

高い横型熱電変換性能を持つ二次元層状磁石の発見 層状物質の特異なスピンの流れを使って、室温無磁場下で効率的な熱電変換を実証

ポイント

- ① スピンの性質を積極的に活用したデバイスが次世代エレクトロニクスとして注目されている。それらのデバイスに革新をもたらす材料として二次元層状物質が期待を集めている。
- ② 室温で高い垂直磁気異方性を持つ二次元層状強磁性体 Fe_3GaTe_2 のデバイス化に成功。世界で初めて同物質の磁気熱電効果を評価し、高い熱起電力を発生することを実証。
- ③ 二次元層状物質の優れたフレキシブル特性と熱変換特性、更に本デバイスの極めてシンプルな構造により、様々な環境下で利用可能な発電装置としての実用化が期待。

概要

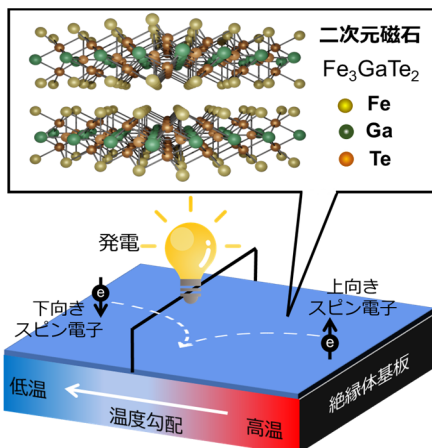
グラフェンに代表される二次元層状物質*1は、高伝導性、柔軟性、透明性など様々な魅力的な性質を有しているため、多彩なアプリケーションが提案されており、とくに、次世代エレクトロニクスの新材料として大きな注目を集めています。近年、強磁性を示す二次元物質も発見され、二次元磁石という名のもと、磁気記録やスピントロニクス*2への応用も期待されています。しかしながら、室温でも磁石の特性を維持する二次元物質は極めて少なく、その磁気的特性も十分明らかになっていませんでした。

本研究では、最近、室温二次元磁石の性質を持つことが明らかになった Fe_3GaTe_2 の熱電特性*3を詳細に評価し、この二次元磁石が優れた横型熱電特性を有することを世界で初めて明らかにしました。

九州大学大学院 理学府 修士2年 劉書含、理学研究院 崔曉敏 博士、同 胡少杰 博士、同 木村崇 教授らの研究グループは、絶縁基板上に転写された Fe_3GaTe_2 薄膜に複数の微細電極を取り付け、磁場中での磁気輸送特性、及び熱電特性を精密に評価しました。その結果、 Fe_3GaTe_2 薄膜の磁石の向きが無磁場下で二次元平面に垂直方向に揃っていることを示し、更に、この物質に温度勾配を加えると、特殊な熱電効果とスピン軌道相互作用により、磁石の向きと温度勾配の両方に垂直な方向に大きな起電力が発生することを明らかにしました。

本成果は、二次元磁石の熱電変換材料としての大きな応用可能性を示した結果であり、熱エネルギーを有効な電気エネルギーに容易に変換できる技術のため、二次元物質の優れた柔軟性も考慮することで、様々な環境下での応用が期待できます。

本成果は、2023年12月31日（現地時間）にドイツの科学誌 *Advanced Materials* のオンライン版に掲載されました。



研究者からひとこと：新技術デバイスのイノベーションには、新物質の発見が必要不可欠です。 Fe_3GaTe_2 は、2022年に中国で発見された二次元磁石です。今回、この物質が熱電デバイスやスピントロニクスにおいても、機能性材料として優れた性能を有していることが示されました。アジアの研究力を結集させることで、人類の発展に貢献する技術が確立されることを願います。

(左図)二次元磁石による高効率熱電変換の概念図。温度勾配により電子がスピンの向きに応じて運動し、横方向起電力に変換される。

【研究の背景と経緯】

グラフェンに代表される二次元層状物質（以下、二次元物質）は、特徴的な結晶構造を反映したユニークな熱・機械・電気・光物性を持つことが知られており、魅力的な性質を持つ物質として、世界中で活発に研究されています。そのため、二次元物質を用いた多彩なアプリケーションが数多く提案されており、とくに、グラフェンや二硫化モリブデン等は、次世代エレクトロニクス新材料として大きな注目を集めています。一方で、より低消費電力なエレクトロニクスやより高効率な熱電変換技術を実現するために、近年、電子のスピンを活用したスピndeバイスが注目されており、もし、二次元物質がスピndeバイスの材料と機能すれば、この分野に革新をもたらすと考えられています。二次元物質がスピndeバイスの材料として機能するためには、室温で磁石の性質を有する必要がありますが、ごく最近、この性質を兼ね備えた二次元物質が発見され、二次元磁石という名のもと、現在、精力的に研究されています。しかしながら、それらの物質がスピndeバイスとして、どの程度の性能を有しているかは、全く研究されていませんでした。

【研究の内容と成果】

本研究では、最近、室温二次元磁石の性質を持つことが明らかになった Fe_3GaTe_2 を微細薄膜化して、絶縁基板上に転写し、その後、電子線リソグラフィ技術を使って、 Fe_3GaTe_2 薄膜に複数の微細電極を取り付け、磁場中での磁気輸送特性、及び熱電特性、及びそれらの温度依存性を詳細に評価しました。磁気輸送特性の結果から、 Fe_3GaTe_2 薄膜中の磁気モーメントは無磁場下で二次元平面に垂直方向に揃い、比較的大きな異常ホール効果を発現することが分かり、更に、熱電特性の結果から、温度勾配と磁気モーメントの両方に垂直な方向に、異常ネルンスト効果に起因した大きな起電力が発生することを明らかにしました。一連の実験から、電気抵抗やゼーベック係数の温度依存性を算出し、異常ネルンスト効果の定量的な解析を行うことで、この物質中では、温度勾配が加わると、上向きスピンと下向きスピンの互いに逆方向に移動することが分かり、本物質は、熱を用いて効果的にスピンの流れを引き出すことができることを明らかにしました。また、異常ネルンスト効果の指標である縦ゼーベック係数と横ゼーベック係数の比は 62 % に達することが分かり、従来の金属磁石と比べて、非常に大きな値を持つことを示しました。

【今後の展開】

二次元物質デバイスの実用化への課題は、量産化に向けた薄膜作製プロセスの開発と考えられます。特に今回の二次元磁石に関しては、発見されたばかりのため、薄膜作製プロセスは未だ報告がありません。本成果にて、二次元磁石の高いポテンシャルが示されたことで関連研究が加速し、プロセス技術も大きく前進すると期待されます。また、二次元物質ならではの特徴を兼ね備えた、二次元磁石でしか実現できない新奇スピndeバイスの実現も可能となると期待されます。

【参考図】

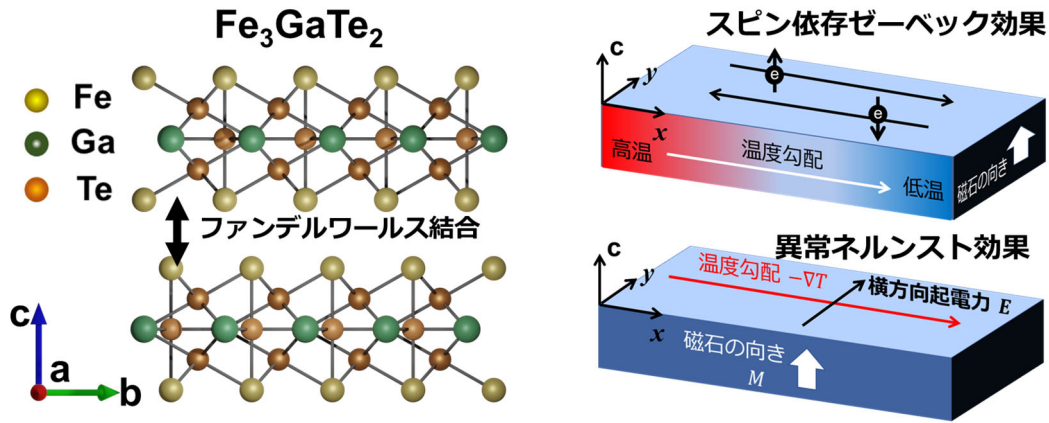


図1 二次元磁石 Fe_3GaTe_2 の結晶構造とスピン依存ゼーベック効果および異常ネルンスト効果の概念図

【用語解説】

(※1) 二次元層状物質

厚さが単原子、または単分子レベルの二次元層内のみで、物質の性質を司る強い原子間結合が形成された単原子、または単分子層物質において、隣接する二次元層が弱いファンデルワールス力のみで結合している物質を二次元層状物質、または二次元物質と呼んでいます。

(※2) スピントロニクス

電子が持つスピン角運動量の性質（強磁性、不揮発性、スピン依存伝導など）を積極的に用いて、低消費電力なエレクトロニクスを実現を目指す研究分野で、巨大磁気抵抗効果やトンネル磁気抵抗効果、スピン角運動量移行効果やスピンホール効果等を基軸にして構成されたスピン注入メモリなどが代表的なデバイスです。

(※3) 熱電特性

主に固体を用いて、熱エネルギーを電気エネルギーに変換、または、その逆変換する技術を熱電変換といい、それに関する特性を熱電特性といいます。代表的な熱電効果として、温度差から起電力を発生するゼーベック効果や電流から熱を発生するペルチェ効果が知られていますが、磁石では、スピンの向きに応じてゼーベック効果の大きさや符号が異なるスピン依存ゼーベック効果が現われ、更にスピン軌道相互作用が大きい物質中では、温度差と磁石の両方の向きに起電力が生じる異常ネルンスト効果が発現します。異常ネルンスト効果は、一種の横方向ゼーベック効果であるため、横型熱電変換とも呼ばれています。

【謝辞】

本研究は JSPS 科研費（JP 21H05021, JP 17H06227）、JST CREST（JPMJCR18J1）、JST SICORP（22480474）の助成を受けたものです。

【論文情報】

掲載誌：Advanced Materials, 2023, 2309776.

タイトル：Efficient Thermo-Spin Conversion in van der Waals Ferromagnet FeGaTe

著者名：Shuhan Liu, , Shaojie Hu, Xiaomin Cui, Takashi Kimura

D O I : 10.1002/adma.202309776

【お問合せ先】

<研究に関すること>

九州大学大学院 理学研究院 教授 木村 崇 (キムラ タカシ)

TEL : 092-802-4082 FAX : 092-802-4107

Mail : t-kimu@phys.kyushu-u.ac.jp

<報道に関すること>

九州大学 広報課

TEL : 092-802-2130 FAX : 092-802-2139

Mail : koho@jimukyushu-u.ac.jp