

科学研究費補助金研究成果報告書

平成 22 年 6 月 10 日現在

研究種目：基盤研究（S）

研究期間：2005～2009

課題番号：17104005

研究課題名（和文）非対称ポテンシャルを用いたスピンドYNAMICS整流素子の作製と物性制御

研究課題名（英文）Development of the rectifying device for spin dynamics using asymmetric potential

研究代表者

大谷 義近 (OTANI YoshiChika)

東京大学・物性研究所・教授

研究者番号：60245610

研究成果の概要（和文）：

以下の3つの主要テーマについて研究を遂行し成果を得た。

1. 磁気リング構造における磁壁ペアのラチェット回転運動

本研究を通じて磁壁対のフラッシングラチェット回転運動を誘導し、二次元電子ガスの曲がり抵抗を用いて、その運動形態を検出する手法を確立した。一つの応用としてスピン誘導起電力の測定を試みたが、出力が予想より小さく検出が困難であった。本研究を通じて得られた知見を基に、素子構造の改良など今後の研究課題としたい。

2. 磁気ゲートを用いた調整可能な磁壁ピン止め素子

静磁気相互作用による磁壁ピン止めを一对の強磁性細線を用いて引き起こすゲート形状の設計と実験検証を完了した。二つの強磁性細線の磁化状態を外部磁場により平行から反平行状態に配行することにより、磁壁のピン止めに有効にすることが可能となった。この手法は磁壁のラチェット駆動や演算素子の構成要素となる可能性を示唆する。

3. スピン整流素子

スピン偏極していない電流からスピン流を取り出すスピン整流法としてスピンホール効果が有効であることを実験的に示した。効果の最適化に取り組んだ結果、スピン吸収法を用いることにより、従来半導体試料で観測されている素子と比べ1000倍大きな効果を室温で観測することに成功した。

研究成果の概要（英文）：

We have performed research projects related to 3 topics below:

1. Ratchet dynamics of paired domain walls in a magnetic elliptic ring.

We have established the flashing ratchet which induces the rotary motion of paired magnetic domain walls in an elliptic ring structure and the local magnetometry based on the bend resistance measurement of 2 DEG cross beneath the ring. Thereby we tried to detect the spin motive force as an example of application. However the magnitude of the induced current by the spin motive force was too small to experimentally detect by using the technique established in the present study. The detection remained as a future task.

2. Control of domain wall pinning by a switchable magnetic gate.

We have demonstrated experimentally and numerically a switchable magnetic gate whereby the domain wall pinning can be magnetostatically activated by altering the magnetic alignment of paired magnetic wires from parallel to antiparallel. This magnetic gate could be a building block of the domain wall ratchet and logic devices.

3. Spin rectifying device.

We have demonstrated that spin rectification from unpolarized to polarized spin currents by using the spin Hall Effects. After optimizing the spin absorption technique applied to the lateral spin valve structure, we succeeded in observing at room temperature the spin Hall Effect in a platinum nano-wire which is 1000 times larger

than the effect observed in semiconductors.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2005年度	29,900,000	8,970,000	38,870,000
2006年度	14,500,000	4,350,000	18,850,000
2007年度	5,700,000	1,710,000	7,410,000
2008年度	6,100,000	1,830,000	7,930,000
2009年度	5,400,000	1,620,000	7,020,000
総計	61,600,000	18,480,000	80,080,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・物性Ⅱ

キーワード：金属スピントロニクス、金属ナノ磁性、スピントロニクスデバイス研究に新しい方向付けを行う。

1. 研究開始当初の背景

生体系に特徴的な分子モーターの基本原則を応用した固体素子の実験研究は、世界的に見ても最近目覚ましい発展を遂げている。しかしながら、多くの研究はマイクロな微粒子の力学的な運搬制御、イオンポンプ、電子または磁束量子の運動制御に集中している。本研究プロジェクトでは、電子スピンやナノ磁壁に着目し、ポテンシャルラチェットの原理を他に先駆けて適用することによりスピントロニクスデバイス研究に新しい方向付けを行う。

2. 研究の目的

(1) ナノ磁壁の運動方向に対して非対称なポテンシャルを導入することにより、振動磁場に対して一方向へ伝播する磁壁ラチェット素子の実現を目指す。

(2) スピン拡散長の長い金属素子に非対称なスピン散乱因子を導入することにより、振動電場に対して一方向へスピン流を生成するスピン流ラチェット素子の実現を目指す。

3. 研究の方法

(1) 本プロジェクトで購入したマイクロカー装置を用いてナノスケール領域の局所磁化測定を行い、磁性細線内の磁壁の核発生過程、あるいはナノ磁気リングの磁化過程を詳細に測定した。この結果を次節以降で述べる2次元電子ガス十字構造の曲がり磁気抵抗と比較して磁化過程との詳細な対応を調べた。

4. 研究成果

(1) 高感度磁壁運動検出法の開発

まず、我々は半導体二次元電子ガスのバリスティックな伝導特性を用いた微小磁性素子中の磁壁運動を検出する手法を開発した。二次元電子ガス十字構造の抵抗（曲がり抵抗）は、十字構造内における磁性体からの漏れ磁場の空間分布に対応した変化を示す。我々

は直径1ミクロン程度の磁気リング・ディスクにおける磁化過程を曲がり抵抗測定により明瞭に測定できることを示し、シミュレーションにより振る舞いを再現した。この手法は他にないユニークなものであり、非常に有効な磁壁運動の検出手段である [8]。

(2) 楕円リングにおける磁壁ラチェット駆動

磁壁の感じるポテンシャルエネルギーは細線の幅や曲率で変化するため、楕円リングにおいては磁壁の安定点・不安定点が存在する。ここに外部から振動磁場を重畳すると、楕円リング中の磁壁ペアが決まった向きに回転する。これはフラッシングラチェットによる整流機構に対応する。回転方向は振動磁

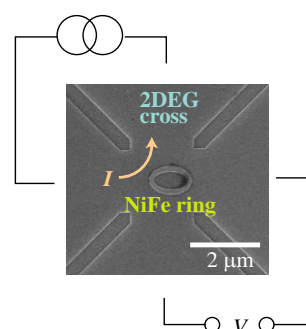


図1: 二次元電子ガス十字構造の曲がり抵抗測定端子配置及び磁壁ペアの回転制御を行った楕円リング。

場の角度により制御できる。楕円磁気リングを半導体二次元電子ガス十字構造上に作製し、交流磁場に対する磁壁ペアの振る舞いを調べたところ、磁壁ペアが特定方向に回転していることが分かった。この磁気素子中では外部揺らぎ（振動磁場）を特定方向への磁壁回転運動に変換しており、将来の磁気デバイスへ向けた概念的に新しい基礎技術としてインパクトを与えるものと考えている[4]。

(3) 磁気ゲートによる磁壁ピン止め制御

二本の磁性細線を垂直に近接させることにより、細線中の磁壁に対して実効的なポテンシャルを導入することを試みた。(1)で開発した曲がり抵抗測定手法を用いて、磁気的な相互作用によりピン止めができるかどうかを調べた。磁性細線ペアが反平行磁化配置の方が平行配置より有意にピン止めが強いことが分かり、シミュレーションにより解析を行った。制御可能な新しい磁壁ピン止め手法として、応用上重要な発見である[7]。

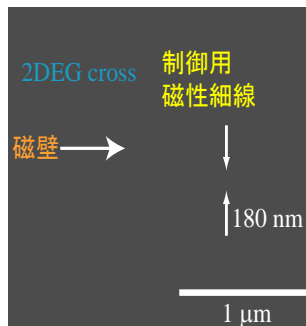


図2: 左側から注入される磁壁が制御用磁性細線ペアの間隙にトラップされる。ピン止めの強さは磁化配置により制御可能。

(4) 磁壁ピン止め離脱の制御

楕円リングにおける磁壁ペアは振動磁場に対して対を成して同期した回転をすることが期待されるが、実際の試料においては必ず非対称性が存在するためにピン止め離脱に時間差に起因する磁壁の衝突による対消滅が起こる。この対消滅を避けるためのパルス磁場印加タイミングの条件を実験的に求めた。この条件は(2)の楕円リングの実験に有用であり、GHz帯の高周波磁場の印加により磁壁ペアの連続回転振動を誘導することが可能であることを示唆する[2]。

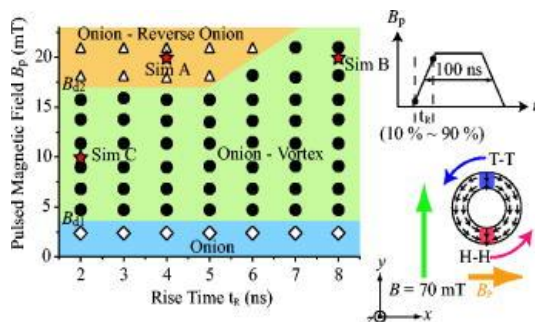


図2: 磁化反転様式の印加磁場強度及び立ち上がり時間依存性。图中△はオニオンから反転オニオン、●はオニオンから渦、◇は無変化を示す。右上の内装図は印加磁場パルスの形(と定常磁場(緑)とパルス磁場(黄)の印加方向)。

(5) スピン流制御法の開発

拡散伝導から生じるスピン流の制御法に主眼を置き研究を遂行した。スピン緩和の難易度の指標であるスピン抵抗を考慮することにより、3次元的にスピン流回路を設計する手法を確立した。このデザイン手法を用いて作製したスピン流注入素子を用いてナノ磁性体の磁化反転[9]、磁壁の核発生[6]、スピンホール効果[1, 3]の検証実験に世界に先駆けて成功した。

5. 主な発表論文等

(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10件)

- ① "Evolution of the spin Hall effect in Pt nanowires: Size and temperature effects," L. Vila, T. Kimura and Y. Otani, *Phys. Rev. Lett.* **99**, 226604-1~4 (2007).
- ② "Controlled depinning of domain walls in a ferromagnetic ring circuit," M. Hara, T. Kimura and Y. Otani, *Appl. Phys. Lett.* **90**, 242504-1~3 (2007).
- ③ "Room temperature reversible spin Hall effect," T. Kimura, Y. Otani, T. Sato, S. Takahashi and S. Maekawa, *Phys. Rev. Lett.* **98**, 156601-1~4 (2007).
- ④ "Rotational dynamics of paired nano-domain walls confined in an elliptical ring," M. Hara, J. Shibata, T. Kimura and Y. Otani, *J. Magn. Magn. Mater.* **310**, 2451~2452 (2007).
- ⑤ "Magnetization process in a ferromagnetic disk measured by a semiconductor two-dimensional electron gas," M. Hara and Y. Otani, *J. Appl. Phys.* **101**, 056107-1~3 (2007).
- ⑥ "Domain wall nucleation assisted by nonlocal spin injection," T. Kimura and Y. Otani, *J. Phys. D: Appl. Phys.: Special Issue* **40**, 1285~1288 (2007).
- ⑦ "Control of domain wall pinning by a switchable magnetic gate," M. Hara, J. Shibata, T. Kimura and Y. Otani, *Appl. Phys. Lett.* **89**, 192504-1~3 (2006).
- ⑧ "Detection of magnetic state in a nanoscale ferromagnetic ring by using ballistic semiconductor two-dimensional electron gas," M. Hara, J. Shibata, T. Kimura and Y. Otani, *Appl. Phys. Lett.* **88**, 082501-1~3 (2006).
- ⑨ "Switching magnetization of nanoscale ferromagnetic particle using nonlocal spin injection," T. Kimura, Y. Otani and J. Hamrle, *Phys. Rev. Lett.* **96**, 037201-1~4 (2006).

[学会発表] (計 5 件)

- ① "Spin currents, spin dynamics and spin Hall effect in metallic nanostructures(invited)," **Y. Otani**, IEEE MML 2007, University of Western Australia, Perth, Australia, October 2007.
- ② "Switching behaviors of Co nano-rings in the current-perpendicular-to-plane configuration," T. Yang, A. Hirohata, M. Hara, T. Kimura and **Y. Otani**, APS March Meeting, Denver, USA, March 2007.
- ③ "Spin Hall effect in metallic systems (invited)," **Y. Otani**, ATI International workshop & IFCAM International workshop on Spin currents, Sendai, February 2007,
- ④ "Magnetic interactions in nano-materials (invited)," **Y. Otani**, 1st Annual Symposium on Japanese-French Frontiers of Science, Fujisawa, January 2007.
- ⑤ "Manipulation of magnetization and domain walls by non-local spin injection (invited)," T. Kimura and **Y. Otani**, 378th WE-Heraeus-Seminar Spin Torque in Magnetic Nanostructures, Physikzentrum Band Honnef, Germany, October 2006.
- ⑥ "Spin current manipulation and spin transfer effect in lateral spin valve devices (invited)," **Y. Otani** and T. Kimura, The International Workshop on Spin Transfer (IWST 2006), Nancy, France, October 2006.
- ⑦ "Rotational dynamics of paired nano-domain walls confined in an elliptical ring," M. Hara, J. Shibata, T. Kimura and **Y. Otani**, International Conference on Magnetism (ICM2006), Kyoto, August 2006.
- ⑧ "Domain wall nucleation assisted by non-local spin injection," T. Kimura and **Y. Otani**, 19th International Colloquium on Magnetic Films and Surfaces (ICMFS2006), Sendai, August 2006.
- ⑨ "Controllable domain wall pinning by an adjustable magnetic gate," M. Hara, J. Shibata, T. Kimura and **Y. Otani**,

19th International Colloquium on Magnetic Films and Surfaces (ICMFS2006), Sendai, August 2006.

- ⑩ "Manipulation of spin-current accumulation and spin transfer in lateral geometries (invited)," **Y. Otani**, 3rd Joint European Magnetic Symposia (JEMS06), San Sebastian, Spain, June 2006.
- ⑪ "Spin-current absorption and torque effects in lateral geometries (invited)," **Y. Otani**, 5th International Workshop on Surface Interface and Thin Film Physics, Shanghai, China, May 2006.
- ⑫ "Spin-transfer induced magnetization reversal in lateral devices (invited)," **Y. Otani**, Workshop on the latest developments in spin currents in metals and semiconductors, San Jose, USA, March 2006.
- ⑬ "Spin-torque effects due to pure spin currents in lateral geometries (invited)," **Y. Otani**, APS March Meeting, Baltimore, USA, March 2006.
- ⑭ "Manipulation of the magnetic state of a small ferromagnetic particle by means of non-local spin-injection techniques," **Y. Otani** and T. Kimura, 50th Magnetism and Magnetic Materials Conference, San Jose, USA, October 2005.
- ⑮ "Magnetization reversal of ferromagnetic nano-dot by non local spin injection," **Y. Otani** and T. Kimura, 8th International Symposium on Foundations of Quantum Mechanics in the Light of New Technology (ISQM-Tokyo'05), Hatoyama, Japan, August 2005.

[図書] (計 1 件)

- ① 大谷義近, 他, 培風館, 21 世紀の物質科学, 2008, 95

[その他]

ホームページ等

<http://www.riken.jp/lab-www/nanomag/indexjpn.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

大谷 義近 (OTANI YOSICHIKA)
東京大学・物性研究所・教授
研究者番号：60245610

(2) 研究分担者

木村 崇 (KIMURA TAKASHI)
研究者番号：80360535
(H17→H19)
東京大学・物性研究所・助教
(H20→H21)
九州大学・稲盛フロンティア研究センター・教授
ハムル・ヤロスラフ (HAMRLE JAROSLAV)
研究者番号：90392167
理化学研究所・フロンティア研究システム・研究員
(H17→H18)
原 正大 (HARA MASAHIRO)
研究者番号：90392167
理化学研究所・フロンティア研究システム・研究員
(H18→H19)
ノリ フランコ (NORI FRANCO)
理化学研究所・フロンティア研究システム・チームリーダー
研究者番号：50415262

(3) 連携研究者

原 正大 (HARA MASAHIRO)
研究者番号：90392167
熊本大学・大学院自然科学研究科・准教授
(H20→H21：連携研究者)
ノリ フランコ (NORI FRANCO)
研究者番号：50415262
理化学研究所・基幹研究所・チームリーダー
(H20→H21：連携研究者)