

令和3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2年10月～令和4年9月

研究課題名：強トロイダル金属のドメイン観察・制御への挑戦

ラボ長

所属：物質創成専攻・物性物理工学領域

氏名：下澤 雅明

研究成果

【背景】 スピンが渦を描く構造で定義できる磁気トロイダルモーメント（図1）が一様に揃った「強磁気トロイダル秩序状態」は、強磁性や強誘電性などとは異なる新しいフェロイック状態として近年注目を集めている。この強トロイダル秩序状態では、空間反転対称性と時間反転対称性が同時に破れているため、電気磁気効果として「電場誘起の磁化」や「磁場誘起の電気分極」の出現が期待される[1, 2]。電気磁気効果は、電磁気学という基礎研究の観点から注目されているだけでなく、機能性物質の開発という点からも盛んに研究されている。しかしながら、その研究対象は大きな電場を印加できる絶縁体物質に限られていた。

最近になって、強トロイダル秩序をもつ金属において電気磁効果が生じることが理論的に示唆され、金属の電気磁効果の研究が大きく進展し始めた[3]。これまでに強トロイダル秩序候補物質であるUNi₄Bにおいて、電流による一様磁化の誘起（電流誘起磁化）[4]や、金属特有の新しい現象である「電流誘起磁化を起源とするゼロ磁場ホール効果」[5]や「磁気トロイダルモーメント起源のゼロ磁場非相反伝導」[6]が報告されている。ごく最近では、反強的なトロイダル金属や、フェリ的なトロイダル金属においても電流誘起ホール効果の観測に成功しており[7]、強トロイダル金属における電気磁気効果の理解が高まりつつある。強トロイダル金属に関する基礎・応用研究をより一層進展させるためには、強磁性や誘電性のようにドメイン形成に関する知見を深めることが必要不可欠であるが、現在のところ、バルク測定によるマクロな視点からの研究に限られており[8]、局所的プローブを用いて直接ドメイン構造を観察した研究例は存在していない。

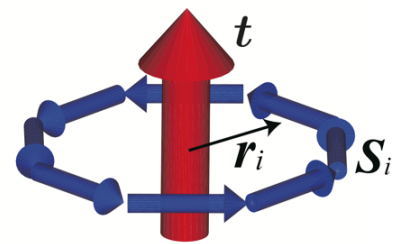


図1：磁気トロイダルモーメント t （赤矢印）の模式図。スピン S_i （青矢印）が渦を描いており、磁気トロイダルモーメントは、 $t \sim \sum_i (r_i \times S_i)$ で定義される（ r_i は中心からの位置座標を示す）。

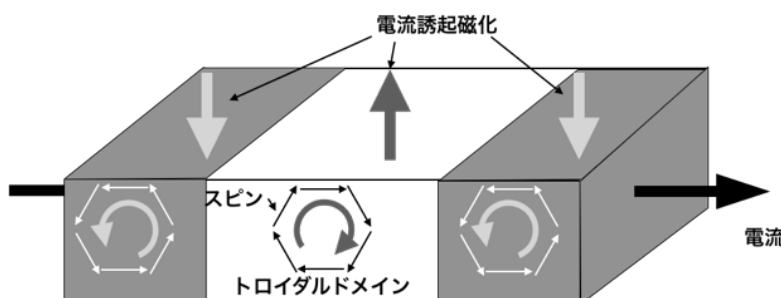
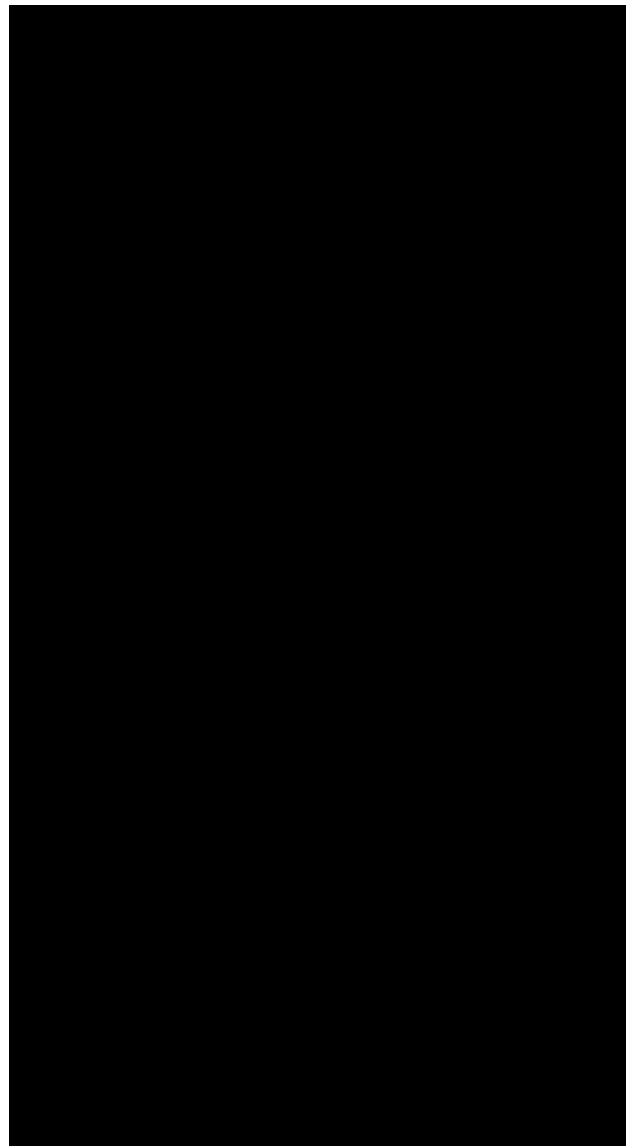


図2：トロイダルドメインと電流印加時の磁化分布の関係。磁気トロイダルモーメントの向きに対応して、一様電流を印加した際に互いに逆方向の磁化が誘起されることが期待される。これは、アンペールの法則による磁化とは大きく異なる。

【目的と実験結果】本研究では、トロイダルドメイン構造を可視化することを目的として、走査型 SQUID 顕微鏡を用いて電流誘起磁化の局所測定に取り組んだ。電流誘起磁化は磁気トロイダルモーメントと電流の外積で決まるので、磁気トロイダルモーメントが反転すると電流誘起磁化も反転する。それゆえ、トロイダルドメインが存在する場合には、図2のように電流誘起磁化にも空間分布が現れることが期待される。実際、走査型 SQUID 顕微鏡による局所磁化測定を行ったところ、図3のようにトロイダルドメイン境界に起因する磁化の符号反転を観測することに成功した。ドメイン1つあたりの磁化の大きさは $300 \mu\text{T}$ 程度と見積れるので、通常のアムペールの法則（電流によって期待される磁化は $4 \mu\text{T}$ 程度）では説明できないことが分かった。

ところが再現性の確認のために行なった2度目の測定では、同じような大きさの電流誘起磁化を観測することができず、アムペールとの相違を明確に区別することができなかった。最近の報告から、電流誘起ホール効果が特徴的な周波数依存性を示すことが分かっているので、その起源である電流誘起磁化の周波数依存性を測定すれば、アムペールによる磁化を完全に排除できるのではないかと考え、追加で試料各場所における局所磁化の周波数依存性を行った。その結果、図4に示すように、電流誘起ホール効果の測定から期待されている周波数依存性を電流誘起磁化でも観測することに成功した。その実部成分は、周波数の増大に伴って減少し、 1000 Hz を超える領域ではアムペールによる磁化が支配的になっていることが分かる。虚部成分においても、強磁性/強誘電の AC 磁化率/誘電率測定で観測されている振る舞いと類似した結果が得られた。また、測定位置を変えると、周波数依存性の振る舞いや信号の符号が変化することも分かった。現在、試料全体の詳細なスキャンに取り組んでいるところである。



[1] V. J. Foren *et al.*, PRL **6**, 607 (1961).

[3] S. Hayami *et al.*, PRB **90**, 024432 (2014).

[5] K. Ota, M. Shimozawa *et al.*, submitted to PRL.

[7] T. Miyamoto, M. Shimozawa *et al.*, in preparation.

[2] T. Arima *et al.*, PRB **70**, 064426 (2004).

[4] H. Saito *et al.*, JPSJ **87**, 033702 (2018).

[6] K. Ota, M. Shimozawa *et al.*, to be submitted.

[8] K. Ota, M. Shimozawa *et al.*, in preparation.

キーワード：

強トロイダル金属、トロイダルドメイン、走査型 SQUID 顕微鏡、電流誘起ホール効果、電流誘起磁化、周波数依存性

研究経費（R3 年度）の内訳

備品費	消耗品費	旅費	謝金	その他	合計
0 円	0 円	0 円	0 円	436000 円	436000 円

共同研究者等

(1) 共同研究者（氏名・所属）

速水 賢・東京大学工学系研究科

(2) 研究協力者（氏名・所属・学年（学生の場合））

発表論文等（令和 4 年 3 月 31 日現在）

〔雑誌論文〕

〔著書〕

- 〔学会発表〕 (1) 多田勝哉，室谷拓海，宮本大輝，細井優，下澤雅明，井澤公一，仲村愛，本間佳哉，本多史憲，青木大：「強トロイダル金属 UNi₄B における非相反伝導」，日本物理学会 2021 年 秋季大会 (2021 年)
- (2) 宮本大輝，室谷拓海，多田勝哉，下澤雅明，細井優，井澤公一，仲村愛，本間佳哉，本多史憲，青木大，小山大介，河端美樹，河合淳：「走査型磁気顕微鏡を用いた UNi₄B のトロイダルドメイン構造の観察」，日本物理学会 第 76 回 年次大会 (2021 年)
- (3) 多田勝哉，室谷拓海，宮本大輝，細井優，下澤雅明，井澤公一，仲村愛，本間佳哉，本多史憲，青木大：「強トロイダル秩序候補金属 UNi₄B における電流誘起 Hall 効果に対する磁場応答」，日本物理学会 第 76 回年次大会 (2021 年)

〔その他〕

外部資金獲得状況・申請状況

・ 研究代表者

研究制度名：科学研究費補助金（基盤研究 B）

研究課題名：SQUID-STM 複合型顕微鏡の開発および新奇超伝導・磁性研究への応用

研究資金の額：1370 万円（総額）

研究期間：2018.4 – 2022.3

役割：代表

参考となるHP等