

筑波大学 数理物質系
数理物質融合科学センター

平成27年度
年次報告書



数理物質融合科学センター

平成28年7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27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	平成27年度実績概要	4
1.2	センター設置の経緯と目的	5
1.3	センターの構成	7
1.4	センターの構成教員	8
1.5	運営協議会	9
1.6	運営室会議	10
1.7	融合研究企画室会議	10
1.8	平成27年度予算	11
1.9	外部資金獲得と平成28年度以降に向けての取り組みについて	12
2	センター関係研究集会	14
2.1	国際会議 TGSW2015 宇宙進化・物質創生 及び 環境エネルギー材料セッション	14
2.2	第2回 CiRfSE ワークショップ・第2回 CiRfSE 運営協議会	16
2.3	第3回 連携サロン	19
2.4	第4回 連携サロン	19
2.5	光量子計測器開発推進室発足会議	20
2.6	バイオエネルギー研究チーム 研究発表会	21
2.7	光量子計測器ワークショップ	21
3	宇宙史国際研究拠点 活動報告	23
3.1	南極天文部門	26
3.2	素粒子構造部門	36
3.3	クォーク・核物質部門	66
4	環境エネルギー材料研究拠点 活動報告	81
4.1	物質変換材料部門	84
4.2	エネルギー貯蔵・変換物質部門	104
4.3	バイオエネルギー研究チーム	115
5	逆問題研究推進室 活動報告	127
6	光量子計測器開発推進室 活動報告	134
7	活動実績資料・参考資料	139
7.1	センター部局細則	139
7.2	競争的資金獲得状況	143
7.3	共同研究・受託研究	146
7.4	研究員・研究生等の受け入れ	149

7.5	各種受賞等	150
7.6	学会活動・各種委員等	151
7.7	新聞等報道・特記事項	154

1 センター活動概要

1.1 平成27年度実績概要

平成26年度に引き続き、国際研究拠点としての研究体制の強化と展開を進めた。その一環として、平成27年10月に、融合研究企画室の下の第2の推進室として「光量子計測器開発推進室」を、また、環境エネルギー材料研究拠点に「バイオエネルギー研究チーム」を新たに設置した。

研究集会としては、国際会議1回と、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のそれぞれのキックオフ・ワークショップを開催し、連携サロンも前年度に引き続き2回を開催した。年度末には、2つの拠点の成果発表とコンソーシアム構築に向け、関係する国内研究者を集めて第2回 CiRfSE ワークショップを開催した。

並行して、外部資金獲得に向け、様々な活動を行った。特に平成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」を計算科学研究センターと共同で提出し、採択された。現在（平成28年度）は、それによる「平成28年度機能強化経費（機能強化促進分）」の配分に基づき、海外研究ユニット招致や、クロス・アポイントメント制度を活用した連携教員雇用などを推進している。

平成27年度の活動概要を、図1に示す。

2015年度活動概要

2014年度年次報告書

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

研究集会

- 2015/9/30 国際会議TGSW2015 宇宙史セッション+環境エネルギー材料セッション（参加者約80）
- 2015/11/30 光量子計測器開発推進室発足会議
- 2015/12/7 バイオエネルギー研究チーム 研究発表会
- 2016/1/18-19 第2回CiRfSEワークショップ
- 連携サロン 2015/6, 2015/12

共催・協力等：

- 2015/9/27-10/3 国際会議Quark Matter 2015, Kobe
- 2015/10/15 国際会議MANA-RSC symposium "Materials for Energy Generation and Storage", Tsukuba

外部資金獲得活動

- 2015/夏 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（学内での配分に従い、計画を調整。）
- 2015/5 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
- 2015/5 JSPS2国間交流事業 => 採択（H27:184万円）西堀
- 2015/9 JSPS研究拠点形成事業「素粒子・原子核国際共同実験による宇宙史研究交流」申請 => 不採択

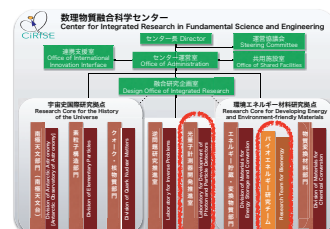


図1 数理工学融合科学センター 平成27年度活動概要

2014年度活動概要



<http://www.past.sukuba.ac.jp/~CIRISE/>

- ◆ **2014/9/1 発足**
 - 発足式@大学会館 国際会議室（参加者数：約100）
 - センター細則制定
 - ホームページ整備
- ◆ **研究活動**
 - 論文(256), 著書・総説等(10), 国際会議発表(99), 国内発表(181) : 年次報告を参照
 - センターとしての融合研究は今後
- ◆ **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・オーフス大学CMCとは、2015海外ユニット招致（西堀）でも連携。
- ◆ **研究集会**
 - 2014/9/29 国際会議TGSW2014 宇宙進化・物質起源セッション（参加者数：約80）
 - 2015/3/12-13 第1回CIRiSEワークショップ（参加者数：77）+ miniワークショップ3つ
 - 連携サロン2回：企画室・推進室が主催、センター内異分野交流と推進室の活動の場として。



◆ 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て：
材料科学分野でも検討中。

◆ 運営関係

- 運営室会議（月に1回）
- 2014/12/17 運営協議会（年度に1回）

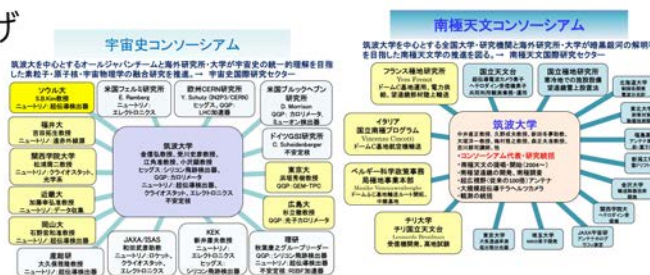


図2 数理物質融合科学センター 平成26年度活動概要

1.2 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。

学術センターは、筑波大学で研究力や国際性の強い分野をさらに強化して、計算科学研究センターや生命領域学際研究センターに並ぶ世界的研究拠点形成を目指すものである。研究力強化実現構想により、「5年度目に当該学術センターの評価を実施し、成果が見込めるものについてはWPI型研究センターに昇格させ、見込めないものは分野の入替を行う。10年度目にも同様の評価を行い、WPI型研究センター化もしくは分野の入替を行う。」となっている。

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ー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く。

数理工融合科学センターは、数理工系では、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。

数理工系では、以上を平成26年度重点施策・改善目標のひとつとして、部門構成の調整や部局細則の制定などの準備を進め、平成26年9月1日にセンターを正式に発足させた。

上記のセンターの目的に従い、各分野の連携の拠点と成る各種コンソーシアムの立ち上げを推進し、配置された国際テニュアトラック教員の採用や海外拠点への派遣により、国際連携体制を強化し、その交流の場である各種研究集会を企画している。平成26年度の活動概要を、図2に示す。詳細は「数理工融合科学センター 平成26年度年次報告書」を参照。

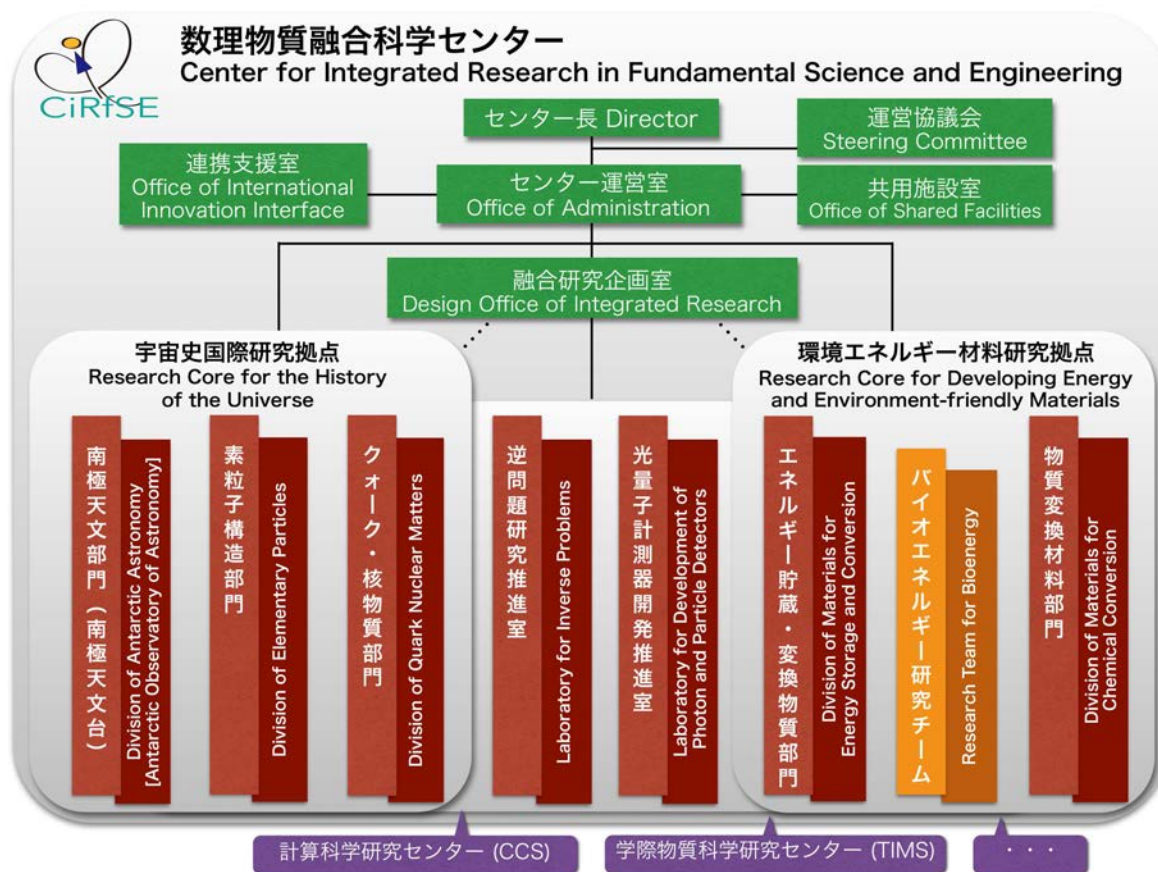


図3 数理工融合科学センターの構成 (平成27年度末現在)

表1 センター構成員表（平成27年度末時点）（その1）

職名等	氏名	域	職名
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	原 和彦	物理学	准教授
素粒子構造部門構成教員	武内 勇司	物理学	講師
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 (*)
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	BUSCH, Oliver	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)

(*)：国際テニュアトラック教員

1.3 センターの構成

図3に、現在のセンター構成図を示す。センター設立当初からの「宇宙誌国際研究拠点」、「環境エネルギー材料研究拠点」、[逆問題研究推進室]の研究集団に加え、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。

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」(7章参照)で定義されている。

1.3.1 光量子計測器開発推進室

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。TIA-ACCELERATE（光量子産業応用イニシアティブ）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する計画と対応して、光量子計測器開発

表2 センター構成員表（平成27年度末時点）（その2）

職名等	氏名	域	職名	
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	物理学	助教	
エネルギー貯蔵・変換物質部門構成教員	丹羽 秀治	物理学	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	(*)
物質変換材料部門長	中村 潤児	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	
逆問題研究推進室長	磯崎 洋	数 学	教授	
逆問題研究推進室構成教員	千原 浩之	数 学	教授	
逆問題研究推進室構成教員	秋山 茂樹	数 学	教授	
逆問題研究推進室構成教員	青嶋 誠	数 学	教授	
逆問題研究推進室構成教員	金子 元	数 学	助教	(*)
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)
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)
光量子計測器開発推進室構成教員	富田 成夫	物理工学	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)
光量子計測器開発推進室構成教員	原 和彦	物理学	准教授	(宇宙史国際研究拠点)
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)

(*)：国際テニュアトラック教員

推進室をその筑波大学の活動拠点として機能する。

1.3.2 バイオエネルギー研究チーム

バイオエネルギー研究チームは、喫緊のエネルギー問題の解決にとって重要な、天然物や酵素を初めとする機能性タンパク質の特性を利用したエネルギー変換やその応用に向けて、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、天然物の優れた機能を利用した機能性物質・材料の創製をミッションとして設立された。環境エネルギー材料研究拠点長直下の研究チームで、拠点に既にある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を目指す。同時に、若手によるリサーチグループとして、将来の部門の種と位置づけている。

1.4 センターの構成教員

表1、表2に、平成27年度末の時点におけるセンター構成教員表を示す。部門の研究体制が整い、研究連携が具体的に進むに合わせて、構成教員、連携教員も随時調整している。

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が使命である。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、大川助教、Busch 助教、笠井助教、金子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。

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、研究担当副学長が指名する者、研究拠点長、学外の学識経験者、数理物質系長、センター長が指名する本学の職員となっている。

平成27年度の運営協議会委員名簿を以下に示す。

選出根拠	(選出区分) 所属	氏名	域	職名
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	(研究担当副学長が指名する者)	(検討中)		
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
第9条第2項第4号	東京理科大学	荒川 裕則		名誉教授 *
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	教授

*：平成28年1月1日より空席

「研究担当副学長が指名する者」については、センター発足から間もないことから、当面は空席とした。「学外の学識経験者」のひとりとして委員を勤めていただいていた東京理科大学荒川裕則名誉教授は、平成27年12月に都合により辞職され、平成28年1月1日から空席となっていたが、平成29年度には、物質・材料研究機構の魚崎浩平主任研究者に就任していただけることになった。「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、梅村雅之教授に務めていただいている。

1.5.1 第2回運営協議会

日時	2016年1月18日～19日
場所	筑波大学 計算科学研究センター WS室、総合研究棟 B204、他
出席者	金谷、金、鍋島、新井、荒川、伊藤、梅村、磯崎(オブザーバー)

第2回運営協議会を、1月18～19日に開催した。全体的報告や活動成果報告部分は第2回 CiRfSE ワークショップの一部として公開し、1月18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 B204 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。

荒川委員の辞任の報告、国際テニユ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18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、各拠点長、各部門長、逆問題研究推進室長、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 も出席する。

平成27年度は、第2水曜日の朝を定例とし、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 2015/04/15
- 第2回 2015/05/13
- 第3回 2015/06/10
- 第4回 2015/07/08
- 第5回 2015/08/26
- 第6回 2015/10/14
- 第7回 2015/11/11
- 第8回 2015/12/08
- 第9回 2016/01/12
- 第10回 2016/02/09
- 第11回 2016/03/08

1.7 融合研究企画室会議

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27年度は、

- 第1回 2015/08/21
- 第2回 2015/10/09
- 第3回 2015/10/21
- 第4回 2015/12/02
- 第5回 2016/03/22

に開催され、逆問題研究推進室の将来計画、光量子計測器開発推進室の新設、バイオエネルギー研究チームの新設、連携サロン、外部資金獲得に向けての活動などが話し合われた。

1.8 平成27年度予算

平成27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400万円が配分された。(平成26年度は500万円であったが、全学的な一律校費削減により、400万円に削減された。)その使用実績は、

消耗品費	旅費	賃金	その他	合計
0円	2,743,430円	907,525円	349,045円	4,000,000円

内訳は、

使用内訳	金額 (円)	使用目的
消耗品費		
旅費		
・ TGSW 講師招へい旅費 (国外9名、国内4名)	659,238円	TGSW 招待者用
・ 国際テニュアトラック教員旅費支援 (30万円×4名)	1,200,000円	国際 TT 旅費支援
・ 第4回数理連携サロン講師旅費 (1名)	5,600円	講師旅費
・ 第2回 CiRfSE ワークショップ講師旅費 (7名)	111,300円	講師旅費
・ 平成27年度運営協議会委員旅費	760円	委員旅費
・ 光量子計測器ワークショップ講師旅費 (2名)	1,160円	講師旅費
・ 部門、推進室旅費支援	765,372円	研究遂行旅費支援
賃金		
・ 事務補佐員給与 (1名)	650,000円	センターの運営に係る事務補助
・ 第3回数理連携サロン講師謝金 (1名)	20,000円	講師謝金
・ 第4回数理連携サロン講師謝金 (1名)	20,000円	講師謝金
・ 光量子計測器開発推進室発足会議出席謝金 (2名)	30,000円	会議出席謝金
・ 第2回 CiRfSE ワークショップ講演謝金 (6名)	110,000円	講演謝金
・ 第2回 CiRfSE ワークショップ短期雇用 (学生11名)	59,594円	ワークショップ運営補助
・ 光量子計測器ワークショップ講演謝金 (1名)	20,000円	講演謝金
・ 光量子計測器ワークショップ短期雇用 (学生1名)	4,931円	ワークショップ運営補助
その他		
・ 印刷製本費 (平成26年度年次報告書冊子)	313,240円	平成26年度年次報告書
・ 会議費 (第3回数理連携サロン)	5,135円	数理連携サロンにおける茶菓子類
・ 会議費 (第4回数理連携サロン)	4,671円	数理連携サロンにおける茶菓子類
・ 会議費 (光量子計測器開発推進室発足会議)	4,860円	発足会議における茶菓子類
・ 会議費 (第2回 CiRfSE ワークショップ)	14,178円	発足会議における茶菓子類
・ 会議費 (光量子計測器ワークショップ)	6,961円	ワークショップにおける茶菓子類

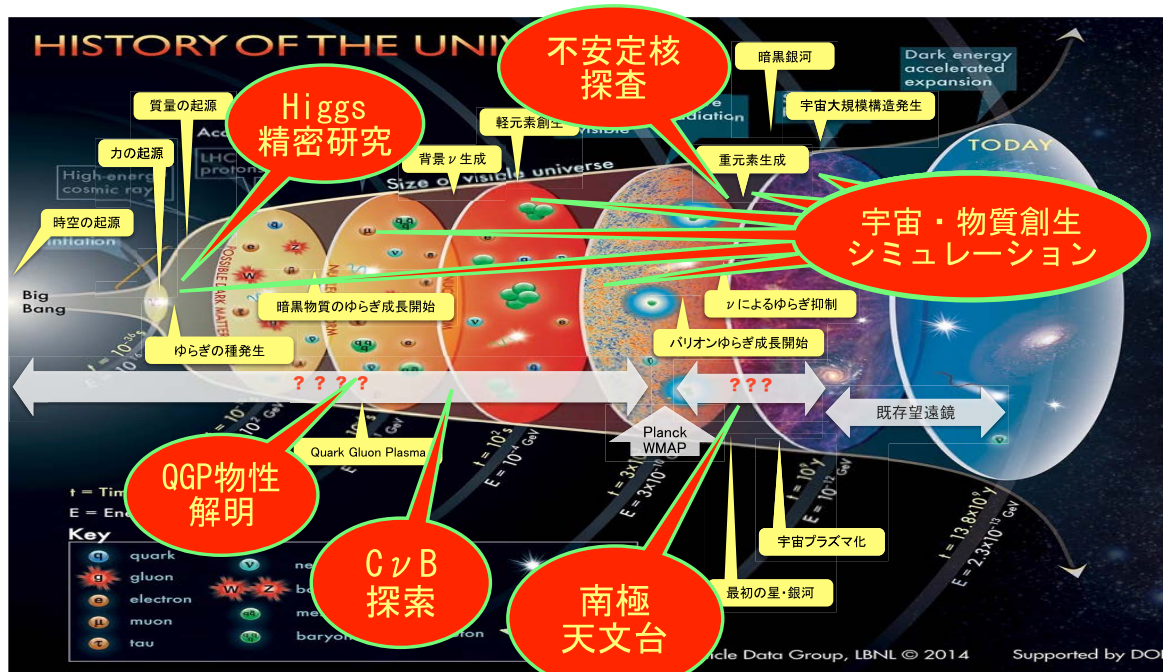
である。

大学本部からの配分としては、他に、TGSW 招聘旅費の半額（707,500 円）が補助されたが、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、数理論物質系から、CiRFSE 活動支援経費として 4,000,000 円、及び TGSW 実施経費として 500,000 円が支給された。

センター全体としての平成 27 年度の主な支出は、上記の運営協議会、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、国際テニュアトラック教員 4 名の渡航旅費支援として各 30 万円の支給、5 部門の活動支援（旅費補助など、総額 1,340,000 円）、光子計測器開発推進室とバイオエネルギー研究チームへのスタートアップ支援（総額 2,800,000 円）であった。

1.9 外部資金獲得と平成 28 年度以降に向けての取り組みについて

宇宙史の暗黒部分とその解明に向けて



- 生命につながる元素の起源？
- 宇宙の構造の起源？ 力・物質・時空の起源？
- 実験的に未解明の領域（暗黒）が多く残されている。
- 宇宙・素粒子・原子核の最先端理論・実験プロジェクトを融合
- 現象とメカニズム・プロセスの同時解明
- 物質と生命の起源に迫る新領域の国際的研究ネットワークを形成

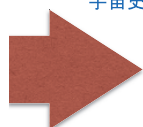
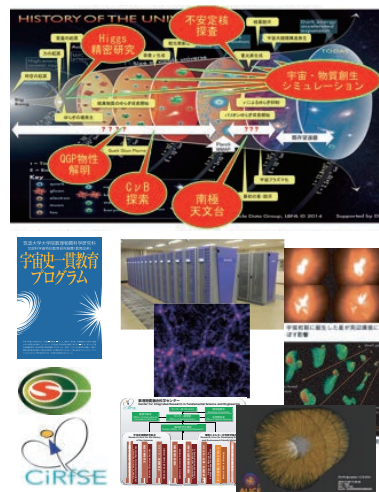
図 4 平成 28 年度概算要求「宇宙史の暗黒を照らす国際研究拠点形成」目的

平成 27 年度の外部資金獲得活動として、計算科学研究センターと共同で、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」を提出した（図 4, 5）。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で、宇宙史の暗黒部分の研究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解明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。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

宇宙史解明における融合研究の必要性

- ◆ 宇宙の起源・進化をビッグバンから銀河・生命形成に至るまで包括的に理解するためには、これまで実験的に未解明の暗黒物質、暗黒銀河、宇宙背景ニュートリノ、物質と質量の起源について、素粒子・原子核・宇宙の研究を連携させて推進する必要がある。
- ◆ 宇宙模型や物質進化に関する大規模シミュレーションの発展に加え、新たな実験・観測プロジェクトや進行中の大型実験プロジェクトの最新の成果により、宇宙史解明の新展開が世界的に引き起こされつつある。
- ◆ それを牽引してきた理論・実験の重要グループが筑波大学に集中している。それらのアクティビティを融合することにより、今後の飛躍的な展開を牽引できる。

- ☑ ロケット・衛星による宇宙背景ニュートリノ(CνB)探索計画、南極天文台計画
- ☑ CERN/ALICE実験(QGP物性)、ATLAS実験(ヒッグス粒子精査)、BNL/RHIC実験(QGP物性)、RIKEN/RIBF実験(不安定核探索)
- ☑ 日本学術会議マスタープラン大型研究計画(2014)に、5プロジェクト全てが採択：宇宙背景ニュートリノ探索、南極天文台、ALICE実験、ATLAS実験、RIBF実験
- ☑ 筑波大学 宇宙史一貫教育プログラム (2007-)：年間約30名履修。2007-2013年度に、修士課程学生100名を約1ヶ月、博士課程学生32名を1ヶ月～1年間、海外拠点実習に派遣。若手宇宙史研究者を多数養成。
- ☑ 理論分野における融合：計算科学研究センター(GCS)による、素粒子・宇宙・原子核の大規模シミュレーションと、そのための専用計算機開発。宇宙生命科学への展開。計算基礎科学連携拠点を主催し、シミュレーションによる科学研究を推進。
- ☑ 実験分野の融合：数理物質融合科学センター(CiRfSE)宇宙史コンソーシアム、南極天文コンソーシアム



国際研究拠点の構築

理論と実験をカバーした宇宙史全体の融合研究拠点

- ★ 数理物質融合科学センター(CiRfSE) と計算科学研究センター(GCS)を核とし、宇宙史コンソーシアム、南極天文コンソーシアム、計算基礎科学連携拠点の国際共同研究ネットワークを接続・融合
- ★ 海外研究ユニット招致や混合給与(クロス・アポイントメント)制度等を活用して、ハブ機能を強化

図5 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」概要

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。

この概算要求は平成27年夏に筑波大学から文部科学省に提出され、採択された。対応して、「平成28年度機能強化経費(機能強化促進分)」が平成28年4月から配分され、海外ユニット招致、クロスアポイントメント教員の採用、研究員募集などによる、拠点形成事業が推進されることになった。

これと平行して、環境エネルギー材料分野における外部資金獲得にむけた取り組みも推進した。平成28年度に提出する「平成29年度概算要求」に向けて、環境エネルギー材料分野のプロジェクトの検討と調整を進めた。

また、CiRfSEのセンターとしての活動場所として、平成28年度筑波大学公募スペース利用に応募し、平成28年4月に、人文社会学系棟B棟1階の10部屋(404 m²)の利用が許可された。センター長室兼会議室や共用セミナー室に加え、機能強化経費に基づく宇宙史拠点研究室や環境エネルギー材料分野研究室として、整備を進めている。

組織面では、逆問題研究推進室長の磯崎洋教授が平成27年度末に定年退職となり、推進室員の千原浩之教授も年度末で転出されることになったため、推進室の今後の体制と研究方向について、融合研究企画室と数学科で検討を重ねた。その結果、平成28年度以降は、青嶋誠教授を推進室長として、研究体制を再構築することとなった。現在、将来の展開を見据えた研究体制の検討を進めている。

2 センター関係研究集会

研究会やワークショップ等の詳細や発表資料については、ホームページのニュースコーナーも参照。

2.1 国際会議 TGSW2015 宇宙進化・物質創生 及び 環境エネルギー材料セッション

日時 2015年9月30日 9:00-17:30
場所 つくば国際会議場 エポカル
主催 筑波大学、筑波大学 数理物質融合科学センター



図6 国際会議 TGSW2015 宇宙進化・物質創生 及び 環境エネルギー材料ジョイントセッション (2015年9月30日)

国際会議 Tsukuba Global Science Week 2015 (TGSW2015) の一環として、宇宙進化・物質起源 (Universe Evolution and Matter Origin) セッションと環境エネルギー材料 (Research Frontier of Developing Energy and Environmental-friendly Materials) セッションを開催した。

2.1.1 Session 4: Universe Evolution and Matter Origin

参加者 約 53 名 (報告者: 12 名・来場者: 約 41 名)

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。

午前中は、Session 5 (環境エネルギー材料研究拠点) との合同として行われた。Dr. Guillaume Unal (CERN, Switzerland) は欧州 CERN 研究所の LHC 加速器を用いた ATLAS 実験でのヒッグス粒子研究の現状と展望を述べ、Dr. Roy Lacey (State University of New York at Stony Brook, USA) は米国 BNL 研究所での RHIC 加速器を用いたクォーク・グルオン・プラズマ研究、特に QCD 相の臨界点について述べた。

午後は単独のセッションとして行い、Dr. Leonardo Bronfman (University of Chile, Chile) がサブ mm 波を用いた銀河天文学を俯瞰し、Dr. Soo-Bong Kim (Seoul National University, Korea) が原子炉ニュートリノ実験について、Dr. Yaxian Mao (Central China Normal University, China) が LHC での主に jet を用いたクォーク・グルオン・プラズマ研究についてそれぞれ講演した。これらの招待者の他に、筑波大学から 5 名の研究者が講演を行った (国際テニュアトラック助教 2 名を含む)。

国際会議 TGSW2015 2015 年 9 月 30 日

Sessions 4+5: Joint Workshop

Kazuyuki Kanaya	Tsukuba	Opening address and introduction to CiRFSE
Guillaume Unal	CERN	LHC/ results on Higgs boson physics
Bo. Iversen	CMC Aarhus	Watching nanocrystals form
Roy Lacey	Stony Brook	Particle correlation studies in RHIC-BES; Probes for the critical end point in the QCD phase diagram
Junfa Zhu	NSRL China	Applications of synchrotron radiation soft X-ray spectroscopies in the studies of energy-related functional materials

Session 4: Universe Evolution and Matter Origin

Leonardo Bronfman	Chile	(Sub)mm-wave galactic astronomy in Chile: an historical perspective
Soo-Bong Kim	Seoul	Current Results from Reactor Neutrino Experiments
Hideki Okawa	Tsukuba	Searches for diboson resonances at the LHC-ATLAS Experiment
Oliver Busch	Tsukuba	Exploring the QGP with jets with ALICE
Yuji Takeuchi	Tsukuba	Development of far-infrared single-photon spectrometers based on superconducting tunnel junction for search for the cosmic background neutrino decay
Yaxian Mao	Wuhan	Hard probes at LHC
Hiroshi Nakagomi	Tsukuba	Flow and correlation results from RHIC-PHENIX experiment
Nario Kuno	Tsukuba	Antarctic 10-m Terahertz Telescope Project
Shinhong Kim	Tsukuba	Closing remarks

Session 5: Research Frontier of Developing Energy and Environmental-friendly Materials

Cheng-Hao Chuang	Tamkang	X-ray spectroscopic study for different surface bonding environments of graphene oxide
Shin-ichi Adachi	KEK	Visualizing bond formation in solution with femtosecond X-ray scattering
Yoshihisa Harada	Tokyo	A new perspective on the structure of water: An electronic structure study
Hideharu Niwa	Tsukuba	<i>Operando</i> soft X-ray emission spectroscopy of non-Pt oxygen reduction catalysts for polymer electrolyte fuel cells
Yu Kwon Kim	Ajou	Enhanced catalytic activity of chemically modified TiO ₂ nanocrystals
Shin-ichiro Fujita	Hokkaido	Mechanism of methanol synthesis over Cu/ZnO: Difference between CO ₂ and CO hydrogenations
Tsuyoshi Takata	NIMS	Development of photocatalysts for water splitting under visible light irradiation
Junpei Kuwabara	Tsukuba	Practical synthetic method of conjugated polymer materials for organic photovoltaics

2.1.2 Session 5: Research Frontier of Developing Energy and Environmental-friendly Materials

参加者 41名（講演者: 10名・その他の参加者: 31名）

宇宙史国際研究拠点担当の Universe Evolution and Matter Origin（セッション 4）と環境エネルギー材料研究拠点担当の本セッション 5 とのジョイントセッションを午前に行った。特にセッション 4 関係では Prof. B. Iversen により、ナノクリスタルの合成、機能、および放射光を利用した構造解析について、また Prof. Junfa Zhu によるグラフェンオキシドの機能や特に X 線を用いた構造解析について興味深い講演があった。

午後からはパラレルセッションとして、本拠点に深く関わる研究分野の 8 件の講演が行われた。いずれも現在の社会が直面する環境エネルギー問題の解決に貢献する物質・材料開発につながるハイレベルな基礎研究についての講演であり、活発な討論が行われた。

2.2 第 2 回 CiRfSE ワークショップ・第 2 回 CiRfSE 運営協議会

日時	2016 年 1 月 18 日～19 日
場所	筑波大学 計算科学研究センター WS 室 他
主催	筑波大学 数理物質融合科学センター
共催	筑波大学 学際物質科学研究センター
参加者	約 50 名

2016 年 1 月 18 日 (月)	
13:00-15:20	CiRfSE ワークショップ・運営協議会
金谷 和至	CiRfSE 全体報告
金 信 弘	宇宙史拠点 活動報告
鍋島 達弥	環境エネルギー材料研究拠点 活動報告
<hr/>	
16:00-17:30	CiRfSE 運営協議会
18:00-	懇親会・交流会
<hr/>	
2016 年 1 月 19 日 (火) CiRfSE ワークショップ・運営協議会	
8:30-12:15	全体セッション
久野 成夫	南極天文部門 成果報告
受川 史彦	素粒子構造部門 成果報告
江角 晋一	クォーク・核物質部門 成果報告
守 友 浩	エネルギー貯蔵・変換物質部門 成果報告
中村 潤児	物質変換材料部門 成果報告
田崎博之・照井章	
矢田和善・金子元	逆問題研究推進室 成果報告
金 信 弘	光量子計測器開発推進室 報告
<hr/>	
13:30-18:00	4 分野のパラレル ワークショップ

平成 27 年度の CiRfSE 成果発表会と第 2 回 CiRfSE 運営協議会を兼ねた、第 2 回 CiRfSE ワークショップを 1 月 18 日から 19 日にかけて開催した。初日は、センターと拠点の全体報告（公開）を計算科学研究セン



図7 第2回 CiRfSE ワークショップ・運営協議会 (2016年1月18日)

ターワークショップ室で行い、午後の後半は、総合研究棟 B204 会議室で CiRfSE 運営協議会（非公開）を開催した。2日目には、部門の成果報告と、各分野に分かれての平行・ワークショップを開催した。

2.2.1 Session 1: 素粒子構造部門

日時	2016年1月19日 13:30-18:00
場所	筑波大学 計算科学研究センター WS 室
参加者	22人 (学内:19人、学外:3人、海外:0人)

講演者	所属	タイトル
武内 勇司	CiRfSE 素粒子構造部門	ニュートリノ崩壊探索概要
武政 健一	筑波大学数理物質系物理学域	Hf-STJ 開発
木内 健司	筑波大学数理物質系物理学域	SOI 極低温アンプ設計
浅野 千紗	福井大学工学研究科物理工学専攻	STJ 較正用遠赤外光源開発
先崎 蓮	筑波大学数理物質科学研究科	SOI-STJ4 評価
森内 航也	筑波大学数理物質科学研究科	CRAVITY 製 Nb/Al-STJ 評価
佐藤 構二	CiRfSE 素粒子構造部門	ATLAS 実験の概要
大川 英希	CiRfSE 素粒子構造部門	ATLAS 実験におけるダイボソン共鳴事象の探索
永田 和樹	筑波大学数理物質科学研究科	ATLAS 実験における荷電ヒッグス粒子の探索
淵 遼亮	筑波大学数理物質科学研究科	ATLAS 実験におけるヒッグス粒子対生成の探索
佐藤 和之	筑波大学数理物質科学研究科	HL-LHC へ向けたピクセル検出器のビームテスト解析
岩淵 周平	筑波大学数理物質科学研究科	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

2.2.2 Session 2: クォーク・核物質部門

日時	2016年1月19日 13:30-18:00
場所	筑波大学 計算科学研究センター 会議室 A
参加者	18人



図8 第2回 CiRfSE ワークショップ・運営協議会 (2016年1月19日)

講演者	所属	タイトル
Xiaofeng Luo	CCNU	Search for experimental signatures of critical point with beam energyscanatSTAR
Masakiyo Kitazawa	Osaka U.	Non-Gaussian fluctuations in relativistic heavy ion collisions
Toshihiro Nonaka	U. Tsukuba	Higher order cumulant of net-proton distribution
Tetsuro Sugiura	U. Tsukuba	Rapidity dependence of net-charge distribution

2.2.3 Session 3: 環境エネルギー材料研究拠点

日時 2016年1月19日 13:30-18:00
 場所 筑波大学 総合研究棟 B112
 参加者 29人

講演者	所属	タイトル
吉 信 淳	東大物性研	シリコン表面の有機化学
神原 貴樹	CiRfSE, TIMS	直接的アリアル化重合の展開研究
近藤 剛弘	CiRfSE, TIMS	モデル触媒と実触媒を用いた窒素含有炭素触媒の ORR 活性点の解明
山本 洋平	CiRfSE, TIMS	ポリマー球体共振器による光エネルギー変調
森 利之	NIMS	白金-セリア電極界面への異種異質クラスター活性サイトの設計とその燃料電池用電極への応用
岡田 晋	CiRfSE	ナノ複合構造体制御によるエネルギー物質科学
大谷 実	AIST	化学電池材料評価のためのシミュレーション技法の開発
梅澤 直人	NIMS	混合価数スズ酸化物の結晶構造予測と光機能材料としての可能性
笠井 秀隆	CiRfSE, TIMS	オーフス大 CMC での構造科学研究
西堀 英治	CiRfSE, TIMS	CiRfSE エネルギー貯蔵・変換物質部門における国際展開の現状

2.2.4 Session 4: 逆問題研究推進室 -New frontiers in mathematical physics

日時	2016年1月19日 13:30-18:00
場所	筑波大学 総合研究棟 B107
参加者	24人

講演者	所属	タイトル
Matti Lassas	U. Helsinki	An Inverse Problems for a Non-linear Wave Equation and Inverse Problems in General Relativity
Sumio Yamada	Gakusyuin U.	On Riemannian Geometry of the Einstein Equation
Tapio Helin	U. Helsinki	Maximum a posteriori Estimates in Bayesian Inversion

2.3 第3回 連携サロン

日時	2015年6月18日
場所	筑波大学第一エリア 自然系学系棟 D509
主催	筑波大学 数理物質融合科学センター 逆問題研究推進室
参加者	30人 (学内:15人、学外:15人)

講演者	所属	時間	タイトル
山本 洋平	筑波大学	15:15-15:45	共役系高分子による球体形成と共鳴発光現象
富安 亮子	KEK	16:00-16:30	粉末結晶構造解析に現れる数学の問題について
千原 浩之	筑波大学	16:45-17:15	分散型写像流の幾何解析

第3回連携サロンは「形と数学」をキーワードに行われた。山本先生は共役高分子の基礎的な用語からはじめ、分かりやすく高分子で球体を作る実験と光を吸収し発光する過程を説明された。「ささやきの回廊効果」を共鳴現象としてとりだせることも紹介された。富安先生は粉末結晶の逆問題が結晶に比して位相以外に回転成分も取り出さなければいけない困難の説明からはじめ、整数論における二次形式分類の問題と結びつける研究と開発したソフトウェアを紹介された。千原先生は偏微分方程式のクラスの一つの分散型というものを例から説明し、渦流や強磁性体の方程式の一般化の初期値問題が一意的に解ける条件について幾何学的な立場から説明した。

2.4 第4回 連携サロン

日時	2015年12月2日
場所	筑波大学第一エリア 自然系学系棟 D509
主催	筑波大学 数理物質融合科学センター 逆問題研究推進室
参加者	50人 (学内:30人、学外:20人)

講演者	所属	時間	タイトル
青嶋 誠	筑波大学	15:15-15:45	高次元データの統計数理
中井 直正	筑波大学	16:00-16:30	電波天文学における統計
川野 秀一	電気通信大学	16:45-17:15	スパース学習による高次元データ解析

第4回連携サロンは「観測と推論」がキーワードであった。青嶋先生は、高次元データの統計数理に関する先端研究を紹介された。多変量統計解析では高次元データを正しく解析できないこと、そして、新しく高次元統計解析が必要になることを解説された。遺伝子発現データがスパースではないことを示され、高次元データの非スパース性に基づく新たな統計数理を提唱し、それがスパース性に基づくものよりも精度に優ることを理論と実用の両面で示された。中井先生は、天文・宇宙観測における統計を、現場の立場から解説された。観測に欠損があること、推定には最尤法が使われていること等、実際の観測における調査の難しさを説明された。さらに、天体の電波強度分布の観測法と、それをを用いた系外惑星の探索法を例示された。川野先生は、高次元回帰分析のパラメータ推定について、スパース推定の概要を解説された。スパース推定は、変数選択とパラメータ推定を同時に処理にすることで、回帰分析の解釈を容易にするものであることが説明された。さらに、ご自身が開発されたスパース学習のソフトウェアを紹介された。

聴衆の関心が大変に高く、多数の質問と意見交換があったために、各講演とも講演時間を大幅に延長した。分野横断的なテーマを通して、研究分野の相互理解と分野融合型のぎっくばらんな意見交換の場となり、大変に盛況な会であった。

2.5 光量子計測器開発推進室発足会議

日時	2015年11月30日
場所	計算科学研究センター ワークショップ室
主催	筑波大学 数理物質融合科学センター
共催	TIA 光・量子計測 (TIA-ACCELERATE)
参加者	15人

講演者	所属	タイトル
金 信弘	筑波大学・物理	推進室概要
武内勇司	筑波大学・物理	超伝導検出器
原 和彦	筑波大学・物理	SOIピクセル検出器
富田成夫	筑波大学・物理工学	超伝導検出器の生体分子研究利用
西堀栄治	筑波大学・物理	放射光X線回折
近藤剛弘	筑波大学・物質工学	分光分析による表面物理化学
原 和彦	筑波大学・物理	宇宙線を用いた大型構造イメージング
江角晋一	筑波大学・物理	シリコン電磁カロリメータ等

この会議は、筑波大学数理物質融合科学センター光量子計測器開発推進室の発足式であるとともに、推進室が目指す、光量子計測器に関する情報の共有、融合共同研究、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、理工連携・つくば連携のもとに光量子計測器開発研究の情報交換と議論を行うことを目的として開催された。

KEK3 名、産総研 2 名を含めて 15 名の研究者が参加し、約 3 時間にわたって研究内容の講演と活発な議論が行われ、光量子計測器開発研究推進に向けて実りの多い研究会となった。

2.6 バイオエネルギー研究チーム 研究発表会

日時	2015 年 12 月 7 日
場所	総合研究棟 B 6 階 0609-2 号室
主催	筑波大学 数理物質融合科学センター
共催	筑波大学 学際物質科学研究センター
参加者	14 人

講演者	所属	タイトル
鍋島達弥	筑波大学・化学	開会の挨拶
北 将樹	筑波大学・化学	「切れ味の良い分子を自然界にもとめて」
加納英明	筑波大学・物理工学	「生細胞を染めずに見る 非線形ラマン分光によるラベルフリー・イメージング」
辻村清也	筑波大学・物質工学	「酵素及び微生物をもちいた電気化学的エネルギー変換系」

数理物質融合科学センター環境エネルギー材料研究拠点に新設したバイオエネルギー研究チームの発足に当たり、研究発表会を開催した。

各メンバーの研究内容を紹介するとともに、環境エネルギー材料研究の今後の動向と、それに向けての融合研究の方向性と戦略について、分野を超えた活発な議論が行われた。

2.7 光量子計測器ワークショップ

日時	2016 年 3 月 2 日
場所	総合 B 棟 0110 室
主催	筑波大学 数理物質融合科学センター 光量子計測器開発推進室
共催	TIA 光・量子計測 (TIA-ACCELERATE)
参加者	22 人

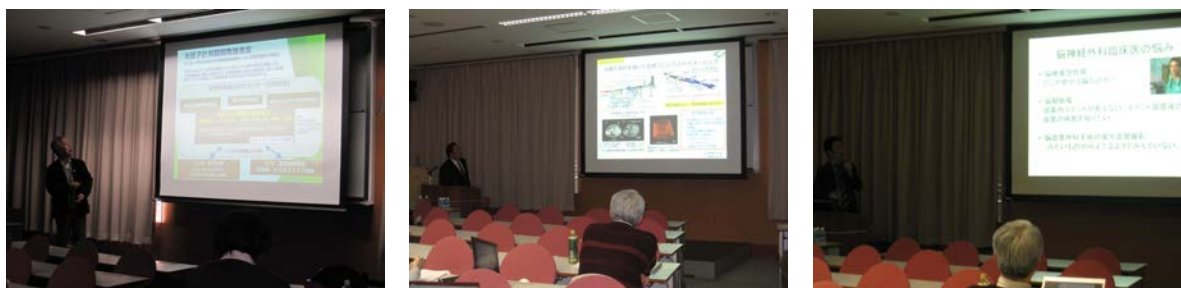


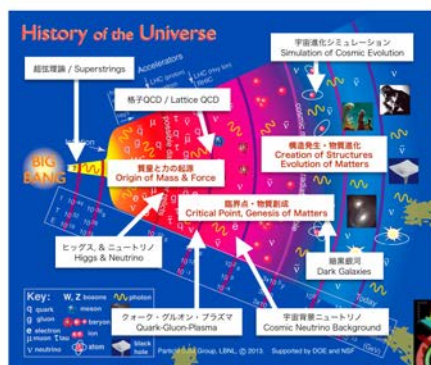
図 9 光量子計測器ワークショップ (2016 年 3 月 2 日)

講演者	所属	タイトル
金 信弘	筑波大学・物理	開会の挨拶
武内勇司	筑波大学・物理	超伝導検出器と SOI 極低温アンプ
富田成夫	筑波大学・物理工学	超伝導検出器の生体分子研究利用
近藤剛弘	筑波大学・物質工学	分光分析による表面物理化学
新井康夫	KEK	SOI ピクセル検出器とその応用
西堀栄治	筑波大学・物理	放射光 X 線回折
兵藤 一行	KEK	放射光単色 X 線、cERL 等での X 線 イメージングの開発とその応用
安岡 聖	筑波大学・陽子線医学利用研究センター	BNCT 治療と計測器
鶴田 和太郎	筑波大学・附属病院	脳神経外科診療と計測・イメージング
江角晋一	筑波大学・物理	シリコン電磁カロリメータ
高崎 史彦	KEK	宇宙線を用いた大型構造イメージング

光量子計測器に関する情報の共有、融合共同研究、新型計測技術の創出、産業・社会への応用を推進し、理工連携・つくば連携のもとに光量子計測器開発研究の情報交換と議論を行うことを目的として、数理物質融合科学センター光量子計測器開発推進室と TIA 光・量子計測の共催でワークショップを開催した。

3 宇宙史国際研究拠点 活動報告

宇宙史国際研究拠点 Research Core for the History of the Universe

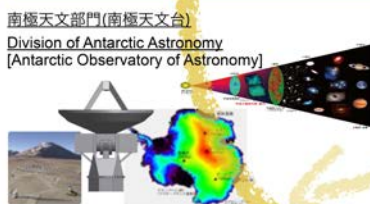


素粒子・原子核・宇宙物理学の融合と、実験的・理論的アプローチの協調により、宇宙史を統一的に理解

拠点長(コーディネータ)：金信弘教授

Construct an integrated view of the History of the Universe by coordinating studies in elementary particles, quark nuclear matters, and astrophysics.

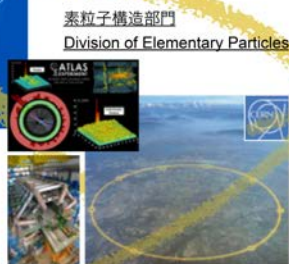
Coordinator: Prof. Shinhong Kim



南極天文部門(南極天文台)
Division of Antarctic Astronomy
[Antarctic Observatory of Astronomy]

部門長(PI)：中井直正教授
Principal Investigator: Prof. Naomasa Nakai

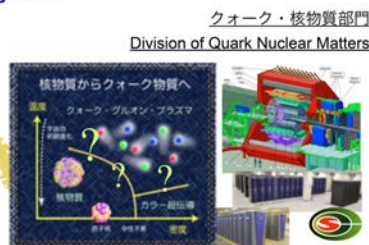
南極天文コンソーシアム / Consortium of Antarctic Astronomy



素粒子構造部門
Division of Elementary Particles

部門長(PI)：受川史彦教授
Principal Investigator: Prof. Fumihiko Ukegawa

宇宙史コンソーシアム / Consortium of the History of the Universe



クォーク・核物質部門
Division of Quark Nuclear Matters

部門長(PI)：江角晋一准教授
Principal Investigator: Asso.Prof. Shinichi Esumi

人類の知識が及んでいない「暗黒」の解明

=> 暗黒物質、暗黒エネルギー、暗黒銀河、...

=> 物質創成・構造発生とそれらの進化

Illuminate the "Darkness":

=> Dark Matter, Dark Energy, Dark Galaxies, ...

=> Genesis of matters, creation of structures and their evolution.

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27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の基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27年9月30日から、国際会議 Tsukuba Global Science Week 2015(TGSW2015)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、50名を超える研究者が参加

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28年1月18、19日に開催された第2回 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、各部門に別れた約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。

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。

また今年度は CiRfSE と計算科学研究センターが連携して、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）に応募し、機能強化経費（機能強化促進分）の配分を受けることが決定された。この事業は、CiRfSE と計算科学研究センターが連携して推進する。平成28年度から、この経費を用いて海外研究ユニット招致や研究員雇用、混合給与制などを活用した拠点構築など、宇宙史国際研究拠点の整備・拡充に向けた作業を開始する。

卓越研究員制度による宇宙史（実験・観測）分野のテニュアトラック助教1名の募集を平成28年3月に開始した。この新しい助教は平成28年度から、宇宙史国際研究拠点の構成教員として研究プロジェクトを牽引していき、拠点の整備・拡充に寄与することが期待される。

本拠点における平成27年度の特筆すべき成果を以下にあげる。

(1) 素粒子構造部門の研究

平成27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関西学院大グループがあらたに参加し、11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の極低温 ($T=3K$) における性能試験を行った結果、極低温での増幅器として高周波領域で動作すること、および増幅器への入力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 実験グループはヒッグス粒子の様々な粒子への崩壊断面積の測定を行った。ヒッグスが W/Z 粒子に質量を与えることはヒッグスの定義であるが、湯川結合によりフェルミ粒子にも質量を与えるか否かは標準模型の検証において最も重要なステップである。レプトンに関する測定として、新しい解析で統計的に 4.5σ の有意度で、ヒッグス粒子が τ レプトン対に崩壊するモード $H \rightarrow \tau^+\tau^-$ の観測に成功した。2015 年度に CMS 実験結果との統合により $H \rightarrow \tau\tau$ 崩壊の信号の有意度は 5σ に達した。 τ レプトン対への崩壊が確認されたことで同じヒッグス粒子が湯川結合によりレプトンにも質量を与えることはここまで確認できた。

(2) 南極天文部門の研究

南極 10m テラヘルツ望遠鏡の設置場所を当初予定していたドームふじからドーム C (フランス・イタリアのコンコルディア基地) に変更し、2016 年 1 月～2 月に中井部門長が視察を行い、適切な場所であることを確認した。南極望遠鏡用電波カメラ系試作機として 400GHz, 850GHz, 1.3THz の 3 バンドを同時観測できる視野 1° 、2 万画素の超広視野電波カメラ (MKID) の開発を行った。国立天文台の野辺

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

近傍の棒渦巻銀河 NGC6946 の中心部と棒状構造の分子ガスを、野辺山宇宙電波観測所 4.5 m 電波望遠鏡 (NRO45 m 鏡) および米国の電波干渉計 CARMA を用いて観測した結果、中心部における分子ガスは棒状構造部分よりも高密度かつ高温であることが明らかとなった。

(3) クォーク・核物質部門の研究

LHC 加速器を用いた ALICE 実験、RHIC 加速器を用いた PHENIX 実験、STAR 実験等を推進し、粒子相関や集団運動、ジェット等の指針を用いたクォーク・グルーオン・プラズマ (QGP) の研究を進めた。日米科学技術協力事業によりこれまで推進してきた PHENIX 実験が 2016 年の実験でデータ収集実験を完了する。STAR 実験による衝突ビームエネルギー走査実験に、今後さらに本格的に加わり、臨界点探索を含む QCD 相図の解明に向けた研究を展開する。ALICE 実験の将来計画として、超前方の光子測定のためのシリコン電磁カロリメーターの開発研究を進めた。また、J-PARC 加速器のエネルギー領域における重イオン衝突実験での使用を目指した高精度の時間分解能をもつ多段型 MRPC 検出器の開発を推進した。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であるが、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 に基づく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、QCD の第一原理からの相構造の解明やクォーク物質の熱力学的性質の計算にむけて、配位生成と計算手法開発を進めた。理化学研究所の RI ビームファクトリー (RIBF) の大型基盤実験装置の一つとして、稀少 RI リング (Rare-RI Ring) の開発研究を行ってきた。稀少 RI リングは、RIBF 棟の K4 室に設置され、平成 24 年 4 月より製作が始まっている。中性子過剰の不安定核の質量測定などに向け、実験準備と測定器開発を進めている。

3.1 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)

4月1日付けで新田冬夢が助教(テニュアトラック)に採用された。南極天文学の推進において、南極望遠鏡の技術開発を継続するとともに、10m テラヘルツ望遠鏡の新しい建設候補地ドームCにある仏伊のコンコルディア基地の現地調査等を行った。またフランス、イタリアと当該望遠鏡の輸送、建設、運用について協議し、大枠において合意した。さらに次期計画である30m級テラヘルツ望遠鏡計画の検討を継続した。国土地理院つくば32m鏡はVLBIおよび単一鏡観測を継続した。南極天文学の推進においては、南極望遠鏡の技術開発を継続するとともに、10m テラヘルツ望遠鏡の新しい設置場所であるドームCの現地調査等を行った。また30m級テラヘルツ望遠鏡計画の検討を継続した。国立天文台野辺山45m電波望遠鏡やアルマ等の既存の共同利用望遠鏡にも観測提案を行い、系外銀河や銀河系星形成領域等の観測を行った。

(1) 南極天文学の推進

10m テラヘルツ望遠鏡のアンテナ開発

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

主鏡面形状を含めた望遠鏡光学系全体の鏡面形状測定について、複数の手法を検討している。Phase Retrieval Holographyについては計算機シミュレーション、焦点面位相差法については小型電波干渉計の製作を行った。また、点解説干渉計の電波望遠鏡への応用をフォトニクスと絡めて提案した。

10m テラヘルツ望遠鏡の建設予定地の現地調査

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

コンコルディア基地の現地調査も行った。1月10日つくば発、2月13日つくば着の行程で、商用飛行機でニュージーランドのクライストチャーチまで行き、そこからイタリアの観測船「イタリア」に乗船して南極大陸沿岸部のイタリアのマリオ・ツチェリ基地に到着した。沿岸部近くは氷が厚くて船は砕氷して進まざるをえず基地への到着が遅れるので手配されたヘリコプターにより基地に到着した。1

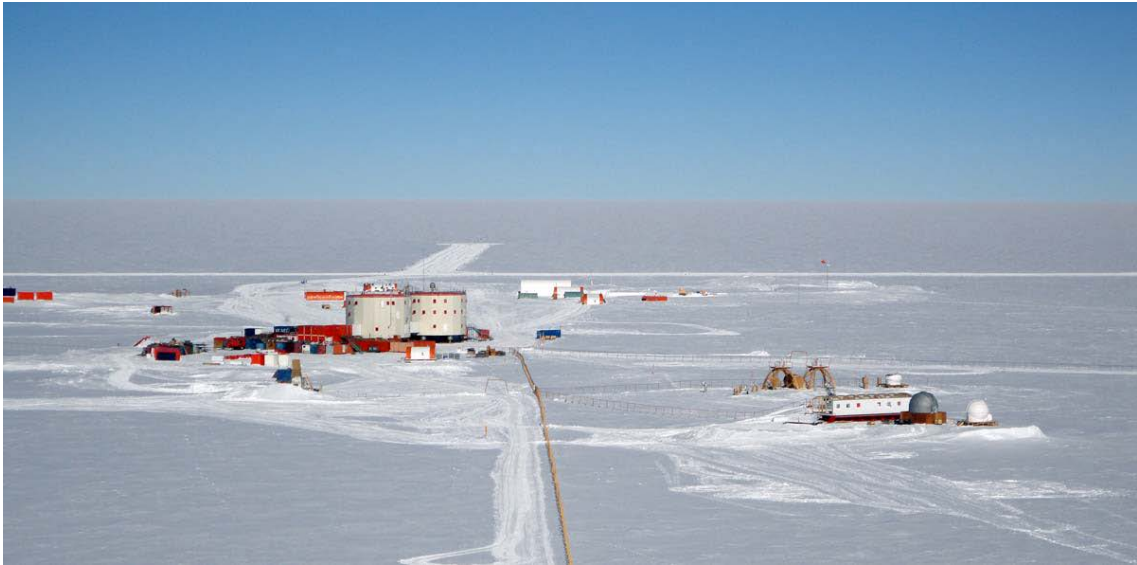


図 10 コンコルディア基地の全景。右下のところが 10m 望遠鏡の建設予定地。



図 11 コンコルディア基地本館



図 12 望遠鏡の輸送、組立、運用の打合せ

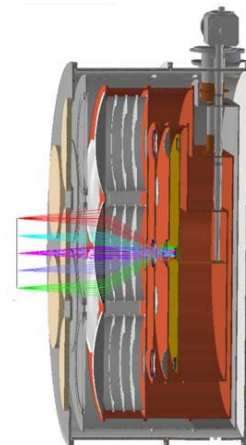


図 13 南極 10m 望遠鏡用クライオスタット

泊ののち小型機（ツイン・オッター、バスラターボ=ダグラス DC3）で内陸のコンコルディア基地に到着。そこに 2 週間滞在して種々の調査を行うとともに現地のエンジニアと協議し 10m 望遠鏡の輸送、現地組み立て、運営についての大枠を取り決め、英文にしてフランス・イタリアの関係者に送付された。帰路は小型機（バスラターボ）でコンコルディア基地から沿岸部の豪州のケーシー基地に移動し、3 泊ののち豪空軍の大型輸送機（C17）でタスマニア島のホバートに着いた。その後は商用飛行機で日本に帰国した。

コンコルディア基地は設備が良く整っており、運営も優れている。特に、130 トンクレーンや高さ 15m までの高所作業車を所有しているので、10m 望遠鏡の建設は可能と判断される。また夏季は常にブルドーザーで除雪しているため雪の吹き溜まりを防ぐための高床式のアンテナ基礎は不要であることがわかり、これは将来の 30m 級テラヘルツ望遠鏡を含めてアンテナ設置には非常に大きな要素である。基

地の収容人員数は夏期が 60 名、冬期が 16 名である。アンテナの建設時（夏期）は収容人員数を上回る
ので独立して宿泊所等を用意する必要がある。（図 10-12）

超伝導電波カメラの開発

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

本ミリ波カメラの冷却光学系をもとにして、南極 10m 望遠鏡のクライオスタット設計も進めた。（図
13）

30m 級テラヘルツ望遠鏡

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

(2) 国土地理院つくば 32m 鏡の電波望遠鏡の開発整備と観測

観測システムの開発整備

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

観測

(VLBI 観測)

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

(単一鏡観測)

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

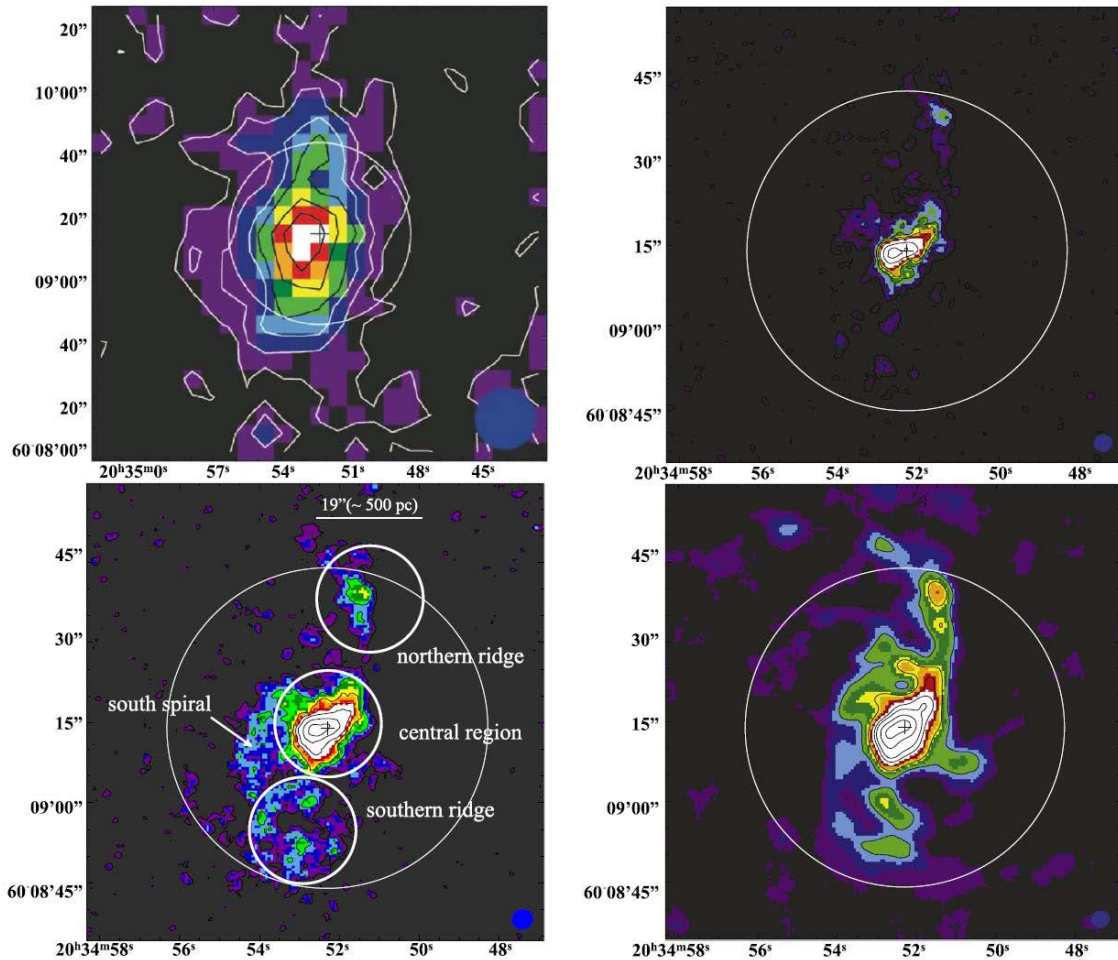


図 14 左上) NRO 4.5 m 鏡による 13CO(1-0) の積分強度図。右上) CARMA による 13CO(1-0) の積分強度図。左下) NRO 4.5 m 鏡と CARMA のデータを結合した 13CO(1-0) の積分強度図。右下) NRO 4.5 m 鏡と CARMA のデータを結合した 12CO(1-0) の積分強度図。

めには温度の精密な測定が必要であり、アンモニア観測による励起温度の測定は最も適している。

- 銀河系における典型的な大質量星形成領域のひとつである W3 領域の分子雲の 3 点においてアンモニア観測を行い、温度、密度等の分子ガスの物理量を求めた。
- 活動的銀河中心核において強い連続波電波を背景としてアンモニア吸収線の探査を行った。

(3) 銀河等の観測的研究

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

近傍の棒渦巻銀河 NGC6946 の中心部と棒状構造の分子ガスを、野辺山宇宙電波観測所 4.5 m 電波望遠鏡 (NRO4.5 m 鏡) および米国の電波干渉計 CARMA を用いて観測した結果、中心部における分子ガスは棒状構造部分よりも高密度かつ高温であることが明らかとなった。(図 14)

オリオン A 分子雲の CO ($J = 4-3$) 広域観測

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

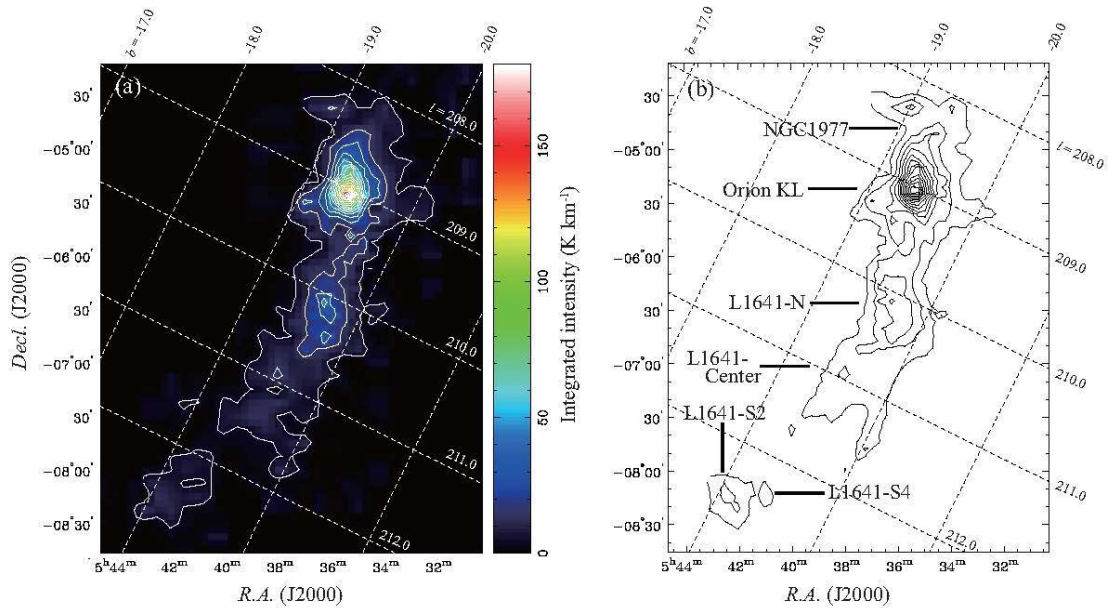


図 15 オリオン A 分子雲の CO ($J = 4-3$) の積分強度の分布

れて温度が高くなっていると考えられる。(図 15)

〈論文〉

[査読論文]

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

- with Single Superconducting Film for Millimeter Wave Camera” , *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, Volume 37, pp 128-136 (2016).
5. Izumi, Takuma; Kohno, Kotaro; Aalto, Susanne; Doi, Akihiro; Espada, Daniel; Fathi, Kambiz; Harada, Nanase; Hatsukade, Bunyo; Hattori, Takashi; Hsieh, Pei-Ying; Ikarashi, Soh; Imanishi, Masatoshi; Iono, Daisuke; Ishizuki, Sumio; Krips, Melanie; Martín, Sergio; Matsushita, Satoki; Meier, David S.; Nagai, Hiroshi; Nakai, Naomasa; Nakajima, Taku; Nakanishi, Kouichiro; Nomura, Hideko; Regan, Michael W.; Schinnerer, Eva; Sheth, Kartik; Takano, Shuro; Tamura, Yoichi; Terashima, Yuichi; Tosaki, Tomoka; Turner, Jean L.; Umehata, Hideki; Wiklind, Tommy, “ALMA Observations of the Submillimeter Dense Molecular Gas Tracers in the Luminous Type-1 Active Nucleus of NGC 7469” , *The Astrophysical Journal*, Volume 811, id. 39, 15 pp. (2015).
 6. Fathi, Kambiz; Izumi, Takuma; Romeo, Alessandro B.; Martín, Sergio; Imanishi, Masatoshi; Hatziminaoglou, Evanthia; Aalto, Susanne; Espada, Daniel; Kohno, Kotaro; Krips, Melanie; Matsushita, Satoki; Meier, David S.; Nakai, Naomasa; Terashima, Yuichi, “Local Instability Signatures in ALMA Observations of Dense Gas in NGC 7469” , *The Astrophysical Journal Letters*, Volume 806, id. L34, 6 pp. (2015).
 7. Tsuzuki, Toshihiro; Nitta, Tom; Imada, Hiroaki; Seta, Masumichi; Nakai, Naomasa; Sekiguchi, Shigeyuki; Sekimoto, Yutaro, “Design of wide-field Nasmyth optical system for a submillimeter camera” , *Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems*, Volume 1, id. 025002 (2015).
 8. Morokuma-Matsui, Kana; Baba, Junichi; Sorai, Kazuo; Kuno, Nario, “CO emissions from optically selected galaxies at $z \sim 0.1-0.2$: Tight anti-correlation between molecular gas fraction and 4000 Åbreak strength” , *Publications of the Astronomical Society of Japan*, Volume 67, Issue 3, id.36, 13 pp. (2015).
 9. Pan, Hsi-An; Kuno, Nario; Koda, Jin; Hirota, Akihiko; Sorai, Kazuo; Kaneko, Hiroyuki, “Molecular Gas and Star-formation Properties in the Central and Bar Regions of NGC 6946” , *The Astrophysical Journal*, Volume 815, id. 59, 14 pp. (2015).
 10. Pan, Hsi-An; Kuno, Nario; Sorai, Kazuo; Umei, Michiko, “Constraints on the minor merging and star formation history of the Wolf-Rayet galaxy NGC 5430 through observations” , *Publications of the Astronomical Society of Japan*, Volume 67, id.116, 17 pp. (2015).
 11. Nakamura, Fumitaka; Ogawa, Hideo; Yonekura, Yoshinori; Kimura, Kimihiko; Okada, Nozomi; Kozu, Minato; Hasegawa, Yutaka; Tokuda, Kazuki; Ochiai, Tetsu; Mizuno, Izumi; Dobashi, Kazuhito; Shimoikura, Tomomi; Kameno, Seiji; Taniguchi, Kotomi; Shinnaga, Hiroko; Takano, Shuro; Kawabe, Ryohei; Nakajima, Taku; Iono, Daisuke; Kuno, Nario; Onishi, Toshikazu; Momose, Munetake; Yamamoto, Satoshi, “Z45: A new 45-GHz band dual-polarization HEMT receiver for the NRO 45-m radio telescope” , *Publications of the Astronomical Society of Japan*, Volume 67, id.117, 19 pp. (2015).
 12. Imada, Hiroaki; Matsuo, Taro; Yamamoto, Kodai; Kino, Masaru, “Real-time point- diffraction interferometer and its analytical formulation” , *Applied Optics*, Volume 54, no. 26, pp. 7870-7878 (2015).
 13. Yamamoto, Kodai; Matsuo, Taro; Imada, Hiroaki; Kino, Masaru, “Measurement of complex

amplitude with a point-diffraction interferometer” , Applied Optics, volume 54, no. 26, pp. 7895 – 7903 (2015).

[国際研究集会集録等]

1. Miyamoto, Y.; Nakai, N.; Kuno, N.; Seta, M.; Salak, D.; Kaneko, H.; Nagai, M.; Ishii, S., “The Velocity Vectors of Gas in Spiral Galaxies and Influence of the Dynamics on Giant Molecular Associations”, Revolution in Astronomy with ALMA: The Third Year. Proceedings of a Conference held at the Tokyo International Forum, Tokyo, Japan 8-11 December 2014. Edited by Daisuke Iono, Ken-ichi Tatematsu, Alwyn Wootten, and Leonardo Testi. ASP Conference Series Vol. 499. San Francisco: Astronomical Society of the Pacific, p.159 (2015).
2. Salak, D.; Nakai, N.; Miyamoto, Y., “Feeding and Feedback in the Starburst Galaxy NGC 1808 Revealed with ALMA and ASTE” , Revolution in Astronomy with ALMA: The Third Year. Proceedings of a Conference held at the Tokyo International Forum, Tokyo, Japan 8-11 December 2014. Edited by Daisuke Iono, Ken-ichi Tatematsu, Alwyn Wootten, and Leonardo Testi. ASP Conference Series Vol. 499. San Francisco: Astronomical Society of the Pacific, p.155 (2015).
3. Nakanishi, K.; Sorai, K.; Nakai, N.; Kuno, N.; Matsubayashi, K.; Sugai, H.; Takano, S.; Kohno, K.; Nakajima, T., “Ionized Gas Observation Toward a Nearby Starburst Galaxy NGC 253” , Revolution in Astronomy with ALMA: The Third Year. Proceedings of a Conference held at the Tokyo International Forum, Tokyo, Japan 8-11 December 2014. Edited by Daisuke Iono, Ken-ichi Tatematsu, Alwyn Wootten, and Leonardo Testi. ASP Conference Series Vol. 499. San Francisco: Astronomical Society of the Pacific, p.117 (2015)
4. Miyamoto, Yusuke; Nakai, Naomasa; Seta, Masumichi; Salak, Dragan; Nagai, Makoto; Ishii, Shun; Yamauchi, Aya, “Hot gas in the center of the Seyfert galaxy NGC 3079” , IAU General Assembly, Meeting #29, id.2251511 (2015).
5. Nishimura, Atsushi; Umemoto, Tomofumi; Minamidani, Tetsuhiro; Kuno, Nario; Tosaki, Tomoka; Fujita, Shinji; Matsuo, Mitsuhiro; Tsuda, Yuya; Ohashi, Satoshi,” Nobeyama 45m CO Galactic Plane Survey: Filament properties and star formation in M17” , IAU General Assembly, Meeting #29, id.2247474 (2015)
6. Kaneko, H.; Kuno, N.; Saito, T. R., “The Detection of Giant Molecular Associations at a Colliding Region by an Interaction of Galaxies” , Revolution in Astronomy with ALMA: The Third Year. Proceedings of a Conference held at the Tokyo International Forum, Tokyo, Japan 8-11 December 2014. Edited by Daisuke Iono, Ken-ichi Tatematsu, Alwyn Wootten, and Leonardo Testi. ASP Conference Series Vol. 499. San Francisco: Astronomical Society of the Pacific, p.147. (2015)
7. Morokuma-Matsui, K.; Baba, J.; Sorai, K.; Kuno, N.,” CO Emissions from Optically Selected Galaxies at $z \sim 0.1-0.2$: Tight Anti-Correlation Between Molecular Gas Fraction and 4000 Angstrom Break Strength” , Revolution in Astronomy with ALMA: The Third Year. Proceedings of a Conference held at the Tokyo International Forum, Tokyo, Japan 8-11 December 2014. Edited by Daisuke Iono, Ken-ichi Tatematsu, Alwyn Wootten, and Leonardo Testi. ASP Conference Series Vol. 499. San Francisco: Astronomical Society of the Pacific, p.157. (2015)

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

〈研究成果発表〉

[国内学会・研究会]

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

9. 奥村大志、今田大皓、永井誠、新田冬夢、中井直正、久野成夫「電波点回折干渉計 (I)」日本天文学会 2016 年春季年会、2016 年 3 月 16 日、首都大学東京
10. 山本広大、松尾太郎、森本悠介、木野勝、今田大皓、入部正継、中村祐一「京大岡山 3.8m 望遠鏡:高コントラスト惑星撮像装置 SEICA の撮像性能」日本天文学会 2016 年春季年会、2016 年 3 月 15 日、首都大学東京
11. 米倉覚則、齋藤悠、沖本有、加古琳一、永瀬桂、安井靖堯、足立弘、大橋拓人、佐藤宏樹、柴田裕輝、宮本祐輔、杉山孝一郎、澤田-佐藤聡子、百瀬宗武、吉田龍生、小川英夫、藤沢健太、高羽浩、徂徠和夫、中井直正、面高俊宏、本間希樹、小林秀行、他大学間連携 VLBI group、「高萩/ 日立 32 m 電波望遠鏡の整備状況 (13)」日本天文学会 2016 年春季年会、2016 年 3 月 16 日、首都大学東京
12. 永井誠、伊佐見薫、奥村大志、中井直正、平田承夫、「AXIe 12 ビット高速デジタイザによるデジタル分光計の性能評価」日本天文学会 2016 年春季年会、2016 年 3 月 16 日、首都大学東京
13. 増田聖、成瀬雅人、田井野徹、明連広昭、関本裕太郎、新田冬夢「ミリ波広帯域マイクロストリップ交差構造の開発」日本天文学会 2016 年春季年会、2016 年 3 月 16 日、首都大学東京
14. 伊藤和雅、成瀬雅人、田井野徹、明連広昭、関本裕太郎、新田冬夢「ミリ波帯用コプレナー導波路へのエアブリッジ構造の開発」日本天文学会 2016 年春季年会、2016 年 3 月 16 日、首都大学東京
15. 関本裕太郎、野口卓、Wenlei Shan, Dominjon Agnes, 関根正和、関口繁之, Shibo Shu, 成瀬雅人, 新田冬夢, 川崎繁男, 三田信, 宮地晃平, 他 LiteBIRD WG「LiteBIRD MKID 焦点面検出器の設計」日本天文学会 2016 年春季年会、2016 年 3 月 16 日、首都大学東京
16. 徂徠和夫、久野成夫、村岡和幸、中井直正、宮本祐介、金子紘之、諸隈佳菜、松本尚子、武田美保、柳谷和希、畠山拓也、岸田望美、Dragan SALAK, 他 COMING メンバー、「NRO レガシープロジェクト COMING (1): プロジェクトの概要」日本天文学会 2015 年秋季年会、2015 年 9 月 9 日、甲南大学
17. 柳谷和希、武田美保、村岡和幸、岸田望美、徂徠和夫、畠山拓也、久野成夫、中井直正、宮本祐介、金子紘之、諸隈佳菜、松本尚子、Dragan SALAK), 他 COMING メンバー、「NRO レガシープロジェクト COMING (2): 棒渦巻銀河 NGC2903 の CO(J=1-0) 多輝線撮像観測」日本天文学会 2015 年秋季年会、2015 年 9 月 9 日、甲南大学
18. 武田美保、柳谷和希、村岡和幸、岸田望美、徂徠和夫、畠山拓也、久野成夫、中井直正、宮本祐介、金子紘之、諸隈佳菜、松本尚子、Dragan SALAK, 他 COMING メンバー「NRO レガシープロジェクト COMING (3): 棒渦巻銀河 NGC 2903 における分子ガスの物理状態診断」日本天文学会 2015 年秋季年会、2015 年 9 月 9 日、甲南大学
19. 畠山拓也、久野成夫、中井直正、岸田望美、徂徠和夫、武田美保、柳谷和希、村岡和幸、金子紘之、宮本祐介、諸隈佳菜、松本尚子、Dragan SALAK, 他 COMING メンバー「NRO レガシープロジェクト COMING (4): 近傍矮小銀河 NGC2976 の分子ガス観測」日本天文学会 2015 年秋季年会、2015 年 9 月 9 日、甲南大学
20. 宮本祐介、徂徠和夫、幸田仁、Dragan SALAK、中井直正、久野成夫、村岡和幸、金子紘之、諸隈佳菜、松本尚子、岸田望美、畠山拓也、武田美保、柳谷和希、他 COMING メンバー「NRO レガシープロジェクト COMING(5): 近傍銀河 NGC 3079 の CO 観測」日本天文学会 2015 年秋季年会、2015 年 9 月 9 日、甲南大学
21. 米倉覚則、齋藤悠、沖本有、加古琳一、永瀬桂、安井靖堯、足立弘、大橋拓人、佐藤宏樹、柴田裕輝、宮本祐輔、杉山孝一郎、澤田-佐藤聡子、百瀬宗武、吉田龍生、近藤哲朗、関戸衛、小川英夫、藤沢健太、高羽浩、徂徠和夫、中井直正、面高俊宏、本間希樹、小林秀行、他大学間連携 VLBI group、「高萩/ 日立 32 m 電波

- 望遠鏡の整備状況 (12)」日本天文学会 2015 年秋季年会、2015 年 9 月 9 日、甲南大学
22. 藤沢健太, ほか大学 VLBI 連携グループ「大学 VLBI 連携の将来計画」日本天文学会 2015 年秋季年会、2015 年 9 月 9 日、甲南大学
 23. 栗木美香, 瀬田益道, 永井誠, 今田大皓, 朝倉健, 中井直正, 久野成夫, 石井峻, 宮本祐介, 南谷哲宏, 荒井均, 長崎岳人, 南極天文コンソーシアム「南極 30 cm 可搬型サブミリ波望遠鏡の指向性能の改善」日本天文学会 2015 年秋季年会、2015 年 9 月 10 日、甲南大学
 24. 永井誠, 今田大皓「一般のアンテナにおける実効開口面積と開口能率について」日本天文学会 2015 年秋季年会、2015 年 9 月 10 日、甲南大学
 25. 今田大皓, 永井誠「収差と開口能率の関係」日本天文学会 2015 年秋季年会、2015 年 9 月 10 日、甲南大学
 26. 今田大皓, 永井誠「幾何光学の応用による広視野電波望遠鏡の効率的な光学設計」日本天文学会 2015 年秋季年会、2015 年 9 月 10 日、甲南大学
 27. 中島大貴, 西川由恭, 徂徠和夫, 日浦皓一朗, 新沼浩太郎, 藤沢健太, 米倉覚則, 中井直正, 永井誠, 村田泰宏, 河野裕介, 小山友明「ダブルピーク広輝線を持つ電波銀河 3C332 の JVN による高分解能観測」日本天文学会 2015 年秋季年会、2015 年 9 月 10 日、甲南大学
 28. 梅本智文, 南谷哲宏, 西村淳, 水野範和, 本間希樹, 井上剛志, 廣田明彦, 諸隈佳菜, Chibueze, J. , 久野成夫, 藤田真司, 半田利弘, 面高俊宏, 中西裕之, 新永浩子, 松尾光洋, 小澤武揚, 松本尚子, 大西利和, 徳田一起, 高橋諒, 濤崎智佳, 小林幸典, 小野寺幸子, 津田裕也, 立原研悟, 鳥居和史, 佐野栄俊, 服部有祐, 吉池智史, 河野樹人, 樋口あや, 大朝由美子, 亀谷和久, 大橋聡史, 桑原翔, 祖父江義明, 坪井昌人「NRO 銀河面サーベイプロジェクト: 2014 年度進捗」日本天文学会 2015 年秋季年会、2015 年 9 月 10 日、甲南大学
 29. 松尾光洋, 中西裕之, 梅本智文, 南谷哲宏, 西村淳, 濤崎智佳, 久野成夫, 藤田真司, 津田裕也, 銀河面サーベイチーム「NRO 銀河面サーベイプロジェクト: 銀河系外縁部 2」日本天文学会 2015 年秋季年会、2015 年 9 月 10 日、甲南大学
 30. 小栗秀悟, 美馬覚, 石塚光, 内田智久, 大谷知行, 関本裕太郎, 田島治, Thushara Damayanthi, Jihoon Choi, 富田望, 永井誠, 長崎岳人, 羽澄昌史, 服部誠, 蓑輪眞, 吉田光宏, Eunil Won「GroundBIRD 搭載用超伝導検出器 MKID アレイのデザイン設計」日本物理学会第 71 回年次大会、2016 年 3 月 19 日、東北学院大学
 31. 美馬覚, 小栗秀悟, 石塚光, 内田智久, 大谷知行, 関本裕太郎, 田島治, Thushara Damayanthi, Jihoon Choi, 富田望, 永井誠, 長崎岳人, 羽澄昌史, 服部誠, 蓑輪眞, 吉田光宏, Eunil Won「GroundBIRD 搭載用超伝導検出器 MKID アレイの製作と評価」日本物理学会第 71 回年次大会、2016 年 3 月 19 日、東北学院大学

3.2 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 講師）

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）

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。平成 27 年度には、伊敷

吾郎助教を新たに構成教員として迎え、一層の研究力の向上を図った。

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最初期の歴史を解き明かすことにつながる。

以下に、平成 27 年度に行われた研究活動をより詳しく述べる。

(1) LHC ATLAS 実験 (受川、原、佐藤構二、大川、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 3.4 fb^{-1} の陽子・陽子衝突データを取得した。Run-1 で 8 TeV であった重心系エネルギーが、Run-2 では 13 TeV に上昇したことにより、ヒッグス粒子の生成断面積が増大し、より精度の高い測定が期待できる。同時に、重い粒子を生成しやすくなるため、重い新粒子を伴う新しい物理に対しても、飛躍的に高い感度で探索解析が行える。

LHC は、当初の設計値を超えた高輝度実験を実現するため、2023 年ころに HL-LHC 加速器へと増強される予定である。放射線レベルも現在の検出器設計の 10 倍に達するため、それに伴う新しい内部飛跡検出器の開発研究を行っている。

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。

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 両実験により種々の終状態を用いて測定したヒッグス粒子の信

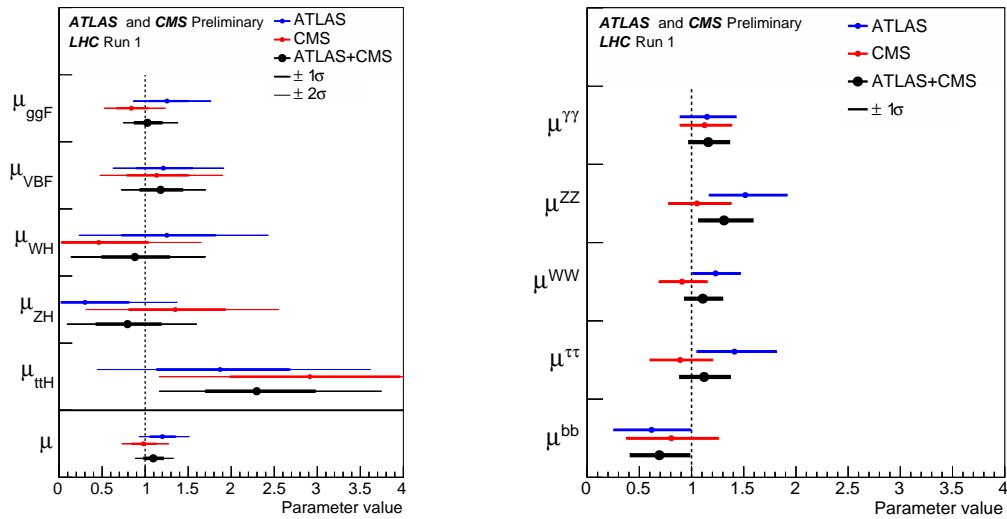


図 16 ATLAS および CMS 実験の測定結果を複合して得られたヒッグス粒子の信号の強さ μ (標準理論の予言値で規格化したもの)。(左) 様々な素過程の生成断面積、および (右) 様々な終状態への崩壊分岐比を示す。

号の強さ μ (生成断面積および崩壊分岐比を標準理論の予言値で割ったもの) の最新結果を図 16 に示す。両実験で個々の測定結果について矛盾は認められず、統合することで測定精度が向上した。

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

ヒッグス粒子が W/Z 粒子に質量を与えることはヒッグス機構の定義であり、 τ レプトン対への崩壊が確認されたことで同じヒッグス粒子が湯川結合によりレプトンにも質量を与えることはここまで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。

トップクォーク対を伴うヒッグス粒子生成過程の探索

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

トップクォークとヒッグス粒子の結合の強さを測るには、ヒッグス粒子がトップクォーク対を伴って生成する $t\bar{t}H$ 事象の生成断面積を測定する。2015 年度には、ATLAS 実験ではじめての $t\bar{t}H$ 過程の探索結果を発表した。この Run-1 データの解析結果を図 17 に示す。ヒッグス粒子が $t\bar{t}$ 対を伴って生成し、引き続きヒッグス粒子が $b\bar{b}$ または W や Z ボソンを介して複数のレプトンを含む終状態へ崩壊する事象を Run-1 データ中に探索した。それぞれのヒッグス粒子崩壊モードで生成断面積と崩壊分岐比の積に対して得られた 95% 信頼度での上限は、標準理論の予言値の 3.4 倍、4.7 倍である。

なお、図 16 に示した ATLAS 実験による $t\bar{t}H$ 過程の生成断面積測定は、これと同一の結果であり、CMS 実験と統合した探索での信号の有意度は、 4.4σ に達している。標準理論通りの場合に予想された 2.0σ よりも高い有意度が結論されたことは大変興味深い。今後、Run-2 で取得するデータを解析する

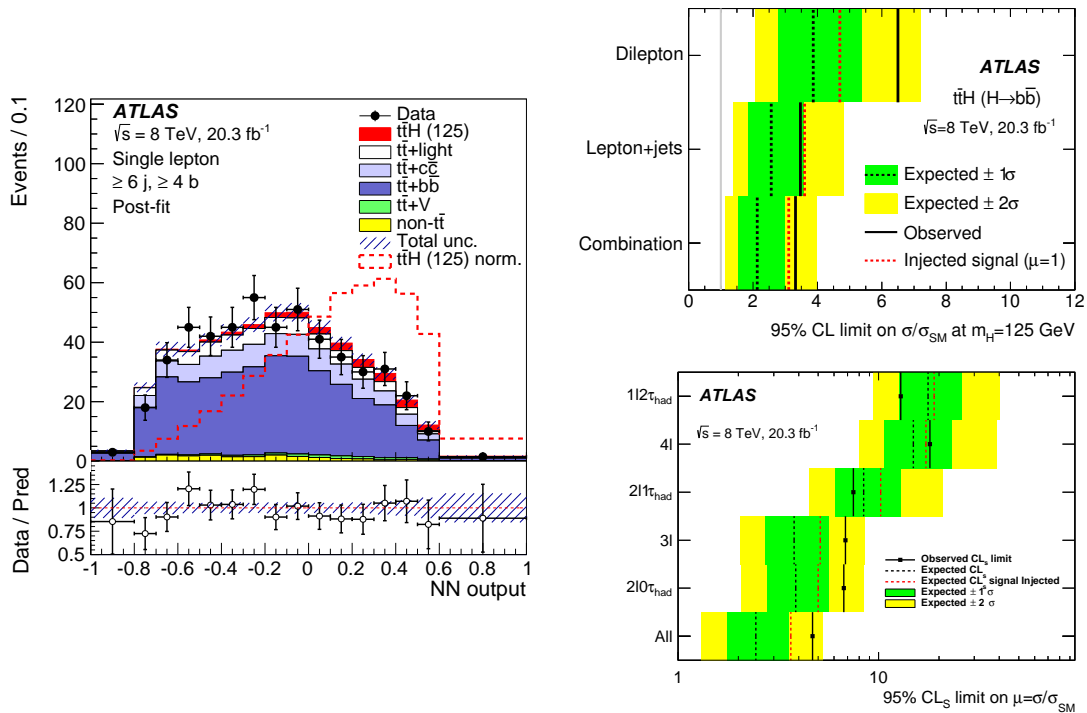


図 17 ATLAS 実験の Run-1 データ内で $t\bar{t}H$ 事象を探査した結果。(左) ヒッグス粒子が $b\bar{b}$ に崩壊し、1 個のレプトンが終状態に含まれるモードでの解析の、ニューラル・ネットワーク出力の分布。データ点はバックグラウンドの総和によく一致している。ヒッグス粒子質量を $125 \text{ GeV}/c^2$ と仮定した場合の $t\bar{t}H$ 信号の分布も同時に示してある。(右上) $t\bar{t}H$ 生成過程に引き続き、ヒッグス粒子が $H \rightarrow b\bar{b}$ 崩壊が起こる事象を探査することで得た、 $t\bar{t}H$ 事象の生成断面積に対する上限。断面積の標準理論の予言値との比で表している。レプトンを 1 または 2 個含む終状態を探査した結果 (それぞれ Lepton+jets、Dilepton)、両終状態を統合した結果を示す。(右下) $t\bar{t}H$ 生成過程に続いて、ヒッグス粒子が W や Z ボソンを介してレプトンに崩壊する事象を探査した結果得られた、 $t\bar{t}H$ 事象の生成断面積に対する上限。断面積の標準理論の予言値との比で表している。終状態のレプトンの種類、数ごとに $1l2\tau_{had}$ 、 $4l$ 、 $2l1\tau_{had}$ 、 $3l$ 、 $2l0\tau_{had}$ の 5 つの独立な解析チャンネルで解析した。

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。

13 TeV 衝突でのヒッグス粒子の生成断面積

2015 年度に取得した重心系エネルギー 13 TeV でのデータをもちいたヒッグス粒子の生成断面積の測定も行われた。いまのところ、 $H \rightarrow \gamma\gamma$ および $H \rightarrow ZZ^{(*)} \rightarrow 4l$ の 2 崩壊モードでの解析が完了している。測定されたヒッグス粒子の全生成断面積はそれぞれの解析で、 $40^{+31}_{-28} \text{ pb}$ 、 $12^{+25}_{-16} \text{ pb}$ 、統合すると $24^{+21}_{-18} \text{ pb}$ 、であった。これらの結果は誤差が大きいので、2016 年度に新規に取得するデータを合わせて更新して行く必要がある。標準理論の予言値 $50^{+4.5}_{-4.4} \text{ pb}$ とは、現在の誤差の範囲では一致している。これらの解析モードでの Run-1 および Run-2 での断面積測定の結果を、まとめたのが図 18 である。

トップクォークとボトムクォークに崩壊する荷電ヒッグス粒子の探索

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

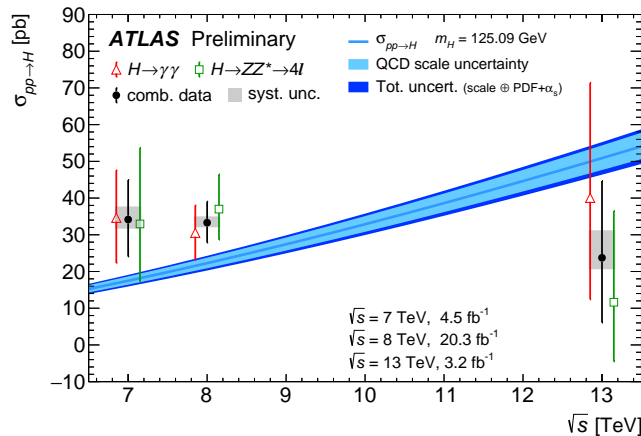


図 18 陽子・陽子衝突の重心系エネルギーの関数としてのヒッグス粒子の生成断面積。

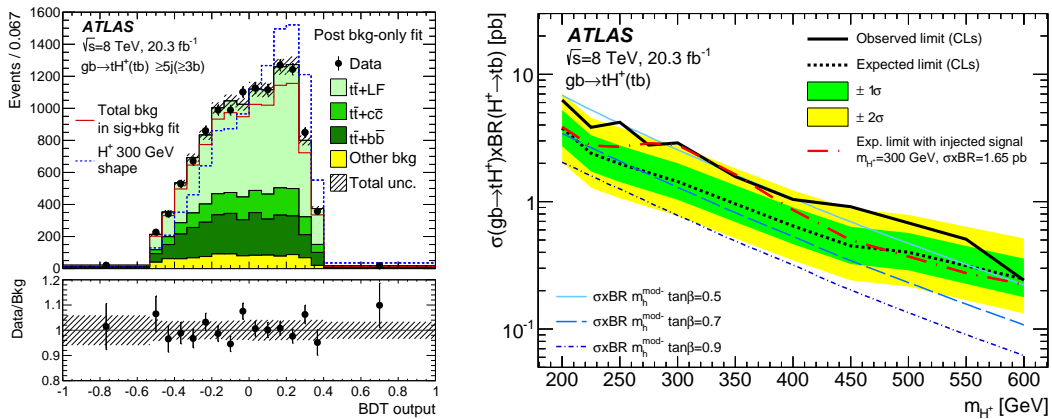


図 19 荷電ヒッグス粒子の探索結果。(左) 質量 $300 \text{ GeV}/c^2$ の荷電ヒッグス粒子信号のバックグラウンドからの分離を最適化した Boosted Decision Tree 出力の分布。荷電ヒッグス粒子の信号なしのバックグラウンド事象のみを仮定してデータをフィットした結果が色塗りのヒストグラムである。信号の存在も仮定したフィット結果でのバックグラウンドの寄与は、赤線で示している。(右) 荷電ヒッグス粒子の生成断面積とトップクォークとボトムクォークへの崩壊分岐比の積に対して、本研究が与えた上限値。荷電ヒッグス粒子の質量の関数としてプロットしている。

が大きくなると予想されている。

2015 年度は、トップクォークとボトムクォークに崩壊する荷電ヒッグス粒子を Run-1 データを使って探索した。図 19 に、 $300 \text{ GeV}/c^2$ の質量を持つ荷電ヒッグス粒子を探索したときの、Boosted Decision Tree 出力の分布と、得られた生成断面積に対する上限を示す。本解析では、広い荷電ヒッグス粒子の質量領域で 2σ を超えるバックグラウンドからの超過が見られ、有意度は $m_{H^+} = 250 \text{ GeV}/c^2$ での 2.4σ が最大であった。Run-2 データでも引き続き探索を続ける。

ヒッグス粒子の非可視崩壊の探索

ヒッグス粒子の非可視崩壊の探索は、暗黒物質とヒッグス粒子の全崩壊幅の観点から非常に重要な研究である。暗黒物質が、ヒッグス粒子のみと相互作用するという、ヒッグスポータルモデルは、数多くある暗黒物質モデルの中でも最有力で、繰り込み可能であり、又、現在の暗黒物質の直接探索実験の結果とも整合する。LHC ATLAS 実験では、vector-boson 随伴生成 (VH) や vector-boson fusion (VBF) 生成過程を用いた探索結果の combination を行い、非可視崩壊比に対して、既存の結果よりも強い、

$BR(H \rightarrow \text{invisible}) < 0.25$ (95% confidence level) をつけることができた (図 20)。これにより、ヒッグスポータルモデルにおいて、暗黒物質の質量がヒッグス粒子の質量の半分よりも低い領域において、暗黒物質と原子核の散乱断面積に対して非常に強い制限をつけることができた (図 21)。

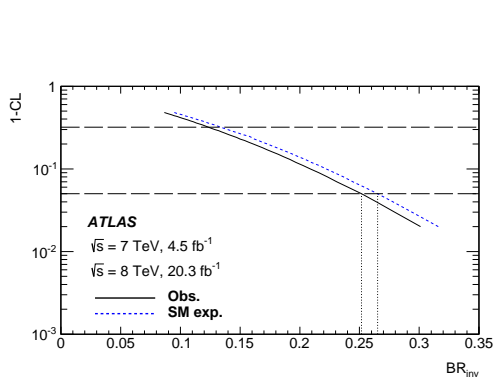


図 20 VH や VBF 生成過程による探索を用いた、ヒッグス粒子の非可視崩壊比への制限。

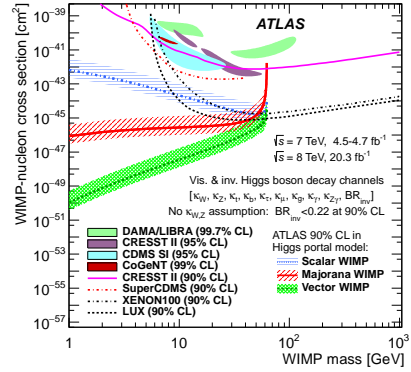


図 21 ヒッグスポータルモデルにおける、暗黒物質と原子核の散乱断面積への制限。青 (暗黒物質がスカラー粒子)、赤 (マヨラナ粒子)、緑 (ベクター粒子) の線が、本研究から得られた制限。LUX など他の実験からの結果も、比較のために載せている。

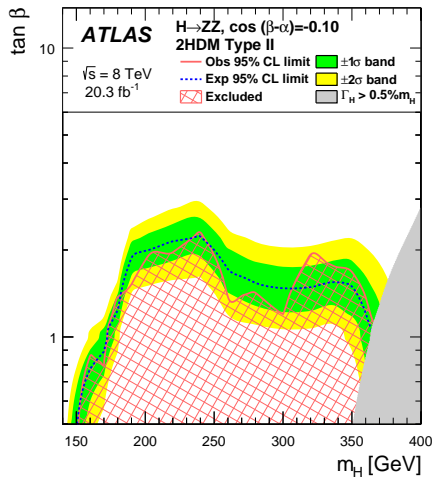


図 22 Type-II の 2HDM において、 $\cos(\beta-\alpha) = -0.1$ を仮定した際の、 $\tan \beta$ 及び重いヒッグス粒子の質量域への制限。

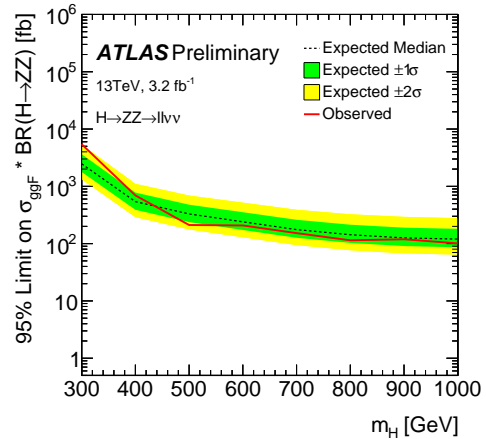


図 23 LHC Run 2 のデータを用いた、gluon-fusion 過程における ZZ モード崩壊に対する $\sigma \times BR$ への制限。

標準理論を超えた重いヒッグス粒子の探索

標準理論を超えた物理の多くのモデルにおいて、複数のヒッグス粒子が存在することが示唆されている。その中でも、 ZZ モードへの崩壊は、多くのモデルで予測されるため、探索チャンネルとして重要である。2012 年までの LHC Run 1 のデータを用いて、gluon-fusion 及び VBF 過程への断面積及び分岐比の積 ($\sigma \times BR$) への制限を付けた。図 23 に gluon-fusion での生成に対して得られた上限を示

す。又、Two Higgs Double Model (2HDM) による解釈を行い、 $\tan \beta < 2$ の場合には、質量 200-350 GeV の重いヒッグス粒子は棄却されることがわかった (図 22)。2015 年から再開した、LHC Run-2 のデータを用いて、同様の探索を gluon-fusion 過程に対して行った。標準理論からの有意な逸脱は見られなかったが、既に Run 1 に匹敵するシグナルへの感度を得ており、来年度以降の進展が待たれる。この探索結果を用いて、Bulk Randall-Sundrum Graviton の存在可能質量域への制限も付けた。このような重いヒッグス粒子は、すでに発見されている 2 つのヒッグス粒子への崩壊モード ($H \rightarrow hh$ 崩壊) も予想されている。とくに 250 – 350 GeV/ c^2 ほどの質量領域では、崩壊分岐比が大きくなることがさまざまなモデルで予想されている。ヒッグス粒子対がボトムクォーク対とタウ粒子対、W ボソン対と光子対、ボトムクォーク対と光子対、両方ともボトムクォーク対に崩壊する 4 つの解析モードで、重いヒッグス粒子を探索し、重いヒッグス粒子の生成断面積とヒッグス粒子対への崩壊分岐比の積に対して上限をつけた (図 24 (左))。得られた結果を超対称性理論の hMSSM および low-tb-high の両シナリオのもとに解釈し、それぞれのシナリオに対して制約を与えた。図 24 (右) に hMSSM シナリオのパラメタに対して得られた制約を示す。

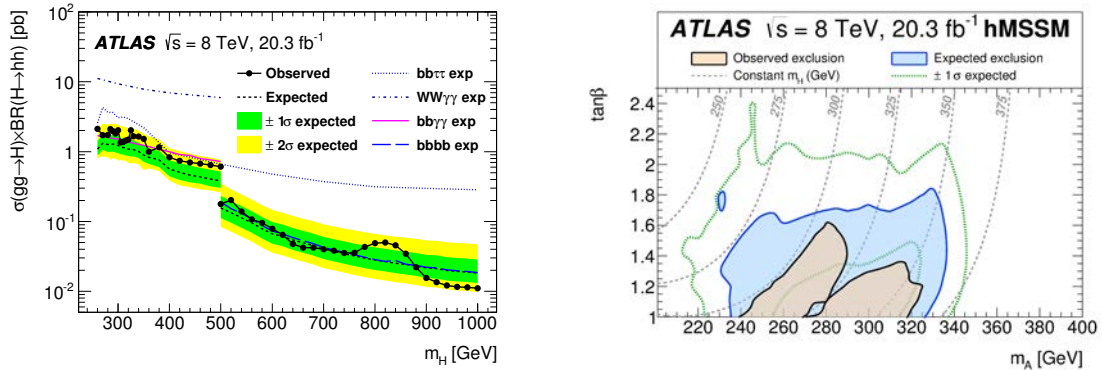


図 24 重いヒッグス粒子が、既知のヒッグス粒子の対に崩壊する $H \rightarrow hh$ 過程の探索結果。(右) $gg \rightarrow H$ 生成断面積と $H \rightarrow hh$ 崩壊分岐比の積に対してつけた上限。(左) hMSSM シナリオに対して設けた制約。

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

Boosted-boson tagging と呼ばれる手法 (高い運動量を持った W や Z ボソンのハドロン崩壊を、大きな radius parameter によるジェット (large-R jet) として再構成する方法) を用いた物理解析にも取り組んでいる。LHC Run 2 において、 $WV \rightarrow \ell\nu J$ (V : W, Z ボソン, J : large-R jet) 及び $VH \rightarrow \ell\ell/\ell\nu/\nu\nu bb$ チャンネルにおける、Boosted-boson tagging を用いた解析にも取り組み、TeV 領域における新粒子の探索を行った (図 25)。LHC Run 1 において不変質量 2 TeV 付近に観測された、ダイボソン共鳴事象における標準理論からの 3.4σ の逸脱は、現時点での Run 2 のデータを用いた解析では確認できず、 $\sigma \times \text{BR}$ への制限を与えた (図 26)。

HL-LHC に用いる p 型シリコン検出器の開発

LHC 加速器は、継続して最大限の物理成果を生み出すために、2023 年から当初設計値を超え、年間 200-250 fb^{-1} の衝突をめざす高輝度 LHC (HL-LHC) 加速器に増強される。放射線レベルも現在の検出器設計を超え、また、粒子数密度も増大する。我々は HL-LHC で使用できる放射線耐性に優れたシリコン半導体検出器による新しい内部飛跡検出器の開発研究を継続して行っている。

HL-LHC でも使用可能な高放射線耐性のセンサーとして n 型電極、p 型基板を用いたセンサー (n^+ -

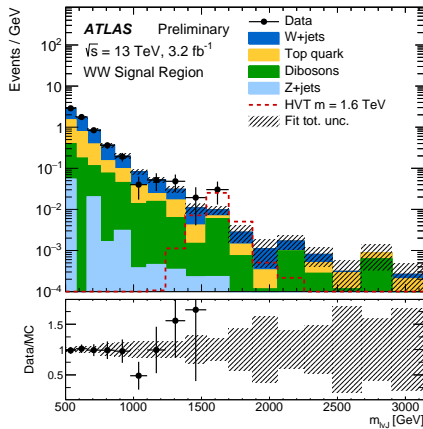


図 25 WW チャンネルのシグナル領域における、再構成したダイボソンの不変質量分布。

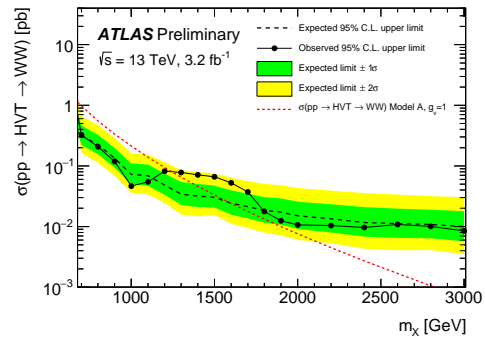


図 26 WW チャンネルを用いた新粒子の $\sigma \times BR$ への制限。赤は、HVT モデルから予測される生成断面積と分岐比の積。

on-p) を提案し、実際に陽子線や中性子を照射し、HL-LHC の高放射線線量でも使用可能な検出器の設計をしている。p 型基板を用いることで高速な電子を収集することで電荷収集が放射線により影響を受けにくい事、また、従来から放射線耐性に優れる n^+ -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、従来よりも広い領域を半導体検出器で覆う HL-LHC 用には特に有利であることを示してきた。

ATLAS の設計では、衝突点に近い最内層には電極サイズが $50 \mu\text{m} \times 250 \mu\text{m}$ のピクセル型、外層は $74 \mu\text{m} \times (2.4 \text{ または } 4.8) \text{ cm}$ のストリップ型のシリコン半導体検出器を配置し、それぞれ最大 2×10^{16} と 1×10^{15} 1-MeV $n_{\text{eq}}/\text{cm}^2$ の放射線を受けても使用可能であることを目標としている。

図 27 (左) はバイアス電圧 500 V を印加した状態での $320 \mu\text{m}$ 厚のセンサーから収集できる電荷量の放射線量依存性を測定したもので、我々の測定 (東北大学 CYRIC の 70 MeV 陽子ビームを照射) に加え、各国の ATLAS グループによる測定も比較して示している。陽子よりも中性子による損傷が $10^{15} \text{ n}/\text{cm}^2$ の近傍では大きなことが分かるが、検出器のノイズと比較して十分な量の電荷が収集できることが実証された。これはシリコンセンサー設計の最終結果として、国際学会で発表した。バルク基板の損傷に対して表面の損傷は様々な影響を与える。その損傷の詳細についても他のグループと共同で評価し、筑波大の測定結果は主要な項目について最終設計に用いることのできる重要なデータとして国際学会で発表した。

最も衝突点に近い位置に設置するピクセル型検出器の設計も平行して行っている。ピクセル検出器は読み出し回路である FE-I4 の仕様からピクセルサイズ $50 \times 250 \mu\text{m}$ が基本設計値である。図 27 (右) に示す様に、2 cm 角の FE-I4 読み出しチップ 4 枚に対し 4 cm 角のピクセル型センサーを金属バンパで接合した試験モジュールを試作した。これらは機械強度等の温度試験の後に、CYRIC で照射試験をし、ドイツ DESY 研究所の電子ビームや CERN の陽子ビームで検出器性能を評価した。

さらにピクセルサイズの小さなセンサーを設計することを見越して、同じ FE-I4 で対応できる $25 \times 500 \mu\text{m}$ のピクセルセンサーも試作した。金属バンパを用いるハイブリッド型では $25 \mu\text{m}$ の精密さは例を見ない。 $3 \times 10^{15} \text{ n}/\text{cm}^2$ の陽子照射をしたのちに DESY で検出効率を測定した結果例を図 28(左) に示す。ビーム範囲にある複数のピクセルの検出効率を重ね合わせてピクセル内の位置の依存性として示すもので、バイアス電圧を各ピクセルに配線する側の境界 (左側) と配線の無い側の境界

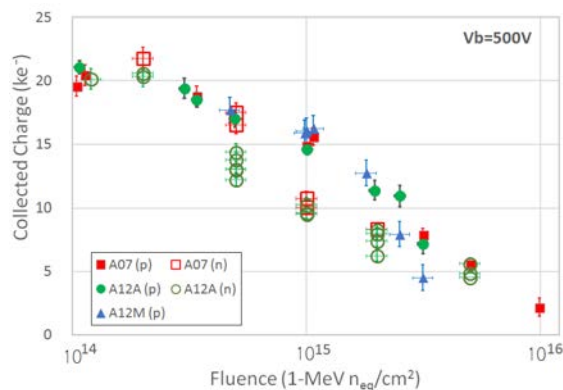


図 27 (左) 通過するβ線を用いて測定したシリコン検出器からの収集電荷量 (厚さ 320μm、バイアス電圧 500 V)。横軸はセンサーに与えた照射量で 1 MeV 中性子に換算した粒子数 (n/cm²)。中性子や様々なエネルギーの陽子線照射の結果をまとめたもの。(右) 4cm 角ピクセルセンサー試験用モジュール (センサーは中央部や右)。

(右側) で検出効率が低下することが分かる。この 2 つの領域に分けて検出効率の低下分をバイアス電圧の関数として示したものが図 28(右) である。さらに金属バンプを境界部に配置しない設計 (青で示すデータ) ではさらに検出効率の低下は低減できることが示された。これら構造による検出効率の低下は放射線損傷に起因するものであるが、ATLAS で予想する 2 倍の照射量でも低下分は 0.3% 程度に抑えられ十分に高い検出効率が達成できることを示した。

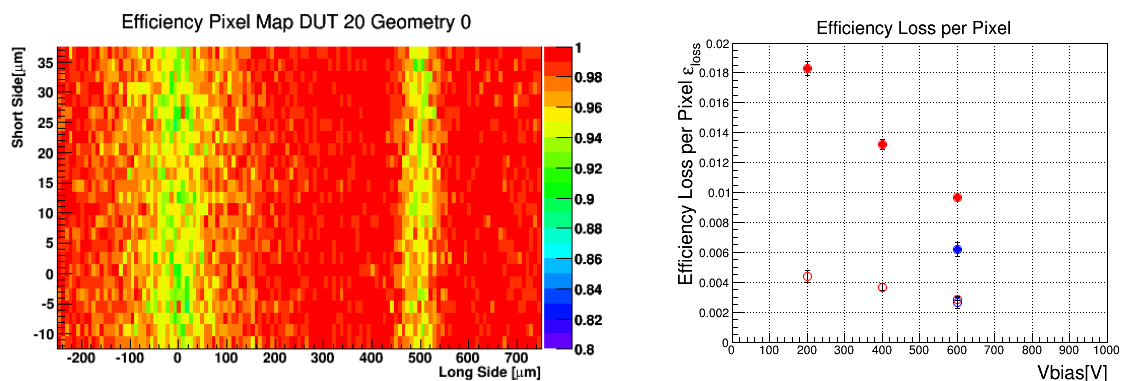


図 28 (左) $3 \times 10^{15} \text{ n/cm}^2$ を照射した $25 \times 500 \mu\text{m}$ ピクセルサイズセンサーのピクセル内位置での検出効率の分布。座標 (0,0), (500,25) が 1 ピクセルに相当し、検出効率はいくつかのピクセルに対する値を平均として求めている。(右) 検出効率が悪部分での検出効率の低下分をバイアス電圧の関数として示した ($3 \times 10^{15} \text{ n/cm}^2$ 照射済み)。異なるマークはピクセル電極の設計の違いを表す。

ハイブリッド型ピクセルでは、金属バンプの不良率を下げるのが重要な開発項目である。我々は Sn/Ag を用いるものと Ni/In を用いるものを平行して比較検討している。現状では Ni/In の方がボンド用フラックスを必要とせずまた小さな不良率で接続できる。ただし、In はやわらかいため、またセンサーと読み出し FE-I4 間を一定間隔に保つ必要性のために Ni の量を増やす必要がある。そのため、センサーモジュールを ATLAS の 2 T の磁場中に設置しても機械強度が十分であるかの試験を行った。ATLAS 環境下でのモジュールへのストレスは磁場の不均一性により強磁性体である Ni に加わる力の不均一性によるもの、磁場の上げ下げに伴うストレスによるものが想定できる。強度評価には KEK 低温センターの 1.5T ソレノイド磁場を借用し、磁場中へのモジュール出し入れを

繰り返すことで ATLAS 実験で受けるストレスを超える耐性試験を行った。4つのモジュールに対して 3300 回の磁場への出し入れ試験した結果、パンプの機械強度は十分であることが示された。

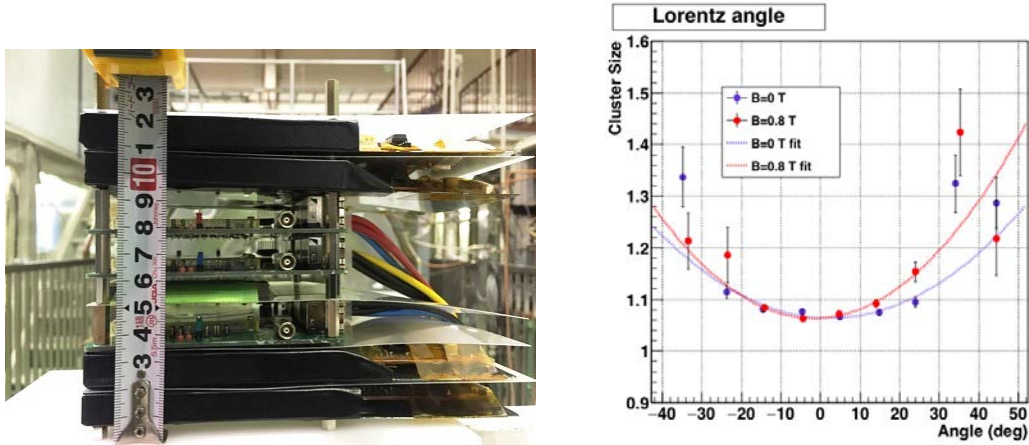


図 29 (左) ローレンツ角測定に用いたシステム。3 台のピクセルモジュールをセンチレータではさみ宇宙線のトリガー信号とした。(右) 磁場中に設置したピクセルモジュールのクラスターサイズの天頂角依存性。データは磁場 0 と 0.8 T で取得した。シリコンの厚さ=150 μm 、バイアス電圧=200 V。

磁場中にモジュールを設置する機会を利用し、シリコン内でのキャリア移動にもなうローレンツ角の評価を行った。磁場がなければ電場に従いキャリアは移動し、50 μm 間隔の電極で測定する電荷分布は最小のヒット電極数(クラスターサイズ)で計測できる。宇宙線の天頂角分布に従い、クラスターサイズは影響を受けるが、磁場を印加することでクラスターサイズ最小の天頂角は移動する。図 29 (左) の示す 3 台のモジュールを磁場中に設置した。図 29 (右) には磁場が無い場合と 0.8T を加えた場合の平均クラスターサイズを飛跡の天頂角の関数として示す。磁場の印加により系統的に天頂角依存性が移動することが分かる。最小クラスターサイズの天頂角の変化分は、シミュレーションの予想値 $3.9 \pm 0.8^\circ$ に対して $4.0 \pm 1.5^\circ$ と矛盾しない結果を得た。ただし、統計不確かさが大きく、今後さらに計測を繰り返すことで測定精度を向上させる。

(2) ニュートリノ崩壊探索のための超伝導体赤外線検出器の開発 (武内、金)

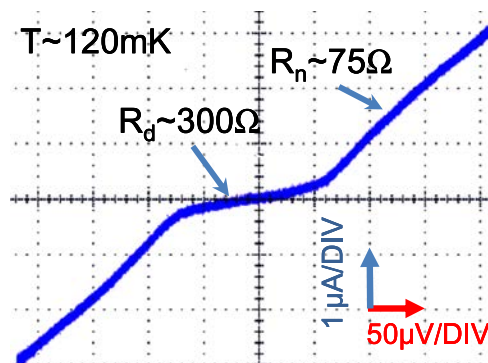


図 30 HF-STJ において絶縁層 HfO_x の上に Al を少量 ($\sim 10 \text{ nm}$) 成膜した 100 μm 角試料の I-V 特性。測定温度は、約 120mK. 従来の Hf/HfO_x/Hf に比べて R_d/R_n の値が 1 から 4 へ改善した。但し磁場無印加時における直流ジョセフソン電流が確認できない。

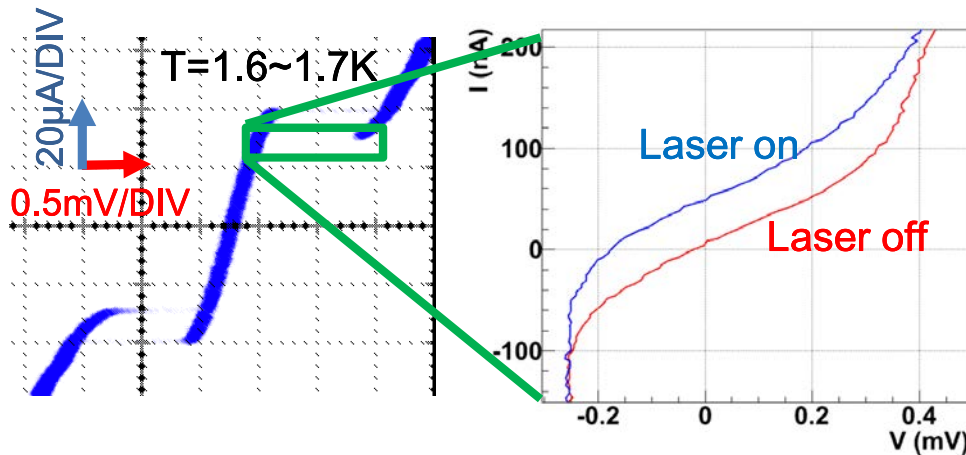


図 31 産総研 CRAVITY で作製した 200 μm 角 Nb/Al-STJ への遠赤外線レーザー (波長 57.2 μm) 照射時の I-V 特性。レーザーは、チョッパーにより $f=200$ Hz でオン・オフされており、左の拡大図 (差動アンプ出力によりオフセットは移動している) において、レーザーオン時・オフ時の I-V 特性の変化が確認された。

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

本開発研究ではニュートリノ崩壊探索実験への応用を目標として、従来から用いられてきた Nb (超伝導ギャップエネルギー $\Delta=1.55\text{meV}$, $T_c = 9.23$ K) を用いた Nb/Al-STJ やさらに Δ の小さい Hf ($\Delta=0.020$ meV, $T_c = 0.165$ K) を超伝導体として使い、遠赤外線領域 ($E_\gamma \sim$ 数 10 meV) の一光子ごとのエネルギーを数 % の精度で測定する性能をもつ STJ の開発を行っている。

Hf-STJ の開発

我々のグループでは、2007 年より KEK 測定器開発室のプログラムの一つとして、KEK、理研との共同研究によってハフニウムを超伝導体とする STJ (Hf-STJ) の開発を進めてきた。これまで、Hf 成膜、Hf 膜のパターン加工方法を確立し、2010 年度には、Hf-HfO_x-Hf による SIS 構造の作製に成功してジョセフソン電流を確認した。また、2012 年度には Hf-STJ 試作サンプルでの可視光入射に対する応答 (トンネル電流増加) を確認した。実用化に向けた課題として要となるものは、漏れ電流の改善、および可視パルス光入射に対するパルス応答の確認が挙げられる。昨年度において、絶縁層 HfO_x の上に Hf と異なる金属層 (Al \sim 10nm 厚) を成膜し絶縁層の上下層の馴染みが悪くなることで漏れ電流の改善が期待される Hf-STJ 試料を作製し I-V 特性を 120mK で測定した (図 30)。その結果、漏れ電流の大幅な改善が確認できた。但し磁場無印加時における直流ジョセフソン電流が確認できない、すなわち信号となるトンネル電流も抑制されるという問題が新たに発生しており、更なる検証が必要である。

Nb/Al-STJ の開発

Hf-STJ 開発と並行して、既に作成方法の確立している Nb/Al-STJ を用いた一光子分光器の開発も行っている。Nb/Al-STJ 単体では、25 meV の光子に対して十分なエネルギー分解能は期待できないが一光子検出が実現できれば、アレイ状に並べた Nb/Al-STJ ピクセルと回折格子の組み合わせによって一光子分光が可能となる。Nb/Al-STJ では、常温増幅器を用いた読み出しにおいて可視光 \sim 近

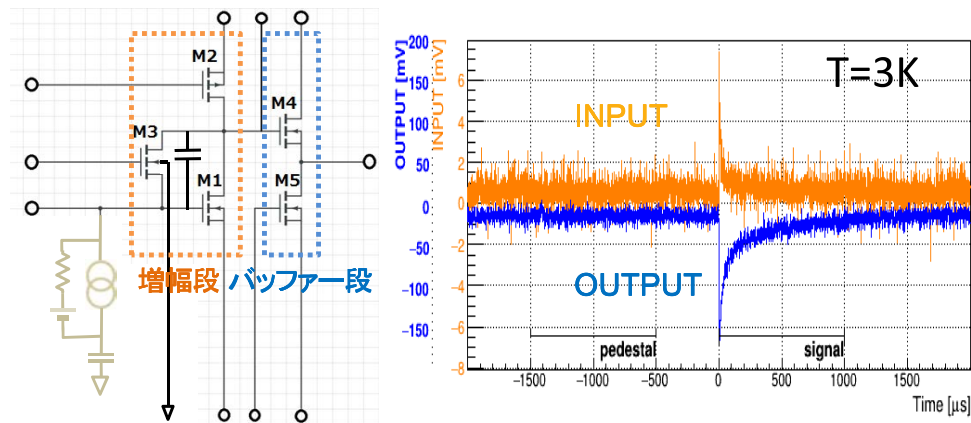


図 32 SOI 技術を用いて試作された STJ 信号読み出し用の極低温増幅器の回路図 (左)、および $T=3\text{K}$ での $C=1\text{nF}$ を用いたテストパルス入力の様子 (右)。入力信号の信号雑音比が増幅後の出力では向上している。

赤外までの一光子検出・分光の報告例がある。我々のグループでは STJ による遠赤外一光子検出を目指して、産総研との共同研究による漏れ電流の少ない Nb/Al-STJ の開発、並びに STJ 信号極低雑音読み出し系として KEK、JAXA 等との共同研究による SOI (Silicon On Insulator) プロセスによる極低温増幅器の開発を行っている。産総研の超伝導デバイス作製施設である 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ており、我々のグループではこの試料の供給を受け、漏れ電流、静電容量、光応答の時定数などの基礎特性の測定を行っている。特に昨年度においては、福井大遠赤センターの遠赤外分子レーザー装置を用いて CRAVITY 製 Nb/Al-STJ の遠赤外光応答の試験を行った。図 31 は、 $200\ \mu\text{m}$ 角 Nb/Al-STJ への遠赤外線レーザー (波長 $57.2\ \mu\text{m}$) 照射時の I-V 特性を示している。レーザーは、チョッパーにより周波数 200 Hz でオン・オフされており、レーザーオン時・オフ時の I-V 特性の変化が確認され、遠赤外線レーザーの照射パワーと STJ の応答から、現段階での遠赤外光子に対する STJ の検出効率が 0.5 % 程度と見積もられた。STJ 表面に反射防止コーティングやアンテナを使用して STJ と遠赤外光子との結合を向上させることが今後の課題となる。

SOI-STJ の開発

SOI プロセスによる MOSFET が STJ の動作温度においてトランジスタとして機能することは既に確立している。我々のグループでは、昨年度においてより現実的に動作する SOI 読み出し回路の試作および測定を行った。図 32 は、SOI プロセスによって作製された STJ 信号読み出し用の極低温増幅器の極低温 ($T=3\text{K}$) におけるテスト信号入力の様子を示している。極低温での増幅器としての動作、および増幅器への入力の信号雑音比が増幅後の出力では向上しているのが確認された。入力波形の時定数から増幅器の入力インピーダンスが数十キロオームであることが分かるが、STJ の光応答速度および STJ の静電容量を考慮すると、より低い入力インピーダンスへの改善が必要である。現在、低入力インピーダンスの電荷積分型増幅器の設計、並びに極低温における回路シミュレーションのための SOI MOSFET の特性の測定を行っている。

(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。

Sine-square deformation と共形場の理論 (石橋)

一次元スピン系において、隣のスピンの相互作用を位置のサイン関数の 2 乗に比例するようにとった場合、その基底状態は相互作用が位置に寄らない場合と一致することが桂 (東大) らの研究によってわかっている。石橋は多田 (理研) とともに、この現象を共形対称性がある場合について調べた。相互作用をサイン関数の 2 乗にとった場合と定数の場合は、ある共形変換で結びついていることを示し、この共形変換から基底状態等の性質が理解できることを示した (論文 114)。また、この理論に現れる演算子・状態の性質を調べた (論文 115)。

弦の場の理論の次元正則化とループ振幅 (石橋)

弦の理論は散乱振幅が摂動論を用いて有限に計算できることが知られているが、発散は相殺するのであり、最初からないわけではない。従って、点粒子の場の理論と同様に、うまい正則化の方法を考えることは重要である。特に超弦の場の理論においてはコンタクトタームの問題と呼ばれる問題があり、tree 振幅でさえ見かけ上発散してしまうため、正則化を与えなければ定義することが出来ない。また、D-ブレーンの影響等の散乱振幅とは異なる量を計算する際には、弦の理論のうまい正則化の方法を与えることが必要不可欠になる。

石橋は村上 (釧路高専) らとのこれまでの研究で、次元正則化を用いた計算により、tree 振幅については第一量子化の計算と一致する結果を得ることができ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 116)。

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 (佐藤)

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グ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 1 0 点強結合散乱振幅を与える可積分模型である $su(3)_2/u(1)^2$ 等質サインゴルドン模型の厳密な質量-結合関係式を導いた。これは、複数のスケールを持つ量子可積分模型に対する初めての結果であり、当該分野の 20 年来の問題を解決するものである。また、この質量-結合関係式により、対応する強結合散乱振幅を解析的に評価する我々の定式化が完結した (論文 117)。

弦理論における非幾何学的背景時空と宇宙項問題 (佐藤)

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

佐藤は菅原、和田 (立命館大学) と共に、共形場理論に基づき弦スケールでも有効な非幾何学的背景時空の解析を進めた。まず、共形対称性を保つ共形場理論の界面 (共形界面/conformal interface) を用いて非幾何学的背景時空中の弦に対する新しいタイプのモジュラー不変な分配関数を構成した (論文 118)。また、このような構成を拡張し、T-fold タイプの非幾何学的背景中の弦理論では、時空の超対称性が破れているにも拘らず 1 ループでの宇宙項が消える、現象論的に興味深い模型が容易に構成できることを示した (論文 119)。

コヒーレント状態を用いた行列幾何の研究 (伊敷)

超弦理論の非摂動的定式化として期待されている行列モデルでは、弦や D ブレーンといった物体は、行列幾何と呼ばれる離散的な幾何の枠組みにより記述される。しかし、この行列幾何の性質はこれまで深く理解されていなかった。伊敷はこの幾何の構造を理解する手法として、量子力学のコヒーレント状態を用いた新たな方法を提案した (論文 120)。この方法により離散的な行列幾何から、計量や曲率といった弦や D ブレーンの微分幾何学的な情報を得ることが出来るようになった。また伊敷と村木は大学院生の松本とともに、この方法を用いて行列幾何の構造を調べた (論文 121)。その結果、特定の行列幾何はケーラー構造と呼ばれる非常に良い性質の構造を持つことが示された。また、このケーラー構造と行列の配位を直接結びつける関係式が得られた。

ゲージ/重力対応の数値的検証 (伊敷)

伊敷は京大基研の花田正範准教授、茨城大学の百武慶文准教授、KEKの西村淳准教授らとともに、ゲージ/重力対応の数値的検証を行った (論文 122)。伊敷らは超弦理論との等価性が予想される 1 次元のゲージ理論の数値計算を行い、内部エネルギー等の熱力学量を求め、得られた結果を超弦理論のものと比較した。その結果、ゲージ/重力対応が確かに成立しているという強い証拠を得ることが出来た。この研究では、ゲージ群のランクが比較的大きい場合と小さい場合の両方が調べられた。ランクが大きい場合の計算はすでに他の先行研究でも行われていたが、伊敷らはその結果をさらに精密化した。一方、ランクが小さい場合の先行研究はこれまでに行われておらず、この研究によってはじめて対応が検証された。

〈論文〉

1. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
“Measurement of four-jet differential cross sections in $\sqrt{s} = 8$ TeV proton-proton collisions using the ATLAS detector,”
JHEP **1512**, 105 (2015)
2. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
“Search for flavour-changing neutral current top quark decays $t \rightarrow Hq$ in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector,”
JHEP **1512**, 061 (2015)
3. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
“Measurement of the $t\bar{t}W$ and $t\bar{t}Z$ production cross sections in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector,”
JHEP **1511**, 172 (2015)
4. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
“Searches for Higgs boson pair production in the $hh \rightarrow bb\tau\tau, \gamma\gamma WW^*, \gamma\gamma bb, bbbb$ channels with the ATLAS detector,”
Phys. Rev. D **92**, 092004 (2015)
5. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
“Search for pair production of a new heavy quark that decays into a W boson and a light quark in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector,”

- Phys. Rev. D **92**, 112007 (2015)
6. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Constraints on new phenomena via Higgs boson couplings and invisible decays with the ATLAS detector,”
 JHEP **1511**, 206 (2015)
 7. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Summary of the ATLAS experiment’s sensitivity to supersymmetry after LHC Run 1 - interpreted in the phenomenological MSSM,”
 JHEP **1510**, 134 (2015)
 8. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Search for lepton-flavour-violating $H \rightarrow \mu\tau$ decays of the Higgs boson with the ATLAS detector,”
 JHEP **1511**, 211 (2015)
 9. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Measurement of transverse energy-energy correlations in multi-jet events in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV using the ATLAS detector and determination of the strong coupling constant $\alpha_s(m_Z)$,”
 Phys. Lett. B **750**, 427 (2015)
 10. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Determination of the ratio of b -quark fragmentation fractions f_s/f_d in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector,”
 Phys. Rev. Lett. **115**, 262001 (2015)
 11. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Measurement of the branching ratio $\Gamma(\Lambda_b^0 \rightarrow \psi(2S)\Lambda^0)/\Gamma(\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi\Lambda^0)$ with the ATLAS detector,”
 Phys. Lett. B **751**, 63 (2015)
 12. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “ Z boson production in p +Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV measured with the ATLAS detector,”
 Phys. Rev. C **92**, 044915 (2015)
 13. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Summary of the searches for squarks and gluinos using $\sqrt{s} = 8$ TeV pp collisions with the ATLAS experiment at the LHC,”
 JHEP **1510**, 054 (2015)
 14. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Search for photonic signatures of gauge-mediated supersymmetry in 8 TeV pp collisions with the ATLAS detector,”
 Phys. Rev. D **92**, 072001 (2015)
 15. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Determination of the top-quark pole mass using $t\bar{t} + 1$ -jet events collected with the ATLAS experiment in 7 TeV pp collisions,”
 JHEP **1510**, 121 (2015)
 16. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],

- “Measurement of the production of neighbouring jets in lead-lead collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV with the ATLAS detector,”
 Phys. Lett. B **751**, 376 (2015)
17. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “ATLAS Run 1 searches for direct pair production of third-generation squarks at the Large Hadron Collider,”
 Eur. Phys. J. C **75**, 510 (2015) Erratum: [Eur. Phys. J. C **76**, 153 (2016)]
18. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Measurement of exclusive $\gamma\gamma \rightarrow \ell^+\ell^-$ production in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector,”
 Phys. Lett. B **749**, 242 (2015)
19. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Study of (W/Z)H production and Higgs boson couplings using $H \rightarrow WW^*$ decays with the ATLAS detector,”
 JHEP **1508**, 137 (2015)
20. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Search for heavy Majorana neutrinos with the ATLAS detector in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV,”
 JHEP **1507**, 162 (2015)
21. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Search for the associated production of the Higgs boson with a top quark pair in multilepton final states with the ATLAS detector,”
 Phys. Lett. B **749**, 519 (2015)
22. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Study of the spin and parity of the Higgs boson in diboson decays with the ATLAS detector,”
 Eur. Phys. J. C **75**, 476 (2015) Erratum: [Eur. Phys. J. C **76**, 152 (2016)]
23. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Measurement of colour flow with the jet pull angle in $t\bar{t}$ events using the ATLAS detector at $\sqrt{s} = 8$ TeV,”
 Phys. Lett. B **750**, 475 (2015)
24. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Modelling $Z \rightarrow \tau\tau$ processes in ATLAS with τ -embedded $Z \rightarrow \mu\mu$ data,”
 JINST **10**, P09018 (2015)
25. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Search for metastable heavy charged particles with large ionisation energy loss in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV using the ATLAS experiment,”
 Eur. Phys. J. C **75**, 407 (2015)
26. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Measurements of the top quark branching ratios into channels with leptons and quarks with the ATLAS detector,”
 Phys. Rev. D **92**, 072005 (2015)

27. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Search for type-III Seesaw heavy leptons in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS Detector,”
 Phys. Rev. D **92**, 032001 (2015)
28. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Search for heavy lepton resonances decaying to a Z boson and a lepton in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector,”
 JHEP **1509**, 108 (2015)
29. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Search for Dark Matter in Events with Missing Transverse Momentum and a Higgs Boson Decaying to Two Photons in pp Collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS Detector,”
 Phys. Rev. Lett. **115**, 131801 (2015)
30. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Search for high-mass diboson resonances with boson-tagged jets in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector,”
 JHEP **1512**, 055 (2015)
31. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Search for Higgs boson pair production in the $b\bar{b}b\bar{b}$ final state from pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector,”
 Eur. Phys. J. C **75**, 412 (2015)
32. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Measurement of differential J/ψ production cross sections and forward-backward ratios in p + Pb collisions with the ATLAS detector,”
 Phys. Rev. C **92**, 034904 (2015)
33. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Search for new light gauge bosons in Higgs boson decays to four-lepton final states in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector at the LHC,”
 Phys. Rev. D **92**, 092001 (2015)
34. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “A search for $t\bar{t}$ resonances using lepton-plus-jets events in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector,”
 JHEP **1508**, 148 (2015)
35. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Search for production of vector-like quark pairs and of four top quarks in the lepton-plus-jets final state in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector,”
 JHEP **1508**, 105 (2015)
36. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Search for Higgs bosons decaying to aa in the $\mu\mu\tau\tau$ final state in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS experiment,”
 Phys. Rev. D **92**, 052002 (2015)

37. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Measurements of the Total and Differential Higgs Boson Production Cross Sections Combining the $H \rightarrow \gamma\gamma$ and $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4\ell$ Decay Channels at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS Detector,”
 Phys. Rev. Lett. **115**, 091801 (2015)
38. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Search for high-mass diphoton resonances in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector,”
 Phys. Rev. D **92**, 032004 (2015)
39. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Search for massive, long-lived particles using multitrack displaced vertices or displaced lepton pairs in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector,”
 Phys. Rev. D **92**, 072004 (2015)
40. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Analysis of events with b -jets and a pair of leptons of the same charge in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector,”
 JHEP **1510**, 150 (2015)
41. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Measurement of charged-particle spectra in Pb+Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV with the ATLAS detector at the LHC,”
 JHEP **1509**, 050 (2015)
42. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Search for invisible decays of the Higgs boson produced in association with a hadronically decaying vector boson in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector,”
 Eur. Phys. J. C **75**, 337 (2015)
43. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Measurement of the top pair production cross section in 8 TeV proton-proton collisions using kinematic information in the lepton+jets final state with ATLAS,”
 Phys. Rev. D **91**, 112013 (2015)
44. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Search for heavy long-lived multi-charged particles in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV using the ATLAS detector,”
 Eur. Phys. J. C **75**, 362 (2015)
45. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Search for long-lived, weakly interacting particles that decay to displaced hadronic jets in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector,”
 Phys. Rev. D **92**, 012010 (2015)
46. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Measurement of the correlation between flow harmonics of different order in lead-lead collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV with the ATLAS detector,”
 Phys. Rev. C **92**, 034903 (2015)

47. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Search for New Phenomena in Dijet Angular Distributions in Proton-Proton Collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV Measured with the ATLAS Detector,”
 Phys. Rev. Lett. **114**, 221802 (2015)
48. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Search for low-scale gravity signatures in multi-jet final states with the ATLAS detector at $\sqrt{s} = 8$ TeV,”
 JHEP **1507**, 032 (2015)
49. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Search for a new resonance decaying to a W or Z boson and a Higgs boson in the $\ell\ell/\ell\nu/\nu\nu + b\bar{b}$ final states with the ATLAS detector,”
 Eur. Phys. J. C **75**, 263 (2015)
50. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS and CMS Collaborations],
 “Combined Measurement of the Higgs Boson Mass in pp Collisions at $\sqrt{s} = 7$ and 8 TeV with the ATLAS and CMS Experiments,”
 Phys. Rev. Lett. **114**, 191803 (2015)
51. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Measurement of the top quark mass in the $t\bar{t} \rightarrow$ lepton+jets and $t\bar{t} \rightarrow$ dilepton channels using $\sqrt{s} = 7$ TeV ATLAS data,”
 Eur. Phys. J. C **75**, 330 (2015)
52. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Search for vector-like B quarks in events with one isolated lepton, missing transverse momentum and jets at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector,”
 Phys. Rev. D **91**, 112011 (2015)
53. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Search for the Standard Model Higgs boson produced in association with top quarks and decaying into $b\bar{b}$ in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector,”
 Eur. Phys. J. C **75**, 349 (2015)
54. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Search for production of WW/WZ resonances decaying to a lepton, neutrino and jets in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector,”
 Eur. Phys. J. C **75**, 209 (2015) Erratum: [Eur. Phys. J. C **75**, 370 (2015)]
55. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Search for a Heavy Neutral Particle Decaying to $e\mu$, $e\tau$, or $\mu\tau$ in pp Collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS Detector,”
 Phys. Rev. Lett. **115**, 031801 (2015)
56. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Search for a Charged Higgs Boson Produced in the Vector-Boson Fusion Mode with Decay $H^\pm \rightarrow W^\pm Z$ using pp Collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS Experiment,”

- Phys. Rev. Lett. **114**, 231801 (2015)
57. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Measurement of the forward-backward asymmetry of electron and muon pair-production in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector,”
 JHEP **1509**, 049 (2015)
 58. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Determination of spin and parity of the Higgs boson in the $WW^* \rightarrow e\nu\mu\nu$ decay channel with the ATLAS detector,”
 Eur. Phys. J. C **75**, 231 (2015)
 59. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Search for supersymmetry in events containing a same-flavour opposite-sign dilepton pair, jets, and large missing transverse momentum in $\sqrt{s} = 8$ TeV pp collisions with the ATLAS detector,”
 Eur. Phys. J. C **75**, 318 (2015) Erratum: [Eur. Phys. J. C **75**, 463 (2015)]
 60. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Evidence of $W\gamma\gamma$ Production in pp Collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV and Limits on Anomalous Quartic Gauge Couplings with the ATLAS Detector,”
 Phys. Rev. Lett. **115**, 031802 (2015)
 61. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Constraints on the off-shell Higgs boson signal strength in the high-mass ZZ and WW final states with the ATLAS detector,”
 Eur. Phys. J. C **75**, 335 (2015)
 62. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Two-particle Bose-Einstein correlations in pp collisions at $\sqrt{s} = 0.9$ and 7 TeV measured with the ATLAS detector,”
 Eur. Phys. J. C **75**, 466 (2015)
 63. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “A search for high-mass resonances decaying to $\tau^+\tau^-$ in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector,”
 JHEP **1507**, 157 (2015)
 64. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Differential top-antitop cross-section measurements as a function of observables constructed from final-state particles using pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV in the ATLAS detector,”
 JHEP **1506**, 100 (2015)
 65. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Search for massive supersymmetric particles decaying to many jets using the ATLAS detector in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV,”
 Phys. Rev. D **91**, 112016 (2015) Erratum: [Phys. Rev. D **93**, 039901 (2016)]
 66. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Search for a CP-odd Higgs boson decaying to Zh in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector,”

- Phys. Lett. B **744**, 163 (2015)
67. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Search for new phenomena in final states with an energetic jet and large missing transverse momentum in pp collisions at $\sqrt{s}=8$ TeV with the ATLAS detector,”
 Eur. Phys. J. C **75**, 299 (2015) Erratum: [Eur. Phys. J. C **75**, 408 (2015)]
 68. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Observation of top-quark pair production in association with a photon and measurement of the $t\bar{t}\gamma$ production cross section in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV using the ATLAS detector,”
 Phys. Rev. D **91**, 072007 (2015)
 69. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Measurement of the charge asymmetry in dileptonic decays of top quark pairs in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV using the ATLAS detector,”
 JHEP **05**, 061 (2015)
 70. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Search for direct pair production of a chargino and a neutralino decaying to the 125 GeV Higgs boson in $\sqrt{s} = 8$ TeV pp collisions with the ATLAS detector,”
 Eur. Phys. J. C **75**, 208 (2015)
 71. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Evidence for the Higgs-boson Yukawa coupling to tau leptons with the ATLAS detector,”
 JHEP **1504**, 117 (2015)
 72. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Search for pair-produced long-lived neutral particles decaying in the ATLAS hadronic calorimeter in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV,”
 Phys. Lett. B **743**, 15 (2015)
 73. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Search for squarks and gluinos in events with isolated leptons, jets and missing transverse momentum at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector,”
 JHEP **1504**, 116 (2015)
 74. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Search for Higgs and Z Boson Decays to $J/\psi\gamma$ and $\Upsilon(nS)\gamma$ with the ATLAS Detector,”
 Phys. Rev. Lett. **114**, 121801 (2015)
 75. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Search for Scalar Charm Quark Pair Production in pp Collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS Detector,”
 Phys. Rev. Lett. **114**, 161801 (2015)
 76. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Identification and energy calibration of hadronically decaying tau leptons with the ATLAS experiment in pp collisions at $\sqrt{s}=8$ TeV,”
 Eur. Phys. J. C **75**, 303 (2015)
 77. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],

- “Search for charged Higgs bosons decaying via $H^\pm \rightarrow \tau^\pm \nu$ in fully hadronic final states using pp collision data at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector,”
JHEP **1503**, 088 (2015)
78. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Observation and measurements of the production of prompt and non-prompt J/ψ mesons in association with a Z boson in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector,”
Eur. Phys. J. C **75**, 229 (2015)
79. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Measurement of Spin Correlation in Top-Antitop Quark Events and Search for Top Squark Pair Production in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV Using the ATLAS Detector,”
Phys. Rev. Lett. **114**, 142001 (2015)
80. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Centrality and rapidity dependence of inclusive jet production in $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV proton-lead collisions with the ATLAS detector,”
Phys. Lett. B **748**, 392 (2015)
81. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Observation and measurement of Higgs boson decays to WW^* with the ATLAS detector,”
Phys. Rev. D **92**, 012006 (2015)
82. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Measurement of the transverse polarization of Λ and $\bar{\Lambda}$ hyperons produced in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV using the ATLAS detector,”
Phys. Rev. D **91**, 032004 (2015)
83. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Search for anomalous production of prompt same-sign lepton pairs and pair-produced doubly charged Higgs bosons with $\sqrt{s} = 8$ TeV pp collisions using the ATLAS detector,”
JHEP **1503**, 041 (2015)
84. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Searches for heavy long-lived charged particles with the ATLAS detector in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV,”
JHEP **1501**, 068 (2015)
85. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Search for new phenomena in events with three or more charged leptons in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector,”
JHEP **1508**, 138 (2015)
86. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Measurements of the Nuclear Modification Factor for Jets in Pb+Pb Collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV with the ATLAS Detector,”
Phys. Rev. Lett. **114**, 072302 (2015)
87. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Measurement of three-jet production cross-sections in pp collisions at 7 TeV centre-of-mass energy

- using the ATLAS detector,”
 Eur. Phys. J. C **75**, 228 (2015)
88. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, K. Sato, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Search for new phenomena in events with a photon and missing transverse momentum in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector,”
 Phys. Rev. D **91**, 012008 (2015) Erratum: [Phys. Rev. D **92**, 059903 (2015)]
89. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Measurement of the inclusive jet cross-section in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV using 4.5 fb^{-1} of data with the ATLAS detector,”
 JHEP **1502**, 153 (2015) Erratum: [JHEP **1509**, 141 (2015)]
90. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Measurement of the $WW + WZ$ cross section and limits on anomalous triple gauge couplings using final states with one lepton, missing transverse momentum, and two jets with the ATLAS detector at $\sqrt{s} = 7$ TeV,”
 JHEP **1501**, 049 (2015)
91. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Search for invisible particles produced in association with single-top-quarks in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector,”
 Eur. Phys. J. C **75**, 79 (2015)
92. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Search for the X_b and other hidden-beauty states in the $\pi^+\pi^-\Upsilon(1S)$ channel at ATLAS,”
 Phys. Lett. B **740**, 199 (2015)
93. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Search for $W' \rightarrow t\bar{b}$ in the lepton plus jets final state in proton-proton collisions at a centre-of-mass energy of $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector,”
 Phys. Lett. B **743**, 235 (2015)
94. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Search for dark matter in events with heavy quarks and missing transverse momentum in pp collisions with the ATLAS detector,”
 Eur. Phys. J. C **75**, 92 (2015)
95. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Search for s -channel single top-quark production in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector,”
 Phys. Lett. B **740**, 118 (2015)
96. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Measurements of the W production cross sections in association with jets with the ATLAS detector,”
 Eur. Phys. J. C **75**, 82 (2015)
97. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Search for the $b\bar{b}$ decay of the Standard Model Higgs boson in associated $(W/Z)H$ production

- with the ATLAS detector,”
JHEP **1501**, 069 (2015)
98. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Search for resonant diboson production in the $\ell\ell q\bar{q}$ final state in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector,”
Eur. Phys. J. C **75**, 69 (2015)
99. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Search for $H \rightarrow \gamma\gamma$ produced in association with top quarks and constraints on the Yukawa coupling between the top quark and the Higgs boson using data taken at 7 TeV and 8 TeV with the ATLAS detector,”
Phys. Lett. B **740**, 222 (2015)
100. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Measurement of the top-quark mass in the fully hadronic decay channel from ATLAS data at $\sqrt{s} = 7$ TeV,”
Eur. Phys. J. C **75**, 158 (2015)
101. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Measurements of Higgs boson production and couplings in the four-lepton channel in pp collisions at center-of-mass energies of 7 and 8 TeV with the ATLAS detector,”
Phys. Rev. D **91**, 012006 (2015)
102. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Measurement of the production and lepton charge asymmetry of W bosons in Pb+Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV with the ATLAS detector,”
Eur. Phys. J. C **75**, 23 (2015)
103. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Performance of the ATLAS muon trigger in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV,”
Eur. Phys. J. C **75**, 120 (2015)
104. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Search for $W' \rightarrow tb \rightarrow qqbb$ decays in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector,”
Eur. Phys. J. C **75**, 165 (2015)
105. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Search for new phenomena in the dijet mass distribution using $p - p$ collision data at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector,”
Phys. Rev. D **91**, 052007 (2015)
106. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Measurement of the $t\bar{t}$ production cross-section as a function of jet multiplicity and jet transverse momentum in 7 TeV proton-proton collisions with the ATLAS detector,”
JHEP **1501**, 020 (2015)
107. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Simultaneous measurements of the $t\bar{t}$, W^+W^- , and $Z/\gamma^* \rightarrow \tau\tau$ production cross-sections in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector,”

- Phys. Rev. D **91**, 052005 (2015)
108. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Search For Higgs Boson Pair Production in the $\gamma\gamma b\bar{b}$ Final State using pp Collision Data at $\sqrt{s} = 8$ TeV from the ATLAS Detector,”
 Phys. Rev. Lett. **114**, 081802 (2015)
109. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Jet energy measurement and its systematic uncertainty in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector,”
 Eur. Phys. J. C **75**, 17 (2015)
110. G. Aad, K. Hara, S.H. Kim, H. Okawa, F. Ukegawa *et al.* [ATLAS Collaboration],
 “Measurements of $W\gamma$ and $Z\gamma$ production in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector at the LHC,”
 Phys. Rev. D **87**, 112003 (2013) Erratum: [Phys. Rev. D **91**, 119901 (2015)]
111. K. Nakamura, K. Hara *et al.*,
 “Irradiation and testbeam of KEK/HPK planar p-type pixel modules for HL-LHC”,
 JINST 10 C06008 (2015).
112. Y. Takeuchi *et al.*,
 “Development of Superconducting Tunnel Junction detectors as a far-infrared photon-by-photon spectrometer for neutrino decay search”,
 Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC), 2015 IEEE International, 551 - 555 (2015), DOI: 10.1109/I2MTC.2015.7151327
113. K. Kiuchi *et al.*,
 “Development FD-SOI MOSFET amplifiers for integrated read-out circuit of superconducting-tunnel-junction single-photon-detectors”,
 Proceedings of International Workshop on SOI Pixel Detector, FERMILAB-CONF-15-355-E-TD (2015), arXiv:1507.07424
114. N. Ishibashi and T. Tada,
 “Infinite circumference limit of conformal field theory”,
 Journal of Physics A48, 315402 (2015).
115. N. Ishibashi and T. Tada,
 “Dipolar quantization and the infinite circumference limit of two-dimensional conformal field theories”,
 arXiv:1602.01190 [hep-th], UTHEP-681.
116. N. Ishibashi and K. Murakami,
 “Worldsheet theory of light-cone gauge noncritical strings on higher genus Riemann surfaces”,
 arXiv:1603.08337 [hep-th], UTHEP-683.
117. Zoltán Bajnok, János Balog, Katsushi Ito, Yuji Satoh and Gábor Zsolt Tóth,
 “Exact mass-coupling relation for the homogeneous sine-Gordon model”,
 Phys. Rev. Lett. **116**, 181601 (2016). arXiv:1512.04673 [hep-th].
118. Yuji Satoh and Yuji Sugawara,

- “Non-geometric backgrounds based on topological interfaces”,
JHEP **1507**, 022 (2015).
119. Yuji Satoh, Yuji Sugawara and Taiki Wada,
“Non-supersymmetric asymmetric orbifolds with vanishing cosmological constant”,
JHEP **1602**, 184 (2016).
120. G. Ishiki,
“Matrix Geometry and Coherent States,”
Phys. Rev. D **92**, 046009 (2015).
121. G. Ishiki, T. Matsumoto and H. Muraki,
“Kähler structure in the commutative limit of matrix geometry,”
arXiv:1603.09146 [hep-th], UTHEP-685.
122. M. Hanada, Y. Hyakutake, G. Ishiki and J. Nishimura,
“Numerical tests of the gauge/gravity duality conjecture for D0-branes at finite temperature and finite N,”
arXiv:1603.00538 [hep-th], UTHEP-682.

〈著書・総説等〉

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

〈研究成果発表〉

[国際会議]

1. Y. Takeuchi *et al.*, “Development of Superconducting Tunnel Junction Detectors as a Far Infrared Photon-By-Photon Spectrometer for Neutrino Decay Search”,
2015 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC),
May 11 – 14, 2015, Pisa, Italy. (一般講演)
2. K. Kiuchi *et al.*, “Development FD-SOI MOSFET amplifiers for integrated read-out circuit of superconducting-tunnel-junction single-photon-detectors”,
International Workshop on SOI Pixel Detector (SOIPIX2015), June 3 – 6, 2015, Sendai, Japan.
(一般講演)
3. H. Okawa, “Higgs Boson & Flavors at the ATLAS & CMS Experiments,” SUSY 2015, Aug. 23 – 29, 2015, Lake Tahoe, USA. (招待講演)
4. K. Hara, K. Sato *et al.*, “Charge collection and field profile studies of heavily irradiated strip sensors for the ATLAS inner tracker upgrade”, 10th International Symposium on the Development and Application of Semiconductor Tracking detectors (HSTD10) , Sept. 25 – 29, 2015, Xi’an, China.

- (一般講演)
5. H. Okawa, “Searches for diboson resonances at the LHC-ATLAS experiment”,
Tsukuba Global Science Week 2015 (TGSW2015), Sept. 28 – 30, 2015, EPOCHAL Tsukuba,
Tsukuba-shi, Japan. (招待講演)
 6. Y. Takeuchi et al., “Development of far-infrared single-photon spectrometers based on superconducting tunnel junction for search for the cosmic background neutrino decay”,
Tsukuba Global Science Week 2015 (TGSW2015), Sept. 28 – 30, 2015, EPOCHAL Tsukuba,
Tsukuba-shi, Japan. (招待講演)
 7. K. Kiuchi et al., “Development of Superconducting-Tunnel-Junction Single-Photon-Detectors Integrated with FD-SOI MOSFET Amplifiers”,
2015 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference (NSS/MIC), Oct. 31 –
Nov. 7, 2015, San Diego, USA. (一般講演)
 8. R. Senzaki et al., “R&D status of FD-SOI Cold Amplifier”,
Interdisciplinary Workshop on Science and Patents (IWP) 2015, Sept. 4, 2015, Univ. of Tsukuba,
Japan. (ポスター)
 9. K. Takemasa et al., “Development of Superconducting Tunnel Junction Detector using Hafnium (Hf-STJ)”,
Interdisciplinary Workshop on Science and Patents (IWP) 2015, Sept. 4, 2015, Univ. of Tsukuba,
Japan. (ポスター)
 10. K. Moriuchi et al., “Development of Superconducting Tunnel Junction photon detector using Niobium and Aluminum (Nb/Al-STJ)”,
Interdisciplinary Workshop on Science and Patents (IWP) 2015, Sept. 4, 2015, Univ. of Tsukuba,
Japan. (ポスター)
 11. Nobuyuki Ishibashi, “Dimensional regularization of light-cone gauge superstring field theory and multiloop amplitudes”
International Conference on String Field Theory and Related Aspects VII, SFT2015 (ChengDu, China, May 11-15, 2015). (招待講演)
 12. Yuji Satoh, “Analytic expansions of strong-coupling amplitudes in N=4 SYM”,
Amplitudes in Asia 2015, (National Center for Theoretical Sciences, Taipei, Taiwan, November 2 - 6, 2015). (招待講演)
 13. Goro Ishiki, “Matrix Geometry and Coherent States”, Workshop on Noncommutative Field Theory and Gravity (Corfu, Greece, Sep. 21-26, 2015). (招待講演)
 14. Goro Ishiki, “Spherical M5-branes from the plane wave matrix model”, KEK theory workshop Dec. (KEK, Tsukuba, Japan, Dec. 1-4, 2015). (一般講演)
 15. Goro Ishiki, “Spherical M5-branes from the plane wave matrix model”, YITP workshop 「Developments in String Theory and Quantum Field Theory」 (YITP, Kyoto, Japan, Nov. 9-13, 2015). (一般講演)
 16. Goro Ishiki, “Matrix Geometry and Coherent States”, YITP workshop 「Numerical approaches to the holographic principle, quantum gravity and cosmology」 (YITP, Kyoto, Japan, July 21-24, 2015). (一般講演)

17. Goro Ishiki, “Matrix Geometry and Coherent States”, The 33rd International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2015) (Kobe, Japan, July 14-18, 2015). (一般講演)
18. Takaki Matsumoto, “New construction method of Matrix Regularization using coherent states”, Geometry in Gauge Theories and String Theory (Korea Institute for Advanced Study, Seoul, Korea, Sep. 15-18, 2015). (一般講演)
19. Takaki Matsumoto, “New construction method of Matrix Regularization using coherent states”, YITP workshop “Developments in String Theory and Quantum Field Theory” (YITP, Kyoto, Japan, Nov. 9-13, 2015). (一般講演)
20. Takaki Matsumoto, “Kähler Structure in Matrix Geometry”, KEK workshop 2015 Dec. (KEK, Tsukuba, Japan, Dec. 1-4, 2015). (一般講演)

[国内学会・研究会]

1. 八木俊輔：ニュートリノ崩壊光探索のための超伝導検出器開発、
第5回高エネルギー春の学校 2015 (2015年6月10-12日)、大津市びわこクラブ。(一般講演)
2. 武内勇司：可視～遠赤外域単一光子検出のための半導体・超伝導体複合型検出器 (SOI-STJ) の開発、
第一回光・量子計測シンポジウム (2015年9月9日)、茨城県つくば市エポカルつくば。(ポスター)
3. 大川英希：LHC-ATLAS 実験 Run-2 における Missing E_T の再構成、
日本物理学会 2015 年秋季大会 (2015年9月25-28日)、大阪市立大学。(一般講演)
4. 萩原陸人：アトラス実験の Run2 におけるシリコンストリップ検出器 (SCT) の全空乏化電圧の経年変化、
日本物理学会 2015 年秋季大会 (2015年9月25-28日)、大阪市立大学。(一般講演)
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、
日本物理学会 2015 年秋季大会 (2015年9月25-28日)、大阪市立大学。(一般講演)
6. 木内健司：Development of Superconducting-Tunnel-Junction Single-Photon-Detectors Integrated with FD-SOI MOSFET Amplifiers,
新学術領域研究「ニュートリノフロンティア」研究会 2015 (2015年12月1-3日)、静岡県熱海市ニューウェルシティー湯河原。(招待講演)
7. 森内航也：Performance evaluation of Nb/Al-STJ fabricated at CRAVITY,
新学術領域研究「ニュートリノフロンティア」研究会 2015 (2015年12月1-3日)、静岡県熱海市ニューウェルシティー湯河原。(招待講演)
8. 受川史彦：素粒子構造部門 成果報告、
第2回 CiRfSE ワークショップ (2016年1月18-19日)、筑波大学。(招待講演)
9. 武内勇司：ニュートリノ崩壊探索概要、
第2回 CiRfSE ワークショップ (2016年1月18-19日)、筑波大学。(招待講演)
10. 武政健一：Hf-STJ 開発、
第2回 CiRfSE ワークショップ (2016年1月18-19日)、筑波大学。(招待講演)
11. 木内健司：SOI 極低温アンプ設計、
第2回 CiRfSE ワークショップ (2016年1月18-19日)、筑波大学。(招待講演)
12. 先崎蓮：SOI-STJ4 評価、

- 第2回 CiRfSE ワークショップ (2016年1月18-19日)、筑波大学。(招待講演)
13. 森内航也: CRAVITY 製 Nb/Al-STJ 評価、
第2回 CiRfSE ワークショップ (2016年1月18-19日)、筑波大学。(招待講演)
 14. 佐藤構二: ATLAS 実験の概要、
第2回 CiRfSE ワークショップ (2016年1月18-19日)、筑波大学。(招待講演)
 15. 大川英希: AATLAS 実験におけるダイボゾン共鳴状態の探索、
第2回 CiRfSE ワークショップ (2016年1月18-19日)、筑波大学。(招待講演)
 16. 永田和樹: ATLAS 実験における荷電ヒッグス粒子の探索、
第2回 CiRfSE ワークショップ (2016年1月18-19日)、筑波大学。(招待講演)
 17. 瀧 遼亮: ATLAS 実験におけるヒッグス粒子対生成の探索、
第2回 CiRfSE ワークショップ (2016年1月18-19日)、筑波大学。(招待講演)
 18. 佐藤和之: HL-LHC へ向けたピクセル検出器のビームテスト解析、
第2回 CiRfSE ワークショップ (2016年1月18-19日)、筑波大学。(招待講演)
 19. 岩淵周平: HL-LHC ATLAS 実験用シリコンストリップセンサーの放射線耐性評価、
第2回 CiRfSE ワークショップ (2016年1月18-19日)、筑波大学。(招待講演)
 20. 武内勇司: 超伝導検出器と SOI 極低温アンプ、
第1回光量子計測器ワークショップ (2016年3月2日) 筑波大学。(招待講演)
 21. 永田和樹: LHC-ATLAS 実験 Run1 におけるトップクォークとボトムクォークに崩壊する荷電ヒッグス粒子の探索、
日本物理学会第71回年次大会 (2016年3月19-22日)、東北学院大学。(一般講演)
 22. 伊藤史哲: LHC-ATLAS 実験 Run2 における $WH \rightarrow l\nu b\bar{b}$ 崩壊過程でのトップクォーク対背景事象除去の改善、
日本物理学会第71回年次大会 (2016年3月19-22日)、東北学院大学。(一般講演)
 23. 笠原宏太: LLHC-ATLAS 実験における $Z + \text{Missing } E_T$ チャンネルを用いた標準模型を超える物理の探索、
日本物理学会第71回年次大会 (2016年3月19-22日)、東北学院大学。(一般講演)
 24. 佐藤和之: HL-LHC 実験 ATLAS 検出器のアップグレードに向けた精密ピクセル検出器の開発、
日本物理学会第71回年次大会 (2016年3月19-22日)、東北学院大学。(一般講演)
 25. 岩淵周平: HL-LHC アトラス実験に用いるシリコンストリップ検出器の放射線損傷および長期アニーリング特性の評価、
日本物理学会第71回年次大会 (2016年3月19-22日)、東北学院大学。(一般講演)
 26. 八木俊輔: ニュートリノ崩壊光探索のための SOI-STJ の研究開発 V、
日本物理学会第71回年次大会 (2016年3月19-22日)、東北学院大学。(一般講演)
 27. 武政健一: ニュートリノ崩壊光探索のための Hf-STJ の研究開発、
日本物理学会第71回年次大会 (2016年3月19-22日)、東北学院大学。(一般講演)
 28. 森内航也: ニュートリノ崩壊光探索のための Nb/Al-STJ の研究開発、
日本物理学会第71回年次大会 (2016年3月19-22日)、東北学院大学。(一般講演)
 29. 武内勇司: 超伝導遠赤外線センサーの開発 (シンポジウム「光センサー: 単一光子検出の最前線」)、
日本物理学会第71回年次大会 (2016年3月19-22日)、東北学院大学。(招待講演)
 30. 石橋 延幸: 「Dimensional regularization of light-cone gauge superstring field theory and multiloop

- amplitudes」,
- 日本物理学会 2015 年秋季大会 (大阪市立大学, 大阪, 2015 年 9 月 25 日-28 日). (一般講演)
31. Yuji Satoh, 「World-sheet conformal interfaces and their applications」(招待講演),
弦の場の理論 16 (筑波大学東京キャンパス, 東京, 2016 年 2 月 22 - 23 日).
 32. 伊藤克司, 佐藤勇二, Chris Locke, 東紅非, 「T-Q relation for modified affine B2 Toda field equation」,
日本物理学会第 71 回年次大会 (東北学院大学, 仙台 2016 年 3 月 19 - 22 日).
 33. Zoltan Bajnok, Janos Balog, 伊藤克司, 佐藤勇二, Gabor Zsolt Toth, 「Exact mass-coupling relation
of simplest multi-scale quantum integrable model」,
日本物理学会第 71 回年次大会 (東北学院大学, 仙台 2016 年 3 月 19 - 22 日).
 34. 佐藤勇二, 菅原祐二, 和田大樹, 「Non-susy asymmetric orbifolds with vanishing cosmological constant」,
日本物理学会第 71 回年次大会 (東北学院大学, 仙台 2016 年 3 月 19 - 22 日).
 35. 伊敷 吾郎, 「Numerical simulation for superstring theory」,
～スパコン「京」がひらく科学と社会～第 2 回「京」を中核とする HPCI システム利用研究課題 成果
報告会、(日本科学未来館, 東京, 2015 年 10 月 26 日). (招待講演)
 36. 伊敷 吾郎, 松本 高興, 深山 陽平, 島田 英彦, 「コヒーレント状態による行列正則化の新しい構成法」,
日本物理学会 2015 年秋季大会 (大阪市立大学, 大阪, 2015 年 9 月 25 日-28 日). (一般講演)
 37. 伊敷 吾郎, 松本 高興, 村木 久祥, 「Kähler Structure in Matrix Geometry」,
日本物理学会 第 71 回年次大会 (東北学院大学, 仙台, 2016 年 3 月 19 日-22 日). (一般講演)
 38. 伊敷 吾郎, 松本 高興, 村木 久祥, 「ゆらいだ非可換球面上のケーラー構造について」,
日本物理学会 第 71 回年次大会 (東北学院大学, 仙台, 2016 年 3 月 19 日-22 日). (一般講演)
 39. 浅野 侑磨, 伊敷 吾郎, 島崎 信二, 寺嶋 靖治, 「Spherical fivebranes from the plane wave matrix
model」,
日本物理学会 第 71 回年次大会 (東北学院大学, 仙台, 2016 年 3 月 19 日-22 日). (一般講演)
 40. 伊敷 吾郎, 「Numerical simulation for superstring theory」,
～スパコン「京」がひらく科学と社会～第 2 回「京」を中核とする HPCI システム利用研究課題 成果
報告会、(日本科学未来館, 東京, 2015 年 10 月 26 日). (ポスター発表)

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

3.3 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）

小沢 顕（数理物質系物理学域 教授）

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）

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

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）

杉立 徹（広島大学・理学研究科 教授）

浜垣 秀樹（東京大学・理学研究科・附属原子核科学研究センター 教授）

秋葉 康之（理化学研究所・仁科加速器研究センター・実験研究グループ グループリーダー）

佐甲 博之（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）

小沢 恭一郎（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）

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）

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）

クォーク・核物質部門では、LHC 加速器を用いた ALICE 実験、RHIC 加速器を用いた PHENIX 実験、STAR 実験等を推進し、粒子相関や集団運動、ジェット等の指針を用いたクォーク・グルーオン・プラズマ (QGP) の研究を進めた。オリバー・ブッシュ氏（国際テニュアトラック教員）は、ハイデルベルグ大学に滞在し、ALICE 実験の物理ワーキンググループのコンビーナーとしてジェット物理に関する研究を推進し、国際連携に貢献した。日仏事業や大学間協定によりフランス・グルノーブル大学とのダブルディグリープログラムを始め、2名の筑波大の大学院生が本プラズマに入学した。ALICE 実験の将来計画として、超前方の光子測定のためのシリコン電磁カロリメーターの開発研究を進めた。日米科学技術協力事業によりこれまで推進してきた PHENIX 実験が 2016 年の実験でデータ収集実験を完了する。STAR 実験による衝突ビームエネルギー走査実験に、今後さらに本格的に加わり、臨界点探索を含む QCD 相図の解明に向けた研究を展開する。また、J-PARC 加速器のエネルギー領域における重イオン衝突実験での使用を目指した高精度の時間分解能をもつ多段型 MRPC 検出器の開発を推進した。

理化学研究所の RI ビームファクトリー (RIBF) の大型基盤実験装置の一つとして、稀少 RI リング (Rare-RI Ring) の開発研究を行ってきた。稀少 RI リングは、RIBF 棟の K4 室に設置され、平成 24 年 4 月より製作が始まっている。中性子過剰の不安定核の質量測定などに向け、実験準備と測定器開発を進めている。

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であるが、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 に基づく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、QCD の第一原理からの相構

造の解明やクォーク物質の熱力学的性質の計算にむけて、配位生成と計算手法開発を進めた。

(1) クォーク・グルーオン・プラズマ (QGP) の実験的研究

RHIC-PHENIX 実験における集団運動、粒子相関に関する研究

クォーク・グルーオン・プラズマ (QGP) は原子核物質状態の一つであり宇宙初期に存在していたとされ、米国ブルックヘブン国立研究所 (BNL) では相対論的重イオン加速器 (RHIC) を用いて QGP の研究が行なわれている。QGP のプローブとして生成粒子分布の方位角異方性がある。方位角異方性は衝突関与部の幾何学的な形状を起源とし、QGP の膨張を経て測定される為、衝突初期モデルや QGP の粘性に敏感である。これまで対称系である金+金や銅+銅衝突での異方性測定が行なわれてきたが、2012年に非対称系の銅+金衝突の実験が行なわれた。銅+金衝突では、銅側と金側の衝突関与部の厚みが違う事からくる指向型の異方性が期待され、衝突初期モデルの検証を目的としている。図 33(a)-(d) は銅+金衝突における指向型の異方性の横運動量依存性である (論文 1)。パネルの違いは中心衝突度を表し、左側が中心衝突で右側がかすり衝突を表す。低運動量領域では統計誤差のため v_1 の正負が分からないが、高運動量領域では v_1 が負であるため、高運動粒子が金原子核側に多く生成されている事を示す。また、かすり衝突側の方が v_1 の絶対値の最大値が小さい、これはかすり衝突側では銅原子核側と金原子核側の衝突関与部の大きさの違いが小さくなっている事から来るものと考えられる。図 33(e)-(h) は楕円型、三角形型の方位角異方性の横運動量依存性の実験データと理論計算の比較を表す。この比較から銅+金衝突での方位角異方性は従来の衝突初期モデルと粘性値 0.08 – 0.16 で理論的に再現する事が出来る事が分かった (論文 1,2)。

欧州共同原子核研究機構 (CERN) の大型ハドロン衝突型加速器 (LHC) における世界最高エネルギーでの陽子・陽子 (p+p) 衝突実験や原子核・原子核 (A+A) 衝突実験が数年前から始まり、p+p 衝突や p+A 衝突のような小さな衝突系においても、終状態の生成粒子数が多い高多重度事象においては、集団運動的膨張を表す結果が報告された。RHIC 加速器ではその多彩な粒子加速技術を生かし、p+p や A+A 衝突実験に加えて、p+A, d+A, $^3\text{He}+A$ 衝突実験や、d+A 衝突における衝突ビームエネルギー走査実験を近年行っている。図 33(i) は $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV の $^3\text{He}+A$ 原子核の中心衝突における荷電粒子の v_2, v_3 の測定結果と流体力学計算等との比較を示している (論文 3)。これは小さな衝突系においても、これまで行ってきた大きな原子核同士の衝突系と同じように、初期密度が十分大きくなるような高多重度事象においては v_2 や v_3 が QGP の流体的膨張によって発展していることを示唆する結果である。これらの小さな衝突系における系統的測定 (衝突の大きさや形状に対する依存性、ラピディティ依存性、衝突ビームエネルギー依存性) を今後詳細に測定し研究する予定である。

RHIC-STAR 実験における QCD 臨界点探索、3 次方位角異方性の研究

RHIC では QCD 相図の臨界点探索を目的として Beam Energy Scan が行われ、STAR 実験において net-proton 分布の高次キュムラントが測定された (論文 4)。本研究では、その結果における検出効率補正法の妥当性を吟味した。通常、ビームパイプ等との相互作用により、陽子と反陽子の検出効率には有限の差が生じるが、その解析においては、それらの検出効率の平均値を補正に用いていた。それらを独立に補正した場合、その結果が本来どうあるべきかを、簡単な統計モデルを用いて見積もった (論文 5)。図 34(a) は横軸にビームエネルギー、縦軸に両補正方法の差をプロットしたものである。差は衝突エネルギーと共に大きくなり、200 GeV では偶数次キュムラントが約 20% ずれることを確認した。STAR 実験では初期の核子分布のゆらぎを主な起源とする 3 次の方位角異方性 ($v_3\{2\}$) のビームエネルギー依存性が測定された。 $v_3\{2\}$ は主に衝突初期の粘性の小さい QGP 相で発展するとされ、QGP

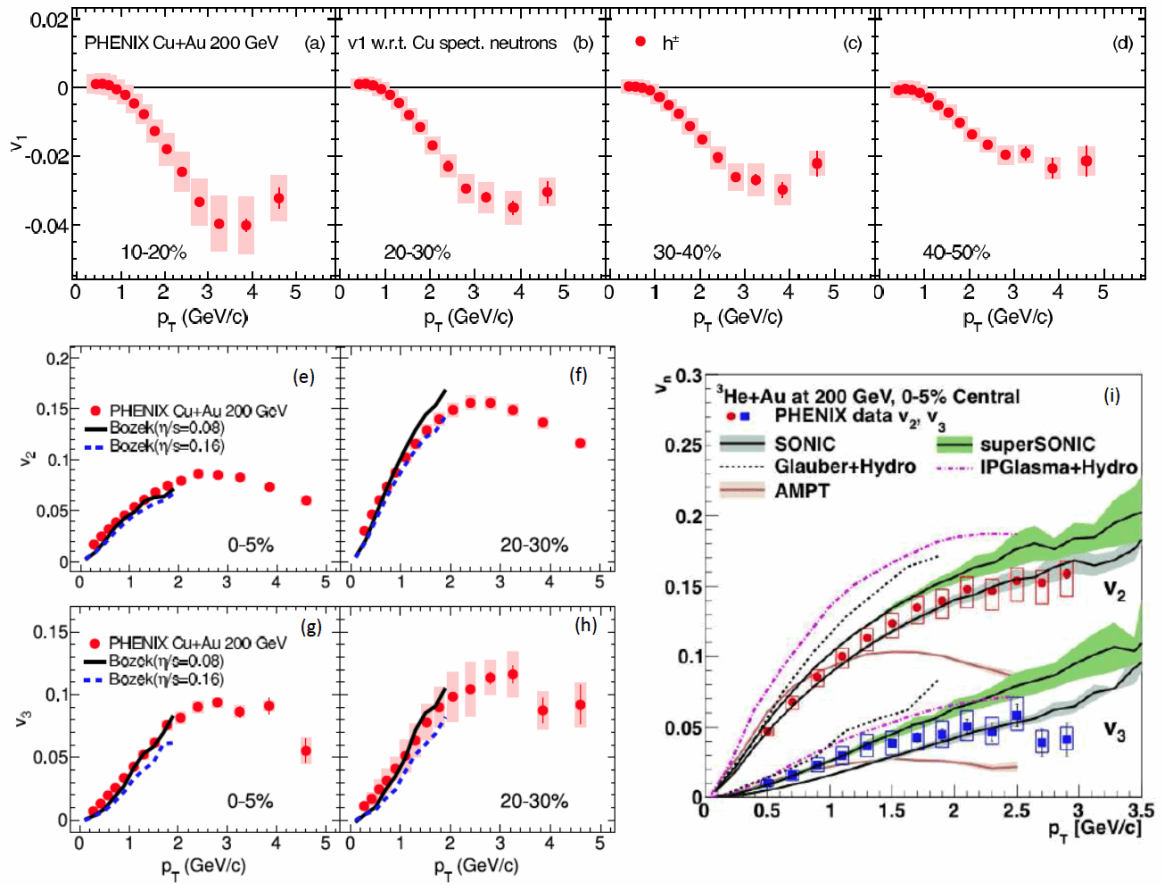


図 33 RHIC-PHENIX 実験における集団運動に関する研究。Cu+Au 衝突 (a)-(h)、 $^3\text{He}+\text{Au}$ 衝突 (i) における荷電粒子 v_1 、 v_2 、 v_3 の p_T 依存性、及び、流体計算との比較。(論文 1,2,3)

の生成および衝突初期の QGP 相での圧力勾配について調べるためのいいプローブである。図 34(b) は横軸をビームエネルギー $\sqrt{s_{NN}}$ 、縦軸に $v_3^2\{2\}/n_{ch,PP}$ ($n_{ch,PP}$ は衝突核子対あたりの荷電粒子数の擬ラピディティ密度) をプロットしたものである。LHC の $\sqrt{s_{NN}}=2.76\text{TeV}$ 鉛 + 鉛衝突での結果も合わせて表示されている。 $v_3^2\{2\}$ を衝突核子対あたりの粒子多重度で規格化すると、 $\sqrt{s_{NN}}$ が 15-20GeV 付近で最小となるという結果が得られた(論文 6)。

LHC-ALICE 実験における方位角異方性、粒子相関、ジェットの研究

スイス欧州原子核研究機構 (CERN) の ALICE 実験では、LHC 加速器を用いた重イオン衝突実験により、クォーク・グルーオン・プラズマ (QGP) の物性研究が進められている。原子核衝突により、衝突関与部は高温高密度状態となり QGP が生成すると考えられている。また、生成された QGP は流体的に膨張しハドロ物質へ相転移する。終状態における粒子の密度分布や膨張時間を詳細に調べることは QGP の粘性や初期状態を調べるための良いプローブである。RHIC-PHENIX 実験では 2 次および 3 次のイベント平面 (楕円および三角の膨張方向軸) に対して HBT 測定をすることで終状態における系の形状が \cos または \sin の振幅であることが観測された(論文 7)。

また近年、方位角異方性の強度を示すベクトル (Q vector) を用いて衝突毎に方位角異方性が強い (または弱い) 事象を選ぶ手法 (Event Shape Engineering) が用いられている(論文 8)。図 35(a)-(b) は

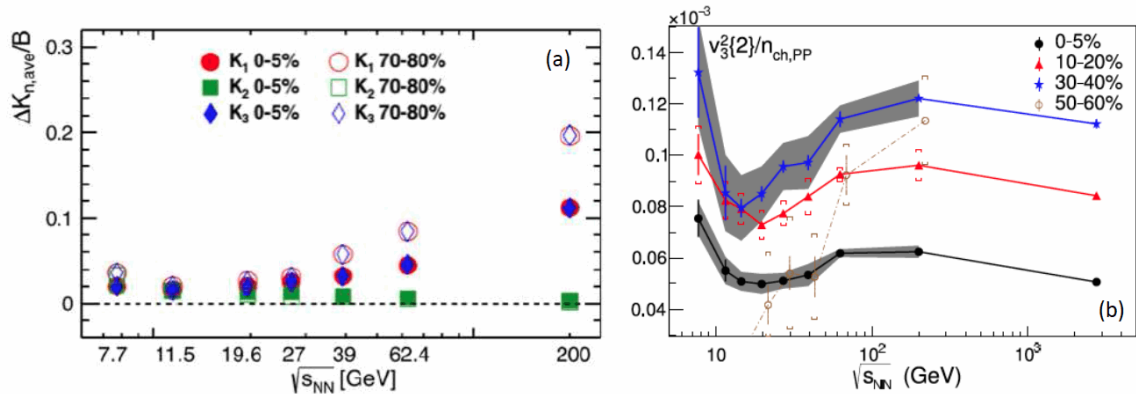


図 34 net-proton 分布の高次キュムラント測定に関する検出効率の平均補正と独立補正による結果の差の衝突ビームエネルギーに対する依存性 (a) と、RHIC-STAR 実験 金 + 金衝突における $v_3^2\{2\}/n_{ch,PP}$ の衝突エネルギー依存性 (b) を示す。(論文 4,5,6)

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

重イオン衝突を用いたクォーク・グルーオン・プラズマ相 (QGP) の物性探索において、衝突初期に作られる高運動量パートンは有用なプローブとなりうる。このパートンは QGP との相互作用を経てジェット事象として観測されるため、重イオン衝突におけるジェットの形状変化測定はパートンを用いた QGP のトモグラフィーと考えられる。LHC にて 2015 年 11 月より行われた $\sqrt{s_{NN}} = 5.02\text{TeV}$ の陽子 + 陽子及び鉛 + 鉛衝突実験でのデータを用いて、QGP に起因する荷電粒子ジェット抑制の測定を開始した。重イオン衝突実験における、ジェット形状変化を示唆する測定量として、陽子 + 陽子衝突と鉛 + 鉛衝突での生成量比 (R_{AA}) が代表的である。図 35(c)-(d) に、これまでに得られた $\sqrt{s_{NN}} = 2.76\text{TeV}$ での結果を示す (論文 9)。ここでは鉛 + 鉛衝突において、ジェットの収量が抑制されることが観測された。 $\sqrt{s_{NN}} = 5.02\text{TeV}$ においても、同様の測定を行い、より広いエネルギー領域において、高運動量パートンの QGP 中での振る舞いを、系統的に理解する。

In heavy-ion collisions at the LHC, jet quenching is observed in central Pb-Pb collisions; the yield of hadrons and jets is strongly modified compared to the expectation from pp collisions scaled by the average number of binary collisions $\langle N_{Coll} \rangle$. This observation is attributed to the formation of a QGP in the collision, due to gluon radiation induced by the hot and dense medium. p-Pb collisions are important to investigate cold nuclear initial and final state effects. In minimum bias p-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}}=5.02\text{ TeV}$ the production of jets (論文 10) is consistent with the absence of a strong final state suppression. However, multiplicity dependent studies in p-Pb collisions on the production of low p_T identified particles and long range correlations (論文 11) show similar features as measured in Pb-Pb collisions, where they are attributed to the collective behavior

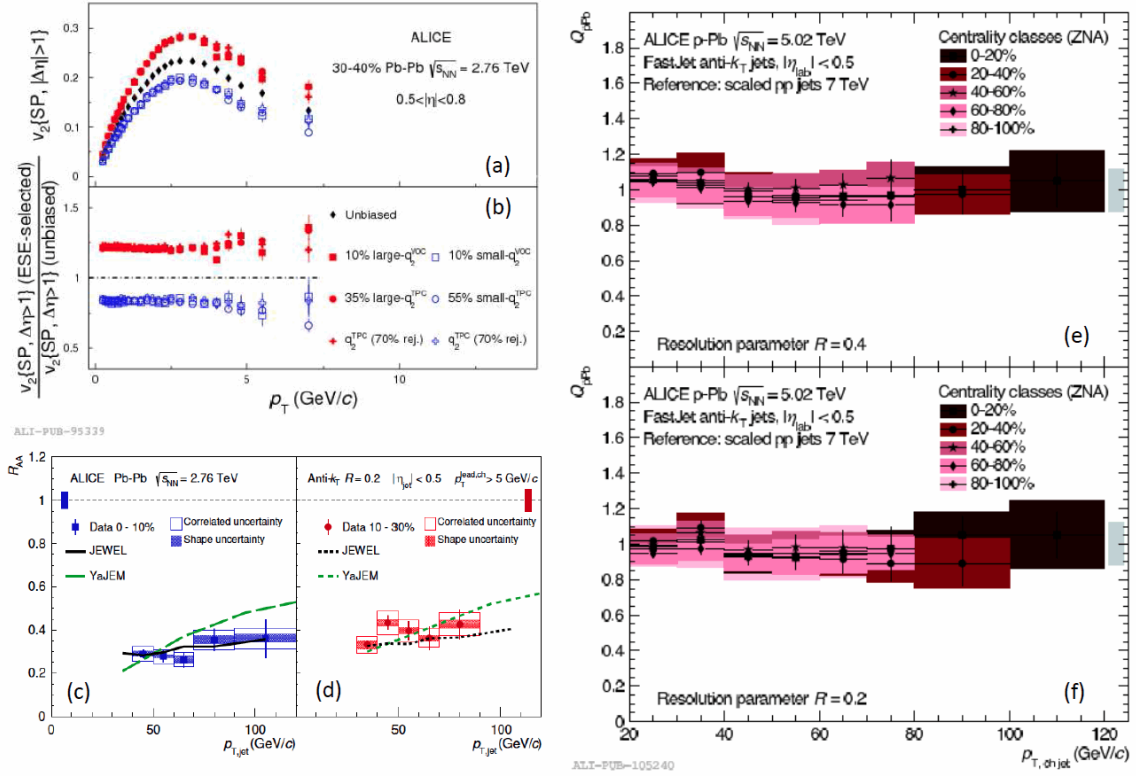


図 35 LHC-ALICE 実験 Pb+Pb 衝突における v_2 の横運動量依存性 (a)-(b) と、LHC-ALICE 実験 Pb+Pb 衝突におけるジェット R_{AA} の横運動量依存性 (c)-(d) と、LHC-ALICE 実験 p+Pb 衝突におけるジェット Q_{pPb} の横運動量依存性 (e)-(f) を示す。(論文 8,9,12)

following the creation of a QGP. These features in p-Pb collisions become more pronounced for higher multiplicity events. The ALICE collaboration has measured the centrality dependence of charged jet production in p-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}}=5.02$ TeV for jet resolution parameters $R=0.2$ and 0.4 in the p_T range from 20 to 120 GeV/c (論文 12). Charged jets are reconstructed with the anti- k_T algorithm using charged particle tracks reconstructed with the ALICE Inner Tracking System (ITS) and Time Projection Chamber (TPC). The event centrality classes are defined by the zero-degree energy measured in the lead-going neutron detector ZNA. N_{Coll} is estimated from a Glauber model and the mean measured amplitude in the V0 detector on the Pb-going side for each centrality class.

The nuclear modification factor Q_{pPb} , obtained by dividing the measured spectra in p-Pb collisions by a pp reference constructed from charged jet spectra at $\sqrt{s}=7$ TeV scaled with $\langle N_{Coll} \rangle$, is shown in Fig.35(e)-(f). Both for $R=0.2$ (upper panel: e) and $R=0.4$ (lower panel: f) the nuclear modification factor is compatible with unity in all centrality classes, indicating the absence of centrality-dependent nuclear effects on the jet yield in the kinematic regime probed by our measurement. The ratio of jet production cross sections reconstructed with $R=0.2$ and 0.4 (not shown) is consistent with the result obtained in minimum bias p-Pb collisions, which agrees with the jet

cross section ratio in pp collisions. Within present uncertainties, no effects of parton energy loss or jet broadening in small systems created in p-Pb collisions is observed.

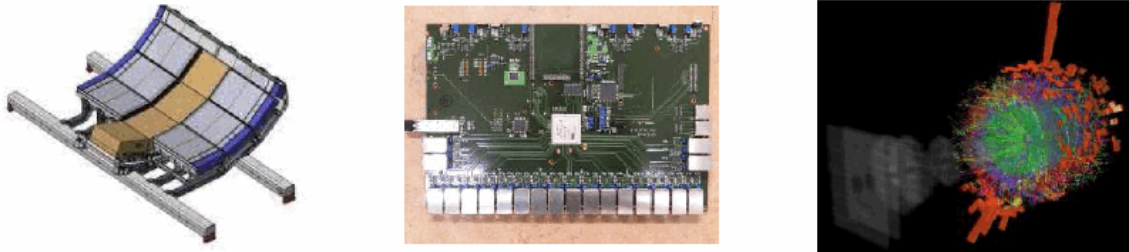


図 36 LHC-ALICE 実験に導入した DCAL 検出器 (左) と、トリガー回路 (Summary Trigger Unit) ボード (中) と、LHC-ALICE 実験 5TeV Pb+Pb 衝突におけるトリガーされたジェット事象 (右) を示す。(論文 13)

欧州原子核研究機構 (CERN) が運用を行っている大型ハドロン衝突型加速器 (LHC) では、2015 年から、核子あたりの衝突エネルギーを陽子-陽子衝突、鉛-鉛衝突それぞれについて最大 13TeV、5.02TeV までに引き上げての Run2 実験が行われている。LHC 加速器を利用する主要実験グループの一つである ALICE 実験では、我々の研究グループがその構想・開発・実験施設への導入に大きく携わった電磁カロリメータ DCAL(図 36 左、論文 13)が増設され、これにより、先に行われた Run1 での実験と比べ、クォーク・グルーオン・プラズマ物性の重要なプローブとなる高エネルギー光子及びジェットイベント測定能力の向上を目的とする。我々は新たに設置されたこの DCAL 検出器と Run1 時から稼働していた EMCAL 及び PHOS 検出器を組み合わせ高エネルギー光子・ジェットイベントを効率的に収集するためのトリガーシステム開発を行った。開発内容としては、主に、トリガー計算を行う Summary Trigger Unit(STU, 図 36 中)上に実装された FPGA 用のファームウェア開発を行った。また、この検出器を運用を開始するための作業・運用システムの更新作業を行った。本システムは 2015 年冬に運用を開始し、鉛-鉛衝突実験におけるカロリメータトリガーによるデータ収集に成功した (図 36 右)。

高精度の時間分解能をもつ多段型 MRPC 検出器の開発研究

多層型ガス検出器 Multi-gap Resistive Plate Chamber(MRPC) は、比較的安価で非常に高い時間分解能を達成できると期待されている。同機は J-PARC 加速器で開始予定の重イオン衝突実験に採用される予定であり、現在、飛行時間分解能 30ps を目指し研究開発が進められている。釣り糸をスペーサーに用いてガラス板を積み重ねることで各ガラス板の間に細く均一なギャップを形成し、さらにその上下を高電圧用電極と、シグナル読出し電極のついた基板で挟んだ構造をしている。これを 1 段とし、今年度は、図 37 左のような 4 段積み重ねた構造の MRPC を用いた。各ギャップをガスで満たしたところへ宇宙線が入射するとギャップ間で電子雪崩が発生し、電荷の移動によってパッドに誘起される。この誘起された電荷信号の時間を読み取り時間分解能を評価した。ガラス板の間隔を狭くすることで時間分解能が改善する傾向にあることが報告されている (論文 13) ことを受け、今年度はガラス板を隔てる釣り糸より細いものにすることで時間分解能の改善を目指した。釣り糸の太さが $165\mu\text{m}$ 、 $128\mu\text{m}$ 、 $104\mu\text{m}$ の三種類用意して評価したところ、 $104\mu\text{m}$ に $16\text{V}/\mu\text{m}$ の電場をかけた時に $50.6 \pm 4.7\text{ps}$ の時間分解能に達した (図 37 中)。しかし、ストリーマー現象の発生に伴い、立ち上がったタイミングを正確につかむことができない事象が増えた結果、検出効率は 50% 程度となった (図 37 右)。

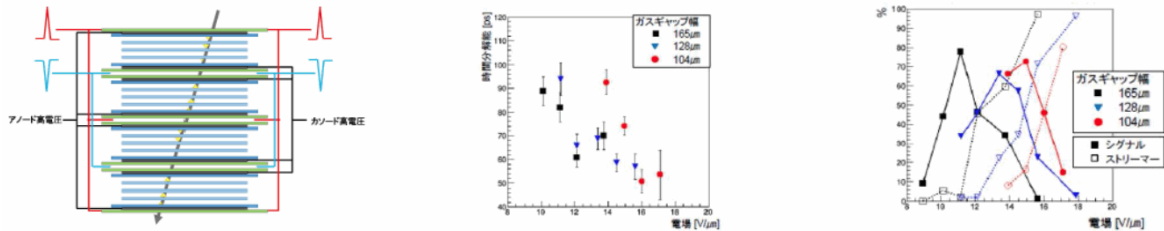


図 37 4 段型 MRPC のセットアップ (左) と、時間分解能のギャップ間電場依存性 (中) と、電子雪崩・ストリーマー現象の割合 (右) を示す。

(2) 稀少 RI リングによる不安定核研究

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

稀少 RI リングプロジェクトの現状

平成 27 年度は、加速器からのビームを使った初めてのコミッションング実験を 2 回行った。最初のコミッションング実験では、ビーム輸送系の確立、個別入射の確認、等時性磁場の検証などを目的とし、168 A MeV の ^{78}Kr ビームを用いて平成 27 年 6 月に行った。光学計算に基づき入射軌道を調整した後、キッカー電磁石を励磁し、そのタイミング及び強度を調整することで ^{78}Kr を 1 粒子毎に周回軌道にのせ、個別入射に成功した。その後、リング周回軌道上に設置したビームモニタで周期的な信号を観測し、粒子がリングに入射され周回したことを確認した。さらに入射に使用したキッカー磁石により、出射を行い、リング出口に設置したプラスチックシンチレータにて信号を確認した。等時性度の確認には、図 38 左に示すように、縦軸をリングの入口と出口に設置したプラスチックシンチレータの時間差 (TOF)、横軸を入射ラインの運動量分散地点で取得した運動量とした 2 次元プロットを活用した。 $(\text{d}B/\text{d}r)/B_0$ はリング内磁場の動径方向依存性を示すパラメーターで、このパラメーターを変更することにより等時性度を調整する。図 38 左に示すように、0.279 で運動量に対してほぼフラットとなった。この図の TOF の幅から導出した等時性度は、 7×10^{-6} であり、シュミレーションの結果とほぼ一致した。リング内には、共鳴空洞をピックアッププローブとする非破壊型のビームモニタ (共鳴空洞型ショットキーピックアップ) も設置されている。取出しを行なわない蓄積モードでイベントの発生を観測した。典型的なショットキーピックアップのスペクトルを図 38 右に示した。1 粒子の ^{78}Kr がリング内を周波数を変えながら 4 秒程度周回したことを示している。(コミッションング実験までの開発研究と最初のコミッションング実験についての詳細は、論文 14 を参照されたい。)

平成 27 年 12 月には、BigRIPS で ^{48}Ca 一次ビームから生成された二次ビーム (^{36}Ar と ^{35}Cl) の入射と出射に成功した。これらの核の質量は既知であるので、TOF 測定から質量の導出が可能であり、現在解析中である。平成 28 年度は、U 一次ビームから生成した中性子過剰核の質量測定を予定している。

稀少 RI リング用の飛行時間検出器の開発

稀少 RI リングでは飛行時間の測定により不安定核の質量を決定する。精密質量測定を行うためには精度良く飛行時間を測定する検出器が必要であり、現在開発中である。検出器に求められる性能は (1)100 ps 以下の時間分解能、(2) 物質量が少ない、(3) 高い検出効率、(4) アクセプタンスが大きいことである。これらの要求を達成するため、二次電子を発生させるためのアルミナイズドマイラー膜と、マイク

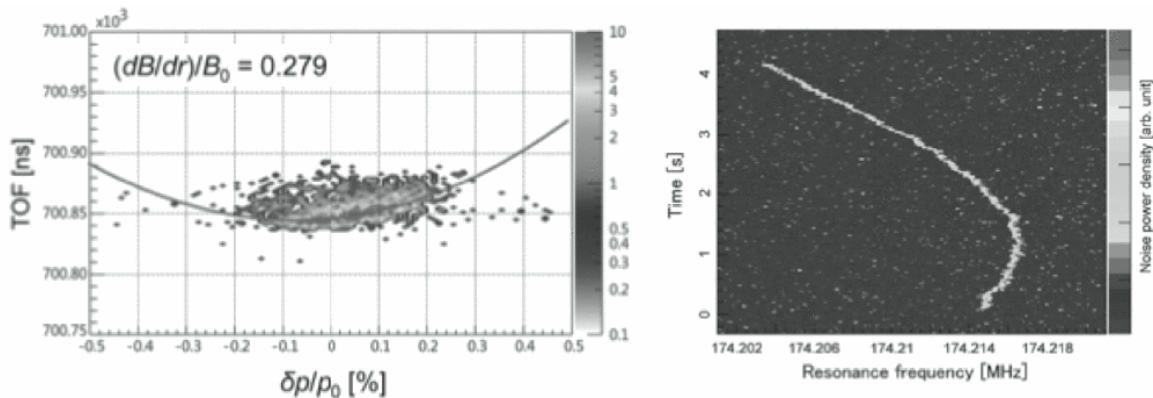


図 38 (左図) 縦軸を TOF 横軸を運動量とした 2 次元プロット。 $(dB/dr)/B_0=0.279$ における結果を示した。曲線は、2 次関数でフィットした結果で、等時性の傾向の目安を示す。(右図) 縦軸は時間経過、横軸はショットキーピークアップの共鳴周波数を示す。線が ^{78}Kr に由来する信号である。

ロチャンネルプレート (MCP) を組み合わせた検出器の開発を行っている。この検出器は、荷電粒子が膜を通過した時に放出される二次電子を電場と磁場を用いて MCP へと導き電子を増幅して信号を得る。膜から発生した二次電子は放出角度や初期エネルギーに依らず等時性を持って MCP に到達するが、厳密には初期エネルギーの違いがわずかに影響する。その効果を小さくするため、(A) 今年度は電場を大きくして時間分解能の向上を図った。印可する電場は 650 V/mm 程度であり、これまでより 4 倍以上大きくした。電場の増強に伴って磁場も大きくする必要があり、永久磁石を用いて約 190 Gauss の磁場を発生させた。(B) さらに、今年度は検出効率を向上させるため MCP を二台に増設した。これまでは、ビーム進行方向と同じ方向に放出された二次電子のみを検出していたが、ビーム進行方向と反対方向に放出する二次電子も検出できるように二台の MCP を配置し、前方放出と後方放出の二次電子を独立に検出できるように改良した (図 39)。

放射線医学総合研究所の HIMAC (Heavy Ion Accelerator in Chiba) から供給される ^{84}Kr ビームを用いて性能評価を行った。前方放出と後方放出のどちらも時間分解能は $\sigma \sim 50 \text{ ps}$ であり、検出効率は前方放出と後方放出の OR をとることにより最大 99% の結果を得た。時間分解能と検出効率ともに目標を達成した。現在は小型試作機のため MCP の有効領域は $\phi 14.5 \text{ mm}$ である。今後は有効領域のより大きな MCP を用いて大きなビームサイズに対応できるように検出器の大型化を行って実機完成を目指す。

(3) 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

金谷、谷口らは、格子 QCD シミュレーションの方法により、新潟大学江尻信司准教授、広島大学梅田貴士准教授、九州大学鈴木博教授らとの共同研究で、Wilson 型クォークによる有限温度・密度 QCD の研究を引き続き推進した。

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

多重点再重み付け法による QCD ベータ関数

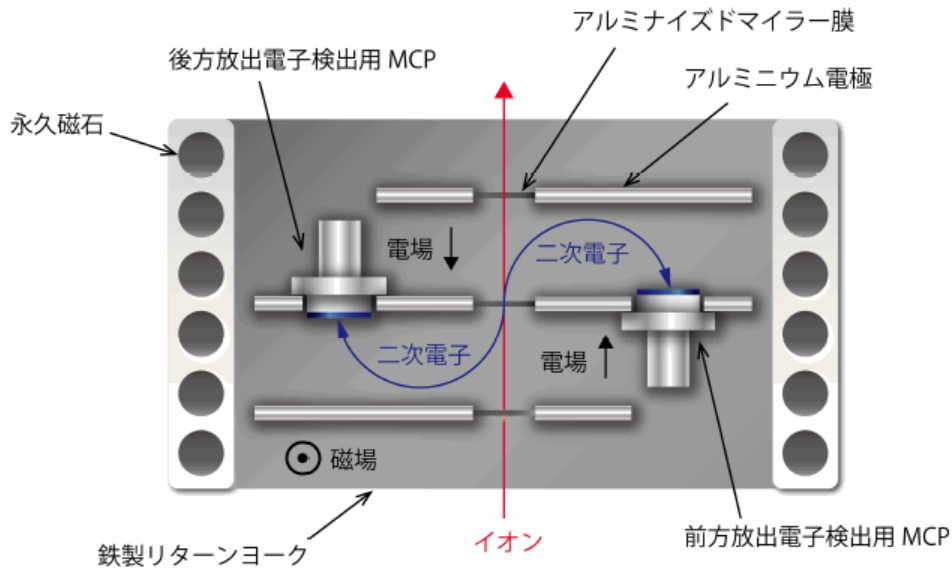


図 39 両読型飛行時間検出器の模式図。

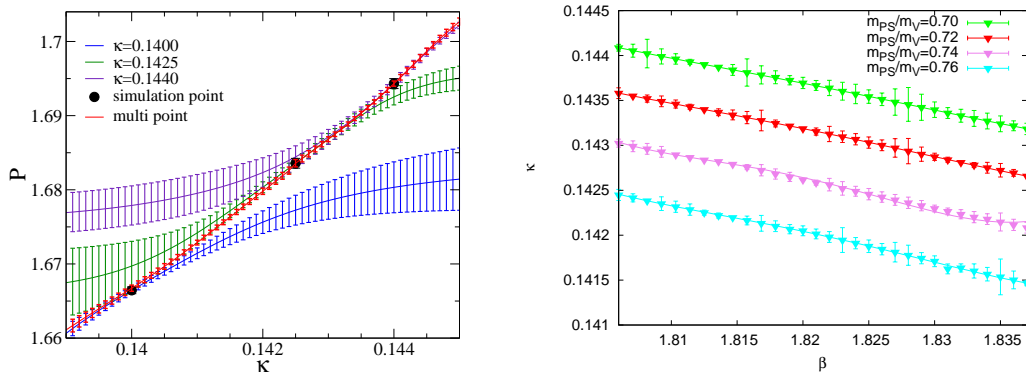


図 40 $N_F = 2$ QCD における多重点再重み付け法の研究 [論文 16]。左図：改良ブラケット $P = c_0 W^{1 \times 1} + 2c_1 W^{1 \times 2}$ の期待値の $\beta = 1.825$ における κ 依存性。黒丸は、3つのシミュレーション点における観測結果。紫、緑、青は、3点それぞれのデータによる単純な再重み付け法の結果。「重ねあわせ問題」のために、パラメータを大きく動かすと単純な再重み付け法では観測結果を再現できないことがわかる。赤は、3点のデータを多重点再重み付け法により結合して計算した結果。観測結果をスムーズに繋ぎ、広いパラメータ領域で精度の高い計算が可能となる。右図： m_{PS}/m_V の結果から求めた等物理線 (LCP)。 m_{PS}/m_V が 1 に近いほどクォーク質量が大きい場合に相当する。

有限温度・有限密度 QCD の状態方程式や物理量の温度・密度依存性を計算するためには、理論のパラメータ空間内の「等物理線 (Line of Constant Physics: LCP)」(同一の物理系を様々な格子間隔で表現) と、LCP 上でパラメータの格子間隔依存性をあらわす「ベータ関数」の情報が必要である。QCD は、ゲージ結合定数 (β) と複数のクォーク質量 (κ) や化学ポテンシャル (μ) を基本パラメータとして持つが、多次元のパラメータ空間で LCP やベータ関数を精度よく評価することは簡単ではない。それを解決するために「多重点再重み付け法 (multi-point reweighting 法)」を検討し、密度ゼロの $N_F = 2$ QCD の場合に試験研究を行った (論文 15,16)。

系のパラメータ依存性を調べる有力な方法として、再重み付け法 (reweighting 法) がよく使われるが、

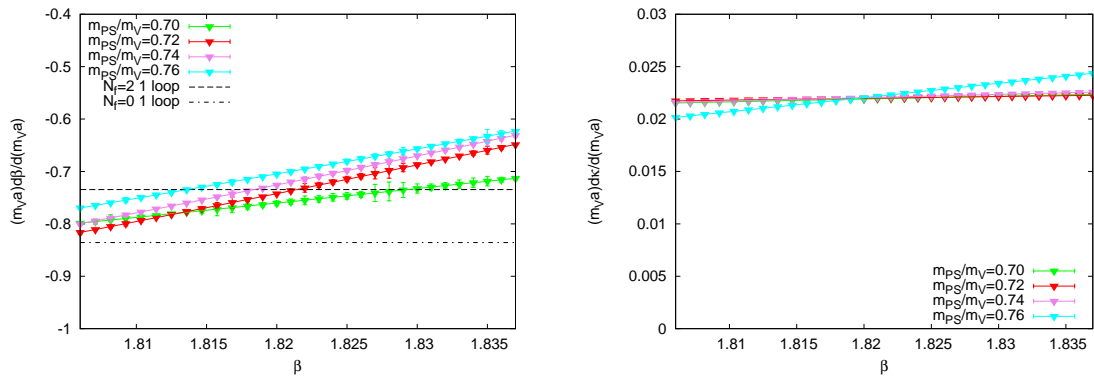


図 41 多重点再重み付け法による、 $N_F = 2$ QCD のベータ関数 $a(d\beta/da)$ (左図) と $a(d\kappa/da)$ (右図)。 $m_V a$ を近傍で結合パラメータの 2 次フィットした結果に基づいて計算したもの。左図の破線は、 $N_F = 0$ と 2 の場合の摂動 1 次の結果。[論文 16]

有限温度・有限密度 QCD の研究で要求されるような、パラメータ空間の広い領域に応用することには困難が伴う。図 40 左に、改良プラケット P の κ 依存性を示す。黒丸は 3 つのシミュレーション点における観測結果で、紫、緑、青は、それぞれのシミュレーション点のデータを使って再重み付け法を使って計算した P の κ 依存性の予言をあらわす。パラメータを大きく動かすと観測結果を再現できないことがわかる。誤差評価も信頼性が低く、このまま LCP やベータ関数の計算に使うことは難しい。これは、再重み付け法に必要なヒストグラムを、各シミュレーション点での期待値近傍でしか信頼できる評価ができず、期待値が大きく動く事に対応するようなパラメータの大きな変化に対応できない事による(「重ねあわせ問題」)。

多重点再重み付け法では、重ねあわせ問題を解決するために、複数のシミュレーションデータを統合して再重み付けする。図 40 左図に、3 つのシミュレーションを合わせて多重点再重み付け法により計算した結果を赤線で示す。観測結果(黒丸)をスムーズに繋ぎ、シミュレーション点の間の領域も含め、広いパラメータ領域で信頼性と精度の高い結果が得られた。これにより、LCP とベータ関数の計算に必要な、パラメータ空間の広い領域での精度の高い測定が可能となる。それに基づいて計算した $N_F = 2$ QCD の LCP とベータ関数を、図 40 右図と図 41 に示す。

$N_F = 2 + 1$ 物理点 QCD と有限密度 QCD

この手法を応用して $N_F = 2 + 1$ 物理点 QCD や有限密度 QCD を研究するための準備も進めている(論文 17)。

我々が開発したる固定格子間隔アプローチに基づき、PACS-CS のゼロ温度シミュレーションと同じシミュレーション・パラメータを使って、 $T = 140\text{--}500$ MeV に相当する有限温度配位を系統的に蓄積している。これまでに生成した有限温度配位と、PACS-CS が公開しているゼロ温度配位や reweighting factor を用いて、Plaquette 期待値、Polyakov loop 期待値、さらに状態方程式の計算で必要となる QCD 作用の coupling parameter 微分の試験計算をおこない、期待する振る舞いを確認した(図 42)。これを発展させ、多重点再重み付け法や Gradient Flow 法を用いた物理点でのベータ関数の評価が次の課題である。

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

近年 QCD 熱力学量の新しい計算方法として gradient flow を用いた方法が注目を浴びている。この方

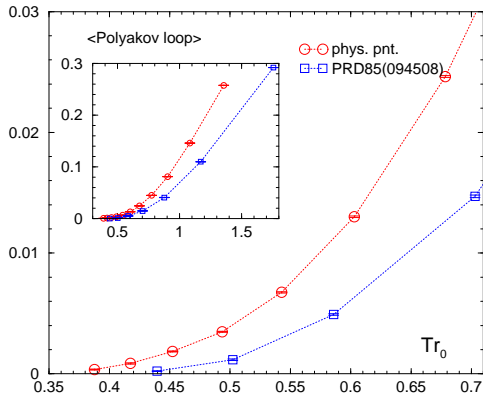


図 42 物理点における有限温度 QCD の配位で計算した Polyakov loop 期待値の温度依存性。以前の計算による比較的重いクォーク質量での結果も示す。クォーク質量が軽くなると相転移温度が下がる事が分かる。[論文 16]

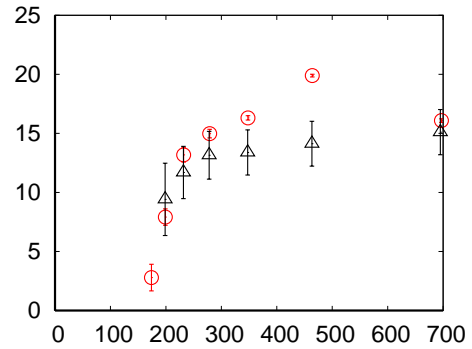


図 43 Gradient Flow 法による $N_F = 2 + 1$ QCD 状態方程式 (中間結果)。縦軸は ϵ/T^4 、横軸は T [MeV]。赤丸が Gradient Flow 法の結果で、黒三角は T -積分法による以前の結果。

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

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

最初のステップとして、 $m_{PS}/m_V = 0.65$ のやや重いクォーク質量領域で $N_F = 2 + 1$ QCD の状態方程式の研究を開始した。固定格子間隔法を採用し、CP-PACS Collaboration で生成したゼロ温度配位と同じシミュレーション・パラメータを用い、 $T = 170\text{--}700\text{MeV}$ に相当する有限温度配位を生成している。図 43 に、gradient flow を用いた状態方程式計算の中間結果を示す。Makino-Suzuki による状態方程式 (エネルギー・運動量テンソル) の評価方法では、flow time t についてゼロの極限を外挿する必要があるが、 $N_t \approx 4$ の高温格子以外では、安定した結果を得ることが出来た。図 43 で、赤丸が Gradient Flow 法によるエネルギー密度の結果で、黒三角は、 T -積分法により我々が以前計算した結果である。Gradient Flow 法による右端のデータ ($N_t = 4$) とその次のデータ ($N_t = 6$) では、 $t \rightarrow 0$ の外挿に不定性が有るが、その系統誤差はエラーバーに含まれていない。連続極限以外で Gradient Flow 法と T -積分法が一致する必然性はないが、有限の格子上で両者がほぼ一致していることは、方法の有用性を示唆している。

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

〈論文〉

1. A. Adare *et al.* (PHENIX Collaboration), arXiv:1509.07784
2. P. Bozek, Phys. Lett. B. **717** (2012) 287
3. A. Adare *et al.* (PHENIX Collaboration), Phys. Rev. Lett. **115** (2015) 142301
4. L. Adamczyk *et al.* (STAR Collaboration), Phys. Rev. Lett. **112** (2014) 032302
5. T. Nonaka, T. Sugiura, S. Esumi, H. Masui, X. Luo, arXiv:1604.06212
6. L. Adamczyk *et al.* (STAR Collaboration), Phys. Rev. Lett. **116** (2013) 112302
7. A. Adare *et al.* (PHENIX Collaboration), Phys. Rev. Lett. **112** (2014) 222301
8. J. Adam *et al.* (ALICE Collaboration), Phys. Rev. C **93** (2016) 034916
9. J. Adam *et al.* (ALICE Collaboration), Phys. Lett. B **746** (2015) 1-14
10. J. Adam *et al.* (ALICE Collaboration), Phys. Lett. B **749** (2015) 68-81
11. B. Abelev *et al.* (ALICE Collaboration), Phys. Lett. B **719** (2013) 29-41
12. B. Abelev *et al.* (ALICE Collaboration), arXiv:1603.03402
13. ALICE Addendum to the Technical Design Report of the Time Of Flight System, 2002, 4
14. 山口由高 他, 「加速器」 Vol. 12 (2015) 1-10
15. Ryo Iwami, S. Ejiri, K. Kanaya, Y. Nakagawa, T. Umeda, D. Yamamoto (WHOT-QCD Collaboration), Multipoint reweighting method and beta functions for the calculation of QCD equation of state, PoS (LATTICE 2014) (2015) 222.
16. R. Iwami, S. Ejiri, K. Kanaya, Y. Nakagawa, D. Yamamoto, and T. Umeda, Multipoint reweighting method and its applications to lattice QCD, Phys. Rev. D 92, No.9 (2015) ref.094507, pp.1-11.
17. T. Umeda, S. Ejiri, R. Iwami, K. Kanaya, Towards the QCD equation of state at the physical point using Wilson fermion, PoS (LATTICE 2015) (2016), to be published.

〈研究成果発表〉

[国際会議]

1. S. Mizuno, "Measurement of soft photon collective flow in $\sqrt{s_{NN}}=200$ GeV Au+Au collisions at RHIC-PHENIX experiment", DIS2015, April 27 - May 1, 2015, Dallas, Texas, USA, 一般講演
2. H. Nakagomi, "Measurement of charged hadron anisotropic flow in Cu+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV at RHIC-PHENIX", Quark Matter 2015, Sep 27- Oct 3, 2015, Kobe, Japan, ポスター
3. D. Watanabe, "Jet azimuthal distributions with high pT neutral pion triggers in pp 7 TeV and Pb-Pb 2.76 TeV collisions from ALICE at the LHC", Quark Matter 2015, Sep 27- Oct 3, 2015, Kobe, Japan, ポスター
4. H. Yamamoto, "Flow and correlation measurement in d+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV at PHENIX experiment", Quark Matter 2015, Sep 27- Oct 3, 2015, Kobe, Japan, ポスター
5. Y. Fukuda, "Analysis methods to extract possible flow and ridge signal in small systems and application to high multiplicity events in 510 GeV p+p collisions at RHIC PHENIX experiment", Quark Matter 2015, Sep 27- Oct 3, 2015, Kobe, Japan, ポスター
6. S. Kudo, "Charged hadron production and two-particle correlations in $^3\text{He}+\text{Au}$ collisions at

- sqrt(sNN) = 200 GeV measured with PHENIX detector”, Quark Matter 2015, Sep 27- Oct 3, 2015, Kobe, Japan, ポスター
7. N. Tanaka, ”HBT measurements with respect to event plane and jet axis in Pb-Pb 2.76 TeV collisions from ALICE”, Quark Matter 2015, Sep 27- Oct 3, 2015, Kobe, Japan, ポスター
 8. M. Hirano, ”Detector R&D of the Forward Calorimeter with PAD readout for the ALICE upgrade”, Quark Matter 2015, Sep 27- Oct 3, 2015, Kobe, Japan, ポスター
 9. O. Busch, ”Exploring the QGP with Jets in ALICE experiment”, Universe Evolution and Matter Origin, TGSW2015, Sep 28-30, 2015, Tsukuba, Japan, 一般講演
 10. H. Nakagomi, ”Flow and correlation results from RHIC-PHENIX experiment”, Universe Evolution and Matter Origin, TGSW2015, Sep 28-30, 2015, Tsukuba, Japan, 一般講演
 11. O. Busch, ”Jets in p-Pb Collisions Measured with ALICE”, QCD challenges at the LHC : from pp to AA, Jan 18-22, 2016, Taxco, Mexico, 招待講演
 12. S. Esumi, ”Experimental evidences for hydrodynamic flow in heavy-ion collisions”, ATHIC2016, Feb 15-19, 2016, New Delhi, India, 招待講演
 13. T. Nonaka, ”Importance of separated efficiencies for positively and negatively charged particles for cumulant calculations”, ATHIC2016, Feb 15-19, 2016, New Delhi, India, 一般講演
 14. H. Nakagomi, ”Latest results of charged hadron flow measurements in CuAu collisions at RHIC-PHENIX”, WWND2016, Feb 28 - Mar 5, 2016, Guadeloupe, 一般講演
 15. A. Ozawa, ”Mass measurements with Rare-RI Ring at RIBF 2015 SKLTP-BLTP”, Joint Workshop on Physics of Strong Interaction 2015, 10/30-11/2, Ronghu Lake Hotel, Guilin, China, 招待講演
 16. A. Ozawa, ”Day-one experiment with R3 OEDO-SHARAQ”, International Collaboration Workshop, 2015, 9/8-9, 東大 CNS, 一般講演
 17. T. Umeda, S. Ejiri, R. Iwami, K. Kanaya 「Towards the QCD equation of state at the physical point using Wilson fermion」 ,
The XXXIII International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2015) (Kobe Convention Center, Kobe, Japan, 7.14-18, 2015).
 18. E. Itou, H. Suzuki, Y. Taniguchi, T. Umeda 「(2+1)-flavor QCD Thermodynamics from the Gradient Flow」 ,
The XXXIII International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2015) (Kobe Convention Center, Kobe, Japan, 7.14-18, 2015).
 19. Y. Taniguchi 「QCD energy momentum tensor at finite temperature using gradient flow」 ,
RBRC Workshop on Lattice Gauge Theories 2016 (BNL, NY, USA, 3.9-11, 2016).

[国内学会・研究会]

1. T. Chujo, ”Evolution of the ALICE computing model in Run 3”, 2015 WLCG Collaboration Workshop, April 11-12, 2015, Okinawa, Japan, 一般講演
2. T. Chujo, ”Correlation measurements with jets”, Mini-workshop on jet physics in ALICE at the LHC Run2, April 14-15, 2015, Wuhan, China, 一般講演
3. O. Busch, ”Jet Physics with ALICE from LHC run 1 to LHC run 2”, Mini-workshop on jet physics

- in ALICE at the LHC Run2, April 14-15, 2015, Wuhan, China, 一般講演
4. D. Watanabe, "Jet azimuthal distribution with high pT neutral pion triggers in pp 7 TeV and PbPb 2.76 TeV", Mini-workshop on jet physics in ALICE at the LHC Run2, April 14-15, 2015, Wuhan, China, 一般講演
 5. N. Tanaka, "Azimuthally sensitive HBT w.r.t. jet axis in Pb+Pb collisions", Mini-workshop on jet physics in ALICE at the LHC Run2, April 14-15, 2015, Wuhan, China, 一般講演
 6. S. Esumi, "Current status and plan of PHENIX experiment at RHIC-BNL as US-J program", The 37-th meeting of the US/Japan joint committee for cooperation in high-energy physics, Apr 16-17, 2015, Richland, Washington, USA, 招待講演
 7. J. Bhom, "Multiplicity dependence of two particle correlation in $\sqrt{s_{NN}}=7$ TeV pp collisions at LHC-ALICE experiment", KPS2015, April 22-24, 2015, Daejeon, South Korea, 一般講演
 8. S. Esumi, "Recent QGP studies at LHC/RHIC and future plans at Fair/J-parc", QGP Seminar at J-parc/JAEA, May 13, 2015, Tokai, Japan, 招待講演
 9. O. Busch, "Jet fragmentation in pp and PbPb", ALICE Jet Workshop 2015, May 13-15, 2015, Yale University, USA, 一般講演
 10. D. Watanabe, " π 0-jet correlations in pp and Pb-Pb collisions", ALICE Jet Workshop 2015, May 13-15, 2015, Yale University, USA, 一般講演
 11. T. Chujo, "Run2 di-jet + soft hadron & HBT measurements", ALICE Jet Workshop 2015, May 13-15, 2015, Yale University, USA, 一般講演
 12. H. Yokoyama, "EMCAL+DCAL jet triggering", ALICE Jet Workshop 2015, May 13-15, 2015, Yale University, USA, 一般講演
 13. S. Esumi, "Beam Energy Scan Program at RHIC", J-parc Heavy-Ion workshop, Sep 2, 2015, Tsukuba, Japan, 招待講演
 14. S. Esumi, "Experimental studies on Quark Gluon Plasma", 有限温度密度系と格子シミュレーション研究会, Sep 5, 2015, 筑波大学, 招待講演
 15. S. Esumi, "RHIC-BES program as a path towards future HIC(sPHENIX/J-parc)", 4th Japan-Korea PHENIX Collaboration Workshop meeting, Oct 19, 2015, Seoul, Korea, 招待講演
 16. S. Esumi, "Quark Gluon Plasma (QGP) Research with High-Energy Heavy-Ion Collisions", 2015年度 在日科協 拡大碩博セミナー, Nov 14, 2015, 学士会館、東京、招待講演
 17. T. Nonaka, "Higher order cumulant of net-proton distribution", CiRfSE workshop, 平成 28 年 1 月 18-19 日、筑波大学、招待講演
 18. T. Sugiura, "Rapidity dependence of net-charge distribution", CiRfSE workshop, 平成 28 年 1 月 18-19 日、筑波大学、招待講演
 19. S. Esumi, 「シリコン電磁カロリメータ等」、CiRfSE 光量子計測器ワークショップ、平成 28 年 3 月 2 日、筑波大学、招待講演
 20. 平野勝大, 「LHC-ALICE 実験のアップグレードに向けた超前方光子測定用電磁カロリメータ Si PAD 検出器の性能評価」、第 71 回年次大会、2016 年 3 月 19 - 22 日、東北学院大学 泉キャンパス 一般講演
 21. 塩谷知弘, 「Measurement of collective flow via two-particle correlation method in $\sqrt{s_{NN}} = 200\text{GeV}$ $^3\text{He}+\text{Au}$ collisions at RHIC-PHENIX」、第 71 回年次大会、2016 年 3 月 19 - 22 日、東北学院大学

泉キャンパス 一般講演

22. 金 秉徹, 「ALICE FoCal-E PAD 検出器の信号読み出しに向けた VMM2 チップの性能評価」、第 71 回年次大会、2016 年 3 月 19 – 22 日、東北学院大学 泉キャンパス、一般講演
23. 佐藤一輝, 「MRPC 飛行時間測定器の時間分解能向上を目指すガスギャップ幅の最適化」、第 71 回年次大会、2016 年 3 月 19 – 22 日、東北学院大学 泉キャンパス、ポスター
24. 小沢顕, 「RI ビーム飛行時間検出器の開発」、H26 年度 HIMAC 共同利用研究成果発表会、2015 4/20-21, ホテルポートプラザちば、Chiba, Japan、一般講演
25. 小沢顕, 「固体水素標的を用いた陽子ドリップライン近傍核生成法の開発」、H26 年度 HIMAC 共同利用研究成果発表会、2015 4/20-21, ホテルポートプラザちば、Chiba, Japan、一般講演
26. 小沢顕, 「Present status of Rare-RI Ring project at RIBF」, 「実験と観測で解き明かす中性子星の核物質」第 4 回研究会: 2015, 9/17-18, 湘南国際村センター、一般講演
27. 鈴木伸司, 「RI ビーム飛行時間検出器の開発」、日本物理学会 2015 年秋季大会、大阪市立大学、2015 年 9 月 25,28 日、一般講演
28. 鈴木伸司, 「質量測定用飛行時間検出器の開発」、日本物理学会第 71 回年次大会、東北学院大学、2016 年 3 月 19,22 日、一般講演
29. 伊藤悦子, 鈴木博, 谷口裕介, 梅田貴士 「グラディエント フローを用いた $N_f=2+1$ QCD の熱力学量の測定」,
日本物理学会 (大阪市大, 大阪, 9.25-28, 2015).
30. 谷口裕介, 石見涼, 梅田貴士, 江尻信司, 金谷和至, 北沢正清, 鈴木博, 若林直輝 「Gradient flow で見る有限温度 QCD」,
日本物理学会 第 71 回年次大会 (東北学院大, 仙台, 3.19-22, 2016)
31. 白銀瑞樹, 江尻信司, 金谷和至, 北沢正清, 石見涼 「Quenched QCD の一次相転移点における潜熱と圧力ギャップ」,
日本物理学会 第 71 回年次大会 (東北学院大, 仙台, 3.19-22, 2016)
32. 石見涼, 江尻信司, 金谷和至, 大野浩史, 梅田貴士, 吉田信介 「O(4) スケーリングを用いた有限温度・密度 QCD の相転移線」,
日本物理学会 第 71 回年次大会 (東北学院大, 仙台, 3.19-22, 2016)

4 環境エネルギー材料研究拠点 活動報告

環境エネルギー材料研究拠点

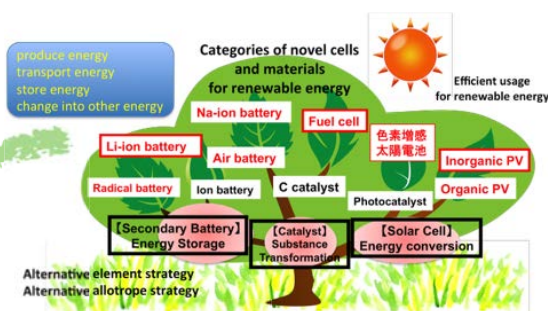
Research Core for Developing Energy and Environment-friendly Materials

持続可能な社会の構築に向け、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・材料を開発する。

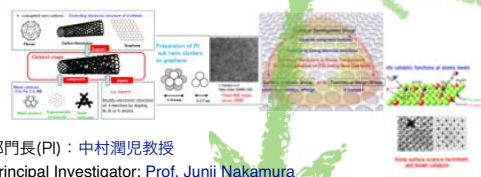
拠点長(コーディネータ)：鍋島達弥教授

Development of innovative substances and materials for highly efficient energy conversion, storage and usage of renewable energy to create a sustainable society.

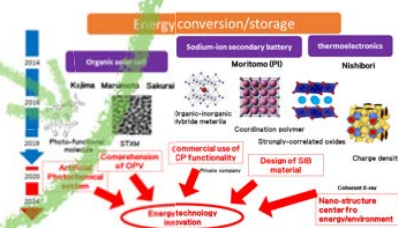
Coordinator : Prof. Tatsuya Nabeshima



物質変換材料部門
Division of Materials for Chemical Conversion



エネルギー貯蔵・変換物質部門
Division of Materials for Energy Storage and Conversion



独自の基礎研究を基盤とした革新的環境エネルギー材料の創出

<= オールジャパン「環境エネルギー材料コンソーシアム」の構築と牽引

Creation of Innovative Materials for Sustainable Energy on the Basis of Original Basic Research

<= All Japan "Consortium of Sustainable Energy Materials"

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、逆問題研究推進室、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 年度に行った研究力強化策として、環境エネルギーに係わる研究をさらに推進するため、バイオエネルギー研究チームを立ち上げ、より多角的な観点から連携融合型の研究を推進できるよう体制を整えた。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ている。

(1) 物質変換材料部門の研究

白金に代わる燃料電池触媒として期待される炭素触媒に関して、活性点を形成する窒素種を特定するこ

とに成功した。これにより安価で豊富なグラファイト系炭素材料を用いた燃料電池電極触媒の設計指針が明確になった。今後の燃料電池の本格普及に大きく貢献することが期待される。また、窒素原子をドーピングしたグラファイト表面において、無磁場下にもかかわらず約 100 テスラもの超高磁場を 2 層グラフェンに垂直に印加した場合に相当するランダウ準位が出現することを明らかにした。グラファイト系炭素材料の特異な性質が新たに見出されたことを意味しており、電子材料や触媒・電池などの環境材料への新たな応用展開が期待される。さらに、高い Q 値を示す共役ポリマーマイクロ球体共振器を用いて、光誘起モード分裂現象を見出した。光によるマイクロ共振器の特性の変調やより高い共振特性が実現し、今後の光デバイスへの応用が期待できる。

(2) エネルギー貯蔵・変換物質部門の研究

時間分解分光の新しい解析法を提案し、複数の有機薄膜太陽電池に適用した。これにより、電荷生成機構を明らかにすることができた。また、ヘテロ型有機薄膜太陽電池をフェムト秒レーザーで励起し、電荷の再結合速度が電荷密度に強く依存することを見出した。ナトリウムイオン二次電池に関して、放電容量と放電レートとの相関を明らかにした。また、プルシャンブルー類似体において、イオン拡散係数と格子定数との相関を明らかにした。さらに、トポロジカル解析にとり LiCoO₂ の結合様式を解明した。他方、新しい電池型熱発電阻止を提案し起電力の発生を実証した。また、天然鉱物熱電変換材料の構造物性を明らかにした。

[国際会議]

1. 平成 27 年 9 月 28 日～30 日、つくば国際会議場エポカルで開催された TGSW2015 (Tsukuba Global Science Week 2015) 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 1 日のシンポジウムを開催した。午前中は宇宙史国際研究拠点と合同で行い、本拠点に関係するものとしては、Prof. Bo Iversen によるナノクリスタルの合成、機能、および放射光を利用した構造解析についての講演と、Prof. Junfa Zhu によるグラフェンオキシドの機能や特に X 線を用いた構造解析についての講演の二つである。午後はそれぞれ会場を分け、本拠点では先導的な研究を行っている研究者 8 名が発表を行った。計 10 件の講演はいずれも現在の社会が直面する環境エネルギー問題の解決に貢献する物質・材料開発につながるハイレベルな基礎研究についての発表であり、活発な討論が行われた。

[国内学会・研究会]

1. TIMS 研究交流会 (平成 27 年 7 月 24 日、第一エリア 1 D 204 室) を共催した。TIMS のメンバーによる 4 件の発表と、電通大の平野誉教授、および東工大の宍戸厚准教授の招待講演を行った。参加者 65 名。
2. 数理物質融合科学センター環境エネルギー材料研究拠点内に新設したバイオエネルギー研究チームの研究発表会を平成 27 年 12 月 7 日に総研 B 棟 609-2 号室で開催した。発表者は連携教員の北将樹准教授、加納英明准教授、辻村清也准教授の若手教員 3 名。
3. 国際ナノアーキテクトニクス研究拠点との共催で、MANA-RSC Symposium: Materials for Energy Generation and Storage を平成 27 年 10 月 15 日-16 日、NIMS 並木地区で開催した。会議ではオックスフォード大学の Fraser Armstrong 教授をはじめとして、エネルギー関連分野で中心的な役割を果たしている研究者による 14 件の講演と若手研究者による 38 件のポスター発表が行われた。
4. 平成 28 年 1 月 18 日、19 日、第 2 回 CiRfSE ワークショップを開催した。18 日は各拠点の成果発表会

および運営協議会が行われ、19日午後は各拠点に分かれて講演会を行った。環境エネルギー材料研究拠点では東大物性研の吉信淳教授、NIMS 梅澤直人氏、森利之氏、AIST 大谷実氏が招待講演を行った。学内発表者は6名。参加人数29名。

〈その他特記事項〉

1. 全学戦略枠の西堀教授と共同で研究を行う国際テニュアトラック教員（笠井秀隆助教）を選考し、平成27年度よりデンマークオーフス大学のアイバーセン教授との国際連携の実施を決定した。環境エネルギー材料研究における国際放射光利用拠点の形成に向けて活動を開始した。
2. バイオエネルギー研究チームを設立した。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を設置。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した研究チームである。

4.1 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

Stephan Barcikowski (ドイツ University of Duisburk-Essen 教授)

王 貴昌 (中国 南開大学化学部 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)

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に関して顕著な成果を挙げ Science 誌で論文発表した。すなわち、これまで論争になっていた窒素ドーパカーボン触媒の活性点を形成する窒素種を特定した。これにより安価で豊富なグラファイト系炭素材料を用いた燃料電池電極触媒の設計指針が明確になった。高価で希少な白金を代替する触媒開発の道筋が切り拓かれたことを意味しており、今後の燃料電池の本格普及に大きく貢献することが期待される成果である。

また、窒素ドーパカーボンの基礎物性に関して新しい現象を見出し、Scientific Reports で論文発表した。すなわち、窒素原子をドーピングしたグラファイトの原子レベルで平坦な表面において、無磁場下にもかかわらず約 100 テスラもの超高磁場を 2 層グラフェンに垂直に印加した場合に相当するランダウ準位が出現することを、詳細な計測から明らかにした。グラファイト系炭素材料の特異な性質が新たに見出されたことを意味しており、グラフェンのバンドギャップ制御など、電子状態制御を利用した電子材料や触媒・電池などの環境材料への新たな応用展開が期待される成果である。

さらに、球形ポリマーにおいて新しい光物性を見出し、Scientific Reports で論文発表した。すなわち、共役ポリマーマイクロ球体共振器を用いて、光誘起モード分裂現象を見出した。光によるマイクロ共振器の特性の変調やより高い共振特性が実現し、今後の光デバイスへの応用が期待できる。

(1) 固体高分子型燃料電池カソード電極触媒の白金代替材料開発の研究

燃料電池は水素と酸素から水を生成する際に生じるエネルギーを電気として取り出す発電装置であり、発電時に温室効果ガスの二酸化炭素や有毒ガスを排出せず、化石燃料を燃焼させる従来の発電システムに比べて高い発電効率を有するなどの優れた特徴をもっている。しかし、燃料電池の電極で化学反応を担う触媒材料として使用されている白金が高価で希少なレアメタルであることが、燃料電池の大規模な普及を妨げる要因の一つとなっている。このため、本研究グループは白金に代わる安価で豊富な材料として炭素材料に着目してきた。既に、複数の研究グループによって炭素材料に窒素原子を導入すると白金に匹敵するカソード電極触媒性能や耐久性が出現することが報告されており、白金を代替する最も有力な燃料電池カソード電極触媒の候補材料の一つとして注目を浴びてきている。しかし、実働環境下(加圧をしない空気下で、高温且つ酸性雰囲気条件)での触媒特性は白金には及んでいないのが現状である。この原因の一つとして、触媒機能をもたらす部位(触媒活性点)が未解明であることが挙げられ

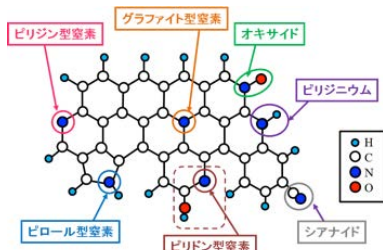


図 44 窒素ドーピンググラファイトに含まれる様々な種類の窒素種

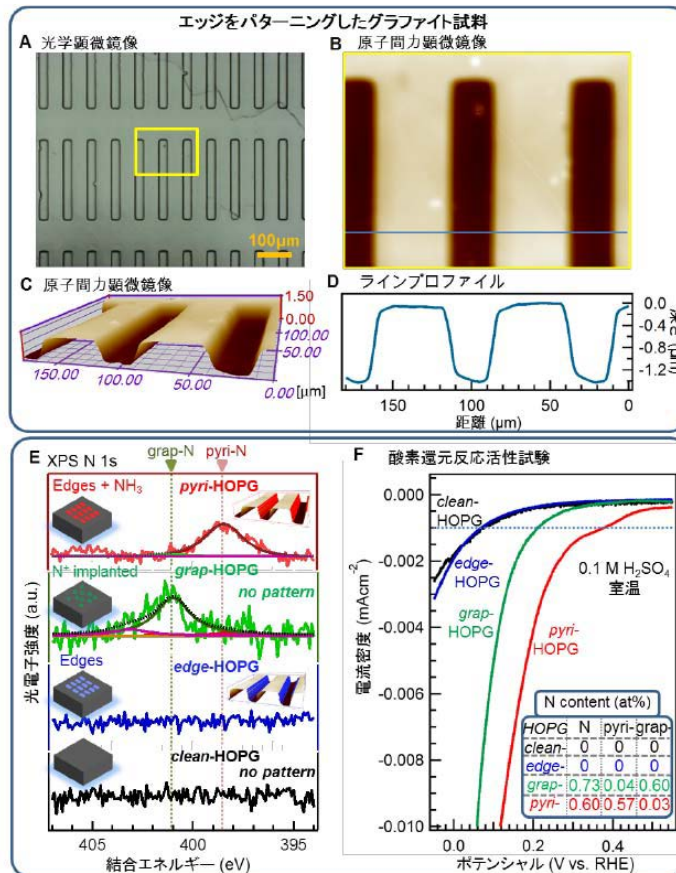


図 45 窒素ドーピンググラファイトモデル触媒の構造と電子状態および酸素還元反応特性. A エッジパターンをしたグラファイトモデル触媒の光学電子顕微鏡. B 図 A で示した試料の原子間力顕微鏡像. C 図 B で示した像を 3D 表示させた図. D 図 B の青線部分のラインプロファイル (断面形状). E 各モデル触媒試料の X 線光電子分光の N 1s コアレベルスペクトル pyri-HOPG: ピリジン型窒素をエッジにドーピングしたグラファイト, grap-HOPG: グラファイト型窒素をドーピングしたグラファイト, edge-HOPG: エッジだけを導入したグラファイト, clean-HOPG: 清浄なグラファイト. F 酸素還元反応試験結果 (測定試料は図 E の XPS 結果で示した試料と対応, 図中の表は窒素含有量 (at%) を示す)

る。もし触媒活性点が特定できれば、特定した活性点の密度を増やすという強力な触媒設計指針ができあがり、実用に資する白金フリー触媒の開発を加速することができる。

窒素を導入した炭素材料には図 44 に示すような様々な種類の窒素種が混在しており、どの窒素種が触媒活性をもたらす、どの部位が触媒活性点であるかについては様々な提案が出されており、明らかにはされていない。特に、炭素との結合を 2 つ持つピリジン型窒素と呼ばれる窒素種と、炭素との結合を 3 つ持つグラファイト型窒素と呼ばれる窒素種のどちらが活性をもたらすかで論争となっていた。そこで、本研究では特定の窒素種だけを持ついくつかのモデル触媒を調製し、触媒特性を比較・解析することにより、触媒活性点の特定を試みた。

本研究ではまず、ピリジン型窒素とグラファイト型窒素のどちらが触媒活性点を形成しているかを特定するために、ピリジン型窒素のみを導入したグラファイト、グラファイト型窒素のみを導入したグラファイト、エッジ構造を持ち窒素を導入しないグラファイト、および純粋なグラファイトの 4 種類のモ

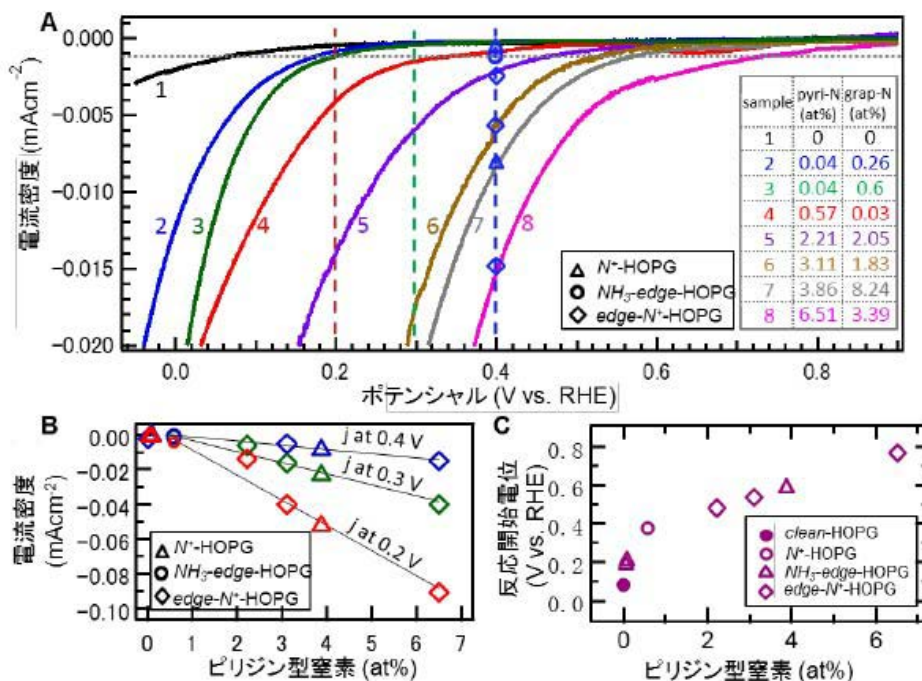


図 46 モデル触媒の酸素還元反応試験. A 窒素含有量の異なるモデル触媒で行った酸素還元反応試験結果. B 図 A で測定した各触媒の 0.2、0.3、0.4 V vs RHE での電流密度とピリジン型窒素量の相関関係. C 図 A で測定した各触媒で $1\mu\text{Acm}^{-2}$ の電流密度が得られるときの酸素還元反応開始電位とピリジン型窒素量の相関関係.

デル触媒を調製した。このうち、ピリジン型窒素は一般的に炭素のエッジ部位に導入される特徴を持つため、図 45A～D に示すような深さ 1 マイクロメートル程度の溝を数千個作成してエッジ構造をグラファイトに導入し、その後、窒素をエッジにドーピングすることで調製した。図 45E は調製したそれぞれのモデル触媒の X 線光電子分光 (XPS) による窒素 1s 軌道のコアレベルスペクトルの測定結果である。導入した窒素の種類によって結合エネルギーが異なっており、それぞれの試料で異なる種類の窒素種が含まれていないことがわかる。図 45F はこれらのモデル触媒試料で行った、酸素還元反応活性試験の結果である。ピリジン型窒素を導入したモデル触媒では、他の触媒に比べて非常に小さい過電圧 (高いポテンシャル値) で電流が流れ始めており、触媒活性が高いことがわかった。図 46 はピリジン型窒素の量を増やした場合の酸素還元反応活性試験の結果である。図 46B に示すように 0.2～0.4(V vs RHE) のどのポテンシャル値で見ても、ピリジン型窒素の導入量に比例して電流密度の大きさが増加していることがわかる。このような、ピリジン型窒素の量と電流密度の大きさとの間に見られる相関関係は、窒素をドーピングしたグラフェン粉末触媒でも得られた (図 47)。これは、モデル触媒で明確に得られた知見が実際の粉末触媒と対応していることを意味している。実際、モデル触媒で得られたピリジン型窒素あたりの活性度と、グラフェン粉末触媒で得られるピリジン型窒素あたりの活性度とが一致することもわかった。以上の結果より、グラファイトやグラフェンなどの炭素材料に触媒活性点を形成している窒素種がピリジン型窒素であることが我々の研究によって特定された。

我々はさらに、ピリジン型窒素の導入によって炭素材料のどの部位に活性点が形成したのかを調べた。我々のこれまでの研究により、ピリジン型窒素が炭素材料に導入されると、ピリジン型窒素の隣の π 共役系を形成している炭素原子に局在化した電子準位が形成され、これがルイス塩基として機能すること

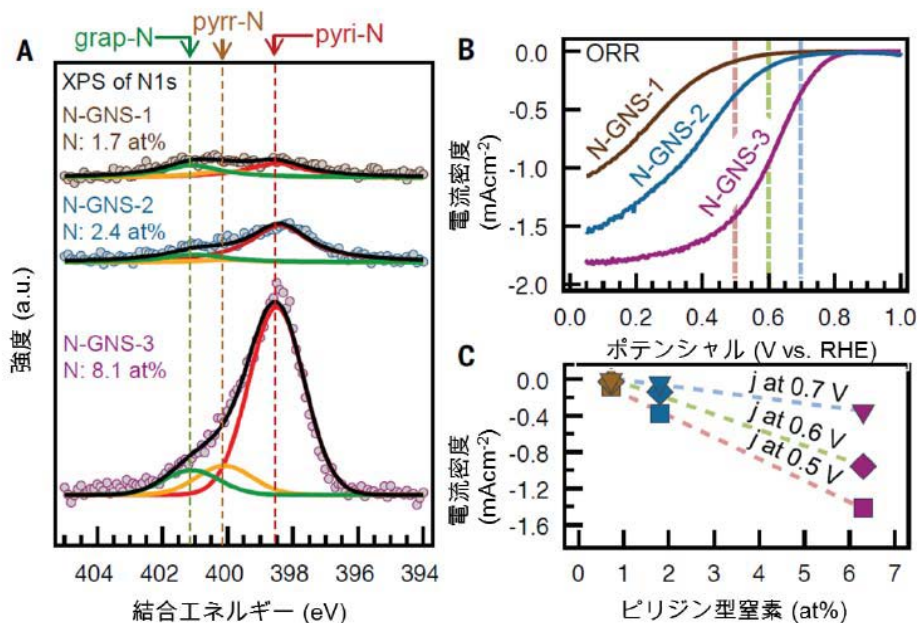


図 47 窒素ドーピンググラフェン (N-GNS) 触媒の XPS と酸素還元反応活性試験. A N-GNS の XPS 窒素 1s 軌道のコアレベルスペクトル. B 図 A に対応する各 N-GNS 触媒の酸素還元反応活性試験. C 図 B で測定した各触媒の 0.5、0.6、0.7 V vs RHE での電流密度とピリジン型窒素量の相関関係.

が示唆されていた。このような部位に、酸素還元反応の最初の段階である酸素吸着が起こる可能性がある。そこで本研究ではまず、図 45 に示したモデル触媒を用いて、実際にピリジン型窒素の導入によってルイス塩基点が形成するかどうかを、ルイス酸である二酸化炭素の吸着特性を調べることで検証した。この結果、ピリジン型窒素を導入したグラファイトにのみ二酸化炭素が吸着することが昇温脱離計測 (TPD) から示された (図 48C)。次に、酸素還元反応試験の前後で試料の窒素の状態がどのように変わるかを XPS によって測定した。この結果、酸素還元反応の中間体と考えられる OH 基がピリジン型窒素の隣の炭素に存在していることが示された (図 48A - B)。以上の結果より、窒素ドーピング炭素材料の酸素還元反応に対する触媒活性点は、ピリジン型窒素の隣のルイス塩基となっている炭素原子であると結論付けられた。

最後に、窒素ドーピング炭素材料で起こっていると考えられる酸素還元反応の触媒サイクルを図 49 に模式的に示す。ピリジン型窒素の隣のルイス塩基となっている炭素に酸素分子が吸着し、逐次的に還元されて過酸化水素になる 2 電子過程と、水になる 4 電子過程の両方のサイクルが起こっていることが考えられる。

触媒特性をもたらす窒素種を特定したことで、安価で豊富なグラファイト系炭素材料を用いた燃料電池電極触媒の設計指針が明確になった。これは、高価で希少な白金を代替する触媒開発の道筋が切り拓かれたことを意味している。本研究の成果が今後の燃料電池の本格普及に大きく貢献することが期待される。

(2) 平坦なグラファイト表面に無磁場下で現れるランダウ準位の起源の解明

一般に磁場中の荷電粒子は速度と垂直なローレンツ力を受けるために円運動 (サイクロトロン運動) をする。量子力学ではこの円運動が量子化され、ランダウ準位という離散的なエネルギー準位に電子状態

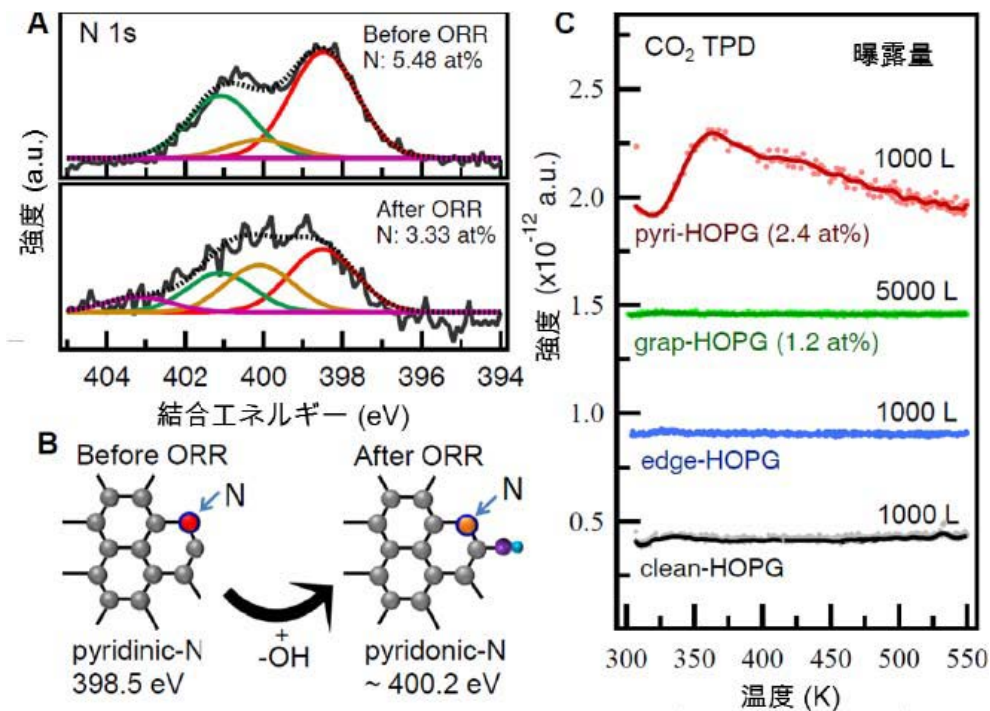


図 48 A, B 酸素還元反応前後での触媒表面の XPS 窒素 1s 軌道のコアレベルスペクトルと構造変化の模式図. C. 各モデル触媒で行った二酸化炭素の TPD

が分裂する。反磁性材料に外部磁場を印可した場合は、この外部磁場を打ち消す方向にサイクロトロン運動がおりランダウ準位が形成することが知られている (図 50a,c)。一方、単層グラフェンや 2 層グラフェンに外部磁場を印可した場合、通常反磁性材料とは異なる法則に従ったランダウ準位が形成することが知られている (図 50b,d,e)。この結果、通常は室温での観測が困難な、量子ホール効果と呼ばれる電気抵抗標準を決定することに用いられている現象が、グラフェンの場合は室温でも観測されるなど、様々な興味深い特性が数多く報告されており注目されている。

最近、このグラフェンのランダウ準位が外部磁場を印可してないにもかかわらず出現することが、我々のグループを含めて複数のグループから報告されている。これまで、このような無磁場下で出現するランダウ準位は、主に歪が誘起する擬磁場 (実際には外部から磁場をかけていないのに見えているように見える磁場) によって理解されてきた。今回、歪が無い平坦な表面でもランダウ準位が生成することが我々の研究から新たに見出された。

我々は、窒素をドーブしたグラファイト表面の原子構造を走査トンネル顕微鏡 (STM) によって観察し、局所的な電子状態を走査トンネル分光 (STS) により計測した。この結果、原子レベルで平坦であることが STM ではっきりと示された表面部分 (図 51a,c) において、外部磁場を印可してないにもかかわらず、2 層グラフェンに垂直に約 100 テスラもの磁場を印可した場合の応答に相当するランダウ準位が現れていることがわかった (図 51b,d)。また、表面の広い範囲で STS 測定を行った結果、約 300 か所まで類似の複数のピークを持つ STS スペクトルが得られる一方で、他の約 1,500 か所では過去に観察された、局在化した 1 つの電子準位ピークのみを持つ場合や、放物線形状のスペクトルや V 字型のスペクトルなどが観察され、表面の電子状態が不均一であることも分かった。

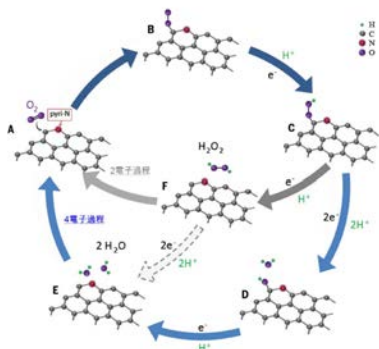


図 49 窒素ドーピング炭素材料で起こっている酸素還元反応の触媒サイクルの模式図

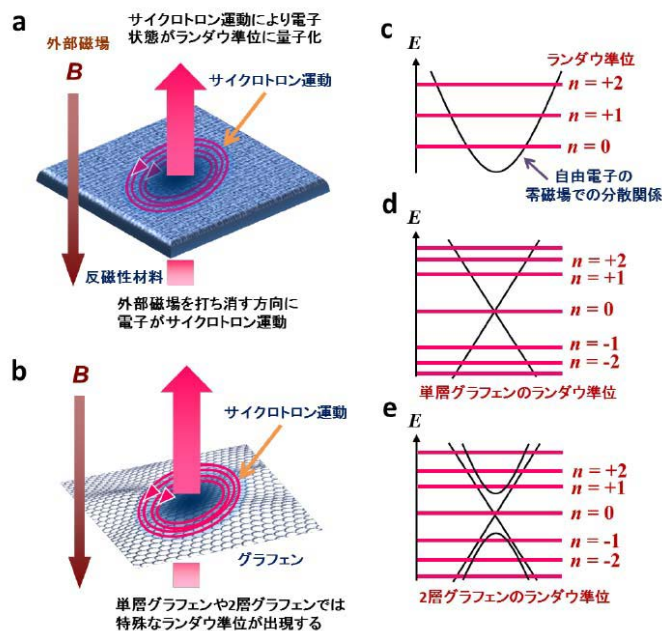


図 50 a, b, 反磁性材料とグラフェンそれぞれに垂直に磁場を印加した際に現れるランダウ準位の概念図。c, 自由電子の零磁場での分散関係 (黒線) とランダウ準位 (赤線) の概念図。d, e, 単層グラフェンと 2 層グラフェンそれぞれのバンド図 (黒線) とランダウ準位 (赤線) の概念図。

観察された 2 層グラフェンのランダウ準位は既存の歪が誘起する擬磁場のモデルでは説明できないため、我々が過去に提唱したドメインモデルと呼ばれる無磁場下でのランダウ準位発生メカニズムで検討をした。まず、走査トンネル顕微鏡の広範囲の詳細な画像解析を行い、窒素が 0.04at% (表面炭素原子の個数に対して 0.04%) ドープされていることを明らかにした。次に、様々な濃度の窒素ドーピンググラファイトを同じ調製方法で作成して X 線光電子分光により解析を行い、0.04at% の窒素濃度の場合には、ドーピングされている窒素の約 90% が正に帯電しているグラファイト型窒素と呼ばれる窒素種であることを明らかにした (図 52)。そして、このグラファイト型窒素の周辺の炭素原子が感じるポテンシャルを第一原理電子状態計算法による計算によって調べた。この結果、グラファイト型窒素近傍でポテンシャルに大きな違いが認められ (図 53)、炭素のポテンシャルが窒素に近いほど低くなるような勾配が形成していることがわかった。すなわち、ドメイン境界に沿ったポテンシャル等高線とドメイン中央に向いたポテンシャル勾配とがそれぞれ形成され、表面にはポテンシャルドメインが存在していることが示された (図 54)。電子はこのドメインに沿って動き、あたかも磁場中でのサイクロトロン運動のように動きが制御されてランダウ準位が形成したというモデル (ドメインモデル) で、今回の測定結果が理解できることが示された。

(3) 直接的アルケニル化反応によるアリーレンビニレン型 π 共役高分子の合成

π 共役高分子は高分子半導体として機能することから、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。この合成では、右田-小杉-Stille 反応や鈴木-宮浦反応のように有機金属化

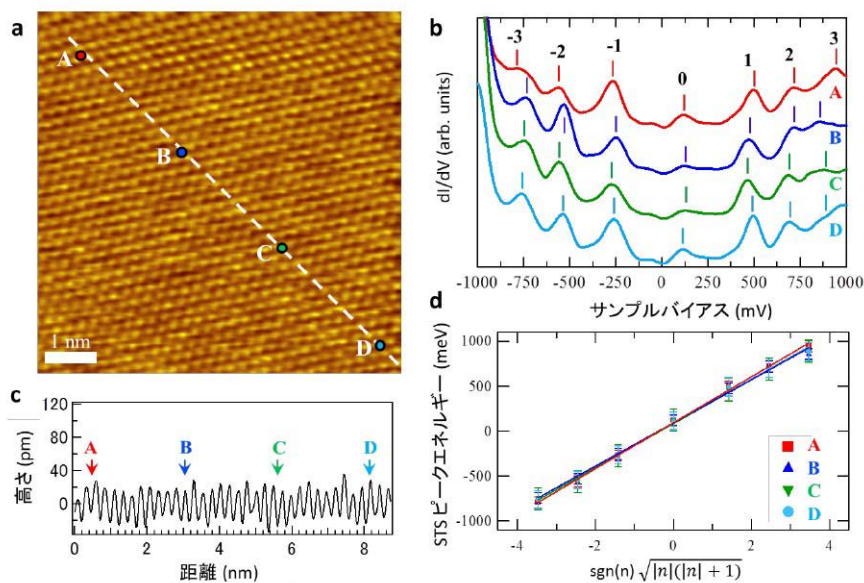


図 51 a, 窒素ドープグラファイト表面の STM 像。b, STM 像中の A~D の各点上で測定した STS スペクトル。通常のグラファイトには表れないピークが複数存在しており、それぞれ $0 \sim \pm 3$ でラベル付したピーク位置が 2 層グラフェンに垂直に約 100 テスラの外部磁場を印可した際に出現するランダウ準位のエネルギー位置と一致することがわかった。c, STM 像中の破線のラインプロファイル。原子の凹凸以外に歪に由来する凹凸が存在しておらず原子レベルで平坦であることを示している。d, STS スペクトルのピーク位置 (縦軸) を 2 層グラフェンのランダウ準位 (横軸) と照らし合わせた図 (横軸の n がピークにラベル付した $0 \sim \pm 3$ の値に対応)。

合物をモノマーとして使用する必要がないため、低環境負荷な高分子合成手法となる。本年度の研究では、この C-H 結合を直接反応点とする合成戦略を溝呂木一 Heck 反応に拡張し、芳香族化合物とビニル化合物を連結する直接的アルケニル化反応によるアリーレンビニレン型 π 共役高分子の合成について検討した。(図 56)

これまでの研究から、1-位に配向基 (directing group: DG) を導入したピロール誘導体では、オルトメタル化反応を経由して α 位の C-H 結合における反応が効率よく進行することが確認されている。これを直接的アルケニル化反応にも活かすことでピロール誘導体とスチレンのクロスカップリング反応がほぼ定量的に進行することを確認した。次にこの反応を重縮合に適用して最適化し、結合位置・幾何構造が制御されたアリーレンビニレン型 π 共役高分子を得た。得られたポリマーは電界効果型トランジスタ (FET) に組み込むことで、p 型半導体として機能することを確認した (図 57)。

この合成法は、芳香族化合物とビニル化合物の酸化的 C-H/C-H クロスカップリング反応を高分子合成に活用した初めての例であり、他のモノマーにも適用できることから、今後さらに多様な高分子半導体合成への展開が期待される。

(4) 高分子材料の末端構造が光電変換特性に及ぼす影響

これまでに、C-H 結合を反応点とする重縮合反応を用いることで、高純度かつ高分子量の共役高分子材料を簡便に合成することを可能にしてきた。さらに、この手法で合成した高品質な高分子は、従来法で合成した同じ構造の高分子に比べて高い光電変換機能を示すことを明らかにしてきた。今回、変換効率が向上した要因を明確にするために、1. 高分子の末端構造、2. 不純物となる Pd の残存量、3. 分子量に着目した検証を行った。まず、分子構造は同一であるが、末端構造、Pd の残存量、分子量が異なる 4

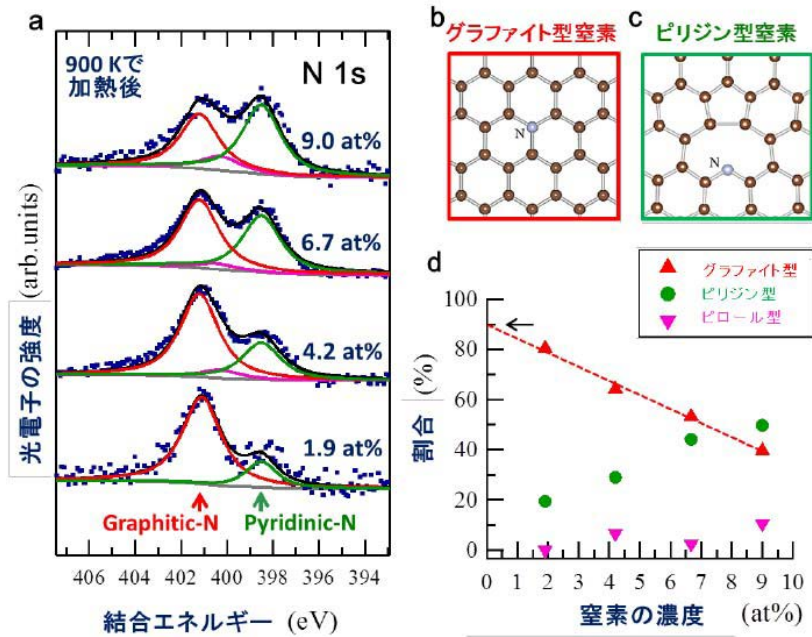


図 52 a, 様々な窒素濃度の窒素ドーピンググラファイト表面の XPS スペクトル。b, グラファイト型窒素 (Graphitic-N) の模式図。c, ピリジン型窒素 (Pyridinic-N) の模式図。d, 各窒素濃度の窒素ドーピンググラファイト表面に含まれる窒素種の相対的な割合。

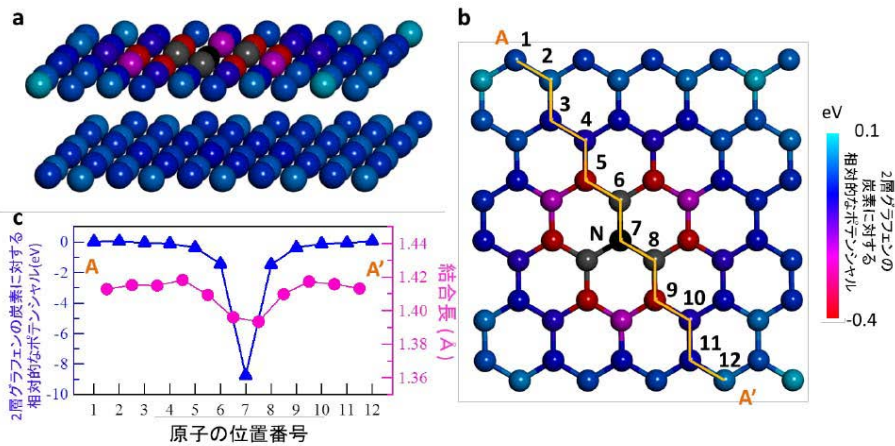


図 53 a, 第一原理計算で調べた 2 層グラフェンモデル。上の層の黒い部分が窒素原子で残りは炭素原子。b, 各原子のオンサイトポテンシャル。a, 図 b の AA' 間における各原子のオンサイトポテンシャル (左軸, 三角) と各原子間の結合長 (右軸, 丸)。

種類の高分子サンプルを合成した。フラレン誘導体と混合したバルクヘテロジャンクション型の有機薄膜太陽電池において、それぞれの高分子サンプルの光電変換特性を比較することで、高分子の末端構造が変換効率に及ぼす影響が最も大きいことが明らかとなった (図 58)。具体的には、材料中に存在するごくわずかな Br 末端がキャリアの移動を障害し、変換効率を低下させていることを明らかにした。末端構造や不純物、分子量などの効果を系統的に比較検討した研究はこれまでになく、本研究によって

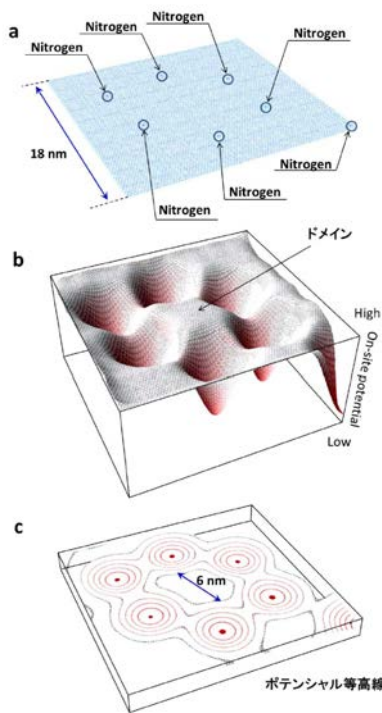


図 54 a, 窒素ドーピンググラファイトのモデル図。すべてグラファイト型窒素がドーピングされている場合を考える。b,c, 炭素のポテンシャル勾配によって表面に形成されるドメインの概念図とポテンシャル等高線の概念図。

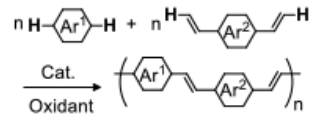


図 55

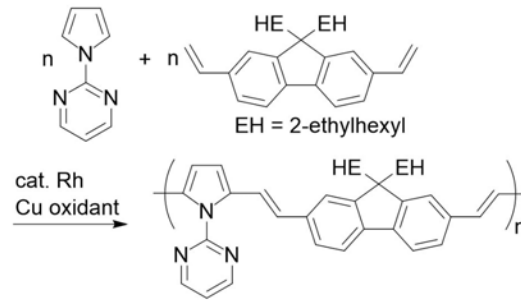


図 56 Scheme 1 直接的アルケニル化重縮合

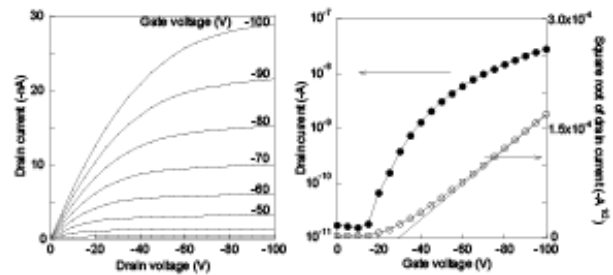


図 57 FET 特性評価の例

高分子材料の機能を最大限に引き出すために重要な点を明確にすることができた。

(5) 孤立共役高分子マイクロ球体からの WGM 共鳴発光

共役系高分子は電荷輸送特性や発光特性、酸化還元特性を有することから、発光ダイオードやトランジスタ、太陽電池、電気色変化素子などの光電子素子における活性層としての利用が期待されている。最近では、 π 共役高分子から形成する直径数百ナノメートルの球状コロイドが、発光性コロイドフォトリック結晶のような新しい光機能材料の可能性から注目されている。これに関して、我々はこれまでに、溶液プロセスにおける自己組織化過程において、 π 共役交互共重合体が形状の整ったマイクロ球体を定量的に形成することを報告した。さらに、マイクロ球体 1 粒子へのレーザー照射により、明瞭な Whispering Gallery Mode (WGM) 発光が発生することを見出した。これらのポリマーの屈折率は 1.6-1.8 であり、空気と比較して十分に大きいことから、球体内で発生した発光はポリマーと空気の界面で全反射して効率的に球体内部に閉じ込められる。

本研究では、固体状態の発光量子収率 (Φ_{PL}) が 0.09-0.49 と、これまでに報告した π 共役交互共重合体 ($\Phi_{PL} < 0.02$) と比べて大きな孤立共役高分子 (Isolated conjugated polymer, ICP) に着目した。これらの高分子は π 共役系からなる主鎖骨格の周りを絶縁性側鎖で覆った構造をしている。主鎖がお互いに孤立して存在するため、主鎖間での相互作用による無輻射失活が効果的に抑制されることから、これらのポリマーは固体状態においても高い発光量子収率を示す。また、この被覆構造により高分子は結

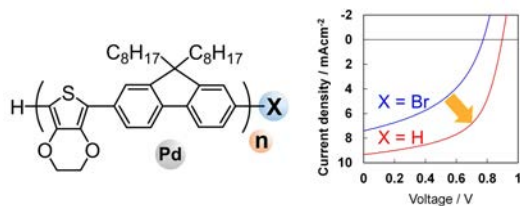


図 58 検証した高分子材料と光電変換特性の比較

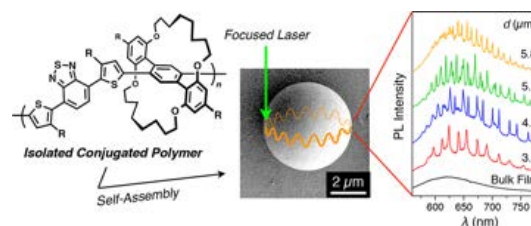


図 59 ICP の自己組織化によるマイクロ球体の形成と WGM 発光スペクトル。

晶性が低く、アモルファスな薄膜を形成する。低い結晶性は、液中の自己組織化プロセスにより球状構造体を形成するために重要な要素である。我々は複数の ICP を用いて、蒸気拡散法による自己組織化を試みた。その結果、そのうちのひとつにおいて、形状の整った球状構造体が形成することを見出した(図 59)。得られた球体を用い、一粒子へのレーザー照射による発光スペクトルを観測した結果、明瞭な WGM 発光を観測した。さらに、 μ -PL 計測による WGM 発光特性が、自己組織化条件の違いによる表面形状や真球度の違いを極めて鋭敏に検知できることを明らかにした。

(6) ポリフッ化ビニリデンナノ粒子のコロイド結晶化とイオン液体誘起 β 相化

光の波長と同程度の周期構造を有するフォトニック結晶は、特異的な光学特性から、さまざまなフォトニックデバイスへの応用が期待されている。とりわけ、サブミクロンサイズのポリマービーズからなるコロイド結晶は、リソグラフィ等のプロセスを必要とせず比較的容易にフォトニック結晶を作製することが可能であるという点で注目されている。近年活発に研究が進められているポリマーコロイド結晶の多くは、ポリスチレンや PMMA など、それ自体は電気的あるいは光学的な特性を示さない高分子の球から作製されている。我々は、電子あるいは光機能を有するポリマー材料からコロイド結晶を作成することにより、新しいフォトニック特性を示す材料が構築できないかと考え、強誘電ポリマーとして知られるポリフッ化ビニリデン (PVDF) に着目した。もし、強誘電ポリマーである PVDF からコロイド結晶を作成できれば、強誘電材料が有する第二次高調波 (SHG) の発生、そしてコロイド結晶の持つ光の閉じ込めという二つの物性を掛け合わせ、これまでになかった光学特性の発現が期待できる。すなわち、周期構造内への SHG の閉じ込めと高密度化、さらなる高次高調波の発生などが考えられる。

PVDF は、all-trans 配座の β 相、trans-gauche 配座の α 相、 α 相と β 相の中間状態である γ 相の三つの結晶構造が主に存在する。この中で、all-trans 配座である β 相は、水素 ($\delta+$) とフッ素 ($\delta-$) が配向分極しており強誘電性を示す。一方、構造的には α 相が最安定相であることから、強誘電相である β 相を実現するためには、延伸処理やポーリング処理が必要となる。

本研究では、入手した α 相 PVDF ナノ粒子にイオン液体 ([EMIM]NO₃) を添加し、複合体の融点より少し低い温度でアニールすることで、ナノ粒子の形状を保持しつつ、部分的な β 相化を実現した(図 60)。また、 α 型 PVDF のコロイド集積化を行った後、イオン液体を浸漬させ、アニールを行うことで、一部 β 相化したコロイド集積薄膜の作成を行った。作成した β 相化 PVDF コロイド結晶薄膜は、イオン液体添加とアニールによる β 相化後においても構造色を示し、微粒子により周期構造を保持していることが明らかになった。

(7) 凝集した金属ナノ粒子の再分散剤としてのシステイン含有ペプチド β シート

金属ナノ粒子は、特異な電子状態に起因する触媒機能や、プラズモンを利用した光触媒機能および電荷分離状態の加速などの利点から、様々なエネルギー、物質変換への応用に向けた研究が進められてい

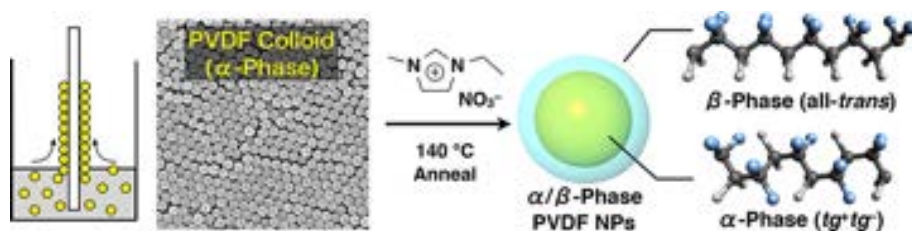


図 60 PVDF ナノ粒子のコロイド結晶化と表面の β 相化の模式図。

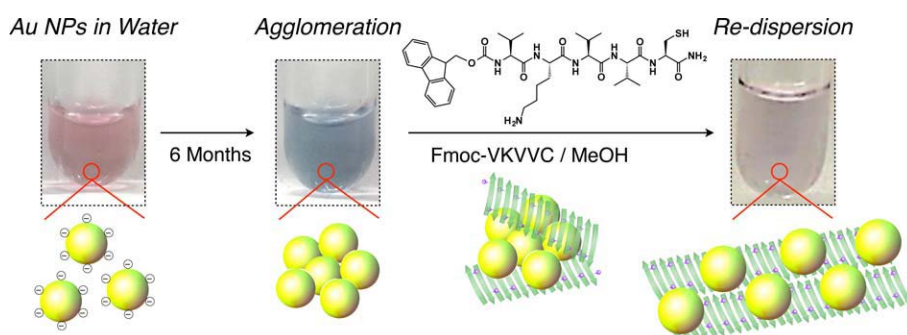


図 61 Fmoc-VKVVC β シートによる招集した金ナノ粒子の再分散化の模式図。

る。金属ナノ粒子の作製方法としては、溶液中の化学反応を介した溶液プロセスによる作製法、気相プロセスによる作製法、固相プロセスによる作製法などが挙げられる。作製した金属ナノ粒子は、固体表面などに担持されれば、その形状は保持されるが、溶液中では時間経過による凝集がしばしば生じる。一旦ナノ粒子の凝集が起こると、それを再分散させることは難しく、また、凝集により表面積や電子状態が変化し、触媒機能などの特性が低下してしまう。溶液中で安定なコロイド状態を持続させるために界面活性剤などを用いて表面電荷を付与する等の方法が通常とられるが、その場合、ナノ粒子独自の触媒機能が保持されない。

本研究では、一旦凝集を起こした金属ナノ粒子を再分散させる物質の探索を行った。その結果、あるシーケンスのショートペプチドが、凝集した金属ナノ粒子を効果的に再分散させることを見出した（図 61）。ペプチドのシーケンスやアミノ酸残基数に関する検討の結果、この再分散化において、ペプチドの2次構造（ β シート構造）が重要な役割を果たしていることを明らかにした。

〈論文〉

1. Galina Marzuna, Junji Nakamura, Xiaorui Zhang, Stephan Barcikowski, Philipp Wagener “Size control and supporting of palladium nanoparticles made by laser ablation in saline solution as a facile route to heterogeneous catalysts”, Applied Surface Science, 348, 75-84 (Sep. 2015).
2. Takahiro Kondo, Donghui Guo, Taishi Shikano, Tetsuya Suzuki, Masataka Sakurai, Susumu Okada, Junji Nakamura “Observation of Landau levels on nitrogen-doped flat graphite surfaces without external magnetic fields”, Scientific Reports 5, 16412 (2015).
3. Hisao Kiuchi, Takahiro Kondo, Masataka Sakurai, Donghui Guo, Junji Nakamura, Hideharu Niwa,

- Jun Miyawaki, Maki Kawai, Masaharu Oshima and Yoshihisa Harada “Characterization of nitrogen species incorporated into graphite using low energy nitrogen ion sputtering” , *Physical Chemistry Chemical Physics* 18, 458-465 (2016).
4. Donghui Guo, Riku Shibuya, Chisato Akiba, Shunsuke Saji, Takahiro Kondo, Junji Nakamura “Active sites of nitrogen-doped carbon materials for oxygen reduction reaction clarified using model catalysts” , *Science* , 351, 6271, 361-365 (2016).
 5. Xiaorui Zhang, Hiroyuki Matsuura, Fumitaka Tsukihashi “Enhancement of the Dissolution of Nutrient Elements from Steelmaking Slag into Seawater by Gluconic Acid” , *Journal of Sustainable Metallurgy*, 1, 2, 134-143 (June 2015).
 6. Hisao Kiuchi, Riku Shibuya, Takahiro Kondo, Junji Nakamura, Hideharu Niwa, Jun Miyawaki, Maki Kawai, Masaharu Oshima and Yoshihisa Harada “Lewis Basicity of Nitrogen-Doped Graphite Observed by CO₂ Chemisorption” , *Nanoscale Research Letters* 11, 127-1~127-7 (2016).
 7. Takeshi Yasuda, Junpei Kuwabara, Liyuan Han, and Takaki Kanbara, Improved power conversion efficiency of bulk-heterojunction organic photovoltaic cells using neat C₇₀ as an effective acceptor for an amorphous π -conjugated polymer, *Org. Electron.*, 25, 99-104 (2015).
 8. Hitoshi Saito, Junpei Kuwabara, and Takaki Kanbara, Facile Synthesis of Fluorene-based π -Conjugated Polymers via Sequential Bromination/Direct Arylation Polycondensation, *J. Polym. Sci.: Part A: Polym. Chem.*, 53, 2198-2201 (2015).
 9. Tatsuya Kumada, Yuta Nohara, Junpei Kuwabara, and Takaki Kanbara, Direct Arylation Polycondensation of Thienothiophenes with Various Dibromoarylenes, *Bull. Chem. Soc. Jpn.*, 88, 1530-1535 (2015). (BCSJ Award Article)
 10. Takeshi Yasuda, Junpei Kuwabara, Liyuan Han, and Takaki Kanbara, Emission from Charge-Transfer States in Bulk Heterojunction Organic Photovoltaic Cells Based on Ethylenedioxythiophene-Fluorene Polymers, *Mol. Cryst. Liq. Cryst.*, 620, 107-111 (2015).
 11. Yohei Fujie, Junpei Kuwabara, and Takaki Kanbara, Selectivity of Reaction Sites for Direct Arylation Polycondensation in Bithiophene Derivatives, *Mol. Cryst. Liq. Cryst.*, 622, 14-18 (2015).
 12. Junpei Kuwabara, Takeshi Yasuda, Naoto Takase, and Takaki Kanbara, Effects of the Terminal Structure, Purity, and Molecular Weight of an Amorphous Conjugated Polymer on Its Photovoltaic Characteristics, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 8, 1752-1758 (2016).
 13. Kosuke Shibasaki, Takeshi Yasuda Yohei Yamamoto, Masashi Kijima, Monosubstitution at the 4-Position of 2,7-Carbazolylene Expands the Structural Design and Fundamental Properties of D- π -A Copolymers for Organic Photovoltaic Cells, *Polym. Chem.*, 6, 5921-5930 (2015).
 14. M. Yamamura, K. Sukegawa, D. Okada, Y. Yamamoto, and T. Nabeshima, “Chiroptical switching caused by crystalline/liquid crystalline phase transition of a chiral bowl-shaped molecule”, *Chem. Commun.*, 52, 4585-4588 (2016).
 15. K. Tabata and Y. Yamamoto, “Enhancement of grain size and crystallinity of thin layers of pentacene grown under magnetic field”, *Thin Solid Films*, 603, 408-412 (2016).
 16. D. Braam, S. Kushida, R. Niemöller, G. M. Prinz, H. Saito, T. Kanbara, J. Kuwabara, Y. Yamamoto, and A. Lorke, “Optically induced mode splitting in self-assembled, high quality-factor conjugated polymer microcavities,” *Sci. Rep.*, 6, 19635/1-6 (2016).

17. T. Mizutaru, T. Sakuraba, T. Nakayama, G. Marzun, P. Wagener, C. Rehbock, S. Barcikowski, K. Murakami, J. Fujita, N. Ishii, and Y. Yamamoto, “Cysteine-containing oligopeptide β -sheets as redispersants for agglomerated metal nanoparticles”, *J. Mater. Chem. A.*, 3, 17612-17619 (2015).
18. S. Kushida, D. Braam, C. Pan, T. D. Dao, K. Tabata, K. Sugiyasu, M. Takeuchi, S. Ishii, T. Nagao, A. Lorke and Y. Yamamoto, “Whispering Gallery Resonance from Self-Assembled Microspheres of Highly Fluorescent Isolated Conjugated Polymers”, *Macromolecules.*, 48, 3928-3933 (2015).
19. D. Okada, H. Kaneko, K. Kato, S. Furumi, M. Takeguchi, and Y. Yamamoto, “Colloidal Crystallization and Ionic Liquid Induced Partial β -Phase Transformation of Poly(Vinylidene Fluoride) Nanoparticles”, *Macromolecules.*, 48, 2570-2575 (2015).
20. T. Nakayama, T. Sakuraba, and Y. Yamamoto, “Self-Assembly and Adsorption Properties of Fmoc-Peptide bearing Charged Side Chains”, *AIP Conf. Proc. ICCMSE 2015.*, 1702, 090068/1-4 (2015).
21. S. Kushida, D. Braam, A. Lorke, and Y. Yamamoto, “Whispering Gallery Mode Photoemission from Self-Assembled Poly-para-phenylenevinylene Microspheres”, *AIP Conf. Proc. ICCMSE 2015.*, 1702, 090046/1-4 (2015).

〈研究成果発表〉

[国際会議]

1. Riku Shibuya, Guo Donghui, Takahiro Kondo and Junji Nakamura, “Reactivity and local electronic structure of N-doped graphitic carbons” The MANA-RSC Symposium, National Institute for Materials Science (NIMS), MANA Auditorium (Japan), October 15, 2015.(招待講演)
2. R. Shibuya, D. Guo, T. Kondo and J. Nakamura, “Reactivity and local electronic structure of graphitic materials” The 23rd International Colloquium on Scanning Probe Microscopy (IC-SPM23), Hilton Niseko Village (Japan), December 12, 2015.(招待講演)
3. Rafael Yoshinori Kosaka, Wataru Oki, Zhang Xiaorui, Takahiro Kondo, Junji Nakamura, “Formation of Pd and Au metal nanoclusters supported on graphene” The 16th International Conference on the Science and Application of Nanotubes (NT15), Nagoya University (Japan), June 2, 2015. (ポスター)
4. Shohei Morohoshi, Shunsuke Saji, Donghui Guo, Riku Shibuya, Takahiro Kondo, Junji Nakamura, “Active site of nitrogen doped graphene for ORR in fuel cells” The 16th International Conference on the Science and Application of Nanotubes (NT15), Nagoya University (Japan), June 2, 2015. (ポスター)
5. Riku Shibuya, Takahiro Kondo, Donghui Guo, Junji Nakamura, “Acid and base properties of N-doped graphite evaluated by local electronic structures” CARBON 2015, International Congress Center Dresden (Germany), July 14, 2015. (一般講演)
6. Jiamei Quan, Takahiro Kondo, Guichang Wang, Tetsuya Ogawa, Junji Nakamura, “Eley-Rideal type Mechanism for Formate Synthesis from Carbon dioxide Hydrogenation on Cu surfaces” Gordon Research Conference (Dynamics at Surfaces), Salve Regina University (USA), August 8-9,

- 2015.(一般講演)
7. Takahiro Kondo, Jiamei Quan, Tetsuya Ogawa, Guichang Wang, Junji Nakamura, “Eley-Rideal Type Mechanism of Formate Synthesis from Carbon Dioxide on Cu Surfaces” 31st European Conference on Surface Science (ECOSS-31), International Convention Center of Barcelona (Spain), September 1, 2015.(一般講演)
 8. Donghui Guo, Takahiro Kondo, Riku Shibuya, Chisato Akiba, Shunsuke Saji, Junji Nakamura, “Model catalysts of nitrogen-doped graphitic carbons for oxygen reduction reaction” 31st European Conference on Surface Science (ECOSS-31), International Convention Center of Barcelona (Spain), September 3, 2015.(一般講演)
 9. T. Kondo, D. Guo, R. Shibuya, C. Akiba, S. Saji, J. Nakamura, “Active Sites of Nitrogen-Doped Carbon Materials for Oxygen Reduction Reaction” American Vacuum Society (AVS) 62th International Symposium and Exhibition, San Jose Convention Center (USA), October 20, 2015. (一般講演)
 10. J.Quan, T. Ogawa, T. Kondo, G. Wang, Junji Nakamura, “Eley-Rideal Typed Mechanism of Formate Synthesis by Hydrogenation of Carbon Dioxide on Cu Surfaces” American Vacuum Society (AVS) 62th International Symposium and Exhibition, San Jose Convention Center (USA), October 21, 2015.(一般講演)
 11. Xiaorui Zhang, W. Ooki, Y.R. Kosaka, T. Kondo, J. Nakamura, “Spontaneous Deposition of Palladium Nanoparticles on Graphene through Redox Reaction” American Vacuum Society (AVS) 62th International Symposium and Exhibition, San Jose Convention Center (USA), October 23, 2015. (一般講演)
 12. Riku Shibuya, Donghui Guo, Takahiro Kondo, and Junji Nakamura, “Identification of Lewis basic sites on nitrogen doped graphite model catalyst” The 7th annual Recent Progress in Graphene and Two-dimensional Materials Research Conference (RPGR2015), Mantra Resort, Lorne (Australia), October 26, 2015. (一般講演)
 13. Donghui Guo, Riku Shibuya, Takahiro Kondo, Junji Nakamura, “Acid and base properties of graphitic carbons evaluated by local electronic structures” 251th ACS National Meeting and Exposition, The San Diego Convention Center (USA), March 17, 2016. (一般講演)
 14. Junpei Kuwabara, Takaki Kanbara, ”Practical synthetic method of conjugated polymer materials for organic photovoltaics”, TGSW2015, Tsukuba, Japan, September 2015 (invited).
 15. Takaki Kanbara, Hitoshi Saito, Junpei Kuwabara, “Facile synthesis of fluorene-based conjugated polymers via direct arylation polycondensation” , The International Chemical Congress of Pacific Basin Societies 2015, Hawaii, USA, December 2015 (invited).
 16. Junpei Kuwabara, Kazuma Yamawaki, Takaki Kanbara, “Modulation of emission properties of pincer Pt complex by intermolecular interactions” , The International Chemical Congress of Pacific Basin Societies 2015, Hawaii, USA, December 2015.
 17. Junpei Kuwabara, Naoto Takase, Takeshi Yasuda, Takaki Kanbara, “Effects of impurity in amorphous conjugated polymer for organic thin-film solar cells” , The International Chemical Congress of Pacific Basin Societies 2015, Hawaii, USA, December 2015 (Poster).
 18. Daichi Okada, Yohei Yamamoto, “Whispering gallery mode photoemission from self-assembled

- ferroelectric polymer microspheres” IWP2015, Ibaraki, Japan, 2015.09.04 (poster).
19. Soh Kushida, Yohei Yamamoto “WGM photoemission from Conjugated Polymer Sphere” IWP2015, Ibaraki, Japan, 2015.09.04 (poster).
 20. Tsukasa Mizutaru, Taro Sakuraba, Toru Nakayama, Yohei Yamamoto “Cysteine-containing peptide as redispersants for agglomerated metal nanoparticles” IWP2015, Ibaraki, Japan, 2015.09.04 (poster).
 21. Sae Nakajima, Soh Kushida, Yohei Yamamoto, “Self-assembly of Carbazole Dendrimers and Whispering Gallery Mode Photoemission” IWP2015, Ibaraki, Japan, 2015.09.04 (poster).
 22. Yohei Yamamoto, Kenichi Tabata, Daniel Braam, Soh Kushida, Junpei Kuwabara, Takaki Kanbara, Axel Lorke, “Self-Assembled Conjugated Polymer Microspherical Optical Resonators” ,Pacifichem2015, Honolulu, USA, 2015.12.15-20 (Poster).
 23. Toru Nakayama, Taro Sakuraba, Kentaro Tashiro, Noriyuki Ishii, Yohei Yamamoto, “Charge-Separated Peptide β -Sheets: Sequence-Secondary Structure Relationship for Arranging Charged Side Chains” , Pacifichem2015, Honolulu, USA, 2015.12.15-20.
 24. Soh Kushida, Daniel Braam, Dao D. Thang, Kosuke Shibasaki, Hitoshi Saito, Satoshi Ishii, Tadaaki Nagao, Junpei Kuwabara, Takaki Kanbara, Masashi Kijima, Axel Lorke, Yohei Yamamoto, “Whispering Gallery Mode photoemission from π -Conjugated Polymer Microspheres and Efficient Intersphere Energy Transfer” , Pacifichem2015, Honolulu, USA, 2015.12.15-20.
 25. Daichi Okada, Seiichi Furumi, Masaki Takeguchi, Yohei Yamamoto “Colloidal Crystals from Poly(Vinylidene Fluoride) Nanospheres” , Pacifichem2015, Honolulu, USA, 2015.12.15-20 (poster).
 26. Daichi Okada, Takashi Nakamura, Daniel Braam, Thang D. Dao, Satoshi Ishii, Tadaaki Nagao, Axel Lorke, Tatsuya Nabeshima, Yohei Yamamoto, “BODIPY-Doped Polymer Microcavities with Tunable Multicolor Resonant Photoemission” , CEMSupra2016, Tokyo, Japan, 2016.1.13-14 (Poster).
 27. Soh Kushida, Daniel Braam, Thang Dao, Hitoshi Saito, Kosuke Shibasaki, Satoshi Ishii, Tadaaki Nagao, Akinori Saeki, Junpei Kuwabara, Takaki Kanbara, Masashi Kijima, Axel Lorke, Yohei Yamamoto, “Whispering Gallery Mode-Mediated Cascading Energy Transfer through Coupled Conjugated Polymer Blend Microcavities” , CEMSupra2016, Tokyo, Japan, 2016.1.13-14 (Poster).

[国内学会・研究会]

1. 中村潤児、「物質変換材料部門 成果報告」第2回 CiRfSE ワークショップ、筑波大学 計算科学研究センター、2016年1月19日
2. 近藤剛弘、「分光分析による表面物理化学」光量子計測器ワークショップ、筑波大学 総合研究棟 B、2016年3月2日
3. 近藤剛弘、「モデル触媒と実触媒を用いた窒素含有炭素触媒の ORR 活性点の解明」第2回 CiRfSE ワークショップ、筑波大学 総合研究棟 B、2016年1月19日
4. 近藤剛弘、「分光分析による表面物理化学」光量子計測器開発推進室発足会議、筑波大学計算科学研究センター、2015年11月30日
5. 中村潤児、「ナノグリーンイノベーション-環境エネルギー問題に挑む科学技術-」茨城県県南生涯学習

- センター 県民大学講座、牛久市中央生涯学習センター、2015年5月28日～8月6日（招待講演）
6. 中村潤児、「環境エネルギー分野の触媒開発と学理」平成27年度物性研究所・短期研究会「反応と輸送」、東京大学物性研究所、2015年6月25日（招待講演）
 7. 中村潤児、「グラファイト系炭素の反応性と触媒への応用」触媒学会千葉地区講演会「触媒と炭素材料」、千葉大学西千葉キャンパス、2015年6月5日（招待講演）
 8. 中村潤児、「ナノカーボン担体とした白金触媒の高活性化」技術情報協会セミナー「燃料電池触媒の活性化技術と白金代替触媒の開発」、技術情報協会 セミナールーム、2015年8月17日（招待講演）
 9. 中村潤児、「グラフェンの反応性と電極触媒への応用」2015年電気化学秋季大会、埼玉工業大学、2015年9月11日（招待講演）
 10. 中村潤児、「表面反応概論」「モデル触媒概論」基礎講座「第6回表面化学チュートリアル」、東京大学理学部化学科本館、2015年9月29日（招待講演）
 11. 中村潤児、「表面科学から見る触媒機能と反応性-S TM, 分子線実験など」第25回触媒学会キャラクタリゼーション講習会「触媒設計・微視的キャラクタリゼーションの最前線」、名古屋工業大学鶴舞キャンパス、2015年11月13日（招待講演）
 12. 中村潤児、「CO₂の活性化とメタノール合成」2015年真空・表面科学合同講演会、つくば国際会議場、2015年12月3日（招待講演）
 13. 中村潤児、「窒素ドープカーボンの電極触媒活性点」2015年度触媒表面ワークショップ「実用触媒と表面化学との融合」、福岡大学七隈キャンパス、2015年3月3日（招待講演）
 14. 中村潤児、「燃料電池用炭素触媒の活性点、反応性および電子状態」ポスト「京」重点課題Ⅱ「エネルギーの高効率な創出、変換・貯蔵、利用の新規基盤技術の開発」第2回公開シンポジウム、自然科学研究機構 岡崎コンファレンスセンター、2016年3月7日（招待講演）
 15. 近藤剛弘、「走査トンネル顕微鏡を用いたグラファイトに形成する局在化した電子準位に関する研究」日本物理学会 第71回年次大会（2016年）、東北学院大学、2016年3月19日（第10回（2016年）日本物理学会若手奨励賞受賞・受賞記念講演）
 16. ZHANG, Xiaorui, OOKI, Wataru, KOSAKA, Yoshinori, KONDO, Takahiro, NAKAMURA, Junji, “Spontaneous redox deposition of palladium nanoparticles on graphene” 第116回触媒討論会, 三重大学（三重）, 2015年9月16日（一般講演）
 17. 近藤剛弘、佐治俊輔、郭東輝、渋谷陸、諸星翔平、新田晋史、白田勇人、中村潤児「窒素含有グラファイト系炭素触媒の ORR 活性点」第116回触媒討論会, 三重大学（三重）, 2015年9月17日（一般講演）
 18. 渋谷陸、郭東輝、近藤剛弘、中村潤児「窒素ドープグラファイトモデル触媒を用いた ORR 活性点の特定」第116回触媒討論会, 三重大学（三重）, 2015年9月17日（一般講演）
 19. 紺野隼平、森戸裕二郎、藤谷忠博、近藤剛弘、中村潤児「Au(111)表面に生成する TiO_x クラスターの構造と電子状態」第116回触媒討論会, 三重大学（三重）, 2015年9月17日（ポスター）
 20. 天羽優花、小山貴裕、近藤剛弘、中村潤児「非平衡系メタノール合成用反応器の試作」第116回触媒討論会, 三重大学（三重）, 2015年9月17日（ポスター）
 21. 諸星翔平、佐治俊輔、松元慶一郎、森利之、鈴木彰、近藤剛弘、中村潤児「窒素ドープグラフェンカソード電極触媒の燃料電池セル評価」第116回触媒討論会, 三重大学（三重）, 2015年9月17日（ポスター）
 22. 松元慶一郎、諸星翔平、森利之、鈴木彰、近藤剛弘、中村潤児「白金担持グラフェン燃料電池電極触媒の発電特性」第116回触媒討論会, 三重大学（三重）, 2015年9月17日（ポスター）
 23. 小此木明德、張曉瑞、近藤剛弘、中村潤児「グラフェンを用いたメタノール合成触媒の調製と活性評価」

- 第 116 回触媒討論会, 三重大学 (三重), 2015 年 9 月 17 日 (ポスター)
24. KOSAKA, Rafael Yoshinori, 大木亘, 張曉瑞, BARCIKOWSKI, Stephan, 近藤剛弘, 中村潤児「グラフェンナノシートに担持した Pd 及び Au ナノクラスター触媒の調製」第 116 回触媒討論会, 三重大学 (三重), 2015 年 9 月 17 日 (ポスター)
 25. 小川哲矢, 全家美, 近藤剛弘, 中村潤児「Eley-Rideal 型反応メカニズムで進行する Cu 表面でのフォルメート生成反応」第 116 回触媒討論会, 三重大学 (三重), 2015 年 9 月 18 日 (一般講演)
 26. 近藤剛弘「モデル触媒と実触媒を用いた窒素含有炭素触媒の ORR 活性点解明」表面・界面スペクトロスコープ 2015, 国立女性教育会館 (埼玉), 2015 年 11 月 28 日 (ポスター)
 27. Quan Jiamei “Thermal non-equilibrium in formate synthesis and formate decomposition on Cu surface” 表面・界面スペクトロスコープ 2015, 国立女性教育会館 (埼玉), 2015 年 11 月 28 日 (ポスター)
 28. Quan Jiamei, Takahiro Kondo, Wang Guichang, Junji Nakamura “Thermal Non-equilibrium Activation of Carbon Dioxide on Cu catalysts” 2015 年真空・表面科学合同講演会, つくば国際会議場 (茨城), 2015 年 12 月 1 日 (一般講演)
 29. 紺野隼平, コウサカラファエル ヨシノリ, 藤谷忠博, 近藤剛弘, 中村潤児「STM/STS を用いた TiO₂ ナノ粒子担持 Au(111) モデル触媒表面の構造と局所電子状態解析」 2015 年真空・表面科学合同講演会, つくば国際会議場 (茨城), 2015 年 12 月 1 日 (一般講演)
 30. 天羽優花, 小山貴裕, 近藤剛弘, 中村潤児「非熱的平衡系メタノール合成用反応器の試作」2015 年真空・表面科学合同講演会, つくば国際会議場 (茨城), 2015 年 12 月 1 日 (ポスター)
 31. 木内久雄, 渋谷陸, 近藤剛弘, 中村潤児, 丹羽秀治, 宮脇淳, 川合眞紀, 尾嶋正治, 原田慈久「X 線分光による窒素ドーピンググラファイトに化学吸着した CO₂ の観測」第 25 回日本 MRS 年次大会, 横浜市開港記念会館 (神奈川), 2015 年 12 月 9 日 (一般講演)
 32. 松元慶一郎, 諸星翔平, 森利之, 鈴木彰, 小林知洋, 山本春也, 近藤剛弘, 中村潤児「白金担持グラフェン触媒とアイオノマーとの界面状態が MEA 内での触媒活性に与える影響」第 25 回日本 MRS 年次大会, 横浜市開港記念会館 (神奈川), 2015 年 12 月 10 日 (一般講演)
 33. 木内久雄, 渋谷陸, 近藤剛弘, 中村潤児, 丹羽秀治, 宮脇淳, 川合眞紀, 尾嶋正治, 原田慈久「X 線光電子・吸収分光法による窒素ドーピンググラファイトに配向吸着した CO₂ の観測」第 29 回日本放射光学会年회放射光科学合同シンポジウム, 東京大学柏の葉キャンパス駅前サテライト (千葉), 2016 年 1 月 9 日 (一般講演)
 34. 近藤剛弘「グラファイトの電子状態制御による新規触媒の創成: 元素戦略/希少金属代替材料開発」第 10 回合同シンポジウム, 東京国際フォーラム (東京), 2016 年 2 月 23 日 (ポスター)
 35. 木内久雄, 渋谷陸, 近藤剛弘, 中村潤児, 丹羽秀治, 宮脇淳, 川合眞紀, 尾嶋正治, 原田慈久「CO₂ 吸着により観測された窒素ドーピンググラファイトの Lewis 塩基性」ISSP ワークショップ「SPRING-8 BL07LSU の現状 -X 線分光と回折の協奏へ-」, 東京大学物性研究所 (千葉), 2016 年 3 月 1 日 (ポスター)
 36. 齋藤 仁志, 桑原 純平, 神原 貴樹「Rh 触媒による脱水素型直接的アルケニル化反応を利用したポリアリーレンビニレン型 π 共役高分子の合成」第 64 回高分子学会年次大会, 札幌, 2015 年 5 月.
 37. 王志安, 桑原 純平, 安田 剛, 神原 貴樹「直接アリアル化反応によるベンゾジピロリドンユニットを有するポリマーの合成と物性評価」第 64 回高分子学会年次大会, 札幌, 2015 年 5 月.
 38. 藤江 陽平, 桑原 純平, 神原 貴樹「直接的アリアル化重縮合法におけるチオフェン環の電子密度の違いに基づく反応位置制御」第 64 回高分子学会年次大会, 札幌, 2015 年 5 月.

39. 神原 貴樹「直接的アリール化反応を利用した共役高分子の合成と機能」ポリマーフロンティア 21、東京、2015 年 6 月（招待講演）.
40. 神原 貴樹「高分子色素からなる加飾剤・光沢フィルムの調製」平成 27 年度 TIMS 研究交流会、つくば、2015 年 7 月.
41. 桑原 純平、高瀬 直人、安田 剛、神原 貴樹「共役高分子材料の純度や分子量が光電変換機能に及ぼす影響」第 64 回高分子討論会、仙台、2015 年 9 月.
42. 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 64 回高分子討論会、仙台、2015 年 9 月.
43. 佐藤 剛大、氏家 義人、桑原 純平、神原貴樹「脱カルボキシル化と直接的アリール化反応を用いた重縮合反応の開拓」第 64 回高分子討論会、仙台、2015 年 9 月.
44. 土田 渉、桑原 純平、神原 貴樹「ジクロロアリーレンを基質とした直接アリール化重縮合反応」第 64 回高分子討論会、仙台、2015 年 9 月.
45. Junpei Kuwabara, Kazuma Yamawaki, Kaho Yamaguchi, Takaki Kanbara, “Effect of intermolecular interaction on emission property of pincer Pt complex”, 錯体化学会第 65 回討論会、奈良、2015 年 9 月.
46. 川崎龍矢、桑原純平、神原貴樹「水素結合によって二量化する DPP 誘導体の合成と物性」第 5 回 C S J 化学フェスタ 2015、東京、2015 年 10 月.
47. 山口佳歩、山脇和馬、桑原純平、神原貴樹「超分子相互作用による NCN ピンサー型白金錯体の発光色変化」第 5 回 C S J 化学フェスタ 2015、東京、2015 年 10 月.
48. 柳弘太、桑原純平、神原貴樹「ヒドロキシメチルフルフラールの選択的酸素酸化反応を指向した Ru 錯体触媒の分子設計」第 48 回酸化反応討論会、京都、2015 年 10 月.
49. 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 30 回高分子学会関東支部茨城地区若手の会、つくばみらい、2015 年 10 月.
50. 藤江陽平、桑原純平、神原貴樹「直接的アリール化重縮合法における反応位置制御」第 30 回高分子学会関東支部茨城地区若手の会、つくばみらい、2015 年 10 月.
51. 土田 渉、桑原 純平、神原 貴樹「ジクロロアリーレンを基質とした直接アリール化重縮合反応」第 30 回高分子学会関東支部茨城地区若手の会、つくばみらい、2015 年 10 月.
52. 佐藤 剛大、氏家 義人、桑原 純平、神原貴樹「脱カルボキシル化と直接的アリール化反応を用いた重縮合反応の開拓」第 30 回高分子学会関東支部茨城地区若手の会、つくばみらい、2015 年 10 月.
53. 神原貴樹「新しい高分子半導体合成法の開発研究—有機デバイスの実用化に向けて—」第 13 回環境研究シンポジウム、東京、2015 年 11 月.
54. 柴崎 浩輔、安田 剛、山本 洋平、木島 正志「4-アルコキシ-2,7-カルバゾリレンとベンゾチアジアゾールから構成された D- π -A 型共重合体の合成と太陽電池特性」第 64 回高分子学会年次大会、札幌、2015 年 5 月.
55. 櫛田創、Daniel Braam、田畑顕一、柴崎浩輔、Dao Duy Thang、石井智、長尾忠昭、桑原純平、神原貴樹、木島正志、Axel Lorke、山本洋平「Whispering Gallery Mode photoemission and intersphere energy transfer from highly fluorescent π -conjugated polymer microspheres」第 64 回高分子学会年次大会、北海道、2015.5.27-29.
56. 櫛田創、Daniel Braam、Chengjun Pan、Dao Duy Thang、田畑顕一、杉安和憲、竹内正之、石井智、長尾忠昭、Axel Lorke、山本洋平「高発光性孤立 π 共役高分子によるマイクロ球体形成と WGM 発光」

- 第 64 回高分子学会年次大会、北海道、2015.5.27-29 (ポスター) .
57. 岡田大地、山本洋平「強誘電ポリマーの自己組織化によるマイクロ球体の作製」第 64 回高分子学会年次大会、北海道、2015.5.27-29 (ポスター) .
 58. 愛敬雄介、櫛田創、田畑頭一、Daniel Braam、Dao Duy Thang、桑原純平、神原貴樹、近藤剛弘、中村潤児、石井智、長尾忠昭、Axel Lorke、山本洋平「酸化グラフェンによる π 共役高分子マイクロ球体の被覆」第 64 回高分子学会年次大会、北海道、2015.5.27-29 (ポスター) .
 59. 水垂 司、櫻庭太郎、中山徹、Phillip Wegener、Stephane Barcikowski、山本洋平「システイン含有ペプチドによる金属ナノ粒子の分散化」第 64 回高分子学会年次大会、北海道、2015.5.27-29 (ポスター) .
 60. 山本洋平「 π 共役ポリマー球体からの共鳴発光と光エレクトロニクスへの展開」新学術領域「 π 造形科学」第 2 回公開シンポジウム、大阪、2015.6.8-9.
 61. 岡田大地「強誘電ポリマーの自己組織化による球体の形成と WGM 発光」新学術領域「 π 造形科学」第 2 回公開シンポジウム、大阪、2015.6.8-9 (ポスター) .
 62. 櫛田創「高発光性 π 共役高分子によるマイクロ球体形成と WGM 発光」新学術領域「 π 造形科学」第 2 回公開シンポジウム、大阪、2015.6.8-9 (ポスター) .
 63. 山本洋平「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」新学術領域「人工光合成」合同会議、静岡、2015.6.8-9.
 64. 山本洋平「共役系高分子による球体形成と共鳴発光現象」第 3 回数理連携サロン、茨城、2015.6.18.
 65. 櫛田創、ダニエルブラーム、柴崎浩輔、齋藤仁志、ダオデュイタン、石井智、長尾忠昭、桑原純平、神原貴樹、木島正志、アクセルロルケ、山本洋平「エネルギー供与性/受容性 π 共役ポリマー混合球体による WGM 発光の変調」第 76 回応用物理学会秋季学術講演会、愛知、2015.9.13-16.
 66. 櫛田創、ダニエルブラーム、チェンジュンパン、ダオタン、杉安和憲、竹内正之、石井智、長尾忠昭、アクセルロルケ、山本洋平「高発光性孤立 π 共役高分子マイクロ球体からの WGM 発光」第 76 回応用物理学会秋季学術講演会、愛知、2015.9.13-16 (ポスター) .
 67. 岡田大地、石井智、Dao Thang、長尾忠昭、山本洋平「蛍光色素を添加した強誘電ポリマー球体からの WGM 発光」第 76 回応用物理学会秋季学術講演会、愛知、2015.9.13-16.
 68. 山本洋平「 π 共役高分子球体による発光性マイクロ共振器の開発」第 64 回高分子討論会、宮城、2015.9.15-17 (日立化成賞受賞講演) .
 69. 山本洋平「様々な高発光性 π 共役高分子によるマイクロ球体の作製と WGM 発光 f」第 64 回高分子討論会、宮城、2015.9.15-17.
 70. 櫛田創、Daniel Braam、柴崎浩輔、齋藤仁志、Dao Thang、石井智、長尾忠昭、桑原純平、神原貴樹、木島正志、Axel Lorke、山本洋平「複数の共役高分子の同時自己組織化によるハイブリッド球体の作製と WGM 発光の変調」第 64 回高分子討論会、宮城、2015.9.15-17.
 71. 岡田大地、伊藤智志、川俣裕紀、石井智、Dao Thang、長尾忠明、山本洋平「強誘電ポリマー球体への蛍光色素添加と WGM 発光」第 64 回高分子討論会、宮城、2015.9.15-17.
 72. 愛敬雄介、齋藤仁志、桑原純平、神原貴樹、山本洋平「溶媒蒸気アニール法による π 共役高分子マイクロディスクの作製」第 64 回高分子討論会、宮城、2015.9.15-17 (ポスター) .
 73. 中嶋紗英、櫛田創、山本洋平、アルブレヒト建、山元公寿、Dao Thang、石井智、長尾忠昭「カルバゾール dendrimer の自己組織化による集合形態制御と WGM 発光」第 64 回高分子討論会、宮城、2015.9.15-17 (ポスター) .
 74. 山本洋平「共役系高分子マイクロ球体による共鳴発光現象と発光材料としての応用」高分子学会 印刷・

- 情報記録・表示研究会および光反応・電子用材料研究会、東京、2015.10.9.
75. 榊田創、斎藤仁志、柴崎浩輔、桑原純平、神原貴樹、木島正志、山本洋平、ダオデュイタン、石井智、長尾忠昭「 π 共役ポリマーブレンド球体によるエネルギー移動を介した WGM 発光の変調」第 5 回 CSJ 化学フェスタ、東京、2015.10.13-15 (ポスター) .
 76. 水垂司、櫻庭太郎、中山徹、Marzun G.、Wagener P.、Barcikowski S.、村上勝久、藤田淳一、石井則行、山本洋平「システイン含有ペプチド β シートによる金属ナノ粒子凝集体の再分散化」第 5 回 CSJ 化学フェスタ、東京、2015.10.13-15 (ポスター) .
 77. 中嶋紗英、榊田創、アルブレヒト建、ダオタン、石井智、長尾忠昭、山元公寿、山本洋平「カルバゾール dendromer の集合形態制御と共鳴発光」第 5 回 CSJ 化学フェスタ、東京、2015.10.13-15 (ポスター) .
 78. 助川公哉、山村正樹、岡田大地、山本洋平、鍋島達弥「中心にリン原子を持つ新規凹型分子の合成と機能」第 5 回 CSJ 化学フェスタ、東京、2015.10.13-15 (ポスター) .
 79. 榊田創、ダニエルブラーム、パンチェンジュン、齋藤仁志、柴崎浩輔、ダオタン、石井智、長尾忠昭、杉安和憲、竹内正之、木島正志、桑原純平、神原貴樹、ロルケアクセル、山本洋平「高発光性共役高分子球体からの WGM 発光と波長変換」高分子学会関東支部茨城地区第 30 回若手交流会、茨城、2015.10.29-30 (ポスター) .
 80. 水垂司、櫻庭太郎、中山徹、Marzun G.、Wagener P.、Barcikowski S.、村上勝久 1、藤田淳一、石井則行、山本洋平「システイン含有ペプチド β シートによる凝集した金属ナノ粒子の再分散化」高分子学会関東支部茨城地区第 30 回若手交流会、茨城、2015.10.29-30 (ポスター) .
 81. 中嶋紗英、榊田創、アルブレヒト建、ダオタン、石井智、長尾忠昭、山元公寿、山本洋平「カルバゾール dendromer の自己組織化による集合形態制御」高分子学会関東支部茨城地区第 30 回若手交流会、茨城、2015.10.29-30 (ポスター) .
 82. 山本洋平「共役高分子球体からの共鳴発光現象の発見と展開」第 9 回物性科学領域横断研究会、東京、2015.11.13-15 (ポスター) .
 83. 中山徹、山本洋平「ポルフィリンおよびナフタレンジイミドを側鎖に有するペプチドの集合構造の検討」2015 年度 π 造形科学若手研究会、大阪、2015.11.20-21 (ポスター) .
 84. 榊田創、山本洋平「エネルギー供与性・受容性高分子のブレンド球体作製および球体間カスケードエネルギー移動」2015 年度 π 造形科学若手研究会、大阪、2015.11.20-21 (ポスター) .
 85. 岡田大地、山本洋平「自己組織化による強誘電ポリマー球体の形成と WGM 発光」2015 年度 π 造形科学若手研究会、大阪、2015.11.20-21 (ポスター) .
 86. 山本洋平「ポリマー球体共振器による光エネルギー変調」CiRfSE ワークショップ、茨城、2016.1.18-19.
 87. 岡田大地、中村貴志、ダニエルブラーム、タンダオ、石井智、長尾忠昭、アクセルロルケ、鍋島達弥、山本洋平「単一の蛍光色素を添加したポリマーマイクロ共振器からの多色共鳴発光と光伝搬」第 63 回応用物理学会春季学術講演会、東京、2016.3.19-22.
 88. 榊田創、岡部真之介、佐伯昭紀、ダオデュイタン、石井智、長尾忠昭、木島正志、山本洋平「可視光全域に共振ピークを持つ共役高分子マイクロ共振器」第 63 回応用物理学会春季学術講演会、東京、2016.3.19-22.
 89. 榊田創、ダニエルブラーム、柴崎浩輔、斎藤仁志、ダオデュイタン、石井智、長尾忠昭、桑原純平、神原貴樹、木島正志、アクセルロルケ、山本洋平「共役ポリマー WGM 共振器による高効率・高指向性放射エネルギー移動」第 63 回応用物理学会春季学術講演会、東京、2016.3.19-22.

4.2 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）

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）

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）

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）

Ashraful Islam（NIMS 主幹研究員）

韓 礼元（NIMS 太陽発電材料ユニット長）

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）、

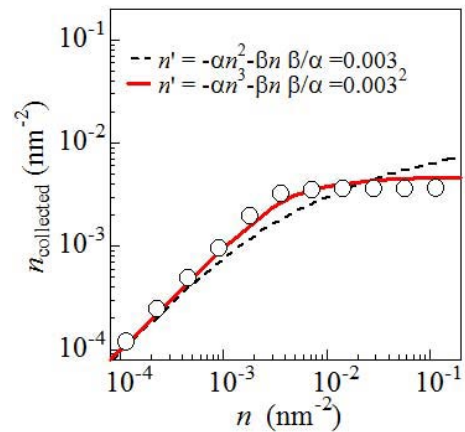
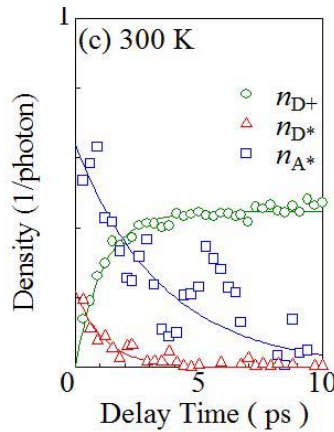
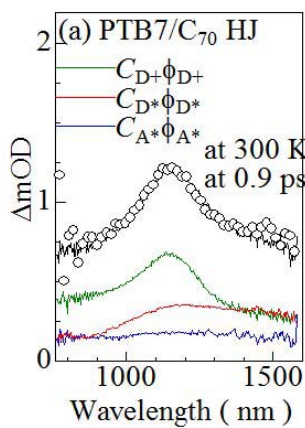


図 62 PTB7/C₇₀ 二層膜の励起子と電荷の絶対数の時間変化。

図 63 PTB7/C₇₀ ヘテロ接合膜における界面電密度と回収電荷密度との相関。

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 (国際テニュアトラック教員) 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、本年度末にはオーフス大 Center for Materials Crystallography のセンター長である Iversen 教授を海外教育研究ユニット招致の PI として迎え、次年度より副 PI として Hathwar Rama Venkatesha 氏を任期付助教として迎え入れる予定である。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 の開拓をおこなう。小林は、二次電池材料に関してして、フランスの CRISMAT 研究所の Valerie Pralong 博士と共同研究を開始した。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開始した。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の開設を準備している。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。他方、物質変換材料部門では、触媒材料に関して、ドイツのデュスブルクエッセン大および台湾清華大学との共同研究を進めている。さらに、アメリカスタンフォード大の自由電子レーザーを用いた共同研究も開始した。こうした国際共同研究体制を堅固なものにするため、国際共同研究に関する外部資金の獲得を目指す。

(1) 有機薄膜太陽電池に関する研究

有機薄膜太陽電池は、エネルギー変換効率が 10% に達し、次世代光発電素子として有望である。しかしながら、電荷生成プロセスおよび電荷消滅プロセスに関しては、未解明な部分が多い。

励起子と電荷の絶対数を決定する分光法の提案と PTB7/C₇₀ 二層膜への応用

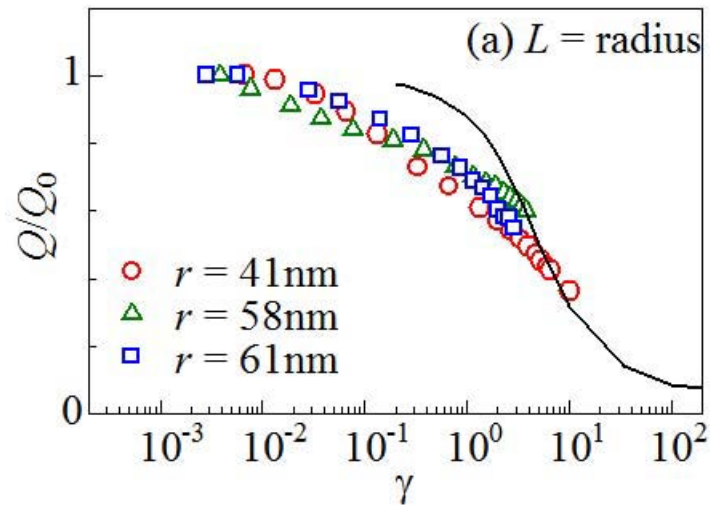


図 64 NaCoO₂ 薄膜における、放電容量とくりこまれた放電レートとの関係。

我々は、フェムト秒時間分解分光と電気化学分光を組み合わせるにより、励起子と電荷の絶対数の時間変化を決定する方法を提案した。この手法を PTB7/C₇₀ 二層膜に適用した。図 62 に PTB7/PC71BM ヘテロ接合膜の結果を示す。時間の経過とともにアクセプター励起子（青）とドナー励起子（赤）の数が減り、電荷（緑）の数が増える。この定量的な解析により、アクセプター励起子の遅い成分は電荷形成に寄与しないことが明らかとなった。これは、理論的に提唱されているホット励起子の描像を、実験的に支持するものである。（論文 1）

電荷の再結合速度の電荷密度依存性

有機薄膜太陽電池では、パルスレーザーで強励すると光電変換効率が低下することが知られている。この機構に迫るために、PTB7/C₇₀ ヘテロ太陽電池作成し、光励起密度と回収電荷密度との関係を明らかにした。（図 63）フェムト秒レーザーで励起した際の電荷生成速度は 3 ps 以下であるので、励起直後に界面に高密度な電荷が存在すると考えて良い。弱励起では、回収電荷密度は生成した界面電荷密度に比例している。しかしながら、強励起下では、回収電荷密度が急速に飽和する、二乗項または三乗項を取り入れた現象論で、得られた実験結果を説明した。（論文 3）

(2) 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。

放電容量と放電レートとの相関

ナトリウムイオン二次電池のレート特性（電流密度に対する容量劣化）において、イオン拡散は重要な要因の一つであると考えられる。しかしながら、二次電池の開発研究においては、分極効果（電流を流すことによる放電電位の低下）で実験結果が解釈されてきた。我々は、イオン拡散の影響を抽出するために、放電容量における電圧降下成分を補正して、放電容量と放電レートとの関係を実験的に明らかにした。（図 64）横軸は、くりこまれた放電レートで (L^2/DT : L は特徴的な長さ、 D は拡散係数、 T は理論容量の電荷を吐き出す時間) ある。複数の試料が同一の曲線を描く。三次元拡散方程式を数値的に計算（実線）し、実験結果を説明した。（論文 6）

イオン拡散係数と格子定数との相関

ヘキサシアノフェライトは有望なりチウム/ナトリウムイオン二次電池正極材料である。この物質の構

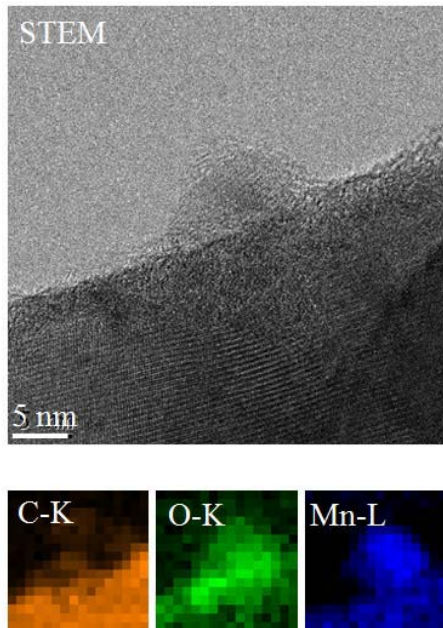


図 65 グルコース熱処理によるマンガン・ヘキサシアノフェライトの TEM 観察。下図は、EELS による元素マップである。

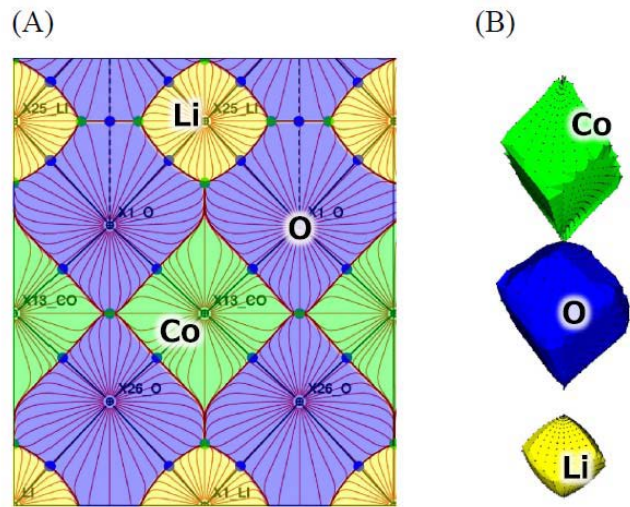


図 66 LiCoO_2 のトポロジカル解析。

成定数は、遷移金属のイオン半径を変えることで精密に制御できる。我々は、この物質のイオン拡散係数と格子定数の相関を実験的に明らかにした。格子定数の増大に伴い、イオン拡散係数は増大し、イオン拡散係数の活性化エネルギーが低下する。(論文 7)

グルコース熱処理によるマンガン・ヘキサシアノフェライトのレート特性の向上

マンガン・ヘキサシアノフェライトは、低コストナトリウムイオン二次電池材料である。この物質の欠点は電気伝導性が低いことである。我々は、マンガン・ヘキサシアノフェライトの表面にグルコース熱処理を加え、レート特性の向上に成功した。試料を TEM 観察したところ、マンガン酸化物のナノ粒子が析出していることが分かった。(図 65) このナノ粒子が電気伝導性向上の要因であると考えられる。(論文 8)

LiCoO_2 のトポロジカル解析

LiCoO_2 について、SPring-8 の BL44B2 で、統計精度と逆空間の分解能を極限まで高めるために、4 つの露光時間と回折角度範囲の異なるデータを測定した。これを、開発・発展を進めてきた精密電荷分布解析法により解析し、マキシマムエントロピー法および多極子展開解析で電子密度分布を求めた。さらに、関数で解析的に表される多極子電子密度については、Bader's Topological 解析により Co-O 結合の評価を行った。(図 66) その結果、Co 周りの O 方向の電子密度が少なくなっていることが分かった。このことは、Co の 3d 電子が O を避けるように分布していることを示している

(3) 熱電変換に関する研究

室温付近の排熱利用は、地球環境の保全と環境社会の実現に不可欠である。半導体を用いた熱電変換は、(1) 希少元素の利用により高コスト、(2) かさばる素子形状、等の問題がある。

新しい電池型熱発電素子の提案と実証

室温付近の排熱利用は、地球環境の保全と環境社会の実現に不可欠である。しかしながら、従来型の

半導体を用いた熱電変換は、(1) 希少元素の利用により高コスト、(2) かさばる素子形状、等の問題がある。我々は、二次電池型熱発電素子を提案し、その実証（起電力の発生と充電・放電）に成功した。（論文 6）

我々の提案する熱発電素子では、二次電池の正極と負極に同じ活物質電極を配置し、正極と負極の温度差による起電力の差を利用して、発電を行う。この二次電池型熱発電素子には、(1) 低コストである二次電池活物質が利用可能、(2) 二次電池製造技術・インフラを転用可能、(3) シート型熱発電素子であるため用途多様、(4) 他熱電変換技術と競合しない、(5) 性能指数 Z の理論上限がない、(6) 材料探索・開発は未開拓、といった産業上および科学上の利点がある。

天然鉱物熱電変換材料の構造物性

天然鉱物として存在する熱電変換材 $\text{Cu}_{12}\text{Sb}_4\text{S}_{13}$ について 80K 以下の磁気転移に伴う構造の変化を、SPring-8 にて粉末および単結晶 X 線回折実験により調べた。その結果、相転移に伴い、Cubic が Tetragonal に変化すること、 abc 軸共に 2 倍の超格子反射が現れることが明らかになった。超格子反射の消滅側から体心格子を取ることが分かった。低温ではツインとなり構造解析は不可能だったためこの時点までの構造を報告した。（論文 21）

(4) 水素吸蔵に関する研究

水素分子は、二酸化炭素を排出しないクリーンなエネルギー源として実用研究が活発に行われるとともに、2 個の陽子と 2 個の電子からなる立体構造および電子構造の明快さから、基礎科学の分野でも長年にわたって研究がされている。

多孔性錯体の吸蔵水素のオルソパラ変換と構造相関

三次元ホフマン型類似配位高分子 $\text{Fe}(\text{pyrazine})[\text{Pd}(\text{CN})_4]$ が細孔あたり 65K で約 2.7 分子、35K で約 3.3 分子の水素を吸着できることを見出した。温度によって細孔あたりの吸着量が変化することから、細孔内での水素原子の配置を SPring-8 でのその場 X 線回折実験により観測した。その結果、65K と 35K では、水素の位置が異なることが分かった。また、配列変化に伴う、水素の核スピンの状態を水素吸着下ラマン散乱により調べ、温度低下に伴いオルト水素が数百秒の時間スケールでパラ水素に変換されることを観測した。（論文 23）

分子性新材料の構造決定

熱電特性を示す金属錯体一次元鎖の構造および第二高調波発生を示したドナー・アクセプター接合分子の構造を単結晶 X 線回折により決定し、機能の起源について議論した。また、フェロセン・アントラキノン共役接合錯体の微粉末から開発した遺伝的アルゴリズムによる構造決定法を利用して 3 次元構造を決定することにも成功した。（論文??,??）

(5) 低次元ナノスケール物質の物性解明

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

異なる振る舞いを示すことが明らかになった。

〈論文〉

1. Kouhei Yonezawa, Takeshi Yasuda, and Yutaka Moritomo, Temperature effects on carrier formation dynamics in organic heterojunction solar cell, *Appl. Phys. Lett.* 107 (2015) 133903.
2. Kouhei Yonezawa, Takeshi Yasuda, and Yutaka Moritomo, Temperature-independent carrier formation dynamics in bulk heterojunction, *Appl. Phys. Express* 8 (2015) 112301.
3. Yutaka Moritomo, Kouhei Yonezawa and Takeshi Yasuda, Carrier density effect on recombination in PTB7-based solar cell, *Sci. Rep.* 5 (2015) 13648.
4. Yutaka Moritomo, Kouhei Yonezawa, and Yasuda Takeshi, Spectroscopic determination of charge formation efficiency of organic photovoltaic cells, *Mol. Cryst. Liq. Cryst.* 620 (2015) 26-31.
5. Yutaka Moritomo, Kouhei Yonezawa, Takeaki Sakurai, Takeshi Yasuda, Yasuo Takeichi, Hayato Kamioka, Hiroki Suga, Yoshio Takahashi, Yuji Yoshida, Nobuhito Inami, Kazuhiko Mase and Kanta Ono, Morphology of F8T2/PC71BM blend film as investigated by scanning transmission X-ray microscope (STXM)", *Mol. Cryst. Liq. Cryst.* 620 (2015) 32-37.
6. Ayumu Yanagita, Takayuki Shibata, Wataru Kobayashi, and Yutaka Moritomo, Scaling relation between renormalized discharge rate and capacity in Na_xCoO_2 films, *APL Materials* 3 (2015) 106104.
7. Masamitsu Takachi, Yuya Fukuzumi and Yutaka Moritomo, Na^+ diffusion kinetics in nanoporous metal-hexacyanoferrates, *Dalton Trans.* 45 (2016) 458-461.
8. Yutaka Moritomo, Kensuke Goto, and Takayuki Shibata, Glucose-treated manganese hexacyanoferrate for sodium-ion secondary battery, *Energies* 8 (2015) 9486-9494.
9. Wataru Kobayashi, Akemi Kinoshita, and Yutaka Moritomo, Seebeck effect in a battery-type thermocell, *Appl. Phys. Lett.* 107 (2015) 073906.
10. Eiji Nishibori Takayuki Shibata, Wataru Kobayashi, and Yutaka Moritomo, Bonding nature of LiCoO_2 by topological analysis of electron density from X-ray diffraction, *Electrochemistry* 83 (2015) 840-842.
11. Yutaka Moritomo, Tomoyuki Matsuda, Yutaro Kurihara, and Jungeun Kim, "Erratum: Cubic-rhombohedral structural phase transition in $\text{Na}_{1.32}\text{Mn}[\text{Fe}(\text{CN})_6]_{0.83} \cdot 3.6\text{H}_2\text{O}$, [*J. Phys. Soc. Jpn.* 80, 074608 (2011)]", *J. Phys. Soc. Jpn.* 85 (2016) 9038001.
12. S. Moser, S. Fatale, P. Krüger, H. Berger, P. Bugnon, A. Magrez, H. Niwa, J. Miyawaki, Y. Harada, and M. Grioni, Electron-phonon coupling in the bulk of anatase TiO_2 measured by resonant inelastic x-ray spectroscopy, *Phys. Rev. Lett.* 115 (2015) 096404.
13. Hisao Kiuchi, Takahiro Kondo, Masataka Sakurai, Donghui Guo, Junji Nakamura, Hideharu Niwa, Jun Miyawaki, Maki Kawai, Masaharu Oshima and Yoshihisa Harada, Characterization of nitrogen species incorporated into graphite using low energy nitrogen ion sputtering, *Phys. Chem. Chem. Phys.* 18 (2016) 458-465.
14. Yusuke Nanba, Tatsumi Iwao, Benoit Mortemard de Boisse, Wenwen Zhao, Eiji Hosono, Daisuke Asakura, Hideharu Niwa, Hisao Kiuchi, Jun Miyawaki, Yoshihisa Harada, Masashi Okubo, Atsuo

- Yamada, Redox potential paradox in Na_xMO_2 for sodium-ion battery cathodes” , *Chem. Mater.* 28 (2016) 1058-1065.
15. Hisao Kiuchi, Riku Shibuya, Takahiro Kondo, Junji Nakamura, Hideharu Niwa, Jun Miyawaki, Maki Kawai, Masaharu Oshima, and Yoshihisa Harada, Lewis basicity of nitrogen-doped graphite observed by CO_2 chemisorption, *Nanoscale Res. Lett.* 11 (2016) 127.
 16. Yuta Nabae, Shinsuke Nagata, Teruaki Hyakawa, Hideharu Niwa, Yoshihisa Harada, Masaharu Oshima, Ayano Isoda, Atsushi Matsunaga and Kazuhisa Tanaka, Morphology controlled carbon-based fuel cell catalyst from spherical polyimide, *Sci. Rep.* 6 (2016) 23276.
 17. Hidetaka Kasai, Eiji Nishibori*. Multiple powder diffraction data for an accurate charge density study using synchrotron radiation X-ray. *Phys. Scripta.* (2016) 91, 043009 (7pages).
 18. Biao Zhou*, Satomi Ogura, Qi Zhi Liu, Hidetaka Kasai, Eiji Nishibori, Heng Bo Cui, Reizo Kato, and Akiko Kobayashi. A Single-component Molecular Conductor with Metal-metal Bonding, $[\text{Pd}(\text{hfdt})_2]$ (hfdt = bis(trifluoromethyl) tetrathiafulvalenedithiolate). *Chem. Lett.* (2016) 45, 303-305.
 19. Masaki Shimada, Mizuho Tsuchiya, Ryota Sakamoto, Yoshinori Yamanoi,* Eiji Nishibori, Kunihisa Sugimoto, and Hiroshi Nishihara* Bright Solid-State Emission of Disilane-Bridged Donor-Acceptor-Donor and Acceptor-Donor-Acceptor Chromophores. *Angew. Chem. Int. Ed.* (2016) 128, 3074-3078.
 20. Takayuki Nakashima, Masaki Shimada, Yu Kurihara, Mizuho Tsuchiya, Yoshinori Yamanoi*, Eiji Nishibori, Kunihisa Sugimoto, and Hiroshi Nishihara*, “Fluorescence and phosphorescence of a series of silicon-containing six-membered-ring molecules”, *J. Organometallic Chemistry.* (2016) 805, 27-33.
 21. Hiromi I. Tanaka, Koichiro Suekuni*, Kazunori Umeo, Toshiki Nagasaki, Hitoshi Sato, Galif Kutluk, Eiji Nishibori, Hidetaka Kasai, and Toshiro Takabatake, “Metal-semiconductor transition in tetrahedrite $\text{Cu}_{12}\text{Sb}_4\text{S}_{13}$ ”, *J. Phys. Soc. Jpn.* 85, 014703 (2016).
 22. E. Nishibori, T. Shibata, W. Kobayashi, Y. Moritomo, “Bonding nature of LiCoO_2 by topological analysis of electron density from X-ray diffraction”, *Electrochemistry*, (2015) 83, 840-842.
 23. Takashi Kosone, Akihiro Hori, Eiji Nishibori*, Yoshiki Kubota, Akio Mishima, Masaaki Ohba, Hiroshi Tanaka, Kenichi Kato, Jungeun Kim, José Antonio Real, Susumu Kitagawa, Masaki Takata*, “Coordination Nano-Space as Stage of Hydrogen Ortho-Para Conversion”, *Royal Society Open Science.* (2015), 2, 150006
 24. Naoyuki Katayama*, Kenta Kimura, Yibo Han, Joji Nasu, Natalia Drichko, Yoshiki Nakanishi, Mario Halim, Yuki Ishiguro, Ryuta Satake , Eiji Nishibori, Masahito Yoshizawa, Takehito Nakano, Yasuo Nozue, Yusuke Wakabayashi, Sumio Ishihara, Masayuki Hagiwara, Hiroshi Sawa, and Satoru Nakatsuji, Absence of Jahn-Teller transition in the hexagonal $\text{Ba}_3\text{CuSb}_2\text{O}_9$ single crystal. *Proceedings of the National Academy Sciences United States America*, (2015) 112, 9305-9309.
 25. Eiji Nishiobri, Masaki Takata, Element-selective visualization for materials science using synchrotron X-ray two-wavelength anomalous powder diffraction data., *Transactions of the Materials Research Society of Japan* (2015) 40[2], 165-168.
 26. Nobuhiro Mizuno, Eiji Nishibori, Mitsuru Oka, Takahito Jomori, Masaki Takata, Takashi Ku-

- masaka,, “Structural basis for polymorphic and solvation properties of the organogermanium crystalline polymer propagermanium and its derivatives”, *J. Pharm. Sci.* (2015) 104, 2482-2488.
27. M. Maruyama, S. Okada, “Geometric and Electronic Structures of Polymerized C32 Fullerenes: Electronic Structure Tuning by Fullerene and Carbon Nanotube Filling”, *Jpn. J. Appl. Phys.* 54, 06FF02 (2015). (10.7567/JJAP.54.06FF02)
 28. U Ishiyama, N.-T. Cuong, S. Okada, “Threshold voltage variation for charge accumulation in carbon nanotube owing to monatomic defect arrangement”, *Jpn. J. Appl. Phys.* 54, 06FF04 (2015). (10.7567/JJAP.54.06FF04)
 29. K. Narita, S. Okada, “Electronic structures of Decamethyl C60 under an Electric Field”, *Jpn. J. Appl. Phys.* 54, 06FF09 (2015). (10.7567/JJAP.54.06FF09)
 30. T. Igarashi, H. Kawai, K. Yanagi, N.-T. Cuong, S. Okada, T. Pichler, “Manipulation of Localized Transverse Surface Plasmon Resonance in Electricity-selected Single-wall Carbon Nanotubes by Electric Double Layer Carrier Injections”, *Phys. Rev. Lett.* 114, 176807 (2015). (10.1103/PhysRevLett.114.176807)
 31. S. Kigure, H. Omachi, H. Shinohara, S. Okada, “Nano-Saturn: Energetics of the Inclusion Process of C60 into Cyclohexabiphenylene”, *J. Phys. Chem. C* 119, 8931- 8936 (2015). (10.1021/acs.jpcc.5b00449).
 32. H. E. Lim, Y. Miyata, M. Fujihara, S. Okada, H. Omachi, R. Kitaura, H. Shinohara, “Fabrication and Optical Probing of Highly-Extended, Ultrathin Graphene Nanoribbons in Carbon Nanotubes”, *ACS NANO* 9, 5034-5040 (2015). (10.1021/nm507408m)
 33. U Ishiyama, N.-T. Cuong, S. Okada, “Influence of Defects for Carrier Injection In Carbon Nanotubes”, *Jpn. J. Appl. Phys.* 54, 065101 (2015). (10.7567/JJAP.54.065101)
 34. K. Narita, S. Okada, “Radical Spin Interaction in One-dimensional Chain of Decamethyl C60”, *Chem. Phys. Lett.* 634, 129-133 (2015). (doi:10.1016/j.cplett.2015.05.075)
 35. D. Matsumoto, K. Yanagi, T. Takenobu, S. Okada, and K. Marumoto, “Electrically induced ambipolar spin vanishments in carbon nanotubes”, *Scientific Rep.* 5, 11859 (2015). (doi:10.1038/srep11859)
 36. M. Maruyama, N.-T. Cuong, S. Okada, “Geometric and electronic structures of two-dimensional networks of fused C36 fullerenes”, *J. Phys. Soc. Jpn.* 84, 084706 (2015). (doi: 10.7566/JPSJ.84.084706)
 37. M. Nakamura, S. Yoshida, T. Katayama, A. Taninaka, Y. Mera, S. Okada, O. Takeuchi, H. Shigekawa, “Three-dimensional dynamic probe imaging mechanically activated switching of Si-based single-molecule junction”, *Nature Commun.* 6, 8465 (2015). (doi:10.1038/ncomms9465)
 38. T. Kondo, D. Guo, T. Shikano, T. Suzuki, M. Sakurai, S. Okada, J. Nakamura, “Observation of Landau levels on nitrogen-doped flat graphite surfaces without external magnetic fields”, *Sci. Rep.* 5, 16412 (2015). (DOI: 10.1038/srep16412)
 39. K.-M. Bui, V.-A. Dinh, S. Okada, T. Ohno, “Hybrid functional study of the NASICON-type Na₃V₂(PO₄)₃: Crystal and electronic structures, and polaron-Na vacancy complex diffusion”, *Phys. Chem. Chem. Phys.* 17, 30433-30439 (2015). (DOI: 10.1039/c5cp05323d)
 40. K. Kishimoto, S. Okada, “Influence of the Defects on the Electronic Structures of Bilayer

- Graphene”, *Surf. Sci.* 644, 18-23 (2016). (doi:10.1016/j.susc.2015.08.036)
41. A. Yamanaka, S. Okada, “Energetics and electronic structures of graphene nanoribbons under a lateral electric field”, *Carbon* 96, 351-361 (2016). (doi:10.1016/j.carbon.2015.09.054)
 42. M. Maruyama, S. Okada, “Magnetic Properties of Graphene Quantum Dots Embedded in h-BN Sheet”, *J. Phys. Chem. C* 120, 1293-1302 (2016). (DOI: 10.1021/acs.jpcc.5b09882).
 43. A. Yamanaka, S. Okada, “Influence of electric field on electronic states of graphene nanoribbons under a FET structure”, *Jpn. J. Appl. Phys.* 55, 035101 (2016), (DOI: 10.7567/JJAP.55.035101)
 44. P. Solis-Fernandez, S. Okada, T. Sato, M. Tsuji, H. Ago, “Gate-Tunable Dirac Point of Molecular Doped Graphene”, *ACS Nano* 10, 2930 - 2939 (2016). (DOI: 10.1021/acsnano.6b00064)

〈著書・総説等〉

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

〈研究成果発表〉

[国際会議]

1. (invited) Y. Moritomo “average and local structure of cathode materials for SIB” seminar at NSRRC, 新竹、2015/3/14
2. (invited) W. Kobayashi, “Sodium ion diffusion and electrochemical Seebeck effect in layered Na_xMO_2 ”, 1h seminar, 2015/6/5, CRISMAT laboratory, Caen
3. Y. Moritomo, “Coordination polymer as Na-ion secondary battery material”, 18th International Symposium on Intercalation Compounds (ISIC18), Strasbourg, 2015/6/2
4. (invited) H. Niwa, “Operando soft X-ray emission spectroscopy of non-Pt oxygen reduction catalysts for polymer electrolyte fuel cells”, TGSW2015, EPOCHAL TSUKUBA, Tsukuba, Japan, 2015/9/30
5. (invited) H. Niwa, “In situ and operando soft X-ray emission spectroscopy of non-Pt fuel cell catalysts”, IXS2015, Oral, The 9th International Conference on Inelastic X-ray Scattering (IXS2015), National Synchrotron Radiation Research Center, Hsinchu, Taiwan, 2015/9/25
6. Eiji Nishibori, Structural Studies using multiple powder diffraction dataset. The 13th Conference of the Asian Crystallographic Association, 8, December, 2015, Kolkata, India
7. Eiji Nishibori, Multiple powder diffraction profiles for charge density study using synchrotron radiation X-ray. *Samgamore XVIII*, 10, Jul. 2015, サルデーニャ、イタリア
8. (invited) Susumu Okada, “Geometric and electronic structures of nanocarbon hybrid materials”, CCTN15: Tenth International Symposium on Computational Challenges and Tools for Nanotubes, June 28, 2015, Nagoya University (Nagoya).
9. W. Kobayashi, T. Shibata, and Y. Moritomo, “Large Na^+ diffusion coefficient in layered Na_xMO_2 ($M = \text{Co}, \text{Mn}$)”, 18th International Symposium on Intercalation Compounds (ISIC18), Strasbourg, 2015/5/31 (ポスター)

[国内学会・研究会]

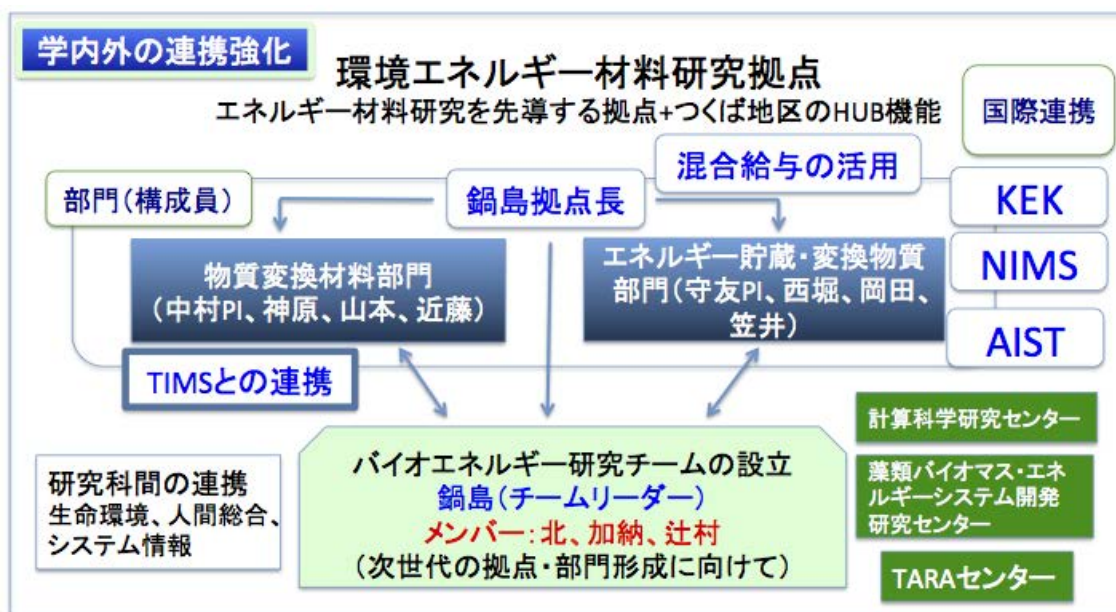
1. (招待) 守友 浩「ナトリウムイオン二次電池の X 線分光/回折」第 18 回 XAFS 討論会, KEK, 2015/7/29-31
2. (招待) 守友 浩「エネルギー変換・貯蔵部門」CiRfSE シンポジウム, 2016/1/18-19, 筑波大学
3. (招待) 守友 浩、他「有機薄膜太陽電池の電荷生成」第 64 回高分子討論会@仙台、2015/9/16
4. (招待) Y. Moritomo, "charge-driven phase transition in cobalt hexacyanoferrates" PCOS2015, 熱海、2015/11/26-27
5. (招待) 守友 浩、他「有機薄膜代用電池の STXM」PF 研究会「X 線顕微分光の新展開」PF2015/10/2
6. 守友 浩「ナトリウムイオン二次電池材料 PBA の固溶体の Redox 反応」第 18 回 XAFS 討論会, KEK, 2015/7/29-31
7. 柴田恭幸、後藤謙典、高地雅光、守友 浩「マンガン・プルシアンブルー類似体の熱処理効果と電気化学特性」第 5 6 回電池討論会、愛知県産業労働センター、2015/11-11-13
8. 小林 航、木下 明美、守友 浩「二次電池型熱電変換セルの試作と評価」第 76 回応用物理学会秋季学術講演会、名古屋国際会議場、2015/9/13-16
9. 福住 勇矢、小林 航、守友 浩「チタン酸化物のイオン拡散と構造相関」第 76 回応用物理学会秋季学術講演会、名古屋国際会議場、2015/9/13-16
10. 高地 雅光、福住 勇矢、守友 浩「プルシアンブルー類似体の Li^+/Na^+ 拡散係数と格子定数依存性」第 76 回応用物理学会秋季学術講演会、名古屋国際会議場、2015/9/13-16
11. 赤間 翔太、柴田 恭幸、高地 雅光、小林 航、守友 浩「ナトリウムイオン電池正極層状酸化物の EXAFS 解析」第 76 回応用物理学会秋季学術講演会、名古屋国際会議場、2015/9/13-16
12. 福住 勇矢、小林 航、守友 浩「イオン拡散における充填効果」第 63 回応用物理学会春季学術講演会、東工大、2016/3/19-22
13. 柴田 恭幸、浦瀬 翔太、守友 浩「マンガン・プルシアンブルー類似体のリチウムイオン二次電池負極挙動」第 63 回応用物理学会春季学術講演会、東工大、2016/3/19-22
14. 小林 航、天羽 薫、赤間 翔太、丹羽 秀治、守友 浩「O3 型 $\text{Na}_x\text{Co}_{1-y}\text{Fe}_y\text{O}_2$ 固溶体の EXAFS 解析」第 63 回応用物理学会春季学術講演会、東工大、2016/3/19-22
15. 赤間 翔太、天羽 薫、小林 航、丹羽 秀治、守友 浩「P2 型 $\text{Na}_x\text{Co}_{1-y}\text{Mn}_y\text{O}_2$ 固溶体の EXAFS 解析」第 63 回応用物理学会春季学術講演会、東工大、2016/3/19-22
16. 岡本 淳、張培裕、柴田恭幸、小林航、守友浩、黃迪靖、“XAS による P2 型 Na_xCoO_2 薄膜電極の電子状態の研究”、日本物理学会 2015 年秋季大会、2015/9/16-19、関西大学 (千里山キャンパス)
17. 畠山あかり、西堀英治、Lei Miao, 木村薫、高田昌樹、放射光粉末 X 線回折データを用いた $\text{W}_x\text{V}_{1-x}\text{O}_2$ の物理的モデルに基づく構造研究 第 29 回放射光学会年会、2016 年 1 月 13 日、東京大学柏キャンパスサテライト
18. 東山和幸「K 吸着 Pd(110) 表面の構造と電子状態：実験と第一原理計算」日本物理学会年次大会、東北学院大学泉キャンパス、2016/3/19 (ポスター)
19. 丹羽秀治、中島淳貴、宮脇淳、原田慈久、森田将史、福田勝利「軟 X 線発光分光による第四級アンモニウムカチオンの水和状態観測」柏の葉カンファレンスセンター、2016/1/9-11、(ポスター)
20. R. L. Magn`usson, W. Kobayashi, and Y. Moritomo, "Li⁺ intercalation into layered chalcogenides", IWP2015, Tsukuba, 2015/9/4 (poster)

21. M. Takachi, Y. Fukuzumi, and Y. Moritomo, "Diffusion constant of Li^+/Na^+ in Prussian Blue Analogues (PBAs)", IWP2015, Tsukuba, 2015/9/4 (poster)
22. S. Akama, W. Kobayashi, T. Shibata, M. Takachi, and Y. Moritomo, "XAFS analysis of layered oxides as sodium ion secondary battery cathode material", IWP2015, Tsukuba, 2015/9/4 (poster)
23. Y. Fukuzumi, W. Kobayashi, and Y. Moritomo, " Na^+/Li^+ diffusion in $\text{Na}_2\text{Ti}_n\text{O}_{2n+1}$ ($n=3, 6$)", IWP2015, Tsukuba, 2015/9/4 (poster)
24. K. Yonezawa, and Y. Moritomo, "Molecular Mixing in Donor and Acceptor Domains as Investigated by Scanning Transmission", IWP2015, Tsukuba, 2015/9/4 (poster)

〈その他特記事項〉

1. 守友 浩：太陽電池に関する記事:日刊工業新聞 2015.10.6 「有機太陽電池の発電解明」
2. 守友 浩、小林 航：熱電変換に関する記事:日刊工業新聞 2015.8.24 「熱電変換セルを安価に」
3. 守友 浩：共同研究に関する記事:日本経済新聞 2015.8.7 「筑波大、共同研究を強化」
4. 小林 航、守友 浩：Rognvaldur Lindal Magnusson 君が IWP2015 においてポスター賞を受賞

4.3 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。また設置に伴い、研究発表会を平成27年12月7日に総研B棟609-2号室で開催した。発表者は連携教員の北将樹准教授、加納英明准教授、辻村清也准教授の若手教員3名。

バイオエネルギー研究チームは以下に示した指針で研究を推進する。

1. 微細藻類オーランチオキトリウムは、高品質な油脂、炭化水素や長鎖脂肪酸などを効率良く生産する。この藻類から抽出して得られるオイルを加工し、化粧品やサプリメント、家畜飼料などに製品化する試みが、筑波大学 ABES 渡邊研究室やバイオベンチャー会社により進められている。そこで、オイルを生産する微細藻類由来の二次代謝産物を詳しく調べることで、有用な生理活性物質の発見と機能解明を目指す。

2. 酵素を電極触媒としてもちい、非常に穏和な条件で生体関連物質から直接発電することのできる酵素燃料電池に開発している。ナノスケールで細孔構造が制御できる酸化マグネシウムを鋳型とする多孔質炭素を調整し、さらにナノ界面の化学修飾を行うことで、酵素の安定性と活性の向上を進めている。さらに物質輸送性を向上させるマクロ孔も併せ持つ階層細孔構造が制御された材料の開発を進めている。今後は、得られた多孔質炭素をスクリーン印刷により紙などの基板上に印刷し、フレキシブル・軽量酵素燃料電池を開発し、身につけることのできるヘルスマニタリングデバイスの電源としての応用を目指す。そのためにナノ構造上に固定化した酵素に対する乾燥、あるいは共存する溶媒や塩などが及ぼす影響を明らかにする。
3. オーランチオキトリウムは、炭化水素系油であるスクアレンを産生する。これまでの渡邊研究室の研究から、オーランチオキトリウムは培養後 24 時間に特殊な細胞分裂を行い、それがその後のスクアレン産生に非常に影響を及ぼすことがわかっている。これに関して、我々は最近、培養 24 時間のときのみ、細胞内から第二高調波発生 (second harmonics generation; SHG) という非線形光学効果が発生することを発見した。これは、オーランチオキトリウム遊走細胞という、培養初期において特に重要な状態を選択的・特異的に可視化している可能性がある。そこで本研究では CARS (coherent anti-Stokes Raman scattering) イメージングを利用して SHG 発生源のオルガネラを特定する。

平成 27 年度のバイオエネルギー研究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

北将樹准教授は、特異な構造や強力な生物活性を示す天然物に注目して、単離・構造決定、化学合成、およびケミカルバイオロジーの手法を組み合わせることで、有用な機能性分子の創出や生体内作用機序の解明を目指してきた。また、機能性分子の標的生体分子との相互作用を質量分析法で解析する新たな手法を開発することを目指して、以下の研究を実施した。

海洋生物由来の新規ステロイド化合物アプリシアセコステロイド類の単離と構造

海洋生物アメフラシは貝殻を持たない軟体動物であり、防御物質として毒を持つとされる。これまでに、ポリケチド、マクロライド、ステロイドなど、多様な生物活性物質が単離されている。これらの機能性分子は、共生や食物連鎖の関係によりアメフラシ個体に蓄積すると考えられており、化学生態学の観点からも興味深い。新規機能性分子の発見を目指して、抗炎症活性 (LPS で刺激したマウスマクロファージ由来 RAW264.7 細胞の NO 生産抑制作用) を指標にアメフラシ抽出物を分離し、新規 9,11-セコステロイド化合物アプリシアセコステロイド A, B, C (AsA, B, C) を単離した (図 67)。[論文 3,9] 二次元 NMR スペクトルや ECD (円二色性) スペクトルの解析および密度汎関数理論 (DFT) に基づく計算による配座解析などにより、これら 3 種の化合物の構造を決定した。AsA はこれまで報告のない三環性 γ -ジケトン構造を有し、2 回の α -ケトール型転位により AsB から生合成されると推定した。また AsA はヒト前骨髄性白血病細胞株 HL-60 に対する細胞毒性 ($IC_{50} = 16\mu M$) を示した。今後、構造活性相関研究や作用機序解析により、新規な医薬リードの創出や薬理作用機序の発見を目指したい。

海洋生物由来の抗菌活性マクロリド、ミカロライド類の全合成

ミカロライド B (MyB) は、三重県の高知湾で採集された *Mycale* 属カイメン由来のマクロリドである (図 68)。MyB は腫瘍細胞に対する細胞毒性や抗菌活性、アクチン脱重合活性など多様な活性を示し、生物活性発現機構に興味を持たれる。また、MyB は 13 個の不斉炭素原子に加えて、トリオキサゾール構造、共役ケトン構造、ジメチルグリセリン酸エステル基など高度に官能基化されており、有機合成化学の観点からも注目される。今回、山口エステル化とメタセシス反応を鍵段階に用いてマクロラ

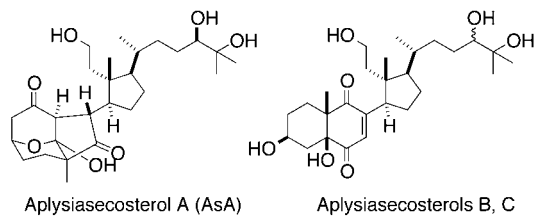


図 67 アプリシアセコステロール類の構造

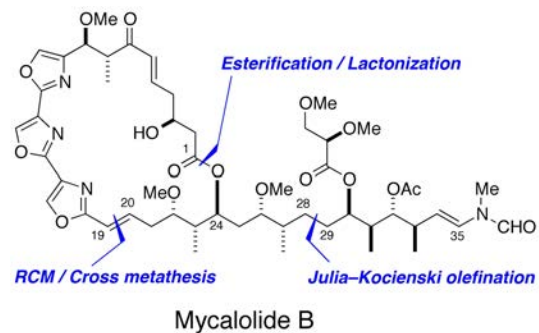


図 68 ミカロライド B の構造と合成戦略

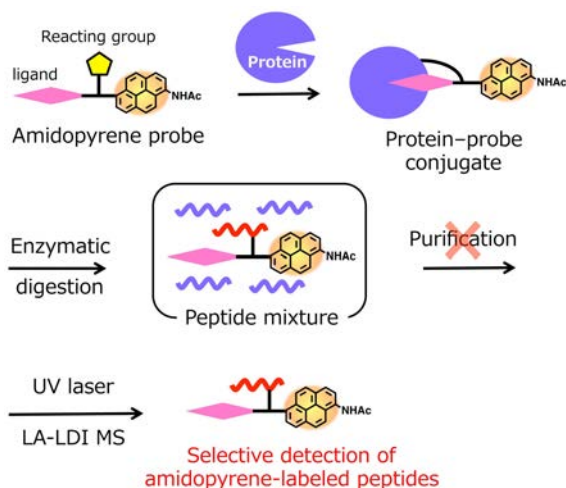


図 69 ピレンプローブを用いた標的分子の結合位置解析法

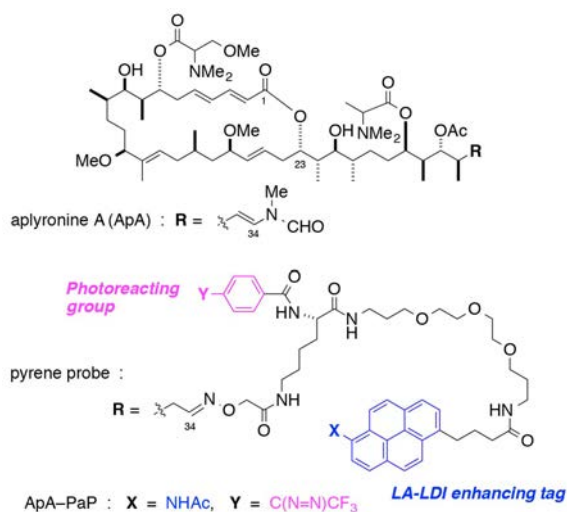


図 70 アプリロニン A および光親和性アミドピレンプローブの構造

クトン環を効率的に構築し、MyB の収束的な全合成を達成した。[論文 4]

LA-LDI MS を用いる標的分子の結合位置解析法の開発

生理活性物質（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）は、標的分子の同定や、結合位置の解析に有用である。今回、蛍光基の特性を活かした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、標的タンパク質のラベル化と酵素消化という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ケミカルプローブの開発を目指した（図 69）。

まず、多環芳香族炭化水素であるピレン基の UV 吸収および蛍光スペクトルの特性に注目して誘導体の LA-LDI MS を検討したところ、6-アミドピレン基が 10 fmol オーダーという、極微量で検出されることを見出した。[論文 5]

さらに、アクチン・チューブリンという2つの細胞骨格タンパク質のタンパク質間相互作用を誘導する海洋抗腫瘍性物質アプリロニン A (ApA) について、光親和性アミドピレンプローブ (ApA-PaP) を合成した（図 70）。ApA-PaP は ApA の強力な生物活性を保持しており、がん細胞の有糸分裂を阻害するとともに、アクチンを脱重合させて定量的に 1:1 の複合体を形成した。しかし、光ラベル化反応では

ApA-PaP は溶媒分子と主に反応し、アクチンとはほとんど共有結合を形成しなかった。現在、反応性官能基の改良と、ラベル化反応や LA-LDI MS 解析法の最適化を検討している。

陸棲哺乳類由来の麻痺性神経毒

食虫動物トガリネズミは、唾液中に毒を持つ珍しい哺乳類であり、脊椎動物や昆虫などの小動物を麻痺させて効率よく捕獲する。以前、ブラリナトガリネズミの顎下腺抽出物からマウス毒性を示すプロテアーゼ毒を発見したが、同じ顎下腺に、昆虫類を速やかに麻痺させる神経毒成分として別の低分子化合物が含まれることが示唆されていた。そこで今回、ミールワーム麻痺活性を指標に顎下腺抽出物を分離し、分子量約 5 kDa の麻痺性ペプチド 2 種 [Blarina paralytic peptides 1 and 2 (BPP1, BPP2)] を単離した。trypsin および Glu-C を用いた溶液内酵素消化と MALDI-TOF/TOF MS 解析により、BPP1, BPP2 の全アミノ酸配列を決定した。BPP1, BPP2 は、哺乳類に普遍的に存在し脳内で分泌されるオピオイドペプチドのプレ配列にあたるシンエンケファリンと高い相同性を示した。これまでに、シンエンケファリンが唾液腺組織で分泌されたり、麻痺活性を示すという報告はなく、BPP 類は新規な麻痺作用性物質として有望である。今後、ジスルフィド結合など二次構造を解析し、化学合成による活性の確認と機能の解明を進める。

(2) 辻村清也准教授

辻村清也准教授は細孔構造が制御された多孔質炭素を用い（1）炭素と酵素の間の界面をデザインすることによるバルク水溶液中よりも高い酵素活性と安定性の実現、（2）酸化還元酵素のハイスループットスクリーニングシステムの構築に向けた検討を行った。さらに（3）酵素固定化と物質輸送性を同時に向上させる新規階層構造を有する炭素材料の開発を行った。

ナノ空間構造及び界面制御による酵素の超活性化

階層構造およびその界面が制御された多孔質炭素電極上に酵素を修飾することで、酵素の安定性及び活性を溶液中の天然のそれよりもはるかに上回る“超活性化”を目指し、以下の成果を得た。

酸化マグネシウム鋳型炭素の構造が酵素電極応答に及ぼす影響をフルクトースデヒドロゲナーゼやピリルビンオキシダーゼを用い検討した。メソ孔サイズが酵素サイズと同程度場合は高い安定性が得られ、細孔サイズが大きい場合は炭素粒子の内側のメソ孔まで利用できることで酵素担持量が増加し高い電流値が得られることがわかった。さらに電気化学インピーダンス測定により、細孔構造、さらには、酵素がどの程度メソ孔を利用できているかを評価できることが分かった。

この多孔質炭素を導電性基板上に泳動電着することでマクロ-メソ階層構造を形成ことで、グルコースオキシダーゼを電極触媒に用いたレドックスハイドロゲルを修飾することで 60 mA cm^{-2} もの大きなグルコース酸化電流が得られた。すなわち、メソ空間を利用した酵素の固定化とマクロ孔を利用した効率的な物質輸送が実現できている。しかし、この“超活性”電流を生み出すには、電極の階層構造のみならず、電解質（特に溶液に溶けているアニオン種の濃度と種類）が強く影響していることがわかった。

そこで、酸化還元酵素と酸化還元ポリマーからなるハイドロゲル修飾電極における様々な電解質の影響をスクリーニングした結果、そのアニオンの影響はホフマイスター系列に準ずることがわかった。すなわち、塩溶作用の強い塩ではハイドロゲルは膨潤し、逆に塩析作用の強い塩ではハイドロゲルは収縮する。前者の場合、応答電流は減少し、後者の場合は増加する。また、負電荷を有する酵素（グルコースオキシダーゼ）と正電荷を有する電子受容体（オスミウム錯体）の間の電子移動には、イオン強度に依存する静電的相互作用と特異的なイオンの吸着が影響していることが明らかになった。ハイドロゲル修飾電極のように酵素と電荷を有する分子が高濃度に存在している場合、その相互作用の理解は非常に重

要である。電流生成効率に影響する酵素とレドックスポリマー間の hidroゲル構造に関する相互作用、酵素とメディエータ間の電子移動反応に関する相互作用を電解質の濃度及び種類により制御することがわかった。このことにより、利用環境や酵素に応じた hidroゲルの設計指針を得ることができるといった。様々な酵素を用いた hidroゲル修飾電極にこの考え方を拡張し、電解質の種類と濃度に依存する電極応答の統一的な解釈を整理した。具体的に疎水的な酵素に対しては塩濃度を上昇させることにより活性を向上させることができた。

一方で、 hidroゲル修飾電極において特定の電解質の濃度を上昇させることで応答安定性が向上（= hidroゲルからの酵素の脱離の抑制）することがわかった。さらに、多孔質炭素を用いることで安定性の向上を達成できた。メソ空間における hidroゲル構造を制御することで酵素の脱離や酵素の変性を抑え、安定性をコントロールすることができるといったことが明らかになった。

酸化還元酵素電極触媒ハイスループットスクリーニング系の構築

一般に酸化還元酵素のスクリーニングには電子受容体（あるいは供与体）色素の酸化還元に伴う色の変化による活性判定が行っている。簡便で多量に酵素のアッセイができるが、その結果が電極触媒活性と必ずしも一致するとも限らない。そこで電気化学法による酸化還元酵素の電極触媒活性のハイスループットスクリーニング系の開発が望まれる。マイクロプレート上でできるだけ少ない量の酵素で活性測定ができるようにチップ上に酵素を担持し活性測定できる多孔質炭素の開発、表面修飾を行う。

1) 多孔質炭素の構造設計：スクリーニングに最適な多孔質炭素材料として“酸化マグネシウム鋳型炭素”に注目した。メソ孔サイズが酵素サイズと同程度場合は高い安定性が得られ、細孔サイズが大きい場合は炭素粒子の内側のメソ孔まで利用できることで酵素担持量が増加し高い電流値が得られることがわかった。2) 多孔質炭素の表面設計：キノンや酸化還元色素が酸化マグネシウム鋳型炭素の表面に安定に吸着すること、さらにメディエータとして機能することわかった。これにより、スクリーニングの対象となる酵素のバリエーションが増した。3) 酵素を電極触媒として利用する場合、酵素-電極間電子移動メカニズムによって酸化還元メディエータを介した反応系（本研究ではレドックス hidroゲル型修飾電極）と、それを用いない直接電子移動系に分類することができる。本研究では、いずれのタイプの酵素反応系にも適用できる適用範囲の広いスクリーニングシステムの構築を目指した。4) 印刷電極のデザインおよび多孔質炭素インクの調整：多孔質炭素を印刷するためのインク調整方法や成分、条件の最適条件を見出した。また、メディエータを炭素インクに添加することで、均一かつ効率よく修飾することができ、印刷電極を作製した際にも、そのメディエータ機能を失わないことがわかった。

バイモーダル炭素の開発

印刷電池における電流値と耐久性の向上に向けて、マクロ、メソ孔構造をあわせ持つ“バイモーダル MgO 鋳型炭素”を開発し、その電極構造を評価した。38nm あるいは 100nm の酸化マグネシウム微粒子を鋳型とした場合 (MgOC₃₈、MgOC₁₀₀)、平均細孔分布は単一のピークを示した。一方で、38nm あるいは 100nm の酸化マグネシウム微粒子両方を 1 : 1 の比率で混合して、多孔質炭素を調製した場合、38nm と 100nm 以上の細孔をともに有していることを水銀ポロシメトリー、窒素吸脱着等温線、電界放射型走査型電子顕微鏡 (FE-SEM) あるいは透過型電子顕微鏡 (TEM) にて観察した。100nm 程度の細孔とその細孔の表面に小さなくぼみが観察されており、期待通りの構造ができていることがわかった。

酸素還元触媒であるビリルビンオキシダーゼ (BOD) を用いて、MgO 鋳型炭素修飾酵素機能電極における電極触媒活性と加熱処理後の残存電極触媒活性をマクロ、メソの混合比を変えることで、酵素機能電極の構造設計に向けた検討を行った。MgOC₃₈、MgOC₁₀₀ とそれら 2 つの細孔径を有するバイモー

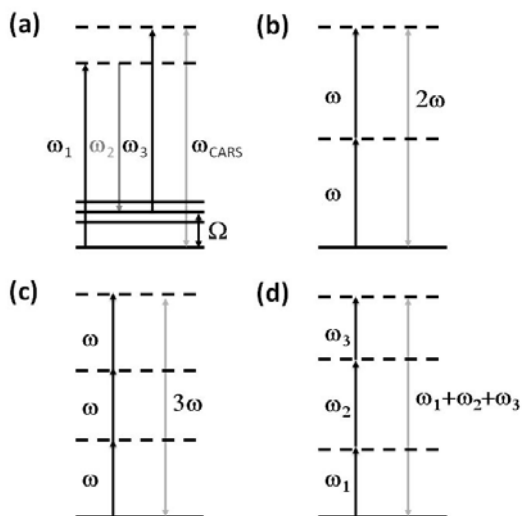


図 71 (a) CARS, (b) SHG, (c) THG, (d) TSFG

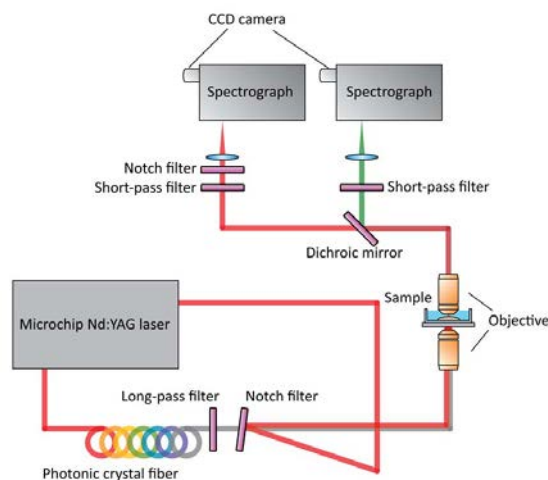


図 72 非線形光学過程を用いた顕微分光イメージング装置

ダル炭素 (MgOC_B) を用いた電極を BOD 溶液に浸漬させた後に電気化学測定を行った。 MgOC_B を用いた場合でも、38nm の細孔を有する炭素で得られた触媒電流と同程度の酸素還元触媒電流が得られた。50 °C の緩衝液溶液に浸漬し、加熱処理を行った後の残存電極触媒活性を比較したところ、 MgOC_B での残存電流値は他の電極の約 2.5 倍増加した。また、加熱前の触媒電流値は酵素の仕込み濃度を上げることによって、 MgOC_{38} よりも上昇した。これは、100nm のマクロ孔の導入により、炭素粒子内部に形成されたマクロ孔内に存在するメソ孔に酵素が効率的に固定化されたためだと考えられる。

次に、バイモーダル炭素調製時に鋳型として用いる 38 と 100nm の酸化マグネシウムの混合比を変えて同様の評価方法において電極触媒活性への影響を検討した。マクロ孔導入量を増やすことで、触媒電流値が増加したが、加熱後の高い残存電流活性を維持していた。よって、マクロ孔の導入量を増やすことで、マクロ孔内にメソ孔を有するメソ・マクロ階層構造が効率的に増加していると考えられる。これによって、触媒電流値および熱安定性を向上させる電極構造を見出すことができたと考えられる。

以上より、酵素を安定に固定化しその活性を十分に引き出すことのできるメソ孔と、物質輸送および体積当たりの有効表面積を増加させるマクロ孔を併せ持つ多孔質炭素材料を作製することができた。

(3) 加納英明准教授

加納英明准教授は、バイオ計測分野の研究を推進した。

生きた細胞中の動的な生命現象を分子レベルかつリアルタイムで追跡することは、分子科学・生命科学双方における究極の目標の一つである。このような視点に基づいて、生細胞内で機能する分子の動的な振る舞いを研究する手法が開発され、実用化されている。このうち最も広く使われている手法は、蛍光色素や蛍光タンパク質による蛍光イメージングである。しかしながら、この手法では試料自身に蛍光物質という異物を導入するため、細胞の本来の姿を忠実に描写しているか否かが問題となる。またこの手法は既知の生体分子にしか適用することができない。これに対して、ラマン分光法は、生きた細胞内の分子分布やそのダイナミクスを、非染色・非標識で観測することのできる、非常に強力な方法である。我々はこれまで、ラマンスペクトルを高効率に取得し、高速にイメージングを行う Coherent Anti-Stokes Raman Scattering (CARS) 分光イメージング装置を開発し、生細胞を含め様々な生体試

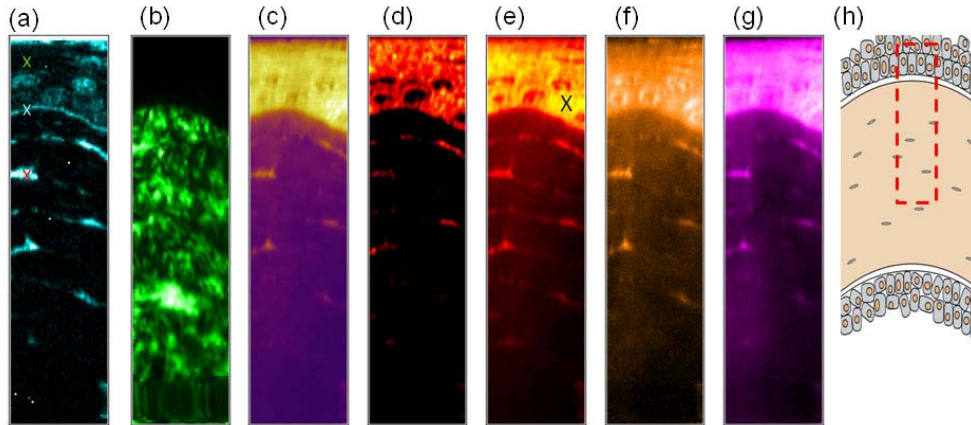


図 73 ラット角膜の非線形マルチモーダル・イメージ; (a) TSFG, (b) SHG, (c) CARS@CH3 伸縮, (d) CARS@CH2 伸縮, (e)CH 変角, (f) CARS@プリン環, (g) CARS@タンパク質フェニルアラニン残基, (h) 角膜と測定領域の概略図

料の可視化を報告している。

本研究では、白色レーザーという新規な光源を用いた、CARSをはじめとする複数の非線形光学効果による顕微イメージング技術の開発と、それを用いた細胞・生体組織の可視化を行った。

CARS の原理

CARS 過程では、図 71(a) に示すように、一般に波長の異なる二つのレーザー光 (ω_1, ω_2 光、またはポンプ光、ストークス光とも言う) を用いる。これら二つの入射光の角振動数差 $\omega_1 - \omega_2$ が試料分子の持つ振動モードの角振動数 W と一致すると、多数の試料分子の振動モードが共鳴的に励振される。このようにして生じた振動コヒーレンスは、試料分子が三つ目のレーザー光 (ω_3 光、またはプローブ光とも言う) と相互作用することにより、三次の非線形分極に由来する ω_{CARS} 光として取り出される。エネルギー保存則から、 $\omega_{\text{CARS}} = \omega_1 - \omega_2 + \omega_3$ であることが要請される。また、位相整合条件から CARS 光は $\mathbf{k}_{\text{CARS}} = \mathbf{k}_1 - \mathbf{k}_2 + \mathbf{k}_3$ の方向に発生する。ここで、 \mathbf{k}_x は ω_x 光の波数ベクトルである。 ω_3 光として、しばしば ω_1 光が用いられる。その場合 ($\omega_3 = \omega_1$)、 ω_{CARS} 光の信号強度は ω_1 光及び ω_2 光の強度の二乗及び一乗にそれぞれ比例する。すなわち、 ω_{CARS} 光の信号強度は ω_1 光の強度に対して非線形に増大する。また、位相整合条件から、CARS 過程により指向性のよいラマン散乱光を得ることができる。このように、ラマン散乱光をコヒーレントかつ非線形に増幅することができるため、高速イメージ測定が可能になる。これに加え、 ω_1, ω_2 光の照射により、様々な他の非線形光学効果が発生する。図 71(b), (c), (d) には、second harmonic generation(SHG)、third harmonic generation(THG)、third-order sum frequency generation(TSFG) のダイアグラムが示されている。CARS と同様に、入力する光強度について非線形に信号強度が増大し、かつ指向性のよい信号を得ることができるため、顕微鏡との組み合わせにより微小領域における細胞・組織の詳細な情報を効率的に得ることが可能である。

CARS 顕微鏡の開発

図 72 に、我々が開発した実験装置を示す。光源にはサブナノ秒マイクロチップレーザー（繰り返し: 33 kHz、パルス幅: 800 ps、スペクトル幅: $< 1 \text{ cm}^{-1}$ 、中心波長: 1064 nm) を用い、出力の一部をフォトニック結晶ファイバー（特注品、Leukos 社）に導入して白色レーザー光を発生させた。白色レーザー

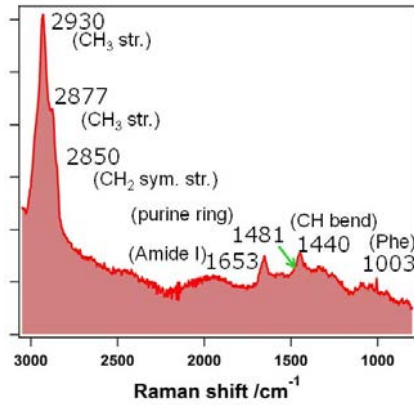


図 74 ラット角膜上皮層における CARS スペクトル (最大エントロピー法により $\text{Im}[\chi^{(3)}]$ に変換済)

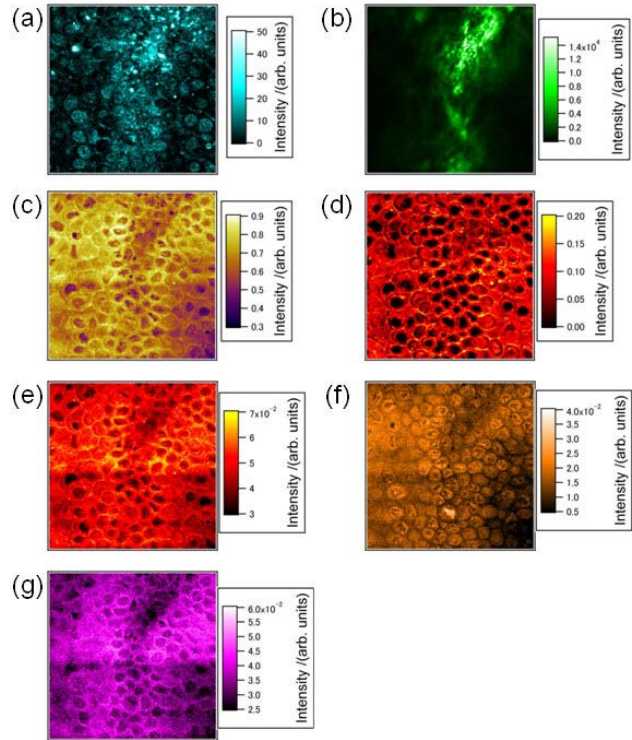


図 75 ラット角膜上皮層における非線形マルチモーダル・イメージ; (a) TSFG, (b) SHG, (c) CARS@ CH_3 伸縮, (d) CARS@ CH_2 伸縮, (e)CH 変角, (f) CARS@プリン環, (g) CARS@タンパク質フェニルアラニン残基

光は可視から近赤外まで、幅広いスペクトル成分を有するが、そのうち 1064 nm 以上の近赤外成分のみを広帯域ストークス光 (ω_2 , 光) として用いた。一方、発振器からの残りの基本波をポンプ光 (ω_1) とし、ノッチフィルターによりストークス光と同軸に顕微鏡へと導入した。この顕微鏡は、倒立顕微鏡 (Nikon: ECLIPSE Ti) の上部に正立顕微鏡を組み合わせ、CARS 用に改造を施した特注品である。二つの光パルスは倒立側の対物レンズにより試料に集光される。試料から発生した CARS 光を正立側の対物レンズで集め、各種フィルターを経由させた後、二台の分光装置にて検出した。近赤外域の信号は、分光器 (Acton 社; LS785) 及び CCD カメラ (Roper Scientific 社; PIXIS 100BR) を、紫外から可視域は分光器 (Acn 社; SpectraPro2300i) 及び CCD カメラ (Roper Scientific 社; PIXIS 100B) を用いた。試料は三軸ピエゾステージ (MadCity; Nano-LP200) 上に載っており、三次元的なスキャンが可能である。

図 73 にラット角膜の結果 (断面像) を示す。ラットから摘出直後の角膜組織を生理食塩水に浸し、*ex-vivo* 測定を行った。図 73 の断面像の上側は上皮層、下側は実質層に相当する。図 73(c-h) は、同時に得られた複数の振動モードに由来する CARS イメージである。このように、白色レーザーを用いることで、様々な振動モードによる複眼的可視化を実現した。

図 74 に、図 73 の× (黒) における CARS スペクトルを示す。イメージングに用いた各々の振動モードが示されている。図 73(a) の TSFG 像では、上皮層に扁平な丸い構造が見られる。これと図 73(f) のプリン環の CARS イメージがよく対応することから、これらは細胞核を可視化していると考えられる。

また、図 73(b) の信号は、上皮層ではまったく観測されず、実質層において非常に強い信号を与えている。これは、実質層におけるコラーゲン (I 型) を可視化していると考えられる。これに加えて、図 73(a) では、上皮層と実質層の間にある基底膜も可視化できている。これらに対して、実質層の CARS イメージには、信号強度の強い領域がまばらに存在しているが、これらは、実質細胞である。図 75 に、上皮層の面内像を示す。図 75(a) の TSFG 像と図 75(f) のプリン環の CARS イメージから、上皮層の細胞核が明瞭に観測されている。以上のように、プリン体 (核酸など)、タンパク質、脂質の分子分布を、ありのままの組織から得ることに成功した。

〈論文〉

1. T. Akindele, B. Gise, T. Sunaba, M. Kita, and H. Kigoshi “Isolation, synthesis and nitric oxide reducing activity of compounds from the marine sponge *Stylisha massa*” *Bull. Chem. Soc. Jpn.*, 88, 600-609 (2015).
2. M. Kita and H. Kigoshi “Marine natural products that regulate multiple cytoskeletal protein interactions” *Nat. Prod. Rep.*, 32, 534-542 (2015).
3. A. Kawamura, M. Kita, and H. Kigoshi “Aplysiasecosterol A: a 9,11-secosteroid with an unprecedented tricyclic γ -diketone structure from the sea hare *Aplysia kurodai*” *Angew. Chem. Int. Ed.*, 54, 7073-7076 (2015).
4. M. Kita, H. Oka, A. Usui, T. Ishitsuka, Y. Mogi, H. Watanabe, M. Tsunoda, M. Matsuki, and H. Kigoshi “Total synthesis of mycalolides A and B through olefin metathesis” *Angew. Chem. Int. Ed.*, 54, 14174-14178 (2015).
5. K. Yoneda, Y. Hu, M. Kita, and H. Kigoshi “Development of an aplyronine A photoaffinity amidopyrene derivative applicable for label-assisted LDI MS” *Sci. Rep.*, 5, 17853 (2015) [DOI: 10.1038/srep17853].
6. 北将樹 “カモノハシの毒” *現代化学* 2015 年 6 月号, p. 26 (2015).
7. M. Kita and H. Kigoshi “Antitumor effects of sea hare-derived compounds in cancer” in *Handbook of Anticancer Drugs from Marine Origin*, Ed. S. -K. Kim (Springer International Publishing Switzerland), pp. 701-740 (2015).
8. Y. Hirayama, P. L. Katavic, A. M. White, G. K. Pierens, L. K. Lambert, A. E. Winters, H. Kigoshi, M. Kita, and M. J. Garson “New cytotoxic norditerpenes from the Australian nudibranchs *Goniobranchus splendidus* and *Goniobranchus daphne*” *Aust. J. Chem.*, 69, 136-144 (2016).
9. M. Kita, A. Kawamura, and H. Kigoshi “Aplysiasecosterols B and C: two new 9,11-secosteroids with a cis-fused 1,4-quinone structure from the sea hare *Aplysia kurodai*” *Tetrahedron Lett.*, 57, 858-860 (2016).
10. Suzuki, A., Tsujimura, S., “Hofmeister effects on the glucose oxidase hydrogel-modified electrode” *Electrochim. Acta*, 201, 228-232 (2016).
11. Suzuki, A., Tsujimura, S., “Long-term continuous operation of FAD-dependent glucose dehydrogenase hydrogel-modified electrode at 37° C” *Chem. Lett.*, 45, 484-486 (2016).
12. Suzuki, A., Murata, K., Mano, N., Tsujimura, S., “Redox hydrogel of glucose oxidase on MgO-templated carbon electrode” *Bull. Chem. Soc. Jpn.*, 89, 24-26 (2016).

13. Tsujimura, S., Murata, K., “Electrochemical Oxygen Reduction Catalyzed by Bilirubin Oxidase with the Aid of 2,2'-Azinobis(3-ethylbenzothiazolin-6-sulfonate) on a MgO-template Carbon Electrode” *Electrochim. Acta*, 180, 555-559 (2015).
14. Murata, K., Shigemori, Y., Tsujimura, S. “Electrochemical activation of a novel laccase, MELAC, isolated from compost” *Chem. Lett.*, 44, 654-655 (2015).
15. Shitanda, I., Tsujimura, S., Yanai, H., Hoshi, Y., Itagaki M., “Electrochemical Impedance Simulation of Branch Structure Porous Carbon Electrode using Transmission Line Model” *Electrochemistry*, 83, 335-338 (2015) .
16. Shitanda, I., Nakafuji, H., Tsujimura, S., Hoshi, Y., Itagaki, M ., “Electrochemical Impedance Study of Screen-printed Branch Structure Porous Carbon Electrode using MgO-templated Carbon and MgO Particle and its Application for Bilirubin Oxidase-immobilized Biocathode” *Electrochemistry*, 83, 329-331 (2015).
17. Funabashi, H., Murata, K., Tsujimura, S., ” Effect of pore size of MgO-templated carbon on the direct electrochemistry of D-fructose dehydrogenase” *Electrochemistry*, 83, 372-375 (2015).
18. Sugimoto, Y., Kitazumi, Y., Tsujimura, S., Shirai, O., Yamamoto, M., Kano, K. “Electrostatic Interaction between an Enzyme and Electrodes in the Electric Double Layer Examined in a View of Direct Electron Transfer-type Bioelectrocatalysis” *Biosens. Bioelectron.*, 63, 138-144 (2015).

〈研究成果発表〉

[国際会議]

1. M. Kita ”Comparative analysis of toxicity in the Cuban solenodon and its potential role in the species” Vth International Wildlife Management Congress 2015 (IWMC2015), Sapporo, Japan, 2015.7.26-30 (招待講演)
2. M. Kita ”Recent advances in the study of actin-targeting natural products” Tsukuba Global Science Week (TGSW2015), Tsukuba, Japan, 2015.9.28-30 (招待講演)
3. M. Kita ”Bioorganic studies on the key natural products from venomous mammals” PACIFICHEM 2015, Hawaii, USA, 2015.12.15-20 (口頭)
4. K. Yamagishi, K. Tsuchiya, T. Chinen, T. Usui, M. Kita, H. Kigoshi ”Evaluation of the binding site of aplyronine A on tubulin by genetic approach” PACIFICHEM 2015, Hawaii, USA, 2015.12.15-20 (ポスター)
5. K. Yoneda, Y. Hu, M. Kita, H. Kigoshi ”Study on the novel chemical probes to analyze protein-ligand interactions” PACIFICHEM 2015, Hawaii, USA, 2015.12.15-20 (ポスター)
6. H. Oka, M. Kita, H. Kigoshi “Total synthesis of mycalolide B, an actin-depolymerizing marine macrolide” PACIFICHEM 2015, Hawaii, USA, 2015.12.15-20 (ポスター)
7. A. Kawamura, M. Kita, H. Kigoshi ” Isolation and structure analysis of novel 9,11-seco-steroids from the sea hare *Aplysia kurodai* ” PACIFICHEM 2015, Hawaii, USA, 2015.12.15-20 (ポスター)
8. M. Kita ”Recent advances in the study of actin-targeting natural products” The 4th Frontier Chemistry Center International Symposium, Sapporo, Japan, 2016.2.23-24 (招待講演)

9. Tsujimura, S., Recent advances in carbon electrodes for the development of enzyme-based biofuel cell, SMOBE-2015, Univ. Antwerpen, Belgium, 2015.8.19 (基調講演)
10. Tsujimura, S., Enzymatic biofuel cell based on porous carbon materials, MANA-RSC symposium Materials for Energy Generation and Storage, Tsukuba, 2015.10.15 (招待講演)
11. Tsujimura S., Biocathode based on a MgO-template carbon electrode modified with ABTS and bilirubin oxidase, The 66th Annual Meeting of the International Society of Electrochemistry, Taipei, 2015. 10.5 (口頭講演)
12. Shitanda I., Nohara S., Tsujimura S., Hoshi Y., Itagaki M., Fabrication of paper-based disk-shaped glucose biofuel array, The 66th Annual Meeting of the International Society of Electrochemistry, Taipei, 2015.10.5. (ポスター)
13. Suzuki A., Murata K., Tsujimura S., Characterization of Glucose Oxidase-Redox Hydrogel on MgO-templated Carbon Electrode, The 66th Annual Meeting of the International Society of Electrochemistry, Taipei, 2015. 10.5. (ポスター)
14. Tsuruoka N., Murata K., Tsujimura S., Glucose Biosensor based on a Glassy Carbon Electrode Modified with Poly(methylene green) and FAD dependent Glucose Dehydrogenase, The 66th Annual Meeting of the International Society of Electrochemistry, Taipei, 2015.10.5. (ポスター)
15. Hiroaki yoneyama, Hiroki Segawa, Ken Nishimura, Aya Fukuda, Kaji Hisatake, and Hideaki Kano, "CARS Molecular Fingerprinting of iPS Cells-Toward Visualizing Pluripotency", ICAVS-8, 12-17 Jul. 2015 (Austria)
16. Hiroaki yoneyama, Hiroki Segawa, Ken Nishimura, Aya Fukuda, Kaji Hisatake and Hideaki Kano, "Nonlinear Multimodal spectral Imaging of Living Cells", The Third Taiwan International symposium on Raman Spectroscopy and TARS Summer School, 30 Jun.-3 Jul. 2015 (Taiwan)
17. Tomoya Ohno, Kei Ishitsuka, Hiroki Segawa, Masaki Yoshida, Makoto Watanabe, and Hideaki Kano, "Multimodal Nonlinear Spectroscopic Imaging of GOD-42 Strain, a New Species of Green Algae", The Third Taiwan International symposium on Raman Spectroscopy and TARS Summer School, 30 Jun.-3 Jul. 2015, Sun Moon Lake (Nantou, Taiwan)
18. Kotaro Hiramatsu, Takashi Nagata, Hideaki Kano, "Visible-excited CARS-ROA Spectroscopy", 15th International Conference on Chiroptical Spectroscopy (CD2015), Aug.30-Sep.3 2015, Hokkaido University (Sapporo, Hokkaido)

[国内学会・研究会]

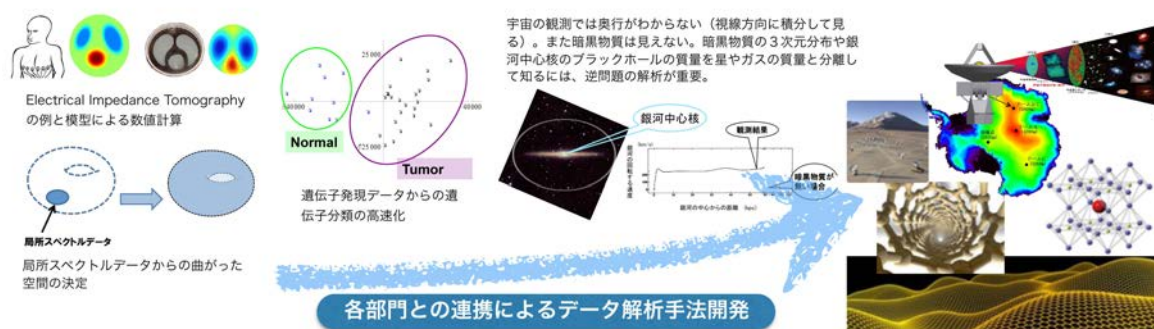
1. 胡亜萍、米田耕三、北将樹、木越英夫「タンパク質-リガンド相互作用を解析する光親和性ピレンプローブの開発」新規素材探索研究会 第14回セミナー、横浜、2015.6.5 (ポスター)
2. 北将樹、砂場大輝、ギセバロ、アキンデレティト、木越英夫「NO生産抑制効果を示す環状ペプチド stylissatin A の合成と構造活性相関研究」日本ケミカルバイオロジー学会第10回年会、仙台、2015.6.10-12 (ポスター)
3. 北将樹「哺乳類由来の神経毒の化学生物学研究」第15回日本蛋白質科学会年会 ワークショップ「バイオインパクトマテリアル：その生体衝撃性の仕組みと応用性」、徳島、2015.6.24-26 (招待講演)
4. 米田耕三、胡亜萍、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新しいケミカルプローブ

- ブの開発」第 57 回天然有機化合物討論会、横浜、2015.9.9 (口頭)
5. 北将樹「哺乳類由来の神経毒の化学生物学研究」第 38 回日本分子生物学会・第 88 回日本生化学会合同大会 (BMB2015)、神戸、2015.12.1-4 (招待講演)
 6. 北将樹「切れ味の良い分子を自然界にもとめて」第 6 回横幹連合コンファレンス、名古屋、2015.12.5-6 (基調講演)
 7. 北将樹「タンパク質-天然物リガンド相互作用を解析するケミカルプローブの開発」新学術領域研究「天然物ケミカルバイオロジー：分子標的と活性制御」地区ミニシンポジウム、東京、2016.3.8 (招待講演)
 8. 渡邊駿、岡大峻、北将樹、木越英夫「閉環メタセシスを用いたミカロライド B の合成」日本化学会 第 96 春季年会、京田辺、2016.3.24-27 (口頭)
 9. 米田耕三、胡亜萍、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新しいケミカルプローブの開発」日本化学会 第 96 春季年会、京田辺、2016.3.24-27 (口頭)
 10. 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 96 春季年会、京田辺、2016.3.24-27 (口頭)
 11. 米山 弘亮、瀬川 尋貴、西村 健、福田 綾、久武 幸司、加納 英明，“iPS 細胞の多能性評価に向けた非線形分光イメージング”，第 6 2 回応用物理学会春季学術講演会，2016 年 3 月 11～14 日（東京）
 12. 秋山 敏宏、瀬川 尋貴、加治 優一、大鹿 哲郎、加納 英明，“マルチモーダル多光子顕微鏡を用いたラット眼組織の分子イメージング”，第 6 2 回応用物理学会春季学術講演会，2016 年 3 月 11～14 日，東京工業大学（東京）
 13. (招待講演) 加納英明，秋山敏宏，“生体組織の非線形ラマン分光イメージング”，医用光学・分光学系合同研究会 (Medical Optics and Spectroscopy 2015) ,2015 年 1 2 月 3 日（東京）
 14. (招待講演) 加納英明，秋山敏宏，“生細胞・生体組織を染めずに見る ～コヒーレント・ラマン分光によるラベルフリーイメージング～”，第 3 6 回日本レーザー医学総会，2015 年 10 月 24 日（栃木）
 15. 秋山 敏宏、瀬川 尋貴、猪子 誠人、加治 優一、大鹿 哲郎、加納 英明，“マルチモーダル多光子分光顕微鏡を用いたラット網膜・視細胞の分子イメージング”，第 9 回分子科学討論会，2015 年 9 月 16～19 日，東京工業大学（東京）
 16. 米山 弘亮、瀬川 尋貴、西村 健、福田 綾、久武 幸司、加納 英明，“非線形マルチモーダル顕微鏡を用いた iPS 細胞のリプログラミング過程の in vivo 追跡”，第 9 回分子科学討論会，2015 年 9 月 16～19 日（東京）
 17. 秋山敏宏、瀬川尋貴、加治優一、大鹿哲郎、加納英明，“マルチモーダル多光子顕微鏡を用いたラット網膜の分子イメージング” 日本分光学会年次講演会，2015 年 6 月 1 日～3 日，東京工業大学（東京）
 18. 大野智哉、石塚圭、吉田昌樹、渡邊信、加納英明，“新規独立栄養性藻類 GOG-42 株のマルチモーダル非線形分光イメージング” 日本分光学会年次講演会，2015 年 6 月 1 日～3 日，東京工業大学（東京）
 19. 石塚圭、瀬川尋貴、小出昌弘、吉田昌樹、渡邊信、沼田治、加納英明，“スクアレンを産生する藻類 (Aurantiochytrium) のマルチモーダル非線形分光イメージング” 日本分光学会年次講演会，2015 年 6 月 1 日～3 日，東京工業大学（東京）

5 逆問題研究推進室 活動報告

逆問題研究推進室

数学と理工学諸分野の密接な連携による、自然現象や理工学諸分野に現れる問題の数理解析と、それによる数理解析、空間モデルの幾何解析と対称性の研究、高次元データ解析と計算アルゴリズム開発などを推進。



- 1.カーボンナノチューブやグラフェンなどに現れる格子の数理解析と物質科学への応用
- 2.空間モデルや準結晶モデルのスペクトル・積分幾何・対称性の研究と宇宙物理・物質科学への応用
- 3.複雑・膨大なデータセットに対する高速・頑健・高精度な統計解析手法、準モンテカルロ法、計算アルゴリズム開発と、計算科学・生命科学への応用

中核教員：磯崎洋教授(室長)、千原浩之教授

推進室長

磯崎 洋 (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)

千原 浩之 (数理物質系数域 教授)

金子 元 (数理物質系数域 国際テニュアトラック助教)

連携教員

青嶋 誠 (数理物質系数域 教授)

竹山 美宏 (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)

梁 松 (数理物質系数域 准教授)

矢田 和善 (数理物質系数域 助教)

逆問題研究推進室は、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・改良も担う、モデリング技法の開発を目指している。平成 27 年度は、巨大なノイズをもった高次元データについて、潜在空間を復元するための理論と方法論を構築した。提案手法は、巨大なノイズに従属性があっても高い精度を保証でき、実データ解析においてノイズで汚れた画像から原画像を復元することに成功した。統計部門の研究成果は国内外から高く評価されており、国際会議での基調講演や日本数学会年会での市民講演会は顕著な業績といえる。社会貢献も活発に行い、大規模複雑データの統計数理に関するシンポジウムを、東京大学・富山県民会館・筑波大学・東京工業大学で計 4 回開催した。多種多様な分野の研究者から多くの関心を集め、研究成果や問題提起について活発な意見交換がなされ、どのシンポジウムも大変に盛況であった。

(2) 数理解析部門：多様体上の幾何解析と逆問題

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

コンパクトリー群の極大対蹠部分群の分類を行った。これは互いに可換な位数 2 の元の極大集合の分類と言い換えることもでき、グラスマン多様体などのコンパクト対称空間の等長変換群に結果を適用することにより、対称性の高い配置にある幾何学的対象を得ることができる。なお、以下の研究集会を世話人として開催した。研究集会「部分多様体論・湯沢 2015」2015 年 11 月 19 日から 21 日、第 14 回秋葉原微分幾何セミナー「山辺不変量と singular Einstein 計量」2015 年 7 月 4 日、第 15 回秋葉原微分幾何セミナー「Extrinsic Symmetric Spaces」2016 年 3 月 25 日。

(4) 代数部門：ランダムネスと数論

Borel 予想に関連する研究をすすめる超越性と代数的独立性に関する新しい結果を digit の情報から導くことができた。さらに Y.Bugeaud, T.Stoll, M.Madritsch, D.H.Kim らとの国際共同研究をすすめることができた。また、J.Caalim と共に回転作用をもつベータ展開のエルゴード性をしらべ、それにより 5 回、7 回などの回転対称性を持つ回析パターンを生成するタイル張りを構成した。これは準結晶の良いモデルとなる。

〈論文〉

統計部門

1. Aoshima, M., Yata, K., Asymptotic normality for inference on multisample, high-dimensional mean vectors under mild conditions, *Methodology and Computing in Applied Probability*, 17 (2015), 419-439.
2. Aoshima, M., Yata, K., Geometric classifier for multiclass, high-dimensional data, *Special Issue:*

Celebrating Seventy Years of Charles Stein's 1945 Seminal Paper on Two-Stage Sampling, *Sequential Analysis*, 34 (2015), 279-294.

3. Yata, K., Aoshima, M., Reconstruction of a high-dimensional low-rank matrix, *Electronic Journal of Statistics*, 10 (2016), 895-917.
4. 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.
5. Wada, Y., Matsuzaki, T., Terui, A., Arai, N., An automated deduction and its implementation for solving problem of sequence at university entrance examination, *Proceedings of ICMS 2016: The 5th International Congress on Mathematical Software, Lecture Notes in Computer Science*, Springer, to appear.

数理解析部門

1. Chihara, H, Fourth-order dispersive systems on the one-dimensional torus, *Journal of Pseudo-Differential Operators and Applications*, 6 (2015), 237-263.
2. Chihara, H, Onodera, E., A fourth-order dispersive flow into Kaehler manifolds, *Zeitschrift fuer Analysis und ihre Anwendungen*, 34 (2015), 221-249.
3. Ando, K., Isozaki, H., Morioka, H., Spectral properties of Schroedinger operators on perturbed lattices, to appear in *Ann. Henri Poincare* (DOI 10.1007/s00023-015-0430-0).
4. Isozaki, H., Morioka, H., Inverse scattering at a fixed energy for discrete Schroedinger operators on the square lattice, *Ann. l'Inst. Fourier* 65, 3 (2015), 1153-1200.
5. Gaitan, P., Isozaki, H., Poisson, O., Siltanen, S., Tamminenn, J., Inverse problems for time dependent singular heat conductivities - Multi-dimensional case, *Comm. in PDE.*, 40 (2015), 837-877.
6. Isozaki, H., Kurylev, Y., Lassas, M., Inverse scattering on multi-dimensional asymptotically hyperbolic orbifold, *Contemporary Mathematics*, 640 (2015), 71-85.

幾何部門

1. Ikawa, O., Tanaka M.S., Tasaki, H., The fixed point set of a holomorphic isometry, the intersection of two real forms in a Hermitian symmetric space of compact type and symmetric triads, *Intern. J. Math.*, 26 no.5 (2015), 1541005 (32pages).
2. Tanaka M.S., Tasaki, H., The intersection of two real forms in Hermitian symmetric spaces of compact type II, *J. Math. Soc. Japan*, 67 (2015), 275-291.
3. Tanaka M.S., Tasaki, H., Correction to: "The intersection of two real forms in Hermitian symmetric spaces of compact type", *J. Math. Soc. Japan*, 67 no. 3 (2015), 1161-1168.
4. Tasaki, H., Estimates of antipodal sets in oriented real Grassmann manifolds, *Intern. J. Math.*, 26 no.5 (2015), 1541008 (12pages).

代数部門

1. Kaneko, H., On the number of nonzero digits in the beta-expansions of algebraic numbers, *Rend. Sem. Mat. Univ. Padova*, in press.

2. Kaneko, H., Komatsu, T., Cauchy-Carlitz numbers, J. Number Theory, to appear.
3. Akiyama, S., Strong coincidence and overlap coincidence, Discrete and Continuous Dynamical System - A, to appear.
4. Akiyama, S., Caalim, J., Rotational beta expansion: Ergodicity and Soficness, Journal of the Mathematical Society of Japan, in press.
5. Akiyama, S., A family of non-sofic beta expansions, Ergodic Theory and Dynamical Systems, 36 (2016), 343-354.
6. Akiyama, S., Thuswaldner, J., Zaïmi, T., Comments on the height reducing property II. Indag. Math., 26 (2015), 28-39.
7. Akiyama, S., Thuswaldner, J., Zaïmi, T., Characterization of the numbers which satisfy the height reducing property, Indag. Math., 26 (2015), 24-27.

〈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 (2015), in press.

数理解析部門

1. 磯崎 洋, 求積法のさきにあるもの-微分方程式はとける, 数学書房 (2015).

幾何部門

1. 田崎博之, 曲線・曲面の微分幾何, 共立講座 数学探検 8 巻, 共立出版 (2015).

代数部門

1. Akiyama, S., Barge, M., Berth'e, V., Lee, J.-Y., Siegel, A., On the Pisot conjecture, a survey article in Mathematics of Aperiodic Order (Ed. J.Kellendonk, D.Lenz, J.Savinien) Progress in Mathematics, 309, pp. 33-72.

〈研究成果発表〉

[国際会議]

統計部門

1. Aoshima, M., High-Dimensional Quadratic Classifiers in Non-Sparse Settings under Heteroscedasticity, ISNPS Meeting “Biosciences, Medicine, and novel Non-Parametric Methods”, Graz (Austria), July 15, 2015 (基調講演)
2. Aoshima, M., Statistical Methods for Heterogeneous Data, ISNPS Meeting “Biosciences, Medicine, and novel Non-Parametric Methods”, Graz (Austria), July 15, 2015 (パネリスト)
3. Aoshima, M., High-Dimensional Classification in Non-Sparse Settings, Kumamoto International

Symposium “High Dimensional Statistical Analysis and Quantile Analysis for Time Series”, Kumamoto University (Kumamoto), March 4, 2016 (招待講演)

4. Yata, K., Aoshima, M., PCA Consistency for High-Dimensional Multiclass Mixture Models and Its Applications, ISNPS Meeting “Biosciences, Medicine, and novel Non-Parametric Methods”, Graz (Austria), July 13, 2015 (招待講演)
5. Yata, K., Aoshima, M., Inference on High-Dimensional Covariance Structures with Fewer Observations Than the Dimension, Waseda International Symposium “High Dimensional Statistical Analysis for Time Spatial Processes & Quantile Analysis for Time Series”, Waseda University (Tokyo), March 1, 2016 (招待講演)
6. Yata, K., Aoshima, M., Two-Sample Tests of High-Dimensional Means under the Strongly Spiked Eigenvalue Model, Waseda International Symposium “High Dimensional Statistical Analysis for Spatio-Temporal Processes & Quantile Analysis for Time Series”, Waseda University (Tokyo), Nov. 10, 2015 (招待講演)
7. Terui, A., Towards Simplified Construction of Subresultant Matrix of Multiple Univariate Polynomials, Dagstuhl Seminar 15251: Sparse modelling and multi-exponential analysis, Wadern (Germany), June 18, 2015 (招待講演)

数理解析部門

1. Song, L., Stochastic Newton equation with absorbing area, Stochastic Analysis and Applications, Tohoku University (Miyagi), August 31, 2015 (招待講演)
2. Isozaki, H., Asymptotic properties of solutions to the elastic equation in a half-space, Control of PDE’s and Applications, CIRM Marseille (France), Nov. 12, 2015 (招待講演)
3. Isozaki, H., Inverse scattering on non-compact manifolds with general metric, Modern theory of wave equations, Semiclassical analysis : Spectral theory and resonances, Wien Schroedinger Institute (Austria), August 28, 2015 (招待講演)
4. Isozaki, H., Inverse scattering on non-compact manifolds with general metric, Spectral and analytic inverse problems, Institute Henri Poincare, Paris (France), May 5, 2015 (招待講演)

幾何部門

1. Tasaki, H., Maximal antipodal subgroups in the automorphism groups of compact Lie algebras, One-day Workshop on “Submanifolds in Symmetric Spaces”, Tokyo Metropolitan University (Tokyo), January 22, 2016 (招待講演)
2. Tasaki, H., Maximal antipodal sets of oriented real Grassmann manifolds, The 11th OCAMI-RIRCM Joint Differential Geometry Workshop on Submanifolds and Lie Theory, Osaka City University (Osaka), March 20-23, 2016 (招待講演)

代数部門

1. Kaneko, H., Arithmetical properties of power series related to β -expansion, Journees Arithmetiques 2015, University of Debrecen (Hungary), July 7, 2015 (一般講演)
2. Kaneko, H., Arithmetical properties of the values of power series, Analytic Number Theory and

- Related Areas, Kyoto University (Kyoto), Nov. 4, 2015 (一般講演)
3. Akiyama, S, Invariant Measures of rotational beta expansions, Fractal and Numeration, Admont (Austria), June 10, 2015 (招待講演)
 4. Akiyama, S, Beta Expansion involving rotation action, Measurabel and Topological Dynamical system, Daejeong (Korea), July 1, 2015 (招待講演)
 5. Akiyama, S, A problem of Tarski and invariant measure of rotational beta, Mini-workshop on symbolic dynamics and related topics, Hiroshima University (Hiroshima), October 23, 2015 (招待講演)
 6. Akiyama, S, Topology of tiles and boundary parametrization, Sino-Japan workshop of Fractal and Dynamical systems, Ningbo (China), December 28, 2015 (招待講演)
 7. Akiyama, S, Rotational Beta expansion and self-similar tilings, Fractal Geometry and related areas, HKUST (China), March 21, 2016 (招待講演)
 8. Akiyama, S, Rotational Beta expansion and self-similar tilings, Substitution and continued fraction, Paris (France), March 7, 2016 (招待講演)

[国内学会・研究会]

統計部門

1. 青嶋 誠, 高次元の統計学, 日本数学会 2016 年度年会市民講演会, 筑波大学 (茨城県つくば市), 2016 年 3 月 19 日 (招待講演)
2. 青嶋 誠, 非スパース性と高次元データの分類, 第 18 回情報論的学習理論ワークショップ, つくば国際会議場 (茨城県つくば市), 2015 年 11 月 25 日 (招待講演)
3. 青嶋 誠, 高次元データの統計数理, 第 4 回数理連携サロン, 筑波大学 (茨城県つくば市), 2015 年 12 月 2 日 (招待講演)
4. 矢田和善, 青嶋 誠, High-Dimensional Two-Sample Tests in General Settings, 科研費シンポジウム「大規模複雑データの理論と方法論：最前線の動向」, 筑波大学 (茨城県つくば市), 2015 年 11 月 16 日 (招待講演)
5. 矢田和善, 高次元データにおける分類問題について, 早稲田大学理工学研究所プロジェクト研究「金融数理および年金数理研究」セミナー, 早稲田大学 (東京都新宿区), 2015 年 5 月 27 日 (招待講演)
6. 照井章, 複数個の 1 変数多項式に対する簡約された部分終結式行列の構成について, 日本数式処理学会 第 24 回大会, 筑波大学 (茨城県つくば市), 2015 年 6 月 5 日 (一般講演)

数理解析部門

1. 千原浩之, Fourth-order linear dispersive systems and dispersive flows into Riemann surfaces, 数理解析セミナー, 広島大学 (広島県東広島市), 2015 年 6 月 12 日 (招待講演)
2. 千原浩之, 分散型写像流の幾何解析, 第 3 回数理連携サロン, 筑波大学 (茨城県つくば市), 2015 年 6 月 18 日 (招待講演)
3. 千原浩之, Geometric analysis of dispersive flows, 第 8 回名古屋微分方程式研究集会, 名古屋大学 (愛知県名古屋市), 2016 年 2 月 23 日~24 日 (招待講演)
4. 竹山美宏, Algebraic construction of multi-species q -Boson system, 日本数学会年会, 筑波大学 (茨城

県つくば市), 2016年3月19日 (一般講演)

5. 竹山美宏, Algebraic construction of integrable stochastic particle systems, 可積分系理論の諸分野への応用, 京都大学数理解析研究所 (京都府京都市), 2015年8月21日 (招待講演)

幾何部門

1. 田崎博之, A 型コンパクト Lie 群の極大対蹠部分群, RIMS 研究集会「部分多様体論と種々の幾何構造」, 京都大学数理解析研究所 (京都府京都市), 2015年6月22日-24日 (招待講演)
2. 田崎博之, 対称空間の対蹠集合, 第62回幾何学シンポジウム, 東京理科大学神楽坂キャンパス (東京都新宿区), 2015年8月27日-30日 (基調講演)
3. 田崎博之, コンパクト Lie 群の極大対蹠部分群, 研究集会「部分多様体幾何とリー群作用 2015」, 東京理科大学森戸記念館 (東京都新宿区), 2015年9月7日-8日 (招待講演)
4. 田崎博之, 対蹠集合と実形の交叉, 第11回代数・解析・幾何学セミナー, 鹿児島大学理学部 (鹿児島県鹿児島市), 2016年2月15日-18日 (招待講演)
5. 田崎博之, 対称空間の対蹠集合に関連する代数的対象, 九大代数学セミナー, 九州大学伊都キャンパス (福岡県福岡市), 2016年3月4日 (招待講演)

代数部門

1. 金子 元, Algebraic independence of real numbers related to beta expansion, Workshop「数論とエルゴード理論」, 金沢大学 (石川県金沢市), 2016年2月7日 (一般講演)

6 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旨として、平成27年10月19日に、設立された。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 76)。

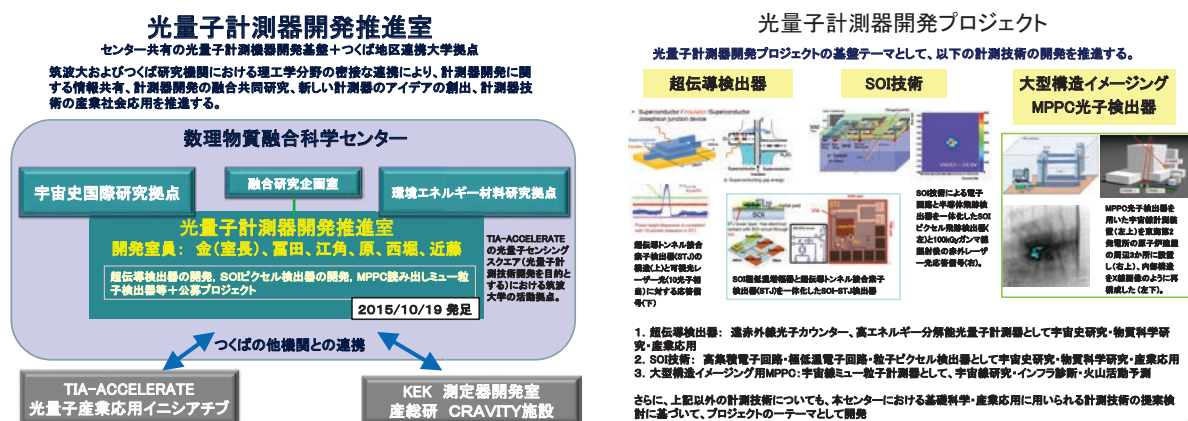


図 76 光量子計測器開発推進室の概要 (左図) と光量子計測器開発プロジェクト (右図)。

平成27年11月30日に光量子計測器開発推進室発足会議を計算科学研究センター・ワークショップ室で開催した。この会議は、筑波大学数理物質融合科学センター光量子計測器開発推進室の発足式であるとともに、推進室が目指す、光量子計測器に関する情報の共有、融合共同研究、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、理工連携・つくば連携のもとに光量子計測器開発研究の情報交換と議論を行うことを目的として開催された。KEK3名、産総研2名を含めて15名の研究者が参加し、約3時間にわたって研究内容の講演と活発な議論が行われ、光量子計測器開発研究推進室を発足させる意義深い会議となった。

平成28年3月2日に第1回光量子計測器ワークショップを数理物質融合科学センター光量子計測器開発推進室が主催してTIA光・量子計測の共催で、筑波大学総合B棟0110室において開催した。このワークショップは、光量子計測器に関する情報の共有、融合共同研究、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、理工連携・つくば連携のもとに光量子計測器開発研究の情報交換と議論を行うことを目的として開催された。KEK、産総研、東京大学からの参加者を含めて22名の研究者が参加し、約5時間半にわたって興味深く貴重な研究内容の講演と活発な議論が行われた。特に、医学医療系の講演者2名による講演と議論によって、計測器の医学利用に関する新たな情報が共有できた。光量子計測器開発研究推進に向けて実りの多いワークショップとなった。

上記の発足会議とワークショップによって、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27年度の特筆すべき成果を以下にあげる。

(1) 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を進めている。平成27年度に、福井大遠赤センターの遠赤外分子レーザー装置を用いて産総研CRAVITY製Nb/Al-STJの遠赤外光応答の試験を行った。200 μ m角のNb/Al-STJへの遠赤外線レーザー(波長57.2 μ m)照射時のI-V特性を測定した。レーザーは、チョッパーにより周波数200Hzでオン・オフされており、レーザーオン時・オフ時のI-V特性の変化を測定して、遠赤外線レーザーの照射パワーとSTJの応答から、遠赤外光子に対してSTJが信号を出すことを確認した。

また、信号ノイズ比を大幅に改善するためにSOIプロセスによって作製されたSTJ信号読み出し用の極低温増幅器の開発を行っている。SOI極低温増幅器プロトタイプ(極低温(T=3K))における性能試験を行った結果、極低温での増幅器として高周波領域で動作すること、および増幅器への入力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。

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

ことと比較して大幅な放射線耐性を実現できた。信号収集速度、クロストークなど総合的な評価も完了して国際学会で発表した。

(3) 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10cm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つの課題に取り組み、現在データ収集を終えて解析を進めている。

〈論文〉

1. I. Kurachi, K. Hara et al., “Analysis of Effective Gate Length Modulation by X-Ray Irradiation for Fully Depleted SOI p-MOSFETs”,
IEEE Trans Electron Devices 62-8 (2015) 2371-2376
2. Y. Takeuchi et al., “Development of Superconducting Tunnel Junction detectors as a far-infrared photon-by-photon spectrometer for neutrino decay search”,
Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC), 2015 IEEE International, 551 - 555 (2015), DOI: 10.1109/I2MTC.2015.7151327
3. K. Kiuchi et al., “Development of FD-SOI MOSFET amplifiers for integrated read-out circuit of superconducting-tunnel-junction single-photon-detectors”,
Proceedings of International Workshop on SOI Pixel Detector, FERMILAB-CONF-15-355-E-TD (2015), arXiv:1507.07424

〈研究成果発表〉

[国際会議]

1. Y. Takeuchi et al., “Development of Superconducting Tunnel Junction Detectors as a Far Infrared Photon-By-Photon Spectrometer for Neutrino Decay Search”,
2015 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC), May 11 – 14, 2015, Pisa, Italy. (一般講演)
2. K. Kiuchi et al., “Development of FD-SOI MOSFET amplifiers for integrated read-out circuit of superconducting-tunnel-junction single-photon-detectors”,

- International Workshop on SOI Pixel Detector (SOIPIX2015), June 3 – 6, 2015, Sendai, Japan.
(一般講演)
3. Y. Takeuchi *et al.*, “Development of far-infrared single-photon spectrometers based on superconducting tunnel junction for search for the cosmic background neutrino decay”,
Tsukuba Global Science Week 2015 (TGSW2015), Sept. 28 – 30, 2015, EPOCHAL Tsukuba,
Tsukuba-shi, Japan. (招待講演)
 4. K. Kiuchi *et al.*, “Development of Superconducting-Tunnel-Junction Single-Photon-Detectors Integrated with FD-SOI MOSFET Amplifiers”,
2015 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference (NSS/MIC), Oct. 31 –
Nov. 7, 2015, San Diego, USA. (一般講演)
 5. S. Honda, K. Hara *et al.*, “Evaluations of TID-Effect Compensation and Sensor-Circuit Cross-Talk Suppression in Double-SOI Devices”,
International Workshop on SOI Pixel Detector (SOIPIX2015), June 3 - 6, 2015, Sendai, Japan (一般講演)
 6. K. Hara *et al.*, “Development of Fine Pixel Detector for HEP Experiments Based on Innovative Double SOI Technology”,
2015 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference (NSS/MIC), Oct. 31 -
Nov. 7, 2015, San Diego, USA (一般講演)
 7. M. Asano, K. Hara *et al.*, “Characteristics of non-irradiated and irradiated double SOI integration type pixel sensors”,
10th International Symposium on the Development and Application of Semiconductor Tracking detectors (HSTD10) , Sept. 25 - 29, 2015, Xian China. (ポスター)
 8. K. Sato, K. Hara, S. H. Kim *et al.*, “Detection of On-Surface Objects using an Underground Muon Radiography Detector System”,
IEEE Nuclear Science Symposium, Oct. 31 - Nov. 7, 2015, San Diego, USA (ポスター)
 9. R. Senzaki *et al.*, “R&D status of FD-SOI Cold Amplifier”,
Interdisciplinary Workshop on Science and Patents (IWP) 2015, Sept. 4, 2015, Univ. of Tsukuba,
Japan. (ポスター)
 10. K. Takemasa *et al.*, “Development of Superconducting Tunnel Junction Detector using Hafnium (Hf-STJ)”,
Interdisciplinary Workshop on Science and Patents (IWP) 2015, Sept. 4, 2015, Univ. of Tsukuba,
Japan. (ポスター)
 11. K. Moriuchi *et al.*, “Development of Superconducting Tunnel Junction photon detector using Niobium and Aluminum (Nb/Al-STJ)”,
Interdisciplinary Workshop on Science and Patents (IWP) 2015, Sept. 4, 2015, Univ. of Tsukuba,
Japan. (ポスター)

[国内学会・研究会]

1. 八木俊輔：ニュートリノ崩壊光探索のための超伝導検出器開発,

- 第5回高エネルギー春の学校 2015 (2015年6月10-12日), 大津市びわこクラブ. (一般講演)
2. 武内勇司: 可視~遠赤外域単一光子検出のための半導体・超伝導体複合型検出器 (SOI-STJ) の開発, 第一回光・量子計測シンポジウム (2015年9月9日), 茨城県つくば市エポカルつくば. (ポスター)
 3. 八木俊輔: ニュートリノ崩壊光探索のための SOI-STJ の研究開発, 日本物理学会 2015 年秋季大会 (2015 年 9 月 25-28 日), 大阪市立大学. (一般講演)
 4. 木内健司: Development of Superconducting-Tunnel-Junction Single-Photon-Detectors Integrated with FD-SOI MOSFET Amplifiers, 新学術領域研究「ニュートリノフロンティア」研究会 2015 (2015 年 12 月 1-3 日), 静岡県熱海市ニューウェルシティー湯河原. (招待講演)
 5. 森内航也: Performance evaluation of Nb/Al-STJ fabricated at CRAVITY, 新学術領域研究「ニュートリノフロンティア」研究会 2015 (2015 年 12 月 1-3 日), 静岡県熱海市ニューウェルシティー湯河原. (招待講演)
 6. 原和彦: 2 層 SOI センサーの放射線耐性の評価, 第 5 回新学術領域研究会 (静岡大学, 2015 年 12 月 2 日). (招待講演)
 7. 金信弘: 光量子計測器開発推進室の活動報告, 第 2 回 CiRfSE ワークショップ (2016 年 1 月 18-19 日), 筑波大学. (招待講演)
 8. 武政健一: Hf-STJ 開発, 第 2 回 CiRfSE ワークショップ (2016 年 1 月 18-19 日), 筑波大学. (招待講演)
 9. 木内健司: SOI 極低温アンプ設計, 第 2 回 CiRfSE ワークショップ (2016 年 1 月 18-19 日), 筑波大学. (招待講演)
 10. 先崎蓮: SOI-STJ4 評価, 第 2 回 CiRfSE ワークショップ (2016 年 1 月 18-19 日), 筑波大学. (招待講演)
 11. 森内航也: CRAVITY 製 Nb/Al-STJ 評価, 第 2 回 CiRfSE ワークショップ (2016 年 1 月 18-19 日), 筑波大学. (招待講演)
 12. 武内勇司: 超伝導検出器と SOI 極低温アンプ, 第 1 回光量子計測器ワークショップ (2016 年 3 月 2 日) 筑波大学. (招待講演)
 13. 八木俊輔: ニュートリノ崩壊光探索のための SOI-STJ の研究開発 V, 日本物理学会第 71 回年次大会 (2016 年 3 月 19-22 日), 東北学院大学. (一般講演)
 14. 武政健一: ニュートリノ崩壊光探索のための Hf-STJ の研究開発, 日本物理学会第 71 回年次大会 (2016 年 3 月 19-22 日), 東北学院大学. (一般講演)
 15. 森内航也: ニュートリノ崩壊光探索のための Nb/Al-STJ の研究開発, 日本物理学会第 71 回年次大会 (2016 年 3 月 19-22 日), 東北学院大学. (一般講演)
 16. 武内勇司: 超伝導遠赤外センサーの開発 (シンポジウム「光センサー: 単一光子検出の最前線」), 日本物理学会第 71 回年次大会 (2016 年 3 月 19-22 日), 東北学院大学. (招待講演)

7 活動実績資料・参考資料

7.1 センター部局細則

○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

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、逆問題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。
逆問題研究推進室長	逆問題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、逆問題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	必要に応じて逆問題研究推進室長、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 逆問題研究推進室
 - 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) 逆問題研究推進室長
 - (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) 逆問題研究推進室長
 - (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できる。
- 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5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。

7.2 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	¥12,700,000
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	BBD27026	自作の望遠鏡で宇宙を見よう	¥360,000
中井 直正		その他	4. 国立極地研究所平成26年度研究プロジェクト		ドームふじ基地における赤外線・テラヘルツ天文学の開拓	¥950,000
久野 成夫		共同研究	自然科学研究機構国立天文台(研究集会)		南極で切り開くテラヘルツ天文学	¥400,000
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	¥19,240,000
受川 史彦		科研費補助金・学術研究助成金	基盤研究(C)	25400295	ハドロン衝突における重いクォーク生成の物理	¥910,000
原 和彦		科研費補助金・学術研究助成金	基盤研究(C)	25400294	アトラス実験でのヒッグス湯川結合の測定	¥1,560,000
受川 史彦	徳宿 克夫	科研費補助金・学術研究助成金	新学術領域 計画研究	23104002	ヒッグス粒子の発見による素粒子の質量起源の解明	¥9,100,000
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	¥5,850,000
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	¥1,040,000
金 信弘	守友浩, 金信弘, 末木啓介	その他			STJ 検出器開発	¥200,000
原 和彦	守友浩, 金信弘, 末木啓介	その他			SOI 検出器開発	¥100,000
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
三好康郎	代表	科研費補助金・学術研究助成金	基盤B	25287048	粒子・ジェット方位角関連測定によるグルーオン衝撃波の探索	¥4,030,000
中條達也	代表	科研費補助金・学術研究助成金	基盤B	25287047	LHC-ALICE実験・前方光子検出器のための高速読み出し系の開発	¥5,720,000
中條達也	代表	科研費補助金・学術研究助成金	挑戦的萌芽	15K13475	高エネルギー実験のための10ピコ秒 飛行時間測定器の開発	¥1,350,000
中條達也	代表	科研費補助金・学術研究助成金	二国間・日仏		ジェット・光子・ハドロン測定によるジェット抑制機構とQGP媒質応答の解明	¥2,000,000
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		重イオン加速器RHICを用いる高エネルギー原子核衝突実験PHENIX	¥16,460,000
金谷和至	代表	科研費補助金・学術研究助成金	基盤研究(C)	15K05041	有限温度・有限密度クォーク物質の物性と相構造	¥900,000
中村 潤児		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)	26107507	ホウ素ドーブラフエンの局所電子状態の解明と制御	¥2,500,000
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			白金アルミナ触媒に関する研究	¥1,500,000
中村 潤児		その他			「燃料電池電極触媒の評価」に対する研究助成	¥3,500,000
神原 貴樹		科研費補助金・学術研究助成金	基盤研究(B)	25288052	結合位置の高度制御を可能にする直接的アリール化重縮合法の開発	¥3,000,000
神原 貴樹		科研費補助金・学術研究助成金	挑戦的萌芽研究	25620094	“ポスト”クロスカップリング反応を基軸とする高分子半導体合成技術の開発	¥500,000
神原 貴樹		共同研究	東京工業大学(物質・デバイス領域共同研究拠点)		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	JSR様		新規赤外吸収色素の開発	¥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	¥2,470,000
桑原 純平		その他	NEDO 先導的産業技術創出事業(若手研究 Grant)		有機薄膜太陽電池用素材の製造コスト低減と高純度化を達成する重縮合反応の開発	¥4,405,000
桑原 純平		受託研究	日立化成様		アリー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	若手研究 (A)	25708020	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	¥2,200,000
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	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への創出	¥2,700,000
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	細胞内への光閉じ込めと共鳴発光・レーザー発振	¥1,500,000
山本 洋平		その他	旭硝子財団若手継続 Grant		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	¥2,500,000
守友 浩	代表	受託研究費	研究成果最適展開支援プログラムFSステージ探索タイプ		水溶液中アニオンの高速・高密度貯蔵技術の開発	¥1,330,000
守友 浩	代表	助成金	日本板硝子財団		配位高分子をベースとしたリチウムおよびナトリウムイオン二次電池材料の開発	¥900,000
守友 浩	代表	助成金	新技術開発事業復興支援特定研究助成2014		放射性Csイオンの高速除去技術と濃縮技術の開発	¥2,880,000
守友 浩	代表	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
小林航	代表	人材育成費補助事業	Nanotech Career-up Alliance (CUPAL) Nanotech Research Professional (NRP)		電池材料の原子レベル構造観測とナノ電池デバイスによるSEM/TEMその場計測	¥7,000,000
小林航	代表	科研費	挑戦的萌芽研究		イオンモデルに基づいた新奇なナトリウムイオン電池材料の開発	¥2,600,000
小林航	代表	助成金	東燃ゼネラル石油研究奨励・奨学財団		イオンモデルに基づいた高性能ナトリウムイオン電池正極材料の開発	¥1,000,000
西堀英治	代表	科学研究費補助金	挑戦的萌芽研究		ナノビーム回折による精密原子配列決定法の開発	¥780,000
西堀英治	代表	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	¥1,850,000
西堀英治	代表	助成金	双葉電子記念財団自然科学研究助成		エネルギー材料のマルチスケール構造可視化システムの構築	¥900,000
西堀英治	代表	助成金	内藤記念科学振興財団 科学研究奨励金・研究助成		医療粉末の湿度・温度変化下での構造決定法の開発	¥3,000,000
岡田晋	代表	科研費補助金・学術研究助成金	基盤研究(A)		ナノ炭素物質と無機半導体からなる複合構造におけるナノ界面物性の解明	¥3,000,000
岡田晋	代表	科研費補助金・学術研究助成金	新学術領域研究		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	¥3,000,000
北 将樹		科研費補助金・学術研究助成金	若手研究(A)	25702047	陸棲哺乳類の産生する麻痺性神経毒およびプロテアーゼの構造と機能	¥3,800,000
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を用いた標的生体分子の結合部位解析法の開発	¥1,400,000
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	¥5,000,000
北 将樹		その他	内藤記念科学振興財団(若手ステップアップ研究助成)		哺乳類由来の神経毒の化学生物学研究	¥2,500,000
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	¥2,470,000
辻村 清也		その他	公益財団法人稲盛財団/稲盛財団研究助成金		ソフト界面と階層空間が制御された炭素材料での酵素の超活性	¥1,000,000
辻村 清也		受託研究	JSTマッチングプランナー		階層的3次元構造多孔質炭素電極の酵素電池への応用	¥1,700,000
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	¥4,992,000
辻村 清也		共同研究	アイシンコスモス研究所		多孔質炭素電極と高性能改良酵素を組み合わせに関する研究	¥1,000,000
辻村 清也		共同研究	アークレイ株式会社		電気化学式バイオセンサに関する研究	¥2,160,000
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	¥3,200,000
加納 英明		科研費補助金・学術研究助成金	挑戦的萌芽研究	26560200	iPS細胞の多能性を可視化する新しい分子イメージング法の開拓	¥500,000
加納 英明		受託研究	JST		汎用・普及型超解像顕微鏡の開発	¥8,000,000
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	¥7,500,000
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	¥800,000

青嶋 誠	赤平 昌文	科研費補助金・学術研究助成金	基盤研究(B)	23340022	統計的推測における非正則構造の解明とその応用	¥50,000
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(C)	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な研究	¥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
磯崎 洋		科研費補助金・学術研究助成金	基盤研究(B)	25287016	多様体上の逆散乱理論の新局面—格子からオービフォールドまで	¥3,000,000
磯崎 洋		科研費補助金・学術研究助成金	挑戦的萌芽研究	15K13447	確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	¥800,000
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	¥4,000,000
竹山 美宏		科研費補助金・学術研究助成金	基盤研究(C)	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
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		科研費補助金・学術研究助成金	基盤研究(C)	24540012	置換規則力学系のビゾ予想	¥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	¥600,000

7.3 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	5,420,000	2015年4月1日～2016年3月31日	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	研究費を納付した日～2016年3月31日	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)	2,250,000 (平成27年度)	2015年4月～2017年3月	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
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	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
神原 貴樹	東京工業大学	100,000	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
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	東京工業大学		2010 - 現在	イオン液体/液晶の構造と物性に関する研究
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	デュースブルグ・エッセン大学		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		2014 - 現在	金属ナノ粒子とペプチドの複合化
山本 洋平	理化学研究所		2013 - 現在	強誘電高分子コロイド結晶のフォトニック特性
山本 洋平	東京理科大学		2015 - 現在	高分子コロイド結晶の顕微蛍光計測
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顕微蛍光計測
守友 浩	NSRRC(台湾)		2015～現在	二次電池材料の局所構造・電子状態
守友 浩	NIMS		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、広大		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	NIMS		2015～現在	TEMを用いた正極材の局所構造観察
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
	(デンマーク)			
西堀 英治	中国科学技術院		2013～現在	VO ₂ ナノ粒子および熱電変換材料の構造評価
	(中国)			
西堀 英治	東京大学		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	東京大学		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	日本大学		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	理化学研究所		2014～現在	スキルミオン結晶の圧力効果
西堀 英治	広島大学		2015～現在	天然鉱物熱電変換材料の構造研究
岡田晋	九州大学		2013～	グラフェン成長過程と各種物性の研究
岡田晋	名古屋大学		2013～	グラフェン成長過程と各種物性の研究
岡田晋	京都大学		2013～	ナノスケール物質の光物性の研究
北 将樹	ハバナ大学(キューバ)		2012～現在	カリブ海地域の固有・希少野生生物の生態化学的調査および生理活性天然物の探索
北 将樹	クイーンズランド大学(オーストラリア)		2006～現在	海洋生物由来の生理活性天然物の単離・構造決定と生成に関する研究
北 将樹	ボゴール農業大学(インドネシア)		2014～現在	薬用植物由来の生理活性天然物に関する研究
北 将樹	ベトナム科学技術アカデミー(ベトナム)		2016～現在	薬用植物由来の生理活性天然物に関する研究
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(豪)		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(仏)		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	熊本大学		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	ポールバスカル研究所(仏)		2011～現在	レドックスポリマーに関する研究
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)		2015～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	国立台湾大学(中華民国)		2014～現在	大規模複雑データの非線形従属構造に関する研究
青嶋 誠	Academia Sinica(中華民国)		2014～現在	大規模複雑データのランダム行列に関する研究

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」
秋山 茂樹	Leoben 大学 (オーストリア)		2015~現在	フラクタルタイルの切断点
秋山 茂樹	香港中文大学 (中国)		2015~現在	ベータ展開の overlap 構造と多項式の Erdos 問題
秋山 茂樹	Catholic Kwangdong 大学 (韓国)		2015~現在	自己アフィンタイリングの線形部分構造
秋山 茂樹	華中科技大 (中国)		2015~現在	一次元置換規則の recognizability
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

7.4 研究員・研究生等の受け入れ

構成員名	研究生等氏名	職名・学年	国籍	受入期間
神原 貴樹	郭 攀瑜	外国人研究生	中国	2015年10月～2016年3月
岡田 晋	Yanlin Gao	研究生	中国	2015.10-2016.3
秋山 茂樹	Jonathan Caalim	D3	フィリピン	2014 - 現在

7.5 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
伊敷吾郎	花田正範	第2回「京」を中核とするHPCIシステム利用研究課題優秀成果賞	大規模数値シミュレーションで解き明かす超弦理論の物理	2015年10月26日	一般財団法人高度情報科学技術研究機構
紺野 隼平		Interdisciplinary Workshop on Science and Patents (IWP) 2015, IWP2015PRIZE	STM studies of TiO ₂ /Au(111) model catalyst	2015.9.5	日本化学会、日本磁気科学会、筑波大学TIMS
全 家美		平成27年度スーパーグローバル大学創成支援事業による国費外国人留学生		2015.9.5	文部科学省
近藤 剛弘		第10回(2016年)日本物理学会若手奨励賞	走査トンネル顕微鏡を用いたグラファイトに形成する局在化した電子準位に関する研究	2016.3.19	日本物理学会
桑原 純平		BCSJ論文賞	Direct Arylation Polycondensation of Thienothiophenes with Various Dibromoarylenes	2015.11.15	日本化学会
山本 洋平		2015年度高分子学会日立化成賞	π 共役高分子球体による発光性マイクロ共振器の開発	2015.9	公益社団法人 高分子学会
岡田 大地		Interdisciplinary Workshop on Science and Patent (IWP2015) 優秀ポスター賞	Whispering gallery mode photoemission from self-assembled ferroelectric polymer microspheres	2015.9	日本化学会、日本磁気科学会、筑波大学TIMS
榎田 創		Interdisciplinary Workshop on Science and Patent (IWP2015) 優秀ポスター賞	WGM photoemission from Conjugated Polymer Sphere	2015.9	日本化学会、日本磁気科学会、筑波大学TIMS
榎田 創		第30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	高発光性共役高分子球体からのWGM発光と波長変換	2015.10.	公益社団法人 高分子学会
榎田 創		第5回CSJフェスタ 優秀ポスター発表賞	π 共役ポリマーブレンド球体によるエネルギー移動を介したWGM発光の変調	2015.10.	公益社団法人 日本化学会
榎田 創		CEMSupra2016 Rising Star Award	Cascading Energy Transfer through Coupled Conjugated Polymer Blend Microcavities	2016.1	理化学研究所
守友 浩	Rognvaldur Lindal Magnusson	IWP2015ポスター賞	受賞理由	2015/9/4	
北 将樹		平成27年度 科学技術分野の文部科学大臣表彰 若手科学者賞	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	2015.4	文部科学省
北 将樹		筑波大学若手教員特別奨励賞	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	2015.6	筑波大学
辻村 清也	船橋広人(M1)	第5回CSJ化学フェスタポスター賞	多孔質炭素修飾酵素電極における細孔構造の検討	2015.11.12	日本化学会
辻村 清也	鈴木愛未(M2)	66 th International Society of Electrochemical annual meeting (Taipei) 優秀ポスター賞	Characterization of Glucose Oxidase-Redox Hydrogel on MgO-templated Carbon Electrode	2015.10.8	International Society of Electrochemistry(ISE)
辻村 清也	新山歩(B4)	茗溪賞	理科教育社会貢献	2016.3.25	筑波大学

7.6 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	電波専門委員会委員	国立天文台	2015.4.1-2016.3.31
中井 直正	電波専門委員会VLBI小委員会委員	国立天文台	2015.4.1-2016.3.31
久野 成夫	電波専門委員会ALMA小委員会委員	国立天文台	2015.4.1-2016.3.31
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	2015.4.1-2016.3.31
中井 直正	客員教授	国立極地研究所	2015.4.1-2016.3.31
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	
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年1月 - 現在
中村 潤児	日本表面科学会触媒表面科学部会幹事	日本表面科学会	2008 - 現在
中村 潤児	協議員	日本表面科学会	2014.6 - 2016.3
中村 潤児	TIAナノグリーンワーキング委員	TIAナノグリーン	2011 - 2015
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	触媒学会	2012 - 現在
中村 潤児	県民大学講師	茨城県県南生涯学習センター	2015.5~2015.8
中村 潤児	「通電加熱式MCH脱水素反応器開発第三者アドバイザー委員会」委員長	株式会社アルミ表面技術研究所	2014.9 - 2016.3
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	2010 - 現在
山本 洋平	客員研究員	産業技術総合研究所	2013 - 現在

守友 浩	光・量子計測MG委員	TIA	2015.4～2016.3
守友 浩	中性子利用実験審査委員会委員	東大物性研	2015.4～2016.3
守友 浩	オープンラボ研究員	NIMS	2015.10～2016.9
守友 浩	外来研究員	SPring-8	2014.4～2015.5
守友 浩	利用研究課題審査委員会分科会レフェリー	CROSS	2014.8～2015.5
小林 航	評議員	日本熱電学会	2014.7～2016.6
小林 航	世話人	化合物新磁性材料研究会	2008.12～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
西堀英治	評議員	日本結晶学会	2014.4～2016.3
西堀英治	行事委員	日本結晶学会	2014.4～2016.3
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ユーザー協団体	2014.4～現在
岡田晋	幹事	フラーレン・ナノチューブ・グラフェン学会	2015.1～
北 将樹	天然物化学談話会 世話人	天然物化学談話会	2005.6～2015.6
北 将樹	毒素シンポジウム 運営委員	毒素シンポジウム	2014.1～現在
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	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

辻村清也	PRiME2016実行委員	日本電気化学会・米国電気化学会	2015.3－現在
青嶋 誠	Scientific Program Committee	Institute of Mathematical Statistics	2015 - 現在
青嶋 誠	Charting Committee	The International Society for NonParametric Statistics	2015 - 2016
青嶋 誠	Elected Member	International Statistical Institute	2004 - 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 - 現在
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
照井 章	大会プログラム委員	日本数式処理学会	2014 - 現在
照井 章	基礎理論分科会運営委員	日本数式処理学会	2012 - 現在
照井 章	学会誌編集委員	日本数式処理学会	2012 - 現在
照井 章	日本数式処理学会第24回大会実行委員長	日本数式処理学会	2014 - 2015
矢田 和善	『数学』常任編集委員	日本数学会	2015 - 現在
竹山 美宏	教育委員会専門委員	日本数学会	2012 - 2015
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 - 2015

7.7 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		日本経済新聞電子版	「“南極天文台構想”に赤信号 氷と予算の厚い壁」	2015/7/29
佐藤勇二		茨城新聞	重力波直接観測結果についてのコメント	2016年2月13日
守友 浩		日刊工業新聞	有機太陽電池の発電解明	2015.10.6
守友 浩		日刊工業新聞	熱電変換セルを安価に	2015.8.24
守友 浩		日刊工業新聞	筑波大、共同研究を強化	2015.8.7

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