

平成 30 年 6 月 12 日現在

機関番号：12611

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2016～2017

課題番号：16H07437

研究課題名(和文) スピン流体発電現象における渦度変換理論の実験的検証

研究課題名(英文) Experimental study on spin-vorticity conversion of spin hydrodynamic generation

研究代表者

高橋 遼 (Takahashi, Ryo)

お茶の水女子大学・基幹研究院・助教

研究者番号：30782023

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,300,000円

研究成果の概要(和文)：スピン流体発電現象は流体運動からスピン角運動量の流れ、スピン流を生成する現象である。本現象は運動流体中の局所回転、渦度を利用し、回転角運動量と電子スピンの直接相互作用(スピン-回転相互作用)により、力学的にスピン流を生成する。本研究課題では、マイクロ・ナノスケールに適用できる層流域において本現象を実証し、従来の乱流域での結果と比較することで本現象のうちスピン-回転相互作用に由来する特性を明確にした。本成果は、スピン流体発電現象をスピン流物理が強く発現する微視スケールへと展開し、スピン流による角運動量変換物理に本現象を組み込む足掛かりとなる。

研究成果の概要(英文)：Spin hydrodynamic generation (SHDG) is generation of spin currents from fluid mechanical motion. The SHDG stems from a direct interaction between mechanical rotation and electron spins, called spin-rotation coupling. Especially in a fluid, vorticity, local rotation in a fluid, can be utilized as a source of the mechanical spin-current generation. In this study, we performed the SHDG measurement in a laminar flow, which is realized even in a micro or nano scale. By comparing results of the current study of the laminar-flow SHDG with that of the conventional study of turbulent one, we clarified SHDG's properties especially due to the spin-rotation coupling. The results indicate the applicability of the SHDG to micro or nano scale physics, including spin-conversion physics by using the spin currents.

研究分野：スピントロニクス

キーワード：スピン流 流体力学

## 1. 研究開始当初の背景

近年注目を集めているスピントロニクスでは、物質中に多様な形態で存在する角運動量の相互変換を、スピン角運動量の流れ「スピン流」を用いて実現、制御することが一つの重要な課題となる。スピン流は、物質中の緩和によってスピンの非保存であるために、電流とは異なりマクロスケールでは殆ど消失してしまう。しかし緩和長程度のマイクロ・ナノ（微視）スケールではスピンが消失しきらず、微視的角運動量と強く相互作用できることが知られている。スピン流生成技術により、複数の角運動量を強固に結びつけることで、スピン流物性が大きく発現する微視スケールにおいて、磁気や発電現象などを包含した全く新しい物理原理の開拓、応用技術体系の構築が期待できる。

角運動量のうち我々にとって最も身近なものは、コマの回転運動にみられるような力学的な角運動量である。しかしながら、この巨視的な力学現象がもつ角運動量とスピン流との相関は殆ど知られていなかった。そのような中、我々の研究では流体の力学運動がもつ回転運動に着目することで、特に液体運動からスピン流を生成する実験に、世界に先駆けて成功していた。

## 2. 研究の目的

流体の力学運動による電子スピン流生成 (Spin hydrodynamic: SHD) 現象を、まず微視スケールの液体流で実証する。そして本現象の発現において重要なスピン-軌道相互作用に関し、その強さが異なる物質間で比較実験を行う。これらにより、スピン流物性が強く発現する微視スケールにおいて SHD 現象を実現させ、他のスピントロニクス現象との相関を強める突破口を開くとともに、我々が先行研究において実験と並行して提唱した渦度変換理論の妥当性を明らかにする。

SHD 現象は液体金属の流れによりその巨視的力学運動から電子スピン流を生成する現象であり、それが電気的信号として現れる。本現象は電子スピンに関して二つの相互作用に依存している。すなわち、スピン-回転相互作用(巨視的力学的回転運動との相互作用)とスピン-軌道相互作用(電子運動との相互作用)である。

スピン-回転相互作用は、液体の運動からスピン流の駆動源であるスピン圧 (非平衡スピン蓄積) を誘起する。SHD 現象において、流路内を流れる液体流がもつ局所回転、すなわち渦度によりスピン圧が誘起されるため、その空間分布が重要な役割を持つ。液体流れの渦度分布は、二つの運動領域、乱流と層流において大きく異なっている。マイクロスケールでの液体流の運動領域、層流領域において SHD 現象を実現し、我々の先行研究で実証した乱流領域での SHD 現象との比較を行うことで、スピン流物性が強く発現する微視スケ-

ールでの SHD 現象の特徴的な振舞が明らかとなる。

スピン-軌道相互作用は、力学的に生成されたスピン圧によって駆動されるスピン流の伝搬長さスケール(スピン拡散長)を決定する。スピン流の非保存性はスピン-軌道相互作用に起因しており、これを介した不純物散乱によりスピン反転緩和するため、拡散流としてスピン拡散長程度しか伝搬しない。また同時に、この相互作用はスピン流を電気信号に変換する機構(逆スピンホール効果)にも寄与する。同相互作用と不純物散乱を介した逆スピンホール効果によりスピン流は電流に変換される。我々の先行研究での提唱(渦度変換理論)によると、これらの寄与により SHD の信号強度はスピン-軌道相互作用の強さに反比例的に依存する。そこで、スピン-軌道相互作用が弱い単一元素からなる低比重の液体金属 Ga の SHD 現象を測定し、高比重の液体金属 Hg の結果と比較することで、この提唱の妥当性が実験的に明らかとなる。

## 3. 研究の方法

力学運動により直流スピン流を生成するには渦度の勾配が必須であり、それが生じる系として本研究では特性がよく知られた円筒細管での流れを用いた。系の対称性によりスピン流は渦度勾配方向、すなわち円管の内径方向に流れる。流体として液体金属を使用することで、電子スピン流が逆スピンホール効果により円管の管軸方向の起電力に変換される。本研究の測定手法では、この逆スピンホール起電力の定量・系統評価により現象の検証を行った。

## 4. 研究成果

### (1) SHD 自動測定システムの構築

SHD 測定システムは、主に(i) 液体金属吐出部、(ii) 流路部、(iii) 平均流速測定部、(iv) 起電力測定部から構成される。(iv)を除く各プロセスは従来手動で行われており煩雑な操作を伴うため測定精度に限界があった。本成果では、不活性な Ar 雰囲気下において(i)-(iii)の各部を電氣的に制御・計測可能にし、これらを(iv)と連動させることで、液体駆動流速が自動制御されたシステム[図 1]において SHD 現象の測定を実施可能にした。この実現により、

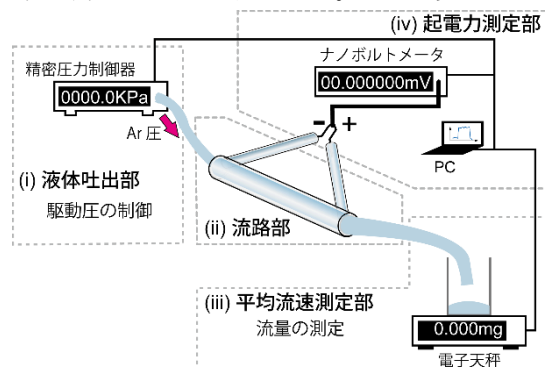


図 1. SHD 自動測定システム

一定条件での反復測定が可能となり低流量かつ小信号の条件においても測定が可能となった。本実験では、流量  $10 \mu\text{g/s}$  オーダーの条件において、 $1 \text{ nV}$  オーダーの定常的な起電力信号まで測定できている。

(2) 層流 SHD 現象の実証

構築した自動測定システムを用いて低流量域である層流域において SHD 現象[図 2]の実証を行った。駆動に用いた液体金属は Hg であり、実験は全て室温で行っている。

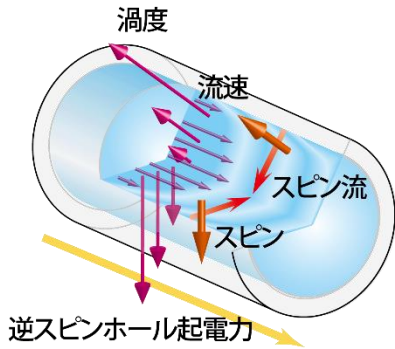


図 2. SHD 現象の概念図

内径  $\phi 50 \mu\text{m}$ 、長さ  $L 100 \text{ mm}$  の流路部で実施した結果が図 3 である。図 3(a)に示すように駆動に対して鋭敏に応答しかつ定常的な起電力信号が得られた。流体の運動域を示す指標であるレイノルズ数は  $2 \sim 100$  程度であり、流体運動が層流域にあることを示している。

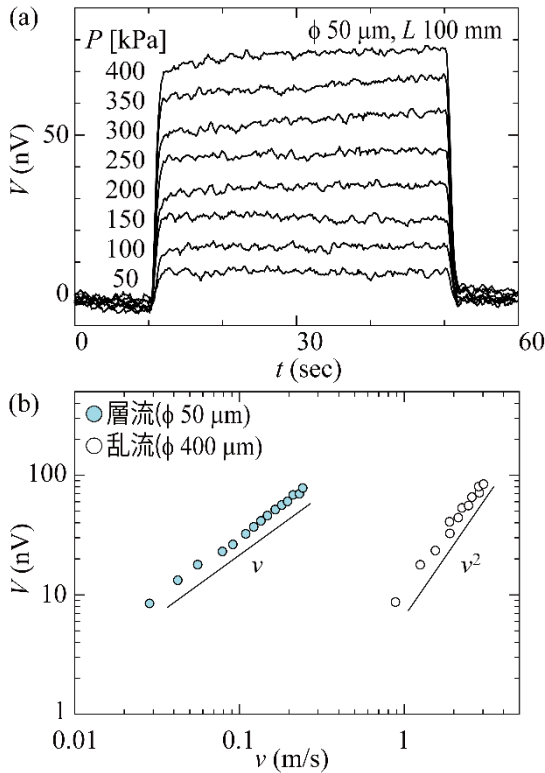


図 3.起電力信号の時間発展(a) および流速依存性(b)

この起電力信号の平均流速依存性は図 3(b)のようになり、流速  $v$  に対して起電力信号  $V$

が線形 ( $V \propto v$ ) の依存性を示すことが明らかとなった。乱流域では SHD 起電力信号はおよそ  $V \propto v^2$  の依存性を示すことが先行研究により解明されており、この流速依存性の違いは乱流域と層流域における渦度  $\omega = \nabla \times v$  の空間分布の違いに由来するものである。

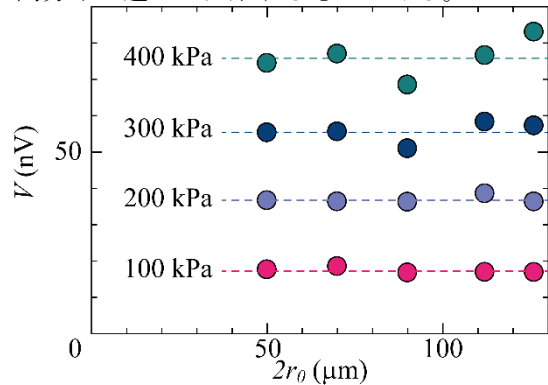


図 4.起電力信号の流路徑依存性

図 4 に示したのは起電力信号の流路徑  $2r_0$  依存性である。この結果は、流体駆動のための各圧力  $P$  において、起電力信号は流路徑に依存しないことを示している。層流域の平均流速は  $v \propto r_0^2 P$  の関係を満たすことから、本結果は一定流速において起電力信号が  $V \propto r_0^{-2}$  の依存性を持つことを示している。すなわち、得られている信号は流路断面全域から発生する起電力によるものであることを意味する。これは、摩擦帯電などの壁面現象ではないことを示すと同時に、乱流域で現れていた  $V \propto r_0^{-1}$  の依存性とも異なっており、上述同様、乱流と層流の渦度分布の違いによるものである。

層流域における SHD 信号を、渦度によるスピン圧生成項を導入した力学運動系でのスピン拡散方程式 (スピン流の基礎方程式) を用いて定式化すると、 $V \propto v r_0^{-2}$  の関係性が理論的に導出でき、上述の実験結果は理論と整合していることが明らかとなった。すなわち図 5 に示すように、SHD 現象は渦度の空間分布の違いを反映して、乱流域ではエッジ (壁面近傍) 電流あるいは起電力を誘起するのに対

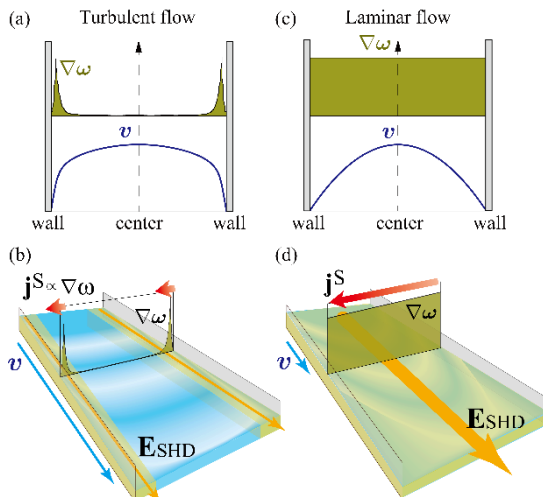


図 5.乱流および層流 SHD 現象

し、層流ではバルク電流（起電力）として発現するという明確な差異が明らかとなった。

層流 SHD 現象がバルクで発現する効果であることは、エネルギー変換効率の観点から乱流に比べて層流の方が高い変換効率を有することができることを示している。実際、図 6 に示すように、得られた起電力から換算した電力と、平均流速から換算した運動エネルギーの増加分の比で定義したエネルギー変換効率  $\eta$  のレイノルズ数  $Re$  依存性は、乱流から層流に流体の運動領域が変化することにより効率が大きく増加することを示している。更にレイノルズ数が小さい領域、すなわちマイクロ・ナノスケールになる程増大していくことも明らかとなった。マイクロ流体力学で扱われるようなスケール（流路径  $\sim 1 \mu\text{m}$ 、長さ  $\sim 1 \text{mm}$ 、レイノルズ数  $\sim 10^{-6}$ ）で評価すると、変換効率は数%まで増大することが見積もられる。

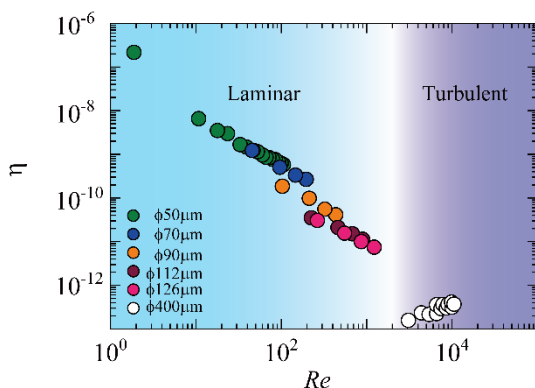


図 6. SHD 現象のエネルギー変換効率

力学的角運動量の寄与を取り込んだスピントロニクスの研究は未だ発展途上であり、特に流体運動が有する渦度を用いて行う本研究は黎明段階にある。層流 SHD 現象の実証と定量測定を行った本成果により、スピン流物性が強く発現する微視スケールにおける SHD 現象が明らかとなり、種々のスピントロニクス現象による角運動量の相互変換物理に本現象を組み込む突破口を得た（本成果は既にまとめられており、論文として投稿する段階にある）。本研究により SHD 現象における微視スケールでのスピン-回転相互作用の寄与が明確となったため、今後の研究展開として、本研究課題の本来の到達目標であったスピン-軌道相互作用の寄与を引き続き検証していく。

## 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 2 件）

R. Takahashi, Observation of spin hydrodynamic generation effect., *Nano-Spin Conversion Science Research Highlights vol.2*, 14 (2016). 査読なし

Y.-J. Seo, K. Harii, R. Takahashi, H. Chudo, K. Oyanagi, Z. Qiu, T. Ono, Y. Shiomi & E. Saitoh, Fabrication and magnetic control of  $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$  cantilevers., *Appl. Phys. Lett.* **110**, 132409 (2017). 査読あり

〔学会発表〕（計 2 件）

R. Takahashi, K. Harii, M. Matsuo, S. Maekawa and E. Saitoh, “Spin-hydrodynamic Conversion Effect”, NSCS-QSD 2016 (Tokyo University), 2016. 10.

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 (大阪大学), 2017. 3.

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

高橋 遼 (TAKAHASHI, Ryo)

お茶の水女子大学・基幹研究院自然科学系・助教

研究者番号：30782023