



平成 28 年 7 月 25 日

科学技術振興機構 (JST)  
Tel : 03-5214-8404 (広報課)  
東北大学原子分子材料科学高等研究機構 (WPI-AIMR)  
Tel : 022-217-6146 (広報・アウトリーチオフィス)  
東北大学金属材料研究所  
Tel : 022-215-2144 (情報企画室広報班)

## 熱を流すだけで金属が磁石になる現象を発見 ～電子の自転「スピン」を使った熱利用技術の発展に貢献～

### ポイント

- 磁石の性質は熱の流れとは無関係で、温度を上げても下げても、磁石ではない金属が磁石になることはないと考えられていた。
- 熱を流すだけで、磁石ではない金属が磁石に変わる現象を世界で初めて観測した。
- 新しい磁化測定法として、電子のスピンを使った熱利用技術や省エネ社会の発展に貢献する。

JST 戦略的創造研究推進事業において、東北大学 金属材料研究所のダジ・ハウ 研究員、東北大学 原子分子材料科学高等研究機構 (WPI-AIMR) / 金属材料研究所の齊藤 英治 教授らは、通常の状態では磁化<sup>注1)</sup> (磁石の性質) を持たない金属が、熱を流すだけで磁石の性質を示す現象を発見しました。

金をはじめとする磁石ではない金属は、温度を上げても下げても磁石になることはないと考えられていました。本研究グループは、イットリウム鉄ガーネット (YIG)<sup>注2)</sup> という磁石の上に金の薄膜を張り付け、この試料の表と裏の間に温度勾配を作ることで、熱が流れている状態 (熱非平衡状態)<sup>注3)</sup> にしました。試料に対して垂直に磁場を加えながら、面に沿って金薄膜に電流を流し、電流と直角の方向に付けた電極に生じるホール電圧<sup>注4)</sup> を測定しました。その結果、温度勾配に比例した大きさのホール電圧が金薄膜に生じることを発見し、この現象を「非平衡異常ホール効果」と命名しました。これは温度勾配によって金薄膜に磁化が生じている証拠であり、熱を流すだけで金属が磁石になることを世界で初めて観測したことになります。

この現象は、単位体積あたり 100 万分の 1 電磁単位<sup>注5)</sup> という極めて微弱な磁化を電気信号として観測できることから、熱非平衡状態での新しい磁化測定法として利用できます。また、熱と磁化との関係の理解が深まることで、熱を利用したスピントロニクス<sup>注6)</sup> の研究が進み、日常生活で捨てられている熱を削減および利用する省エネ社会への貢献が期待されます。

本研究は、東北大学 金属材料研究所 / デルフト工科大学のゲリット・バウアー 教授らと共同で行ったものです。

本研究成果は、2016 年 7 月 26 日 (英国時間) に英国科学誌「Nature Communications」のオンライン版で公開されます。

本成果は、以下の事業・研究領域・研究課題によって得られました。

戦略的創造研究推進事業 総括実施型研究 (ERATO)

研究プロジェクト: 「齊藤スピン量子整流プロジェクト」

研究総括: 齊藤 英治 (東北大学 原子分子材料科学高等研究機構 / 金属材料研究所 教授)

研究期間: 平成 26 年 1 月 ~ 平成 32 年 3 月

上記研究課題では、電子スピンが持つ整流性に注目し、これを基礎とした物質中のゆらぎの利用原理の構築と、スピンを用いた新たなエネルギー変換方法の開拓を目指します。

## <研究の背景と経緯>

磁性は、物質の持つ基本的な性質の1つであり、長い研究の歴史があります。磁性を持つ物質は磁性体と呼ばれ、特に磁化を持つ物質は磁石と呼ばれます。従来、この磁化の発現は、電子が持つ「スピン」と呼ばれるミクロな自転運動の軸が揃うことにより、マクロな磁氣的性質（S極とN極）が生じるからだとして理解されてきました（図1 a）。回転運動の軸がひとたび揃うと、軸は反転しなくなり、磁性体に特異な現象を引き起こします。

この特異な現象の例として、異常ホール効果が挙げられます。電流が流れている物質に対して、電流と垂直な方向に外部から磁場を加えると、電子が磁場による一方向の力を感じて曲げられます。その行き着く先に電子がたまることで、電流の流れと磁場の向きの両方に垂直な方向に電圧（起電力）が生じる現象が、ホール効果です。これに対して異常ホール効果では、磁石中の磁化に垂直な方向に電流を流したときに、磁化が外部から加える磁場と同じ働きをすることで、電流の流れと磁化の向きの両方に垂直な方向に起電力が生じます。そのため、磁化の発現を確かめる有用な手法の1つとなっています。

一方、近年、熱非平衡状態における電子スピンの役割が大きな注目を集めています。齊藤教授らが発見したスピンゼーベック効果<sup>注7)</sup>では、磁石ではない金属の薄膜を積んだ磁性体中に温度勾配を作ると、磁性体中をスピンの流れ（スピン流<sup>注8)</sup>）が伝わって隣り合う金属へ流れ込み、逆スピンホール効果<sup>注9)</sup>によって電圧に変換されます（図1 b）。この一連の現象は、理論的には、熱非平衡状態で生じる磁化（非平衡磁化）が鍵となって起こると考えられます。しかし、非平衡磁化の存在はこれまで実験で確認されたことがなく、そのための有用な手法もありませんでした。

## <研究の内容>

まず、絶縁性の磁石であるYIG薄膜上に、磁石ではない金属の代表例として、金（Au）薄膜を積んだ試料を用意しました。この試料は、YIG薄膜の側もしくは金薄膜の側を熱することで、温度が低い側から高い側に向かってそれぞれの膜中に温度の分布、すなわち温度勾配が生じます（図2 a）。温度勾配が生じると、熱は温度の高い側から低い側に流れます。このように熱が流れている状態で、外部から磁場を加えてYIG薄膜中の磁化を垂直方向に向け、金薄膜に電流を流しました（図3 a）。このとき、もし金薄膜中に磁化が生じていれば、異常ホール効果と同様の原理によって、電流と磁化の向きの両方に対して垂直な方向にホール電圧が発生すると予想しました（図2 b）。

実際に、温度勾配の大きさに比例したホール電圧が測定されました（図3 b、c）。このホール電圧は、外部磁場に比例して大きさが変化することから、温度勾配によって金薄膜中に磁化が生じることを示しています。つまり、磁石ではない金属中に、温度勾配によって非平衡磁化が生じることを世界で初めて証明しました。

また、測定したホール電圧から見積もった磁化の大きさは、単位体積当たり100万分の1電磁単位で、極めて微小な磁化を電気信号として検出できることが分かりました。今回観測したホール効果は、磁性体が持つ通常の磁化による異常ホール効果とは異なり、熱非平衡状態で生じた非平衡磁化によるものとして、「非平衡異常ホール効果」と命名しました。

### <今後の展開>

非平衡異常ホール効果は、単位体積あたり100万分の1電磁単位という微小な磁化を電気信号として検出できるので、さまざまな材料における熱非平衡状態での磁化特性を評価および解明する新しい磁化測定法として利用できます。さらに、このような磁化測定法の確立による温度勾配（熱流）と磁化との関係の解明は、熱流を使ったスピントロニクスの研究を加速させ、日常生活で捨てられている熱を削減および利用する省エネ社会の発展に貢献するものと考えられます。

<参考図>

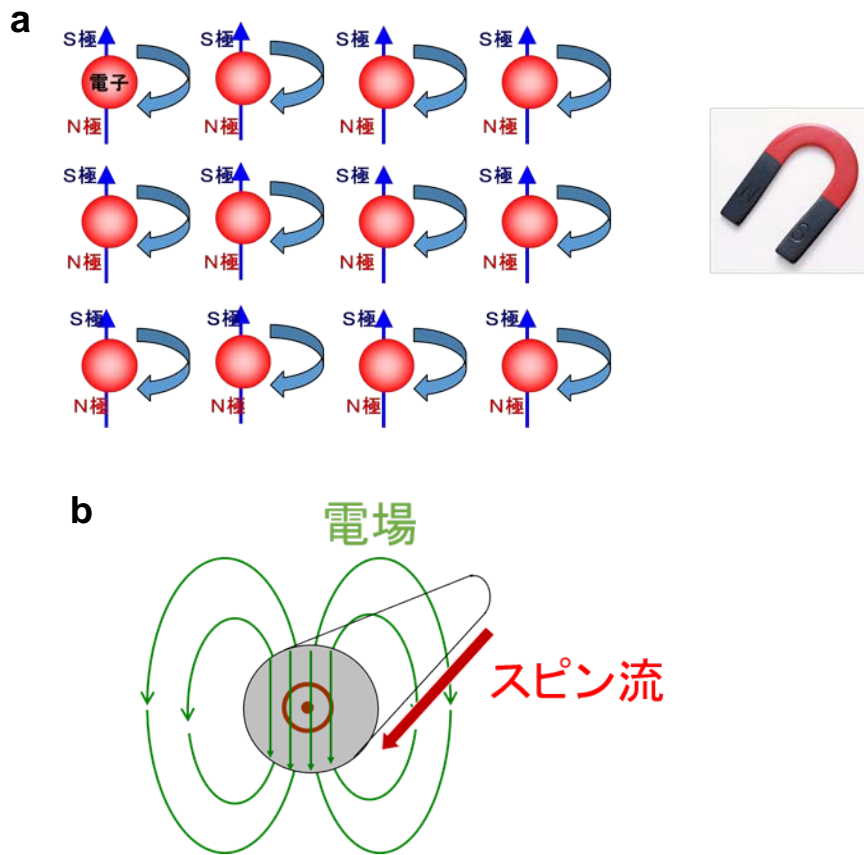


図1 電子スピンの世界（一例）

- (a) 電子スピンと磁石の関係を表した概念図  
物質内の電子スピンの回転方向が揃うことで、磁石（S極とN極）が形成される。
- (b) 逆スピンホール効果の概念図  
スピン流が流れると、その周りに電場（電圧）が発生する。

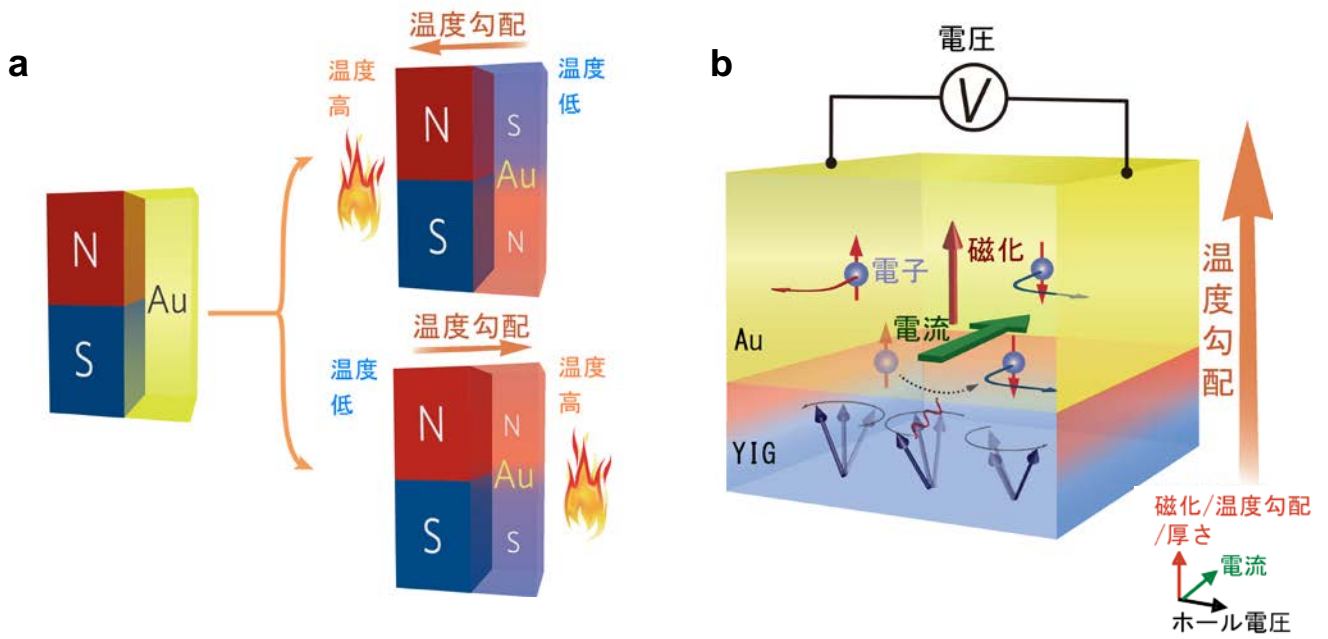


図2 非平衡磁化の概念図

- (a) 磁石に接した金 (A u) 薄膜が、温度勾配によって磁石になる様子を表す概念図。温度が低い側から高い側に向かって温度勾配が生じる。
- (b) 温度勾配によって金薄膜に生じた非平衡磁化が、金薄膜を流れる電子 (電流) を曲げる様子を表す概念図 (非平衡異常ホール効果)。

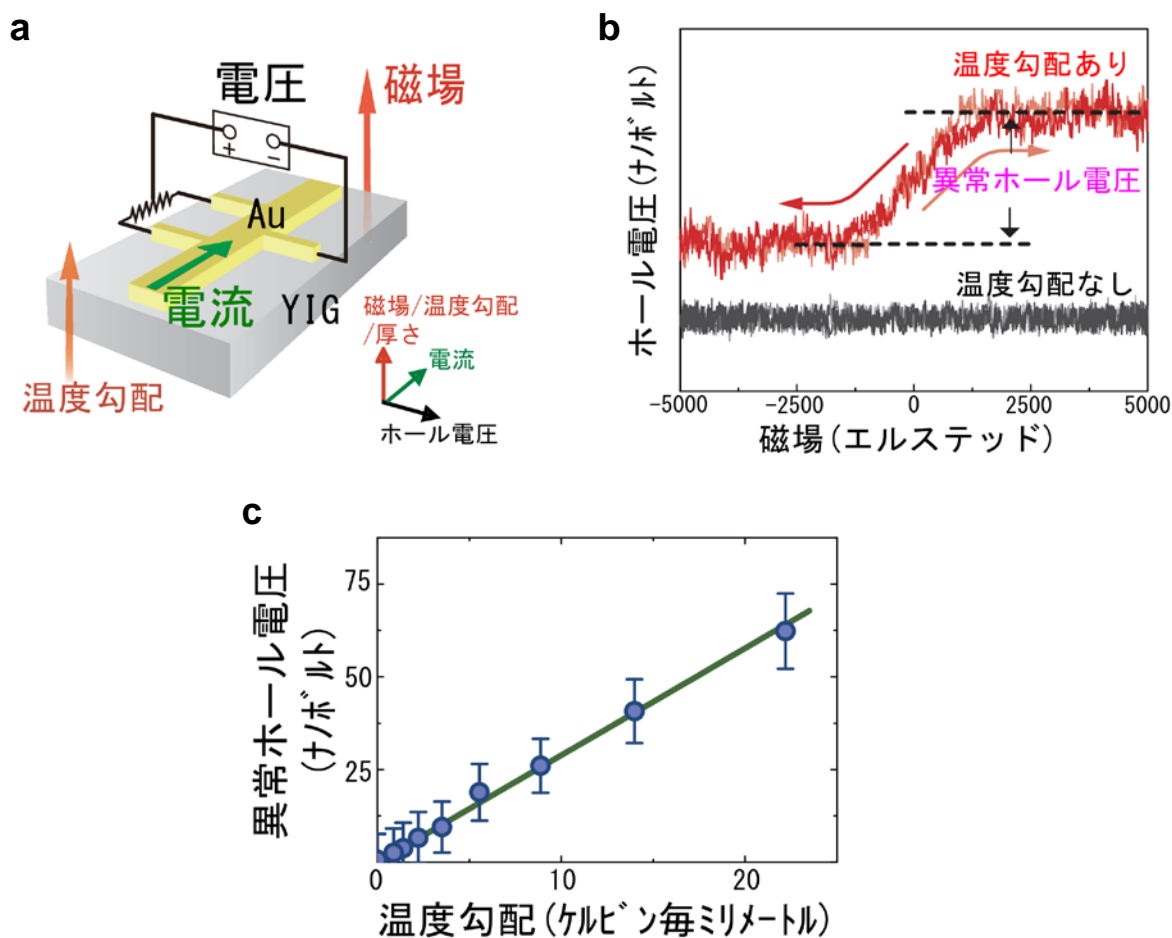


図3 測定用試料と測定結果（ホール電圧）

(a) 測定用試料

絶縁性の磁石であるYIG上に金（Au）薄膜を載せて測定用に加工した。測定では金薄膜に対して垂直方向に外部から磁場と温度勾配を加えながら、金薄膜のホール電圧を測定した。

(b) 代表的なホール電圧の信号

温度勾配がない場合（黒）とある（22.2ケルビン毎ミリメートル）場合（赤）を比較すると、磁場の大きさに比例した異常ホール電圧が観測でき、磁化が生じていることを確認した。

(c) ホール電圧と温度勾配の関係

得られた異常ホール電圧は温度勾配に比例することが確認された。

## <用語解説>

### 注1) 磁化

磁性を持つ物質（磁性体）が磁氣的に分極（S極とN極が生じる）して磁石となるときの程度を表す物理量、もしくはその現象のこと。ここでは前者。

### 注2) イットリウム鉄ガーネット（YIG）

安定した絶縁性の磁石であり、マイクロ波用のサーキュレーターなど高周波デバイスに利用されている。絶縁体スピントロニクスに適した材料として広く利用されている。

### 注3) 熱非平衡状態

「熱平衡状態」とは、物質内部にエネルギーの流れがない状態である。例えば、2つの物質を接触させて、両方の温度が一定になった状態や、物質の温度が周囲と同じ温度になった状態である。それに対して、物質内を熱や電気が移動する（流れる）ことで、エネルギーの流れがある状態を「熱非平衡状態」と呼ぶ。

### 注4) ホール電圧

試料に電流を流して電流の向きと垂直に磁場をかけたときに、電流および磁場と垂直な方向に生じる電圧のこと。

### 注5) 電磁単位

磁石の持つ磁化の大きさの単位。間隔が1センチメートルとなるように真空中に置かれた、同じ大きさの磁化を持つ2つの磁石において、磁石間に働く力（引力もしくは斥力）が1ダイン（10万分の1ニュートン）の時の磁極（S極もしくはN極）の強さ。

### 注6) スピントロニクス

スピンとエレクトロニクスを合わせた造語。電子が持つ電荷だけではなくスピンを積極的に利用して、新機能を持ったデバイスの創製を目指す研究分野。ハードディスクドライブやメモリ分野では実用化が進んでいる。また、新たな熱電変換素子なども提案されている。

### 注7) スピンゼーベック効果

磁性体に温度差を与えることによってスピン角運動量の流れ（スピン流）が生成される現象で、齊藤 英治 教授らが2008年に発見した。スピントロニクス分野において、汎用性の高いスピン流源としての応用が期待されるとともに、スピン流と垂直な方向に起電力が発生する現象（逆スピンホール効果）と組み合わせることで熱電変換素子としての応用可能性が示唆されている。

### 注8) スピン流

スピン角運動量の流れ。例えば電子は電氣的な自由度である電荷と、磁氣的な自由度であるスピン角運動量を持っており、前者の流れを電流、後者の流れをスピン流と呼ぶ。

#### 注9) 逆スピンホール効果

スピン流と垂直な方向に起電力が発生する現象。電子のスピンと軌道の相互作用により上向きスピンを持った電子と下向きスピンを持った電子が互いに逆方向に散乱されることによって生じる。スピン情報と電気情報をつなぐ現象として、スピントロニクス分野で重要である。

#### <論文タイトル>

“Observation of temperature-gradient induced magnetization”

(温度勾配で誘起された磁化の観測)

著者 : Dazhi Hou, Z. Qiu, R. Iguchi, K. Sato, E. K. Vehstedt, K. Uchida, G. E. W. Bauer, and E. Saitoh.

doi : 10.1038/NCOMMS12265

#### <お問い合わせ先>

##### <研究に関すること>

齊藤 英治 (サイトウ エイジ)

ERATO 齊藤スピン量子整流プロジェクト 研究総括  
東北大学 原子分子材料科学高等研究機構／金属材料研究所 教授  
〒980-8577 宮城県仙台市青葉区片平2-1-1  
Tel : 022-217-6238 Fax : 022-217-6395  
E-mail : eizi@imr.tohoku.ac.jp

##### <JSTの事業に関すること>

水田 寿雄 (ミズタ ヒサオ)

科学技術振興機構 研究プロジェクト推進部  
〒102-0076 東京都千代田区五番町7 K's 五番町  
Tel : 03-3512-3528 Fax : 03-3222-2068  
E-mail : eratowww@jst.go.jp

##### <報道担当>

科学技術振興機構 広報課  
〒102-8666 東京都千代田区四番町5番地3  
Tel : 03-5214-8404 Fax : 03-5214-8432  
E-mail : jstkoho@jst.go.jp

皆川 麻利江 (ミナガワ マリエ)

東北大学 原子分子材料科学高等研究機構 広報・アウトリーチオフィス  
〒980-8577 宮城県仙台市青葉区片平2-1-1  
Tel : 022-217-6146 Fax : 022-217-5129  
E-mail : aimr-outreach@grp.tohoku.ac.jp



東北大学 金属材料研究所 情報企画室広報班

〒980-8577 宮城県仙台市青葉区片平 2 - 1 - 1

Tel : 022-215-2144

E-mail : pro-adm@imr.tohoku.ac.jp