

報道関係者各位

電気・磁気変換の新原理「スピン起電力」の実現に成功
- ナノデバイスにおける新しい電磁気学と「超」巨大磁気抵抗効果の発見 -
Nature(2009/03/08) Online 掲載

発表概要：

閃亜鉛鉱型結晶構造をもつ強磁性 MnAs のナノ微粒子を含む磁気トンネル接合デバイスを作製し、静磁場を与えるだけで起電力が発生する「スピン起電力」とクーロンブロック効果による 100,000%を超えるきわめて大きな磁気抵抗効果を実現した。これは磁気エネルギーを電気エネルギーに変換する新しい原理の実証を意味するとともに、ファラデーの電磁誘導の法則を拡張する必要があることを示唆している。この研究成果は高感度の磁気センサやスピン起電力を利用した新規なデバイス応用への道を拓くものである。Nature Online (3月8日号) 掲載予定。

発表内容：

閃亜鉛鉱型結晶構造をもつ強磁性 MnAs (ZB-MnAs) 微粒子を含む磁気トンネル接合 MnAs/GaAs/AlAs/GaAs:ZB-MnAs を作製し、静磁場(時間的に変化しない一定の磁場)による起電力の発生とクーロンブロック効果による 100,000%を超えるきわめて大きな磁気抵抗効果を見出した。ここで観測された「静磁場による起電力の発生」は、古典的な電磁気学で説明できるものではなく、巨視的な量子トンネリングによって MnAs 微粒子の磁化が回転し、同時に電子スピンの反転しながらトンネルするというコトンネリングが起こることによって、磁気的なゼーマンエネルギーが電子系の電氣的なエネルギーに転換される、という理論モデルで説明できるものである。本研究は、磁気エネルギーを電気エネルギーに変換する新しい原理を実証するとともに、1831年に発見されたファラデーの電磁誘導の法則が成り立たない実験結果を初めて明瞭に示したものであり、このような磁性ナノ構造で観測される量子力学的なスピンの効果を説明するためには、ファラデーの電磁誘導の法則を拡張する必要があることを示唆している。また、同時に発見された 100,000%を超えるきわめて大きな磁気抵抗効果は、まったく新しい磁気センサやスピン起電力を用いた新しいデバイス応用への道を拓くものである。詳細は別紙参照。

発表雑誌：

Nature (3月8日 Online) に掲載予定

問い合わせ先：

田中雅明(東京大学 大学院工学系研究科 電気系工学専攻 教授)

用語解説：

(別紙1) 研究詳細をご参照ください。

添付資料：

(別紙1) 研究詳細をご参照ください。

(別紙1) 研究詳細

東京大学
東北大学
米国マイアミ大学

電気・磁気変換の新原理「スピン起電力」の実現に成功
- ナノデバイスにおける新しい電磁気学と「超」巨大磁気抵抗効果の発見 -

東京大学大学院工学系研究科の研究論文が英国科学誌「Nature」に掲載されます

東京大学大学院工学系研究科 電気系工学専攻の田中雅明教授、東北大学金属材料研究所 前川禎通教授および米国マイアミ大学 S.E. Barnes 教授の研究グループは、強磁性体のナノスケール微粒子を含む磁気トンネル接合において静磁場を印加するだけで起電力が発生する「スピン起電力」効果を世界で初めて観測しました。本研究は、1831年に発見された電磁気学の基本法則の1つであるファラデーの電磁誘導の法則が成り立たない実験結果を初めて明瞭に示したものであり、このような磁性ナノ構造で観測される量子力学的なスピンの効果を説明するためには、ファラデーの電磁誘導の法則を拡張する必要があることを示唆しています。さらにこの「スピン起電力」により、100,000%を超えるきわめて大きな磁気抵抗効果を実現しました。これにより、磁気エネルギーから電気エネルギーへの効率的な変換が可能になり、新しいタイプの電池（スピン電池）や超高感度磁気センサーとしての応用が期待されます。本研究は、東京大学大学院工学系研究科電気系工学専攻の田中研究室において、ベトナム出身の留学生であるファム ナム ハイ（博士課程3年）の博士論文研究の一部として実験研究が行われたものであり、理論的検討は、東北大学金属研究所前川教授、米国マイアミ大学 Barnes 教授および東京大学田中研究室の共同研究として行われました。本研究成果は英国科学誌「Nature（ネイチャー）」（2009年03月08日 Online）に掲載されます。

1. 研究の背景と概要

古典的な電磁気学では、磁場の中に電気回路を置いたとき、磁場の時間的な変化が回路に起電力をもたらします。これは1831年にファラデーが発見した電気誘導の法則です。このファラデーの電磁誘導の法則は、発電機からIHクッキングヒータまで、さまざまな電気機器の動作原理となっています。この起電力は磁場が電子の「電荷」に作用する力（ローレンツ力）を反映しています。一方、ミクロな世界を扱う量子力学では、磁場が電子の「スピン」にも力を及ぼします。近年、マイアミ大学のBarnes教授と東北大学の前川教授によって、磁性材料を含むナノ構造においては時間的に変化しない静磁場の中でも起電力を発現できることが理論的に予測されています（参考文献[1,2]）。このスピンに起因する起電力をスピン起電力といいます。しかし、このスピン起電力効果は過度現象であるため、実験的な実証は非常に難しく、観測された例はありませんでした。本研究では、磁気異方性エネルギーが大きい閃亜鉛鉱型(Zinc

blende; ZB)結晶構造をもつナノメータ・スケールの強磁性 MnAs 微粒子を電極とする磁気トンネル接合を作製し、これに静磁場(時間的に変化しない一定の大きさの磁場)を印加し、起電力の発生を観測することに初めて成功しました。この現象は、静磁場により MnAs 微粒子の磁化を反転させることによって、MnAs の磁氣的なゼーマンエネルギーが電子スピンを反転させながら電子を駆動し電氣的なエネルギーに転化されるという、新しいタイプのスピンの起電力によって引き起こされることがわかりました。さらに、「スピン起電力」と微粒子のクーロンブロッケード効果により、100,000%を超えるきわめて大きな磁気抵抗効果を実現しました。

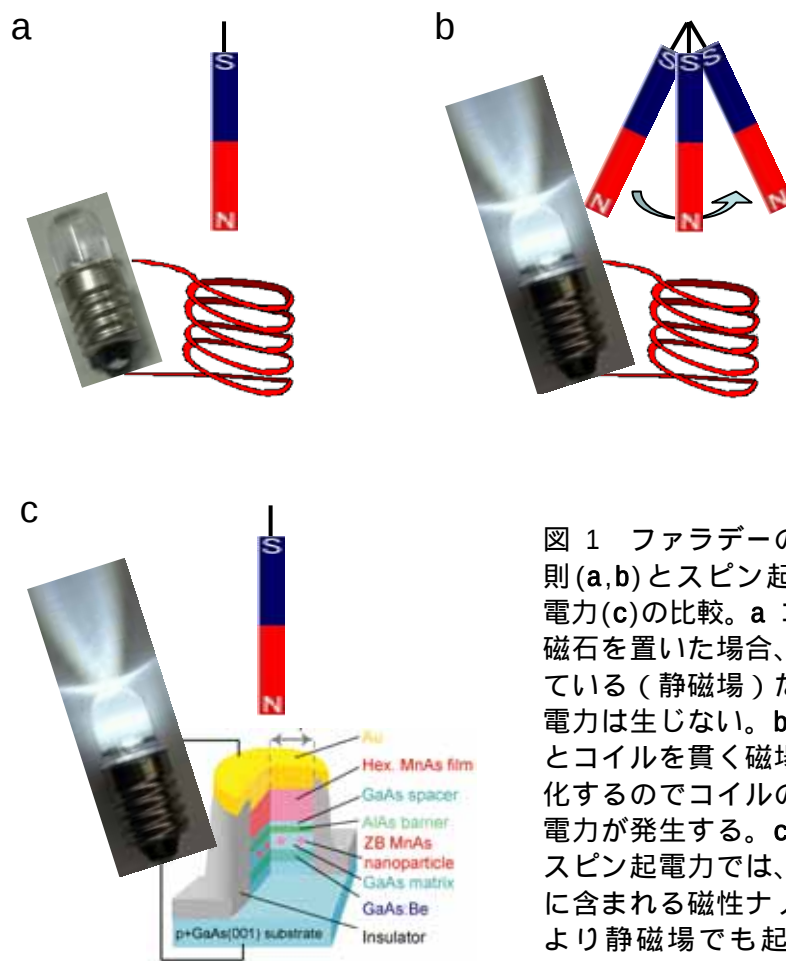


図 1 ファラデーの電磁誘導の法則(a,b)とスピン起電力による起電力(c)の比較。a コイルの近くに磁石を置いた場合、磁場は静止している(静磁場)ためコイルに起電力は生じない。b 磁石を動かすとコイルを貫く磁場が時間的に変化するのでコイルの両端に誘導起電力が発生する。c これに対し、スピン起電力では、ナノデバイスに含まれる磁性ナノ粒子の存在により静磁場でも起電力が発生する。

参考文献

- [1] S. E. Barnes, J. Ieda, and S. Maekawa, Appl. Phys. Lett. 89, 122507 (2006).
- [2] S. E. Barnes and S. Maekawa, Phys. Rev. Lett. 98, 246601 (2007).

2. 研究成果 - スピン起電力効果と「超」巨大磁気抵抗効果の観測—

分子線エピタキシー法により、MnAs (20nm) / GaAs (1 nm) / AlAs (2.1 nm) / ZB GaAs:MnAs (10nm)からなる単結晶磁気トンネル接合 (magnetic tunnel junction; MTJ) 構造 (図 2 a 参照) を作製しました。ここで、GaAs:MnAs とは GaAs 格子中に直径 2-3 nm 程度の ZB MnAs ナノ粒子が埋め込まれた構造です。図 2 b に示すように、高分解能の透過型電子線顕微鏡によって、直径 2-3 nm の ZB MnAs 微粒子が確かに下部電極に形成されていることを確認しました。

図 3 a に直径 200 ミクロンの円形メサに加工された素子の電流電圧特性 (I - V) を示します。電流が上部から下部電極に流れるときの符号を正としています。黒い曲線は磁場を印加しない時の電流-電圧 (I - V) 特性で、 $V < 50$ mV 領域では抵抗が 3 桁に及ぶ急激な増大を示しています。これは微粒子が極めて小さいため、電子の MnAs 微粒子に出入りしてからトンネル伝導する場合には大きなクーロンエネルギーが必要となり、抵抗がゼロ電圧付近で極めて大きくなるというクーロンブロッケード効果が働くためです。一方、素子の面内方向に 10 kG の静磁場を印加したときの I - V 特性を赤い曲線で示しています。この I - V 特性の原点は、正電圧側に 21 mV シフトしました。これは素子から 21 mV の起電力が発生したことを意味しています。

図 3 b に素子に外部抵抗 R_L を接続して、外部抵抗の両端に発生する電圧 V を磁場 H の関数として測定した結果を示します。ここでは電流源も電圧源も付けておらず、ただ静磁場を印加しただけです。黒い曲線が素子を開放した時 (R_L =無限大) の V - H で、 V 軸に対して反転したのは灰色の曲線です。この結果は、この素子に静磁場を印加するだけで起電力が発生し、その起電力の大きさが磁場にほぼ比例して増大することを示しています。

特筆すべきことは、図 3 a の I - V 特性の原点付近 (低電圧) では、磁場ゼロのときは電流はほとんどゼロ (抵抗は極めて高い状態) ですが、磁場をかけると電流が流れ

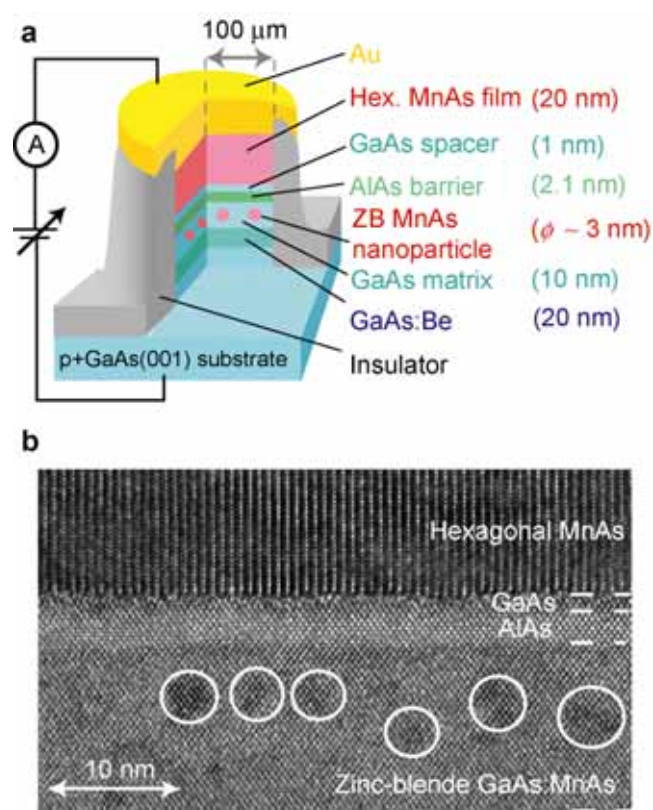


図 2 a 作製した磁気トンネル接合素子の構造
b 磁気トンネル接合素子を高分解能の透過型電子線顕微鏡で断面観察した格子像。白丸が直径約 2nm-3nm 程度の閃亜鉛鉱型 MnAs 微粒子

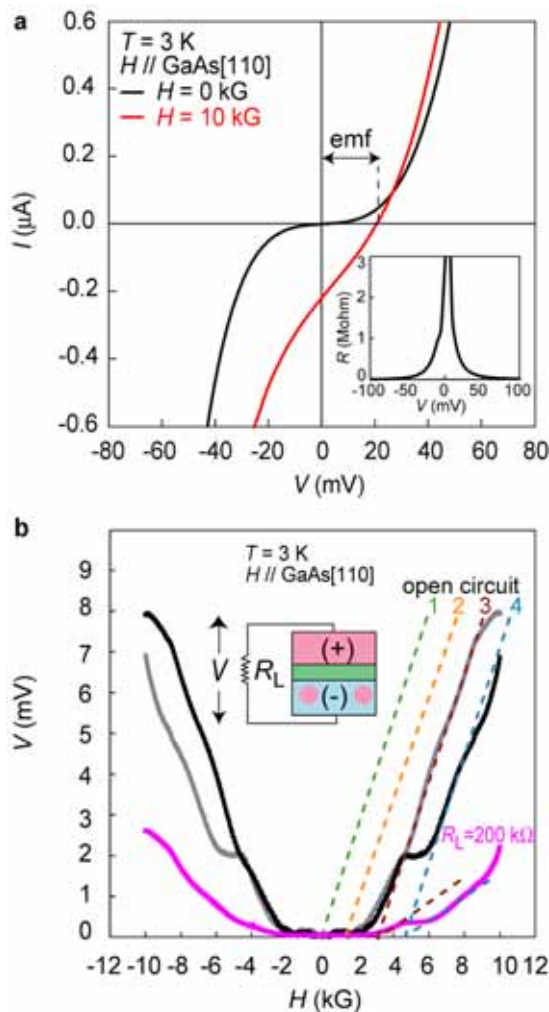


図3 a 図2の素子の電流-電圧(I - V)特性
b 起電力 V の磁場 H 依存性(V - H 特性)。

る(抵抗が劇的に低くなる)ことがわかります。素子に一定の電圧をかけて抵抗の磁場依存性を測ると図4のようになります。きわめて大きな磁気抵抗変化が得られたことがわかります。この磁気抵抗変化率は低電圧になるほど大きく、-1 mV の電圧では 100,000% 以上にも達しました。これは現在ハードディスク用磁気ヘッドに使用されている巨大磁気抵抗効果(GMR)およびトンネル磁気抵抗効果(TMR)を用いた磁気センサの磁気抵抗変化率に比べて、約 1000 倍の大きさになります。

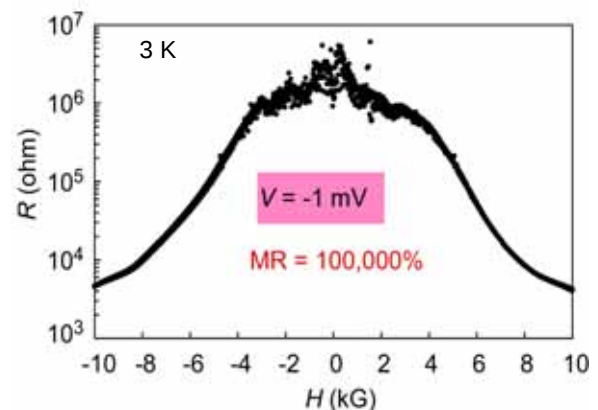


図4 バイアス電圧-1mVのときの抵抗の磁場依存性。磁気抵抗変化率(MR)は低バイアスになるほど大きく、-1 mV のバイアス電圧では 100,000% 以上にも達した。

3. 本研究の意義

本研究は、時間変化しない静磁場を与えるだけで起電力が生ずることを実験的に示しており、磁場の時間変化が起電力をもたらすという 1831 年にファラデーが発見した電磁誘導の法則が成り立たない実験結果を初めて明瞭に示したことになります。これは、本研究で作製した磁性ナノ微粒子構造では、量子力学的なスピンの効果が働くため、古典的な電磁気学では説明できない現象が起こることを意味します。この現象を説明するためには、ファラデーの電磁誘導の法則を拡張する必要があることを示唆しています。

この原理を用いれば、磁気エネルギーから電気エネルギーへの効率的な変換が可能になり、新しいタイプの電池(スピン電池)としての応用が考えられます。また、同

時に発見された 100,000%を超えるきわめて大きな磁気抵抗効果は、超高感度磁気センサとしての応用が期待されます。このように、本研究で得られた成果は、幅広い応用を可能にすることが期待されます。

今後は起電力と磁気抵抗比のさらなる向上、デバイス構造の最適化、動作温度の向上などの研究課題に取り組む予定です。

本研究における実験は、東京大学大学院工学系研究科電気系工学専攻において田中雅明教授の指導のもとで、ベトナム出身の博士課程大学院生ファムナムハイ氏を中心に行われたものです。実験結果の説明および理論的検討は、東北大学金属材料研究所の前川禎通教授、米国マイアミ大学の Stewart E. Barnes 教授および田中研究室との共同で行われました。

本研究の一部は、文部科学省科学研究費補助金（基盤研究 S No.18106007、特定領域研究 No.19048018、若手研究 No.20686002）、科学技術振興調整費先端融合 COE、次世代 IT 基盤構築のための研究開発、科学技術振興機構戦略的基礎研究の助成を受けて行われました。ファムナムハイは日本学術振興会特別研究員として経済的支援を、および田中研究室はグローバル COE プログラム(C04)から研究環境の整備について支援を受けました。

4. 用語解説

○ 起電力

発電機や電池などの電源装置における電流を流そうとする力の強さ。単位はボルト（V）を用いる。

○ ファラデーの電磁誘導の法則

一つの回路に生じる起電力の大きさはその回路を貫く磁場（磁界）の時間変化の割合に比例するという電磁気学の基本法則の 1 つ。

○ MnAs（マンガン砒素）

金属強磁性体の一種。バルクでは NiAs 型六方晶の結晶構造を示す。1994 年に田中らによって初めて単結晶のエピタキシャル薄膜が作製され、以来スピントロニクス材料として盛んに研究されている。本研究では GaAs などの化合物半導体と同じ結晶構造である閃亜鉛鉱型（Zinc blende: ZB）結晶構造をもつ強磁性 MnAs 微粒子を用いている。

○ GaAs（ガリウム砒素）、AlAs（アルミニウム砒素）

いずれもエレクトロニクスでは最も有用な III-V 族化合物半導体の一種。GaAs は高速トランジスタや半導体レーザなどに使われている。

○電子スピン

電子が本来持っている角運動量（自転のような性質）。スピンを持つことで電子は角運動量と磁気モーメントを持つ小さな電磁石となっている。電子スピンは物質の磁性の源であり、スピンの状態には上向きと下向きという二つの状態がある。

○磁気トンネル接合

強磁性電極/トンネル障壁/強磁性電極の3層構造からなるトンネル接合。トンネル障壁の厚さは数ナノメートルと非常に薄いので、電子がトンネルによって伝導することができる。数10%～数100%の大きな磁気抵抗変化を示し、磁気センサや不揮発性メモリに応用される。

○分子線エピタキシー法

超高真空において、材料がはいった坩堝を加熱することにより原子または分子をゆっくり基板の上に降らせて積層させ、単結晶の薄膜を成長させる結晶成長方法。1原子層または1分子層単位の膜厚制御性があり、さまざまな薄膜やエレクトロニクスデバイスの作製に使われている。

○ゼーマンエネルギー

電子を磁場の中に置くと、電子のスピンによる磁気モーメントの向きが磁場と平行の時にはエネルギーが低く、反平行の時にはエネルギーが高い。このエネルギーの差をゼーマンエネルギーという。スピンによる磁気モーメントが磁場に対して反平行から平行に反転する時に、余分なエネルギーが発生する。本研究では、これが起電力の起源になる。

○磁気抵抗

物質に磁場をかけると電気抵抗が変化する現象。電気抵抗の変化率を磁気抵抗比という。現在ハードディスク用磁気ヘッドに使用されている巨大磁気抵抗効果(GMR)の発見は2007年のノーベル物理学賞の対象になった。

5. 論文名・著者名

“Electromotive force and huge magnetoresistance in magnetic tunnel junctions”

Pham Nam Hai, Shinobu Ohya, Masaaki Tanaka, Stewart E. Barnes and Sadamichi Maekawa

6. 著者所属

ファムナムハイ 東京大学大学院工学系研究科電気系工学専攻
(〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1)

大矢 忍 東京大学大学院工学系研究科電気系工学専攻
(〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1)

田中 雅明 東京大学大学院工学系研究科電気系工学専攻
(〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1)

Stewart. E. Barnes Physics Department, University of Miami
(Coral Gables, Florida 33124, USA)

前川 禎通 東北大学金属材料研究所, 科学技術振興機構(JST)CREST
(〒980-8577 宮城県仙台市青葉区片平 2-1-1)

7. 詳細な内容のお問い合わせ先

田中 雅明
東京大学大学院工学系研究科電気系工学専攻 教授