

# 令和 6 年度 未来研究ラボシステム 研究成果報告書

研究種目：共同研究 研究期間：令和 6 年 10 月 ～ 令和 8 年 9 月（予定）

研究課題名：電気トロイダル物質における熱流誘起スピン流制御

ラボ長

所属：大学院基礎工学研究科 物質創成専攻

職位 准教授 氏名：下澤 雅明

研究成果：

(概要)

本研究では、純スピン流の生成・制御・観察技術を融合し、新たなスピントロニクス技術の基礎構築を目指す。具体的には、電気トロイダル双極子が秩序化した物質において、熱流を用いた純スピン流の生成および一軸圧を用いた制御を実現することが主な目的である。電気トロイダル双極子は、結晶の鏡映対称性を破ることでスピン流の向きを決定できると理論的に提案されている。しかし、その実証には、熱流印加可能な環境の構築、電気トロイダル双極子の制御技術の確立、スピン流の精密観察が必要である。そこで本年度は、当初の計画に沿って研究を進め、2つの重要な技術的課題を解決した。(1) まず、熱流を試料に安定的に印加できる断熱環境を整備した。磁気トロイダル物質を用いた予備実験では、7 K ~ 25 K の温度範囲でも SQUID 顕微鏡（非断熱下では 7 K 以下でのみ利用可）が動作することを確認し、試料内の熱が外部に逃げないことを実証した。副次的な成果として、磁気トロイダルモーメント由来の電流誘起磁化の空間分布を直接観察し、磁気トロイダルドメイン構造の解明に成功した。現在、この成果の論文執筆に向け、解析・議論を進めている。(2) スピン流制御のための一軸歪みシステムに関しては、設計開発・シミュレーション解析を行い、図面作成まで完了した。なお、既存の歪みシステムに関する研究成果は、下記「発表論文等」に記載の通り、論文として既に発表済みである。本研究では、SQUID 顕微鏡に適用可能な新たなシステムとして設計し直した。これらの成果は、本研究プロジェクトの実現に向けた重要なステップとなる。

(本文)

## 1. 研究背景と目的

スピントロニクスは、電子のスピンを情報媒体とする技術であり、省エネルギーデバイスの実現に向けて注目されている。その中でも、ジュール熱の損失がない純スピン流の生成と制御は極めて重要な課題である。しかし、現在の主流な手法では電流を用いたスピン流生成が一般的であり、本質的なエネルギー損失を回避するには、新たなスピン流発生機構が求められる。近年、電気トロイダル双極子が秩序化した物質において、熱流を印加することで純スピン流が生成される可能性が理論的に提案された。さらに、スピン流の向きは電気トロイダル双極子の向きと反平行になることが予測されている。そこで本研究では、「熱流による純スピン流の生成技術」と「歪みによる純スピン流の制御技術」、「SQUID 顕微鏡を用いた純スピン流の観察技術」を融合し、電気トロイダル双極子を用いたスピントロニクス技術の基礎構築を目指す。

## 2. 研究の進捗状況（本年度の成果）

本年度は、計画に沿って以下の2つの課題に取り組んだ。

### (1) SQUID 顕微鏡に搭載可能な熱流生成技術の確立：

試料に安定した熱流を印加するためには、熱流が意図しない場所で漏洩することを防ぐ必要がある。そのためには、試料周囲の断熱環境を向上させつつ、SQUID 素子との熱的接触を最小限に抑えることが重要である。本年度の予備実験では、磁気トロイダル物質  $\text{UNi}_4\text{B}$  の磁気トロイダルドメインを  $7\text{K}\sim 25\text{K}$  で測定し、試料内の熱が外部に逃げないことを実証した（図1）。

### (2) SQUID 顕微鏡用の歪みシステムの設計・開発：

スピン流の向きを制御するため、一軸圧歪みを導入するシステムを設計・開発した。既存の歪みシステムに関する研究成果は、「発表論文等」に記載のとおり、我々が発表した論文においてその有効性が確認されている。しかし、本研究では SQUID 顕微鏡に適用するために、新たな歪みシステムの設計が求められた。そこで、共同研究者【Clifford Hicks, 細井優】の技術を活用し、SQUID 顕微鏡との親和性を確保した設計に見直し、シミュレーション評価を行い、図面作成まで完了した（図2）。

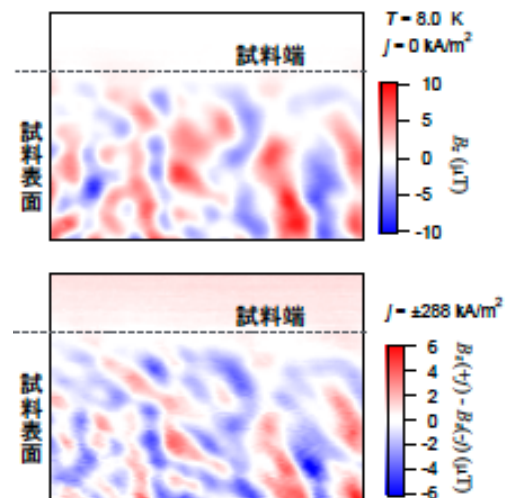


図1:磁気トロイダル物質の局所磁化の空間分布。(上) 磁気トロイダル双極子の歪みで誘起されたキャント磁化(ゼロ電流下)。(下) 電流誘起磁化。両者のパターンはほぼ一致。

## 3. 今後の展開

本年度の成果を基盤とし、以下課題に取り組む。

(1) 電気トロイダル双極子を用いたスピン流の実証実験：本来の目的である電気トロイダル双極子物質を用いたスピン流観測に移行する。具体的には、熱流誘起局所磁化の空間変化を高感度で測定し、スピン流生成を高精度で定量評価する。

(2) SQUID 顕微鏡対応の歪みシステムの実装とスピン流制御：本年度設計した一軸圧歪みシステムを加工・組み立てを行い、SQUID 顕微鏡システムに搭載する。これにより、スピン流の向きを制御可能であることを実験的に検証する。

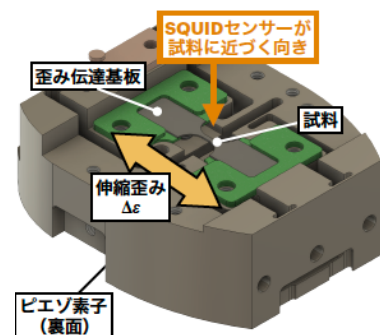


図2：SQUID 顕微鏡用に設計した一軸歪みセル。ピエゾ素子を背面に配置することで、SQUID を試料表面に近づける際に干渉しないようにした。

## 4. まとめ

本年度は、熱流印加環境の構築、SQUID 顕微鏡用の歪みシステムの設計を進めるとともに、磁気トロイダルモーメントのドメイン構造の直接観測に成功した。これにより、電気トロイダル双極子を用いたスピントロニクス技術の実現に向けた重要な知見を得た。このように、本年度の研究は当初予定していた通り順調である。今後、SQUID 顕微鏡用の歪みシステムを加工・実装し、スピン流の発生・制御に関する実験を計画通り遂行する予定である。

研究経費（R6 年度）の内訳：

| 備品費 | 消耗品費       | 旅費        | 謝金  | その他 | 合計            |
|-----|------------|-----------|-----|-----|---------------|
| 0 円 | 983, 677 円 | 16, 323 円 | 0 円 | 0 円 | 1, 000, 000 円 |

共同研究者等：

(1) 共同研究者（氏名・所属）

Clifford Hicks・University of Birmingham

細井 優・Los Alamos National Laboratory

(2) 研究協力者（氏名・所属・学年（学生の場合））

宮本 大輝・物質創成専攻・博士 2 年

発表論文等（令和 7 年 3 月 31 日現在）：

〔雑誌論文〕 S. Hosoi, F. Tachibana, M. Sakaguchi, K. Ishida, M. Shimozawa *et al.*, PRR **6**, 033096 (2024).

〔著書〕

〔学会発表〕

〔その他〕

外部資金獲得状況・申請状況：

科学研究費補助金（学術変革領域研究（A）（公募研究））採択

科学研究費補助金（挑戦的研究（萌芽））申請中

参考となる HP 等：