

2026年2月17日



分野：工学系

キーワード：ひずみゲージ、力学センシング、スピントロニクス、ナノ薄膜、SDGs

実用化の壁を超えるスピン力学センサの誕生

—高感度・高耐久を両立する新しいフィルム型ひずみゲージ—

【研究成果のポイント】

- ◆ 従来のフィルム型ひずみゲージの感度を圧倒的に凌駕(りょうが)する「スピン力学センサ」が、10万回を超える引っ張り試験後も特性劣化を示さず、実使用環境を想定した耐久性を世界で初めて実証
- ◆ 繰り返し大きく変形するフレキシブル基材上での長期安定動作は未検証であったが、高感度と高耐久性の両立を証明
- ◆ 高感度・低消費電力・低電圧駆動に加え、実用化の障壁となっていた高耐久性を兼ね備えた新センサの登場により、フィジカルとサイバー空間をつなぐインターフェースの高度化への貢献に期待

❖ 概要

大阪大学産業科学研究所の千葉大地教授(兼 東北大学国際放射光イノベーション・スマート研究センター センター長)らの研究グループは、磁性体ナノ薄膜からなる磁気トンネル接合(MTJ)^{*1}素子をフレキシブル基材上に形成した「スピン力学センサ」において、実使用環境を想定した高い耐久性を世界で初めて実証しました。

本研究において、フレキシブル基材上に形成したスピン力学センサに対して、10万回を超える繰り返し引っ張り試験を行った結果、特性劣化を示すことなく安定した動作を維持することを確認しました(図1)。

これまで、MTJは磁気メモリや磁界センサとして実用化されてきた一方で、繰り返し大きく変形するフレキシブル基材上における長期安定動作については十分に検証されていませんでした。本研究成果は、高感度という特長を保ったまま高耐久性を両立できることを示したものであり、スピン力学センサが実用的なフィルム型ひずみゲージとして利用可能であることを明確に示しています。

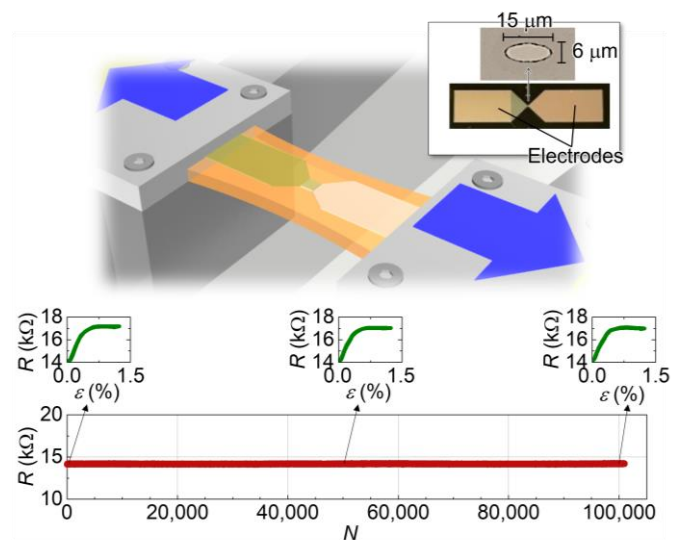


図1

10万回の引っ張り試験の模式図(上)と結果(下)。フレキシブル基材上に、MTJの上下の磁性層に電気的な接続をするための2つの電極(Electrodes)を有するマイクロメートル(100万分の1メートル)サイズのMTJを形成してスピン力学センサを作製し(右上の四角枠内の写真参照)、模式図のように引っ張り試験機に装着した。1%以上のひずみを繰り返し与えて引っ張り試験を行った結果、下のグラフ(縦軸: R = 抵抗、横軸: N = 引っ張り回数)のようにセンサの無ひずみ時の抵抗は10万回以上の引っ張り試験の間一定であり、素子の劣化がないことが証明された。真ん中の3つのグラフ(横軸: ε = ひずみ量)が示すように、センサ特性にも劣化は見られなかった。

さらに、本成果は、高感度・低消費電力・低電圧駆動という特長に、実用化の壁を超える耐久性が加わった新センサの登場を意味し、フィジカルな情報をサイバー空間へと高精度につなぐ次世代センシング技術の基盤となることが期待されます。

本研究成果は、米国科学誌『APL Electronic Devices』に、2月17日(火)(現地時間)に公開されます。

【千葉教授のコメント】

力学センサ(ひずみゲージ)については、これまで高い感度を示すさまざまな方式が提案されてきましたが、既製品を置き換える条件を満たしたものは半世紀以上現れていません。今回の成果は、既製品を凌駕する複数の性能を備えたスピンの力学センサが、将来の力学センサの本命として社会で活躍し得ることを示したものです。

❖ 研究の背景

ひずみなどの力学情報は、医療・ヘルスケア、インフラモニタリング、モビリティ、ロボティクスなどの幅広い分野において、フィジカル空間における極めて重要なセンシング対象です。特にフィルム型ひずみゲージとしては金属箔(はく)ゲージが長年にわたり実用化され、高い信頼性を持つ既製品として広く普及しています。一方で、近年の高度化するセンシング需要に応えるため、より高感度な力学センサの研究が数多く進められてきました。

研究グループがこれまでに開発してきた MTJ を用いたスピンの力学センサは、トンネル磁気抵抗効果^{*2}と磁気弾性効果^{*3}を利用したものです。同グループは、スピンの力学センサが、広く普及している金属箔を用いたフィルム型のひずみゲージの 500 倍もの高感度を実現できることを示してきました。しかし、これらのデバイスが繰り返し大きく変形するフレキシブル基材上で長期間にわたり安定して動作できるかどうかについては、これまで十分に検証されていませんでした。そのため、高感度という利点を持ちながらも、実使用環境を想定した耐久性の観点からは、実用化に向けた課題が残されていました。

❖ 研究の内容

研究グループは、数ナノメートル(ナノは 1 メートルの 10 億分の 1)の厚みの薄膜の積層構造からなる MTJ 素子を、フレキシブル基材上に直接形成したスピンの力学センサを作製し、その力学応答および耐久性を体系的に評価しました。作製したセンサは、引っ張りひずみに応じて磁化方向が変化する自由層と、変化しない固定層を備えています。引っ張りひずみによって両層の磁化の相対角度が変化し、それに伴う電気抵抗変化を利用してひずみを高感度に検出する構造を有しています。

本センサのもう 1 つの特長は、磁気センサや磁気メモリとしてすでに市販されている Co-Fe-B(磁性体、コバルト-鉄-ホウ素合金)/MgO(トンネル障壁)系の MTJ^{*4} を用いている点にあります。従来とは異なる用途である力学センシングにおいても、既存の製造技術や材料技術を転用可能であり、製品化を加速できる点が大きな利点です。

研究グループは、実使用環境を想定し、センサに対して実用で想定されるひずみをはるかに超える 1% 以上の引っ張りひずみを繰り返し高速に印加できる引っ張り試験機を自作し、耐久試験を実施しました。その結果、10 万回を超える繰り返し変形後においても、ひずみ応答特性や初期特性に顕著な劣化が生じないことを確認しました。

以上より、スピンの力学センサが高感度なひずみ検出性能を維持したまま、長期にわたり安定して動作可能であることを明らかにしました。

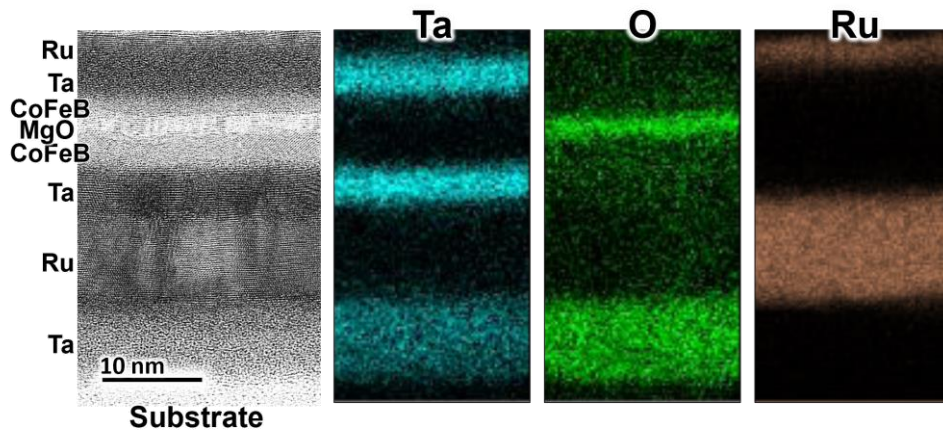


図 2

MTJ を形成するナノ薄膜の積層構造の透過型電子顕微鏡像(左)と、元素分析の結果(右の 3 つの図)。
Co-Fe-B/MgO/Co-Fe-B の MTJ 積層部分の下に Ta/Ru/Ta の下地層を形成しており、最下層の Ta は基材 (Substrate)と接している。元素分析の結果、最下層の Ta 領域に、強い O(酸素)のシグナルが見られ、最下層の Ta が強く酸化されていることが示唆される。一方で、酸化は、最下層 Ta の上の Ru には酸化の兆候は見られず、MTJ 積層部分の酸化はブロックされている。

さらに、磁気特性および電子顕微鏡による構造・元素解析により、MTJ 層構造を形成する最下層の金属層(Ta: タンタル)の酸化を確認しました。これは、フレキシブル基材と Ta の混じりあいが起因している可能性を示しています。これらの構造的特徴が、基材と層構造の密着性やゲージの耐久性に関連している可能性が示唆されました(図 2)。今後、NanoTerasu^{※5} などでの放射光計測が、より詳しい理解をもたらすと期待されます。

❖ 本研究成果が社会に与える影響(本研究成果の意義)

本研究成果は、高感度・低消費電力・低電圧駆動という特長を持つスピニ力学センサに、実使用環境に耐え得る高い耐久性が加わった点に大きな意義があります。これにより、従来は研究段階にとどまりがちであった高感度力学センサの研究が、既製品の代替として実用化可能な段階に到達したことを示しました。

さらに、本センサは、磁気メモリや磁気センサとして確立された MTJ 技術を基盤としており、既存の材料・製造技術を活用できる点で、社会実装や量産展開への障壁が低いという特長があります。この特長を活かし、JST A-STEP 産学共同(本格型)においては、株式会社鷲宮製作所と、スピニ力学センサを用いた圧力センサの量産に向けた研究開発を進めていきます。

本成果は、ひずみゲージの性能と信頼性を大きく拡張するものであり、無から有の視点で従来の性能を凌駕する新たなセンサを創出し、その社会実装に向けた課題を克服したものです。上記の圧力センサにとどまらず、医療・ヘルスケア、インフラモニタリング、モビリティ、ロボティクスなど、幅広い分野において、フィジカル空間の情報をサイバー空間へ高精度に接続する次世代センシング基盤としての展開が期待されます。

❖ 特記事項

本研究成果は、2026 年 2 月 17 日(火)(現地時間)に米国科学誌『APL Electronic Devices』(オンライン)に掲載されます。

タイトル:“Flexible magnetic tunnel junction-based strain sensor with over 100,000-cycle endurance”

著者名: Daichi Chiba, Akiko Imai, and Akira Ando

DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0293081>

なお、本研究は、科学技術振興機構(JST) 研究成果最適展開支援プログラム A-STEP 産学共同(本格型)(課題番号:JPMJTR233A)、同 戦略的創造研究推進事業 CREST(課題番号:JPMJCR20C6)の一環として行われ、一部は日本学術振興会 科学研究費助成事業(課題番号:JP23H00183)、文部科学省次世代 X-nics 半導体創生拠点形成事業(課題番号:JPJ011438)、スピントロニクス学術研究基盤と連携ネットワーク拠点の支援を受けて行われました。また、実験は大阪大学 産業科学研究所 今井亜希子助教および安藤陽特任研究員(兼 客員教授)の協力を得て行われました。

❖ 用語説明

※1 磁気トンネル接合(MTJ)

2 層の磁性ナノ薄膜の間に、非常に薄い絶縁体薄膜(トンネル障壁)を挟み込んだ構造を持つ代表的なスピントロニクスデバイスです。磁化状態に応じて電気抵抗が変化する特性を利用し、超微小な磁界を検出する磁気センサや、ハードディスクの読み取りヘッド、固体磁気メモリ(MRAM)の記録素子として実用化されています。

※2 トンネル磁気抵抗効果

磁気トンネル接合(MTJ)において、2 層の磁性層の磁化の相対角度に応じて、トンネル障壁を介した電子のトンネリング確率が変化し、電気抵抗が変化する現象です。本成果では、磁界の代わりにひずみを加えることで磁化の相対角度を変化させ、同様の電気抵抗変化を引き起こすことにより、ひずみゲージとしての高感度な動作を実現しています。

※3 磁気弾性効果

磁性体に外部から磁場や機械的な力が加わることで、その形状や磁化状態(磁気異方性)が変化する現象です。本研究では、機械的なひずみによって磁化状態が変化する性質を利用しています。さらに、この磁気弾性効果とトンネル磁気抵抗効果を組み合わせることで、ひずみに応じた磁化変化を電気信号として読み出しています。

※4 Co-Fe-B(磁性体)/MgO(トンネル障壁)系の MTJ

Co-Fe-B(コバルト・鉄・ホウ素合金)を磁性層、MgO(酸化マグネシウム)をトンネル障壁として用いた磁気トンネル接合です。高いトンネル磁気抵抗比と優れた信頼性を持ち、磁気メモリや磁気センサとしてすでに広く実用化されています。本研究では、この確立された材料系を力学センシングへ応用することで、既存の製造技術を活用した実用化への展開を可能にしています。

※5 NanoTerasu

高輝度な放射光(X 線)を観察対象物に照射し、ナノスケールでの内部イメージングや、構造・電子状態などを非破壊で精密に分析できる、東北大学青葉山キャンパス内に建設された世界最高水準の先端放射光施設です。

❖ **SDGs 目標**❖ **参考 URL**

千葉大地 教授 研究者総覧

<https://rd.iai.osaka-u.ac.jp/ja/9e65159ad1a4c722.html>

大阪大学産業科学研究所 界面量子科学研究分野 千葉研究室

<https://www.sanken.osaka-u.ac.jp/labs/se/>

東北大学国際放射光イノベーション・スマート研究センター ナノマテリアル機能創出スマートラボ

https://www.sris.tohoku.ac.jp/researchers/chiba_daichi.html

❖ **本件に関する問い合わせ先**

<報道に関するお問い合わせ>

大阪大学 産業科学研究所 広報室

TEL: 06-6879-8524

E-mail: press@sanken.osaka-u.ac.jp

東北大学 国際放射光イノベーション・スマート研究センター SRIS 戦略室

TEL: 022-217-5139

E-mail: sris-senryaku@grp.tohoku.ac.jp

科学技術振興機構 広報課

TEL: 03-5214-8404

E-mail: jstkoho@jst.go.jp

<JST 事業に関するお問い合わせ>

科学技術振興機構 スタートアップ・技術移転推進部 研究支援グループ

星 潤一(ほし じゅんいち)

TEL: 03-5214-8994

E-mail: a-step@jst.go.jp