

固体中の電子の軌道を曲げる新しい機構の発見 —非共面スピン集団がもたらす巨大電子散乱—

1. 発表のポイント：

- ◆従来の機構では説明できない巨大な異常ホール効果（注1）を観測しました。
- ◆その起源が、非共面的な構造をもつスピン集団（注2）による電子散乱で説明できる可能性を、多角的な検証実験を通して提唱しました。
- ◆今後様々な物質において、同じ機構による巨大異常ホール効果の観測が期待でき、省エネルギーデバイスの実現に向けた新たな設計指針につながると考えられます。

2. 発表概要：

伝導電子と磁性との相互作用の結果、電流と垂直方向に電圧が生じる現象は「異常ホール効果」と呼ばれ、基礎・応用の両観点から近年大きな注目を集めています。その起源には、固体中の仮想磁場（注3）に由来するものと、不純物からの電子散乱によるものがありますが、近年の固体中の幾何学的位相の概念確立によって、多くの物質で前者の寄与が支配的であることが明らかになったため、電子散乱による機構はあまり注目されてきませんでした。

東京大学大学院工学系研究科の藤代有絵子大学院生と金澤直也講師、理化学研究所創発物性科学センターの十倉好紀センター長らを中心とする研究グループは、東京大学物性研究所の徳永将史准教授、東北大学金属材料研究所の塚崎敦教授、理化学研究所創発物性科学センターの于秀珍チームリーダー、東京大学大学院工学系研究科の永長直人教授、市川昌和名誉教授、川崎雅司教授らの研究グループと共同で、カイラル磁性体 MnGe （Mn：マンガン、Ge：ゲルマニウム）の薄膜において、電子散乱機構に基づく巨大な異常ホール効果を発見しました。この結果を、従来の電子散乱機構によって説明することはできず、熱励起された非共面的なスピン集団が電子を散乱するという、全く新しい機構で理解できる可能性を示しました。特に、異常ホール効果の詳しい温度・磁場依存性や、膜厚制御による磁気異方性（注4）に対する変化を調べることで、上記の機構の妥当性を実証しました。

今回の成果により、電子散乱に起因した巨大異常ホール効果の観測が、今後より多くの物質で期待できます。また一般に、ホール電流はエネルギー損失を伴わないため、省電力デバイスの新たな設計指針につながることが期待できます。

3. 発表内容：

<研究の背景>

ホール効果とは、電流と垂直な方向に電圧が生じる現象で、古典的な例としては外部磁場を印加した際のローレンツ力によるものが知られています。一方、電子が磁性と相互作用することで起きるホール効果は「異常ホール効果」と呼ばれ、基礎・応用の両観点から近年大きな注目を集めています。その機構は大きく分けて二種類あり、固体中の仮想磁場に由来するものと、不純物からの電子散乱によるものが知られています。近年の固体中の幾何学的位相の概念確立によって、多くの物質で前者の寄与が支配的であることが明らかになったため、電子散乱による機構はあまり注目されてきませんでした。

<研究の内容>

本研究グループは、カイラル磁性体 MnGe の単結晶薄膜において巨大な異常ホール効果を観測し、それが新しい電子散乱機構に起因している可能性を明らかにしました。 MnGe は低磁場領域において、ヘッジホッグ格子（注 5）とよばれる長距離の非共面磁気構造をもち、その特異な物性解明が本研究グループによって進められてきました。今回強磁場下で電気伝導測定を行ったところ、そのような非共面磁気秩序が消失する強磁性転移（注 6）の近傍において巨大なホール伝導度（約 $40,000 \Omega^{-1}\text{cm}^{-1}$ ）（注 7）を観測しました（図 1a）。さらに、ホール伝導度と縦伝導度（注 7）の比例関係（図 1b）から、スキュー散乱（注 8）とよばれる電子散乱機構が異常ホール効果の起源であることを明らかにしました。従来のスキュー散乱では、単スピンの不純物や格子欠陥が電子を散乱し、ホール角（注 7）は 1%未満になることが知られています。一方、今回観測されたホール角は 18%にも及び、全く新しい機構によるものと考えられます。そのひとつの可能性として、近年理論的に提案された、非共面スピン集団がもたらす電子散乱が挙げられます（図 1c）。これは、熱励起された非共面スピン集団を電子が通過する際、複数の経路による量子的な干渉効果で軌道が曲げられる現象で、大きな異常ホール効果をもたらす可能性が指摘されていました。

そこで多角的な検証実験を行ったところ、上記の機構を示唆する特徴を観測しました。ひとつはホール伝導度の温度依存性で、中間温度で最大化される振る舞いを示しています（図 2a）。これは、低温ではスピン集団が熱励起されず、一方高温では逆向きのスピン集団による打ち消し合いが起きることを反映していると考えられます。さらに、温度・磁場依存性に着目すると、膜厚が小さいほど、熱励起が難しい低温・強磁場領域においても異常ホール効果が増強することが判明しました（図 2b）。これは、膜厚を小さくすることで面内磁気異方性が大きくなり、非共面的なスピン集団が励起されやすくなったためであると考えられます。従って本研究グループは、観測された巨大異常ホール効果が、熱励起された非共面スピン集団による電子散乱という新しい機構に起因している可能性を提案しました。

<社会的意義・今後の予定>

これまでの研究により、様々な磁性体における異常ホール効果のホール伝導度と縦伝導度は普遍的なスケーリング則に従うことが明らかにされてきました（図 3）。一方今回の成果は、短距離スピン相関による全く新しい異常ホール効果の発見であり、実際にスケーリング則から外れた顕著な振る舞いを示しています（図 3）。従来のスキュー散乱では、大きな異常ホール効果を観測するためには極端にきれいな試料が必要でしたが、今回の成果は、今後多くの物質において電子散乱を起源とする巨大異常ホール効果が観測できる可能性を示しています。また一般に、ホール電流はエネルギー損失を伴わないため、大きな異常ホール効果をもたらす新機構の発見は、省エネルギー電子デバイスの開発における重要な設計指針となることが期待されます。

研究支援

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「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）」（Grant No. JPMJCR1874）、同 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）」（Grant No. JPMJCR16F1）、日本学術振興会（JSPS）科学研究費補助金特別研究員奨励費「磁気構造のトポロジー制御による電子機能物性の開拓（研究代表者：藤代有絵子）」（Grant No. JP18J20959）、

同基盤研究B「Zak位相制御による表面状態設計とスピントロニクス機能実現(研究代表者:金澤直也)」(Grant No. JP20H01859)、同基盤研究B「トポロジカル熱輸送の低温イメージング分光(研究代表者:豊田新悟)」(No. JP20H01867)、同新学術領域研究(量子液晶の物性科学)「トポロジカルスピン液晶制御と巨大電子散乱現象(研究代表者:金澤直也)」(Grant No. JP20H05155)による支援を受けて行われました。

4. 発表雑誌:

雑誌名:「*Nature Communications*」

論文タイトル: Giant anomalous Hall effect from spin-chirality scattering in a chiral magnet

著者: Y. Fujishiro, N. Kanazawa, R. Kurihara, H. Ishizuka, T. Hori, F. S. Yasin, X. Z. Yu, A. Tsukazaki, M. Ichikawa, M. Kawasaki, N. Nagaosa, M. Tokunaga and Y. Tokura
DOI番号: 10.1038/s41467-020-20384-w

発表者

- 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年生/
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 研修生)
- 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/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 客員研究員)
- 栗原 綾佑 (東京大学 物性研究所附属国際超強磁場科学研究施設 特任研究員)
- 石塚 大晃 (研究当時: 東京大学 大学院工学系研究科 物理工学専攻 助教/
現: 東京工業大学 理学院物理学系 准教授)
- 堀 智洋 (東京大学 大学院工学系研究科 物理工学専攻 修士課程1年生/
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 研修生)
- F. S. Yasin (理化学研究所 創発物性科学研究センター 電子状態マイクロコピー
研究チーム 特別研究員)
- 于 秀珍 (理化学研究所 創発物性科学研究センター 電子状態マイクロコピー
研究チーム チームリーダー)
- 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)
- 市川 昌和 (東京大学 大学院工学系研究科 物理工学専攻 名誉教授)
- 川崎 雅司 (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
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 副センター長)
- 永長 直人 (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 副センター長)
- 徳永 将史 (東京大学 物性研究所附属国際超強磁場科学研究施設 准教授)
- 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 国際高等研究所東京カレッジ 卓越教授)

5. 問い合わせ先：

<研究に関すること>

東京大学 大学院工学系研究科 物理工学専攻
大学院生 藤代 有絵子 (ふじしろ ゆかこ)

東京大学 大学院工学系研究科 物理工学専攻
講師 金澤 直也 (かなざわ なおや)

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 国際高等研究所東京カレッジ
卓越教授 十倉 好紀 (とくら よしのり)

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

<報道に関すること>

東京大学 大学院工学系研究科 広報室

理化学研究所 広報室 報道担当

東京大学物性研究所 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

<JST事業に関すること>

嶋林 ゆう子 (シマバヤシ ユウコ)

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
〒102-0076 東京都千代田区五番町7 K's 五番町

6. 用語解説：

(注 1) 異常ホール効果

電子が磁性と相互作用することで、ホール効果が増強されることが知られており、様々な起源を総称して「異常ホール効果」と呼ぶ。

(注 2) 非共面的な構造をもつスピン集団

隣り合う3つ以上のスピン立体角をもっているようなスピンの集団のこと。スピンの向きが揃っておらず、図 1c に示すように互いに傾いた状態。

(注 3) 仮想磁場

固体中の電子構造・磁気構造の幾何学的な性質は電子の位相に影響を与えるため、電子があたかも実効的な磁場を感じているかのように振る舞うことが知られている。

(注 4) 磁気異方性

物質中で、スピンが結晶のどちらの向きに向きやすいかという性質のこと。MnGe 薄膜の場合、膜厚が小さいほどスピンは薄膜の面内に向きやすくなることが知られている。

(注 5) ヘッジホッグ格子

多くのスピンが集まって構成する幾何学的磁気構造のひとつで、ヘッジホッグ・反ヘッジホッグと呼ばれる磁化の特異点的な構造が3次元状に分布している。これらは伝導電子と結合すると大きな仮想磁場を生み、特異な電荷輸送特性をもたらすため、MnGe 化合物において研究が進められてきた。

(注 6) 強磁性転移

磁場をかけることで、スピンが完全に揃った状態（強磁性状態）になること。

(注 7) ホール伝導度、縦伝導度、ホール角

ホール伝導度は電流に対して垂直方向、縦伝導度は電流と平行な方向の、電気伝導のしやすさを表す物理量。伝導度が大きいほど、電気が流れやすい。またホール角はホール伝導度を縦伝導度で割ったもので定義され、流した電流のうち、どれだけの成分が横方向に曲げられたかを表している。

(注 8) スキュー散乱

不純物によって電子が散乱される異常ホール効果の機構のひとつ。この場合、ホール伝導度と縦伝導度の大きさは、いずれも不純物密度の逆数に比例するため、線形の比例関係を取ることが知られている。不純物が少なく縦伝導度が大きい領域ほどスキュー散乱の効果は顕著になる。

7. 添付資料：

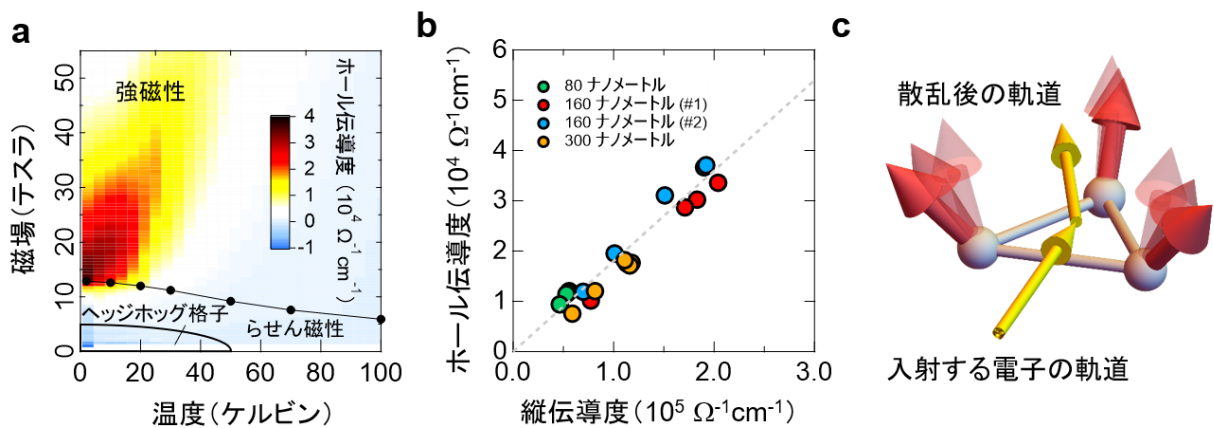


図1 観測された巨大異常ホール効果の特徴と新しい電子散乱機構の模式図

(a)厚さ 160 ナノメートルの薄膜におけるホール伝導度の温度・磁場相図。ヘッジホッグ格子やらせん磁性が消えた強磁性領域において異常ホール効果が増大している。(b) ホール角が最大になる磁場点において、ホール伝導度と縦伝導度を温度変化させながらプロットしたものを。膜厚や品質に依らず、あらゆる試料においてスキュー散乱に特徴的な線形の比例関係を示している。比例直線の傾きの大きさがホール角に相当し、18~22%と大きな値を取っているため、従来のスキュー散乱とは異なる機構が示唆される。(c) 熱励起された非共面的なスピン集団によって、運動する電子が横方向に散乱される様子を描いた模式図。

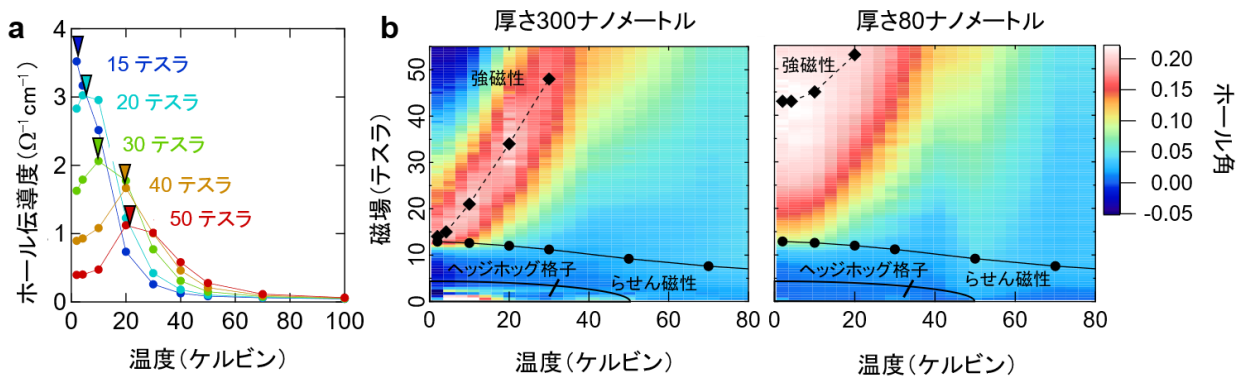


図2 熱励起された非共面スピン集団による電子散乱を示唆する異常ホール効果の特徴

(a)様々な磁場下における、ホール伝導度の温度依存性。非共面スピン集団の熱励起が最も増強する中間温度で最大値を取っている。(b) 厚さ 300 ナノメートルと 80 ナノメートルの薄膜におけるホール角の温度・磁場依存性の比較。スピンの面内磁気異方性が大きくなる薄い薄膜においては、非共面スピン集団の熱励起が起こりにくい低温・強磁場領域においても異常ホール効果が増大している。

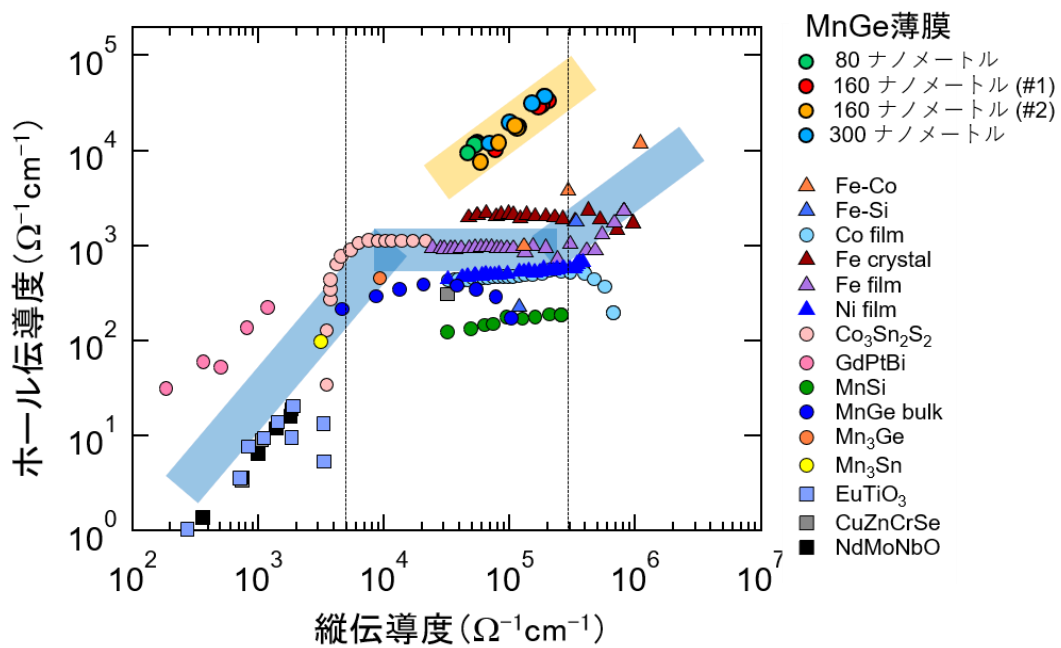


図3 さまざまな磁性体におけるホール伝導度と縦伝導度のプロット

MnGe 薄膜において観測された異常ホール効果（黄色の領域）は、普遍的なスケーリング則（水色の領域）から大きく外れており、新しい機構による異常ホール効果であることを強く示唆している。ホール角が通常のスキュー散乱と比べて1桁以上大きいため、縦伝導度の値に対して大きなホール伝導度が観測されている。