

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 21 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K05153

研究課題名(和文) スピン流と力学運動の交差する角運動量変換物性の開拓

研究課題名(英文) Angular momentum conversion among spin and mechanical motion

研究代表者

松尾 衛 (Matsuo, Mamoru)

東北大学・材料科学高等研究所・助教

研究者番号：80581090

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究課題ではスピン流と力学運動の交差する角運動量変換物性を理論・実験の両面から確立することを目指し、1.非平衡グリーン関数法を用いたスピン・渦度結合を用いたスピン流生成の微視的理論の構築、2.液体金属流体中の渦度分布を用いたスピン流生成の実証実験、3.表面弾性波注入によってCu中に誘起される渦度分布を用いたスピン流生成の実証実験、および4.非金属・強磁性体接合系界面のスピン流ノイズ理論構築を行った。

研究成果の概要(英文)：We developed a microscopic theory of spin-current generation via the spin-vorticity coupling arising from fluid and elastic motion. Based on this theoretical prediction, we experimentally demonstrated the spin current generation from liquid metal motion and that from elastic motion in the presence of the surface acoustic wave. We also developed a microscopic theory of spin-current noise at the magnetic interface.

研究分野：スピントロニクス

キーワード：スピン流

1. 研究開始当初の背景

電子は、電氣的自由度である電荷と磁氣的自由度であるスピン角運動量を持ち、スピントロニクスではこの2つを同時に利用する。その中核を担うのが「スピン流(スピン角運動量の流れ)」である。スピン流の高効率生成・制御は、最重要課題の一つであり、そこでの中心概念は、「角運動量変換」である。これまでに電磁場や局在磁化の持つ角運動量と電子スピンの間の角運動量変換によって、スピン流生成・制御が実現されてきた。一方、私たちにとって最も身近な角運動量は、コマの回転運動にみられる力学的角運動量である。巨視的物体の回転運動と磁性の関係は、量子力学成立以前の1915年にアインシュタインやバーネットらによって発見されていた(図1:磁気回転効果)。実際、磁場を印加して強磁性体を磁化させると角運動量が変化するが、その変化分は、力学的角運動量に変換され、磁性体は回転運動を始める。逆に磁性体を回転させると、力学的角運動量がスピン角運動量に変換され、磁化する。近年、ナノ磁性体を用いた同様の実験が行われているが、回転運動を用いたスピン流生成の研究は行われていなかった。

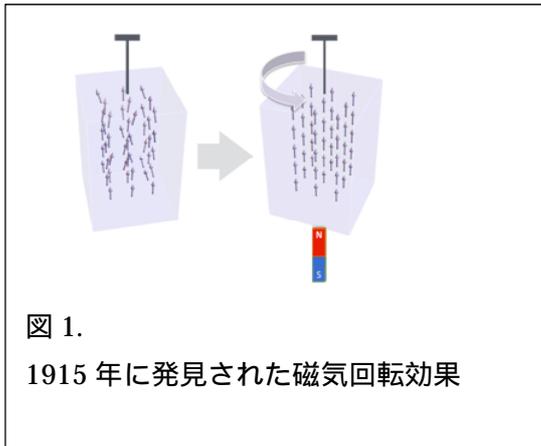


図 1.
1915年に発見された磁気回転効果

2. 研究の目的

物体の巨視的回転運動に伴う力学的角運動量とスピン角運動量の相互変換理論を構築し、その実証実験を成功させるのが本研究の目的である。本研究課題では、非慣性系におけるゲージ場の量子論を用いて「スピン流と力学運動の交差する角運動量変換」の基礎理論体系を確立し、その実証実験および数値解析を行う。スピン流の媒介する物性の中心概念は「角運動量変換」であり、従来は電磁場や局在磁化の角運動量が用いられてきた。ここに新たに巨視的な回転運動に伴う力学的角運動量を加えて、電子スピン角運動量との相互変換の実現を目指す。スピントロ

ニクスの舞台を固体から金属流体へ拡張し、力学運動によるスピン流生成、およびスピン流注入によるナノ物体の力学的駆動のための基礎理論構築を行う。さらに、力学系制御技術とスピン流制御技術を有する原子力機構齊藤実験グループの協力の下で実証実験を行い、数値シミュレーションによる理論解析を行う。

3. 研究の方法

回転運動する物質は非慣性系なので、その物質中の電子スピンの性質を調べるためには、これまで慣性系で定式化されてきたスピントロニクス理論を非慣性系へと拡張する必要がある。そこで、非慣性系のスピノール場の基礎理論である、一般共変ディラック方程式を出発点とし、その低エネルギー有効理論を導き、スピンと回転の相互作用を特定する。その相互作用の下で、バルク金属中のスピン伝導を支配する、スピン拡散方程式を非平衡グリーン関数法を用いて微視的に導出する。こうして得られた拡散方程式を、適切な境界条件の下で解析し、回転運動を用いたスピン流生成の実証実験系をデザインする。また、実証実験によって得られた結果を解析し、高効率生成条件を探る。

4. 研究成果

回転運動する物体中のスピンには、スピン・渦度結合が現れ、この相互作用を通じて回転運動に伴う力学的角運動量とスピントロニクスが相互変換することを理論的に示した(図2)。実際、回転運動が有効磁場として電子スピンに作用する。流体運動や弾性変形運動のある系では、回転運動の分布を作ることができ、角速度の勾配に沿ってスピン流が生成される。

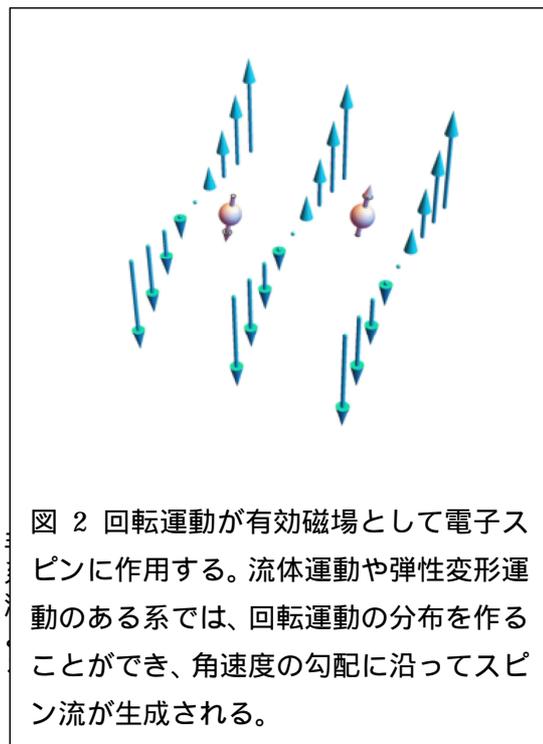


図 2 回転運動が有効磁場として電子スピンに作用する。流体運動や弾性変形運動のある系では、回転運動の分布を作ることができ、角速度の勾配に沿ってスピン流が生成される。

換可能であることを微視的理論によって示した。

実際、Hg や Ga 合金のような液体金属流体をもちいて、流体渦運動を駆動し、スピン流生成することに成功した(図3)。この成果は Nature Physics 誌に掲載され、Nature Physics 誌および Nature Materials 誌の News and Views によってレビューされ、Science 誌の Editor's choice にも取り上げられた。

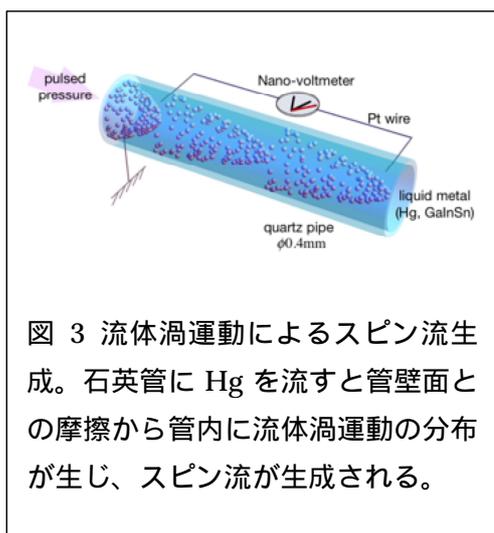


図3 流体渦運動によるスピン流生成。石英管に Hg を流すと管壁面との摩擦から管内に流体渦運動の分布が生じ、スピン流が生成される。

また、Cu のようなスピン軌道相互作用の小さい物質に表面弾性波を注入し、局所回転運動を誘起させることで、スピン流生成する実証実験に成功した(図4)。従来、非磁性金属でスピン流生成するには、プラチナのようなスピン軌道相互作用の大きい物質を用いるしかないと思われてきたが、本成果はそれを覆すものである。この成果は、Physical Review Letters 誌に掲載され、Editors' Suggestion に選出された。

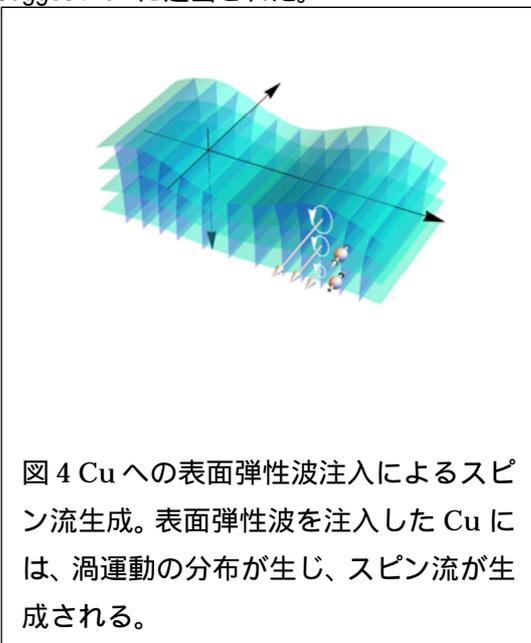


図4 Cu への表面弾性波注入によるスピン流生成。表面弾性波を注入した Cu には、渦運動の分布が生じ、スピン流が生成される。

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10件)

1. M. Matsuo, Y. Ohnuma, T. Kato, and S. Maekawa, "Spin current noise of the spin Seebeck effect and spin pumping", Physical Review Letters 120, 037201 (2018) (査読有)
2. D. Kobayashi, T. Yoshikawa, M. Matsuo, R. Iguchi, S. Maekawa, E. Saitoh, and Y. Nozaki, "Spin current generation using a surface acoustic wave generated via spin-rotation coupling", Physical Review Letters 119, 077202 (2017). [PRL Editors' Suggestion.] (査読有)
3. M. Matsuo, Y. Ohnuma, and S. Maekawa, "Theory of the spin Peltier effect", Physical Review B 96, 020401(R) (2017) (査読有)
4. M. Matsuo, E. Saitoh, and S. Maekawa, "Spin-mechatronics", J. Phys. Soc. Jpn. 86, 011011 (2017). [invited review paper] (査読有)
5. 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, 52-56 (2016) (査読有)

[学会発表](計7件 招待講演のみ)

1. 松尾 衛「非慣性系スピントロニクスからのメッセージ」合同シンポジウム「高エネルギー重イオン衝突実験と諸分野の協奏と発展」日本物理学会年次大会 2018年3月22日
2. M. Matsuo, "Scaling law of spin hydrodynamics generation", CEMS-Tsinghua-Asia Pacific Workshop Joint Workshop on "Highlights of condensed matter physics", Dec.7-8, 2017, Wako, RIKEN.
3. M. Matsuo, "Spin hydrodynamic generation", Asia Pacific Workshop - CEMS Joint Workshop on "Highlights of modern condensed matter physics" RIKEN, Saitama, Japan, Jan 25-27, 2016.
4. M. Matsuo, "Theory of spin mechatronics", New Perspectives in Spintronic and Mesoscopic Physics

Kashiwa, Japan, Jun 10-12, 2015.

〔図書〕(計 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

取得状況(計 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

松尾 衛 (MATSUO, Mamoru)
東北大学・材料科学高等研究所・助教
研究者番号：80581090

(2) 研究分担者

小野 正雄 (ONO, Masao)
国立研究開発法人日本原子力研究開発機
構・原子力科学研究部門 先端基礎研究
センター・研究副主幹
研究者番号：50370375

(3) 連携研究者

()

研究者番号：

(4) 研究協力者

()