

機関番号：12612

研究種目：特定領域研究

研究期間：2007～2010年度

課題番号：19048021

研究課題名（和文） スピン偏極電流磁化反転の解明とデバイス設計

研究課題名（英文） Computer simulation of magnetic vortex core switching by spin current

研究代表者

仲谷 栄伸 (NAKATANI YOSHINOBU)

電気通信大学・大学院情報理工学研究科・教授

研究者番号：20207814

研究成果の概要（和文）：近年サブミクロンサイズの磁気ディスク中に現れる vortex 構造をスピン電流を用いて操作する研究が盛んに行われている。本研究では計算機シミュレーションを用いて、スピン電流による vortex コアの回転運動や磁化反転の解析を行い、またこの現象を利用した磁気デバイスが安定に動作する条件を求めた。また本シミュレーションでは膨大な計算時間が必要となるために graphic processing unit を用いてシミュレーションを高速に行う手法を提案した。

研究成果の概要（英文）：Recently, there are many works relating to the vortex core dynamics by spin current. In this research the mechanism of the vortex core rotation and switching by spin current are investigated by using computer simulation. We also investigate the conditions to use this mechanism for magnetic devices. Because these simulation requires huge amount of the computation time, we propose the method to accelerate the calculation speed by using the graphic processing unit.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	3,900,000	0	3,900,000
2008年度	4,700,000	0	4,700,000
2009年度	4,000,000	0	4,000,000
2010年度	4,000,000	0	4,000,000
年度			
総計	16,600,000	0	16,600,000

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：スピン流、磁化反転

1. 研究開始当初の背景

従来より磁気モーメントの操作には磁界が用いられてきたが、1978年 Berger によるスピン偏極電流による磁壁移動の実験や、1996年 Slonczewski によるスピン偏極電流による磁化反転の理論的考察は、新たな磁化操作技術の可能性を示し、近年本現象に関する研究や、本現象を利用したデバイスの提案が盛んに行われている。またスピン電流による磁化操作対象として、磁気ディスク（磁

性ドット）内に現れる vortex 構造の運動に関する研究報告も行われ始めている。本研究の代表者はこれまでに計算機シミュレーションを用いて、交流のスピン電流によるドット内の vortex コアの螺旋運動や共振運動、さらに vortex コアの反転の研究を行い、これらの現象を用いた新たなデバイスの可能性を示した。しかしながら、シミュレーション結果は実験結果と定性的には一致するが、定量的には一致したとはいえず、スピン電流

による vortex の運動が完全に解明されているとは言いがたい。本現象の解明のためには、シミュレーションモデルの改良が必要となっている。

2. 研究の目的

本研究では、vortex の運動や磁化反転を再現できるシミュレーションモデルの作成をとおしてスピン電流による vortex 挙動を解明する。また磁気ドットを用いたメモリの評価を行う。

(1) スピン偏極率の測定

スピン偏極率は、スピン電流の電流密度とスピントルクの関係を求めるための重要な要因であり、その値の特定が必要となっていた。AC 電流による vortex コアの回転運動では、その回転半径はスピントルクにほぼ比例するために、実験を用いてスピン電流とコアの回転半径の関係を測定し、その回転半径を再現できる条件をシミュレーションで求めれば、スピン偏極率を求めることができる。ここでは京都大学の実験グループと連携し、上記の手法を用いてスピン偏極率を求める。

(2) 電流磁界効果の解析

スピン電流を用いた現象では、常に電流磁界の効果が議論となっている。たとえば vortex の回転運動に対して、電流磁界の効果は全体の約 3 割と非常に大きいとの指摘も行われている。磁気ドットに与えられる電流はドット上部に付けられた電極より加えられるために、ドット内部では電流密度は一様ではなく複雑に変化し、このためドット内部の電流磁界も複雑に分布する。ここでは AC 電流によるコアの回転運動における電流磁界の効果を詳細に調べるために、まずドット内部に現れる電流密度分布と電流磁界分布を数値的に求め、これらを用いたシミュレーションを行い、その効果の解析を行う。

(3) パルス電流による磁化反転

vortex コアを交流電流で反転させる場合、共振効果が現れるまでに時間がかかるためにコアの反転には時間がかかる。このため磁気ドットを用いたデバイスは、交流電流ではなくパルス電流で動作することが望ましい。以前、非常に小さな磁気ドットを用いたパルス電流によるコア反転シミュレーション結果が報告されたが、vortex コアの反転には $7 \times 10^{12} \text{A/m}^2$ もの非常に大きな電流密度が必要であったために、実験でパルス電流によってコアを反転させることは不可能であると考えられていた。ここでは京都大学の実験グループと連携し、現実の大きさの磁気ドットを用いてパルス電流による磁化反転の可能性を調べ、さらにシミュレーションを用いてその磁化反転機構を調べる。

(4) vortex 構造の安定性

磁気ドットには vortex 構造だけではな

くドットサイズによっては単磁区構造が安定に現れることが知られている。また、残留磁化状態では vortex 構造が安定な場合でも、vortex コアが反転する際に単磁区構造に変化してしまうことも考えられる。磁気ドットを利用したデバイス作成のためには、磁化反転操作後も vortex 構造が安定に存在する条件を調べる必要がある。ここではシミュレーションを用いて、磁化反転を含めた vortex 構造の安定性を調べる。

(5) シミュレーションの高速化

上記のシミュレーションを通常の CPU を用いて行った際には膨大な計算時間が必要となる場合がある。たとえば、電流磁界効果のシミュレーションを通常の CPU で行った際には、一回のシミュレーションに約 2 ヶ月程度の時間がかかってしまい、事実上シミュレーションが不可能である。この問題を解決するために、Graphic Processing Unit (GPU) を用いてシミュレーションを高速に実行できるプログラムを開発し、前述のシミュレーションの一部で利用する。

3. 研究の方法

本研究はマイクロマグネティックシミュレーションモデルを用いて行う。本モデルでは計算対象を規則的に配置された原子磁気モーメントの集合とみなし、各原子磁気モーメントの運動を Landau-Lifshitz-Gilbert 方程式を数値的に解いて求める (図 1)。スピン電流による原子磁気モーメントの運動方程式は、LLG 方程式にスピン電流によるトルク項を追加することで表す。

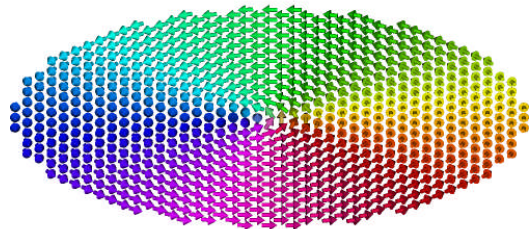


図 1 磁気ドットのマイクロマグネティックシミュレーションモデル

なお計算で用いた磁気ドットの材料定数は Permalloy 材のものである。

磁気ドットに加えられる電流は磁気ドット上部に付けられた電極より流れ込むために、電流密度はドット内部では非一様となる。この効果を取り入れるために、電極を含む領域を対象として、電流密度分布を計算する必要がある。電流密度計算では、対象領域を同じ大きさの直方体セルで離散化し、Laplace 方程式を差分法で解くことで各計算セルでの電位を求め、電位分布より電流密度分布を求めた。得られた電流密度分布より、スピン

電流の向きと密度の情報を計算に組み込んだ。磁気ドットに現れる電流磁界は、前述の方法で得られた電流密度分布より Biot-Savart の法則を用いて求めた。得られた電流磁界は、ドットの各場所の磁気モーメントに加わる外部磁界として計算に組み込んだ。

シミュレーションの高速化は、プログラム開発環境が用意されている nVidia 社の GPU を用いて行った。

4. 研究成果

(1) スピン偏極率の測定

まず実験グループによって、交流のスピンの電流による vortex コアの回転運動の様子を X 線顕微鏡を用いて直接観測し、回転中の vortex コアの回転半径と電流密度の関係が求められた。この結果をうけて、スピン分極率を変化させてシミュレーションを繰り返したところ、実験で得られた回転半径を再現する条件から、スピン分極率 $p=0.67 \pm 0.16$ を得ることができた。

(2) 電流磁界効果の解析

計算で用いた磁気ドットのサイズは直径が 1500nm で厚さは 40nm とした。前述のように電流磁界はドット内部で複雑に変化するために、このドットを $4 \times 4 \times 5 \text{ nm}$ の直方体セルで 3 次元格子を用いて分割した 3 次元モデルを用いて計算した。コアを回転させるために用いた AC 電流の電流密度は $2.66 \times 10^{11} \text{ A/m}^2$ とした。またスピン分極率は 0.7 とした。図 2 にドット内部に出現する電流磁界分布を示す。

ここで電流の流れる向きは図の左から右(+x 方向)である。図 2(b) よりコアが回転するドット中央部では、数 $0e$ のほぼ一樣な弱い磁界が現れることがわかる。図 2(d) よりドット

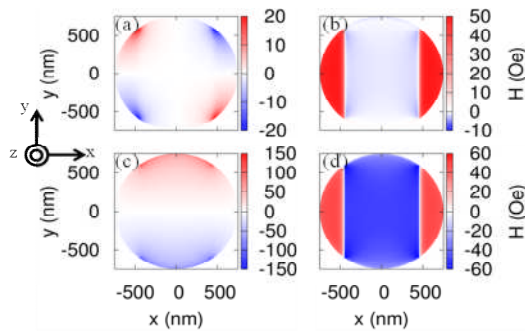


図 2 磁気ドット内部に現れる電流磁界 ($j=2.66 \times 10^{11} \text{ A/m}^2$)。 (a)~(c) ドットの膜厚方向の中央面に現れる電流磁界の x, y, z 方向成分。 (d) ドット最上位面に現れる電流磁界の y 方向成分。

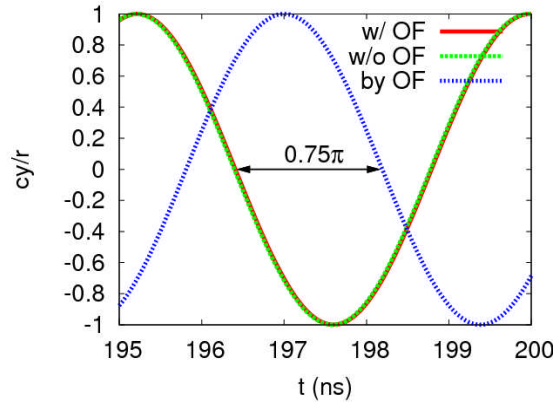


図 3 電流磁界による vortex コアの回転位相の変化。

表面には数十 $0e$ のやや強い磁界が現れるが、逆の表面には向きが逆で強さがほぼ同じ磁界が現れているために、両者の効果がほぼキャンセルされて残った効果がコアの運動に影響すると考えられる。図 2(c) ではドットの中心線を境に、向きが異なる z 方向の磁界が現れることがわかる。この磁界はドット中心線から離れるにつれて強くなるために、コアの回転半径、すなわち電流密度によってこの磁界の効果が変化すると考えられる。図 2(b), (d) の左右の端の電極直下部にはやや強い磁界が現れる。

求めた電流磁界や電流密度分布を用いて AC 電流によるコアの回転運動を行い、定常状態でのコアの回転位相を求めた。計算で用いた AC 電流の周波数は vortex コアの共振周波数 (210MHz) を用いた。電流磁界の効果を調べるために、電流磁界を零にした計算も行い、両者の結果を比較した。結果を図 3 に示す。電流磁界の有無による回転位相の変化は非常に小さく約 0.016π であった。解析式 (M. Bolt, et. al, PRL 100, 176601(2008)) を用いて、回転位相の位相差からコアに加わる全体の駆動力における電流磁界の駆動力の割合を求めたところ、約 4.5% と求められた。図

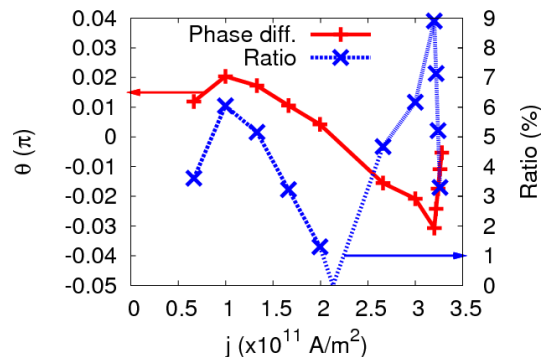


図 4 電流密度による vortex コア回転の位相差と電流磁界の効果の変化。

ではまた両者の軌道の差のグラフも示す。このデータは電流磁界のみによる vortex コアの回転位相を示すものと考えられる。電流磁界のみによるコアの回転位相は、電流のみによるコアの回転位相と 0.75π 異なっていた。次に電流密度を変化させて計算を繰り返し、電流磁界による位相の変化を求めた。結果を図 4 に示す。

図より電流磁界の効果は電流密度の上昇とともに振動するが、最大でも 9% 程度であることがわかる。電流磁界効果が振動する原因は、電流密度の上昇とともに電流磁界のみによるコアの回転位相と電流によるコアの回転位相の差が増加してゆくが、位相差は 2π 毎に元に戻るためであると考えられる。

(3) パルス電流による磁化反転

まず実験グループによってパルス実験が行われた。実験で用いられた磁気ドットサイズは直径 155nm、厚さ 55nm であった。この磁気ドットに対して、電流密度 $1.33 \times 10^{12} \text{A/m}^2$ 、パルス幅 2.5ns のパルス電流を加え、MFM を用いて電流による vortex コアの向きの変化を直接観察により調べたところ、コアの反転が確認された。同じ条件でスピントルクのみを用いてシミュレーションを行った。シミュレーションでは磁気ドットを厚さ方向に 11 層で分割した 3 次元モデルを用いた。同じ電流密度では vortex コアは反転せず、コアの反転には電流密度 $2.8 \times 10^{12} \text{A/m}^2$ もの、実験で得られた値の倍以上の電流密度が必要であることがわかった。このために、パルス電流によるコア反転では、スピントルク以外の効果もあると考えられる。まず考えられ

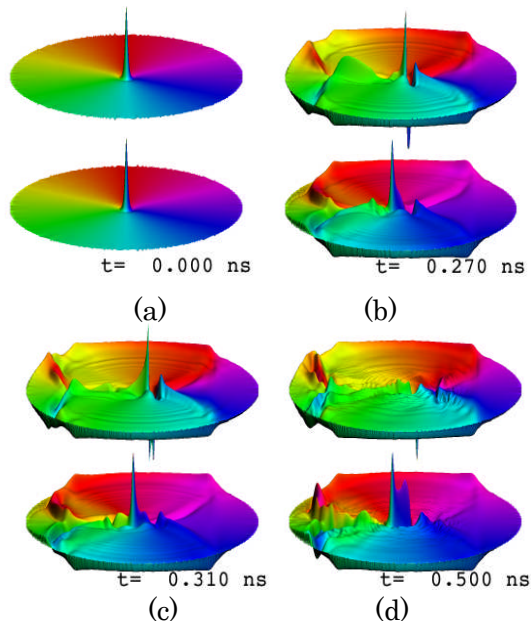


図 5 パルス電流による vortex コアの反転。
図では最上位層と最下位層のみを示す。

る効果として、電流磁界の効果が挙げられる。パルス反転で用いられた電流密度は、前章の vortex コアの回転運動で用いられた電流密度よりも 5 倍程度大きな値であるために、現れる電流磁界も 5 倍程度の強い値となる。特に磁気ドット中央部の上下面では、それぞれ逆向きに 300Oe もの強い磁界が現れるため、これによる反転機構の変化が考えられる。そこで電流磁界効果を考慮し、パルス電流による反転シミュレーションを行ったところ、電流密度が $1.57 \times 10^{12} \text{A/m}^2$ と実験結果とほぼ同程度の電流で vortex コアの反転を確認した。反転機構を図 5 に示す。

図より、磁気ドット表面に現れる強い磁界の効果によって、ドットの上下面の vortex コアは互いに逆方向に移動し反転が始まるのがわかる。このことはパルス反転の場合電流磁界の効果は非常に大きく、電流磁界によって vortex コアは厚さ方向に曲がることを示している。このことから、磁気ドットの厚さが薄くなると、交換エネルギーの効果によって vortex が湾曲しにくくなり、反転に必要なスピントルクも大きくなると予想される。ドットの厚さを変化させて計算したところ、厚さ 45nm までは反転電流及び反転機構は同じであったが、厚さがそれ以下になるとこの反転機構は現れず、vortex コア反転に必要な電流が倍以上になることを確認した。

(4) vortex 構造の安定性

ここではまず、残留磁化状態での vortex 構造の安定性を調べた。磁気ドットにはそのサイズによって vortex 構造以外に単磁区構造が現れるので、磁気ドットの直径と膜厚を変化させて人工的に両者の残留磁化構造を求め、それらの磁気エネルギーの差を求めた。結果を図 6 に示す。

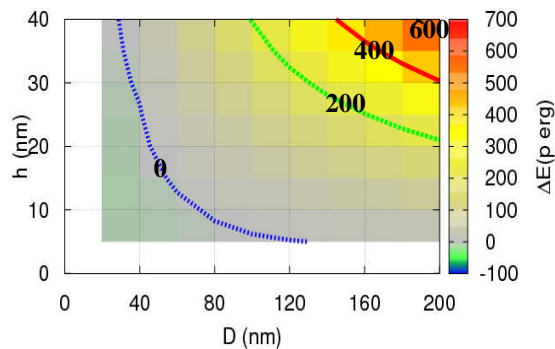


図 6 単磁区構造と vortex 構造の磁気エネルギー差

図のエネルギー差がゼロとなる線の右側の、ドットサイズが大きな領域では vortex 構造が安定であり、左側の領域では単磁区構造が安定である。次に、ドットサイズを変化さ

せて AC 電流による vortex コア反転のシミュレーションを行い、安定して vortex コアが反転する条件（動的安定条件）を求めた。ここで AC 電流の周波数は各ドットの共振周波数とし、電流密度は各ドットにおいて vortex コアが反転する最小の電流密度とした。求めた反転電流及び vortex 構造の動的な安定領域を図 7 に示す。但し、vortex コアが反転せずに単磁区が現れる領域では、磁化構造が変化する最小の電流密度を示した。

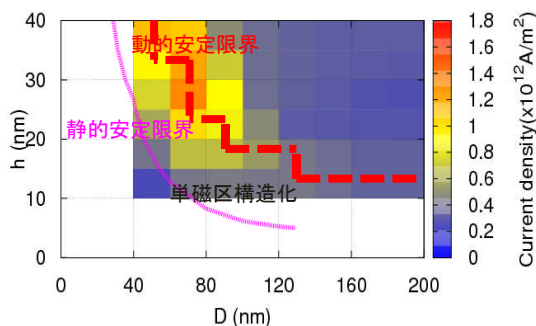


図 7 磁気ドットサイズによる vortex コアの反転電流の変化と、vortex 構造の動的安定条件

図より、厚さが 10nm 以下では vortex 構造が消滅し、単磁区構造が現れることがわかる。また厚さ 10nm 以上でも、vortex 構造が安定に反転するために必要な磁気ドットの直径は、残留磁化状態の限界に対して 20~70nm 程度大きい必要があることがわかる。単磁区構造が現れるメカニズムは以下のとおりである。AC 電流によって vortex コアが回転し、その半径が時間とともに増加してゆき、最後は磁気ドットの端から vortex コアが出ゆき、単磁区構造が現れる。vortex コアの回転によって単磁区構造が現れる全ての場において、単磁区構造出現後に電流を切っても、vortex 構造にはもどらなかった。これらの条件では残留磁化状態では vortex 構造のエネルギーが低いために、単磁区から vortex 構造への構造変化に必要なエネルギーバリアが大きいことが予想される。そこで、このエネルギーバリアを求めた。

エネルギーバリアは、単磁区状態に対して渦状の外部磁界を加えてゆき、磁化構造が変化する際の磁気エネルギーの上昇量から求めた。結果を図 8 に示す。

図より厚さが 30nm 以下の動的安定限界以下の領域では、エネルギーバリアは数 perg 以上であることがわかる。これは熱エネルギ

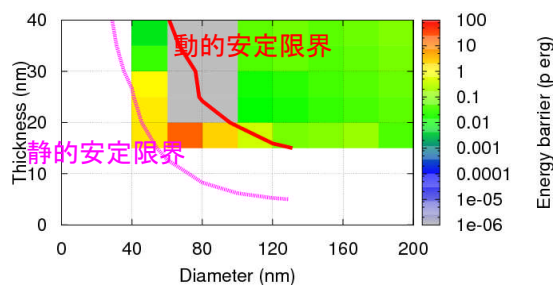


図 8 単磁区構造から vortex 構造への変化に必要なエネルギーバリア

一と比較すると、数十 kT 程度であるために、これらの領域では単磁区構造は熱エネルギーでは状態が変化しない程度に安定であることがわかる。

(5)シミュレーションの高速化

本研究で用いたシミュレーションでは非常に長い計算時間が必要であり、計算対象によっては、通常の CPU では事実上計算が不可能なものもある。そこで GPU を用いて高速計算可能なプログラムの作成を試みた。

ここで GPU を用いるモデルとして次の 3 つを考えた。

1. All Single (GPU)

全ての計算を GPU で行うモデル。また GPU では単精度計算が特に高速であるために、すべての計算は単精度で行う。

2. Dem Single (GPU)

全ての計算を GPU で行うモデル。特に計算時間がかかる静磁界計算は単精度で行い、それに対して計算時間が比較的短いそれ以外の領域は倍精度で計算を行う。単精度計算による計算精度低下を少しでも防ぐことを目指したモデル。

3. Dem Single (CPU+GPU)

上記の二つのモデルは全ての計算を GPU で行うために、プログラム全てを GPU 用に変更する必要がある。計算時間の割合が多い静磁界計算のみを GPU で行い、残りの計算を CPU で行うモデル。プログラムの変更は少ないが、静磁界計算を行うたびに CPU-GPU 間でデータの送受信が行われるために、計算速度の低下が予想される。

図 9 に計算点数による CPU を用いたときに対する高速化率の変化を示す。高速化率は計算点数とともに増加し、計算点数が約 6 万点で 14 倍程度の高速化率が実現できた。

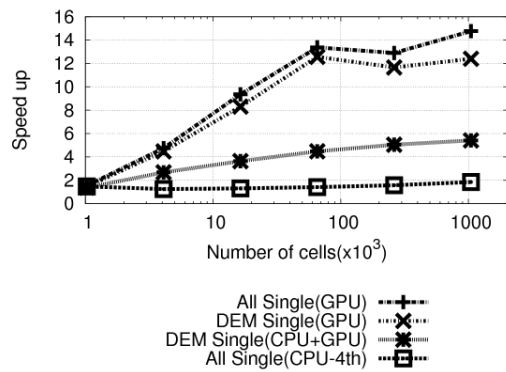


図 9 計算点数による高速化率の変化

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 6 件)

- ① T. Sato, and Y. Nakatani. Fast Micromagnetic Simulation of Vortex, Journal of the Magnetics Society of Japan, 35, 163 (2011), 査読有.
- ② K. Yamada, S. Kasai, Y. Nakatani, K. Kobayashi, and T. Ono, Current-induced switching of magnetic vortex core in ferromagnetic elliptical disks, Applied Physics Letters, 96, 192508 (2010), 査読有.
- ③ S. Kasai, P. Fischer, Mi-Y. Im, K. Yamada, Y. Nakatani, K. Kobayashi, and T. Ono, Probing the spin polarization of current by soft X-ray imaging of current-induced magnetic vortex dynamics, Physical Review Letters, 101, 237203 (2008), 査読有.
- ④ K. Ymada, S. Kasai, Y. Nakatani, K. Kobayashi, and T. Ono, Switching magnetic vortex core by a single nanosecond current pulse, Applied Physics Letters, 93, 152502 (2008), 査読有.
- ⑤ A. Thiaville, and Y. Nakatani, Electrical rectification effect in single domain magnetic microstrips: A micromagnetics-based analysis, Journal of Applied Physics, 104, 93701 (2008), 査読有

[学会発表] (計 26 件)

- ① T. Sato, Y. Nakatani, T. Ono, The Effect of Oersted Field on Magnetic Vortex Core Gyration, International Conference of AUMS, Jeju Korea, 2010年12月6日
- ② T. Sato, Y. Nakatani, K. Yamada, T. Ono, Velocity of the vortex core switching in

elliptic dots, 11th Joint MMM-Intermag Conference, Washington USA, 2010年1月22日

③ T. Sato, and Y. Nakatani, Effect of the calculation precision in micromagnetic simulation, 11th Joint MMM-Intermag Conference, Washington USA, 2010年1月20日

④ T. Sato, Y. Nakatani, Effect of the thermal fluctuation on the current induced vortex core switching time, International Colloquium on Magnetic Films and Surfaces, Berlin Germany, 2009年7月20日

⑤ Y. Nakatani, A. Thiaville, K. Yamada, S. Kasai, K. Kobayashi, and T. Ono, Pulse current switching of a vortex core in a nanodot: a micromagnetic study, International Colloquium on Magnetic Films and Surfaces, Berlin Germany, 2009年7月20日

⑥ T. Sato and Y. Nakatani, Fast micromagnetic simulation by cell broadband engine, INTERMAG CONFERENCE2009, Sacramento USA, 2009年5月5日

⑦ M. Tate, T. Sato and Y. Nakatani, Fast micromagnetic simulation by a graphic processor unit, INTERMAG CONFERENCE2009, Sacramento USA, 2009年5月5日

⑧ Y. Nakatani, and T. Ono, Effect of the ellipticity on the switching current and field of the vortex core in an elliptic nanodot, Magnetic single nano-object workshop, Nancy France, 2008年11月27日

⑨ Y. Nakatani, A. Thiaville, K. Yamada, S. Kasai, K. Kobayashi, and T. Ono, Reduction of the vortex core switching current with an elliptic nanodot, 53th Annual Conference on Magnetism and Magnetic Material, AustinUSA, 2008年11月12日

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

仲谷 栄伸 (NAKATANI YOSHINOBU)

電気通信大学・大学院情報理工学研究科・教授

研究者番号：20207814

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし