

研究種目：特定領域研究

研究期間：2007～2010

課題番号：19048009

研究課題名（和文） 磁壁運動によるスピン流と起電力

研究課題名（英文） spin current and motive force due to domain wall motion

研究代表者

前川 禎通 (MAEKAWA SADAMICHI)

東北大学・金属材料研究所・教授

研究者番号：60005973

研究分野：物性理論，スピントロニクス

科研費の分科・細目：

キーワード：スピン流、起電力、磁化運動、磁壁、磁気渦、磁性ナノ粒子

#### 1. 研究計画の概要

近年、電子のスピン自由度を用いる、スピントロニクスが注目を集めている。スピンの流れである「スピン流」はこの中心概念を担っており、その全容の把握が求められている。本研究は、磁化の運動に伴うスピン流の生成と電流との相互変換に関する量子論的基礎を確立し、現象の解明と新機能を有する磁気デバイスの開発を目的とする。

#### 2. 研究の進捗状況

2007年、我々は強磁性体中の磁化が運動するとき、ファラデーの電磁誘導の法則が、電子のスピン自由度への影響を含む形に拡張されることを理論的に示し、一様磁場中で磁壁が運動した場合に発生する起電力の値を導出した[米国物理学会 Phys. Rev. Lett. 誌第98号に掲載]。これは、磁化運動によって起電力が生じることを量子力学的に示したはじめての研究成果であり、「スピン起電力」と称され、今日のスピントロニクスにおけるキーコンセプトの一つとなっているものである。

我々はその後の研究において、(1) スピン起電力の一般化、(2) 任意の強磁性物質・材料形状におけるスピン起電力を求める数値計算のアルゴリズムの開発、(3) 磁気ディスク中に形成される磁気渦のダイナミクスによるスピン起電力の計算、(4) 磁気渦コアの分極の情報を電場によって読み出す新しいスピントロニクスデバイスの提案、等を行っている。

#### 3. 現在までの達成度

①当初計画以上に進展している。

#### (理由)

研究開始当初、磁化運動によって生じる起電力に注目していたのは我々の他、ごく僅かの研究者に限られていた。本研究の進展に伴い、国内外の多くの研究グループが実験・理論の両面で本テーマに関心を寄せるようになり、現在スピントロニクス研究の新しい流れを生み出している。特に、本特定領域研究に参加する実験グループとの緊密な連携の下、2009年にはトンネル接合における磁性ナノ粒子の系において磁化運動に伴う起電力を実証した[英国科学誌 Nature 第458号に掲載]。この成果は、従来の1000倍以上となる巨大な磁気抵抗効果素子の原理を与え、超高感度磁気センサへの応用が期待されるなど、研究の進展に拍車をかけた。

このように、本研究は新しい物理機構の基礎的な現象理解から大規模数値計算への拡張、さらにデバイス応用にいたるまで包括的な展開をもたらしており、進展の度合い・広がりともに予想以上の成果を収めている。

#### 4. 今後の研究の推進方策

スピン起電力の大きさは、磁化構造の空間・時間微分に比例することから、急峻な構造をもった磁化が早い運動をしている場合、より大きなスピン起電力が得られると考えられる。そのような磁化の運動が得られる例として、磁気渦の運動に注目した。磁気渦構造は磁気ナノディスクで得られ、これに振動磁場を印加することで磁気コアが回転運動することが実験的にも示されている。計算により、電場はコアの運動と垂直方向に現れ、誘起される電場は kV/m と非常に大きいことが明らかになった。また、コア分極方向の違

いをスピン起電力によって読み取ることが可能であることを理論的に示し、新しいスピントロニクス素子の提案を行った。今後、本特定領域研究に参加する実験グループとの共同研究を通じて、その実証をおこなう。

#### 5. 代表的な研究成果

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 12 件)

- ① P. N. Hai, S. Ohya, M. Tanaka, S. E. Barnes, and S. Maekawa, Electromotive force and huge magnetoresistance in magnetic tunnel junctions, *Nature* 458, 489-492, (2009), 査読有.
- ② J. Ohe, S. E. Barnes, H. W. Lee, and S. Maekawa, Electrical measurements of the polarization in a moving magnetic vortex, *Appl. Phys. Lett.* 95, 123110(1-3), (2009), 査読有.
- ③ M. Yamanouchi, J. Ieda, F. Matsukura, S. E. Barnes, S. Maekawa, H. Ohno, Universality classes for domain wall motion in the ferromagnetic semiconductor (Ga, Mn)As, *Science*, 317, 1726-1729, (2007), 査読有.
- ④ S. E. Barnes and S. Maekawa, Generalization of Faraday's Law to Include Nonconservative Spin Forces, *Phys. Rev. Lett.* 98, 246601(1-4), (2007), 査読有.
- ⑤ S. Takahashi, S. Hikino, M. Mori, J. Martinek, and S. Maekawa, Supercurrent Pumping in Josephson Junctions with a Half-Metallic Ferromagnet, *Phys. Rev. Lett.* 99, 057003(1-4), (2007), 査読有.

[学会発表] (計 40 件)

- ① S. Maekawa, Spin Motive Force in Magnetic Nanostructures, NewSpin, 2010.1.7, Utrecht, Netherlands.
- ② 前川禎通, GMR(巨大磁気抵抗効果)から TMR(トンネル磁気抵抗効果)へ、日本物理学会第 64 回年次大会、2009.3.29、立教大学
- ③ S. Maekawa, Non-Local Spin Transport and Spin Motive Force in Magnetic Nanostructures, The 53rd Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials, American Center for Physics, 2008.11.13, Austin, Texas, USA
- ④ S. Maekawa, Spin Motive Force in Magnetic Nanostructures, 421st. Wilhelm and Else Heraeus Seminar on

Spin Hall Effect, 2008.10.20, Physikzentrum, Bed Honeff, Germany.

- ⑤ S. Maekawa, Tunnel Magnetoresistance, Spin Accumulation, and Spin Hall Effect, The American Physical Society March Meeting 2008, 2008.3.14, New Orleans, USA
- ⑥ S. Maekawa, Spin Current vs. Charge Current in Magnetic Nanostructures, Yukawa International Seminar 2007, 2007.11.20, Kyoto

[図書] (計 1 件)

- ① 高橋三郎、前川禎通、スピントロニクスの基礎と材料・応用技術の最前線、第 3 章「スピン注入・蓄積効果」、シーエムシー出版、28-36 (2009)。

[産業財産権]

○出願状況 (計 1 件)

名称：磁気電気エネルギー変換装置、電源装置および磁気センサ

発明者：田中雅明，ファム ナムハイ，大矢

忍，スチュワートバーンズ，前川禎通

権利者：東京大学，東北大学，スチュワートバーンズ

種類：特許

番号：PCT/JP2010/053668

出願年月日：2010年3月5日

国内外の別：国外

[その他]

ホームページ

<http://www.maekawa-lab.imr.tohoku.ac.jp>