

報道関係者各位

国立大学法人筑波大学  
国立研究開発法人物質・材料研究機構（NIMS）  
国立大学法人東北大学

## 物質科学の基礎定理に反する？異方的なホール効果の発見

電流を流す方向によって電流の曲がる方向が変わる新しいホール効果を観測しました。物質科学の基礎定理の一つであるオンサーガーの相反定理によれば、このような現象は起こりえないはずですが、特殊な磁気配列を仮定することで、相反定理と矛盾せずにこの現象を説明できる物理モデルを提案しました。

磁場中にある導体や磁石に電流を流すと電流と磁場に対して垂直方向に電圧が生じる「ホール効果」や「異常ホール効果」という現象が起きます。物質科学における基礎定理の一つである「オンサーガーの相反定理」によると、磁場や磁化に垂直な面内であれば、どの方向に電流を流しても電子が曲がる方向は変わらないということが導かれます。この定理に反するような現象は、これまで見つかっていませんでしたが、本研究では低温で円錐型の磁気異方性を有するスピネル酸化物  $\text{NiCo}_2\text{O}_4$  薄膜において、電流方向に依存した異方的な異常ホール効果を初めて観測しました。

この現象を説明するために、実験的に観測された異方的な異常ホール効果の対称性を、現象論的な観点から考察したところ、クラスター磁気トロイダル四極子と呼ばれる磁気構造が関与していることが示唆されました。そこで、円錐型の磁気異方性により磁気トロイダル四極子構造と強磁性が共存した時には、オンサーガーの相反定理と矛盾せずに異方的な異常ホール効果を説明できる物理モデルを提案しました。

### 研究代表者

筑波大学数理物質系

柳原 英人 教授

物質・材料研究機構（NIMS）マテリアル基盤研究センター

山崎 裕一 主幹研究員

東北大学先端スピントロニクス研究開発センター

小泉 洸生 助教（研究当時：筑波大学数理物質科学研究科）

## 研究の背景

電気と磁気の間には、さまざまな力が働くことが知られています。その中の一つにローレンツ力<sup>注1)</sup>があります。「フレミング左手の法則」で知られるように、磁場中の導体に電流を流すと電流が曲がるようなローレンツ力を受け、磁場と電流に垂直な方向に起電力が生じます。これは、ホール効果<sup>注2)</sup>と呼ばれ、磁気センサーなどに使われている現象です (図1上)。

磁石に電気を流すと、外部の磁場がなくてもホール効果が表れることがあります。これは異常ホール効果と呼ばれ、磁石の持つ磁気が磁場と同じように作用する現象として理解できます。しかし、実際にはさまざまな量子力学的現象が関与しており、その多彩な物理現象の研究が盛んに行われてきました。このような研究分野において、ホール効果のミクロな現象を電流や磁場のようなマクロな物理量と関連付けるのが、物質科学の基本的な定理の一つである「オンサーガー (Onsager) の相反定理」です。この定理によると、ホール効果や異常ホール効果は、磁場や磁化に垂直な面内であれば、どの方向に電流を流しても電子が曲がる方向は変わらないという事実を導くことができます。これは、フレミング左手の法則で電流の方向を変えても、電流に対して受ける力の方向は変わらない (右手の法則にはならない) ことに対応しています。

## 研究内容と成果

今回、本研究グループは、宝石のスピネル (尖晶石) と同じ結晶構造を持つ、ニッケル (Ni) とコバルト (Co) の酸化物  $\text{NiCo}_2\text{O}_4$  の薄膜試料 (厚さ 50 ナノメートル) を作製し、異常ホール効果の電流方向依存性を実験的に調べました。 $\text{NiCo}_2\text{O}_4$  薄膜は、特殊な電子状態の影響で、磁気モーメント<sup>注3)</sup> が薄膜の膜面垂直方向に向きやすい特性があり (図2左)、高密度な磁気記憶材料として応用上、魅力的な物質です。また近年、 $\text{NiCo}_2\text{O}_4$  薄膜を冷却すると磁気異方性<sup>注4)</sup> が変化し、磁気モーメントの向きやすい方向が円錐面状に広がっていることが明らかになりました。このような磁性体では、磁気モーメントが膜面内方向の自由度を持ち、三次元的に配列した複雑な磁気構造になっていると想定されています (図3)。

この物質について詳細に調べたところ、驚くべきことに、低温において異常ホール効果が電流方向に依存していることが分かりました (図1下、図2中・右)。上述のように、オンサーガーの相反定理は、異常ホール効果が電流方向に依存しないことを示しているため、この結果はオンサーガーの相反定理に反しているかのように思われました。しかしながら、異方的なホール効果の対称性<sup>注5)</sup> を考慮し、クラスター磁気多極子理論<sup>注6)</sup> に基づいて、 $\text{NiCo}_2\text{O}_4$  薄膜で実現しうる磁気構造について考察を行うと、クラスター磁気トロイダル四極子と呼ばれる磁気構造が実現していることが示唆されました (図3)。そして、クラスター磁気トロイダル四極子と強磁性が共存しており、反強磁性構造であるクラスター磁気トロイダル四極子が外部磁場により反転しない場合には、一見するとオンサーガーの相反定理が破れているように見える現象が、定理と矛盾することなく実現することを明らかにしました。これらの考察に基づいて、今回の実験結果を説明可能な物理モデルを提案するとともに、この新しいホール効果を四極子異常ホール効果と名付けました。

## 今後の展開

本研究では、電流方向に依存した異方的なホール効果とオンサーガーの相反定理が矛盾なく両立することを、実験と理論の両面から明らかにしました。今後、スピン分解角度分解光電子分光や光学測定などによりクラスター磁気トロイダル四極子秩序の直接的な実証と観察を進める予定です。

参考図

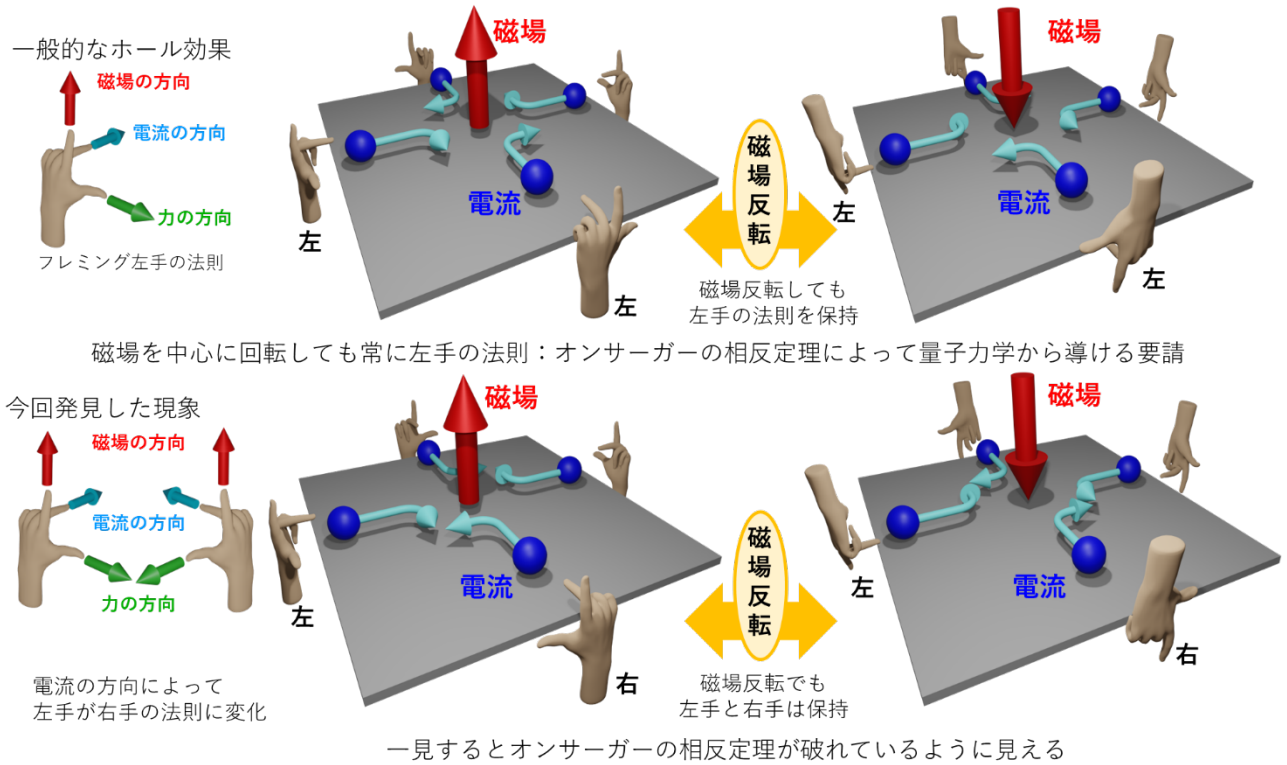
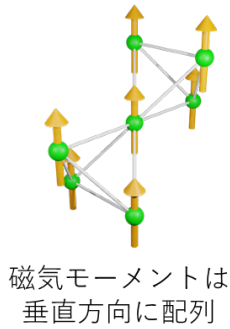
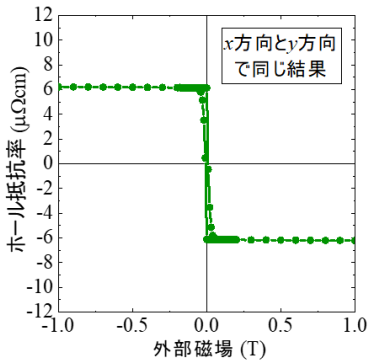


図1 一般的なホール効果と本研究における異方的なホール効果の概略図

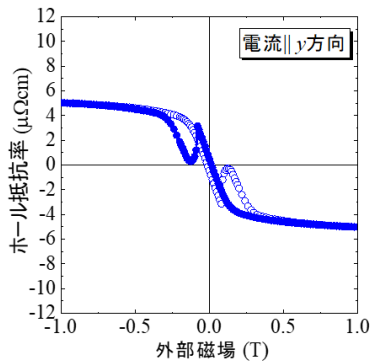
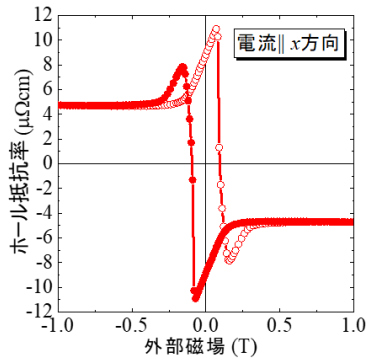
(上) 一般的なホール効果：オンサーガーの相反定理によりホール効果は電流方向で力の方向が変わらないことが前提となり、フレミング左手の法則が常に成り立つ。

(下) 今回発見した異方的なホール効果：電流方向によって力の方向が変化するホール効果を観測した。電流方向により、フレミング左手の法則が右手の法則に変化する。

垂直磁気異方性を示す温度でのホール効果



円錐型の磁気異方性を示す温度でのホール効果



抜き出された電流に依存した成分

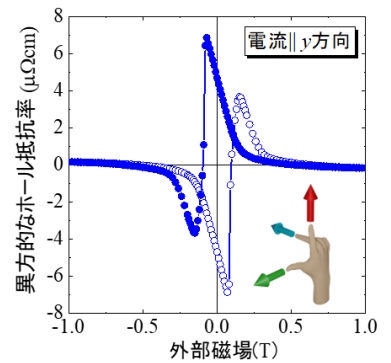
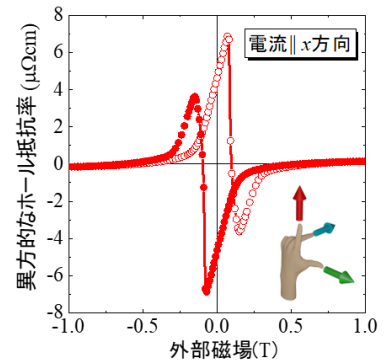


図2 本実験で得られた通常のホール効果と異方的なホール効果の対比  
 (左) 垂直磁気異方性を示す温度と、(中) 円錐型の磁気異方性を示す温度でホール効果測定の測定結果。  
 (右) ホール抵抗率から抽出された電流方向に依存したホール効果の成分。

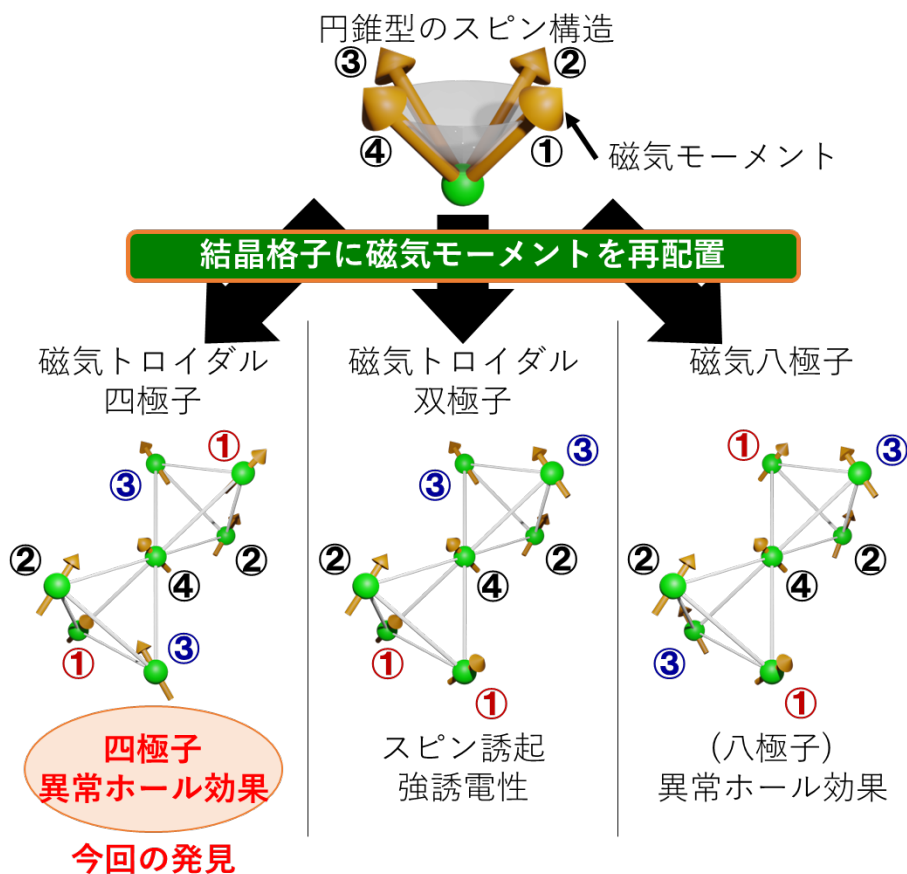


図 3: 磁気異方性により、磁気モーメントが円錐型に配列する。これらの磁気モーメントをスピネルの結晶格子に配列しなおすと、クラスター磁気トロイダル四極子やクラスター磁気トロイダル双極子、磁気八極子などのさまざまな磁気構造が実現可能となる。

### 用語解説

注 1) ローレンツ力

運動する荷電粒子が磁場から受ける力。フレミング左手の法則において、力に相当する。

注 2) ホール効果

磁場中にある物質に電流を流すと、ローレンツ力により磁場と電流のそれぞれに垂直な方向に起電力が生じる現象のこと。

注 3) 磁気モーメント

原子内の電子が持つスピン角運動量と軌道運動によって生じる軌道角運動量を合わせた磁気の由来となるモーメント。固体内でモーメントが同じ方向に向いて秩序化すると強磁性体、打ち消すように配列すると反強磁性体となる。

注 4) 磁気異方性

磁性体中では、磁気モーメントの向きにより内部エネルギーが変化する。そのため、磁性体中では磁気モーメントは特定の方向に向きやすい特性を持ち、これを磁気異方性と言う。通常、磁性薄膜では、磁気モーメントは膜面に対して垂直か平行な方向に向きやすくなっており、垂直に向きやすい特性は垂直磁気異方性と呼ばれる。一方で、より複雑な相互作用（高次の効果）が加わると、磁気モーメントの向きやすい方向が垂直か面内のどちらでもない斜め方向の円錐型になることがある。

注 5) (ホール効果の) 対称性

物理現象の対称性は、常に結晶の有する対称性と同等かそれよりも高い（ノイマンの原理）。磁性体に

においては、磁気構造の対称性を反映した物理応答が得られる。

#### 注6) クラスタ-磁気多極子理論

磁性体においては、結晶中のいくつかのサイトを磁性イオンが占有している。この理論では、これら複数のサイトからなる磁気構造を一つのクラスターとして考え、これを、そのクラスター内の磁気構造の対称性に対応する磁気多極子秩序とみなす。

#### 研究資金

本研究は、高エネルギー加速器研究機構 (KEK) PF 課題 (2017G602、2016S2-005) において行われたものです。また本研究の一部は、日本学術振興会科学研究費助成事業(19H04399、20J10749、21H01750、22H04966、22J00871、23H01842)、TIA-かけはし(TK22-023、TK23-017)、科学技術振興機構 (JST) 戦略的創造研究推進事業 (さきがけ、JPMJPR177A)、同戦略的創造研究推進事業チーム型研究 (CREST、JPMJCR1861) の支援を受けて実施されました。

#### 掲載論文

- 【題名】 Quadrupole anomalous Hall effect in magnetically induced electron nematic state  
(磁気的に誘導された電子ネマティック状態による四極子異常ホール効果)
- 【著者名】 Hiroki Koizumi, Yuichi Yamasaki, and Hideto Yanagihara
- 【掲載誌】 Nature Communications
- 【掲載日】 2023年12月8日
- 【DOI】 10.1038/s41467-023-43543-1

#### 問い合わせ先

##### 【研究に関すること】

柳原 英人 (やなぎはら ひでと)

筑波大学数理物質系/エネルギー物質科学研究センター 教授

URL: <https://www.bk.tsukuba.ac.jp/~mml/index.html#>

##### 【取材・報道に関すること】

筑波大学 広報局

TEL: 029-853-2040

E-mail: [kohositu@un.tsukuba.ac.jp](mailto:kohositu@un.tsukuba.ac.jp)

NIMS 国際・広報部門 広報室

TEL: 029-859-2026

E-mail: [pressrelease@ml.nims.go.jp](mailto:pressrelease@ml.nims.go.jp)

東北大学 電気通信研究所 総務係

TEL: 022-217-5420

E-mail: [riec-somu@grp.tohoku.ac.jp](mailto:riec-somu@grp.tohoku.ac.jp)