

機関番号：82110

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2008～2010

課題番号：20740182

研究課題名（和文） 乱れのある系における電流誘起磁壁移動

研究課題名（英文） Current-induced domain wall motion in disordered systems

研究代表者

家田 淳一（JUNICHI IEDA）

独立行政法人日本原子力研究開発機構・先端基礎研究センター・任期付研究員

研究者番号：20463797

研究成果の概要（和文）：サブミクロン領域の強磁性体における磁壁の電流駆動に関して、素子表面の乱れの効果のモデル化と時間発展方程式の数値解析、及び強磁性体素子の形状効果とそれによる磁壁運動の制御に関する理論的研究を行い、より効率的な電流誘起磁壁移動を実現するための指針を与える。

研究成果の概要（英文）：Current-induced domain wall motion in submicron regime ferromagnets is theoretically studied by taking account of effects arising from various types of disorder in magnetic media.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2009年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2010年度	1,000,000	300,000	1,300,000
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

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：磁性、磁気ナノ構造、磁壁、スピン流、スピントルク、形状効果、クリープ運動

1. 研究開始当初の背景

磁気メモリーは、電源を切っても蓄えた内容を保持する不揮発性と大容量性を兼ね備えたメモリーとして大きな期待を集めている。現在これらの素子中の磁化方向は、外部から磁界を加えることで制御されている。しかし、磁界を用いた磁化方向制御には大容量化に限界がある。そのため、それに代わる電氣的な制御法により、記憶容量の増大、低消費電力化、高速化の実現が期待されている。

磁化方向を電氣的に制御する一つの有力な方法として「電流誘起磁壁移動」があげられる。磁壁とは、強磁性体内にある隣接した磁区同士の境界領域のことで、一定の幅を持ち、その中で磁化を担うスピンの向きが一つの磁区のスピンの方向から隣接磁区のスピンの向きへと角度を変えながら遷移する。近

年、磁性体に直接電流を流すことにより磁壁が移動し、磁化方向の制御が可能であることが実証された[Yamanouchi *et al.*, *Nature* 428, 539 (2004); Yamaguchi *et al.*, *PRL* 92, 077205 (2004); Saitoh *et al.*, *Nature* 432, 203 (2004); Klaui *et al.*, *PRL* 94, 106601 (2005); Hayashi *et al.*, *PRL* 96, 197207 (2006)]。磁界による磁化制御に比べて、低消費電力化が期待できるため、基礎研究だけでなく、応用研究も盛んに行われている。しかし、電流と磁壁の相互作用には様々な効果が寄与するため、不明な点が数多く残されており、今なお活発な議論の対象となっている。

その一つとして、形状を人為的に変調させた非一様な磁性金属細線にパルス電流を印加した場合、一様細線の場合とは逆方向に動く磁壁の報告がなされた。印加電流のパルス

幅が数ナノ秒であることから、熱的な揺らぎの効果は小さく、通常のスピ角運動量移行のみでは説明がつかない現象である。

2. 研究の目的

本研究では、強磁性ナノ構造体における磁壁の電流駆動に関して、素子表面の乱れの効果のモデル化と形状効果による磁壁運動の制御に関する理論的研究を行い、より効率的な電流誘起磁壁移動を実現するための指針を明らかにする。特に、強磁性金属系における磁性細線形状の変調（乱れ）が電流誘起磁壁運動に与える影響を詳しく調べる。また、乱れのある磁性細線中の磁壁運動に伴うスピ起電力の解析にも研究の範囲を広げる。

3. 研究の方法

磁壁のエネルギーが磁性細線の断面積に依存するため、空間的に非一様な細線中では、磁壁はそのエネルギー勾配に応じた圧力的作用を受ける。この効果を位置に依存した有効磁場として取り扱う手法を提案した。この形状効果を磁壁の集団座標の方法に取り込んだ次元モデル、及び二次元モデルを開発し、シミュレーションを行った。さらに、マイクロマグネティックシミュレーションによるより詳細な解析を元に、非一様細線中の磁壁運動に伴うスピ起電力の数値計算も行った。

4. 研究成果

(1) 非一様細線の有効磁場モデルと磁壁運動

一般に断面積が A の磁性細線中で磁壁のエネルギーは $V_{DW} \approx \sigma_0 A$ で与えられる。ここで、 $\sigma_0 = (A_s K_u)^{1/2}$ は交換ステイフネス A_s 、一軸磁気異方性 K_u によって定められる磁壁面の表面張力を表す。この結果、 $A(q)$ のように断面積が磁壁位置 q に依存する細線では、磁壁のエネルギーは磁壁位置の関数となる。図 1(a) に示すような細線の幅が周期 λ で変調する場合、上述のエネルギー V_{DW} は図 1(b) のようになる。このとき磁壁はエネルギー勾配に応じた力の作用を受け運動する。磁壁に作用する力は等価な磁場に置き換え可能であるから、形状の効果による有効磁場として、 $H_{shape} = -(\sigma_0 / 2M_s)(d/dq) \log A(q)$ (1) を得る (σ_0 は定数とした)。

磁壁運動を記述する集団座標の運動方程式に(1)を代入して、電流パルス（固定パルス幅 t_p ）による磁壁の最終位置 q_f の計算を行った結果が図 1(c) である。電流密度 j の増加に伴ってピン止め ($q_f = 0$)、散乱 ($q_f = \{2\lambda, \lambda, 0, -\lambda\}$)、電流追従 ($q_f \propto jt_p$) という特徴的な磁壁運動の振る舞いが確認できた。

京都大学化学研究所の谷川らは図 1(a) のように形状を人為的に変調させたパーマロイ細線を作成し、パルス電流による磁壁駆動実

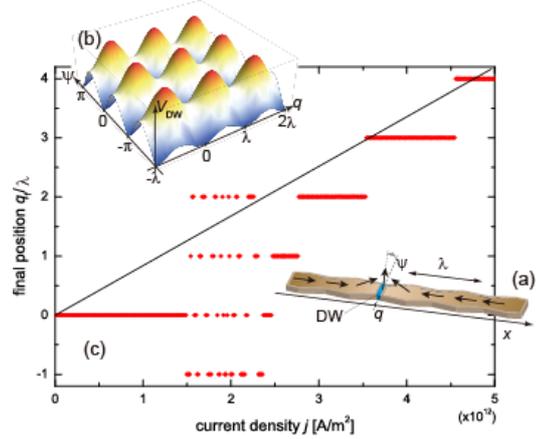


図 1：非一様細線中の電流誘起磁壁移動。(a)周期 λ の変調を伴う磁性細線。 q 、 ψ はそれぞれ磁壁(DW)の位置と磁化の立上がり角。(b)非一様細線中の磁壁エネルギー V_{DW} 。(c)磁壁移動 q_f の電流パルス依存性。

験を行った。観測された磁壁の位置は角運動量保存則から導かれるスピ移行トルクによる磁壁移動の予測に対して、順方向、逆方向への変位、または静止のいずれかにほぼランダムに分布していた。この現象は、本研究で得られた細線の非一様性がもたらす有効磁場モデルの解析により、上述の散乱領域に対応した磁壁運動であると理解される。

(2) 非一様細線中の磁壁運動とスピ起電力

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す。一方、強磁性体中では、磁化の空間的・時間的変動に応じて電子のスピにも力が作用する。このスピを直接駆動する作用を「スピ起電力」といい、これまでに一様な強磁性細線中の磁壁移動、磁性ナノ粒子を介した磁気トンネル接合、強磁性円盤中の磁気渦運動等においてその観測が報告されている。以上の例では、いずれも外部磁場が磁化運動を引き起こしている。本研究では形状効果を応用することで、外部磁場の印加を必要としない、磁壁内部に蓄えられた磁気エネルギーから電気エネルギーへの変換を可能にする磁性素子を提案し、その発生起電力特性を検証する予備的な数値シミュレーションを実施した。

2カ所のくびれを持つ強磁性細線(図 2a)において、初期状態として左のくびれに磁壁を配置し、パルス磁場によって磁壁を細線中央まで移動させれば、上記式(1)の形状効果により磁壁は外部磁場が無い状況下でも自発的に右のくびれまで移動する。計算にはパーマロイ細線のパラメータを用いて、形状勾配による磁壁移動とそれに伴うスピ起電力を数値計算により定量的に解析した。その結果、

これまでに報告されている外部磁場によるスピン起電力の5倍以上の信号強度が観測可能であることを明らかにした。今後は、細線の厚さ・細線幅、また物質に対するスピン起電力の依存性も含め系統的な計算を継続して行い、大きな信号を得るために効果的な実験状況について検討する。

(3)まとめ

磁壁の電流駆動現象に対し、細線形状が一般に非一様な場合の取り扱いを可能とする有効モデルを確立した。そのモデルを用いることで、電流パルスに対する磁壁の非線形な応答の起源を解明した。さらに、非一様細線中の磁壁移動によるスピン起電力の数値解析を行い、これまでに報告された実験結果を

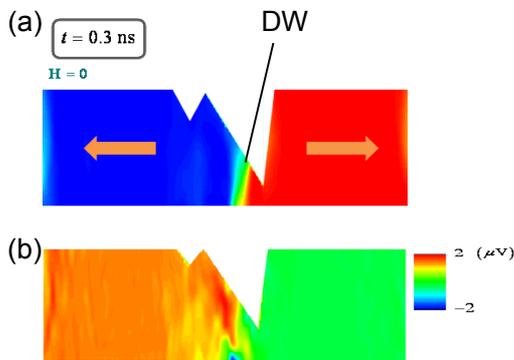


図2：非一様細線中の磁壁移動とスピン起電力の電位分布。(a)磁性細線の形状勾配を利用した無磁場下での磁壁(DW)移動のスナップショット。(b)磁化運動に伴うスピン起電力の電位分布。運動する磁壁に対応した箇所電圧変化($\sim 2\mu\text{V}$)が生じている。

大きく上回るスピン起電力の検出が可能であることを理論的に予言した。

以上のように、本研究では磁壁運動の基礎理論から、それによるスピン起電力の応用研究までを一貫して行うことができ、当初の目標を十分に達成している。

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5件)

- ① 前川禎通、家田淳一、「巨大磁気抵抗効果(GMR)からトンネル磁気抵抗効果(TMR)へ」、日本物理学会誌、査読有(依頼原稿)、**65**、2010、324-330
- ② Y. Yamane, J. Ieda, J. Ohe, S.E. Barnes, and S. Maekawa, “Equation-of-motion approach of spin-motive force,” *Journal of Applied Physics*, 査読有, **109**, 2011, 07C735(1-3)

- ③ J. Ieda, H. Sugishita, S. Maekawa, “Current-induced domain wall motion in magnetic nanowires with spatial variation,” *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 査読有, **322**, 2010, 1363-1367
- ④ J. Ieda, S. Maekawa, and S. E. Barnes, “Current-Induced Domain Wall Creep in Magnetic Wires,” *Proceedings of the ISQM-Tokyo’08*, 査読有, 2009, 134-137
- ⑤ 家田淳一、前川禎通、「ナノ構造磁性体における磁壁ダイナミクスの理論」、まぐね、査読無(依頼原稿)、**4**、2009、384-389

[学会発表] (計12件)

- ① 山根結太、家田淳一、大江純一郎、前川禎通、「細線形状効果による磁壁運動とスピン起電力(2)」、日本物理学会第66回年次大会、2011年3月25日、新潟(新潟大学)
- ② 山根結太、家田淳一、大江純一郎、前川禎通、「細線形状効果による磁壁運動とスピン起電力」、特定領域研究スピン流の創出と制御 平成22年度成果報告会、2011年1月6日、東京(東京大学)
- ③ 山根結太、家田淳一、大江純一郎、前川禎通、「細線形状効果による磁壁運動とスピン起電力」、日本物理学会2010年秋季大会2010年9月24日、大阪(大阪府大)
- ④ J. Ieda, “Electric detection of spin wave resonance using inverse spin-Hall effect,” *Joint European Magnetic Symposia (JEMS2010)*, 2010年8月25日, Krakow, Poland
- ⑤ J. Ieda, H. Sugishita, S. Maekawa, “Vortex Domain Wall Motion in Disordered Nanowires,” *The 4th International Workshop on Spin Currents*, 2010年2月8日, Sendai, Japan
- ⑥ 家田淳一、杉下裕樹、前川禎通、「周期的な線幅変調を伴う磁性細線中の電流誘起磁壁運動」、特定領域研究 スピン流の創出と制御 平成21年度成果報告会、2010年1月13日、東京(東京大学)
- ⑦ J. Ieda, H. Sugishita, S. Maekawa, “Dynamics of vortex domain wall in Permalloy nanowires,” *The 20th International Colloquium on Magnetic Films and Surfaces*, 2009年7月20日, Berlin, Germany
- ⑧ 杉下弘樹、家田淳一、前川禎通、「非一様細線における電流誘起磁壁運動(II)」、日本物理学会第64回年次大会、2009年3月27日、東京(立教大学)
- ⑨ J. Ieda (招待講演), “Current-induced domain wall motion in inhomogeneous

nanowires,” ”International Workshop
Spin Transport in Condensed Matter,
2008年11月4日, Kyoto, Japan

- ⑩ 杉下弘樹、家田淳一、前川禎通、「非一様細線における電流誘起磁壁運動」、日本物理学会2008年秋季大会、2008年9月21日、盛岡（岩手大学）
- ⑪ J. Ieda（招待講演），“Domain wall motion in variable-shaped magnetic wires,” The Joint European Magnetism Symposia, 2008年9月18日, Dublin, Ireland
- ⑫ J. Ieda, “Current-Induced Domain Wall Creep in Magnetic Wires,” ISQM-TOKYO’08, 2008年8月25日, Saitama, Japan

〔図書〕（計1件）

- ① Jun'ichi Ieda, Miki Wadati, IN-THEC, *Nonlinear Dynamics* (Chapter 2), 2010, 28 pages

〔その他〕

ホームページ等

<http://asrc.jaea.go.jp/soshiki/gr/mori-gr/index.html>

6. 研究組織

(1)研究代表者

家田 淳一 (JUNICHI IEDA)

独立行政法人日本原子力研究開発機構・
先端基礎研究センター・任期付研究員
研究者番号：20463797

(2)研究分担者

なし

研究者番号：

(3)連携研究者

なし

研究者番号：