

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 7 日現在

機関番号：24506

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2015

課題番号：25610098

研究課題名(和文) 格子振動によって誘起される磁壁輸送の究明

研究課題名(英文) Study on magnetization reversal and dynamics induced by lattice oscillation

研究代表者

山口 明啓 (Yamaguchi, Akinobu)

兵庫県立大学・高度産業科学技術研究所・准教授

研究者番号：70423035

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：磁性体の磁化反転機構は、古くから研究されており、基礎学理だけではなく応用技術にも極めて重要である。近年のスピン트로ニクス分野の興隆に伴い、電流や電圧による磁化反転機構が実証されてきたが、電流密度が大きく発熱等の諸問題が問題になっている。本研究では、磁気モーメントと格子が直接結晶を介して結合していることに着目し、格子振動による磁化反転機構についての可能性等について研究を行った。格子振動として表面弾性波(SAW)・電流・磁場等を入力して、磁性体の磁気応答特性を種々の方法で検出・測定した。測定結果を理論モデル計算と比較検討し、電流・磁場・温度に対する応答特性について、ほぼ理解できることが分かった。

研究成果の概要(英文)：Magnetization reversal, that has been investigated through the ages, is crucial important for both fundamental magnetism and engineering applications. Recently, on the technological application of new spintronic devices, microscale and nanoscale ferromagnets have proven to be appropriate for clarifying the spintronics associated with magnetization dynamics induced by spin-polarized current and voltage. However, the Joule heating and high current density required for the magnetization reversal are problems for device applications. In this study, we focused on that the magnetic moments tightly coupled with their lattice within a crystal. We investigated that the magnetization dynamics induced by the surface acoustic wave (SAW), spin-polarized current, and microwave magnetic fields. By comparison of theoretical approach, micromagnetic calculations and experimental results, we qualitatively understood the magnetization dynamics induced by the current, magnetic fields, and temperature.

研究分野：磁気物理

キーワード：磁壁移動 表面弾性波 スピンドYNAMIXS 磁化反転

1. 研究開始当初の背景

磁性体の磁化反転機構は、古くから研究されており、基礎学理だけではなく応用技術にも極めて重要である。特に磁性体の磁気制御は、磁石性能を決定する上でも、不揮発性磁気メモリに代表される磁気記録においても、性能向上の基本原則と基礎技術となる重要な研究である。その成果は、永久磁石の高性能化やハードディスクの記録密度の高密度化に寄与してきた。申請者らは、外部磁場ではなく、強磁性体に直接電流を印加することによる伝導電子のスピンの角運動量移行を励起させて、磁化反転や磁壁移動を誘発することを実証してきた。電流による磁化反転および磁壁駆動は、不揮発性磁気メモリ等に应用されているが、電流を伴うため発熱や書き込み電流密度が高いことが問題となっている。最近では、電圧による磁気制御機構についての研究も行われている。ここでは、磁化反転機構について、新しい視点から磁気制御機構に焦点を当て、保磁力の向上や軟磁性材料の研究開発につながる基礎研究を行うことを目指した。特に磁化反転機構の先端部を担うことになる磁壁移動を何らかの物理機構によって制御できれば、保磁力を制御することができるため、発電機の性能向上に寄与し、エネルギー問題を解決する方策を得られると期待される。

2. 研究の目的

本研究では、新奇な磁化反転機構として、固体の結晶構造において、磁気モーメントと格子が直接結合していることに着目し、固体中を伝播する格子振動によって磁壁駆動を誘発するかを確認することを目的として研究を行う。また、基本的な磁区構造制御方法の確立や動的挙動の検出等も同時に行うことで、磁気物理の基本原則の究明を行うことを目的とした。

3. 研究の方法

シリコン基板や単結晶圧電体基板 LiNbO_3 上に基板結晶方位を考慮して、微小磁性体を半導体微細加工技術によって作製および配置した。シリコン基板や LiNbO_3 基板には、予め、表面弾性波(SAW)を励起するための楕型電極(IDT)を微細加工によって形成している。作製した微小磁性体の磁気抵抗を測定することによって、磁壁の有無を確認し、SAWを励起し

て磁壁移動に関するデビニング磁場の検出並びに測定を行う。

また、微小磁性細線に高周波電流を印加して、その整流効果やノイズ測定を行うことで、磁壁の動的挙動を検出する。さらに、大型放射光施設SPRING-8を用いた磁気構造の動的挙動を直接観察する手法等も用いて、磁気状態の静的・動的挙動ならびに制御技術について研究を行った。

4. 研究成果

図1は、SPRING-8からの入射パルスに同期して、微小磁性体を励起して、その磁区構造の動的挙動をpump&probeで測定する方法の概要である。本研究では、外部入力励起によるpump&probe時間分解実空間測定を用いて、直接観察を試みた。

まず、SAW励起用基板は、基板の絶縁性が非常に高く、チャージアップのためにX線磁気円二色性光電子顕微鏡(XMCD-PEEM)がうまく測定できなかった。チャージアップ対策を施して、XMCD-PEEM観察を行ったときに、想定していなかった磁気状態が出現し、現在調査中である。この点については継続して研究を行い、近いうちに解析データをまとめて公表できると考えられる。

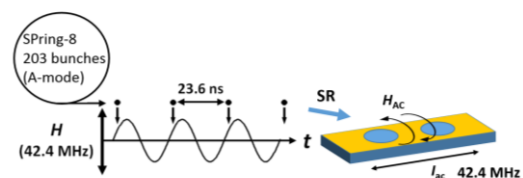


図1 SPRING-8を用いたPump&Probe測定の概念図。

次に、磁気抵抗測定を行い、SAW励起による磁気状態の変化の検出を試みた。現在までに得られている結果としては、SAW励起が無い場合と比較した結果、デビニング磁場に変化は多少生じたが、SAW励起による温度効果の寄与が問題となった。そこで、熱による磁化揺らぎの効果を調査するために、磁性細線に電流を印加した際の磁気応答ノイズ測定を行い、ジュール発熱による磁化揺らぎ発生機構を理論モデルとの比較実験より明らかにした。この研究によって、微小磁性における温度による磁化揺らぎの寄与を明らかにした。

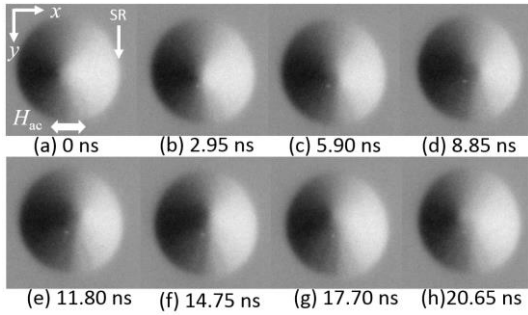


図2 磁気渦のSPring-8を用いたPump&Probe測定 の概念図.

次に、シリコン基板上での微小磁性体内部の磁区構造の動的挙動を直接観察する実験を行った。図2にXMCD-PEEMによる磁気円盤中の磁区構造挙動を直接観察した結果を示す。Pump&Probeによって、磁気円盤中の磁気渦が旋回運動している様子が分かる。この磁気渦の旋回軌道を示したのが、図3になる。この旋回軌道は、共鳴周波数と励起周波数のずれや磁気渦を閉じ込めているポテンシャルの空間的な分布を反映している。解析モデルとマイ

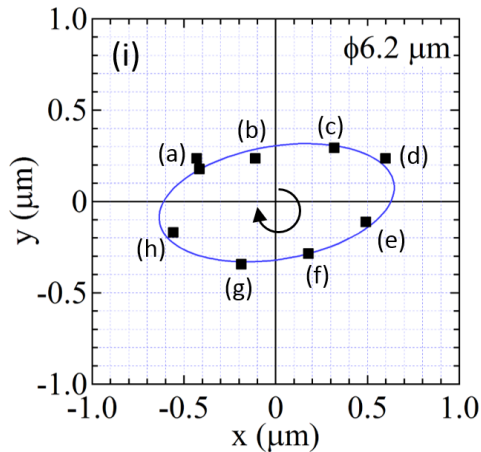


図3 磁気渦の旋回軌道.

クロマグネティックス・シミュレーションから導かれた旋回軌道と実験結果を比較した結果、ほぼ定性的に一致し、モデル計算が磁気渦挙動を予見できることを示した。

次に、磁気円盤の形状を人為的に操作し、円盤に耳をつける。その耳の大きさを大きくしていくと、閉じ込めポテンシャルの形状が変化し、旋回軌道が扁平状態になることが分かった。

以上は、磁気渦が一つ閉じ込められた場合の動的挙動であったが、2つ磁気渦が閉じ込められた場合についても、その動的挙動を研究した。図4に示すように、楕円形状にすることで、磁気渦が2つ入る。この2つの磁気渦は、静磁エネルギーと交換相互作用を介して相互作用し、外部刺激による動的挙動が変化する。

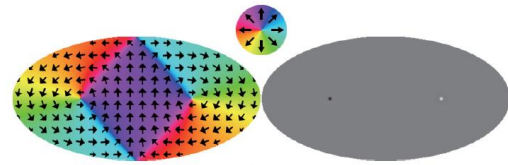


図4 楕円型磁気円盤に閉じ込めた2つの磁気渦が形成された磁区構造. (左)磁気モーメントの空間分布. (右)磁化の面直成分の空間分布.

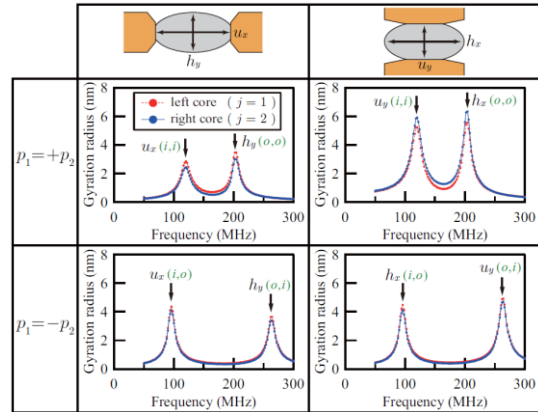


図5 楕円型磁気円盤に閉じ込めた2つの磁気渦に対して、長軸あるいは短軸方向から高周波電流を印加した場合の磁気共鳴スペクトル。磁気渦の分極方向は同じ($P_1=+P_2$)場合と異なる場合($P_1=-P_2$)によって、旋回挙動が異なるため、スペクトルに違いが生じる。

図5では、高周波電流をコプレーナ型伝送路に沿って印加し、楕円型磁気円盤の長軸あるいは短軸から入力した場合の磁気共鳴スペクトルを示している。

磁気渦は、面直方向の磁化成分をもっており、上向きか下向きかの2つの状態と面内の磁化回転方向が左回りか右回りかの2つの状態がある。単独の磁気渦の場合、この4つの状態が縮退している。磁気渦が2つ閉じ込められた場合には、その組み合わせによって、磁気渦の旋回挙動が変化する。図5では、磁気渦の分極方向の組み合わせが同じ($P_1=+P_2$)場合と異なる場合($P_1=-P_2$)で共鳴スペクトルに違いが生じていることが分かる。さらに、高周波電流を印加する際に伴う磁場成分も考慮して、電流による断熱スピントルク成分と磁場成分による共鳴モードの違いも明らかにした。

基本物性の研究として、微小磁性体の強磁性共鳴について測定を行った。図6では、 $\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$ 合金からなる微小磁性体をコプレーナ型伝送路に配置して、高周波電流を印加した際の整流電圧を測定することで、強磁性共鳴スペクトルを得た。外部磁場の印加方向によって、スペクトルが変化するが、ここでは

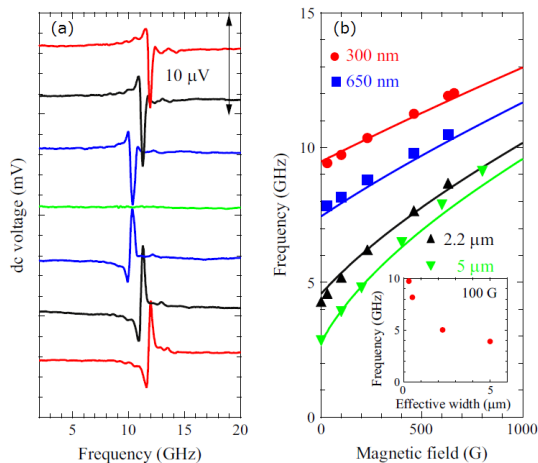


図6 微小磁性体の整流効果による強磁性共鳴スペクトル。(a)線幅300 nm, 細線長20 nm, 厚み 50 nmのNi₈₁Fe₁₉合金細線における高周波整流スペクトル。外部磁場は, 細線長軸方向から, 45度傾いた方向から面内で印加。図(a)の下から, -620, -450, -230, 0, +230, +460, +630 Gの静的外部磁場を印加。±の符号は外部磁場の方向を示しており, +は45度, -は225度に対応する。(b)共鳴周波数の細線幅依存性。挿入図は, 印加磁場が100 Gの時の強磁性共鳴周波数の線幅依存性を示す。

信号強度が大きく検出できる45度方向のスペクトルを測定した。同様の測定を細線形状の異なる複数の細線でおこなうことで, 図6(b)に示すような強磁性共鳴の細線幅依存性を測定することに成功した。この結果から, 細線幅を制御することで, 強磁性共鳴周波数を制御できることが分かった。その理由は, Ni₈₁Fe₁₉合金の場合, 結晶磁気異方性が無視できるほど小さいので, 形状磁気異方性による内部有効磁場の制御が可能であるからである。いずれにしても, 形状によって, 磁気状態を制御できることが明らかになり, 測定したい物理現象に合わせて, 磁性体の設計を行えばよいということを明らかにした。

制御した理想的な物理系を創製して, 基本的な磁壁・磁気渦および微小磁性体の静的・動的磁気挙動について明らかにした。一方, 圧電体基板に励起される表面弾性波を用いて粉体輸送実験を行い, 表面弾性波によって, 粉体輸送が可能であり, 確かに格子振動の伝搬モードが生じていることが分かった。表面弾性波と微小磁性体の組み合わせ実験を行ったが, 予期できない現象が生じたため, その現象解析に時間を取られることになった。しかし, 解決の糸口が得られた。

以上の結果を元に, 格子振動による磁壁挙動の実験を再度, 見直して試料デザインおよ

び測定を進めている。

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 9 件)

- 1) A. Yamaguchi, H. Hata, T. Ohkochi, M. Goto, M. Kodama, Y. Kasatani, K. Sekiguchi, Y. Nozaki, M. Kotsugi and T. Kinoshita, “Real-space observation of anisotropic gyration of magnetic vortex core using time-resolved photoemission electron microscopy”, *Japanese Journal of Applied Physics* **55**, 023002-1-13 (2016). 【査読あり】 <http://doi.org/10.7567/JJAP.55.023002>
- 2) A. Yamaguchi, K. Motoi and H. Miyajima, “Highly sensitive detection and stochastic analysis of magnetization fluctuation induced in a nano-scale magnetic wire”, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* **401**, 9–15 (2016). 【査読あり】 <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmmm.2015.10.020>
- 3) Akinobu Yamaguchi, Takao Fukuoka, Ryohei Hara, Kazuhisa Kuroda, Ryo Takahashi and Yuichi Utsumi, “On-chip integration of novel Au electrode with a higher order three-dimensional layer stack nanostructure for surface-enhanced Raman spectroscopy”, *RSC Advances*, **5**, 73194–73201 (2015). 【査読あり】 DOI : 10.1039/c5ra10728h
- 4) A. Yamaguchi, T. Matsumoto, I. Okada, I. Sakurai and Y. Utsumi, “Surface-enhanced Raman Scattering active metallic nanostructure fabricated by photochemical reaction of synchrotron radiation”, *Materials Chemistry and Physics*, **160**, 205-211 (2015). 【査読あり】 <http://dx.doi.org/10.1016/j.matchemphys.2015.04.025>
- 5) R. Hara, T. Fukuoka, R. Takahashi, Y. Utsumi and A. Yamaguchi, “Surface-enhanced Raman spectroscopy using a coffee-ring-type three-dimensional silver nanostructure”, *RSC Advances*, **5**, 1378-1384, (2014). 【査読あり】 DOI : 10.1039/c4ra09309g
- 6) H. Hata, M. Goto, A. Yamaguchi, T. Sato, Y. Nakatani and Y. Nozaki, “Coupled oscillations of vortex cores confined in a ferromagnetic elliptical disk”, *Physical Review B* **90**, 104418-1-14, (2014). 【査読あり】 DOI : 10.1103/PhysRevB.90.104418
- 7) A. Yamaguchi, K. Motoi, H. Miyajima and Y. Utsumi, “Broadband noise spectroscopy of a nano-scale magnetic wire”, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* **364**, 34-38 (2014). 【査読あり】

<http://dx.doi.org/10.1016/j.jmmm.2014.03.066>

- 8) T. Saiki, Y. Matsui, Y. Arisue, Y. Utsumi and A. Yamaguchi, "Powder Transport by Surface Acoustic Wave Actuator using Bragg Reflection", IEEJ Transactions on Electronics, Information and Systems, Vol. **134**(No. 12) pp. 1934-1935 (2014). 【査読あり】 DOI : 10.1541/ieejieiss.134.1934
- 9) 山口明啓, 山本敏寛, 才木常正, 松井優耶, 内海裕一, "微小磁性体のブロードバンド磁気応答検出", 電気学会【A】基礎・材料・共通部門マグネティクス研究会資料, 2014-08-01, IEEJ-MAG14090-1-4 【査読無し】 <http://id.nii.ac.jp/1031/00075514/>

〔学会発表〕(計 9 件)

- 1) T. Saiki, Y. Matsui, A. Yamaguchi, M. Takeo, K. Maenaka, and Y. Utsumi, "High-Performance Feeder Driven by Surface Acoustic Wave for Micro Powders", Proc. of 40th International Conference on Micro and Nano Engineering (MNE2014), P2-12-Tu, p.71, September 22-26(2014), Lausanne, Switzerland
- 2) 松井優耶, 原田昌樹, 山口明啓, 奥田孝一, 内海裕一, 笠井一夫, 浜口和也, 才木常正, "弾性表面波を用いた粉体フィーダーの提案", 日本機械学会 2014 年度年次大会, 東京電機大学東京千住キャンパス, 2014 年 9 月 7 日~10 日, J2240102 (東京都足立区)
- 3) 山本敏寛, 松井優耶, 田中浩介, 才木常正, 内海裕一, 能崎幸雄, 山口明啓, "ナノ磁性体における微小磁気応答特性の検出", 第 38 回 日本磁気学会 学術講演会, 慶應義塾大学日吉キャンパス, 2014 年 9 月 2 日~5 日, 5aC-11 (神奈川県横浜市)
- 4) 山本敏寛, 才木常正, 松井優耶, 岡田育夫, 内海裕一, 山口明啓, "表面弾性波による磁化状態の制御", 平成 26 年 電気学会 基礎・材料・共通部門大会, 信州大学 長野 (工学) キャンパス, 2014 年 8 月 21 日~22 日, 22-B-a1-1 (長野県長野市)
- 5) A. Yamaguchi, Y. Arisue, Y. Matsui, T. Saiki, K. Kuramoto, I. Okada and Y. Utsumi, "Micro-powder blending, transportation and separation using surface acoustic waves", EIPBN May 28 (2014), Washington, USA.
- 6) 松井優耶, 有末康人, 才木常正, 内海裕一, 山口明啓, "弾性表面波デバイスを用いた粉体輸送に関する研究", 先端技術セミナー2014, イーグレ姫路, 2014 年 3 月 11 日, p67 (兵庫県姫路市)
- 7) 山本敏寛, 寄玉侑司, 内海裕一, 山口明啓, 内山剛, "立体型マイクロ磁気インピーダンスセンサの作製と評価", 先端技

術セミナー2014, イーグレ姫路, 2014 年 3 月 11 日, p64 (兵庫県姫路市)

- 8) T. Yamamoto, Y. Yoritama, T. Uchiyama, Y. Utsumi, A. Yamaguchi, "Estimation of magnetic impedance of a thin Fe19Ni81 wire using built up micro-scale pickup coil", 8th International Symposium on Metallic Multilayers (MML2013), pp.288-289, May 19-24. (2013), Kyoto (京都府京都市中区)
- 9) T. Yamamoto, Y. Yoritama, T. Uchiyama, Y. Utsumi, A. Yamaguchi, "Fabrication and characterization of three-dimensional type micro magneto-impedance sensor", 10th International Workshop on High Aspect Ratio Micro and Nano System Technology, pp.225-226, April 21-24. (2013), Berlin, Germany

〔図書〕(計 1 件)

- 1) Spintronics for Next Generation Innovative Devices, Wiley, ISBN: 978-1-118-75191-6, Katsuaki Sato (Editor), Eiji Saitoh (Editor), Arthur Willoughby (Series Editor), Peter Capper (Series Editor), Safa Kasap (Series Editor) 第 5 章を執筆 : Spin torque (domain dynamics)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

山口 明啓 (YAMAGUCHI, Akinobu)
兵庫県立大学・高度産業科学技術研究所・
准教授
研究者番号 : 70423035

(2) 研究分担者

多々良 源 (TATARA, Gen)
国立研究開発法人理学研究所・創発物性科学
研究センター・スピン物性理論研究チー
ム・チームリーダー
研究者番号 : 10271529

内海 裕一 (UTSUMI, Yuichi)
兵庫県立大学・高度産業科学技術研究所・
教授
研究者番号 : 80326298

(3) 連携研究者

なし