

齊藤 英治

東北大学金属材料研究所 教授

スピン流による熱・電気・動力ナノインテグレーションの創出

§1. 研究実施体制

(1)「齊藤」グループ

- ① 研究代表者: 齊藤 英治 (東北大学金属材料研究所、教授)
- ② 研究項目
 - ・スピン流注入効率の飛躍的向上
 - ・スピンゼーベック効果及びスピンペルチェ効果による熱電変換素子の開拓
 - ・スピントロニクスとマイクロ機械流体工学の融合

(2)「高梨」グループ

- ① 主たる共同研究者: 高梨 弘毅 (東北大学金属材料研究所、教授)
- ② 研究項目
 - ・高品質 FePt 垂直磁化膜および高スピン分極ホイスラー薄膜の最適成膜条件の探索
 - ・数十 nm サイズの磁性ナノドットの微細加工プロセスの確立

(3)「前川」グループ

- ① 主たる共同研究者: 前川 禎通 (日本原子力研究開発機構 先端基礎研究センター、センター長)
- ② 研究項目
 - ・一般座標変換共変なディラック方程式のパウリ近似に基づく微視的理論の建設
 - ・磁場中での力学的回転によるスピン流生成を理論的に予言
 - ・実験グループと共同で力学的に生成されるスピン流の検出方法を検討

(4)「大江」グループ

- ① 主たる共同研究者: 大江 純一郎 (東邦大学、講師)

②研究項目

- スピン波と発熱の相互作用を用いた新しい熱伝磁性材料の設計のための理論構成
- スピン波による局所発熱・吸熱現象の実験グループの研究成果への数値解析

§ 2. 研究実施内容

(文中に番号がある場合は(3-1)に対応する)

スピン流を媒介として電気・磁気・熱・動力を高効率に変換させるテクノロジー構築に不可欠な以下の研究を行った。

1. スピン流注入の効率の飛躍的向上

多様な材料へのスピン注入とその高効率化は本研究の目指すスピン流媒介デバイスの実現に向けて極めて重要である。これまで、スピン流注入可能な物質はごく限定されていた。磁化ダイナミクスによる半導体中のスピン流生成は高抵抗物質への効果的スピン流注入を実現する。この手法を用いることでスピン軌道相互作用が弱く間接遷移型の物質として知られるシリコン中ですら逆スピンホール効果検出が可能であることを見出した⁽²¹⁾。シリコンはスピン緩和時間が長い物質として知られており、スピントロニクスデバイスの基幹となることが期待されている。

一方でスピン軌道相互作用が弱いことから、シリコン中のスピンホール効果を検出することは極めて困難であると考えられてきた。しかし、図1に示すように磁化ダイナミクスによるスピン流注入を用いることで明瞭な逆スピンホール効果の信号検出に成功し、シリコンがスピン伝送路としてだけでなくスピン検出器としても利用可能であることを示した。(Nature Mat., Nature Com.に掲載)

2. 力学的スピントルクの開拓

スピントロニクスとマイクロ機械流体工学の融合により、量子力学原理により動力から電子を取り出す発電技術とその逆効果である電子から動力を取り出す技術の開拓を行なった。先ず、温度勾配が印加された磁性絶縁体中のフォノン-マグノン間の相互作用を利用することでスピン流が生成されることを明らかにした¹³。本原理は、音波を磁性絶縁

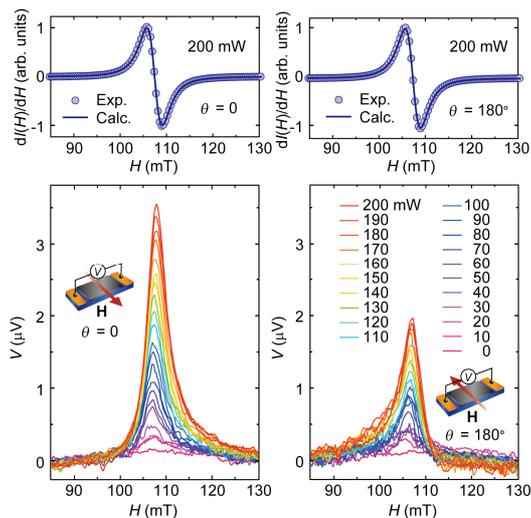


図1. シリコン中の逆スピンホール効果の観測。

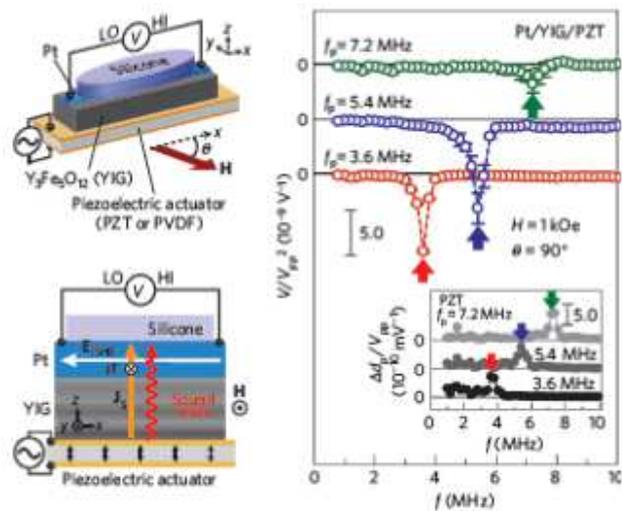


図2 音波による力学的スピン角運動量変換

体中へ注入することでも確かめられ(図2)、「力学的な角運動量のスピン信号への変換」を実現している¹³。(Nature Mat.に掲載)さらに、高い実現性と有用性を備えた手法として、これまでに液体金属(LM)を用いる方法を採用し準備を進めた。まず、動力から電子

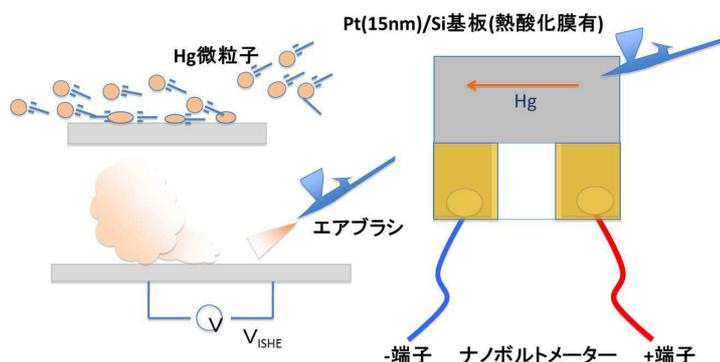


図3 流体スピントロニクスデバイスによる液体金属(LM)の力学的運動からのスピン流生成

を取り出す発電技術として液体金属(LM)に水銀を用いて水銀からPtへ力学的トルクを

作用しPtへのスピン流生成を目指した。この際には、我々がこれまでに開発した逆スピンホール効果Pt電極を用いたスピン検出器を用いる。これまでに、微小水銀粒子(数マイクロメートルサイズ)をPt電極へ噴霧し、且つ、Pt電極から高感度に起電力を計測可能な簡便なシステムを構築し、水銀微粒子の噴霧方向に依存した起電力の測定に成功している(図3)。今後、力学的トルク・スピン流生成の観測・定量化を詳細に行ない、その原理を解明する。また、系統的データ収集及びデバイスプロトタイプを試作のための準備を進める。

前項の逆効果である、電子から動力を取り出す技術として微細流路に閉じ込められた液体金属(LM)である水銀を用いる方法を採用し準備を進めた。具体的には、内壁をPtでコートした微小流路を作製し、液体金属(LM)に水銀を用いてPtからのスピン注入による力学的スピントルク生成による流体駆動の実現を目指して研究を進めている。また、垂直磁化膜からの垂直磁化膜上にトップダウン法によって液体金属及び回転子を入れたマイクロメートル程度のシリンダーを形成し、同様の方法によって電氣的に角運動量を注入する方法についても準備を進めた。これまでに、垂直型スピントルク用及び高効率スピン注入用試料として、L10型規則合金およびフルホイスラー系単結晶薄膜、垂直磁化且つ高スピン分極が期待されるCo系多層膜などの作製を行なった。今後、以上の手法を用いて力学的角運動量注入による回転運動駆動の観測を開始し、その実現を目指す。得られた流体のポンプ効果(量子ポンプ)のデータについてスピントルクを組み込んだ数値流体力学計算を援用して解析することで、駆動された液体金属の運動とスピントルクの相関を理論的に解明する。

3. 電子スピンによる熱電エネルギー変換技術の開拓

代表者らがこれまでに発見した「スピンゼーベック効果」(Nature (2008))は、熱から電圧やスピン圧が生成される効果である。この効果は、スピン輸送によるフォノン散乱(広義のドップラー効果)及びスピントルクによる磁気ブラウン運動の抑制・増幅効果による熱電変換技術実現の可能性を示唆する。

(1) スピン冷却技術の開拓

研究代表者らは、昨年度までに、酸化物絶縁体 (YIG) 中にスピン波を励起することにより、スピン流による熱輸送が実現されることを見出した (図4)。今後、酸化物絶縁体の精密温度分布観察及びマイクロ加工による微小領域温度測定を組み合わせた実験を整備して実施し、スピン波の熱輸送現象を利用した冷却効果である、マイクロ波冷却の実現を目指す。

(2) スピンゼーベック効果増強技術の開発

スピンゼーベック効果では、電圧は熱流の方向ではなく熱流に垂直な方向の長さに比例するため、単純な二重膜やシート構造で面積を増やすだけで昇圧することができる。これまでに、広面積化したスピンゼーベック構造を作成し、ボルトオーダーの電圧を生成できるスピンゼーベック技術を開拓した (図 5)。スピンゼーベック効果の最大の特徴は、構造の単純さである。従来のゼーベック素子と異なり、複雑な接合構造が不要であるからである。これは、スピンゼーベック効果が積層化に適していることを意味している。最近、研究代表者らは酸化物絶縁体でもスピンゼーベック効果が発現することを見出しており (Nature Mater.(2010))、材料と構造の探索により大きなスピンゼーベック効果を生む基本構造を見出し、今後、面内のパターン化とシンプルな積層を併用したスピンゼーベック電圧増幅効果を利用した実用的なスピンゼーベック素子のプロトタイプを開発する。

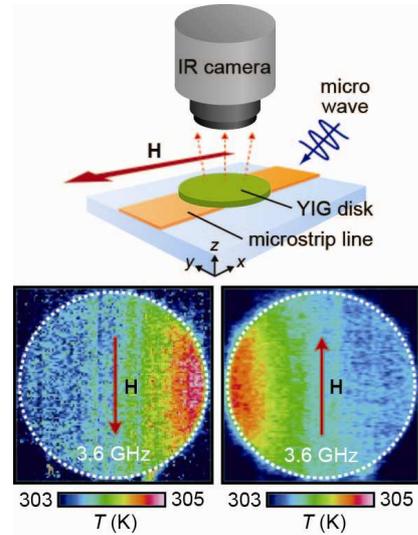


図 4 スピン波による熱輸送

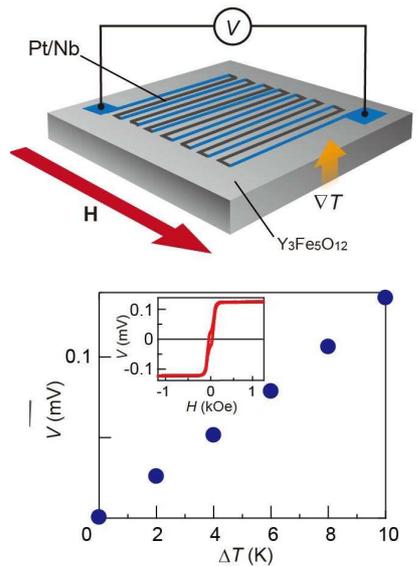


図 5 スピンゼーベック効果の二次元化による高効率発電

§3. 成果発表等

(3-1) 原著論文発表

- 論文詳細情報

1. Kazuya Ando, Saburo Takahashi, Junichi Ieda, Yosuke Kajiwara, Hiroyasu Nakayama, Tatsuro Yoshino, Kazuya Harii, Yasunori Fujikawa, M. Matsuo, S. Maekawa, and E. Saitoh, “Inverse spin-Hall effect induced by spin pumping in metallic system”, *Journal of Applied Physics* vol. 109, 103913_1-103913_11, 2011 (DOI: 10.1063/1.3587173)
2. Christian W. Sandweg, Yosuke Kajiwara, Andrii V. Chumak, Alexander A. Serga, Vitally I. Vasyuchka, Mattias Benjamin Jungfleisch, Eiji Saitoh, and Burkard Hillebrands, “Spin Pumping by Parametrically Excited Exchange Magnons”, *Physical Review Letters*, vol. 106, 216601_1-216601_4 2011 (DOI: 10.1103/PhysRevLett.106.216601)
3. Y. Kajiwara, S. Takahashi, S. Maekawa, and E. Saitoh, “Detection of spin-wave spin current in a magnetic insulator”, *IEEE Transaction on Magnetism*, vol. 47, 1591-1594, 2011, (DOI: 10.1109/TMAG.2011.2118747)
4. Naoya Okamoto, Hidekazu Kurebayashi, Kazuya Harii, Yosuke Kajiwara, H. Beere, I. Farrer, T. Trypiniotis, Kazuya Ando, D. A. Ritchie, C. H. W. Barnes, and Eiji Saitoh, “Spin current depolarization under high electric fields in undoped InGaAs”, *Applied Physics Letters*, vol. 98, 242104_1-242104_3, 2011, (DOI: 10.1063/1.3599599)
5. Mamoru Matsuo, Junichi Ieda, Eiji Saitoh, and Sadamichi Maekawa, “Spin current generation due to mechanical rotation in the presence of impurity scattering”, *Applied Physics Letters*, vol. 98, 242501_1-242501_3, 2011, (DOI: 10.1063/1.3597220)
6. Kazuya Harii, Toshi An, Yosuke Kajiwara, Kazuya Ando, Hiroyasu Nakayama, Tatsuro Yoshino, and Eiji Saitoh, “Frequency Dependence of Spin Pumping in Pt/Y3Fe5O12 Film”, *Journal of Applied Physics*, 109, 116105_1-116105_3, 2011, (DOI: 10.1063/1.3594661).

7. Subrojati Bosu, Yuya Sakuraba, Ken-ichi Uchida, Kesami Saito, Takeru Ota, Eiji Saitoh, and Koki Takanashi, "Spin Seebeck effect in thin films of the Heusler compound Co_2MnSi ", *Physical Review B* vol. 83, 224401_1-224401_6, 2011, (DOI: 10.1103/PhysRevB.83.224401)
8. Ken-ichi Uchida, Takeru Ota, Yosuke Kajiwara, Hiromitsu Umezawa, Hiroki Kawai, and Eiji Saitoh, "Electric detection of the spin-Seebeck effect in magnetic insulator in the presence of interface barrier", *Journal of Physics (conference series)* vol. 303, 012096_1-012096_4, 2011, (DOI: 10.1088/1742-6596/303/1/012096)
9. Kazuya Ando, Saburo Takahashi, Junichi Ieda, Hidekazu Kurebayashi, T. Trypiniotis, C.H.W. Barnes, Sadamichi Maekawa, and Eiji Saitoh, "Electrically tunable spin injector free from the impedance mismatch problem", *Nature materials*, vol. 10, 655 -659, 2011, (DOI: 10.1038/nmat3052)
10. Mamoru Matsuo, Junichi Ieda, Eiji Saitoh, and Sadamichi Maekawa, "Spin-dependent inertial force and spin current in accelerating systems", *Physical Review B*, vol. 84, 104410_1-104410_9, 2011, (DOI: 10.1103/PhysRevB.84.104410)
11. Kazuya Ando, Toshu An, and Eiji Saitoh, "Nonlinear spin pumping induced by parametric excitation", *Applied Physics Letters*, 092510_1-092510_4, vol. 99, 2011, (DOI: 10.1063/1.3633348)
12. Ken-ichi Uchida, Hiroto Adachi, Toshu An, Takeru Ota, Masaya Toda, Burkard Hillebrands, Sadamichi Maekawa, and Eiji Saitoh, "Long-range spin Seebeck effect and acoustic spin pumping", *Nature materials*, vol. 10, 737-741, 2011, (DOI: 10.1038/nmat3099)
13. Yosuke Kajiwara, Kazuya Ando, Hiroyasu Nakayama, Ryo Takahashi, and Eiji Saitoh, "Spin pumping in polycrystalline magnetic insulator/metal Pt films", *IEEE Transaction on Magnetism*, vol. 47, 2739-2742, 2011, (DOI: 10.1109/TMAG.2011.2150737)
14. Mattias Benjamin Jungfleisch, Andrii. V. Chumak, Vitaliy Vasyuchka, Alexander Serga, Björn Obry, Helmut Schultheiss, P. Andreas Beck, A. D. Karenowska, Eiji Saitoh, and Burkard Hillebrands, "Temporal evolution of inverse spin Hall effect

voltage in a magnetic insulator-nonmagnetic metal structure”, Applied Physics Letters, vol. 99, 182512_1-182512_3, 2011, (DOI: 10.1063/1.3658398)

15. Ken-ichi Uchida, Toshu An, Yosuke Kajiwara, Masaya Toda, and Eiji Saitoh, “Surface-acoustic-wave-driven spin pumping in Y₃Fe₅O₁₂/Pt hybrid structures”, Applied Physics Letters, 99, 212501_1-212501_3, 2011, (DOI: 10.1063/1.3662032)

16. Yuta Yamane, Kohei Sasage, Toshu An, Kazuya Harii, Jun-ichiro Ohe, Junichi Ieda, Stuart E Barnes, Eiji Saitoh, and Sadamichi Maekawa,, “Continuous Generation of Spinmotive Force in a Patterned Ferromagnetic Film”, Physical Review Letters, 107, 236602_1-236602_4, 2011, (DOI: 10.1103/PhysRevLett.107.236602)

17. Ken-ichi Uchida, Akihiro Kirihara, Masahiko Ishida, Ryo Takahashi, and Eiji Saitoh, “Two-dimensional temperature mapping using spin-Seebeck insulator”, Japanese Journal of Applied Physics (Rapid Communication), vol. 50, 120211_1-120211_3, 2011, (DOI: 10.1143/JJAP.50.120211)

18. Zhi Yong Qiu, Yosuke Kajiwara, Kazuya Ando, Yasunori Fujikawa, Ken-ichi Uchida, Takaharu Tashiro, Kazuya Harii, Tatsuro Yoshino, and Eiji Saitoh, “All-oxide system for spin pumping” Applied Physics Letters, 100, 022402_1-022402_3, 2012, (DOI: 10.1063/1.3675463)

19. Hitroyasu Nakayama, Jianting Ye, Takashi Ohtani, Yasunori Fujikawa, Kazuya Ando, Yoshihiro Iwasa, and Eiji Saitoh, “Electroresistance effect in gold thin film induced by ionic liquid gated electric double layer”, Applied Physics Express, vol. 5, 023002_1-023002_3, 2012, (DOI: 10.1143/APEX.5.023002)

20. Kazuya Ando, and Eiji Saitoh, “Observation of inverse spin-Hall effect in silicon”, Nature communications, vol. 3, 629_1-629_6, 2012, (DOI: 10.1038/ncomms1640)

21. Hiroyasu Nakayama, Kazuya Ando, Kazuya Harii, Tatsuro Yoshino, Ryo Takahashi, Yosuke Kajiwara, Ken-ichi Uchida, Yasunori Fujikawa, and Eiji Saitoh, "Geometry dependence on inverse spin Hall effect induced by spin pumping in Ni₈₁Fe₁₉/Pt films", Physical Review B, vol. 85, 144408_1-144408_7, 2012, (DOI: 10.1103/PhysRevB.85.144408)

(3-2) 知財出願

① 平成 23 年度特許出願件数(国内 5 件)

② CREST 研究期間累積件数(国内 7 件)