

令和元年6月3日現在

機関番号：12601

研究種目：新学術領域研究(研究領域提案型)

研究期間：2014～2018

課題番号：26103005

研究課題名(和文)熱・力学的スピン変換

研究課題名(英文)Thermodynamic Spin Conversion

研究代表者

齊藤 英治(SAITOH, Eiji)

東京大学・大学院工学系研究科(工学部)・教授

研究者番号：80338251

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 168,000,000円

研究成果の概要(和文)：機械工学、物性測定、材料工学各領域の研究者がチームを組み、スピントロニクスとマイクロ機械工学の融合などによる、電流・スピン流と機械運動・熱を相互作用させる新しいエネルギー変換現象の開拓と学理構築を行った。具体的には、スピントロニクス研究の対象材料を、液体金属、気体スピン、核スピン、さらにはマイクロ機械技術による磁性体カンチレバー構造にまで拡張し、磁性層積層構造や反強磁性体、そして1次元量子スピン液体などにおけるスピン角運動量熱変換を利用した熱エネルギー技術体系を構築した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、スピン角運動量の流れである「スピン流」を基盤とし、角運動量保存に基づく変換原理の有用性を現代科学の体系に組み込むことで、革命的な科学技術の進展をもたらすことに成功した。例えば、スピン変換現象を統一的に理解し、力学運動と熱とのスピン変換という新しい学術領域の創生という学術的意義を生み出した。さらに、従来のエネルギー変換単独では成し得なかったスピン-熱-力学運動間の角運動量変換を利用したエネルギー変換技術体系の構築は、社会的にも意義深い成果である。

研究成果の概要(英文)：By the collaboration of researchers specialized in mechanics, condensed matter physics, and material engineering, our group open the new research area, placed between spintronics and mechanics, through the intensive studies on the interaction between electric current, spin current, mechanical motion, and heat in various materials. As a result, the target material of spintronics, which have been limited to condensed matter, is extended to liquid metal, gas spin, nuclear spin, and cantilever. The cantilever was made of magnetic materials and fabricated with micro-mechanical techniques. Moreover, we developed the theory about the heat-energy exchange in magnetic materials, including multi-layered magnetic film, anti-ferromagnetic materials, and one-dimensional quantum-spin liquid.

研究分野：物性物理学

キーワード：スピン流 スピントロニクス 磁性物理 スピンメカニクス

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

産業革命以降、熱機関や半導体デバイス等、基礎科学が新しいテクノロジーを生み出し、このテクノロジーがさらに新しいテクノロジーを生み出すというサイクルが、大きな成果を収めてきた。これらの基礎にある物理概念は、エネルギーの変換とそれを可能にした電磁気学や熱力学の物理原理である。従来、電気・熱・力学的運動等さまざまなエネルギー形態は別々に利用されていたが、それらは物理の力によって結びつけられ、それらの間の相互変換の実現によって有為な機能やエネルギー利用技術が作り出されてきた。

このエネルギー変換の延長線上にはない現象が、スピン角運動量の流れであるスピン流を重要な概念とするスピントロニクスの中に出現した。スピントロニクスでは、角運動量変換とエネルギー変換とをスピンを媒介にしてうまく組み合わせることで多彩な機能を実現している。特に、角運動量変換を外的に制御する方法である「逆スピンホール効果及びスピンホール効果」の発見により、従来伝導電子のみで議論されていた角運動量変換を未だ利用されていない角運動量に対して適用しエネルギー変換と組み合わせることで、有用な物質機能が開拓されるという新しい科学の方向性が示された。逆スピンホール効果・スピンホール効果によって電子スピンの流れをコントロールすれば、物質の有する最も典型的な角運動量である流体・弾性体のダイナミクス、格子強制振動、熱格子振動と磁化角運動量間の相互変換を実現することができると考えられるため、世界に先駆けて角運動量エネルギー変換科学の開拓を行う必要があった。

2. 研究の目的

電子スピン・格子・磁化の間の相互作用を制御・利用することで、熱エネルギーや格子運動から効果的に電気エネルギーを取り出す現象に期待が集まっている。本研究班メンバーにより熱からスピン流・電力が生成される現象が見出され大きなインパクトをもたらしたが、この発見の本質は熱のみならず、一般的な力学運動・熱運動と磁化間の角運動量変換効果の端緒を開いた点にある。しかし従来、界面でのスピン変換が観測される系はごく限られていた。これを突破するために、本新学術領域研究で共有する界面スピン変換の研究を軸に、従来の枠を超えた機械工学・物性測定・材料工学、理論物理の先端研究者を結集させ、熱-スピン変換を種にスピンに基づく機械運動・熱・スピン変換効果の学理体系を新たに構築することを目指した。同時に、理学・工学に跨る研究により、スピンを利用したエネルギーテクノロジーの基礎を創出することを目的とした。本研究課題の目的は、以下のようにブレイクダウンされる。

- (1) 力学・波動・音とのスピン変換：界面スピン変換を利用し、格子の回転を伴う連続体の運動とスピン輸送との相互作用現象を開拓し、学理を構築する。
- (2) スピン・熱・電気相互変換：熱的スピンポンプの概念を一般化し、マグノン・伝導電子スピン流両者を駆使した、相反性を持つ熱-スピン相互変換物理を創出する。

3. 研究の方法

スピントロニクスとマイクロ機械工学の融合により、電流・スピン流と機械運動・熱を相互作用させる新しいエネルギー変換現象の開拓と学理の構築を行った。機械工学、物性測定、材料工学各領域の研究者がチームを組み、「2. 研究の目的」の各項目について以下の具体的項目に取り組むことで、効果的に目標を達成できるように研究を遂行した。

- (1) 弾性体及び液体におけるスピン変換科学に関して、研究代表者が開拓してきたスピン流生成・検出手法と本新学術領域研究で共有する界面でのスピン変換手法を融合させることで、弾性体表面波及び流体の運動とスピン流の相反的相互作用の解明や、力学運動を用いたスピン発電などに取り組んだ。
- (2) 微小機械工学とスピントロニクス物性を融合させ、スピン交換によるマグノン制御に基づく熱制御技術（冷却、加熱技術）の学理の構築に取り組み、この効果と従来のスピンゼーベック効果を基盤として制御性の良い熱-スピン相互変換学理を体系化した。

4. 研究成果

(1) 電子スピンと力学的運動との角運動量変換

回転運動における有効磁場（バーネット磁場）生成とその空間分布がもたらすスピン駆動力に基づく、力学回転とスピン流の相互作用の基礎理論を構築した。更に、小野（分担者）・齊藤（代表者）を中心として、流体の渦度を利用して上述のスピン流生成条件を満たすオリジナルな実験系を構築した。勾配を持ったスピン-回転相互作用条件を、微小流路における局所的な回転の勾配の形成により満たすことで、流体運動からスピン流が生成可能であることを明らかにした（図1）。

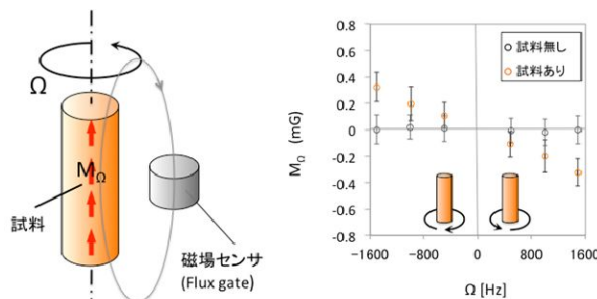


図1 バーネット効果測定実験の模式図と定量評価例

流体運動からのスピンドラ生成において核となる物理現象は、古典的には回転が局所有効磁場を生成することである。これはバーネット効果として特定の強磁性体においてのみ測られていた。本研究では、世界で初めて常磁性電子におけるバーネット効果を観測し、回転による有効磁場の定量にも成功した。これらは、最新の機械回転技術とスピンドラ測定技術を融合させ、秒間一万回転スケールの超高速安定エアタービンと非線形磁場測定系を組み合わせた、高速回転中の磁場その場観察装置の開発により達成された。

マイクロ機械技術を用いて磁性絶縁体 YIG のカンチレバーを作製し、その機械振動特性の外部磁場応答を観測した。その結果、機械振動モードが外部磁場によって制御が可能であることを見出した。

磁石の磁化と剛体回転との相互作用を利用して磁石内部の角運動量を測定する新手法を開発し、実際にフェリ磁性体の角運動量補償点の精密測定に成功した。この結果は、スピンドラ角運動量と軌道角運動量を独立に簡便に決定できる従来にない新手法であり、基礎研究および応用研究へ広く発展することが期待される。

(2) スピンドラ角運動量変換を利用した熱エネルギー技術体系の構築

熱-スピンドラ変換に不可欠なスピンドラペルチェ効果と呼ばれるスピンドラ流による熱流輸送現象の新測定法を確立し、従来予想よりも一桁大きいことが明らかとなった。本手法の確立により、相反性に基づくアプローチによる熱-スピンドラ変換学理の構築が可能になった。加えて、この現象の考察から、スピンドラゼーベック効果の新しいメカニズムも開拓され、大幅な熱電変換効率の向上が実現された。

多層の積層構造において、各層における伝導電子およびマグノンのスピンドラ流の連続条件を適切に制御することで、従来の構造と比較して二桁近い熱電出力の向上が実現された。さらに、多層膜を微視化した極限である磁性イオンを含む規則合金を舞台として、高梨（分担者）と齊藤（代表者）の協力により、ナノスケールでの積層効果についても研究を行い、多層繰り返し構造における熱的スピンドラ流増大効果がユニバーサルな現象であることが明らかになった。また、スピンドラゼーベック効果を利用することで、強磁性薄膜におけるスピンドラホール効果の観測にも成功した。

磁性絶縁体におけるスピンドラゼーベック効果を測定し、マグノンとフォノンの混成効果に起因するピーク構造を見出した。この実験結果は、マグノン流に比べて長寿命なフォノン流がスピンドラゼーベック効果に寄与することを示し、スピンドラ-フォノン変換を用いた機能設計の指針を与える成果である。

1次元量子スピンドラ液体（図2）において熱励起スピンドラ流が生成可能であることを実証した。この結果は、スピンドラがスピンドラ流のキャリアとして機能することを意味し、量子スピンドラ演算の基礎をなすものと期待される。

原子核の自転運動である核スピンドラの集団励起を介したスピンドラ生成に成功した。従来の電子スピンドラ自由度に由来するスピンドラ変換現象に加えて、核スピンドラが利用可能であることを実証した。

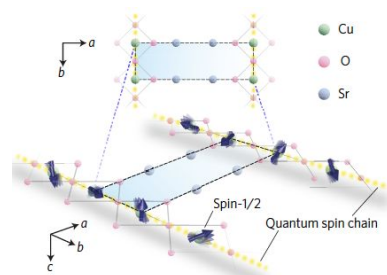


図2 1次元量子スピンドラ液体の模式図

(3) 公募研究班との融合により得られた成果

スピンドラ流のスピンドラ角運動量から巨視的回転運動を生み出す最適条件を詳しく調べた。その結果、電気伝導度が高い非磁性金属の膜厚をスピンドラ拡散長程度にすることが回転運動とスピンドラ波の変換効率向上に重要であることが明らかになった。

スピンドラ偏極させた熱運動する気体からのスピンドラ生成法を設計し、実験で検証した。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計118件)すべて査読有

Y. Shiomi, J. Lustikova, S. Watanabe, D. Hirobe, S. Takahashi, E. Saitoh, "Spin pumping from nuclear spin waves", *Nature Physics* 15 (2019) 22-26.

DOI: 10.1038/s41567-018-0310-x

J. Lustikova, Y. Shiomi, N. Yokoi, N. Kabeya, N. Kimura, K. Ienaga, S. Kaneko, S. Okuma, S. Takahashi, E. Saitoh, "Vortex rectenna powered by environmental fluctuations", *Nature Communications* 9 (2018) 4922_1-6.

DOI: 10.1038/s41467-018-07352-1

M. Imai, Y. Ogata, H. Chudo, M. Ono, K. Harii, M. Matsuo, Y. Ohnuma, S. Maekawa, E. Saitoh, "Observation of gyromagnetic reversal", *Applied Physics Letters* 113 (2018) 052402_1-3.

DOI: 10.1063/1.5041464

- K. Uchida, S. Daimon, R. Iguchi and E. Saitoh, " Observation of anisotropic magneto-Peltier effect in nickel ", *Nature* 558 (2018) 95-99.
DOI: 10.1038/s41586-018-0143-x
- ZY. Qiu, D. Hou, J. Barker, K. Yamamoto, O. Gomonay and E. Saitoh, " Spin colossal magnetoresistance in an antiferromagnetic insulator ", *Nature materials* 17 (2018) 577-580.
DOI: 10.1038/s41563-018-0087-4
- J. Cramer, F. Fuhrmann, U. Ritzmann, V. Gall, T. Niizeki, R. Ramos, Z. Qiu, D. Hou, T. Kikkawa, J. Sinova, U. Nowak, E. Saitoh and M. Klaui, " Magnon detection using a ferroic collinear multilayer spin valve ", *Nature Communications* 9 (2018) 1089_1-7.
DOI: 10.1038/s41467-018-03485-5
- Y. Ogata, H. Chudo, B. Gu, N. Kobayashi, M. Ono, K. Harii, M. Matsuo, E. Saitoh and S. Maekawa, " Enhanced orbital magnetic moment in FeCo nanogranules observed by Barnett effect ", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 442 (2017) 329-331.
DOI: 10.1016/j.jmmm.2017.06.101
- S. Kikushima, T. Seki, K. Uchida, E. Saitoh and K. Takanashi, " Electric field effect on magnetic anisotropy for Fe-Pt-Pd alloys ", *Aip Advances* 7 (2017) 085210_1-7.
DOI: 10.1063/1.4999326
- Y. Hashimoto, S. Daimon, R. Iguchi, Y. Oikawa, K. Shen, K. Sato, D. Bossini, Y. Tabuchi, T. Satoh, B. Hillebrands, G. E. W. Bauer, Y. H. Johansen, A. Kirilyuk, T. Rasing and E. Saitoh, " All-optical observation and reconstruction of spin wave dispersion ", *Nature Communications* 8 (2017) 15859_1-6.
DOI: 10.1038/ncomms15859
- Y. Otani, M. Shiraishi, A. Oiwa, E. Saitoh and S. Murakami, " Spin conversion on the nanoscale ", *Nature Physics* 13 (2017) 829-832.
DOI: 10.1038/NPHYS4192
- A. Yagmur, K. Uchida, K. Ihara, I. Ioka, T. Kikkawa, M. Ono, J. Endo, K. Kashiwagi, T. Nakashima, A. Kirihara, M. Ishida, E. Saitoh, " Gamma radiation resistance of spin Seebeck devices ", *Applied Physics Letters* 109 (2016) 243902_1-4.
DOI: 10.1063/1.4971976
- Y. Ogata, H. Chudo, M. Ono, K. Harii, M. Matsuo, S. Maekawa, and E. Saitoh, " Gyroscopic g factor of rare earth metals ", *Applied Physics Letters* 110 (2017) 072409_1-4.
DOI: 10.1063/1.4976998
- S. Daimon, R. Iguchi, T. Hioki, E. Saitoh and K. Uchida, " Thermal imaging of spin Peltier effect ", *Nature Communications* 7 (2016) 13754_1-7.
DOI: 10.1038/ncomms13754
- D. Hirobe, M. Sato, T. Kawamata, Y. Shiomi, K. Uchida, R. Iguchi, Y. Koike, S. Maekawa and E. Saitoh, " One-dimensional spinon spin currents ", *Nature Physics* 13 (2016) 30-34.
DOI: 10.1038/nphys3895
- D. Hou, Z. Qiu, R. Iguchi, K. Sato, E. K. Vehstedt, K. Uchida, G.E.W. Bauer, and E. Saitoh, " Observation of temperature-gradient-induced magnetization ", *Nature Communications* 7 (2016) 12265_1-6.
DOI: 10.1038/ncomms12265
- R. Takahashi, M. Matsuo, M. Ono, K. Harii, H. Chudo, S. Okayasu, J. Ieda, S. Takahashi, S. Maekawa, and E. Saitoh, " Spin hydrodynamic generation ", *Nature Physics* 12 (2015) 52-56.
DOI : 10.1038/NPHYS3526
- K. Uchida, T. Kikkawa, T. Seki, T. Oyake, J. Shiomi, Z. Qiu, K. Takanashi, and E. Saitoh, " Enhancement of anomalous Nernst effects in metallic multilayers free from proximity-induced magnetism ", *Physical Review B* 92 (2015) 094414.
DOI : 10.1103/PhysRevB.92.094414
- T. Seki, K. Uchida, T. Kikkawa, Z. Qiu, E. Saitoh, and K. Takanashi, " Observation of inverse spin Hall effect in ferromagnetic FePt alloys using spin Seebeck effect ", *Applied Physics Letters* 107 (2015) 092401_1-4.
DOI : <http://dx.doi.org/10.1063/1.4929691>

[学会発表](計73件)

齊藤英治, " Spin Current in Uniaxial Antiferromagnets and Quantum Spin Liquids ", 2019 Joint MMM-Intermag Conference (Washington D.C, USA) 2019年1月15日.

齊藤英治, (プレナリー講演)「スピン流の科学」第47回結晶成長国内会議(仙台)2018年10月31日.

齊藤英治, 「固体の素励起とスピン流」日本物理学会 2018 年秋季大会 新学術領域研究 (研究領域提案型) 「ナノスピン変換科学」共催シンポジウム ナノスピン変換から強結合スピントロニクスへ (京都) 2018 年 9 月 10 日.

齊藤英治, “Phonon and nuclear spin in spin current physics”, 2018 Spin Caloritronics IX (Ohio, USA) 2018 年 6 月 26 日.

齊藤英治, (基調講演) “Spin Current Physics and Applications”, The 9th US-Japan Joint Seminar on Nanoscale Transport Phenomena (Tokyo) 2017 年 7 月 3 日.

齊藤英治, (基調講演) “How to create and use spin current?”, TMT2017 (Taichung City, Taiwan) 2017 年 6 月 28 日.

齊藤英治, (基調講演) “How to create and use spin current?”, ICSS 2017 (San Sebastian, Spain) 2017 年 5 月 10 日.

齊藤英治, (基調講演) “Spin Current Physics and Applications”, IAPP workshop (Bangkok, Thailand) 2017 年 3 月 22 日.

齊藤英治, “Spinon and Phonon Seebeck Effects”, APS March Meeting (New Orleans, USA) 2017 年 3 月 14 日.

齊藤英治, “Spin current generators”, 2016 MRS Fall Meeting (Boston, USA) 2016 年 11 月 29 日.

齊藤英治, (セミプレナリー講演) “Spin current generators”, JEMS2016 (Glasgow, UK) 2016 年 8 月 22 日.

齊藤英治, (基調講演) “Spin current generators”, ICM 2015 (Barcelona, Spain) 2015 年 7 月 8 日.

齊藤英治, “Various spin current exchange phenomena” Magnetism and Magnetic Materials Conference 2014 (Honolulu) 2014 年 11 月 5 日.

〔図書〕(計 2 件)

E. Saitoh, K. Takanashi, et al. Oxford University Press, “Spin Current” Second Edition, 2017, 520(3-32, 33-47, 264-272, 322-347, 493-508).

E. Saitoh, K. Takanashi, et al. John Wiley & Sons, “Spintronics for Next Generation Innovative Devices”, 2015, 255(1-19, 43-75).

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://saitoh.t.u-tokyo.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名: 高梨 弘毅

ローマ字氏名: (TAKANASHI, Koki)

所属研究機関名: 東北大学

部局名: 金属材料研究所

職名: 教授

研究者番号 (8 桁): 00187981

研究分担者氏名: 小野 正雄

ローマ字氏名: (ONO, Masao)

所属研究機関名: 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構

部局名: 原子力科学研究部門 原子力科学研究所 先端基礎研究センター

職名: 研究副主幹

研究者番号 (8 桁): 50370375

(2)研究協力者

研究協力者氏名：新関 智彦

ローマ字氏名：(NIIZEKI, Tomohiko)

研究協力者氏名：横井 直人

ローマ字氏名：(YOKOI, Naoto)

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。