

## 6-5 光分子科学研究領域

### 光分子科学第二研究部門

大 森 賢 治 (教授) (2003 年 9 月 1 日着任)

素川 靖司 (助教)

DE LÉSÉLEUC, Sylvain (助教)

富田 隆文 (特任助教 (分子科学研究所特別研究員))

ZHANG, Yichi (特任研究員 (IMS フェロー))

BHARTI, Vineet (特任研究員)

國見 昌哉 (特任研究員)

溝口 道栄 (大学院生)

CHEW, Yeelai (大学院生)

TIRUMALASETTY PANDURANGA, Mahesh (大学院生)

川本 美奈子 (事務支援員)

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

A-2) 研究課題：

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

A-3) 研究活動の概略と主な成果

- a) コヒーレント制御は、物質の波動関数の位相を操作する技術である。その応用は、量子コンピューティングや結合選択的な化学反応制御といった新たなテクノロジーの開発に密接に結び付いている。コヒーレント制御を実現するための有望な戦略の一つとして、物質の波動関数に波としての光の位相を転写する方法が考えられる。例えば、二原子分子に核の振動周期よりも短い光パルスを照射すると、「振動波束」と呼ばれる局在波が結合軸上を行ったり来たりするような状態を造り出す事ができる。波束の発生に際して、数フェムト秒からアト秒のサイクルで振動する光電場の位相は波束を構成する各々の振動固有状態の量子位相として分子内に保存されるので、光学サイクルを凌駕する精度で光の位相を操作すれば波束の量子位相を操作することができる。我々はこの考えに基づき、独自に開発したアト秒位相変調器 (APM) を用いて、二つのフェムト秒レーザーパルス間の相対位相をアト秒精度で操作するとともに、このパルス対によって分子内に発生した二つの波束の相対位相を同様の精度で操作する事に成功した。さらに、これらの高度に制御され

た波束干渉の様子を、ピコメートルレベルの空間分解能とフェムト秒レベルの時間分解能で観測する事に成功した。

- b) APMを用いて、分子内の2個の波束の量子干渉を自在に制御する事に成功した。また、この高精度量子干渉をデコヒーレンス検出器として用いる事によって、熱的な分子集団や固体中の電子的なデコヒーレンスを実験的に検証した。さらに、固体パラ水素中の非局在化した量子状態 (vibron) の干渉を観測し制御する事に成功した。
- c) 光子場の振幅情報を分子の振動固有状態の量子振幅として転写する量子メモリの開発を行なった。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次元位相メモリの可能性を実証することに成功した。
- d) 量子メモリを量子コンピュータに発展させるためには、c)で行ったポピュレーション測定だけでなく、位相の測定を行う必要がある。そこで我々は、c)の第3の波束の時間発展を別のフェムト秒パルスを用いて実時間観測した。これによって、ポピュレーション情報と位相情報の両方を分子に書き込んで保存し、読み出すことが可能であることを実証した。振動固有状態の組を量子ビットとして用いる量子コンピュータの可能性が示された。さらに、分子波束を用いた量子フーリエ変換を開発した。
- e) 分子の振動波束を構成する振動固有状態の振幅と位相を強レーザー場で制御することに成功した。
- f) バルク固体中の原子の超高速2次元運動をフェムト秒単位で制御し画像化する新しい光技術を開発した。
- g) ほぼ絶対零度 (~50 ナノケルビン) まで冷やした極低温のルビジウム原子をマイクロレベルで整列させた人工原子結晶にアト秒精度のコヒーレント制御法を適用することによって、3万個の粒子の量子多体問題を近似無しに1ナノ秒 (ナノ =  $10^{-9}$ ) 以内でシミュレートできる世界唯一・最速の「超高速量子シミュレータ」を開発することに成功した。それぞれ異なる研究分野で発展してきた「超高速化学」と「極低温物理」の手法を融合させた世界初の試みであり、材料科学・固体物理・溶液化学など広範囲の領域に波及効果を及ぼす新しい方法論として期待されている。
- h) 上記の人工原子結晶とアト秒精度のコヒーレント制御法を組み合わせた世界唯一・最速の「超高速量子コンピュータ」の開発を進めている。

#### B-1) 学術論文

**M. MIZOGUCHI, Y. ZHANG, M. KUNIMI, A. TANAKA, S. TAKEDA, N. TAKEI, V. BHARTI, K. KOYASU, T. KISHIMOTO, D. JAKSCH, A. GLÄTZLE, M. KIFFNER, G. MASELLA, G. PUPILLO, M. WEIDEMÜLLER and K. OHMORI**, “Ultrafast Creation of Overlapping Rydberg Electrons in an Atomic BEC and Mott-Insulator Lattice,” *Phys. Rev. Lett.* **124**, 253201 (7 pages) (2020).

#### B-4) 招待講演

**K. OHMORI**, “Ultrafast and ultracold quantum simulator with attosecond precision,” EU FET Project COPAC Symposium “Parallel Computing Quantum Devices,” Online, March 2021.

大森賢治, 「アト秒精度の超高速量子シミュレータ開発と量子コンピュータへの応用」, 応用物理学会 春季学術講演会 シンポジウム「量子コンピュータの現状と展望」, オンライン開催, 2021年3月.

**K. OHMORI**, “Ultrafast quantum simulator with attosecond precision at ultracold temperatures,” Optics Seminars OIST, Online, December 2020.

**K. OHMORI**, “Ultrafast quantum simulator with attosecond precision at ultracold temperatures,” Fundamental Sciences and Quantum Technologies using Atomic Systems (FSQT 2020), Online, September 2020.

**K. OHMORI**, “Ultrafast quantum simulator with attosecond precision at ultracold temperatures,” India-Japan Webinar on Quantum Technologies, Organized by the Embassy of India and by the Governments of India and Japan, Online, July 2020.

#### B-5) 特許出願

取得特許US 10,824,114 B2, 「QUANTUM SIMULATOR AND QUANTUM SIMULATION METHOD」, 酒井寛人(浜松ホトニクス), 大森賢治(自然科学研究機構), 安藤太郎(浜松ホトニクス), 武井宣幸(自然科学研究機構), 豊田晴義, 大竹良幸, 兵土知子, 瀧口優(浜松ホトニクス), (登録日 2020年 11月 3日).

#### B-7) 学会および社会的活動

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–).

European Research Council (ERC), Invited Expert Referee (2007–).

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

QuantERA (<https://www.quantera.eu>), Invited Remote Reviewer (2017–).

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

ゴードン研究会議 (Gordon Research Conference: GRC) “Quantum Control of Light and Matter,” 2021 議長, 2019 副議長 (2017–).

ゴードン会議 (Gordon Research Conference: GRC) 評議会メンバー (2019–).

International Symposium on Advanced Photonics “Next frontiers to be explored by advanced light source facilities” 組織委員 (2020).

文部科学省, 学術振興会, 大学共同利用機関等の委員等

内閣官房イノベーション推進室イノベーション政策強化推進のための有識者会議委員 (2019).

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 専門委員 主査代理 (2015–).

科学技術振興機構 戦略的創造研究推進事業 (CREST) 研究領域「量子状態の高度な制御に基づく革新的量子技術基盤の創出」(研究総括: 荒川泰彦) 中間評価委員 (2020–2021).

学会誌編集委員

*Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics*, IOP, Editorial Board (2018–) and Section Editor for Quantum Technologies (2019–).

## その他

上記「B-1) 学術論文」に記載した大森グループ・超高速量子シミュレータ・量子コンピュータ・ラボの最新の研究成果(2020年6月22日出版)「金属状の量子気体：全く新しい量子シミュレーション・プラットフォーム」(*Phys. Rev. Lett.* **124**, 253201 (2020))が、UC Boulder (米国コロラド大学ボルダー校)とNIST (米国国立標準技術研究所)の量子技術関連ホームページ「CUBit Quantum Initiative」や中日新聞・朝刊・社会面を始め、国内新聞各紙15件、および日米欧を中心とする世界中のニュースメディア42件の主要記事として大きく報道された。これによって、全世界的な分子研の知名度向上と研究力アピールに貢献。

ノーベル物理学賞発表(2020年10月6日)に先立ち、大森が日本テレビ放送網株式会社・報道局社会部より自然科学研究機構本部を通じ受賞候補者として取材を受け、写真・研究発表資料等を提出。並びに発表当日の大森の動静確認と受賞時の記者会見・映像取材のため記者の分子研待機申し込み。

ノーベル物理学賞発表(2020年10月6日)に先立ち、大森がNHK本部(東京)や共同通信社よりノーベル物理学賞に関する取材を受ける。

大森賢治インタビュー記事：“今さら聞けない「そもそも量子力学って？」にトップ研究者が答えた！”(2020年8月18日)が「Yahoo! ニュース」「講談社・現代ビジネス」で大きく報道され、大森グループ・超高速量子シミュレータ・量子コンピュータ・ラボの研究内容が全国の一般市民へ周知されることによって分子研の研究力アピールに貢献。Yahoo! ニュースではアクセスランキングの上位にランクされる。

文部科学省 科学技術学術政策局 研究開発基盤課 量子研究推進室からの要請で、大森グループの超高速量子シミュレータ・量子コンピュータ開発状況を室長始め量子研究推進室メンバーにレクチャー(2020年9月2日)することによって日本政府への分子研の研究力アピールに貢献。

文部科学省 研究振興局 基礎研究振興課長の分子研訪問(2020年9月4日)に際して大森グループ・超高速量子シミュレータ・量子コンピュータ・ラボの視察に対応することによって日本政府への分子研の研究力アピールに貢献。

文部科学大臣政務官の分子研訪問(2020年7月2日)に際して大森グループ・超高速量子シミュレータ・量子コンピュータ・ラボの視察に対応することによって日本政府への分子研の研究力アピールに貢献。

内閣府 量子技術イノベーション戦略 最終報告(2020年1月)にロードマップ検討グループメンバー等として貢献するとともに、分子研・大森グループの超高速量子シミュレータが主要技術領域・重点課題としてハイライトされることによって分子研の国際的な認知度の向上に貢献。

長い伝統と世界的な権威を誇る米国のゴードン会議(Gordon Research Conference: GRC)の副議長(2019)、議長(2021)、評議会メンバー(2019-)として議長会議(2020年1月9日、シンガポール)に出席し、分子研の国際的な認知度の向上に貢献。

文部科学省 科学技術学術審議会 量子科学技術委員会の主査代理・専門委員として、量子テクノロジー開発および量子ビーム(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貢献。

## B-8) 大学での講義、客員

Heidelberg University, 客員教授(フンボルト賞受賞者), 2012年-

## B-10) 競争的資金

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–2028年).

科研費 特別推進研究,「アト秒精度の超高速コヒーレント制御を用いた量子多体ダイナミクスの探求」, 大森賢治 (2016年–2021年).

科学技術振興機構さきがけ研究(受託研究),「極低温ドレスト原子集団の超精密制御による非可換トポロジカル量子現象の探索」, 素川靖司 (2016年–2020年).

## B-11) 産学連携

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

(株)日立製作所,「超高速量子シミュレータの開発」, 大森賢治 (2018年–).

## C) 研究活動の課題と展望

今後我々の研究グループでは, APM を高感度のデコヒーレンス検出器として量子論の基礎的な検証に用いると共に, より自由度の高い量子位相操作技術への発展を試みる。そしてそれらを希薄な原子分子集団や凝縮相に適用することによって, 「アト秒量子エンジニアリング」と呼ばれる新しい領域の開拓を目指している。当面は以下の4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)

長谷川 友里 (特任研究員 (IMS フェロー))

山田 一斗 (特任研究員)

YANG, Jinpeng (研究員)

萩原 久代 (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) 機能性分子薄膜の振動状態と電子励起計測
- f) 自己組織化と分子認識機能の分光研究
- g) 分子薄膜の作製と評価：成長ダイナミクス, 構造と分子配向

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。2014 年度より新たに超短パルスレーザー光を励起源として電子状態を測定し、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開始した。UVSOR では BL7U における低エネルギー励起光を用いた界面電子状態評価を推進しつつ、BL6U における光電子運動量顕微鏡の開発と分子系への最適化を模索している。
- 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光電子運動量顕微鏡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、バンド伝導移動度を評価した。有機単結晶ヘテロ界面や温度依存測定による準粒子評価などより詳細な物性議論へ向けた発展的計測を進めている。有機無機混合ペロブスカイト系にこの技術を応用し、バンド分散関係の測定に成功した。

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。極めて高感度に光電子を捕捉し、評価可能な光電子分光装置を開発し、バンドギャップに生じる 10ppm レベルの状態密度検出に成功した。価電子帯トップバンドの状態密度分布がガウス型から指数関数型に変化し、基板フェルミ準位まで到達している様子をとらえた。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。数値解析による定量評価を実施した。
- e) 低速電子エネルギー損失分光により、機能性分子薄膜の振動状態と電子励起状態を測定し、弱相互作用による振動構造への影響を調べている。国際共同による二次元検出器を利用したフォノン分散実験を開始した。
- f) 表面場で織り成すパイ共役分子系の超格子構造や、分子薄膜の自己組織化機構の解明を目指している。また超分子系の固相膜を作製し、自己組織化や原子・分子捕獲などによる電子状態への影響を測定することで、分子認識機能について分光学的に研究している。プローブ顕微鏡実験を共同研究で推進し、局所構造と電子状態の相関研究を開始した。
- g) 有機分子薄膜や低次元物質の電子状態を議論する上で、試料調整方法の確立が鍵である。光電子放射顕微鏡 (PEEM)、走査プローブ顕微鏡 (STM)、高分解能低速電子線回折 (SPALEED)、準安定励起原子電子分光 (MAES)、X線定在波法 (XSW)、軟X線吸収分光 (NEXAFS) 等を用い、基板界面における単分子膜成長から結晶膜成長までの多様な集合状態について構造 (分子配向) と成長を観察している。

#### B-1) 学術論文

**R. TAKEUCHI, S. IZAWA, Y. HASEGAWA, R. TSURUTA, T. YAMAGUCHI, M. MEISSNER, S. IDETA, K. TANAKA, S. KERA, M. HIRAMOTO and Y. NAKAYAMA**, “Experimental Observation of Anisotropic of Valence Band Dispersion in the Dinaphtho[2,3-b:2',3'-f]thieno[3,2-b]thiophene (DNTT) Single Crystal,” *J. Phys. Chem. C* **125**, 2938–2943 (2021). DOI: 10.1021/acs.jpcc.0c09239

**Y. LIU, S. TANG, J. FAN, E. GRACIA-ESPINO, J. YANG, X. LIU, S. KERA, M. FAHLMAN, C. LARSEN, T. WÅGGERBERG, L. EDMAN and J. WANG**, “High-Solubility Perovskite Quantum Dots for Solution-Processed Light-Emission Devices,” *ACS Appl. Nano Mater.* **4**(2), 1162–1174 (2021). DOI: 10.1021/acsanm.0c02797

**J. YANG, M. MEISSNER, T. YAMAGUCHI, B. XI, K. TAKAHASHI, S. ABDULLAH, X. LIU, H. YOSHIDA, M. FAHLMAN and S. KERA**, “Temperature-Dependent Band Structure Evolution Determined by Surface Geometry in Organic Halide Perovskite Single Crystals,” *Phys. Rev. B* **102**, 245101 (6 pages) (2020). DOI: 10.1103/PhysRevB.102.245101

**F. MATSUI, S. MAKITA, H. MATSUDA, T. YANO, E. NAKAMURA, K. TANAKA, S. SUGA and S. KERA**, “Photoelectron Momentum Microscope at BL6U of UVSOR-III Synchrotron,” *Jpn. J. Appl. Phys.* **59**, 067001 (9 pages) (2020). DOI: 10.35848/1347-4065/ab9184

**T. KIRCHHUEBEL, S. KERA, T. MUNAKATA, N. UENO, R. SHIRAIISHI, T. YAMAGUCHI, K. YONEZAWA, T. UEBA, F. BUSSOLOTTI, J. YANG, T. YAMADA, R. MORI, S. KUNIEDA, T. HÜMPFNER, M. GRUENEWALD, R. FORKER and T. FRITZ**, “The Role of Initial and Final States in Molecular Spectroscopies—the Example of Tetraphenyldibenzoperiflanthene (DBP) on Graphite,” *J. Phys. Chem. C* **124**, 19622–19638 (2020). DOI: 10.1021/acs.jpcc.0c05448

**F. MATSUI, S. MAKITA, H. MATSUDA, T. UEBA, T. HORIGOME, H. YAMANE, K. TANAKA, S. KERA and N. KOSUGI**, “Bulk and Surface Band Dispersion Mapping of the Au(111) Surface by Acceptance-Cone Tunable PES System,” *e-J. Surf. Sci. Nanotechnol.* **18**, 18–23 (2020). DOI: 10.1380/ejsnt.2020.18

**G. D'AVINO, S. DUHM, R. DELLA VALLE, G. HEIMEL, M. OEHZELT, S. KERA, N. UENO, D. BELJONNE and I. SALZMANN**, “Electrostatic Interactions Shape Molecular Organization and Electronic Structure of Organic Semiconductor Blends,” *Chem. Mater.* **32**, 1261–1271 (2020). DOI: 10.1021/acs.chemmater.9b04763

**J. YANG, S.-X. REN, T. YAMAGUCHI, M. MEISSNER, L. CHENG, L. ZHOU, S. IDETA, K. TANAKA and S. KERA**, “Valence Band Dispersion Measured in the Surface Normal Direction of CH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub>PbI<sub>3</sub> Single Crystals,” *Appl. Phys. Express* **13**, 011009 (4 pages) (2020). DOI: 10.7567/1882-0786/ab6134

B-3) 総説, 著書

**Y. NAKAYAMA, S. KERA and N. UENO**, “Photoelectron Spectroscopy on Single Crystals of Organic Semiconductors: Experimental Electronic Band Structure for Optoelectronic Properties,” *J. Mater. Chem. C* **8**, 9090–9132 (2020). [review] DOI: 10.1039/D0TC00891

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–).

日本放射光学会評議員 (2020–).

学会の組織委員等

第 33 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 (2020).

The 10<sup>th</sup> Workshop on Advanced Spectroscopy of Organic Materials for Electronic Applications (ASOMEA-X), International Committee (Tokyo, Japan 2020).

文部科学省, 学術振興会, 大学共同利用機関等の委員等

東京大学物性研究所軌道放射物性研究施設運営委員会委員 (2018–).

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

学会誌編集委員

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

B-8) 大学での講義, 客員

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

千葉大学大学院融合科学研究科, 連携客員教授, 2014 年 9 月–.

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

蘇州大学, 客員教授, 2014 年 4 月–.

#### B-10) 競争的資金

科研費基盤研究(A),「分子集合体における電子局在性とその電子-フォノン相互作用の影響」,解良 聡(2018年-).  
科研費国際共同研究加速基金(国際共同研究強化(B)),「光電子波数顕微鏡法で切り拓くナノスピン・オービトロニクス」,解良 聡(2019年-).

#### C) 研究活動の課題と展望

機能性分子に代表される弱相互作用物質系の高配向試料作製法と精密電子状態計測で蓄積したノウハウを集結し、分子集合体における「電子の真の姿を見出すこと」でその機能・物性の根源を理解することを主眼として進めている。シンクロトン放射光を利用した各先端分光法(角度分解光電子分光法, 共鳴光電子分光法, 軟X線吸収分光法, X線定在波分光法など), 高感度紫外光電子分光法, 気相光電子分光法, レーザー励起二光子光電子分光法, 低エネルギー逆光電子分光法, スポット分析型低速電子線回折法を用いた実験を進めている。2020年度は, マンパワー不足にCOVID-19問題が加わり実験活動が停滞した。試料作製条件の探査等の地道な予備実験の重要性を再認識した。次年度より着任する助教と共に研究アクティビティを再始動する。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。2020年2月に放射光利用実験の新規軸として, 光電子運動量顕微鏡装置を導入した。主任研究員である松井らを中心に装置開発を進めている。欧米からの遅れを取り戻すべく基本設計に独自性を含めた発展的な計画としており, 2021年度に逐次機能追加による装置更新作業を進め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および国際共同研究加速基金(B)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。解良グループの寄与としては分子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。国内外で類似の新型装置の導入が計画されているため, 短期間にUVSOR 施設の地位を確立し, 優位性を確かなものにする必要がある。長期計画として次世代研究施設 UVSOR-IV(仮)計画の具体化作業を開始した。今後は国内外施設およびコミュニティの情報収集に注力する。

## 長坂 将成 (助教) (2007年4月1日着任)

萩原 久代 (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液体の局所構造解析
- b) 低エネルギー領域の軟X線吸収分光法の開発
- c) 軟X線吸収分光法による光化学系 II タンパク質の構造解析
- d) 溶液光化学反応の超高速軟X線吸収分光法の開発

A-3) 研究活動の概略と主な成果

- a) 1 keV 以下の軟X線領域には炭素, 窒素, 酸素の K 吸収端や遷移金属の L 吸収端が存在するため, 液体の局所構造を元素選択的に調べられる有望な光領域である。我々は 20 ~ 2000 nm の範囲で液体層を精密に厚さ制御する手法を独自に開発することで, 液体の軟X線吸収分光 (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, 異なる元素ごとに液中の分子間相互作用を調べる手法を確立した。これにより, 異なる濃度のアセトニトリル水溶液の局所構造を, 溶質 (C, N-K) と溶媒 (O-K) の寄与を分離して観測して, 水とアセトニトリルの双極子相互作用により, 中間の濃度領域で微小不均一性が現れることを明らかにした。
- b) 200 eV 以下の低エネルギー領域には, Li, B の K 吸収端や Si, P, S, Cl の L 吸収端が存在するため, 化学研究において重要である。しかしながら, 低エネルギー領域では, 目的の一次回折光 (160 eV 等) の透過率が高次回折光 (320 eV, 480 eV 等) と比較して極端に小さく, 一次回折光の強度変化が高次回折光の寄与に埋もれてしまうため, XAS 測定は不可能であった。我々はアルゴンガスを用いると, Ar-L 吸収端 (240 eV) により効率良く高次回折光を除去して, 60 ~ 240 eV の範囲で一次回折光の透過吸収スペクトルを測定できることを見出した。これは, 「水の窓領域」に次ぐ, 新たな軟X線透過窓である。また, 一次回折光と高次回折光の光エネルギー差に着目して, 軟X線を金基板に照射して, 放出される Au 4f 光電子の運動エネルギー分析により, 一次回折光の強度だけを計量する新しいタイプの軟X線検出器を開発した。
- c) 光化学系 II (PSII) タンパク質の酸素発生中心  $\text{Mn}_4\text{CaO}_5$  クラスターの局所構造解析を目指して, Mn-L, Ca-L, O-K 吸収端 XAS 測定を行った。液体層を構成する  $\text{Si}_3\text{N}_4$  膜に PSII タンパク質包含脂質二重膜を調製することで, PSII が光活性を維持した状態で  $\text{Si}_3\text{N}_4$  膜への担持に成功した。これにより, 光活性を維持した状態の PSII の  $\text{Mn}_4\text{CaO}_5$  クラスターの構造を, 主要な元素を網羅して明らかにできる。
- d) 放射光から発生する 70 ps の時間幅の軟X線パルスと 100 fs スケールの可視・紫外光レーザーの同期による, 溶液光化学反応の超高速 XAS 測定手法の開発を行った。今後は, 開発した手法を用いて, 鉄錯体溶液の紫外光励起過程の超高速 XAS 測定を行うことで, 金属-配位子間電子遷移における, 中心金属 (Fe-L) と配位子 (C, N-K) の両方の局所電子状態変化の解明を目指している。

B-1) 学術論文

**M. NAGASAKA, H. YUZAWA and N. KOSUGI**, “Microheterogeneity in Aqueous Acetonitrile Solution Probed by Soft X-Ray Absorption Spectroscopy,” *J. Phys. Chem. B* **124**, 1259–1265 (2020). DOI: 10.1021/acs.jpcc.0c00551

**M. NAGASAKA**, “Soft X-Ray Absorption Spectroscopy in the Low-Energy Region Explored Using an Argon Gas Window,” *J. Synchrotron Radiat.* **27**, 959–962 (2020). DOI: 10.1107/S1600577520005883

**M. NAGASAKA and H. IWAYAMA**, “Photoelectron Based Soft X-Ray Detector for Removing High Order X Rays,” *Rev. Sci. Instrum.* **91**, 083103 (7 pages) (2020). DOI: 10.1063/5.0011302

**T. TSUKAMOTO, A. KUZUME, M. NAGASAKA, T. KAMBE and K. YAMAMOTO**, “Quantum Materials Exploration by Sequential Screening Technique of Heteroatomicity,” *J. Am. Chem. Soc.* **142**, 19078–19084 (2020). DOI: 10.1021/jacs.0c06653

**S. TSUNEKAWA, F. YAMAMOTO, K.-H. WANG, M. NAGASAKA, H. YUZAWA, S. TAKAKUSAGI, H. KONDOH, K. ASAKURA, T. KAWAI and M. YOSHIDA**, “Operando Observations of a Manganese Oxide Electrocatalyst for Water Oxidation Using Hard/Tender/Soft X-Ray Absorption Spectroscopy,” *J. Phys. Chem. C* **124**, 23611–23618 (2020). DOI: 10.1021/acs.jpcc.0c05571

**H. IWAYAMA, M. NAGASAKA, I. INOUE, S. OWADA, M. YABASHI and J. R. HARRIES**, “Demonstration of Transmission Mode Soft X-Ray NEXAFS Using Third- and Fifth-Order Harmonics of FEL Radiation at SACLA BL1,” *Appl. Sci.* **10**, 7852 (7 pages) (2020). DOI: 10.3390/app10217852

**G. MICHALOUDI, J. J. LIN, H. YUZAWA, M. NAGASAKA, M. HUTTULA, N. KOSUGI, T. KURTÉN, M. PATANEN and N. L. PRISLE**, “Aqueous-Phase Behavior of Glyoxal and Methylglyoxal Observed with Carbon and Oxygen K-Edge X-Ray Absorption Spectroscopy,” *Atmos. Chem. Phys.* **21**, 2881–2894 (2021). DOI: 10.5194/acp-21-2881-2021

**H. WANG, M. HE, Y. LI, H. ZHANG, D. YANG, M. NAGASAKA, Z. LV, Z. GUAN, Y. CAO, F. GONG, Z. ZHOU, J. ZHU, S. SAMANTA, A. D. CHOWDHURY and A. LEI**, “Electrochemical Oxidation Enables Regioselective and Scalable  $\alpha$ -C(sp<sup>3</sup>)-H Acyloxylation of Sulfides,” *J. Am. Chem. Soc.* **143**, 3628–3637 (2021). DOI: 10.1021/jacs.1c00288

B-3) 総説, 著書

**M. NAGASAKA, H. YUZAWA and N. KOSUGI**, “Soft X-Ray Absorption Spectroscopy of Liquids for Understanding Chemical Processes in Solution,” *Anal. Sci.* **36**, 95–105 (2020). DOI: 10.2116/analsci.19R005

長坂将成, 小杉信博, 「精密厚さ制御による液体の軟X線透過吸収分光測定」, *日本物理学会誌* **75**, 496–503 (2020).

B-4) 招待講演

**M. NAGASAKA**, “Molecular Interactions in Liquids Probed by Soft X-Ray Absorption Spectroscopy in Transmission Mode,” Conference on Laser and Synchrotron Radiation Combination Experiment 2020 (LSC 2020), OPTICS & PHOTONICS International Congress 2020, Online, April 2020.

長坂将成, 「放射光を活用した溶液の軟X線吸収分光法の開発と応用」, 茨城大学 令和2年度第1回量子線科学セミナー, オンライン開催, 2020年7月.

長坂将成, 「液体の軟X線吸収分光法のバイオ研究への展望」, 電気学会 光・量子デバイス研究会「医療・バイオ研究に有効なインターフェースと量子ビーム応用の未来」, オンライン開催, 2020年12月.

長坂将成,「軟X線吸収分光法による溶液の化学現象の解明」,第34回日本放射光学会年会,オンライン開催,2021年1月.

B-6) 受賞,表彰

**M. NAGASAKA, H. YUZAWA and N. KOSUGI**, *Analytical Sciences Hot Article Award* (2020).

B-7) 学会および社会的活動

学協会役員等

日本放射光学会行事委員 (2013–2015, 2017–2019).

B-10) 競争的資金

科研費基盤研究(B),「超高速軟X線吸収分光法による光化学系IIタンパク質の光合成反応の機構解明」,長坂将成 (2019年–2021年).

自然科学研究機構新分野創成センター先端光科学研究分野プロジェクト,「軟X線吸収分光法による光化学系IIタンパク質の酸素発生中心の構造解析」,長坂将成 (2019年).

公益財団法人村田学術振興財団研究助成,「軟X線吸収分光法によるリチウムイオン電池のオペランド測定」,長坂将成 (2019年–2020年).

公益財団法人ソルト・サイエンス研究財団一般公募研究助成,「軟X線吸収分光法による塩水溶液の水和構造の元素選択的観測」,長坂将成 (2020年).

自然科学研究機構新分野創成センター先端光科学研究分野プロジェクト,「軟X線吸収分光法による光化学系IIタンパク質の酸素発生中心の構造解析」,長坂将成 (2020年).

科研費挑戦的研究(萌芽),「生体膜へのイオン配位状態の分子レベルでの理解:水中X線吸収分光」(代表:手老龍吾),長坂将成(研究分担者) (2020年–2021年).

自然科学研究機構分野融合型共同研究事業,「マイクロ波による化学反応加速機構の解明」,(代表:高谷 光),長坂将成(研究分担者) (2020年–2021年).

## 光源加速器開発研究部門（極端紫外光研究施設）

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

藤本 将輝（助教）  
木村 信之介（特別共同利用研究員）  
小杉 直（特別共同利用研究員）  
中尾 海斗（特別共同利用研究員）  
堀 遥輝（特別共同利用研究員）  
稲垣 いつ子（事務支援員）  
石原 麻由美（事務支援員）

A-1) 専門領域：ビーム物理学，加速器科学，放射光科学

A-2) 研究課題：

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

A-3) 研究活動の概略と主な成果

- a) シンクロトロン光源 UVSOR の性能向上に向けた開発研究を継続している。電子ビーム光学系の最適化による電子ビーム輝度の大幅な向上，電子ビーム強度を一定に保つトップアップ入射の導入などに成功し，低エネルギー放射光源としては世界最高水準の光源性能を実現した。高輝度放射光発生のために真空封止アンジュレータ3台，可変偏光型アンジュレータ3台を設計・建設し，稼働させた。UVSOR の将来計画に関する設計研究に着手し，既存加速器の更なる高度化の可能性，新しい光源加速器の検討を進めている。
- b) 自由電子レーザーに関する研究を継続している。蓄積リング自由電子レーザーとして世界最高の出力を記録した。また，共振器型自由電子レーザーに関する基礎研究を進め，レーザー発振のダイナミクスやフィードバック制御に関する先駆的な成果を上げた。外部レーザーを用いて電子パルス上に微細な密度構造を形成することでコヒーレント放射光を極紫外領域やテラヘルツ領域において生成する研究を継続している。この手法により一様磁場中から準単色テラヘルツ放射光を発生することに世界に先駆けて成功した。電子パルス上に形成された密度構造の時間発展に関するビームダイナミクス研究により先駆的な成果を上げた。
- c) 高エネルギー電子ビームによる光渦の生成に成功し，その原理の解明に世界に先駆けて成功した。自然界での光渦の生成の可能性について，研究を進めると共に，深紫外・真空紫外領域での物質系と光渦の相互作用に関する基礎研究を進めている。
- d) 外部レーザーと高エネルギー電子線を用いた逆コンプトン散乱によるエネルギー可変，偏光可変の極短ガンマ線パルス発生に関する研究を継続している。パルス幅数ピコ秒以下の超短ガンマ線パルスの生成，エネルギー可変性の実証に成功した。光陰極を用いた電子源の開発を進めている。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。

B-1) 学術論文

**L. GUO, H. YAMAGUCHI, M. YAMAMOTO, F. MATSUI, G. WANG, F. LIU, P. YANG, E. R. BATISTA, N. A. MOODY, Y. TAKASHIMA and M. KATOH**, “Graphene as Reusable Substrate for Bialkali Photocathodes,” *Appl. Phys. Lett.* **116**, 251903 (5 pages) (2020). DOI: 10.1063/5.0010816

**K. FUJIMORI, M. KITaura, Y. TAIRA, M. FUJIMOTO, H. ZEN, S. WATANABE, K. KAMADA, Y. OKANO, M. KATOH, M. HOSAKA, J. YAMAZAKI, T. HIRADE, Y. KOBAYASHI and A. OHNISHI**, “Visualizing Cation Vacancies in Ce:Gd<sub>3</sub>Al<sub>2</sub>Ga<sub>3</sub>O<sub>12</sub> Scintillators by Gamma-Ray-Induced Positron Annihilation Lifetime Spectroscopy,” *Appl. Phys. Express* **13**, 085505 (4 pages) (2020). DOI: 10.35848/1882-0786/aba0dd

**K. ALI, H. OHGAKI, H. ZEN, T. KII, T. HAYAKAWA, T. SHIZUMA, H. TOYOKAWA, Y. TAIRA, V. IANCU, G. TURTURICA, C. ALEXANDRU UR, M. FUJIMOTO and M. KATOH**, “Selective Isotope CT Imaging Based on Nuclear Resonance Fluorescence Transmission Method,” *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **67**, 1976–1984 (2020). DOI: 10.1109/tns.2020.3004565

**T. KANEYASU, Y. HIKOSAKA, M. FUJIMOTO, H. IWAYAMA and M. KATOH**, “Polarization Control in a Crossed Undulator without a Monochromator,” *New J. Phys.* **22**, 083062 (8 pages) (2020). DOI: 10.1088/1367-2630/aba730

**Y. TAIRA, M. FUJIMOTO, S. RI, M. HOSAKA and M. KATOH**, “Measurement of the Phase Structure of Elliptically Polarized Undulator Radiation,” *New J. Phys.* **22**, 093061 (12 pages) (2020). DOI: 10.1088/1367-2630/abb54a

**T. KANEYASU, Y. HIKOSAKA, M. FUJIMOTO, H. IWAYAMA and M. KATOH**, “Electron Wave Packet Interference in Atomic Inner-Shell Excitation,” *Phys. Rev. Lett.* **126**, 113202 (6 pages) (2021). DOI: 10.1103/PhysRevLett.126.113202

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 (2008–2009, 2014–2017, 2020–).

日本放射光学会評議員 (2006–2009, 2010–2012, 2013–2015, 2016–2018, 2019–).

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) 大学での講義, 客員

名古屋大学シンクロトン光研究センター, 客員教授, 2018年4月–.

高エネルギー加速器研究機構加速器研究施設, 客員教授, 2018年4月–.

B-10) 競争的資金

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

科研費基盤研究(A), 「直線偏光ガンマ線のデルブリュック散乱」(代表: 早川岳人), 加藤政博 (研究分担者) (2018年–2020年).

科研費基盤研究(B),「LCS-NRFによる同位体3Dイメージング法の基盤確立」(代表:大垣英明),加藤政博(研究分担者)(2018年-2020年).

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トロン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探るとともに,全く新しい加速器の建設についても検討を進める。

自由電子レーザー及び外部レーザーを用いたコンプトン散乱ガンマ線の発生とその利用法の開拓に取り組んできたが,材料評価などへの応用は実用段階に入りつつある。今後は,特異な性質を持つガンマ線発生法の開拓に重心を移す。

放射光による光渦の生成については,その光学的特性の詳細評価,さらに放射光光渦同士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。今後は応用展開の開拓に重心を移す。また,二連アンジュレータを用いた孤立原子系の量子状態制御について先駆的な成果が出ており,こちらもさらに幅広く応用展開の可能性を探る。

## 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）

SALEHI, Elham（特任研究員）

神山 和輝（特別共同利用研究員）

山本 涼平（特別共同利用研究員）

稲垣 いつ子（事務支援員）

石原 麻由美（事務支援員）

A-1) 専門領域：ガンマ線計測，陽電子計測，光渦計測

A-2) 研究課題：

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

A-3) 研究活動の概略と主な成果

- a) 世界の放射光施設でも UVSOR の独自技術であるのは、超短パルスガンマ線を用いた陽電子計測によるバルク材料のナノメートル欠陥分析に関する研究である。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、超短パルスガンマ線を発生し、そのパルス幅は 5 ps と計算される。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、陽電子計測による材料中の欠陥分析を行っている。陽電子は、対生成と呼ばれる現象によって材料内部でガンマ線から発生し、材料中の欠陥に捕獲される。欠陥の大きさによって陽電子の寿命が変化するために、陽電子寿命を測定することで材料中の欠陥を非破壊で分析することができる。さらに、ガンマ線は物質に対する透過率が高いため厚さ数 cm のバルク材料の欠陥分析を行うことが可能である。本分析技術は、現在 UVSOR の施設利用として利用可能である。ユーザー利用の研究成果が徐々に始まり、ユーザー執筆の論文が今年 1 報 *Applied Physics Express* に掲載された。
- b) 本研究課題では、らせん波面を形成するエネルギー sub-MeV 以上のガンマ線渦を世界に先駆けて開発し、素粒子や原子核、物性研究への応用開拓を行うことを最終目標としている。このガンマ線は、位相構造がらせんであるために軌道角運動量（Orbital angular momentum: OAM）を運ぶということに大きな特徴がある。ガンマ線渦の発生には、平らが初めて見出した電子ビームと高強度円偏光レーザーの非線形逆トムソン散乱法を用いる。2019 年度から関西光科学研究所において高強度レーザーと 150MeV マイクロトロン電子加速器を用いた実験を行っている。今年度も引き続き実験を行う予定であり、光渦の特徴である空間分布が円環になることを測定することを目標としている。一方で、UVSOR の円偏光アンジュレータを用いて発生できる紫外光領域の光渦の計測技術開発も行っている。アンジュレータから発生する光渦に関しては世界の他の施設でも行われており、円偏光モードでの計測だけが行われていた。平らの計算により、楕円偏光モードでも位相構造をもつ光渦が発生することが新たに分かり、UVSOR で実証実験を行った。光渦を 2 重スリットに通したときの干渉縞をサンプリングモアレ法によって位相解析することで光渦の位相構造を測定し、計算との比較を行った。この結果に関して論文が *New Journal of Physics* に掲載された。

B-1) 学術論文

**K. FUJIMORI, M. KITaura, Y. TAIRA, M. FUJIMOTO, H. ZEN, S. WATANABE, K. KAMADA, Y. OKANO, M. KATOH, M. HOSAKA, J. YAMAZAKI, T. HIRADE, Y. KOBAYASHI and A. OHNISHI**, “Visualizing Cation Vacancies in Ce:Gd<sub>3</sub>Al<sub>2</sub>Ga<sub>3</sub>O<sub>12</sub> Scintillators by Gamma-Ray Induced Positron Annihilation Lifetime Spectroscopy,” *Appl. Phys. Express* **13**, 085505 (4 pages) (2020). doi: 10.35848/1882-0786/aba0dd

**Y. TAIRA, M. FUJIMOTO, S. RI, M. HOSAKA and M. KATOH**, “Measurement of the Phase Structure of Elliptically Polarized Undulator Radiation,” *New J. Phys.* **22**, 093061 (12 pages) (2020). doi: 10.1088/1367-2630/abb54a

B-4) 招待講演

平 義隆, 「アンジュレータを用いた光渦の発生」, 研究会「光の軌道角運動量の発生機構と物質相互作用の理解」, 2021年3月.

B-7) 学会および社会的活動

学協会役員等

日本物理学会 ビーム物理領域運営委員 (2020–2021).

ビーム物理研究会 若手の会 幹事 (2020–).

ビーム物理研究会 若手の会 オブザーバー (2019–2020).

学会の組織委員等

日本加速器学会第 18 回年会組織委員 (2020–2021).

日本加速器学会第 18 回年会プログラム委員 (2021).

学会誌編集委員

日本放射光学会誌「放射光」編集委員 (2019–2021).

B-8) 大学での講義, 客員

理化学研究所, 客員研究員, 2018年9月–.

B-10) 競争的資金

科研費基盤研究(B) (一般), 「非線形逆コンプトン散乱による軌道角運動量を運ぶ光子の生成」, 平 義隆 (2018年–2021年).

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

C) 研究活動の課題と展望

超短パルスガンマ線の利用研究に関しては, 現状ガンマ線の強度が低い点が課題である。来年度初めに新しいレーザーチャンバーをUVSOR 電子蓄積リングに導入し, ガンマ線の強度を 20 倍以上向上する予定である。また, 陽電子計測に関しては, 現在寿命のみの測定が可能であるが, 寿命運動量相関測定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。計算上は数ピコ秒のガンマ線が発生していると考えられるが, 超短パルスガンマ線のパルス幅計測手法の開発も行う。光渦に関しては, ガンマ線の波面計測の技術を開発し, ガンマ線渦が実験的に発生していることを実証する。

## 松 井 文 彦（主任研究員）（2018 年 4 月 1 日着任）

松田 博之（特任研究員）  
稲垣 いつ子（事務支援員）  
石原 麻由美（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) 電子分光装置の新規開発を突破口とした UVSOR の高度化
- b) 運動量分解光電子分光に関する新規現象を基盤とした測定手法確立
- c) 新奇表面電子物性・化学特性の応用展開

A-3) 研究活動の概略と主な成果

- a) ① UVSOR オリジナルの Momentum Microscope (MM) 拠点構築を主務とする。MM は空間・波数空間・エネルギーの幅広い範囲での高分解能測定を可能にするユニークな分析器である。電子物性研究に有力な VUV/EUV 領域での高強度・可偏光などといった UVSOR の光源特性を活かした測定機能を実装する MM の導入を実現し、論文発表・プレスリリースを通じて成果を発信した。② 並行して全天球エネルギー・スピン分析器を考案し特許出願した。上記の MM は  $3 \text{ \AA}^{-1}$  までの波数空間の一括測定ができるため価電子帯研究で有効な運動エネルギー 36 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  $15^\circ$  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次元ベクトル解析すること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礎となる。
- b) 連続的なエネルギー可変性が放射光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  $\pi$  バンドが選択的に励起される様子を波数空間上で可視化したが、共鳴 Auger 電子スペクトルに価電子帯分散があらわれる現象の発見は重要でありグラフェンから  $\pi$  共役系分子への展開に歩を進め、お家芸としての共鳴光電子回折法を確立しつつある。④光エネルギー可変性を活かし  $k_z$  分散測定や偏光特性を活かした原子軌道波動関数解析の知見は BL6U での共同研究推進の基盤である。
- c) 光電子回折・分光を用いて典型的な高温超伝導体 Bi2212 や代表的騒擾物質 TiSe<sub>2</sub> の相転移前後の電子状態をとらえた。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

**F. MATSUI, S. MAKITA, H. MATSUDA, T. YANO, E. NAKAMURA, K. TANAKA, S. SUGA and S. KERA,** “Photoelectron Momentum Microscope at BL6U of UVSOR-III Synchrotron,” *Jpn. J. Appl. Phys.* **59**, 067001 (9 pages) (2020). doi: 10.35848/1347-4065/ab9184

**H. MATSUDA and F. MATSUI,** “90°-Deflection Imaging Electron Analyzer for Measuring Wide 2D Angular Distribution and Perpendicular Spin Texture,” *J. Electron Spectrosc. Relat. Phenom.* **245**, 147001 (11 pages) (2020). doi: 10.1016/j.elspec.2020.147001

**H. MATSUDA and F. MATSUI,** “Principle and Basic Design of Omnidirectional Photoelectron Acceptance Lens,” *Jpn. J. Appl. Phys.* **59**, 046503 (11 pages) (2020). doi: 10.35848/1347-4065/ab7bac

**T. MATSUSHITA T. MURO, T. YOKOYA, K. TERASHIMA, Y. KATO, H. MATSUI, N. MAEJIMA, Y. HASHIMOTO and F. MATSUI,** “Theory for High-Angular-Resolution Photoelectron Holograms Considering the Inelastic Mean Free Path and the Formation Mechanism of Quasi-Kikuchi Band,” *Phys. Status Solidi B* **257**, 2000117 (5 pages) (2020). doi: 10.1002/pssb.202000117

**T. MATSUSHITA, T. MURO, F. MATSUI, N. HAPPO and K. HAYASHI,** “Data Processing for Atomic Resolution Holography,” *Jpn. J. Appl. Phys.* **59**, 020502 (10 pages) (2020). doi: 10.7567/1347-4065/ab4b3a

**I. I. OGORODNIKOV, M. V. KUZNETSOV, F. MATSUI, D. Y. USACHOV and L. V. YASHINA,** “Enhanced Surface Sensitivity of X-Ray Photoelectron Holography through the Example of Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>(111) Surface,” *Appl. Surf. Sci.* **505**, 144531 (6 pages) (2020). doi: 10.1016/j.apsusc.2019.144531

**L. GUO, H. YAMAGUCHI, M. YAMAMOTO, F. MATSUI, G. WANG, F. LIU, P. YANG, E. R. BATISTA, N. A. MOODY, Y. TAKASHIMA and M. KATOH,** “Graphene as Reusable Substrate for Bialkali Photocathodes,” *Appl. Phys. Lett.* **116**, 251903 (5 pages) (2020). doi: 10.1063/5.0010816

**F. MATSUI, S. MAKITA, H. MATSUDA, T. UEBA, T. HORIGOME, H. YAMANE, K. TANAKA, S. KERA and N. KOSUGI,** “Bulk and Surface Band Dispersion Mapping of the Au(111) Surface by Acceptance-Cone Tunable PES System,” *e-J. Surf. Sci. Nanotechnol.* **18**, 18–23 (2020). doi: 10.1380/ejsnt.2020.18

B-3) 総説, 著書

松井文彦, 松下智裕, 大門寛, 「光電子分光詳論」, 丸善出版株式会社; 東京, pp. 1–298 (2020). ISBN 978-4-621-30537-9

B-4) 招待講演

松井文彦, 「光電子を用いた2次元層状物質の原子レベル解析」, 日本学術振興会マイクロビームアナリシス第141委員会研究会, Nagoya (Japan), February 2020.

B-5) 特許出願

F. MATSUI and H. MATSUDA, “Electrostatic Lens, and Parallel Beam Generation Device and Parallel Beam Convergence Device which use Electrostatic Lens and Collimator,” US 10614992, 2020.04.07 patented.

PCT/JP2020/047288, 「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.

特願 2020-118687,「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, およびスピン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), 2020年.

#### B-6) 受賞, 表彰

松井文彦, 永井科学技術財団永井奨励賞 (2021).

#### B-7) 学会および社会的活動

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-).

12<sup>th</sup> International Symposium on Atomic Level Characterizations for New Materials and Devices '19 出版委員, プログラム委員 (2018-2020).

14<sup>th</sup> International Conference on Synchrotron Radiation Instrumentation (SRI2021), Scientific Program Committee (2020-2021).

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-).

学会誌編集委員

日本表面真空学会出版委員 (2013-).

その他

出前授業「超伝導って何? 最先端研究施設から出前実験」岡崎市立岩津中学校 (2020).

出前授業「超伝導って何? 最先端研究施設から出前実験」岡崎市立福岡中学校 (2020).

#### B-10) 競争的資金

科研費基盤研究(B),「軌道磁気量子数計測法の確立と低次元電子物性研究への応用」, 松井文彦 (2017年-2020年).

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

## 大 東 琢 治 (助教) (2011 年 8 月 1 日着任)

稲垣 いつ子 (事務支援員)

石原 麻由美 (事務支援員)

A-1) 専門領域：X線光学

A-2) 研究課題：

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

A-3) 研究活動の概略と主な成果

- a) 高次光フィルター機能を備えた高効率の集光光学素子 (Fresnel zone plate, FZP) の開発により, リチウム K 吸収端 (~55 eV) の高分解能吸収分光を可能とした。この際にビームラインの高次光強度を定量的に測定する手法の開発を行い, 含有高次光強度を測定したところ, 0.1%以下まで除去されていることがわかった。これに伴って, FZP の回折限界である空間分可能 72 nm を達成した。
- b) 昨年度まで開発を行ってきた大気非曝露試料搬送システムを用いて, 100% 充電状態のリチウムイオン電池の, 大気曝露下での劣化条件のプロセスの解明を行った。

B-1) 学術論文

**T. OHIGASHI, H. YUZAWA and N. KOSUGI**, “A Low-Pass Filtering Fresnel Zone Plate for Soft X-Ray Microscopic Analysis down to the Lithium K-Edge Region,” *Rev. Sci. Instrum.* **91**, 103110 (5 pages) (2020). DOI: 10.1063/5.0020956

**Y. HIGAKI, K. KAMITANI, T. OHIGASHI, T. HAYAKAWA and A. TAKAHARA**, “Exploring the Mesoscopic Morphology in Mussel Adhesive Proteins by Soft X-Ray Spectromicroscopy,” *Macromolecules* **22**, 1256–1260 (2021). DOI: acs.biomac.0c01746

**M. UESUGI, K. HIRAHARA, K. UESUGI, A. TAKEUCHI, Y. KAROUJI, N. SHIRAI, M. ITO, N. TOMIOKA, T. OHIGASHI, A. YAMAGUCHI, T. YADA and M. ABE**, “Development of a Sample Holder for Synchrotron Radiation-Based Computed Tomography and Diffraction Analysis of Extraterrestrial Materials,” *Rev. Sci. Instrum.* **91**, 035107 (8 pages) (2020). DOI: 10.1063/1.5122672

**Y. R. LU, Y. F. WANG, Y. C. HUANG, J. L. CHEN, C. L. CHEN, Y. C. LIN, Y. G. LIN, W. F. PONG, T. OHIGASHI, N. KOSUGI, C. H. KUO, W. C. CHOW and C. L. DONG**, “Effect of Fe<sub>2</sub>Co<sub>3</sub> Coating on ZnO Nanowires in Photoelectrochemical Water Splitting: A Synchrotron X-Ray Spectroscopic and Spectromicroscopic Investigation,” *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* **209**, 110469 (7 pages) (2020). DOI: j.solmat.2020.110469

**T. MANSIKKALA, M. PATANEN, A. KARKONEN, R. KORPINEN, A. PRANOVICH, T. OHIGASHI, S. SWARAJI, J. SEITOSONEN, J. RUOKOLAINEN, M. HUTTULA, P. SARANPAA and R. PIISPANEN**, “Lignans in Knotwood of Norway Spruce: Localisation with Soft X-Ray Microscopy and Scanning Transmission Electron Microscopy with Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy,” *Molecules* **25**, 2997 (22 pages) (2020). DOI: molecules25132997

M. ITO, N. TOMIOKA, K. UESUGI, M. UESUGI, Y. KODAMA, I. SAKURAI, I. OKADA, T. OHIGASHI, H. YUZAWA, A. YAMAGUCHI, N. IMAE, Y. KAROUJI, N. SHIRAI, T. YADA and M. ABE, “The Universal Sample Holders of Microanalytical Instruments of FIB, TEM, NanoSIMS, and STXM-NEXAFS for the Coordinate Analysis of Extraterrestrial Materials,” *Earth, Planets Space* **72**, 133 (11 pages) (2020). DOI: s40623-020-01267-2

B-3) 総説, 著書

大東琢治, 「有機物顕微分析の最先端——ドラッグデリバリーからはやぶさ2まで——」, 第29回日本有病者歯科医療特別号, 10–12 (2020).

B-4) 招待講演

大東琢治, 「はやぶさ2の帰還, そして分析へ」, 神戸常磐大学第4回サイエンスカフェ, オンライン開催, 2021年3月.

大東琢治, 「有機物顕微分析の最先端——ドラッグデリバリーからはやぶさ2まで——」, 第29回日本有病者歯科医療学会総会, 神戸国際会議場, 神戸, 2020年2月.

大東琢治, 「有機物顕微分析法の宇宙科学への展開」, 第30回自然科学研究機構シンポジウム「宇宙科学と生命科学の深～いつながり」, オンライン開催, 2020年9月.

B-7) 学会および社会的活動

学会の組織委員等

SpectroNanoscropy Workshop, Organizing Committee (2014–).

X線結像光学研究会幹事 (2015–).

第32回日本放射光学会年会シンポジウム組織委員会 (2018–2019).

第27回日本放射光学会年会シンポジウム組織委員会 (2013), 座長 (2013, 2018, 2020).

応用物理学会シンポジウム「軟X線イメージングの描く未来」座長 (2021).

学会誌編集委員

*Synchrotron Radiation News*, Editor (2017–).

その他

第4回KITサイエンスカフェ「はやぶさ2の帰還, そして分析へ」講師 (2021).

出前授業「軟X線顕微鏡による有機物分析の最先端～ドラッグデリバリーからはやぶさ, そしていかにして働かずにご飯を食べるようになったか」岡崎北高校 (2020).

B-8) 大学での講義, 客員

立命館大学 SR センター, 特別研究員, 2011年8月–.

B-11) 産学連携

共同研究, (株)住友ゴム工業, 「走査型透過X線顕微鏡を用いたポリマー中の薬品・添加剤の分散及び化学状態解析」, 大東琢治 (2017年–2021年).

## 光物性測定器開発研究部門（極端紫外光研究施設）

田 中 清 尚（准教授）（2014年4月1日着任）

出田 真一郎（助教）  
細谷 知輝（特別共同利用研究員）  
古田 貫志（特別共同利用研究員）  
松永 和也（特別共同利用研究員）  
山本 凌（特別共同利用研究員）  
稲垣 いつ子（事務支援員）  
石原 麻由美（事務支援員）

A-1) 専門領域：物性物理学，放射光科学

A-2) 研究課題：

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

A-3) 研究活動の概略と主な成果

- a) UVSOR BL7U, BL5Uにおいて、銅酸化物高温超伝導体 Bi2212 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ク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。
- b) UVSOR BL5Uは高分解能角ビームラインとしてユーザー利用を開始している。同時に高効率スピン分解角度分解光電子分光測定の開発も進めている。2020年度はコロナ渦による UVSOR のビームタイムのキャンセルが多かったが、この時間を利用してスピン分解 ARPES の開発が大きく進み、Au(111) 表面バンドのラッシュバ分裂をスピン分解してイメージスペクトルを取得することに成功した。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た。ただし、測定時には頻繁にスピントーゲットの磁化操作をする必要があり、このままではユーザー利用を開始できない。そこで、2021年度にスピンの向きをあらゆる方向に変更できるスピンマニピュレータを導入し、問題の解決を図る予定である。
- c) 角度分解光電子分光実験の高エネルギー分解能測定には、試料をどれだけ冷却できるかが重要となる。BL5U, 7U用に開発した冷却可能な5軸6軸マニピュレータは、これまで放射光施設の光電子分光装置としては世界でもトップクラスの低温を実現している。最近、新たにソフトウェアによる熱伝導解析を導入した。新たな改良案に基づいて、現在さらなる低温化を目指して開発を進めている。

B-1) 学術論文

C. LIN, T. ADACHI, M. HORIO, T. OHGI, M. A. BAQIYA, T. KAWAMATA, H. SATO, T. SUMURA, K. KOSHIISHI, S. NAKATA, G. SHIBARA, K. HAGIWARA, M. SUZUKI, K. ONO, K. HORIBA, H. KUMIGASHIRA, S. IDETA, K. TANAKA, Y. KOIKE and A. FUJIMORI, “Extended Superconducting Dome Revealed by Angle-Resolved Photoemission Spectroscopy of Electron-Doped Cuprates Prepared by the Protect Annealing Method,” *Phys. Rev. Res.* **3**, 013180 (8 pages) (2021).

K. NAKAYAMA, R. TSUBONO, G. N. PHAN, F. NABESHIMA, N. SHIKAMA, T. ISHIKAWA, Y. SAKISHITA, S. IDETA, K. TANAKA, A. MAEDA, T. TAKAHASHI and T. SATO, “Orbital Mixing at the Onset of High-Temperature Superconductivity in  $\text{FeSe}_{1-x}\text{Te}_x/\text{CaF}_2$ ,” *Phys. Rev. Res.* **3**, L012007 (6 pages) (2021).

R. TAKEUCHI, S. IZAWA, Y. HASEGAWA, R. TSURUTA, T. YAMAGUCHI, M. MEISSNER, S. IDETA, K. TANAKA, S. KERA, M. HIRAMOTO and Y. NAKAYAMA, “Experimental Observation of Anisotropic Valence Band Dispersion in Dinaphtho[2,3-b:2',3'-f]thieno[3,2-b]thiophene (DNFTT) Single Crystals,” *J. Phys. Chem. C* **125**, 2938–2943 (2021).

K. KURODA, Y. ARAI, N. REZAEI, S. KUNISADA, S. SAKURAGI, M. ALAEI, Y. KINOSHITA, C. BAREILLE, R. NOGUCHI, M. NAKAYAMA, S. AKEBI, M. SAKANO, K. KAWAGUCHI, M. ARITA, S. IDETA, K. TANAKA, H. KITAZAWA, K. OKAZAKI, M. TOKUNAGA, Y. HAGA, S. SHIN, H. S. SUZUKI, R. ARITA and T. KONDO, “Devil's Staircase Transition of the Electronic Structures in CeSb,” *Nat. Commun.* **11**, 2888 (9 pages) (2020).

D. PINEK, T. ITO, K. FURUTA, Y. KIM, M. IKEMOTO, S. IDETA, K. TANAKA, M. NAKATAKE, P. L. FEVRE, F. BERTRAN and T. OUISSE, “Near Fermi Level Electronic Structure of  $\text{Ti}_3\text{SiC}_2$  Revealed by Angle-Resolved Photoemission Spectroscopy,” *Phys. Rev. B* **102**, 075111 (11 pages) (2020).

H. ANZAI, K. MORIKAWA, H. SHIONO, H. SATO, S. IDETA, K. TANAKA, T. ZHUANG, K. T. MATSUMOTO and K. HIRAOKA, “Temperature Dependence of the Kondo Resonance in the Photoemission Spectra of the Heavy-Fermion Compounds  $\text{YbXCu}_4$  ( $X = \text{Mg}, \text{Cd}, \text{and Sn}$ ),” *Phys. Rev. B* **101**, 235160 (7 pages) (2020).

F. MATSUI, S. MAKITA, H. MATSUDA, T. YANO, E. NAKAMURA, K. TANAKA, S. SUGA and S. KERA, “Photoelectron Momentum Microscope at BL6U of UVSOR-III Synchrotron,” *Jpn. J. Appl. Phys.* **59**, 067001 (9 pages) (2020).

J.-P. YANG, S.-X. REN, T. YAMAGUCHI, M. MEISSNER, L.-W. CHENG, L. ZHOU, S. IDETA, K. TANAKA and S. KERA, “Valence Band Dispersion Measured in the Surface Normal Direction of  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  Single Crystals,” *Appl. Phys. Express* **13**, 011009 (4 pages) (2020).

B-4) 招待講演

田中清尚, 「UVSOR における軌道分解測定とスピン分解光電子分光, 先端磁気分光と理論計算の融合研究: 『界面多極子相互作用』が拓く新しい学理」, 東京, 2020年6月.

B-7) 学会および社会的活動

学会の組織委員等

WIRMS2021 組織委員 (2020).

日本放射光学会プログラム副委員長 (2019).

学会誌編集委員

日本放射光学会誌編集委員 (2016-), (出田真一郎)

C) 研究活動の課題と展望

2020年度はコロナ渦によるUVSORのビームタイムのキャンセルが多かったが、この時間を利用してスピン分解ARPESの開発が大きく進み、目標としていたイメージでのスピン分解スペクトルの取得に成功した。また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た。ただし、測定時には頻繁にスピントーゲットの磁化操作をする必要があり、このままではユーザー利用を開始できない。そこで、2021年度にスピンの向きをあらゆる方向に変更できるスピンマニピュレータを導入し、問題の解決を図る予定である。できるだけ早いユーザー利用の開始を目指す。

## 光化学測定器開発研究部門（極端紫外光研究施設）

岩 山 洋 士（助教）（2010年4月1日着任）

稲垣 いつ子（事務支援員）

石原 麻由美（事務支援員）

A-1) 専門領域：軟X線分子分光，光化学反応動力学

A-2) 研究課題：

- a) 液晶相物質の軟X線共鳴散乱法の開発
- b) X線自由電子レーザーを用いた溶液光学反応のフェムト秒実時間観測手法の開発

A-3) 研究活動の概略と主な成果

- a) 液晶分子は分子が凝集し集団となることで複屈折などの機能を有する材料であり，分子1個の性質を調べただけではその機能・物性解明には不十分である。特にスメクチック相を示す液晶分子はメゾスコピック領域である数 nm ～ 100 nm 程度の空間スケールで分子配向に構造を持っており，その構造を明らかにすることが液晶相物質の誘電率などの物性を理解する上で重要である。このようなメゾスコピック領域の構造測定としX線小角散乱が考えられるが，非共鳴におけるX線散乱は電子密度の変調に敏感であるが，分子配向の変化に対しては感度が弱い。一方共鳴散乱は内殻電子の遷移先の非占有軌道と入射光偏光ベクトルとの角度に強く依存し，分子配向に敏感な散乱である。そのため，共鳴散乱は，メゾスコピック領域の分子配向構造を調べる上で極めて有用であるが，液晶分子は主に軽元素の炭素，酸素，窒素原子で構成されており，そのK殻吸収端は軟X線領域であるため，軟X線を用いる必要がある。本年度は，軟X線共鳴散乱法を実現すべく，装置開発を行った。装置の立ち上げでは，共同研究者らと共にキラルスメクチック液晶を用いて，数 nm から 10nm の周期構造に由来する回折像の観測に成功し，本軟X線共鳴散乱法が液晶におけるメゾスコピック領域の構造を明らかにするうえで有用な測定方法であることを示した。
- b) X線自由電子レーザー SACLA BL1 を利用した液体試料用のポンプ・プローブ法による時間分解・透過型軟X線吸収分光器の開発を提案し，2020年度 SACLA 基盤開発プログラムに採択され研究を進めている。化学反応の多くは溶液内で起こり，また光合成をはじめとした光化学反応また生命現象は細胞液内でおこることを考えると，固相・気相に加え液相を研究対象に加えることは重要である。特に，軟X線領域は生命において重要な炭素，窒素，酸素元素のK殻吸収端を含む。本年度は，溶液試料を用いた透過型軟X線吸収分光を実現すべく，20 から 2000 nm の範囲で液体試料厚を調整可能な液体セルを開発し，SACLA BL1 にて水および酢酸溶液の軟X線吸収スペクトルを計測した。今後，同期光学レーザーと組み合わせることで，ポンプ・プローブ法による時間分解軟X線吸収スペクトルを実現し，溶液の光化学反応を明らかにする。

B-1) 学術論文

H. IWAYAMA, M. NAGASAKA, I. INOUE, S. OWADA, M. YABASHI and J. R. HARRIES, "Demonstration of Transmission Mode Soft X-Ray NEXAFS Using Third- and Fifth-Order Harmonics of FEL Radiation at SACLA BL1," *Appl. Sci.* **10**, 7852 (7 pages) (2020).

**T. KANEYASU, Y. HIKOSAKA, M. FUJIMOTO, H. IWAYAMA and M. KATOH**, “Polarization Control in a Crossed Undulator without a Monochromator,” *New J. Phys.* **22**, 083062 (8 pages) (2020).

**M. NAGASAKA and H. IWAYAMA**, “Photoelectron Based Soft X-Ray Detector for Removing High Order X Rays,” *Rev. Sci. Instrum.* **91**, 083103 (7 pages) (2020).

**A. FERTE, J. PALAUDOUX, F. PENENT, H. IWAYAMA, E. SHIGEMASA, Y. HIKOSAKA, K. SOEJIMA, K. ITO, P. LABLANQUIE, R. TAIEB and S. CARNIATO**, “Advanced Computation Method for Double Core Hole Spectra: Insight into the Nature of Intense Shake-up Satellites,” *J. Phys. Chem. Lett.* **11**, 4359 (11 pages) (2020).

**Y. HIKOSAKA, H. IWAYAMA and T. KANEYASU**, “Zeeman Quantum Beats of Helium Rydberg States Excited by Synchrotron Radiation,” *J. Synchrotron Radiat.* **27**, 675 (6 pages) (2020).

#### B-7) 学会および社会的活動

学会の組織委員等

第 32 回日本放射光学会年会放射光科学合同シンポジウムプログラム委員 (2019).

日本物理学会領域 1 運営委員 (原子・分子分科) (2018–2019).

学会誌編集委員

日本放射光学会誌編集委員 (2010–2012, 2018–2020).