

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 12 日現在

機関番号：14301  
研究種目：基盤研究(S)  
研究期間：2011～2015  
課題番号：23221008  
研究課題名(和文)新規スピンドYNAMICSデバイスの研究  
  
研究課題名(英文)Development of Novel Spin Dynamics Devices  
  
研究代表者  
小野 輝男(Ono, Teruo)  
  
京都大学・化学研究所・教授  
  
研究者番号：90296749  
  
交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 150,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は、電流誘起スピンドYNAMICSの解明と、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を作製し基本動作を確認することである。電流駆動磁壁移動に対するスピホール効果の影響などの電流誘起スピンドYNAMICSを明らかにし、磁壁メモリーや磁気コアメモリーの動作実証に成功した。さらに、磁気コア運動に伴うスピントロニクス電力の検出や電界による磁性の制御など、当初研究計画では予期されなかった成果もあげることができた。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this project is to develop novel spin devices that utilize the current-induced spin dynamics in non-uniform spin structure, such as a magnetic domain wall and a magnetic vortex. We succeeded in demonstrating the operation of the spin devices such as domain wall memory and vortex core memory. Furthermore, we obtained unexpected results such as the observation of spin motive force in gyrating vortex core and the modulation of ferromagnetic transition temperature of Cobalt by electric field gating.

研究分野：磁性物理

キーワード：スピントロニクス

## 1. 研究開始当初の背景

研究代表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、磁壁を通過する際に電子のスピンの方向が磁壁内の磁気モーメントに沿って回転するため、電子から磁壁にスピン角運動量が受け渡された結果(スピントランスファー効果)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。

研究代表者は、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。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)。研究代表者は、これらの成果を踏まえ、若手研究(S)「電流誘起スピンダイナミクスとスピン能動素子への展開」(H19-H23)等によって研究を進展させ、電流誘起磁気コア共鳴運動の実時間実空間観察(Phys. Rev. Lett. 101 (2008) 237203)、ナノ秒電流パルスによる磁気コア反転(Appl. Phys. Lett. 93 (2008) 152502)、磁気渦トランジスタ(Appl. Phys. Express 1 (2008) 091302)、新規電流駆動磁壁移動材料開発(Appl. Phys. Express 2 (2009) 053002)などの成果をあげてきた。

このように、研究代表者は基礎科学的興味に根ざした新しい知見の発掘とそれに基づく新規デバイスの提案および実証を行ってきた。これらの成果は将来の省エネルギースピントロニクスデバイスの基盤となるものであり、基盤研究(S)においてさらに研究を加速し継続的に発展させることで次世代の情報処理装置や情報蓄積装置の飛躍的な低消費電力化・高速化に寄与する大きな進展が得られると考え提案へ至った。

## 2. 研究の目的

電流誘起スピンダイナミクスを記述する拡張 Landau-Lifshits-Gilbert(LLG)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ダイナミクスの知見に基づき、磁壁や磁気渦の電流誘起スピンダイナミクス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、レーストラックメモリー、磁壁発振器の3つのデバイスに取り組む。

## 3. 研究の方法

実験家である研究代表者が、理論家(河野浩:阪大)とシミュレーションの専門家(仲谷栄伸:電通大)と緊密な関係を持って研究を推進した。さらに、スピントルク効果の専門家である森山貴弘氏と磁壁に関する物理の専門家である Kim Kab-Jin 氏を助教として迎えたことにより、研究実施体制はより充実したものとなった。

本研究体制により研究は極めて順調に進捗し、当初計画を達成するばかりでなく、新しい電流駆動磁壁移動メカニズムの発見や電界による磁性制御などの研究当初は予期していなかった重要な成果をあげることができた。

## 4. 研究成果

本研究の目的は、電流誘起スピンダイナミクスの解明と、磁壁や磁気渦の電流誘起スピンダイナミクス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ことである。以下に、これまでに得られた成果を具体的に記述する。

(1)磁壁の電流誘起スピンダイナミクスに関する研究

電流駆動磁壁デバイスにおける低消費電力と高い熱安定性の証明(Nat. Commun. 4:2011 doi: 10.1038/ncomms3011 (2013).) Co/Ni 多層膜における電流駆動磁壁移動現象を詳細に調べた結果、磁壁移動に必要な閾電流密度が磁気異方性によって決まる内因性ピニングによって決定されるのに対して、磁壁位置の安定性は欠陥等の外因性ピニングによって決定されることが明らかとなった。内因性ピニングと外因性ピニングは独立に制御することが可能であり、本研究は電流駆動磁壁デバイスにおける低消費電力と高い熱安定性の両立が可能であることを示している。

内因性ピニングによって決まる閾電流密度以下での電流駆動磁壁移動(Nature Nanotechnology 7, 635-639 (2012)) 研究代表者らは、電流駆動磁壁移動に必要な閾電流密度が磁気異方性によって決まる内因性ピニングによって決定されることを示した(Nature Materials 10, 194-197 (2011))。このことは内因性ピニングによって決まる

閾電流密度以下の電流で磁壁を駆動することは不可能であることを意味している。しかし電流と同時に外部磁場を印加すると、外部磁場によって磁壁が内因性ピニングを超えるため、さらに閾電流密度を減少させることが可能であることが明らかになった。

電流駆動磁壁デバイスの外部磁場擾乱耐性の証明 (Appl. Phys. Express 5, 063001 (2012); Appl. Phys. Lett. 98, 192509 (2011))

電流駆動磁壁現象をデバイス応用するためには、浮遊磁場に対する耐性が重要となる。本研究では、磁壁移動に必要な閾電流密度と一定電流密度における磁壁移動速度の両方が、 $\pm 50$  Oe 以下の外部磁場に対して殆ど変化しないことを示し、実用上問題が生じないことが明らかとなった。

スピン分極率と非断熱トルクの定量評価 (Appl. Phys. Lett. 100, 202407 (2012); Jpn. J. Appl. Phys. 51 (2012) 028005)

スピン分極率と非断熱トルクの大きさはスピデバイスにとって重要な材料定数である。磁壁移動速度の電流密度依存性を測定することでスピン分極率を評価できることを示し、その温度依存性を定量的に求めた (Appl. Phys. Lett. 100, 202407 (2012))。磁壁のピニングサイトからのデピニング磁場の電流密度依存性を測定することで非断熱トルクの大きさを定量的に評価した (Jpn. J. Appl. Phys. 51 (2012) 028005)。この結果、Co/Ni 多層膜においては、非断熱トルクではなく断熱トルクによって電流による磁壁移動が起こっていることが明らかとなった。

電流駆動磁壁移動に対するスピンホール効果の影響の解明 (Appl. Phys. Express 7, 033005 (2014); Appl. Phys. Express 6 (2013))

磁壁移動に必要な閾電流密度と一定電流密度における磁壁移動速度の両方が、 $\pm 50$  Oe 以下の外部磁場に対して殆ど変化しないことを示したが、さらに大きな磁場では非磁性層 Pt のスピンホール効果によるスピン注入による影響が磁壁移動に現れることが明らかとなった (Appl. Phys. Express 7, 033005 (2014))。この効果が大きくなるように非対称な膜構造を持つ試料を用いて調べたところ、断熱トルクによる磁壁移動とは逆方向に磁壁が移動することがわかった。これは、Pt のスピンホール効果によるスピン注入による磁壁移動という全く新しい機構による磁壁移動を示唆する結果である。

## (2) 磁気渦の電流誘起スピンドायナミクスに関する研究

磁気コアメモリーの動作実証 (Appl. Phys. Lett. 99, 262505 (2011))

情報蓄積用強磁性円盤 FM1、情報読み取り用強磁性体 FM2、および FM1 と FM2 の間の絶縁障壁からなる 3 端子デバイスを作製し、磁

気コアメモリーの動作実証を行った。下図の左は作製したデバイスの SEM 写真であり、下図の右が磁気コアメモリーの動作実証である。図の緑線が入力信号であり、オレンジがデバイス出力である。入力に対応した出力の振動が磁気コアの回転運動に対応する。入力信号に書き込みパルス信号を加える度に出力信号の大きさが変化しており、書き込みパルスによって磁気コアの向きが変化することがわかる。したがって、書き込みパルスによって磁気コアを任意の時間に反転し、磁気コアの向きを出力信号の振幅で読み取ることが可能であることを示している。

## (3) 当初研究計画では予期されなかった新たに見いだされた成果

磁気コア運動に伴うスピン起電力の検出 (Nat. Commun. 3:845 doi: 10.1038/ncomms1824 (2012))

本研究の主題は電流によって誘起されるスピンドાયナミクスであるが、この逆効果が存在するかは大変興味深い問題である。磁気円盤中の磁気コアを外部磁場で運動させると、磁気コアがナノ電極を通過する際に電圧が生じることを確認した。得られた結果は理論によって定量的に説明可能であり、この電圧は磁気コア運動に伴うスピン起電力であるとの結論が得られた。

電界による磁性の制御 (Nature Materials 10, 853-856 (2011); Appl. Phys. Lett. 100, 122402 (2012); Appl. Phys. Express 5, 063007 (2012); Appl. Phys. Express 6, 073004 (2013))

本研究の主題は電流によって誘起されるスピンドાયナミクスであるが、デバイスのさらなる消費電力化の方向として電界効果が注目されつつある。磁気コアや磁壁の電界制御を目指して磁性への電界効果を調べた結果、強磁性相転移温度が電界で制御できること (Nature Materials 10, 853-856 (2011); Appl. Phys. Lett. 100, 122402 (2012)) や磁気異方性が電界で制御できること (Appl. Phys. Express 5, 063007 (2012); Appl. Phys. Express 6, 073004 (2013)) が明らかとなった。

電界による磁壁移動速度の制御 (Nat. Commun. 3:888 doi: 10.1038/ncomms1888 (2012))

電界を印加することで磁壁移動速度が 100 倍程度変化することを見いだした。本研究は外部磁場による磁壁移動に関するものであるが、今後、電界による磁壁移動を目指して研究を展開する予定である。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 27 件)

"Effect of spin Hall torque on current-induced precessional domain wall motion", Yoko Yoshimura, Tomohiro Koyama, Daichi Chiba, Yoshinobu

Nakatani, Shunsuke Fukami, Michihiko Yamanouchi, Hideo Ohno, Kab-Jin Kim, Takahiro Moriyama and Teruo Ono, Appl. Phys. Express 7, 033005 (2014). DOI: 10.7567/APEX.7.033005

“Spin-wave-induced domain wall motion in perpendicularly magnetized system”, Hiroshi Hata, Takuya Taniguchi, Hyun-Woo Lee, Takahiro Moriyama, and Teruo Ono, Applied Physics Express 7, 033001 (2014).

DOI:10.7567/APEX.7.033001

“Direct Observation of Domain Wall Motion in Co/Pt Wire under Gate Electric Field”, Haruka Kakizakai, Kihiro Yamada, Masashi Kawaguchi, Kazutoshi Shimamura, Shunsuke Fukami, Nobuyuki Ishiwata, Daichi Chiba, and Teruo Ono, Jpn. J. Appl. Phys. 52 (2013) 070206. DOI: 10.7567/JJAP.52.070206

“Electric Field Modulation of Magnetic Anisotropy in MgO/Co/Pt Structure”, Kihiro Yamada, Haruka Kakizakai, Kazutoshi Shimamura, Masashi Kawaguchi, Shunsuke Fukami, Nobuyuki Ishiwata, Daichi Chiba, and Teruo Ono, Appl. Phys. Express 6 (2013) 073004. DOI: 10.7567/APEX.6.073004

“Current-induced Effective Fields Detected by Magnetotransport Measurements”, M. Kawaguchi, K. Shimamura, S. Fukami, F. Matsukura, H. Ohno, T. Moriyama, D. Chiba, T. Ono, Appl. Phys. Express 6 (2013) 113002. DOI: 10.7567/APEX.6.113002

“Two-barrier stability that allows low power operation in current-induced domain wall motion”, Kab-Jin Kim, Ryo Hiramatsu, Tomohiro Koyama, Kohei Ueda, Yoko Yoshimura, Daichi Chiba, Kensuke Kobayashi, Yoshinobu Nakatani, Shunsuke Fukami, Michihiko Yamanouchi, Hideo Ohno, Hiroshi Kohno, Gen Tatara, Teruo Ono, Nature Communications 4, (2013) 2011. DOI: 10.1038/ncomms3011

“Control of magnetism in Co by an electric field”, D. Chiba and T. Ono, J. Phys. D: Appl. Phys. 46 (2013) 213001. DOI: 10.1088/0022-3727/46/21/213001

“Real-time observation of electrical vortex core switching”, Kunihiro Nakano, Kenji Tanabe, Ryo Hiramatsu, Daichi Chiba, Norikazu Ohshima, Shinya Kasai, Tomonori Sato, Yoshinobu Nakatani, Koji Sekiguchi, Kensuke Kobayashi, and Teruo Ono, Appl. Phys. Lett. 102, 072405 (2013). DOI:10.1063/1.4793212

“Current-Induced Magnetic Domain Wall Motion in a Co/Ni Nanowire with Structural Inversion Asymmetry”,

Tomohiro Koyama, Hiroshi Hata, Kab-Jin Kim, Takahiro Moriyama, Hironobu Tanigawa, Tetsuhiro Suzuki, Yoshinobu Nakatani, Daichi Chiba, and Teruo Ono, Appl. Phys. Express 6 (2013) 033001. DOI: 10.7567/APEX.6.033001

“Current-induced magnetic domain wall motion below intrinsic threshold triggered by Walker breakdown”, T. Koyama, K. Ueda, K.-J. Kim, Y. Yoshimura, D. Chiba, K. Yamada, J.-P. Jamet, A. Mougin, A. Thiaville, S. Mizukami, S. Fukami, N. Ishiwata, Y. Nakatani, H. Kohno, K. Kobayashi, T. Ono, Nature Nanotechnology 7, 635-639 (2012). DOI: 10.1038/nnano.2012.151

“Symmetry breaking in the formation of magnetic vortex states in a permalloy nanodisk”, Mi-Young Im, Peter Fischer, Keisuke Yamada, Tomonori Sato, Shinya Kasai, Yoshinobu Nakatani, Teruo Ono, Nat. Commun. 3:983 DOI: 10.1038/ncomms1978 (2012).

“Observation of magnetic domain-wall dynamics transition in Co/Ni multilayered nanowires”, Kab-Jin Kim, D. Chiba, K. Kobayashi, S. Fukami, M. Yamanouchi, H. Ohno, Soong-Geun Je, Sug-Bong Choe, and T. Ono, Appl. Phys. Lett. 101, 022407 (2012). DOI: 10.1063/1.4733667

“Electric-field control of magnetic domain-wall velocity in ultrathin cobalt with perpendicular magnetization”, D. Chiba, M. Kawaguchi, S. Fukami, N. Ishiwata, K. Shimamura, K. Kobayashi, T. Ono, Nat. Commun. 3:888 DOI: 10.1038/ncomms1888 (2012).

“Spin-motive force due to a gyrating magnetic vortex”, K. Tanabe, D. Chiba, J. Ohe, S. Kasai, H. Kohno, S. E. Barnes, S. Maekawa K. Kobayashi, T. Ono, Nat. Commun. 3:845 DOI: 10.1038/ncomms1824 (2012).

“Electric Field Effect on Magnetization of an Fe Ultrathin Film”, Masashi Kawaguchi, Kazutoshi Shimamura, Shimpei Ono, Shunsuke Fukami, Fumihiko Matsukura, Hideo Ohno, Daichi Chiba, and Teruo Ono, Appl. Phys. Express 5 (2012) 063007. DOI: 10.1143/APEX.5.063007

“Temperature dependence of carrier spin polarization determined from current-induced domain wall motion in a Co/Ni nanowire”, K. Ueda, T. Koyama, R. Hiramatsu, D. Chiba, S. Fukami, H. Tanigawa, T. Suzuki, N. Ohshima, N. Ishiwata, Y. Nakatani, K. Kobayashi, and T. Ono, Appl. Phys. Lett. 100, 202407 (2012). DOI: 10.1063/1.4718599

“Current-Induced Domain Wall Motion in

Perpendicularly Magnetized Co/Ni Nanowire under In-Plane Magnetic Fields”, Yoko Yoshimura, Tomohiro Koyama, Daichi Chiba, Yoshinobu Nakatani, Shunsuke Fukami, Michihiko Yamanouchi, Hideo Ohno, and Teruo Ono, Appl. Phys. Express 5 (2012) 063001. DOI: 10.1143/APEX.5.063001

“Electrical control of Curie temperature in cobalt using an ionic liquid film”, K. Shimamura, D. Chiba, S. Ono, S. Fukami, N. Ishiwata, M. Kawaguchi, K. Kobayashi and T. Ono, Appl. Phys. Lett. 100, 122402 (2012). DOI: 10.1063/1.3695160

“Effect of Current on Domain Wall Depinning Field in Co/Ni Nanowire”, Ryo Hiramatsu, Kouta Kondou, Tomohiro Koyama, Yoko Yoshimura, Daichi Chiba, Shunsuke Fukami, Nobuyuki Ishiwata, and Teruo Ono, Jpn. J. Appl. Phys. 51 (2012) 028005. DOI: 10.1143/JJAP.51.028005

“Time-Domain Measurement of Current-Induced Spin Wave Dynamics”, Koji Sekiguchi, Keisuke Yamada, Soo-Man Seo, Kyung-Jin Lee, Daichi Chiba, Kensuke Kobayashi, and Teruo Ono, Phys. Rev. Lett. 108, 017203 (2012). DOI: 10.1103/PhysRevLett.108.017203

②① “All-electrical operation of magnetic vortex core memory cell”, K. Nakano, D. Chiba, N. Ohshima, S. Kasai, T. Sato, Y. Nakatani, K. Sekiguchi, K. Kobayashi, and T. Ono, Appl. Phys. Lett. 99, 262505 (2011). DOI: 10.1063/1.3673303

②② “Electrical control of the ferromagnetic phase transition in cobalt at room temperature”, D. Chiba, S. Fukami, K. Shimamura, N. Ishiwata, K. Kobayashi, T. Ono, Nature Materials 10, 853-856 (2011). DOI: 10.1038/nmat3130

②③ “Real space observation of current-induced magnetic domain wall displacement in Co/Ni nano-wire by photoemission electron microscopy”, N. Ohshima, T. Koyama, H. Tanigawa, M. Kotsugi, T. Ohkouchi, D. Chiba, T. Kinoshita, T. Ono, J. Phys.: Condens. Matter 23, 382202 (2011). DOI: 10.1088/0953-8984/23/38/382202

②④ “Effect of the Oersted field on a vortex core switching by pulse spin current”, Y. Nakatani and T. Ono, Appl. Phys. Lett. 99, 122509 (2011). DOI: 10.1063/1.3643140

②⑤ “Electrical Investigation of Notch Width Dependence of Domain Wall Structure in Co/Ni Nanowires”, K. Kondou, R. Hiramatsu, T. Koyama, Y. Nakatani, D. Chiba, S. Fukami, N. Ishiwata, T. Ono, Jpn. J. Appl. Phys. 50, 073002 (2011). DOI: 10.1143/JJAP.50.073002

②⑥ “Current-Induced Magnetic Domain Wall Motion in Co/Ni Nanowire at Low Temperature”, K. Ueda, T. Koyama, D. Chiba, K. Shimamura, H. Tanigawa, S. Fukami, T. Suzuki, N. Ohshima, N. Ishiwata, Y. Nakatani, T. Ono, Appl. Phys. Express 4, 063003 (2011). DOI: 10.1143/APEX.4.063003

②⑦ “Magnetic field insensitivity of magnetic domain wall velocity induced by electrical current in Co/Ni nanowire”, T. Koyama, D. Chiba, K. Ueda, H. Tanigawa, S. Fukami, T. Suzuki, N. Ohshima, N. Ishiwata, Y. Nakatani, T. Ono, Appl. Phys. Lett. 98, 192509 (2011). DOI: 10.1063/1.3590713

以上、すべて査読有り

〔学会発表〕(計 30 件)

(1) T. Ono, International Magnetics Conference 2015, Beijing, China, May 12th, 2015 (招待講演)

“Domain wall motion by electric field gating”

(2) T. Ono, International Conference on Magnetism, July 12, 2012, Busan, Korea “Current-induced domain wall motion in perpendicularly magnetized nanowire” (招待講演)

この他 28 件の国際会議招待講演を行った。

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

小野 輝男 (ONO, Teruo)  
京都大学・化学研究所・教授  
研究者番号：9 0 2 9 6 7 4 9

### (2) 研究分担者

### (3) 連携研究者

森山 貴広 (MORIYAMA, Takahiro)  
京都大学・化学研究所・准教授  
研究者番号：5 0 6 4 3 3 2 6

キム カプチン (KIM, KabJin)  
京都大学・化学研究所・助教  
研究者番号：4 0 7 1 1 7 7 6

千葉 大地 (CHIBA, Daich)  
東京大学・工学系研究科・准教授  
研究者番号：1 0 5 0 5 2 4 1

河野 浩 (KOHNO, Hiroshi)  
名古屋大学・理学研究科・教授  
研究者番号：1 0 2 3 4 7 0 9

仲谷 栄伸 (NAKATANI, Yoshinobu)  
電気通信大学・情報理工学研究科・教授  
研究者番号：2 0 2 0 7 8 1 4