

機関番号：11301

研究種目：特定領域研究

研究期間：2007～2010

課題番号：19048028

研究課題名（和文）ナノ磁性体におけるスピン流-電磁場変換

研究課題名（英文）Conversion between spin current and electromagnetic field in nanomagnets

研究代表者

齊藤 英治 (SAITOH EIJI)

東北大学・金属材料研究所・教授

研究者番号：80338251

研究成果の概要（和文）：スピンホール効果と磁化ダイナミクスの相互作用について実験・理論の両面から系統的に研究を行い、(1) スピントルクメータ効果の開発、(2) スピンポンピングによるスピン流生成効率の最適化、(3) 光誘起逆スピンホール効果の観測 を実現した。また、逆スピンホール効果を用いたスピン流検出技術を用いて、温度勾配によるスピン圧生成現象「スピンゼーベック効果」を強磁性金属において初めて観測した。

研究成果の概要（英文）：We have systematically investigated the interaction between spin-Hall effects and magnetization dynamics both experimentally and theoretically, and reported (1) Development of a spin-torque-meter effect, (2) Optimization for spin-current generation from a spin-pumping effect, and (3) Observation of a photoinduced inverse spin-Hall effect. Furthermore, by using a spin-detection technique based on the inverse spin-Hall effect, we observed a “spin-Seebeck effect,” generation of a spin voltage as a result of a temperature gradient, in ferromagnetic metals for the first time in the world.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	7,900,000	0	7,900,000
2008年度	10,500,000	0	10,500,000
2009年度	9,600,000	0	9,600,000
2010年度	6,700,000	0	6,700,000
年度			
総計	34,700,000	0	34,700,000

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：スピン流、スピントロニクス、ナノ磁性、スピンホール効果

1. 研究開始当初の背景

従来の電子技術において、情報の処理や伝送は電流によって実現されていた。電流は電子の持つ電荷の流れであるが、一方で電荷は流れることなくスピンのみが流れている状態を作り出すことも可能で、これは「純スピン流」と呼ばれている。純スピンの最大

の特徴は、電流とは異なりオームの法則に相当したエネルギー散逸機構が無く、更に量子力学的重ね合わせ状態を生成することが容易である点である。従って、純スピン流を用いることによりエネルギーロス無しの情報伝送・量子情報伝送が実現される。このようなスピン流の途方もない可能性は予想され

てはいたが、純スピン流は汎用的生成・検出手法が皆無であったため、その利用は困難であった。

しかし、2006年に我々は純スピン流が電流に変換される新しい現象：逆スピンホール効果を見出し、これを利用することで室温でも高感度なスピン流検出が可能であることを発見した。逆スピンホール効果のこれまでに無い大きな特徴は、スピン蓄積を経ること無くスピン流を直接電流に変換可能であることであり、量子スピントロニクスと従来のエレクトロニクスとのインターフェースとして極めて有望である。上記の進展によって、スピン流利用技術を開拓する道が拓けた。

2. 研究の目的

スピン流物理の開拓におけるスピン流と電磁場との基本相互作用解明の重要性は、現在のエレクトロニクスが電流と電磁場の相互作用を拠り所としていることを省みれば明らかである。本研究では、我々が開拓したスピンプンピング効果及び逆スピンホール効果を利用することで、固体中のスピン流と電磁場との相互変換効果を体系的に開拓し、スピン流の量子電磁物理を確立することを目指す。

3. 研究の方法

金属中の量子相対論効果である正（逆）スピンホール効果をスピン流の生成（検出）手法として用い、強磁性/常磁性金属複合薄膜におけるスピン流と磁化ダイナミクスの相互作用を系統的に調べた。また、LLG方程式とスピンプンピングモデル、スピン拡散方程式を組み合わせた理論解析を行った。

4. 研究成果

本研究の主要な成果は、以下の4点に集約される。

(1) スピントルクメータ効果の開発

Ni₈₁Fe₁₉/Pt 複合薄膜のPt層に電流を流しながら強磁性共鳴の系統的測定を行い、電流印加（スピン流注入）により磁化緩和が変調されることを見出した(図1, K. Ando, E. Saitoh *et al.*, Phys. Rev. Lett. (2008))。重要なことは、この磁化ダイナミクス変調現象において、磁気緩和定数の変調量はスピン流に正比例し、その比例定数は磁化や試料体積などの巨視的パラメータのみによって構成されていることである。このことは、このダイ

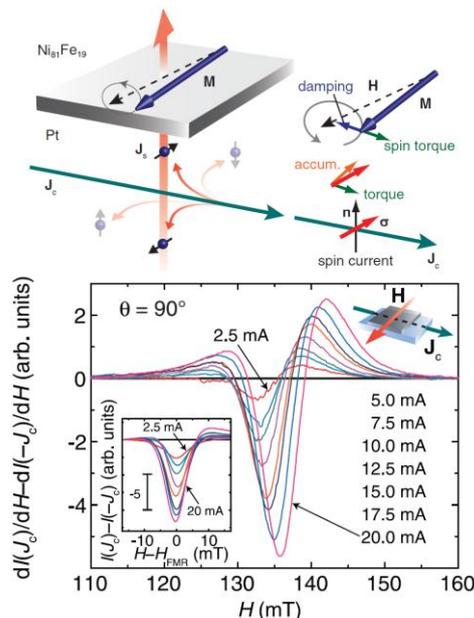


図1 スピントルクによる磁化緩和変調の概念図及び Ni₈₁Fe₁₉/Pt 複合薄膜における電流誘起強磁性共鳴変調スペクトル。

ナミクス変調効果をスピン流の定量手段として利用できることを示しており、磁気緩和変調効果を用いた「スピン流計」を構築可能である。

(2) スピンプンピングによるスピン流生成効率の最適化

強磁性/常磁性金属複合薄膜について、スピンプンピングによって生じたスピン流がもたらす逆スピンホール電圧の測定を、磁場角度を変えながら系統的に行った。その結果、スピンプンピング効率は磁化歳差運動の軌跡（磁化の先端が描く楕円）の面積の比例することが実験・理論の両面から示された(図2, K. Ando, E. Saitoh *et al.*, Appl. Phys. Lett. (2009))。本結果により、スピンプンピングによるスピン流生成効率を大きくするためには、スピン緩和定数と磁化軌道の面積を最大化すれば良い、という基本的な指針が得られた。

(3) Pt/GaAs 複合構造における光誘起逆スピンホール効果の観測

Pt/GaAs 複合構造において光誘起逆スピンホール効果の検出に成功した。これにより逆スピンホール効果を用いることで、電子スピンだけでなく、光スピンを電気信号に変換することが可能であることを明らかにした(K. Ando, E. Saitoh *et al.*, Appl. Phys. Lett. (2010))。本現象を多層膜における光伝播解析手法に基づいて定式化し、光誘起逆スピンホール効果が光スピン情報・電気信号の直接変換を実現することを見出した。Pt/GaAs 複合構造においてこれを実証し、スピンプोटド

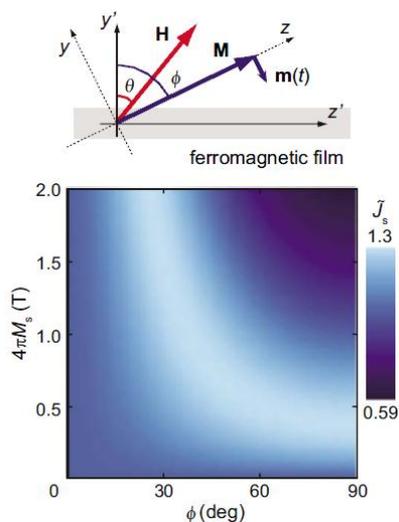


図 2 スピンポンピングによるスピンの生成効率の解析結果。

ィテクターとしての機能を示した。光誘起逆スピンのホール効果は光スピン・スピン流・電流の相互作用を実現する希少な現象であるだけでなく、光スピン情報に基づく光スピントロニクスにおいて本質的役割を果たすことが期待される。

(4) スピンゼーベック効果の発見

Pt 薄膜中の逆スピンのホール効果を用いて、強磁性金属 $\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$ における温度勾配誘起スピン圧生成現象「スピンゼーベック効果」を

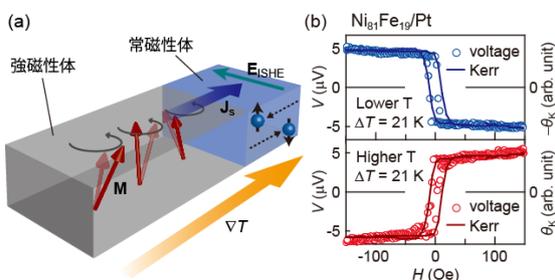


図 3 スピンゼーベック効果の模式図と $\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}/\text{Pt}$ 複合薄膜における温度勾配誘起スピン圧の測定結果。

観測することに初めて成功した(K. Uchida, E. Saitoh *et al.*, Nature (2008))。本実験により、強磁性金属に温度勾配を付けるだけでスピン圧を生成可能であることが実証された。スピンゼーベック効果によって誘起されたスピン圧は、ミリメートルスケールの強磁性金属において温度勾配方向に沿ってほぼ線形に分布し、低温側と高温側で符号反転することを明らかにした (図 3)。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 40 件) すべて査読有

- ① K. Ando, T. Yoshino, and E. Saitoh, "Optimum condition for spin-current generation from magnetization precession in thin film systems" Applied Physics Letters 94 (2009) 152509_1-152509_3.
- ② 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 (2008) 778-781.
- ③ 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 98 (2008) 036601_1-036601_4.

[学会発表] (計 43 件)

- ① E. Saitoh, 2009 年 7 月 27 日 "Spin Hall effects and spin Seebeck effect in metallic films" International Conference on Magnetism (ICM 2009) (Karlsruhe, Germany).
- ② E. Saitoh, 2010 年 9 月 19 日 "(Plenary Talk) Spin current coupled with charge and heat currents" The IEEE 7th International Symposium on Metallic Multilayers (MML2010, Berkeley).
- ③ E. Saitoh, 2010 年 11 月 17 日 "Spin current generation from insulators and metals" Magnetism and Magnetic Materials Conference 2010 (Atlanta, Georgia).

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 8 件)

- ① 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、齊藤英治
権利者: 学校法人慶應義塾

種類：特許
番号：特願 2007-068371
出願年月日：2008年3月14日
国内外の別：国内

② 名称：スピ^ン流熱変換素子及び熱電変換素子
発明者：内田健一、針井一哉、梶原瑛祐、齊藤英治
権利者：学校法人慶應義塾
種類：特許
番号：特願 2007-302470
出願年月日：2007年11月22日
国内外の別：国内

③ 名称：マイクロ波発振素子及びマイクロ波発振装置
発明者：梶原瑛祐、齊藤英治
権利者：学校法人慶應義塾
種類：特許
番号：特願 2009-094681
出願年月日：2009年4月9日
国内外の別：国内

○取得状況（計0件）

〔その他〕
ホームページ等
<http://saitoh.imr.tohoku.ac.jp/>

6. 研究組織

(1)研究代表者
齊藤 英治 (SAITOH EIJI)
東北大学・金属材料研究所・教授
研究者番号：80338251