

藤森科学技術振興財団 研究実施概要報告書

開票の宛先(2)

平成 25 年

(西暦) 2025 年 05 (月) 19 日

開票の宛先(3)

公益財団法人藤森科学技術振興財団

理事長 藤森 明彦 殿

所属機関 東京大学

職 名 助教

氏 名 北折 暁

北折印

【提出書類】

(1) 研究実施概要報告書(本紙)

添付書類(A4 版 3 枚以内): 研究状況を示す写真等の資料

(2) 収支報告書

添付書類: 助成金を充当した経費の領収書

領収書を添付しない場合: 支払一覧表と支払部門担当者確認署名

(1) テーマ

※スペースが足りない場合は、枠を追加いただいて構いません。

高密度情報処理を実現する多重方向制御可能な磁性体開発

(2) 本研究の期間

(西暦) 2024 年 4 月 ～ 2025 年 3 月

(3) 本研究の目的

スピントロニクス分野の新材料「オルタマグネット」を開拓し、さらなる機能性を付与することで、省電力・高性能スピン回路開発への道を拓くことが本研究の目的である。

現行のエレクトロニクスは現代の情報社会の基盤となっている一方、その消費電力量は膨大なものになっているため、より省電力のエレクトロニクス代替技術が盛んに研究されている。なかでもスピントロニクスは、固体中の電子が持つ電荷だけでなくスピンも工学的に利用する、次世代計算回路の主流と目される方式の一つである。

過去のスピントロニクス研究ではスピンの同方向揃った強磁性体を主な舞台にして展開されてきた。これはスピンや磁化が上向き ($\uparrow\uparrow$) の状態を 0、下向き ($\downarrow\downarrow$) の状態を 1 と定義して情報ビットとして扱えるためである。一方、スピンの互い違い ($\uparrow\downarrow$) に揃う反強磁性体では通常このような区別ができないものの、漏れ磁場が小さいためビット間干渉が少なく高密度化が可能 (情報密度の低さは磁気メモリの最たる弱点である)・応答が高速であるといった利点が存在する。オルタマグネットは「反強磁性体としての利点を有したまま 0/1 の状態が区別できる」"第三の磁性体"として注目を集めており、その実証は国際的意義が大きい。しかしこの物質は理論的提案が中心であり、具体的な物質例には乏しい。

スピントロニクスは、しばしば電力消費量の少なさを利点として上げられる。一方で性能面では「漏れ磁場干渉によって情報密度を上げられない」という欠点があった。オルタマグネットはそれを解決するものであるが、しかし原理的性能上限という観点では、それでようやく既存エレクトロニクスに並ぶかどうかである。諸コスト面と性能面の両方で既存技術を上回らなければ、既存技術を駆逐し技術的なパラダイムシフトを起こすことができない。本研究計画は次節以降で述べるようなさらなる高機能化によって、性能面での優位性も獲得しに行く。こうした複合次世代計算基盤技術開拓の試みが実現すれば、現状のエネルギー消費を大幅に減らし、さらに進展した情報技術を社会が受け入れる余地を生み出すことができる。

オルタマグネット内部では、電子構造・磁気構造に由来する仮想磁場が発生しており、この向きによって 0/1 状態を定義可能である。また、固体中の電子にのみ作用するこの仮想磁場が強磁性体における磁化の役割を代替することによって、外部への磁場を生じないにもかかわらず 0/1 状態が電氣的に検出可能となる場合がある。

本研究ではまずこの「0/1 状態を電氣的に検出可能なオルタマグネット」材料の探索を行う。オルタマグネット内部では、固体中の電子のみが感じ取れる仮想磁場が発生すると考えられており、この向きの上下で定まる 0/1 状態を電流で検出することを目的とした。

さらに独創的な取り組みとして、「空間的な向きつけが可能な関連材料」の探索も行う。らせん構造に右巻き/左巻きが定義できるように、一部の物質はその結晶構造の向きが定義可能である。物質の電気抵抗はこうした「結晶構造の向き」および「仮想磁場の向き」双方の影響を受ける場合があるため、これを活用することで「2 入力 1 出力の論理演算回路としての機能性を有する革新的な物質」を実現可能である。こうした先進的な物質設計指針が本研究の特徴と言える。

(4) 本研究の概要

本研究計画では、物質開拓および合成を通じて、

- ・オルタマグネット内での 0/1 状態検出
 - ・空間反転対称性の破れた反強磁性体関連物質の開拓
- の 2 点を試みた。以下にその詳細を述べる。

近年ドイツのグループにより、反強磁性体の場合でも非磁性元素の存在を考慮すると、ある種の構造を有する物質においては 0/1 状態の区別が可能となることが理論的に提案された [Smejkal *et al.*, Science Advances 6, 8809 (2020)]。これがオルタマグネットである。オルタマグネット内部では、電子構造・磁気構造に由来する仮想磁場が発生しており、この向きによって 0/1 状態を定義可能である。この向きに応じてオルタマグネット内の電流は右/左のどちらかへ進行方向を曲げられるため、外部への磁場を生じないにもかかわらず 0/1 状態が電気的に検出可能となりうる。本研究計画では、まずこの「オルタマグネット内での 0/1 状態検出」を最初に狙った。具体的にはオルタマグネット候補物質を合成し、0/1 状態を外部磁場で制御・電流の進行方向を通じて 0/1 状態を検出する。

固体中で向きを定義できる自由度は仮想磁場だけではない。らせん構造の右巻き/左巻き (= キラリティの向き)・極性の向きのような、空間構造の対称性の破れもまた、向きを定義可能である。本研究計画の公判では、こうした「空間反転対称性の破れた関連物質」も探索した。空間反転対称性が破れたオルタマグネット内では、空間構造と磁気構造の双方によって影響される性質が期待される。具体的には、電気抵抗がある方向と反対方向で一致しない非相反抵抗という現象は、「空間構造の破れている向き」「仮想磁場」どちらかの向きが反転すると低電気抵抗の向きが反転する。(図 1)

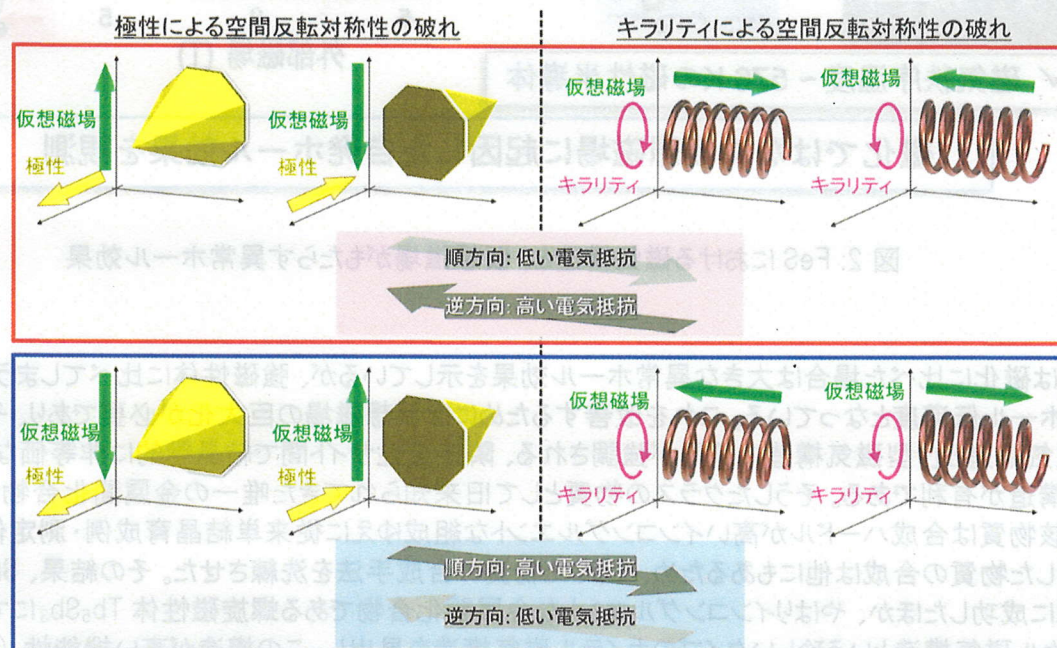


図 1: 空間構造の向き付けと仮想磁場の向きで定まる、電気抵抗の非相反方向

こうした物質の設計が可能となれば、対象物質内では仮想磁場と極性/キラリティと 2 つの情報に基づき非相反電気抵抗の方向が 1 つに定まることから、自然に 2 入力 1 出力論理演算回路としての機能性を有することとなる。しかも「計算結果」である非相反抵抗方向はそのまま保存されるので、磁気メモリとしての機能も併せ持つ。現行のエレクトロニクスではこうした 2 入力 1 出力の論理演算回路は 8-10 個程度のトランジスタを組み合わせることで実現されている。さらに先述の通り、オルタマグネットは漏れ磁場がないために微細デバイスを高密度で集積させることが可能となるため、当該物質は固体中に高度に集積化された回路を実現するうえで非常に有利な舞台である。具体的な方法としては、オルタマグネット候補物質の結晶構造に対して適宜複合アニオン化などを施すことで、空間反転対称性の破れたオルタマグネット材料や、それに関連する物質の探索を試みた。

(5) 本研究の内容及び成果

六方晶構造を持つ磁性半導体である FeS は、容易面内反強磁性の場合に時間反転対称性を破り、面直方向に仮想磁場を生じることが期待できる。申請者を含む研究グループは本物質の反強磁性相において仮想磁場に起源をもつ異常ホール効果の観察に成功した。申請者は反強磁性秩序の磁気構造決定に参画し、情報の読み書きを安定して行うことができる、示す初のオルタナグネット物質報告に寄与した。(図 2)

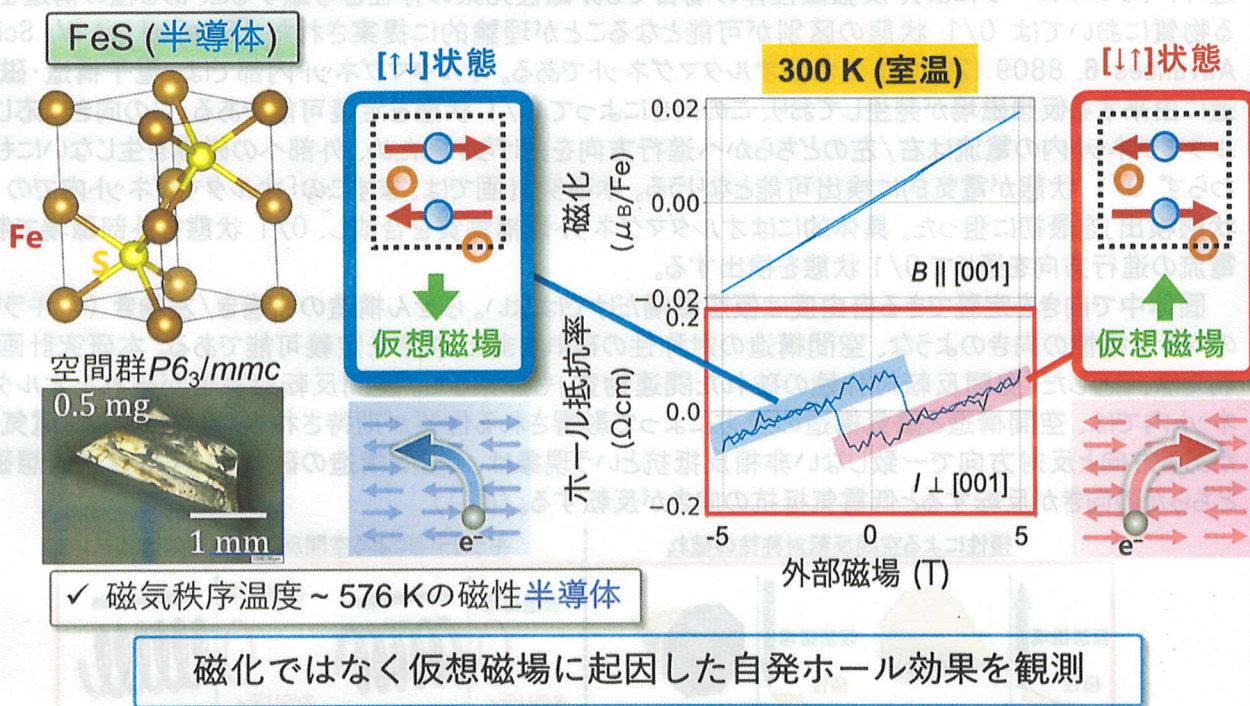


図 2: FeS における磁気構造と、仮想磁場がもたらす異常ホール効果

FeS は磁化に比べた場合は大きな異常ホール効果を示しているが、強磁性体に比べてしまうと 4 桁以上小さいホール伝導度となっている。これを改善するためには仮想磁場の巨大化が必要であり、そのためには $\uparrow\downarrow$ 型磁気構造と $\downarrow\uparrow$ 型磁気構造の差異が強調される、隣接磁性サイト間で結晶学的に非等価なサイトになっている構造が有利である。そうしたクラスの物質として旧来知られてきた唯一の金属間化合物が Sm_2In だが、当該物質は合成ハードルが高いインコングルエントな組成ゆえに従来単結晶育成例・測定例に乏しかった。こうした物質の合成は他にもあるため、こうした物質の合成手法を洗練させた。その結果、 Sm_2In の単結晶育成に成功したほか、やはりインコングルエントな金属間化合物である螺旋磁性体 Tb_5Sb_3 にて、乱れた傾斜コニカル磁気構造という珍しいタイプのカイラル磁気構造を見出し、この構造が高い機能性（巨大な創発インダクタンス）を生み出していることを発見・報告した。 Tb_5Sb_3 のゼロ磁場下の磁気構造である傾斜コニカル磁気構造は、反強磁性体の派生形とも見なしうるらせん磁性体であるとともに、空間反転対称性と時間反転対称性が同時に破れた磁気構造である。

(6) 本研究の考察

従来 Altermagnet (交代磁性体 / 交替磁性体) として報告されてきた物質は、いずれもバルク試料で再現性高く異常ホール効果を検出することができなかった。すなわち、仮想磁場の無機で定義される 0/1 状態の切り替えができなかった。この問題を、しかも室温で克服した物質系の発見と報告に貢献することができたほか、さらに応答を巨大化することができる物質の単結晶化にも成功した。

本研究によって開拓された「(外場によって情報の読み書きが可能な)時間反転対称性の破れた反強磁性体 / 交代磁性体 / 交替磁性体」は従来用いられてきた強磁性体に比べて、漏れ磁場がなく動作が高速なスピントロニクス材料としての注目度も高く、将来的な産業研究を見据えた基礎研究としての価値が大きい。また、それ以外の新規スピントロニクス材料に関する報告も並行して行い、複数のスピントロニクス展開に対応可能な物質プラットフォーム整備を実施した。特に、 Tb_5Sb_3 を用いた研究ではらせん磁性体における電流駆動ダイナミクスに関する結果も得られており (図 3)、広範な領域におけるスピントロニクス材料開拓に資する成果が得られているといえる。

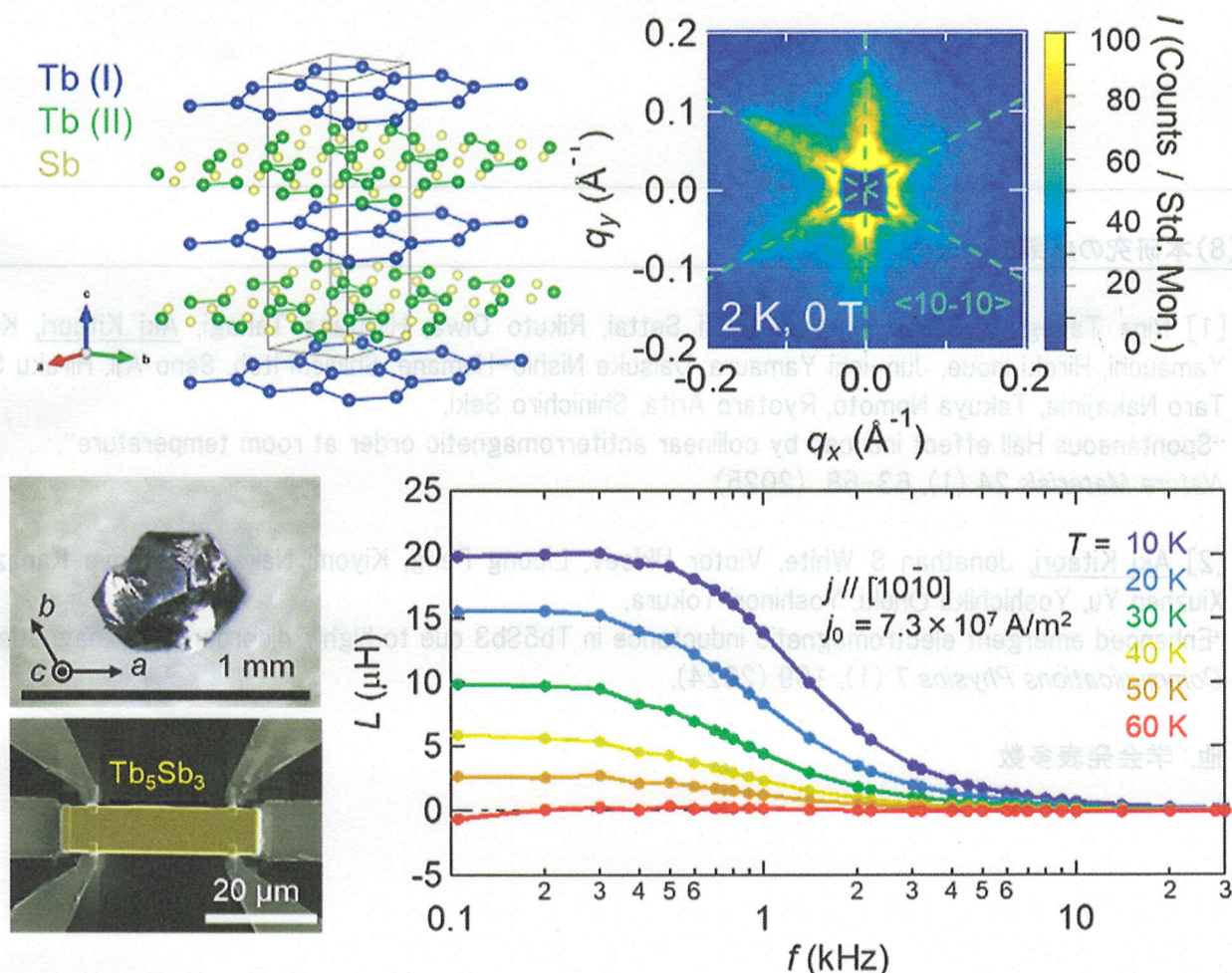


図 3: Tb_5Sb_3 における結晶・磁気構造と、創発インダクタンスの温度依存性

(7) 共同研究者(所属機関名、役職、氏名)

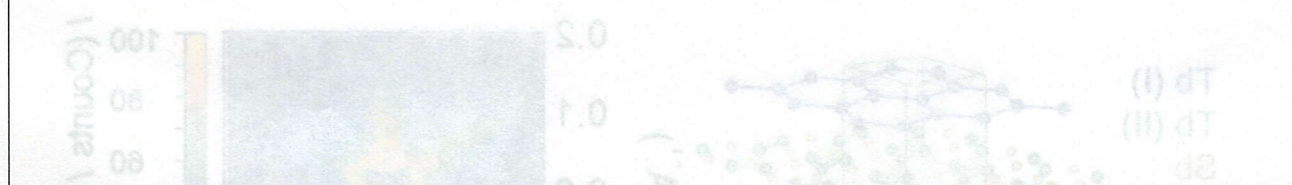
報告の添付本(8)

主な共同研究者を以下に示す。

東京大学、教授、関 真一郎

東京大学、准教授、高木 里奈

東京大学、特任助教、Nguyen Duy KHANH

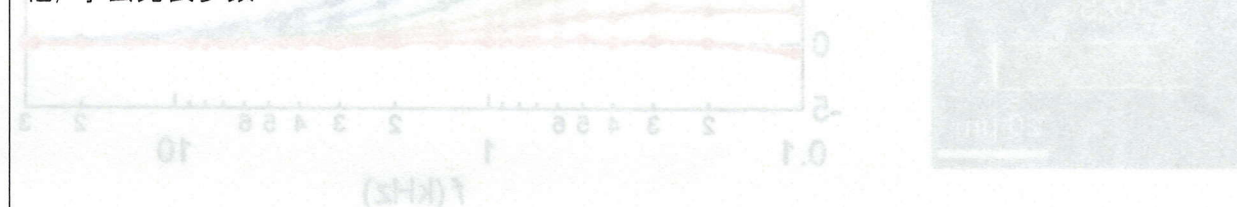


(8) 本研究の成果の公表先

[1] Rina Takagi, Ryosuke Hirakida, Yuki Settai, Rikuto Oiwa, Hirotaka Takagi, Aki Kitaori, Kensei Yamauchi, Hiroki Inoue, Jun-ichi Yamaura, Daisuke Nishio-Hamane, Shinichi Itoh, Seno Aji, Hiraku Saito, Taro Nakajima, Takuya Nomoto, Ryotaro Arita, Shinichiro Seki,
“Spontaneous Hall effect induced by collinear antiferromagnetic order at room temperature”,
Nature Materials 24 (1), 63–68 (2025).

[2] Aki Kitaori, Jonathan S White, Victor Ukleev, Licong Peng, Kiyomi Nakajima, Naoya Kanazawa, Xiuzhen Yu, Yoshichika Ōnuki, Yoshinori Tokura,
“Enhanced emergent electromagnetic inductance in Tb₅Sb₃ due to highly disordered helimagnetism”,
Communications Physics 7 (1), 159 (2024).

他, 学会発表多数



[注]この報告書を当財団のホームページ等に掲載します。予めご了承ください。