



東北大学

報道解禁時間 2009年3月9日午前3時

2009年3月5日

報道機関 各位

東北大学金属材料研究所

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

(説明)

東北大学金属材料研究所の前川禎通教授、東京大学大学院工学系研究科電子工学専攻の田中雅明教授、及び米国マイアミ大学の S.E. Barnes 教授の研究グループは、強磁性ナノ粒子を含む磁気トンネルデバイスにおいて、静磁場により起電力が発生する「スピン起電力」の効果の存在を世界で初めて実証した。本研究は電磁気学の基本法則を約 180 年ぶりに拡張し、トンネル磁気抵抗デバイスを用いて実験的にも証明したものである。さらに、この「スピン起電力」により、従来技術の 1000 倍となる抵抗比 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る。本研究成果は英国科学誌「Nature (ネイチャー)」Online 版 (2009 年 3 月 8 日付) に掲載される。

(概要説明)

○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 (図 1a,b)。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 クッキングヒーターまで、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、東北大学の前川教授とマイアミ大学の Barnes 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 (図 1c) ことが理論的に示されています [1,2]。このスピンに起因する起電力をスピン起電力と名付けました。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。

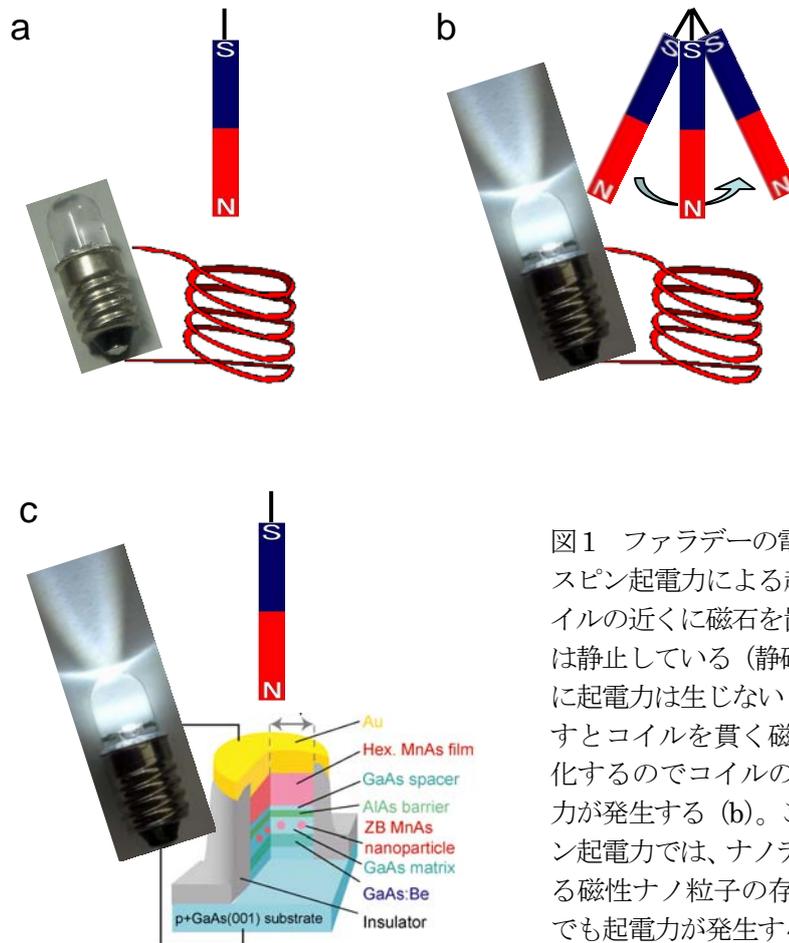


図1 ファラデーの電磁誘導の法則とスピン起電力による起電力の比較。コイルの近くに磁石を置いた場合、磁場は静止している（静磁場）ためコイルに起電力は生じない（a）。磁石を動かすとコイルを貫く磁場が時間的に変化するのでコイルの両端に誘導起電力が発生する（b）。これに対し、スピン起電力では、ナノデバイスに含まれる磁性ナノ粒子の存在により静磁場でも起電力が発生する（c）。

本研究では、特殊な磁石である MnAs（マンガン砒素）*のナノ粒子を電極とする磁気トンネルデバイス*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 ナノ粒子の磁化を反転させることによって、MnAs の磁気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気的なエネルギーに転化されるという、通常の電磁気学に収まらない新しいタイプの「スピン起電力」によって引き起こされることがわかりました。さらに、スピン起電力とナノ粒子のクーロンブロッケード効果*により、これまでの約 1000 倍となるきわめて大きな磁気抵抗効果*（抵抗比 100,000%以上）を実現しました。

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).

○主要な成果 —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) [()内は厚み]からなる単結晶磁気トンネルデバイス (図 2a 参照) を作製しました。ここで、GaAs:MnAs とは GaAs (ガリウム砒素)*格子中に直径 2-3 nm 程度の閃亜鉛鉱型(Zinc blende; ZB)結晶構造をもつ MnAs ナノ粒子が埋め込まれた構造です。図 2b 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 ナノ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。

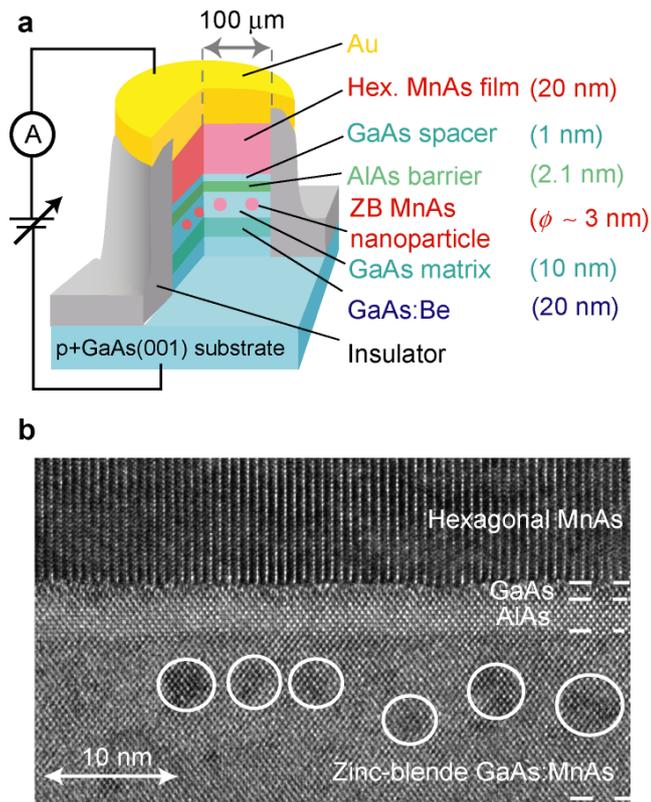


図2 a 作製した磁気トンネルデバイスの構造
 b 磁気トンネルデバイスを高分解能の透過型電子線顕微鏡で断面観察した格子像。白丸が直径約 2nm-3nm 程度の閃亜鉛型 MnAs ナノ粒子

図 3a 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ときの電流-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しています。これはナノ粒子が極めて小さいため、電子が MnAs ナノ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ク効果の働くためです[3]。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 3b に素子に外部抵抗 RL 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 (RL=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 3a の I-V 特性の原点付近 (低電圧) では、磁場ゼロのとき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る (抵抗が劇的に低くなる) ことです。すなわち、きわめて大きな磁気抵抗変化が得られました (図 4)。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。

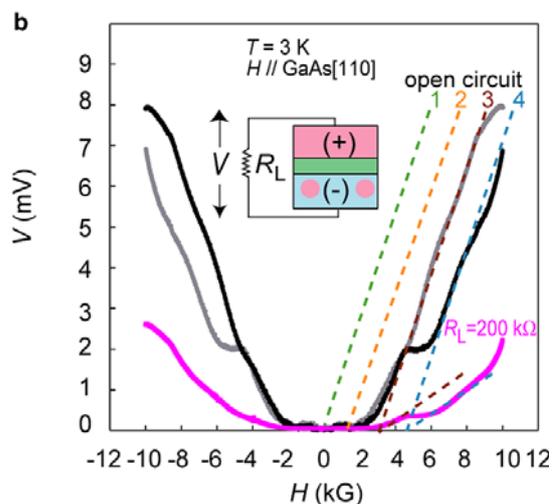
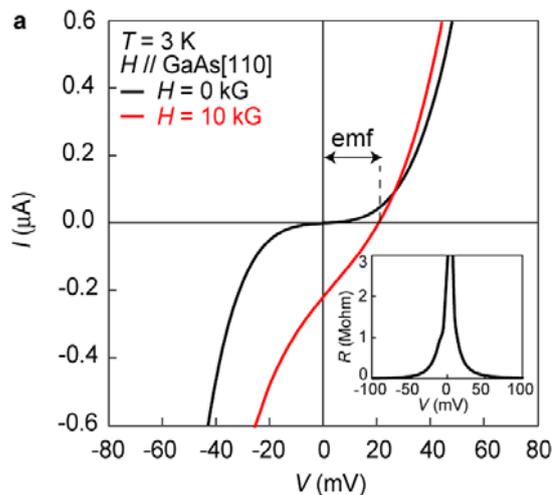


図3 a 図1の素子の電流-電圧 (I - V)特性
b 起電力 V の磁場 H 依存性 (V - H 特性)

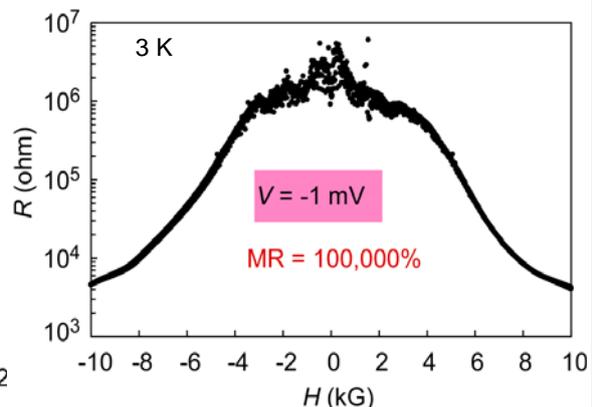


図4 バイアス電圧-1mV のときの抵抗の磁場依存性。磁気抵抗変化率(MR)は低バイアスになるほど大きく、-1 mV のバイアス電圧では 100,000% 以上にも達した。

○本研究のインパクト

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ー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）、科学技術振興機構 戦略的創造研究推進事業 CREST「次世代エレクトロニクスデバイスの創出に資する革新材料・プロセス研究」、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。

(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。

○電子スピン

電子が本来持っている角運動量。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。

○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 ナノ粒子を用いている。

○磁気トンネルデバイス

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デバイス。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、磁気センサーや不揮発性メモリに応用される。

○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分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。

○クーロンブロック効果

ナノ粒子を介した電子の伝導において、電子間に働くクーロン力のため、すでに電子が存在するナノ粒子を別の電子が通り抜けることが出来なくなる現象。

○磁気抵抗効果

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。

○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。

○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。

(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

(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教授

(〒980-8577 宮城県仙台市青葉区片平 2-1-1)

(お問い合わせ先)

前川 禎通 (教授)

東北大学金属材料研究所 金属物性論研究部門

TEL: 022-215-2005 FAX: 022-215-2006

EMAIL: maekwa@imr.tohoku.ac.jp

家田 淳一 (助教)

東北大学金属材料研究所 金属物性論研究部門

TEL: 022-215-2009 FAX: 022-215-2006

EMAIL: ieda@imr.tohoku.ac.jp