

令和元年6月24日現在

機関番号：82110

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H04023

研究課題名(和文) スピン注入流体駆動の研究

研究課題名(英文) Research for fluid flow driven by spin current injection

研究代表者

中堂 博之 (Chudo, Hiroyuki)

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 原子力科学研究所 先端基礎研究センター・研究副主幹

研究者番号：30455282

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究課題では、電子スピンの分極した流れであるスピン流の角運動量を用いて流体を駆動することを目指す。流体とスピン流の間に角運動量相互変換の理論を構築し、検証実験を行う。スピン流注入による流体駆動の基礎原理となるスピン流体発電現象を微視的理論によって定式化し、流体の乱流よりも層流で大きく発電効率が向上することを予言するとともに、実験によってこれを実証した。また、磁性マイクロカントレバーにスピン流を注入することで、スピン波スピン流注入による微細素子の駆動を初めて実現した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究課題において見出したスピン波スピン流による磁性カントレバーの駆動現象は、スピン流が角運動量伝送のキャリアとして利用できることを初めて実証したものである。また、単純にスピン流を注入するだけで物体を駆動することが可能となることから、力学的な駆動素子を単純化、簡素化できるため、機械的な動作機能を目的としたマイクロデバイス等の動力原理となる可能性を有している。

研究成果の概要(英文)：In this research, we aim at generation of fluid flow by means of injecting a spin current, which is a current of spin-polarized electrons. We have developed a microscopic theory on a interconversion in angular momentum between a spin current and fluid flow, and have performed verification experiments on generation of fluid flow by injecting a spin current. We have also formalized a microscopic theory on a phenomenon, in which spin currents are generated by fluid flow (spin hydrodynamical generation: SHD). The theory predicts that efficiency of SHD is more enhanced in a laminar flow than in a turbulent flow, and we have experimentally demonstrated this enhancement of SHD in the laminar flow. Furthermore, we have demonstrated mechanical oscillation of a ferromagnetic cantilever by injecting a spin-wave spin current. The results indicate that a spin currents can drive an object through interconversion in angular momentum between spin currents and object's motion.

研究分野：スピントロニクス

キーワード：スピントロニクス

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

1. 研究開始当初の背景

エレクトロニクスにスピン自由度を加えることで新機能の発現を目指すスピントロニクスの中心概念は、スピン角運動量と他の角運動量の変換である。これまで電子スピンと電磁波、局在磁化との角運動量変換によってスピン注入マイクロ波発振やスピン注入磁化反転などが実現されてきた。研究代表者らは、この方向性をさらに押し進め、最も身近な角運動量である巨視的物体の回転とスピンの間の角運動量変換に注目した研究を行ってきた。巨視的物体の回転と磁化の変換に関する研究は1915年のアインシュタイン、ド・ハースやバーネットの発見に遡るが、その後のスピントロニクスの隆盛に比べて十分に研究されてきたとは言い難い状況であった。その中で研究代表者らは、回転による有効磁場の直接測定や希土類金属の回転誘起磁化の測定などの基礎実験を行い、さらに微細管に液体金属を流した際の流れがスピン流を生成する現象(スピン流体発電)を逆スピンホール効果によって観測することに成功していた(図1)。

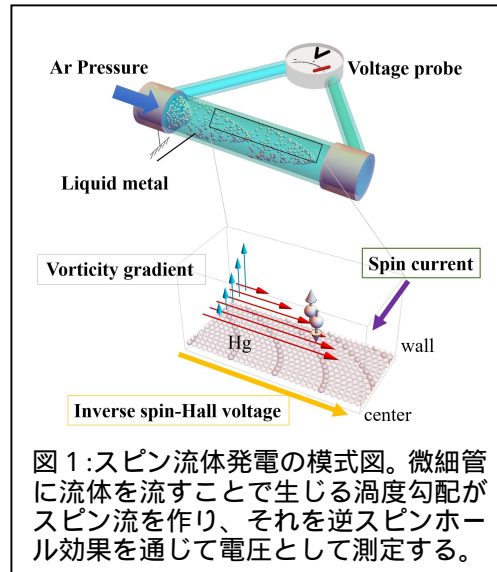


図1: スピン流体発電の模式図。微細管に流体を流すことで生じる渦度勾配がスピン流を作り、それを逆スピンホール効果を通じて電圧として測定する。

2. 研究の目的

流体運動からのスピン流生成であるスピン流体発電現象の観測に成功した背景のもとで、スピン流体発電のさらなる深化と、逆効果であるスピン流注入による流体駆動の検出を目指すのが本研究の目的である。

スピン流体発電は回転が磁化を誘起するバーネット効果のスピン流版と考えることができる。他方、バーネット効果の逆効果である磁化の変化が巨視的物体の回転を誘起する現象もアインシュタイン・ド・ハース効果として存在が知られている。アインシュタイン・ド・ハース効果のスピン流版を考えると、スピン流の注入によって巨視的物体の運動を誘起することが可能であると考えられる。この新しい物体駆動原理の実証はスピントロニクス物理で欠けているピースを埋めるものであると同時に、新しいマイクロデバイス動力の提案となりうる。

一方で、その基礎となるスピン流体発電は乱流領域の液体金属流で観測されたばかりであり、乱流以外の流れでの検証や、それを支える微視的理論もなかった。そこで、スピン流体発電の微視的理論の構築を図るとともに、実験をマイクロデバイスで扱いやすい層流域へと広げていくことが、スピン流注入による物体駆動の実現の観点でも重要である。

3. 研究の方法

スピン流体発電の理解を深め、応用への可能性を探索するため、従来の実験に用いた管(管径 $400\ \mu\text{m}$) よりもさらに細い管(管径 $50\ \mu\text{m}$ ~ $126\ \mu\text{m}$) での実験を行う。この管径での流れは層流になる。スピン流体発電においてスピン流は流速の回転である渦度の勾配により生じるが、乱流の渦度勾配は管壁付近に局在しており管内のほとんどの領域はスピン流生成に寄与しない。他方で層流の渦度勾配は管全体に分布しており、発電効率の観点で乱流より圧倒的に有利である(図2)。層流によるスピン流体発電を実現するため、破損しやすい微細管をガラス管との2重管構造にし、系統的实验を可能とする実験の自動化を実現する。

スピン流体発電の理論構築は、非平衡グリーン関数法による微視的理論に長けた研究分担者によって進める。スピン渦度結合を取り入れたハミルトニアンによる量子運動論と、流体のナビエ・ストークス方程式を組み合わせることで微視的な立脚点に基づいたスピン流体発電理論の導出を行う。

スピン注入による流体駆動は2つの段階に分けて実験を行う。そもそも、純粋なスピン流を用いた物体の駆動は、固体中においても報告されていないので、第1段階として純スピン流によるマイクロデバイスの駆動を実証する。わずかな振動を増幅して検出可能なマイクロサイズのカンチレバー構造に、スピン流注入効率の高いスピンゼーバック効果でスピン流を注入し、発生する振動を調べる(図3)。電気的な効果を完全に排除するため、理想的な絶縁磁性体として知られるイットリウム鉄ガーネットを材料に用いる。この際のスピン流は磁化の振動である

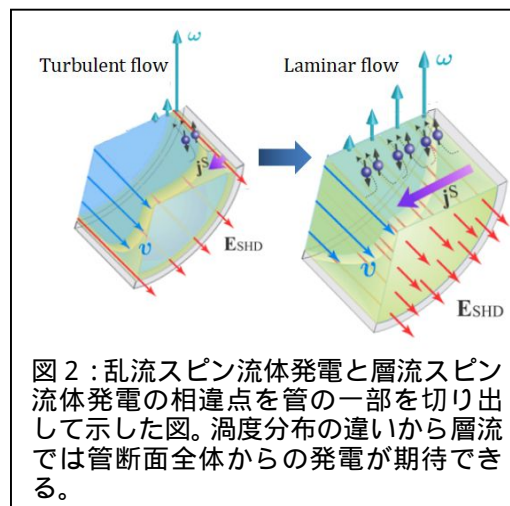


図2: 乱流スピン流体発電と層流スピン流体発電の相違点を管の一部を切り出して示した図。渦度分布の違いから層流では管断面全体からの発電が期待できる。

スピン波によって運ばれる。材料基板を集束イオンビーム法によってカンチレバー構造に加工し、根元から注入したスピン波スピン流が緩和する際に生じる振動を高感度のレーザードップラー振動計で測定する。熱応力の影響を排除するため、振動の測定には熱流と磁場を使ったヘテロダイン測定を採用した。

第2段階としてスピン流注入による流体駆動の実験を行う。流体運動を妨げないようにするため、液体金属を白金管に通し、管に電流を流すことで白金中のスピンホール効果を通じてスピン流を注入する。スピン流の駆動力が小さいため、長時間変化によって流体の運動を測定する実験系とする。具体的には、2つの液体溜を白金管で接続し、スピン流注入に伴う液体溜の液面高さ変化を観測する。液面高さの測定にはナノメートルの分解能を持つレーザー干渉計を用いる。

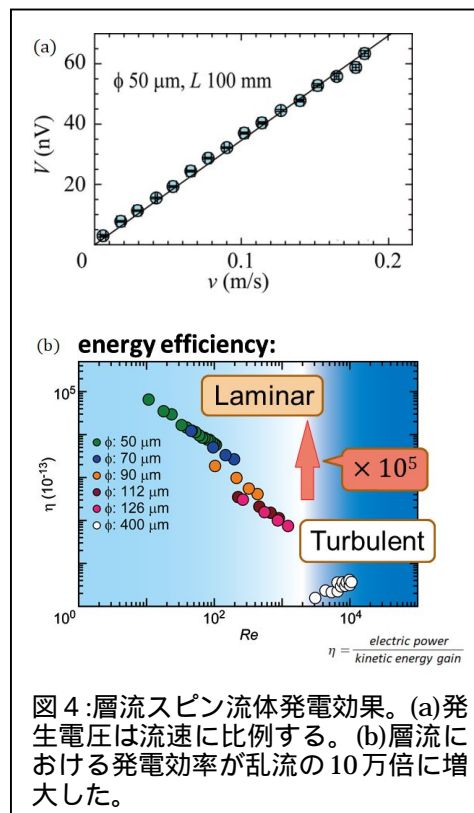
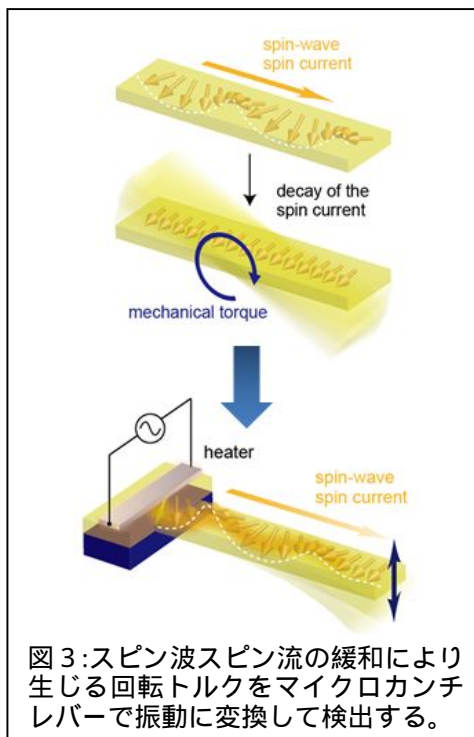
4. 研究成果

スピン流体発電の微視的理論を、ディラック方程式の非相対論近似から導出されるスピン渦度結合と呼ばれる相互作用を取り入れたハミルトニアンによる量子運動論的な方法で計算した結果、スピン渦度結合に起因する新たな緩和時間が定義され、それによってスピン拡散方程式に補正が生じることがわかった。この補正によってスピン蓄積は流体の渦度に依存するようになる。以上が渦度勾配によるスピン流生成の微視的な定式化である。この結果に流体運動を記述するナビエ-ストークス方程式を適用することで、実際の流体におけるスピン流生成を計算できる。流速分布として、層流を例に計算した結果、生成されるスピン流の大きさが流速に比例し、管径の2乗に反比例することが分かった。

この知見を踏まえて層流域でのスピン流体発電を実際に測定した。その結果、図4(a)に示すように、理論予測通り流速に比例する電圧信号が得られた。特筆すべきは、図4(b)に示すように、流体の運動エネルギーに対する発電効率が管径50 μm の管において乱流の10万倍に至った点である。これは管全体で発電が起きるといふ層流のスピン流体発電が持つ性質の表れと考えられる。管径を変えた実験を系統的に行った結果、発電効率は管径とレイノルズ数が小さくなるほど上昇することが分かった。より小さい径、より微量な流れほど発電効率が高くなるというこの結果はマイクロ/ナノデバイスにおけるエネルギー源としてのスピン流体発電の有効性を示すものである。これらの結果をまとめて、Nature Communications 誌へ投稿した。

次に、スピン流による物体駆動の第1段階であるマイクロカンチレバーデバイスへのスピン流注入の主要な結果を図5に示す。長さ400 μm のカンチレバーにスピン波スピン流を注入した結果、印加磁場がカンチレバーと平行な場合には環境の熱ノイズによる微小な振動のみが観測されたのに対し、印加磁場カンチレバーと垂直な場合にはヘテロダイン周波数に明瞭なシグナルが発生した。このふるまいはスピン波スピン流が運ぶ角運動量の方向で良く説明できる。磁場がカンチレバーと平行な際にはカンチレバーを捻じる方向の角運動量が運ばれるため、振動モードのスペクトルに信号が出ない一方、垂直な磁場の場合にはカンチレバーを曲げる方向の角運動量が運ばれることから、明瞭な振動となって観測されたと考えられる。この解釈は、スピン波スピン流の注入を妨げたサンプルによる対照実験で振動が抑制されたことから支持される。電流を伴わない純粋なスピン流で巨視的な運動が駆動可能であるというこの結果は、電気的な配線が困難なマイクロ機械デバイスの駆動原理となりうるものであり、Nature Communications 誌への掲載が決定している。

以上の結果をもとに、流体へのスピン流注入の実験を行った。実験精度の向上と熱膨張の影響を排除するため、測定環境の振動や温度、系の放熱などを制御した結果、10000秒以上の測



定時間にわたって液体溜の液面変動を 100 nm 以下に抑えることに成功した。この変動量は、固体系で報告されている効率でスピン流注入が可能である場合にスピン流注入による液面変動が観測できる数値である。しかし、白金管を用いたスピン流注入においては有意な液面変動は観測されなかった。この理由として、管から液体金属へのスピン注入効率が非常に悪い可能性が考えられる。電気伝導とは異なり、スピン流の注入は原子レベルで広い面積にわたって接触の保たれた界面が必要であることが知られており、濡れ性の悪い液体金属-白金界面では蒸着膜などの固体系と比較してスピン流注入効率が著しく劣ると考えられる。そこで、流路内壁に金メッキを施し、金との合金化を通じて液体金属と白金の接触を改善する実験系を作製した。本研究で得られた様々な知見を活かし、スピン流注入による流体駆動実験を継続している。

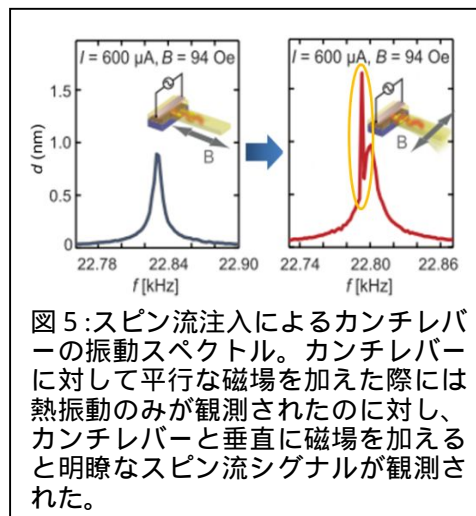


図 5: スピン流注入によるカンチレバーの振動スペクトル。カンチレバーに対して平行な磁場を加えた際には熱振動のみが観測されたのに対し、カンチレバーと垂直に磁場を加えると明瞭なスピン流シグナルが観測された。

5 . 主な発表論文等

[雑誌論文](計 10 件)

K. Harii, Y.-J. Seo, Y. Tsutsumi, H. Chudo, K. Oyangi, M. Matsuo, Y. Shiomi, T. Ono, S. Maekawa, and E. Saitoh, “Spin Seebeck Mechanical Force,” *Nature Communications* (accepted), (2019), 査読有

M. Imai, H. Chudo, M. Ono, K. Harii, M. Matsuo, Y. Ohnuma, S. Maekawa, and E. Saitoh, “Angular momentum compensation manipulation to room temperature of the ferrimagnetic $\text{Ho}_{3-x}\text{Dy}_x\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ detected by the Barnett effect,” *Appl. Phys. Lett.* 114, 162402 (2019). [Featured Article], 査読有, URL:

<https://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/1.5095166>

M. Matsuo, Y. Ohnuma, T. Kato, and S. Maekawa, “Spin Current Noise of the Spin Seebeck Effect and Spin Pumping,” *Phys. Rev. Lett.* 120 037201 (2018), 査読有, URL: <https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.120.037201>

C. Tang, Q. Song, C.-Z. Chang, Y. Xu, Y. Ohnuma, M. Matsuo, Y. Liu, W. Yuan, Y. Yao, J. S. Moodera, S. Maekawa, W. Han, and J. Shi, “Dirac surface state-modulated spin dynamics in a ferrimagnetic insulator at room temperature,” *Science Advances* 4, eaas8660 (2018), 査読有, URL: DOI: 10.1126/sciadv.aas8660

M. Imai, Y. Ogata, H. Chudo, M. Ono, K. Harii, M. Matsuo, Y. Ohnuma, S. Maekawa, and E. Saitoh, “Observation of gyromagnetic reversal,” *Appl. Phys. Lett.* 113, 052402 (2018) [Editor’s picks], 査読有, URL: <https://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/1.5041464>

Y. Ohnuma, M. Matsuo, and S. Maekawa, “Theory of the spin Peltier effect,” *Phys. Rev. B* 96, 134412 (2017), 査読有, URL: <https://journals.aps.org/prb/abstract/10.1103/PhysRevB.96.134412>

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,” *J. Magn. Mang. Mater.* 442, 329-331 (2017), 査読有, URL: <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2017.06.101>

Y. Ogata, H. Chudo, M. Ono, K. Harii, M. Matsuo, S. Maekawa, and E. Saitoh, “Gyroscopic g factor of rare earth metals,” *Appl. Phys. Lett.* 110, 072409 (2017), 査読有, URL: <https://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/1.4976998>

M. Matsuo, Y. Ohnuma, and S. Maekawa, “Theory of spin hydrodynamic generation,” *Phys. Rev. B*, 020401(R) (2017), 査読有, URL: <https://journals.aps.org/prb/abstract/10.1103/PhysRevB.96.020401>

Y. Ohnuma, M. Matsuo, and S. Maekawa, “Spin transport in half-metallic ferromagnets,” *Phys. Rev. B* 94, 184405 (2016), 査読有, URL: <https://journals.aps.org/prb/abstract/10.1103/PhysRevB.94.184405>

[学会発表](計 10 件)

K. Harii, Y.-J. Seo, Y. Tsutsumi, H. Chudo, K. Oyanagi, Y. Shiomi, M. Matsuo, T. Ono, S. Maekawa, and E. Saitoh, “Detection of spin Seebeck mechanical force,” *Spin Mechanics*

6 (2019).

今井正樹、中堂博之、前川禎通、齊藤英治、「NMR 測定で観るフェリ磁性ガーネット $\text{Ho}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ の角運動量補償」、日本物理学会第 74 回年次大会 (2019).

針井一哉、Seo Yong-Jun、堤康雅、中堂博之、大柳洸一、松尾衛、塩見雄毅、小野崇人、前川禎通、齊藤英治、「磁性絶縁体カンチレバーによるスピン波スピン流の検出」、日本物理学会第 74 回年次大会 (2019).

大沼悠一、前川禎通、松尾衛、「核スピンポンピングの理論」、日本物理学会第 74 回年次大会 (2019).

H. Chudo, “Nuclear spin dynamics on rotating frame observed by NMR/NQR” 53rd REIMEI international workshop (2019).

今井正樹、緒方裕大、中堂博之、小野正雄、針井一哉、大沼悠一、松尾衛、前川禎通、齊藤英治、「フェリ磁性ガーネット $\text{R}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ (R=希土類) の角運動量補償温度の制御」、日本物理学会 2018 年秋季大会 (2018).

今井正樹、緒方裕大、中堂博之、小野正雄、大沼悠一、松尾衛、前川禎通、齊藤英治、「ガーネット効果による角運動量補償点の直接観測」、日本物理学会第 73 回年次大会 (2018).

高橋遼、針井一哉、小野正雄、中堂博之、松尾衛、前川禎通、齊藤英治、「層流におけるスピン流体発電現象の実験」、日本物理学会第 72 回年次大会 (2017).

松尾衛、大沼悠一、前川禎通、「界面におけるスピン注入効率の微視的理論」、日本物理学会第 72 回年次大会 (2017).

大沼悠一、松尾衛、前川禎通、「スピンペルチェ効果の理論」、日本物理学会第 72 回年次大会 (2017).

〔図書〕(計 1 件)

S. Maekawa, et al. (eds.) Oxford university press, Spin Current (second edition) (2017).

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

取得状況 (計 0 件)

6 . 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名：家田 淳一

ローマ字氏名：(IEDA Jun'ichi)

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：研究主幹

研究者番号 (8 桁)：20463797

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

研究分担者氏名：前川 禎通

ローマ字氏名：(MAEKAWA Sadamichi)

所属研究機関名：国立研究開発法人理化学研究所

部局名：創発物性科学研究センター

職名：上級研究員

研究者番号 (8 桁)：60005973

研究分担者氏名：松尾 衛

ローマ字氏名：(MATSUO Mamoru)

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 先端基礎研究センター

職名：任期付研究員

研究者番号(8桁): 80581090

期間：平成27年度～平成28年度

研究分担者氏名：高橋 遼

ローマ字氏名：(TAKAHASHI Ryo)

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 先端基礎研究センター

職名：博士研究員

研究者番号(8桁): 30782023

期間：平成27年度～平成28年度

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。