

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 8 日現在

機関番号：24506

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25289107

研究課題名(和文) 表面弾性波変調機構を用いたスピン波による情報伝達の提案

研究課題名(英文) Study on the spin dynamics induced by surface acoustic wave

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) 13,900,000円

研究成果の概要(和文)：非接触型近距離無線通信において、無線通信だけではなく、チップ内省電力化や無線電力供給機構を機器や素子に搭載する要求が高まっている。この観点から電荷の流れを伴わないスピンによる情報伝達やエネルギー輸送機構について基礎研究を行った。本研究では、磁気モーメントが固体中の結晶と直接結合していることに着目して、電流による磁化制御に関する物理的知見と格子振動を伴う表面弾性波(SAW)波動工学技術を組み合わせて、スピン波励起やスピン波伝搬等の磁化ダイナミクスについて研究を行った。SAW励起・高周波電流ノ磁場および温度励起によるスピンドイナミクスの検出と解析を行い、理論モデルで定性的に説明できることを示した。

研究成果の概要(英文)：The integration system which assembles the wireless communication system, power-saving technology, and wireless power transmission system is required for contactless near field communication devices. From this point of view, we investigated the information and power transmission technology through spin wave transmission without charge current. We focused on that the magnetic moments tightly coupled with their lattice within a crystal. We studied the magnetization dynamics by combining the spintronic approach which controlled the magnetization through the strong shape anisotropy with technology associated with surface acoustic wave excitation and transmission accompanied by lattice oscillation. We qualitatively understood the magnetization dynamics induced by the current, magnetic fields, and temperature rising due to the Joule heating excited by SAW and current by comparison of the theoretical approach, simulation, and experimental results within the microscale artificial magnets.

研究分野：磁気物理

キーワード：スピンドイナミクス 表面弾性波 ナノ磁性体

## 1. 研究開始当初の背景

RFIDやBluetoothなど非接触型近距離無線通信において、無線通信だけではなく、チップ内省電力化や無線電力供給機構を機器に搭載する要求が高まっている。この観点から電力損失のない手段として電荷の流れを伴わないスピンによる情報伝達が提案されているが、電気信号/スピン波信号の変換効率が小さいこと、スピン波の伝播距離が短いなど、実用化が困難である。そこで、新しい磁区構造制御やスピン波励起モードの基本原理の理解を深め、それらを応用展開することで新しい素子の研究開発に発展させることが求められていた。

## 2. 研究の目的

本研究では、スピン波の起源となる磁気モーメントが固体中の結晶と直接結合していることに着目して、申請者らが“世界に先駆けて実証した電流による磁化制御に関する物理的知見”と“表面弾性(SAW)波動工学技術”を基礎として、スピン波の変調を行うと同時に、SAWによるスピン波増幅を実現し、スピン波による情報伝達機構と超低損失な無線電力輸送機構の基礎学理の究明を目的として研究を行った。また、SAW励起だけではなく、微小磁性体を基板に配置したときの熱揺らぎとスピン揺らぎの関係などにも言及し、スピン波励起そのものの素励起過程の基本機構の解明も行う。

## 3. 研究の方法

シリコン基板、MgO基板と表面弾性波を励起する圧電体基板等、複数の基板を用いて、半導体微細加工技術で微小磁性体を基板に配置する。その微小磁性体の応答特性を電氣的あるいは光学的な手法を用いて測定することで、物理現象を解明し、基本原理を理解する方針で研究を行った。ここで、シリコン基板やMgO基板を用いるのは、圧電体基板上のサンプルの差異を明らかにするためである。

電氣的測定では、磁気抵抗効果を用いた磁気応答特性ならびに高周波印加による居磁性共鳴あるいはスピン波を励起した場合の磁気応答特性を測定する。光学測定では、マイクロカーによる磁化ヒステリシス測定およびSPring-8を用いたX

線磁気円二色性光電子顕微鏡(XMCD-PEEM)による時間分解直接観察手法を用いる。

## 4. 研究成果

UVリソグラフィー法とスパッタ法を用いて、圧電体基板LiNbO<sub>3</sub>にアルミニウムで櫛歯電極を作製した。その後、電子線リソグラフィーとリフトオフ法を用いて、強磁性体を圧電体基板に実装して、試料構造を創製した。初めに、圧電体基板に作製した櫛歯電極によって、SAWを励起できるか、そして励起したSAWの特性がどのようなものかを評価した。表面弾性波の特性測定には、ネットワークアナライザーを用いたSパラメーター測定を行った。図1に測定結果を示す。図1に示されたSAW伝搬特性は、電極幅と電極間距離をそれぞれ10 $\mu$ mと10 $\mu$ mとした櫛歯電極構造を対向させた表面弾性波フィルタ構造の特性である。基本モードであるレイリー波については、ほぼ設計通りの特性を得ることができた。

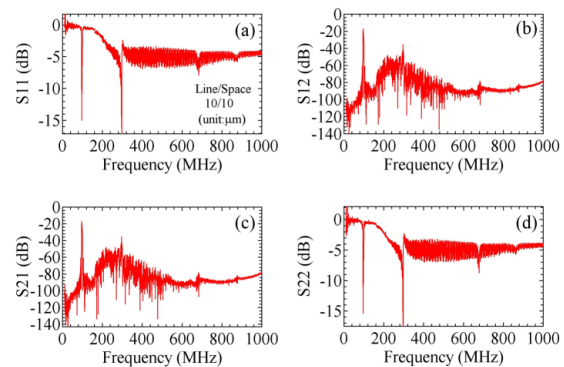


図1 (a)S11 (b)S12 (c)S21 (d)S22 の測定結果。

次に、半導体微細加工技術を用いて、微小磁性体をSAW励起可能な基板に配置した。SAW励起を行いながら、磁気抵抗と強磁性共鳴スペクトルの測定を行った。しかし、想定したような結果が得られなかった。さらに、SPring-8XMCD-PEEMを用いて、SAW励起による磁性体の磁気応答特性を実時間で観察する実験を行った。しかし、基板の絶縁性が高いため、チャージアップによる試料破壊や観察条件の悪化があり、思うように結果を得られなかった。チャージアップの問題を解決すると、想定していなかった現象が観察され、この問題を解決するために時間を取られることになった。これらの諸問題については、最近になって解決の糸口が見えたので、近いうちに解析結果をまとめて発表する予定である。

さて、SAW 励起時の磁気抵抗効果や強磁性共鳴スペクトルに注目すると、温度上昇による磁化揺らぎの寄与があることが予期された。そこで、本研究ではまず、温度と電流による磁化の揺らぎが微小磁性体の磁気応答特性にどのように反映されるのかを明らかにすることにした。

微小磁性体をコプレーナリ伝送線路に配置して、図 2 に示す座標系を適用する。本研究

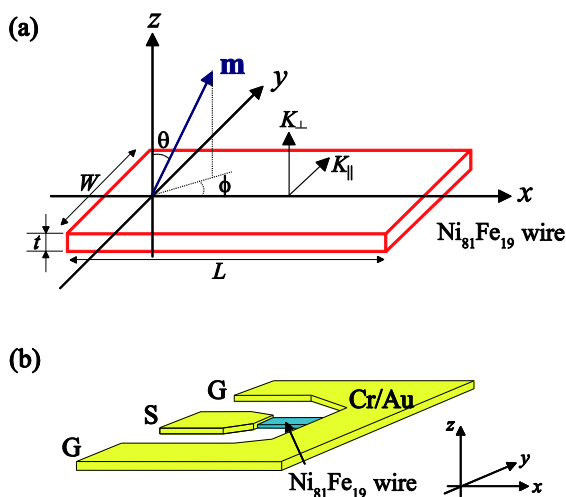


図 2 (a)測定系の座標系の定義。  $m$  は  $\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$  内の単位磁化ベクトル。(b)試料構造の概念図。G と S は電極であり、それぞれ G:Ground, S:Signal に対応する。

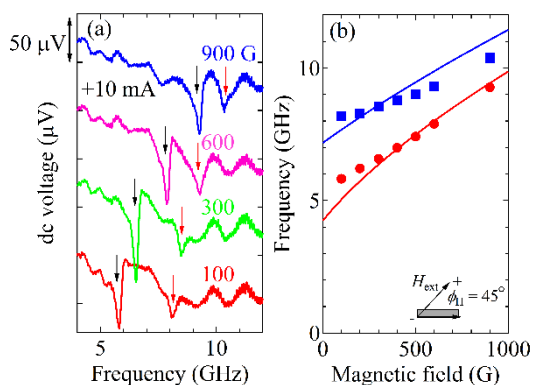


図 3 (a)ブリッジ回路を用いて測定を行ったマイクロ波整流効果スペクトル。直流電流をマイクロ波に重畳して入力した際の応答特性。(b)共鳴周波数の外部磁場依存性。直流で電流と+10mA を印加すると高周波側の励起モードが増大している様子がよくわかる。

では、ブリッジ回路を用いたブロードバンド整流スペクトル測定との直流電流励起による磁化揺らぎを直接スペクトルアナライザで検出する方法の 2 通りを行った。

まず、ブロードバンド測定結果を図 3 に示

す。直流電流の重畳を行うことで、高周波側の励起モードの増大が見られた。この高次モードは、以下の式で記述できるスピン波モードである。

ここで、 $\omega_H = \gamma H$ 、 $\omega_M = 4\pi M_S$ であり、 $\lambda_n$ は線方向に励起される固有モード係数である。 $n$ は整数で与えられるスピン波のモードである。直流電流によって顕著になった共鳴モードは第 1 励起モードであることが分かった。

$$\left(\frac{\omega_n}{\omega_M}\right)^2 = \left(\frac{\omega_H}{\omega_M} + 1 + \frac{\lambda_n}{4\pi}\right) \left(\frac{\omega_H}{\omega_M} - \frac{\lambda_n}{4\pi}\right) \quad (1)$$

次に直流電流によって高次のスピン波モードが顕著に出現する物理機構を究明するために、マイクロ波整流スペクトルの直流電流依存性を測定した。このとき、外部磁場は 100 G と固定し、第一励起モードによるスペクトル

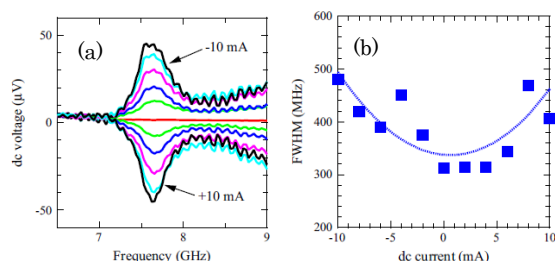


図 4 (a)マイクロ波整流効果スペクトルの直流電流依存性。(b)スペクトル半値幅の直流電流依存性。

の直流電流依存性と共鳴半値幅の直流電流依存性を図 4 に示す。図 4(a)から明らかのように、直流電流によって、スピン波励起が増大されていることが分かる。そのスペクトル半値幅の直流電流依存性を図 4(b)に示す。図 4(b)

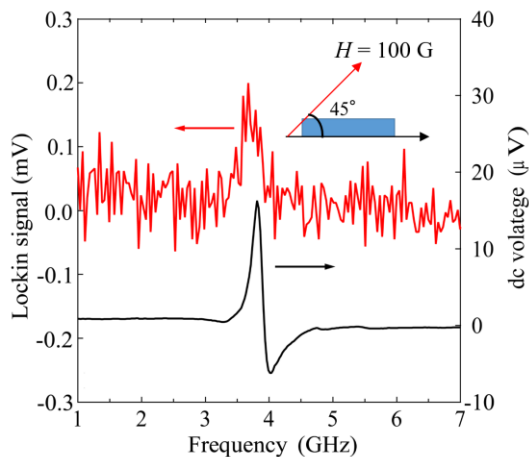


図 5 同一サンプルで測定を行ったマイクロ波整流効果スペクトル(右軸: dc voltage)と直流電流励起ノイズスペクトル(左軸: Lockin signal)。外部磁場は、細線長軸方向から  $45^\circ$  の方向に面内で印加した。測定は室温大気中でおこなった。

の結果から、半値幅は直流電流に対して放物線形状の依存性を示している。この結果は、直流電流によって発生するジュール熱に起因すると考えられる。また、スピン波励起強度は直流電流に比例して大きくなることが分かった。

次に、直流電流による効果のみを調べる評価を行った。測定系は、基本的には図2と同じであるが、測定にスペクトルアナライザーを用いる。微小信号を検出するため、ロックインアンプとの組み合わせで、特定の応答のみを標的にして検出することで有効検出感度と信号ノイズ比を向上させた。図5に測定した結果を示す。図5では、比較のため、同一サンプルのマイクロ波整流効果スペクトルも並べて表示しており、共鳴がほぼ一致していることが分かる。すなわち、この両者の測定手法で励起して検出しているものが同じ現象に由来するものと分かる。

熱による磁化揺らぎを考慮した理論モデルから見積もられるノイズ信号 $\delta V_{\text{signal}}$ は、

$$\delta V_{\text{signal}} \cong \epsilon I_{\text{dc}} I_{\text{mod}} \frac{k_B T}{\eta M_S v_0 H_{\text{Keff}}^{\parallel}} \quad (2)$$

と表記される。ここで、 $\epsilon$ 、 $I_{\text{dc}}$ 、 $I_{\text{mod}}$ 、 $k_B$ 、 $T$ 、 $\eta$ 、 $M_S$ 、 $v_0$ 、 $H_{\text{Keff}}^{\parallel}$ は、それぞれ、回路係数、印加直流電流、変調電流、ボルツマン定数、試料温度、ダンピングに関連する定数、飽和磁化、試料体積、試料に印加されている有効磁場の細線方向に平行な成分である。この理論モデルとの比較を行うために、外部磁場依存性を測定し、ノイズ信号と $H_{\text{Keff}}^{\parallel}$ の関係をプロットしたのが、図6である。測定結果を式(2)でほぼ再現できていることが分かった。

以上の結果から、微小磁性体の磁化揺らぎによるノイズは室温で励起されており、熱雑音によって最も励起されやすいモード：キッテルモードが励起されていることが分かった。SAWの入力時にも、格子振動に伴う熱雑音の寄与があり、この実験結果から熱雑音の寄与の評価を行うことができた。

磁気ダイナミクスについて、圧電体上に形成した微小磁性体の観察実験は道半ばであるが、将来的な実験的研究を行う上でもっとも制御性のよい理想的な系として、磁気渦中心の動的挙動観察を行った。測定は、SPRING-8BL25SUに設置してあるXMCD-PEEM装置にて行った。本実験では、磁気円盤に形成される磁気渦挙動等の直接観察に成功した。理

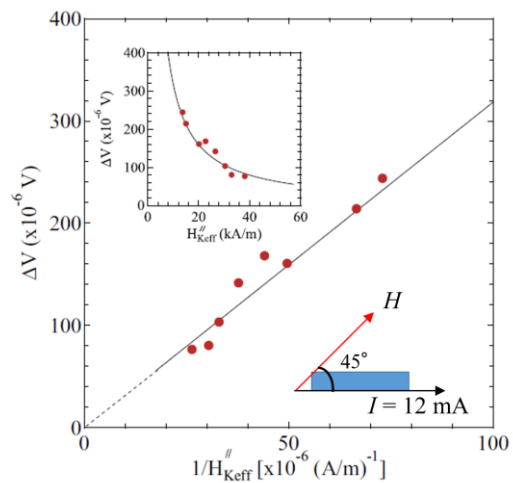


図6 ノイズ信号の有効磁場 $H_{\text{Keff}}^{\parallel}$ 依存性。横軸は、 $1/H_{\text{Keff}}^{\parallel}$ である。挿入図は、横軸が $H_{\text{Keff}}^{\parallel}$ となっている。それぞれフィッティング線を記載している。

論モデルとシミュレーションとの比較検討を行い、現象の物理機構を解明した。図7に実験の概略図と結果の一部を示す。高周波磁場励起の場合[図7(b)]とスピン偏極電流によるスピントルクによる磁気渦旋回挙動[図7(c)]

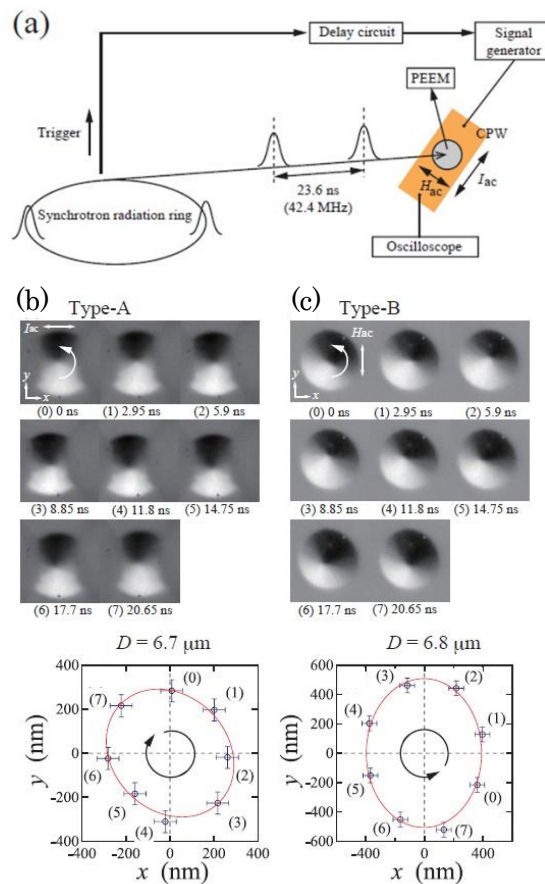


図7 (a) XMCD-PEEM 実験の概略図。(b)電流直接励起による磁気渦旋回運動の観察結果と軌道。(c)高周波磁場励起による磁気渦旋回挙動の観察結果と軌道。放射光の信号と試料への入力を同期させることによって測定を実施。

の観察に成功した。磁気渦中心の旋回挙動は、渦中心の極性(polarity)と巻き方(chirality)に依存し、高周波磁場による旋回挙動とスピントルクによる旋回挙動に差異が生じる。この両者の初期位相や旋回挙動を比較することによって、非断熱スピントルク項の大きさの評価を行うことが可能となる。この実験では、直接両者の旋回軌道を比較することが出来き、定量的な物理量の評価につながる事が期待できる。

以上の結果を基に、引き続き、格子振動によるスピン波励起や動的磁化過程の研究を行っている。

#### 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 11 件)

- 1) A. Yamaguchi, H. Kido, Y. Ukita, M. Kishihara, and Y. Utsumi, “Anisotropic pyrochemical microetching poly(tetrafluoroethylene) initiated by synchrotron radiation-induced scission of molecule bonds”, *Applied Physics Letters* **108**, 051610-1-5 (2016). 【査読あり】  
<http://dx.doi.org/10.1063/1.4941668>
- 2) 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>
- 3) 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.2015.10.002>
- 4) 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
- 5) 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>
- 6) 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
- 7) 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
- 8) 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>
- 9) 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
- 10) 柳澤翔吾, 能崎幸雄, “表面弾性波を用いた磁化ダイナミクスの励起とその電気的検出”, 2014-08007, 電気学会研究会資料, MAG-14-113-1-6 【査読無し】  
<http://id.nii.ac.jp/1031/00075533/>
- 11) 山口明啓, 山本敏寛, 才木常正, 松井優耶, 内海裕二, “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, 内海裕二, 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 Fe<sub>19</sub>Ni<sub>81</sub> 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

能崎 幸雄 (NOZAKI, Yukio)  
慶應義塾大学・理工学部・准教授  
研究者番号: 30304760

浮田 芳昭 (UKITA, Yoshiaki)  
山梨大学・総合研究部・助教  
研究者番号: 40578100

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