

ワイル粒子を用いた不揮発性メモリ素子の原理検証に成功 — ビヨンド5Gに向けた超高速駆動・超高密度メモリ開発に道—

1. 発表者：

肥後 友也（東京大学物性研究所 量子物質研究グループ 特任助教）

Hanshen Tsai（東京大学物性研究所 量子物質研究グループ 特任研究員）

近藤 浩太（理化学研究所 創発物性科学研究センター 量子ナノ磁性研究チーム
上級研究員）

野本 拓也（東京大学大学院工学系研究科 物理工学専攻 助教）

酒井 明人（東京大学物性研究所 量子物質研究グループ 助教）

小林 鮎子（東京大学物性研究所 ナノスケール物性研究部門 博士課程1年生）

有田 亮太郎（東京大学大学院工学系研究科 物理工学専攻 教授／理化学研究所 創発物性科学
研究センター計算物質科学研究チーム チームリーダー 併任）

三輪 真嗣（東京大学物性研究所 量子物質研究グループ 准教授／トランススケール量子科学
国際連携研究機構 併任）

大谷 義近（東京大学物性研究所 ナノスケール物性研究部門 教授／理化学研究所 創発物性
科学研究センター 量子ナノ磁性研究チーム チームリーダー／トランススケール
量子科学国際連携研究機構 併任）

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 教授／トランススケール量子科学国際連携研究機構 併任）

2. 発表のポイント：

- ◆ 幻の粒子「ワイル粒子」の電氣的制御に世界で初めて成功。
- ◆ ワイル粒子の作る巨大電圧信号を用いた不揮発性メモリの動作原理を実証。
- ◆ ビヨンド5G世代に不可欠な超高速駆動・超高密度の次世代メモリの開発に大きな一歩。

3. 発表概要：

東京大学物性研究所の肥後友也 特任助教、Tsai Hanshen 特任研究員、東京大学大学院理学系研究科物理学専攻・物性研究所及びトランススケール量子科学国際連携研究機構の中辻 知 教授らの研究グループは、同研究所・同機構 三輪真嗣 准教授、大谷義近 教授、理化学研究所 近藤浩太 上級研究員、東京大学大学院工学系研究科の野本拓也 助教、有田亮太郎 教授らと共同で、反強磁性体（注1）中において、幻の粒子「ワイル粒子（注2）」の電氣的制御に成功し、ワイル粒子の作る巨大電圧信号を利用した不揮発性メモリの動作原理を実証しました。

反強磁性体はスピン（注1）の応答速度が強磁性体（注1）に比べて2～3桁早いピコ秒オーダーであるため、メモリ素子に反強磁性体を用いると、超高速の情報処理を行える可能性があります。この超高速性はビヨンド5Gに必要とされる性能であり、すでに応用されている強磁性体を用いた不揮発性メモリでは到達不可能な領域です。また反強磁性体では、スピンの方向が互いにキャンセルするように秩序するため、漏れ磁場（注3）がなく、大容量メモリ素子を作製できます。このように反強磁性体の利用は、IoT時代のBig Data処理に不可欠な省電力・超高速駆動・超高密度な次世代メモリの開発にブレークスルーをもたらします。

本成果の鍵となる「ワイル粒子」は、1927年の提案以来、ニュートリノなどの素粒子を記述すると考えられていましたが、自然界では未だに存在が確認されていない幻の粒子です。しかし、

2015年に物質中での存在が確認されて以降、それが持つさまざまな量子的性質に世界中で大きな関心が集まっています。特に、磁性体中のワイル粒子は結晶の乱れなどに強靱であり、かつ、巨大な電圧信号を示します。従ってワイル粒子の電氣的な制御は不揮発性メモリ等への応用において不可欠な開発要素でした。

本研究成果は英国科学雑誌「*Nature*」において、2020年4月20日付けオンライン版に公開される予定です。

4. 発表内容：

① 研究の背景

現在のコンピュータやスマートフォンなどで情報の一時保存に用いられているメモリは、情報の維持に多くの電力を消費します。これは従来のメモリでは電力供給をしなければ情報が失われるためです。そのため、情報の維持に電力供給を必要としない「不揮発性メモリ」への代替が検討されています。不揮発性メモリのひとつとして、私たちの身の回りで磁石として使われている強磁性体を用いた磁気メモリが有望視されています。

強磁性体では、原子ひとつひとつが持つスピンの向きが揃って磁化という強磁性秩序を示します。磁気メモリではこの磁化の向きの制御が情報の「書き込み・読み出し」に相当します。最近では、磁化の書き込み手法としてスピン流（注4）を用いた磁化反転現象が見いだされ、汎用化されています。特に強磁性体と非磁性重金属（白金（Pt）やタングステン（W）等）からなる多層膜に電流を流すことで起こる磁化反転現象は、スピン軌道トルク磁化反転と呼ばれ盛んに研究されています。

既存の強磁性体を用いた磁気メモリを更に高性能化するために、最近では反強磁性体の利用が期待されています。反強磁性体は強磁性体に比べてスピンの応答速度が2~3桁速く、漏れ磁場の影響がないため、いっそうの高速化・高集積化が不可欠となるビヨンド5G世代の磁気メモリ材料として期待を集めています。しかし、反強磁性体では、隣接する原子のスピンの向きが打ち消しあう反強磁性秩序を形成するため、磁化がほとんどありません。そのため、反強磁性体では磁化の向きを用いた情報の書き込み・読み出しは難しいと考えられていました。

本研究グループは、2015年にマンガン（Mn）とスズ（Sn）からなる反強磁性体 Mn_3Sn （図1aと1b）が、強磁性体に匹敵するほど大きな異常ホール効果（注5）（*Nature* 誌 527, 212–215 (2015).）や異常ネルンスト効果（注6）（*Nature Physics* 誌 13, 1085–1090 (2017).）を室温で自発的に示すことを発見しました。さらに、 Mn_3Sn の研究を通じて、磁気秩序を起源としたワイル粒子を持つワイル磁性状態の存在を世界に先駆けて報告しています（*Nature Materials* 誌 16, 1090–1095 (2017).）。すなわち、 Mn_3Sn はワイル粒子を有する反強磁性体であり、運動量空間においてワイル粒子の作る仮想磁場は実空間換算で100~1000テスラに相当し、上記の巨大応答の発現に重要な役割を担います（図2）。つまり、このワイル反強磁性体では磁化の代わりに仮想磁場の向き、すなわちワイル粒子の運動量空間での分布による情報の記憶が可能であり、大きな磁化を示す強磁性体に制限されない磁気メモリ材料の開発が可能となります（図3）。一方で、ワイル磁性体では、ワイル粒子を磁場で制御する手法は報告されていたものの、磁気メモリを製作する際に必要となる電流での制御手法は発見されておらず、新たな情報の書き込み手法の開発が強く望まれていました。

② 研究内容と成果

今回用いたワイル反強磁性体 Mn_3Sn はカゴメ格子と呼ばれる結晶構造をとり、磁性元素 Mn の持つスピンの向きが逆120度構造（図1aと1b）という反強磁性秩序を室温で示します。この反強磁性秩序は、運動量空間におけるワイル粒子の位置であるワイル点やその仮想磁場の向きと対応し

ており、反強磁性秩序を操作することでワイル点と仮想磁場に由来した応答を制御できることが、理論および実験的研究から明らかになっています。

本研究では、ワイル反強磁性体 Mn_3Sn と非磁性金属 Pt や W、銅 (Cu) との多層膜からなるホール抵抗測定用の素子をシリコン基板上に作製し、外部電流によるホール電圧の変化を室温で測定しました (図 4a)。その結果、 Mn_3Sn と Pt もしくは W を積層させた素子において、電流によるホール電圧の反転に成功しました。図 4a に示すように、① Pt と W を用いた素子では外部電流によりホール電圧の反転が起きること、② Pt と W を用いた素子では電圧の反転が逆符号であること、③ Cu を用いた素子では反転が起きないこと、を確認しました。重金属の Pt と W では電流が流れる際に (それぞれ反対向きの) スピン流を生じますが、Cu は電流を流してもスピン流をほとんど生みません (図 5)。本結果は、素子に電流を流すことで重金属層に生じるスピン流が、 Mn_3Sn の持つワイル点の位置分布とその仮想磁場に由来したホール電圧を反転していることを示しています。これは従来の強磁性体からなる磁気メモリ素子で用いられているスピン軌道トルク磁化反転と同様の手法でワイル反強磁性体への情報の書き込みができるということを示しています。

また、書き込み電流の大きさを変えることで反転するホール電圧の大きさをアナログ的に制御可能であることを確認しました (図 4b)。本結果は、従来の計算システムで用いられている「0」と「1」の 2 つの情報単位だけでなく、3 つ、あるいは、それ以上の情報を一つの素子で書き込み・読み出しできることを示しています。このような多値記憶素子は脳型計算機や量子コンピュータの実現へつながる技術であり、近年盛んに研究が行われている次世代の情報記憶素子として多くの期待を集めています。

③ 今後の展望

本研究によって、電流によるワイル粒子の制御、特にワイル点を単位とした情報の書き込み・読み出し手法と、素子作製に関する指針が築かれました。特筆すべきは、研究対象となったワイル反強磁性体 Mn_3Sn では強磁性体の場合と同様の素子構造を用いることができるため、現在磁気メモリで使われている技術が適用できるという点です。今後はビヨンド 5G 世代の磁気メモリ材料として、反強磁性体で期待されている超高速駆動・超高密度の不揮発性メモリの実現にむけた研究が期待されます。具体的にはワイル反強磁性体を用いた素子の時間特性や、より実用的な特性である熱安定性の評価を経て情報機器への実装を進める必要があります。

また、ワイル粒子の電流制御そのものは学術的にも大変興味を持たれています。2016 年のノーベル物理学賞に代表されるように、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います。 Mn_3Sn は電子構造にワイル粒子を有し、ワイル点を作り出す仮想磁場に由来した巨大な異常ホール効果や異常ネルンスト効果を示す物質として、世界中のグループで研究が行われています。今回、電流を用いてワイル粒子を制御できる手法を開発したことにより、これまで観測できなかったワイル粒子のダイナミクス等の非平衡物理やそれによる新しい量子現象の研究へと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) 戦略的創造研究推進事業 チーム型研究 (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)、文部科学省 科学研究費補助金新学術領域「J- Physics: 多極子伝導系の物理」課題番号 15H05882 (研究代表: 播磨 尚朝) における研究計画班「A01: 局在多極子と伝導電子の相関効果」課題番号 15H05883 (研究代表者: 中辻 知)、科研費 (No.16H06345, 強相関物質設計と機能開拓 - 非平衡系・非周期系への

挑戦一)、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)「NEDO先導研究プログラム/エネルギー・環境新技術先導研究プログラム/ワイル磁性体を用いた熱発電デバイスの研究開発」の一環として、産業技術総合研究所と共同で行われました。

5. 発表雑誌:

雑誌名: *Nature*

論文タイトル: Electrical Manipulation of a Topological Antiferromagnetic State

著者: Hanshen Tsai[†], Tomoya Higo[†], Kouta Kondou, Takuya Nomoto, Akito Sakai, Ayuko Kobayashi, Takafumi Nakano, Kay Yakushiji, Ryotaro Arita, Shinji Miwa, YoshiChika Otani, and Satoru Nakatsuji*

([†]: equal contribution、*: 責任著者)

DOI 番号: 10.1038/s41586-020-2211-2

6. 問い合わせ先:

【研究内容に関すること】

東京大学物性研究所 量子物質研究グループ

特任助教 肥後 友也 (ひご ともや)

E-mail: tomoya[at]issp.u-tokyo.ac.jp

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/
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

【JST事業に関すること】

科学技術振興機構 戦略研究推進部 グリーンイノベーショングループ

嶋林 ゆう子 (しまばやし ゆうこ)

TEL: 03-3512-3531

E-mail: crest[at]jst.go.jp

【報道に関すること】

東京大学物性研究所 広報室

TEL: 04-7136-3207

E-mail: press[at]issp.u-tokyo.ac.jp

東京大学大学院理学系研究科・理学部広報室

TEL: 03-5841-8856

E-mail: kouhou.s[at]gs.mail.u-tokyo.ac.jp

理化学研究所 広報室 報道担当

E-mail: ex-press[at]riken.jp

7. 用語解説 :

(注1) スピン・強磁性体・反強磁性体

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ます。これらは①スピンの一様な方向に揃うことで磁石のように大きな磁化を示す強磁性体、②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正味の磁化がゼロもしくは非常に小さくなっている反強磁性体、に分類されます。

(注2) ワイル粒子・ワイル点・ワイル半金属・ワイル磁性体

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。ニュートリノを記述する粒子として世界的に研究が進められてスーパーカミオカンデでの実験でニュートリノが微小な質量をもつことがわかり、ワイル粒子は自然界に存在しない幻の粒子と思われていました。

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)を持つ対となって発生し、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といいます。ワイル磁性体では磁場などの外場によって磁気秩序を制御することで、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等の起源となっています。

(注3) 漏れ磁場

磁性体から外部へ出ている磁界のことを漏れ磁場といいます。漏れ磁場は磁化の大きさに比例し、自発的に磁化をもつ強磁性体では大きな値となります。磁石にクレジットカードを近づけるとデータが消えてしまうのと同様に、高集積記憶デバイスにおいて、漏れ磁場が隣の素子に作用し、情報を誤って書き換えてしまうなどの問題が生じることがあります。

(注4) スピン流

エレクトロニクスでは電子の持つ電荷の流れ、すなわち電流が重要な役割を担っています。通常は電流における電子の持つスピンの向きはランダムです。電子のスピン自由度を積極的に利用するスピントロニクスでは、スピンの流れである「スピン流」を用います。今回用いた非磁性重金属は、電流を流すと電流と直交方向にスピンの向きがそろったスピン流を生成します。多層膜を作ることで、重金属層で生成されたスピン流を隣接層へ注入することができます。

(注5) 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・電流と垂直の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。自発的に磁化を持つ強磁性体や、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は外部から磁場を与えなくてもホール効果が生じるため、これらを異常ホール効果と呼びます。

(注6) 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・温度差と垂直な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。互いに垂直に磁場と温度差を与えることで、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。自発的に磁化を持つ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。異常ネルンスト効果を用いると、外部から磁場を印加する必要がないため、温度差のみで発電が可能です。

8. 添付資料：

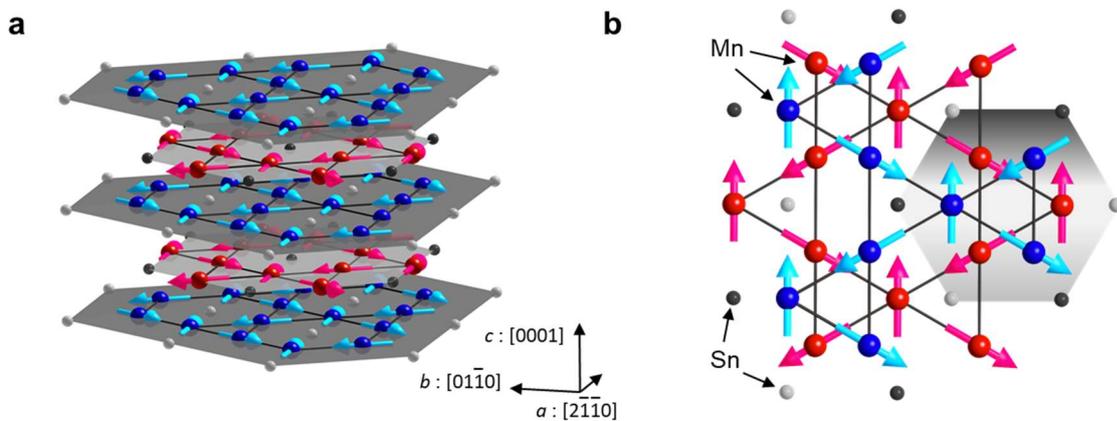


図1 ワイル反強磁性体 Mn₃Sn の結晶構造と磁気構造

(a) ワイル反強磁性体 Mn₃Sn は c 軸方向に磁性原子のマンガン (Mn、赤と青の球) からなるカゴメ格子が積層した構造をもち、420 K (約 150 °C) 以下で、Mn のスピンの逆 120 度構造と呼ばれる反強磁性秩序を示します。(b) 二層のカゴメ格子上的スピンを見ると、六角形で示されているクラスター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揃っていることがわかります。

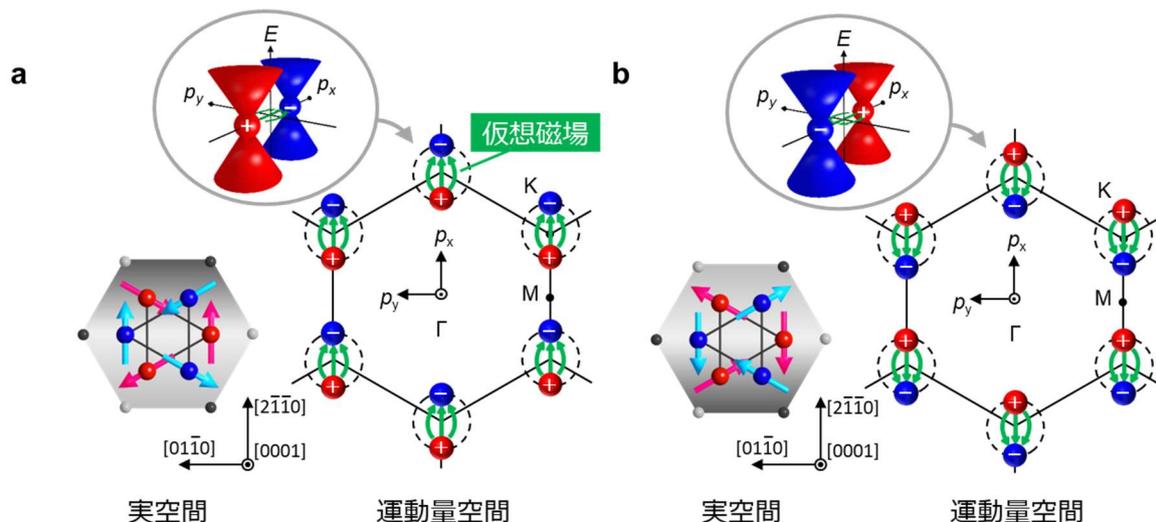


図2 ワイル反強磁性体 Mn_3Sn における反強磁性秩序とワイル点の関係

ワイル反強磁性体 Mn_3Sn では、実空間での反強磁性秩序の向きと運動量空間におけるワイル点の対 (赤 (+) と青 (-) の球)、その仮想磁場の向きが対応しています。図 (a) と (b) は反強磁性秩序を反転させた場合のワイル点と仮想磁場の向きの概要図で、それぞれ逆方向に仮想磁場が向くことがわかります。

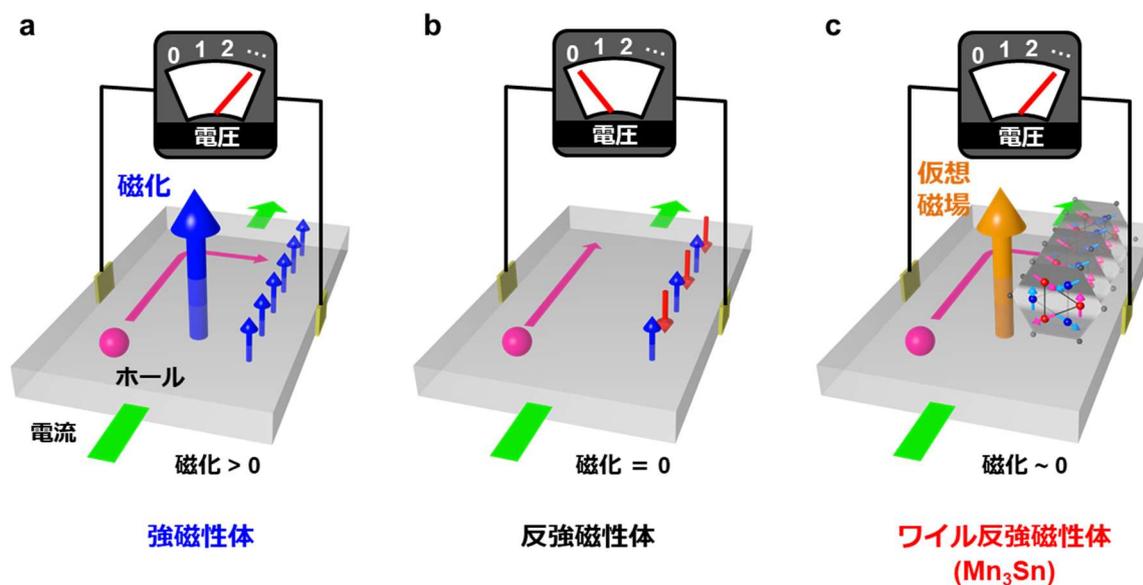


図3 強磁性体と反強磁性体、ワイル反強磁性体 Mn_3Sn における異常ホール効果

(a) 大きな磁化を持つ強磁性体では異常ホール効果が現れます。一般に、磁化の大きさに比例して異常ホール効果は大きくなります。(b) 反強磁性体では磁化が0、もしくは、非常に小さいため、異常ホール効果の測定は困難です。(c) ワイル反強磁性体 Mn_3Sn では、ワイル点が生み出す仮想磁場の効果により、磁化が非常に小さくても、強磁性体に匹敵するほど大きな異常ホール効果が現れます。

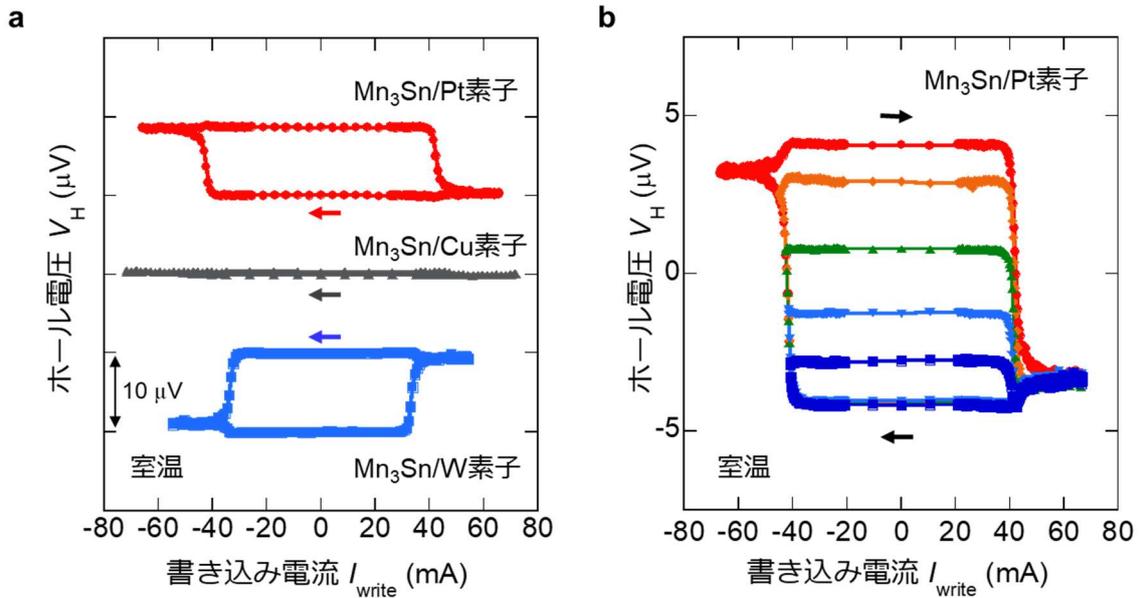


図 4 ワイル反強磁性体 Mn_3Sn /非磁性金属からなる素子でのホール電圧の電流反転
 (a)ワイル反強磁性体 Mn_3Sn と白金 (Pt)、銅 (Cu)、タングステン (W) との積層膜を用いた素子における、ホール電圧の書き込み電流依存性。大きなスピンの発生が期待できる Pt もしくは W からなる素子において、ホール電圧の反転が確認できます。 Mn_3Sn /W 素子ではホール電圧の大きさを $\times 1/2$ にして表示しています。(b) Mn_3Sn /Pt 素子を用いた多値記憶の実証実験結果。書き込み電流の大きさを変えるとホール電圧がアナログ的に変化します。

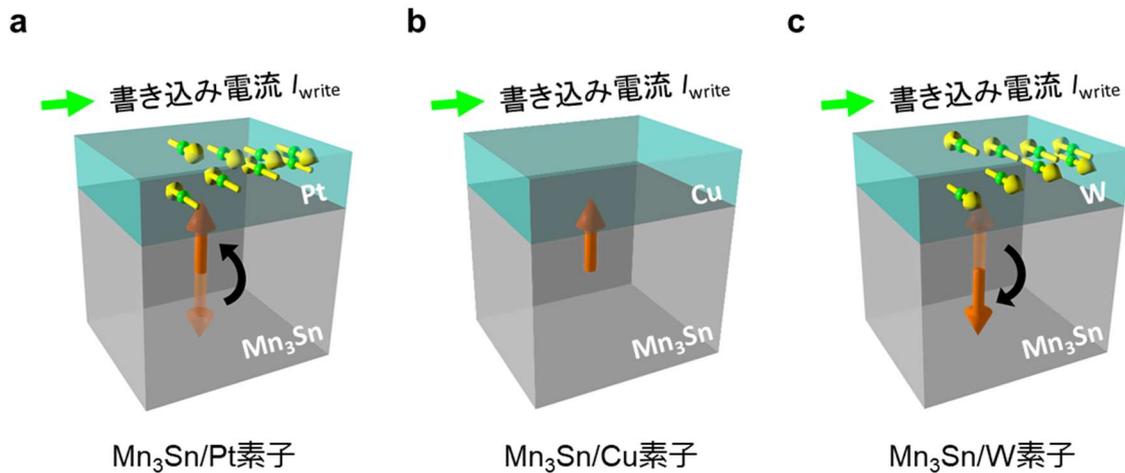


図 5 ワイル反強磁性体 Mn_3Sn /非磁性金属の素子でのスピンの流による仮想磁場反転の概要図
 白金 (Pt (a)) やタングステン (W (c)) では、電流を流すことで黄色矢印に偏極した大きなスピンの流が生じます。このスピンの流によりワイル反強磁性体 Mn_3Sn の反強磁性秩序・ワイル点およびその仮想磁場 (オレンジ矢印) が反転し、仮想磁場由来の異常ホール効果の反転が起こります。一方で、銅 (Cu (b)) では、ほとんどスピンの流が生じないため、異常ホール効果の反転は起きません。従って図 4a の電流によるホール電圧の反転は、非磁性金属で生成されたスピンの流の効果と考えられます。