

田中 清尚（准教授）（2014 年 4 月 1 日着任）

福田 亮平（特別共同利用研究員）
諫山 輝亮（特別共同利用研究員）
興田 康人（特別共同利用研究員）
波多江 勇太（特別共同利用研究員）
石原 麻由美（事務支援員）
加茂 恭子（事務支援員）
横田 光代（事務支援員）

A-1) 専門領域：物性物理学，放射光科学

A-2) 研究課題：

- a) 新規スピン分解角度分解光電子分光装置の開発
- b) 高温超伝導体の電子状態の解明
- c) UVSOR ビームラインの自動測定開発と高精度化

A-3) 研究活動の概略と主な成果

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

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

B-1) 学術論文

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

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

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

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

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

B-10) 競争的資金

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

C) 研究活動の課題と展望

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

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