

## ひずみ方向をセンシングする「フレキシブルスピンドバイス」の動作実証に成功 ～フレキシブルスピントロニクスへ向け道～

### 1. 発表者：

太田 進也 (東京大学大学院工学系研究科 物理工学専攻 博士課程1年)  
安藤 陽 (株式会社村田製作所 新規技術センター シニアプリンシパルリサーチャー)  
千葉 大地 (東京大学大学院工学系研究科 物理工学専攻 准教授)

### 2. 発表のポイント：

- ◆ひずみの“大きさ”ではなく、“方向”を検出する柔らかいセンサを開発し、その動作実証に成功しました。
- ◆従来のセンサは非磁性体を用い、変形によりその抵抗値が変化することを利用してひずみの大きさを検出していましたが、本研究では磁性体の磁化方向を活用したひずみ方向センサの動作実証に世界で初めて成功しました。
- ◆電子の磁氣的性質であるスピンを活用する「スピントロニクス」と、柔らかい電子部品を創り出す「フレキシブルエレクトロニクス」の長所を融合した学際研究として、今後の展開が期待されます。

### 3. 発表概要：

ひずみセンサは、物体の荷重や変位量、振動などを測定するために広く用いられています。従来のセンサでは、変形により金属などの抵抗値が変化することを利用して、予め決まった方向のひずみの“大きさ”を検出していましたが、東京大学大学院工学系研究科物理工学専攻の太田進也大学院生、同 千葉大地准教授、村田製作所の安藤陽シニアプリンシパルリサーチャーからなる研究チームは、ひずんだ方向に応じて磁石の磁化方向が変化する現象を利用して、ひずみの“方向”を検出することに初めて成功しました。同センサはノーベル物理学賞にも選ばれた技術である巨大磁気抵抗効果（注1）という現象を用いており、柔らかいフレキシブルフィルム上に形成されています。フィルム上にセンサを集積化することも容易で、場所により異なる局所的なひずみ方向を可視化するような場面での用途も広がると考えられます。

磁化というベクトルを使った新しい仕組みのひずみセンサを実現したという意義だけでなく、電子の磁氣的性質であるスピンを活用する「スピントロニクス」と、柔らかい電子部品を創り出す「フレキシブルエレクトロニクス」の長所を融合した学際研究の足掛かりとしても、今後の展開が期待されます。

本成果は、2018年2月8日(英国時間)に、「ネイチャー・エレクトロニクス(Nature Electronics)」のオンライン版に掲載されます。なお、本研究は株式会社村田製作所及び科研費基盤研究(S)の助成を受けて実施されました。

#### 4. 発表内容：

##### [研究の背景]

伸縮性のある細長い導線があったとします。その電気抵抗は、導線の長さに比例し、断面積に反比例します。導線を引っ張って伸ばすと、距離が長くなり断面積が小さくなるので電気抵抗は大きくなります。従来の代表的なひずみセンサはこの単純な仕組みを用いてひずみの“大きさ”を検出していました。従って、ひずみを検出する方向が予め決まっていました。一方、磁石を伸び縮みさせると、その方向に応じて磁化の方向も変化するという性質があります。研究チームは、このような磁石に特有な性質（磁気弾性効果）と、巨大磁気抵抗効果という現象に着目し、素子に加わるひずみの“方向”を電氣的に検出するセンサに関する研究を進めました。

##### [研究内容]

磁性体に情報を記録するハードディスクの読み出しヘッドとして用いられている磁界検出センサや、MRAM とよばれる固体磁気メモリには、磁石ではない層（スペーサ層）を二枚の金属磁石の層で挟み込んだ素子構造（スピンバルブ）が用いられています（図1）。二枚の磁石のうち一方の層（フリー層）は、与えた磁界が微弱であっても、磁化が磁界方向に追従するように設計されています。もう一方の層（ピン層）は強い磁界を加えないと磁化方向が変化しないようになっています。この構造では、フリー層とピン層の磁化のなす角度が180度に近づくほど、素子抵抗が大きくなる性質があります。つまり、ピン層のN極が右側を向いていた場合、フリー層のN極が左側を向くような状況のときに抵抗が最も大きくなります。フリー層の磁化の方向に応じて、同じ電圧を加えた際の電流量が制御できることから、スピンバルブとも呼ばれます。スペーサ層が、銅などの磁石ではない金属のときに、抵抗が上記のように変化する現象を巨大磁気抵抗効果と呼びます。

本研究チームは、コバルト層と鉄・ニッケルの合金（パーマロイ）層で銅の層を挟み込んだ巨大磁気抵抗素子を、柔らかいポリエチレンナフタレートフィルム上に作製しました（図2）。それぞれの層は数ナノメートル（1ナノメートル＝1000万分の1センチメートル）の厚みです。コバルト層は引っ張られた方向に磁化が向きやすいのに対し、パーマロイ層の磁化はひずみに対して鈍感な性質があります。スピンバルブでは、「磁界に対する磁化応答の敏感度に差」をつけてフリー層とピン層を作り分けていましたが、本研究では、「ひずみに対する敏感度に差」をつけたスピンバルブを開発しました。本素子のピン層（パーマロイ）の磁化とひずみ方向がなす角度を大きくしていくと、フリー層（コバルト）の磁化方向だけがひずみ方向に追従し、ピン層とフリー層の磁化の相対角度が大きくなります。そのため巨大磁気抵抗効果により電気抵抗が増大します（図3）。その抵抗の変化の様子は、予測と一致し、ひずみの大きさではなく、方向を検出することに成功しました。

##### [社会的意義・今後の予定]

スピンバルブ構造は集積化も容易であるため、フレキシブル基板上にひずみ方向検出用スピンバルブを整然と並べれば、場所によって異なるひずみの方向を素子ごとの抵抗の違いとして可視化するような用途に使用することもできます。また、ひずみではなく磁界を検出する従来のスピンバルブを用いれば、柔らかい磁界センサを実現することもできます。現段階では抵抗の変化率が数%程度とそれほど大きくありませんが、スペーサ層を絶縁体とした際に得られるトンネル磁気抵抗効果（注2）を利用すれば、一桁から二桁の抵抗変化率の向上が見込める

ため、センサとしての感度をより一層高め、実用上十分な性能を得ることができると考えられます。

本研究成果は、磁化がベクトルであるという性質を有効活用したものです。磁化は、電子の磁氣的性質であるスピンの源ですが、スピンを活用するエレクトロニクスは「スピントロニクス」と呼ばれ、近年大きな広がりを見せています。本研究は、この「スピントロニクス」と、柔軟な電子部品を創り出す「フレキシブルエレクトロニクス」の長所を融合した学際研究の足掛かりとして、今後の展開が期待されます。

#### 5. 発表雑誌：

雑誌名：「*Nature Electronics*」（オンライン版：英国時間 2018 年 2 月 8 日掲載）

論文タイトル：A flexible giant magnetoresistive device for sensing strain direction

著者：太田進也, 安藤陽, 千葉大地

DOI 番号：10.1038/s41928-018-0022-3

#### 6. 問い合わせ先：

東京大学大学院工学系研究科 物理工学専攻

准教授 千葉 大地 (ちば だいち)

#### 7. 用語解説：

注1 巨大磁気抵抗効果

数ナノメートル程度の磁石ではない金属層と磁石の層を交互に積層した構造（磁性多層構造）に磁界を加えたとき、その電気抵抗が大きく変化する現象。同現象はハードディスクの記録密度を飛躍的に向上させることに貢献し、その功績により 2007 年に A. Fert と P. Grünberg にノーベル賞が授与された。

※本研究では、二枚の磁石の層で金属の層を挟み込んだ三層構造（スピバルブ）を用いている。

注2 トンネル磁気抵抗効果

磁石ではない薄い絶縁体の層を二枚の磁石の層で挟み込んだ構造に磁界を加えたとき、その電気抵抗が大きく変化する現象。電子のトンネル現象が利用されている。

9. 添付資料：

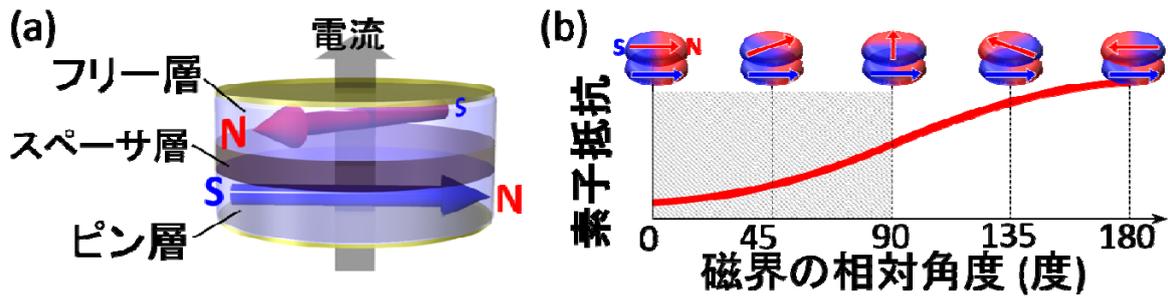


図1 典型的なスピバルブ構造とその特性

(a) フリー層（磁石）/スペーサ層/ピン層（磁石）から構成される代表的なスピバルブ構造の模式図。(b) フリー層の磁化方向に対して、加える一定磁界の方向を $0^\circ$ から $180^\circ$ まで変えたときのスピバルブ素子の抵抗の変化の様子を模式的に描いた図。フリー層の磁化のみが磁界方向を向くことにより、ピン層とフリー層の磁化の相対角度に開きが生じ、抵抗が上昇する。

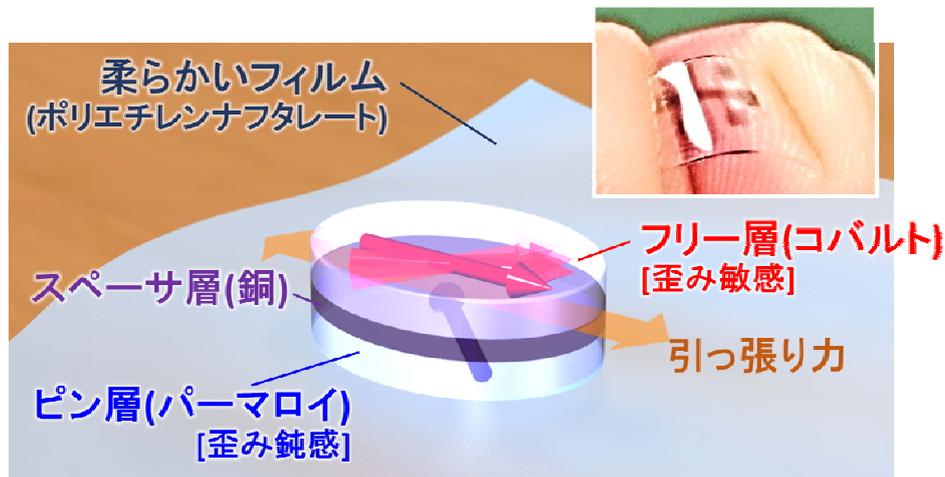


図2 実験で用いた素子の構造と写真

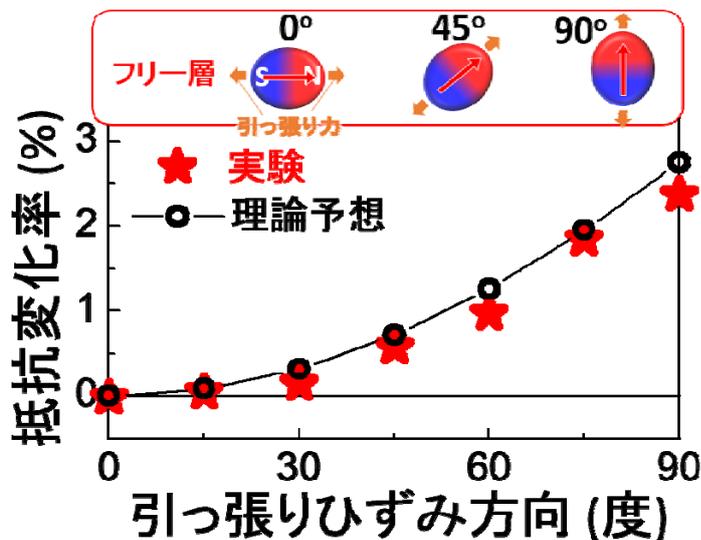


図3 ひずみ方向検出の実証データ

ピン層の磁化方向に対して、加えるひずみの方向を $0^\circ$ から $90^\circ$ まで変えたときのスピバルブ素子の抵抗の変化の様子（★が実験結果）。図1 (b)の斜線部分と同様な抵抗変化を示しており、ひずみに対するスピバルブ構造が実現したことを示している。○はより現実に近いモデルでシミュレーションした理論予想。