

平成 22 年 5 月 28 日現在

研究種目： 若手研究 (B)

研究期間： 2007～2009

課題番号： 19760210

研究課題名 (和文) スピン流分布を制御した磁壁移動型デバイス

研究課題名 (英文) Domain wall motion devices by controlling spin current distribution

研究代表者

小峰 啓史 (KOMINE TAKASHI)

茨城大学・工学部・准教授

研究者番号： 90361287

研究成果の概要 (和文)：

スピン流分布を取り込んだマイクロマグネティックシミュレーションを用いて、磁性細線における磁壁電流駆動を研究した。その結果、面内磁化ナノワイヤにおける切り込み形状、パルス電流が閾値電流に及ぼす影響を明らかにした。また、垂直磁化ナノワイヤにおけるマルチビット転送を検討し、ナノワイヤメモリ実現のための新たな課題を明らかにした。

研究成果の概要 (英文)：

We developed the micromagnetic simulation including non-uniform spin current distribution, and investigated current-induced domain wall motion in a nanowire. As a result, in an in-plane magnetization nanowire, the influences of notch shape and pulse current on the critical current density driving domain wall motion were clarified. Moreover, the multi-bit motion in a nanowire with perpendicular magnetic anisotropy was demonstrated, and a new issue to realize a nanowire memory was suggested.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	900,000	0	900,000
2008 年度	600,000	180,000	780,000
2009 年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	2,100,000	360,000	2,460,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学 電子デバイス・電子機器

キーワード：スピン流分布、マイクロマグネティクス、磁性ナノワイヤ、磁壁移動

## 1. 研究開始当初の背景

近年、スピンの直接注入もしくは角運動量交換によるスピン制御型デバイスが盛んに研究されている。磁性体を用いた不揮発性メモリである磁気ランダムアクセスメモリ (MRAM) は、車載用メモリとして期待され、

実用化検討されているが、磁場書き込み型 MRAM は微細化に伴って書き込みに必要な電流密度が増加することが懸念されている。スピン注入書き込みはメモリセルの微細化に対応できる技術として期待されている。電流によるスピン直接駆動の研究は、スピン注入

を用いた MRAM, スピントランジスタ, マイクロ波発振, 磁壁移動型メモリなど多岐にわたる. これらは, 伝導電子の角運動量とスピン角運動量の運動量交換に基づいており, 電流が発生する磁場でスピンを制御する従来技術とは異なる.

スピントルクによる磁壁移動型デバイスとしては, Parkin によって提案されたシーケンシャルアクセスメモリである Magnetic Race-Track Memory が挙げられる. 磁壁移動型メモリは, 電流によるスピン駆動を用いたメモリであり, スピンの電流駆動および 3 次元構造を利用するアイデアは興味深く, 構造の工夫によって新しい論理素子の可能性を秘めている. しかし, 提案された磁壁移動型メモリは, 磁壁幅によってメモリ密度が制限されること, 情報安定保持のための機構が備わっていないこと, など提案された形状のままでは実用化するのは難しいが, 様々な形状や組合せにより実現可能かを検討する意義はある. さらに, 磁壁移動が起こるために必要な閾値電流密度が大きいという問題がある. 磁壁移動型デバイスの動作は電流密度のみならず磁壁構造にも敏感であることから, デバイス形状を工夫することによって電流密度の低減, 安定動作が実現する可能性がある.

## 2. 研究の目的

本研究では, スピン流分布を考慮したマイクロマグネティックシミュレーションを開発し, 磁性体形状を制御することで, 低電流動作, 高密度化を目指した磁壁移動型デバイスを検討することを目的とする.

## 3. 研究の方法

電流による磁壁駆動を計算するため, スピントランスファートルクを考慮した Landau-Lifshitz-Gilbert 方程式

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{M}} &= -\gamma \mathbf{M} \times \mathbf{H}_{\text{eff}} + \frac{\alpha}{M_s} \mathbf{M} \times \dot{\mathbf{M}} \\ &\quad - b_J (\mathbf{J}_e \cdot \nabla) \mathbf{M} + c_J \mathbf{M} \times (\mathbf{J}_e \cdot \nabla) \mathbf{M} \\ b_J &= \frac{\mu_B P}{e M_s}, c_J = \beta b_J \end{aligned}$$

を用いた. 第 3 項, 第 4 項はスピントランスファートルクの断熱項及び非断熱項である. 各項での電流密度分布  $\mathbf{J}_e$  を陽に書いた. 計算に用いた物性値は, 飽和磁化  $800 \text{ emu/cm}^3$ , 交換スティフネス定数  $1.0 \times 10^{-6} \text{ erg/cm}$ , Gilbert のダンピング定数  $\alpha$  を  $0.02$ , スピン分極率を  $1$  とした. また, 切り込みの影響を調べる際には, 内在的ピン止め効果の議論を明確にするため, スピントランスファートルクの非断熱項  $c_J$  は  $0$  とした.

計算に用いた磁性細線の代表的なモデルを Fig.1 に示す. 磁性細線は, 幅  $48 \text{ nm}$ , 厚さ  $5 \text{ nm}$  として, 長手方向に  $1000 \text{ nm}$  の計算領域を準備し,  $4 \times 4 \times 5 \text{ nm}^3$  のセルに分割して離散化した. 磁性細線は無限に長いものとなし, 静磁場の計算において長手方向端部に磁極が現れないようにした. 磁壁は細線の中心に配置されている Transverse wall (TW) を想定した. この細線サイズでは, TW が安定構造として存在する. TW を横切るように細線の長手方向左向きに電流を流した. したがって, Fig.1 に示す右向きに電子が流れ, スピントランスファートルクにより磁壁は右向きの推進力を受ける. また, Fig.1 のように細線の端部に V 字型の切り込みを入れた. V 字型の切り込みは, 高さ  $d_N$ , 底辺  $2d_N$  の直角二等辺三角形に含まれるセルを切り抜いた凹凸形状により表現した. このとき, V 字型の切り込みによって発生する非一様電流が磁壁移動に与える影響を調べた.

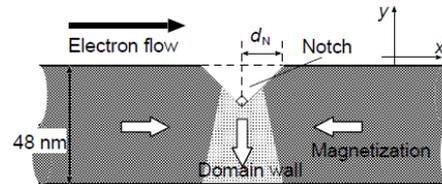


Fig.1 Calculation model

切り込みがある細線中の電流密度分布を以下のようにして求めた. Fig.2 のように計算セルの間が抵抗でつながれている回路を考える. Fig.2 のように切り込みがある場合, セル間に流れる電流が分布する. 本研究では離散化したセル間の抵抗が磁化によらないものと仮定した. 端部における電流密度  $J_{\text{edge}}$  を与えて, LLG 計算の初めに回路方程式を解き, 電流分布を求めた.

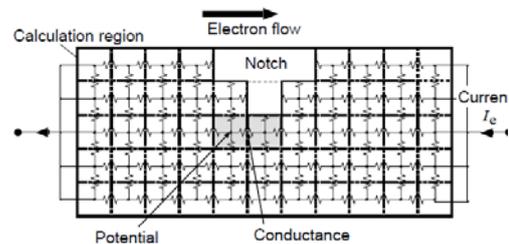


Fig.2 Electric circuit model for calculating the current density in a magnetic strip with a notch.

## 4. 研究成果

(1) 切り込み形状が磁壁移動に及ぼす影響  
切り込みのあるナノワイヤにおいて, 電流密度を変えて, 磁壁移動をシミュレートした

結果を Fig.3 に示す. 磁壁移動モードは, 3種類に分けて考えることが出来る. 1つ目は, 磁壁が切り込みの周りを振動しながら停止する場合, 2つ目は, 切り込みから磁壁がデピニングするが, しばらくすると停止する場合, 3つ目は切り込みの影響を受けずに磁壁が移動し続ける場合である.

本研究では, 磁壁の振動現象を通じて, 磁壁ピン止めの効果を議論した. 切り込みの大きさを変えて, 磁壁振動の振動スペクトルを計算した結果が Fig.4 である. 各磁壁振動には固有振動数が存在することがわかる. また, 切り込みが大きくなるにしたがって, 固有振動数が高くなることがわかる.

固有振動数と磁壁移動に必要な閾値電流を対比させたものが Fig.5 である. これをみると, 切り込みの大きさと閾値電流が対応していることが明らかである. 本研究で開発したスピン流分布を考慮したシミュレーションによって, このような現象の定量的な理解が可能になった. さらに, 磁壁固有振動数と対応するパルス電流を印加することで閾値電流が低減できることを見出した.

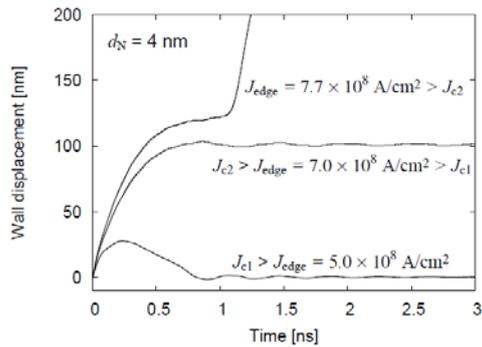


Fig.3 Domain wall displacement as a function of time after inducing a current. The notch size is 4 nm.

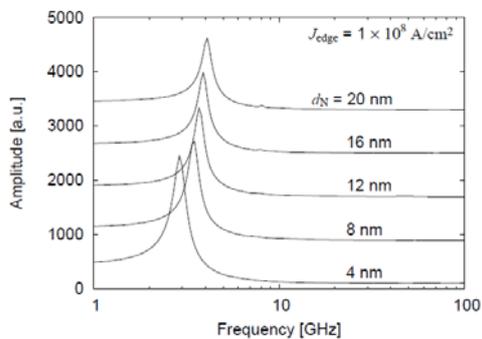


Fig.4 Wall vibration spectra for various current densities. The current density at the edge is  $1.0 \times 10^8 \text{ A/cm}^2$ .

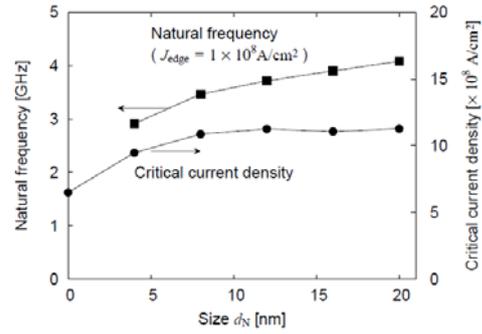


Fig.5 Notch size dependence of the critical current density and the natural frequency in a magnetic strip with a notch of 12 nm depth.

## (2) 垂直磁化ナノワイヤを用いたマルチビット転送

磁壁移動に必要な閾値電流は, 磁壁幅に比例することが研究の過程で明らかになった. 磁壁幅は, 面内磁化ナノワイヤよりも垂直磁化ナノワイヤの方が一般的に狭いため, 低電流化, 高密度化の観点から望ましい. 本研究では, 垂直磁化ナノワイヤに複数ビットがある場合の磁壁移動を検討した. Fig.6 に示すように計算領域に複数ビットを配置して, 磁壁電流駆動を計算した.

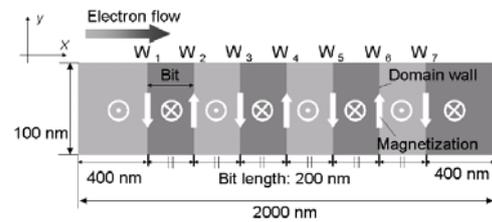


Fig.6 Calculation model of a multi-bit with six bits and seven domain walls in a nanowire with perpendicular magnetic anisotropy.

その結果, 複数磁壁の移動において, 磁壁間隔(ビット長)がほとんど変化せずに移動し続ける場合, ビット長が大きく変動し, 場合によっては磁壁が消失することがあることがわかった. 異なる磁壁移動モードの解析を詳細に行ったところ, 単一磁壁の磁壁移動モードの違いとほとんど対応していることが分かった. Fig.7 にその状態図を示す. 磁壁移動モードが非断熱項係数及び電流密度で決まっており, 磁壁を安定に動作させるためのパラメータ範囲を明らかにした.

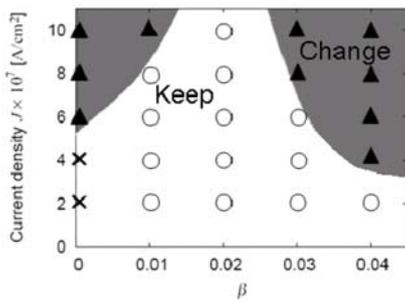


Fig.7 Wall motion of a multi-bit for various current densities and non-adiabatic spin torque parameters.

## 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 25 件)

- (1) H. Murakami, T. Komine and R. Sugita, "Micromagnetic analysis of current-driven domain wall motion of multi-bit in a nanowire with perpendicular magnetic anisotropy", J. Phys. Conf. Ser. Vol. 200, 042018/pp.1-4, 2010. (査読あり)
- (2) T. Komine, T. Murakoshi, Y. Tanaka, Y. Sakaguchi, and R. Sugita, "Micromagnetic study of magnetic printing onto various slave media", J. Phys. Conf. Ser. Vol. 200, 102004/pp.1-4, 2010. (査読あり)
- (3) H. Murakami, T. Komine and R. Sugita, "Effect of Non-Adiabatic Spin Torque Parameter on Domain Wall Motion Driven by Pulse Current in a Magnetic Nanowire", IEEE Trans. Magn. vol. 45, iss. 10, pp.3812-3815, 2009. (査読あり)
- (4) N. Sheeda, M. Nakazawa, H. Konishi, T. Komine and R. Sugita, "Perpendicular anisotropy master medium in magnetic printing for writing high density printing servo signal", IEEE Trans. Magn. vol. 45, iss. 10, pp.3676-3678, 2009. (査読あり)
- (5) 村上宏, 小峰啓史, 杉田龍二, "磁性細線における磁壁移動の電流パルス波形依存性", J. Magn. Soc. Jpn. vol. 33, no. 3, pp. 232-236, 2009. (査読あり)
- (6) T. Komine, H. Murakami, T. Nagayama and R. Sugita, "Influence of Notch Shape and Size on Current-Driven Domain Wall Motions in a Magnetic

Nanowire", IEEE Trans. Magn. vol. 44, iss. 11, pp. 2516-2518, 2008. (査読あり)

- (7) T. Komine, T. Murata, Y. Sakaguchi, Y. Hosoya, N. Sheeda Suhaimi, and R. Sugita, "Feasibility of Perpendicular Magnetic Duplication at 1Tbit/inch<sup>2</sup>", IEEE Trans. Magn. vol. 44, iss. 11, pp. 3416-3418, 2008. (査読あり)
- (8) 小峰啓史, 村上宏, 永山剛広, 杉田龍二, "非一様電流による磁壁駆動のマイクロマグネティックシミュレーション", J. Magn. Soc. Jpn. vol. 32, no. 3, pp. 280-284, 2008. (査読あり)

[学会発表] (計 27 件)

- (1) T. Komine, K. Takahashi, H. Murakami and R. Sugita, "Influence of exchange coupling on current-driven domain wall motion in a nanowire", Joint MMM-Intermag Conference, Washington DC, 2010.1.21.

[その他]

○受賞

- (1) 茨城大学学長表彰(奨励賞), 「非一様電流を考慮した磁壁電流駆動のマイクロマグネティックシミュレーション」, 2009年9月17日
- (2) 日本磁気学会学術奨励賞(内山賞), 「非一様電流を考慮した磁壁電流駆動のマイクロマグネティックシミュレーション」, 2008年9月14日

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

小峰 啓史 (KOMINE TAKSHI)

茨城大学・工学部・准教授

研究者番号：90361287