Press Release

2025 年 9 月 17 日
東京科学大学
東京大学
理化学研究所
公益財団法人 豊田理化学研究所
科学技術振興機構（JST）

強磁性材料における面内異常ホール効果の発見

－軌道磁化とスピン磁化の非対角結合を実証－

【ポイント】

○面内方向に磁化を持つ強磁性材料において異常ホール効果を観測
○軌道磁化とスピン磁化の非対角的な結合が本質的に重要であることを実証
○軌道磁化が拓く新たな物性科学と応用技術の可能性に期待

【概要】

東京科学大学（Science Tokyo）理学院 物理学系の打田正輝准教授の研究グループは、同大学 理学院 物理学系の石塚大晃准教授の研究グループ、および東京大学 大学院理学系研究科 有田亮太郎教授（兼：理化学研究所 創発物性科学研究センター チームディレクター）の研究グループと共同で、面内方向に磁化を持つ強磁性材料における**異常ホール効果**（用語 1）の観測に成功しました。

ホール効果は、磁場によって電子の流れが曲げられる現象であり、固体中の電子伝導現象の理解に不可欠な要素として、100 年以上にわたって研究と応用の両面で重要な役割を果たしてきました。これまで、ホール効果は主に電流が流れる面に垂直な面直磁場や、それに対応する面直**スピン磁化**（用語 2）によって引き起こされると理解されており、ホールセンサなど多くの電子デバイスもその枠組みに基づいて設計されてきました。しかし本研究では、バンド構造に**ワイル点**（用語 3）を持つストロンチウムルテニウム酸化物（$SrRuO_3$）の極薄膜を用いることで、面内方向に自発的なスピン磁化を持つ状態を実現し、磁場を印加しなくても面直方向に**軌道磁化**（用語 4）が顕在化した異常ホール効果が発現することを明らかにしました。磁場の天頂角や方位角を制御しながら測定を行うことで、ホール抵抗率がスピン磁化の向きに応じて規則的に変化することを確認し、軌道磁化とスピン磁化の非対角的な結合がこの効果の本質であることが示されました。この成果は、ホール効果に対する従来の常識を覆すものであり、軌道磁化に基づく電子物性の新たな理解と応用の可能性を大きく拓くものです。

本研究成果は、「*Advanced Materials*」に 2025 年 9 月 16 日（米国東部時間）に掲載されました。

●背景

固体中で電子の流れが曲げられるホール効果は、電子の動きを理解するうえで極めて重要であり、100 年以上にわたって電子伝導の研究や応用技術の発展を支えてきました。通常、この効果を引き起こすには、電流が流れる面に垂直方向の「面直磁場」を印加する必要があります。非磁性材料における**正常ホール効果**（用語 5）や、磁性材料で見られるより複雑な異常ホール効果も、面直磁場条件の下で理解されてきました。こうした中、打田准教授の研究グループは、電流が流れる面に平行な「面内磁場」を用いるという新たな発想により、軌道磁化が顕在化した異常ホール効果の観測に成功しました（2024 年 12 月 2 日プレスリリース「面内磁場によるホール効果の発見―軌道磁化に基づく電子物性の開拓に道筋―」・参考文献[1]）。この発見は、異常ホール効果に関する理解を大きく前進させました。

一方で、非磁性・反強磁性材料では、図 1 左下に示すように、軌道磁化が顕在化した異常ホール効果を誘起するために、外部から面内磁場を印加する必要があるという課題がありました。そこで、図 1 右下に示すように、磁場を加えなくても、面内方向を向いたスピン磁化と結合した異常ホール効果が現れる、強磁性材料の検討を始めました。

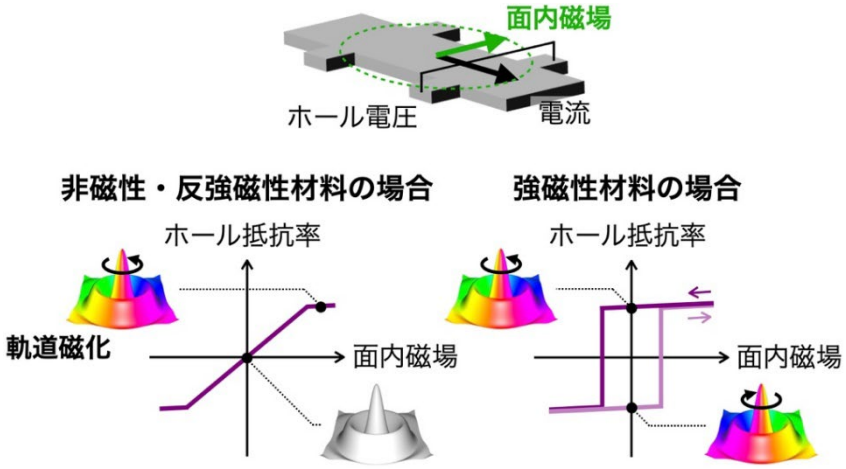

図 1　面内磁場によって制御される新しい異常ホール効果（上）。非磁性・反強磁性材料における場合（左下）と、今回の強磁性材料における場合（右下）。後者では磁場なしの状態においても軌道磁化が顕在化する。

●研究成果

強磁性材料における面内異常ホール効果の観測

本研究では、面内スピン磁化と結びついた異常ホール効果の実証を目指し、トポロジカル物質の一種である磁性ワイル半金属に注目しました。この種の物質は、バンド構造に**ベリー曲率**（用語 6）が発散するワイル点を持ち、大きな異常ホール効果を示す特徴があります。なかでも、面内方向に自発的にスピン磁化を持つ強磁性ワイル半金属では、軌道磁化が顕在化した異常ホール効果が磁場なしで現れることが期待されます。

本研究では、ワイル点を持つ代表的な材料であり、これまでの異常ホール効果の研究にも大きく貢献してきた $SrRuO_3$ に着目しました。酸化物分子線エピタキシー法により高品質な $SrRuO_3$ 薄膜を作製し、膜厚を数 nm にまで薄くすることで、面内方向にスピン磁化を持つ状態を実現しました。この試料を用いて精密な電気伝導測定を行ったところ、図 2 上に示すように、面内磁場の方位角を 60 度変えるごとに異常ホール抵抗率の符号が反転し、磁場なしの状態においても有限の異常ホール抵抗率が生じることが明らかになりました。また、図 2 下に示すように、磁場の天頂角を面直方向から面内方向へと変化させながら、それぞれの角度で磁場を 9 T（テスラ）まで印加したあとゼロに戻してホール抵抗率を測定したところ、面内スピン磁化と結びついた異常ホール効果が現れていることが明らかとなりました。

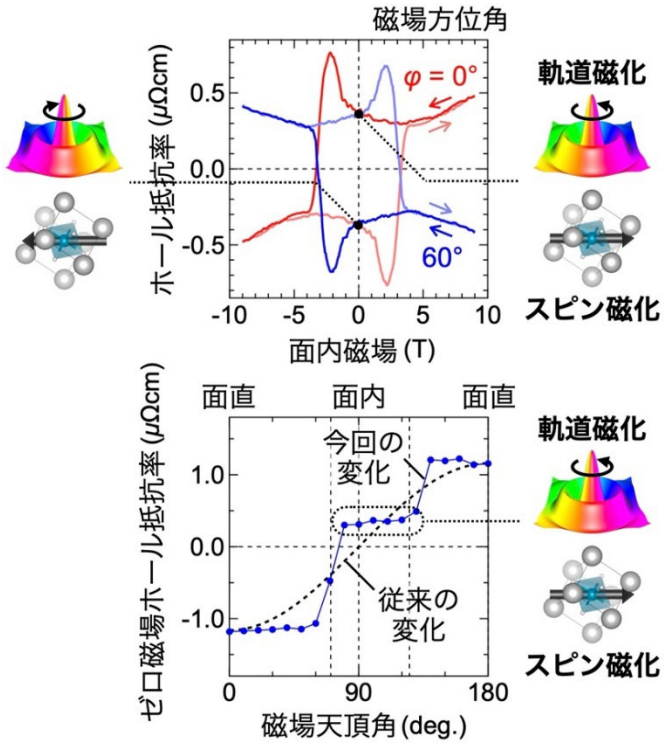

図 2　特定の磁場方位角における異常ホール抵抗率の面内磁場依存性（上）と、磁場天頂角を面直方向から面内方向へと変えながら、それぞれの天頂角において磁場を 9 T まで印加したあとゼロに戻してホール抵抗率を測定した結果（下）。

強磁性材料における自発的な軌道磁化の理解

今回 $SrRuO_3$ 薄膜で観測された面直方向に軌道磁化が顕在化した異常ホール効果は、面内スピン磁化と非対角的に結合したものと理解されます。さらに、この効果は、通常の面直スピン磁化と対角的に結合した異常ホール効果と同程度の大きさを持つ可能性があることが示されました。また、磁場の天頂角を変化させながら異常ホール抵抗率を測定することで、面直軌道磁化と面内スピン磁化の非対角的な結合の特徴を捉えられることも分かりました。この非対角的な結合は、対称性に基づく理論解析や第一原理計算

によっても確認され、軌道磁化が自発的に発現する機構と深く関係しています。本成果は、軌道磁化を中心とした非対角応答の理解と、今後の新しい電子物性研究を大きく後押しするものと期待されます。

●社会的インパクト

これまでホール効果は、面直方向の磁場や磁化に起因すると考えられ、その枠組みに基づいてホールセンサなどのデバイスが設計されてきました。本研究では、近年注目されつつある面内磁場によるホール効果に加え、面内磁化の寄与によっても自発的なホール効果が発現することを明らかにしました。この成果は、ホール効果に関する従来の概念を刷新する画期的なものであり、応用展開にも新たな可能性を拓くものです。

●今後の展開

本研究により、軌道磁化が顕在化した異常ホール効果が磁場なしで自発的に現れることが示されました。また、スピン磁化との非対角的な結合が異常ホール効果の顕在化において重要な役割を果たすことも明らかになりました。この成果は、軌道磁化を軸とした新たな電子物性の理解を深めると同時に、ホールセンサなどへの応用展開に向けた技術基盤としてもさらなる前進をもたらすと期待されます。

●付記

本研究は、科学技術振興機構（JST） 創発的研究支援事業（JPMJFR202N)、同 戦略的創造研究推進事業 さきがけ（JPMJPR2452)、日本学術振興会（JSPS）科学研究費助成事業（JP22K18967、JP22K20353、JP23K13666、JP23K03275、JP24H01614、JP24H01654)、豊田理化学研究所ライジングフェロー制度、村田学術振興・教育財団助成、「東工大の星」特別賞【STAR】の支援のもと実施されました。

【参考文献】

［1］ A. Nakamura *et al.*, *Physical Review Letters* **133,** 236602 (2024)

【用語説明】

（1） **異常ホール効果**：ホール効果のうち、磁化を持つ物質において磁場とは異なる形で電子の進行方向が曲げられる効果のこと。

（2） **スピン磁化**：電子の自転運動であるスピンに由来する磁化。

（3） **ワイル点**：バンド分散における特異点で、バンドが 3 次元的に交差した特異点であり、そのカイラリティ（スピンと粒子の運動方向が平行か反平行かを表す指標）の符号に応じてベリー曲率発散的な湧き出しまたは吸い込みを示す。

（4） **軌道磁化**：電子の軌道運動に由来する磁化で、バンド構造に内在する量子幾何

学的性質を反映する。

（5） **正常ホール効果**：ホール効果のうち、磁場によるローレンツ力によって電子の進行方向が曲げられる効果のこと。

（6） **ベリー曲率**：波動関数の位相変化に関連した量子幾何学量の一つで、波数空間における仮想的な磁場としてはたらく。

【論文情報】

掲載誌：*Advanced Materials*
論文タイトル：Spontaneous in-plane anomalous Hall response observed in a ferromagnetic oxide
著者：Shinichi Nishihaya, Yuta Matsuki, Haruto Kaminakamura, Hiroki Sugeno, Ming-Chun Jiang, Yoshiya Murakami, Ryotaro Arita, Hiroaki Ishizuka, and Masaki Uchida*
*corresponding author
DOI：10.1002/adma.202502624

【研究者プロフィール】

西早 辰一（ニシハヤ シンイチ）Shinichi NISHIHAYA
東京科学大学 理学院 物理学系　助教
研究分野：物性実験

有田 亮太郎（アリタ リョウタロウ）Ryotaro ARITA
東京大学 大学院理学系研究科　教授
理化学研究所 創発物性科学研究センター　チームディレクター
研究分野：物性理論

石塚 大晃（イシヅカ ヒロアキ）Hiroaki ISHIZUKA
東京科学大学 理学院 物理学系　准教授
研究分野：物性理論

打田 正輝（ウチダ　マサキ）Masaki UCHIDA
東京科学大学 理学院 物理学系　准教授
研究分野：物性実験

【お問い合わせ先】

（研究に関すること）
東京科学大学 理学院 物理学系　准教授

打田 正輝
Email: m.uchida@phys.sci.isct.ac.jp
TEL/FAX: 03-5734-2756

東京大学 大学院理学系研究科　教授
兼 理化学研究所 創発物性科学研究センター　チームディレクター
有田 亮太郎
Email: ryotaro.arita@phys.s.u-tokyo.ac.jp

（JST 事業に関すること）
科学技術振興機構 創発的研究推進部
東出 学信
Email: souhatsu-inquiry@jst.go.jp
TEL: 03-5214-7276　FAX: 03-6268-9413

（報道取材申し込み先）
東京科学大学 総務企画部 広報課
取材申し込みフォーム：https://forms.office.com/r/F3shqsN7zY
Email: media@adm.isct.ac.jp
TEL: 03-5734-2975　FAX: 03-5734-3661

東京大学大学院理学系研究科・理学部　広報室
Email: media.s@gs.mail.u-tokyo.ac.jp
TEL: 03-5841-8856　FAX: 03-5841-1035

理化学研究所
Email: ex-press@ml.riken.jp
TEL: 050-3495-0247

公益財団法人 豊田理化学研究所 事務局
Email: riken@toyotariken.jp
TEL: 0561-63-6141　FAX: 0561-63-6327

科学技術振興機構 広報課
Email: jstkoho@jst.go.jp
TEL: 03-5214-8404　FAX: 03-5214-8432