



## 室温巨大磁気キャパシタンス効果の観測にはじめて成功

### 研究成果のポイント

- ・ 強磁性トンネル接合において、世界最高のトンネル磁気キャパシタンス比を達成。
- ・ デバイ-フレ-リッヒモデルを用いた新たな理論計算により、トンネル磁気キャパシタンス効果のメカニズムを解明。
- ・ 理論計算によれば、室温にて 1000%を超えるトンネル磁気キャパシタンス比が期待。

### 研究成果の概要

北海道大学電子科学研究所（所長 西井準治教授）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、同大学大学院工学研究院の長浜太郎准教授らは、ブラウン大学物理学科の蕭鋼（Xiao, Gang）教授と共同で、強磁性体/絶縁体/強磁性体から構成される強磁性トンネル接合<sup>\*1</sup>において、室温にて世界最高のトンネル磁気キャパシタンス（電気容量）比（=155%）の観測に成功しました。また、これまで解明されていなかったトンネル磁気キャパシタンス効果<sup>\*2</sup>のメカニズムが、デバイ-フレ-リッヒモデル<sup>\*3</sup>による新たな理論計算により、初めて明らかになりました。さらに、この理論計算によると、室温にて 1000%を超えるトンネル磁気キャパシタンス比も期待できることが明らかになりました。この研究成果は、交流スピンドダイナミクスに関する新たな学術的知見を提供するとともに、次世代革新的超高性能・低消費電力メモリ素子や超高感度磁気センサーの創製に向けた新たな設計指針を導くと期待できます。

本研究は、科学研究費補助金 基盤研究（B）No. 15H03981、及びブラウン大学 National Science Foundation through Grant No. DMR-1307056 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：Large magnetocapacitance effect in magnetic tunnel junctions based on Debye-Fröhlich model（デバイ-フレ-リッヒモデルに基づく強磁性トンネル接合における巨大磁気キャパシタンス効果）

著者：海住英生<sup>1</sup>、武井将志<sup>1</sup>、三澤貴浩<sup>1</sup>、長浜太郎<sup>2</sup>、西井準治<sup>1</sup>、蕭鋼（Xiao, Gang）<sup>3</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>ブラウン大学物理学科）

公表雑誌：Applied Physics Letters

公表日：米国東部時間 2015 年 9 月 29 日（火）（オンライン公開）

## 研究成果の概要

### (背景)

電子の電荷とスピンの2つの自由度を利用する「スピントロニクス」は、現代のエレクトロニクスを凌駕する次世代技術として期待され、近年大きな注目を集めています。中でも、強磁性体/絶縁体/強磁性体から構成される強磁性トンネル接合は室温にて巨大なトンネル磁気抵抗効果<sup>※4</sup>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。現在では室温にて600%を超える巨大なトンネル磁気抵抗比が得られています。一方で、強磁性トンネル接合は、室温にてトンネル磁気キャパシタンス効果も示します。しかしながら、トンネル磁気キャパシタンス比は50%程度にとどまっています。また、そのメカニズムも明らかにされていませんでした。

### (研究手法・成果)

今回の研究では、はじめに、強磁性トンネル接合におけるトンネル磁気キャパシタンス効果のメカニズムを明らかにするため、デバイ-フレリッヒモデルを用いた新たな理論を考案しました。その結果、トンネル磁気キャパシタンス比は、ある特徴的な周波数において最大値を示し、その値はトンネル磁気抵抗比よりも大きくなることがわかりました。そこで、この理論を実証するために、実験的に超高真空マグネトロンスパッタ装置を用いて、コバルト鉄ボロン (CoFeB) /酸化マグネシウム (MgO) /コバルト鉄ボロン (CoFeB) から構成される強磁性トンネル接合を作製し、トンネル磁気キャパシタンス効果の周波数特性を詳細に調べました。その結果、ある特徴的な周波数において、室温にて巨大なトンネル磁気キャパシタンス効果を観測することに、はじめて成功しました (図1左)。ここでのトンネル磁気キャパシタンス比は、これまでに報告された値 (=約50%) を大きく超える155%を示しました。また、この強磁性トンネル接合でのトンネル磁気抵抗比は108%であることから、トンネル磁気キャパシタンス比はトンネル磁気抵抗比よりも大きいこともわかりました (図1右)。さらに、トンネル磁気キャパシタンス効果の周波数特性は、上述の理論による計算結果と極めて良い一致を示すことも明らかになりました (図2)。すなわち、強磁性体であるコバルト鉄ボロン層の磁化が互いに平行であるときは、絶縁体である酸化マグネシウム内のキャリア (電子や正孔など電気の担い手) は高い透過確率でトンネルするため、キャリアの緩和時間は短くなります。そのため、外部の交流電場に対してキャリアは追従することができます。これによって酸化マグネシウム層における誘電分極が大きくなり、キャパシタンスが大きくなります (図3左)。一方で、コバルト鉄ボロン層の磁化が反平行であるときは、上述とは逆で、酸化マグネシウム内のキャリアは低い透過確率でトンネルするため、キャリアの緩和時間は長くなります。そのため、酸化マグネシウム層における誘電分極が小さくなり、キャパシタンスが小さくなります (図3右)。これが今回明らかになったトンネル磁気キャパシタンス効果のメカニズムです。さらに、600%以上のトンネル磁気抵抗比をもつ強磁性トンネル接合では、1000%を超えるトンネル磁気キャパシタンス比の観測も期待できることが、上述の理論計算により明らかになりました。

### (今後への期待)

磁場によりキャパシタンスが変化する磁気キャパシタンス効果は、強磁性トンネル接合のみならず、近年盛んに研究が行われているマルチフェロイック材料においても発見されています。最近では、絶縁体中にナノ粒子を分散させたナノグラニューラ材料や強磁性層と強磁性層の間に分子を挟んだ分子スピントロニクス素子においても発見されており、磁気キャパシタンス効果をキーワードとした

当該研究分野が急速に発展しています。このような観点から他の様々な材料・物質・デバイスにおいても室温巨大磁気キャパシタンス効果が発見される可能性は極めて高く、学術的に広く展開していくものと期待できます。さらに、将来的には、磁気キャパシタンス効果の特徴を活かした革新的低ノイズ・低消費電力メモリ素子の創製のみならず、磁気抵抗効果と組み合わせることで、従来にない多値磁気メモリ素子の創製も期待でき、応用工学的な観点からも極めて大きな意義をもつものと考えられます。

## お問い合わせ先

所属・職・氏名：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/

〔参考図〕

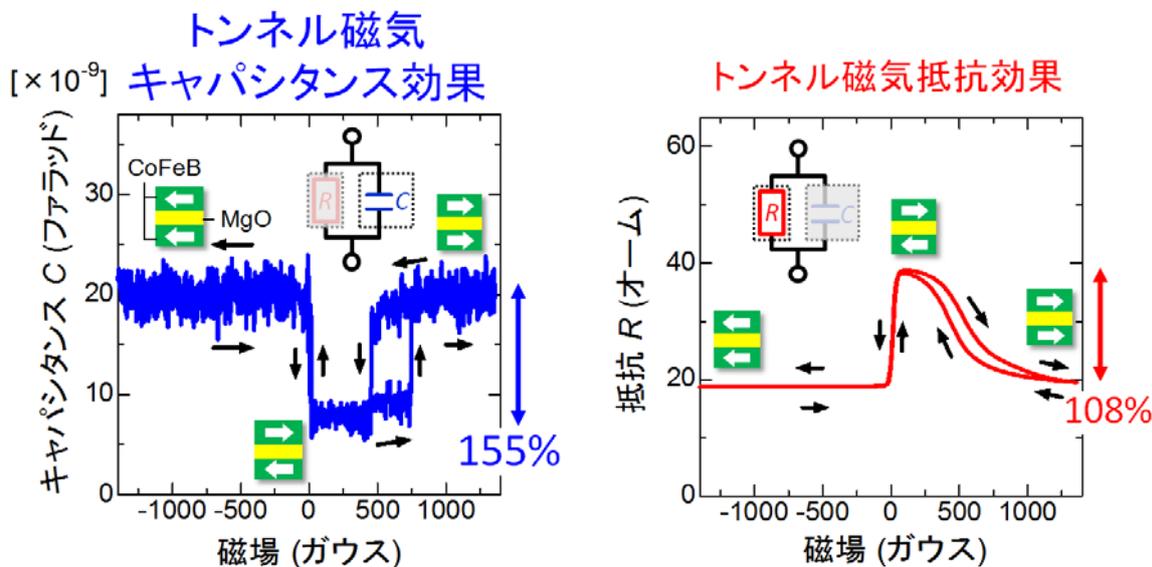


図 1 強磁性トンネル接合におけるトンネル磁気キャパシタンス効果（左図）とトンネル磁気抵抗効果（右図）。黒矢印は磁場の挿引方向を示す。200 ヘルツの周波数において、室温にて 155% の巨大なトンネル磁気キャパシタンス比を観測した。一方で、この強磁性トンネル接合のトンネル磁気抵抗比は 108% を示す。これよりトンネル磁気キャパシタンス比はトンネル磁気抵抗比よりも大きいことがわかる。

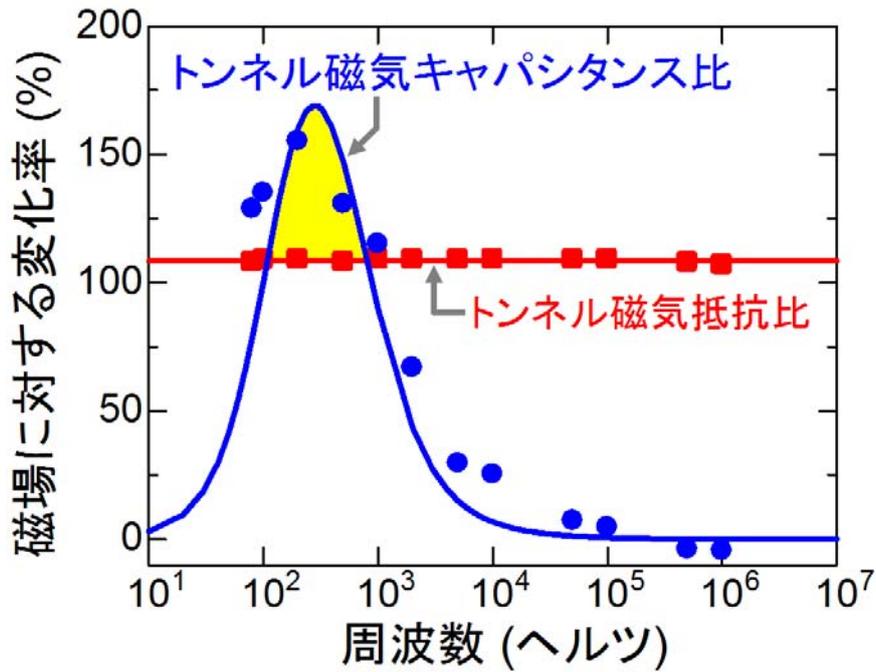


図 2 トンネル磁気キャパシタンス比（青丸）とトンネル磁気抵抗比（赤四角）の周波数特性。実線はデバイフレリッヒモデルを用いた理論計算結果。実験結果と計算結果は良い一致を示す。

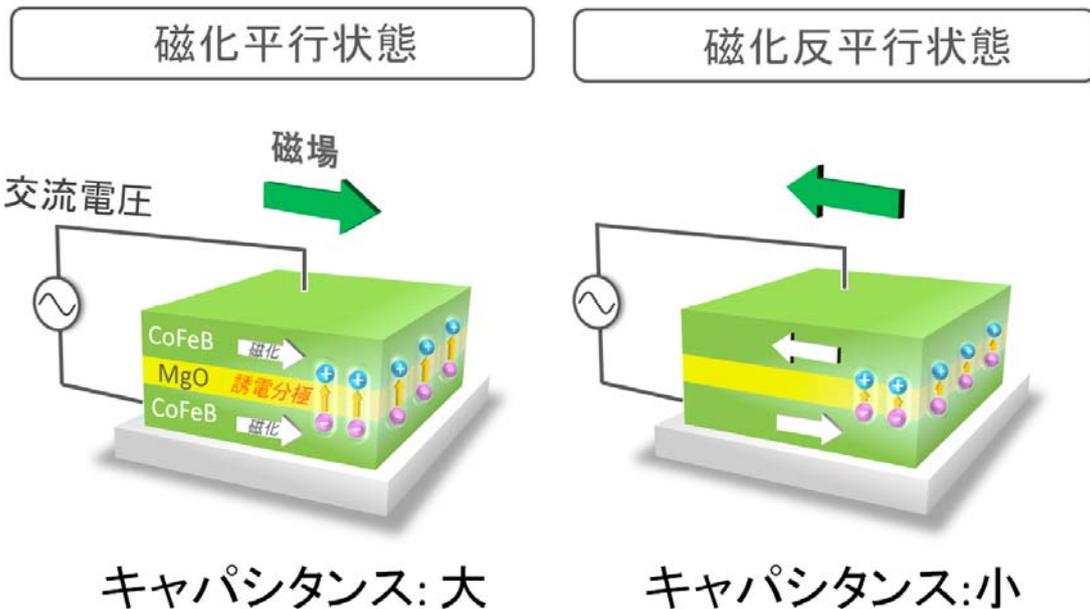


図 3 トンネル磁気キャパシタンス効果のメカニズム。強磁性体であるコバルト鉄ボロン層の磁化が互いに平行であるときは、絶縁体である酸化マグネシウム内のキャリアは高い透過確率でトンネルするため、キャリアの緩和時間は短くなる。そのため、外部の交流電場に対してキャリアは追従することができる。これによって、酸化マグネシウム層における誘電分極が大きくなり、キャパシタンスが大きくなる（左図）。一方で、コバルト鉄ボロン層の磁化が反平行であるときは、その逆で、酸化マグネシウム内のキャリアは低い透過確率でトンネルするため、キャリアの緩和時間は長くなる。そのため、酸化マグネシウム層における誘電分極が小さくなり、キャパシタンスが小さくなる（右図）。これらの磁化平行・反平行状態が磁場によって制御できるため、磁気キャパシタンス効果が発現する。

〔用語説明〕

※1 強磁性トンネル接合：

2 層の強磁性体の間に極薄の絶縁体が挟まれた接合。絶縁体の厚さがナノメートル程度と薄い場合、量子力学的な効果（トンネル効果）により電流が流れる。この薄い絶縁体が強磁性体により挟まれていることから、強磁性トンネル接合と呼ばれる。

※2 トンネル磁気キャパシタンス効果：

強磁性トンネル接合において、両強磁性層の磁化が平行であるときキャパシタンスが大きくなり、反平行であるときキャパシタンスが小さくなる現象。一般に、磁気キャパシタンス効果には2つのタイプがあり、1つはマルチフェロイック材料において、もう1つは強磁性トンネル接合に代表されるスピントロニクスデバイスにおいて、発見されている (Scientific Reports 5, 13704 (2015))。

※3 デバイ-フレリッヒモデル：

動的な誘電率の算出に極めて有効な理論モデル。昨年、絶縁体中に磁性ナノ粒子が分散された系でその定量的理解に成功している (Nature Communications 5, 4417 (2014))。

※4 トンネル磁気抵抗効果：

強磁性トンネル接合において、両強磁性層の磁化が平行であるとき抵抗が小さくなり、反平行であるとき抵抗が大きくなる現象。スピントロニクス研究分野における代表的な現象の一つ。すでにハードディスクドライブの読み取り用磁気ヘッドや磁気センサーに応用されている。