

先端国際共同研究推進事業

2024 年度採択

「Top のための ASPIRE」

量子分野

2024 年度

年次報告書（公開版）

研究課題名 人材育成と量子スピントロニクス技術の基盤確立に向けた日仏共同イニシアティブ

日本側研究代表者 大谷 義近 東京大学 物性研究所 教授

相手側研究代表者 Lucian Prejbeanu, Executive Director,
CEA SPINTEC

研究期間 2024 年 12 月 1 日～2030 年 3 月 31 日

<年次報告書（公開）>

1. 研究成果の概要

① 研究構想にかかる成果

2024 年度は、三つの主軸テーマ「軌道」「量子」「キメラ準粒子」に基づいて多角的かつ実験と理論の両面からのアプローチにより多くの成果が得られた。各研究項目は、先端的な計測技術の導入、ナノスケールのデバイス加工、国際連携による共同研究体制の確立といった複数の側面から展開されており、それぞれの領域における今後のブレイクスルーに向けた基盤形成に寄与している。

【研究テーマ 1：軌道】

本テーマの目的は、電子の軌道角運動量に関連する蓄積現象の検出と、それに関わるダイナミクスを可視化・追跡することである。今年度は、将来的な XFEL（X 線自由電子レーザー）を用いた高時間分解能実験に向けて、実験室内での測定系の構築と試料設計を重点的に進めた。

特に、磁気光学カー効果（MOKE）による軌道蓄積の予備的検出実験を、CoFe/Ti などの界面構造を用いて実施した。実験では、スピン軌道相互作用を活用して、光によって誘起される磁気応答の中に軌道由来の成分が含まれることを確認した。また、軌道エデルシュタイン効果に特有な界面でのダイナミクスを明らかにするため、磁化誘起 2 次高調波発生（MSHG）法による測定装置を構築し、外部磁場の掃引に対するヒステリシス応答から MSHG 信号の検出に成功した。これらの取り組みは、軌道角運動量の物理を時間領域・元素選択的に解明する XFEL 測定の準備として極めて重要である。

2025 年 5 月には SACLA における軟 X 線を用いた分光実験が予定されており、Co、Fe、Cu などの特定元素における軌道応答の時間発展を MOKE および MSHG の組み合わせで測定する計画である。加えて、現在整備中のパルスレーザー、電流パルス源、同期信号処理システムを用いた電流印加下での時間分解分光法の導入にも取り組んでおり、軌道自由度の動的応答を高精度で捉えるための計測体制が整いつつある。

【研究テーマ 2：量子】

量子スピントロニクスの実現に向けて、電子スピンやマグノン（スピン波）などの準粒子を高速・高精度に制御するための基盤技術の開発を進めた。特に注目されたのが、SAW（表面弾性波）を用いたパルス搬送技術の構築である。2024 年度には、LiNbO₃（ニオブ酸リチウム）基板上で、幅約 300 ピコ秒のパルス SAW を発生させることに成功し、その電圧振幅は GaAs 系に比べて約 30 倍という顕著な強度を示した。

この成果は、単一電子の搬送や量子ドット制御だけでなく、今後のスキルミオン輸送やマグノンロジック素子の駆動手段としても有望である。また、これと並行して、デバイス化が困難であった微結晶・脆弱材料のナノ加工技術の高度化を行った。FIB と電子線リソグラフィを併用することで、擬一次元物質 Ta₄SiTe₄ をサファイア基板上に精密配置し、c 軸方向および垂直方向の電気伝導測定を実施した。

さらに、角度分解光電子分光（ARPES）により、c 軸方向に沿った一次元的バンド構造が明確に観測され、量子スピントロニクス材料としての有望性が示された。ただし、FIB 加工時に用いる Ga イオンの影響で極低温における伝導特性に変化が生じることが確認され、今後は表面処理や非 Ga ビーム技術の導入も検討されている。

また、量子ホール系におけるエッジ状態のコヒーレンス保持を研究対象とし、橋坂グループでは、スピンアップ・ダウン間の相互作用がスピンモードの時間発展に与える影響を、電子干渉測定と理論解析を通じて明らかにした。加藤グループと共同で進めている Marseille 大学との国際連携研究では、エニオン統計性を検出する新規デバイスの設計が進められており、2025 年には現地滞在による長期共同研究を通じた成果発表も予定されている。

【研究テーマ3：キメラ準粒子】

スピン（マグノン）と格子（フォノン）の自由度が混成したキメラ準粒子に関する研究では、非対称なバンド構造とトポロジカル輸送の可能性に着目した。今年度は、モアレ構造を持つ人工超格子を電子線リソグラフィで作製し、SAW透過スペクトルの計測により、複数の谷状態の出現と、それに起因する非相反応答の増強を実験的に示した。

特に、透過が抑制されるはずの周波数領域で逆に透過率が増強される磁場誘起透過率増強（MIT）現象を確認し、構造制御による応答性の調整が可能であることを明らかにした。また、SAWを用いてグラフェン中の電子を駆動し、静的格子と干渉させて時間的・空間的に変調された移動モアレ構造の構築にも成功し、これは Thouless ポンピングに類似するトポロジカル輸送機構の実証に向けた重要なステップである。

以上のように、2024 年度の研究活動は、計測技術、デバイス加工、国際連携、理論・実験の融合など、複数の観点から学際的かつ統合的に展開された。これらの成果は、量子スピントロニクスや軌道物性物理、トポロジカル情報伝達技術の進展に向けた礎として、今後の応用研究と技術開発に繋がっていくことが期待される。

② 国際ネットワーク構築・拡大/国際頭脳循環の促進に資する若手研究者の人材育成に関する成果

日仏量子スピントロニクス共同研究キックオフイベント

2025 年 3 月 3 日から 4 日にかけて、フランス・グルノーブルにて日仏量子スピントロニクス共同研究のキックオフイベントを開催した。冒頭では、日本側代表の大谷義近（東京大学物性研究所）とフランス側代表の Lucian Prejbeanu（CEA SPINTEC）が開会の辞を述べ、研究の意義と展望を共有した。続いて、東京大学物性研の広井善二所長（オンライン出席）をはじめ、Catalin Miron（CEA-DRF）、Pascale Bayle Guillemaud（CEA-Irig）、Frédéric Petroff（CNRS）、Caroline Bertoneche（グルノーブル・アルプ大学）、Lorena Anghel（グルノーブル INP – UGA）、川上則雄（JST）といった関係機関の代表が参加し、日仏間の研究連携の重要性が強調された。

本プロジェクトは、JST の ASPIRE プログラムの支援のもと、以下の三本柱を中心に据えて展開される：

- （1） スピン・軌道輸送（軌道流物性とスピン流への変換の解明）
- （2） 量子輸送（表面弾性波を用いた準粒子操作）
- （3） キメラ準粒子（マグノンとフォノン間の新たな相互作用の探究）

これらを軸に、若手研究者の交流と育成、そして日仏間の持続的な研究体制の構築を目指すものである。

イベントの最終日には、参加者が CNRS の Institut Néel および CEA-SPINTEC の研究施設を訪問し、今後の具体的な連携について活発な意見交換が行われた。（参加者の集合写真参照）



この討議を経て、2025 年度 4 月から、大学院生の相互派遣を開始する方針を決定した。また、まず東京大学物性研と Institut Néel（CNRS）の間で研究連携の基本となる覚書（MoU）を締結し、その後、他の参加機関にも順次拡大していく方針が合意された。現在、その MoU の具体的な文案作成が進められている。

2. 研究実施体制

全体統括

日本側 大谷 義近 東京大学 物性研究所 教授

相手側 Lucian PREJBEAN CEA Spintec Director

研究テーマ	中心となる研究者氏名	所属機関・部署・役職名
研究テーマ1 軌道	松田 巖 Marie D'angelo 大谷 義近 Vincent Cros Lucian Prejbeanu Aurelien Manchon	東京大学・物性研究所・教授 INSP Sorbonne Université・准教授 東京大学・物性研究所・教授 CNRS Thales・Lab. Albert Fert・Director CEA・Spintec・Director (所長) CINaM・Professor
研究テーマ2 量子	橋坂 昌幸 加藤 岳生 Frederic Pierre Anne Anthore Thierry Martin 新見 康洋 高田 慎太郎 Christopher Bäuerle	東京大学・物性研究所・准教授 東京大学・物性研究所・准教授 CNRS・C2N・Director CNRS・C2N・Director Centre de Physique Théorique・Director 大阪大学・理学研究科・教授 大阪大学・理学研究科・准教授 CNRS・Institut Néel・Director
研究テーマ3 キメラ準粒子	大谷 義近 松田 巖 Olivier Klein Laura Thevenard Aurelien Manchon	東京大学・物性研究所・教授 東京大学・物性研究所・教授 CEA・Spintec・Director CNRS・INSP・École Polytechnique・准教授 CINaM・Professor

3. 代表的な業績（原著論文、プレスリリース、表彰など）

無し