

平成 21 年 3 月 31 日現在

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2006～2008

課題番号：18684021

研究課題名（和文） ナノ変調構造磁性体における超スピン伝導とスピン量子物性

研究課題名（英文） Transfer of spin current and spin super current in nanostructured ferromagnet

研究代表者

齋藤 英治 (SAITO EIJI)

慶應義塾大学・理工学部・講師

研究者番号：80338251

研究成果の概要：スピン流生成のモデルとして最もシンプルな金属二層膜及び微細加工したワイヤ・膜接合を利用し、スピンダイナミクスや磁化不均一構造からのスピン流生成を系統的に調べた。本研究の主要成果は、以下に集約される。(1)スピントルクとスピンホール効果の併用によりスピン緩和が電氣的に変調され、これはスピン流の定量や磁化緩和制御に利用できる。(2)スピンダイナミクスからのスピンプンプの強度を決める条件を見出し、最適なスピンプンプ条件を定式化した。(3)NiFe/Ptにおいて、磁化ダイナミクスとスピン流、電流の相互作用を定量的に体系化した。(4)超スピン流(スピン波スピン流)のスピンホール効果を用いた電氣的検出に成功した。(5)NiFeに温度勾配を与えることによってスピン圧が生じる現象「スピンゼーベック効果」を発見した(Natureに論文掲載)。以上により、本研究の目的が全て達成された。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	14,700,000	4,410,000	19,110,000
2007年度	5,100,000	1,530,000	6,630,000
2008年度	2,900,000	870,000	3,770,000
年度			
年度			
総計	22,700,000	6,810,000	29,510,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・物性

キーワード：スピントロニクス スピン流 ナノ磁性体

1. 研究開始当初の背景

次世代情報技術を支えるスピントロニクス技術の進展の鍵を握るのは、スピンの流れ即ち「スピン流」の物理の解明・利用である。しかしスピン流は、汎用的検出手法が皆無であったため、その観測すら困難であった。

2. 研究の目的

申請者らが開拓してきた逆スピンホール効

果や磁気構造共鳴現象は、スピン流を生成し敏感に検出する稀有な手法である。本研究は、これらの効果を武器にスピントロニクス現象の随所に現れるスピン流・超スピン流の測定を行い、スピン流に基づいたスピン量子物性を開拓・究明するものである。

3. 研究の方法

磁気異方性の小さな金属強磁性体とスピン

軌道相互作用の大きな常磁性金属との複合膜 NiFe/Pt 及びこれを微細加工した試料に、マイクロ波及び電流誘起法（スピンホール効果を利用）でスピン流をポンプし、Pt の逆スピンホール効果及びスピンドायナミクスを利用した緩和分光法を利用してスピン流を検出した。LLG 方程式と現象論的スピンポンプのモデルを組み合わせた方法で解析を行った。

4. 研究成果

マイクロ波共振器の対称性を利用したスピンポンプ測定法改良を行い、スピン流の純粹測定、スピン流抵抗測定に成功した。この技法を用い、Pt 層に電流を印加しながら測定した NiFe/Pt の強磁性共鳴データを解析し、NiFe の磁化緩和定数がスピン流により変調されるという現象を発見した。微視的モデル解析により、この効果はスピンホール効果とスピントルク効果の相乗効果であることが明らかになり、この変調強度はスピン流に比例し、その比例係数は磁化の大きさ等の巨視的量のみによって構成されることがわかった。これは、この現象（スピントルクメーター効果）がスピン流の定量に利用できることを示している。

このスピントルクメーター効果を利用することでスピンポンプによるスピン流を定量化した。その結果、Pt の逆スピンホール効果によって生成されるスピン流そのものの定量化にも成功し、Cu 不純物を添加した Pt のスピンホール角 0.01 を得た。更に、強磁性共鳴と共鳴起電力スペクトルの同時測定により、磁場を面から外れた方向に印加してスピン分極方向とスピン流空間方向の成す角度を系統的に変えた実験を行い、逆スピンホール効果のスピン分極方向依存性を全方位角について明らかにした。また、不均一スピンドાયナミクスによって生成されるスピン流を観測するため、局所マイクロ波励起を行い、逆スピンホール効果によるスピン流起電力を測定し、スピン流と交換相互作用やスピン依存伝導度との関係を明らかにした。

この薄膜の逆スピンホール電圧の磁場角度依存性を測定し、これに LLG 方程式とスピンポンピングのモデルを組み合わせた解析を行った。その結果、スピンポンプ効率と磁化歳差運動の軌跡の面積に比例することを示した。さらに、スピンポンプ効率と理論モデルの比較を行うため、NiFe 合金系列と Pt の複合膜のスピンポンプ強度を測定した。Ni と Fe ではフェルミ面のスピン分極が逆であり、Ni と Fe の混合比を変えることでこのスピン分極（伝導電子にかかる有効磁場）の符号を変えることができる。スピン注入効率の組成依存性を無視する近似を用いてスピンポンプ効率を算出すると、Ni と Fe の混合比

について系統性が確認できなかったが、このデータをスピン緩和トルクベクトルの大きさを整理し直してみると、ポンプ効率とスピン緩和トルクの大きさが正比例していることがわかった。この結果は、スピンポンプが磁化の緩和に支配された現象であることを示している。一方、フェルミ面の分極が消失する混合比でも、大きなポンプ信号が観測され、この系において、緩和モデルによる理解が適当であることがわかった。

一方で、磁性体を細線と膜を含む構造に微細加工することで磁気異性を制御し、強磁性共鳴磁場の空間分布を与えることで、試料の任意の位置からスピン流を発生させることを可能にした系では、接合部のスピン歳差運動は細線の磁壁長程度のスケールで変化する。このスケールはスピンの歳差運動の空間スケール（ハンル振動の長さスケール）よりも十分長いので、断熱極限での扱いが有効であると予想される。しかし、実際に測定してみると、断熱極限での予想値以上の信号が検出される結果となった。これは、長いスケールでの変調構造をもつ磁化ダイナミクスの場合でも、スピン流生成効率においてスピン緩和項の寄与や β 緩和項の寄与が無視できないことを示している。

更に、白金と強磁性体のサンドイッチ構造を作成し、励起用白金電極に電流を流すことでスピン波を試料片端から注入し、検出用白金端子の逆スピンホール効果を利用することでこの超スピン流の伝達特性を調べた。電流反転に伴い、検出端子側の白金両端に生じる起電力の大きさに差が生じていることが確認された。これは生じた起電力が磁場方向、つまりスピンに依存した起電力であることを示している。電流と磁場が平行、つまりスピンポンプ・トルクが働かない条件では起電力の差は生じなかった。これにより、スピンポンプによって生じたスピン波超スピン流（スピン交換相互作用が輸送するスピン角運動量の流れ）が Pt 端子まで届いていることが示された。Pt 端子の位置依存性測定の結果、ミリメートルスケールのスピン流伝送を確認した。

本研究の過程で、NiFe に温度勾配を与えることによってスピン圧が生じる現象「スピンゼーベック効果」を白金中の逆スピンホール効果を利用することで発見し、その磁場依存性を系統的に調べ、スピンゼーベック効果の予想と整合することを見出した。スピンゼーベック効果を利用すれば長さに制約なく長距離にわたってスピン流を印加できることがわかった。

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16件)

- [1] K. Ando, T. Yoshino, and E. Saitoh, “Optimum condition for spin-current generation from magnetization dynamics in thin film systems” *Applied Physics Letters* 88 (in press). 査読有
- [2] Y. Kajiwara, K. Ando, K. Sasage, and E. Saitoh, “Spin pumping and spin-Hall effect observed in metallic films” *Journal of Physics* (in press). 査読有
- [3] K. Uchida, T. Ota, K. Harii, K. Ando, K. Sasage, H. Nakayama, K. Ikeda, and E. Saitoh, “Spin Seebeck Effect in Ni81Fe19/Pt Thin Films with different widths” *IEEE transactions on magnetics* (in press). 査読有
- [4] K. Ando, H. Nakayama, Y. Kajiwara, D. Kikuchi, K. Sasage, K. Uchida, K. Ikeda, and E. Saitoh, “Measurement of spin current using spin relaxation modulation induced by spin injection” *Journal of Applied Physics* 105, 07C913_1- 07C913_3 (2009). 査読有
- [5] K. Sasage, N. Okamoto, H. Tsujikawa, T. Yamaoka, E. Saitoh, “Magnetic force microscopic study on domain-wall molecules in NiFe nano rings” *Solid State Phenomena* 152-153, 529-532 (2009). 査読有
- [6] K. Uchida, S. Takahashi, K. Harii, J. Ieda, W. Koshibae, K. Ando, S. Maekawa, and E. Saitoh, “Phenomenological analysis for spin-Seebeck effect in metallic magnets” *Journal of Applied Physics* 105 07C908_1-07C908_3 (2009). 査読有
- [7] K. Uchida, S. Takahashi, K. Harii, J. Ieda, W. Koshibae, K. Ando, S. Maekawa, and E. Saitoh, “Observation of the spin-Seebeck effect” *Nature* 455 778-781 (2008). 査読有
- [8] K. Ando, Y. Kajiwara, S. Takahashi, S. Maekawa, K. Takemoto, M. Takatsu, and E. Saitoh, “Angular dependence of inverse spin-Hall effect induced by spin pumping investigated in a Ni81Fe19/Pt thin film” *Physical Review B* 78 014413_1-014413_6

(2008). 査読有

- [9] K. Ando, S. Takahashi, K. Harii, K. Sasage, J. Ieda, S. Maekawa, and E. Saitoh, “Electric manipulation of spin relaxation using spin-Hall effect” *Physical Review Letters* 101 036601_1-036601_4 (2008). 査読有
- [10] K. Harii, K. Ando, H.Y. Inoue, E. Sasage, and E. Saitoh, “Inverse spin-Hall effect and spin pumping in metallic films” *Journal of Applied Physics* 103 07F311_1-07F311_4 (2008). 査読有
- [11] K. Ando, K. Sasage, K. Harii, and E. Saitoh, “Ferromagnetic resonance spectra in patterned and unpatterned NiFe/Pt films” *Physica Status Solidi B* 244 4522-4525 (2007). 査読有
- [12] H.Y. Inoue, K. Harii, K. Ando, K. Sasage, and E. Saitoh, “Detection of pure inverse spin-Hall effect induced by spin pumping at various excitation” *Journal of Applied Physics* 102 083915_1-083915_4 (2007). 査読有
- [13] K. Harii, K. Ando, K. Sasage, and E. Saitoh, “Detection of inverse spin-Hall effect in Palladium” *Physica Status Solidi C* 4 4437-4440 (2007). 査読有
- [14] H.Y. Inoue, K. Harii, and E. Saitoh, “Field-angle dependence of magnetic resonance in FeNi/Pt films” *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 310 e699-e701 (2007). 査読有
- [15] E. Saitoh, “Magnetic resonance coupled with electric and spin currents in NiFe nanostructures” *IEEE Nanotechnology* 2 20-23 (2006). 査読有
- [16] E. Saitoh, M. Ueda, M. Morota, H. Miyajima, and G. Tatara, “Conversion of spin current into charge current at room temperature: inverse spin-Hall effect” *Applied Physics Letters* 88 182509/1-182509/3 (2006). 査読有
- (学会発表)(計29件)
- [1] 齋藤英治 「スピン流・スピン圧検出手法の進展(シンポジウム講演)」日本物理学会年次大会、2009年3月27日、東京。
- [2] 齋藤英治 学技術未来戦略ワークショップ

ブ「次世代を拓くナノエレクトロニクス～2030年の先を求めて～」独立行政法人科学技術振興機構、2009年3月9日、東京。

[3] E.Saitoh “Spin Hall Effect and spin Seebeck effect in metallic film,” Workshop on spin caloritronics , (Feb.9.2009)Leiden , Netherlands.

[4] K. Uchida, K. Harii, T. Ota, K. Ando, K. Sasage, and E. Saitoh “Thermo-spin effects in ferromagnetic/paramagnetic metallic films” Asian Magnetics Conference 2008 , (Dec. 11, 2008), Busan, Korea.

[5] 齊藤英治 「スピン流」応用物理学学会スピントロニクス入門セミナー、2008年12月3日、大阪。

[6] K. Uchida, T. Ota, K. Harii, and E. Saitoh “Thermo-spin effects in ferromagnetic/paramagnetic metallic films” 53rd Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials, (Nov. 13, 2008), Austin, Texas, USA.

[7] E.Saitoh ”Spin Hall Effect and Inverse Spin Hall effect Coupled with Magnetization Dynamics” Wilhelm and Else Heraeus-Stiftung seminar on Spin-Hall effects, (Oct.21.2008), Bad Honnef, Germany.

[8] 内田健一、針井一哉、太田岳、高橋三郎、家田淳一、小椎八重航、前川禎通、齊藤英治 「強磁性/常磁性金属接合におけるスピン流熱効果」日本物理学会 2008年秋季大会、2008年9月22日、岩手大学。

[9] 内田健一、針井一哉、太田岳、高橋三郎、家田淳一、小椎八重航、前川禎通、齊藤英治 「NiFe/Pt 複合構造におけるスピン流熱効果の観測」日本磁気学会 第32回学術講演会、2008年9月15日、東北学院大学。

[10] K. Sasage, K. Harii, K. Ando, and E. Saitoh “Spin Pumping in a Nanostructured NiFe film” Joint European Magnetic Symposia, (Sep. 14 - 19, 2008), Dublin, Ireland.

[11] 内田健一、針井一哉、太田岳、高橋三郎、家田淳一、小椎八重航、前川禎通、齊藤英治 「強磁性/常磁性金属接合における熱スピントロニクス現象」2008年秋季第69回応用物理学学会学術講演会、2008年9月5日、中部大学。

[12] E.Saitoh ”Spin Hall Effects Coupled with Magnetization Dynamics” The 9th international symposium on foundations of quantum mechanics in the light of new technology, (Aug.14.2008), Saitama, Japan.

[13] E.Saitoh “Interaction between magnetization dynamics and spin current in bilayer systems” The 2nd International conference on spintronics material and technology , (Jul.14,2008), Nanjing, China.

[14] 齊藤英治 「スピンホール効果とその逆効果」第55回応用物理学関係連合講演会、2008年3月27日、千葉。

[15] 内田健一、針井一哉、安藤和也、梶原瑛祐、齊藤英治 「強磁性 NiFe における熱スピン流効果の観測」日本物理学会 2008年春 第63回年次大会、2008年3月23日、近畿大学。

[16] E.Saitoh ” Magnetization dynamics coupled with spin currents in a metallic film” ATI International Workshop on Spin Current, (Feb.18 2008) , Sendai, Japan.

[17] E.Saitoh “Inverse spin-Hall effect and spin pumping” Magnetism and Magnetic Materials Conference 2007, (Nov.7.2007), Tampa, Florida, USA.

[18] 安藤和也、捧耕平、針井一哉、梶原瑛祐、齊藤英治 「NiFe/Pt 接合におけるスピン流 - 磁気ダイナミクス相互作用」日本物理学会 2007年秋季大会、2007年9月14日、北海道大学。

[19] 捧耕平、岡本尚也、安藤和也、針井一哉、齊藤英治 「強磁性 - 強磁性接合における磁気ダイナミクス - 電圧変換」応用磁気学会第31回学術講演会、2007年9月14日、学習院大学。

[20] 齊藤英治 「電流誘起磁化反転の新展開」応用物理学学会年会、2007年9月4日、北海道工業大学。

[21] K. Ando, K. Sasage, K. Harii, and E. Saitoh “Spin pumping and magnetization dynamics in nanostructured NiFe film” International Symposium on Advanced Magnetic Materials and Applications, (May.31,2007) , Jeju, Korea.

[22] K. Harii, K. Ando, K. Sasage, and E.

Saitoh "Detection of inverse spin-Hall effect in Palladium" International Symposium on Advanced Magnetic Materials and Applications, (Jun.1,2007), Jeju, Korea.

[23] 捧耕平、針井一哉、安藤和也、井上博之、齋藤英治「強磁性 NiFe 複合ナノ構造における磁気ダイナミクス - 電流変換」日本物理学会 2007 年春季大会、2007 年 3 月 18 日、鹿児島大学。

[24] 安藤和也、捧耕平、針井一哉、井上博之、齋藤英治「強磁性/非磁性金属接合における電流 - 磁気ダイナミクス」日本物理学会 2007 年春季大会、2007 年 3 月 18 日、鹿児島大学。

[25] 針井一哉、安藤和也、捧耕平、井上博之、齋藤英治「強磁性 NiFe 複合ナノ構造における形状依存磁気ダイナミクス」日本物理学会 2007 年春季大会、2007 年 3 月 18 日、鹿児島大学。

[26] E.Saitoh "Inverse Spin-Hall effect in NiFe/Pt films"ATI International Workshop on Spin Current,(Feb.9.2007) , Sendai, Japan.

[27]E.Saitoh "Spinmotiveforce and electromotiveforce coupled with magnetic dynamics", 3rd Asia forum on Magnetism,(Sep.13.2006) ,Shimane,Japan

[28] K. Harii, E. Saitoh, and T. Yamaoka "Interaction between domain-wall dynamics and electric current" International Conference on Magnetism, (Aug. 21. 2006) , Kyoto, Japan.

[29] E.Saitoh "Magnetic resonance coupled with electric and spin currents in NiFe nanostructures",IEEE2006Nano,(Jul.20.2006) ,Cincinnati,Ohio,USA

〔産業財産権〕

出願状況(計7件)

名称:「磁気センサ及び磁気記憶装置」
発明者:中山裕康、針井一哉、齋藤英治
権利者:同上
種類:特許権
番号:特願 2009-073088
出願年月日:2009 年 3 月 25 日
国内外の別:国内

名称:「熱電変換素子」
発明者:内田健一、梶原瑛祐、中山裕康、齋藤英治

権利者:同上
種類:特許権
番号:特願 2008-153781
出願年月日:2008 年 6 月 12 日
国内外の別:国内

名称:「スピントロニクスデバイス及び情報伝達方法」
発明者:梶原瑛祐、内田健一、安藤和也、齋藤英治
権利者:同上
種類:特許権
番号:特願 2008-148556
出願年月日:2008 年 6 月 5 日
国内外の別:国内

名称:「スピン流熱変換素子」
発明者:内田健一、針井一哉、梶原瑛祐、齋藤英治
権利者:同上
種類:特許権
番号:特願 2007-068371
出願年月日:2007 年 3 月 16 日
国内外の別:国内

名称:「磁気抵抗型ランダムアクセスメモリ」
発明者:安藤和也、針井一哉、捧耕平、齋藤英治
権利者:同上
種類:特許権
番号:特願 2007-283363
出願年月日:2007 年 10 月 31 日
国内外の別:国内

名称:「スピン緩和変調方法、スピン流検出方法、及び、スピン緩和を利用したスピントロニクスデバイス」
発明者:安藤和也、針井一哉、捧耕平、齋藤英治
権利者:同上
種類:特許権
番号:特願 2007-068371
出願年月日:2007 年 10 月 31 日
国内外の別:国内

名称:「バッテリー、バッテリーシステムおよびマイクロ波発振装置」
発明者:大谷義近、柴田絢也、多々良源、齋藤英治
権利者:同上
種類:特許権
番号:特願 2006-251737
出願年月日:2006 年 9 月 15 日
国内外の別:国内

〔その他〕

【研究会等】

[1] 太田岳、内田健一、針井一哉、中山裕康、
齊藤英治「強磁性/常磁性金属接合におけるス
ピンゼーベック効果の観測」次世代スーパ
ーコンピュータプロジェクトナノ統合拠点
の物性科学ワーキンググループ連続研究会
- 新しい概念に基づく熱電材料とその物理
- (東北大学金属材料研究所) 2008年12
月12日

[2] 針井一哉、安藤和也、捧耕平、井上博之、
齊藤英治、「スピン流の生成・検出とその応
用」、第1回量子ITC会議(テレコム先端技
術研究支援センター) 2007年3月13日・
14日

6. 研究組織

(1) 研究代表者

齋藤 英治 (SAITO EIJI)

慶應義塾大学・理工学部・講師

研究者番号: 80338251

(2) 研究分担者

該当なし

(3) 連携研究者

該当なし