2025 年度年次報告書

先端国際共同研究推進事業
【2023 年度採択　Top のための ASPIRE　量子分野】

【研究課題名】
トポロジカル物質に基づく革新的量子エレクトロニクスの創成

研究代表者：
中辻 知（東京大学 トランススケール量子科学国際連携研究機構および理学系研究科物理学専攻 機構長および教授）

主たる共同研究者：
有田 亮太郎（東京大学 理学系研究科 物理学専攻 教授）
三輪 真嗣（東京大学 物性研究所 准教授）
是常 隆（東北大学 大学院理学研究科 物理学専攻 教授）
近藤 浩太（大阪大学 先導的学際研究機構 スピン学際研究部門 准教授）

相手側研究代表者：
Collin L. Broholm（Johns Hopkins University (JHU)・Department of Physics and Astronomy & Institute for Quantum Matter (IQM)　Gerhard H. Dieke Professor & Director）

1. 研究進捗状況と成果

① 研究構想

＜実施したこと＞　研究開発項目である、高機能トポロジカル反強磁性体の開発／高品質・積層単結晶薄膜の作製／クラスター磁気多極子による磁気スイッチングダイナミクスの解明に取り組んだ。

＜得られた成果＞　高機能トポロジカル反強磁性体の開発では、アルター磁性と呼ばれる状態における異常ホール効果を相手側研究拠点との連携で実験的に実証し、機能性反強磁性体の研究領域を拡張した。また、高品質薄膜作製・磁気スイッチング機構解明・反強磁性 MTJ 開発については一体的に推進し、反強磁性体における磁気スイッチングをピコ秒時間スケールで観測すること、また、強磁性体と反強磁性体との金属ヘテロ界面における交換バイアスの電場誘起スイッチングを実証した。

② 国際ネットワーク構築・拡大

＜実施したこと＞　国際的な研究交流を促進すべく、「反強磁性体とアルター磁性によるスピントロニクス」国際シンポジウムを相手側研究機関と共同で主催した。また、若手研究者間の国際的なネットワーク形成を促進することを目的として、「アーリーキャリア・セミナー」シリーズを新たに立ち上げた。さらに、複数の国際会議における招待講演やファシリテーションを実施した。

＜得られた成果＞　「反強磁性体とアルター磁性によるスピントロニクス」国際シンポジウム：反強磁性体およびアルター磁性に基づくスピントロニクス分野の最新の研究成果および今後の方向性について、世界をリードする研究者と若手研究者が一堂に会して議論を行った。「アーリーキャリア・セミナー」：日米の ASPIRE チームを結ぶとともに、博士課程学生、ポストドクター、若手教員が英語によるコミュニケーション能力を高めるための、参加しやすい双方向の場を提供する。「外部の国際会議」：(i) SCES2025 (International Conference on Strongly Correlated Electron Systems)、(ii) MMM2025 (Magnetism and Magnetic Materials Conference)、(iii) Maryland and Japan: Collaborations Toward the Quantum Industry of the Future。

③ 国際頭脳循環の資する若手研究者の人材育成

＜実施したこと＞　研究者及び学生の国際派遣・受入プログラムの加速に取り組んだ。

＜得られた成果＞　国際派遣・受入プログラムにより、派遣では 2 人目のトランスファを実現した。受入では韓国に加え、米国とフランスの若手研究者が長期滞在を開始した。また、相手側研究者以外でも本分野の世界的な研究者を日本側拠点の長期滞在に招き、ポストドクターと大学院学生の指導を行った。これらの活動により若手研究者と学生の間で ASPIRE が目指す「国際頭脳循環促進に資する人材育成」の仕組みが徐々に認知されつつある。

2. 代表的な成果事例

論文

1. M. Asakura, T. Higo, T. Matsuo, Y. Tsushima, S. Kurosawa, R. Uesugi, D. Nishio-Hamane, and S. Nakatsuji, "Magnetic Field Switching of Exchange Bias in a Metallic FM/AFM Heterostructure at Room Temperature", Nano Letters 2025, 25, 26, 10294-10302

概要：本研究は、金属強磁性体／反強磁性体ヘテロ構造において、室温で磁場による交換バイアスのスイ

ッチングを初めて実証したものである。トポロジカル反強磁性体 Mn_3Sn の磁気八極子秩序を用いることで、界面における磁気結合を可逆的かつ可変に制御できることを可能にした。

2. Ray, M.K., Fu, M., Chen, Y. et al. Zero-field Hall effect emerging from a non-Fermi liquid in a collinear antiferromagnet $V_{1/3}NbS_2$. Nat Commun 16, 3532 (2025)

概要：本研究は、コリニア反強磁性体において、磁化をほとんど伴わない大きな異常ホール効果を実験的に確認した初めての例である。さらに、その発現は「非フェルミ液体」状態で行われており、従来の理解を超えるトポロジカル輸送の新たな物理メカニズムを示唆する。

3. Ogawa, K., Tsai, H., Yoshikawa, N. et al. Ultrafast time-resolved observation of non-thermal current-induced switching in an antiferromagnetic Weyl semimetal. Nat. Mater. 25, 434–439 (2026)

概要：本研究は、トポロジカル反強磁性体 Mn_3Sn において、非熱的な電流誘起スイッチングを超高速・時間分解計測により初めて実証したものである。これにより、反強磁性秩序が、遅い熱過程に依ることなく、サブピコ秒時間スケールで操作可能であることを明らかにした。

4. M. Raju, T. Matsuo, M. B. Balkew, D. Nishio-Hamane, T. Higo, C. Broholm, S. Nakatsuji
Tunable high Néel temperature and large anomalous Hall response in antiferromagnetic Weyl semimetal Mn3Sn1-xGax thin films, Commun. Mater. 6, 205 (2025)

概要：本研究は、Mn_3Sn 薄膜における化学ドーピングにより、磁気秩序温度と強固な異常ホール効果を同時に制御し、薄膜形状では磁気秩序が弱まるという従来の制約を克服できることを実証したものである。

5. K. Hattori, H. Watanabe, R. Arita, “Dirac Charge in Antiferromagnetic Topological Semimetals”, Phys. Rev. Lett. 136, 046603 (2026)

概要：スピン-電荷結合系に対する実時間シミュレーションにより反強磁性ディラック半金属における隠れた「ディラック電荷」の存在と、それが光電流によって検出可能であることを示した。この電荷はスピンおよびスピン・電荷混合パラメータ空間でのベリー曲率に基づき、ディラック電荷はその源・吸い込みとして定義される。

6. T. Hatanaka, J. Bouaziz, T. Nomoto and R. Arita, “Calculation of the Biquadratic Spin Interactions Based on the Spin Cluster Expansion for Ab initio Tight-binding Models”, J. Phys. Soc. Jpn., 94 124709 (2025)

概要：(Editors' choice), 同誌の News & Comments で取り上げられた。磁性体の高次スピン相互作用は磁気構造を決める重要な鍵になるが、エネルギースケールが小さく、その第一原理評価は難しかった。本論文ではこの高次スピン相互作用の正確かつ効率的な計算方を開発し、その応用を行なった。

7. J. Matsuda, H. Watanabe, R. Arita, “Multiferroic Collinear Antiferromagnets with Hidden Altermagnetic Spin Splitting”, Phys. Rev. Lett. 134, 226703 (2025)

概要：巨視的な時間反転対称性を保つ反強磁性体は応用の観点からあまり重要視されてこなかったが、磁気伝搬ベクトルが有限な場合には、磁気秩序の発生にともなって空間反転対称性が破れ、バンド構造にスピン縮退を残したまま、特異な応答を示し機能磁性体となりえることを明らかにした。

8. M. Tsukamoto, Z. Xu, T. Higo, K. Kondou, K. Sasaki, M. Asakura, S. Sakamoto, P. Gambardella, S. Miwa, Y. Otani, S. Nakatsuji, C. L Degen, and K. Kobayashi, Observation of chiral domain walls in an octupole-ordered antiferromagnet Phys. Rev. B 112 (2), L020404 (2025).

概要：Editors’ Suggestion に選出. プレスリリース:量子センサで“見えない磁石”の構造を解明

ー八極子磁壁の正体に迫るー. Mn3Sn 薄膜における磁気八極子秩序に由来するキラルな磁壁の構造を初めて実空間で観測

プレスリリース

1。「共線反強磁性異常金属におけるゼロ磁場異常ホール効果の発見」、2025 年 4 月 18 日。

2。「ワイル反強磁性体による交換バイアスの室温制御に成功」、2025 年 6 月 17 日。

3。「電流による反強磁性体の超高速磁化スイッチングを時間分解イメージング測定で可視化」、2025 年 12 月 4 日。

表彰

1. Clarivate's Highly Cited Researchers 2025: 中辻知(研究チーム 1)、有田亮太郎(研究チーム 2)

概要：中辻は新たなトポロジカル材料の合成および物性測定における先駆的な実験的成果が評価された。有田はこれらのエキゾチックな量子状態を理解し予測するための理論的枠組みの研究成果が評価された。

2. 第 31 回（2026 年）日本物理学会論文賞: 中辻知 酒井明人、

概要：$PrTi_2Al_{20}$ における強的四極子秩序の磁場誘起スイッチング現象の研究