



## 新たな物理現象，逆磁気キャパシタンス (iTMC) 効果を発見

### 磁石の向きにより電気の溜まり方を自在にコントロール

#### 研究成果のポイント

- ・新たな現象「逆磁気キャパシタンス (iTMC) 効果」を世界で初めて発見。
- ・量子力学を取り入れた電荷蓄積理論により iTMC 効果のメカニズムを解明。
- ・新しいタイプの高感度磁気センサーや磁気メモリーに道を拓く。
- ・学内共同研究，附置研究所間アライアンス共同研究，日米国際共同研究が実を結んだ成果。

#### 研究成果の概要

北海道大学電子科学研究所（所長 中垣俊之教授）附属グリーンナノテクノロジー研究センターの海住英生准教授，西井準治教授，同大学院工学研究院の長浜太郎准教授，島田敏宏教授らは，東北大学多元物質科学研究所の北上 修教授，ブラウン大学物理学科の蕭 鋼教授と共同で，新現象である「逆磁気キャパシタンス (iTMC) 効果」を発見しました。これまで，磁場によりキャパシタンス（電気容量；電気が溜まる量）が順方向に変化する現象 (TMC 効果) はよく知られていましたが，逆方向に変化する現象は知られていませんでした。今回，地球上にありふれた元素の一つである鉄とその酸化物（さびた鉄）を組み合わせることで，キャパシタンスが逆方向に変化する新現象「iTMC 効果」を発見しました。この成果は，新たな電気容量検出型の高感度磁気センサー・磁気メモリー誕生への道を切り拓くものです。

本研究は，科学研究費補助金基盤研究 (B)，「人・環境と物質をつなぐイノベーション創出ダイナミック・アライアンス」，「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整備事業共同研究プロジェクト」，及びブラウン大学 National Science Foundation などの支援を受けて実施されました。

## 論文発表の概要

研究論文名：Inverse Tunnel Magnetocapacitance in Fe/Al-oxide/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> (鉄/酸化アルミニウム/酸化鉄における逆トンネル磁気キャパシタンス)

著者：海住英生<sup>1</sup>，長浜太郎<sup>2</sup>，佐々木駿<sup>2</sup>，島田敏宏<sup>2</sup>，北上 修<sup>3</sup>，三澤貴浩<sup>1</sup>，藤岡正弥<sup>1</sup>，西井準治<sup>1</sup>，蕭 鋼 (シャオ・ガン)<sup>4</sup> ( <sup>1</sup>北海道大学電子科学研究所，<sup>2</sup>北海道大学大学院工学研究院，<sup>3</sup>東北大学多元物質科学研究所，<sup>4</sup>ブラウン大学物理学科)

公表雑誌：Scientific Reports (ネイチャー・パブリッシング・グループ)

公表日：英国時間 2017 年 6 月 1 日 (木) (オンライン公開)

## 研究成果の詳細

### (背景)

電子の持つ「電荷 (電気量)」と「スピン (電子の回転に相当するもの)」の2つの性質を利用するスピントロニクス<sup>※1</sup>は、次世代のエレクトロニクス<sup>※2</sup>として期待され、近年大きな注目を集めています。中でも、2つの磁性層 (磁気を帯びた層) の間に薄い絶縁層を挟んだ磁気トンネル接合<sup>※3</sup>は室温でも大きな磁気キャパシタンス (TMC) 効果を示すことから、世界中で盛んに研究が進められてきました。TMC 効果とは2つの磁性層の磁化 (磁石としての性質の向き) が互いに平行であるときキャパシタンス (電気容量；電気が溜まる量) が「大きく」、反平行であるとき「小さく」なる現象であり、以前より広く知られていました。

### (研究手法・成果)

今回、海住准教授らの研究グループは、その逆の現象、すなわち、磁性層の磁化が平行であるときキャパシタンスが「小さく」、反平行のとき「大きく」なる現象の発現を目指し、従来にない接合構造の開発に挑みました。この現象を発見できれば、ノイズが大きい従来の磁気センサー・メモリーとは異なり、高感度かつ低消費電力の全く新しいセンサー・メモリー<sup>※4</sup>の誕生に向け、大きな一歩を踏み出すことができます。

この新現象を探索するにあたり、海住准教授らの研究グループは鉄に注目しました。鉄はよく知られているように、磁石にくっつく、地球上にありふれた元素の一つです。この鉄を酸化させると錆 (さ) びて酸化鉄<sup>※5</sup>ができます。酸化鉄も磁石にくっつきませんが、興味深いことに、鉄と同じ方向に磁化させると、電流を担う電子のスピンの向きが鉄とは逆になります。これを利用すれば、通常の TMC 効果とは逆の現象が見出せるのではないかと考えました (図1)。

そこで、このようなアイデアのもと、研究グループは分子線エピタキシー法<sup>※6</sup>という高度な技術を駆使して、鉄と酸化鉄の間に薄い酸化アルミニウムを挟んだ、超高品質な磁気トンネル接合を作製しました (図2)。この接合を磁場中にセットし、キャパシタンスの振る舞いを調べたところ、鉄と酸化鉄の磁化が平行であるときキャパシタンスが「小さく」、反平行のとき「大きく」なることがわかりました (図3)。これは通常の TMC 効果とは逆の現象です。通常とは逆 (inverse) なので、逆磁気キャパシタンス (iTMC) 効果と名付けました。

iTMC 効果は世界で初めての発見だったことから、周波数特性や直流電圧依存性など詳細な実験を何度も行い、再現性をしっかり確認しました。また、実験のみならず、理論的な検討も行ったところ、量子力学を取り入れた電荷蓄積理論により、実験結果をよく説明できることがわかりました (図4)。理論計算によると、窒化鉄とコバルト鉄ホウ素合金の間に薄い酸化マグネシウムを挟んだ磁気

トンネル接合では、キャパシタンスの変化率(iTMC 比)が今回得られた鉄に関する値より約10倍も大きくなることもわかりました。

#### (今後への期待)

今後は、本研究成果が発端となり、iTMC 効果に関する研究が広く展開していくものと期待されます。これにより iTMC 比の向上が見込まれ、高感度・低消費電力磁気センサーやメモリー誕生への道が切り拓かれるものと期待できます。将来的には、磁気カードリーダーやGPS等の位置検出センサー素子、パソコンやスマートフォンに搭載されている不揮発性メモリーなどへの応用が考えられます。

また、本研究成果は学内共同研究、附置研究所間アライアンス共同研究、日米2国間の国際共同研究、スピントロニクス学術研究基盤連携ネットワークにおける共同研究が実を結んだ成果であり、研究組織という観点からも極めて特徴的です。このようなネットワーク型の共同研究が新現象発見をもたらした意義は大きく、今後の共同研究モデルケースの一つにもなりえると期待できます。

#### お問い合わせ先

北海道大学電子科学研究所 准教授 海住 英生 (かいじゅう ひでお)

TEL : 011-706-9349 FAX : 011-706-9346 E-mail : kaiju@es.hokudai.ac.jp

ホームページ : <http://nanostructure.es.hokudai.ac.jp/>

北海道大学大学院工学研究院 准教授 長浜 太郎 (ながはま たろう)

TEL : 011-706-6578 FAX : 011-706-6578 E-mail : nagahama@eng.hokudai.ac.jp

ホームページ : <http://www.eng.hokudai.ac.jp/labo/kotai/>

東北大学多元物質科学研究所 教授 北上 修 (きたかみ おさむ)

TEL : 022-217-5357 FAX : 022-217-5356 E-mail : kitakami@tagen.tohoku.ac.jp

ホームページ : <http://www.tagen.tohoku.ac.jp/labo/kitakami/>

ブラウン大学物理学科 教授 蕭 鋼 (シャオ ガン)

TEL : 010-1-401-863-2586 FAX : 010-1-401-863-2024 E-mail : gang\_xiao@brown.edu

ホームページ : <https://www.brown.edu/research/labs/xiao/>

[参考図]

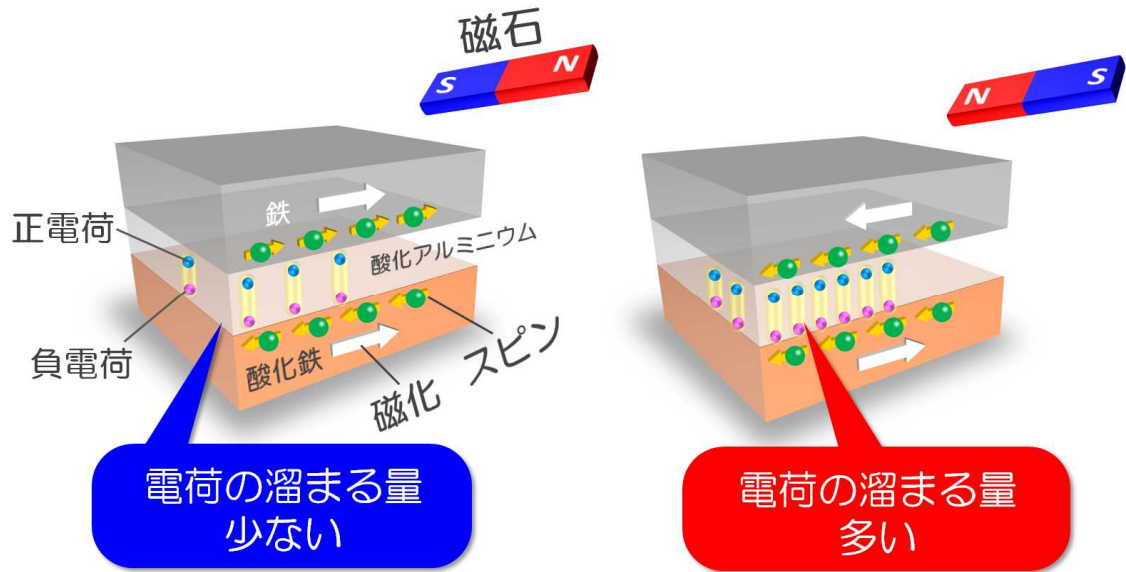
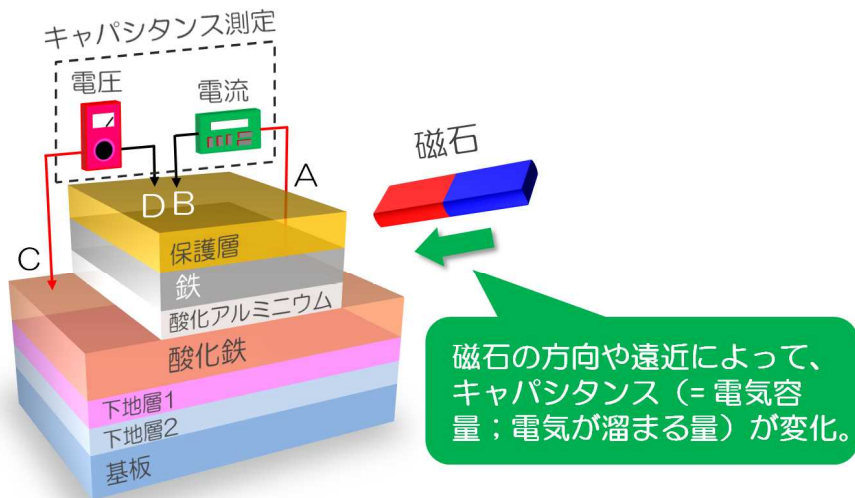


図1 iTMC効果の概念図

左図では、磁石のS極を近づけることで磁化を平行にしており、電荷の溜まる量が少なくなっている。右図では、N極を近づけることで磁化を反平行にしており、電荷の溜まる量が多くなっている。これは、今まで知られていたTMC効果とは全く正反対の現象。



AB間に電流（交流）を流し、CD間で電圧（交流）を検出する。これにより、キャパシタンスを測定。

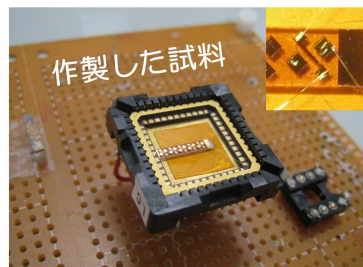


図2 今回作製した超高品質な磁気トンネル接合（上：接合のイメージ図と測定回路，下：実際の写真）  
鉄（磁性層）と酸化鉄（磁性層）の間にナノメートル程度に薄い酸化アルミニウム（絶縁層）が挟まれている。鉄と酸化アルミニウムの間、そして、酸化アルミニウムと酸化鉄の間に、スピンをもった電荷が蓄積され、この電荷の蓄積量（キャパシタンス）が磁場（磁石）によって変化する。

# iTMC効果

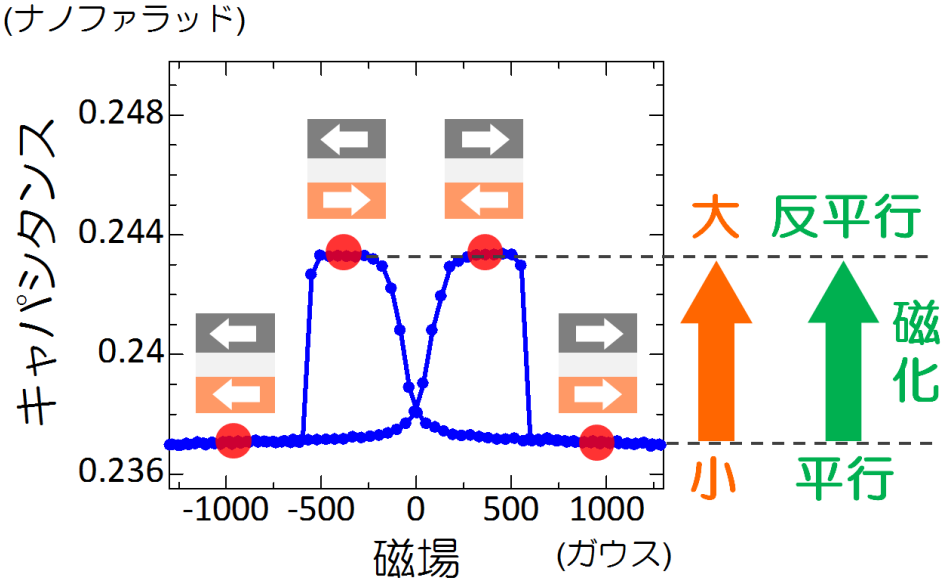


図3 今回発見した iTMC 効果  
鉄と酸化鉄の磁化が平行であるときキャパシタンス（電荷の蓄積量）が「小さく」、反平行であるとき「大きく」なる。これは通常の TMC 効果とは逆（inverse）であり、本研究により初めて見出された現象である。

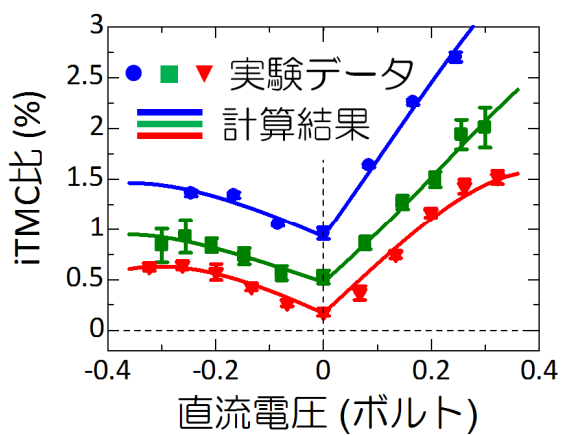
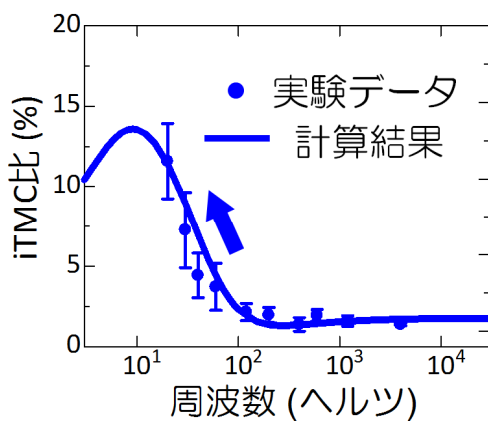
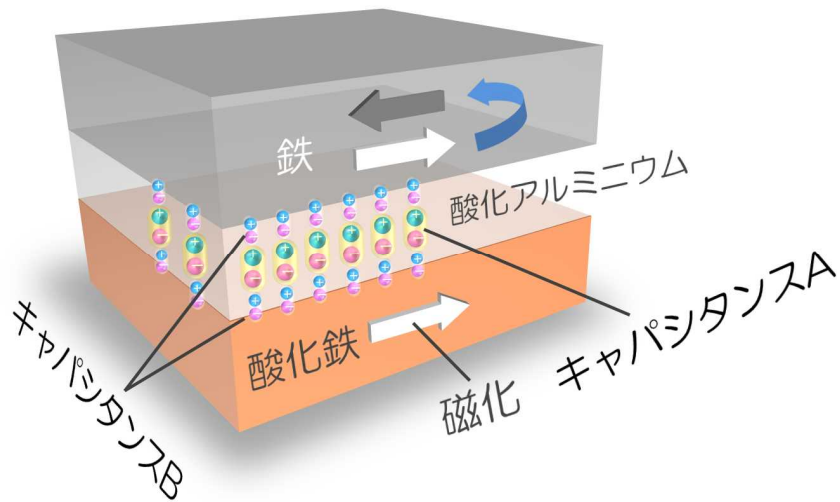


図4 実験データと計算結果の比較（上：計算に用いた理論モデル，下：iTMC比の周波数特性・直流電圧依存性）

キャパシタンス A はジャン理論<sup>※7</sup>と放物線バリア近似<sup>※8</sup>を取り入れたデバイ・フレリッヒ模型<sup>※9</sup>に基づくキャパシタンス。キャパシタンス B はスピン依存ドリフト拡散模型<sup>※10</sup>に基づくキャパシタンス。iTMC比とは磁場に対するキャパシタンスの変化率のことであり，iTMC比が大きいほど感度が高いことを示す。実験データと計算結果がよく一致していることがわかる。

## [用語説明]

### ※1 スピントロニクス：

従来のエレクトロニクスは電子の流れを利用するため、電子機器の抵抗が大きくなり、省エネ化の限界が懸念されている。一方で、スピントロニクスはスピンの流れを利用するため抵抗の影響を軽減でき、省エネ化に大きく貢献できると期待されている。

### ※2 エレクトロニクス：

電子の働きを利用した通信・計測などに関する科学・技術の総称。電子工学。

### ※3 磁気トンネル接合：

2つの磁性層の間に薄い絶縁層が挟まれた接合。通常、絶縁層は電流を流さないが、絶縁層がナノメートル程度の薄さの場合、特殊な効果（トンネル効果）により電流が流れる。

### ※4 新しいセンサー・メモリー：

これまでの磁気センサーやメモリーは抵抗検出型と呼ばれ、抵抗の変化を電気信号に変換するため、電氣的ノイズが大きくなる問題があった。電気容量検出型である新しいセンサー・メモリーでは、抵抗検出型に比べ低インピーダンスを実現でき、かつ入力信号と検出信号の間に生じる位相差を利用できることから、高感度かつ低消費電力が実現すると期待されている。

### ※5 酸化鉄：

酸化鉄は鉄の価数（電荷の量）によって構造や電気・磁気特性が大きく変化する。本研究で注目した酸化鉄は $\text{Fe}_3\text{O}_4$ であり、マグネタイトとも呼ばれる。

### ※6 分子線エピタキシー（MBE）法：

超高真空中で原料を加熱することで分子（原子）線を発生させ、これにより結晶基板上に薄膜を成長（エピタキシャル成長）させる方法。

### ※7 ジャン（Zhang）理論：

磁気トンネル接合における磁気抵抗効果の電圧依存性を記述した理論。

### ※8 放物線バリア近似（PBA）：

絶縁層のトンネル障壁の形を放物線で近似したモデル。

### ※9 デバイ・フレーリッヒ模型：

動的な誘電率を算出する際によく用いられる理論模型。

### ※10 スピン依存ドリフト拡散模型：

磁性層と絶縁層の界面に蓄積される電荷の蓄積量を記述した理論模型。