

平成 30 年 6 月 20 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H03995

研究課題名(和文) 膜厚方向スピン配列制御と3次元マグノニクスへの展開

研究課題名(英文) Controlling of spin orientation in film thickness direction and development of three dimensional magnetics

研究代表者

松山 公秀 (MATSUYAMA, KIMIHIDE)

九州大学・システム情報科学研究所・教授

研究者番号：80165919

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 11,700,000円

研究成果の概要(和文)：界面交換結合により磁気特性を膜厚方向に階層化した磁性多層膜を対象とし、その膜面内及び膜厚方向にスピン波が量子化される3次元のスピン波共鳴構造について、実験と計算機シミュレーションの両面から研究を行い、マイクロ波交流磁界とスピン波量子(マグノン)との間の相互変換に係る基礎物理を明らかにした。10 GHz以上の高周波域において高効率スピン波励起が可能なマグノニクス媒体の材料設計を行うと共に、マグノンの周波数選択的な励起・応答特性を利用した伝送線路構造の信号処理デバイスや、マグノン励起モードの膜厚方向スピン配列依存性を利用した記憶・論理一体型素子の基本構造を明らかにした。

研究成果の概要(英文)： Ferromagnetic multilayers with hierarchized magnetic properties, integrated with the inter-layer exchange coupling, have been focused. The fundamental physics of the mutual conversion between the microwave field and the quanta of the three dimensional spin wave (3D magnon), where the spin wave is quantized in the in-plane and out-of-plane direction, have been investigated experimentally and numerically. The material parameters have been clarified, which enable efficient magnon emission at the operation frequency higher than 10 GHz. Fundamental device architecture and the expected performance have been clarified for signal processing devices of transmission line structures and the logic in memory devices, which utilize frequency selective excitation of 3D-magnon.

研究分野：磁気デバイス工学

キーワード：電子デバイス・機器 スピンエレクトロニクス データストレージ スピン波 マイクロマグネティック  
ス マグノニクス

### 1. 研究開始当初の背景

高度情報社会の急速な進展に伴い、様々な情報機器において飛躍的な性能向上が要求されている。次世代情報通信機器ではミリ波帯への移行が想定されており、10GHz以上の動作周波数域での信号処理機能の集積化が急務となっている。一方、情報処理分野では、各種応用システムにおける多機能化の要請から、記憶・論理機能の一体化や機能再構成等、高度の処理機能を有するデバイスが要望されている。これらに応えうる革新的技術として、近年、スピンのコヒーレントな才差運動であるスピン波を情報伝搬、論理演算、信号処理に応用するマグノニクスと呼ばれる新しい技術が注目されている。スピン波は電荷の移動を伴わず磁気の波として、位相、振幅、周波数等、様々な波動情報を伝搬することができるため、極低電力での多様な機能動作が可能である。申請者はこれまでに、膜面内方向へのスピン波伝搬特性など、スピン波の基本特性を明らかにすると共に、スピン波間の位相干渉を論理機能に応用したスピン波論理演算デバイス等を提案し、基本動作の検証実験に成功している。

これまでマグノニクス分野の研究では、YIG(Yttrium Iron Garnet)、NiFe等に代表される軟磁性薄膜が主に用いられてきた。これらは、磁気異方性が小さく磁気励起に対する応答感度は高いものの、磁気共鳴周波数は数GHz程度と低く、10GHzを超える周波数域での機能動作には適用出来ない。一方、磁気記録材料として用いられている硬磁性垂直磁化膜の磁気共鳴周波数は数10GHz以上となるが、大きな磁気異方性によってスピンの才差運動が抑制されるためスピン波の励起効率が著しく劣化する。申請者等は、磁気異方性の異なる磁性層を交換結合したECC(Exchange-coupled Composite)磁気記録媒体におけるマイクロ波アシスト磁気記録の研究を並行して行っており、低磁気異方性層での磁気励起が高磁気異方性層に膜厚方向スピン波として波及し、層全体の磁化反転に至る大振幅のスピン才差運動が誘発されることを見出している。

### 2. 研究の目的

本研究では、界面交換結合により磁気特性を階層化した磁性多層膜を微細加工することにより、膜厚方向にもスピン波が量子化される3次元のスピン波共鳴構造を創出し、実験と計算機シミュレーションにより、ミリ波域交流磁界とスピン波量子(マグノン)との間の相互変換に係る基礎物理を明らかにする。さらに、種々の信号・情報処理機能への応用に向けた要素技術を確立する。具体的には先ず、10GHz以上の高周波域において高効率スピン波励起が可能なマグノニクス媒体を開発する。さらに、マグノンの周波数選択

的な励起・応答特性を利用した伝送線路構造のミリ波域信号処理技術や、マグノン励起モードの膜厚方向スピン配列依存性を利用した記憶・論理機能の3次元集積技術の確立に向け、評価素子作製及び基本動作の検証実験を行う。

### 3. 研究の方法

(1) 磁気異方性の異なる磁性層から構成される種々の交換結合膜における、スピндаイナミクスの詳細をマイクロマグネティクスシミュレーションにより解析すると共に、各磁性層の機能を効果的に統合し得る層構造、各構成層の磁気特性、層界面の結合強度等の最適化を行った。

(2) 交換結合膜を構成する高磁気異方性層として、Co/Pd、Co/Ni等の多層膜やMnGa、FePd等のL1<sub>0</sub>規則格子を、また、低磁気異方性として、CoFeB、FeCo等の低磁気損失軟磁性膜を候補とし、3次元マグノニクス材料探索の観点から組成、成膜条件(成膜温度、成膜速度、スパッタガス圧)、下地層(Ta、Cr等)、などの諸条件と磁気特性との関係を調査した。成膜には、複数のターゲット材からの同時及び交互成膜が可能なタンデム型多元マグネトロンスパッタリング装置を用いた。膜構造評価は、XRD構造解析、AFM観察、EDS組成分析等により行なった。

(3) マグノン伝播媒体となる磁性薄膜パターンと、マグノン励起用コプレーナ伝送線路から構成されるスピン波共鳴評価素子を微細加工技術により作製した。ベクトルにおけるネットワークアナライザを用い、伝送系のSパラメータを測定することにより、種々材料系のスピン波共鳴吸収特性を評価した。

(4) 3次元マグノンを用いたミリ波域信号処理デバイスや、膜厚方向のスピン配列構造を情報とする記憶論理一体型デバイスについて、の構造設計及び基本動作の検証を行った。

### 4. 研究成果

(1) 図1に3次元マグノン媒体の低磁気損失層として着目した(a)Co<sub>40</sub>Fe<sub>40</sub>B<sub>20</sub>薄膜、及び(b)Fe<sub>75</sub>Co<sub>25</sub>薄膜における残留磁化比の磁界印

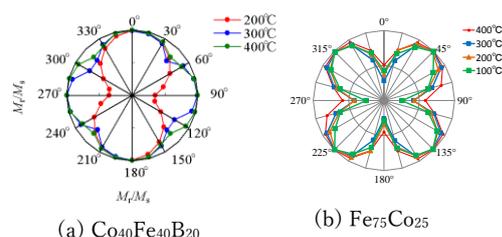


図1 残留磁化比の磁界印加角依存性

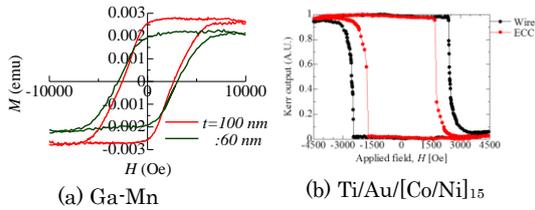
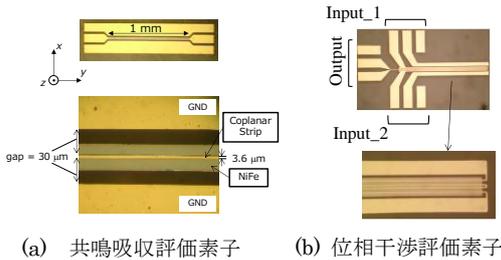


図2 垂直磁化膜の磁気ヒステリシス

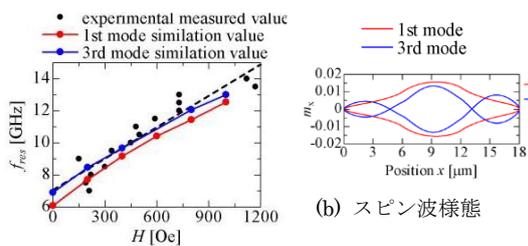
加角依存性を示す。CoFeB では成膜温度 300°C 以上で、FeCo 薄膜については比較的低温 (100°C) でも顕著な 4 回対称磁気異方性が確認された。CoFeB 及び FeCo の容易方向は、MgO 基板して各々<110>(100), <100>(100) 方向であった。図 2 に高磁気異方性層を構成する (a)Ga-Ma 合金薄膜 (層厚 40 nm), 及び (b) [Co/Ni]<sub>15</sub> 多層膜 (層厚 15nm) について測定した膜面垂直方向の磁気ヒステリシス曲線を示す。基板温度、層構成の適正化により、残留磁化比 1, 保磁力 3.0 kOe (GaMn), 2.8 kOe ([Co/Ni]<sub>15</sub>) の垂直磁化膜が得られた。

図 2(b)に示されるように、[Co/Ni]多層膜については、層厚 2nm の NiFe 合金薄膜を上層に積層成膜することにより保磁力が 300 Oe 程度減少していることから両層間に交換結合が作用していることが示唆される。

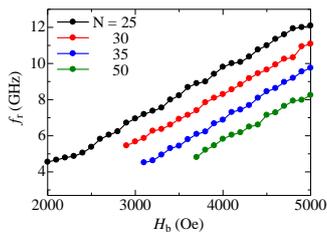


(a) 共鳴吸収評価素子 (b) 位相干渉評価素子

図3 スピン波機能動作評価素子



(a) 共鳴周波数のバイアス磁界依存性 (CoFeB)



(c) 共鳴周波数のバイアス磁界依存性 ([Co/Ni]<sub>N</sub>)

図4 スピン波共鳴特性

上記薄膜及びこれらの交換結合膜を材料とする図3に示すような機能動作評価素子を微細加工により作製し、基本動作の評価実験を行った。図4(a)に Co<sub>40</sub>Fe<sub>40</sub>B<sub>20</sub> (層厚 40 nm) を用いて作製した評価素子におけるスピン波共鳴周波数  $f_{res}$  のバイアス磁界 ( $H_b$ ) 依存性を示す。図4(b)のシミュレーション結果から、コプレーナ伝送線が作るマイクロ波磁界により磁性細線の幅方向端部を節とする定在スピン波の形成が示唆される。図4(c)は積層数  $N$  の異なる垂直磁化膜 ([Co/Ni]<sub>N</sub>) における  $f_{res}$  の  $H_b$  依存性を示している。 $N$  の減少に伴い  $f_{res}$  が高周波側にシフトしていることから、 $N=25\sim 50$  の範囲では同膜の垂直磁気異方性定数が  $N$  の減少により単調に増大していることが分かる。

(2) 磁気異方性の異なる磁性層から成る交換結合膜を対象とし、図5に示すような素子構造をデバイスモデルとしてそのスピンドイナミクスを精査した。幅 1  $\mu\text{m}$  の磁性細線と平行に配した2本の平行導体へのマイクロ波電流の通電を想定し、その作る磁界によりスピン波を励起している。磁性細線中央部を検出領域とし誘導起電力  $V_{out}$  を評価した。

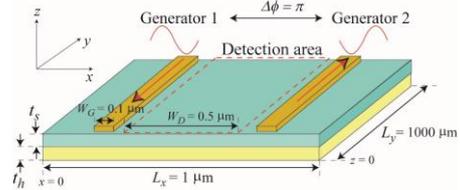


図5 交換結合 2 層膜におけるスピン波伝播評価素子の設計

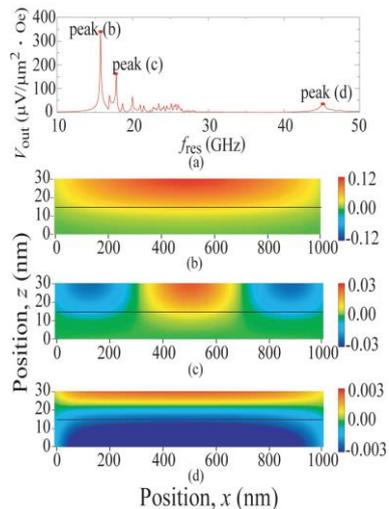


図6 (a) 交換結合膜におけるマグノン共鳴特性. (b),(c),(d) 3 次元マグノンの歳差運動様態

図6は  $V_{out}$  の励起周波数 ( $f_{res}$ ) 依存性、及び  $V_{out}$  の共鳴ピークにおけるスピン波の様態を示

している。励起周波数により、1次 ( $f_{res}=15.8$  GHz), 3次 ( $f_{res}=16.2$  GHz), 膜厚方向スピン波 ( $f_{res}=45.2$  GHz) の3つの共鳴ピークが出現している。低磁気異方性(図中上層)の歳差運動振幅は高磁気異方性に比べ著しく小さくなっており、面内及び膜面垂直方向に非一様な3次元マグノンの励起がみてとれる。図7(a)に示すように、 $f_{res}$ は層厚比(高磁気異方性層厚  $t_h$ /総膜厚  $t_t$ )に応じ、各層の  $f_{res}$  を上・下限として連続的に変化する。トルク解析により、交換結合による  $f_{res}$  の変化は膜厚方向に沿ったスピンの方向変化によって生じた交換等価磁界に起因していることが分かった。層厚比の増加により交換等価磁界が増大すると歳差運動振幅が減少し、出力低下に繋がることから(図7(b)),  $f_{res}$  の増大と出力増大とは相反要求となっている。

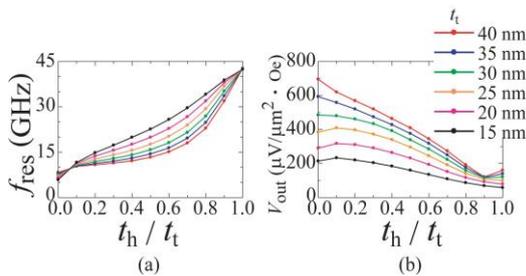


図7 (a) 共鳴周波数, 及び (b) 出力電圧層厚比依存性。

(3) ダンピング定数の小さな面内磁気異方性層の上下に垂直磁気異方性層を形成した交換結合3層膜において、図8に示されるようなスピントイスト構造が形成される各層厚の異なる種々の3層膜の共鳴周波数を図9(a)に示す。面内磁気異方性層の厚さが増加すると共鳴周波数  $f_{res}$  が低下しているが、これは、図9(b)に示すように同層内でスピン方向変化が緩和してしまい、交換結合磁界が有効に作用しなくなるためと考えられる。また垂直磁気異方性層厚が10 nm以下では、スピントイスト構造の遷移長が全層厚以上となり膜上下面におけるスピン方向が容易軸から傾斜するために  $f_{res}$  が低下することが分かった。図10は、最適化した層構造(面内磁気異方性層厚2 nm, 垂直磁気異方性層厚12 nm)における出力電圧のダンピング定数( $\alpha$ )依存性を表しており、出力の増大には各層のダンピング定数を小さくすることが有効で

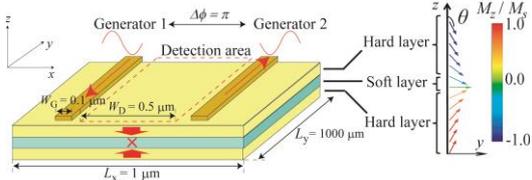
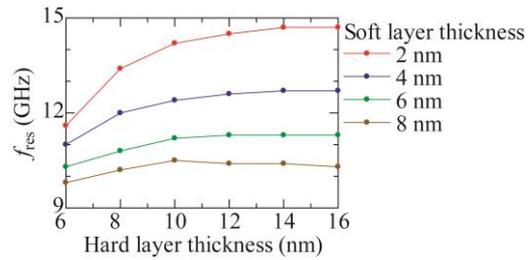
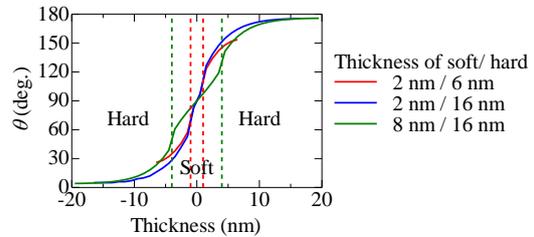


図8 交換結合3層膜によるスピントイスト構造の形成



(a) 共鳴周波数の層厚依存性



(b) 膜厚方向に沿ったスピンの方向変化

図9 交換結合3層膜のスピン波共鳴特性

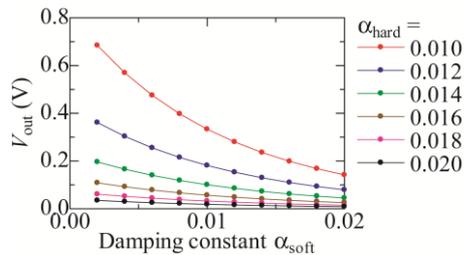


図10 出力電圧のダンピング定数依存性

あることを明示している。特に垂直磁気異方性層の $\alpha$ を0.02から0.01に減少することで出力電圧が1桁程度増大しており、GaMn, FePd等の低ダンピング材料の有用性が定量的に明らかにされた。

4) 図11に前記(3)項に述べた交換結合膜を用いたナノドットを機能要素とする記憶論

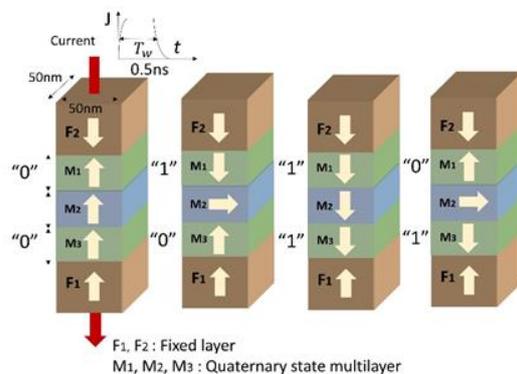


図11 膜厚方向スピン配列を情報とする記憶・論理一体素子の概要図

理一体素子の概要図を示している。各層の磁化方向を 2 進情報とする (00), (01), (10), (11) の 4 値記憶が可能であり, (00), (11) と (01), (10) の記憶状態が異なる共鳴特性を示すことを利用して, 記憶ビット間の排他的論理演算を実現することができる。図 12 に, スピン偏極電流とマイクロ波磁界による各層への選択的書き込み(磁化反転)時のエネルギー変化を示している。各層の異方性磁界 ( $H_k$ ) に強度差を付けることで, 選択層の共鳴周波数での励起による層選択的な磁化反転が可能であることを示している。図 13 は  $H_k$  の異なる磁性ドットについて, 各層の磁化反転に要する電流強度範囲を示している。両層の  $H_k$  を各々 10 kOe, 20 kOe とした素子において最も良好な選択書き込みが可能であることが示されている。

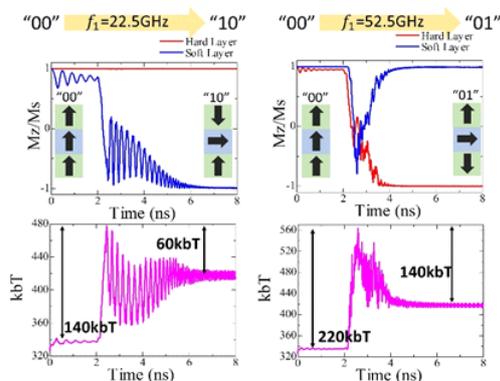


図 12 各記憶層への層選択的磁化反転

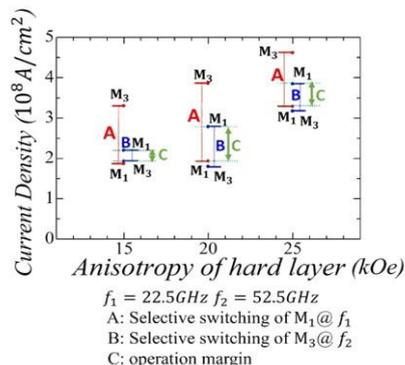


図 13 各記憶層の磁化反転に要するスピン偏極電流強度

## 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 17 件)

① X. Ya, T. Tanaka, and K. Matsuyama, “Standing spin wave resonant properties of spin-twist structure in exchange

coupled composite films”, AIP Advances, 査読有, 7, 056028, (2017).

- ② Y. Wang, T. Tanaka, and K. Matsuyama, “Atomistic simulation of heat-assisted linear reversal mode in nanodots with perpendicular anisotropy”, AIP Advances, 査読有, 7, 056015 (2017).
- ③ Z. Zhang, T. Tanaka, and K. Matsuyama, “Micromagnetic simulation of domain wall propagation along meandering magnetic strip with spatially modulated material parameters”, AIP Advances, 査読有, 7, 055922 (2017).
- ④ Xiaorui Ya, Terumitsu Tanaka and Kimihide Matsuyama, “Numerical Study on Microwave based Read-write Operation in Magnetic Vortex Memory”, ITE Trans. on MTA, 査読無, Vol. 4, No. 4, pp. 292-295 (2016).
- ⑤ T. Tanaka, S. Kashiwagi, Y. Kanai and K. Matsuyama, “Microwave-assisted shingled magnetic recording simulations on an exchange-coupled composite medium”, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 査読有, Vol. 416, pp. 188–193 (2016).
- ⑥ T. Tanaka, S. Kashiwagi, Y. Kanai and K. Matsuyama, “Microwave-assisted shingled magnetic recording simulations on an exchange-coupled composite medium”, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 査読有, Vol. 416, pp. 188–193 (2016).
- ⑦ X. Ya, K. Imamura, T. Tanaka, and K. Matsuyama, “Numerical Analysis on 2-D Standing Spin Waves in Microstructured Exchange-Coupled Hard/Soft Bilayer Strips”, IEEE Transactions on Magnetics, 査読有, Vol. 51, No. 11, Art. No. 7003003 (2015)
- ⑧ H. Yu, X. Ya, T. Tanaka, and K. Matsuyama, “Microwave-Assisted spin- Transfer torque switching in a vertically integrated architecture”, IEEE Transactions on Magnetics, 査読有, Vol. 51, No 11, Art. No. 3401103 (2015).
- ⑨ J. Shen, M. Shi, T. Tanaka, and K. Matsuyama, “Numerical Analysis of thermally assisted spin transfer torque magnetization reversal in synthetic ferromagnetic free layers”, Journal of Applied Physics, 査読有, Vol. 177, No. 17, Art. No. 17A718 (2015)
- ⑩ X. Ya, H. Chen, S. Oyabu, B. Peng, H. Otsuki, T. Tanaka, and K. Matsuyama,

“Interferometric properties of standing spin waves and the application to a phase comparator”, Journal of Applied Physics, 査読有, Vol. 117, No. 17, Art. No. 17A719 (2015).

[学会発表] (計 50 件)

- ① X. Ya, T. Tanaka and K. Matsuyama, “Numerical analysis on spin dynamics in multilayer nanodots with interlayer antiferromagnetic coupling”, IEEE International Magnetism Conference 2017.
- ② X. Ya, T. Tanaka and K. Matsuyama, “Controlling of voltage-induced spin wave resonance properties in ferromagnetic nanowires with perpendicular anisotropy”, IEEE International Magnetism Conference 2017.
- ③ T. Tanaka, Y. Nozaki and K. Matsuyama, “Micromagnetic calculation of microwave-assisted magnetization switching process for granular films”, IEEE International Magnetism Conference 2017.
- ④ Z. Zhang, Y. Hashiguchi, T. Tanaka and K. Matsuyama, “Numerical study on vertical domain wall propagation for three-dimensional race track memory”, IEEE International Magnetism Conference 2017.
- ⑤ X. Ya, T. Tanaka and K. Matsuyama, “Standing spin wave resonant properties of spin-twist structure in exchange coupled composite films”, 61st Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials 2016.
- ⑥ Z. Zhang, T. Tanaka and K. Matsuyama, “Micromagnetic Simulation of Domain Wall Propagation Along Meandering Magnetic Strip With Spatially Modulated Material Parameters”, 61st Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials 2016.
- ⑦ Y. Wang, T. Tanaka and K. Matsuyama, “Atomistic simulation of heat assisted linear reversal mode in nano-dots with perpendicular anisotropy”, 61st Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials 2016.
- ⑧ X. Ya, T. Tanaka and K. Matsuyama, “Controlling of standing spin wave configuration in nanowires with domain wall”, International Conference of the Asian Union of Magnetism Societies

2016.

- ⑨ X. Ya, K. Imamura, T. Tanaka and K. Matsuyama, “Numerical analysis on two dimensional standing spin waves in micro-structured exchange-coupled hard/soft bilayer strips”, IEEE International Magnetism Conference 2015.
- ⑩ K. Imamura, X. Ya, T. Tanaka and K. Matsuyama, “Controlling of synthesized standing spin wave configuration with external fields”, IEEE International Magnetism Conference 2015.
- ⑪ H. Yu, X. Ya, T. Tanaka and K. Matsuyama, “Microwave assisted spin transfer torque switching in a vertically integrated logic-in-memory architecture”, IEEE International Magnetism Conference 2015.

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

松山 公秀 (MATSUYAMA KIMIHIDE)  
九州大学・大学院システム情報科学研究  
院・教授  
研究者番号：80165919

##### (2) 研究分担者

田中 輝光 (TANAKA TERUMITSU)  
九州大学・大学院システム情報科学研究  
院・助教  
研究者番号：20423387