

令和3年6月3日

東北大学金属材料研究所  
科学技術振興機構(JST)

## 磁性ワイル半金属の表面に潜む金属伝導を初検出 表面伝導を活用した新型素子開発に前進

### 【発表のポイント】

- $\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{S}_2$  薄膜の磁性ワイル半金属 (※1) 状態における金属的表面伝導を実証しました。
- 汎用的かつ信頼性の高い膜厚制御に基づく表面伝導評価を確立しました。
- 表面伝導を用いた新型素子原理の検証につながる本成果は素子化研究へのブレークスルーとなります。

### 【概要】

トポロジカル物質群と呼ばれる特殊な物質の一種である磁性ワイル半金属については、強磁性であると同時に、トポロジカルな電子構造に由来する様々な興味深い物性の発現が提唱されています。磁性ワイル半金属の試料表面には、特異な電子構造に起因する表面状態が生じています。そのため、表面状態の特性は試料厚みに依存せず、優れた電気伝導を示すことが期待されています (図 1)。しかしながら、表面状態と試料内部の伝導成分をそれぞれ分けて評価することは困難でした。

東北大学金属材料研究所の池田絢哉大学院生 (研究当時、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、磁性ワイル半金属  $\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{S}_2$  薄膜の膜厚を精密に制御することで、磁性ワイル半金属状態における表面伝導の発現を初めて捉えるとともに、その金属的性質を明らかにしました。

この成果は、磁性ワイル半金属の物性解明を大きく前進させるだけでなく、表面伝導を活用した新型素子の開発にも寄与するものと期待されます。

本研究成果は、2021年6月3日 (英国時間) に、英国科学誌「Communications Physics」オンライン版に掲載されます。

表面伝導 (厚みに依存しない)

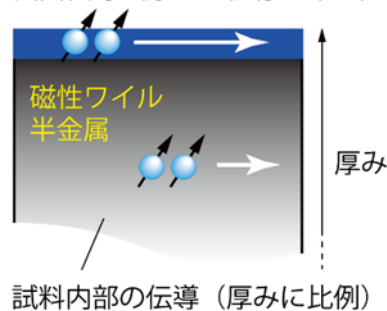


図1. 磁性ワイル半金属の表面伝導。

## 【詳細な説明】

### ○研究背景

固体が示す様々な性質や機能は、固体中の電子の軌道が集まって形成されるバンド構造（※2）と密接な関係にあります。例えば、金属、半導体、絶縁体（誘電体）の示す異なる電氣的・光学的性質は、バンド構造と電子の詰まり方の違いを考えることで理解できます。近年、バンド構造をトポロジー（位相幾何学）の観点から理解したり、分類したりする「トポロジカル物質科学」が急速に発展しています。トポロジカル物質群の一種である磁性ワイル半金属と呼ばれる物質には、バンド構造中にワイル点と呼ばれる特異点が存在します。ワイル点は、交差したバンドとバンドの結び目に相当し、固体中の電子に強い磁場と同等の作用を与えます。この性質を活用して、高感度の磁気センサや高効率の磁気熱電素子を開発しようとする試みが、エレクトロニクスの技術革新に向けた画期的アプローチとして注目を集めています。

磁性ワイル半金属のもう一つの特徴に、試料の表面に現れる電子状態（表面状態）の存在があります。この表面状態の電気伝導は、不純物などの乱れの影響を受けにくいことが予測されており、新奇素子原理への応用の可能性が理論提唱されています。しかしながら、バルク試料（※3）を用いる従来の研究では、試料内部（表面ではない領域）の伝導が実験的に検出する伝導成分を支配するため、薄皮一枚の表面からの伝導成分を分離して検出することは難しく、分光学的手法による表面状態の観測に留まっていました。そこで本研究グループは、代表的な磁性ワイル半金属である  $\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{S}_2$  の薄膜化に世界に先駆けて取り組み、膜厚の系統的制御による物性評価を進めてきました[1]。今回、シンプルかつ制御性の高い「膜厚」をパラメータに用いることで、膜厚に比例する内部の伝導成分と膜厚に依存しない表面の伝導成分を分離できることに着眼し、未達成であった表面伝導の検出に挑みました。

[1] J. Ikeda *et al.*, *Commun. Mater.* **2**, 18 (2021).

### ○成果の内容

これまでの研究で、膜厚 20 nm 以上の試料で磁性ワイル半金属の特徴を持つことが分かっていました。今回はそれらの試料を対象に、シート伝導度（単位面積当たりの伝導度）を詳細に評価しました。約 180 K の磁気転移温度以上の常磁性状態（※4）では、シート伝導度は膜厚と比例関係にあり（オームの法則）、薄膜試料内部の伝導成分のみを考慮することで説明できます（図 2(a)、黒破線）。一方、磁気転移温度以下で強磁性の磁性ワイル半金属状態になると、シート伝導度が急激に増加するとともに、膜厚ゼロ nm に対応するシート伝導度に有限の切片成分が明瞭に現れました（図 2(b)、矢印）。この結果は、膜厚に比例する試料内部の伝導成分に加えて、強磁性状態になると膜厚に依存しない伝導成分が出現することを意味しています。さらに、この膜厚に依存しない伝導成分が温度低下に伴い増加、すなわち、金属的な温度依存性を示すことを明らかにし（図 3）、磁性ワイル半金属の表面伝導であると結論付けました。

## ○意義・課題・展望

これらの結果は、盛んに議論されてきた  $\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{S}_2$  の表面伝導を初めて検出した成果であり、磁性ワイル半金属の物性解明に大きなインパクトをもたらすものです。今回用いた膜厚制御の手法は  $\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{S}_2$  に限定されるものではなく、様々な物質系への適用が可能であることから、表面伝導の基盤的評価手法としての発展が期待できます。また、優れた金属的表面伝導の存在を実証したことで、磁性ワイル半金属を用いることで初めて実現される素子機能の実験的検証も加速すると考えられます。薄膜試料は、表面伝導の評価に効果的であるだけでなく、産業応用を目指した素子化研究にも不可欠であることから、今後、磁性ワイル半金属の薄膜研究がより一層活発になると予測されます。高品質薄膜の作製と表面・界面における物性評価を通して、高度情報化社会の発展を支える革新的エレクトロニクス素子の創出に貢献することが本研究グループの目標です。

## ○発表論文

雑誌名： Communications Physics

英文タイトル： Two-dimensionality of metallic surface conduction 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/s42005-021-00627-y

## ○専門用語解説（注釈や補足説明など）

### ※1 磁性ワイル半金属

固体中の電子状態が、一般的な物質（金属、半導体、絶縁体）とは異なる幾何学的特徴（トポロジー）を持つ物質群を総称して、トポロジカル物質と呼ぶ。代表例であるトポロジカル絶縁体は、物質内部では電気を通さない絶縁体であるが、表面には電気を通す表面状態を持つ。この二次元の表面状態は、線形のエネルギー分散関係を示す。その拡張として、三次元の物質全体に線形分散のバンド（※2）を持つ物質が存在する。特に、磁気秩序（※4）とスピン軌道相互作用（電子のスピンと軌道角運動量の相互作用）の寄与により、運動量空間で特定の対称性をもつ点（ワイル点）近傍に線形分散を有し、それ以外でギャップの開いた状態を持つ物質を磁性ワイル半金属と呼ぶ。

### ※2 バンド、バンド構造と運動量空間

量子力学では、原子核の周りを運動する電子の状態は、特定のエネルギー準位と空間的特徴を持つ軌道として表現される。原子単体では、軌道のエネルギー準位は離散的（とびとび）であるが、膨大な数の原子から成る固体中では、軌道間の様々な重なり方を反映して、広がったエネルギー準位（バンド）を形成する。種々の軌道から構成されるバンドの集合体をバンド構造と呼ぶ。電子の運動量を変数にして、エネルギー準位を表す空間を運動量空間と呼ぶ。

### ※3 バルク試料

単結晶や焼結体など、mm～cm スケールの塊状(バルク)の試料。基礎物性研究に広く用いられている。

### ※4 常磁性と強磁性、磁気秩序

電子は、スピンと呼ばれるミクロな磁石としての性質を有している。物質中でスピランダムな方向を向いた無秩序状態を常磁性、同じ方向に並ぶことでマクロな磁化を生み出している秩序状態を強磁性と呼ぶ。一般に、磁気秩序は高温で熱の影響を受けて無秩序になりやすく、低温で秩序化しやすい。Co<sub>3</sub>Sn<sub>2</sub>S<sub>2</sub>は約 180 K で常磁性から強磁性へと転移する。

### ○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。

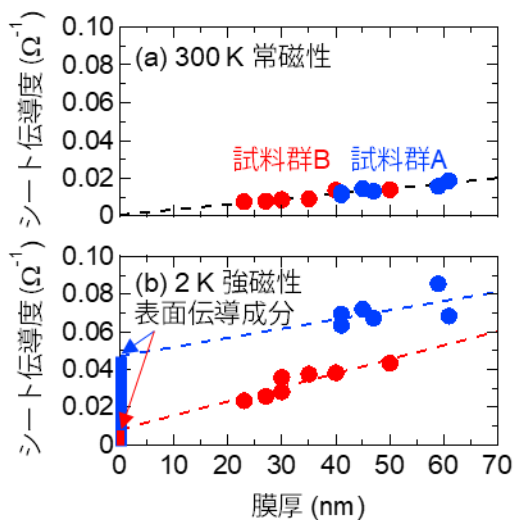


図2. Co<sub>3</sub>Sn<sub>2</sub>S<sub>2</sub>薄膜のシート伝導度の膜厚依存性。(a)常磁性状態。(b)強磁性状態(磁性ワイル半金属)。金属伝導の比較に用いられる物理的指標(残留抵抗比)の観点から、優れた伝導を示す試料群Aとそれ以外の試料群Bに分類し、表面伝導の違いを議論した。

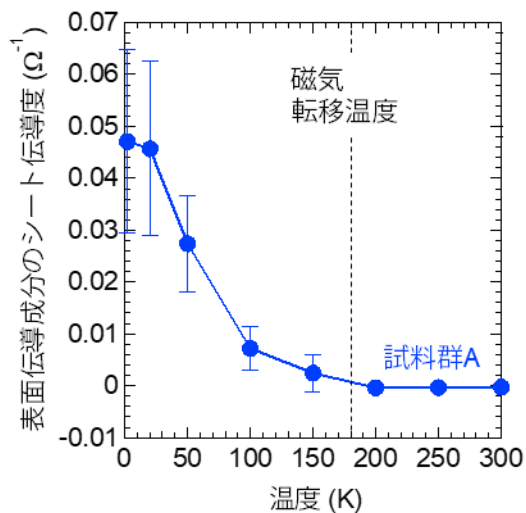


図3. 膜厚依存性解析から算出した表面伝導成分の温度依存性。磁気転移温度以下で急速に発達する。

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:imr-press[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