

## トンネル磁気抵抗（TMR）に対する新理論を提案

～TMR 比向上の鍵「TMR 振動」の解明に前進～

NIMS は、磁気メモリ等に応用されるトンネル磁気抵抗（TMR）について、絶縁層の厚さによって TMR 比が振動する現象を説明する新たな理論を提案しました。この TMR 振動は、NIMS が近年達成した TMR 比の世界最高記録に付随して明瞭に観測される現象であり、その起源の解明は、さらなる TMR 比の向上に直結すると期待されます。本研究成​​果は、米国物理学会の学術誌『Physical Review B』の Letter 論文として、2025 年 6 月 9 日に掲載されました。

### 研究成果の概要

#### ■従来の課題

TMR 効果は、磁性層／絶縁層／磁性層という薄膜素子において、左右の磁性層の磁化<sup>[1]</sup>の向きが平行な場合と反平行な場合とで、素子の電気抵抗が異なる現象です。磁気センサーや磁気メモリなど応用範囲の拡大に向けて、電気抵抗の変化率（TMR 比）のさらなる向上が求められています。NIMS は近年、TMR 比の世界最高記録を更新し、「TMR 比が絶縁層の膜厚に応じて振動する現象（TMR 振動現象）」の解明が TMR 比をさらに高めるための鍵であることを示しました。しかし、TMR 振動現象は、過去に多くの研究がなされたにもかかわらず、その起源が 20 年以上明らかにされてきませんでした。

#### ■成果のポイント

当研究チームは、従来の理論研究で見過ごされてきたメカニズムを取り入れた、新たな TMR 効果の理論を提案しました。この理論により、TMR 振動現象を理論的に再現できることを示しました。TMR 効果は、磁性層と絶縁層からなる薄膜構造において発現し、両層の界面構造が重要な役割を担うと考えられています。本研究のポイントは、この界面における波動関数<sup>[12]</sup>の重ね合わせ状態 [図 1(a)] を理論に取り入れた点にあります。この理論に基づいて計算された TMR 比が、実験で得られた TMR 振動現象をよく再現することも確認されました [図 1(b)]。

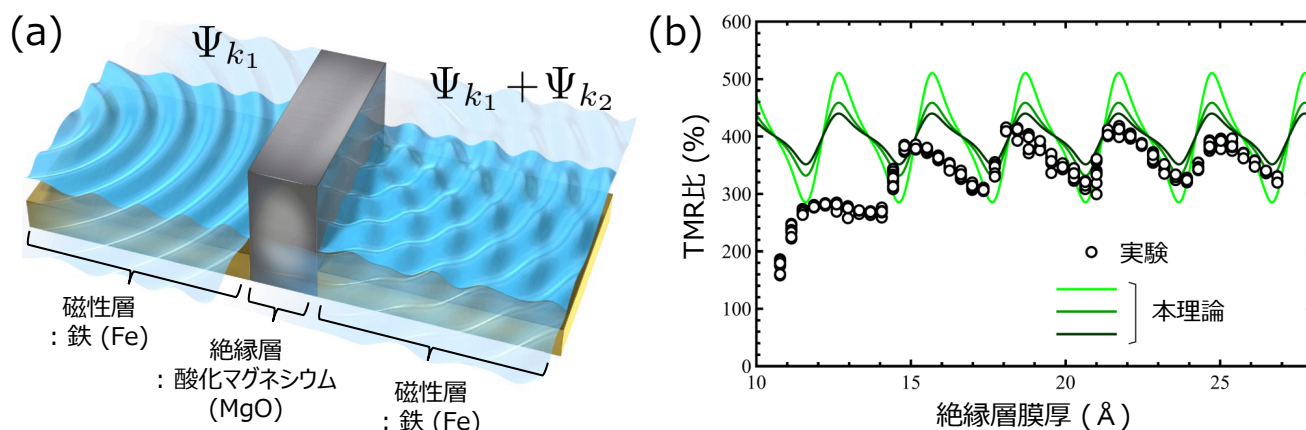


図 1：(a) TMR 振動現象が生じる仕組みの模式図。磁性層と絶縁層の界面における波動関数の重ね合わせが鍵となる。

(b) 理論計算と実験データの比較。計算結果は様々な条件で実験結果とよく一致し、TMR 振動現象を再現している。

## ■ 将来展望

これまで TMR 振動現象に関する実験は、鉄（Fe）など限られた磁性材料を用いた薄膜で行われてきました。今後は、より多様な磁性体を用いた実験が進められ、本理論との比較を通じて、TMR 振動現象に対する理解が一層深まることが期待されます。さらに、本理論は TMR 振動を制御するための指針や、TMR 比のさらなる向上に向けた設計方針の確立にも貢献すると見込まれます。

## ■ その他

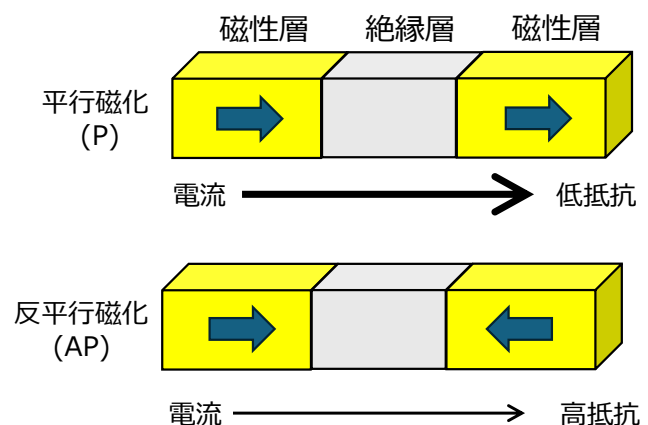
- 本研究は、NIMS 磁性・スピントロニクス材料研究センター磁性理論グループの増田啓介主任研究員、三浦良雄招聘研究員を中心とし、同センタースピントロニクスグループのシャイクトーマス客員研究員、介川裕章グループリーダー、三谷誠司上席研究員、NIMS ナノアーキテクトニクス材料研究センター量子ビット材料グループの小塚裕介グループリーダーにより構成される研究チームによって実施されました。
- 本研究は、JSPS 科研費（22H04966、23K03933、24H00408）および文部科学省データ創出・活用型マテリアル研究開発プロジェクト事業（JPMXP1122715503）の支援を受けています。
- 本研究成果は、2025 年 6 月 9 日付で『Physical Review B』誌のオンライン版に Letter 論文として掲載されました。また、本論文は Editors' Suggestion（注目論文）にも選出されています。

## 研究の背景

TMR 効果は、磁性層／絶縁層／磁性層という三層構造を持つ薄膜素子「磁気トンネル接合」で発現する現象です。具体的には、左右の磁性層の磁化の向きが平行な場合と反平行な場合とで、素子を通る電流に対する電気抵抗が異なります（図 2）。この TMR 効果は、微弱な磁場を検出する高感度な磁場センサーや、情報の不揮発性を有する磁気メモリといったデバイスに応用されており、私たちの生活を支える重要な基盤技術の一つです。

このような応用において鍵となるのが、TMR 効果の性能指数ともいえる「TMR 比」です。TMR 比は、左右の磁性層の磁化の向きが平行な場合と反平行な場合とでの電気抵抗の比として定義され（図 2）、あらゆる応用において、より高い TMR 比が望まれます。これまでの研究では、鉄（Fe）と酸化マグネシウム（MgO）からなる磁気トンネル接合 Fe/MgO/Fe において、巨大 TMR 比が発見されており<sup>[3]</sup>、この現象が TMR 応用技術の基盤となっています。

ただし、磁場センサーの感度向上や磁気メモリの大容量化といった実用的課題を考慮すると、TMR 比をさらに高める必要があります。NIMS ではこの課題に長年取り組んでおり、近年では磁気トンネル接合の界面を高度に制御することで、室温における TMR 比の世界最高記録を 15 年ぶりに更新する成果を上げています（[2023 年 4 月 13 日プレスリリース『素子「界面」の高度な制御で世界最高の磁気抵抗特性を達成』https://www.nims.go.jp/press/2023/04/202304130.html](https://www.nims.go.jp/press/2023/04/202304130.html)）。この実験研究では、世界最高記録を達成すると同時に、TMR 比が絶縁層の膜厚に応じて振動する「TMR 振動現象」も明瞭に観測されました。この現象は、2004 年に Fe/MgO/Fe 系で巨大 TMR 比が発見された際にも報告されており、それ以来 20 年以上にわたって起源は明らかにされておらず、現在ではスピントロニクス<sup>[4]</sup>分野における長年の未解決問題の一つと位置づけられています。典型的な従来の理論研究では、TMR 比は絶縁層膜厚の増加にともない、単調に増加するものとされてきました。し



$$\text{TMR 比 (\%)} = 100 \times (R_{\text{AP}} - R_{\text{P}}) / R_{\text{P}}$$

図 2：磁気トンネル接合における TMR 効果の模式図。磁化の向きによって電気抵抗が変化し、TMR 比は平行磁化時の抵抗（ $R_{\text{P}}$ ）と反平行磁化時の抵抗（ $R_{\text{AP}}$ ）の比で定義される。

たがって、TMR 振動現象を解明するためには、従来理論の枠組みを超えた新たなアイデアが必要であると言えます。

## 研究内容と成果

当研究チームは、従来の理論研究で見過ごされてきた効果を取り入れた、TMR 効果に対する新たな理論を提案しました。この理論により、実験で観測されている大きな振幅をもつ TMR 振動現象が理論的に再現できることを明らかにしました。

従来の理論では、Fe/MgO/Fe における高い TMR 比は、Fe が特定の対称性 ( $\Delta_1$ : デルタ 1) を持つエネルギーバンド<sup>[5]</sup>において、ハーフメタル<sup>[8]</sup>的な性質を示すことによって説明されてきました (図 3)。具体的には、多数スピン状態<sup>[1]</sup>では  $\Delta_1$  対称性を持つエネルギーバンドがフェルミ準位<sup>[7]</sup>を横切る一方、少数スピン状態<sup>[1]</sup>では  $\Delta_1$  対称性を持つエネルギーバンドがフェルミ準位より高い位置にあり、電子の伝導には多数スピン状態のみが寄与するとされてきました (図 3 の左図と右図それぞれで  $\Delta_1$  と表示されたエネルギーバンドを参照)。このようなバンド構造のスピンの非対称性が、二つの磁性層の平行磁化と反平行磁化の間で電気伝導に差を生じさせ、高い TMR 比の発現をもたらすと理解されています。しかしながら、この従来の説明は、多数スピン状態と少数スピン状態の間に相関がないという単純化された仮定に基づいています。実際の磁気トンネル接合では、特に磁性層と絶縁層の接合界面において、交換相互作用<sup>[9]</sup>などを通じて両スピン状態の混成が生じる可能性があります。また、従来理論に基づく計算では、TMR 比は絶縁層膜厚の増加とともに単調に増加することが示されており、TMR 振動現象は定性的にさえ説明されないことがわかっています。

本研究では、Fe のエネルギーバンド構造 (図 3) に基づき、多数スピンの  $\Delta_1$  状態 (フェルミ波数<sup>[11]</sup>  $k_1$ ) と、少数スピンの  $\Delta_2$  状態 (フェルミ波数  $k_2$ ) の混成を考慮した波動関数<sup>[12]</sup>を導入しました。このような異なるスピン、異なるフェルミ波数の重ね合わせ状態を解析に取り入れた点が、本理論の新規性です [図 1(a)]。

解析的な計算の結果、TMR 比が絶縁層の膜厚に応じて振動することが明らかとなりました。さらに、その振動周期が  $2\pi/(k_1 - k_2)$  によって表されることもわかりました。 $k_1$  および  $k_2$  の値は第一原理計算<sup>[13]</sup>により求めることができ、算出された振動周期は、これまでに報告された実験結果とよく一致することが確認されました。また、研究チームは数値計算によって TMR 振動の波形も求め、実験データとよく一致することを明らかにしました [図 1(b)]。

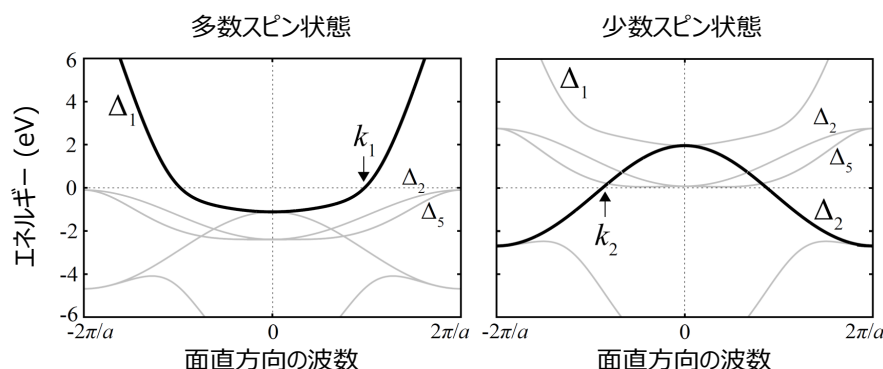


図 3 : Fe における多数スピン状態および少数スピン状態のエネルギーバンド構造。縦軸はフェルミ準位を基準 (0eV) としたエネルギーを示す。本研究では、太い線で示された多数スピンの  $\Delta_1$  状態 (左図) と、少数スピンの  $\Delta_2$  状態 (右図) の重ね合わせを考慮した点に新規性がある。

## 今後の展開

現在、TMR 比の世界最高記録を持つ磁気トンネル接合における実験では、TMR 振動の振幅が非常に大きく、TMR 比の約 20%に達しています。したがって、このような大きな TMR 振動を抑制できれば、幅広い膜厚において安定して、より高い TMR 比を実現することが可能となります。今回の研究成果は、TMR 振動現象の理解に向けた第一歩であり、今後さらなる検討を通じてその起源をより深く解明し、最終的には TMR 振動の抑制や制御の指針を得ることを目指しています。現在は限られた磁性体を用いた接合でのみ TMR 振動が観測されていますが、今後はさまざまな磁性体を用いた実験が進むことが期待されます。これらの実験結果と本研究の成果を比較・検討することで、TMR 振動現象に対する理解をさらに深めていきたいと考えています。

■掲載論文

題目	Theory for tunnel magnetoresistance oscillation
著者	Keisuke Masuda, Thomas Scheike, Hiroaki Sukegawa, Yusuke Kozuka, Seiji Mitani, and Yoshio Miura
雑誌	Physical Review B
DOI	10.1103/PhysRevB.111.L220406
掲載日時	2025 年 6 月 9 日

■用語解説

- [1] **磁化**： 磁性体に磁場をかけると、2 つのスピン<sup>[2]</sup>状態を占有する電子数に偏りが生じます。この電子数の差が磁化です。またこのとき、電子がより多く（少なく）存在するスピン状態は多数（少数）スピン状態と呼ばれます。磁場によりスピンは一定方向を向くため、磁化も方向を持つベクトル量となります。
- [2] **スピン**： 電子が持つ内部自由度で、上向き（アップ）と下向き（ダウン）の 2 つの状態があります（ここでは電子に限った説明です）。
- [3] **巨大 TMR 比の発見**： 室温で約 200%の巨大な TMR 比が、2004 年に産業技術総合研究所の湯浅らのグループおよび IBM の Parkin らのグループにより、独立に発表されました。
- [4] **スピントロニクス**： 電子が持つスピン<sup>[2]</sup>の自由度と電荷の自由度の両方を活用することに着目した研究分野です。
- [5] **エネルギーバンド**： 固体中の電子が取りうるエネルギー状態を表すもので、波数<sup>[6]</sup>とエネルギーの関係として描かれます。電気の流れ（電気伝導）は、フェルミ準位<sup>[7]</sup>付近のエネルギーバンドによって決まります。また、金属とはフェルミ準位をまたぐエネルギーバンドを持つ物質と定義できます。
- [6] **波数**： 位置の逆数の次元を持つ、電子の状態を記述する重要な物理量です。周期性を持つ結晶では、実空間よりもフーリエ変換された波数空間で電子状態を表す方が有用な場合があります。
- [7] **フェルミ準位**： エネルギーバンドの最低エネルギーから電子を詰めていき、絶対零度ですべての電子を詰め終えたときの最も高いエネルギー準位を指します。
- [8] **ハーフメタル**： 一方のスピン状態だけが金属状態を示す性質です。具体的には、一方のスピン状態ではエネルギーバンドがフェルミ準位をまたぎ、もう一方ではまたがない状態を指します。
- [9] **交換相互作用**： 電子間の相互作用の一種で、特に磁気現象の説明において重要な役割を果たします。これまで磁性や近藤効果<sup>[10]</sup>の理解に用いられてきました。
- [10] **近藤効果**： 少量の磁性元素を含む金属において、電気抵抗が低温で特異な振る舞いを示す現象です。この現象の物理的起源は発見以来長らく解明されていみせんでしたが、近藤淳氏による 1964 年の研究をはじめとする一連の研究により、磁性元素が持つ局在スピンと伝導電子の交換相互作用によって説明できることが明らかになりました。現在では「近藤効果」として広く知られ、後の物性物理学の研究に多大な影響を与えています。
- [11] **フェルミ波数**： フェルミ準位に対応する波数の値を指します。
- [12] **波動関数**： 電子の運動状態を表す関数で、シュレディンガー方程式の解として得られます。
- [13] **第一原理計算**： 結晶構造などの既知情報をもとに、理論的な仮定を最小限にしてシュレディンガー方程式を解くことで、エネルギーバンドなどの電子状態を求める計算手法です。



研究内容について	<b>NIMS 磁性・スピントロニクス材料研究センター 磁性理論グループ 主任研究員 増田啓介</b> E-mail: MASUDA.Keisuke@nims.go.jp TEL: 029-859-2228 URL: <a href="https://www.nims.go.jp/mmu/">https://www.nims.go.jp/mmu/</a>
報道・広報について	<b>NIMS 国際・広報部門 広報室</b> 〒305-0047 茨城県つくば市千現 1-2-1 E-mail: <a href="mailto:pressrelease@ml.nims.go.jp">pressrelease@ml.nims.go.jp</a> TEL: 029-859-2026, FAX: 029-859-2017

## NIMS とは？

NIMS（ニムス）は、国内で唯一、物質・材料科学の研究に特化した国立研究開発法人です。世界を構成する様々な「物質」。その中で私たちの生活を支えているのが「材料」です。その材料も、大きくは有機・高分子材料、無機材料に分類でき、無機材料はさらに金属材料とセラミックス材料とに分けられます。石器時代から産業革命を経て現代まで、人類の発展はこの材料の進歩とともにありましたが、近年では、地球規模の環境や資源問題の解決手段のひとつとしても注目が高まっています。NIMS はその物質・材料に関する研究に特化した国立研究開発法人として、「材料で、世界を変える」をテーマに、未来を拓く物質・材料の研究に日々取り組んでいます。

### 【NIMS を掴む参考ページ】

NIMS はこんな研究所！ <https://www.nims.go.jp/nims/introduction.html>

NIMS ビジョン <https://www.nims.go.jp/nims/profile.html#vision>