

PRESS RELEASE (2024/10/23)

二次元層状磁石への圧力印加による磁気特性の飛躍的向上

～層状物質の隙間を縮め、より優れた二次元磁石へ～

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ナノ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 室温で垂直磁気異方性を有する二次元層状強磁性体 Fe_3GaTe_2 薄膜に、圧力を加えることに成功。圧力により層状物質の隙間が縮まり、垂直磁気異方性が飛躍的に向上することを実証。
- ③ Fe_3GaTe_2 が持つ優れた磁気熱電特性や磁気伝導特性と組み合わせて、様々な環境下で利用可能な発電装置やスピンメモリデバイスへの実用化が期待。

概要

二次元層状物質^{*1}は、高い伝導性、柔軟性、透明性など、さまざまな魅力的な特性を持つため、多彩なアプリケーションが提案されており、特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層状物質も発見され、「二次元磁石」として磁気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。特に、最近発見された Fe_3GaTe_2 は、室温で磁性を維持し、磁気の向きが面に垂直な方向に向きやすい（垂直磁気異方性）ため、スピンメモリや熱電デバイス^{*3}への応用が期待されています。しかしながら、室温において、垂直磁気異方性の強度が不十分なため、磁場を印加しない状態では磁気の向きを垂直に保つことができませんでした。

本研究では、この二次元層状磁石に圧力を加えることで、垂直磁気異方性が著しく向上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博士課程3年の飯森陸氏と理学研究院の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 薄膜に微細電極を取り付けたホール効果測定素子を、独自に開発した微細圧力セル内に設置し、同薄膜の垂直磁気異方性が圧力によってどのように変化するかを評価しました。その結果、圧力の印加に伴い垂直磁気異方性が飛躍的に向上し、室温で磁場を加えない状態でも磁気の向きが垂直に保たれる（完全垂直磁化状態）ことを明らかにしました。

本成果は、スピントロニクスデバイスにおける課題であった垂直磁気異方性の増強に大きく貢献することが期待され、二次元層状磁石の可能性を大きく広げるものです。また、熱電デバイス応用においても、より高温領域での効率的な動作が可能となり、二次元層状物質への圧力の印加はさまざまなデバイスの性能向上に大きく寄与することが期待されます。

本成果は、2024年10月23日（現地時間）に英国 Nature Publishing Group の科学誌 Communication Materials のオンライン版に掲載されました。

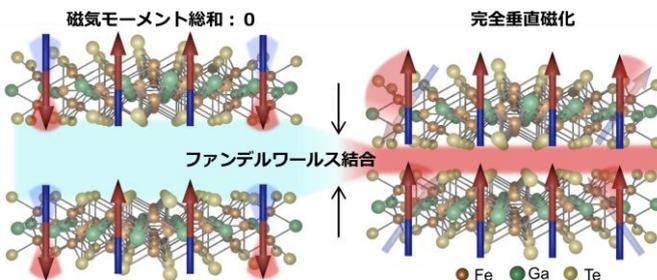


図. 圧力印加によるファンデルワールスギャップの変調と完全垂直磁化状態の実現

研究者からひとこと：本結果は、二次元層状物質特有の隙間の存在に起因しており、従来金属や絶縁体では起こり得ない現象です。圧力が印加可能なデバイス実装技術が確立され、同物質の大面积薄膜作成技術および量産技術が確立されれば、各種スピンデバイスのエネルギー効率が飛躍的に向上し、今後のデジタル社会に大きく貢献することが期待されます。

【研究の背景と経緯】

二次元物質やそれらを積層させた二次元層状物質（以下、二次元物質）は、特徴的な結晶構造を反映して、独特の熱・機械・電気・光物性を持つ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。そのため、これらの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、特にグラフェンや二硫化モリブデンは、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、近年ではより低消費電力のエレクトロニクスや高効率な熱電変換技術の実現に向け、電子のスピン特性を活用したスピndeバイスの材料として注目されています。もし二次元物質がスピndeバイスの材料として機能すれば、この分野に革新をもたらすことが期待されています。

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、室温で磁性を持つ必要がありますが、2022年にこの性質を備えた二次元層状磁石である Fe_3GaTe_2 が発見されました。我々の研究グループでは、同物質が面に垂直な方向に磁気異方性を示すこと、さらに優れた電気および熱的スピン生成効率を持つことを明らかにし、スピndeバイスや熱電デバイスに極めて適した特性を有していることを示してきました。しかしながら、この垂直磁気異方性の大きさが十分ではなく、さらなる特性向上が求められています。

【研究の内容と成果】

本研究では、室温二次元磁石である Fe_3GaTe_2 の微細薄膜を絶縁基板上に転写し、その後、様々な微細加工技術を用いて複数の微細電極を取り付け、ホール効果の測定から垂直磁気異方性の大きさを評価する素子を作製しました。さらに、このデバイスを独自に開発した圧力セル内に設置し、圧力印加に伴う垂直磁気異方性の変化を調査しました。その結果、 Fe_3GaTe_2 薄膜に約 0.2 GPa 程度の圧力を加えることで、磁場を印加しない状態でも磁化の方向が垂直に保たれることが明らかになり、より圧力を加えることで、垂直磁気異方性が更に大きく増加することが確認されました。一方で、磁石の性質を維持できる温度（キュリー点）に関しては圧力を加えてもほとんど変化を示さないことも判明しました。これらの結果から、強磁性の特性は二次元面内の共有結合によって、さらに垂直磁気異方性は層間のファンデルワールス結合*4によって主に支配されていることが明らかになりました。

【今後の展開】

二次元物質デバイスの実用化に向けて、各種特性の向上が求められており、これまでは組成変調や基板最適化など様々な改良が行われてきました。今回の研究では、二次元層状磁性体に約 0.2 GPa という比較的小さな圧力を印加するだけで、磁気特性が大きく改善することが明らかになりました。この結果は、圧力印加がファンデルワールス結合に起因する層間距離（層と層の隙間）を効果的に変調できることを示しており、二次元物質の各種物性の制御や特性向上に有効な手法として利用できる可能性が期待されます。

Fe_3GaTe_2 を用いた熱電デバイスの研究は、NEDO 先導研究プログラム／未踏チャレンジ（課題番号：24000474）に採択されており、今回の成果と組み合わせることで、超高性能な熱電デバイスの社会実装を目指していきます。

【参考図】

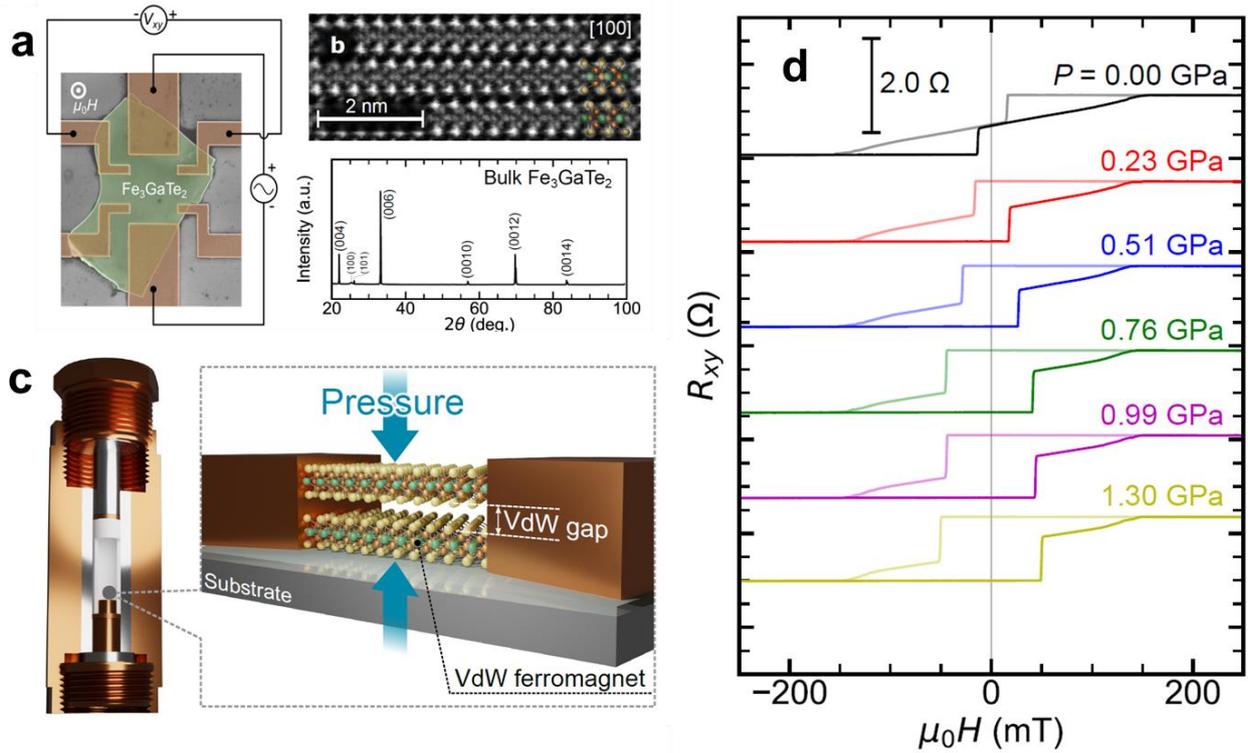


図 1. (a) 複数の微細電極を取り付けたホール効果測定デバイスの電子顕微鏡像 (b) 作成された Fe₃GaTe₂ 薄膜の断面透過電子顕微鏡像と X 線回折パターン。(c) 圧力セルに内包された Fe₃GaTe₂ 薄膜ホール効果デバイスの概念図。(d) ホール抵抗曲線の圧力依存性。

【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、横型熱電変換とも呼ばれています。

(※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：Communication Materials

タイトル：Substantial enhancement of perpendicular magnetic anisotropy in van der Waals ferromagnetic Fe₃GaTe₂ film due to pressure application

著者名：Riku Iimori, Shaojie Hu, Akihiro Mitsuda, Takashi Kimura

D O I : 10.1038/s43246-024-00665-3

【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@jimu.kyushu-u.ac.jp