

# 液体金属流によって磁気の流れを生み出す Spin-current generation from liquid-metal flow

松尾 衛 スピン・エネルギー変換材料科学研究グループ  
Mamoru Matsuo Research Group for Spin-energy Transformation Science



## 概要

近年の微細加工技術の進展によって、スピン角運動量の流れである「スピン流」を生成制御することができるようになり、スピン流を媒介する多様な物性現象が探索されてきました。これまでにスピン流生成には固体材料しか使われてきませんでした。私たちは液体金属の流体運動を用いてスピン流生成する新現象を発見しました。

本研究は東北大学（高橋遼氏）との共同研究で行われました。本成果は、ネイチャーフィジクス誌に論文掲載され、ネイチャーフィジクス誌、ネイチャーマテリアル誌、サイエンス誌に注目論文として解説記事が掲載されました。

## 1. 研究の背景・経緯

電子は、電気と磁気の2つの性質を持っており、磁気の起源は「スピン」とよばれる電子の自転運動であることが知られています。近年、微細加工技術のめざましい進展に伴い、電気の流れである電流だけでなく、「スピン流」と呼ばれる磁気の流れを生み出すことができるようになりました。スピン流は、電流に比べて発生するジュール熱が大幅に抑制されることが知られており、電子デバイスへのスピン流利用は、次世代省エネルギー電子技術として注目されています。

これまでスピン流の生成制御には電磁場、熱、音などと電子スピンの相互作用を利用して、様々な形態のエネルギーをスピン流に変換する技術が確立されてきました。ところが、これらのスピン流利用はすべて固体物質中に限られており、液体金属のような流体でスピン流を生成できるかは不明でした。

一方、コンピューターで用いられる論理集積回路は年々高密度集積化が進み、それに伴う消費電力や発熱の増大が問題となっています。この解決策の1つとして、液体金属の利用が提案されています。従来の固体金属導線を液体金属に置き換えることによって、消費電力を抑制し排熱能力を向上させることが検討されています。

このような背景から、私たちはスピン流を液体金属中で生成制御することによって、スピン流と液体金属という両者のメリットを兼ね備えた全く新しい省エネルギーデバイスが実現できると考えて研究を進めてきました。

## 2. 研究の内容

まず、ミクロの世界を精密に記述する量子力学によって明らかにされた、電子の自転運動「スピン」についての直観的なイメージを共有することから始めましょう。図1左のように、電子といえば、負電荷を帯びた球体が想像されると思いますが、ここにはスピンのイメージが

## Abstract

Recent progress of nanotechnology allows us to generate a flow of spin angular momentum, “spin current”, and explore a wide variety of transport phenomena via spin currents. Conventionally, spin currents have been generated only in solid states. However, we discovered a new method of spin-current generation from liquid-metal flow.

This work was done in collaboration with Tohoku University (Dr. Ryo Takahashi) and was published in Nature Physics. Our research got featured in News&Views of Nature physics and Nature Materials, and also in Editors' Choice of Science.

## 1. Background

Electrons are charged elementary particles with spin angular momentum or spin, which is the origin of magnetism. Recently, advanced nano-fabrication technology allows us to utilize “spin current”, a flow of spins. The spin current has drawn global attention as a new way to reduce power consumption of electronic devices because the Joule heating produced by the spin current is much smaller than that by the charge current. Conventionally, spin currents have been generated by using the coupling between spin and electromagnetic fields, heat, and sound. All of these methods are performed in solid-state materials [1].

Meanwhile, as logic circuits used in computers are made highly integrated and highly dense year by year, the power consumption problem is increasingly prominent. To solve it, liquid-based transistors have been studied to build chips that are highly efficient and work with much less power than silicon-based semiconductor chips.

In this context, we have been conducting research with the idea that a completely new energy-saving device combining the advantages of both spin current and liquid metal can be realized by generating spin currents in a liquid metal.

不在です。電子自身は「スピン」のために磁気を帯びており、回転軸方向に沿ってN極とS極を持つ小さな磁石として働きます。同時に電子は、宇宙の始まりから終わりまで永久に途絶えることのない回転歯車です。つまり、「スピン」を持つ電子とは、図1右のように、小さな磁石と回転する歯車が組み合わさったものだと想像できます。

鉄のような特殊な物質中ではスピンの向きが揃っているので、鉄は磁気を帯びて磁石になっています。ところが、通常物質中の電子たちのスピンの向きはバラバラになっており、回転歯車や磁石としての性質は互いに打ち消し合っており、直接利用することができません。

私たちは、電子のスピンの性質のなかでも、特に回転歯車としての性質に着目し、液体金属中に渦運動を発生させることで、回転歯車と渦運動が噛み合わさって、電子スピンの向きを揃えながら電子を移動できると予想しました(図2)。

実際に液体金属中の電子の従う基礎方程式を導いた結果、液体金属中の渦運動の強さを表す渦度と呼ばれる物理量 $\omega$ と電子スピン $S$ との間に $H_{sv} = -S \cdot \omega / 2$ という相互作用「スピン・渦度相互作用」が働くことが分かりました。この相互作用は、磁場中の電子スピンの働くゼーマン相互作用 $H_z = -S \cdot \gamma B$ (ここで $\gamma$ は磁気回転比、 $B$ は磁場)とよく似た形をしており、両者を比較すると、液体金属中には渦度由来の有効磁場 $\omega / 2 \gamma$ が生じていると解釈することができます。ゼーマン相互作用のある系では、その勾配からスピンの働く力 $F = -\nabla H_z = -S \cdot \gamma \nabla B$ が得られるため、磁場勾配 $\nabla B$ に平行もしくは反平行に電子が流れます。これはシュテルン・ゲルラッハ効果と呼ばれ、この効果によってスピンの発見されたという歴史的経緯があります。同様に液体金属中では、スピン・渦度相互作用 $H_{sv}$ の勾配から、 $F = -\nabla H_{sv} = -S \cdot \nabla \omega / 2$ という力がスピンの働くため、電子は渦度勾配に平行・反平行に流れます。この流れこそが、液体金属流体中に発生するスピン流です。

## 2. Contents of the study

Let us begin with sharing visualization of an electron with spin. Owing to this quantum mechanical spin, electrons can be imagined as a spinning gear with a magnet whose poles are parallel to the spinning axis. Since the spinning motion is perpetual, the magnetism is permanent (Fig. 1). We benefit significantly from spin via magnetic materials such as iron wherein spins are intrinsically aligned. Conversely, it is difficult to utilize electron-spin functions in non-magnetic materials because the spinning axes are incoherent and thus, the spins cancel each other out.

Focusing on properties as the spinning gear, we predicted that the electrons can flow while aligning the spinning axis by engaging local rotational motion in the liquid metal and the gear (Fig. 2).

We derived a fundamental equation of electron spin in a liquid metal, and found that the spin  $S$  couples to the vorticity  $\omega$ , local rotational motion induced in a liquid metal flow as:  $H_{sv} = -S \cdot \omega / 2$  [2]. The spin-vorticity coupling is very similar to the Zeeman coupling  $H_z = -S \cdot \gamma B$ , where  $\gamma$  is the gyromagnetic ratio and  $B$  is the magnetic field. Comparing  $H_{sv}$  with  $H_z$ , the spin-vorticity coupling can be interpreted as the Zeeman coupling due to an effective magnetic field due to the vorticity field:  $B \omega = \omega / 2 \gamma$ . In the presence of the gradient of the magnetic field  $\nabla B$ , spins are driven along  $\nabla B$  by the spin-dependent force  $F = -\nabla H_z = -S \cdot \gamma \nabla B$ . This is well known as Stern-Gerlach effect. Similarly, when the vorticity gradient  $\nabla \omega$  is induced in a liquid metal, spins flow along  $\nabla \omega$ . This means that spin current can be generated along the vorticity-gradient,  $\nabla \omega$ . This is the mechanical analogue of the Stern-Gerlach effect.



図1 電子のイメージ

電子は電荷だけでなくスピンを持っています。スピンを持った電子は、小さな磁石に回転する歯車が組み合わさったものだとみなすことができます。

Fig. 1 Visualization of an electron

Electrons have electric charge as well as spin, which can be visualized as a small magnet with a spinning gear.

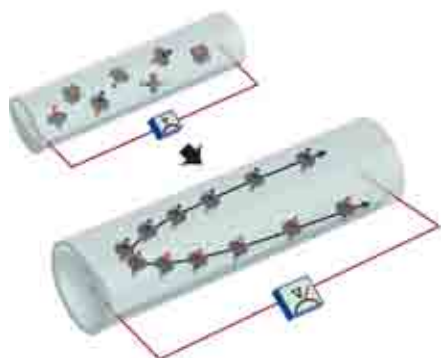


図2 液体金属流からのスピン流を生成

細管に液体金属を流すことで電子のスピンの向きを揃えながら電子を移動させる新現象を理論計算により発見し、実証実験に成功しました。

Fig. 2 Spin current generation from liquid metal flow.

A "spin current", or flow of electron spins, is created by a pipe flow of a liquid metal.

こうした理論予測に基づき、私たちは次のような実験を考案しました。図3のように細管に液体金属を流すと細管壁面と液体金属の間に働く摩擦の効果によって流体の渦運動が生じます。渦運動の勢いである渦度 $\omega$ は壁面に近い程大きく、細管の中心軸付近に向かって小さくなります。つまり、管壁から管の中心軸方向に向かって渦度勾配が生じているため、その方向に沿ってスピン流が生成されます。こうして生成されたスピン流は、液体金属中の様々な散乱過程を経て、最終的には流体の流れに沿った方向への電圧信号として観測されることが理論計算によって示されます。実際に図3のような実験系を用意し実証実験を行いました。内径数百マイクロンの石英製細管にプラチナ線で電圧計をつなぎ、細管には水銀やガリウム合金を封入し、圧力ポンプで圧力をかけて、流体運動を駆動しました。図4に示したように、0.1MPa～0.6MPaの圧力を印加して水銀を流したところ、理論予測通り圧力印加時に数十ナノボルトという電圧信号が測定されました。

さらに、理論計算によって管の半径 $r_0$ 、電圧端子間の距離 $L$ 、電圧信号の大きさ $V$ と、流体の平均流速 $v^*$ との間には、

$$(r_0/L)V \propto v_*^2 \quad (1)$$

という関係が成り立つことが分かりました。実際に $r_0$ ,  $L$ ,  $v^*$ を変えながら実験を行うと、理論予測通り、上式が成り立つことを確かめることができました(図5)。

### 3. 成果の意義と波及効果

私たちの研究によって、電子のスピンが液体金属の渦運動と相互作用することが世界で初めて証明されまし

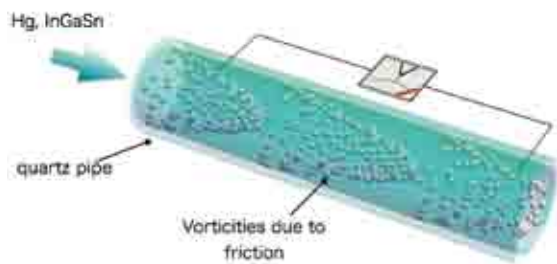


図3 実験セットアップ

石英製の細管に電圧計をつなぎ、圧力ポンプで水銀やガリウム合金を細管に流し、発生する電圧信号を測定する。

Fig.3 Experimental setup.

Spin current is generated along the vorticity gradient, which is induced perpendicular to the flow velocity by applying a pulsed pressure. The spin current is converted into the charge current due to the inverse spin Hall effect. Then, the electric voltage is generated along the flow velocity.

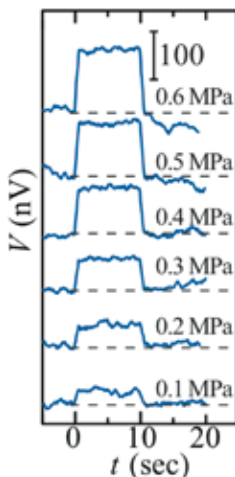


図4 液体金属流による電圧

細管に圧力をかけて液体金属の流れを作り、その金属流の渦運動によって生じたスピン流は、電圧信号として観測されます。

Fig.4 Electric voltage from a liquid-metal flow

We excited liquid-metal flows in a narrow channel, with spin current being generated by the vorticity fluctuation of the flow. The spin current is observed as the longitude-voltage generation.

To confirm the spin-current generation, we used liquid metal flows of Hg and GaInSn in a narrow quartz pipe (Fig. 3). When applying a pulsed pressure, vorticity fields are induced. The spin current is generated along the vorticity gradient, and is converted into the electric voltage due to the inverse spin Hall effect. The induced voltages are measured by the nano-voltmeter attached to the pipe.

Figure 4 shows the time evolution of the electric voltage  $V$  measured in the liquid GaInSn. The liquid flow in the channel starts at time  $t=0$  and ends at  $t=\Delta t$ . Clear  $V$  signals appear when Hg is flowing and the magnitude of  $V$  increases with increasing applied pressure.

We also derived the scaling law of the voltage:

$$(r_0/L)V \propto v_*^2,$$

where  $L$  is the pipe length,  $r_0$  is the pipe radius, and  $v^*$  is the friction velocity. The friction velocity dependence of the signal shows good agreement with the theoretical prediction as shown in Fig. 5.

### 3.Importance of the result and its impact

Our study proved that the electron spin interacts with the local rotational motion of liquid metal for the first time in the world and that liquid metal can be utilized for generating spin current. As mentioned at the beginning, we have taken the first step toward realizing an energy-saving device combining liquid metal and spin. In addition, this new phenomenon is

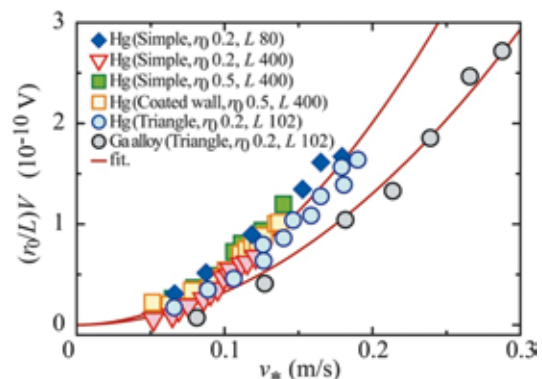


図5 管の形状、流速、電圧信号の関係。

Fig.5 Scaling law of the electric voltage.



た。従来の電子スピンの制御には固体物質が用いられてきましたが、電子スピン研究に液体金属が利用可能であることが分かりました。冒頭にも述べたとおり、液体金属とスピンを組み合わせた省エネルギーデバイス実現への第一歩を踏み出したと言えます。

また、液体金属流からスピン流を作り、最終的に電圧として観測されるこの新現象は、液体金属流体から電気エネルギーを取り出す新原理でもあります。従来の流体発電では、水流でタービンを回転させる水力発電や、磁石を使った磁気流体発電のように、タービンや磁石といった外部装置が必要でした。ところが、今回発見した手法では、電子スピンと流体渦運動との相互作用を利用するため、外部装置が必要なくなり、その結果、原理的には超小型化が可能です。本実験で得られた電気信号はせいぜい100ナノボルト程度と微弱ですが、超小型化できる利点を生かすことで、微弱な電力で駆動するナノロボットの電源装置としての応用が期待されます。

さらには、得られる電圧信号の強度が流体の速度分布に応じて変化するという性質を使うことで、マイクロスケールの微小な領域に発生する流体の速度を電氣的に観測する流体速度計の実現も期待されます。

#### 4. 今後の予定

今回私たちは、

(1) 渦運動という巨視的回転運動を使ってスピンという微視的な自転運動を制御できること

(2) 液体物質を使ってスピン流を生成できること

という2点について、理論と実験の両面から実証することに世界で初めて成功しました。今後は、上記2点それぞれについて、次のような発展を考えています。

まず(1)については、今回の「渦運動から電子スピンを制御する」という現象の逆過程に相当する、「電子スピンを流体に注入して、渦運動を駆動する」という新現象の発見を目指しています。図1に示したように、電子スピンは、永久に回転し続ける歯車とみなせます。この回転歯車の向きを揃えて液体金属に注入することで、この歯車によって液体金属が「かき混ぜられる」結果として、渦運動が生じると予想できます。この予想に基づき、現在理論と実験の両面から新現象の探索を行っています。

また(2)については、これまでのスピン流研究はすべて固体物質を対象にしていたため、液体金属におけるスピン流の性質はほとんど調べられていません。そこで、私たちは、どのような液体金属を使い、どのような条件を揃えることで、スピン流が高効率に生成できるのかを探る必要があります。そのために私たちは、様々な微細流路を設計し、そこで生成されるスピン流の性質を詳しく調べる予定です。

also a new principle of extracting electric energy from a liquid metal flow since the generated spin current is converted into the electric voltage. In conventional fluid power generation, eternal devices such as turbines in hydraulic power generation and magnets in magneto-hydrodynamic generation are indispensable. However, since our method utilizes the interaction between spin and fluid motion, it eliminates an external device and as a result, ultra miniaturization is possible in principle. Although the electric voltage obtained in our experiment is weak at most to 100 nano volts, it is expected that it can be applied as a power supply device of a nano robot derived with weak electric power.

Furthermore, it is possible to realize a fluid velocity meter that electrically measures the velocity of the micro fluids by using the property that the intensity of the voltage signal varies according to the velocity distribution of the fluid.

#### 4. Perspectives

In this study, we demonstrated the following two points:

(1) Controlling the microscopic rotational motion, "spin", using macroscopic rotational motion in a fluid,

(2) Generating spin current using liquid metal.

In the future, we will consider the following developments for each of the points.

For (1), we are trying to discover a reciprocal process of the spin-current generation, namely, a fluid motion driven by spin injection. As shown in Fig. 1, the electron spin can be regarded as a spinning gear. By injecting the spinning gears into a liquid metal, it is expected that vorticity will be generated as a result of "stirring a liquid metal" with the gears. Based on this, we are now searching for new phenomena from both theory and experiment.

With regard to (2), the properties of spin current in liquid metal have hardly been investigated so far since all previous studies were directed to solid-state materials. Therefore, we need to find out what kind of liquid metal is suitable and what conditions should be used for generating spin current with high efficiency. For this purpose, we plan to design various micro channels and investigate the nature of the spin current generated in them.

#### 参考文献 References

[1] S. Maekawa, S. O. Valenzuela, E. Saitoh, and T. Kimura, ed., "Spin Current", Oxford, 2012.

[2] R. Takahashi, M. Matsuo, M. Ono, K. Harii, H. Chudo, S. Okayasu, J. Ieda, S. Takahashi, S. Maekawa, and E. Saitoh, Nature Physics, **2**, 52 (2016).