

歪みによる異常ホール効果のスイッチングに成功
—ピエゾ磁気効果を用いた反強磁性体への情報の書き込み技術を開発—

1. 発表者：

- ムハンマド イクラス (東京大学大学院理学系研究科 物理学専攻 特任研究員)
肥後 友也 (東京大学大学院理学系研究科 物理学専攻 特任准教授/
東京大学物性研究所 量子物質研究グループ リサーチフェロー 併任)
サヤック ダスグプタ (ブリティッシュコロンビア大学 特任研究員/
東京大学物性研究所 特任研究員 併任)
オレグ チェルニシヨフ (ジョンズホプキンス大学 物理学・天文学専攻 教授)
中辻 知 (東京大学大学院理学系研究科 物理学専攻 教授/
東京大学物性研究所 量子物質研究グループ 特任教授/
東京大学トランススケール量子科学国際連携研究機構 機構長 併任)

2. 発表のポイント：

- ◆ 反強磁性体における巨大なピエゾ磁気効果を室温で実現。
- ◆ 通常は磁場で制御される異常ホール効果の符号を結晶の歪みで制御することに初めて成功。
- ◆ 歪みによる反強磁性体の磁気状態の制御技術は、MRAMをはじめとするさまざまなデバイスに展開される可能性。

3. 発表概要：

東京大学大学院理学系研究科 中辻 知 教授、ムハンマド イクラス 特任研究員、肥後友也 特任准教授の研究グループは、カナダ ブリティッシュコロンビア大学 サヤック ダスグプタ 特任研究員、米国 コーネル大学 ブラッド ラムシャウ 助教、フローリアン セイス 大学院生の研究グループ、中央大学 橋高俊一郎 准教授、米国 ジョンズホプキンス大学 オレグ チェルニシヨフ 教授、英国 バーミンガム大学 クリフォード ヒックス グループリーダーからなる国際共同研究グループと共同で、磁化をほとんど持たないにもかかわらず、室温で巨大な異常ホール効果(注1)を示す反強磁性体(注2) Mn_3Sn において、一軸性の歪み(ひずみ)によって異常ホール効果の符号が制御可能であることを実証しました。

反強磁性体はスピン(注2)の応答速度が強磁性体(注2)の場合に比べて100~1000倍速いということのみならず、磁化が非常に小さいため素子化した際に漏れ磁場の影響を受けないという特性を持っています。そのため、不揮発性メモリ(注3)の有力候補である磁気抵抗メモリ(MRAM)(注3)に応用することにより、テラヘルツ帯(ピコ秒台)で超高速駆動する、超高密度なMRAMの実現が期待できます。その一方で、磁化が非常に小さいという上記の利点は、反強磁性体への情報の書き込み(信号の制御)が困難であるという課題にもなっていました。本研究により見いだされた一軸性の歪みを用いた高効率な信号の制御手法は、磁場や電流といった従来の磁性体における信号の制御手法を補完するものであり、反強磁性体のスピントロニクス技術への応用展開の幅を広げる成果になりました。

本研究成果は英国の科学誌「Nature Physics」において、英国夏時間2022年8月18日(木)にオンライン版に公開されます。

4. 発表内容：

① 研究の背景

現在、コンピュータやスマートフォンにおける情報処理には電力供給をしないと情報が失われてしまう揮発性の半導体メモリが用いられています。近年のインターネットの普及による社会の高度情報化は著しく、爆発的に増加する情報を低消費電力で処理するために電源オフ状態でも情報が失われないう揮発性メモリの開発が行われています。磁石として知られる強磁性体を用いた MRAM は、低消費電力性と共に高書き換え耐性を満たし得る不揮発性メモリとして研究が進められ、近年実用化が進んでいます。MRAM の更なる高速化や高密度化を実現する研究開発指針の 1 つとして、強磁性体を反強磁性体で代替することが検討されています。なぜなら、反強磁性体では情報の記憶速度がピコ秒（従来の強磁性体の 100~1000 倍）になることが期待される、また、スピンの互いの磁化を打ち消し合う配置になり正味の磁化を持たないため、従来より 100 倍速い演算が可能、かつ、高密度な MRAM が原理上実現可能であるためです。一方で、反強磁性体を用いるためには「0」と「1」の情報に対応する電氣的信号を検出・制御する技術の開発が必要とされていました。

② 研究内容と成果

本研究グループはマンガン (Mn) とスズ (Sn) からなる反強磁性体 Mn_3Sn の研究を行っており、反強磁性体では検出が困難だと信じられてきた異常ホール効果や異常ネルンスト効果（注 4）、磁気光学カー効果（注 5）などの読み出し信号を室温で検出できることを明らかにしてきました。これらの信号が得られる理由は、ノンコリニア（非共線）反強磁性スピン構造を示す Mn_3Sn が、磁極に類似した拡張磁気八極子偏極（注 6）を持つためです（図 1a）。

上記の信号を制御する手法としては磁場や電流を用いることが一般的ですが、本研究では歪みに着目しました。純良な Mn_3Sn 単結晶試料に引張方向と圧縮方向へ一軸性の歪みを高精度、かつ、幅広い範囲で加えることが可能な抵抗測定用圧電歪み測定ステージ（図 1b）を開発し、歪みによる異常ホール信号の変化を測定しました（図 2a）。その結果、室温において Mn_3Sn がピエゾ磁気効果（注 7）を示すことを発見しました。通常、異常ホール効果などの電気輸送特性に観測可能なほどの変化をもたらすには、1%程度の歪みが必要でしたが、本研究では 0.1%程度の非常に小さな歪みで異常ホール効果のつくるホール信号を変化させることに成功しました（図 2b）。ホール信号は単に大きさが変化しただけでなく、その符号まで反転する振る舞いが観測され、ノンコリニア反強磁性体 Mn_3Sn では歪みにより信号が非常に高効率に制御できることが分かりました。これまでの強磁性体での研究では磁化の方向に対応してホール信号が変化していました。その一方で、 Mn_3Sn ではピエゾ磁気効果により生じる微小な磁化とホール信号が歪みによって別々に制御できることが実験と理論の双方の研究から分かりました（図 3）。

③ 今後の展望

反強磁性体を用いた MRAM をはじめとする電子デバイスの開発には薄膜が必要です。現在、世界中の多くの研究グループが Mn_3Sn および関連物質の薄膜の開発に取り組んでおり、その膜界面物性に着目した反強磁性スピントロニクス分野の研究が活発化しています。薄膜では、基板との格子不整合や圧電材料を用いることで、歪み効果が異常ホール効果をはじめとする読み出し信号を制御することが可能です。実際、 Mn_3Sn 薄膜を用いた電流でホール信号を反転することが可能なデバイス（スピン軌道トルク磁気反転デバイス）において、歪みによる垂直磁気異方性を導入することで、ホール信号が高効率に電氣的に制御できることが明らかになる（Nature 607, 474–479 (2022).）など、歪みによる新たな信号の制御の技術の開発につながっています。本研究で開発された歪みによる反強磁性体の磁気状態の高度な制御技術は、上記のホール信号の電氣的制御をより高

速、低消費電力で実現するための重要な指針となります。今後、MRAMをはじめ、さまざまな磁気デバイスの高機能化に関する研究に本技術が展開されることが期待されます。

また、本研究で読み出し信号として用いた異常ホール効果はノンコリニア反強磁性体 Mn_3Sn が持つトポロジカル電子状態であるワイル半金属状態（注8）に由来しています。物質のトポロジーに由来する性質は、近年の固体物理学において大きな注目を集めており、ワイル半金属状態の電氣的な制御は学術的に大変興味を持たれています。今回開発した一軸性の歪みによる符号の反転を含めた異常ホール効果の制御手法は、これまで観測できなかったワイル半金属状態における新しい現象の開拓へつながることが期待されます。

本研究は、科学技術振興機構（JST）未来社会創造事業 大規模プロジェクト型（JST-MIRAI）「トリリオンセンサ時代の超高度情報処理を実現する革新的デバイス技術」研究領域（運営統括：大石善啓）における研究課題「スピントロニクス光電インターフェースの基盤技術の創成」課題番号 JPMJMI20A1（研究代表者：中辻知）、戦略的創造研究推進事業 チーム型研究（JST-CREST）「トポロジカル材料科学に基づく革新的機能を有する材料・デバイスの創出」研究領域（研究総括：上田正仁）における研究課題「電子構造のトポロジーを利用した機能性磁性材料の開発とデバイス創成」課題番号 JPMJCR18T3（研究代表者：中辻知）などの一環として行われました。

本研究チーム構成員：

ムハンマド イクラス（東京大学大学院理学系研究科 物理学専攻 特任研究員）
サヤック ダスグプタ（ブリティッシュコロンビア大学 物理学・天文学専攻 特任研究員）
フローリアン セイス（コーネル大学 物理学専攻 博士課程）
肥後 友也（東京大学大学院理学系研究科 物理学専攻 特任准教授／
東京大学物性研究所 量子物質研究グループ リサーチフェロー併任）
橘高 俊一郎（中央大学 理工学部 物理学科 准教授）
ブラッド ラムシャウ（コーネル大学 物理学専攻 助教）
オレグ チェルニシヨフ（ジョンズホプキンス大学 物理学・天文学専攻 教授）
クリフォード ヒックス（バーミンガム大学 物理学・天文学専攻 グループリーダー）
中辻 知（東京大学大学院理学系研究科 物理学専攻 教授／
東京大学物性研究所 量子物質研究グループ 特任教授／
東京大学トランススケール量子科学国際連携研究機構 機構長 併任）

5. 発表雑誌：

雑誌名：Nature Physics

タイトル：Piezomagnetic switching of anomalous Hall effect in an antiferromagnet at room temperature

著者：M. Ikhlas⁺, S. Dasgupta⁺, F. Theuss, T. Higo, S. Kittaka, B. J. Ramshaw, O. Tchernyshyov, C. W. Hicks and S. Nakatsuji*（⁺：equal contribution、*：corresponding author）

DOI 番号：10.1038/s41567-022-01645-5

アブストラクト URL：<https://www.nature.com/articles/s41567-022-01645-5>

6. 問い合わせ先：

【研究内容に関すること】

東京大学大学院理学系研究科 物理学専攻／
東京大学物性研究所 量子物質研究グループ／

東京大学トランススケール量子科学国際連携研究機構
教授 中辻 知 (なかつじ さとる)
E-mail : satoru[at]phys.s.u-tokyo.ac.jp

【報道に関すること】

東京大学大学院理学系研究科・理学部広報室
主事員 吉岡 奈々子、教授・広報室長 飯野 雄一
TEL : 03-5841-8856 E-mail : kouhou.s[at]gs.mail.u-tokyo.ac.jp

科学技術振興機構 広報課
TEL : 03-5214-8404 E-mail : jstkoho[at]jst.go.jp

【JST 事業に関すること】

科学技術振興機構 未来創造研究開発推進部
小泉 輝武 (こいずみ てるたけ)
TEL : 03-6272-4004 E-mail : kaikaku_mirai[at]jst.go.jp

7. 用語解説 :

(注 1) 異常ホール効果

電気を流すことが可能な物質において、磁場・電流と垂直方向に起電力が生じる現象をホール効果と呼びます。互いに垂直に磁場と電流を与えた際に、電流として流れている電子の運動方向が磁場により曲げられることが原因です。強磁性体では、外部から磁場を与えなくても磁極の向きを制御することでホール効果が生じます。この効果を異常ホール効果と呼びます。最近では仮想磁場（波数空間に存在する有効磁場で、電子構造のトポロジーに起因する新しい物理概念）を持つ特殊な反強磁性体やスピン液体でも異常ホール効果が現れることが分かってきています。

(注 2) 反強磁性体・スピン・強磁性体

磁性体は「スピン」と呼ばれる電子の自転運動に起因した微小な磁石を有する物質です。この磁性体は巨視的な数のスピンの何らかのパターンで整列する磁気秩序を示し、スピンの一様な方向にそろうことで磁石のように磁極を持つ強磁性体と、隣り合うスピンの反平行や互いを打ち消しあうように配列することで磁極を持たない（磁石の性質が現れない）反強磁性体に分類されます。

(注 3) 不揮発性メモリ・磁気抵抗メモリ (MRAM)

既存の半導体メモリとは異なり、電源を切っても記録された情報を失わないメモリです。磁気抵抗メモリ (MRAM)、抵抗変化メモリ (ReRAM)、相変化メモリ (PRAM) など、データ記憶方式の異なる複数のメモリが開発されています。本研究で着目した MRAM は磁気状態（磁極の向きに対応した抵抗値の変化）を使用して情報の書き込みと読み出しを行う不揮発性メモリです。膜面に対して磁極 (Mn_3Sn の場合は磁気八極子偏極 (注 6)) が垂直 (上下) 方向に向いた垂直 2 値状態のときに高密度・省電力化と熱安定性の向上が期待できます。

(注 4) 異常ネルンスト効果

電気を流すことが可能な物質において、磁場・温度勾配と垂直方向に起電力が生じる現象をネルンスト効果と呼びます。磁場と温度勾配を互いに垂直となるように加えることで、高温側から低温側へ向かう電子の流れが磁場により曲げられることが原因です。異常ホール効果と同様に、強磁性体や仮

想磁場を持つ特殊な反強磁性体ではゼロ磁場でもネルンスト効果が現れ、これを異常ネルンスト効果と呼びます。この場合、磁場の代わりに磁極や仮想磁場を温度勾配と垂直に向けることで起電力が得られます。

(注 5) 磁気光学カー効果

強磁性体に直線偏光した光を入射した際に、磁極の向きに応じて反射光の偏光面が回転する現象を磁気光学カー効果といいます。光の偏光面の回転方向により磁極の向きを非接触・非破壊で測定できるため、強磁性体の磁気ドメインを直接観察する手法として広く用いられています。反強磁性体では観測が困難だと考えられていましたが、異常ホール効果・異常ネルンスト効果と同様にノンコリニア反強磁性体 Mn_3Sn などの拡張磁気八極子偏極を持つ特殊な反強磁性体ではこの効果が観測可能であることが分かっており、磁気ドメイン観察に用いられています。

(注 6) 拡張磁気八極子偏極

磁石として知られる強磁性体は N 極と S 極の 2 つの極（磁極）を持っていますが、磁性体の各格子点に配置されたスピンも 2 つの極を持ち、これは磁気双極子と呼ばれています。複数の格子点に配置されたスピンの 1 つのユニットを考えた際に作られる特徴的なスピンの組み合わせを拡張磁気多極子といい、構成するスピンの数が 1、2、3 つと増えるにつれて、磁気双極子、四極子、八極子というようにその組み合わせの名前が変わります。反強磁性体 Mn_3Sn のスピン構造では、2 つのカゴメ格子に配置された 6 つのスピンで拡張磁気八極子のユニットが考えられ、図 1a に示すように拡張磁気八極子偏極を持っていることが分かります。 Mn_3Sn の磁気八極子偏極は異常ホール効果などの源である仮想磁場の向きを制御するパラメータとして機能します。そのため、磁極のない反強磁性体においても、強磁性体で見られるような巨大応答を示すことができます。

(注 7) ピエゾ磁気効果

磁性体において、外部から加えられた応力（歪み）によって磁気分極（磁化）が生じる現象です。磁化と歪みは線形結合しており、piezo磁気効果を示す磁性体では、歪みにより磁化を誘起するだけでなく、磁場をかけることで試料自体に物理的な変形を起こすことも可能です。

(注 8) ワイル半金属状態

1921 年にヘルマン・ワイルが提唱したワイル方程式に従って記述される質量ゼロの粒子（ワイル粒子）を持つ物質はワイル半金属と呼ばれています。ワイル半金属においてワイル点は異なるカイラリティ（右巻き・左巻きの自由度）を持つ対となってトポロジカルな電子構造として現れます。このワイル点の対は運動量空間における磁石の N 極と S 極に相当します。通常のワイル半金属では物質の結晶構造に由来してワイル点が創出されます。一方で磁性により創出されるワイル点を持つ磁性体をワイル磁性体（より広義にはトポロジカル磁性体）といいます。ワイル磁性体では磁極や磁気八極子偏極を制御することで、ワイル点とそれに付随した仮想磁場の制御が可能であり、応用の観点からも魅力的な性質が見つかっています。ワイル点間に生じる仮想磁場は 100 ~ 1000 テスラ (T) の外部磁場に相当するほど大きく、巨大な異常ホール効果などの起源となっています。

8. 添付資料 :

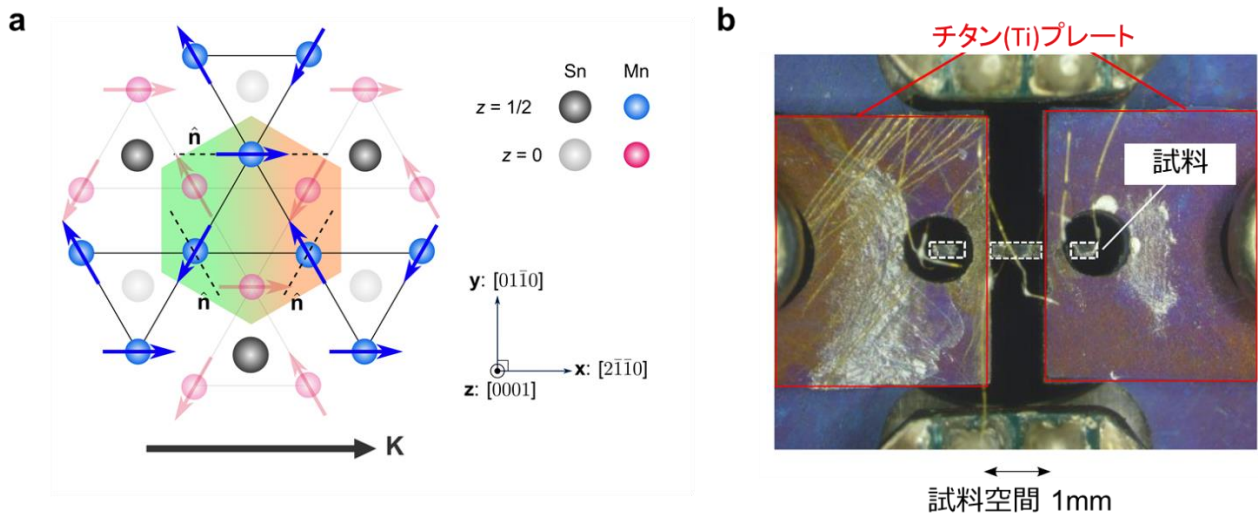


図 1 : (a) Mn_3Sn の磁気構造。 Mn_3Sn は c 軸方向に磁性原子のマンガン (Mn、ピンクと青の球) からなるカゴメ格子が交互に積層した構造を持ちます。 430 K (約 $150\text{ }^\circ\text{C}$) 以下で、Mn のスピンの逆 120 度構造と呼ばれるノンコリニア反強磁性秩序を示します。二層のカゴメ格子上的スピン (ピンクと青の矢印) を見ると、六角形で示されている拡張磁気八極子と呼ばれる 6 つのスピンからなるユニットが同じ方向にそろっていることがわかります。黒矢印 (\mathbf{K}) は磁気八極子偏極の向きを示しています。(b) 引張方向と圧縮方向へ一軸性の歪みを高精度、かつ、幅広い範囲で加えることが可能な抵抗測定用圧電歪みステージ。ピエゾアクチュエータによって図の横方向に稼働する 2 枚の Ti 製プレートの上に棒状に加工した Mn_3Sn を固定し、抵抗率と異常ホール効果の測定を行います。

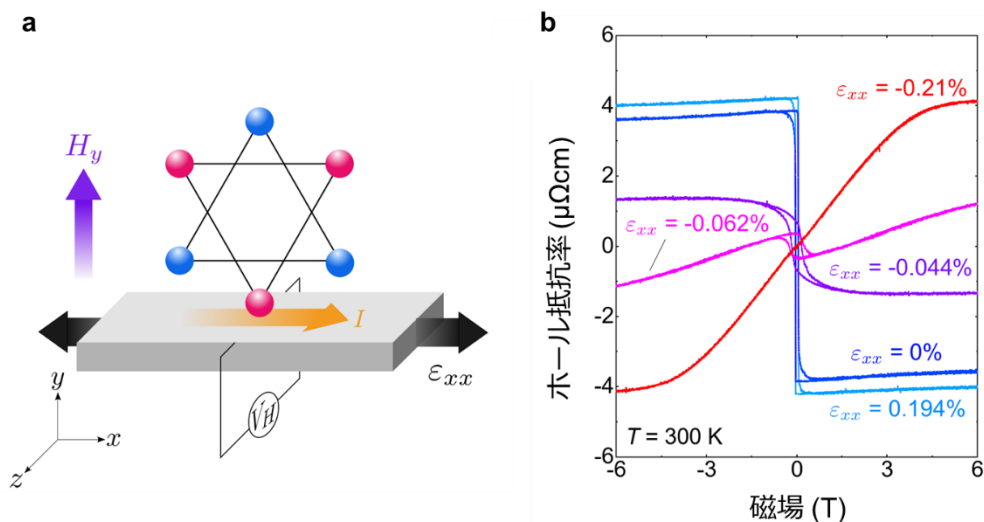


図 2 : (a) 歪み下での異常ホール効果の測定構成の概要図。ここでは x 方向への引張り歪み下で、試料の z 軸方向に発生するホール電圧 V_H を測定している。 H_y は外部磁場、 I は電流、 ϵ_{xx} は x 方向への歪みを示している。(b) さまざまな歪み ϵ_{xx} 下での Mn_3Sn のホール抵抗率の磁場依存性。

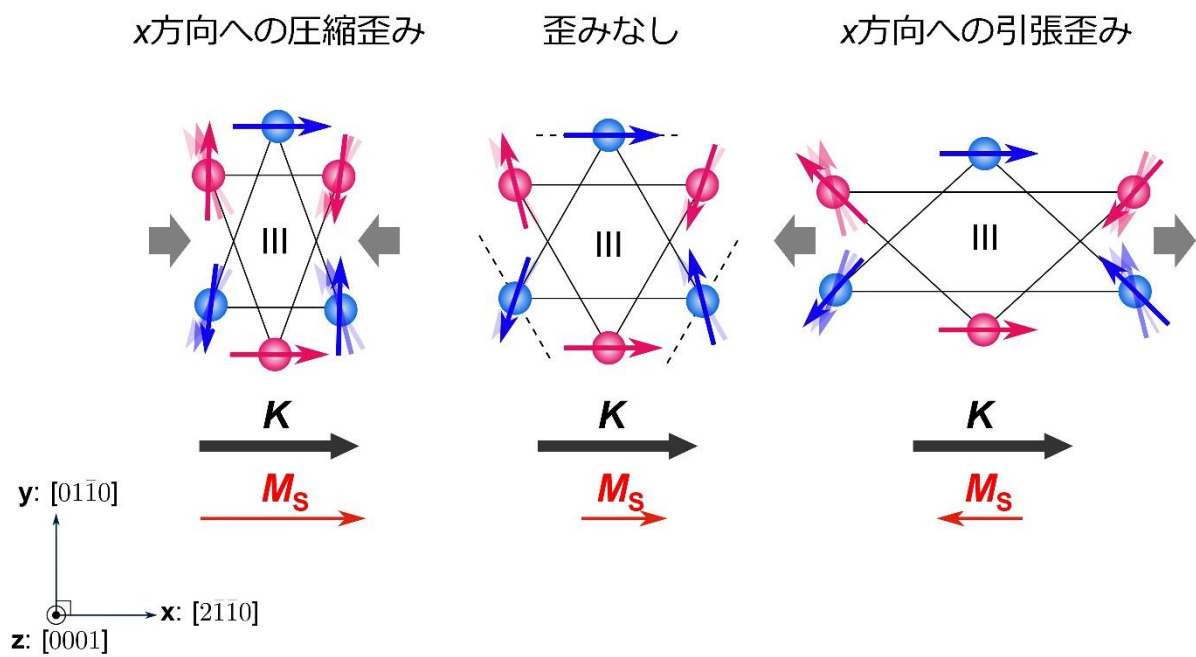


図 3: Mn_3Sn では一軸性歪みの符号によって、ピエゾ磁気効果によって生じる微小磁化 M_s と Mn_3Sn の異常ホール効果の起源である拡張磁気八極子偏極 K の向きを独立に制御できる。