

## 6-5 光分子科学研究領域

### 光分子科学第二研究部門

大 森 賢 治 (教授) (2003 年 9 月 1 日着任)

素川 靖司 (助教)

DE LÉSÉLEUC, Sylvain (助教)

富田 隆文 (特任助教 (分子科学研究所特別研究員))

BHARTI, Vineet (特任研究員)

CHAUHAN, Vikas Singh (特任研究員)

周 鳥居 諭来 (特任研究員)

藤川 武敏 (特命専門員)

川本 美奈子 (特任専門員)

鈴木 光一 (特任専門員)

牧野 茜 (特任専門員)

松尾 友紀子 (特任専門員)

MORLA AL YAHYA, Joa (インターンシップ)

DENECKER, Tom (インターンシップ)

KOCIK, Robin (インターンシップ)

BARRE, Maxence (インターンシップ)

MARTHOURET, Hugo (インターンシップ)

DELABRE, Antoine (インターンシップ)

北出 聡太 (インターンシップ)

梅岡 雅人 (インターンシップ)

MAURICIO URBINA, Jorge Antonio (インターンシップ)

TIRUMALASETTY PANDURANGA, Mahesh (大学院生)

VILLELA ESCALANTE, Rene Alejandro (大学院生)

田中 亮 (技術支援員)

中井 愛里 (技術支援員 (派遣))

西岡 稚子 (事務支援員)

A-1) 専門領域：量子物理学, 原子分子光物理学, 量子情報科学, 物理化学

A-2) 研究課題：

- a) アト秒精度のコヒーレント制御法の開発
- b) 量子論の検証実験
- c) コヒーレント分子メモリーの開発
- d) 分子ベースの量子情報科学
- e) 強レーザー場非線形過程の制御
- f) バルク固体の極限コヒーレント制御
- g) 超高速量子シミュレータの開発

## h) 超高速量子コンピュータの開発

### A-3) 研究活動の概略と主な成果

- a) コヒーレント制御は、物質の波動関数の位相を操作する技術である。その応用は、量子コンピューティングや結合選択的な化学反応制御といった新たなテクノロジーの開発に密接に結び付いている。コヒーレント制御を実現するための有望な戦略の一つとして、物質の波動関数に波としての光の位相を転写する方法が考えられる。例えば、二原子分子に核の振動周期よりも短い光パルスを照射すると、「振動波束」と呼ばれる局在波が結合軸上を行ったり来たりするような状態を造り出す事ができる。波束の発生に際して、数フェムト秒からアト秒のサイクルで振動する光電場の位相は波束を構成する各々の振動固有状態の量子位相として分子内に保存されるので、光学サイクルを凌駕する精度で光の位相を操作すれば波束の量子位相を操作することができる。我々はこの考えに基づき、独自に開発したアト秒位相変調器 (APM) を用いて、二つのフェムト秒レーザーパルス間の相対位相をアト秒精度で操作するとともに、このパルス対によって分子内に発生した二つの波束の相対位相を同様の精度で操作する事に成功した。さらに、これらの高度に制御された波束干渉の様子を、ピコメートルレベルの空間分解能とフェムト秒レベルの時間分解能で観測する事に成功した。
- b) APM を用いて、分子内の 2 個の波束の量子干渉を自在に制御する事に成功した。また、この高精度量子干渉をデコヒーレンス検出器として用いる事によって、熱的な分子集団や固体中の電子的なデコヒーレンスを実験的に検証した。さらに、固体パラ水素中の非局在化した量子状態 (vibron) の干渉を観測し制御する事に成功した。
- c) 光子場の振幅情報を分子の振動固有状態の量子振幅として転写する量子メモリーの開発を行なった。ここでは、フェムト秒光パルス対によって分子内に生成した 2 個の波束間の量子位相差をアト秒精度で操作し、これらの干渉の結果生成した第 3 の波束を構成する各振動固有状態のポピュレーションを観測することによって、光子場の振幅情報が高精度で分子内に転写されていることを証明することができた。また、フェムト秒光パルス対の時間間隔をアト秒精度で変化させることによって波束内の固有状態のポピュレーションの比率を操作できることを実証した。さらに、固体パラ水素中の振動量子状態 (vibron) の位相情報の 2 次元分布を操作し可視化することによって、固体 2 次元位相メモリーの可能性を実証することに成功した。
- d) 分子メモリーを量子コンピュータに発展させるためには、c) で行ったポピュレーション測定だけでなく、位相の測定を行う必要がある。そこで我々は、c) の第 3 の波束の時間発展を別のフェムト秒パルスを用いて実時間観測した。これによって、ポピュレーション情報と位相情報の両方を分子に書き込んで保存し、読み出すことが可能であることを実証した。振動固有状態の組を量子ビットとして用いる量子コンピュータの可能性が示された。さらに、分子波束を用いた量子フーリエ変換を開発した。
- e) 分子の振動波束を構成する振動固有状態の振幅と位相を強レーザー場で制御することに成功した。
- f) バルク固体中の原子の超高速 2 次元運動をフェムト秒単位で制御し画像化する新しい光技術を開発した。
- g) ほぼ絶対零度 (~50 ナノケルビン) まで冷やした極低温のルビジウム原子をマイクロレベルで整列させた人工原子結晶にアト秒精度のコヒーレント制御法を適用することによって、3 万個の粒子の量子多体問題を近似無しに 1 ナノ秒 (ナノ =  $10^{-9}$ ) 以内でシミュレートできる世界唯一・最速の「超高速量子シミュレータ」を開発することに成功した。それぞれ異なる研究分野で発展してきた「超高速化学」と「極低温物理」の手法を融合させた世界初の試みであり、材料科学・固体物理・溶液化学など広範囲の領域に波及効果を及ぼす新しい方法論として期待されている。
- h) 上記の人工原子結晶とアト秒精度のコヒーレント制御法を組み合わせた世界唯一・最速の「超高速量子コンピュータ」の開発を進めている。

B-1) 学術論文

**Y. CHEW, T. TOMITA, T. P. MAHESH, S. SUGAWA, S. de LÉSÉLEUC and K. OHMORI**, “Ultrafast Energy Exchange between Two Single Rydberg Atoms on a Nanosecond Timescale,” *Nat. Photonics* **16**, 724–729 (2022). (Front cover page highlight) DOI: 10.1038/s41566-022-01047-2

B-4) 招待講演

大森賢治, 「量子力学に残された 100 年の謎に迫る」, LG Japan Lab (株) 横浜 R&D Center 開所式・記念講演, 横浜, 2022 年 7 月.

大森賢治, 「量子力学に残された 100 年の謎に迫る」, 令和 4 年度 (2022 年度) 第 122 回 熊本県立熊本高等学校 創立記念講演会, 熊本, 2022 年 10 月.

大森賢治, 「ロックミュージシャンだった物理学者」, Kumamoto Education Week 2023——みんなの夢が未来を創る——オープニングトーク, 熊本, 2023 年 1 月.

大森賢治, 「量子スピード限界で動作する冷却原子型・超高速量子コンピュータ」, KEK (高エネルギー加速器機構) 素核研・物構研 連携研究会, 高エネルギー加速器機構, 筑波 (オンライン開催), 2023 年 2 月.

大森賢治, 「量子力学 100 年の謎と量子コンピュータへの挑戦」, 文部科学省 GIGA スクール特別講座, 岡崎コンファレンスセンター, 岡崎, 2023 年 3 月.

大森賢治, 「量子スピード限界で動作する冷却原子型・超高速量子コンピュータ」, 第 70 回応用物理学会春季学術講演会, 上智大学, 東京, 2023 年 3 月.

大森賢治, 「量子スピード限界で動作する冷却原子型超高速量子コンピュータ」, 自然科学研究機構 経営協議会・教育研究評議会, 御茶ノ水ソラシティカンファレンスセンター, 東京, 2023 年 3 月.

大森賢治, 「大規模・高コヒーレンスな動的原子アレー型・誤り耐性量子コンピュータ」, ムーンショット目標 6 公開シンポジウム 2023・プロジェクト紹介講演, ヘルサール秋葉原, 東京, 2023 年 3 月.

**K. OHMORI**, “Ultrafast and ultracold quantum simulator/computer with attosecond precision,” The 4th Asia-Pacific Workshop on Trapped Quantum Systems (APTQS 2022), 精華大学, Beijing (China) (Online), April 2022.

**K. OHMORI**, “Moonshot proposal: Large-scale and high-coherence fault-tolerant quantum computer with dynamical atom arrays,” ColdQuanta, Inc., Boulder (USA) (Hybrid), July 2022.

**K. OHMORI**, “Ultrafast and ultracold quantum simulator/computer with attosecond precision,” Special Summer 2022 Quantum Seminar Series, CUBit Quantum Initiative, University of Colorado Boulder and JILA/NIST, Boulder (USA) (Hybrid), July 2022.

**K. OHMORI**, “Ultrafast and ultracold quantum simulator/computer with attosecond precision,” ColdQuanta, Inc., Boulder (USA) (Hybrid), July 2022.

**K. OHMORI**, “Ultrafast quantum computer/simulator operating at the single-atom level,” Virtual Humboldt Colloquium “Top Global Research” and the Humboldt Network: New Frontiers of German-Japanese Scientific Cooperation, Alexander von Humboldt Foundation, Germany (Online), November 2022.

**K. OHMORI**, “Ultrafast quantum computer/simulator with attosecond precision,” The 4th International Symposium on Quantum Physics and Quantum Information Sciences, 北京量子信息科学研究院 (Beijing Academy of Quantum Information Sciences), Beijing (China) (Online), November 2022.

**K. OHMORI**, “Ultrafast quantum simulation and quantum computing with ultracold atom arrays,” The Chicago Quantum Exchange (CQE) Seminar, The University of Chicago, Chicago (USA) (Hybrid), February 2023.

**K. OHMORI**, “Ultrafast quantum simulation and quantum computing with ultracold atom arrays,” MIT-Harvard Center for Ultracold Atoms (CUA) Seminar, Harvard University, Cambridge (USA), February 2023.

B-5) 特許出願

特許登録(米国)US11567450,「量子シミュレーターおよび量子シミュレーション方法(Quantum Simulator and Quantum Simulation Method)」, 酒井寛人(浜松ホトニクス), 大森賢治(自然科学研究機構), 安藤太郎(浜松ホトニクス), 武井宣幸(自然科学研究機構), 豊田晴義, 大竹良幸, 兵土知子, 瀧口優(浜松ホトニクス)(登録日 2023年1月31日).

特願 2020-145826,「量子シミュレーターおよび量子シミュレーション方法」, 酒井寛人(浜松ホトニクス), 大森賢治(自然科学研究機構), 安藤太郎(浜松ホトニクス), シルヴァンド レゼルック, 富田隆文, 素川靖司(自然科学研究機構), 大竹良幸, 豊田晴義(浜松ホトニクス), 2020年.

特願 2020-145812,「量子シミュレーターおよび量子シミュレーション方法」, 酒井寛人(浜松ホトニクス), 大森賢治(自然科学研究機構), 安藤太郎(浜松ホトニクス), シルヴァンド レゼルック, 富田隆文, 素川靖司(自然科学研究機構), 大竹良幸, 豊田晴義(浜松ホトニクス), 2020年.

WO2022045146 (PCT),「量子シミュレーターおよび量子シミュレーション方法」, 酒井寛人(浜松ホトニクス), 大森賢治(自然科学研究機構), 安藤太郎(浜松ホトニクス), シルヴァンド レゼルック, 富田隆文, 素川靖司(自然科学研究機構), 大竹良幸, 豊田晴義(浜松ホトニクス), 2020年.

WO2022045147 (A1) (PCT),「量子シミュレーターおよび量子シミュレーション方法」, 酒井寛人(浜松ホトニクス), 大森賢治(自然科学研究機構), 安藤太郎(浜松ホトニクス), シルヴァンド レゼルック, 富田隆文, 素川靖司(自然科学研究機構), 大竹良幸, 豊田晴義(浜松ホトニクス), 2020年.

B-6) 受賞, 表彰

周 鳥居 諭来, 第9回SOKENDAI賞(2022).

B-7) 学会および社会的活動

学協会役員等

European Science Foundation (ESF), ESF College of Expert Reviewers (2018-).

European Commission, HORIZON 2020, EU Future and Emerging Technologies, Scientific and Industrial Advisory Board (SIAB) (2017-).

Center for Quantum Engineering, Research and Education (CQuERE), TCG, CREST (India), Scientific Advisory Board (2021-).

日本分光学会代議員(2022-).

学会の組織委員等

原子・分子・光科学(AMO)討論会プログラム委員(2003-).

iSAP HAMAMATSU (International Symposium on Advanced Photonics) 組織委員(2016-).

米国ゴードン研究会議 (Gordon Research Conference: GRC, USA) “Quantum Control of Light and Matter,” 2023 議長, 2021 議長 (Covid-19 パンデミックのため 2023 年に延期) (2019-).

米国ゴードン研究会議 (Gordon Research Conferences: GRC, USA) 評議会メンバー (2019-).

文部科学省, 学術振興会, 大学共同利用機関等の委員等

文部科学省 科学技術・学術審議会 専門委員 (2015-).

文部科学省 科学技術・学術審議会 量子科学技術委員会 主査代理 (2015-2023), 主査 (2023-).

文部科学省 研究計画・評価分科会 臨時委員 (2023-).

科学技術振興機構 戦略的創造研究推進事業 (CREST) 研究領域「量子状態の高度な制御に基づく革新的量子技術基盤の創出」(研究総括: 荒川泰彦) 中間評価委員 (2020-).

学会誌編集委員

*Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics*, IOP, UK, Section Editor for Quantum Technologies (2019-) and Executive Editorial Board (2021-).

競争的資金等の領域長等

内閣府「ムーンショット型研究開発制度」, 「大規模・高コヒーレンスな動的原子アレー型・誤り耐性量子コンピュータ」, プロジェクト・マネージャー (PM) (2022-).

文部科学省「光・量子飛躍フラッグシッププログラム (Q-LEAP)」量子情報処理・大規模基礎基盤研究, 「アト秒ナノメートル領域の時空間光制御に基づく冷却原子量子シミュレータの開発と量子計算への応用」, 研究代表者 (2018-).

その他

冷却原子型・量子コンピュータ開発において従来技術を2桁上回る世界最速の制御量子ゲート(量子コンピューティングに不可欠な条件つき2量子ビットゲート)を達成し, *Nature Photonics* 2022年10月号の表紙を飾るとともに, 日米欧中を中心に世界中の200件以上のニュース報道でハイライトされることによって, 分子研の世界的なプレゼンス向上と研究力アピールに大きく貢献. (<https://www.ims.ac.jp/news/2022/09/0824.html>)

上記の世界最速の制御量子ゲート(量子コンピューティングに不可欠な条件つき2量子ビットゲート)の成果を受けて, 日本の学術会議はもとより, 米国を代表する量子技術開発コンソーシアムである Chicago Quantum Exchange (CQE), シカゴ大学, マサチューセッツ工科大学 (MIT), ハーバード大学などの米国の量子技術開発の最重要拠点の数々や, ドイツのフンボルト財団, 原子物理分野で由緒ある大規模な国際会議 ICPEAC (今年の開催地: オタワ) などから, 次々にコロキウムや全体講演 (Plenary Lecture) 等に招待され, 世界のアカデミアで大反響を呼んでおり, 分子研の世界的なプレゼンス向上と研究力アピールに大きく貢献.

上記の世界最速の制御量子ゲート(量子コンピューティングに不可欠な条件つき2量子ビットゲート)の成果を受けて, 日本光学会誌「光学」において「2022年の日本の光学研究を代表する成果」として解説記事を依頼されている他, 「日本物理学会誌」, 応用物理学会機関誌「応用物理」, 自動車技術会誌「自動車技術」などからも, 次々に解説記事を依頼されるなど, 光学, 物理学, 自動車技術など様々な研究分野に強烈なインパクトを与え, 分子研の全国的なプレゼンス向上と研究力アピールに大きく貢献.

文部科学省の指名を受けて、量子科学技術をテーマにした文部科学省GIGA スクール特別講座「量子力学 100 年の謎と量子コンピュータへの挑戦」の企画と講師を務めることによって、分子研を「日本における量子科学技術の中心拠点」として広く社会に認知させるとともに、わが国の量子科学技術の将来を担う若い世代の人材育成に大きく貢献。

日本の量子技術政策の象徴である「文科省Q-LEAP プロジェクト」の前半(2018–2022年度)のステージゲート審査(2022年5月12日)において最高評価「S:評価項目を満たしており、特に優れたところが認められる」を獲得し(2022年6月24日に結果通知)、分子研の全国的なプレゼンス向上と研究力アピールに大きく貢献。

文部科学省 科学技術・学術審議会 量子科学技術委員会の主査代理 専門委員(2015–2023)、同委員会の主査(2023–現在)、ならびに文部科学省 研究計画・評価分科会 臨時委員(2023–現在)として、量子テクノロジー開発および分子研 UVSOR を含む量子ビーム(放射光施設・大型レーザー施設)利用推進に関する政策検討に大きく貢献。

世界最高レベルの学術会議である米国ゴードン研究会議(Gordon Research Conferences: GRC, USA)の評議会メンバー(2019–)としてGRCの運営に貢献することによって、科学技術分野全般における分子研の国際的なプレゼンス向上と研究力アピールに大きく貢献。

量子科学技術分野における世界最高レベルの学術会議である米国ゴードン研究会議(Gordon Research Conference: GRC, USA)“Quantum Control of Light and Matter”の2023年会議 議長, 2021年会議 議長(Covid-19 パンデミックのため2023年に延期)、および2019年会議 副議長として2017年から2023年の長期に渡り、GRCの運営に貢献することによって、量子科学技術分野における分子研の国際的なプレゼンス向上と研究力アピールに大きく貢献。

米国を代表する量子テクノロジー企業からの強い要望で、分子研・大森グループとの今後の協業に向けた協議を継続的に進めることによって(2022年2月18日–), 米国の産業界における分子研のプレゼンス向上と研究力アピールに大きく貢献。

文部科学省と、わが国の量子科学技術政策に関する意見交換・ブレインストーミングを継続的に行うことによって日本政府の政策立案、および日本政府に対する分子研のプレゼンス向上と研究力アピールに大きく貢献。

科学技術推進機構(JST)に対して国内外の研究動向やJSTが推進すべき研究領域などについてアドバイスを行うことによってわが国の量子技術の発展と分子研のプレゼンス向上に貢献。

文部科学省研究振興局大学研究基盤整備課のメンバーに対して、大森グループの超高速量子シミュレータ・量子コンピュータラボの研究開発状況に関するレクチャーおよびラボツアー(2023年3月30日)を行うことによって、日本政府に対する分子研のプレゼンス向上と研究力アピールに大きく貢献。

#### B-8) 大学等での講義, 客員

Heidelberg University(ドイツ), 客員教授(フンボルト賞受賞者), 2012年–.

総合研究大学院大学物理科学研究科, 集中講義「量子動力学」, 2022年12月13日, 15日, 20日, 22日.

#### B-9) 学位授与

周 鳥居 諭来, 「光ピンセット配列中の冷却リユードバリ原子を用いた超高速量子ダイナミクスの研究」, 2022年9月, 博士(理学).

## B-10) 競争的資金

内閣府「ムーンショット型研究開発制度」,「大規模・高コヒーレンスな動的原子アレー型・誤り耐性量子コンピュータ」, 大森賢治 (2022年度-2030年度).

文部科学省「光・量子飛躍フラッグシッププログラム (Q-LEAP)」量子情報処理・大規模基礎基盤研究,「アト秒ナノメートル領域の時空間光制御に基づく冷却原子量子シミュレータの開発と量子計算への応用」, 大森賢治 (2018年度-2028年度).

内閣府官民研究開発投資拡大プログラム (PRSIM),「超高速・高機能な冷却原子型量子シミュレータ・コンピュータの高度化」, 大森賢治 (2021年度-2022年度).

科研費基盤研究 (B),「強相関リユードベリ原子を用いた非平衡量子開放系の量子シミュレーション」, 素川靖司 (2021年度-2025年度).

科研費研究活動スタート支援,「Rydberg atoms at sub-micron distance with overlapping electronic clouds」, Sylvain de LÉSÉLEUC (2019年度-2022年度).

科研費研究活動スタート支援,「冷却原子の個別観測と事後選択的統計処理に基づく開放量子多体系の研究」, 富田隆文 (2019年度-2022年度).

## B-11) 産学連携

浜松ホトニクス (株),「超高速量子シミュレータの開発」, 大森賢治 (2016年-).

(株) 日立製作所,「超高速量子コンピュータの開発」, 大森賢治 (2022年-).

ColdQuanta, Inc. (米国),「超高速量子コンピュータの開発」, 大森賢治 (2022年-).

## C) 研究活動の課題と展望

今後我々の研究グループでは, APM を高感度のデコヒーレンス検出器として量子論の基礎的な検証に用いると共に, より自由度の高い量子位相操作技術への発展を試みる。そしてそれらを希薄な原子分子集団や凝縮相に適用することによって, 「アト秒量子エンジニアリング」と呼ばれる新しい領域の開拓を目指している。当面は以下の5テーマの実現に向けて研究を進めている。

- ① デコヒーレンスの検証と抑制: デコヒーレンスは, 物質の波としての性質が失われて行く過程である。量子論における観測問題と関連し得る基礎的に重要なテーマであるとともに, テクノロジーの観点からは, 反応制御や量子情報処理のエラーを引き起こす主要な要因である。その本質に迫り, 制御法を探索する。
- ② 量子散逸系でのコヒーレント制御の実現: ①で得られる知見をもとにデコヒーレンスの激しい凝縮系でのコヒーレント制御法を探索する。
- ③ 原子・分子ベースの量子情報科学の開拓: アト秒精度の超高速コヒーレント制御技術によって, 原子・分子内の電子・振動固有状態を用いるユニタリ変換とそれに基づく量子情報処理の確立を目指す。さらに, 単一原子・分子の操作・読み出し技術の開発を進める。
- ④ 超高速量子シミュレータの開発: ほぼ絶対零度 (~50 ナノケルビン) まで冷やした極低温のルビジウム原子をミクロンレベルで整列させた人工原子結晶とアト秒精度の超高速コヒーレント制御技術を組み合わせた世界唯一・最速の「超高速量子シミュレータ」のさらなる高機能化を目指す。

- ⑤ 超高速量子コンピュータの開発：極低温のルビジウム原子をマイクロレベルで整列させた人工原子結晶とアト秒精度の超高速コヒーレント制御技術を組み合わせた世界唯一・最速の「超高速量子コンピュータ」の開発を進める。

これらの研究の途上で量子論を深く理解するための何らかのヒントが得られるかもしれない。その理解はテクノロジーの発展を促すだろう。我々が考えている「アト秒量子エンジニアリング」とは、量子論の検証とそのテクノロジー応用の両方を含む概念である。



## 光分子科学第三研究部門

解 良 聡 (教授) (2014 年 4 月 1 日着任)

福谷 圭祐 (助教)  
SCHAAL, Maximilian (インターンシップ)  
西野 史 (大学院生)  
PALASSERY ITHIKKAL, Jaseela (大学院生)  
山内 早希 (特別共同利用研究員)  
瀬間 亮太 (特別共同利用研究員)  
神谷 美穂 (事務支援員)

A-1) 専門領域：表面物理学，有機薄膜物性

A-2) 研究課題：

- a) シンクロトロン放射光・レーザー光励起による弱相互作用系の電子状態計測
- b) 配向分子薄膜の光電子放出強度の理論解析と分子軌道撮影法の開発
- c) 有機半導体薄膜の電荷輸送機構の研究
- d) 有機半導体薄膜の界面電子準位接合機構の研究
- e) 機能性分子薄膜の振動状態と電子励起計測
- f) 自己組織化と分子認識機能の分光研究
- g) 分子薄膜の作製と評価：成長ダイナミクス，構造と分子配向
- h) 低次元電子相関物質の物性機構解明

A-3) 研究活動の概略と主な成果

- a) 機能性分子薄膜の弱相互作用による電子状態変化を計測する技術開発を進めている。弱相互作用を定量的に評価するため、蒸気圧の低い大型分子対応の気相光電子分光実験装置を開発し、分子集合による電子状態の違いに関する議論を進めている。超短パルスレーザー光を励起源とする二光子光電子分光装置を構築し、ホール緩和や励起子拡散など、電荷ダイナミクス関連の研究を進めている。UVSOR では BL7U における低エネルギー励起光を用いた角度分解光電子分光 (ARPES) による分子界面電子状態の計測法開拓を推進しつつ、BL6U における光電子運動量顕微鏡 (PMM) の装置開発と分子系への最適化のためのパラメータ調整を進めている。
- b) 高配向分子薄膜からの光電子放出強度の角度依存性について、多重散乱理論による強度解析を行い、有機分子薄膜構造の定量的解析を行うための方法論を検討してきた。その後、高配向試料では広波数空間二次元分解測定が分子軌道の可視化に対応することが指摘され、新たな量子計測ツールになりうると期待されている。前述の放射光を利用した PMM 装置による高効率計測が強力である。特に単層膜界面の分子配向に依存した電子波のポテンシャル散乱と干渉問題を定量化し、局在電子系における一電子近似の限界を吟味しつつ、弱相互作用系の物理現象を議論するための新たな方法論の構築を目指している。
- c) 有機半導体のバンド分散関係：良質な配向有機結晶膜を作製し、価電子エネルギーバンド分散を測定する技術を確認した。分子間相互作用の大きさ、ホール有効質量、バンド伝導移動度の定量的評価と、分子結晶特有の物理モデ

ルの構築を進めている。多体効果による電子構造への影響を検出し、非自明な機能開拓へ向けた研究を進めている。有機半導体結晶における振電相互作用の運動量異方性の検出に成功した。

有機半導体の電荷振動結合：配向有機超薄膜の作製により、大型の分子薄膜系における光電子スペクトルの高エネルギー分解測定を実現する方法論を開拓して、分子薄膜における伝導ホールと分子振動の結合状態を初めて実測し、ホッピング移動度（そのポーラロン効果を含む）を分光学的に得る方法を開拓した。これらの物理量を実測することで、準粒子描像に基づいた輸送機構の解明を目指している。

- d) 本質的には絶縁物である有機分子が n 型 / p 型半導体として機能する起源を明らかにすべく研究を進めている。極めて高効率に光電子を捕捉し評価可能な高感度紫外光電子分光装置を開発し、バンドギャップに生じる 10ppm レベルの状態密度検出に成功した。価電子帯トップバンドの状態密度分布がガウス型から指数関数型に変化し、基板フェルミ準位まで到達している様子をとらえた。また低エネルギー逆光電子分光装置の導入により、伝導帯構造を合わせて評価することが可能となり、ドナー・アクセプター半導体分子間の弱い vdW 結合から、分子と金属原子の局所的な強い化学結合によるギャップ準位形成までを統括検討し、エネルギー準位接合機構の解明を目指している。
- e) 低速電子エネルギー損失分光により、機能性分子薄膜の振動状態と電子励起状態を測定し、弱相互作用による振動構造への影響を調べている。国際共同による二次元検出器を利用したフォノン分散実験を開始した。
- f) 表面場で織り成すパイ共役分子系の超格子構造や、分子薄膜の自己組織化機構の解明を目指している。また超分子系の固相膜を作製し、自己組織化や原子・分子捕獲などによる電子状態への影響を測定することで、分子認識機能について分光学的に研究している。プローブ顕微鏡実験を共同研究で推進し、局所構造と電子状態の相関研究を開始した。ケイ素を含む共有結合性有機構造体の作製に成功した。
- g) 有機分子薄膜や低次元物質の電子状態を議論する上で、試料調整方法の確立が鍵である。光電子放射顕微鏡 (PEEM)、走査プローブ顕微鏡 (STM)、高分解能スポット解析型低速電子線回折 (SPALEED)、準安定励起原子電子分光 (MAES)、X線定在波法 (XSW)、軟X線吸収分光 (NEXAFS) 等を用い、基板界面における単分子膜成長から結晶膜成長までの多様な集合状態について構造（分子配向）と成長を観察している。
- h) 電子が物質中の様々な準粒子と相互作用することにより発現する特異物性はその複雑性・多様性から根本起源が未解明であるものが多い。二次元 ARPES や PMM 法などの電子と準粒子の直接観測を可能とする分光法を用いて、主に励起子絶縁体や電荷密度波物質の電子物性の解明・制御を目指した研究プロジェクトの立ち上げを行なっている。

#### B-1) 学術論文

**Y. HASEGAWA, F. MATSUI and S. KERA**, “Resonant Photoemission Spectroscopy of Highly-Oriented-Coronene Monolayer Using Photoelectron Momentum Microscope,” *e-J. Surf. Sci. Nanotechnol.* **20(3)**, 174–179 (2022). DOI: 10.1380/ejsnt.2022-031

**S. A. ABD-RAHMAN, T. YAMAGUCHI, S. KERA and H. YOSHIDA**, “Sample-Shape Dependent Energy Levels in Organic Semiconductors,” *Phys. Rev. B* **106(7)**, 075303 (2022). DOI: 10.1103/physrevb.106.075303

**H. OTA, M. FUJIMOTO, K. HAYASHI, T. HORIGOME, H. IWAYAMA, M. KATOH, N. KONDO, S. MAKITA, F. MATSUI, H. MATSUDA, T. MIZUKAWA, A. MINAKUCHI, E. NAKAMURA, M. NAGASAKA, Y. OKANO, T. OHIGASHI, M. SAKAI, K. SUGITA, K. TANAKA, Y. TAIRA, F. TESHIMA, J. YAMAZAKI, T. YANO, H. YUZAWA and S. KERA**, “UVSOR Synchrotron Facility Update,” *J. Phys.: Conf. Ser.* **2380**, 012003 (5 pages) (2022). DOI: 10.1088/1742-6596/2380/1/012003

Y. SHEN, Y. Q. LI, K. ZHANG, L. J. ZHANG, F. M. XIE, L. CHEN, X. Y. CAI, Y. LU, H. REN, X. GAO, H. XIE, H. MAO, S. KERA and J. X. TANG, “Multifunctional Crystal Regulation Enables Efficient and Stable Sky-Blue Perovskite Light-Emitting Diodes,” *Adv. Funct. Mater.* **32(41)**, 2206574 (2022). DOI: 10.1002/adfm.202206574

O. ENDO, F. MATSUI, S. KERA, W. J. CHUN, M. NAKAMURA, K. AMEMIYA and H. OZAKI, “Observation of Hole States at Perylene/Au(110) and Au(111) Interfaces,” *J. Phys. Chem. C* **126(37)**, 15971–15979 (2022). DOI: 10.1021/acs.jpcc.2c04060

K. SUN, O. J. SILVEIRA, Y. MA, Y. HASEGAWA, M. MATSUMOTO, S. KERA, O. KREJČÍ, A. S. FOSTER and S. KAWAI, “On-Surface Synthesis of Disilabenzene-Bridged Covalent Organic Frameworks,” *Nat. Chem.* **15(1)**, 136–142 (2023). DOI: 10.1038/s41557-022-01071-3

#### B-4) 招待講演

福谷圭祐, 「Ta<sub>2</sub>NiSe<sub>5</sub> の励起子絶縁体の根拠としての自発的励起子からの光電子観測」, 日本物理学会第 77 回年次大会, オンライン開催, 2022 年 3 月.

#### B-7) 学会および社会的活動

学協会役員等

VUVX (International Conference on Vacuum Ultraviolet and X-Ray Physics) 真空紫外光物理およびX線物理国際会議 国際諮問委員 (2014–).

SRI (International Conference on Synchrotron Radiation Instrumentation) シンクロトロン放射装置技術国際会議国際諮問委員 (2018–).

AOF (Asia Oceania Forum for Synchrotron Radiation Research) アジア・オセアニア放射光研究評議会庶務委員 (2021–).

日本放射光学会評議員 (2020–2022).

学会の組織委員等

第 35 回日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム 組織委員会委員 (2022–2023).

文部科学省, 学術振興会, 大学共同利用機関等の委員等

東京大学物性研究所軌道放射物性研究施設運営委員会委員 (2018–).

SPring-8 ユーザー協同体 (SPRUC) 機関代表者 (2019–).

KEK 加速器・共通基盤研究施設運営会議委員 (2021–2024).

KEK 物質構造科学研究所運営会議委員 (2021–2024).

東京大学物性研究所附属極限コヒーレント光科学研究センター軌道放射物性研究施設運営委員会委員 (2022–2024).

学会誌編集委員

*Journal of Electron Spectroscopy and Related Phenomena*, Editorial Board (2015–).

B-8) 大学等での講義, 客員

東北大学大学院理学研究科, 委嘱教授, 「強相関電子物理学特論」, 2020年-.

千葉大学大学院融合科学研究科, 連携客員教授, 2014年9月-.

千葉大学大学院融合科学研究科, 「ナノ創造物性工学特論II」, 2014年9月-.

蘇州大学, 客員教授, 2014年4月-.

B-10) 競争的資金

科研費国際共同研究加速基金(国際共同研究強化(B)), 「光電子波数顕微鏡法で切り拓くナノスピン・オービトロニクス」, 解良 聡 (2019年度-2022年度).

NINS-DAAD 国際研究者交流事業, Advanced Spectroscopy of Epitaxial Organic Films Grown on Modern 2D Material, 解良 聡 (2021年度-2022年度).

科研費研究活動スタート支援, 「励起子絶縁体における自発的励起子生成メカニズムの解明」, 福谷圭祐 (2021年度-2022年度).

科研費基盤研究(C), 「基底状態観測と物質設計に基づく定常励起子の制御」, 福谷圭祐 (2022年度-2024年度).

C) 研究活動の課題と展望

機能性分子の高配向試料作製法と精密電子状態計測で蓄積したノウハウを集結し, 分子集合体における「電子の真の姿を見出すこと」でその機能・物性の根源を理解することを主眼とし, 様々な放射光利用先端分光法や独自に開発した分光装置群を駆使して多角的に研究を進めている。2021年度より福谷助教が着任し, 低次元物性と精密計測に関する研究力を強化した。分子結晶や界面の階層性に着目し, 電子物性の多体効果問題に挑戦する。一方, UVSOR 施設長として国内コミュニティの基盤強化を推進するための利用支援に注力している。2019年度から技術開発を進めているPMM装置について, スピン検出機能追加による第二期R&Dを開始した。松井教授らと共に多彩な計測機能をもつ複合システムの完成を目指す。ドイツの装置開発拠点であるユーリッヒ研究所との学術協定によって, 装置開発とその利用展開についての国際共同研究を推進するとともに, 国内では分子固体系のオールジャパン体制(実験班, 理論班)を構築し, 戦略的に上記装置を利用した新奇実験を牽引する。施設長期計画として次世代研究施設UVSOR-IVの建設に向けた準備を進めている。学術系施設PF, HiSORとの連携に加え, あいちSRとナノテラスを中心に, 国内外施設およびコミュニティの意見交換と情報収集に邁進している。

## 長坂 将成 (助教) (2007年4月1日着任)

石川 裕子 (事務支援員)

神谷 美穂 (事務支援員)

A-1) 専門領域：物理化学, 軟X線分光学

A-2) 研究課題：

- a) 軟X線吸収分光法による溶液の局所構造解析
- b) 軟X線吸収分光法による金属錯体溶液の局所構造解析
- c) 溶液の軟X線吸収分光法の低エネルギー領域への開拓
- d) 溶液光化学反応のオペランド時間分解軟X線吸収分光法の開発

A-3) 研究活動の概略と主な成果

- a) 2 keV 以下の軟X線領域には炭素, 窒素, 酸素の K 吸収端や遷移金属の L 吸収端が存在するため, 軟X線吸収分光 (XAS) 法は溶液の局所構造を元素選択的に調べることができる有用な手法である。我々は液体層の精密厚さ制御法 (20 ~ 2000 nm) を独自に開発することで, 溶液の XAS 測定を実現した。更に, XAS スペクトルのエネルギーシフトの高精度測定と量子化学に基づく内殻励起計算から, 異なる元素ごとに溶液中の分子間相互作用を調べる手法を確立した。最近では, ジメチルスルホキシド水溶液の O-K 吸収端 XAS 測定を行うことで, 異なる濃度におけるジメチルスルホキシドと水の水素結合ネットワークの変化を明らかにした。また, 液体エタノールの C-K 吸収端 XAS スペクトルを分子動力学計算と内殻励起計算の組み合わせから再現する方法を確立した。
- b) 水溶液中のヘミン (FePPIX) とその異種金属錯体 (CoPPIX) の N-K 吸収端 XAS 測定を行い, 金属錯体の中心金属依存性を調べた。N-K 吸収端では金属錯体の配位子の電子状態を観測するが, 配位子の 2p 軌道と中心金属の 3d 軌道の混成のため, その金属-配位子間相互作用を調べることに成功した。更に, 金属錯体のスピン状態や水溶液中での溶媒の配位効果などを, N-K 吸収端 XAS 測定から調べられることを実証した。
- c) 200 eV 以下の低エネルギー領域には, Li, B の K 吸収端や Si, P, S, Cl の L 吸収端が存在するため, 化学研究において重要である。しかしながら, 低エネルギー領域では, 目的の一次回折光の透過率が極端に小さくて, 一次回折光の強度変化が高次回折光の寄与に埋もれてしまうため, XAS 測定は不可能であった。そこで, Si が含まれていない高分子ナノ膜を開発すると共に, 液体セルを満たすアルゴン光路長を 2.6 mm にできる超薄型液体セルを開発することで, 低エネルギー領域の溶液の XAS 測定の実現を目指している。
- d) 溶液光化学反応のオペランド時間分解 XAS 測定を実現するために, 超高速レーザーパルスと放射光から発生する軟X線パルスを 70 ps の時間分解能で同期するシステムを構築した。これにより, 鉄フェナントロリン錯体水溶液の N-K 吸収端 XAS スペクトルにおいて, 光励起後の高スピン状態から低スピン状態に緩和する過程の経時変化を, 金属錯体の配位子の電子状態変化から観測することに成功した。

B-1) 学術論文

**M. NAGASAKA, M. BOUVIER, H. YUZAWA and N. KOSUGI**, “Hydrophobic Cluster Formation in Aqueous Ethanol Solutions Probed by Soft X-Ray Absorption Spectroscopy,” *J. Phys. Chem. B* **126(26)**, 4948–4955 (2022). DOI: 10.1021/acs.jpcc.2c02990

**M. NAGASAKA**, “Site Selective Analysis of Water in Hydrogen Bond Network of Aqueous Dimethyl Sulfoxide Solutions by Oxygen K-Edge X-Ray Absorption Spectroscopy,” *J. Mol. Liq.* **366**, 120310 (2022). DOI: 10.1016/j.molliq.2022.120310

**M. NAGASAKA**, “Carbon K-Edge X-Ray Absorption Spectra of Liquid Alcohols from Quantum Chemical Calculations of Liquid Structures Obtained by Molecular Dynamics Simulations,” *J. Chem. Phys.* **158(2)**, 024501 (2023). DOI: 10.1063/5.0131017

**F. KUMAKI, M. NAGASAKA, R. FUKAYA, Y. OKANO, S. YAMASHITA, S. NOZAWA, S. ADACHI and J. ADACHI**, “Operando Time-Resolved Soft X-Ray Absorption Spectroscopy for Photoexcitation Processes of Metal Complexes In Solutions,” *J. Chem. Phys.* **158(10)**, 104201 (2023). DOI: 10.1063/5.0129814

**Y. YAMADA, K. MORITA, T. SUGIURA, Y. TOYODA, N. MIHARA, M. NAGASAKA, H. TAKAYA, K. TANAKA, T. KOITAYA, N. NAKATANI, H. ARIGA-MIWA, S. TAKAKUSAGI, Y. HITOMI, T. KUDO, Y. TSUJI, K. YOSHIZAWA and K. TANAKA**, “Stacking of a Cofacially Stacked Iron Phthalocyanine Dimer on Graphite Achieved High Catalytic CH<sub>4</sub> Oxidation Activity Comparable to That of pMMO,” *JACS Au* **3(3)**, 823–833 (2023). DOI: 10.1021/jacsau.2c00618

B-4) 招待講演

長坂将成, 「軟 X 線吸収分光法による溶液の化学現象の解明」, 第 130 回触媒討論会, 富山市, 2022 年 9 月.

長坂将成, 「軟 X 線吸収分光法による溶液反応のオペランド観測」, 第 12 回岩澤コンファレンス「サステナブル社会のための触媒化学・表面科学の最前線」, 東京, 2023 年 3 月.

**M. NAGASAKA**, “Development of Time-Resolved Soft X-Ray Absorption Spectroscopy for Observing Photochemical Reaction in Solution,” Conference on Laser and Synchrotron Radiation Combination Experiment 2022 (LSC 2022), OPTICS & PHOTONICS International Congress 2022, Yokohama (Japan), April 2022.

B-7) 学会および社会的活動

学会の組織委員等

International Workshop on Photoionization—Resonant Inelastic X-ray Scattering 2022, local organizing committee (2021–2022).

理科教育活動

出前授業「分子研授業～授業の先に何があるのか～『軟 X 線で観る液体の化学』」愛知県立岡崎北高等学校あいち STEM ハイスクール研究指定事業 (2022).

B-8) 大学等での講義, 客員

理化学研究所, 客員研究員, 2022 年 4 月–2023 年 3 月.

#### B-10) 競争的資金

科研費基盤研究(B),「励起キャリア移動の指向性制御による高効率光触媒表面の構築」(代表:吉田真明),長坂将成(研究分担者)(2021年度-2023年度).

科研費基盤研究(A),「人工光合成をめざす半導体光触媒:オペランド計測によるミリ秒反応化学の解明」(代表:大西洋),長坂将成(研究分担者)(2022年度-2024年度).

科研費基盤研究(B),「難分解性有機物資源化を可能にするグラファイト担持型超強力酸化触媒活性種の開発」(代表:山田 泰之),長坂将成(研究分担者)(2022年度-2024年度).

## 光源加速器開発研究部門（極端紫外光研究施設）

加藤 政博（特任教授）（2019年4月1日着任）  
（クロスアポイントメント；広島大学放射光科学センター）

藤本 将輝（助教）（兼任）  
石原 麻由美（事務支援員）  
加茂 恭子（事務支援員）

A-1) 専門領域：ビーム物理学，加速器科学，放射光科学

A-2) 研究課題：

- a) シンクロトロン光源の研究
- b) 自由電子レーザーの研究
- c) 相対論的電子ビームからの電磁放射の研究
- d) 量子ビームの発生と応用に関する研究

A-3) 研究活動の概略と主な成果

- a) シンクロトロン光源 UVSOR の性能向上に向けた開発研究を継続している。電子ビーム光学系の最適化による電子ビーム輝度の大幅な向上，電子ビーム強度を一定に保つトップアップ入射の導入などに成功し，低エネルギー放射光源としては世界最高水準の光源性能を実現した。高輝度放射光発生のために真空封止アンジュレータ3台，可変偏光型アンジュレータ3台を設計・建設し，稼働させた。UVSOR の将来計画に関する設計研究に着手し，既存加速器の更なる高度化の可能性を検討した後，新しい光源加速器の設計を開始し，これまでに電子エネルギー 1 GeV，周長約 70 m の放射光源の基礎設計を完了した。
- b) 自由電子レーザーや関連技術に関する研究を継続している。蓄積リング自由電子レーザーとして世界最高の出力を記録した。また，共振器型自由電子レーザーに関する基礎研究を進め，レーザー発振のダイナミクスやフィードバック制御に関する先駆的な成果を上げた。外部レーザーを用いて電子パルス上に微細な密度構造を形成することでコヒーレント放射光を極紫外領域やテラヘルツ領域において生成する研究を継続している。この手法により一様磁場中から準単色テラヘルツ放射光を発生することに世界に先駆けて成功した。電子パルス上に形成された密度構造の時間発展に関するビームダイナミクス研究により先駆的な成果を上げた。
- c) 高エネルギー電子ビームによる光渦の生成に成功し，その原理の解明に世界に先駆けて成功した。自然界での光渦の生成の可能性について，研究を進めると共に，深紫外・真空紫外領域での物質系と光渦の相互作用に関する基礎研究を進めている。
- d) 外部レーザーと高エネルギー電子線を用いた逆コンプトン散乱によるエネルギー可変，偏光可変の極短ガンマ線パルス発生に関する研究を継続している。パルス幅数ピコ秒以下の超短ガンマ線パルスの生成，エネルギー可変性の実証に成功した。光陰極を用いた電子源の開発を進めた。また，これら偏極量子ビームの応用研究の開拓を進めている。
- e) アンジュレータ放射光波束の時間構造に着目した研究に原子分子物理学研究者と共同で取り組み，2連のアンジュレータからの自然放射を用いた孤立原子の量子状態制御に世界で初めて成功した。放射光の時間構造や干渉性の実験的検証を進め，全く新しい放射光利用法の開拓を進めている。



B-1) 学術論文

**T. KANEYASU, M. HOSAKA, A. MANO, Y. TAKASHIMA, M. FUJIMOTO, E. SALEHI, H. IWAYAMA, Y. HIKOSAKA and M. KATOH**, “Double-Pulsed Wave Packets in Spontaneous Radiation from a Tandem Undulator,” *Sci. Rep.* **12(1)**, 9682 (2022). DOI: 10.1038/s41598-022-13684-2

**T. FUJI, T. KANEYASU, M. FUJIMOTO, Y. OKANO, E. SALEHI, M. HOSAKA, Y. TAKASHIMA, A. MANO, Y. HIKOSAKA, S. WADA and M. KATOH**, “Spectral Phase Interferometry for Direct Electric-Field Reconstruction of Synchrotron Radiation,” *Optica* **10(2)**, 302–302 (2023). DOI: 10.1364/optica.477535

**E. SALEHI, Y. TAIRA, M. FUJIMOTO, L. GUO and M. KATOH**, “Lattice Design of the UVSOR-IV Storage Ring,” *J. Phys.: Conf. Ser.* **2420(1)**, 012062 (2023). DOI: 10.1088/1742-6596/2420/1/012062

**H. OTA, E. SALEHI, M. FUJIMOTO, K. HAYASHI, T. HORIGOME, H. IWAYAMA, M. KATOH, N. KONDO, S. MAKITA, F. MATSUI, H. MATSUDA, T. MIZUKAWA, A. MINAKUCHI, E. NAKAMURA, M. NAGASAKA, Y. OKANO, T. OHIGASHI, M. SAKAI, K. SUGITA, K. TANAKA, Y. TAIRA, F. TESHIMA, J. YAMAZAKI, T. YANO, H. YUZAWA and S. KERA**, “UVSOR Synchrotron Facility Update,” *J. Phys.: Conf. Ser.* **2380(1)**, 012003 (2022). DOI: 10.1088/1742-6596/2380/1/012003

**H. KAWAGUCHI, T. MURAMATSU, M. KATOH, M. HOSAKA and Y. TAKASHIMA**, “Time-Domain Eddy Current and Wake Fields Analysis of Pulsed Multipole Magnet Beam Injector in Synchrotron Radiation Ring,” *IEICE Trans. Electron.* **E105.C(4)**, 146–153 (2022). DOI: 10.1587/transele.2021rep0003

B-4) 招待講演

**M. KATOH**, “Physics and applications of electromagnetic radiation from relativistic electrons,” The 31<sup>st</sup> International Toki Conference on Plasma and Fusion Research (ITC31), Online, November 2022.

B-7) 学会および社会的活動

学協会役員等

日本加速器学会評議員 (2020–).

日本放射光学会評議員 (2022–).

文部科学省, 学術振興会, 大学共同利用機関等の委員等

高エネルギー加速器研究機構教育研究評議会評議員 (2021–).

高エネルギー加速器研究機構加速器研究施設運営委員 (2018–).

その他

あいちシンクロトロン光センター運営委員 (2013–).

B-8) 大学等での講義, 客員

名古屋大学シンクロトロン光研究センター, 客員教授, 2018年4月–.

高エネルギー加速器研究機構加速器研究施設, 客員教授, 2018年4月–.

核融合科学研究所, 客員教授, 2022年4月–.

## B-10) 競争的資金

科研費基盤研究(A),「放射光の位相構造制御法の開発」,加藤政博(2020年度-2022年度).

## C) 研究活動の課題と展望

UVSORは2000年以降の継続的な高度化により、低エネルギーのシンクロtron光源としては世界的にも最高レベルの性能に到達したが、国内外では新しい光源の建設稼働が相次ぎ、更なる競争力の向上が求められている。現在の加速器の更なる高度化の可能性を検討した結果、現在の性能を大幅に上回る高度化改造は困難であると結論づけ、新規に回折限界を目指す光源加速器の建設について検討を進めている。基礎設計は概ね完了し、今後、デザインレポートの作成を進める。また、高エネルギー加速器研究機構や名古屋大学シンクロtron光研究センターなどと連携し、持続可能な加速器施設を目指した省エネルギー化や運転の自動化などを念頭に、次期光源に必要とされるハードウェア技術開発を進める。

高エネルギー自由電子を用いた光発生として、自由電子レーザーやレーザーコンプトン散乱ガンマ線、コヒーレントシンクロtron放射の発生法の開発や高度化、それらの利用法の開拓に取り組んできた。最近では光子の時空間構造やその干渉性の実験的検証やその利用法の開拓に挑戦している。放射光による光渦の生成、さらに放射光光渦同士の商品によるベクトルビーム発生など、UVSORの研究環境を活用して世界に先駆けた研究ができた。また、二連アンジュレータから放射される光子の時間構造を利用した量子状態制御について先駆的な成果が出ている。相対論的自由電子からの電磁放射の時空間構造の制御とその応用というこれまで全く着目されていなかった領域を切り拓きつつあり、今後はさらに基礎研究を進めるとともに幅広く応用展開の可能性を探っていきたい。

## 電子ビーム制御研究部門（極端紫外光研究施設）

平 義 隆（准教授）（2020年4月1日着任）

杉田 健人（助教）  
SALEHI, Elham（特任研究員）  
田部 圭梧（特別共同利用研究員）  
後藤 啓太（特別共同利用研究員）  
小澤 舜ノ介（特別共同利用研究員）  
塩原 慧介（特別共同利用研究員）  
石原 麻由美（事務支援員）  
加茂 恭子（事務支援員）

A-1) 専門領域：ガンマ線計測，陽電子計測，光渦計測

A-2) 研究課題：

- a) 超短パルスガンマ線の発生と利用研究
- b) 短波長光渦の発生と計測技術開発

A-3) 研究活動の概略と主な成果

- a) 世界の放射光施設でも UVSOR の独自技術である超短パルスガンマ線を用いた陽電子消滅分光によるバルク材料の原子スケール欠陥分析に関する研究である。超短パルスガンマ線は、フェムト秒レーザーと 750MeV 電子ビームの 90 度衝突逆トムソン散乱によって発生し、そのパルス幅はサブピコ秒からピコ秒オーダーである。この超短パルス性とバックグラウンドの低さを活かしたガンマ線の利用研究として、陽電子消滅分光法による材料中の欠陥分析をユーザーに提供している。陽電子は、対生成と呼ばれる現象によって材料内部でガンマ線から発生し、材料中の欠陥に捕獲される。欠陥の大きさによって陽電子の寿命が変化するために、陽電子寿命を測定することで材料中の欠陥を非破壊で分析することができる。さらに、ガンマ線は物質に対する透過率が高いため厚さ数 cm のバルク材料の欠陥分析を行うことが可能である。2022 年度に陽電子寿命測定法及び寿命運動量相関測定法の検出器の数を 2 倍にすることで、計数率が 2 倍になることを確認した。これまでと同じ統計を貯めるのに測定時間が半分になり、限られた時間で測定できる試料の数が増えたため、ユーザーにとって利便性が向上した。寿命運動量相関測定法の開発に関する論文が *Rev. Sci. Instrum.* に掲載され、シンチレータ材料の陽電子消滅分光法に関するユーザー執筆の論文が発表された。また、超短パルス円偏光ガンマ線を用いたスピン偏極陽電子消滅分光法の開発も開始しており、複数の分析技術をユーザーに提供することを目指す。一方で、パルスではない連続ガンマ線を用いたユーザー利用も行っており、ユーザー執筆の論文が発表された。陽電子消滅分光法とガンマ線の施設利用及び協力研究と有償利用（民間企業）の全申請件数は、2020 年度が 8 件、2021 年度 16 件、2022 年度 16 件と順調に伸びており、今後の成果発表が期待される。
- b) 本研究課題では、らせん波面を形成するエネルギー sub-MeV 以上のガンマ線渦を世界に先駆けて開発し、素粒子や原子核、物性研究への応用開拓を行うことを最終目標としている。このガンマ線は、位相構造がらせんであるために軌道角運動量（Orbital angular momentum: OAM）を運ぶということに大きな特徴がある。ガンマ線渦の発生には、

平らが初めて見出した電子ビームと高強度円偏光レーザーの非線形逆トムソン散乱法を用いる。2019年度から関西光科学研究所において高強度レーザーと150MeVマイクロトン電子加速器を用いた実験を行っており、光渦の特徴である空間分布が円環になることを測定することを目標としている。また、UVSORにおいても非線形逆トムソン散乱実験を行うため、パルスエネルギー50mJのレーザー装置の立ち上げを現在行っている。2022年11月に非線形逆トムソン散乱実験を行ったが、光渦である高次高調波の確認が出来なかった。今後課題解決に取り組み、再実験する予定である。

#### B-1) 学術論文

**Y. TAIRA, R. YAMAMOTO, K. SUGITA, Y. OKANO, T. HIRADE, S. NAMIZAKI, T. OGAWA and Y. ADACHI,** “Development of Gamma-Ray-Induced Positron Age-Momentum Correlation Measurement,” *Rev. Sci. Instrum.* **93(11)**, 113304 (2022). DOI: 10.1063/5.0105238

**H. OTA, E. SALEHI, M. FUJIMOTO, K. HAYASHI, T. HORIGOME, H. IWAYAMA, M. KATOH, N. KONDO, S. MAKITA, F. MATSUI, H. MATSUDA, T. MIZUKAWA, A. MINAKUCHI, E. NAKAMURA, M. NAGASAKA, Y. OKANO, T. OHIGASHI, M. SAKAI, K. SUGITA, K. TANAKA, Y. TAIRA, F. TESHIMA, J. YAMAZAKI, T. YANO, H. YUZAWA and S. KERA,** “UVSOR Synchrotron Facility Update,” *J. Phys.: Conf. Ser.* **2380(1)**, 012003 (2022). DOI: 10.1088/1742-6596/2380/1/012003

**E. SALEHI, Y. TAIRA, M. FUJIMOTO, L. GUO and M. KATOH,** “Lattice Design of the UVSOR-IV Storage Ring,” *J. Phys.: Conf. Ser.* **2420(1)**, 012062 (2023). DOI: 10.1088/1742-6596/2420/1/012062

**M. KITAURA, Y. TAIRA and S. WATANABE,** “Characterization of Imperfections in Scintillator Crystals Using Gamma-Ray Induced Positron Annihilation Lifetime Spectroscopy,” *Opt. Mater: X* **14**, 100156 (2022). DOI: 10.1016/j.omx.2022.100156

#### B-4) 招待講演

**Y. TAIRA,** “Ultra-short pulsed gamma rays and their application to material science,” Asia-Oceania Conference on Synchrotron Radiation Instrumentation 2022, Sendai (Japan), November 2022.

#### B-7) 学会および社会的活動

学会の組織委員等

ビーム物理研究会 若手の会 幹事 (2020- )

日本加速器学会第19回年会組織委員 (2021-2023).

日本加速器学会第19回年会プログラム委員 (2022-2023).

日本加速器学会組織委員 (2022-2023).

#### B-8) 大学等での講義, 客員

理化学研究所, 客員研究員, 2018年9月-.

総合研究大学院大学物理科学研究科, 「光物理」, 2022年7月.

#### B-10) 競争的資金

科研費基盤研究(B) (一般), 「超短パルスガンマ線を用いた陽電子寿命運動量相関測定法の開発と利用研究の推進」, 平 義隆 (2021年度-2023年度).

科研費基盤研究(A), 「放射光の位相構造制御法の開発」 (代表: 加藤政博), 平 義隆 (研究分担者) (2020年度-2022年度).

#### C) 研究活動の課題と展望

陽電子消滅分光法に関しては, 陽電子寿命測定法と寿命運動量相関測定法に加えて, 同時計数ドップラー拡がり法やスピン偏極陽電子の発生と計測技術開発を行い, 分析技術の拡充を図る。計算上はパルス幅数ピコ秒のガンマ線が発生していると考えられるが, 超短パルスガンマ線のパルス幅計測手法の開発も行う。光渦に関しては, ガンマ線の波面計測の技術を開発し, らせん波面を形成するガンマ線渦が発生していることを実験的に実証する。

大 東 琢 治 (准教授) (2022 年 2 月 1 日着任)  
(クロスアポイントメント; KEK 物質構造科学研究所)

石原 麻由美 (事務支援員)  
加茂 恭子 (事務支援員)

A-1) 専門領域: X線光学

A-2) 研究課題:

- a) 走査型透過軟X線顕微鏡ビームラインの発展
- b) 走査型透過軟X線顕微鏡を用いた応用手法の開発

A-3) 研究活動の概略と主な成果

- a) STXM 用の引っ張り応力印加セルの開発を行なった。
- b) STXM 用に開発した大気非暴露試料搬送システムを用いて、リュウグウ帰還試料の有機物分析を行った。

B-1) 学術論文

**J. BAROSCH, L. R. NITTLER, J. WANG, C. M. O'D. ALEXANDER, B. T. DE GREGORIO, C. ENGRAND, Y. KEBUKAWA, K. NAGASHIMA, R. M. STROUD, H. YABUTA, Y. ABE, J. ALÉON, S. AMARI, Y. AMELIN, K.-I. BAJO, L. BEJACH, M. BIZZARRO, L. BONAL, A. BOUVIER, R. W. CARLSON, M. CHAUSSIDON, B.-G. CHOI, G. D. CODY, E. DARTOIS, N. DAUPHAS, A. M. DAVIS, A. DAZZI, A. DENISET-BESSEAU, T. DI ROCCO, J. DUPRAT, W. FUJIYA, R. FUKAI, I. GAUTAM, M. K. HABA, M. HASHIGUCHI, Y. HIBIYA, H. HIDAKA, H. HOMMA, P. HOPPE, G. R. HUSS, K. ICHIDA, T. IIZUKA, T. R. IRELAND, A. ISHIKAWA, M. ITO, S. ITOH, K. KAMIDE, N. KAWASAKI, A. L. DAVID KILCOYNE, N. T. KITA, K. KITAJIMA, T. KLEINE, S. KOMATANI, M. KOMATSU, A. N. KROT, M.-C. LIU, Z. MARTINS, Y. MASUDA, J. MATHURIN, K. D. MCKEEGAN, G. MONTAGNAC, M. MORITA, S. MOSTEFAOUI, K. MOTOMURA, F. MOYNIER, I. NAKAI, A. N. NGUYEN, T. OHIGASHI, T. OKUMURA, M. ONOSE, A. PACK, C. PARK, L. PIANI, L. QIN, E. QUIRICO, L. REMUSAT, S. S. RUSSELL, N. SAKAMOTO, S. A. SANDFORD, M. SCHÖNBÄCHLER, M. SHIGENAKA, H. SUGA, L. TAFLA, Y. TAKAHASHI, Y. TAKEICHI, Y. TAMENORI, H. TANG, K. TERADA, Y. TERADA, T. USUI, M. VERDIER-PAOLETTI, S. WADA, M. WADHWA, D. WAKABAYASHI, R. J. WALKER, K. YAMASHITA, S. YAMASHITA, Q.-Z. YIN, T. YOKOYAMA, S. YONEDA, E. D. YOUNG, H. YUI, A.-C. ZHANG, M. ABE, A. MIYAZAKI, A. NAKATO, S. NAKAZAWA, M. NISHIMURA, T. OKADA, T. SAIKI, S. TANAKA, F. TERUI, Y. TSUDA, S.-I. WATANABE, T. YADA, K. YOGATA, M. YOSHIKAWA, T. NAKAMURA, H. NARAOKA, T. NOGUCHI, R. OKAZAKI, K. SAKAMOTO, S. TACHIBANA and H. YURIMOTO, "Presolar Stardust in Asteroid Ryugu," *Astrophys. J. Lett.* **935**(1), L3 (2022). DOI: 10.3847/2041-8213/ac83bd**

I. KERRAOUCH, Y. KEBUKAWA, A. BISCHOFF, M. E. ZOLENSKY, E. WÖLFER, J. L. HELLMANN, M. ITO, A. KING, M. TRIELOFF, J. ALIX BARRAT, P. SCHMITT-KOPPLIN, A. PACK, M. PATZEK, R. D. HANNA, T. FOCKENBERG, Y. MARROCCHI, M. FRIES, J. MATHURIN, E. DARTOIS, J. DUPRAT, C. ENGRAND, A. DENISET, A. DAZZI, K. KIRYU, M. IGISU, T. SHIBUYA, D. WAKABAYASHI, S. YAMASHITA, Y. TAKEICHI, Y. TAKAHASHI, T. OHIGASHI, Y. KODAMA and M. KONDO, “Heterogeneous Nature of the Carbonaceous Chondrite Breccia Aguas Zarcas—Cosmochemical Characterization and Origin of New Carbonaceous Chondrite Lithologies,” *Geochim. Cosmochim. Acta* **334**, 155–186 (2022). DOI: 10.1016/j.gca.2022.07.010

J. LI, W. LIU, D. CASTARÈDE, W. GU, L. LI, T. OHIGASHI, G. ZHANG, M. TANG, E. S. THOMSON, M. HALLQUIST, S. WANG and X. KONG, “Hygroscopicity and Ice Nucleation Properties of Dust/Salt Mixtures Originating from the Source of East Asian Dust Storms,” *Front. Environ. Sci.* **10**, 897127 (2022). DOI: 10.3389/fenvs.2022.897127

M. C. LIU, K. A. MCCAIN, N. MATSUDA, A. YAMAGUCHI, M. KIMURA, N. TOMIOKA, M. ITO, M. UESUGI, N. IMAE, N. SHIRAI, T. OHIGASHI, R. C. GREENWOOD, K. UESUGI, A. NAKATO, K. YOGATA, H. YUZAWA, Y. KODAMA, K. HIRAHARA, I. SAKURAI, I. OKADA, Y. KAROUJI, S. NAKAZAWA, T. OKADA, T. SAIKI, S. TANAKA, F. TERUI, M. YOSHIKAWA, A. MIYAZAKI, M. NISHIMURA, T. YADA, M. ABE, T. USUI, S. WATANABE and Y. TSUDA, “Incorporation of <sup>16</sup>O-Rich Anhydrous Silicates in the Protolith of Highly Hydrated Asteroid Ryugu,” *Nat. Astron.* **6**(10), 1172–1177 (2022). DOI: 10.1038/s41550-022-01762-4

M. ITO, N. TOMIOKA, M. UESUGI, A. YAMAGUCHI, N. SHIRAI, T. OHIGASHI, M.-C. LIU, R. GREENWOOD, M. KIMURA, N. IMAE, K. UESUGI, A. NAKATO, K. YOGATA, H. YUZAWA, Y. KODAMA, A. TSUCHIYAMA, M. YASUTAKE, R. FINDLAY, I. FRANCHI, J. MALLEY, K. MCCAIN, N. MATSUDA, K. MCKEEGAN, K. HIRAHARA, A. TAKEUCHI, S. SEKIMOTO, I. SAKURAI, I. OKADA, Y. KAROUJI, M. ARAKAWA, A. FUJII, M. FUJIMOTO, M. HAYAKAWA, N. HIRATA, N. HIRATA, R. HONDA, C. HONDA, S. HOSODA, Y. IJIMA, H. IKEDA, M. ISHIGURO, Y. ISHIHARA, T. IWATA, K. KAWAHARA, S. KIKUCHI, K. KITAZATO, K. MATSUMOTO, M. MATSUOKA, T. MICHIKAMI, Y. MIMASU, A. MIURA, O. MORI, T. MOROTA, S. NAKAZAWA, N. NAMIKI, H. NODA, R. NOGUCHI, N. OGAWA, K. OGAWA, T. OKADA, C. OKAMOTO, G. ONO, M. OZAKI, T. SAIKI, N. SAKATANI, H. SAWADA, H. SENSU, Y. SHIMAKI, K. SHIRAI, S. SUGITA, Y. TAKEI, H. TAKEUCHI, S. TANAKA, E. TATSUMI, F. TERUI, R. TSUKIZAKI, K. WADA, M. YAMADA, T. YAMADA, Y. YAMAMOTO, H. YANO, Y. YOKOTA, K. YOSHIHARA, M. YOSHIKAWA, K. YOSHIKAWA, R. FUKAI, S. FURUYA, K. HATAKEDA, T. HAYASHI, Y. HITOMI, K. KUMAGAI, A. MIYAZAKI, M. NISHIMURA, H. SOEJIMA, A. IWAMAE, D. YAMAMOTO, M. YOSHITAKE, T. YADA, M. ABE, T. USUI, S. WATANABE and Y. TSUDA, “Hayabusa2 Returned Samples: A Unique and Pristine Record of Outer Solar System Materials from Asteroid Ryugu,” *Nat. Astron.* **6**, 1163–1171 (2022). DOI: 10.1038/s41550-022-01745-5

R. C. GREENWOOD, I. A. FRANCHI, R. FINDLAY, J. A. MALLEY, M. ITO, A. YAMAGUCHI, M. KIMURA, N. TOMIOKA, M. UESUGI, N. IMAE, N. SHIRAI, T. OHIGASHI, M.-C. LIU, K. A. MCCAIN, N. MATSUDA, K. D. MCKEEGAN, K. UESUGI, A. NAKATO, K. YOGATA, H. YUZAWA, Y. KODAMA, A. TSUCHIYAMA, M. YASUTAKE, K. HIRAHARA, A. TEKEUCHI, S. SEKIMOTO, I. SAKURAI, I. OKADA, Y. KAROUJI, S. NAKAZAWA, T. OKADA, T. SAIKI, S. TANAKA, F. TERUI, M. YOSHIKAWA, A. MIYAZAKI, M. NISHIMURA, T. YADA, M. ABE, T. USUI, S. WATANABE and Y. TSUDA, “Oxygen Isotope Analysis of Ryugu Particles: Fresh Evidence for Hydration of Earth by CI Chondrites,” *Nat. Astron.* **7**, 29–38 (2023).

K. A. MCCAIN, N. MATSUDA, M.-C. LIU, K. D. MCKEEGAN, A. YAMAGUCHI, M. KIMURA, N. TOMIOKA, M. ITO, N. IMAE, M. UESUGI, N. SHIRAI, T. OHIGASHI, R. C. GREENWOOD, K. UESUGI, A. NAKATO, K. YOGATA, H. YUZAWA, Y. KODAMA, K. HIRAHARA, I. SAKURAI, I. OKADA, Y. KAROUJI, S. NAKAZAWA, T. OKADA, T. SAIKI, S. TANAKA, F. TERUI, M. YOSHIKAWA, A. MIYAZAKI, M. NISHIMURA, T. YADA, M. ABE, T. USUI, S. WATANABE and Y. TSUDA, “Early Fluid Activity on Ryugu Inferred by Isotopic Analyses of Carbonates and Magnetite,” *Nat. Astron.* **7**, 309–317 (2023).

A. YAMAGUCHI, N. TOMIOKA, M. ITO, N. SHIRAI, M. KIMURA, R. C. GREENWOOD, M.-C. LIU, K. A. MCCAIN, N. MATSUDA, M. UESUGI, N. IMAE, T. OHIGASHI, K. UESUGI, A. NAKATO, K. YOGATA, H. YUZAWA, Y. KODAMA, K. HIRAHARA, I. SAKURAI, I. OKADA, Y. KAROUJI, S. NAKAZAWA, T. OKADA, T. SAIKI, S. TANAKA, F. TERUI, M. YOSHIKAWA, A. MIYAZAKI, M. NISHIMURA, T. YADA, M. ABE, T. USUI, S. WATANABE and Y. TSUDA, “Insight into Multi-Step Geological Evolution of C-Type Asteroids from Ryugu Particles,” *Nat. Astron.* **7**, 398–405 (2023).

W. ZHANG, E. HOSONO, D. ASAKURA, H. YUZAWA, T. OHIGASHI, M. KOBAYASHI, H. KIUCHI and Y. HARADA, “Chemical-State Distributions in Charged LiCoO<sub>2</sub> Cathode Particles Visualized by Soft X-Ray Spectromicroscopy,” *Sci. Rep.* **13**, 4639 (2023). DOI: 10.1038/s41598-023-30673-1

D. ASAKURA, E. HOSONO, M. KITAMURA, K. HORIBA, E. MAGOME, H. SETOYAMA, E. KOBAYASHI, H. YUZAWA, T. OHIGASHI, T. SAKAI, R. KANEGA, T. FUNAKI, Y. SATO and A. OHIRA, “Redox Reaction in Ti-Mn Redox Flow Battery Studied by X-Ray Absorption Spectroscopy,” *Chem. –Asian J.* **18**(1), e220201047 (2022). DOI: 10.1002/asia.202201047

#### B-4) 招待講演

大東琢治, 「軟 X 線顕微鏡のこれまでとこれから ナノバブルの化学状態分析への挑戦」, 日本マイクロ・ナノバブル学会第 10 回学術総会, 東北大学, 仙台, 2022 年 12 月.

大東琢治, 「A cosmic cradle for water and organic molecules; spectro-microscopic analysis in Hayabusa2 project」, 淡江大学, 台湾, 2023 年 3 月.

T. OHIGASHI, “A cosmic cradle for water and organic molecules; spectro-microscopic analysis in Hayabusa2 project,” Academia Sinica Seminar, Taipei (Taiwan), March 2023.

大東琢治, 「A cosmic cradle for water and organic molecules; spectro-microscopic analysis in Hayabusa2 project」, NSRRC (台湾), 2023 年 3 月.

#### B-7) 学会および社会的活動

学会の組織委員等

第 27 回日本放射光学会年会シンポジウム組織委員会, 座長 (2022–2023).

SpectroNanoscopy Workshop, Organizing Committee (2014–).

X 線結像光学研究会幹事 (2015–).

理科教育活動

日本天文教育普及研究会講演「宇宙のゆりかご, 地球へ～はやぶさ 2 帰還試料の有機物分析」慶應大学日吉キャンパス (2022).



B-8) 大学等での講義, 客員

立命館大学 SR センター, 特別研究員, 2011年 8月 - .

B-11) 産学連携

共同研究, (株)住友ゴム工業, 「走査型透過X線顕微鏡を用いたポリマー中のフィラー周囲の化学状態解析」, 大東琢治 (2017年度-2022年度).

C) 研究活動の課題と展望

タイヤゴムにおいて, その破断や損傷の主な原因の一つが, その形状変形の際に内部にかかる応力である。その化学的メカニズムおよび形状の変化の観察を行うため, in-situ で試料に引っ張り応力を印加するための, STXM 用の試料セルのテスト機の開発を行なった。現在, 問題点を改善すべく改良中であり, 今後のビームタイムにて実際に運用し, 分析研究を進める予定である。

惑星探査機はやぶさ2が小惑星リュウグウから持ち帰った試料について, STXM を用いて高分解能有機物分析を行なってきた。リュウグウ試料にはX線照射に対して非常に弱い有機物が含まれており, 特に有機物に対する観察時の試料ダメージが小さいとされるSTXMでも, その化学変化が確認されたため, その変化の過程の解明を行なってきた。この試料は2023年4月をもってJAXAに返還しており, 現在は研究成果を論文として執筆中である。

## 光物性測定器開発研究部門（極端紫外光研究施設）

松井文彦（主任研究員）（2018年4月1日～2021年11月15日）  
（教授）（2021年11月16日昇任）

萩原健太（特任研究員（IMSフェロー））

松田博之（特任研究員）

石原麻由美（事務支援員）

加茂恭子（事務支援員）

A-1) 専門領域：表面物性物理学，電子分光計測技術，放射光科学

A-2) 研究課題：

- a) 電子分光装置・マルチモーダルスピン分析器の新規開発を突破口とした UVSOR の高度化
- b) 運動量分解光電子分光に関する新規現象を基盤とした測定手法確立
- c) 新奇表面電子物性・化学特性・スピン科学の応用展開

A-3) 研究活動の概略と主な成果

- a) ① UVSOR オリジナルの Momentum Microscope (MM) 拠点構築を主務とする。MM は空間・波数空間・エネルギーの幅広い範囲での高分解能測定を可能にするユニークな分析器である。電子物性研究に適した VUV/EUV 領域での高強度・可偏光などといった UVSOR の光源特性を活かした測定機能を実装する MM の導入を実現し、論文・プレスリリースを通じて成果発信を続けている。② 並行して全地球エネルギー・スピン分析器を考案し特許出願した。上記の MM は  $3 \text{ \AA}^{-1}$  までの波数空間の一括測定ができるため価電子帯研究で有効な運動エネルギー  $36 \text{ eV}$  以下の領域では全地球をカバーすることができるが、原子配列を研究するのに有効な運動エネルギー  $500 \text{ eV}$  以上の領域ではせいぜい  $15^\circ$  の領域でしかない。新規分析器は  $2 \text{ keV}$  でも全地球の放出光電子を取り込むことができ、後段のスピン偏向器でスピンの 3 次元ベクトル解析ができるようになる。①は high-end 型価電子帯光電子分光装置、②は内殻光電子ホログラフィー測定装置である。両者を融合させ、スピン 3 次元ベクトル解析を実・逆空間で自在にマッピングできる唯一無二の装置を構築する。
- b) 物性評価に適した光波長帯の連続的なエネルギー可変性が UVSOR の最大の特徴である。BL6U は軟 X 線領域 ( $45\text{--}700 \text{ eV}$ ) をカバーする直線偏光ビームラインである。③ 分子科学で重要となる CNO 吸収端の光を用い、元素選択的な共鳴励起によって価電子帯の原子軌道構成を解明できる共鳴光電子分光の実験を成功させた。特に、吸収端にてグラファイトの  $\pi$  バンドが選択的に励起される様子を波数空間上で可視化した。共鳴 Auger 電子スペクトルに価電子帯分散があらわれる現象の発見は重要である。グラフェンから  $\pi$  共役系分子への展開に歩を進め、お家芸としての共鳴光電子回折法を確立しつつある。本年は「運動量分解光電子顕微鏡法」を新たに確立しグラファイトの単原子層ステップの可視化に成功し、プレスリリースを行った。④ 光エネルギー可変性を活かした  $k_z$  分散測定による全 Brillouin 域価電子帯分散マッピングや偏光特性を活かした原子軌道波動関数解析技術は BL6U での共同研究推進の基盤であるが、さらに精緻な測定を行い、表面特有の電子状態や現象の情報を引き出す研究展開を進めている。
- c) 光電子回折・分光を用いて典型的な高温超伝導体  $\text{Bi2212}$  や代表的層状物質  $\text{TaSe}_2$ ,  $\text{TiSe}_2$  の相転移前後の電子状態をとらえた。graphite 表面の単原子層ステップの顕微像の撮影に成功した (*Phys. Rev. B* 2022) は大きな前進である。新たに確立した顕微 ARPES/ARPES 顕微法の論文 (*J. Phys. Soc. Jpn.* 2022) は Editor's Choice に選定された。劈開試

料表面の局所部分の精密分析の成功は今後の共同研究を呼び込む重要な成果である。共同研究先から Ir 単結晶薄膜の電子状態評価の依頼を受け、バンド分散の測定に成功した。この薄膜は新しいスピン 2 次元フィルターとして有望な材料であり、上記で述べたスピン 3 次元ベクトル解析への応用展開につながるものである。

#### B-1) 学術論文

**E. HASHIMOTO, K. TAMURA, H. YAMAGUCHI, T. WATANABE, F. MATSUI and S. KOH**, “Characterization of Epitaxial CVD Graphene on Ir(111)/ $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(0001) by Photoelectron Momentum Microscopy,” *Jpn. J. Appl. Phys.* **61(SD)**, SD1015 (2022). DOI: 10.35848/1347-4065/ac4ad8

**F. MATSUI and S. SUGA**, “Coupling of  $k_z$ -Dispersing  $\pi$  Bands with Surface Localized States in Graphite,” *Phys. Rev. B* **105(23)**, 235126 (2022). DOI: 10.1103/PhysRevB.105.235126

松井文彦, 「光電子運動量顕微鏡：局所フェルミオロジーと内殻共鳴」, *固体物理*, **57(7)**, 423 (2022).

**F. MATSUI, Y. OKANO, H. MATSUDA, T. YANO, E. NAKAMURA, S. KERA and S. SUGA**, “Domain-Resolved Photoelectron Microscopy and  $\mu$ m-Scale Momentum-Resolved Photoelectron Spectroscopy of Graphite Armchair Edge Facet,” *J. Phys. Soc. Jpn.* **91(9)**, 094703 (2022). DOI: 10.7566/JPSJ.91.094703

**F. MATSUI, H. OTA, R. EGUCHI, H. GOTO, K. KOBAYASHI, J. AKIMITSU, H. OZAKI, T. NISHIOKA, K. KIMURA, K. HAYASHI, T. SHIMANO, N. HAPPO and Y. KUBOZONO**, “Multiple-Site Ag Doping in Bi<sub>2</sub>Se<sub>3</sub>: Compositional Crossover from Substitution to Intercalation as Revealed by Photoelectron Diffraction and X-Ray Fluorescence Holography,” *J. Electron Spectrosc. Relat. Phenom.* **264**, 147295 (2023). DOI: 10.1016/j.elspec.2023.147295

**P. KRÜGER and F. MATSUI**, “Observation and Theory of Strong Circular Dichroism in Angle-Resolved Photoemission from Graphite,” *J. Electron Spectrosc. Relat. Phenom.* **258**, 147219 (2022). DOI: 10.1016/j.elspec.2022.147219

**O. ENDO, F. MATSUI, S. KERA, W. J. CHUN, M. NAKAMURA, K. AMEMIYA and H. OZAKI**, “Observation of Hole States at Perylene/Au(110) and Au(111) Interfaces,” *J. Phys. Chem. C* **126(37)**, 15971–15979 (2022). DOI: 10.1021/acs.jpcc.2c04060

**T. KATO, Y. LI, K. NAKAYAMA, Z. WANG, S. SOUMA, F. MATSUI, M. KITAMURA, K. HORIBA, H. KUMIGASHIRA, T. TAKAHASHI, Y. YAO and T. SATO**, “Fermiology and Origin of  $T_c$  Enhancement in a Kagome Superconductor Cs(V<sub>1-x</sub>Nb<sub>x</sub>)<sub>3</sub>Sb<sub>5</sub>,” *Phys. Rev. Lett.* **129(20)**, 206402 (2022). DOI: 10.1103/PhysRevLett.129.206402

**N. V. VLADIMIROVA, A. S. FROLOV, J. SÁNCHEZ-BARRIGA, O. J. CLARK, F. MATSUI, D. YU USACHOV, M. MUNTWILER, C. CALLAERT, J. HADERMANN, V. S. NEUDACHINA, M. E. TAMM and L. V. YASHINA**, “Occupancy of Lattice Positions Probed by X-Ray Photoelectron Diffraction: A Case Study of Tetradymite Topological Insulators,” *Surf. Interfaces* **36**, 102516 (2023). DOI: 10.1016/j.surfin.2022.102516

#### B-4) 招待講演

松井文彦, 「もう一つの顕微ARPES：光電子運動量顕微法 世界動向とUVSORの現状」, ナノテラスARPESシンポジウム, 仙台, 2023年2月.

松井文彦, 「UVSORにおける先端計測拠点構築：光電子運動量顕微鏡」, 日本表面真空学会中部支部研究会, 名古屋, 2022年11月.

F. MATSUI, “Photoelectron Momentum Microscope at UVSOR-III BL6U, Okazaki,” DESY PETRA-3 seminar, Hamburg (Germany), November 2022.

F. MATSUI, “Surface resonance and monoatomic step of graphite surface imaged by Photoelectron Momentum Microscope,” 14<sup>th</sup> International Symposium on Atomic Level Characterizations for New Materials and Devices ’22, Nago (Japan), October 2022.

B-5) 特許出願

EP4075475, “Spherical Aberration Adjustment Cathode Lens, Spherical Aberration Correction Electrostatic Lens, Electron Spectroscopy, and Photoemission Electron Microscope,” H. MATSUDA and F. MATSUI (National Institutes of Natural Sciences), 2020年.

B-7) 学会および社会的活動

学協会役員等

日本表面真空学会理事 (2021.5–2023).

日本放射光学会庶務幹事 (2021.9–2023).

学会の組織委員等

表面構造に関する国際学会 ICSOS 国際アドバイザー委員 (2017–).

文部科学省, 学術振興会, 大学共同利用機関等の委員等

日本学術振興会 R026 先端計測技術の将来設計委員会運営委員 (2019–).

日本学術振興会運営委員 (2022–2023).

学会誌編集委員

日本表面真空学会出版委員 (2013–).

B-8) 大学等での講義, 客員

総合研究大学院大学物理科学研究科, 「光物理」, 2022年7月–2022年8月.

B-10) 競争的資金

科研費基盤研究(C), 「全角取り込み光電子分光法の開発」, 松田博之 (2021年度–2025年度).

科研費国際共同研究加速基金 (国際共同研究強化(B)), 「光電子波数顕微鏡法で切り拓くナノスピン・オービトロニクス」 (代表: 解良 聡), 松井文彦 (研究分担者) (2019年度–2022年度).

科研費挑戦的研究(開拓), 「ドーパントの価数ごとの立体原子配列を観測する小型測定装置の研究」 (代表: 松下智裕), 松井文彦 (研究分担者) (2021年度–2025年度).

B-11) 産学連携

共同研究, SPECS Surface Nano Analysis GmbH, 「Development of 2D-projection analyzers」, 松井文彦 (2022年度–2024年度).

### C) 研究活動の課題と展望

UVSOR 型 Momentum Microscope (MM) 利用研究を推進する。顕微角度分解光電子分光, 共鳴光電子分光, 3D 波数空間分解光電子分光法を協力研究に供するとともに自身の表面物性科学研究を進める。軟X線ビームラインと VUV ビームライン両方を同時に MM に導く two-beam MM 実験ステーションをデザインし, 建設段階に入った。2020年度は片方(BL6U)での運用が始まった。2022年度に 2D スピンフィルタを導入し, 9月末にデータ取得開始にこぎつけた。2022年度以降 2本目のビームラインに接続, MM の将来の拡張として 2次元スピン検出器を用いたスピン分解光電子分光によるスピン物性研究の展開を計画しているが, その基礎研究として磁性薄膜・キラル分子膜の電子状態・原子構造研究を進める。

MM 開発の先駆者がいる Forschungszentrum Jülich (FZJ) の電子物性部門 (PGI-6) と学術協定を結び, 表面電子物性の共同研究を進めてきたおかげで, UVSOR でも MM が順調に立ち上がった。時間分解型の MM 開発を進めるドイツ・DESY の M. Hoesch らとも共同研究を密にし, こちらからスピン研究に関して相手から時間分解測定法に関して経験技術交流を進めている。本装置を活かした実験を積極的に進めるユーザーコミュニティ構築のための第 1回 (2019)・第 2回 (2020.10) 国際ワークショップ・第 3回 (2022.10) 国際会議特別セッション共催に続き, 東アジア圏での MM 開発グループの萌芽のネットワークづくりに取り掛かり, また FHI・HiSOR・ALS 各機関との合同セミナーで招待講演を行った。UVSOR の国内外からのビジビリティを高めるとともに, 他のビームラインにも先端拠点を目指す機運と風土の定着を活動指針として進めている。

## 田中清尚（准教授）（2014年4月1日着任）

杉本 卓史（特別共同利用研究員）  
保科 拓海（特別共同利用研究員）  
小山 正太郎（特別共同利用研究員）  
三田 愛也（特別共同利用研究員）  
石原 麻由美（事務支援員）  
加茂 恭子（事務支援員）

A-1) 専門領域：物性物理学，放射光科学

A-2) 研究課題：

- a) 高温超伝導体の電子状態の解明
- b) 新規スピン分解角度分解光電子分光装置の開発
- c) 角度分解光電子分光における低温技術の開発

A-3) 研究活動の概略と主な成果

- a) UVSOR BL7U, BL5U において、銅酸化物高温超伝導体 Bi2213 の角度分解光電子分光測定を行った。Bi2223 では結晶構造に起因する 2 種類の CuO<sub>2</sub> 面（IP と OP）が存在し、それぞれに対応するバンド分散が観測できるが、運動量空間上でノードとアンチノードと呼ばれる領域を結ぶ中間領域において IP と OP バンドが交差し、その交差点においてバンド分散に異常が観測されることを発見した。二つの CuO<sub>2</sub> 面間での電子のホッピングや、種々の格子振動との結合を仮定したスペクトルのシミュレーションを行うことで、バンド分散の異常を再現できることが分かった。この結果は格子振動と電子の結合が、この系では重要であることを示唆している。また理論計算により、スピン揺らぎだけではなく格子振動も高温超伝導の実現に必要であるという、今回の観測結果を支持する結果を得ることができた。
- b) UVSOR BL5U では高効率スピン分解角度分解光電子分光測定の開発を進めている。これまで Au(111) 表面バンドのラッシュバ分裂をスピン分解してイメージスペクトルを取得することに成功し、運動量空間分解能や検出効率なども既存システムを大きく上回ることも確認できている。ただし、測定時には頻繁にスピントーゲットの磁化操作をする必要があり、このままではユーザー利用を開始することは困難であることが判明した。スピンの向きをあらゆる方向に変更できるスピンマニピュレータを導入し、スピントーゲットの磁化操作を不要とすることに成功したが、スピンマニピュレータのパラメータ整備が必要となっている。パラメータの整備を完了してユーザー利用開始を目指す予定である。
- c) 角度分解光電子分光実験の高エネルギー分解能測定には、試料をどれだけ冷却できるかが重要となる。BL5U, 7U 用に開発した冷却可能な 5 軸 6 軸マニピュレータは、これまで放射光施設の光電子分光装置としては世界でもトップクラスの低温を実現している。最近、新たにソフトウェアによる熱伝導解析を導入した。新たな改良案に基づいて、現在さらなる低温化を目指して開発を進めている。

B-1) 学術論文

**C. W. CHUANG, S. SOUMA, A. MORIYA, K. NAKAYAMA, A. IKEDA, M. KAWAGUCHI, K. OBATA, S. R. SAHA, H. TAKAHASHI, S. KITAGAWA, K. ISHIDA, K. TANAKA, M. KITAMURA, K. HORIBA, H. KUMIGASHIRA, T. TAKAHASHI, S. YONEZAWA, J. PAGLIONE, Y. MAENO and T. SATO**, “Fermiology of a Topological Line-Nodal Compound  $\text{CaSb}_2$  and Its Implication to Superconductivity: Angle-Resolved Photoemission Study,” *Phys. Rev. Mater.* **6(10)**, 104203 (2022). DOI: 10.1103/PhysRevMaterials.6.104203

**T. SUMI, T. SENOO, M. HORIO, S. EL MOUSSAOUI, E. NAKAMURA, K. TANAKA, A. TSUKAMOTO and I. MATSUDA**, “Element-Selective Magnetization States in a  $\text{Gd}_{23}\text{Fe}_{67}\text{Co}_{10}$  Alloy, Probed by Soft X-Ray Resonant Magneto-Optical Kerr Effect,” *Jpn. J. Appl. Phys.* **62(SB)**, 8001 (2022). DOI: 10.35848/1347-4065/aca3b1

**T. KATO, Y. LI, T. KAWAKAMI, M. LIU, K. NAKAYAMA, Z. WANG, A. MORIYA, K. TANAKA, T. TAKAHASHI, Y. YAO and T. SATO**, “Three-Dimensional Energy Gap and Origin of Charge-Density Wave in Kagome Superconductor  $\text{KV}_3\text{Sb}_5$ ,” *Commun. Mater.* **3(1)**, 30 (9 pages) (2022). DOI: 10.1038/s43246-022-00255-1

**T. NAKAMURA, T. NAKAYA, Y. OHTSUBO, H. SUGIHARA, K. TANAKA, R. YUKAWA, M. KITAMURA, H. KUMIGASHIRA, K. IMURA, H. S. SUZUKI, N. K. SATO and S. KIMURA**, “Surface Valence Transition in SmS by Alkali Metal Adsorption,” *Phys. Rev. B* **107(4)**, L041102 (2023). DOI: 10.1103/PhysRevB.107.L041102

**S. ICHINOKURA, A. HEMMI, H. CUN, K. TANAKA, R. SHIMIZU, T. HITOSUGI, T. GREBER and T. HIRAHARA**, “Efficiency of Electron Doping to Monolayer Hexagonal Boron Nitride by Alkali Metals,” *Appl. Phys. Lett.* **122(7)**, 071601 (2023). DOI: 10.1063/5.0140074

**I. SUZUKI, S. KAWANISHI, K. TANAKA, T. OMATA and S. TANAKA**, “Experimental Identification of Atomic Orbital Contributions to SnS Valence Band Using Polarization-Dependent Angle-Resolved Photoemission Spectroscopy,” *Phys. Status Solidi B* **260(4)**, 2200408 (2023). DOI: 10.1002/pssb.202200408

C) 研究活動の課題と展望

開発中のスピン分解ARPESシステムは、目標としていたイメージでのスピン分解スペクトルの取得に成功し、運動量空間分解能や検出効率なども既存システムを大きく上回ることも確認できている。ユーザー利用を目指して、スピンの向きをあらゆる方向に変更できるスピンマニピュレータを導入したが、電子レンズ系のパラメータ整備に時間がかかっている。できるだけ早期にパラメータの整備を完了してユーザー利用開始を目指す予定である。

## 光化学測定器開発研究部門（極端紫外光研究施設）

荒 木 暢（主任研究員）（2023年1月1日着任）

石原 麻由美（事務支援員）

加茂 恭子（事務支援員）

A-1) 専門領域：放射光科学

A-2) 研究課題：

- a) Scanning Transmission X-Ray Microscopy (STXM) ビームラインにおける他の検出方法の検討
- b) STXM を用いた応用研究とそのための試料環境開発
- c) Resonant Soft X-Ray Scattering/Reflectivity (RSOXS/R) 及び STXM の生命科学研究への適用

A-3) 研究活動の概略と主な成果

- a) Swiss Light Source と共同で AFM と STXM を組み合わせた装置の導入およびその周辺技術の検討を行なった。
- b) 上記に関係して、ユーザー及び Swiss Light Source との共同開発研究に関する打ち合わせを行った。2023年1月に着任以来、前任者（今年度クロスアポイントメント）の大東氏からの引き継ぎを行って来た。ビームライン・エンドステーションの現状と民間利用も含めたユーザーサイエンスの把握に努めつつ、ユーザー実験のサポートを行なった。
- c) 両手法を軸にした UVSOR における生命科学研究を岡崎3機関連携のもとで進めるための準備を行なってきた。1月行なった研究会では、両手法の生命科学への適用を念頭においた解説を行い、その後、個別の議論・テスト実験も行なった。また、昨年11月に日本における RSOXS/R の普及と発展を目指して、関係する放射光施設及びユーザーとこの手法をリードしている米国 Advanced Light Source の Dr. Cheng Wang 氏による講演を内容とする研究会を開催した。

B-1) 学術論文

**D. M. BUCHANAN, L. NEWSOME, J. R. LLOYD, M. KAZEMIAN, B. KAULICH, T. ARAKI, H. BAGSHAW, J. WATERS, G. VAN DER LAAN, A. N'DIAYE and V. S. COKER**, “Investigating Nanoscale Electron Transfer Processes at the Cell-Mineral Interface in Cobalt-Doped Ferrihydrite Using *Geobacter sulfurreducens*: A Multi-Technique Approach,” *Front. Earth Sci.* **10**, 799328 (2022). DOI: 10.3389/feart.2022.799328

**A. DYBOWSKA, P. F. SCHOFIELD, L. NEWSOME, R. J. HERRINGTON, J. F. W. MOSSELMANS, B. KAULICH, M. KAZEMIAN, T. ARAKI, T. J. SKIGGS, J. KRUGER, A. OXLEY, R. L. NORMAN and J. R. LLOYD**, “Evolution of the Piauí Laterite, Brazil: Mineralogical, Geochemical and Geomicrobiological Mechanisms for Cobalt and Nickel Enrichment,” *Minerals* **12**(10), 1298 (2022). DOI: 10.3390/min12101298



B-4) 招待講演

荒木 暢,「世界の軟X線イメージングの現状」,第36回日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム特別企画講演「いよいよ動き出す NanoTerasu——整備状況とサイエンスの展開——」,草津市,2023年1月.

荒木 暢,「マルチプローブを用いたソフト界面解析技術～量子ビームの枠を超えたマルチプローブ実験の普及を目指して」,CIQuS 研究会,つくば市,2023年3月.

B-8) 大学等での講義, 客員

Diamond Light Source, Visiting Scientist, 2023年-.

## 岩 山 洋 士 (助教) (2010 年 4 月 1 日着任)

石原 麻由美 (事務支援員)

加茂 恭子 (事務支援員)

A-1) 専門領域：軟X線分子分光, 光化学反応動力学

A-2) 研究課題：

- a) 軟X線共鳴散乱法によるソフトマターのメゾスコピック構造解析
- b) X線自由電子レーザーを用いた溶液光学反応のフェムト秒実時間観測手法の開発

A-3) 研究活動の概略と主な成果

- a) 共鳴軟X線散乱の開発を通して、ポリマーや液晶などを含むソフトマターのメゾスコピック領域の構造解析技術の開発を行っている。ソフトマターは様々な空間スケールで階層構造を持つ物質であり、特に数 nm から数 100 nm のメゾスコピック領域の構造が、その物質のマクロな性質を理解するうえで重要である。このようなメゾスコピック領域の構造解析法として従来X線小角散乱が広く用いられているが、非共鳴におけるX線散乱は電子密度の変調に敏感であるが、平均原子番号の近い化学種ごとの構造解析は難しい。そのため、ポリマーブレンドなどの異なる化学種の複合材に対しては、化学種を選別したメゾスコピック領域の構造解析法が開発が望まれている。共鳴軟X線散乱法は、化学種ごとに内殻共鳴エネルギーが異なることを利用し、放射光軟X線を用い化学種ごとの構造解析を可能とする。本グループでは2020年度より共鳴軟X線散乱法を実現すべく、散乱観測のための装置開発を行っている。装置の立ち上げでは、液晶分野を専門とする共同研究者らと共にキラルスメクチック液晶を用いて、従来のX線小角散乱法では観測できなかった、強誘電体、反強誘電体およびその副次相による数 nm から 10 nm の周期構造に由来する回折像の観測に成功し、本共鳴軟X線散乱法が液晶におけるメゾスコピック領域の構造を明らかにするうえで有用な測定方法であることを示した。本年度は、観測装置の高度化に取り組み、軟X線用の in-vacuum CMOS カメラを用いた検出器回転型の散乱光観測装置の設計・開発を行った。本測定器では、真空チャンバー内で散乱角 2θ 方向に検出器が可動することで、広い散乱角 1° から 60° までを観測できる。これは炭素の内殻共鳴エネルギー 285 eV (波長 4.4 nm) 付近において、散乱ベクトル 0.02 nm<sup>-1</sup> から 1.2 nm<sup>-1</sup>、空間スケールにおいて 5 nm から 300 nm の範囲で構造解析が可能なことに対応する。2023年度より立ち上げ・稼働する予定である。
- b) X線自由電子レーザー SACLA BL1 を利用した液体試料用のポンプ・プローブ法によるフェムト秒時間分解・透過型軟X線吸収分光器の開発を提案し、2020年度 SACLA 基盤開発プログラムに採択され研究を進めている。化学反応の多くは溶液内で起こり、また光合成をはじめとした光化学反応また生命現象は細胞液内でおこることを考えると、固相・気相に加え液相を研究対象に加えることは重要である。特に、軟X線領域は生命において重要な炭素、窒素、酸素元素の K 殻吸収端を含む。これまでの実験結果により高強度のポンプ光によりメンブレンが破損することが明らかになり、メンブレンを用いないマイクロ流路を用いた液厚 20~1000 nm の超薄膜フラットジェット法の開発を行った。また発光分光器の回折格子を更新し、エネルギー分解能  $E/\Delta E$  を 2000 まで向上させた。今後、超薄膜フラットジェットおよび発光分光器を用いた、ポンプ・プローブ法によるフェムト秒時間分解軟X線吸収スペクトルを実現し、溶液の光化学反応を明らかにする。

B-1) 学術論文

**A. FERTÉ, F. PENENT, J. PALAUDOUX, H. IWAYAMA, E. SHIGEMASA, Y. HIKOSAKA, K. SOEJIMA, P. LABLANQUIE, R. TAÏEB and S. CARNIATO**, “Specific Chemical Bond Relaxation Unraveled by Analysis of Shake-Up Satellites in the Oxygen Single Site Double Core Hole Spectrum of CO<sub>2</sub>,” *Phys. Chem. Chem. Phys.* **24(2)**, 1131–1146 (2022). DOI: 10.1039/d1cp03947d

**T. KANEYASU, M. HOSAKA, A. MANO, Y. TAKASHIMA, M. FUJIMOTO, E. SALEHI, H. IWAYAMA, Y. HIKOSAKA and M. KATO**, “Double-Pulsed Wave Packets in Spontaneous Radiation from a Tandem Undulator,” *Sci. Rep.* **12(1)**, 9682 (2022). DOI: 10.1038/s41598-022-13684-2

**K. KAWAGUCHI, T. MIYAMACHI, T. GOZLINSKI, T. IIMORI, Y. TAKAHASHI, T. HATTORI, K. YAMAMOTO, T. KOITAYA, H. IWAYAMA, O. ISHIYAMA, E. NAKAMURA, M. KOTSUGI, W. WULFHEKEL, T. YOKOYAMA and F. KOMORI**, “Layer-Resolved Magnetic Moments in N-Surfactant Assisted FeNi Ordered Alloy Thin Films,” *Jpn. J. Appl. Phys.* **61(SL)**, SL1001 (2022). DOI: 10.35848/1347-4065/ac66c1

**Y. TAKANISHI, F. ARAOKA and H. IWAYAMA**, “The Effect of the Structure of a Helical Nanofilament of the B4 Phase of Bent-Core Liquid Crystals on the Nano-Phase Separation Mixed with a Rod-Like Cholesteric Liquid Crystal Mixture,” *RSC Adv.* **12(45)**, 29346–29349 (2022). DOI: 10.1039/d2ra03316j

**J. J. LEE, S. KIM, H. NISHIKAWA, Y. TAKANISHI, H. IWAYAMA, C. KIM, S. W. CHOI and F. ARAOKA**, “Chiroptical Performances in Self-Assembled Hierarchical Nanosegregated Chiral Intermediate Phases Composed of Two Different Achiral Bent-Core Molecules,” *Int. J. Mol. Sci.* **23(23)**, 14629 (2022). DOI: 10.3390/ijms232314629

B-7) 学会および社会的活動

学会誌編集委員

原子衝突学会学会誌編集委員 (2020–).

B-8) 大学等での講義, 客員

理化学研究所, 客員研究員, 2022年4月–2023年3月.