

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 5月25日現在

機関番号：24403

研究種目：若手研究（A）

研究期間：2010～2012

課題番号：22686004

研究課題名（和文） スピン流スピン波の微視的解析とその応用

研究課題名（英文） Microscopic analysis of spin-current spin wave and its application

研究代表者

戸川 欣彦（TOGAWA YOSHIHIKO）

大阪府立大学・21世紀科学研究機構・准教授

研究者番号：00415241

研究成果の概要（和文）：本研究では、透過型電子顕微鏡を用いたその場計測法を駆使し、スピン流が誘起するスピン波の特性を微視的に解明し、スピン流スピン波を用いた磁化ダイナミクスの制御方法を確立した。スピン波運動モードを制御するためのこれらの手法は、将来的に、次世代スピン電子素子においてスピン電気信号の高速変調・増幅・反転作用などの機能を達成するための基盤技術として活用される。

研究成果の概要（英文）：We have clarified the nature of spin wave induced by spin current, namely, spin-current spin wave in nanofabricated ferromagnetic wires mainly by means of *in-situ* transmission electron microscopy and have developed methods to control and manipulate the magnetization dynamics by using spin-current spin wave. These methods will be utilized as fundamental technology to obtain various functions of fast modulation, amplification, and inversion of spin electric signal in the next-generation spin electric devices.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	10,600,000	3,180,000	13,780,000
2011年度	7,300,000	2,190,000	9,490,000
2012年度	2,200,000	660,000	2,860,000
年度			
年度			
総計	20,100,000	6,030,000	26,130,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎、応用物性・結晶工学

キーワード：スピントロニクス、スピン流、スピン波、磁化ダイナミクス、ローレンツ電子顕微鏡法、強磁性細線、カイラル磁性体、カイラル磁気秩序

1. 研究開始当初の背景

電子が有するスピン自由度や磁性体が有する不揮発性を活用するスピントロニクスはエレクトロニクスの概念を拡張し、低エネルギー消費社会や量子情報処理を実現するための革新的技術を提供するものとして、学術的、産業的に注目を集めている。

スピントランジスタなどの次世代スピン

電子素子において、スピン電気信号の高速変調・増幅・反転作用は必須の機能であり、磁性体を流れるスピン流が励起するスピン波を用いた機能の実現が期待されている。

スピン流を用い、特定波数のスピン波を選択的に励起しその振幅を自由に制御することができれば、磁化ダイナミクスを通じ、スピン電気信号の高速変調・増幅・反転作用が

実現される。しかしながら、スピンの流が誘起するスピン波(スピン流スピン波)の特性は実験的にほとんど解明されておらず、その詳細を理解し振舞いを制御することはスピン流が誘起する磁化ダイナミクスを活用するスピン電子素子の開発において今後ますます重要となる。

2. 研究の目的

本研究は、透過型電子顕微鏡(TEM)を用いた電流印加下でのその場計測法を駆使し、磁気異方性を制御した磁気細線において、スピン流が誘起するスピン波の振舞いを微視的に精査しその特性を解明することを研究目的とする。得られる微視的知見と高速磁気抵抗計測に基づき、スピン流が励起するスピン波の波数や振幅を自由に制御し、磁化ダイナミクスの制御方法を確立することを目指す。スピン波運動モードの制御を通じて、スピン電気信号の変調・増幅・反転動作を達成し、将来的に、次世代スピン電子素子の開発に貢献する。

3. 研究の方法

本研究は、透過型電子顕微鏡を用いたその場計測法を駆使し、スピン流が誘起するスピン波の特性を微視的に解明し、スピン流スピン波を用いた磁化ダイナミクスの制御方法を確立することを研究目的とする。そのため、3つの研究項目 (1) 磁気異方性を制御したパーマロイ細線の作製、(2) パーマロイ細線におけるスピン流スピン波特性の微視的解析、(3) スピン流スピン波を用いた磁化ダイナミクスの制御法の確立 を設定し、研究を進展させた。初年度と次年度は、研究項目 (1)、(2) に注力し、次年度と最終年度に研究項目 (2)、(3) を遂行した。

4. 研究成果

磁気異方性を制御したパーマロイ細線の作製方法を確立することに成功した。パーマロイ細線の製膜方法、細線の幅や厚みにより、試料の形状磁気異方性と面内垂直磁気異方性を競合させ、パーマロイ細線の実効的な面内磁気異方性の値を制御することができることを見出した。また、数値計算を用い、磁

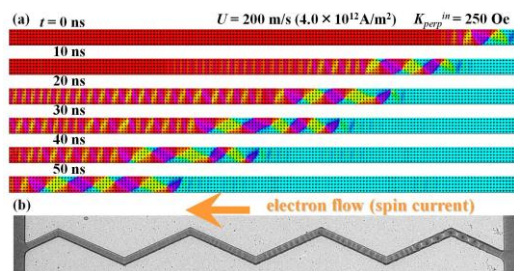


図1 スピン流印加下での磁気縞の生成と伝搬。(a) 数値計算(b)ローレンツ TEM 像。

気異方性を制御した細線はスピン流により誘起されるスピン波を細線内に顕在化させるのに有効であることを示した (図 1(a))。

次に、自己開発した電流印加用透過型電子顕微鏡ホルダーを用い、作製した細線 (磁気異方性を制御したパーマロイ細線) において、電流(スピン流)を印加することにより磁気縞が誘起されることを実証した (図 1(b))。磁気縞構造はスピン流が誘起するスピン波により励起されるスピン構造であり、そのスピン構造が顕在化されて磁気縞ダイナミクスが生じることがわかった。

これらの実験事実を応用し、非局所的電極配置を有する試料構造においてスピン流印加により同様の磁気縞ダイナミクスが生じることを実証することに成功した。さらに実験を進め、非局所的電極配置を有する試料構造において熱スピン流を併せて誘起すると磁気縞ダイナミクスが増強される様子を観察することに成功した。

これらの研究成果は、スピン流スピン波の運動モードの制御を行う上で、重要な基礎的知見となる。

スピン流スピン波の特性をより系統的かつ定量的に精査するために、研究計画に加えて、カイラル磁性体におけるカイラル磁気秩序の研究に着手した。カイラル磁気秩序はスピン波モードの厳密解が解析的に与えられる稀有な系であり、理論と実験の両面から詳細な解析を行うことが可能であると期待される。

独自に開発している電子顕微鏡解析手法(その場解析ローレンツ法と小角電子線散乱法)を駆使し、カイラル磁性体においてカイラルらせん磁気秩序とカイラル磁気ソリトン格子が出現することを世界で初めて実証することに成功した (図 2)。

カイラル磁気秩序ではスピン波のコヒー

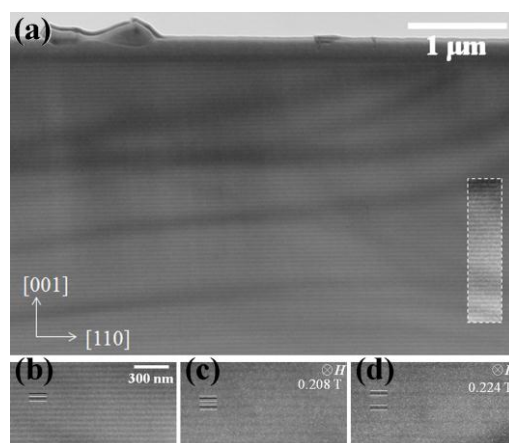


図2 カイラル磁性体におけるカイラル磁気秩序のローレンツ TEM 像。(a)カイラルらせん磁気秩序。(b-d) カイラルソリトン格子。

レントな集団運動が巨視的スケールにわたって生成される。輸送特性や電子スピン共鳴などを通じスピン流スピン波の集団運動する様子を観察することに成功した。この特性を用いることで、スピン流スピン波の増強が可能であることが明らかになった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計14件)

- ① Y. Togawa, Small angle electron scattering of magnetic fine structures, To appear in Microscopy, 査読有.
- ② K. Takayanagi, T. Koyama, S. Mori, K. Harada, Y. Togawa, Small-angle electron scattering from magnetic artificial lattice, J. Electron Microscopy 61, 401-407 (2012), 査読有.
- ③ Y. Togawa, T. Koyama, K. Takayanagi, S. Mori, Y. Kousaka, J. Akimitsu, S. Nishihara, K. Inoue, A. S. Ovchinnikov, J. Kishine, Chiral magnetic soliton lattice on chiral helimagnet, Phys. Rev. Lett. 108, 107202-1-5 (2012), 査読有. (Selected as Spotlighting Exceptional Research, American Physical Society. Highlighted in a Viewpoint in Physics 5, 28 (2012). 日経産業新聞(2012/2/28))
- ④ T. Koyama, S. Yano, Y. Togawa, Y. Kousaka, S. Mori, K. Inoue, J. Kishine, J. Akimitsu, Unconventional magnetic domain structure in the ferromagnetic phase of MnP single crystals, J. Phys. Soc. Jpn. 81, 043701-1-4 (2012), 査読有.
- ⑤ T. Koyama, K. Takayanagi, Y. Togawa, S. Mori, K. Harada, Small angle electron diffraction and deflection, AIP Advances 2, 012195-1-7 (2012), 査読有. (Selected in Virtual Journal of Nanoscale Science & Technology Volume 25, Issue 15, April 9, 2012)
- ⑥ Y. Togawa, T. Kimura, K. Harada, A. Tonomura, Y. Otani, Control of magnetic domain nucleation using spin current in Permalloy nanowires, J. Phys. D: Appl. Phys. 44, 064015-1-7 (2011), 査読有.
- ⑦ K. Takayanagi, S. Mori, Y. Togawa, Magnetic Ripple in Permalloy Narrow Wires Investigated by Lorentz Microscopy, IEEE Xplore TENCON2010, 1875-1877 (2010), 査読有.
- ⑧ Y. Togawa, K. Takayanagi, T. Kimura, K. Harada, T. Akashi, A. Tonomura, S. Mori, Y. Otani, Crystalline analysis of Permalloy narrow wires subject to current pulses, J. Appl. Phys. 107, 09A326-1-3 (2010), 査読有.
- ⑨ 戸川欣彦、木村崇、原田研、明石哲也、

外村彰、大谷義近、スピン流に誘起される磁化ダイナミクス、顕微鏡(日本顕微鏡学会誌) 45, 156-160 (2010), 査読有.

〔学会発表〕(計42件)

- ① 戸川欣彦、電子線小角散乱とカイラル磁気秩序、第3回 CROSSroads 研究会「カイラル磁性体一起源と機能」(招待講演)、2012/12/18、いばらき量子ビーム研究センター
- ② 戸川欣彦、スピンカイラル秩序の観測-スピン位相ソリトン格子-、平成24年度日本結晶学会年会 物理・鉱物系シンポジウム(招待講演) 2012/10/26、東北大学片平キャンパス
- ③ 戸川欣彦、電子線小角散乱法によるスピントロニクス研究、日本磁気学会スピンエレクトロニクス専門研究会(招待講演)、2012/6/8、名古屋大学
- ④ Y. Togawa, Chiral magnetic order on chiral magnet, Tonomura FIRST International Symposium "Electron Microscopy and Gauge Fields", 2012/5/9, Tokyo.
- ⑤ 戸川欣彦、電子線で見るカイラル磁気秩序、日本磁気学会分科会 化合物新磁性研究会(招待講演)、2012/3/2、東京大学本郷キャンパス(東京都)
- ⑥ 戸川欣彦、磁性体における電子線の位相情報、日本顕微鏡学会第55回シンポジウム(招待講演)、2011/10/1、サンポート香川(香川県・高松市)
- ⑦ 戸川欣彦、高柳和矢、原田研、森茂生、仲谷栄伸、スピン流が誘起する磁気縞ダイナミクス、日本物理学会 2011 年秋季大会、2011/9/23、富山大学(富山県)
- ⑧ 高柳和矢、原田研、森茂生、戸川欣彦、パルス電流印加による磁気縞ダイナミクスのその場観察、日本顕微鏡学会 第67回学術講演会、2011/5/16、福岡国際会議場(福岡県)
- ⑨ Y. Togawa, Control of magnetic domain nucleation using spin current in Permalloy nanowires (Invited), International Symposium on Advanced Materials and Applications (ISAMMA 2010), 2010/7/13, Sendai (Japan)
- ⑩ 戸川欣彦、木村崇、原田研、明石哲也、外村彰、森茂生、仲谷栄伸、大谷義近、スピン流が誘起する磁気縞状態、日本顕微鏡学会、2010/5/25、名古屋国際会議場(愛知県)

〔産業財産権〕

○出願状況(計1件)

名称: 電子顕微鏡、および回折像観察方法
発明者: 戸川欣彦、原田研、森茂生
権利者: 大阪府立大学

種類：特許
番号：特願 2011-61352
出願年月日：2011/3/18
国内外の別：国内

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.osakafu-u.ac.jp/info/publicity/release/2011/20120227.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

戸川 欣彦 (TOGAWA YOSHIHIKO)

大阪府立大学・21世紀科学研究機構・准教授

研究者番号：00415241