



2022年5月17日

報道関係者各位

慶應義塾大学

世界最大 426%の磁気キャパシタンス変化率の観測に成功 — 超高感度磁気センサー・メモリーとして期待 —

慶應義塾大学大学院理工学研究科佐藤健太(修士2年生)、同大学理工学部海住英生准教授らは、物質・材料研究機構介川裕章主幹研究員、ブラウン大学物理学科の蕭鋼教授と共同で、世界最大のトンネル磁気キャパシタンス(TMC)効果の観測とそのメカニズム解明に成功しました。TMC効果とは、磁場によりキャパシタンス(電気容量; 電気が溜まる量)が変化する現象です。この現象は2つの磁性層の間に薄い絶縁層を挟んだ磁気トンネル接合において観測されます。磁気感度を示すキャパシタンス変化率はこれまで最大で332%でした。今回、「絶縁層の工夫」と「電圧印加」により、世界最大となる426%の変化率を達成しました。さらに、量子力学と統計論を取り入れた誘電体理論によりそのメカニズムを解明しました。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。

本研究成果は5月16日(英国時間)に『Scientific Reports』(オンライン、シュプリンガー・ネイチャー・グループ)に掲載されました。

1. 本研究のポイント

- ・絶縁層の工夫と電圧印加により、世界最大トンネル磁気キャパシタンス比の観測に成功。
- ・量子力学と統計論を取り入れた誘電体理論によりメカニズムを解明。
- ・超高感度磁気センサーやメモリーに新たな道を拓く。

2. 研究背景

電子の持つ「電荷(電気量)」と「スピン(電子の自転に相当するもの)」の2つの性質を利用するスピントロニクスは、次世代のエレクトロニクスとして期待され、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は室温で大きなトンネル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、磁場によりキャパシタンス(電気容量; 電気が溜まる量)が変化する現象です。このキャパシタンスの変化率はTMC比と呼ばれ、これまでの最大値は332%でした(参考文献付記)。

3. 研究内容・成果

今回、研究グループは、332%を超える巨大なTMC比の観測を目指し、「絶縁層」と「電圧」に注目しました。磁気トンネル接合では、磁場により抵抗も変化します。この現象はトンネル磁気抵抗(TMR)効果と呼ばれ、以前よりよく知られていました。現在のパソコンに搭載されているハードディスクドライブ(HDD)の磁気ヘッドに用いられている技術です。この変化率(TMR比)が大きくなると、磁気記録面密度が大きく向上します。しかし、このTMR効果では、「電圧」を加えると、TMR比は下がります。一方で、TMC効果では、磁性層と絶縁層の界面に電子のスピンに由来するキャパシタンスが存在するため、電圧を加えると、逆にTMC効果は大きくなります。この電圧効果を利用することで、昨年、同

グループは 332%の TMC 比を達成しました。今回の研究では、さらに、磁性層と絶縁層の界面構造に注目しました。これまでに巨大な TMC 効果が観測された磁気トンネル接合では、磁性層と絶縁層に、それぞれ、鉄コバルト (FeCo) と酸化マグネシウム (MgO) が使用されていました。しかし、鉄コバルトと酸化マグネシウムの結晶サイズは、それぞれわずかに異なっていました。それに対し、本研究ではマグネシウムとアルミニウムの酸化物であるスピネル ($MgAl_2O_4$) に着目しました。このスピネルと鉄の結晶サイズの差は 1%以内であることが知られています。この場合、磁性層と絶縁層の界面で、原子同士がほぼ完全に整列するため、TMC 比の更なる向上が期待できると考えました。

そこで、同グループは、高度なマグネトロンスパッタ技術(※1)を駆使して、2つの鉄磁性膜の間に薄いスピネル絶縁膜を挟んだ、超高品質な磁気トンネル接合を作製しました(図1)。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ました。その結果、この磁気トンネル接合において、電圧を加えると最大で 426%の TMC 比の観測に成功しました(図2)。これまでの最大値である 332%を大きく超える結果です。さらに、実験のみならず、理論的な検討も行ったところ、誘電体理論(※2)に量子力学と統計論を取り入れた新たな計算手法により、実験結果をよく説明できることがわかりました(図3)。理論計算によると、スピン分極率がより大きい磁性材料を用いれば、TMC 比は 1000%を超えることもわかりました。

4. 今後の展開

本研究成果により、超高感度磁気センサーやメモリーの誕生に向け新たな道が切り拓かれるものと期待できます。また、情報ネットワーク時代に大きく貢献する次世代 IoT 技術としての活用も期待でき、昨今注目されているビッグデータの取得・蓄積・解析に大きく貢献するものと考えられます。また、将来的には、IT/ICT 分野のみならず、環境エネルギー、医療・治療、保健科学、運輸交通、農業、製造業など幅広い分野での実用化が期待できます。

5. 謝辞

本研究は、科学研究費補助金基盤研究 (B)、「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」(文部科学省「学術研究の大型プロジェクトの推進に関する基本構想ロードマップの策定-ロードマップ 2020-」採択)、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。

<参考文献>

従来の最大値 332%の TMC 効果が記載されている論文

K. Ogata, Y. Nakayama, G. Xiao, and H. Kaiju:

“Observation and theoretical calculations of voltage-induced large magnetocapacitance beyond 330% in MgO-based magnetic tunnel junctions”, Scientific Reports **11**, 13807 (2021)

<原論文情報>

研究論文名: Large magnetocapacitance beyond 420% in epitaxial magnetic tunnel junctions with an $MgAl_2O_4$ barrier ($MgAl_2O_4$ バリアをもつエピタキシャル磁気トンネル接合における 420%を超える巨大磁気キャパシタンス)

著者: 佐藤健太¹、介川裕章²、緒方健太郎¹、蕭鋼 (シャオ ガン)³、海住英生^{1, 4} (¹慶應義塾大学理工学部物理情報工学科、²物質・材料研究機構、³ブラウン大学物理学科、⁴慶應義塾大学スピントロニクス研究開発センター)

公表雑誌: Scientific Reports (シュプリンガー・ネイチャー・グループが発行するオープンアクセ

スジャーナル)

公表日：英国時間 2022 年 5 月 16 日（月）（オンライン公開）

doi: 10.1038/s41598-022-11545-6

<用語説明>

※1 マグネトロンスパッタ技術

超高真空中で不活性ガス（例えば、アルゴンガス）を原料に衝突させることで、その原料物質をはじき飛ばし（＝スパッタし）、これにより基板の上に薄膜を形成させる技術。不活性ガス原子を原料に衝突させる頻度を増やすため、磁石（＝マグネット）を用いることから、マグネトロンスパッタと呼ばれる。

※2 誘電体理論

動的な誘電率を算出する際に用いられる理論で、その模型はデバイ・フレーリッヒ模型と呼ばれる。今回、このデバイ・フレーリッヒ模型に、ジャン-シグモイド理論、放物線バリア近似、スピン依存ドリフト拡散模型を融合させた新たな理論を構築した。その結果、実験結果と良い一致を示した。

<図表>

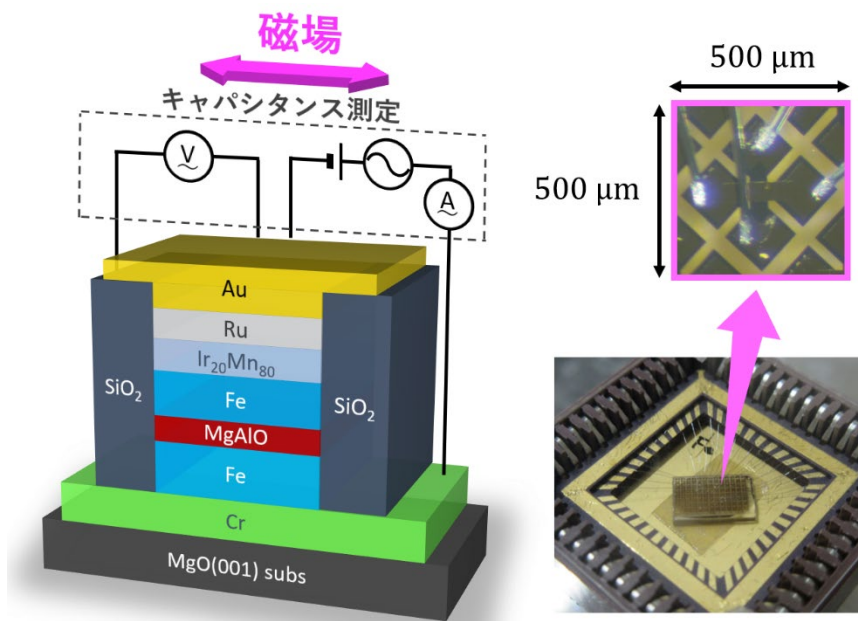


図1 磁気トンネル接合（左：測定系、右：試料の写真）

(ナノファラッド)

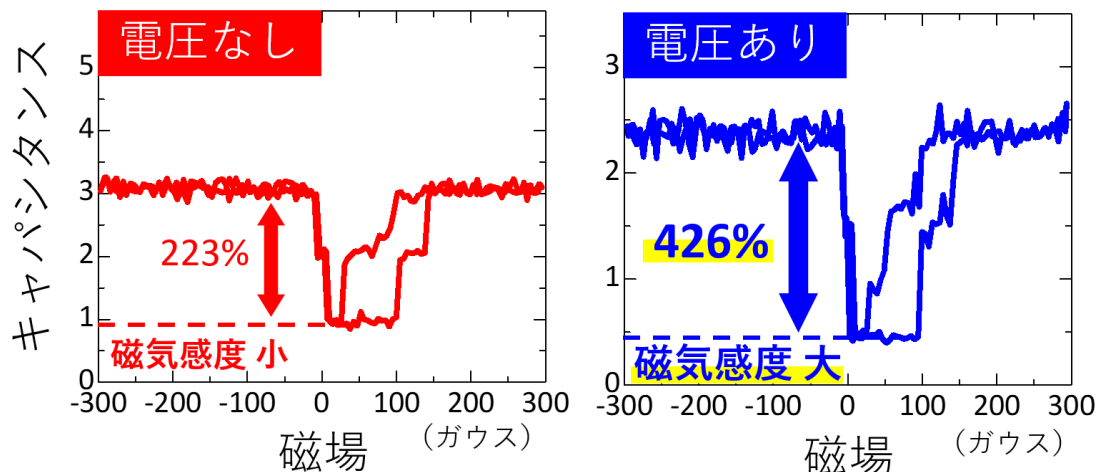


図2 電圧を加えることで、426%のキャパシタンス変化率を達成

(パーセント)

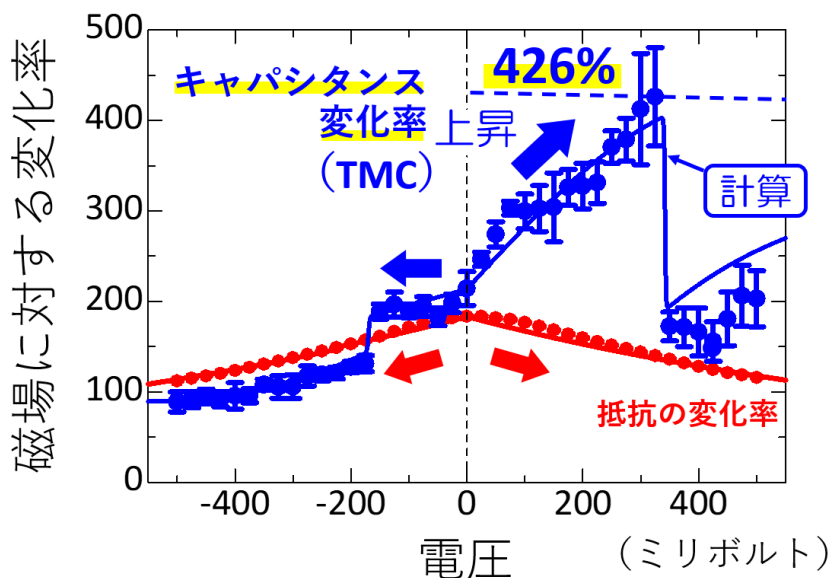


図3 実験結果と計算結果の比較

(青丸●が TMC の実験結果、青線—が計算結果。

赤丸●が抵抗変化率の実験結果、赤線—が計算結果。)

※ご取材の際には、事前に下記までご一報くださいますようお願い申し上げます。

※本リリースは文部科学記者会、科学記者会、各社科学部等に送信させていただいております。

・研究内容についてのお問い合わせ先

慶應義塾大学 理工学部 物理情報工学科 准教授 海住 英生 (かいじゅう ひでお)

TEL : 045-566-1428 E-mail : kaiju@appi.keio.ac.jp

・本リリースの配信元

慶應義塾広報室（澤野）

TEL : 03-5427-1541 FAX : 03-5441-7640

Email : m-pr@adst.keio.ac.jp <https://www.keio.ac.jp/>