

## 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 4月20日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22540346

研究課題名（和文）

強磁性絶縁体を用いた磁性ナノ構造におけるスピン依存伝導の理論的研究

研究課題名（英文）

Theoretical study of spin-dependent transport in magnetic nanostructures using ferromagnetic insulators

研究代表者

高橋 三郎（TAKAHASHI SABURO）

東北大学・金属材料研究所・助教

研究者番号：60171485

研究成果の概要（和文）：

スピントロニクス・デバイスにおける新しいスピン源やスピン流として強磁性絶縁体のマグノン（スピン波）やマグノン流を利用した新機能スピントロニクス・デバイスを提案し、磁性絶縁体を用いた磁性ナノ構造におけるスピン伝導の物理を解明した。電気的に絶縁体であるイットリウム鉄ガーネット（ $Y_3Fe_2O_{12}$ :YIG）などの強磁性絶縁体を用いることにより、スピンゼーベック効果などの新奇なスピン伝導現象を開拓し、エネルギー損失の小さいスピントロニクス・デバイスの開発指針を与えた。

研究成果の概要（英文）：

We proposed new feature spintronics devices utilizing magnon (spin wave) and magnon current as a new spin source and elucidated the physics of spin transport in magnetic nanostructures using magnetic insulators. By using magnetic insulators, such as yttrium-iron-garnet ( $Y_3Fe_2O_{12}$ :YIG), we explored novel spin transport phenomena, such as the spin Seebeck effect, involving magnon accumulation and magnon current and paved the way for development of new energy-saving spintronic devices.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	800,000	240,000	1,040,000
2011年度	600,000	180,000	780,000
2012年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	2,000,000	600,000	2,600,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・物性 II

キーワード：スピントロニクス、強磁性絶縁体、スピン流、スピン蓄積、スピンホール効果、スピンゼーベック効果、スピン依存伝導

### 1. 研究開始当初の背景

磁性ナノ構造は、巨大磁気抵抗効果、電流駆動磁化反転、スピンプンピング、スピンホール効果などのスピン依存伝導現象の基礎研究のみならず、これらの現象を利用した磁

気センサーや磁気メモリー（MRAM）などのスピン・エレクトロニクスへの応用研究が国内外で活発に行われている。特に、スピン・エレクトロニクスは次世代の情報技術として有力視されており、その実用化に向けて、

ナノ領域におけるスピンの流れ（スピン流）が引き起こす物理現象の解明し、スピン流の生成と磁気制御をいかに効率よく実現するかが緊急の課題となっている。しかしながら、強磁性金属を用いたナノ構造素子では、強磁性金属中の磁気緩和が大きいことや強磁性金属中を流れるに電流により大きなエネルギー損失を生じることが大きな問題となっていた。

## 2. 研究の目的

強磁性金属の強いスピン緩和やエネルギー損失の問題を解決するために、本研究では、強磁性絶縁体を用いた磁性ナノ構造を提案する。特に、強磁性絶縁体のスピンの集団励起であるマグノンがスピン流生成、スピン移行トルク、熱スピン流などを引き起こし、特異なスピン伝導現象が発現することを理論的に明らかにし、マグノンを積極的に利用した新機能ナノ構造デバイスを提案する。具体的には、強磁性体絶縁体と非磁性金属からなる接合を考察し、界面で働く伝導電子と局在スピンの間の交換相互作用により、非磁性金属のスピン流やスピン蓄積からマグノン流への変換、およびマグノンからスピン流やスピン蓄積への変換が効率よく起こることを示し、強磁性絶縁体のマグノンを利用した磁性ナノ構造のスピン伝導の理論を構築する。これに基づいて、強磁性絶縁体を積極的に利用した省エネ型の新機能スピントロニクス・デバイスの開発指針を与える。

## 3. 研究の方法

強磁性絶縁体と非磁性金属からなる磁性ナノ構造素子におけるスピン伝導現象を理論的に解明する。界面での伝導電子と局在スピンの間の  $s-d$  交換相互作用により、伝導電子のスピン反転とマグノンの生成、吸収が起こり、スピン角運動量の移行が生じる。このような界面での量子力学的散乱過程を取り入れて、非磁性金属のスピン流・スピン蓄積・マグノン流の相互変換、磁化反転、熱スピン流生成を、線形応答理論、グリーン関数法、揺動散逸定理を用いて調べ、強磁性体絶縁体を用いた磁性ナノ構造におけるスピン伝導現象を理論的に明らかにする。

## 4. 研究成果

1) 強磁性絶縁体と非磁性金属からなる接合系の電極間に温度差がある場合のスピン依存伝導の現象論的定式化を行った。強磁性絶縁体の温度(マグノン温度)  $T_m$  が非磁性金属の温度(電子温度)  $T_e$  よりも高い場合は、強磁性絶縁体中に熱的に励起されるマグノン

の数は  $T_e$  で期待される数よりも相対的に多くなり、その差が過剰(非平衡)マグノンとして振舞う。過剰マグノンは磁化の縮みに対応し、これを回復(マグノンを減少)する方向に、非磁性金属から強磁性絶縁体へスピン流が流れる。逆に、強磁性絶縁体のマグノン温度  $T_m$  が非磁性金属の電子温度  $T_e$  より低い場合は、逆向きのスピン流が流れる。このような温度差によるスピン流・マグノン流の相互変換を各電極(部分系)のスピン密度の揺らぎを表す時空相関関数を用いて定式化した。これら部分系のスピン相関関数は、揺動散逸定理によって、仮想揺らぎ磁場に応答する動的帯磁率の虚部と関係づけられ、その比例係数として現れるボーズ分布はそれぞれ温度  $T_m, T_e$  によって支配される。これにより、非磁性金属と強磁性絶縁体の接合間を流れるスピン流の大きさは、それぞれの温度で決まるボーズ分布の差(室温では  $T_m - T_e$ ) に比例することが分かった。図1のように、強磁性絶縁体膜に沿って温度勾配  $T(x)$  を印加すると、高温側から低温側へマグノンの流れが生じて、低温側ではマグノンが過剰になり、高温側ではマグノンが欠乏する。このような非平衡マグノンの分布に対応するマグノンの有効温度は、低温側で  $T(x)$  より高く、高温側で  $T(x)$  より低くなる。その結果、低温側に非磁性金属線を付けると  $T_m > T_e$  となりスピン流は強磁性絶縁体から非磁性金属へ流れる。他方、低温側に非磁性金属線を付けると  $T_m < T_e$  となり非磁性金属から強磁性絶縁体へスピン流が流れる。従って、逆スピンホール効果により、高温側と低温側の非磁性金属線には逆符号の出力電圧が生じる。これらの結果は、内田らのスピンゼーバック効果の実験結果(Nature Materials 9, 894, 2010)をよく説明することが分かった。また、数値シミュレーションによる検証も行った。

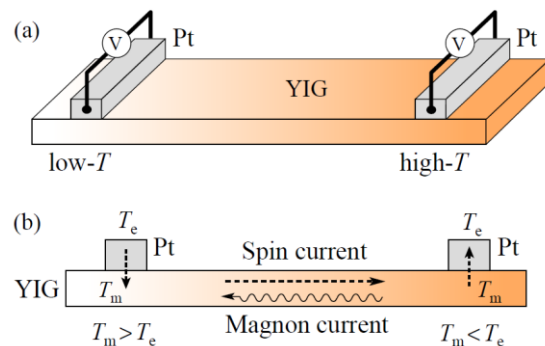


図1：スピンゼーバック効果

2) 強磁性絶縁体と非磁性金属からなる接合系において、非磁性金属のスピンホール効果を利用した強磁性絶縁体へのスピン注入の理論を構築した。非磁性金属により電流を印加すると、スピンホール効果により非磁性金属

中にスピン蓄積（スピン圧）を生じる。接合界面で働く伝導電子と局在スピンの間に働く交換相互作用により、接合界面を流れるスピン流—スピン圧特性を導出した。室温ではスピン流—スピン圧特性は線形となり、その比例係数であるスピンコンダクタンスが交換相互作用定数、交換スティネス定数、温度の関数として求められた。スピン流が接合界面で連続となる境界条件から強磁性絶縁体に注入されるスピン流が求められ、印加電流、スピンホール角、スピンコンダクタンス、スピン抵抗に対する依存性が明らかになった。これにより、強磁性体絶縁体であるイットリウム鉄ガーネットとスピンホール角の大きい白金からなる接合において、白金からイットリウム鉄ガーネットに注入されるスピン流の大きさや注入効率を評価することができるようになった。磁化緩和が非常に小さい強磁性絶縁体では、スピン流注入による磁化反転の臨界スピン流密度が小さくなり、スピンホール効果を利用した低消費型のスピン注入磁化反転デバイスが実現可能であることが示された。これらの成果により絶縁体スピントロニクス of 新しい可能性が拓かれた。

3) 強磁性絶縁体と非磁性金属を接合した2層膜における磁気抵抗効果の研究を行った。非磁性金属膜に電流を流すと、スピンホール効果により金属膜にスピン流とスピン蓄積が生じ、このスピン蓄積が強磁性絶縁体膜に吸収されることにより、非磁性金属膜から強磁性絶縁体膜へスピンが流入する。強磁性絶縁体膜の磁化の向きを変えると、非磁性金属膜から強磁性絶縁体膜に流入するスピン流の大きさが変化するため、非磁性金属膜内のスピン流分布が変調を受ける。このスピン流分布の変調は、逆スピンホール効果により、印加した電流の大きさを変調する。この現象は、強磁性絶縁体膜の磁化と非磁性金属膜の蓄積スピンの相対的方向に依存する新しい磁気抵抗効果であり、スピンホール磁気抵抗効果と呼ぶことを提案した。この効果は、従来の強磁性金属膜で観測される印加電流と磁化の相対的向きに依存する異方的磁気抵抗効果とは本質的に異なる現象である。散乱理論に基づいたスピントルク型の界面スピン流を用いてスピンホール磁気抵抗効果の定式化を行い、スピンホール磁気抵抗の磁化方向依存性を調べた。特に、面内および面外に磁化を回転した場合、スピンホール磁気抵抗効果の特徴づける磁場方向依存性が見出された。磁性絶縁体と金属を用いた2層膜における磁気抵抗効果を解明することにより、スピンホール効果、磁化方向に依存した界面スピン流とスピン蓄積がもたらす非平衡スピン近接効果、界面スピン伝導の物理を確立する方向性が得られた。

## 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14件)

- 1) T. Chiba, G. E. W. Bauer, and S. Takahashi, Spin torque transistor revisited, 査読有, Appl. Phys. Lett. **102**, 2013, 192412 (1-5). DOI: 10.1063/1.4806982
- 2) Y.-T. Chen, S. Takahashi, H. Nakayama, M. Althammer, S. T. B. Goennenwein, E. Saitoh, and G. E. W. Bauer, Theory of spin Hall magnetoresistance, 査読有, Phys. Rev. B **87**, 2013, 144411 (1-9). DOI: 10.1103/PhysRevB.87.144411
- 3) S. Takahashi and S. Maekawa, Spin Hall effect in superconductors, 査読有, Jpn. J. Appl. Phys. **51**, 2012, 010110 (1-7). DOI: 10.1143/JJAP.51.010110
- 4) K. Ando, S. Takahashi, J. Ieda, H. Kurebayashi, T. Trypiniotis, C. H. W. Barnes, S. Maekawa, and E. Saitoh, Electrically tunable spin injector free from the impedance mismatch problem, 査読有, Nature Materials **10**, 2011, 655-659. DOI:10.1038/nmat3052
- 5) Y. Fukuma, L. Wang, H. Idzuchi, S. Takahashi, S. Maekawa, and Y. Otani, Giant enhancement of spin accumulation and long-distance spin manipulation in metallic lateral spin valves, 査読有, Nature Materials **10**, 2011, 527-531. DOI:10.1038/nmat3046
- 6) S. Hikino, M. Mori, S. Takahashi, and S. Maekawa, Composite excitation of Josephson phase and spin wave in Josephson junction with ferromagnetic insulator, 査読有, J. Phys. Soc. Jpn. **80**, 2011, 074707 (1-8). DOI:10.1143/JPSJ.80.074707
- 7) M. Ichimura, T. Hamada, H. Imamura, S. Takahashi, and S. Maekawa, Spin transfer torque in MTJs with synthetic ferrimagnetic layers by the Keldysh approach, 査読有, J. Appl. Phys. **109**, 2011, 07C906 (1-3). DOI:10.1063/1.3549437
- 8) K. Ando, S. Takahashi, J. Ieda, Y. Kajiwara, H. Nakayama, T. Yoshino, K. Harii, Y. Fujikawa, M. Matsuo, S. Maekawa, and E. Saitoh, Inverse spin-Hall effect induced by spin pumping in metallic systems, 査読有, J. Appl. Phys. **109**, 2011, 1591(1-11). DOI:10.1063/1.3587173

9) Y. Kajiwara, S. Takahashi, S. Maekawa, and E. Saitoh, Detection of spin-wave spin current in a magnetic insulator, 査読有, IEEE Trans. Magn. **47**, 2011, 1591(1-4). DOI:10.1109/TMAG.2011.2118747

10) H. Adachi, J. Ohe, S. Takahashi, and S. Maekawa, Linear-response theory of spin Seebeck effect in ferromagnetic insulator, 査読有, Phys. Rev. B **83**, 2011, 094410 (1-6). DOI: 10.1103/PhysRevB.83.094410

11) J. Ohe, H. Adachi, S. Takahashi, and S. Maekawa, Numerical study on the spin Seebeck effect, 査読有, Phys. Rev. B **83**, 2011, 115118 (1-5). DOI: 10.1103/PhysRevB.83.115118

12) K. Uchida, J. Xiao, H. Adachi, J. Ohe, S. Takahashi, J. Ieda, T. Ota, Y. Kajiwara, H. Umezawa, H. Kawai, G. E. W. Bauer, S. Maekawa, and E. Saitoh, Spin Seebeck insulator, 査読有, Nature Materials, **9**, 2010, 894-897. DOI: 10.1038/NMAT2856

13) H. Adachi, K. Uchida, E. Saitoh, J. Ohe, S. Takahashi, and S. Maekawa, Gigantic enhancement of spin Seebeck effect by phonon drag, 査読有, Appl. Phys. Lett. **97**, 2010, 252506 (1-3). DOI:10.1063/1.3529944

14) R. Sugano, M. Ichimura, S. Takahashi, and S. Maekawa, Effect of interlayer coupling of synthetic ferrimagnetic free layer on current induced magnetization switching in MTJs, 査読有, IEEE Trans. Magn. **46**, 2010, 2136-2139. DOI: 10.1109/TMAG.2010.2042149

〔学会発表〕(計23件)

1) 千葉貴裕, G. E. W. Bauer, 高橋三郎, スピントラクトランジスタ, 応用物理学会, 2013年3月28日, 神奈川工科大学

2) 中山裕康, M. Althammer, Y.-T. Chen, 内田健一, 梶原瑛祐, 菊池大介, 大谷隆史, S. Gepraegs, M. Opel, 高橋三郎, R. Gross, G. E. W. Bauer, S. Goennenwein, 齊藤英治, スピンHall 効果を紹介した磁気抵抗効果, 応用物理学会, 2013年3月28日, 神奈川工科大学

3) 市村雅彦, 家田淳一, 高橋三郎, 前川禎通, スピン起電力による非局所スピントラクトランジスタ構造におけるスピントラクトランジスタ, 応用物理学会, 2013年3月28日, 神奈川工科大学

4) 井土宏, 福間康裕, 高橋三郎, 前川禎通,

大谷義近, 純スピンの拡散速度に対するスピン吸収の影響, 日本物理学会, 2013年3月27日, 広島大学

5) 高橋三郎, スピントラクトランジスタの歳差位相差依存性, 日本物理学会, 2013年3月25日, 広島大学

6) S. Takahashi, Mechanical motion of fluid by spin injection (招待講演), 8th International Workshop on Spin Mechanics, 2013年2月25日, 東海

7) T. Chiba, G. E. W. Bauer, and S. Takahashi, Spin torque transistor revisited, The 3rd CSIS International Symposium on Spintronics-based VLSIs and The 11th RIEC International Workshop on Spintronics, 2013年1月31日, 仙台

8) Y.-T. Chen, S. Takahashi, H. Nakayama, S. Goennenwein, E. Saitoh, and G.E.W. Bauer, Non-equilibrium proximity-induced anisotropic magnetoresistance, 12th Joint MMM/Intermag Conference, 2013年1月17日, シカゴ, 米国

9) R. Sugano, M. Ichimura, S. Takahashi, and S. Maekawa, Emergence of non-equilibrium magnetization through transfer of spin motive force, 12th Joint MMM/Intermag Conference, 2013年1月15日, シカゴ, 米国

10) 高橋三郎, Y.-T. Chen, G.E.W. Bauer, 強磁性絶縁体/金属接合におけるスピントラクトランジスタ磁気抵抗効果, 日本物理学会, 2012年09月18日, 横浜国立大学

11) 菅野量子, 市村雅彦, 高橋三郎, 前川禎通, 磁壁移動によるスピン起電力を用いた非磁性体中でのスピントラクトランジスタ生成, 2012年9月18日, 日本物理学会, 横浜国立大学

12) 市村雅彦, 菅野量子, 高橋三郎, 前川禎通, スピン起電力を用いた非局所スピントラクトランジスタ構造におけるスピントラクトランジスタ増幅, 応用物理学会, 2012年9月13日, 松山大学

13) S. Takahashi, Spin injection into magnetic insulator using spin Hall effect (招待講演), Spin Caloritronics 2012, 2012年6月5日, 仙台

14) 高橋三郎, 非磁性ナノ粒子におけるスピントラクトランジスタ緩和の理論, 日本物理学会, 2012年3月24日, 関西学院大学

15) 高橋三郎, 磁性ナノ構造におけるスピントラクトランジスタ蓄積と歳差, 日本物理学会, 2011年9月21日, 富山大学

16) 家田淳一, 高橋三郎, 前川禎通, 磁化ダイナミクスを用いた半導体へのスピン注入(理論), 日本物理学会, 2011年9月21日, 富山大学

17) 菅野量子, 市村雅彦, 高橋三郎, 前川禎通, 積層フェリ磁性層をもつ MTJ における面内/面直 STO の同期モード, 応用物理学会, 2011年8月31日, 山形大学

18) S. Takahashi, Spin Seebeck effect in magnetic insulator: A phenomenological approach (招待講演), Spin Caloritronics 2011, 2011年5月10日, ライデン, オランダ

19) R. Sugano, M. Ichimura, S. Takahashi, and S. Maekawa, Current-induced steady precessional modes and magnetization switching in MTJs with synthetic ferrimagnetic free layer, International Conference of AUMS, 2010年12月6日, 濟州島, 韓国

20) M. Ichimura, T. Hamada, H. Imamura, S. Takahashi, and S. Maekawa, Bias dependence of spin-transfer torque in MTJs with synthetic ferrimagnetic layers, International Conference of AUMS, 2010年12月6日, 濟州島, 韓国

21) 高橋三郎, 大江純一郎, 安立裕人, 家田淳一, 前川禎通, 磁性絶縁体におけるスピンゼーベック効果の現象論, 日本物理学会, 2010年9月25日, 大阪府立大学

22) 大江純一郎, 安立裕人, 高橋三郎, 前川禎通, 局所スピン注入による磁性薄膜中のスピン波励起, 日本物理学会, 2010年9月24日, 大阪府立大学

23) 安立裕人, 高橋三郎, 前川禎通, 集団励起を介する熱スピン流の理論解析 II, 日本物理学会, 2010年9月24日, 大阪府立大学

[図書] (計2件)

1) S. Takahashi and S. Maekawa, CRC Press, "Handbook of Spin Transport and Magnetism", 2011, 619-635 pages.

2) S. Maekawa and S. Takahashi, Oxford University Press, "Spin Current", 2012, 194-208 pages.

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

高橋 三郎 (TAKAHASHI SABURO)

東北大学・金属材料研究所・助教

研究者番号: 60171485