

佐藤 宇史

東北大学材料科学高等研究所  
教授

## ナノスピン ARPES によるハイブリッドトポロジカル材料創製

### § 1. 研究成果の概要

トポロジカル絶縁体(Topological insulator; TI)は、物質自体が絶縁体でありながら、トポロジカルに保護された端(エッジ)に金属状態を持つ奇妙な物質であり、その性質を利用した量子現象の探索やデバイス応用に向けた研究が進展している。これらの研究の出発点となるのが、新しいトポロジカル物質の実証であり、多岐にわたるトポロジカル材料の開拓それ自体が研究の進展に直結している。物質の電子状態を運動量とスピンにまで分解して直接観測できるスピン・角度分解光電子分光(スピン ARPES)は、表面におけるトポロジカル電子のもつエネルギー状態を直接決定できる特長を生かして、多くのトポロジカル物質の同定を先導してきた。一方、従来のスピン ARPES は、測定対象が大面積かつ平坦な清浄表面が得られる試料に限られるという問題を抱えているため、二次元 TI や弱い TI の同定、デバイス動作中における局所電子状態観測などといった課題に対して威力を十分発揮できておらず、材料開発において障害となっている。

本研究では、これらの問題を打破する「ナノスピン ARPES 装置」を開発する。この装置は、放射光からの紫外線や軟 X 線をナノ集光して、試料に照射しながら走査型スピン ARPES 測定を行うことで、トポロジカルな電子状態をナノメートルスケールで可視化する。さらに、この装置と分子線エピタキシー法による薄膜物質開発により、新しいトポロジカル材料の探索・実証を行う。本年度は、ナノスピン ARPES 装置の開発に向けて、その前身となるマイクロ ARPES 装置の開発に注力した。マイクロ集光を実現するために、光軌道シミュレーションを元に K-B 型ミラー集光光学系とミラー駆動系、超高真空装置の設計を行った(図 1)。設計を元に装置を製作し、KEK-PF のビームライン 28A への設置と、高分解能 ARPES 装置の移設・調整を行った。この装置開発と並行して、ナノスピン ARPES 装置において多チャンネルスピン検出に用いる大面積磁性薄膜ターゲットを作製するために、専用の分子線エピタキシー(MBE)装置の開発を行っ

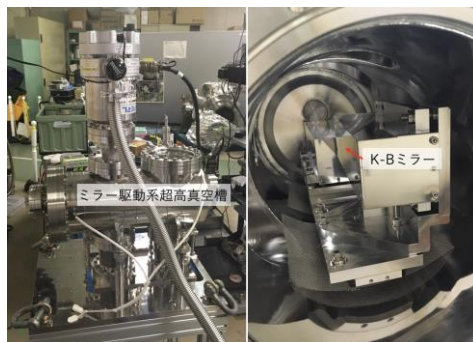


図 1: 開発したマイクロ ARPES のための K-B 型ミラー集光光学系

た。また、英国・フランスの高輝度放射光施設に赴いて現地のナノ ARPES 装置開発担当者と技術交流を行うと共に、トポロジカル超格子物質などにおいて、ドメインにまで分割した電子状態の測定を行うことで、トポロジカル物質へのナノ ARPES の適用性を検証した。また、本研究の主テーマの一つであるハイブリッドトポロジカル超伝導材料の創成に向けて、トポロジカル絶縁体上に Pb 超伝導薄膜を MBE 成長し、その電子状態を ARPES によって可視化することで、従来型超伝導体をトポロジカル超伝導体に変換する新しい手法を考案した。今後も継続して、マイクロ ARPES 装置およびナノスピン ARPES 装置の開発を行う。

#### 【代表的な原著論文】

1. C. X. Trang, N. Shimamura, K. Nakayama, S. Souma, K. Sugawara, I. Watanabe, K. Yamauchi, T. Oguchi, K. Segawa, T. Takahashi, Y. Ando, and T. Sato, “Conversion of a conventional superconductor into a topological superconductor by topological proximity effect”, *Nature Commun.* Vol. 11, pp. 159–1–6, 2020.
2. K. Shigekawa, K. Nakayama, M. Kuno, G. N. Phan, K. Owada, K. Sugawara, T. Takahashi, and T. Sato, “Dichotomy of superconductivity between monolayer FeS and FeSe”, *Proc. Natl. Acad. Sci, USA*, Vol. 116, pp. 24470–24474, 2019.
3. K. Nakayama, S. Souma, C. X. Trang, D. Takane, C. Chen, J. Avila, T. Takahashi, S. Sasaki, S. Kouji, M. C. Asensio, Y. Ando, and T. Sato, “Nano-mosaic of Topological Dirac states on the surface of  $\text{Pb}_5\text{Bi}_{24}\text{Se}_{41}$  observed by nano-ARPES”, *Nano Letters*, Vol. 19, pp. 3737–3742, 2019.

## § 2. 研究実施体制

### (1) 佐藤グループ

- ① 研究代表者: 佐藤 宇史 (東北大学材料科学高等研究所、教授)
- ② 研究項目
  - ・ナノスピンの ARPES 装置の開発
  - ・その場観察に基づいたハイブリッドトポロジカル材料創製

### (2) 組頭グループ

- ① 主たる共同研究者: 組頭 広志 (高エネルギー加速器研究機構物質構造科学研究所、教授 / 東北大学多元物質科学研究所、教授)
- ② 研究項目
  - ・ナノスピンの ARPES 装置の開発
  - ・その場観察に基づいたハイブリッドトポロジカル材料創製

### (3) 瀬川グループ

- ① 主たる共同研究者: 瀬川 耕司 (京都産業大学理学部物理科学科、教授)
- ② 研究項目
  - ・その場観察に基づいたハイブリッドトポロジカル材料創製

### (4) 山内グループ

- ① 主たる共同研究者: 山内 邦彦 (大阪大学産業科学研究所、助教)
- ② 研究項目
  - ・第一原理計算を駆使したトポロジカル界面の機能設計