., Isozaki, H., Morioka, H., Spectral properties of Schroedinger operators on perturbed lattices, *Ann. Henri Poincare*, 17 (2016), 2103-2171.
3. Kinoshita, T., On Second order hyperbolic equations with coefficients degenerating at infinity and the loss of derivatives and decays, *J. Differential Equations*, 26 (2016), 5441-5423.
4. Galstian, A., Kinoshita, T., Representation of solutions for 2nd order one-dimensional model hyperbolic equations, *Journal D'Analyse Mathematique*, 130 (2016), 355-374.
5. Mizuguchi, M., Takayasu, A., Kubo, T., Oishi, S., A method of verified computations for solutions to semilinear parabolic equations using semigroup theory, *SIAM J. Numer. Anal.*, to appear.
6. Mizuguchi, M., Takayasu, A., Kubo, T., Oishi, S., Numerical verification for existence of a global-in-time solution to semilinear parabolic equations, *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 315 (2017), 1-16.
7. Takeyama, Y., On the eigenfunctions for the multi-species q-Boson system, *Funkcialaj Ekvacioj*, to appear.
8. Liang, S., Stochastic Newton equation in Strong potential limit, *Stochastic Processes and their Applications*, 126 (2016), 2913-2955.

幾何部門

1. Hasegawa, K., Moriya, K., Twistor Lifts and Factorization for Conformal Maps from a Surface to the Euclidean Four-space, *Adv. Appl. Clifford Algebras* (2016).
2. Tanaka M.S., Tasaki, H., Maximal antipodal subgroups of some compact classical Lie groups, *Journal of Lie Theory*, 27 (2017), 801-829.

代数部門

1. Akiyama, S., Imai, K., The corona limit of Penrose tilings is a regular decagon, *Lecture Note in Computer Science* 9664, M. Cook and T. Neary (Eds.): *AUTOMATA 2016*, 35-48.

2. Akiyama, S., Loridant, B., Boundary parametrization and the topology of tiles, Nagoya Math. J., (2016), 1-38.
3. Akiyama, S., Strong coincidence and overlap coincidence, Discrete and Continuous Dynamical System - A, 36 (2016), 5223-5230.
4. Akiyama, S., A family of non-sofic beta expansions, Ergodic Theory and Dynamical Systems, Published Online 2014, 36 (2016), 343-354.
5. Naito, S., Sagaki, D., Demazure submodules of level-zero extremal weight modules and specializations of Macdonald polynomials Mathematische Zeitschrift, 283 (2016), 937-978.
6. Lenart, C., Naito, S., Sagaki, D., Schilling, A., Shimozono, M., A uniform model for Kirillov-Reshetikhin crystals III. Nonsymmetric Macdonald polynomials at $t = 0$ and Demazure characters, Transformation Groups, in press.
7. Naito, S., Nomoto, F., Sagaki, D., Specialization of nonsymmetric Macdonald polynomials at $t = \infty$ and Demazure submodules of level-zero extremal weight modules, Transactions of the AMS, in press.
8. Kaneko, H., Komatsu, T., Cauchy-Carlitz numbers, JOURNAL OF NUMBER THEORY, 163 (2016), 238-254.
9. Kaneko, H., On the number of nonzero digits in the beta-expansions of algebraic numbers, Rendiconti del Seminario Matematico della Universita di Padova, 136 (2016), 205-223.
10. Kaneko, H., Algebraic independence of the values of power series with unbounded coefficients, Arkiv for Matematik, to appear.
11. Kaneko, H., Komatsu, T., Bernoulli-Carlitz and Cauchy-Carlitz numbers with Stirling-Carlitz numbers, rims kokyuroku bessatsu, to appear.

〈著書・総説等〉

統計部門

1. Aoshima, M., Yata, K., Statistical inference for high-dimension, low-sample-size data, Sugaku translation, American Mathematical Society (2017), in press.

数理解析部門

1. 竹山美宏, ベクトル空間, 日本評論社 (2016).

幾何部門

1. Leschke, K. and Moriya, K., Applications of Quaternionic Holomorphic Geometry to minimal surfaces, Complex Manifolds, 3.1 (2016): -. Retrieved 21 Apr. 2017, from doi:10.1515/coma-2016-0015.
2. 田崎博之, 積分幾何学入門, 牧野書店 (2016).

代数部門

1. Akiyama, S., Natural Extension of arithmetic algorithms and S-adic system, RIMS 講究録別冊

〈研究成果発表〉

[国際会議]

統計部門

1. Aoshima, M., Yata, K., High-dimensional statistical analysis based on the inference of eigenstructures, Waseda International Symposium “High Dimensional Statistical Analysis for Time Spatial Processes & Quantile Analysis for Time Series”, Waseda University (Tokyo), February 28, 2017 (招待講演)
2. Yata, K., Aoshima, M., Statistical inference in strongly spiked eigenvalue models, International Symposium on Statistical Analysis for Large Complex Data, University of Tsukuba (Ibaraki), November 23, 2016 (招待講演)
3. Yata, K., Aoshima, M., Reconstruction of a high-dimensional low-rank matrix and its applications, Waseda International Symposium “High Dimensional Statistical Analysis for Time Spatial Processes, Quantile and Empirical Likelihood Analysis for Time Series”, Waseda University (Tokyo), October 25, 2016 (招待講演)
4. Yata, K., Aoshima, M., Inference on high-dimensional covariance structures via the extended cross-data-matrix methodology, Eighth International Workshop on Applied Probability, Toronto (Canada), June 23, 2016 (招待講演)
5. Yata, K., Aoshima, M., Effective classifiers for high-dimensional non-sparse data, International conference on information complexity and statistical modeling in high dimensions with applications, Cappadocia (Turkey), May 20, 2016 (招待講演)
6. Wada, Y., Matsuzaki, T., Terui, A., Arai, N.H., An automated deduction and its implementation for solving problem of sequence at university entrance examination, The 5th International Congress on Mathematical Software (ICMS 2016), Berlin (Germany), July 11, 2016 (一般講演)

数理解析部門

1. Isozaki, H., Inverse scattering on non-compact manifolds with general metric, Geometry of Moduli Space of Low Dimensional Manifolds, Kyoto University (Kyoto), December 15, 2016 (招待講演)

幾何部門

1. Moriya, K., The Schwarz lemma for superconformal maps, The 20th International Workshop on Hermitian Symmetric Spaces and Submanifolds, Daegu (Korea), July 28, 2016 (招待講演)
2. Tasaki, H., Sequences of maximal antipodal sets of oriented real Grassmann manifolds II, The 20th International Workshop on Hermitian Symmetric Spaces and Submanifolds, Daegu (Korea), July 28, 2016 (招待講演)

代数部門

1. Akiyama, S., On Corona limits, Symbolic Dynamics, Combinatorics on Words, Computability and Automata, at CIRM, Marseille (France), January 30, 2017 (招待講演)
2. Akiyama, S., Rotational beta expansion and self-similar tiling, Workshop “Analysis on Fractals and Graphs”, Sanya (China), December 29, 2016 (招待講演)
3. Sagaki, D., Introduction to extremal weight modules for quantum affine algebras, Spring School on Representation Theory, University of Tokyo (Tokyo), March 13, 2017 (一般講演)
4. Kaneko, H., Algebraic independence of the values of power series with unbounded coefficients, Journee d’Approximation Diophantienne, Lorraine (France), December 1, 2016 (一般講演)
5. Kaneko, H., Algebraic independence of real numbers related to beta expansion and beta representation, Normal Numbers: Arithmetic, Computational and Probabilistic Aspects, Vienna (Austria), November 18, 2016 (一般講演)

[国内学会・研究会]

統計部門

1. 青嶋 誠, 高次元固有空間の推測と高次元統計解析, 第 11 回日本統計学会春季集会, 政策研究大学院大学 (東京都港区), 2017 年 3 月 5 日 (招待講演)
2. 青嶋 誠, 統計学の話題と研究の可能性, CiRfSE ワークショップ, 筑波大学 (茨城県つくば市), 2017 年 1 月 24 日 (招待講演)
3. 青嶋 誠, 矢田和善, スパイクノイズと高次元統計解析, 滋賀大学データサイエンス研究集会「数理統計ひこね 2016」, 滋賀大学 (滋賀県彦根市), 2016 年 12 月 2 日 (招待講演)
4. 青嶋 誠, High-dimensional two-sample tests under strongly spiked eigenvalue models, CREST 研究集会「大規模統計モデリングと計算統計 III」, 東京大学 (東京都目黒区), 2016 年 9 月 27 日 (招待講演)
5. 青嶋 誠, 高次元の統計学 (再び), 早稲田大学理工学研究所「統計数理および金融数理研究」セミナー, 早稲田大学 (東京都新宿区), 2016 年 4 月 25 日 (招待講演)
6. 矢田和善, 青嶋 誠, Reconstruction of a high-dimensional low-rank matrix, 統計関連学会連合大会 (企画セッション: 高次元かつ複雑なデータの統計解析), 金沢大学 (石川県金沢市), 2016 年 9 月 7 日 (招待講演)
7. 中山優吾, 矢田和善, 青嶋 誠, 高次元小標本におけるサポートベクターマシンの漸近的性質とバイアス補正 (優秀報告賞受賞), 統計関連学会連合大会, 金沢大学 (石川県金沢市), 2016 年 9 月 5 日 (一般講演)
8. 照井 章, 大学入試の数値問題を解く自動推論アルゴリズム, 数理連携サロン, 筑波大学 (茨城県つくば市), 2016 年 12 月 5 日 (招待講演)

数理解析部門

1. 磯崎洋, 逆散乱理論からの 2 つの話題, 微分方程式に対する散乱理論の展開, 京都大学数理解析研究所 (京都府京都市), 2016 年 9 月 8 日 (招待講演)
2. 木下保, Wavelet transforms on Gelfand-Shilov spaces, ウェーブレット解析と信号処理, 京都大学数理解析研究所 (京都府京都市), 2016 年 10 月 25 日 (招待講演)
3. 木下保, Wave equation in Einstein and de Sitter space-time, 数理連携サロン, 筑波大学 (茨城県つく

- ば市), 2016 年 6 月 16 日 (招待講演)
4. 竹山美宏, 可積分確率過程に現れる対称関数, 九大応力研共同利用研究集会「非線形波動研究の深化と展開」, 九州大学 (福岡県春日市), 2016 年 11 月 4 日 (招待講演)
 5. 竹山美宏, 可積分確率過程の表現論的構成, Algebraic Lie Theory and Representation Theory, 菅平高原 プチ・ホテル ゾンタック (長野県上田市), 2016 年 6 月 11 日 (招待講演)

幾何部門

1. 守屋克洋, The Weierstrass representation formula for surfaces in Euclidean space of arbitrary dimension, 日本数学会秋季総合分科会, 関西大学 (大阪府吹田市), 2016 年 9 月 17 日 (一般講演)
2. 田崎博之, 有向実 Grassmann 多様体の極大対蹠集合, 北九州ワークショップ「幾何学と組合せ論」, リファレンス小倉魚町貸会議室 (福岡県北九州市), 2017 年 3 月 11 日 (招待講演)
3. 田崎博之, 実形の交叉, 第 24 回沼津研究会, 沼津工業高等専門学校 (静岡県沼津市), 2017 年 3 月 6 日 (招待講演)
4. 田崎博之, コンパクト Lie 群の極大対蹠部分群, 第 63 回幾何学シンポジウム, 岡山大学 (岡山県岡山市), 2016 年 8 月 28 日 (招待講演)

代数部門

1. 秋山茂樹, 代数学の話題と研究の可能性, CiRfSE ワークショップ, 筑波大学 (茨城県つくば市), 2017 年 1 月 24 日 (招待講演)
2. 秋山茂樹, 今井克暢, Corona limits of tilings: Periodic case, 京都大学数理解析研究所共同研究「準周期系の数理物理とその周辺」, 京都大学 (京都府京都市), 11 月 9 日 (一般講演)

7 光量子計測器開発推進室 活動報告

推進室長

金 信弘 (数理物質系物理学域 教授)

構成教員

西堀 英治 (数理物質系物理学域 教授)

富田 成夫 (数理物質系理工学域 准教授)

江角 晋一 (数理物質系物理学域 准教授)

原 和彦 (数理物質系物理学域 准教授)

近藤 剛弘 (数理物質系物質工学域 准教授)

連携教員

新井 康夫 (高エネルギー加速器研究機構 素粒子原子核研究所 教授)

浮辺 雅宏 (産業技術総合研究所 研究グループ長)

志岐 成友 (産業技術総合研究所 主任研究員)

光量子計測器開発推進室は、宇宙史国際研究拠点と環境エネルギー材料研究拠点が協力して、光量子計測器に関する情報の共有、融合共同研究の推進、新型計測技術の創出、産業・社会への応用を推進するために、また、つくば地区連携の光量子計測器開発研究の大学拠点として機能することを目指している。推進室は両拠点から各3名の教員が構成員として参加し、KEK・産総研等の研究機関と連携して、つくば光量子計測工房を形成して、先端基礎科学と最新産業応用のための光量子計測器開発を推進する。現在 TIA-ACCELERATE (光量子産業応用イニシアチブ) の光量子センシングスクエア (光量子計測技術開発) において、つくば連携で超伝導検出器、SOI 技術、大型構造イメージングの光量子計測器を開発している。光量子計測器開発推進室は、この開発研究の筑波大学の活動拠点として機能する (図 96)。

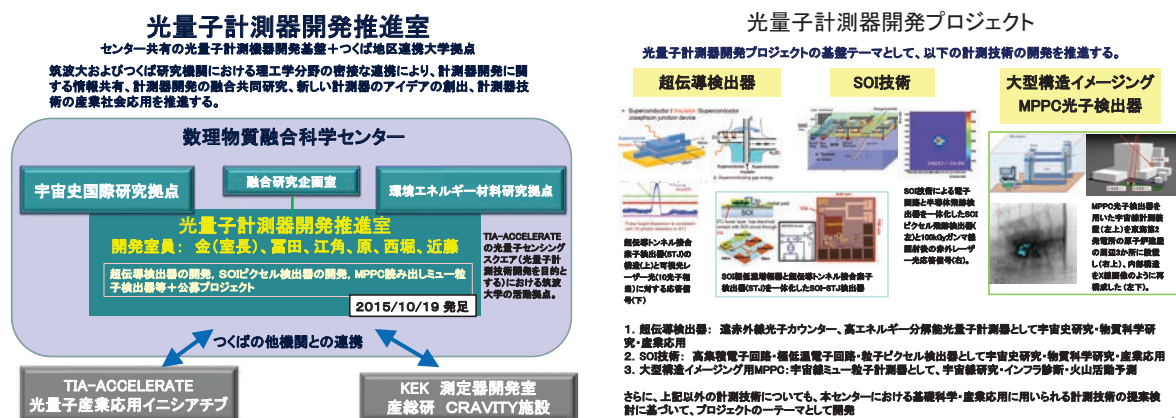


図 96 光量子計測器開発推進室の概要 (左図) と光量子計測器開発プロジェクト (右図)。

平成28年度は、TIA かけはしプログラムによって、TIA 中核研究機関 (筑波大、産総研、NIMS、KEK、東大) が連携して、新領域を開拓するための調査研究を支援する事業が開始された。光量子計測器開発推進室の推進プロジェクトからは、「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」、「3次元積

層半導体イメージセンサーの調査研究」が TIA かけはしプログラムに採択され、調査研究が進められた。「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」の研究会は平成 29 年 1 月 4 日に NIMS で開催され、筑波大、産総研、NIMS、KEK、東大、理研の研究者 27 名が参加し、温度仕様制限を緩めることで、「簡単・便利」を実現する計測アイデアを検討し、活発な意見交換が行われた。「3 次元積層半導体イメージセンサーの調査研究」研究会は平成 29 年 1 月 30 日につくば国際会議場中会議室 202 で開催され、筑波大、産総研、KEK、東大の研究者によって最新の 3 次元積層技術、量子イメージングセンサー技術を持ち寄り、今後の研究開発方向に関して活発な議論を行った。

平成 28 年 9 月 2 日に第 1 回 SOI-STJ 研究会が筑波大学自然棟 B118 室で開催された。参加者は学外からは JAXA、KEK、産総研、関西学院大、福井大、近畿大の研究者 10 名を含む総勢 16 名で、極低温 SOI 増幅器と超伝導トンネル接合素子 (STJ) 検出器を一体化させた SOI-STJ 検出器の開発についての報告・議論が行われ、情報共有を深め、研究進展の推進に寄与した。

平成 28 年 11 月 10 日に第 2 回光・量子計測シンポジウムがつくば国際会議場で開催された。本シンポジウムでは TIA5 研究機関の高度な光・量子計測技術の力を結集して新しい科学と産業の創成を目指して、講演会・ポスターセッションが行われ、全国から 100 名を超える参加者により意見交換、交流が行われた。光量子計測器開発研究推進に向けて実りの多いシンポジウムとなった。

上記の研究会とシンポジウムによって、光量子計測器開発推進室は拠点連携、研究機関連携により計測器開発に関する議論と情報交換を進め、光量子計測器開発を推進させる基礎となる情報共有の環境を築いた。

本推進室における平成 28 年度の特筆すべき成果を以下にあげる。

超伝導検出器

筑波大学では、産総研、KEK、JAXA、福井大等との共同研究で超伝導トンネル接合素子 (STJ) 赤外線検出器の開発および 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 CRVAVITY で作製された Nb/Al-STJ 試料は、遠赤外一光子検出に要求される低漏れ電流性能をほぼ達成した。極低温増幅器の開発については、FD-SOI プロセスによる MOSFET を用いた増幅器の試作および測定を行い、300~400 mK の極低温での動作を確認している。更に、平成 28 年度においては、この試作増幅器を用い、極低温で動作させた STJ のパルス光応答信号の極低温ステージ上での増幅に成功した。STJ のパルス光に対する光応答速度および STJ 測定系の静電容量を考慮すると、より低い入力インピーダンスへの改善が必要であることから、低入力インピーダンスの電荷積分型増幅器の試作を行い、現在、極低温における測定を行っている。また Nb/Al-STJ の開発と並行して、KEK 測定器開発室のプログラムの一つとして、KEK、理研との共同研究によって Hf-STJ の開発を進めてきた。平成 28 年度には絶縁層 HfO_x の上に薄いアルミニウム層 (< 10 μ m) を追加することで漏れ電流密度を従来の 1/16 という大幅な改善に成功した。この Hf/Al-STJ サンプルを用い、可視域 (波長 465nm) レーザーパルス光照射試験により、Hf/Al-STJ からのパルス応答を得た。

SOI 技術

Silicon-On-Insulator (SOI) は、埋め込み酸化膜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。筑波大学では、Lapis セミコンダクター社の 0.20 μ m SOI プロセスを用いて KEK の先端検出器開発室と共同で、将来の加速器実験に用いることのできるピクセル検出器の開発研究を行っている。

SOI はトランジスタ各素子が酸化膜で覆われているために、漏れ電流が少なく高速応答が期待できるが、一方、正孔を酸化膜に蓄積しやすく、電離性放射線線量 (TID) が増えると蓄積電荷の影響を受けて近傍のトランジスタ特性が大きく変化することを明らかにしてきた。そこで SOI の素粒子実験への適用を可能にするた

め、埋め込み酸化膜 2 層からなる 2 層 SOI 基板を世界で初めて製作し、評価を継続している。粒子センサー基板の上に 2 層の埋め込み酸化膜層を形成し、その中間シリコン層 (SOI2) に TID 損傷による劣化に応じて負の電荷を加えることで TID 損傷を補償することを目指している。2 層 SOI 素子の総合評価として、新たに FPIX2 を設計した。FPIX2 は 8 μ m 角のピクセルサイズで SOI としては最も微細な位置測定が可能な素子であるが、ピクセル部分、入出力 (IO) 部分、アドレスデコーダ部分それぞれで VSOI2 が調整できるように設計した。適正な VSOI2 (ピクセル部=-5V, デコーダ部=-10V, IO 部=-21V) を加えると未照射の場合に近い応答が示された。その条件で赤外レーザーに対する応答を見ると、バイアス電圧に依存し空乏層が広がり電荷を収集できることが示され、未照射時と変わらない応答が得られた。

500kGy 照射された FPIX2 でも応答を観測できた。また 4 枚の FPIX2 のビームテストをフェルミ研究所において実施し、固有位置分解能を測定した結果、0.8 ミクロンという世界初の 1 ミクロン以下の位置分解能を有することがわかった。

大型構造イメージング

ミュオン粒子が建物などを透過しやすい性質を利用し、宇宙線ミュオン粒子の飛来数分布を大規模構造物の背後で測定することで、構造物内部の様子を透視するミュオンラジオグラフィイーに取り組んでいる。2011 年夏から福島第一原子炉事故で溶け落ちた燃料デブリの位置を測定することを最終目標にして KEK のグループと共同で技術設計を開始し、2012 年には実際の原子炉透視に成功することで技術設計の実証を行った。その後国際廃炉機構 (IRID) の計画として放射線遮蔽の設計を施した検出器を 2 台建設した。全体を 10 cm の鉄で遮蔽し、さらにバックグラウンド放射線を排除できるように 3 ユニットの XY 測定面から構成されている。2015 年 2 月から 1 号炉の観測を開始した結果、燃料装荷位置には核燃料の溶け残りは殆どないことが判明し IRID により観測結果は公表された。

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

1 号炉での観測の成果を受けて、2016 年 3 月からは東京電力の事業委託を受けた KEK に協力する形態で 2 号炉を観測し、1 号炉の場合に比べ、より近くに検出器を設置することができ、燃料装荷位置にはほとんど燃料がなさそうであり、それに加え圧力容器の底部に燃料が残っていることが観測できた。

〈論文〉

1. T. Miyoshi, K. Hara *et al.*, “Advanced monolithic pixel sensors using SOI technology”, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A824 (2016) pp438-442.
2. S. Ohmura, K. Hara *et al.*, “Reduction of cross-talks between circuit and sensor layer in the Kyoto’s X-ray astronomy SOI pixel sensors with Double-SOI wafer”, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A831 (2016) pp61-64.
3. M. Asano, K. Hara *et al.*, “Characteristics of non-irradiated and irradiated double SOI integration type pixel sensor”, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A831 (2016) pp315-321.

〈研究成果発表〉

[国際会議]

1. K. Hara, 「Long-term stability of ATLAS12 main sensors」, ATLAS ITk Workshop (Valencia, 2016年9月12日-16日) (一般講演)
2. Y. Takeuchi *et al.*, “Development of Far-infrared Spectrophotometers based on Superconducting Tunnel Junction for the Cosmic Background Neutrino Decay (COBAND) Experiment”, Tsukuba Global Science Week 2016 (TGSW2016), Sep. 17 – 19, 2016, EPOCHAL Tsukuba, Tsukuba-shi, Japan
3. 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
4. Y. Takeuchi, “The COBAND project to search for the cosmic background neutrino decay”, Seminar at Fermilab, Aug. 11, 2016, Fermilab, Illinois, USA

[国内学会・研究会]

1. 原和彦, 「素粒子実験用細密ピクセル検出器の開発」, 第6回新学術領域研究会 (静岡大学 2016年6月28日 - 29日) (一般講演)
2. 原和彦, 「宇宙線ミュー粒子を用いた大構造物の透視」, TIA 光量子シンポジウム (つくば国際会議場, 2016年11月10日) (一般講演)
3. 原和彦, 「宇宙線ミュー粒子を用いた大構造物の透視」, TIA 光量子シンポジウム (つくば国際会議場, 2016年11月10日) (ポスター)
4. 八木俊輔: LDD 濃度改良後の SOI-FET 極低温環境下で異常特性の改善, 新学術研究領域研究「3次元半導体検出器で切り拓く新たな量子イメージングの展開」第6回研究会 (2016年6月28-29日), 北海道大学
5. 八木俊輔: ニュートリノ崩壊光探索のための SOI-STJ の研究開発 V, 日本物理学会 2016 秋季大会 (2016年9月21-24日), 宮崎大学
6. 武政健一: COBAND 実験のための Hf-STJ 研究開発 I, 日本物理学会 2016 秋季大会 (2016年9月21-24日), 宮崎大学
7. 武内勇司: 宇宙背景ニュートリノ崩壊探索実験 COBAND に向けた SOI-STJ 開発 (招待講演), 超伝導エレクトロニクス研究会 (2016年10月26-27日), 東北大学電気通信研究所
8. 金信弘: 超伝導トンネル接合素子 STJ を用いた光・量子計測, 第2回 TIA 光・量子計測シンポジウム (2016年11月10日), つくば国際会議場
9. 武政健一: 可視～遠赤外域単一光子検出のための超伝導トンネル接合素子検出器 (STJ) の開発 (ポスター発表), 第2回 TIA 光・量子計測シンポジウム (2016年11月10日), つくば国際会議場
10. 若狭玲那: ニュートリノ崩壊光探索に向けた極低温増幅器の開発と現状 (ポスター発表), 新学術領域研究「ニュートリノフロンティアの融合と進化」研究会 2016 (2016年11月28-30日), 石川県加賀市ゆのくに天祥
11. 武内勇司: Development of Far-infrared Spectrophotometers based on Superconducting Tunnel

- Junction (STJ) for COBAND Experiment,
新学術領域研究「ニュートリノフロンティアの融合と進化」研究会 2016 (2016年11月28-30日),
石川県加賀市ゆのくに天祥
12. 武内勇司： 超電導検出器によるニュートリノ質量+暗黒物質 (パネルディスカッション),
新学術領域研究「ニュートリノフロンティアの融合と進化」研究会 2016 (2016年11月28-30日),
石川県加賀市ゆのくに天祥
13. 武政健一： R&D status of Hf-STJ,
新学術領域研究「ニュートリノフロンティアの融合と進化」研究会 2016 (2016年11月28-30日),
石川県加賀市ゆのくに天祥
14. 八木俊輔： R&D Status of Nb/Al-STJ with SOI cryogenic preamplifier,
新学術領域研究「ニュートリノフロンティアの融合と進化」研究会 2016 (2016年11月28-30日),
石川県加賀市ゆのくに天祥
15. 武内勇司： 冷却エレクトロニクスーSTJ読み出し用SOI極低温アンプー,
TIA かけはし事業「簡単・便利な超伝導計測」ミニ研究会 (2017年1月4日), つくば市物質・材料
研究機構 (NIMS)
16. 八木俊輔： COBAND 実験のための SOI-STJ の研究開発 I,
日本物理学会第 72 回年次大会 (2017年3月17-20日), 大阪大学豊中キャンパス
17. 若狭玲那： COBAND 実験のための SOI-STJ の研究開発 II,
日本物理学会第 72 回年次大会 (2017年3月17-20日), 大阪大学豊中キャンパス

8 資料

8.1 センター細則

○国立大学法人筑波大学数理物質融合科学センター細則

〔平成26年9月1日〕
数理物質系部局細則第8号

改正 平成26年数理物質系部局細則第9号
改正 平成27年数理物質系部局細則第4号
改正 平成27年数理物質系部局細則第10号
改正 平成28年数理物質系部局細則第7号
改正 平成28年数理物質系部局細則第8号
改正 平成28年数理物質系部局細則第13号
改正 平成29年数理物質系部局細則第2号

国立大学法人筑波大学数理物質融合科学センター細則

(趣旨)

第1条 本部局細則は、数理物質科学の国際研究拠点の実現を目指し、数理物質系に設置する数理物質融合科学センター（以下「センター」という。）の組織及び運営に関し、必要な事項を定めるものとする。

(目的)

第2条 センターは、物質の本質の統一的理解を数理的手法によって進める世界的研究拠点を形成し、宇宙史の統一的理解と、環境エネルギー材料の研究による新物質の創出を飛躍的に推進させることを目的とする。

(センター長)

第3条 センターにセンター長を置く。

2 センター長は、センター業務を所掌しセンターの研究を統括する。

(センターの構成員)

第4条 センターにセンター長のほか次の表の左欄の者を置き、その職務は右欄のとおりとする。

融合研究企画室長	センター長が兼務し、融合研究企画室の業務を所掌し、数理科学研究推進室及び光量子計測器開発推進室の研究を統括する。
宇宙史国際研究拠点長	宇宙史国際研究拠点の業務を所掌し、宇宙史国際研究拠点の各部門の研究を統括する。
環境エネルギー材料研究拠点長	環境エネルギー材料研究拠点の業務を所掌し、環境エネルギー材料研究拠点の各部門の研究を統括する。
数理科学研究推進室長	数理科学研究推進室の研究を中心的に進める。
光量子計測器開発推進室長	光量子計測器開発推進室の研究を中心的に進める。
部門長	宇宙史国際研究拠点、環境エネルギー材料研究拠点の各部門における研究を中心的に進める。
構成教員	宇宙史国際研究拠点、環境エネルギー材料研究拠点の各部門、数理科学研究推進室及び光量子計測器開発推進室の研究を進める。

構成研究員	宇宙史国際研究拠点、環境エネルギー材料研究拠点の各部門、数理科学研究推進室及び光量子計測器開発推進室の研究を進める。
連携教員	必要に応じて数理科学研究推進室長、光量子計測器開発推進室長または部門長と連携し研究を進める。

(組織)

第5条 第2条の目的達成のため、センターに次の管理組織、研究組織及び支援組織を置く。

- (1) 管理組織
 - ① センター運営室
 - ② 融合研究企画室
- (2) 研究組織
 - ① 宇宙史国際研究拠点
 - ア 南極天文部門
 - イ 素粒子構造部門
 - ウ クォーク・核物質部門
 - ② 環境エネルギー材料研究拠点
 - ア エネルギー貯蔵・変換物質部門
 - イ 物質変換材料部門
 - ③ 数理科学研究推進室
 - ④ 光量子計測器開発推進室
- (3) 支援組織
 - ① 共用施設室
 - ② 連携支援室

2 研究組織及び支援組織に関し必要な事項は、センター長が別に定める。

(センター運営室)

第6条 センター運営室は、次の業務を行う。

- (1) センターの運営に関すること
 - (2) 研究拠点の研究の実施に関すること
 - (3) 研究拠点の研究の広報に関すること
- 2 センター運営室は、次に掲げる者で組織する。
- (1) センター長
 - (2) 宇宙史国際研究拠点長
 - (3) 環境エネルギー材料研究拠点長
 - (4) 数理科学研究推進室長
 - (5) 光量子計測器開発推進室長
 - (6) 部門長
 - (7) 数理物質系長
 - (8) その他センター長が指名する者

(融合研究企画室)

第7条 融合研究企画室は、センター運営室のもと次の業務を行う。

- (1) 研究拠点間の研究連携及び研究連携の検討
- (2) 研究拠点間の研究融合及び研究融合の検討
- (3) 研究拠点の研究のサポート

2 融合研究企画室は、次に掲げる者で組織する。

- (1) 融合研究企画室長
- (2) 宇宙史国際研究拠点長
- (3) 環境エネルギー材料研究拠点長
- (4) 数理科学研究推進室長
- (5) 光量子計測器開発推進室長
- (6) その他センター長が指名する者

(センター長の任期)

第8条 センター長の任期は、2年とし、再任を妨げない。ただし、任期の途中で欠員となった場合の後任の任期は、前任者の残任期間とする。

- 2 センター長は、センター構成員及び次条の運営協議会委員から選出するものとする。
- 3 センター長の選考は、センター運営室の議を経るものとし、手続きについては別に定める。

(センター運営協議会)

第9条 センターに、センターの管理運営を協議するためセンター運営協議会（以下「協議会」という。）を置き、次に掲げる事項を審議する。

- (1) センターの運営方針に関する重要事項
 - (2) センター事業の実施状況の点検及び評価に関する重要事項
 - (3) その他センター長が必要と認める事項
- 2 協議会は、次の者で組織する。
- (1) センター長
 - (2) 研究担当副学長の指名する者 若干名
 - (3) 研究拠点長
 - (4) 学外の学識経験者 若干名
 - (5) 数理物質系長
 - (6) センター長が指名する本学の職員 若干名
- 3 前項の他に、センター長が必要と認める教職員をオブザーバーとして出席させることが出来る。
- 4 協議会に議長を置き、委員の互選により選出する。
- 5 議長は、協議会を主宰する。
- 6 議長に事故があるときは、あらかじめ議長の指名する委員がその職務を代行する。

(協議会委員の任期)

第10条 前条第2項第2号、第4号及び第6号の委員の任期は、2年とする。ただし、任期の終期は、委員となる日の属する年度の翌年度の末日とする。

- 2 後任の委員の任期は、前任者の残任期間とする。
- 3 前2項の委員は、再任されることができる。

(事務)

第11条 センターに関する事務は、数理物質エリア支援室が行う。

(雑則)

第12条 この部局細則に定めるもののほか、センターの運営に関し必要な事項は、別に定める。

附 則

- 1 この部局細則は、平成26年9月1日から施行する。
- 2 第8条第1項及び第2項の規定にかかわらず、当分の間、センター長は数理物質系長をもって充てる。

附 則

この部局細則は、平成26年10月17日から施行する。

附 則

- 1 この部局細則は、平成27年4月1日から施行する。
- 2 平成26年数理物質系部局細則第8号附則第2項の適用については、平成27年3月31日までとする。

附 則

この部局細則は、平成27年12月11日から施行し、同年10月9日から適用する。

附 則

この部局細則は、平成28年4月1日から施行する。

附 則

- 1 この部局細則は、平成28年6月10日から施行し、平成27年4月1日から適用する。
- 2 第8条第3項の規定にかかわらず、当分の間、センター長の選考は数理物質系長が候補者を指名した上で、センター運営室の議を経るものとする。

附 則

この部局細則は、平成28年12月9日から施行し、同年10月1日から適用する。

附 則

この部局細則は、平成29年2月10日から施行し、同年1月1日から適用する。

8.2 競争的資金獲得状況

構成員名	研究代表者名	区分	種目	課題番号	研究題目・寄附の目的等	金額(分担金)
中井 直正		科研費補助金・学術研究助成金	基盤研究A	26247019	大規模電波カメラによる「あかり」北極域の掃天観測	¥900,000
中井 直正		受託事業	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~ようこそ大学の研究室へ~ KAKENHI	BBD28043	自作の望遠鏡で宇宙を見よう	¥344,000
中井 直正		受託研究	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-	ABD28014	高精度VLBI観測による銀河系の構造及び進化の解明	¥5,182,000
金 信弘		科研費補助金・学術研究助成金	新学術領域 計画研究	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	¥13,910,000
武内 勇司		科研費補助金・学術研究助成金	挑戦的萌芽研究	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	¥910,000
受川 史彦	花垣 和則	科研費補助金・学術研究助成金	新学術領域 計画研究	16H06491	ヒッグス粒子で探る真空と世代構造	¥9,750,000
原 和彦	坪山 透	科研費補助金・学術研究助成金	新学術領域 計画研究	25109006	高輝度加速器実験のための素粒子イメージング	¥2,340,000
石橋 延幸		科研費補助金・学術研究助成金	基盤研究(C)	70211729	弦の場の理論を用いた超弦理論・D-ブレーンの研究	¥1,040,000
佐藤 勇二		科研費補助金・学術研究助成金	基盤研究(C)	24540248	重力ノゲージ理論双対性の可積分構造に基づいたグルーオン散乱振幅の研究	¥700,000
伊敷 吾郎		科研費補助金・学術研究助成金	若手研究(B)	16K17679	超弦理論の非摂動的定式化についての研究	¥1,430,000
金 信弘	守友浩, 金信弘	その他			宇宙史一貫教育プログラム	¥280,000
石橋 延幸		受託研究		ABD27011	素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理分野にかかる学術研究動向に関する調査研究	¥1,300,000
三明 康郎	代表	科研費補助金・学術研究助成金	基盤研究(B)	25287048	粒子・ジェット方位角相関測定によるグルーオン衝撃波の探索	¥14,300,000
中條 達也	代表	科研費補助金・学術研究助成金	挑戦的萌芽研究	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	¥3,900,000
江角 晋一	代表	科研費補助金・学術研究助成金	日米科学技術協力事業		相対論的重イオン加速器をもちいたPHENIX実験	¥13,800,000
小沢 顕	代表	科研費補助金・学術研究助成金	新学術領域研究	15H00830	新型飛行時間検出器によるNi同位体の質量測定	¥5,980,000
森口 哲朗	代表	科研費補助金・学術研究助成金	若手研究(B)	16K17678	スキム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	¥4,160,000
中村 潤児		受託研究			エネルギー選別型反応制御とナノカーボン担持触媒設計	¥15,000,000
中村 潤児		その他			白金フリー燃料電池カーボン触媒イノベーション	¥1,000,000
中村 潤児		その他			ナノカーボンの表面化学と電極触媒の設計	¥2,100,000
近藤 剛弘		奨学寄附金			窒素ドーブラフエン粉末を用いた新規CO2分離吸着材料の開発	¥10,000,000
近藤 剛弘		科研費補助金・学術研究助成金	挑戦的萌芽研究	16K13679	超高感度ヘテロダイン走査トンネル分光の実現	¥1,400,000
近藤 剛弘		科研費補助金・学術研究助成金	基盤研究(B)	16H03823	ホウ素を基盤とした新規2次元化合物の創成	¥6,100,000
近藤 剛弘		科研費補助金・学術研究助成金	新学術領域研究(研究領域提案型)	16H00895	単層ボロンシートの合成	¥1,800,000
神原 貴樹		奨学寄附金			藻類産生オイルを基盤とする新しい熱可塑性エラストマー製造技術の開発	¥1,000,000
神原 貴樹		共同研究			藻類産生油成分からプラスチックを合成する錯体触媒に関する研究	¥100,000
神原 貴樹		受託事業			新規赤外線吸収色素の開発	¥300,000
桑原 純平		科研費補助金・学術研究助成金	若手研究(B)	15K17922	高純度化と高分子量化が共役高分子材料にもたらす特性向上の原理解明	¥1,820,000
桑原 純平		奨学寄附金			有機顔料の特性を活かした有機半導体材料の創製	¥800,000
桑原 純平		共同研究			アリアルアミンポリマ合成に関する研究	¥600,000

山本 洋平		科研費補助金・学術研究助成金	基盤研究 (A)	16H02081	光機能性ポリマー球体の高次連結による光学メタマテリアルの開発	¥8,800,000
山本 洋平		科研費補助金・学術研究助成金	国際共同研究加速基金	15KK0182	発光性および強誘電性ポリマーナノ粒子による新しいフォトニック結晶の構築	¥4,229,000
山本 洋平		科研費補助金・学術研究助成金	新学術領域研究(公募研究)	15H00986	π 電子球体の自己形成と新しい光エレクトロニクスの創出	¥2,800,000
山本 洋平		科研費補助金・学術研究助成金	新学術領域研究(公募研究)	15H00860	共役炭素ナノ材料およびペプチド複合体による超広域光捕集系の構築	¥1,500,000
山本 洋平		科研費補助金・学術研究助成金	挑戦的萌芽研究	15K13812	細胞内の光閉じ込めと共鳴発光・レーザー発振	¥1,500,000
山本 洋平		奨学寄附金			導電性高分子マイクロ共振器への電荷注入と共鳴電界発光	¥2,000,000
山本 洋平		その他			光と物質・生命科学のアンサンブルによる新現象の発掘と解明	¥500,000
山本 洋平		その他			エネルギー変換や光活性メタマテリアルのための革新的ナノ材料の開発	¥1,482,000
西堀 英治		科学研究費補助金	挑戦的萌芽研究	16K13660	弾性・非弾性散乱データ同時解析による計測物質科学の創成	¥2,000,000
西堀 英治		日本学術振興会二国間交流事業	オープンパートナーシップ共同研究		精密電子密度観測法の開発によるエネルギー材料の構造科学研究	¥1,650,000
西堀 英治		助成金	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	¥5,000,000
西堀 英治		助成金	公益財団法人カシオ科学振興財団 研究助成		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	¥1,100,000
守友 浩		TIA	かけはし		未利用熱エネルギーを変換する熱発電素子	¥900,000
守友 浩		助成金	谷川熱技術振興基金		電池型熱発電素子の開発と排熱利用	¥1,200,000
守友 浩		助成金	矢崎財団		配位高分子を用いたナトリウムイオン電池材料の開発	¥2,000,000
岡田 晋		科研費補助金・学術研究助成金	基盤研究(A)	25246010	ナノ炭素質と無機半導体からなる複合構造における	¥3,000,000
岡田 晋		科研費補助金・学術研究助成金	新学術領域研究	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	¥2,800,000
岡田 晋	松田 一成	科研費補助金・学術研究助成金	基盤研究(S)	16H06331	原子層物質におけるパレースピンフォトニクスの創生と応用	¥500,000
北 将樹		科研費補助金・学術研究助成金	挑戦的萌芽研究	15K12753	光親和性プローブとLA-LDI-MSを用いた標的体分子の結合部位解析法の開発	¥1,400,000
北 将樹		科研費補助金・学術研究助成金	基盤研究B (海外学術調査)	16H05655	カリブ海地域の固有・希少野生生物の生態化学的調査	¥1,500,000
北 将樹		科研費補助金・学術研究助成金	基盤研究A	26242073	海洋天然物の誘導するタンパク質-タンパク質相互作用の解明	¥200,000
北 将樹		受託研究	JST戦略的創造研究推進事業 さきがけ		LA-LDI MSを用いた標的タンパク質の結合位置解析法の開発	¥20,000,000
辻村 清也		科研費補助金・学術研究助成金	挑戦的萌芽研究	15K14684	酸化還元酵素のハイスループット電極触媒機能評価	¥1,550,000
辻村 清也		受託研究	JST/研究成果最適展開支援プログラム		バイオ燃料電池を搭載したウェアラブルヘルスケアデバイスの創成	¥6,980,000
辻村 清也		共同研究			多孔質炭素電極と高性能改良酵素を組み合わせたに関する研究	¥1,000,000
辻村 清也		共同研究			電気化学式バイオセンサに関する研究	¥2,578,000
辻村 清也		奨学寄附金			臨床診断用酵素の電気化学的評価および評価	¥900,000
辻村 清也		奨学寄附金			微生物燃料電池高効率化のための電極修飾	¥500,000
加納 英明		科研費補助金・学術研究助成金	基盤研究 (B)	26282117	アルツハイマー病早期診断に向けたコヒーレント・ラマン水晶体イメージング法の開発	¥2,100,000
加納 英明		科研費補助金・学術研究助成金	挑戦的萌芽研究	16K12866	脂肪を燃やす褐色脂肪細胞における熱産生過程の非染色分子イメージング	¥1,400,000
加納 英明		受託研究	JST		汎用・普及型超解像顕微鏡の開発	¥1,750,000
青嶋 誠		科研費補助金・学術研究助成金	基盤研究 (A)	15H01678	大規模複雑データの理論と方法論の総合的研究	¥5,800,000
青嶋 誠		科研費補助金・学術研究助成金	挑戦的萌芽研究	26540010	ビッグデータの統計学: 理論の開拓と3Vへの挑戦	¥1,100,000

青嶋 誠	赤平 昌文	科研費補助金・学術研究助成金	挑戦的萌芽研究	15K11992	統計的欠損性の階層構造の解明とその応用	¥50,000
青嶋 誠	イリチュ美佳	科研費補助金・学術研究助成金	基盤研究(G)	26330033	多次元クラスター尺度構成法によるビッグデータ解析とその社会的応用	¥50,000
矢田 和善		科研費補助金・学術研究助成金	若手研究(B)	26800078	高次元漸近理論の統一的研究	¥700,000
矢田 和善	青嶋 誠	科研費補助金・学術研究助成金	基盤研究(A)	15H01678	大規模複雑データの理論と方法論の総合的研究	¥1,000,000
矢田 和善	青嶋 誠	科研費補助金・学術研究助成金	挑戦的萌芽研究	26540010	ビッグデータの統計学: 理論の開拓と3Vへの挑戦	¥50,000
矢田 和善	赤平 昌文	科研費補助金・学術研究助成金	挑戦的萌芽研究	15K11992	統計的欠損性の階層構造の解明とその応用	¥50,000
照井 章		科研費補助金・学術研究助成金	基盤研究(C)	16K05035	近似Syzgyによる代数曲面の融合計算の研究	¥1,600,000
照井 章	田島 慎一	科研費補助金・学術研究助成金	基盤研究(C)	15KT0102	機械学習モデルの特異統計構造と計算代数解析アルゴリズム	¥100,000
磯崎 洋		科研費補助金・学術研究助成金	基盤研究(B)	16H03944	スペクトル逆散乱理論の新モデル-離散から連続まで	¥1,100,000
磯崎 洋		科研費補助金・学術研究助成金	挑戦的萌芽研究	15K13447	率論的方法による離散シュレーディンガー作用素の逆散乱理論	¥600,000
磯崎 洋	山本 昌宏	科研費補助金・学術研究助成金	基盤研究(S)	15H05740	偏微分方程式の係数決定逆問題の革新的解決と応用	¥2,000,000
磯崎 洋	山口孝男	科研費補助金・学術研究助成金	基盤研究(B)	26287010	アレクサンドロフ空間のリブシツ構造・崩壊理論とスペクトル逆問題の新展開	¥200,000
木下 保		科研費補助金・学術研究助成金	基盤研究(C)	16K05223	ウェーブレット解析による変数係数を持つ波動方程式への超局所解析的応用	¥900,000
久保 隆徹		科研費補助金・学術研究助成金	基盤研究(C)	15K04946	流体力学の非定常問題への実解析的・数値解析的アプローチ	¥900,000
久保 隆徹	木下 保	科研費補助金・学術研究助成金	基盤研究(C)	16K05223	ウェーブレット解析による変数係数を持つ波動方程式への超局所解析的応用	¥50,000
竹山 美宏		科研費補助金・学術研究助成金	基盤研究(G)	26400106	可積分系に現れる差分方程式の代数解析	¥900,000
梁 松		科研費補助金・学術研究助成金	若手研究(B)	25800056	結晶確率モデルのハミルトン力学系による導出及びそれにおける相対効果の影響	¥800,000
守屋 克洋		科研費補助金・学術研究助成金	基盤研究(C)	25400063	正則写像から受け継がれる超共形写像の性質とその応用	¥1,100,000
守屋 克洋	長谷川 敬三	科研費補助金・学術研究助成金	基盤研究(G)	16K05123	等質および局所等質多様体上の複素幾何構造についての研究	¥50,000
守屋 克洋	長谷川 和志	科研費補助金・学術研究助成金	基盤研究(C)	15K04839	ツイスタープログラムに基づく四元数ケーラー多様体内の部分多様体の研究	¥70,000
田崎 博之		科研費補助金・学術研究助成金	基盤研究(C)	15K04835	対称空間の対蹠集合の拡張と応用	¥1,200,000
秋山 茂樹	木上 淳	科研費補助金・学術研究助成金	基盤研究(B)	26287017	フラクタルにおける代数的・幾何学的構造と解析の相互的な関わり研究	¥400,000
佐垣 大輔		科研費補助金・学術研究助成金	基盤研究(C)	15K04803	Kirillov-Reshetikhin 加群の結晶基底とその組合せ論的実現	¥900,000
金子 元		科研費補助金・学術研究助成金	若手研究(B)	15K17505	種々の数列のランダム性、およびその超越数論への応用	¥500,000
原 和彦	新井康夫	科研費補助金・学術研究助成金	新学術領域研究	25109006	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	¥2,340,000
金谷和至		科研費補助金・学術研究助成金	基盤研究(G)	15K05041	有限温度・有限密度クォーク物質の物性と相構造	¥1,170,000

8.3 共同研究・受託研究

構成員名	相手先機関	金額	期間	内容
中井 直正	大学共同利用機関法人自然科学研究機構	¥5,182,000	2016.4.1- 2017.3.31	大学間連携VLBI観測事業に係る研究
新田 冬夢	株式会社 雄島試作研究所	¥540,000	2016.4.1- 2016.9.30	AR溝付レンズの最適な形状の研究
佐藤 勇二	Hungarian Academy of Sciences (ハンガリー)	¥2,000,000 (平成28年度)	2015.4.1- 2017.3.31	ゲージ-重力双対性と可積分性に基づく強結合ゲージ理論ダイナミクスの展開
三明 康郎	CERN研究所(スイス・フランス)		2006-現在	LHC-ALICE実験
江角 晋一	BNL研究所(アメリカ)		1996-現在	RHIC-PHENIX実験
江角 晋一	BNL研究所(アメリカ)		2016-現在	RHIC-STAR実験
小沢 顕	放医研HIMAC		2008-現在	RIビーム飛行時間検出器の開発
小沢 顕	理化学研究所仁科加速器センター		2007-現在	稀少RIリングの開発
小沢 顕	理化学研究所仁科加速器センター		2004-現在	不安定核の反応断面積測定
小沢 顕	KEK/理化学研究所仁科加速器センター		2014-現在	Developments of KISS
中村 潤児	南開大学(中国)		2003-現在	金属表面での触媒反応の理論的研究
中村 潤児	産業技術総合研究所		2011-現在	炭素系触媒の機能解析
中村 潤児	NIMS		2015-現在	炭素系触媒の機能解析
中村 潤児	慶応義塾大学		2016-現在	炭素系触媒の機能解析
中村 潤児	東京大学		2012-現在	メタノール合成触媒の表面科学的研究
中村 潤児	大阪大学		2012-現在	メタノール合成触媒の表面科学的研究
中村 潤児	デュースブルク・エッセン大学(ドイツ)		2012-現在	金属ナノ粒子の触媒応用
近藤 剛弘	東京工業大学元素戦略センター		2016-現在	新規ホウ素2次元シート材料の開拓
近藤 剛弘	NIMS		2016-現在	新規ホウ素2次元シート材料の開拓
近藤 剛弘	東北大学		2016-現在	新規ホウ素2次元シート材料の開拓
神原 貴樹	東京工業大学		2007-現在	新奇有機金属錯体及び機能性高分子の開発に関する研究
神原 貴樹	富山大学		2007-現在	高選択的分離機能性樹脂・配位子の開発に関する研究
神原 貴樹	物質・材料研究機構		2012-現在	高分子半導体のデバイス機能評価に関する研究
神原 貴樹	産業技術総合研究所		2015-現在	藻類オイルのバイオリファイナリーに関する研究
神原 貴樹	TIMS内連携		2012-現在	高分子半導体のデバイス機能評価に関する研究
神原 貴樹	TIMS内連携		2012-現在	りん光発光性金属錯体の研究
桑原 純平	物質・材料研究機構		2014-現在	高品質な共役高分子材料の低コスト製造と特性評価
山本 洋平	物質・材料研究機構		2012-現在	ペプチド固相合成と自己組織化
山本 洋平	物質・材料研究機構		2014-現在	孤立共役高分子の自己組織化
山本 洋平	物質・材料研究機構		2014-現在	高分子マイクロ球体の顕微蛍光計測
山本 洋平	物質・材料研究機構		2014-現在	高分子マイクロディスクアレイ

山本 洋平	東京工業大学		2014 - 現在	π 共役 dendrimer の自己組織化
山本 洋平	大阪大学		2012 - 現在	高分子集合体のマイクロ波電導度測定
山本 洋平	大阪大学		2015 - 現在	近赤外発光ポリマー共振器
山本 洋平	デュースブルグ=エッセン大学(ドイツ)		2012 - 現在	高分子球体の顕微蛍光計測
山本 洋平	デュースブルグ=エッセン大学(ドイツ)		2014 - 現在	金属ナノ粒子とペプチドの複合化
山本 洋平	産業技術総合研究所		2015 - 現在	高分子マイクロ球体のフェムト秒分光
山本 洋平	神奈川大学		2015 - 現在	有機マイクロ結晶レーザー
山本 洋平	TIMS内連携		2015 - 現在	発光性ジピリン錯体含有高分子の研究
山本 洋平	TIMS内連携		2015 - 現在	おわん型分子をメソゲンとした液晶の開発
山本 洋平	TIMS内連携		2012 - 現在	共役ポリマー光共振器の開発
山本 洋平	TIMS内連携		2014 - 現在	酸化グラフェン-ペプチド-金属ナノ粒子複合体による光触媒効果
山本 洋平	TIMS内連携		2015 - 現在	π 共役 dendrimer 結晶の構造解析
西堀 英治	西オーストラリア大学(オーストラリア)		2014 - 現在	実験電子密度の解析法開発の研究
西堀 英治	オーフス大学		2000 - 現在	エネルギー材料の放射光を利用した構造科学研究
西堀 英治	(デンマーク)		2013 - 現在	VO ₂ ナノ粒子および熱電変換材料の構造評価
西堀 英治	中国科学技術院		2005 - 現在	ドナー・アクセプター共役接合錯体の構造決定の研究
西堀 英治	(中国)		2014 - 現在	単成分からなる分子性金属の物理と構造相関
西堀 英治	東京大学		2008 - 現在	単成分からなる分子性金属の物理と構造相関
西堀 英治	東京大学		2014 - 現在	スキルミオン結晶の圧力効果
西堀 英治	日本大学		2014 - 現在	スピんキャスト高分子膜のその場観察
西堀 英治	理化学研究所		2015 - 現在	天然鉱物熱電変換材料の構造研究
西堀 英治	京都大学、JASRI/SPring-8		2016 - 現在	超臨界ナノ材料合成のその場観察
守友 浩	NSRRC		2015 - 現在	二次電池材料の局所構造・電子状態
守友 浩	(台湾)		2010 - 現在	有機薄膜太陽電池の電荷生成ダイナミクス
守友 浩	NIMS		2015 - 現在	ペロブスカイト太陽電池の電荷生成ダイナミクス
守友 浩	SPring-8		2015 - 現在	二次電池材料の局所構造
守友 浩	KEK,NIMS,AIST,東大、弘大		2014 - 現在	有機薄膜太陽電池の局所構造
小林 航	CRISMAT研究所(フランス)		2015 - 現在	新規な酸化物正極材料の研究
小林 航	CRISMAT研究所(フランス)		2015 - 現在	TEMを用いた正極材の局所構造観察
辻村 清也	東京理科大		2011 - 現在	ウェアラブルデバイスの研究開発
辻村 清也	理化学研究所		2015 - 現在	酸化還元酵素の開発
辻村 清也	群馬大学		2011 - 現在	多孔質炭素に関する研究

辻村 清也	東京農工大		2014－現在	酵素電極に関する研究
辻村 清也	クイーンズランド大学(オーストラリア)		2014－現在	微生物燃料電池に関する研究
辻村 清也	岡山大学		2015－現在	分子技術を活用した酵素燃料電池に関する研究
辻村 清也	グルノーブル・アルプ大(フランス)		2015－現在	分子技術を活用した酵素燃料電池に関する研究
辻村 清也	佐賀大学		2016－現在	分子技術を活用した酵素燃料電池に関する研究
辻村 清也	ポールパスカル研究所(フランス)		2011－現在	レドックスポリマーに関する研究
辻村 清也	産業技術総合研究所		2016－現在	補酵素の電気化学に関する研究
辻村 清也	産業技術総合研究所		2016－現在	レドックスフロー電池に関する研究
辻村 清也	筑波大学		2016－現在	酵素の電気化学特性評価に関する研究
加納 英明	アトナーブ株式会社		2014－現在	小型・高性能コヒーレントラマン分析装置の開発
加納 英明	コニカミノルタ株式会社		2014－現在	CARSを用いた樹脂フィルムの物性評価
加納 英明	株式会社資生堂		2015－現在	コヒーレント反ストークスラマン散乱(CARS)による表皮成分イメージングの研究
加納 英明	株式会社アサヒビジョン		2016－現在	水晶体の光学的検査によるタンパク質変性疾患の早期診断法の研究
青嶋 誠	ノースカロライナ大学(米国)		2013－現在	高次元小標本データの高精度識別に関する研究
青嶋 誠	プリンストン大学(米国)		2013－現在	高次元潜在因子モデルの共分散行列推定に関する研究
青嶋 誠	国立精華大学(台湾)		2014－現在	大規模複雑データのランダム行列に関する研究
青嶋 誠	香港大学(香港)		2016－現在	大規模複雑データの主成分分析に関する研究
青嶋 誠	モスクワ大学(ロシア)		2005－現在	高次元統計解析の精度評価に関する研究
照井 章	国立情報学研究所, 富士通研究所, 名古屋大学, 東京理科大学, 立教大学		2014－現在	人口知能プロジェクト「ロボットは東大へ入れるか」
磯崎 洋	St.Petersburg State大学(ロシア)		2002－現在	離散シュレーディンガー作用素のスペクトル逆問題
磯崎 洋	University College London大学(英国)		2000－現在	非コンパクト多様体上の逆散乱理論
磯崎 洋	Helsinki大学(フィンランド)		2000－現在	非コンパクト多様体上の逆散乱理論
磯崎 洋	Aix Marseille大学(フランス)		2013－現在	離散マックスウエル方程式と逆散乱理論
磯崎 洋	愛媛大学, 同志社大学		2014－現在	格子上の離散シュレーディンガー作用素のスペクトル逆問題
木下 保	Texas大学(米国)		2013－現在	双曲型偏微分方程式に関する研究
守屋 克洋	University of Leicester, Universidad de Granada, University College Cork, Technical University Munich	105,520 €	2016－現在	Minimal surfaces: integrable systems and visualisation
秋山 茂樹	The City University of New York		2016－現在	Higher order Oscillation and uniform distribution
佐垣 大輔	京都大学, 東京工業大学		2016－現在	半無限 Lakshmibai-Seshadri パスに対する標準単項式理論
金子 元	武漢大学(中国)		2015－現在	組み合わせ論における重要な定数に関する正標数における類似に関する研究
金子 元	ストラスブール大学(フランス)		2015－現在	数論における近似理論および一様分布論に関する研究
金 信弘	高エネルギー加速器研究機構	¥280,000	2016年度	加速器科学に関する大学院教育プログラム等の高度化

8.4 研究員・研究生等の受け入れ

(受入教員)				
構成員名	研究生等氏名	職名・学年	国籍	受入期間
中村 潤児	Christoph Mechler	博士課程学生	ドイツ	2016.5 - 2016.6
中村 潤児	王貴昌	南開大学 教授	中国	2016.7 - 2016.8
中村 潤児	小笠原寛人	SLAC(USA) Staff Scientist	日本	2016.7 - 2016.8
中村 潤児	Thomas Winter	博士課程学生	ドイツ	2016.9 - 2016.10
中村 潤児	Stephanie Hoffmann	博士課程学生	ドイツ	2016.10 - 2016.11
中村 潤児	Justus Heese	博士課程学生	ドイツ	2016.11
中村 潤児	Malte Behrens	University of Duisburg-Essen 教授	ドイツ	2016.11
中村 潤児	Klaus Friedel	博士課程学生	ドイツ	2017.3
中村 潤児	Ina Haxhijaj	博士課程学生	ドイツ	2017.3 - 2017.4
神原 貴樹	江鑫	外国人研究生	中国	2016.10 - 2017.3
山本 洋平	Rui Zhong	外国人研究生	中国	2016.10 - 2017.3
秋山 茂樹	Jonathan Caalim	D3	フィリピン	2014 - 2016

8.5 各種受賞等

構成員名	共同受賞者名	賞名	受賞課題・受賞論文名	受賞年月日	団体名
下山 雄人		学長表彰		2017.3.24	
山本 洋平		ICSM2016 Best Poster Award	Self-Assembled Conjugated Polymer Spherical Microresonators	2016.6	
大木 理		Interdisciplinary Workshop on Science and Patent (IWP2016) Rafa?! Kiebooms Prize	Near-Infrared Whispering Gallery Mode Photoluminescence from Conjugated Polymer Blend Microspheres via FRET	2016.9	
鈴木 佳太		Interdisciplinary Workshop on Science and Patent (IWP2016) Rafa?! Kiebooms Prize	Resonant Photoluminescence from Semiconductor Nanocrystal-Doped Polymer Microspheres	2016.9	
岡田 大地		KJF-ICOME2016 Best Student Poster Award	Polymorphic Dye-Doped Polymer Microcavities with Tunable Multicolor Resonant Photoemission and Long-Range Energy Transfer Cascade	2016.9	
水垂 司		AsiaNANO 2016 Pan Stanford Poster Award	Peptide Crosslinkers: Redispersion of Agglomerated Metal Nanoparticles and Enhanced Photocatalytic Properties	2016.1	
岡田 大地		AsiaNANO 2016 NPG Asia Materials Poster Award	Polymorphic BODIPY-Doped Polymer Microcavities with Multicolor Resonant Photoluminescence and Color Conversion	2016.1	
愛敬 雄介		第31回高分子学会関東支部茨城地区若手交流会 最優秀ポスター賞	多色発光ポリマーマイクロディスクアレイの作製	2016.11	
水垂 司		第31回高分子学会関東支部茨城地区若手交流会 優秀ポスター賞	ペプチド架橋材を用いた金属ナノ粒子-酸化グラフェン複合体の形成と増強光触媒効果	2016.11	
大木 理		第31回高分子学会関東支部茨城地区若手交流会 優秀ポスター賞	球体内FRETを介した近赤外WGM発光ポリマーブレンド共振器	2016.11	
愛敬 雄介		第6回CSJ化学フェスタ 優秀ポスター賞	多色発光 π 共役ポリマーマイクロディスクアレイの作製	2016.11	
小林 航		筑波大学若手奨励賞		H29.1	筑波大学
北 将樹		筑波大学 FY2016 BEST FACULTY MEMBER 選出	有毒哺乳動物および海洋生物由来の鍵物質に関する化学的研究	2017.2.20	筑波大学
辻村清也	新山歩(M1)	TGSW2016, Student Poster Session on Materials Research Excellent Poster Award	Glucose/O ₂ biofuel cell using carbon cloth modified with MgO-templated carbon	2016.9.18	Doctoral Program University of Tsukuba
辻村清也		JAFOE2016, Best Speakers Award	Enzyme-Based Biofuel Cells	2017.1.18	JAFOE
辻村清也	船橋広人(M2)	数理物質科学研究科長表彰	研究活動・成績優秀	2017.3.24	筑波大学
加納 英明	下平雄貴	日台医用分光学会国際シンポジウムポスター賞	CARS spectroscopic imaging and multivariate curve resolution analysis of brown adipocytes	2016.12.4	JTMSIS
青嶋 誠	中山 優吾 (M2)	2016年度統計関連学会連合大会 優秀報告賞	高次元小標本におけるサポートベクターマシンの漸近的性質とバイアス補正	2016.9.6	日本統計学会

8.6 学会活動・各種委員等

構成員名	役職名など	組織名	任期
中井 直正	欧文研究報告編集顧問	日本天文学会	2015.4.1-2017.5.31
久野 成夫	欧文研究報告編集委員	日本天文学会	2015.4.1-2017.5.31
中井 直正	電波専門委員会VLBI小委員会委員	国立天文台	2016.4.1-2017.3.31
久野 成夫	電波専門委員会ALMA小委員会委員	国立天文台	2016.4.1-2017.3.31
久野 成夫	電波専門委員会野辺山プログラム小委員会委員	国立天文台	2016.4.1-2017.3.31
中井 直正	客員教授	国立極地研究所	2017.4.1-2017.3.31
石橋 延幸	日本学術振興会学術システム研究センター専門委員	日本学術振興会	3年
石橋 延幸	PTEP 編集委員	日本物理学会	2017.4.1-2019.3.31
佐藤 勇二	グローバルネットワークへの参加	欧州の学際研究教育ネットワーク「Gauge Theory as an Integrable System (GATIS)」(http://gatis.desy.eu/)	2013.1.1-2016.12.31
中村 潤児	科学研究費委員会専門委員	独立行政法人 日本学術振興会	2016.12 - 2017.11
中村 潤児	協議員	公益社団法人 日本表面科学会	2016.6 - 2017.3
中村 潤児	Surface Science誌Editorial Board	Elsevier	2012.1 - 現在
中村 潤児	Surface Science Report誌Editorial Board	Elsevier	2012.1 - 現在
中村 潤児	触媒学会東日本支部幹事	一般社団法人 触媒学会	2012 - 現在
中村 潤児	技術指導・コンサルティング	東洋インキSCホールディングス㈱	2016.4-2017.3
中村 潤児	技術指導・コンサルティング	㈱村田製作所	2016.1-2017.5
中村 潤児	代議員	一般社団法人 触媒学会	2017.3-2018.2
近藤 剛弘	科学技術・学術政策研究所 科学技術動向研究センター専門調査員	文部科学省	2014.4 - 現在
近藤 剛弘	特定准教授	東京工業大学 元素戦略研究センター	2016.4 - 現在
近藤 剛弘	出版委員	日本表面科学会	2016.4 - 現在
近藤 剛弘	企画委員	日本表面科学会	2016.4 - 現在
近藤 剛弘	The 8th International symposium on Surface Science 実行委員	日本表面科学会	2016.4 - 現在
近藤 剛弘	平成28年度 触媒学会 つくば地区講演会 世話人	触媒学会	2015.4 - 現在
近藤 剛弘	領域7運営委員	日本物理学会	2016.10 - 現在
神原 貴樹	関東支部茨城地区幹事	高分子学会	2007 - 現在

神原 貴樹	客員研究員・兼任	産業技術総合研究所	2009 - 現在
桑原 純平	客員研究員・兼任	産業技術総合研究所	2009 - 現在
山本 洋平	客員研究員	物質・材料研究機構	2011 - 現在
山本 洋平	客員研究員	産業技術総合研究所	2013 - 現在
西堀 英治	councilor	Asian Crystallographic Association	2011.4-現在
西堀 英治	Membership	Commission on Charge, Spin and Momentum Densities, International Union of Crystallography	2014.8-現在
西堀 英治	客員研究員	理化学研究所	2014.5-現在
西堀 英治	外来研究員	(公財)高輝度光科学研究センター	2012.4-現在
西堀 英治	企画幹事	SPring-8ユーザー協同体	2014.4-2016.3
西堀 英治	SACLA利用研究課題審査委員会委員	(公財)高輝度光科学研究センター	2014.4-2016.3
西堀 英治	利用研究課題審査委員会分科会レフェリー	(公財)高輝度光科学研究センター	2014.4-2016.3
守友 浩	光・量子計測MG委員	TIA	2015.10-2016.3
守友 浩	オープンラボ研究員	NIMS	2015.10-2016.9
守友 浩	J-PARC課題審査委員	CROSS	
守友 浩	PF実験課題審査委員	KEK	
守友 浩	中性子共同利用実験審査委員会	KEK	2011.5-2017.3
守友 浩	客員研究員	KEK	2011.5-現在
守友 浩	外来研究員	JASRI	2012.4-現在
守友 浩	中性子散乱実験審査委員会委員	東大物性研	2015.4-現在
守友 浩	茨城県中性子ビームライン運営委員会委員	茨城県企画科学技術振興課中性子利用推進グループ	2016.5-現在
小林 航	外来研究員	JASRI	2014.4-現在
小林 航	外来研究者	NIMS	2015.6-現在
岡田 晋	客員教授	東京理科大学	2012.4-現在
北 将樹	組織委員	8th US-Japan Symposium, 21st Century Innovations in Natural Products	2016.11
北 将樹	運営委員	毒素シンポジウム	2014.1-2016.12
北 将樹	科学技術・学術政策研究所 科学技術動向研究センター専門調査員	文部科学省	2015.4-現在

辻村清也	電気化学会関東支部幹事	電気化学会	2012.7－現在
辻村清也	電気化学会編集幹事	電気化学会	2016.2－現在
辻村清也	電気化学会電力貯蔵技術研究会幹事	電気化学会	2016.11－現在
辻村清也	評議員	日本ポーログラフ学会	2005.1－現在
辻村清也	客員准教授	東京理科大	2015.4－現在
青嶋 誠	日本数学会解析学賞委員会委員	日本数学会	2015－2017
青嶋 誠	日本統計学会統計教育委員会委員	日本統計学会	2011－現在
青嶋 誠	Elected Member	International Statistical Institute	2004－現在
青嶋 誠	Scientific Program Committee	Institute of Mathematical Statistics	2015－現在
照井 章	理事, 常任委員, 代表会員	日本数式処理学会	2016－現在
照井 章	論文誌“Communications of the Japan Society for Symbolic and Algebraic Computation”編集委員長	日本数式処理学会	2016－現在
矢田 和善	『数学』常任編集委員	日本数学会	2015－2017
木下 保	JSIAM Letters編集委員会委員	日本応用数理学会	2011－現在
竹山 美宏	教育委員会運営委員	日本数学会	2015－現在
秋山 茂樹	代数学分科会運営委員	日本数学会	2014－現在
佐垣 大輔	『数学』常任編集委員	日本数学会	2015－2017
金谷和至	人材育成マネジメントグループ/委員	つくばイノベーションアリーナ	2015-現在
金谷和至	加速器共通基盤研究施設運営会議/委員	高エネルギー加速器研究機構	2015-2017
金谷和至	教育研究評議会/評議員	高エネルギー加速器研究機構	2015-2017

8.7 新聞等報道・特記事項

構成員名	共同発表者名	新聞・雑誌名	報道内容	年・月・日
中井 直正		読売新聞(茨城版)	「電波望遠鏡模型を公開一筑波大など南極設置計画」	2017.3.23
中井 直正		日本経済新聞	「南極に新拠点構想」	2017.3.5
瀬田 益道		神戸新聞	「南極に最大天体望遠鏡」	2016.12.25
中井 直正		北陸中日新聞	「宇宙観測 南極が最適」	2016.12.19
中井 直正		日本経済新聞	かがくアゴラ「銀河の謎、南極から探る」	2016.7.3
中井 直正		日本経済新聞	「南極に天文台計画一銀河の赤ちゃん観測へ」	2016.6.27
守友 浩	西堀英治	常陽新聞	放射光物質科学コースを開設	2016.5.2
北 将樹		北海道大学 プレスリリース	Sci. Rep. 誌掲載の論文 [DOI: 10.1038/srep31173] 「生きた化石」キューバソレドンの起源は恐竜の絶滅よりも新しかった」(北将樹) https://www.hokudai.ac.jp/news/160809_lowtem_pr.pdf	2016.8.9
北 将樹		毎日新聞 朝刊 (北海道版)	「ソレドン 恐竜絶滅後に進化 DNA分析で判明 大館・北大助教ら発表」(北将樹) https://mainichi.jp/articles/20160828/k00/00e/040/113000c	2016.8.28
北 将樹		Scientific American Español電子版	「Científicos estudian al almiquí, un casi desaparecido mamífero cubano」(北将樹) http://www.scientificamerican.com/espanol/imagenes-de-la-ciencia/cientificos-estudian-al-almiqui-un-casi-desaparecido-mamifero-cubano/	2016.9.2
北 将樹		北海道新聞 夕刊	「モグラの仲間「キューバソレドン」「恐竜と共存」していなかった」(北将樹)	2016.10.24
加納英明		筑波大学プレスリリース	網膜内構造の「そのまま」見える化に成功 ～新しい非線形光学顕微鏡の効果を実証～ (加納英明)	2017.1.06
金 信弘 原 和彦	高崎史彦 (KEK)	東京新聞	筑波大がKEK,首都大学、IRIDと推進しているミュオンラジオグラフィの研究について「福島2号機 溶け落ちた核燃料の大部分 圧力容器の底に」と報道	2016.7.14
金 信弘 原 和彦	高崎史彦 (KEK)	河北新報	筑波大がKEK,首都大学、IRIDと推進しているミュオンラジオグラフィの研究について「<福島第1>2号機溶融燃料 ほぼ炉内残存」と報道	2016.7.14

筑波大学 数理物質系
数理物質融合科学センター

Center for Integrated Research
in Fundamental Science and Engineering
(CiRfSE)

〒305-8571

茨城県つくば市天王台 1-1-1

URL: <http://www.pas.tsukuba.ac.jp/~CiRfSE/>

email: CiRfSE@pas.tsukuba.ac.jp

phone: 029-853-3724

fax: 029-853-6305