

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）

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）
加茂 恭子（事務支援員）

A-1) 専門領域：表面物性物理学，電子分光計測技術，放射光科学

A-2) 研究課題：

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

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・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 \AA^{-1} までの波数空間の一括測定ができるため価電子帯研究で有効な運動エネルギー 36 eV 以下の領域では全天球をカバーすることができるが、原子配列を研究するのに有効な運動エネルギー 500 eV 以上の領域ではせいぜい 15° の領域でしかない。新規分析器は 2 keV でも全天球の放出光電子を取り込むことができ、後段のスピン偏向器でスピンの3次元ベクトル解析ができるようになる。①は high-end 型価電子帯光電子分光装置、②は内殻光電子ホログラフィー測定装置である。両者を融合させ、スピン3次元ベクトル解析を実・逆空間で自在にマッピングできる唯一無二の装置を構築する。
- b) 物性評価に適した光波長帯の連続的なエネルギー可変性が UVSOR の最大の特徴である。BL6U は軟 X 線領域 (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あらわれ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つつある。④ 光エネルギー可変性を活かした k_z 分散測定による全 Brillouin 域価電子帯分散マッピングや偏光特性を活かした原子軌道波動関数解析技術は BL6U での共同研究推進の基盤であるが、さらに精緻な測定を行い、表面特有の電子状態や現象の情報を引き出す研究展開を進めている。
- c) 光電子回折・分光を用いて典型的な高温超伝導体 Bi2212 や代表的騒擾物質 TiSe₂ 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 and H. MATSUDA, “Projection-Type Electron Spectroscopy Collimator Analyzer for Charged Particles and X-Ray Detections,” *Rev. Sci. Instrum.* **92(7)**, 73301 (7 pages) (2021). DOI: 10.1063/5.0051114

O. ENDO, F. MATSUI, W.-J. CHUN, M. NAKAMURA, K. AMEMIYA and H. OZAKI, “Nanographene Growth from Benzene on Pt(111),” *Surf. Sci.* **711**, 121874 (2021). DOI: 10.1016/j.susc.2021.121874

K. SAKAMOTO, H. ISHIKAWA, T. WAKE, C. ISHIMOTO, J. FUJII, H. BENTMANN, M. OHTAKA, K. KURODA, N. INOUE, T. HATTORI, T. MIYAMACHI, F. KOMORI, I. YAMAMOTO, C. FAN, P. KRÜGER, H. OTA, F. MATSUI, F. REINERT, J. AVILA and M. C. ASENSIO, “Spatial Control of Charge Doping in n-Type Topological Insulators,” *Nano Lett.* **21(10)**, 4415–4422 (2021). DOI: 10.1021/acs.nanolett.1c01100

S. MAKITA, H. MATSUDA, Y. OKANO, T. YANO, E. NAKAMURA, Y. HASEGAWA, S. KERA, S. SUGA and F. MATSUI, “Contrast Inversion of Photoelectron Spectro-Microscopy Imag,” *e-J. Surf. Sci. Nanotechnol.* **19**, 42–47 (2021). DOI: 10.1380/EJSSNT.2021.42

F. MATSUI, S. MAKITA, H. MATSUDA, E. NAKAMURA, Y. OKANO, T. YANO, S. KERA and S. SUGA, “Valence Band Dispersion Embedded in Resonant Auger Electrons,” *J. Phys. Soc. Jpn.* **90(12)**, 124710 (9 pages) (2021). DOI: s10.7566/JPSJ.90.124710

B-3) 総説, 著書

F. MATSUI, S. MAKITA, Y. OKANO, H. MATSUDA and S. KERA, “Photoelectron Momentum Microscope: Development at UVSOR Synchrotron Facility,” *Vac. Surf. Sci.*, **64(6)**, 262–268 (2021). DOI: 10.1380/vss.64.262 (in Japanese)

松井文彦 (編集者・分担著者), 「図説表面分析ハンドブック」, 朝倉書店 (2021). ISBN: 978-4-254-20170-3

B-4) 招待講演

松井文彦, 「顕微光電子分光の技術的な展開と課題～放射光と光電子運動量顕微鏡～」, R026 先端計測技術の将来設計委員会第4回研究会, オンライン開催, 2021年4月.

F. MATSUI, “Soft X-ray Photoelectron Momentum Microscopy: Resonating valence band element-selectively,” FHI-IMS Joint Seminar, online, June 2021.

F. MATSUI, “Introduction to the contrarian usage of two-dimensional photoelectron spectroscopy,” HiSOR セミナー, 広島大学, オンライン開催, 2021年6月.

F. MATSUI, “Toward comprehensive analysis of electronic and spin structure by UVSOR Photoelectron Momentum Microscope,” Advanced Light Source Users meeting 2021, online, August 2021.

松井文彦, 「光電子運動量顕微鏡の拠点構築と展開」, 日本物理学会 2021 秋季大会, オンライン開催, 2021年9月.

B-7) 学会および社会的活動

学協会役員等

表面真空学会理事 (2021.5–).

日本放射光学会庶務幹事 (2021.9–).

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–).

14th 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」岡崎市立甲山中学校 (2021).

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 (2022).

B-10) 競争的資金

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

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–2025年).

C) 研究活動の課題と展望

UVSOR 型 Momentum Microscope (MM) 利用研究を推進する。顕微角度分解光電子分光, 共鳴光電子分光, 3D 波数空間分解光電子分光法を協力研究に供するとともに自身の表面物性科学研究を進める。軟X線ビームラインと VUV ビームライン両方を同時に MM に導く two-beam MM 実験ステーションをデザインした。2020 年度は片方 (BL6U) での運用が始まった。2021 年度以降 2 本目のビームラインに接続, 2022 年度以降の MM の将来の拡張として 2 次元スピン検出器を用いたスピン分解光電子分光によるスピン物性研究の展開を計画しているが, その基礎研究として磁性薄膜・キラル分子膜の電子状態・原子構造研究を進める。

MM 開発の先駆者がいる Forschungszentrum Jülich (FZJ) の電子物性部門 (PGI-6) と学術協定を結び, 表面電子物性の共同研究を進めてきたおかげで, UVSOR でも MM が順調に立ち上がった。時間分解型の MM 開発を進めるドイツ・DESY の M. Hoesch らとも共同研究を密にし, こちらからスピン研究に関して相手から時間分解測定法に関して経験技術交流を進める。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に続き, 東アジア圏での MM 開発グループの萌芽のネットワークづくりに取り掛かり, また FHI・HiSOR・ALS 各機関との合同セミナーで招待講演を行った。UVSOR の国内外からのビジビリティを高めるとともに, 他のビームラインにも先端拠点を目指す機運と風土の定着を活動指針として進めている。