

物質のトポロジーに由来した巨大磁気光学効果の発見

1. 発表者：

- 岡村 嘉大 (東京大学大学院工学系研究科 附属量子相エレクトロニクス研究センター 助教)
- 見波 将 (研究当時：金沢大学ナノマテリアル研究所 博士後期課程大学院生／
現在：東京大学大学院理学系研究科 物理学専攻 特任研究員)
- 加藤 喜大 (東京大学大学院工学系研究科 物理工学専攻 修士課程2年)
- 藤代 有絵子 (東京大学大学院工学系研究科 物理工学専攻 博士課程3年)
- 金子 良夫 (理化学研究所創発物性科学研究センター 強相関物性研究グループ 上級技師)
- 池田 絢哉 (東北大学大学院理学研究科 物理学専攻 修士課程2年)
- 村本 丈 (研究当時：東京大学大学院工学系研究科 物理工学専攻 修士課程2年)
- 金子 竜馬 (東京大学大学院工学系研究科 物理工学専攻 博士課程3年)
- 上田 健太郎 (東京大学大学院工学系研究科 物理工学専攻 助教)
- V. Kocsis (研究当時：理化学研究所創発物性科学研究センター 強相関物質研究グループ 特別研究員)
- 金澤 直也 (東京大学大学院工学系研究科 物理工学専攻 講師)
- 田口 康二郎 (理化学研究所創発物性科学研究センター 強相関物質研究グループ グループディレクター)
- 是常 隆 (東北大学大学院理学研究科 物理学専攻 准教授)
- 藤原 宏平 (東北大学金属材料研究所 低温物理学研究部門 准教授)
- 塚崎 敦 (東北大学金属材料研究所 低温物理学研究部門 教授)
- 有田 亮太郎 (東京大学大学院工学系研究科 物理工学専攻 教授／理化学研究所創発物性科学研究センター 計算物質科学研究チーム チームリーダー)
- 十倉 好紀 (理化学研究所創発物性科学研究センター センター長／東京大学大学院工学系研究科 物理工学専攻 教授／東京大学 卓越教授)
- 高橋 陽太郎 (東京大学大学院工学系研究科 附属量子相エレクトロニクス研究センター 准教授／理化学研究所創発物性科学研究センター 創発分光学研究ユニット ユニットリーダー)

2. 発表のポイント：

- ◆磁性ワイル半金属（注1）と呼ばれる特殊な磁性体において巨大な磁気光学効果を発見しました。
- ◆観測した磁気光学効果は物質のトポロジカルな性質を反映しており、これまでにない発現機構のものと言えます。
- ◆テラヘルツ・赤外領域における革新的な光学デバイスの開発の進展が期待できます。

3. 発表概要：

東京大学大学院工学系研究科の岡村嘉大助教、高橋陽太郎准教授、理化学研究所の十倉好紀センター長、東北大学金属材料研究所の藤原宏平准教授、塚崎敦教授らの研究グループは、磁性ワイル半金属と呼ばれる近年新たに見つかった磁性体において、巨大な磁気光学応答の実証

に成功しました。トポロジカル物質と呼ばれる一連の物質群では、特殊な電子構造に由来した新奇な電磁気応答が理論的に予測されており、次世代エレクトロニクス・フォトニクスへの応用展開が期待されています。例えば、こうした物質群においては、電子はあたかも非常に大きな磁場がかかっているかのように振る舞い、巨大な異常ホール効果（注2）に代表される非自明な伝導現象が報告されています。その一方で、光学応答についても物質のトポロジーに由来した新たな現象の存在が期待されていました。

今回、岡村嘉大助教らは、強磁性でなおかつトポロジカル物質である $\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{S}_2$ において、トポロジカルな電子構造に関連した磁気光学応答の探索を行いました。テラヘルツから赤外の広い光学領域（注3）において、高精度に磁気光学ファラデー・カー効果を測定した結果、この物質の磁気光学効果が、これまで観測されてきた通常の磁性体と比べてはるかに大きいことがわかりました。さらに、光学ホール伝導度スペクトルと第一原理計算（注4）との比較を行うことで、観測した光学応答がまさにトポロジカルな電子構造に由来していることを明らかにしました。

今回得られた成果は、トポロジカル物質が一般的に大きな磁気光学効果を示すことを示唆しています。今後、トポロジカル物質を利用した新しい光デバイスの開発へとつながっていくことが期待されます。

本研究成果は、英国科学雑誌「*Nature Communications*」に英国時間9月15日に掲載されます。

本研究は、科学技術振興機構（JST）戦略的創造研究推進事業 CREST「トポロジカル絶縁体ヘテロ接合による量子技術の基盤創成（研究代表者：川崎雅司）」（No. JPMJCR16F1）、「ナノスピン構造を用いた電子量子位相制御（研究代表者：永長直人）」（No. JPMJCR1874）、「トポロジカル機能界面の創出（研究代表者：塚崎敦）」（No. JPMJCR18T2）の支援を受けて行われました。

4. 発表内容：

<研究の背景>

近年、物質中の電子状態の理解が進み、位相幾何学（トポロジー）に基づいて分類できることがわかってきました。トポロジカルに非自明な電子構造では、従来の物質にはない電磁気応答の発現が予測されており、次世代のエレクトロニクス・フォトニクスに向けた材料として、基礎・応用の両面から精力的に研究されています。その一例として、トポロジカルな電子構造は伝導電子に対して巨大な仮想磁場を生み出すため、大きな異常ホール効果に代表されるような非自明な電気伝導現象を引き起こすことが知られています。その一方で、これまでトポロジカル物質の光学応答の研究は非常に少なく、その基礎物理はほとんど明らかになっていませんでした。

<研究の経緯>

東京大学大学院工学研究科の岡村嘉大助教らは、トポロジカル電子構造が強く影響する光学応答の候補として、ファラデー効果やカー効果と呼ばれる磁気光学効果に着目しました（図1右）。これらの効果は、磁性体に光を照射した際、それぞれ透過光および反射光の偏光（振動電場の方向）が回転する現象のことを指し、（強）磁性体において広く観測されてきました。この効果は磁場の大きさに比例する効果であるため、電子に大きな仮想磁場がかかっているようなトポロジカル物質においては、大きな効果が期待できます。

現在トポロジカル物質の探索が精力的に進められていますが、今回着目した磁性ワイル半金属 $\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{S}_2$ はその代表例です。この物質は、ワイル点やノーダルリングといったトポロジカルな電子構造 (図 1 左) を持ち、またそれらに由来した巨大な異常ホール効果が発現することがわかっています。したがって、トポロジカルな電子構造に由来する巨大光学応答を探索する格好の舞台です。

<研究内容>

トポロジカル電子構造に関連した光学応答を包括的に調べるために、最近新たに発見された磁性ワイル半金属 $\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{S}_2$ において、テラヘルツから赤外領域までの広い光学領域における高精度の磁気光学測定を行いました。この物質では、第一原理計算によってフェルミ準位から 0.1 eV 付近までに、ワイル点やノーダルリングの存在が予想されています。測定の結果、このエネルギー領域において磁気光学効果が確かに増大していることがわかりました (図 2 左)。その大きさは、強磁性体で一般に成り立っているスケール則からもはずれた巨大なものでした。

測定した磁気光学スペクトルからホール伝導度スペクトルを算出すると、理論計算とも非常に良い一致を示すことがわかりました (図 2 右)。特に、観測されたホール伝導度スペクトルの形状は、トポロジカルな電子構造のみを考えた際のスペクトルによってほとんど説明できるため、磁気光学応答がワイル点やノーダルリングといったトポロジカルな電子構造に由来していることを証明することができました。これは同時に、輸送現象である異常ホール効果においても、これらの電子構造が重要な役割を果たしていることを意味しています。

<展望・社会意義>

本研究では、磁性トポロジカル半金属において、実験・理論の両面からトポロジカル電子構造に関連する光学遷移において、巨大な磁気光学効果が発現することを明らかにしました。今後、様々なトポロジカル半金属への拡張することによって、この光学効果の普遍性を検証することが待たれます。

磁気光学効果は携帯電話にも使われるアイソレータ (注 5) の原理として使われている現象です。これまでテラヘルツ・赤外領域においては、大きな磁気光学効果を示す材料がほとんどなかったため、今回の発見は高効率な次世代光デバイスの開発へ向け、重要な一歩であるといえます。

5. 発表雑誌:

雑誌名: 「*Nature Communications*」 (オンライン版 9 月 15 日)

論文タイトル: Giant magneto-optical responses in magnetic Weyl semimetal $\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{S}_2$

著者: Y. Okamura, S. Minami, Y. Kato, Y. Fujishiro, Y. Kaneko, J. Ikeda, J. Muramoto, R. Kaneko, K. Ueda, V. Kocsis, N. Kanazawa, Y. Taguchi, T. Koretsune, K. Fujiwara, A. Tsukazaki, R. Arita, Y. Tokura, Y. Takahashi

DOI 番号: 10. 1038/s41467-020-18470-0.

アブストラクト URL: <http://www.nature.com/ncomms>

6. 問い合わせ先:

<研究に関すること>

岡村 嘉大(おかむら よしひろ)

東京大学大学院工学系研究科 附属量子相エレクトロニクス研究センター 助教

藤原 宏平(ふじわら こうへい)
東北大学金属材料研究所 低温物理学研究部門 准教授

塚崎 敦(つかざき あつし)
東北大学金属材料研究所 低温物理学研究部門 教授

<報道担当>
東京大学大学院工学系研究科 広報室

東北大学 金属材料研究所

科学技術振興機構 広報課

理化学研究所 広報室 報道担当

<JST 事業に関すること>
嶋林 ゆう子(しまばやし ゆうこ)
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

7. 用語解説：

(注1) 磁性ワイル半金属

電子の持つ運動量によって電子状態を記述したものをバンド構造と呼び、2つのバンドが何らかの対称性によって交差しているものをトポロジカルな電子構造という。ワイル半金属は、このような電子状態を持つトポロジカル物質の1つであり、バンドの交差点(ワイル点)が対をなして現れる。

(注2) 異常ホール効果

磁場印加状態において、磁場と垂直に電流を流すと磁場・電流に垂直な方向に電圧が発生する効果をホール効果と呼ぶ。この電圧は一般に印加磁場の大きさに比例するが、強磁性体の場合においては、さらに磁化に比例するような電圧も生じ、これを異常ホール効果と呼ぶ。

(注3) テラヘルツから赤外の広い光学領域

毎秒約 10^{12} 乗(一兆)回振動する周波数のことをテラヘルツ周波数と呼び、この周波数の電磁波をテラヘルツ波と呼ぶ。エネルギーでは0.005eV程度の帯域に対応する。一方、赤外領域は可視領域よりも低エネルギーの光学領域を広く指し、0.01eVから1.5eV程度のエネルギー帯域に対応する。

(注4) 第一原理計算

量子力学に基づき、結晶構造のみから物質の電子状態や物性を予測する理論計算手法。

(注5) アイソレータ

マイクロ波や光波の伝送回路において用いられ、一方向には電磁波を伝えるが、その逆方向には伝えないという回路素子のこと。

8. 添付資料：

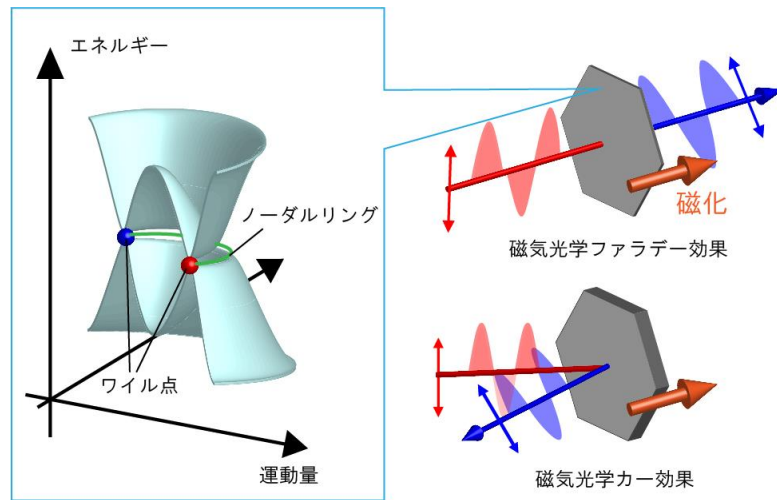


図1. 磁性ワイル半金属 $\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{S}_2$ の電子構造 (左) と磁気光学ファラデー・カー効果の概念図 (右)。

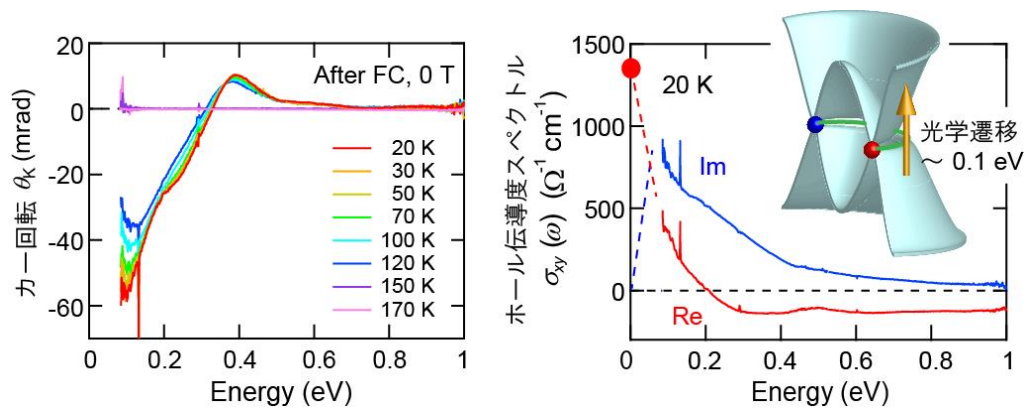


図2. 磁気光学カー効果の温度依存性 (左) とそこから算出したホール伝導度スペクトル (右)。インセットには代表的な光学遷移を示した。