

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（特任准教授）

富田 隆文（助教）

周 鳥居 諭来（特任助教）

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）

LIENHARD, Vincent（招へい研究員）

岡田 満哉（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）

酒井 志帆（特任専門員）

伊神 賢人（特任専門員）

西岡 稚子（特任専門員）

GANESAN, Karthikeyan（インターンシップ）

MAITY, Arnab（インターンシップ）

KETAIAM, Kittisak（インターンシップ）

SIRIWORAKOONCHAI, Phatwarach（インターンシップ）

BRAUN, Eduard（インターンシップ）

ROUSSEL, Mathis（インターンシップ）

LERICHE, Axel-Ugo（インターンシップ）

DUPERON, Isaline（インターンシップ）

石坂 晴（インターンシップ）

SCHMID, Otto（インターンシップ）

MEMBREZ, Gaetan（インターンシップ）

BROSIG, Jule（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）

田中 愛登（大学院生）

ANTONIO, Jorge (大学院生)
渡部 元輝 (大学院生)
中井 愛里 (技術支援員 (派遣))
鶴田 笑子 (技術支援員 (派遣))
越田 陽子 (事務支援員)
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 2 件を行っている。

B-1) 学術論文

T. P. MAHESH, T. MATSUBARA, Y. T. CHEW, T. TOMITA, S. DE LÉSÉLEUC and K. OHMORI, “Generation of 480 nm Picosecond Pulses for Ultrafast Excitation of Rydberg Atoms,” *Opt. Lett.* **50**(2), 403–406 (2025). DOI: 10.1364/OL.538707

Y. CHEW, M. POITRINAL, T. TOMITA, S. KITADE, J. MAURICIO, K. OHMORI and S. DE LÉSÉLEUC, “Ultra-Precise Holographic Optical Tweezers Array,” *Phys. Rev. A* **110**, 053518 (2024). DOI: 10.1103/PhysRevA.110.053518

M. KUNIMI, T. TOMITA, H. KATSURA and Y. KATO, “Proposal for Simulating Quantum Spin Models with the Dzyaloshinskii-Moriya Interaction Using Rydberg Atoms and the Construction of Asymptotic Quantum Many-Body Scar States,” *Phys. Rev. A* **110**, 043312 (2024). DOI: 10.1103/PhysRevA.110.043312

V. BHARTI, S. SUGAWA, M. KUNIMI, V. S. CHAUHAN, T. P. MAHESH, M. MIZOGUCHI, T. MATSUBARA, T. TOMITA, S. DE LÉSÉLEUC and K. OHMORI, “Strong Spin-Motion Coupling in the Ultrafast Dynamics of Rydberg Atoms,” *Phys. Rev. Lett.* **133**(9), 093405 (2024). DOI: 10.1103/PhysRevLett.133.093405

X. ZHOU, H. TAMURA, T. H. CHANG and C. L. HUNG, “Trapped Atoms and Superradiance on an Integrated Nanophotonic Microring Circuit,” *Phys. Rev. X* **14**(3), 031004 (2024). DOI: 10.1103/PhysRevX.14.031004

B-2) 国際会議のプロシーディングス他

C. NILL, S. DE LÉSÉLEUC, C. GROß and I. LESANOVSKY, “Resonant Stroboscopic Rydberg Dressing: Electron-Motion Coupling and Multi-Body Interactions,” *arXiv* 2411.10090 (2024).

K. NISHIMURA, H. SAKAI, T. TOMITA, S. DE LÉSÉLEUC and T. ANDO, “Super-Resolution Holographic Optical Tweezers Array,” *arXiv* 2411.03564 (2024).

T. TOMITA, Y. CHEW, R. VILLELA, T. P. MAHESH, H. SAKAI, K. NISHIMURA, T. ANDO, S. DE LÉSÉLEUC and K. OHMORI, “Atom Camera: Super-Resolution Scanning Microscope of a Light Pattern with a Single Ultracold Atom,” *arXiv* 2410.03241 (2024).

B-3) 総説, 著書

大森賢治, 「量子コンピュータ概観, “巻頭言”」, *表面と真空*, **68(3)**, 127–128 (2025).

B-4) 招待講演 (* 基調講演)

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 2025, バルサール秋葉原, 東京都千代田区, 2025 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」, 応用物理学会超伝導分科会第 70 回研究会「量子コンピュータの現状と展望」, 同志社大学東京オフィス セミナー室, 東京都中央区, 2024 年 12 月.

大森賢治, 「冷却原子の量子コンピュータへの展開」, 量子フォーラムシンポジウム「冷却原子が拓く量子技術の最前線」, 赤坂インターシティコンファレンス 301, 東京都港区, 2024 年 11 月.

大森賢治, 「量子コンピューティングの最新研究開発の状況と今後の展望」, 第 5 回量子コンピューティング EXPO 【秋】, 幕張メッセ, 千葉県千葉市, 2024 年 11 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」, DBJ iHub 量子コンピュータ実現への道, 大手町プレイスホール&カンファレンス 2F ホール A, 東京都千代田区, 2024 年 11 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」, 自然科学研究機構シンポジウム「量子はめぐる」, 一橋大学一橋講堂, 東京都千代田区, 2024 年 10 月.

大森賢治, 「量子力学 100 年の謎と超高速量子コンピュータへの挑戦」, 名古屋大学総長がナビゲートする科学最前線「知の地平線未来への挑戦」, 中日ホール&カンファレンス, 名古屋市中区, 2024 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」, 令和 6 年度第 3 回量子技術研究会 JATES 科学技術と経済の会, バルサール飯田橋駅前, 東京都千代田区, 2024 年 7 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」, Q2B2024 Tokyo サテライトイベント「量子グローバルイノベーション・サミット 東京 2024」, Deloitte Tohmatsu Innovation Park, 東京都千代田区, 2024 年 7 月.*

大森賢治, 「量子力学 100 年の謎と超高速量子コンピュータへの挑戦」, 第 13 回 JACI/GSC シンポジウム, 一橋講堂, 東京都千代田区, 2024 年 6 月.*

大森賢治, 「世界に羽ばたく大森量子コンピュータ・スタートアップいよいよ始動へ 2」, 政策アクション会議, 神戸大学東京六甲クラブ, 東京都千代田区, 2024 年 6 月.

大森賢治, 「量子力学 100 年の謎と超高速量子コンピュータへの挑戦」, 日本表面真空学会特別講演会, 東京大学武田ホール, 東京都文京区, 2024 年 5 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」, 一般社団法人量子技術による新産業創出協議会 (Q-STAR) 講演会, 分子科学研究所, 愛知県岡崎市, 2024 年 5 月.

大森賢治, 「世界に羽ばたく大森量子コンピュータ・スタートアップいよいよ始動へ」, 政策アクション会議, 神戸大学東京六甲クラブ, 東京都千代田区, 2024 年 4 月.

K. OHMORI, “Ultrafast quantum simulation and quantum computing with ultracold atom arrays at quantum speed limit,” CESQ Colloquium, Centre Européen de Sciences Quantiques (CESQ), Strasbourg (France), March 2025.

K. OHMORI, “Ultrafast quantum simulation and quantum computing with ultracold atom arrays at quantum speed limit,” SXSW 2025 Quantum Session, South by Southwest (SXSW) Conference & Festivals, Austin Convention Center, Austin (USA), March 2025.

K. OHMORI, “Ultrafast quantum simulation and quantum computing with ultracold atom arrays at quantum speed limit,” International Year of Quantum Science and Technology (IYQ)-2025, The Centre for Quantum Engineering, Research and Education (CQuERE), TCG Centres for Research and Education in Science and Technology (TCG CREST), Kolkata (India), February 2025.

K. OHMORI, “Ultrafast quantum computing with ultracold atom arrays at quantum speed limit,” iSAP-Hamamatsu 2024, Invited Lecture and Symposium Chair, International Symposium on Advanced Photonics(iSAP), Okura Act City Hotel, Hamamatsu (Japan), November 2024.

K. OHMORI, “Ultrafast quantum simulation and quantum computing with ultracold atom arrays at quantum speed limit,” Center for Quantum Dynamics Colloquium, Universität Heidelberg, Heidelberg (Germany), October 2024.

K. OHMORI, “Ultrafast quantum simulation and quantum computing with ultracold atom arrays at quantum speed limit,” QUP Colloquium, International Center for Quantum-field Measurement Systems for Studies of the Universe and Particles (QUP), KEK, Tsukuba (Japan), October 2024.

K. OHMORI, “Ultrafast quantum simulation and quantum computing with ultracold atom arrays at quantum speed limit,” Okinawa School in Physics 2024: Coherent Quantum Dynamics, OIST Seaside House, Okinawa (Japan), September 2024.

K. OHMORI, “Ultrafast quantum computing with ultracold atom arrays at quantum speed limit,” The 14th Japan-US Joint Seminar on Quantum Electronics and Laser Spectroscopy, Stanford University, Stanford, CA (USA), September 2024.

K. OHMORI, “Ultrafast quantum simulation and quantum computing with ultracold atom arrays at quantum speed limit,” R. G. Herb Condensed Matter Seminar, Chicago Quantum Exchange, Physics Department 2320 Chamberlin Hall 1150, University of Wisconsin, Madison, WI (USA), July 2024.

K. OHMORI, “Ultrafast quantum simulation and quantum computing with ultracold atom arrays at quantum speed limit,” Laboratoire Kastler Brossel (LKB) Seminar 2024, Collège de France, Paris (France), June 2024.

K. OHMORI, “Ultrafast quantum simulation and quantum computing with ultracold atom arrays at quantum speed limit,” Colloquium, Laboratoire Charles Fabry, Institut d'optique, Palaiseau (France), June 2024.

K. OHMORI, “Ultrafast quantum simulation and quantum computing with ultracold atom arrays at quantum speed limit,” Swiss-Japanese Quantum Symposium 2024, University of Tokyo Yayoi Auditorium, Tokyo (Japan), June 2024.

K. OHMORI, “Ultrafast quantum simulation and quantum computing with ultracold atom arrays at quantum speed limit,” Colloquium at Stewart Blusson Quantum Matter Institute, University of British Columbia, Vancouver (Canada), May 2024.

K. OHMORI, “Ultrafast quantum simulation and quantum computing with ultracold atom arrays at quantum speed limit,” 26th Photonics North 2024, Vancouver Convention & Exhibition Centre, Vancouver (Canada), May 2024.*

K. OHMORI, “Ultrafast quantum simulation and quantum computing with ultracold atom arrays at quantum speed limit,” Innsbruck Physics Colloquium, Innsbruck Physics Research Center, Universität Innsbruck, Innsbruck (Germany), April 2024.

K. OHMORI, “Ultrafast quantum simulation and quantum computing with ultracold atom arrays at quantum speed limit,” Quantum Simulation of Novel Phenomena with Ultracold Atoms and Molecules, University of Kyoto Panasonic Auditorium, Yukawa Hall, Kyoto (Japan), April 2024.

B-5) 特許出願

登録

特許第 7511839 号, 「量子シミュレータ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), 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. (登録日 2024 年 6 月 28 日)

特許第 7511838 号, 「量子シミュレータ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), 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. (登録日 2024 年 6 月 28 日)

WO2025/063038(A1)(PCT), 「レーザー制御装置, 光ピンセット生成システム, レーザー制御方法, 光ピンセット生成方法及びプログラム」, シルヴァン ドレゼルック, 大森賢治, 富田隆文 (自然科学研究機構), 2023 年. (公開日 2025 年 3 月 27 日)

B-6) 受賞, 表彰

TIRUMALASETTY PANDURANGA, Mahesh, The Dean's Award of the Physical Sciences Graduate School (2024).

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–).

日本分光学会代議員 (2022–).

欧州研究会議 (European Research Council: ERC, EU) 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–), 議長 (2024).

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 (2023–2025).

文部科学省 研究計画・評価分科会 臨時委員 (2023–2025).

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-).

理科教育活動

セミナー講師「夢への挑戦～自然科学研究機構の研究者・職員から学ぶ」岡崎市第1回MIRAI オンラインセミナー (2024). (Sylvain de LÉSÉLEUC)

出前授業「未来の量子ネイティブ×ムーンショット研究者」神奈川県立相模原中等教育学校 (2024). (Sylvain de LÉSÉLEUC, 富田隆文)

ワークショップ「Atomic Qubits: Neutral atoms and Trapped ions」量子コンピュータ関連研究者及び学生の技術交流 大阪大学 (2024). (Sylvain de LÉSÉLEUC, 富田隆文, 牧野 茜)

ワークショップ「ASPIRE, Neutral atom QC Winter Camp 2024」量子コンピュータ関連若手研究者及び学生の技術交流 (2024). (Sylvain de LÉSÉLEUC, 富田隆文, 牧野茜)

その他

大森賢治個人で年額 (換算) およそ 17 億円にも上る極めて高額的外部資金を獲得 (上記の「競争的資金等の領域長等」および下記「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.

大森が研究代表者 (プロジェクトマネージャー) を務める内閣府・ムーンショット型研究開発プロジェクト「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」が, ムーンショット事業の 2024 年度年次評価において「中性原子量子コンピュータの研究開発で世界トップレベルにあることを, 非常に高く評価する」などと絶賛され, 総合評価において「最高の S 評価」を受けるなど, 量子コンピュータ研究開発で世界のトップを牽引しており, 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.

米国ホワイトハウスが公表した日米首脳会談 (ワシントン D.C. 2024 年 4 月 10 日) の公式資料「FACT SHEET」において分子研大森グループの強力な量子コンピュータ開発における日米協力がハイライトされた。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, 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, 産総研 G-QuAT をはじめとする 13 社・1 国立研究所の参画を得ている。本件は日本経済新聞の朝刊 1 面トップ記事として掲載された。これによって, 国内外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.

分子研大森グループによるムーンショット量子コンピュータ開発の最新状況が, 日本経済新聞の朝刊 1 面トップ記事として掲載された。これによって, 国内外のアカデミア・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.

8-3 情報発信に記載されている通り、過去1年に限っても読売新聞、日本経済新聞、産経新聞、中日新聞、NHK 総合テレビ全国放送などを始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いる。これらの極めて頻繁な全国区の報道によって、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。(web ニュース等については、<https://ohmori.ims.ac.jp/kenjihomori/> を参照)

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–現在)、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–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。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。

冷却原子型・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、日経サイエンス7月号(2024年5月24日・雑誌)、日経コンピュータ9月5日号(2024年9月5日・雑誌)にも特集されるなど、関連報道が現在も継続している(ニュース報道については、<https://ohmori.ims.ac.jp/kenjihomori/> 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とはもとより、オーストリアのインスブルック大学、カナダのプリティッシュ・コロンビア大学、フランス・アカデミアの最高峰であるCollege de France、同じくフランスのInstitut d'Optique、ストラスブール大学、米国のスタンフォード大学、ウィスコンシン大学、ドイツのハイデルベルグ大学、インドのTCG CREST、バンクーバーの国際会議Photonics North、米国オースティンで開催された世界最大級の産業展示会・カンファレンスSXSW 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。

経産省が進める量子コンピュータ関係のヒアリング(2024年3月14日、8月27日)に、冷却原子型量子コンピュータの代表として貢献することによって、経産省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。

財務省関係者を中心とするシンクタンクである政策アクション会議に招かれ(2024年4月4日、6月6日、12月5日)、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うことによって、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。

Q-STAR (一般社団法人量子技術による新産業創出協議会)メンバーが多数分子研に所属し、これに対して大森が、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と事業化に関するレクチャー(2024年5月20日)を行うことによって、日本の産業界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。

JACI（公益社団法人新化学技術推進協会）シンポジウムに招かれ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と事業化に関する基調講演（2024年6月18日）を行うことによって、従来の電気、情報業界を超えて日本の化学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。

世界初の量子超越性の実証（2019年）で有名な John Martinis 教授（UCSB）と彼が新たに立ち上げた米国の量子コンピュータスタートアップ Qolab 社の経営陣主催のコロキウム（2024年7月16日 @ ウィスコンシン大学マディソン）に招かれ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と事業化に関するレクチャーを行うことによって、米国の量子コンピュータ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。

世界を代表する量子関連企業である NVIDIA 社、Oxford Quantum Circuits 社、QuEra Computing 社、Strangeworks 社の経営陣や、我が国を代表する量子関連企業の研究開発幹部（富士通、NEC、東芝、日立総合計画研究所、東芝デジタルソリューションズ）が登壇する Q2B 会議のサテライト会議「Quantum Globalization Summit: Tokyo 2024」（2024年7月22日 @ デロイトトーマツ社、東京・丸の内）における唯一の基調講演に招かれ、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と事業化に関するレクチャーを行うことによって、国際的な量子コンピュータ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。

JATES（一般社団法人科学技術と経済の会）が主催する講演会「量子技術研究会」（2024年7月26日）に大森が招かれ、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と事業化に関するレクチャーを行うことによって、我が国の産業界や政府関係者（総務省など）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。

文科省研究振興局長ご一行の分子研来所に際して、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（2024年9月17日）を行うことによって、大学共同利用機関法人としての分子研の知名度・プレゼンス向上と研究力アピールに大きく貢献。

経済産業省ご一行の分子研・大森グループ訪問に際して、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（2024年10月9日）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。

自然科学研究機構シンポジウム（2024年10月20日）で、大森グループの超高速量子コンピュータに関する招待講演を行うことによって、自然科学研究機構と分子研の知名度・プレゼンス向上と研究力アピールに大きく貢献。

経済産業省に招かれ（2024年11月5日）、大森グループの超高速量子コンピュータ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。

大森が、浜松ホトニクス社 関連財団である光科学技術研究振興財団が主催する国際会議 第4回 iSAP Hamamatsu（2024年11月11-13日、オークラアクトシティホテル浜松、浜松市）の議長を務めるとともに、招待講演を行った。この会議には、2019年に世界で初めて量子コンピュータの量子超越性を実証した John Martinis 教授（米国・UCSB）をはじめ、Vladan Vuletic 教授（米国・MIT）、Jonathan Home 教授（スイス・ETH Zurich）、Michelle Simmons 教授（オーストラリア・UNSW）、藤井啓祐教授（大阪大学）ら量子コンピュータ分野の世界最高峰の面々が集結した。会議の様子はNHK 総合テレビの「おはよう日本」（全国版）で大きく取り上げられ、大森のインタビュー動画が全国に向けて放映された。これによって、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。

財務省傘下の日本政策投資銀行（DBJ）が主催するシンポジウム「DBJ iHub 量子コンピュータ実現への道」（2024年11月14日、大手町プレイスホール&カンファレンス、東京）において、大森グループの超高速量子コンピュータの研究開発状況に関する招待講演を行うことによって、全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。

2019年に世界で初めて量子コンピュータの量子超越性を実証したJohn Martinis 教授(米国・UCSB)を分子研に招聘し、同教授による分子研コロキウム(2024年11月18日)を主催することによって、分子研の知名度・プレゼンス向上に大きく貢献。

量子コンピューティングEXPO(2024年11月21日、幕張メッセ)で大森グループの超高速量子コンピュータの研究開発状況に関する招待講演、および量子コンピュータ全般に関するパネルディスカッションを行うことによって、全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。

量子フォーラムシンポジウム「冷却原子が拓く量子技術の最前線」(2024年11月27日、赤坂インターシティコンファレンス、東京)で、大森グループの超高速量子コンピュータの研究開発状況に関する招待講演を行うことによって、量子技術関連のアカデミアと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。

三菱ケミカル社ご一行の分子研・大森グループ訪問に際して、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(2025年1月7日)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。

日本経済新聞社記者の分子研・大森グループ訪問・取材に際して、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(2025年1月14日)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。

衆議院議員の分子研・大森グループ訪問に際して、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(2025年1月16日)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。

文部科学省 研究振興局 量子研究推進室室長ご一行の分子研・大森グループ訪問・取材に際して、大森グループの超高速量子コンピュータの研究開発状況に関するレクチャーおよびラボツアー(2025年2月17日)を行うことによって、大学共同利用機関法人としての分子研の知名度・プレゼンス向上と研究力アピールに大きく貢献。

世界最大級のビッグテックカンファレンス／EXPOであるSXSW(2025年3月7-15日、Austin市、Texas州、USA)において、「量子力学100年の謎と大森グループの超高速量子コンピュータの研究開発状況」に関する招待講演を行うことによって、世界中の産業界・マスコミ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。

読売新聞 東京本社 記者の分子研・大森グループ訪問・取材に際して、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(2025年3月19日)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。

公益社団法人 日本表面真空学会からの依頼で、同学会の会誌「表面と真空」第68巻3月号(特集「量子コンピュータの最前線」)の巻頭言を執筆することによって、大学共同利用機関法人としての分子研の知名度・プレゼンス向上と研究力アピールに大きく貢献。

「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。

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先端学術院, 集中講義「量子動力学」, 2024年.

総合研究大学院大学先端学術院, 集中講義「量子動力学」, 2024年. (富田隆文)

B-9) 学位授与

TIRUMALASETTY PANDURANGA, Mahesh, “Ultrafast excitation of atoms to a Rydberg orbit using picosecond pulsed lasers,” 2025年3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).

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–2028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).

B-11) 産学連携

共同研究, キュエル (株), 「量子コンピュータの制御」, 大森賢治 (2024年度–).

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 (2016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), 「超高速量子コンピュータの開発」, 大森賢治 (2023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（特任研究員）

WONGKANYA, Ratchada（インターンシップ）

西野 史（大学院生）

PALASSERY ITHIKKAL, Jaseela（大学院生）

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) 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. NISHINO, K. FUKUTANI, J. BRANDHOFF, M. GRUENEWALD, E. FUERCH, M. SCHAAL, F. OTTO, D. STELTER, R. FORKER, Z. ZHANG, T. HIROSE, T. FRITZ and S. KERA, “Enantiospecific Mirror-Imaged Growth in Overlayers of Enantiopure Thiadiazole-[9]helicene on Au(111) without Commensurability,” *Appl. Phys. Express* **18**(1), 015502 (2025). DOI: 10.35848/1882-0786/ada688

F. MATSUI, K. HAGIWARA, Y. SATO, E. NAKAMURA, R. SAGEHASHI, S. KERA and S. SUGA, “Dual-Beamline Photoelectron Momentum Microscopy for Valence Orbital Characterization,” *Synchrotron Radiat. News* **37**(4), 43–48 (2024). DOI: 10.1080/08940886.2024.2391256

S. LEE, K.-H. JIN, K. FUKUTANI, J. LEE, C. I. KWON, J. S. KIM, J. KIM and H. W. YEOM, “Surface Doping and Dual Nature of the Band Gap in Excitonic Insulator Ta₂NiSe₅,” *ACS Nano* **18**(36), 24784 (2024). DOI: 10.1021/acsnano.4c02784

J. P. ITHIKKAL, K. FUKUTANI, F. NISHINO, T. MINATO, H. ISHII, S. IZAWA, K. TANAKA, M. HIRAMOTO and S. KERA, “Direct Observation of the Electronic Structure and Many-Body Interactions of Low-Mobility Carriers in Perylene Diimide Derivative,” *Appl. Phys. Lett.* **125(5)**, 052102 (2024). DOI: 10.1063/5.0221293

K. HAGIWARA, E. NAKAMURA, S. MAKITA, S. SUGA, S. TANAKA, S. KERA and F. MATSUI, “Development of Dual-Beamline Photoelectron Momentum Microscopy for Valence Orbital Analysis,” *J. Synchrotron Radiat.* **31(Pt3)**, 540–546 (2024). DOI: 10.1107/s1600577524002406

T. YAMADA, R. NEMOTO, F. NISHINO, T. HOSOKAI, C. H. WANG, M. HORIE, Y. HASEGAWA, S. KERA and P. KRÜGER, “On-Surface Growth of Transition-Metal Cobalt Nanoclusters Using a 2D Crown-Ether Array,” *J. Mater. Chem. C* **12(3)**, 874–883 (2023). DOI: 10.1039/d3tc03339b

B-3) 総説, 著書

S. KERA, T. ARAKI, K. TANAKA, Y. TAIRA, M. KATOH and F. MATSUI, “UVSOR Synchrotron Facility 40th Anniversary,” *Synchrotron Radiat. News* **37(2)**, 41–42 (2024). DOI: 10.1080/08940886.2024.2330876

B-4) 招待講演

解良 聡, 「有機材料の光電子分光計測：電子状態の次元階層性の特徴」, 第 19 回有機デバイス・物性院生研究会, 京都, 2024 年 10 月.

S. KERA, “Insight into the charge transport mechanisms of molecular crystals,” Nanyang Technological University, Singapore (Singapore), July 2024.

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

第 37 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 (2024–2025).

VSX・SX 高輝度光源利用者懇談会会長 (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

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ちシンクロトロン光センター運営委員会委員 (2023–2025).

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–).

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-9) 学位授与

PALASSERY ITHIKKAL, Jaseela, “Material design for lateral organic solar cells by studying semiconductor electronic properties,” 2024年9月, 博士(理学).

西野 史, 「キラル分子による表面对称性の操作と電子物性への影響」, 2025年3月, 博士(理学).

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).

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).

B-11) 産学連携

共同研究, 東ソー(株), 「電荷輸送材料の薄膜状態における電子状態の解析」, 解良 聡 (2024年度).

共同研究, 三菱ケミカル(株), 「軟X線共鳴散乱を用いた樹脂素材の元素選択的な構造解析法の開発」, 解良 聡 (2023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金属－配位子間の非局在化の解明
- c) 大規模な分子系の構造解析のための内殻励起計算法の開発
- d) 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

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，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，小さな分子だけでなく，溶液中の高分子の XAS 計測を実現した。これにより，純水と純メタノールには溶ける高分子が，メタノール水溶液中では溶けなくなる共貧性溶媒効果のメカニズムを，高分子の C=O 基の酸素 K 吸収端 XAS 計測により明らかにした。
- 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を，中心金属の $L_{2,3}$ 吸収端と配位子の窒素 K 吸収端の XAS 計測により明らかにした。配位子の窒素 K 吸収端を用いることで，金属－配位子間の非局在化の中心金属依存性を調べた。また，水溶液中で配位構造の分かっていないポルフィリンコバルト錯体の窒素 K 吸収端 XAS 計測と様々な配位モデルの内殻励起計算から，水溶液中においてポルフィリンコバルト錯体に溶媒の水は配位しないで，5 配位構造を維持することを明らかにした。
- c) XAS 計測から溶液中の高分子や生体分子の構造を調べるには，大規模な分子系の内殻励起計算法を確立する必要がある。そこで，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，内殻励起計算するスキームを確立した。これにより，液体エタノールの炭素 K 吸収端 XAS スペクトルが，実験で得られたスペクトル形状を良く再現することを確かめた。また，アセトニトリル水溶液の酸素 K 吸収端 XAS スペクトルで得られたシャープなピークが，アセトニトリル中に孤立して存在する水分子に由来することを明らかにした。更に，高分子の鎖の一部を切り出して，内殻励起計算を行う方法論の開発を行った。
- d) 超高速レーザー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て，溶液光化学反応のオペランド XAS 測定を実現した。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，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。また，XAS の吸収端の違いによる緩和時間の変化や，緩和時間の溶媒依存性と温度依存性についても明らかにした。現在，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。

B-1) 学術論文

T. MIBU, R. MATSUOKA, M. NAGASAKA and T. KUSAMOTO, “Emission Enhancement in a Luminescent Polychlorinated Diphenylpyridylmethyl Radical through Coordination to Silver(I),” *Dalton Trans.* **54(6)**, 2265–2270 (2025). DOI: 10.1039/D4DT03129F

M. NAGASAKA, Y. YAO and K. MOCHIZUKI, “Oxygen K-Edge Inner-Shell Calculations of Polymers in Solutions Realized by the Extraction of Local Structures from Molecular Dynamics Simulations,” *J. Chem. Phys.* **162(5)**, 054901 (2025). DOI: 10.1063/5.0245456

M. NAGASAKA, S. TSURU and Y. YAMADA, “Metal–Ligand Delocalization of Iron and Cobalt Porphyrin Complexes in Aqueous Solutions Probed by Soft X-Ray Absorption Spectroscopy,” *Phys. Chem. Chem. Phys.* **26(36)**, 23636–23645 (2024). DOI: 10.1039/D4CP02140A

Y. YAO, M. NAGASAKA and K. MOCHIZUKI, “Salt-Specific Effect on the Solubility and Aggregation of 1-Butanol in Water,” *Phys. A* **647**, 129917 (2024). DOI: 10.1016/j.physa.2024.129917

M. NAGASAKA, “Probing Isolated Water Molecules in Aqueous Acetonitrile Solutions Using Oxygen K-Edge X-Ray Absorption Spectroscopy,” *J. Phys. Chem. Lett.* **15(19)**, 5165–5170 (2024). DOI: 10.1021/acs.jpclett.4c01087

M. NAGASAKA, F. KUMAKI, Y. YAO, J. ADACHI and K. MOCHIZUKI, “Mechanism of Poly(*N*-isopropylacrylamide) Cononsolvency in Aqueous Methanol Solutions Explored via Oxygen K-Edge X-Ray Absorption Spectroscopy,” *Phys. Chem. Chem. Phys.* **26(18)**, 13634–13638 (2024). DOI: 10.1039/D4CP00676C

B-3) 総説, 著書

工藤優斗, 熊木文俊, 長坂将成, 足立純一, 野口良史, 古賀伸明, 板橋英之, 樋山みやび, 「ホタル生物発光における内殻吸収計測技術」, *Photon Factory News*, **42(4)**, 15–20 (2025).

熊木文俊, 長坂将成, 深谷 亮, 足立純一, 「溶液試料の光励起緩和過程の研究に向けた時間分解軟X線吸収分光法の開発」, *しょうとつ*, **22(1)**, R001 (2025). DOI: 10.50847/collision.22.R001

長坂将成, 「軟X線吸収分光法による高分子溶液の共貧性溶媒効果の解明」, *月刊機能材料*, **44(10)**, 41–47 (2024).

B-4) 招待講演

長坂将成, 「軟X線吸収分光測定のための液体セルの開発」, 第24回R&Dビームライン検討会, オンライン講演会, 2024年10月.

長坂将成, 「溶液の軟X線吸収分光計測の現状と将来展望」, 物理化学と放射光・先端計測に関する研究会, 岡崎, 2024年10月.

B-7) 学会および社会的活動

学会の組織委員等

第2回PF-UAサマースクール「放射光の特長を活かした分析手法」実行委員長 (2024).

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(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（クロスアポイントメント*））（2019 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）

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。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いる。
- 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，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いる。

B-1) 学術論文

M. KATOH, M. FUJIMOTO, E. SALEHI, M. HOSAKA and H. KAWAGUCHI, “Chirality in Electromagnetic Radiation from Relativistic Electrons,” *Chirality* **36**(5), e23677 (2024). DOI: 10.1002/chir.23677

M. KOBAYASHI, S. YOSHIMURA, H. IWAYAMA, N. KONDO, J. TAKAHASHI, H. OTA, M. KATOH, K. KOBAYASHI and H. NAKAMURA, “First Attempt at Photoionized Plasma Production with VUV Radiation in Synchrotron Light Source UVSOR-III,” *Plasma Fusion Res.* **19**, 1301028 (2024). DOI: 10.1585/pfr.19.1301028

M. KOBAYASHI, J. TAKAHASHI, H. OTA, K. MATSUO, M.I.A. IBRAHIM, T. MINATO, G. FUJIMORI, M. KATOH, K. KOBAYASHI, Y. KEBUKAWA and H. NAKAMURA, “Emergence of Optical Activity and Surface Morphology Changes in Racemic Amino Acid Films under Circularly Polarized Lyman- α Light Irradiation,” *Chirality* **36**, e70004 (2024). DOI: 10.1002/chir.70004

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–.

B-10) 競争的資金

科研費挑戦的研究(萌芽), 「広帯域インコヒーレント放射光の可干渉性を利用する革新的光技術の探索」, 加藤政博 (2022年度–2024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いる。

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トロン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ている。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、引き続き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）

脇田 幸哉（特別共同利用研究員）

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。

逆トムソン散乱では、偏光レーザーを使うことで偏光ガンマ線が発生する。エネルギー広がり準単色かつエネルギー可変の偏光ガンマ線が発生する唯一の方法であるため、偏光ガンマ線検出器の応答測定にも利用されている。J-PARC において中性子捕獲反応によって発生する円偏光ガンマ線を測定することで、原子核の励起状態のスピンやパリティを決定するための実験が行われている。ガンマ線の偏光計として使用される電磁石を UVSOR に持ち込み、円偏光ガンマ線に対する偏光計の感度測定が行われた。開発している偏光計が、円偏光ガンマ線に対して予想値とほぼ一致する感度が得られている事を確認した。この偏光計を J-PARC 物質・生命科学実験施設の ANNRI ビームラインに設置し、中性子捕獲反応によって発生する円偏光ガンマ線の測定が行われている。この実験に関するユーザー執筆の論文が *Eur. Phys. J. A* に掲載された。

- 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。最初の実験として、ガンマ線の空間分布を2次元検出器(AdvaPIX TPX3)で測定した。軸対称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とは異なる空間分布になることが確認された。この結果に関する論文が *Phys. Rev. A* に掲載された。

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。また、直径10 mm程度に広がったガンマ線の一部を直径1 mmの鉛コリメータを用いて切り出してターゲットに照射することでその位置で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。実験に向けて、最初に偏光計の設計を行った。放射線シミュレーションコードを用いてガンマ線検出器の選定、ターゲット形状や配置および計数率の計算を行った。検出器固定治具の設計および組立は装置開発室に依頼した。

最初に、偏光特性の分かってい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た。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。今後、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、その偏光特性を明らかにする。

B-1) 学術論文

R. SATO, M. HAMDAN, K. SHIMAZOE, M. UENOMACHI and Y. TAIRA, “Measurement of Scattering Azimuthal Distribution of Polarized Gamma-Rays in Compton Scattering Using GAGG(Ce) Scintillator,” *J. Instrum.* **20(2)**, C02007 (2025). DOI: 10.1088/1748-0221/20/02/C02007

Y. TAIRA, “Spatial Distribution of Gamma Rays Produced by Axially Symmetric Polarized and Optical Vortex Lasers,” *Phys. Rev. A* **110(10)**, 043525 (2024). DOI: 10.1103/PhysRevA.110.043525

S. ENDO, R. ABE, H. FUJIOKA, T. INO, O. IWAMOTO, N. IWAMOTO, S. KAWAMURA, A. KIMURA, M. KITAGUCHI, R. KOBAYASHI, S. NAKAMURA, T. OKU, T. OKUDAIRA, M. OKUIZUMI, M. OMER, G. ROVIRA, T. SHIMA, H. M. SHIMIZU, T. SHIZUMA, Y. TAIRA, S. TAKADA, S. TAKAHASHI, H. YOSHIKAWA, T. YOSHIOKA and H. ZEN, “Circular Polarization Measurement for Individual Gamma Rays in Capture Reactions with Intense Pulsed Neutrons,” *Eur. Phys. J. A* **60(8)**, 166 (2024). DOI: 10.1140/epja/s10050-024-01392-6

B-3) 総説, 著書

S. KERA, T. ARAKI, K. TANAKA, Y. TAIRA, M. KATOH and F. MATSUI, “UVSOR Synchrotron Facility 40th Anniversary,” *Synchrotron Radiat. News* **37(2)**, 41–42 (2024). DOI: 10.1080/08940886.2024.2330876

B-4) 招待講演

平 義隆, 「超短パルスガンマ線の発生と利用研究」, RARiS研究会「加速器を用いたガンマ線ビームの生成, 基礎科学と産業分野への利用」, 仙台, 2024年9月.

平 義隆, 「UVSORにおけるガンマ線源の開発と利用」, 第664回高崎研オープンセミナー, 高崎, 2024年5月.

Y. TAIRA, “Gamma-ray-induced positron annihilation spectroscopy at UVSOR,” 13th International Workshop on Positron and Positronium Chemistry (PPC-13), Kanazawa, November 2024.

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 21 回年会組織委員 (2024).

学会誌編集委員

日本陽電子科学学会会報編集委員 (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–.

総合研究大学院大学先端学術院, 「放射光科学」, 2024 年 7 月–8 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。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。軸対称偏光レーザーを用いたガンマ線発生に関しては, ガンマ線の偏光分布の測定技術を開発する。

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）

佐藤 祐輔（助教）
萩原 健太（特任研究員（IMS フェロー））
松田 博之（特任研究員）
大門 寛（研究員）
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を突破口とした UVSOR の高度化
- 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と利用コミュニティの開拓

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国際特許出願した。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（こちらは特許が 2 件成立した）、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（45–700 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。特に、吸収端にてグラファイトの π 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重なる現象の発見は重要である。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。graphite 表面の単原子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) および (*Rev. Sci. Instrum.* 2023) は両方とも 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

- T. KOBAYASHI, F. MATSUI, E. IWAMOTO, H. KIZAKI, M. MIYATA, M. KOYANO, I. YAMAMOTO, S. SUGA and K. SAKAMOTO**, “Temperature-Dependent Electronic Structure of a Quasi-Two-Dimensional Conductor η -Mo₄O₁₁,” *Sci. Rep.* **15**, 9034 (2025). DOI: 10.1038/s41598-025-93355-0
- Y. SATO, Y. FUKAYA, A. NAKANO, T. HOSHI, C. C. LEE, K. YOSHIMI, T. OZAKI, T. NAKASHIMA, Y. ANDO, H. AOYAMA, T. ABUKAWA, Y. TSUJIKAWA, M. HORIO, M. NIIBE, F. KOMORI and I. MATSUDA**, “Surface Structure of the 3×3-Si Phase on Al(111), Studied by the Multiple Usages of Positron Diffraction and Core-Level Photoemission Spectroscopy,” *Phys. Rev. Mater.* **9**(1), 014002 (2025). DOI: 10.1103/PhysRevMaterials.9.014002
- Y. HASHIMOTO, J. MIZUNO, H. MATSUDA, F. MATSUI and T. MATSUSHITA**, “High-Resolution Electron Energy Analyzer with Wide Acceptance Angle for Hard X-Ray Photoelectron Holography: Integrating PESCATORA and Retarding Field Analyzer,” *Jpn. J. Appl. Phys.* **63**(12), 124001 (2024). DOI: 10.35848/1347-4065/ad9447
- F. MATSUI, K. HAGIWARA, Y. SATO, E. NAKAMURA, R. SAGEHASHI, S. KERA and S. SUGA**, “Dual-Beamline Photoelectron Momentum Microscopy for Valence Orbital Characterization,” *Synchrotron Radiat. News* **37**(4), 43–48 (2024). DOI: 10.1080/08940886.2024.2391256
- T. INOUE, T. INA, H. MASAI, N. KONDO, F. MATSUI, T. KINOSHITA and A. NAKAJIMA**, “Extended X-Ray Absorption Fine Structure (EXAFS) Measurements on Alkali Metal Superatoms of Ta-Atom-Encapsulated Si₁₆ Cage,” *J. Phys. Chem. Lett.* **15**(20), 5376–5381 (2024). DOI: 10.1021/acs.jpclett.4c00492

K. HAGIWARA, E. NAKAMURA, S. MAKITA, S. SUGA, S. TANAKA, S. KERA and F. MATSUI, “Development of Dual-Beamline Photoelectron Momentum Microscopy for Valence Orbital Analysis,” *J. Synchrotron Radiat.* **31(Pt3)**, 540–546 (2024). DOI: 10.1107/s1600577524002406

H. MATSUDA, K. OZAWA, Y. HASHIMOTO, T. MATSUSHITA and F. MATSUI, “Use of Planar Retarding Field to Improve Energy Resolution of Projection-Type Electron Spectroscopy Collimator Analyzer,” *Jpn. J. Appl. Phys.* **63(4)**, 046503 (2024). DOI: 10.35848/1347-4065/ad3ab8

B-3) 総説, 著書

H. DAIMON, T. MATSUSHITA, F. MATSUI, K. HAYASHI and Y. WAKABAYASHI, “Recent Advances in Atomic Resolution Three-Dimensional Holography,” *Adv. Phys.:X* **9(1)**, 2350161 (2024). DOI: 10.1080/23746149.2024.2350161

S. KERA, T. ARAKI, K. TANAKA, Y. TAIRA, M. KATOH and F. MATSUI, “UVSOR Synchrotron Facility 40th Anniversary,” *Synchrotron Radiat. News* **37(2)**, 41–42 (2024). DOI: 10.1080/08940886.2024.2330876

T. YOKOYAMA, F. MATSUI, H. ABE and T. KINOSHITA, “60 Years of Synchrotron Radiation in Japan (JPSR60),” *Synchrotron Radiat. News* **37(2)**, 43–44 (2024). DOI: 10.1080/08940886.2024.2330877

B-4) 招待講演

松井文彦, 「光電子運動量顕微鏡による電子状態研究：ミルからワカルへ」, 日本物理学会領域 2, 5, 9, 10 合同シンポジウム「先端計測のフロンティア～見えないモノを見る挑戦」, 札幌, 2024 年 9 月.

松井文彦, 「マルチモーダル光電子シネマトグラフィー：表面相転移の観察から解明へ」, NIFS 研究会数理科学・プラズマ科学・物質科学の共通研究拠点形成, 土岐, 2024 年 5 月.

松井文彦, 「顕微 ARPES と光電子顕微鏡：光電子運動量顕微鏡を中心に」, JVSS-MBA 研修セミナー「多様な表面分析が可能な電子分光法」, 仙台, 2024 年 4 月.

F. MATSUI, “Dual-beam (Soft X-ray/VUV) Photoelectron Momentum Microscope,” Korea-Japan Symposium on Molecular Science, Cutting-Edge Molecular Science from Elementary to Complex Systems, Busan (Korea), June 2024.

B-5) 特許出願

登録

特許第 7505794 号, 「球面収差調整カソードレンズ, 球面収差補正静電型レンズ, 電子分光装置, 及び光電子顕微鏡」, 松田博之, 松井文彦 (自然科学研究機構), 2020 年. (登録日 2024 年 6 月 17 日)

特許第 7607953 号, 「静電偏向収束型エネルギー分析器, 結像型電子分光装置, 反射結像型電子分光装置, およびピンベクトル分布イメージング装置」, 松田博之, 松井文彦 (自然科学研究機構), 2021 年. (登録日 2024 年 12 月 20 日)

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–), 協議員 (2023–2025).

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).

日本表面真空学会若手部会運営委員 (2025). (佐藤祐輔)

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 (2019–2025), 副委員長 (2024–2025).

広島大学放射光科学研究所協議会委員 (2024–2026).

高エネルギー加速器研究機構物質構造科学研究所人事委員会委員 (2024).

量子科学技術研究開発機構 Nanoterasu 利用研究検討委員会委員 (2024–2025).

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先端学術院, 「放射光科学」, 2024 年 7 月–8 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: 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–).

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 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。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。2022年にはDESYにて招待講演を行った。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。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(R026先端計測)，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）

ZHU, Yupeng（特別訪問研究員）
河野 健人（特別共同利用研究員）
増田 圭亮（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 ビームラインの高精度化

A-3) 研究活動の概略と主な成果

- a) UVSOR BL5U では高効率イメージ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。昨年度から導入している超高輝度電子銃を用いて電子レンズパラメータの調整を実施し、試料面内 2 軸方向のスピン分解測定可能運動エネルギー領域を、125 eV からビームラインの最低励起光エネルギー（21.2 eV）の領域まで拡大することに成功した。また今年度はユーザー利用開始の最も大きな障害となっていたスピントーゲットの 2 軸モーター制御を新たに開発し導入することに成功した。スピントーゲットを装置に適切なトルクで、再現性良く押し付けることが最大の課題であったが、既製品である 2 軸モータートランスファーシステムの 1 軸機構を完全に取り外し、新たにラックアンドピニオンギアを取り付けることで実現したことに大きな特徴がある。さらに 2 軸モーター制御導入の副次的効果として、試料面直方向のスピン分解測定を実施するための電子レンズパラメータ設定に自由度ができたことで、電子銃での実験ではあるが、はじめて試料位置での角度情報を保ったまま面直方向電子を検出器まで導くことに成功した。来年度は面直方向用の電子レンズパラメータの調整を継続するとともに、面直スピン検出の実証実験を実施する予定である。成功すれば世界初の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情報を得ることのできる角度分解光電子分光装置が実現する。
- b) UVSOR BL7U 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。超伝導転移温度の上下でのスペクトルを比較することで、超伝導によるスペクトラルウェイト変化の運動量空間依存性とホール濃度依存を導出することに成功した。これまで長い間有効とされてきたフェルミアーキ描像を否定する結果が得られており、高温超伝導が超伝導ギャップよりも超流動密度に強く影響を受けていることを示唆している。現在論文にまとめている。
- c) 放射光のビームラインでは使用する励起光エネルギーを設定したときに、毎回エネルギーとビームスポット位置が再現されることが、高精度な実験、あるいは測定の自動化を実現する上で欠かせない。BL5U では励起光エネルギーの再現性があまりよくないことが問題となっていたが、回折格子の角度制御における機械的な動作の問題を回避するための特別なモーター制御を開発・導入し、再現性を確保することに成功している。他の光電子ビームライン（BL7U）

でも同様の制御システムを導入し、再現性のある励起光エネルギーの提供に成功したが、運用開始後1年後に突然再現性が確保できなくなった。今後の自動測定に向けて最も重要な要素であり、現在原因究明に向けて、ひとつひとつの光学素子制御の確認実験を実施している。

B-1) 学術論文

- Y. MIYAI, S. IDETA, M. ARITA, K. TANAKA, M. ODA, T. KUROSAWA and K. SHIMADA**, “Dual Origin in the Temperature Dependence of the Coupling Parameter for the Strange Metal State in Heavily Overdoped Cuprate Superconductor,” *Phys. Rev. Res.* **7(1)**, L012039 (2025). DOI: 10.1103/PhysRevResearch.7.L012039
- Y. LEE, Y. SUR, S. KIM, J. CHA, J. HYUN, C. LIM, M. HASHIMOTO, D. LU, Y. KIM, S. HUH, C. KIM, S. IDETA, K. TANAKA, K. H. KIM and Y. KIM**, “Coupling Between Electrons and Charge Density Wave Fluctuation and its Possible Role in Superconductivity,” *Adv. Sci.* **11(41)**, 2406043 (2024). DOI: 10.1002/advs.202406043
- Y. NAKAYAMA, K. YAMAUCHI, Y. BABA, K. KIKUCHI, H. HATTORI, F. TESHIMA and K. TANAKA**, “Synchrotron Radiation Fourier-Transform Infrared Absorption Measurements on the Single-Crystal Dinaphtho[2,3-*b*:2',3'-*f*]thieno[3,2-*b*]thiophene,” *Jpn. J. Appl. Phys.* **63(9)**, 09SP07 (2024). DOI: 10.35848/1347-4065/ad70c0
- T. KATO, K. NAKAYAMA, Y. LI, Z. WANG, K. SUGAWARA, K. TANAKA, T. TAKAHASHI, Y. YAO and T. SATO**, “Quasi-Homoepitaxial Growth of Highly Strained Alkali-Metal Ultrathin Films on Kagome Superconductors,” *Adv. Sci.* **11(29)**, 2309003 (2024). DOI: 10.1002/advs.202309003
- R. FUKUSHIMA, V. N. ANTONOV, M. M. OTROKOV, T. T. SASAKI, R. AKIYAMA, K. SUMIDA, K. ISHIHARA, S. ICHINOKURA, K. TANAKA, Y. TAKEDA, D. P. SALINAS, S. V. EREMEEV, E. V. CHULKOV, A. ERNST and T. HIRAHARA**, “Direct Evidence of Induced Magnetic Moment in Se and the Role of Misplaced Mn in MnBi₂Se₄-Based Intrinsic Magnetic Topological Insulator Heterostructures,” *Phys. Rev. Mater.* **8(8)**, 084202 (2024). DOI: 10.1103/PhysRevMaterials.8.084202
- T. KAWASAKI, A. NAGASE, K. HAYAKAWA, F. TESHIMA, K. TANAKA, H. ZEN, A. IRIZAWA, T. SAKAI and Y. HAYAKAWA**, “Investigating Structural Property of Human Hair by Using Infrared Free Electron Lasers,” *Discover Appl. Sci.* **6(8)**, 397 (2024). DOI: 10.1007/s42452-024-06104-9
- J. P. ITHIKKAL, K. FUKUTANI, F. NISHINO, T. MINATO, H. ISHII, S. IZAWA, K. TANAKA, M. HIRAMOTO and S. KERA**, “Direct Observation of the Electronic Structure and Many-Body Interactions of Low-Mobility Carriers in Perylene Diimide Derivative,” *Appl. Phys. Lett.* **125(5)**, 052102 (2024). DOI: 10.1063/5.02212938.
- K. YAMAGUCHI, M. NIIBE, X. ZHANG, T. SUMI, M. HORIO, Y. ANDO, J. YAMAURA, E. NAKAMURA, K. TANAKA, T. KONDO and I. MATSUDA**, “Macroscopic Sheets of Hydrogen Boride and Their Spectroscopic Evaluation,” *Phys. Rev. Mater.* **8(7)**, 074005 (2024). DOI: 10.1103/PhysRevMaterials.8.074005
- S. ICHINOKURA, K. TOKUDA, M. TOYODA, K. TANAKA, S. SAITO and T. HIRAHARA**, “Van Hove Singularity and Enhanced Superconductivity in Ca-Intercalated Bilayer Graphene Induced by Confinement Epitaxy,” *ACS Nano* **18(21)**, 13738–13744 (2024). DOI: 10.1021/acsnano.4c01757
- Y. NAKAYAMA, J. MIYAMOTO, K. YAMAUCHI, Y. BABA, F. TESHIMA and K. TANAKA**, “Far- and Mid-Infrared FT-IR Analysis of the Single-Crystal Pentacene Using a Linearly Polarized Synchrotron Radiation Light Source,” *Vib. Spectrosc.* **132**, 103681 (2024). DOI: 10.1016/j.vibspec.2024.103681

D. OOTSUKI, H. TAKATSU, K. FUNADA, T. ISHIDA, M. ARITA, S. IDETA, K. TANAKA, H. KAGEYAMA and T. YOSHIDA, “Tiny Fermi Surface with an Extremely Light Mass of Ternary Chalcopyrite CdSnAs₂ Revealed by Angle-Resolved Photoemission Spectroscopy,” *Phys. Rev. Mater.* **8(4)**, 044604 (2024). DOI: 10.1103/PhysRevMaterials.8.044604

B-3) 総説, 著書

S. KERA, T. ARAKI, K. TANAKA, Y. TAIRA, M. KATOH and F. MATSUI, “UVSOR Synchrotron Facility 40th Anniversary,” *Synchrotron Radiat. News* **37(2)**, 41–42 (2024). DOI: 10.1080/08940886.2024.2330876

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

開発中のスピン分解ARPES システムは、試料面内 2 軸方向の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。ユーザー利用の障害となっていたスピントラゲットの磁化操作については自動化に成功し利便性が大きく向上した。これまで一番問題となっていた面直方向スピン測定も実装する目途が立ちつつある状況である。これまでスピン分解測定は一部ユーザーには開放していたが、一般ユーザーの利用開始に向けて整備を急ぎたい。

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) 液中観察のためのX線分光顕微鏡と試料環境開発
- c) 夾雑環境生体試料の定量化学状態マッピング

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；UVSOR の次期計画を念頭に、既存の軟X線ビームラインを利用したトライアルとして、以下の2つの試料システムについて Scanning Transmission X-ray Microscopy (STXM) による実験を行った。

光合成タンパク質の超複合体の測定を行い、鉄の L 吸収端 X 線吸収スペクトル (XAS) において十分なレベルの信号を検出でき、スペクトルを正しく測定できることを確認したが、マンガンについては限られたビームタイム中では検出できなかった。更に実験を行い、鉄およびマンガンの共鳴 X 線散乱の実験に繋がりたいと考えている。

極限環境下で乾眠することが知られているクマムシについて、その微視的解剖学の観点から、樹脂に包埋した超薄切片試料について STXM 観察を行った。炭素、窒素、酸素の K 吸収端ではエネルギーを変化させる（特定の吸収構造に合わせる）ことでオルガネラに対応すると思われる微細構造が観察され、Scanning Electron Microscopy (SEM) で観察された構造にほぼ対応していることを確認した。今後、相補的な観点で用いる SEM との対比などを共同研究者と議論し、① STXM でしか見えない構造があるのか？ ② SEM で観察されている構造の特定に STXM が寄与できるか？ といったことを明らかにし、研究を進めたい。

X 線のコヒーレンスを生かしたイメージング（散乱からの像再構成）について現在の UVSOR および次期リングでの実現を検討するために、先行する海外施設での装置見学および実験を検討し、実際に、蓄積リングのサイズこそ大きいもの、そのエミッタンス（電子ビームのサイズ×発散角）がほぼ同じである Canadian Light Source (CLS) のコミッション実験に参加した。上記のクマムシ試料を使った Ptychography（コヒーレントイメージングの一つ）のテスト実験において、確かな空間分解能の向上（X 線のビームサイズで決まる分解能よりも優れていること）を確認した。

- b) 液中観察のためのX線分光顕微鏡と試料環境開発；Diamond Light Source において硬X線顕微分光によって液中セルを使ったバクテリアに金ナノ粒子が担持されたポリマー粒子を添加した試料の観察を共同研究者と行った。金の酸化状態を XAS スペクトル測定から決定した。今後、軟X線領域での STXM でも同様の試料の観察を計画している。Transmission Electron Microscopy (TEM) 用に開発されたセルを利用した実験であり、今後の STXM 実験の参考になるものであった。TEM 用の液体セルの活用または、独自セルの開発の2つの観点で計画を進める。試料自体を走

査する STXM の場合、液中セル自体を揺さぶることになるため、今後、集光X線の走査または結像型による試料を固定した状態での測定を模索する。また、液体エタンなどを冷媒に用いた急速凍結による試料準備のオプションも併せて検討する。TEM 試料セルの利用は、現在検討中の TEM とX線イメージング・共鳴散乱手法の相補利用も念頭にその導入を進める。

- c) 夾雑環境生体試料の定量化学状態マッピング：細胞中の「夾雑環境」で、これまで高分子研究や皮膚への薬剤の浸透などで発揮された化学状態弁別性とメソスケールの空間分解能を生かした定量分析をどう実現するかを検討する。上記のクマムシの共同研究もその一つである。NINS の本部主導のフォトンバイオロジー研究プラットフォーム：PBRP を通じて、東北大の医学・農学研究科、量子生命研究所のメンバーと UVSOR を使ったフィージビリティ実験を行った（R6 年度前期）。1 件については日本バイオイメーjing学会にて発表が行われた。後期は同様の実験と、更に、PBRP で立ち上げるプロジェクト：X線によるオルガネラソーティングの基礎データ収集を行う予定である。

B-1) 学術論文

J. A. LAUX, T. OHIGASHI, M. R. BITTERMANN, T. ARAKI, H. YUZAWA, F. RANCAN, A. VOGT and E. RÜHL, “Scanning Transmission Soft X-Ray Microscopy Probes Topical Drug Delivery of Rapamycin Facilitated by Microneedles,” *ChemPhysChem* **26(2)**, e202400819 (2025). DOI: 10.1002/cphc.202400819

T. MATSUMOTO, T. NOGUCHI, A. MIYAKE, Y. IGAMI, M. MATSUMOTO, T. YADA, M. UESUGI, M. YASUTAKE, K. UESUGI, A. TAKEUCHI, H. YUZAWA, T. OHIGASHI and T. ARAKI, “Sodium Carbonates on Ryugu as Evidence of Highly Saline Water in the Outer Solar System,” *Nat. Astron.* **8(12)**, 1536–1543 (2024). DOI: 10.1038/s41550-024-02418-1

B-3) 総説、著書

S. KERA, T. ARAKI, K. TANAKA, Y. TAIRA, M. KATOH and F. MATSUI, “UVSOR Synchrotron Facility 40th Anniversary,” *Synchrotron Radiat. News* **37(2)**, 41–42 (2024). DOI: 10.1080/08940886.2024.2330876

B-4) 招待講演

荒木 暢, 「軟X線顕微分光法」, 第 16 回日本放射光学会放射光基礎講習会, 仙台 (ハイブリッド開催), 2024 年 9 月。

B-8) 大学等での講義、客員

Diamond Light Source, Visiting Scientist, 2023 年–。

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 (2024 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，多くの物性はその構造に由来する。偏光顕微鏡などで観察できない数 nm から数 100nm 程度のメゾスコピック領域の構造をしらべる手法として，X線小角散乱法が用いられ，多くの成果が挙げられている。しかしながら，X線小角散乱は試料の電子密度の変調に対して敏感であるが，電子密度の近い多成分系における特定の成分の構造や，ねじれ構造などの観測は難しい。X線共鳴過程を用いることで元素・分子種・分子配向に選択性を有する散乱光をえることができる。しか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X線共鳴エネルギーは，0.1 eV ～ 1 keV の軟X線領域であり，X線小角散乱法で使用する 10 keV 程度のX線とは一致しない。そのため，我々は軟X線領域の共鳴散乱光を観測できるための手法（共鳴軟X線散乱法）を行っている。我々は UVSOR のビームライン BL3U および Photon Factory BL7A において，共鳴軟X線散乱装置を開発し，高分子や液晶の構造解析を行っている。本年度は，入射光エネルギーをスキャンしながら散乱画像を取得するプログラムを開発し，炭素，窒素，酸素の K 殻吸収端の内殻共鳴に相当する軟X線を用いて，有機薄膜太陽電池のバルクヘテロジャンクション構造の解析や，多成分系の有機薄膜の成分ごとの解析，キラル液晶のモルフォロジーの解析を行った。また，放射光施設 Photon Factory BL7A では，軟X線検出器が回転できることを利用し，反射率計測することで膜厚評価できるシステムを構築した。
- b) 2023 年度より，軟X線による生体試料の可視化を実現すべく密着型軟X線顕微鏡の開発を始めた。本手法では，シンチレーター上に細胞を培養し，Si₃N₄ メンブレン（100 nm）で封入することで，軟X線を照射し，その透過光像をシンチレーターで可視光に変換し，細胞を観測する。10 月ごろより，犬の腎臓尿細管上皮細胞由来の細胞株である MDCK 細胞などの標準的な細胞を培養し，使うことにした。また，そのための細胞培養準備室を明大寺に設置した。今期は細胞に軟X線を照射する装置を改良し，従来気泡などがはいる，測定がうまくいかなかったことを，ヘリウム雰囲気下で実験することで解決した。また軟X線およびテnder X線を使うことで，軽元素 C, N, O に加え S, P などの元素についても測定できる環境を整備している。
- c) X線自由電子レーザー SACLA BL1 を利用した液体試料を対象とした実験装置の開発を進めている。昨年度は，Nevada 大の Craig Schwartz さんと液体表面からの二次高調波発生の実験を行った。液体表面などの界面においては，空間対称性の破れより，二次高調波が発生する。そのため，二次高調波を観測することで表面敏感な実験を行うこ

とができる。特に液体表面は気液界面であるため、反応場として重要であり、その化学状態を測定する手法は重要である。また軟X線の共鳴過程を利用することで、表面の特定の元素の化学状態を選択的に観測できる長所がある。そのため、SACLA BL1を利用して、高強度の軟X線パルスを鉄硝酸水溶液の超薄膜フラットジェットに照射し、その反射光を、斜入射分光器で分光観測した。現在解析中である。

B-1) 学術論文

T. N. TRAN, T. HAYASHI, H. IWAYAMA, M. SEKINE, M. HORI and K. ISHIKAWA, “Hydrofluoroethane Plasma Etching of SiN, SiO₂, and poly-Si Films with CHF₂CF₃, CF₃CH₃, and CHF₂CH₃,” *Appl. Surf. Sci.* **684**, 161815 (2025). DOI: 10.1016/j.apsusc.2024.161815

T. WALMSLEY, J. W. MCMANUS, Y. KUMAGAI, K. NAGAYA, J. HARRIES, H. IWAYAMA, M. N. R. ASHFOLD, M. BRITTON, P. H. BUCKSBAUM, B. DOWNES-WARD, T. DRIVER, D. HEATHCOTE, P. HOCKETT, A. J. HOWARD, J. W. L. LEE, Y. LIU, E. KUKK, D. MILESEVIC, R. S. MINNS, A. NIOZU, J. NISKANEN, A. J. ORR- EWING, S. OWADA, P. A. ROBERTSON, D. ROLLES, A. RUDENKO, K. UEDA, J. UNWIN, C. VALLANCE, M. BROUARD, M. BURT, F. ALLUM and R. FORBES, “The Role of Momentum Partitioning in Covariance Ion Imaging Analysis,” *J. Phys. Chem. A* **128**(22), 4548–4560 (2024). DOI: 10.1021/acs.jpca.4c00999

W. O. RAZMUS, F. ALLUM, J. HARRIES, Y. KUMAGAI, K. NAGAYA, S. BHATTACHARYYA, M. BRITTON, M. BROUARD, P. H. BUCKSBAUM, K. CHEUNG, S. W. CRANE, M. FUSHITANI, I. GABALSKI, T. GEJO, A. GHRIST, D. HEATHCOTE, Y. HIKOSAKA, A. HISHIKAWA, P. HOCKETT, E. JONES, E. KUKK, H. IWAYAMA, H. V. S. LAM, J. W. MCMANUS, D. MILESEVIC, J. MIKOSCH, S. MINEMOTO, A. NIOZU, A. J. ORR- EWING, S. OWADA, D. ROLLES, A. RUDENKO, D. TOWNSEND, K. UEDA, J. UNWIN, C. VALLANCE, A. VENKATACHALAM, S. WADA, T. WALMSLEY, E. M. WARNE, J. L. WOODHOUSE, M. BURT, M. N. R. ASHFOLD, R. S. MINNS and R. FORBES, “Exploring the Ultrafast and Isomer-Dependent Photodissociation of Iodothiophenes via Site-Selective Ionization,” *Phys. Chem. Chem. Phys.* **26**(16), 12725–12737 (2024). DOI: 10.1039/d3cp06079a

Y. UMEDA, H. ONO, K. YAMAMOTO, O. ISHIYAMA, H. IWAYAMA, E. NAKAMURA, T. YOKOYAMA, M. MIZUGUCHI and T. MIYAMACHI, “Annealing Temperature Dependence of Magnetic Properties in FeCo Ordered Alloy Thin Films Fabricated Using the Nitrogen Surfactant Effect,” *Jpn. J. Appl. Phys.* **63**(4), 04SP80 (2024). DOI: 10.35848/1347-4065/ad396b

J. UNWIN, W. O. RAZMUS, F. ALLUM, J. R. HARRIES, Y. KUMAGAI, K. NAGAYA, M. BRITTON, M. BROUARD, P. BUCKSBAUM, M. FUSHITANI, I. GABALSKI, T. GEJO, P. HOCKETT, A. J. HOWARD, H. IWAYAMA, E. KUKK, C.-S. LAM, J. MCMANUS, R. S. MINNS, A. NIOZU, S. NISHIMURO, J. NISKANEN, S. OWADA, J. D. PICKERING, D. ROLLES, J. SOMPER, K. UEDA, S.-I. WADA, T. WALMSLEY, J. L. WOODHOUSE, R. FORBES, M. BURT and E. M. WARNE, “Time-Resolved Probing of the Iodobenzene C-Band Using XUV-Induced Electron Transfer Dynamics,” *ACS Phys. Chem. Au* **4**(6), 620–631 (2024). DOI: 10.1021/acspchemau.4c00036

M. KOBAYASHI, S. YOSHIMURA, H. IWAYAMA, N. KONDO, J. TAKAHASHI, H. OTA, M. KATOH, K. KOBAYASHI and H. NAKAMURA, “First Attempt at Photoionized Plasma Production with VUV Radiation in Synchrotron Light Source UVSOR-III,” *Plasma Fusion Res.* **19**, 1301028 (2024). DOI: 10.1585/pfr.19.1301028

B-4) 招待講演

岩山洋士,「放射光で見る EUV 露光の光化学」, EUV フォトン第三回研究会, 福岡, 2025 年 3 月.

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-).

B-10) 競争的資金

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), 「放射光 X 線による心筋細胞内の超硫黄分子のバイオイメーキング」, 岩山洋士 (2024 年度).

B-11) 産学連携

共同研究, 三菱ケミカル (株), 岩山洋士 (2023 年度-2024 年度).