

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
 - ・スピントロニクスとマイクロ機械流体工学の融合
 - ・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

(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
 - ・L10型規則合金およびフルホイスラー系単結晶薄膜の作製
 - ・フルホイスラー合金系のスピン分極率向上を目指した組成改良
 - ・NiFe 複合膜を用いたスピンプンプ実験

(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
 - ・スピン-回転結合の繰り込み現象をバンド間遷移効果に基づき導出
 - ・表面弾性波の回転モード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重力磁場の検出方法を検討

(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

- ・表面スピン波と発熱に関する理論構成
- ・スピン波端状態に対する数値解析と実験系の設計

§ 2. 研究実施の概要

電子は量子力学的な自由度として、電荷と自転の対応するスピン角運動量(スピン)を有する。電子のスピンはナノスケールにおいて、物質中の様々な角運動量と相互作用することから、スピンの流れ「スピン流」を媒介として、電気・磁気・熱・動力の高効率変換が可能となる。本研究グループでは、スピントロニクスとメカニクスの融合によるスピン流-動力相互変換の実証、および、熱的スピン流生成による発電機能の高効率化を目指す研究を行った。

1. 力学的スピントロニクス効果の開拓

力学的運動の有する角運動量と量子力学的な電子スピンの角運動量の相互変換による、スピン流生成による発電技術の開拓、および、スピン流による力学的運動の制御に向けた研究を行った。

(a) 音波を用いたレアメタルフリー材料における力学的スピン流生成

これまで、非磁性体中を用いたスピン流の生成手法としては、プラチナを始めとする貴金属に電流を印加して生じるスピンホール効果を用いられてきた。貴金属は入手およびコストの面で難点があり、貴金属が示す大きいスピン軌道相互作用を必要としないスピン流の生成手法が求められていた。本研究グループでは、平成24年度までの研究によって明らかにした力学的回転-電子スピン結合に基づいて、銅やアルミニウムなどの身近な金属への音波の注入によって、貴金属以外における効率的なスピン流の生成が可能なることを理論的に明らかにした。

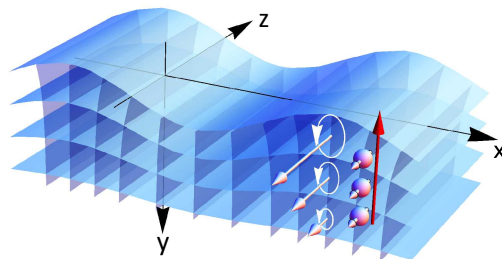


図1:音波によるスピン流生成。音波によって金属表面付近に回転運動(白矢印)が誘起され、スピン流(赤矢印)が生成される。

(b) 流体運動を用いた力学的スピン流生成

流体運動は微小領域における回転運動に分解でき、スピン流-力学的角運動量相互変換の格好の舞台である。回転運動の角運動量は、角運動量保存則を通して流体中の電子のスピン角運動量に受け渡される。平成25年度は、これまでに構築した渦度-電子スピン結合に基づく流体力学によって、種々の円筒管における流体運動におけるスピン流生成を実験および理論の両面から明らかにできた。高効率なスピン流-力学的角運動量相互変換が可能なるナノスケールに流路を拡張すべく、微細化を進めてマイクロメートルスケールの流路を作製して原理の実証を行うなど、ナノスケール流路におけるスピン流-力学的角運動量相互変換に向けた準備を行った。

2. 熱的スピントロニクス効果の高効率化

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。スピnzeーベック効果では、電圧は熱流の方向で 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可能であるなど、従来の熱電素子とは異なる特徴を有する。

(a) 塗布工程によって形成可能なスピン流-電流変換素子の開発

代表者らは平成 24 年度に報告したように、強磁性絶縁体層が塗布工程によって大面積に形成可能なスピnzeーベック素子を実現した。一方で、スピン流を媒介した発電で不可欠なスピン流-電流変換を担う層は、塗布工程によっては作製が実現されていなかった。代表者らは平成 25 年度において、塗布工程によって形成可能でかつスピン流-電流変換現象を示す有機物の探索に成功した(Nature Materials 誌に掲載)。また、特定の有機物が電流を通さず、スピン流のみを通すことを明らかにした(Nature Physics 誌に掲載)。有機物の利用は、スピnzeーベック素子を全工程で真空を必要としない低コストのプロセスによって形成可能にし、熱電素子としての応用へと近づける。

§ 3. 成果発表等

(3-1) 原著論文発表

論文詳細情報(国内)

- 1 内田健一、齊藤英治, “スピnzeーベック効果と熱電変換への応用”, 応用物理, Vol.82, No.11, pp.928-931, 2013.
- 2 齊藤英治, “特殊相対論”, 数理科学, No.2, pp.8-14, 2014.
- 3 中山裕康、齊藤英治, “スピンホール磁気抵抗効果”, パリティ, Vol.29, No.1, pp.23-25 2014.
- 4 吉川貴史、内田健一、齊藤英治, “スピnzeーベック効果熱電変換”, 電子情報通信学会誌, Vol.97, No.3, pp.209-213 2014.

論文詳細情報(国際)

- 1 Yan-Ting Chen, Saburo Takahashi, Hiroyasu Nakayama, Matthias Althammer, Sebastian T. B. Goennenwein, Eiji Saitoh, and Gerrit E. W. Bauer, “Theory of spin Hall magnetoresistance”, Physical Review B, Vol.87, No,14, pp,144411, 2013. (DOI: 10.1103/PhysRevB.87.144411)
- 2 Mamoru Matsuo, Jun’ichi Ieda, Sadamichi Maekawa, Eiji Saitoh, “Effects of mechanical rotation and vibration on spin currents”, Journal of the Korean Physical Society, Vol.62, No.10, pp.1404-1409, 2013. (DOI: 10.3938/jkps.62.1404)
- 3 M. Matsuo, J. Ieda, E. Saitoh, and S. Maekawa, “Effects of mechanical rotation and vibration on spin currents”, Journal of the Korean Physical Socociety, Vol. 62, No. 10, pp.1404, 2013. (DOI: 10.3938/jkps.62.1404)
- 4 Ryuichi Shindou, Jun-ichiro Ohe, Ryo Matsumoto, Shuichi Murakami, and Eiji Saitoh, “Chiral

- spin-wave edge modes in dipolar magnetic thin films”, *Physical Review B*, Vol.87, No.17, pp.174402, 2013. (DOI: 10.1103/PhysRevB.87.174402)
- 5 H. Nakayama, M. Althammer, Y.-T. Chen, K. Uchida, Y. Kajiwara, D. Kikuchi, T. Ohtani, S. Geprägs, M. Opel, S. Takahashi, R. Gross, G. E. W. Bauer, S. T. B. Goennenwein, and E. Saitoh, “Spin Hall Magnetoresistance Induced by a Nonequilibrium Proximity Effect” (selected as Editor’s suggestion), *Physical Review Letters*, Vol.110, No.20, pp.206601, 2013. (DOI: 10.1103/PhysRevLett.110.206601).
 - 6 Mamoru Matsuo, Jun’ichi Ieda, Kazuya Harii, Eiji Saitoh, and Sadamichi Maekawa, “Mechanical generation of spin current by spin-rotation coupling”, *Physical Review B*, Vol.87, No.18, pp.180402, 2013. (DOI: 10.1103/PhysRevB.87.180402)
 - 7 T. An, V. I. Vasyuchka, K. Uchida, A. V. Chumak, K. Yamaguchi, K. Harii, J. Ohe, M. B. Jungfleisch, Y. Kajiwara, H. Adachi, B. Hillebrands, S. Maekawa, and E. Saitoh, “Unidirectional spin-wave heat conveyer”, *Nature Materials*, Vol.12, No.6, pp.549–553, 2013. (DOI: 10.1038/NMAT3628)
 - 8 S. Maekawa and H. Adachi, “Heat and Spin”, *Journal of the Korean Physical Society*, Vol. 62, pp.1985, 2013. (DOI: 10.3938/jkps.62.1985)
 - 9 H. Adachi and S. Maekawa, “Linear-response theory of the longitudinal spin Seebeck effect”, *Journal of the Korean Physical Society*, Vol. 62,, pp.1753, 2013. (DOI: 10.3938/jkps.62.1753)
 - 10 Matthias Althammer, Sibylle Meyer, Hiroyasu Nakayama, Michael Schreier, Stephan Altmannshofer, Mathias Weiler, Hans Huebl, Stephan Geprägs, Matthias Opel, Rudolf Gross, Daniel Meier, Christoph Klewe, Timo Kuschel, Jan-Michael Schmalhorst, Günter Reiss, Liming Shen, Arunava Gupta, Yan-Ting Chen, Gerrit E. W. Bauer, Eiji Saitoh, and Sebastian T. B. Goennenwein, “Quantitative study of the spin Hall magnetoresistance in ferromagnetic insulator/normal metal hybrids”, *Physical Review B*, Vol.87, No.22, pp.224401, 2013. (DOI: 10.1103/PhysRevB.87.224401)
 - 11 Kazuya Ando,, Shun Watanabe,, Sebastian Mooser,, Eiji Saitoh, & Henning Sirringhaus, “Solution-processed organic spin-charge converter”, *Nature Materials*, Vol.12, No.7, pp.622–627, 2013. (DOI: 10.1038/NMAT3634)
 - 12 Y. Kajiwara, K. Uchida, D. Kikuchi, T. An, Y. Fujikawa and E. Saitoh, “Spin-relaxation modulation and spin-pumping control by transverse spin-wave spin current in Y3Fe5O12”, *Applied Physics Letters*, Vol.103, No.5, pp.052404, 2013. (DOI: 10.1063/1.4817076)
 - 13 T. An, K. Yamaguchi, K. Uchida, and E. Saitoh, “Thermal imaging of standing spin waves”, *Applied Physics Letters*, Vol.103, No.5, pp.052410, 2013. (DOI: 10.1063/1.4816737)
 - 14 Z. Qiu, K. Ando, K. Uchida, Y. Kajiwara, R. Takahashi, H. Nakayama, T. An, Y. Fujikawa, and E. Saitoh, “Spin mixing conductance at a well-controlled platinum/yttrium iron garnet interface”, *Applied Physics Letters*, Vol.103, No.9, pp.092404, 2013. (DOI: 10.1063/1.4819460)
 - 15 A. Kawasuso, Y. Fukaya, M. Maekawa, H. Zhang, T. Seki, T. Yoshino, E. Saitoh and K.

- Takanashi, "Current-induced spin polarization on a Pt surface: A new approach using spin-polarized positron annihilation spectroscopy", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol.342,, pp.139-143, 2013. (DOI: 10.1016/j.jmmm.2013.04.006)
- 16 S. Maekawa, H. Adachi, K. Uchida, J. Ieda, and E. Saitoh, "Spin Current: Experimental and Theoretical Aspects", *Journal of the Physical Society of Japan*, Vol.82, No.10, pp.102002, 2013. (DOI: 10.7566/JPSJ.82.102002)
- 17 Z. Qiu, K. Ando, K. Uchida, Y. Kajiwara, R. Takahashi, H. Nakayama, T. An, Y. Fujikawa, and E. Saitoh, "Experimental investigation of spin Hall effect in indium tin oxide thin film", *Applied Physics Letters*, Vol.103, No.18, pp.182404, 2013. (DOI: 10.1063/1.4827808)
- 18 T. Kikkawa, K. Uchida, S. Daimon, Y. Shiomi, H. Adachi, Z. Qiu, D. Hou, X.-F. Jin, S. Maekawa, and E. Saitoh, "Separation of longitudinal spin Seebeck effect from anomalous Nernst effect: Determination of origin of transverse thermoelectric voltage in metal/insulator junctions", *Physical Review B*, Vol.88, No.21, pp.214403, 2013. (DOI: 10.1103/PhysRevB.88.214403)
- 19 Ryo Iguchi, Koji Sato, Daichi Hirobe, Shunsuke Daimon and Eiji Saitoh, "Effect of spin Hall magnetoresistance on spin pumping measurements in insulating magnet/metal systems", *Applied Physics Express*, Vol.7, No.1, pp.013003, 2014. (DOI: 10.7567/APEX.7.013003)
- 20 Shun Watanabe, Kazuya Ando, Keehoon Kang, Sebastian Mooser, Yana Vaynzof, Hidekazu Kurebayashi, Eiji Saitoh, Henning Sirringhaus, "Polaron spin current transport in organic semiconductors", *Nature Physics*, (Advanced online publication), 2014. (DOI: 10.1038/nphys2901)
- 21 M. Matsuo, J. Ieda, and S. Maekawa, "Theory of mechanical spin current generation via spin-orbit coupling", *Solid State Communications*, (accepted), 2013. (DOI:10.1016/j.ssc.2013.08.005)
- 22 J. Ieda, M. Matsuo, and S. Maekawa, "Theory of mechanical spin current generation via spin-rotation coupling", *Solid State Communications*, (accepted), 2014. (DOI: 10.1016/j.ssc.2014.02.003)
- 23 K. Uchida, Z. Qiu, T. Kikkawa, and E. Saitoh, "Pure detection of the acoustic spin pumping in Pt/YIG/PZT structures", *Solid State Communications*, (accepted), 2013. (DOI: 10.1016/j.ssc.2013.10.012)

(3-2) 知財出願

- ① 平成 25 年度特許出願件数(国内 0 件)
- ② CREST 研究期間累積件数(国内 9件)