

PRESS RELEASE

2023年1月19日

東京大学

科学技術振興機構 (JST)

室温で駆動する新しい量子トンネル磁気抵抗効果の発見

— ピコ秒帯域で駆動する超高速・高密度・低消費電力メモリの開発へ大きな一歩 —

1. 発表のポイント：

- ◆ 近年、現状のシリコン半導体技術の性能を超えた高速、かつ、低消費電力な情報処理技術の開発が強く求められている。従来型の低消費電力な不揮発性の磁気抵抗メモリ (MRAM) は強磁性体の磁化が必要であり、そのため処理速度はギガヘルツ (GHz) 帯域 (ナノ秒帯域) にとどまっていた。この常識を破る『磁化が不要な量子トンネル磁気抵抗効果』の実現に初めて成功。
- ◆ MRAM の心臓部であるトンネル磁気抵抗素子の磁性層に、磁化を持たない反強磁性体が適用可能であることを実証。
- ◆ SRAM 代替が可能なテラヘルツ (THz) 帯域 (ピコ秒帯域) で駆動する超高速・高密度・低消費電力メモリの開発へ道を拓く。

2. 発表概要：

東京大学大学院理学系研究科、物性研究所、および先端科学技術研究センターの研究グループは、反強磁性体 (注 1) Mn_3Sn が磁化を持たないにも関わらず室温で量子トンネル磁気抵抗効果 (注 2) を示すことを世界に先駆けて発見しました。

Mn_3Sn は磁化を持たないにも関わらず巨大な異常ホール効果 (注 3) を示すことが知られていました。今回の、電気的な出力を飛躍的に増大させることのできる量子トンネル磁気抵抗効果の発見は、これまで不可能と思われていた THz 帯の動作速度で駆動する超高速・高密度・低消費電力メモリの実現に向けた大きな一歩です。本発見は今後大きく注目される量子技術であり、アカデミックなインパクトのみならず、産業界においても大きな波及効果をもたらすことが期待されます。

近年の情報技術、AI、IoT の発展により、データトラフィックは指数関数的に上昇し、データ処理・伝送に必要な消費電力の削減が大きな課題になっています。また今後のクラウドやエッジコンピューティングを用いた自動運転や遠隔医療、工場の自動操業などのサービスの実現には大量のデータを高速で処理する必要があります。そのため、現状のシリコン半導体技術の性能を超える高速、かつ、低消費電力な情報処理技術の開発が求められています。このような状況の中、待機時に電力を必要としない不揮発性メモリ (注 4) として、現在、商業化が進んでいるものに磁気抵抗メモリ (Magnetoresistive Random Access Memory: MRAM) (注 4) があります。

MRAM は不揮発性による低消費電力のみならず、繰り返し耐性が非常に高いことから Dynamical RAM (DRAM) (注 5) に取って代わる次世代のメモリとして注目されています。しかし、MRAM の動作周波数は 100MHz から 1GHz 程度であり、Static RAM (SRAM) (注 5) の置き換えにはスピードが足りません。そこで今後の情報処理と伝送のさらなる高速化を見据えて、(i) SRAM よりも高速な 1THz 程度での動作が可能であり、さらに (ii) 複雑な構造の SRAM よりも大幅に微細化可能な MRAM の開発が望まれていました。

THz 動作特性を持つ磁性体としては反強磁性体が知られています。従って、MRAM に使われている強磁性体 (注 1) を反強磁性体に置き換えることにより高速化が可能となります。また、反強磁性

体は磁化が無視できるほど小さいため、素子化した際に磁性層間の漏れ磁場の影響を受けない性質があります。従って、大幅な微細化も期待できます。

一方で、反強磁性体が有する、磁化がないあるいはごく小さいことによる利点は、反強磁性体への情報の書き込み及び読み出しが困難であるという課題にもなります。反強磁性体への書き込みについては、本研究グループにより強磁性体の場合と同様のスピン（注1）軌道トルクという手法を用いた新規書き込み方法が見出されています（2020年及び2022年にNature誌発表）。読み出しについてはMRAMで必須の量子トンネル磁気抵抗効果の利用が望ましいとされますが、この効果は磁化を持つ強磁性体でのみで観測されるため反強磁性体では現れないと考えられてきました。

本研究グループは、特異な磁気構造とトポロジカルな性質を持つ反強磁性体 Mn_3Sn を用いて、世界で初めて反強磁性体において量子トンネル磁気抵抗効果の観測に成功しました。今回観測された磁気抵抗の変化は1~2%です。さらに、理論的には現在強磁性体で見られる値と同程度まで増強可能であることも明らかにしました。今後、THz帯域で駆動する超高速MRAMの開発が期待されます。

本研究成果は英国の科学誌「Nature」において、2023年1月18日付けオンライン版で公開される予定です。

3. 発表内容：

研究の背景

シリコンベースの半導体は今や2ナノメートル（nm）プロセスの時代に入りました。しかし、高性能化の鍵となる情報記録密度の増加は年々鈍化の一途をたどっています。また、情報処理速度を上げるためにはこれまで以上の電力が必要です。従来は「半導体回路の集積密度は1年半から2年で2倍となる」というムーアの法則により、半導体チップの小型化・高性能化が進むことで半導体の製造コストが下がると予想されてきました。しかし、ムーアの法則の破綻が明確になりつつある現在、情報処理原理の刷新が喫緊の課題です。そのなかで重要な技術の1つがMRAMです。

2020年頃からSamsung、TSMC、Intelなど巨大半導体企業がMRAMの量産を始めましたが、その処理速度は10ナノ秒（1億分の1秒）程度であり、半導体メモリのうちメインメモリであるDRAM代替が進められています。現在はさらに高速な処理速度（0.1~1ナノ秒）が要求されるSRAMを不揮発性メモリに代替することが期待されています。MRAMの処理速度の大幅な向上の鍵を握るのが、次世代のメモリ媒体として注目されている反強磁性体です。反強磁性体は強磁性体よりも2~3桁早い動作周波数、すなわち100GHzから1THzを有します。それゆえ、MRAMの心臓部にある強磁性体を反強磁性体で置き換えることができれば、(i) SRAMよりも高速な1THz程度での動作が可能であり、さらに (ii) 複雑な構造のSRAMよりも大幅に微細化が可能なMRAMの開発が視野に入ってきます。しかし、反強磁性体MRAMの実現には、MRAMの心臓部である磁気トンネル接合（Magnetic Tunnel Junction: MTJ）素子（注2）を反強磁性体で作製し、「0」と「1」の情報に対応する電気信号を制御・検出する技術の開発が必要です。制御に関しては、本研究グループにより強磁性体同様のスピン軌道トルクという手法を用いた新規書き込み方法が見出されています（2020年及び2022年にNature誌発表）。しかし、読み出しとして必須のトンネル磁気抵抗効果は、これまで磁化が必要と考えられており、磁化を持たない反強磁性体ではトンネル磁気抵抗効果の利用は不可能とされていました。

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 において、強磁性体でのみ現れると信じられていた磁気的な効果、すなわち異常ホール効果や異常ネルンスト効果(注 6)、磁気光学カー効果(注 7)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ました。これらの信号は、非共線反強磁性スピン構造(注 1)を示す Mn_3Sn が磁化に類似したクラスター磁気八極子偏極(注 8)を持つことに由来します。そしてこのクラスター磁気八極子偏極に対応するワイル半金属と呼ばれるトポロジカルな電子構造が重要となります。強磁性体の巨大応答性と反強磁性体の超高速性を併せ持つ Mn_3Sn は、現在、世界各国の多くの研究グループにより機能性反強磁性体として研究されています。

現在、半導体企業が量産している MRAM の構造を図 1 に示します。情報の読み書きはトンネル磁気抵抗効果を発現する MTJ 素子が担います。MTJ 素子は主に強磁性層/トンネル障壁層/強磁性層から構成されており、2つの強磁性層の磁化方向が平行及び反平行になることで「0」と「1」の情報を保持します。

本研究では強磁性層を反強磁性体 Mn_3Sn で置き換えた MTJ 素子を作製しました。反強磁性体は強磁性体のような大きな磁化を持ちません。しかし、 Mn_3Sn には類似の機能を有するクラスター磁気八極子偏極があり、この偏極を制御できます。本研究グループは Mn_3Sn -MTJ 素子を構成する2つの反強磁性層のクラスター磁気八極子偏極が平行な状態と反平行な状態を作り(図 2a)、室温で磁気抵抗効果を測定しました。その結果、反強磁性体のみからなる MTJ 素子で初めてトンネル磁気抵抗効果の観測に成功しました(図 2b)。今回確認できた磁気抵抗効果の変化は1~2%程度ですが、理論計算から、この抵抗変化比は現在強磁性体で見られる値と同程度(100%程度)まで十分増強可能であることも併せて明らかにしました。

今後の展望

MRAM の強磁性体部分を置き換えても機能しうる反強磁性体としては、強磁性体と同じ磁気対称性を持ち磁化の代わりにするクラスター磁気多極子偏極を有する磁性体が考えられます。この条件を満たす反強磁性体の有望な候補物質は、現在のところ本研究グループが開発した Mn_3X ($X = Sn, Ge$) 系のみです。MRAM の基盤技術である MTJ 素子の開発は、アカデミックなインパクトのみならず、従来のシリコン半導体に比してより高速で低消費電力な情報技術に繋がる可能性を秘めており、産業界においても大きな波及効果をもたらすことが期待されます。また、今後の日本のポスト半導体産業の育成にも大きな効果をもたらすと考えられます。

最後になりますが、クラスター磁気多極子がつくる量子的なトンネル電流が室温で実現しうるのか？これは物性物理学における真に興味深い問いです。本研究グループは理論的に Mn_3Sn の MTJ 素子が現在の MTJ 素子の材料系(強磁性の鉄(Fe))とほぼ同程度のトンネル磁気抵抗効果を有し得ることを示しました。これはスピン分裂したバンド間の運動量を保存した電子のトンネル現象という非常に興味深い量子科学の基礎的主題に対する大きな知見でもあります。このように、今回の成果はアカデミックおよび産業界の両方に大きく貢献する量子技術であり、今後の研究開発の一大分野に発展すると期待されます。

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：

チェン シャンツェ (東京大学物性研究所 特任研究員：研究当時
現在：カリフォルニア大学バークレー校 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 リサーチフェロー 併任)
田中 克大 (東京大学先端科学技術研究センター 特任研究員)
野本 拓也 (東京大学先端科学技術研究センター 講師)
ツァイ ハンセン (東京大学大学院理学系研究科 物理学専攻 特任助教)
井土 宏 (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 リサーチフェロー 併任)
志賀 雅亘 (東京大学物性研究所 量子物質研究グループ 特任研究員：研究当時／
現在：九州大学大学院工学部 エネルギー量子工学部門 助教)
坂本 祥哉 (東京大学物性研究所 量子物質研究グループ 助教)
安藤 遼哉 (東京大学物性研究所 修士課程学生：研究当時)
甲崎 秀俊 (東京大学物性研究所 修士課程学生)
松尾 拓海 (東京大学大学院理学系研究科 博士課程学生)
浜根 大輔 (東京大学物性研究所 附属物質設計評価施設 技術専門職員)
有田 亮太郎 (東京大学先端科学技術研究センター 教授／
理化学研究所 創発物性科学研究センター 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／
東京大学トランススケール量子科学国際連携研究機構 准教授 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 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)

4. 発表雑誌：

雑誌名：Nature

タイトル：Octupole-driven magnetoresistance in an antiferromagnetic tunnel junction

著者：X. Chen⁺, T. Higo⁺, K. Tanaka⁺, T. Nomoto, H. Tsai, H. Idzuchi, M. Shiga, S. Sakamoto,
R. Ando, H. Kosaki, T. Matsuo, D. Nishio-Hamane, R. Arita, S. Miwa & S. Nakatsuji*
(⁺：Equal contribution, *：Corresponding author)

DOI 番号：10.1038/s41586-022-05463-w

アブストラクト URL：<https://www.nature.com/articles/s41586-022-05463-w>

5. 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

6. 用語解説 :

(注 1) 反強磁性体、強磁性体、スピン、非共線反強磁性スピン構造

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します。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としての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反強磁性体に分類されます。また、隣り合うスピンの平行な場合を共線的と呼び、そうでない場合は非共線的と呼びます。今回取り上げた反強磁性体 Mn_3Sn は、図 2(a)に示すようにスピンの互いに 120 度ずつ傾斜した方向を向いており、3つのサイトのスピンの互いに打ち消しあうように配列しています。このような構造を量子トンネル磁気抵抗効果と呼びます。

(注 2) 量子トンネル磁気抵抗効果、磁気トンネル接合素子

電極として金属磁性体を用い、また、この電極がトンネル障壁層である絶縁体を挟む構造を有する接合素子のことを磁気トンネル接合素子と呼びます(図 1 参照)。これまで知られていた従来型の接合素子は電極として磁化を持つ強磁性体を利用していました。この磁気トンネル接合 (MTJ) 素子に電圧を加えたとき、量子トンネル効果によって流れる電流が両側の磁性薄膜における磁化の向きに依存して変化する現象を量子トンネル磁気抵抗効果と呼びます。この磁化が平行と反平行な状態での 2 値の抵抗が不揮発な 1bit の情報となります。

(注 3) 異常ホール効果

電気を流す物質において、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、電子の運動が磁場により曲げられることが原因です。強磁性体では磁極の向きに依存して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います。

(注 4) 不揮発性メモリ、磁気抵抗メモリ (MRAM)

既存の半導体を用いた揮発性メモリと異なり、電源を切っても記録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 は磁性体におけるスピン方向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 5） DRAM、SRAM

DRAM は Dynamic Random Access Memory の略です。コンデンサとトランジスタを組み合わせた揮発性メモリであり、コンデンサへの電荷蓄積の有無で情報を保存します。構造が単純で安価に大容量化が可能のため、現在のコンピュータにメインメモリとして広く用いられています。電荷は時間経過とともに失われるため、定期的に再書き込みを行う必要があります。

SRAM は Static Random Access Memory の略です。DRAM 同様に半導体メモリの一種であり、トランジスタの組み合わせにより構成されます。高速動作を得意としますが、複数のトランジスタを用いるため大容量化が困難です。

いずれのメモリも電源を切ると情報が失われる揮発性メモリであり、情報処理を行っていない待機時のリフレッシュ動作やリーク電流によるエネルギー消費が深刻な問題となっています。

（注 6） 異常ネルンスト効果

電気を流す物質において、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することにより、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の方向を温度勾配と垂直にすることで起電力が得られます。

（注 7） 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非共線反強磁性体 Mn_3Sn などのクラスター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 8） クラスター磁気八極子偏極

磁石として知られる強磁性体は N 極と S 極と呼ばれる 2 つの極（磁極）を持っています。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クラスター磁気多極子といい、構成するスピンの数が 1 つ、2 つ、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 つのカゴメ格子上に配置された 6 つのスピンの組み合わせでクラスター磁気八極子のユニットが考えられます。 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、磁極のない反強磁性体においても強磁性体同様の巨大応答を示すことができます。

7. 添付資料 :

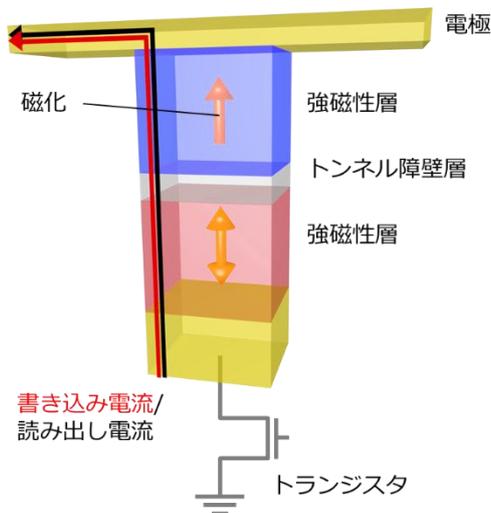


図 1 : MRAM の模式図。磁気トンネル接合素子は強磁性層/トンネル障壁層/強磁性層で構成される。オレンジ色の矢印は磁化 (磁極) の向き、黄色部分は電極を示す。強磁性層を反強磁性体に置き換えることにより、動作周波数の向上と微細化を見込める。

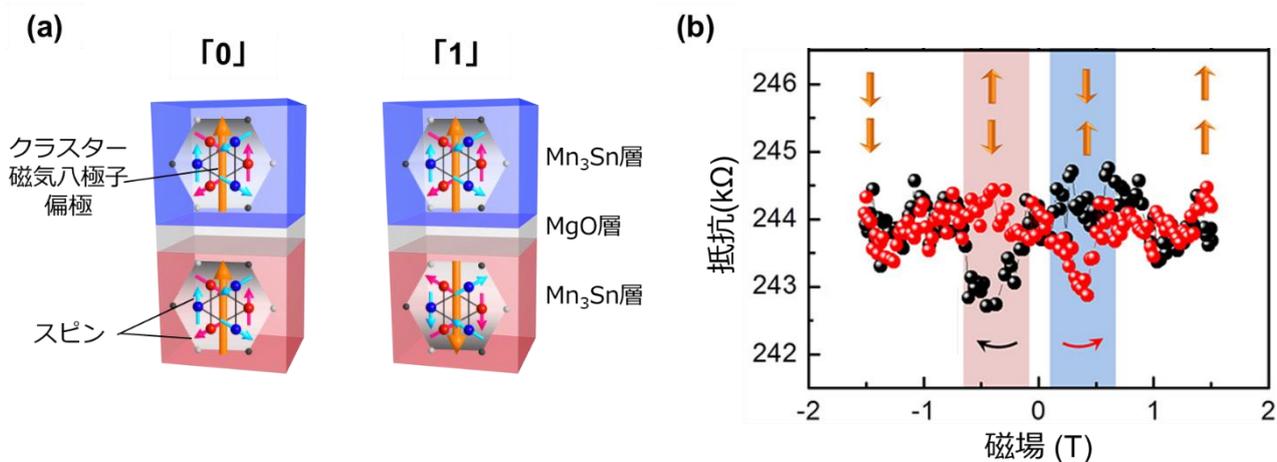


図 2 : (a) 「0」と「1」の情報に対応する 2 値のトンネル磁気抵抗効果の模式図であり、反強磁性体 Mn_3Sn からなる MTJ 素子のクラスター磁気八極子偏極の平行と反平行状態を示す。(b) 室温において測定した Mn_3Sn /トンネル障壁層 (MgO) / Mn_3Sn の MTJ 素子における磁気抵抗効果。図中のオレンジ色の矢印は 2 つの Mn_3Sn 層におけるクラスター磁気八極子偏極の方向を示している。反平行状態 ($\uparrow\downarrow$, $\downarrow\uparrow$) は平行状態 ($\uparrow\uparrow$, $\downarrow\downarrow$) よりも電気抵抗が小さくなっている。