

## 先端研究助成基金助成金(最先端・次世代研究開発支援プログラム) 実績報告書

本様式の内容は一般に公表されます

研究課題名	電流誘起スピンドYNAMIXを利用した省エネルギー次世代デバイスの開発
研究機関・ 部局・職名	京都大学・化学研究所・教授
氏名	小野 輝男

1. 研究実施期間 平成23年2月10日～平成23年5月30日

2. 収支の状況

(単位:円)

	交付を受けた額			利息等収入 額	収入額合計	執行額	未執行額
	平成22・23年度	平成24年度	平成25年度				
直接経費	17,112,963	0	0	0	17,112,963	17,112,963	0
間接経費	5,133,888	0	0	0	5,133,888	5,133,888	0
合計	22,246,851	0	0	0	22,246,851	22,246,851	0

3. 執行額内訳

(単位:円)

費目	平成22年度	平成23年度	平成24年度	平成25年度	合計
物品費	0	12,989,530			12,989,530
旅費	24,755	1,033,280			1,058,035
謝金・人件費等	0	2,368,423			2,368,423
その他	0	696,975			696,975
直接経費計	24,755	17,088,208	0	0	17,112,963
間接経費計	0	5,133,888	0	0	5,133,888
合計	24,755	22,222,096	0	0	22,246,851

4. 主な購入物品(1品又は1組若しくは1式の価格が50万円以上のもの)

物品名	仕様・型・性能等	数量	単価 (単位:円)	金額 (単位:円)	納入 年月日	設置研究機関名
マイクロ波プローブ	40A-GSG -200-ED P-NM	1	571,200	571,200	2011/5/18	京都大学
デジタルマイクロスコープ	VH-5500 コントローラ	1	3,160,500	3,160,500	2011/5/19	京都大学
ES-350用ターゲット	Au 5t 4N	1	3,675,000	3,675,000	2011/5/20	京都大学
サーモレーサー	H2630	1	2,892,750	2,892,750	2011/5/26	京都大学
100μm近接拡大レンズ	TH92-486	1	997,500	997,500	2011/5/26	京都大学
				0		

5. 研究成果の概要

本研究では、磁壁や磁気渦の電流誘起スピンドYNAMIXを利用した新規省エネルギーデバイス(磁気コアメモリー、レーストアラックメモリー、磁壁発振器など)を作製し基本動作を確認することを目的として研究を行い、以下の成果が得られた。1. 磁気コアメモリーのデバイス作成条件を検討し、磁気コアの向きを電氣的に読み取ることが可能であることを確認した。2. レストアラックメモリー研究のためのデバイス設計を行った。3. 磁壁発振器研究のためのデバイス作成条件を検討し、磁性細線中に作成したノッチに単一磁壁を閉じ込めることが可能であることを電気抵抗測定によって確認した。

課題番号	GR057
------	-------

## 先端研究助成基金助成金(最先端・次世代研究開発支援プログラム) 研究成果報告書

本様式の内容は一般に公表されます
------------------

研究課題名 (下段英語表記)	電流誘起スピンドYNAMIXを利用した省エネルギー次世代デバイスの開発
	Development of low-energy-consumption next generation devices using current-induced spin dynamics
研究機関・部局・ 職名 (下段英語表記)	京都大学・化学研究所・教授
	Professor, Institute for Chemical Research, Kyoto University
氏名 (下段英語表記)	小野 輝男
	Teruo ONO

### 研究成果の概要

(和文):

本研究では、磁壁や磁気渦の電流誘起スピンドYNAMIXを利用した新規省エネルギーデバイス(磁気コアメモリー、レーストラックメモリー、磁壁発振器など)を作製し基本動作を確認することを目的として研究を行い、以下の成果が得られた。1. 磁気コアメモリーのデバイス作成条件を検討し、磁気コアの向きを電氣的に読み取ることが可能であることを確認した。2. レーストラックメモリー研究のためのデバイス設計を行った。3. 磁壁発振器研究のためのデバイス作成条件を検討し、磁性細線中に作成したノッチに単一磁壁を閉じ込めることが可能であることを電気抵抗測定によって確認した。

(英文):

The present project has been done to develop low-energy-consumption next generation devices (magnetic vortex core memory, race-track memory, and domain wall oscillator) utilizing current-induced spin dynamics, and the following developments have been obtained; 1. It was demonstrated that the direction of the vortex core can be detected electrically. 2. The device design for the race-track memory was performed. 3. The electrical resistance measurement confirmed that a single domain wall can be trapped in a notch fabricated in a magnetic wire.

1. 執行金額 22,246,851 円

(うち、直接経費 17,112,963 円、 間接経費 5,133,888 円)

2. 研究実施期間 平成23年2月10日～平成23年5月30日

3. 研究目的

①研究の学術的背景

近年、電流による磁化状態制御が盛んに研究されている。電流による磁化状態制御に関する先駆的研究として、スピン注入磁化反転(コーネル大学、*Science*, 285 (1999) 867)、磁壁の電流駆動(応募者ら、*Phys.Rev.Lett.*, 92(2004)077205)が挙げられる。これらの現象によって外部磁場を使わない磁化制御が可能となり、磁気メモリーや磁気ストレージへの応用研究が国内外で盛んに行われている

上述したように、応募者はナノ磁性細線における磁壁の電流駆動の直接観察に世界に先駆けて成功した。この磁壁の電流駆動現象は、電子から磁壁にスピン角運動量が受け渡された結果である。つまり、この現象は強磁性体中のナノスピン構造である磁壁が電流によって励起された結果と解釈することができる。

応募者は、この非一様磁気構造の電流による励起という概念の普遍性を検証するために、強磁性体中の典型的非一様磁気構造である強磁性円盤中に出現する磁気渦の電流励起についての研究を行った。強磁性体を円盤状に加工すると、スピンの試料面内で渦のように回転方向に整列する磁気渦構造が安定化され、その中心には直径数ナノメートルの磁気コアが存在することを、応募者らは以前に報告している(*Science*, 289 (2000) 930)。この磁気渦状態に適切な周波数を持つ交流電流を印加すると、電流と磁気コアの相互作用によって磁気コアが強磁性円盤の中で回り始めることをシミュレーションによって見出し、強磁性円盤の電気抵抗の交流電流周波数依存性測定を行うことで、この磁気コアの共鳴励起現象を実験的に捉える事に成功した(*Phys. Rev. Lett.*, 97 (2006) 107204)。さらに、励起電流を大きくすると磁気コアの向きが反転する現象を見出し、磁気力顕微鏡による直接観察で確認した(*Nature Materials*, 6 (2007)269)。

②研究期間内に何をどこまで明らかにしようとするのか

電流誘起スピンドYNAMIXの物理を明らかにし、これを用いた新規デバイスの動作実証を行う。

電流誘起スピンドYNAMIXは拡張 Landau-Lifshits-Gilbert(LLG)方程式によって記述されている。この方程式には、電流による断熱スピントルク項と非断熱スピントルク項と呼ばれる二つのトルクが含まれているが、非断熱項はその存在自体が現在でも議論されている重要な研究課題である。さらに、LLG 方程式にはエネルギー散逸を記述する緩和項が含まれているが、磁壁や磁気コアのような非一様磁気構造中での緩和は一様磁気構造とは異なることが近年理論的に指摘された。非断熱項と非一様磁気構造の緩和に関する知見は LLG 方程式に基づくデバイスデザイン

に不可欠であり、本研究では研究計画・手法に記述する方法でこの二つの問題を定量的に明らかにする。

これらの電流誘起スピンドYNAMIKSの知見に基づき、磁壁や磁気渦の電流誘起スピンドYNAMIKSを利用した新規省エネルギーデバイスを作製し基本動作を確認する。具体的には、磁気コアメモリー(特願 2006-211432)、レーストラックメモリー(Science 320 (2008)190)、磁壁発振器(特願 2006-298840)の3つのデバイスに取り組む。磁気コアメモリーは、磁気コアの向きをビット情報とする不揮発性磁気メモリーであり、電流誘起磁気コア反転を情報書き込みに利用し、磁気コアの向きをトンネル磁気抵抗素子によって読み出す。レーストラックメモリーは、IBM が提案した不揮発性多値メモリーであり、ハードディスクやフラッシュメモリーを省電力と廉価性の面で凌駕する大容量メモリーとして期待されている。磁壁発振器は、電流によって誘起された磁壁の回転運動をトンネル磁気抵抗素子によってマイクロ波に変換するデバイスであり、マイクロ波の周波数を電流密度で制御できる、出力がトンネル磁気抵抗素子への印加電圧で制御できるなどのこれまでのマイクロ波発振器にない特徴を持つ。

#### 4. 研究計画・方法

本研究では、電流誘起スピンドYNAMIKSの物理を明らかにし、これを用いた省エネルギー次世代デバイスの動作実証を行うことを目的とする。

##### (1)電流誘起スピンドYNAMIKSの物理

電流誘起スピンドYNAMIKSを記述する拡張 Landau-Lifshits-Gilbert 方程式の中でデバイス性能を左右する重要なパラメーターは、緩和定数  $\alpha$ 、非断熱スピントランスファー定数  $\beta$  および電流のスピンドYNAMIKS率  $P$  である。本研究では、これらを定量的に評価する手法を確立し、合金組成依存性を系統的に調べることで電流誘起スピンドYNAMIKSの物理を明らかにするとともに高効率スピントロニクスデバイス材料探索への展開を図る。 $P$  と  $\beta$  の評価は応募者らが理論的に示した電流印加下のスピンドYNAMIKS波の速度・振幅測定(Phys. Rev. Lett. 102 (2009) 147202)によって行う。非一様磁気構造中での緩和定数は、応募者らが開拓した磁気コアの共鳴運動(Phys. Rev. Lett., 97 (2006) 107204; Phys. Rev. Lett. 101 (2008) 237203)を利用して求める。

##### (2)次世代デバイスの動作実証

本研究では、さらに応募者らが発展させてきた磁気コアと磁壁の電流誘起スピンドYNAMIKSを利用した磁気コアメモリー、レーストラックメモリー、磁壁発振器の3種類のデバイスの動作実証を以下の研究スケジュールに沿って行う。

<平成22年度>

・23年度以降の実験の詳細な検討をする。

<平成23年度>

・FeNi 合金を用いて電流印加下のスピンドYNAMIKS波の速度・振幅測定手法を確立する。

- ・FeNi 合金を用いて磁気コア共鳴運動を利用した非一様磁気構造中の緩和定数測定手法を確立する。

- ・磁気コアメモリー素子作製手法を確立する。

- ・レーストラックメモリーの基礎実験として、Co/Ni における単一磁壁電流駆動を研究する。

- ・磁壁発振器実現に不可欠なナノコンタクト構造作製手法を確立し、ナノコンタクトへの単一磁壁導入を確認する。

<平成24年度>

- ・平成 22 年度に確立した電流印加下のスピン波の速度・振幅測定手法および非一様磁気構造中の緩和定数測定手法を用いて、 $\alpha$ ,  $P$ ,  $\beta$  の NiFe 合金への不純物添加効果を調べる。特に効果が大きいと期待される大きなスピン軌道相互作用を持つ Pt 添加について調べる。

- ・磁気コアメモリーの電氣的読み書きを実証する。

- ・レーストラックメモリーの基礎実験として、Co/Ni における複数磁壁電流駆動を研究する。

- ・磁壁発振器基本動作の確認として、ナノコンタクトへ閉じ込められた単一磁壁の電流誘起回転運動をスペクトラムアナライザーによって確認する。

<平成25年度>

- ・前年度に引き続き、 $\alpha$ ,  $P$ ,  $\beta$  の NiFe 合金への不純物添加効果を系統的に調べる。

- ・磁気コアメモリーの書き込み特性を書き込みパルス幅等を変えながら調べる。

- ・プロトタイプレーストラックメモリーとして、情報読み出し用のトンネル磁気抵抗素子を付加したデバイス作製に取り組む。

- ・プロトタイプ磁壁発振器として、マイクロ波出力用のトンネル磁気抵抗素子を付加したデバイス作製に取り組む。

## 5. 研究成果・波及効果

本研究では、磁壁や磁気渦の電流誘起スピンドYNAMICSを利用した新規省エネルギーデバイス(磁気コアメモリー、レーストラックメモリー、磁壁発振器など)を作製し基本動作を確認することを目的として研究を行い、以下の成果が得られた。

(1) 磁気コアメモリーのデバイス作成条件を検討し、磁気コアの向きを電氣的に読み取ることが可能であることを確認した。磁気コアメモリーを実現するには、電氣的に磁気コアの向きを制御し、その向きを電氣的に検出する技術を開発することが必須である。今回の成果は、磁気コアメモリーの電氣的情報読み取りを可能とする技術であり、磁気コアメモリー実現へ向けた大きな一歩であると評価できる。

(2) レーストラックメモリー研究のためのデバイス設計を行った。レーストラックメモリーを研究する上で重要となる磁壁の電流駆動研究のためのデバイス設計を行った。

(3) 磁壁発振器研究のためのデバイス作成条件を検討し、磁性細線中に作成したノッチに単一磁壁を閉じ込めることが可能であることを電気抵抗測定によって確認した。

様式21

6. 研究発表等

雑誌論文 計 1 件	(掲載済み一査読有り) 計 1 件 T. Koyama, D. Chiba, K. Ueda, K. Kondou, H. Tanigawa, S. Fukami, T. Suzuki, N. Ohshima, N. Ishiwata, Y. Nakatani, K. Kobayashi and T. Ono, "Observation of the intrinsic pinning of a magnetic domain wall in a ferromagnetic nanowire", Nature Materials 10 (2011) 194. (掲載済み一査読無し) 計 0 件  (未掲載) 計 0 件
会議発表 計 3 件	専門家向け 計 3 件 T.Ono, International Magnetics Conference, "All electrical operation of magnetic vortex core memory", Taipei, Taiwan, April 25-29, 2011 T.Ono, Spin Caloritronics III, "Temperature dependence of spin polarization in Co/Ni estimated from current-induced domain wall motion", Leiden, Netherlands, May 9-13, 2011 T. Ono, Recent Trends in Nanomagnetism , Spintronics and their Applications, "Observation of Intrinsic Pinning Mechanism in Current-induced Domain Wall Motion", Ordizia, Spain, May 31-June 3, 2011 一般向け 計 0 件
図書 計 0 件	
産業財産権 出願・取得 状況 計 0 件	(取得済み) 計 0 件  (出願中) 計 0 件
Webページ (URL)	<a href="http://www.scl.kyoto-u.ac.jp/~ono/onolab/public_html/indexj.html">http://www.scl.kyoto-u.ac.jp/~ono/onolab/public_html/indexj.html</a> <a href="http://www.kuicr.kyoto-u.ac.jp/announce/2010/news_110223.html">http://www.kuicr.kyoto-u.ac.jp/announce/2010/news_110223.html</a> <a href="http://pup.adm.kyoto-u.ac.jp/ja/news_data/h/h1/news6/2010/110221_1.htm">http://pup.adm.kyoto-u.ac.jp/ja/news_data/h/h1/news6/2010/110221_1.htm</a>
国民との 科学・技術 対話の実 施状況	
新聞・一般 雑誌等掲 載 計 0 件	
その他	

7. その他特記事項

特になし。