

令和3年2月18日

東北大学金属材料研究所
科学技術振興機構(JST)

カゴメ格子の極薄ナノ結晶でも安定な強磁性 磁性ワイル半金属の起源解明に前進

【発表のポイント】

- 磁性ワイル半金属 $\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{S}_2$ の Co カゴメ格子を有するナノサイズの粒状結晶に、垂直磁化の強磁性を初めて検出。
- 強磁性は磁性ワイル半金属状態を実現するために不可欠な性質。
- 新省電力素子原理として期待される量子伝導の実現に向けて重要な知見。

【概要】

トポロジー（位相幾何学）の観点から固体の性質を理解・分類しようとするトポジカル物質科学が急速な発展を遂げています。東北大学金属材料研究所の池田絢哉大学院生（理学研究科物理学専攻）、藤原宏平准教授、塩貝純一助教、関剛斎准教授、野村健太郎准教授、高梨弘毅教授、塚崎敦教授らの共同研究グループは、トポジカル物質の一種である磁性ワイル半金属 $\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{S}_2$ が極薄のナノ結晶（※1）でも垂直磁化の強磁性（※2）を示すことを初めて明らかにしました。

Co カゴメ格子から成る磁性ワイル半金属（※3） $\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{S}_2$ （図1）では、カゴメ格子単層極限における量子伝導の発現が理論提唱されています。しかし、磁性ワイル半金属状態の実現に不可欠な強磁性が熱揺らぎに弱い極薄試料で維持されるかは不明でした。本研究では、強磁性が極薄ナノ結晶でも安定であることを明らかにするとともに、磁性ワイル半金属状態が膜厚の増加に伴い発達していく様子を捉えることに成功しました。

この成果は、磁性ワイル半金属に関する重要な知見を提供するだけでなく、薄膜試料を用いた機能素子の開発にも貢献するものと期待されます。本研究成果は、2021年2月18日（英国時間）に、英国科学誌「Communications Materials」オンライン版に掲載されます。

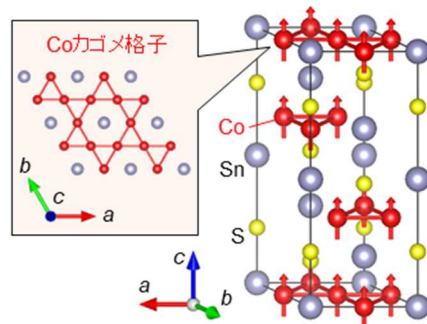


図1. $\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{S}_2$ の Co カゴメ格子と結晶構造。

【詳細な説明】

○研究背景

トポロジカル絶縁体（※4）の発見以降、トポロジー（位相幾何学）の観点から固体の性質を理解・分類しようとするトポロジカル物質科学が急速な発展を遂げています。近年、新たなトポロジカル物質群として、磁性ワイル半金属と呼ばれる物質とその特殊な電子状態に由来する新奇物性の提案が相次いでいます。特に、Co カゴメ格子から成る強磁性体 $\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{S}_2$ は、理想的な磁性ワイル半金属状態を有することから、試金石的な物質として注目を集めています。際立った物性として、カゴメ単層状態において、ジュール損失の無い電流が試料端に生じる量子異常ホール効果（省電力デバイスの新規原理）の発現が理論提唱されており、実験的検証への期待が高まっています。

磁性ワイル半金属状態の実現には、線形分散バンドに加え、強磁性などの磁気秩序とスピン軌道相互作用が不可欠です。一方で、磁性体の極薄試料では一般に熱揺らぎにより磁気秩序が弱められてしまうことが知られており、 $\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{S}_2$ の極薄膜がどのような磁氣的性質を示すかは明らかになっていません。 $\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{S}_2$ の研究は、数年前までバルク試料を用いた報告に限定されていましたが、本研究グループは2019年にスパッタリング法（※5）を用いて薄膜化に初めて成功し[1]、 $\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{S}_2$ の薄膜物性研究を先導してきました。膜厚 40 nm 程度の試料において、磁性ワイル半金属の特徴である大きな異常ホール効果（※6）の検出に成功していたことから、より薄い試料で、強磁性および磁性ワイル半金属性が保たれるかどうかを実験的に検証することが次の課題でした。

[1] K. Fujiwara *et al.*, *Jpn. J. Appl. Phys.* **58**, 050912 (2019).

○成果の内容

スパッタリング法の安定性を利用して $\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{S}_2$ 薄膜の厚さを調整して、様々な膜厚の試料の構造、磁気特性および電気特性を系統的に評価しました。結晶格子 2 つ分に相当する平均膜厚 2.7 nm（カゴメ格子 6 層）の試料の構造は、期待した極薄膜とは異なり、孤立した島状のナノ結晶となりました（図 2(a)）。このような極薄ナノ結晶の集まった試料の磁気特性を評価したところ、明瞭な磁気履歴曲線が検出されました（図 2(b)）。この結果は、熱揺らぎに打ち勝ってスピン間の強磁性秩序が発達し、薄膜面直方向に揃っている（垂直磁化）ことを示しており、磁性体の極薄試料としては珍しい特長です。さらに、膜が連続的につながった膜厚 4 nm 以上の試料を対象に、大きな異常ホール効果の発現条件を調べたところ、約 10 nm の臨界膜厚を見出し、強磁性 $\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{S}_2$ 薄膜が、膜厚増加と共に磁性ワイル半金属 $\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{S}_2$ 薄膜へと発達していく様子を初めて明らかにしました（図 3）。

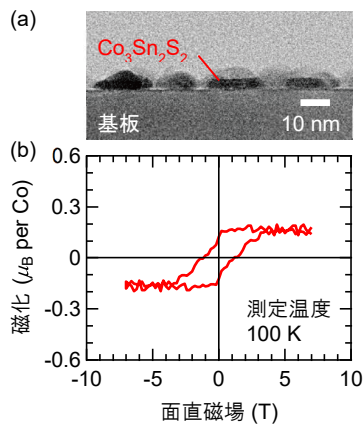


図2. (a) $\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{S}_2$ ナノ結晶の透過型電子顕微鏡像。(b) 磁気特性。

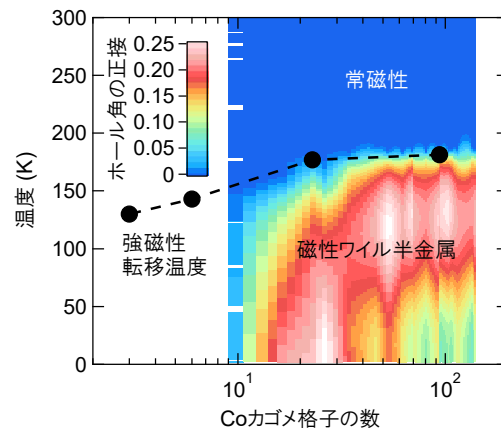


図3. Co カゴメ格子の数の増加に伴う磁性ワイル半金属状態の発達を示す図。強磁性は極薄ナノ結晶でも安定。

○意義・課題・展望

カゴメ格子単層極限に近い条件でも強磁性が安定であることを明らかにしたことで、量子伝導の検証に必要な条件の一つを満たすことを初めて実証しました。今後は極薄膜における島状成長の改善やナノ結晶の電気測定を可能にすることで、カゴメ格子単層極限での電気伝導評価も可能になると期待されます。膜厚増加に伴う磁性ワイル半金属相の発達も、系統的な膜厚評価により本研究で初めて明らかになったものであり、特殊な電子状態の基礎的理解に向けて重要な手がかりを与えます。本成果により、 $\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{S}_2$ を含む様々な磁性ワイル半金属の極薄膜物性の検証や薄膜を用いた素子応用に向けた取り組みがより一層加速するものと期待できます。

○発表論文

雑誌名： Communications Materials

英文タイトル： Critical thickness for the emergence of Weyl features in $\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{S}_2$ thin films

全著者： Junya Ikeda, Kohei Fujiwara, Junichi Shiogai, Takeshi Seki, Kentaro Nomura, Koki Takanashi and Atsushi Tsukazaki

DOI: 10.1038/s43246-021-00122-5

○専門用語解説（注釈や補足説明など）

※1 ナノ結晶

ナノメートルスケールの結晶。ここでは、基板上で面内方向に連結しておらず、互いに孤立した結晶性ドメインを指す。

※2 強磁性

電子が持つマイクロな磁石の性質であるスピンの同じ方向に並ぶことで、マクロな磁化を生み出している磁気的狀態。鉄、ニッケル、コバルトが代表的な強磁性を示す物質。垂直磁気異方性は、薄膜の面直方向に磁場を印加した時に磁化が生じやすく、ゼロ磁場に戻した後も磁化が維持されやすい状態。

※3 磁性ワイル半金属

二次元物質グラフェンやトポロジカル絶縁体の表面には、線形分散をもつ電子状態（線形分散バンド）が現れる。三次元の物質全体が線形分散バンドと磁気秩序を有し、かつ、スピン軌道相互作用の寄与がある場合、運動量空間で特定の対称性をもつ点以外でギャップが開く。この状態の電子の運動は相対論的ワイル方程式で記述されることから、磁性ワイル半金属と呼ばれる。

※4 トポロジカル絶縁体

物質の内部は絶縁体であるが、その表面（2次元系では端）は導電性を示す物質。 $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$ や Bi_2Se_3 が代表的なトポロジカル絶縁体。

※5 スパッタリング法

物理的气相蒸着法の一つ。ターゲットと呼ばれる固体原料に、アルゴンプラズマなどのイオン化粒子を照射することでターゲット表面の原子分子を気化し、基板上に薄膜として形成する手法。

※6 異常ホール効果

試料の x 方向に通電した状態で z 方向に磁場を印加すると、ローレンツ力により電子の運動方向が捻じ曲げられ、 y 方向に電圧（ホール起電力）が生じる現象を（正常）ホール効果と呼ぶ（ x, y, z は直交座標系とする）。磁性体では、これに磁化の寄与が加わり、異常ホール効果と呼ばれる。磁性ワイル半金属は、特殊なバンド構造に由来する大きな異常ホール効果を示す。

○共同研究機関および助成

本研究は、JST 戦略的創造研究推進事業 CREST「トポロジカル機能界面の創出」（研究代表者：塚崎 敦、課題番号：JPMJCR18T2）、科学研究費補助金（課題番号：20H01830）、東北大学金属材料研究所附属新素材共同研究開発センター（課題番号：19G0410）からの支援を受けて実施されました。

【本件に関するお問い合わせ先】

◆研究内容に関して

東北大学金属材料研究所 低温物理学研究部門

准教授 藤原 宏平 TEL:022-215-2088 Email:kfujiwara[at]imr.tohoku.ac.jp

教授 塚崎 敦 TEL:022-215-2085 Email:tsukazaki[at]imr.tohoku.ac.jp

◆JST 事業に関して

科学技術振興機構 戦略研究推進部 グリーンイノベーショングループ

嶋林 ゆう子 TEL:03-3512-3531 FAX:03-3222-2066 Email:crest[at]jst.go.jp

◆報道に関して

東北大学金属材料研究所 情報企画室広報班

TEL:022-215-2144 FAX:022-215-2482 Email:pro-adm[at]imr.tohoku.ac.jp

科学技術振興機構 広報課

TEL:03-5214-8404 FAX:03-5214-8432 Email:jstkoho[at]jst.go.jp