

磁性材料の熱電変換現象を磁化の向きで操る

～「異方性磁気トムソン効果」を初めて直接観測～

配布日時：2023年11月22日14時

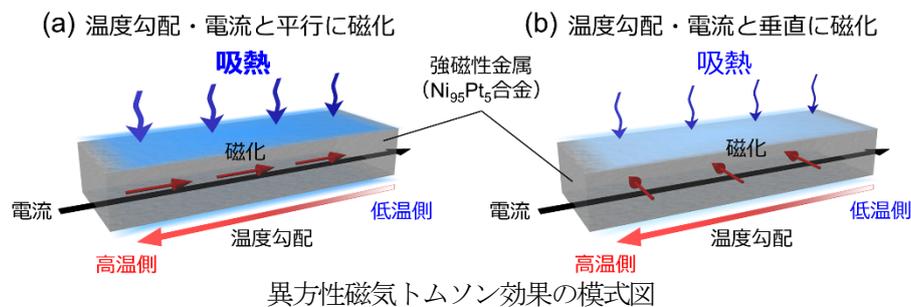
国立研究開発法人物質・材料研究機構（NIMS）

概要

1. NIMS は、温度差を付けた導電体に電流を流すと温度差と電流に比例した吸熱・発熱が生じる現象（トムソン効果）が、磁性体においては磁化方向に依存して異方的に変化する「異方性磁気トムソン効果」の直接観測に成功しました。本研究により、熱電物性とスピントロニクスとの融合領域に関する基礎物理および物質科学のさらなる発展や、磁気で熱エネルギーを制御する新たな機能の発現が期待されます。

2. トムソン効果は、熱電変換技術の駆動原理であるゼーベック効果やペルチェ効果と並び、金属や半導体における基本的な熱電効果の一つとして古くから知られています。ゼーベック効果やペルチェ効果に及ぼす磁気の影響は長年研究されてきましたが、トムソン効果の熱電変換能は一般的に小さく、その計測・評価手法も十分に確立されていなかったため、トムソン効果が磁場や磁性にどう影響されるかは明らかにされていませんでした。そのような状況の中、NIMS は2020年に非磁性の導電体におけるトムソン効果が磁場によって変化する現象を観測した実験を報告しました。今回はさらに精密な熱計測を行うことで、磁性体における異方性磁気トムソン効果の観測に成功しました。非磁性体における磁気トムソン効果と磁性体における異方性磁気トムソン効果は発現機構が異なり、未開拓現象の初めての直接観測例になります。

3. 今回、NIMS の研究チームは、ロックインサーモグラフィ法と呼ばれる熱計測技術を用いて、強磁性合金 $\text{Ni}_{95}\text{Pt}_5$ に温度差を与えながら、電流を流した際に生じる温度分布を精密に測定し、磁化方向によりトムソン効果がどう変わるかを検証しました。その結果、 $\text{Ni}_{95}\text{Pt}_5$ 合金に生じる吸熱（もしくは発熱）量が、温度勾配・電流と磁化が平行な場合は、それぞれ垂直な場合よりも大きいことを明らかにしました。この振る舞いは磁性体におけるゼーベック効果やペルチェ効果の測定から予想される変化と一致しました。



4. 本研究により、異方性磁気トムソン効果の基本的な性質が明らかになり、その計測・評価技術が確立されました。今後、異方性磁気トムソン効果に関する物理・材料・機能探索を進めることで、熱・電気・磁気の相互作用がもたらす新しい物理現象の観測や、電子デバイスの効率向上・省エネルギー化に資する熱マネジメント技術への応用展開を目指していきます。

5. 本研究は、NIMS 磁性・スピントロニクス材料研究センターの Rajkumar Modak 特別研究員、平井孝昌研究員、三谷誠司センター長、内田健一上席グループリーダーによって行われました。本研究は主に、JSPS 科学研究費助成事業 基盤研究(B) (19H02585)、基盤研究(S) (22H04965)、JSPS 外国人研究者招へい事業 (外国人特別研究員) (P21064)の一環として行われました。

6. 本研究成果は、2023年11月17日にアメリカ物理学会の学術誌「Physical Review Letters」(Vol. 131, p. 206701) に掲載されました。

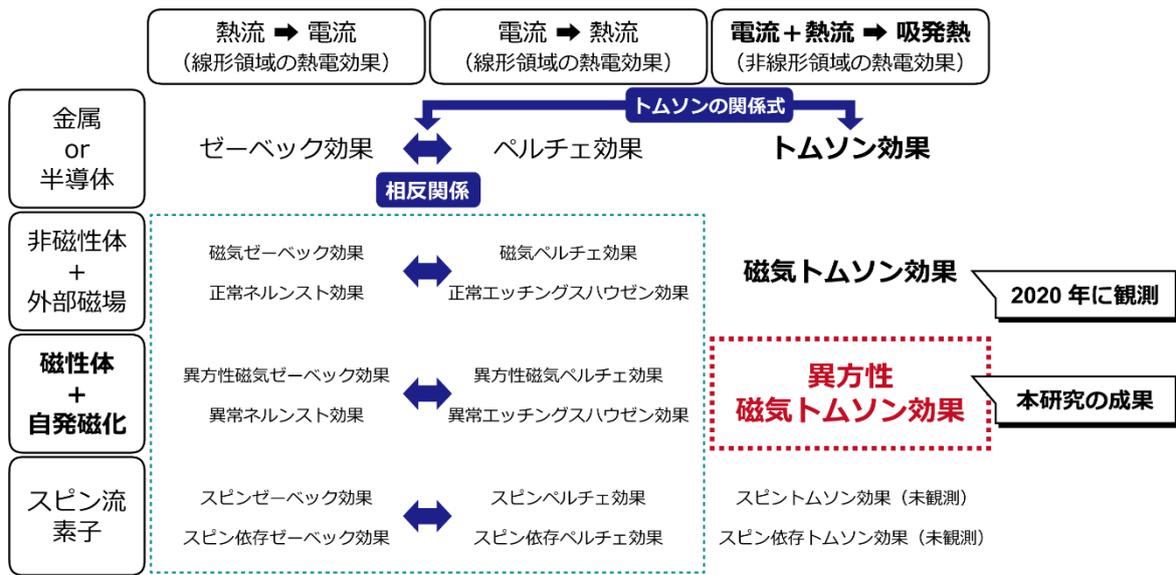
* 物質・材料研究機構は、その略称を NIMS (National Institute for Materials Science) に統一しております。

研究の背景

熱エネルギーと電気エネルギーを変換できる熱電効果は、環境発電技術⁽¹⁾や電子冷却技術⁽²⁾の動作原理として長年盛んに研究されています。これらの技術は主に、温度差に比例した電圧が生じるゼーベック効果や、電流に比例した吸熱・発熱（温度変化）が生じるペルチェ効果によって機能します。トムソン効果は、温度差を付けた導電体に電流を流した際に、温度勾配と電流の両方に比例して吸熱もしくは発熱が生じる現象であり、単一物質で動作する点が2種類の物質の接合を必要とするゼーベック効果・ペルチェ効果とは異なります。しかし、トムソン効果の熱電変換能は一般的に小さく、その計測・評価手法も十分に確立されていなかったため、基礎・応用の両面においてトムソン効果に関する研究報告は限られていました。

磁場を印加した導電体や磁化を持つ磁性体においては、ゼーベック効果・ペルチェ効果・トムソン効果に加えて多彩な熱電効果が発現します（図1）。熱流と電流の相互作用に磁場や磁性（スピン⁽³⁾）を取り入れることで、新たな物理原理や機能性の創出を目指す学問が、21世紀に入ってから急速に進展しています。しかし、これまではゼーベック効果やペルチェ効果に対する磁場や磁性の影響が主な研究対象となっていたため、トムソン効果に対する影響は明らかになっていませんでした。

そのような状況の中、NIMSはロックインサーモグラフィ法⁽⁴⁾と呼ばれる動的熱計測技術を用いて、トムソン効果によって生じる温度変化の直接観測を可能にする手法を確立しました。この手法を用いることで、2020年には非磁性体におけるトムソン効果が磁場を印加することで変化する現象（磁気トムソン効果⁽⁵⁾）が観測されるなど、磁場や磁性がトムソン効果に与える影響が徐々に明らかになってきました（図1）。しかし、磁性体において磁化の方向に依存してトムソン効果が異方的に変化する「異方性磁気トムソン効果」については、ゼーベック効果・ペルチェ効果の測定結果からその存在が期待されていたものの、異方性磁気トムソン効果によって生じる温度変化が直接観測された例はありませんでした。



熱電物性とスピントロニクスの融合分野において近年急速に進展

図1 熱・電気・磁気の相互作用がもたらす熱電効果の代表例

研究内容と成果

今回、NIMSの研究チームは、測定温度環境などを最適化した精密なロックインサーモグラフィ計測を行うことで、世界で初めて異方性磁気トムソン効果を直接観測しました。従来の磁気トムソン効果と今回観測した異方性磁気トムソン効果の名称や熱電変換機能は似ていますが、その発現メカニズムは全く異なり、両者は別の物理現象です。磁気トムソン効果は外部磁場下で電荷キャリア（伝導電子や正孔）の流れがローレンツ力で曲げられることによって生じますが、異方性磁気トムソン効果は磁性体中のスピン軌道相互作用⁽⁶⁾によって発現します。一般的には、原子番号の大きい元素ほど強いスピン軌道相互作用を有する傾向があるため、今回は強磁性金属であるニッケルにスピン軌道相互作用の大きなプラチナを少量加えたNi₉₅Pt₅合金を試料として用いました。Ni₉₅Pt₅合金においては、比較的大きな異方性磁気ペルチェ効果⁽⁷⁾が生じることが知られていますが、温度測定感度の制限からこれまでは異方性磁気トムソン効果の観測に

は至っていませんでした。

そこで本研究では、まずはNi₉₅Pt₅合金におけるゼーベック効果の磁場・温度依存性を精密に測定することで、異方性磁気トムソン効果の観測に適した温度領域を決定することから始めました。トムソン効果による熱電変換能はゼーベック効果による熱電変換能の温度微分に依存することが知られており、ゼーベック効果の測定により間接的に異方性磁気トムソン効果の振る舞いを予測することができます。その結果、400 K 程度に加熱することにより、室温下よりもNi₉₅Pt₅合金の異方性磁気トムソン効果が2倍程度増強されることを示唆する結果が得られました。この結果に基づき、Ni₉₅Pt₅合金におけるトムソン効果によって生じる温度変化を、加熱条件下で磁化方向を変えながらロックインサーモグラフィ法により測定しました。

トムソン効果を測定するために、本実験ではNi₉₅Pt₅合金を角棒状に加工し、試料の両端に取り付けたヒーターによって平均温度を上げると共に、両端に温度差を付けました。ロックインサーモグラフィ法では、試料に周期的に変化する電流を印加しながら赤外線カメラを用いて表面の温度分布を測定し、フーリエ解析⁸⁾によって電流と同じ周波数で時間変化する温度変化だけを選択的に抽出することで、熱電効果に由来する信号のみを可視化することができます。2020年に報告した実験と同様の測定・解析手法を用いることでペルチェ効果等の外的な寄与を排除して、トムソン効果に由来する温度変化のみを精密に測定しました。

実験の結果、Ni₉₅Pt₅合金におけるトムソン効果によって生じる温度変化（トムソン信号）の大きさが、磁場方向に依存して変化する振る舞いが観測されました（図2）。試料に与えた温度勾配・電流と磁場が平行である場合にはトムソン信号の大きさは磁場強度の増加に伴い増大し、温度勾配・電流と磁場が垂直である場合にはトムソン信号の大きさが磁場強度の増加に伴い減少しました。重要な点は、トムソン信号の磁場依存性はNi₉₅Pt₅合金の磁化過程と対応していることであり、磁化が飽和する磁場領域ではトムソン信号の変化量がほぼ一定値になることから、外部磁場強度ではなく磁化に依存した現象であることがわかります。また、温度勾配・電流と磁化が平行である場合に生じたトムソン信号の変化量が、温度勾配・電流と磁化が垂直である場合の変化量より約2倍大きいことも重要です。これは異方性磁気ペルチェ効果に関する実験から予測されていた異方性磁気トムソン効果の振る舞いと整合しており、異方性磁気トムソン効果を直接観測することに成功したと言えます。

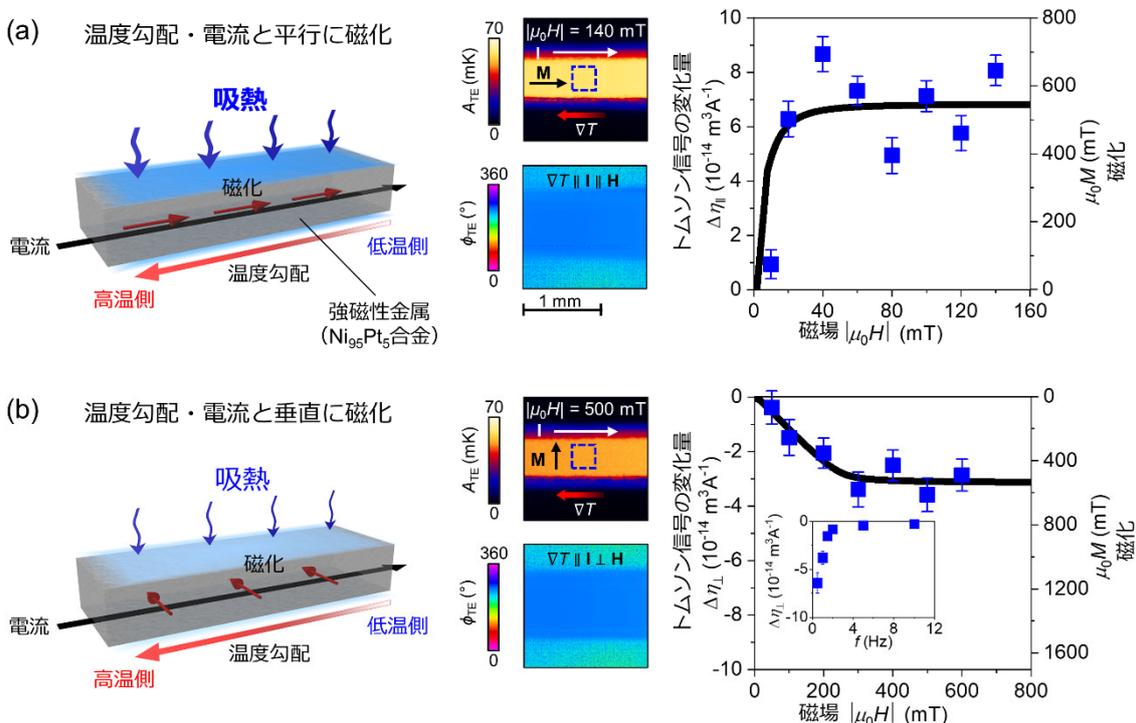


図2 Ni₉₅Pt₅合金における異方性磁気トムソン効果の測定結果

今後の展開

異方性磁気トムソン効果が初めて観測されたことで、熱電分野やスピントロニクス分野の基礎科学・応用技術のさらなる発展が期待されます。異方性磁気トムソン効果は磁性体が自発的に有する磁化に由来するため、原理的には外部磁場が無くても機能する点が従来の非磁性体における磁気トムソン効果とは決定

的に異なります。今回観測された温度変化信号は非常に小さいため、異方性磁気トムソン効果を直ちに熱電変換応用に展開することは困難ですが、より大きなトムソン効果の磁化方向依存性を示す磁性材料の開発を推進することで、熱・電気・磁気の相互作用がもたらす新たな熱エネルギー制御技術の創出に繋がる可能性があります。図1に例を示したように、熱電物性とスピントロニクス⁹⁾の融合分野には未だ観測・開拓されていない物理現象が眠っており、磁性体やその複合構造においてはスピン流⁹⁾によって駆動されるトムソン効果の存在も期待されています。今後も継続して、新たな熱電変換現象の開拓とそれに基づく熱制御機能の実証を進めていきます。

掲載論文

題目：Observation of the Anisotropic Magneto-Thomson Effect

著者：Rajkumar Modak, Takamasa Hirai, Seiji Mitani, and Ken-ichi Uchida

雑誌：Physical Review Letters (doi: 10.1103/PhysRevLett.131.206701)

掲載日時：2023年11月17日

用語解説

- (1) 環境発電技術： 廃熱、体温、太陽光、室内光、振動、電磁波など、身の回りにあるわずかなエネルギーを電力に変換する技術の総称であり、エネルギーハーベスティング技術とも呼ばれます。IoTや小型IT機器の自立型電源としての応用が期待されています。ゼーベック効果を利用した発電素子は、スマートウォッチや暖房用ファンなどの電源として実用化されています。
- (2) 電子冷却技術： 熱電効果（主にペルチェ効果）を利用した冷却技術の総称であり、身近なものでは小型冷蔵庫やネッククーラー、実験用温度制御素子などに応用されています。製品化には至っていませんが、トムソン効果による温度制御も電子冷却技術に分類されます。
- (3) スピン： 電子が有する自転のような量子力学的性質であり、磁気発生源です。スピンの状態には上向きと下向きの2つがあり、スピンの方向に揃った材料が磁石（磁性体）になります。
- (4) ロックインサーモグラフィ法： サーモグラフィ法の一つであり、主に集積回路の動作・欠陥解析用途に利用されている技術です。ロックインサーモグラフィ法では、試料に周期的に変化する電流を印加しながら赤外線カメラを用いて表面の温度分布を測定し、電流と同じ周波数で時間変化する温度変化だけを選択的に抽出することで高感度な熱イメージングを実現しています。近年では、スピントロニクスや熱電変換の基礎研究にも利用されています。
- (5) 磁気トムソン効果： 非磁性体におけるトムソン効果が外部磁場に依存して変化する現象であり、2020年にBiSb合金において観測されました（2020年9月2日のNIMS・産総研共同発表のプレスリリース参照：<https://www.nims.go.jp/news/press/2020/09/202009010.html>）
- (6) スピン軌道相互作用： 電荷キャリアが電界中を運動することにより磁場を感じる相対論的效果であり、電荷キャリアの運動方向をスピンの方向に依存して曲げる働きがあります。
- (7) 異方性磁気ペルチェ効果： 磁性体におけるペルチェ効果が磁化と電流の相対角度に依存して異方的に変化する現象であり、2018年にNiおよびNi合金において観測されました（2018年5月22日のNIMS・東北大学・JST共同発表のプレスリリース参照：<https://www.nims.go.jp/news/press/2018/05/201805220.html>）
- (8) フーリエ解析： ここでは狭義の意味として、元の信号からある周波数で振動している成分のみを抽出する解析手法のことを指します。
- (9) スピン流： 電流が流れることなくスピンだけが流れている状態であり、スピントロニクス分野において研究されている多くの物理現象・デバイスの駆動源となります。

本件に関するお問い合わせ先

(研究内容に関すること)

NIMS 磁性・スピントロニクス材料研究センター スピンエネルギーグループ

上席グループリーダー 内田 健一 (うちだ けんいち)

TEL: 029-859-2062

E-mail: UCHIDA.Kenichi@nims.go.jp

URL: <https://www.nims.go.jp/mmu/scg/>

(報道・広報に関すること)

NIMS 国際・広報部門 広報室

〒305-0047 茨城県つくば市千現 1-2-1

TEL: 029-859-2026, FAX: 029-859-2017

E-mail: pressrelease@ml.nims.go.jp