PRESS RELEASE（2026/9/1）

# フェリ磁性絶縁体を用いた異常ホール効果で二段階符号反転を観測

～GGG 基板上の TmIG/Pt で初観測、超高速・省エネなメモリ素子の設計指針に～

## ポイント

① 2 種類の磁気モーメントが共存するフェリ磁性体は、磁化が打ち消し合う「補償点（磁気補償点）（※1）」の近くで、熱安定性の向上および漏れ磁場がゼロとなることが知られています。このうち、ツリウム鉄ガーネット（TmIG）では、補償点を見いだす原理の解明が望まれていました。

② 本研究では、TmIG 薄膜と白金（Pt）を重ねた TmIG/Pt 二層構造で異常ホール効果（※2）の符号が温度によって 2 度反転することを、ガドリニウムガリウムガーネット（GGG）基板上で初めて観測しました。

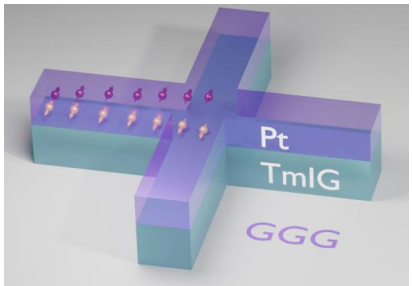
③ 今後、超高速・省エネなスピントロニクス（※3）応用に向けた材料設計の指針となることが期待されます。

## 概要

新たなスピントロニクス材料として「フェリ磁性絶縁体（※4）」が注目されています。フェリ磁性体は 2 種類の磁化成分が互いに打ち消し合う補償点をもつことがあります。電流制御可能なフェリ磁性絶縁体材料であるツリウム鉄ガーネット（TmIG）では、2 種類の磁化成分の結びつきが弱いにもかかわらず、薄膜に格子歪み（ひずみ）（※5）を加えることで磁気補償に似た現象が現れることが特殊な基板を用いて発見されたため、より一般的な基板上でこれを実現する方法が模索されていました。

九州大学大学院システム情報科学研究院の山下尚人（ヤマシタ ナオト）准教授らとスウェーデン・チャルマース工科大学の研究グループは、スパッタリング法を用いて TmIG を薄膜化することにより、この現象の観測に成功しました。ガドリニウムガリウムガーネット（GGG）基板の上に TmIG 薄膜と白金（Pt）を重ねた試料を作製しました。温度を変えて異常ホール効果を測定したところ、異常ホール効果による信号の向きが 2 度反転しました。ある温度では磁化は室温の 100 万分の 3 程度と見積もられ、補償点に近い状態を捉えたといえます。また、今回の試料では格子歪みが先行研究の約 3 分の 1 に抑制されており、観測された現象は格子歪みだけでは説明できない結果です。

本研究成果は、2026 年 9 月 1 日（火）に APL Materials 誌に掲載されました。




**研究者からひとこと：**

スパッタリング法の特徴を生かして TmIG という興味深い材料の新たな性質を垣間見ることができました。共同研究者および支援者に感謝し、引き続き現象の解明に取り組んでまいります。（山下尚人准教授）

## 【研究の背景と経緯】

情報機器の消費電力を抑える技術として、電子のもつ「スピン」を情報の担い手として使うスピントロニクスの研究が世界的に進められています。中でも希土類鉄ガーネットは、電気を通さない絶縁体であり磁石でもあるフェリ磁性絶縁体です。電流による発熱を避けながら磁気の情報を扱えるため、低消費電力メモリや高周波デバイスの材料として期待されています。

希土類鉄ガーネットでは、鉄イオンと希土類イオンの磁気モーメントが互いに逆向きに結びつき、希土類成分の磁気モーメントの大きさは温度によって大きく変化します。そのため、ある温度で両者がちょうど釣り合い、全体としての磁化がゼロになることがあります。これが補償点です。この温度の近くでは磁化の安定性が高まり、漏れ磁場がゼロとなります。そのため、超高集積化した磁気メモリの動作点として注目されています。

しかし、代表的な材料の一つである TmIG では、希土類側の磁化が小さく、鉄側との結びつきも弱いため、バルク（塊状）の状態では補償点が現れません。一方、薄膜にして基板から格子歪みを加えると、上記の磁化補償に似た現象が現れることが知られています。格子のずれが約 1.4%と大きいネオジムガリウムガーネット（NGG）基板の上では、Pt を堆積させた構造を用いて、2 つの温度で異常ホール効果の信号が反転する例がすでに報告されています。しかし、より一般的な GGG 基板を用いたこれまでの報告では、反転は多くても 1 回、あるいは全く観測されていませんでした。作製方法や膜質がどこまで結果を左右するのかも、未解明のままでした。

## 【研究の内容と成果】

研究グループはまず、量産に適したオンアクシススパッタリング法（※6）により、GGG 基板（111）の上に厚さ 6 ナノメートル（nm, ナノメートルは、10 億分の 1 メートル）の TmIG 薄膜を作製しました。X 線回折法により求めた格子歪みは 0.42%でした。この薄膜の上に厚さ 3 nm の Pt を重ね、十字型素子に加工しました（図 1）。2 ケルビン（K）（※7）から 300 K まで温度を変えながら各温度で磁場を掃引し、電気抵抗を測定しました。その結果、異常ホール効果による信号が約 124 K と約 81 K の 2 か所で符号が反転することが分かりました（図 2）。格子歪みの小さい GGG 基板上の TmIG で二段階の反転が観測されたのは、本研究が初めてです。

さらに、2 つの反転は性質が大きく異なります。81 K では、磁化の向きを反転させるのに必要な磁場（保磁力）が室温の約 5 ミリテスラから最大約 3.5 テスラへと約 700 倍に急増しました。これは全体の磁化がほぼゼロに近づいたことを意味し、補償点に特徴的な振る舞いです。文献値をもとに見積もると、この温度で残っている磁力は室温の 100 万分の 3 程度と極めて小さくなります。ただし、鉄とツリウムそれぞれの磁化成分を個別に測る手段が今回はないため、論文では慎重に「補償に似た状態」と表現しています。

一方、124 K では保磁力の急増は見られませんでした。研究グループは、この反転を、Pt の中で電気信号を生む 2 つの仕組み（スピンホール磁気抵抗（※8）と磁気近接効果（※9））の主役が温度によって入れ替わるためと結論づけました。つまり、電気測定で観測される信号の反転が、必ずしも磁石そのものの打ち消し合いを意味するとは限らないことを、同一の試料上で明確に示したことになります。この区別は、今後この種の材料を評価するうえで重要な指針となります。

さらに、今回の薄膜の格子歪みは 0.42%で、二段階の反転が報告されていた NGG 基板（約 1.4%）の約 3 分の 1 にとどまります。それでも同様の現象が現れたのは、膜を極めて薄くした効果と成膜手法による違いが強く効いたためと考えられます。格子歪みを制御つまみとして、非磁性金属と希土類鉄ガーネットの界面に生じる磁気輸送特性を設計できることを実証した成果です。

## 【今後の展開】

本研究は、産業で標準的に使われる GGG 基板と量産可能な成膜法を用いて、補償点に似た現象を極薄膜で実現できることを示しました。今後は、鉄とツリウムそれぞれのスピン成分を個別に観測できる X 線磁気円二色性（XMCD）測定などにより、81 K で本当に完全な磁化補償が起きているのかを確定させます。あわせて、薄膜の厚さと基板の組み合わせによって格子歪みを変え、補償点をより高い温度へ引き上げることを目指します。補償点を室温付近で自在に設計できるようになれば、現在の磁気メモリを高集積化し、より経済的なメモリ素子の実現につながると期待されます。

## 【参考図】

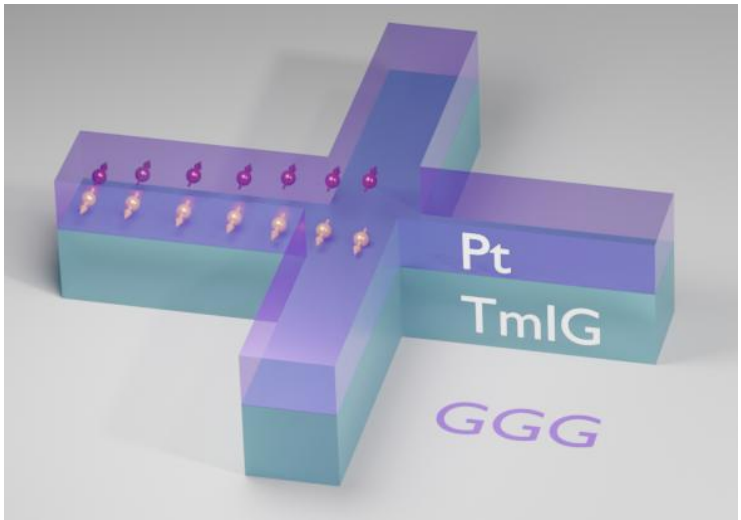



**図 1　作製した素子の模式図**

白金（Pt）/ツリウム鉄ガーネット（TmIG）/ガドリニウムガリウムガーネット（GGG）基板の積層構造の模式図。

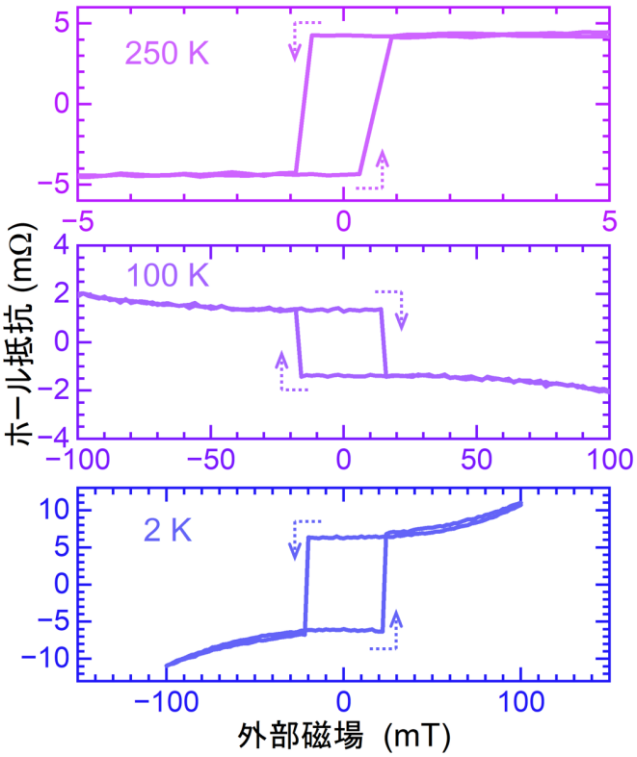



**図 2　電気信号の向きが 2 回反転する様子**

異常ホール効果による信号。250 K、2 K では反時計回り、100 K では時計回りとなった。

**【用語解説】**

**（※1）補償点（磁気補償点）**

2 種類の磁化成分の強さがちょうど釣り合い、全体としての磁化がゼロになる温度。この温度の近くでは磁化が磁場に対して安定となり、漏れ磁場も抑制されるため、高集積化された磁気メモリの動作点として注目されている。

**（※2）異常ホール効果**

磁石の性質をもつ物質に電流を流して磁場をかけると、電流と磁場の両方に垂直な向きに電圧が生じる現象。電圧の符号と大きさから、微小な試料の磁気の状態を電気的に調べることができる。

**（※3）スピントロニクス**

電子がもつ電荷だけでなく、磁化の起源である「スピン」も利用して情報を扱う技術分野。低消費電力・不揮発性のメモリなどへの応用が期待されている。

**（※4）フェリ磁性絶縁体**

電気を通さない絶縁体であり、磁石の性質をもつ物質。内部に向きの異なる 2 種類の磁石成分をもち、その差が全体の磁力となる。本研究のツリウム鉄ガーネット（TmIG、$Tm_3Fe_5O_{12}$）は、希土類鉄ガーネットと呼ばれる仲間の一つ。

**（※5）格子歪み**

薄膜が基板の上で結晶を成長させる際、基板と薄膜の原子の間隔の違いによって薄膜の結晶が引き伸ばされたり縮められたりすること。磁気特性を左右する重要な要因となる。

**（※6）オンアクシススパッタリング法**

材料の原料（ターゲット）と基板を正面で向かい合わせて薄膜を作る方法。装置構成が単純で成膜速度が高く、大面積・量産に向く。

**（※7）ケルビン（K）**

絶対温度の単位。0 K は約マイナス 273°Cにあたる。2 K は約マイナス 271°C、81 K は約マイナス 192°C、124 K は約マイナス 149°C、300 K は約 27°C。

**（※8）スピンホール磁気抵抗**

非磁性金属と磁性絶縁体の二層構造において生じる磁気抵抗。電流の向きを基準とした磁化の向きによって非磁性金属の電気抵抗が変化する現象。

**（※9）磁気近接効果**

磁石ではない金属（本研究では白金）が、隣接する磁性体と接することで、界面付近だけ磁石のような性質を帯びる現象。

**【謝辞】**

本研究は、JST 戦略的創造研究推進事業 ACT-X（JPMJAX23KJ）、JSPS 科研費（JP22KK0056, JP26K17760）、JST 先端国際共同研究推進事業（ASPIRE）（JPMJAP2321）、公益財団法人日本板硝子材料工学助成会、公益財団法人イオン工学振興財団、R1 TECHNOLOGIES LLC の助成を受けたものです。また、スウェーデン側の研究は Wallenberg Initiative Materials Science for Sustainability（WISE、Knut and Alice Wallenberg Foundation）およびスウェーデン研究会議（VR、No. 2021-04821）の支援を受けました。

**【論文情報】**

**掲載誌：**APL Materials

**タイトル：**Observation of double anomalous Hall polarity reversals with temperature in an ultrathin ferrimagnetic insulator

（極薄フェリ磁性絶縁体における異常ホール効果の二度の極性反転の観測）

**著者名：**Ivo P. C. Cools, Jinyu Xu, Lei Yan, Divya P. Dubey, Saroj P. Dash, Naoto Yamashita

**DOI：**10.1063/5.0328123

**【お問合せ先】**

**＜報道に関すること＞**

九州大学　広報課

TEL：092-802-2130　FAX：092-802-2139

Mail：koho@jimu.kyushu-u.ac.jp

科学技術振興機構　広報課

TEL：03-5214-8404　FAX：03-5214-8432

Mail：jstkoho@jst.go.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　先進融合研究グループ　原田 千夏子（ハラダ チカコ）

TEL：03-6380-9130　FAX：03-3222-2066

Mail：act-x@jst.go.jp

Kyushu University VISION 2030

総合知で社会変革を牽引する大学へ