

4-5 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）

DE LÉSELEUC, Sylvain（准教授（兼任））

富田 隆文（助教）

松原 卓也（特任助教）

田村 光（特任助教）

CHAUHAN, Vikas Singh（特任研究員）

JAUNET-LAHARY, Titouan（特任研究員）

KUMAR SINGH, Pushpander（特任研究員）

SRAKAEW, Kritsana（特任研究員）

TIRUMALASETTY PANDURANGA, Mahesh（特任研究員）

MAGRO, Valentin Nicolas Walter（特任研究員）

LIENHARD, Vincent（特任研究員）

LORANCA CRUZ, Luisa Fernanda（招へい研究員）

岡田 満哉（特別訪問研究員）

仲田 公明（特別訪問研究員）

藤川 武敏（特命専門員）

川本 美奈子（特任専門員）

鈴井 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）

犬飼 和久（特任専門員）

西岡 稚子（特任専門員）

越田 陽子（特任専門員）

ANTHOINE-MILHOMME, Valentin Timothée（特任専門員）

SCHMID, Maximilian Otto（インターンシップ）

MEMBREZ, Gaetan（インターンシップ）

PINOCHE, Berengere（インターンシップ）

MICAGLIO, Giorgio（インターンシップ）

KAWATA, Shun（インターンシップ）

PARKPROM, Pongpol（インターンシップ）

DESMURS, Fabien（インターンシップ）

VAN-EIMERN, Moritz（インターンシップ）

UDOMMAI, Parinya（インターンシップ）

MARCELINO, Maximilien（インターンシップ）

SENOUCI, Sami（インターンシップ）

VIDOR, Guilhem（インターンシップ）

GODARD, Theo（インターンシップ）

GIANGRECO, Lorenzo（インターンシップ）

KOCIK, Robin（大学院生）

DENECKER, Tom (大学院生)
HASSANALY, Sapna (大学院生)
KECIR, Omar (大学院生)
ANTONIO, Jorge (大学院生)
渡部 元輝 (大学院生)
小田川 陽陸 (大学院生)
新川 聖也 (大学院生)
鶴田 笑子 (技術支援員 (派遣))
佐藤 琢美 (技術支援員 (派遣))
山岸 芽衣 (事務支援員)
久樂 由莉耶 (事務支援員)
武井 美緒 (事務支援員 (派遣))
八幡 菜穂子 (事務支援員 (派遣))

A-1) 専門領域：量子物理学，量子コンピュータ，量子シミュレータ，原子分子光 (AMO) 物理学，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ミクロン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」の開発を進めており、新規特許出願4件を行っている。

B-1) 学術論文

K. NISHIMURA, H. SAKAI, T. ANDO, T. TOMITA and S. DE LÉSÉLEUC, “Optimization-Based Hologram Design for Fine Optical Tweezer Arrays and Extension of Super-Resolution Criteria,” *Phys. Rev. A* **113**(1), 013119 (2026). DOI: 10.1103/xhb8-jlxh

V. LIENHARD, R. MARTIN, Y. T. CHEW, T. TOMITA, K. OHMORI and S. DE LÉSÉLEUC, “Generation of Motional Squeezed States for Neutral Atoms in Optical Tweezers,” *Phys. Rev. Lett.* **135**(25), 253404 (2025). DOI: 10.1103/3kwz-ny2h

M. KUNIMI and T. TOMITA, “Proposal for Realizing Heisenberg-Type Quantum-Spin Models in Rydberg-Atom Quantum Simulators,” *Phys. Rev. A* **112**(5), L051301 (2025). DOI: 10.1103/c97b-my2w

C. NILL, S. DE LÉSÉLEUC, C. GROß and I. LESANOVSKY, “Resonant Stroboscopic Rydberg Dressing: Electron-Motion Coupling and Multi-Body Interactions,” *Phys. Rev. A* **111**(4), L041104 (2025). DOI: 10.1103/PhysRevA.111.L041104

T. DENECKER, Y. T. CHEW, O. GUILLEMANT, G. WATANABE, T. TOMITA, K. OHMORI and S. DE LÉSÉLEUC, “Measurement and Feedforward Correction of the Fast Phase Noise of Lasers,” *Phys. Rev. A* **111**(4), 042614 (2025). DOI: 10.1103/PhysRevA.111.042614

B-4) 招待講演 (* 基調講演)

大森賢治,「量子スピード限界で動作する中性原子型・超高速量子コンピュータ」, 2026年第73回応用物理学会春季学術講演会, 東京科学大学大岡山キャンパス本館, 東京都目黒区, 2026年3月.

大森賢治,「中性原子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2026～誤り耐性型汎用量子コンピュータの実現を目指して～, ベルサール秋葉原, HALL A/B, 東京都千代田区, 2026年3月.

大森賢治,「将来への展望」,「アト秒の日」(10月18日)登録記念式典, 東京大学先端科学技術研究センター ENEOSホール, 東京都目黒区, 2025年10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」, JASIS2025分析機器・科学機器総合展トピックスセミナー「量子コンピュータ」, 幕張メッセ, 千葉県千葉市, 2025年9月.

大森賢治,「量子力学100年の謎」, 大阪・関西万博スペシャルトーク『攻殻機動隊×量子コンピュータ』(EXPO2025 SPECIAL TALK『GHOST IN THE SHELL』×『QUANTUM COMPUTER』)特別講義, 大阪・関西万博EXPO メッセ「WASSE」 「エンタングル・モーメントー [量子・海・宇宙] ×芸術」展ステージ, 大阪府大阪市, 2025年8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」, 電子情報通信学会 システムナノ技術に関する特別研究専門委員会主催第6期第2回研究会「量子情報分野におけるナノ構造・制御技術」, オンライン開催, 2025年6月.

K. OHMORI, “Ultrafast quantum computing with ultracold atom arrays at quantum speed limit,” Physikalisches Kolloquium, Emmy-Noether-Campus, Universität Siegen, Siegen (Germany), January 2026.

K. OHMORI, “Ultrafast quantum computing with ultracold atom arrays at quantum speed limit,” International Conference on Quantum Information Science and Technology (ICQIST 2025), CQuERE, TCG CREST, Kolkata (India) (Hybrid), December 2025.* (Plenary talk)

K. OHMORI, “Ultrafast quantum computing with ultracold atom arrays at quantum speed limit,” Optica Incubator on Petahertz Electronics, Optica Global Headquarters, Washington D.C. (USA), November 2025.

K. OHMORI, “Ultrafast quantum computing with ultracold atom arrays at quantum speed limit,” JQI (Joint Quantum Institute) Special Seminar, The Physical Sciences Complex at the University of Maryland, College Park (USA), November 2025.

K. OHMORI, “Ultrafast quantum computing with ultracold atom arrays at quantum speed limit,” 2nd Japan-Denmark Symposium On Practical Quantum Computing, Hillside Terrace, Hillside Plaza, Tokyo (Japan), October 2025.

K. OHMORI, “Ultrafast quantum computing with ultracold atom arrays at quantum speed limit,” 2nd International Workshop on Quantum Information Engineering (QIE2025), Okinawa Institute of Science and Technology, Seaside House, Onna, Okinawa (Japan), October 2025.

K. OHMORI, “Ultrafast quantum computing with ultracold atom arrays at quantum speed limit,” Quantum Control of Light and Matter Gordon Research Conference (GRC), Salve Regina University, Newport (USA), August 2025.

K. OHMORI, “Large-scale and high-coherence fault-tolerant quantum computer with dynamical atom arrays,” Moonshot Goal 6 Session in Quantum Innovation 2025, Congrès Square Grand Green Osaka, Osaka (Japan), August 2025.

K. OHMORI, “Ultrafast quantum computing with ultracold atom arrays at quantum speed limit,” The Rochester Conference on Coherence and Quantum Science (CQS-12), Sloan Auditorium, University of Rochester, Rochester (USA), June 2025.

K. OHMORI, “Ultrafast quantum computing with ultracold atom arrays at quantum speed limit,” Optics & Photonics International Congress 2025, PACIFICO Yokohama, Kanagawa (Japan), April 2025.* (Plenary talk)

B-5) 特許出願

出願

PCT/JP2024/044357, 「パルス光出力システム, パルス光出力方法, 中性原子励起方法及び量子コンピュータ装置」, 松原卓也, シルヴァン ド レゼルック, 富田隆文, 素川靖司, 大森賢治 (自然科学研究機構), 2024 年.

登録

US/12580093, 「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), 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), 2023 年. (登録日 2026 年 3 月 17 日)

B-6) 受賞, 表彰

TIRUMALASETTY PANDURANGA, Mahesh, レーザー学会学術講演会第46回年次大会論文発表奨励賞 (2026).

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-).

Center for Quantum Engineering, Research and Education (CQuERE), TCG, CREST (India), Scientific Advisory Board (2021-), 委員長 (2024 年より Artur Ekert 英オックスフォード大教授の後任として委員長に就任) (2024-).

日本分光学会代議員 (2022-).

欧州研究会議 (European Research Council: ERC, EU) パネル評価者 / 外部評価者 (2007-).

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-).

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

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-).

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-).

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」, 「大規模冷却原子型量子コンピュータプラットフォームの開発および統合」, 課題推進者 (PI) (2022-).

文部科学省「先端国際共同研究推進事業 (ASPIRE)」量子技術領域, 「冷却原子型量子コンピュータ」, 日本側研究代表者 (2024-).

経済産業省「ポスト 5G 情報通信システム基盤強化研究開発事業」, 「繰り返し量子誤り訂正を可能とする Dual-Yb 型量子コンピュータの開発」プロジェクト, 分子研チーム研究開発統括 (2025-).

理科教育活動

科学技術振興機構日本未来館常設展示「量子コンピュータ・ディスク」監修協力 (2025). (富田隆文)

講演講師「光ピンセット中性原子 量子コンピュータ」文部科学省 第一線の講師陣と量子技術を学ぶサマースクール 2025 (OIST) (2025). (富田隆文)

ワークショップ「Focused workshop on atom move」量子コンピュータ関連研究者及び学生の技術交流 (2026). (Sylvain de LÉSÉLEUC, 富田隆文)

その他

内閣府・ムーンショット型研究開発事業・目標 6「誤り耐性型汎用量子コンピュータ」第 1 期 (2022 年 11 月–2025 年度) および第 2 期 (2026–2030 年度) のプロジェクトマネージャーとして、極めて高額の外部資金を獲得 (「B-10」競争的資金) の項を参照) することで、分子研の財政に多大な貢献をもたらすとともに、分子研の世界的な知名度・プレゼンス向上と研究力アピールに大きく貢献。

内閣府・ムーンショット型研究開発事業・目標 6「誤り耐性型汎用量子コンピュータ」のステージゲート審査 (2025 年 10 月 6 日) に合格することによって、第 1 期 (2022 年 11 月–2025 年度) に引き続き、第 2 期 (2026–2030 年度) のプロジェクトマネージャーにも任命され、分子研のプレゼンス向上と研究力アピール、および財政に大きく貢献。

文科省・光・量子飛躍フラッグシッププログラム Q-LEAP (2018–2027 年度) の大規模基礎基盤研究の研究代表者として、高額の外部資金を獲得 (「B-10」競争的資金) の項を参照) することで、分子研の財政に多大な貢献をもたらすとともに、分子研の世界的な知名度・プレゼンス向上と研究力アピールに大きく貢献。

文科省「先端国際共同研究推進事業 (ASPIRE)」において、日本–ドイツ共同研究「量子技術」領域 (2024–2029 年度) の研究代表者に任命され、高額の外部資金を獲得 (「B-10」競争的資金) の項を参照) することで、分子研の国際的なプレゼンス向上と研究力アピール、および財政に大きく貢献。

経産省・ポスト 5G 情報通信システム基盤強化研究開発事業における「繰り返し量子誤り訂正を可能とする Dual-Yb 型量子コンピュータの開発」プロジェクトの分子研チーム研究開発統括 (2025–2027 年度) に任命され、高額の外部資金を獲得 (「B-10」競争的資金) の項を参照) することで、分子研のプレゼンス向上と研究力アピール、および財政に大きく貢献。

大森ムーンショットプロジェクト第 1 期の最大の成果の一つとして、日本初・世界でも数少ない中性原子型のフルスタック量子コンピュータを大森が率いる分子研チームが中心となって完成させた。現在、細部の最終調整中であるが、既に社会的に大きな注目を集めており、一般社団法人量子技術による新産業創出協議会 Q-STAR ご一行 (2026 年 2 月 27 日) をはじめとして様々な企業や報道機関らが視察に来所された。これらによって、産学官のさまざまな分野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。

文科省、講談社、自然科学研究機構、分子研の共催によって、2025 年 8 月 15 日、大阪・関西万博における大森と押井守監督 (映画 GHOST IN THE SHELL / 攻殻機動隊) とのスペシャルトークショー (冒頭で大森による「量子力学 100 年の謎」についての講演) が開催された。当日は立ち見溢れる超満員の盛況となった。これによって分子研の世界的な知名度・プレゼンス向上と研究力アピールに大きく貢献。

自然科学研究機構本部と分子科学研究所が中心となり、2023 年 10 月より分子研大森グループの量子コンピュータ開発の成果を用いた事業化のための協議体「事業化検討プラットフォーム」を立ち上げ、日本政策投資銀行 (DBJ)、日立製作所、富士通、NEC、浜松ホトニクス、豊田通商、岡崎信用金庫をはじめとする 13 社、および 1 国立研究所産総研 G-QuAT の参画を得るとともに、会社設立のためのさまざまな議論や準備活動を進め 2025 年 4 月 1 日、国内初となる中

性原子型・量子コンピュータのハード開発を行う株式会社 Yaqumo の設立に繋がった(これに伴って同協議体は当初目的達成の上、解散)。

8-3 情報発信に記載されている通り、過去 1 年に限っても日本経済新聞(4 度紙面に掲載)、中日新聞などをはじめとする全国的な主要ニュースメディアに度々露出しており、また、米国科学誌サイエンスの中性原子型・量子コンピュータ特集記事に数少ない世界のリーダーとして取り上げられるなど国際的にも大きく注目されている。さらに、大阪・関西万博における攻殻機動隊・押井守監督とのスペシャルトークショーへの大森の出演など、これらの継続的かつ多様な媒体における報道によって、一般社会に対する分子研の知名度・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(2023-2025)、主査代理・専門委員(2015-2023)、ならびに文部科学省・研究計画・評価分科会・臨時委員(2023-2025)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。同審議会での大森の任期は 10 年ルールにより 2025 年度で公式には終了したが、その後も文部科学省からの要請で、同省の科学技術政策へのアドバイザーとして貢献を継続している(2026 年 3 月現在)。これによって、日本政府における分子研の知名度・プレゼンス向上に大きく貢献。

中性原子型・量子コンピュータ開発において従来技術を一気に 2 桁加速する超高速 2 量子ビットゲート(量子コンピューティングの心臓部である計算素子)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(2022 年 8 月以降-現在も継続)でハイライトされ、この成果に関連して、米国 Science 誌 2025 年 7 月 10 日号の中性原子型・量子コンピュータ特集記事で数少ない世界のリーダーの一人としてハイライトされるなど、関連報道が現在も継続している(web ニュース等については、<https://ohmori.ims.ac.jp/kenjiohmori/> を参照)。これらの報道によって分子研の世界的な知名度・プレゼンス向上と研究力アピールに大きく貢献。上記の超高速 2 量子ビットゲートの成果等、大森ムーンショット量子コンピュータの開発の進展を受けて、日本の学術会議や大型の産業展示会等をはじめ、横浜で開催された国際会議 Optics & Photonics International Congress 2025 (プレナリー講演)、ドイツのジューゲン大学コロキウム、インドの TCG CREST にて開催の International Conference on Quantum Information Science and Technology (ICQIST) 2025 (プレナリー講演)、米国ロチェスターで開催された 6 年に 1 度の伝統ある国際会議 CQS-12 Rochester Conference on Coherence and Quantum Science (ボードメンバーとしてアジアから唯一招待)、米国 RI 州ニューポートで開催された Gordon Research Conference on Quantum Control of Light and Matter、米国ワシントン D.C. の OPTICA (米国光学会)本部にて開催された Optica Incubator on Petahertz Electronics、米国メリーランド大学にて開催の JQI (Joint Quantum Institute) Special Seminar などから、次々にコロキウムや招待講演に招かれ、世界のアカデミアや産業界で大反響を呼んでおり、分子研の世界的な知名度・プレゼンス向上と研究力アピールに大きく貢献。

分子研・大森グループと米国を代表する量子テクノロジー企業である ColdQuanta (現 Infleqtion) 社 (<https://coldquanta.com>) との間で量子コンピュータ開発における協業を進めており(2022 年 2 月 18 日-現在)、米国の産業界における分子研の知名度・プレゼンス向上と研究力アピールに大きく貢献。

インドを代表する新しい研究機関 TCG CREST, The Center for Quantum Engineering Research and Education (CQuERE) の Scientific Advisory Board メンバー (2021-現在) (2024 年より Artur Ekert 英オックスフォード大教授の後任として委員長に就任)として、分子研の知名度・プレゼンス向上と研究力アピールに大きく貢献。

2024 年度に 3 度の政策アクション会議に招かれ、各省・局長級のトップ官僚、あるいは政府系金融機関・幹部を始めとする政財界の実力者らに向けて、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

発状況や事業化に関するレクチャーを行うとともに、それら実力者らと量子コンピュータ開発の現状と展望および関連政策に関する討論を行った。これを契機に引き続き同幹部との関係が継続、我が国の政財界における分子研の知名度・プレゼンス向上と研究力アピールに大きく貢献大きく貢献。

「欧州研究会議 (European Research Council : ERC)」や量子コンピュータ研究開発コンソーシアム「ミュンヘン量子バレー (Munich Quantum Valley : MQV)」などヨーロッパを代表する研究開発助成機関から量子技術関係の数々の大型研究プロポーザルの審査を依頼されるなど、世界的な科学研究コミュニティから大きな信頼を集めており、分子研の知名度・プレゼンス向上と研究力アピールに大きく貢献。

大手新聞社による分子研・大森グループ訪問・取材(2025年4月16日;予備取材5月20日オンライン)に際して、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を行うことによって、分子研の知名度・プレゼンス向上と研究力アピールに大きく貢献。

米国サイエンス誌のAdrian Cho 記者による大森へのオンライン取材(2025年5月2日)に際して、自身の量子コンピュータ研究開発に関するレクチャーを行った。この取材に基づいて、米国サイエンス誌 2025年7月10日号の中性原子型・量子コンピュータ特集記事(FEATURE ARTICLE)「Atomic explosion」において、世界でも数少ない中性原子型・量子コンピュータ研究開発のリーダーの一人としてフィーチャーされた。これによって世界的な分子研の知名度・プレゼンス向上と研究力アピールに大きく貢献。

大手通信会社ご一行の分子研・大森グループ訪問(2025年5月15日)に際して、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を行うことによって、分子研の知名度・プレゼンス向上と研究力アピールに大きく貢献。

大手報道機関の大森へのオンライン取材(2025年7月18日および9月24日)に際して、大森グループの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を行うことによって、分子研の知名度・プレゼンス向上と研究力アピールに大きく貢献。

日本政府量子コンピュータ施策関係者ご一行の分子研・大森グループ訪問(2025年8月18日)に際して、大森グループ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を行うことによって、分子研の知名度・プレゼンス向上と研究力アピールに大きく貢献。

日本政府量子コンピュータ施策関係者らの分子研・大森訪問(2025年9月19日)に際して、大森グループ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を行うことによって、分子研の知名度・プレゼンス向上と研究力アピールに大きく貢献。

海外の量子コンピュータスタートアップからのリクエストで面談を行い(2025年11月5日)今後の協力関係の要請を受けた。これによって、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。

国際的ベンチャーキャピタルからのリクエストで面談を行い(2025年11月26日)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。

大手新聞会社の取材(2025年12月8日)を受け、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。

ドイツ初の量子コンピュータ・スタートアップ「eleQtron 社」(Siegen 市)の本社に招かれ、視察・面談を行ない、引き続き創業者Christof Wunderlich 氏が教授を務めるSiegen 大学でコロキウム講演を行った(2026年1月22日)。これにより、ドイツの産業界およびアカデミアに対して、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。日本政府量子施策関係者らと面談を行い(2026年3月13日)、今後の日本政府の量子技術政策の立案に貢献するとともに、文科省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。

分子研フルスタック量子コンピュータに関して大手報道機関の取材の取材(2026年3月17日)を受け、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–。

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)。

内閣府「ムーンショット型研究開発制度」, 「大規模冷却原子型量子コンピュータプラットフォームの開発および結合」, 大森賢治 (2022年度–2030年度)。

内閣府「ムーンショット型研究開発制度」, 「Novel techniques and tools for high-fidelity operation of a cold-atom based, fault-tolerant, quantum computer」, Sylvain de LÉSELEUC (2022年度–2030年度)。

内閣府「ムーンショット型研究開発制度」, 「高忠実度ゲート操作および誤り訂正のための光学的・量子制御技術の開発」, 富田隆文 (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–2027年度)。

文部科学省 先端国際共同研究推進事業 (ASPIRE) 量子技術領域, 「冷却原子型量子コンピュータ」, 大森賢治 (日本側・研究代表者) (2024年度–2029年度)。

経済産業省「ポスト 5G 情報通信システム基盤強化研究開発事業 (量子産業化) / ポスト 5G 情報通信システムの開発 / 繰り返し量子誤り訂正を可能とする Dual-Yb 型量子コンピュータの開発」, 大森賢治 (分子研研究総括) (2025年度–2027年度)。

B-11) 産学連携

共同研究, 浜松ホトニクス (株), 「高精度光技術を用いた量子シミュレータの研究」, 大森賢治 (2022年–)。

共同研究, (株) 日立製作所, 「動的量子ビットを用いた量子コンピュータの研究」, 大森賢治 (2023年度–)。

共同研究, ColdQuanta, Inc. d.b.a. Infleqtion (米国), 「Technologies for cold-atom based fault-tolerant quantum computing : Research and development of Quantum Processing Unit (QPU)」, 大森賢治 (2023年度–)。

共同研究, キュエル (株), 「量子コンピュータの制御装置・ミドルウェアの開発」, 大森賢治 (2024年度–)。

共同研究, (株) Yaqumo, 「高度光技術を用いた量子コンピュータに関する研究」, 大森賢治 (2025年度–)。

共同研究, (株) Yaqumo, 「ポスト 5G 情報通信システム基盤強化研究開発事業 (量子産業化) / ポスト 5G 情報通信システムの開発 / 繰り返し量子誤り訂正を可能とする Dual-Yb 型量子コンピュータの開発」, 大森賢治 (2025年度–)。

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）

下ヶ橋 龍之介（特任助教）

中澤 遼太郎（若手研究者雇用特別研究員）

WULIJI TAOGETAO（特任専門員）

三浦 直也（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単位接合機構の研究
- e) 自己組織構造体の作製と分子機能の分光研究
- f) 機能性分子薄膜の振動状態と電子励起計測
- g) 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立した。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捉えた。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。レーザー励起光によるギャップ状態密度の評価を開始した。
- e) 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により発現する各種機能の解明を目指す。新規な共有結合性有機構造体の作製、自己組織化や原子・分子捕獲などによる有機無機複合構造体の作製に挑戦している。各種分子機能の起源について解明するため、電子状態の局在性の視点で構造との相関を各種先端分光法を駆使して研究を進めている。2022 年度より、キラル分子によるスピン選択性の定量的電子構造評価に向けた高配向キラル二次元膜の研究を開始した。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 (SPALED), 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。
- f) 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進めている。
- g) 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。レーザー励起 ARPES, 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

F. MATSUI, K. HAGIWARA, Y. SATO, R. SAGEHASHI and S. SUGA, “Spin and Orbital Polarizations of Au(111) Surface State Determined by Photoelectron Momentum Microscope,” *J. Phys. Soc. Jpn.* **94**, 114707 (9 Pages) (2025). DOI: 10.7566/JPSJ.94.114707

L. X. CAO, Y. SHEN, K. ZHANG, Z. H. SU, S. C. FENG, X. M. HU, Y. H. ZHANG, B. F. WANG, Y. Y. LI, X. GAO, W. J. WANG, S. KERA, N. UENO, Y. Q. LI and J. X. TANG, “In Situ Interface Reaction Enables Efficient Deep-Blue Perovskite Light-Emitting Diodes,” *Angew. Chem., Int. Ed.* **64(39)**, e202513617 (2025). DOI: 10.1002/anie.202513617

Y. NAKAYAMA, Y. KOYAMA, S. MIYATA, J. MIYAMOTO, T. HOSOKAI, K. FUKUTANI, S. KERA, R. KUMARA, T. KOGANEZAWA, F. KOBAYASHI and M. TADOKORO, “Epitaxial Molecular Heterojunction with Spontaneous Charge Transfer: A Novel Strong Acceptor, Perfluorotetraazaphthalene, on Single-Crystal Pentacene,” *Synth. Met.* **314**, 117941 (2025). DOI: 10.1016/j.synthmet.2025.117941

C. DE, K. FUKUTANI, J. SEO, R. STANIA, K. YAJI, K. KURODA, K. SHIMADA, J. S. KIM, H. W. YEOM and S.-W. CHEONG, “Multiple Magnetic Transitions, Anomalous Hall Effect, and Tunable Surface States in $\text{Mn}(\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x)_4\text{Te}_7$,” *Phys. Rev. B* **112**, 085151 (2025). DOI: 10.1103/7swz-xkrt

Y. HASEGAWA, T. YAMAGUCHI, M. MEISSNER, T. UEBA, F. BUSSOLOTTI, S. IDETA, K. TANAKA, S. YANAGISAWA and S. KERA, “Fingerprinting Weak Electronic Interaction at a van der Waals Interface: Fano Signatures in a Pentacene Monolayer on Graphite,” *Phys. Rev. B* **112**(8), 085301 (2025). DOI: 10.1103/2k7h-h8jm

Y. YU, B. F. WANG, Y. SHEN, Y. T. WANG, Y. H. ZHANG, Y. Y. LI, Z. H. SU, L. X. CAO, S. C. FENG, Y. H. WU, X. Y. GAO, S. KERA, N. UENO, J. X. TANG and Y. Q. LI, “Efficient Blue Perovskite LEDs via Bottom-Up Charge Manipulation for Solution-Processed Active-Matrix Displays,” *Adv. Mater.* **37**(37), 2503234 (2025). DOI: 10.1002/adma.202503234

F. NISHINO, P. KRÜGER, C. H. WANG, R. NEMOTO, Y. H. CHANG, T. HOSOKAI, Y. HASEGAWA, K. FUKUTANI, S. KERA, M. HORIE and T. YAMADA, “Reversible Sliding Motion by Hole-Injection in Ammonium-Linked Ferrocene, Electronically Decoupled from Noble Metal Substrate by Crown-Ether Template Layer,” *Small* **21**(7), 2408217 (2024). DOI: 10.1002/sml.202408217

M. KIM, D. MIYAGI, I. TAMAI, Y. MAEYAMA, Y. OGUCHI, S. INOUE, R. NAKAZAWA, J. JIA, H. ISHII and Y. SHIGESATO, “Impact of Nitrogen Doping on Leakage Current of p-Type Cu₂O-Based pn Junctions for Ga₂O₃ Power Device Applications,” *Phys. Status Solidi RRL* **19**(11), 2400396 (2025). DOI: 10.1002/pssr.202400396

R. NAKAZAWA, M. KITAOKA, R. KAIMORI, M. TATENO, R. HOSHIKAWA, Y. TANAKA and H. ISHII, “Determining the Density of In-Gap States in Organic Semiconductors: A Pitfall of Photoelectron Yield Spectroscopy,” *J. Phys. Chem. C* **130**(9), 3418–3427 (2026). DOI: 10.1021/acs.jpcc.5c07058

B-4) 招待講演

解良 聡, 「有機材料の光電子分光計測：物性の次元性と階層性」, 分子科学討論会, 広島, 2025 年 9 月.

K. FUKUTANI, “Phonon-dressed quasiparticles and excitonic insulator transition in TiSe₂,” 1st International Workshop on Advanced Angle-Resolved Photoemission Spectroscopy, Sapporo (Japan), January 2026.

S. KERA, “Characteristic electronic properties of organic molecular solids,” Global conference on condensed matter physics 2025, Praha (Czech), April 2025.

S. KERA, “Deep insight into the characteristic electronic properties of organic molecular solids by spectroscopic view,” International conference on emerging technologies (ICET), Sabaragamuwa (Sri Lanka), April 2025.

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 (2024–2026).

学会の組織委員等

VSX・SX 高輝度光源利用者懇談会会長 (2024–2026).

応用物理学会プログラム編集委員 (2025–). (福谷圭祐)

文部科学省, 学術振興会, 大学共同利用機関等の委員等

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

KEK 物質構造科学研究所運営会議委員 (2024-2027).

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 (2022-2026).

科学技術交流財団あいしシンクロトン光センター運営委員会委員 (2023-2025), 将来計画検討委員会委員 (2025-2026).

量子科学技術研究開発機構 NanoTerasu 共用ビームライン整備検討委員会委員 (2023-).

文部科学省研究振興局科学技術・学術審議会専門委員 (2025-2027).

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4月-.

千葉大学大学院融合理工学府, 連携客員教授, 2014年9月-.

千葉大学大学院融合理工学府, 「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-.

豊田工業大学, 修士・博士一貫教育プログラム学生メンター, 2025年4月-2026年3月.

B-10) 競争的資金

科研費基盤研究(S), 「階層的準粒子の先端計測による可知化と分子材料研究の変革」, 解良 聡 (2023年度-2027年度).

科研費研究活動スタート支援, 「半導体電気物性の起源: ギャップ内のppmオーダー低状態密度の定量観察と全容解明」, 中澤遼太郎 (2024年度-2025年度).

科研費特別研究員奨励費, 「準粒子相互作用による新たな電荷ダイナミクスの開拓と有機光エレクトロニクスへの展開」, 中澤遼太郎 (2025年度-2027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「電子の真の姿を可知化」することでその機能・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年度に福谷助教が着任し, 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。下ヶ橋特任助教ならびに中澤研究員の若手2名を雇用し, 科研費基盤(S)課題による研究推進を強化した。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多面的に進めている。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）

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) 溶液中の金属錯体の電子状態解析
- c) 時間分解軟X線吸収分光法によるエネルギー・電子移動のオペランド計測
- d) 複合的な生化学反応のオペランド軟X線吸収分光計測

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 $L_{2,3}$ 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 nm ~ 40 μ m）を独自に開発することで，溶液の XAS 測定を実現した。更に，溶液の状態を詳細に調べるために，分子動力学計算により得た分子配置から，励起分子とその周りの分子を切り出して内殻励起計算する，大規模な分子系の内殻励起計算法を確立した。これにより，りん酸の水和構造，有機溶媒中のシリケートの構造，トリエチルアミン水溶液の相転移現象を調べている。また，高分子鎖の一部を切り出すことで，溶液中の高分子の内殻励起計算を実現して，その相転移現象を調べている。
- b) 水溶液中のポルフィリン金属錯体の金属-配位子間の非局在化により，金属錯体の配位子の窒素 K 吸収端 XAS 測定から，その電子状態やスピン状態を議論できることを見出した。また，中心金属の XAS 測定から中心金属の電子状態が分かり，XAS による金属錯体の中心金属と配位子の電子状態の解析法を確立した。これにより，クロロフィルにおけるフィトール鎖の役割，アルミニウム錯体における溶媒の配位構造，鉄錯体におけるオキソ種の生成などを調べている。
- c) 超高速レーザーと放射光から発生する軟X線パルスをも 100 ps の時間分解能で同期するシステムを構築して，溶液光化学反応のオペランド XAS 法を開発した。これにより，フェナントロリン鉄錯体水溶液の窒素 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調べた。現在，光緩和過程への溶媒分子，溶液温度などの影響を時間分解 XAS 計測により調べている。更に，異種金属錯体間での蛍光共鳴エネルギー移動や，二元分子系における光電子移動の機構解明に，時間分解 XAS 法を適用するための実験条件の検討を行っている。
- d) 生化学反応のオペランド XAS 計測を目指した手法開発を行っている。水溶液中のミオグロビンのヘム鉄のスピン状態の変化を窒素 K 吸収端 XAS 計測により調べた。タンパク質のポリペプチド鎖には大量の窒素原子が含まれるが，ポルフィリン環の窒素に由来するピークとエネルギー位置が異なるため，分離して観測できることを見出した。また，内殻励起計算から，異なる状態のヘム鉄のスピン状態を調べて，室温のミオグロビン溶液にスピン平衡を示す状態があることを見出した。今後は，光化学系 II タンパク質の XAS 測定を行い，将来的にその光合成反応の機構解明を行う予定である。

B-1) 学術論文

- H. XU, F. KUMAKI, M. NAGASAKA and T. SASAKI**, “N K-Edge XAS Measurements for Ionic Liquids and N-Heterocycle Molecules in Liquid Phase Analyzed by Simulations with Explicit Inclusion of Solvent Molecules,” *J. Chem. Phys.* **164**(10), 104502 (2026). DOI: 10.1063/5.0315131
- H. IWAYAMA, H. YUZAWA and M. NAGASAKA**, “Phase-Dependent Intermolecular Interactions of Nematic Liquid-Crystal Molecules Probed by Carbon K-Edge X-Ray Absorption Spectroscopy,” *Phys. Rev. E* **113**(1), 015413 (2026). DOI: 10.1103/17prb3wv
- F. KUMAKI, S. TSURU, S. YAMASHITA, J. ADACHI and M. NAGASAKA**, “Electronic Structures of Chlorophyll a Investigated by Nitrogen K-Edge X-Ray Absorption Spectroscopy under a Radiation-Induced Effect,” *J. Phys. Chem. A* **130**(1), 222–228 (2026). DOI: 10.1021/acs.jpca.5c07907
- R. TAKAHASHI, F. KUMAKI, J. ADACHI, Y. NISHIMOTO, M. YASUDA and M. NAGASAKA**, “Soft X-Ray Absorption Spectroscopy for Analysing Aluminium Complexes in Solution,” *Phys. Chem. Chem. Phys.* **27**(44), 24017–24023 (2025). DOI: 10.1039/D5CP03440J
- H. TEDZUKA, H. SAITO, N. MATSUMOTO, M. NAGASAKA, H. SATO, Y. SEKINE and T. SUGIMOTO**, “Nonthermal Catalytic Origin in DC-Enhanced Dry Reforming of Methane Unveiled by Multimodal Operando Analyses,” *J. Phys. Chem. Lett.* **16**, 12973–12981 (2025). DOI: 10.1021/acs.jpclett.5c03159
- Y. YAMADA, Y. TOYODA, M. NAGASAKA, N. NAKATANI, T. KOITAYA, A. KUZUME and K. TANAKA**, “Room-Temperature Direct Spectroscopic Observation of High-Valent Terminal Iron-Oxo Species of a μ -Nitrido-Bridged Iron Phthalocyanine Dimer Deposited on a Highly Oriented Pyrolytic Graphite Surface,” *ChemistryEurope* **3**(5), e202500277 (2025). DOI: 10.1002/ceur.202500277
- K. HARADA, A. SAKAI, S. TSUNEKAWA, Y. TAKAKI, M. NAGASAKA, H. YUZAWA, K.-H. WANG, T. INA, H. KONDOH and M. YOSHIDA**, “Improved Water Electrolysis Over Cobalt Oxyhydroxide by Carbonate Anion Adsorption: Direct Observation of Active Species Using Operando Hard/Soft X-Ray Absorption Spectroscopy,” *ChemSusChem* **18**(16), e202500559 (2025). DOI: 10.1002/cssc.202500559
- S. TSURU and M. NAGASAKA**, “Solvatochromism Observed in the X-Ray Absorption Spectrum of Indole Dissolved in Water,” *J. Phys. Chem. A* **129**(13), 3020–3031 (2025). DOI: 10.1021/acs.jpca.5c00456

B-3) 総説, 著書

- M. NAGASAKA, F. KUMAKI, Y. YAO, J. ADACHI and K. MOCHIZUKI**, “Polymer Cononsolvency Explored Using Soft X-Ray Absorption Spectroscopy,” *Photon Factory Highlights*, **2024**, 24–25 (2025).
- Y. KUDO, F. KUMAKI, M. NAGASAKA, J. ADACHI, Y. NOGUCHI, N. KOGA, H. ITABASHI and M. HIYAMA**, “Core-Electron Excitation of Firefly Luciferin with Carbon XAS Measurements,” *Photon Factory Highlights*, **2024**, 18–19 (2025).
- 長坂将成, 「軟X線吸収分光法による溶液のオペランド計測: 錯体化学と高分子化学への展開」, *Vac. Surf. Sci.*, **68**(4), 226–231 (2025). DOI: 10.1380/vss.68.226
- 為則雄祐, 長坂将成, 「軟X線技術」, *XAFSの基礎と応用 第2版*, 179–190 (2025).

B-4) 招待講演

長坂将成,「軟X線吸収分光法による液体と固液界面のオペランド計測」,第86回応用物理学会秋季学術講演会シンポジウム「ナノバイオテクノロジー分野における実験と分子シミュレーションのインタープレイ」,名古屋,2025年9月.

長坂将成,「軟X線吸収分光法による溶液のオペランド計測」,岩澤コンファレンス2025「持続可能な社会をささえる最先端サイエンス」,東京,2025年6月.

B-7) 学会および社会的活動

学会の組織委員等

第3回PF-UAサマースクール「広がる放射光の利用研究」実行委員長(2025).

文部科学省,学術振興会,大学共同利用機関等の委員等

PF User Association 教育担当幹事(2024–2027).

B-10) 競争的資金

科研費基盤研究(B),「複合的な生化学反応のオペランド軟X線吸収分光計測」,長坂 将成(2025年度–2027年度).

科研費基盤研究(B),「未利用有機資源の有効利用に資する超分子型難分解性有機物電解酸化触媒システムの開発」(代表者:山田 泰之),長坂 将成(研究分担者)(2025年度–2027年度).

高エネルギー加速器研究機構物質構造科学研究所放射光共同利用実験S2課題,「軟X線吸収分光法による固液界面上の化学反応のオペランド計測」,長坂 将成(2025年度–2028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(クロスアポイントメント*)）(2019年4月1日～2026年3月31日)

石原 麻由美（事務支援員）

加茂 恭子（事務支援員）

横田 光代（事務支援員）

*広島大学放射光科学研究所

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きた。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。高エネルギー加速器研究機構などと連携し，持続可能な加速器の実現を目指して加速器要素技術の開発を進めてきた。
- 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きた。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きた。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，広島大学や室蘭工業大学と協力し，深紫外・真空紫外領域での物質と光渦の相互作用に関する基礎研究を進めてきた。
- 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進めた。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た。

- 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た他、単一電子からの放射の観測など、全く新しい放射光利用法の開拓に向けた実験研究を進めてきた。

B-1) 学術論文

T. FUJI, T. TANAKA, T. KANEYASU, Y. KIDA, K. IMAMURA, S. HASHIMOTO, A. GOCHO, K. KANESHIMA, Y. TANAKA and M. KATOH, “Spectral Phase Interferometry for Direct Electric-Field Reconstruction of Chirped Wavepackets Generated from a Tapered Undulator,” *Opt. Lett.* **50(24)**, 7604–7607 (2025). DOI: 10.1364/OL.582624

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加速器研究施設運営委員 (2018–).

B-8) 大学等での講義, 客員

名古屋大学シンクロtron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–.

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、広島大学放射光科学研究所などと連携し、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てきた。

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た。放射光による光渦の生成、さらに放射光光渦同士の合成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た。最近では、単一電子からの電磁放射に関する基礎研究にも着手した。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、今後の幅広い応用展開に期待したい。

金安 達夫（教授）（2025 年 4 月 1 日着任）

浅井 佑哉（特別共同利用研究員）

神谷 美穂（事務支援員）

石原 麻由美（事務支援員）

加茂 恭子（事務支援員）

横田 光代（事務支援員）

A-1) 専門領域：原子分子物理，加速器科学，放射光科学

A-2) 研究課題：

- a) 時空間構造光の利用開拓
- b) シンクロトロン光源の高性能化に関する研究
- c) 量子ビーム源の開発と応用
- d) 放射光計測技術の開発

A-3) 研究活動の概略と主な成果

- a) 時空間構造光の利用開拓：UVSOR に設置されたタンデム型アンジュレータを用いて、二連パルスや光渦など、時空間構造を持つシンクロトロン光の生成技術の確立と利用法の開拓を目指した研究を進めている。二連パルスの利用では原子分子を対象として内殻光電子の波束干渉を捉えることに成功した。この手法は超高速現象の時間観測への応用が期待されており、加速器技術を駆使して二連パルスの制御法を高精度化しつつ、様々な物質系への展開を探索している。また二連パルスの干渉性を生かした軟X線フーリエ分光法の開発や、螺旋波面を持つ光渦ビームの電子分光への応用に着手した。
- b) シンクロトロン光源の高性能化に関する研究：UVSOR 光源の性能向上へ向けた研究開発を進めている。とくに放射光実験の遂行に直結する蓄積ビームの安定化やトップアップ入射の効率化へ向けて、UVSOR 加速器群の運転状況の把握や電子ビームの挙動解明を目的としたマシンスタディを行った。また UVSOR のアップグレードに関する設計研究に着手し、挿入光源の更新案やビーム制御・診断装置の増強の検討を進めている。さらに蓄積リングにおける単一電子のダイナミクスや単一電子が発する光の性質の解明を目指した研究に着手した。
- c) 量子ビーム源の開発と応用：放射光の高フラックス特性を活用したスピン偏極電子源の開発に着手し、電子源の設計製作を行った。
- d) 放射光計測技術の開発：放射光の偏光特性を活用するためには試料位置での偏光評価が欠かせないが、一般的に真空紫外より短い波長域での偏光測定は高度な装置開発を伴う。光と原子の相互作用を利用した簡便な偏光測定装置を開発し、極紫外光の偏光測定に成功した。またシンクロトロン放射の光電場波形の再構築法の開発研究を行い、アンジュレータ放射を測定対象として検証実験に成功した。

B-1) 学術論文

T. FUJI, T. TANAKA, T. KANEYASU, Y. KIDA, K. IMAMURA, S. HASHIMOTO, A. GOCHO, K. KANESHIMA, Y. TANAKA and M. KATOH, “Spectral Phase Interferometry for Direct Electric-Field Reconstruction of Chirped Wavepackets Generated from a Tapered Undulator,” *Opt. Lett.* **50(24)**, 7604–7607 (2025). DOI: 10.1364/OL.582624

T. KANEYASU, Y. HIKOSAKA, S. WADA, H. OTA, H. IWAYAMA, K. SHIMIZU, M. FUJIMOTO and M. KATOH, “Attosecond Interferometry Experiments at the Tandem Undulator Beamline BL1U of UVSOR-III Synchrotron,” *J. Phys.: Conf. Ser.* **3010(1)**, 012086 (2025). DOI: 10.1088/1742-6596/3010/1/012086

Y. IWASAKI, T. KANEYASU, Y. TAKABAYASHI, H. TAKEDA and S. KODA, “Operation of Two Superconducting Wigglers at SAGA Light Source,” *J. Phys.: Conf. Ser.* **3010(1)**, 012021 (2025). DOI: 10.1088/1742-6596/3010/1/012021

H. TAKEDA, T. KANEYASU, Y. TAKABAYASHI and Y. IWASAKI, “Twenty Years of Operation of the SAGA Light Source,” *J. Phys.: Conf. Ser.* **3010(1)**, 012013 (2025). DOI: 10.1088/1742-6596/3010/1/012013

B-4) 招待講演

金安達夫, 「シンクロトロン放射と光渦」, 「原子分子素過程研究とプラズマ分光計測の学際的展開」 「原子分子データ応用フォーラムセミナー」合同研究会, 土岐, 2025 年 12 月.

金安達夫, 「アンジュレータ放射の時空間構造とその応用」, 日本物理学会第 80 回年次大会領域 1, 2, 10, ビーム物理領域合同シンポジウム, 東広島, 2025 年 9 月.

金安達夫, 「シンクロトロン放射の時空間構造制御とその利用」, 東京科学大学理学院化学系講演会, 東京, 2025 年 8 月.

金安達夫, 「原子分子科学と放射光源の利用開拓」, 第 3 回 PF-UA サマースクール「広がる放射光の利用研究」, オンライン開催, 2025 年 8 月.

金安達夫, 「シンクロトロン放射のアト秒位相制御とその応用」, 原子衝突学会第 50 回年会「第 50 回記念シンポジウム」, 八王子, 2025 年 8 月.

B-7) 学会および社会的活動

学会の組織委員等

日本加速器学会年会開催地検討委員 (2025–).

ICPEAC2025, the XXXIV International Conference on Photonic, Electronic and Atomic Collisions, Local Organizing Committee (2023–2025).

学会誌編集委員

日本放射光学会誌編集委員 (2023–2025).

B-8) 大学等での講義, 客員

東京科学大学, 非常勤講師, 2025 年 8 月–9 月.

B-10) 競争的資金

科研費基盤研究(A),「タンデムアンジュレータの多角的利用法の開発」, 金安達夫 (2025年度-2029年度).

自然科学研究機構 OPEN MIX LAB (OML) 公募研究プログラム (研究共創型),「フーリエ分光型X線顕微鏡の開発へ向けた放射光干渉制御の基礎研究」, 金安達夫 (2025年度).

C) 研究活動の課題と展望

UVSOR の極限的な光源性能を生かし, 新規光源技術の開発と利用開拓を柱として研究活動を推進していく。タンデムアンジュレータが発する二連パルスや光渦など時空間構造を持つ光の研究では, 原子分子系を対象とした実験研究で光と物質の基礎的な相互作用を解明しつつ, 新たな放射光計測手法としての応用展開を目指す。時空間構造光の利用には極めて高品質な電子ビームが必須であり, 蓄積リングを周回する電子ビームの制御技術や光ビームの操作手法の開発にも取り組む。

UVSOR 光源の高性能化では蓄積ビームの安定化へ向けた研究開発と並行して, 現光源の改修による高度化改造や新規光源の可能性についても検討を進める。また単一電子の蓄積技術を活用し, 円形加速器における電子ダイナミクスの研究を開拓していく。さらにスピン偏極電子源や二色ビームなどの量子ビーム源の開発研究では, 本年度に設計製作した装置を用いてビーム発生試験を行う予定である。偏光測定や光電場測定などの放射光計測技術については適用波長範囲や時間領域を拡大すべく, 研究開発を継続していく。

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）

YANG, Yuxuan（特別共同利用研究員）

ZHOU, Weixin（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）

横田 光代（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) 軸対称偏光レーザーを用いたガンマ線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 6.6MeV 超短パルスガンマ線を用いた陽電子消滅分光法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に厚さ数 cm のバルク材料の欠陥分析を行うことが可能である。陽電子寿命測定法のユーザー利用が現在行われており、放射性同位元素から発生する陽電子を直接試料に照射する従来の方法では実施困難な金属材料の応力負荷及び水素脆化時の欠陥形成のその場測定手法の開発を進めている。応力負荷時の測定については論文の執筆を開始している。また、応力負荷後の緩和過程における欠陥挙動に関するユーザー執筆の論文が *J. Phys.: Conf. Ser.* に掲載された。電子線照射による単原子空孔の導入や水素導入の有無によって緩和過程における欠陥形成が大きく異なる事が分かった。さらに、ガンマ線誘起陽電子寿命測定法の最新の状況についてまとめた論文が *J. Phys.: Conf. Ser.* に掲載された。ガンマ線誘起陽電子寿命測定法では、厚さ数 cm のバルク試料の測定が可能であるが、現在の測定手法では試料の平均的な情報のみを測定可能であった。近年、がん検査に使われる Time of flight positron emission tomography (TOF-PET) の時間分解能が向上しており、この検出器を利用することでバルク試料内部の欠陥分布をイメージングできる可能性がある。現在、測定システム設計のため、シミュレーションコードを用いた計算や機器の選定を行っている。来年度に原理実証実験を行う事を目指している。
- b) 本研究課題では、特殊な偏光状態であるラジアル偏光やアジマス偏光の軸対称偏光レーザーを用いた逆トムソン散乱によって発生するガンマ線の偏光分布を明らかにする。直線偏光及び円偏光レーザーを用いると、直線偏光及び円偏光のガンマ線が発生する事は既に実験的に確かめられているが、軸対称偏光レーザーを使用した場合にどのよ

うな偏光状態のガンマ線が発生するのは理論的にも実験的にも確認されていない。新しい偏光特性をもつガンマ線を発生出来れば、新たな利用開拓に繋がる可能性がある。軸対称偏光レーザーは、Altechna社のS-waveplateを用いて直線偏光のレーザーから変換する。

ガンマ線の空間偏光分布を測定するため、偏光計の設計および構築を行った。ガンマ線が直線偏光の場合、ターゲットで散乱されるコンプトン散乱ガンマ線の断面積が方位角方向に変化するため、ガンマ線の偏光軸に対して90度方向に散乱されるガンマ線の割合が高くなる。そのため、ガンマ線検出器を方位角方向に複数配置し、散乱ガンマ線の方位角分布を測定する事でガンマ線の偏光軸を測定できる。さらに、コリメータを2次元スキャンして同様の測定を行う事で、ガンマ線の空間偏光分布を測定できる。

直線偏光および円偏光ガンマ線の空間偏光分布を測定し、理論計算との比較を行った。直線偏光ガンマ線は、理論計算が示すようにガンマ線ビーム断面の位置によってガンマ線の偏光軸が変化することを測定することができた。一方で、円偏光ガンマ線は、ビーム断面の位置によって偏光が変化し、直径10 mmに広がっている外側の領域では直線偏光に変化することを実証できた。次に、軸対称偏光レーザーを用いて発生するガンマ線の空間偏光分布を測定した。この方法で発生するガンマ線は、中心軸付近がランダム偏光であり、外側の領域は方位角偏光になることが分かった。この結果は、直線偏光ガンマ線のインコヒーレントな重ね合わせによって理論的に理解できる結果であった。開発した偏光計を用いて、これまで実験的に不明であったガンマ線の偏光特性を明らかにすることができた。偏光計を用いたガンマ線の偏光測定についてまとめた論文が *Phys. Rev. Research* に掲載された。

ガンマ線天文学の分野において、エネルギー MeV 領域はその測定の難しさから感度の高い測定がこれまで行われてこなかった。現在そのエネルギー領域をターゲットにした検出器開発が世界で進められている。UVSORのガンマ線は最大エネルギーが6.6 MeVであり、また、コリメータの位置を変えることで3 MeVまでエネルギーを変えられる。さらに、宇宙ガンマ線の偏光検出もガンマ線発生個所の磁場分布の測定にとって重要である。上述したように偏光特性を詳細に測定したUVSORガンマ線が、このようなガンマ線天文学の需要に合うと考え、該当するコミュニティに宣伝することで新規ユーザー2組がUVSORガンマ線を使い始めた。

ガンマ線のエネルギー測定には、高純度ゲルマニウム検出器を使用している。MeVガンマ線は物質に対する透過力が高いために、厚さ10 cm程度のゲルマニウム検出器の内部構造によって測定されるエネルギースペクトルが変わり得る。そのため、内部構造がスペクトルに与える影響を理解する事がガンマ線源のエネルギー特性評価にとって重要である。ゲルマニウム結晶内部に入り込んでいる冷却用ロッドの構造が異なる2つの検出器を用いて同一ガンマ線のエネルギースペクトル測定を行い、内部構造によってスペクトルが変化することを実験的に示し、シミュレーションとの比較を行った。この結果は、ユーザーが論文にまとめ *Radiat. Phys. Chem.* に掲載された。

B-1) 学術論文

M. OMER, T. SHIZUMA, M. KOIZUMI, Y. TAIRA, H. ZEN, H. OHGAKI and R. HAJIMA, “Effect of Coaxial HPGe Detector Structure on γ -Ray Beam Measurements,” *Radiat. Phys. Chem.* **240**, 113467 (2025). DOI: 10.1016/j.radphyschem.2025.113467

Y. TAIRA, Y. YANG, T. SHIZUMA and M. OMER, “Generation and Measurement of Gamma Rays with Axially Symmetric Polarization States via Compton Scattering,” *Phys. Rev. Res.* **7**, 033130 (2025). DOI: 10.1103/pn68-rjd2

F. HORI, S. ARAKI, Q. XU and Y. TAIRA, “In-Situ Measurement of Stress Relaxation Process in Hydrogenated Bulk Fe by Gamma-Ray Induced Positron Annihilation Spectroscopy,” *J. Phys.: Conf. Ser.* **3149(1)**, 012018 (2025). DOI: 10.1088/1742-6596/3149/1/012018

Y. TAIRA, Y. OKANO and T. HIRADE, “Gamma-Ray-Induced Positron Annihilation Lifetime Spectroscopy at UVSOR,” *J. Phys.: Conf. Ser.* **3029(1)**, 012022 (2025). DOI: 10.1088/1742-6596/3029/1/012022

B-4) 招待講演

Y. TAIRA, “Development of gamma-ray-induced positron annihilation spectroscopy at UVSOR synchrotron facility,” 20th International Conference on Positron Annihilation (ICPA20), Takamatsu (Japan), June 2025.

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–).

学会誌編集委員

日本陽電子科学会会報編集委員 (2024–2025).

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–.

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。さらに, PET 検出器を用いた欠陥分布のイメージング測定手法の開発にも取り組む。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）

佐藤 祐輔（助教）
松田 博之（特任研究員）
新井 郁也（特任専門員）
大門 寛（研究員）
染井 裕貴（大学院生）
佐々葉 遼平（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）
横田 光代（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と高度化
- b) 運動量分解光電子分光による相転移やスピン物性など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
- d) 諸分光手法の融合による電子状態計測データベース構築，利用コミュニティの開拓と UVSOR の活性化

A-3) 研究活動の概略と主な成果

- a) ① UVSOR オリジナルの Photoelectron Momentum Microscope (PMM) 拠点構築を主務とする。PMM 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 PMM 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並行して全天球電子レンズ及び電子エネルギー・スピン分析器を考案し特許化した。上記の PMM 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 eV 以下の領域では全天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 eV 以上の領域ではせいぜい 15° の領域でしかない。新規分析器は 2 keV でも全天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（40–700 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。グラフェンから π 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た。当グループで確立した「運動量分解光電子顕微鏡法」はグラファイトの単原子層ステップや Ir の双晶成長，各種相転移・相分離の可視化で威力を発

揮し、プレスリリースを行った。表面の劈開や分子吸着のエネルギーに関する詳細な議論ができるようになった。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) BL7U は真空紫外領域 (6–40 eV) をカバーする偏光可変ビームラインである。ブランチ化を行い、新たに PMM に直入射配置で導入することに成功した。軟 X 線の照射位置と同じ場所で真空紫外光による全立体角光電子分光を行うことができる。特にバンドを構成する原子軌道の対称性を直接的に解析することができる新しい手法の展開が始まった。二つのアンジュレータ光源を駆使する包括的な光電子分光ステーションの構築が実現した。この直入射配置を活用した PMM 展開 (*J. Synchrotron Radiat.* 2024 プレスリリース済) をもとに、高対称の光励起実験が可能となり、価電子帯を構成する原子軌道の情報が得られること、および解析で問題となる散乱現象の見分け方を早速実証実験で示すことに成功した。念願の多次元スピン分析解析機能が立ち上がり、基礎データの取得を系統的に進めている段階である。直入射配置と組み合わせたスピン分析は唯一無二の手法となる。
- d) 光電子回折・分光を用いて典型的な高温超伝導体 Bi2212 や代表的層状物質 TaSe₂, TiSe₂ の相転移前後の電子状態をとらえた。新たに確立した顕微 ARPES/ARPES 顕微法の論文 (*J. Phys. Soc. Jpn.* 2022, *Rev. Sci. Instrum.* 2023) に続き Au 単結晶表面のスピン偏極電子状態の解明の論文 (*J. Phys. Soc. Jpn.*) も 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

K. HAGIWARA, F. NISHINO, D. STELTER, J. PICKER, F. OTTO, R. SAGEHASHI, M. SCHAAL, J. BRANDHOFF, A. TURCHANIN, T. FRITZ, S. KERA and F. MATSUI, “Identifying Antiparallel Twin Domains of Monolayer WS₂/Au(111) by Momentum-Selected PEEM,” *Phys. Scr.* **101**(8), 085915 (2026). DOI: 10.1088/1402-4896/ae3cc8

E. HASHIMOTO, K. HAGIWARA, Y. ONUMA, H. KUROSAKA, Y. NISHIO, T. HAMAMATSU, H. YABE, T. WATANABE, F. MATSUI and S. KOH, “Domain Visualization of Molecular Beam Epitaxy-Grown Ir(111) Thin Films by Momentum-Selected Photoelectron Emission Microscopy,” *e-J. Surf. Sci. Nanotechnol.* **24**(1), 1–6 (2026). DOI: 10.1380/ejssnt.2026-001

F. MATSUI, K. HAGIWARA, Y. SATO, R. SAGEHASHI and S. SUGA, “Spin and Orbital Polarizations of Au(111) Surface State Determined by Photoelectron Momentum Microscope,” *J. Phys. Soc. Jpn.* **94**, 114707 (9 Pages) (2025). DOI: 10.7566/JPSJ.94.114707

B-3) 総説、著書

松井文彦, 豊島 遼 (編集幹事), 「X 線光電子分光法」, 日本表面真空学会編 (2025).

B-4) 招待講演

松井文彦, 「表示型光電子分光計測の研究系譜 放射光技術の発展史のなかで」, R026 先端計測の将来設計委員会研究会, 名古屋, 2025 年 8 月.

松井文彦,「多次元・複モード光電子分光計測:その目標とデータ解析技術に期待すること」,核融合研研究会,土岐市, 2025年6月.

佐藤祐輔,「光電子運動量顕微鏡:基礎から UVSOR での実例まで」,The Japan Society of Vacuum and Surface Science The 8th Young Members Section Meeting & Kanto Chapter 10th Anniversary Symposium,新潟県新潟市,2025年4月.

F. MATSUI,“Breaking the symmetry: a close look at crystal surface symmetry by photoelectron momentum microscope,” The 14th International Conference on Advanced Materials and Devices (ICAMD2025), Busan (Korea), December 2025.

F. MATSUI, “Mapping Electronic Phase Transition Domains and Spin-Polarized Bands at the Atomic Frontier with Photoelectron Momentum Microscopy,” Hybrid Quantum Systems and Nanotechnologies 2025 (HQSN2025), International Workshop on Hybrid Quantum Materials, Sciences, and Technologies 2025 (HQMST2025), Matsue (Japan), October 2025.

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–).

日本放射光学会評議員 (2025–2026).

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–).

VUV・SX 高輝度光源利用者懇談会幹事 (2024–2026).

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–).

広島大学放射光科学研究所協議会委員 (2024–2026).

日本学術振興会 R073 先端計測技術の未来創生委員会運営委員及びWG リーダー (2025–2026).

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

東京理科大学, 非常勤講師, 2025年9月–2026年3月.

B-10) 競争的資金

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」(代表者; 松下智裕), 松井文彦(研究分担者) (2021年度–2025年度).

科研費基盤研究(B),「グラフェン/h-BN 構造を用いたグラフェン透明アンテナの特性向上に関する研究」(代表者; 黄 晋二), 松井文彦(研究分担者) (2023年度–2025年度).

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).

B-11) 産学連携

共同研究, 三菱ケミカル(株), 松井文彦 (2020年度–).

C) 研究活動の課題と展望

UVSOR 型 Photoelectron Momentum Microscope (PMM) 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 PMM に導く two-beam PMM 実験ステーションを構築し, 2023 年度は両方での運用が始まった。現在 2D スピンフィルタが立ち上がり, 最適化を進め, 両ビームラインを利用したスピンを含めた電子状態解析環境の構築を進めている。運動量分布を一度に観測することで電子状態におけるキラリティや対称性の低下にいち早く気づくことができる利点がある。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。

PMM 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 PMM が順調に立ち上がった。時間分解型の PMM 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, 第 4 回 (2023.7) 分子研研究会, 第 5 回 (2024.11) 国際会議特別セッション共催と継続的に開催し, 東アジア圏での PMM 開発グループの萌芽のネットワークが密になった。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。

各種分光研究で取得されるデータを有効活用するためのデータフォーマット策定や公開のためのインフラづくりの重要性が近年認識されてきている。多量のデータを協力研究の研究者と共同で解析するために, データ解析ソフトや手法の整備を進めている。学会(放射光学会), 産学連携委員会(R073 先端計測分析技術), 計測コミュニティー(XAFS)などでデータフォーマット整備の活動に加わっている。UVSOR 放射光利用を産業界を含めた広い潜在的ユーザーに拡大する機会ととらえている。

田中 清尚（准教授）（2014 年 4 月 1 日着任）

福田 亮平（特別共同利用研究員）
諫山 輝亮（特別共同利用研究員）
興田 康人（特別共同利用研究員）
波多江 勇太（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）
横田 光代（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) 新規スピン分解角度分解光電子分光装置の開発
- b) 高温超伝導体の電子状態の解明
- c) UVSOR ビームラインの自動測定開発と高精度化

A-3) 研究活動の概略と主な成果

- a) UVSOR BL5U において、高効率イメージスピン分解角度分解光電子分光（スピン ARPES）装置の開発を進めている。今年度は、昨年度開発したスピントーゲットの 2 軸モーター制御と測定プログラムを連動させた自動測定プログラムの開発に成功した。これにより、測定スピン方向の変更時に生じていた煩雑なパラメータ入力や PC を介したスピントーゲットのモーター駆動が完全自動化され、測定の簡便性が飛躍的に向上したことで、ユーザーからも高い評価を得ている。また、継続課題であった試料面直方向の電子レンズパラメータ調整も概ね完了し、現在は面直スピン検出の実証実験を実施中である。世界初となる高効率マルチチャンネル検出器を利用した全方位スピン ARPES 装置の実現に向け、いよいよ最終段階を迎えている。
- b) UVSOR BL7U において、三層系銅酸化物高温超伝導体 Bi2213 の角度分解光電子分光（ARPES）測定を実施した。アンダードープ試料において、内部の CuO_2 面におけるドーピング濃度が極めて低いにもかかわらず、アンチノード領域における d 波超伝導ギャップが 80 ～ 100 meV という前例のない大きさに増大していることを発見した。さらに、このギャップがフェルミアークを伴わず、「ノード金属」的な挙動を示すことを明らかにした。この特異な振る舞いは、最適ドープされた外側の CuO_2 面からの強い近接効果に起因すると考えられ、三層系銅酸化物がすべての多層系銅酸化物ファミリーの中で最も高い超伝導転移温度（ T_c ）を示す主要な要因であると結論付けた。本研究成果は *Nature Communications* 誌に掲載され、プレスリリースを実施した。
- c) 放射光ビームラインにおいて、高精度な実験や測定の自動化を実現するためには、励起光エネルギーとビームスポット位置の高い再現性が不可欠である。BL5U では励起光エネルギーの再現性が課題となっていたが、回折格子の角度制御における機械的挙動の問題を回避するため、特殊なモーター制御システムを開発・導入し、高い再現性の確保に成功した。同様の制御システムを BL7U にも展開し、初期段階では安定したものの、運用開始 1 年後に突如として再現性が低下する事象が発生した。エネルギー再現性は今後の自動測定システム構築における最重要要件であるため、現在、各光学素子制御の確認実験を行い、徹底的な要因究明を進めている。これと並行して、ビームライン全体の測定自動化も強力に推進している。これまでに、各種パラメータ（励起光エネルギー、試料角度、試料位置）に依存した自動

ARPES 測定, スピン分解 ARPES 測定の半自動化, Ar スパッタ・アニール処理の自動化, スピンターゲット製膜用の自動蒸着装置などを構築してきた。現在は「自動試料位置最適化機能」の実装が目前に迫っており, 来年度には, 一度清浄表面を作製して測定シーケンスを登録すれば, ビームタイム終了まで無人測定が可能な「全自動測定システム」の実装を予定している。長期的には, 試料の自動搬送機構と AI によるスペクトル判定技術を統合し, 薄膜試料等の最適な表面条件を完全自動で探索・導出する次世代型ビームラインシステムの構築を目指す。

B-1) 学術論文

S. IDETA, S. ADACHI, T. NOJI, S. YAMAGUCHI, N. SASAKI, S. ISHIDA, S. UCHIDA, T. FUJII, T. WATANABE, W. O. WANG, B. MORITZ, T. P. DEVEREAUX, M. ARITA, C. Y. MOU, T. YOSHIDA, K. TANAKA, T. K. LEE and A. FUJIMORI, “Proximity-Induced Nodal Metal in an Extremely Underdoped CuO₂ Plane in Triple-Layer Cuprates,” *Nat. Commun.* **16**(1), 9470 (2025). DOI: 10.1038/s41467-025-64492-x

D. GOTO, K. KUGA, K. TANAKA, T. TAKEUCHI and M. MATSUNAMI, “Evidence for Energy-Dependent Scattering Dominating Thermoelectricity in Heavy Fermion Systems,” *Appl. Phys. Lett.* **127**(16), 161903 (2025). DOI: 10.1063/5.0291138

K. SASAKI, H. MURAKAMI, K. KAMINAGA, F. TESHIMA, A. KIKUCHI, K. TANAKA, S. MARUYAMA and Y. MATSUMOTO, “Infrared Laser Deposition of High-Quality KBH₄ Epitaxial Thin Films as an Epitaxial Template for Heterostructures of Alkali Borohydrides,” *Cryst. Growth Des.* **25**(12), 4494–4502 (2025). DOI: 10.1021/acs.cgd.5c00396

T. KAWASAKI, A. NAGASE, K. HAYAKAWA, F. TESHIMA, K. TANAKA, H. ZEN, F. SHISHIKURA, N. SEI, T. SAKAI and Y. HAYAKAWA, “Infrared Free-Electron Laser: A Versatile Molecular Cutter for Analyzing Solid-State Biomacromolecules,” *ACS Omega* **10**(14), 13860–13867 (2025). DOI: 10.1021/acsomega.4c07531

T. KAWATE, H. A. SAKAUE, C. SUZUKI, N. NAKAMURA, K. TANAKA, E. NAKAMURA, K. FUJII, D. KATO, A. SASAKI and I. MURAKAMI, “Optical Design and Efficiency Measurement of an Extreme Ultraviolet High-Resolution Spectrometer for Unresolved Transition Array Research,” *Rev. Sci. Instrum.* **96**(4), 043512 (2025). DOI: 10.1063/5.0250066

B-10) 競争的資金

科研費基盤研究(C), 「最新の高分解能光電子分光による高温超伝導体スピン電荷ストライプ相の電子状態の解明」, 田中清尚 (2024年度–2026年度)。

C) 研究活動の課題と展望

スピン分解 ARPES 装置については, 自動化により利便性が飛躍的に向上した面内スピン測定に加え, 現在実証中の面直方向スピン検出を早期に確立する。これにより, 高効率かつ高分解能な全方位スピン分解 ARPES 装置を完成させ, 一般ユーザーへの本格的な共同利用を開始する。

また来年度は, 実装間近である自動試料位置最適化機能を導入し, 無人測定に向けた環境整備を進める。さらに AI によるスペクトル判定と試料自動搬送機構を統合した, 次世代自律測定システムの構築に向けた技術開発に着手する。

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）

横田 光代（事務支援員）

A-1) 専門領域：放射光科学

A-2) 研究課題：

- a) 軟X線吸収分光を基礎とした生命科学へのアプローチ
- b) 軟X線分光顕微鏡と試料環境開発

A-3) 研究活動の概略と主な成果

- a) 軟X線吸収分光を基礎とした生命科学へのアプローチ；クマムシの STXM 観察（ExCELLS 特別研究）；継続課題として、クマムシについて Scanning Transmission X-Ray Microscopy (STXM) による実験を行った。乾眠状態と活動状態のクマムシの超薄切片を作製し、炭素の K 吸収端の X 線吸収分光イメージングデータを取得・解析を行った。その結果、特徴的な化学種について、その分布様が乾眠と活動状態で異なることを見出した。

夾雑環境生体試料の定量化学状態マッピング；上記のクマムシもこのテーマに関わる研究テーマであるが、共同研究として STXM の顕微分光技術による「生体分子の絶対定量マッピングとその単離核への適用」にも引き続き参画した。

- b) 軟X線分光顕微鏡と試料環境開発；液体試料セルの開発；Liquid TEM のために開発されたマイクロ流路液体セルの導入に向けて、海外メーカーと協議した。現在、仕様を決定してプロトタイプの購入を進めている。

軟X線直接検出のための 2 次元検出器の導入；コヒーレントイメージングの一つである Ptychography や Resonant Soft X-Ray Scattering (RSoXS) の実現に向けて 2 次元検出器を入手し、その既存 STXM 装置への実装のための検討を行い、設計を進めている。

NanoXAS 装置の導入・立ち上げ；Swiss Light Source (SLS) から無償譲渡された NanoXAS は AFM と STXM を合わせた装置であり、同一試料を二つ手法で観察することが可能で、金属コートしたティップによる光電子収量検出を目指した装置である。3 月に搬入・据付を行い、4-5 月に共同研究者の Watts 博士の協力を得て、基本的な動作確認までを完了した。

STXM 測定制御系の更新計画；10 年以上経過した Windows XP 上の制御系の更新を目指して、SLS などの協力も得て、新制御システムへの移行への準備を行った。STXM の各種ステージについては全ての動作を確認出来た。

B-1) 学術論文

C. O. M. MARIANO, K. H. CHEN, J. SHIUE, H. YUZAWA, T. ARAKI, K. T. ARUL, C. L. DONG, T. Y. YUNG, S. C. HSU, X. CAI, S. H. HSIEH and C. H. CHUANG, “Hexagonal BN Membranes Formation by Liquid-Phase Synthesis: Insights from Scanning Transmission X-Ray Microscopy,” *APL Mater.* **13(10)**, 101118 (2025). DOI: 10.1063/5.0289068

T. A. KUMARAVELU, C.-L. PAN, H.-Y. HUANG, H.-W. CHANG, C.-H. LEE, T. T. T. NG, W.-C. CHOU, S.-C. HAW, T. ARAKI, T. OHGASHI and C.-L. DONG, “Heterostructured MnO₂/CuO on Cu Wire for Electrochemical Energy Storage: Insights from Spectro-Microscopy,” *Adv. Sustainable Syst.* **10(2)**, e00881 (2026). DOI: 10.1002/adsu.202500881

W.-T. CHEN, H. W. SHIU, Y.-X. CHEN, E. BATSAIKHAN, Y.-L. LAI, S. L. CHENG, T. ARAKI, J.-F. LEE, M. HAYASHI and Y.-J. HSU, “Highly Selective toward HER or CO₂RR by Regulating Cu Single and Dual Atoms on g-C₃N₄,” *Adv. Funct. Mater.* **36(10)**, e14183 (2026). DOI: 10.1002/adfm.202514183

R. L. JONES, J. R. HAWKINGS, M. P. MEREDITH, M. C. LOHAN, O. W. MOORE, R. M. SHERRELL, J. N. FITZSIMMONS, M. KAZEMIAN, T. ARAKI, B. KAULICH and A. L. ANNETT, “Antarctic Glaciers Export Carbon-Stabilised Iron(II)-Rich Particles to the Surface Southern Ocean,” *Nat. Commun.* **16(1)**, 5015 (2025). DOI: 10.1038/s41467-025-59981-y

B-4) 招待講演

荒木 暢, 「軟X線顕微分光法による生体分子・金属のラベルフリーマッピング」, 分子基盤研究部セミナー, 大府市, 2025年5月.

荒木 暢, 「Soft X-Ray Spectromicroscopy in Life Sciences at UVSOR」, 阪大生命機能研究科セミナー, 大阪, 2025年4月.

荒木 暢, 「Soft X-Ray Microscopy」, AOFSSR School 2025, つくば市, 2025年10月.

B-10) 競争的資金

生命創成探究センター特別共同研究, 「無水生物学を開拓する技術基盤の構築とその展開」, 荒木 暢 (2025年度).

岩山 洋士（助教）（2010年4月1日～2024年4月15日）
（主任研究員）（2024年4月16日昇任）

石原 麻由美（事務支援員）
加茂 恭子（事務支援員）
横田 光代（事務支援員）

A-1) 専門領域：軟X線構造解析，軟X線顕微鏡法，ソフトマター，X線非線形光学

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) 密着型軟X線顕微鏡法による生体試料のXAFSイメージング
- c) X線自由電子レーザーを用いた溶液表面における二次高調波発生による化学状態分析

A-3) 研究活動の概略と主な成果

- a) 高分子，液晶，コロイドなどのソフトマターは，メゾスコピック領域に特徴的な構造を持ち，多くの物性は系特有の構造に由来する。偏光顕微鏡などでは観察が困難な数 nm から数百 nm 程度の構造を調べる手法として，X線小角散乱法（SAXS）が用いられ，多くの成果を挙げている。しかしながら，SAXS は試料の電子密度変調には敏感であるものの，電子密度が近似した多成分系における特定成分の構造や，ねじれ構造などの観測は容易ではない。これに対し，X線共鳴過程を利用すれば，元素・分子種・分子配向に対して選択性を有する散乱強度を得ることが可能となる。ただし，ソフトマターの主成分である軽元素（炭素，窒素，酸素など）の共鳴エネルギーは 280 eV ～ 540 eV 程度の軟X線領域にあり，従来の SAXS で使用される 10 keV 程度の硬X線とはエネルギー域が大きく異なる。そこで我々は，軟X線領域の共鳴散乱を観測するための手法として「共鳴軟X線散乱法（RSoXS）」の開発を行っている。具体的には，分子科学研究所の UVSOR（BL3U）および放射光実験施設 Photon Factory（BL7A）において装置開発を進め，高分子や液晶の構造解析に適用してきた。本年度は，入射エネルギーを走査しながら散乱画像を取得するプログラムを開発した。これにより，炭素・窒素・酸素の K 殻吸収端を利用し，有機薄膜太陽電池のバルクヘテロジャンクション構造や，多成分有機薄膜の成分別解析，キラル液晶のモルフォロジー解析を実施した。また，Photon Factory（BL7A）では，軟X線検出器の回転機構を活用し，反射率測定による膜厚評価が可能なシステムを構築した。
- b) 軟X線を用いた生体試料内の元素および化学状態の可視化を実現すべく，密着型軟X線顕微鏡の開発を進めている。本手法では，シンチレーター上で細胞を培養し，厚さ 100 nm の Si_3N_4 メンブレンで封入した状態で軟X線を照射する。透過光像をシンチレーターによって可視光へ変換することで，細胞の XAFS イメージングを実現するものである。本年度は，ウシおよびトリの赤血球を対象として，試料内の鉄原子の分布計測に取り組んだ。具体的には，鉄の L 吸収端近傍の軟X線（700 ～ 740 eV）を用いて XAFS イメージング測定を実施した。鉄原子は炭素・窒素・酸素などの主要元素に比べると含有量は極めて少ないものの，鉄の L 吸収端における明瞭なスペクトルの取得に成功した。現在は，ピーク形状やピークエネルギーの解析から，鉄の価数状態に関する情報の抽出も進めている。
- c) X線自由電子レーザー施設「SACLA」の BL1 において，液体試料を対象とした実験装置の開発を進めている。本年度は，ネバダ大学の Craig Schwartz 氏らと共同で，液体表面からの二次高調波発生（SHG）に関する実験を行った。

一般に、液体表面などの界面では空間対称性が破れているため、二次高調波が発生しうる。この二次高調波を観測することで、表面に対して極めて敏感な測定が可能となる。特に液体表面（気液界面）は重要な反応場であり、その化学状態を特定する手法の確立は極めて重要である。さらに、軟X線の共鳴過程を利用することで、表面に存在する特定の元素の化学状態を選択的に観測できるという利点がある。本実験では、SACLA BL1 から照射される高強度の軟X線パルスを、ジメチルスルホキシド（DMSO）水溶液の超薄膜フラットジェットに照射した。その透過光および発生した二次高調波を、ビームライン下流に設置した斜入射分光器によって分光観測した。

B-1) 学術論文

H. IWAYAMA, H. YUZAWA and M. NAGASAKA, “Phase-Dependent Intermolecular Interactions of Nematic Liquid-Crystal Molecules Probed by Carbon K-Edge X-Ray Absorption Spectroscopy,” *Phys. Rev. E* **113**(1), 015413 (2026). DOI: 10.1103/17pr-b3wv

T. T. NGUYEN, T. HAYASHI, H. IWAYAMA and K. ISHIKAWA, “Valence Fragmentation Dynamics of a Promising Low Global Warming Etching Gas CF_3CHCF_2 ,” *Sci. Rep.* **15**(1), 9507 (2025). DOI: 10.1038/s41598-025-94119-6

T. KANEYASU, Y. HIKOSAKA, S. WADA, H. OTA, H. IWAYAMA, K. SHIMIZU, M. FUJIMOTO and M. KATOH, “Attosecond Interferometry Experiments at the Tandem Undulator Beamline BL1U of UVSOR-III Synchrotron,” *J. Phys.: Conf. Ser.* **3010**(1), 012086 (2025). DOI: 10.1088/1742-6596/3010/1/012086

B-3) 総説、著書

A. -A. HAGHIGHIRAD, R. ICHIKAWA, T. MIYAMACHI, H. ISHII, S. AKAMATSU, E. MASUI, O. ISHIYAMA, H. IWAYAMA, E. NAKAMURA, T. YOKOYAMA, E. INAMI and T. YAMADA, “STM Imaging and Electronic Correlation in van der Waals Ferromagnet Fe_3GeTe_2 ,” *Jpn. J. Appl. Phys.* **64**(4), 040805 (2025). DOI: 10.35848/1347-4065/adc7be

B-4) 招待講演

岩山洋士, 「Study of Soft X-Ray Nonlinear Optical Effects Using Ultrathin Liquid Jet Sheets」, 第 39 回日本放射光学会, 仙台市, 2026 年 1 月.

H. IWAYAMA, “Development of Polymer Nanostructure and Chemical State Characterization Methods via Resonant Soft X-Ray Scattering and Reflectometry,” Optics & Photonics Japan, Tokushima, December 2025.

B-7) 学会および社会的活動

学会の組織委員等

日本放射光学会年次大会プログラム編集 (2024–2026).

学会誌編集委員

原子衝突学会学会誌編集員 (2020–).