

PRESS RELEASE (2025/08/29)

世界初、室温における二次元層状磁石の電氣的磁氣制御

～層状物質の隙間を電氣的に精密制御し、二次元磁石の磁氣特性を効率的に操作～

ポイント

- ① スピンの自由度を積極的に利用するスピントロニクスデバイスは、次世代ナノエレクトロニクスとして注目されており、その革新を支える材料として二次元層状物質が期待されている。
- ② 室温で強い垂直磁氣異方性を示す二次元層状強磁性体 Fe_3GaTe_2 薄膜の強誘電体基板上への形成に成功。強誘電体への電圧印加によって生じる歪みや電氣分極を利用することで、層状物質の隙間の電氣的制御が可能となり、磁氣特性の効果的な操作を実現。
- ③ Fe_3GaTe_2 の優れた磁氣熱電特性および磁氣伝導特性を活用することで、多様な環境下で動作可能な高性能熱電発電素子やスピンメモリデバイスへの応用が期待される。

概要

二次元層状物質（*1）は、高い電氣伝導性、柔軟性、透明性などの優れた特性を備えており、多彩な応用が提案されています。中でも、次世代エレクトロニクスにおける新材料として、近年特に大きな注目を集めています。さらに、近年では強磁性を示す二次元層状物質も発見され、「二次元磁石」として磁氣記録やスピントロニクス（*2）への応用が期待されています。中でも Fe_3GaTe_2 は、室温で磁性を維持するだけでなく、強い磁氣異方性と優れた熱電特性を併せ持つことから、熱電デバイス（*3）への応用も有望視されています。通常、強磁性体の磁氣特性は磁場やスピン流によって制御されますが、磁氣異方性の増加に伴い、より大きな磁場や電流が必要となるため、消費電力の増大が大きな課題となっています。このような背景から、近年では電場による磁氣特性の制御が省電力化の観点で大きな注目を集めています。しかしながら、これまでのところ、二次元磁石における磁氣特性の電氣的制御は報告されていませんでした。

本研究では、二次元層状磁石の磁氣特性を室温において電氣的に制御することに、世界で初めて成功しました。九州大学大学院理学研究院の飯森陸助教および木村崇教授らの研究グループは、 Fe_3GaTe_2 薄膜を強誘電体基板上に作製し、電場印加により強誘電体の歪みや電氣分極を制御することで、 Fe_3GaTe_2 の磁氣異方性の変化を評価しました。その結果、電場によって誘起される歪みにより、 Fe_3GaTe_2 の自磁氣特性が大きく変調できることを確認しました。さらに、界面からの距離が増すにつれて歪みが減少することから、層内に歪みの勾配が形成され、これにより空間反転対称性が破れることで、特異な磁区構造の形成が示唆される結果も得られました。

本成果は、スピントロニクスデバイスにおける最大の課題である消費電力の低減に貢献するとともに、高機能かつ高効率な熱電デバイスの実現にも寄与するものであり、二次元層状磁石の応用範囲を大きく広げる成果となっています。さらに、本手法は強磁性体に限らず、他の二次元層状物質に対しても適用可能であり、今後の物性制御技術や材料開発における波及効果が大きいと期待されます。

本成果は、2025年8月27日（現地時間）にドイツ Willey 社の科学誌 Advanced Science のオンライン版に掲載されました。

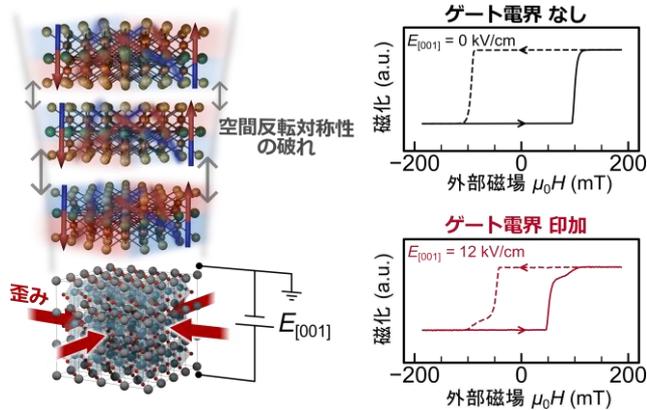


図. PMN-PT 強誘電体基板を用いた二次元磁石 Fe_3GaTe_2 磁気特性の電氣的制御の例

研究者からひとこと: 本成果は、二次元層状物質に特有の原子層間の空隙構造を活用することにより、従来の三次元結晶材料では実現が困難であった電氣的物性の高度な制御を可能にした成果です。今後、グラフェンや MoS_2 をはじめとする次世代半導体材料においても、同様の物性制御が実現される可能性が高く、超低消費電力・高性能なエレクトロニクスの実現に資する基盤技術としての波及的貢献が強く期待されます。(木村崇教授)

【研究の背景と経緯】

二次元物質や、それらを積層した二次元層状物質（以下、総称して「二次元物質」）は、特徴的な結晶構造に起因して、独自の熱・機械・電気・光学的性質を示すことが知られており、世界中で活発に研究が進められています。これらの優れた物性にに基づき、多彩な応用が提案されており、特にグラフェンや二硫化モリブデン (MoS_2) 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、近年はさらなる低消費電力化や高効率な熱電変換技術の実現に向けて、電子のスピン自由度を活用するスピンドバイスへの関心が高まっています。二次元物質がスピンドバイス材料として機能することができれば、この分野における革新的進展が期待されます。

スピンドバイス材料としての応用において、二次元物質には室温での磁性が求められますが、2022年にはその条件を満たす二次元層状磁石 Fe_3GaTe_2 が発見されました。本研究グループは、 Fe_3GaTe_2 が膜面に垂直な磁気異方性を示すこと、さらに優れた電氣的・熱的スピン生成効率を有することを明らかにし、スピンドバイスおよび熱電デバイスに極めて適した特性を備えていることを報告してきました。さらに近年、同物質に圧力を印加することで層間の隙間が縮小し、それに伴って磁気異方性が大きく変調されることを新たに見出しました。しかしながら、圧力による歪みは一方向的な圧縮に限られる上、実用化の観点からも制御性や装置設計に課題が多く、より高い制御性を持ち、デバイス実装に適した代替的な歪み制御手法の確立が求められていました。

【研究の内容と成果】

本研究では、室温で強磁性を示す二次元磁石 Fe_3GaTe_2 の微細薄膜を、強誘電体基板である鉛マグネシウムニオブ酸鉛-鉛チタン酸鉛 (PMN-PT) 上に転写し、各種微細加工技術を用いて複数の微細電極を形成することで、ホール効果測定によって磁気特性を評価できる素子を作製しました。さらに、PMN-PT 基板の裏面に電極を取り付けることで、基板の格子定数を電氣的に制御可能な構造を構築しました。この構造により、強誘電体基板に印加された電場に応じて格子定数が変化し、その歪みが界面を介して Fe_3GaTe_2 薄膜へと伝搬することで、層間の隙間を電氣的に制御することが可能となります。

本研究では、さまざまな電場印加条件におけるホール効果とその温度依存性を詳細に測定し、室温下で電場を印加すると Fe_3GaTe_2 の保磁力が大きく低下する一方で、磁化反転が完了する飽和磁場はほとんど変化しないことを見出しました (図1)。保磁力の減少に関しては、先行研究で報告された圧力印加実験と逆の効果、すなわち電場による層間隙間の増加によるものと考えられますが、今回観測された保磁力の変化量はその見積もりを大きく上回っており、他の要因の関与も示唆されます。さらに、飽和磁場がほとんど変化しなかったことから、電場印加によって多磁区構造が安定化した可能性が考えられま

す。この解釈を支持するものとして、Dzyaloshinskii-Moriya (DM) 相互作用の寄与が挙げられます。DM 相互作用は、空間反転対称性が破れた系において現れることが知られていますが、本系では PMN-PT 基板の格子定数変化に伴う歪みが界面から徐々に伝搬するため、 Fe_3GaTe_2 薄膜内に一様ではない歪み勾配が生じます。このような歪みの空間変化が空間反転対称性の破れを引き起こし、DM 相互作用を顕在化させ、多磁区構造の安定化につながったものと考えられます。

また、磁性が維持される上限温度（キュリー温度）についても調査を行い、電場を印加してもほとんど変化が見られないことが明らかとなりました。この結果は、以前の圧力印加実験の結果と一致しており、 Fe_3GaTe_2 の強磁性が主に二次元面内の共有結合によって支えられていること、そして磁気異方性が層間のファンデルワールス結合（*4）によって支配されているというこれまでの解釈を強く支持しています。

【今後の展開】

二次元物質デバイスのさらなる高性能化に向けては、各種物性の向上や高機能化が求められており、これまでに組成の最適化や基板材料の工夫など、さまざまな改良が試みられてきました。本研究では、強誘電体基板を用いて電氣的に制御可能な歪みを二次元層状磁性体に印加することにより、磁気特性が大きく変化することを明らかにしました。特に、ファンデルワールス結合に起因する層間距離（すなわち層間の隙間）を制御することで、磁気異方性や保磁力などの磁気特性が顕著に変調されることが示されました。この成果は、二次元物質の物性を電氣的に制御する新たな手法として、今後のデバイス高性能化や新機能の実現に大きく貢献する可能性を示すものです。

【謝辞】

本研究開発は、NEDO（国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構）の NEDO 先導研究プログラム/未踏チャレンジ 2050 事業「高品質二次元層状磁石を用いた磁気熱電デバイスと低環境負荷作成プロセスの開発」（2024～2028 年度）による支援を受けています。

【参考図】

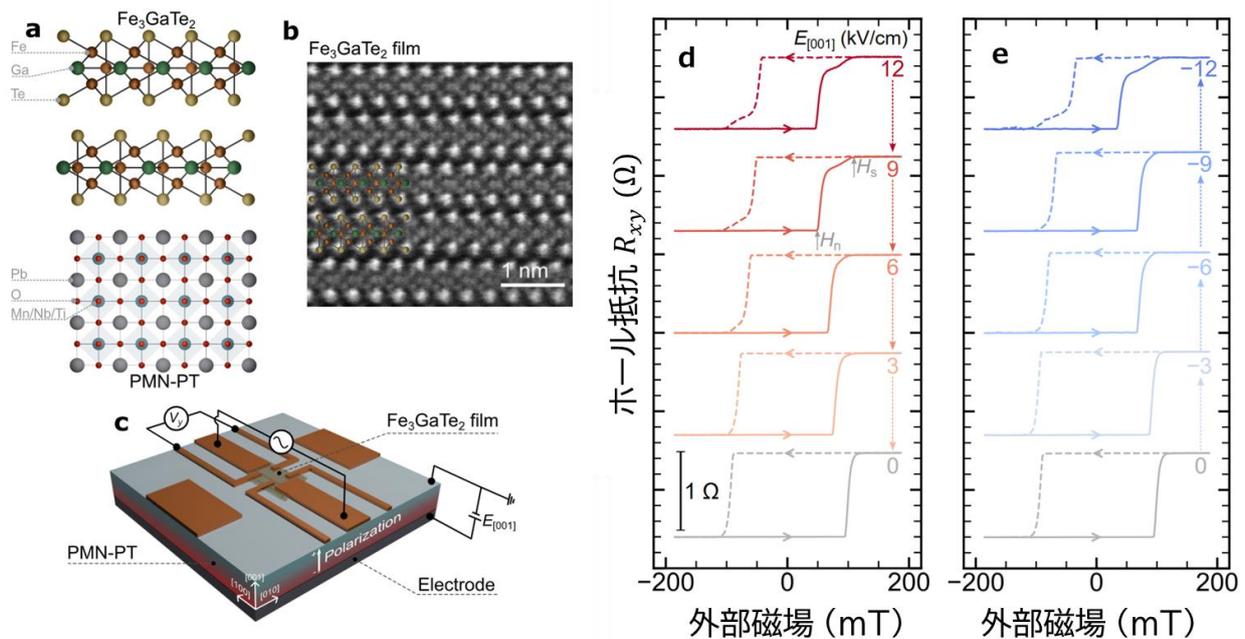


図 1. (a) Fe_3GaTe_2 および PMN-PT の結晶構造 (b) 作成された Fe_3GaTe_2 薄膜の断面透過電子顕微鏡像 (c) 磁気特性評価用の Fe_3GaTe_2 薄膜ホール効果デバイスの概念図。ホール抵抗曲線の電場依存性 ((d) 正バイアスと(e) 負バイアス)

【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、物質の性質をつかさどる強い原子間結合が形成された単原子、または単分子の二次元薄膜で構成される物質を二次元物質と呼び、そのようなファンデルワールス結合を介して積層した二次元物質を二次元層状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の実現を目指す研究分野で、巨大磁気抵抗効果、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) 熱電デバイス

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、その逆変換するデバイスを熱電デバイス、または熱電変換デバイスといいます。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。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、横型熱電変換とも言われています。

(※4) ファンデルワールス結合

分子や原子の間に働く弱い引力であり、イオン結合や共有結合のような強力な結合ではなく、比較的弱い力です。二次元物質においては、層を結合させる上で重要な役割を果たしています。また、この弱い結合により、単原子層や単分子層の二次元膜を機械的に剥離するプロセスが可能になります。

【論文情報】

掲載誌：Advanced Science

タイトル：Electrical manipulation of magnetic domain structure in van der Waals ferromagnetic Fe₃GaTe₂ using ferroelectric PMN-PT single crystal

著者名：Riku Iimori, Yuta Kodani, Shaojie Hu, Takashi Kimura

DOI：10.1002/adv.202503530

【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@jim.kyushu-u.ac.jp