

力学的物質・スピン制御研究グループの主な成果

Highlights of Research Group for Spin Manipulation and Material Design
by Combining Spintronics and High-Speed Rotation Technique

齊藤 英治 グループリーダー
Eiji Saitoh Group Leader



概要

本研究グループでは、力学的角運動量と原子核の角運動量を新たな相互変換角運動量としてスピントロニクスに取り込むことを目指した研究を遂行してきた。これまでに、核磁気共鳴法（NMR）を用いた力学的回転運動と核スピンの相互作用の検出や流体運動からのスピン流生成を示唆する実験結果の取得に成功した。

1. 研究の背景・経緯

スピントロニクスは次世代電子技術の有力候補であり、関連研究が盛んに行われている。スピントロニクスとは、電子の持つ電荷とスピンの自由度を利用して新しい機能性電子物性を創出するものである。スピントロニクスによる次世代電子技術の確立にはスピン流の効率的生成法と高精度制御法の開発が必要不可欠である。スピン流とは電子スピン角運動量の流れのことであるが、これまでのスピントロニクスでは、スピン流の生成・制御に、磁氣的角運動量および電磁場の角運動量との相互変換が用いられてきた。

本研究グループでは、スピン流の生成・制御に、力学的角運動量と原子核の角運動量を用いること、つまり、これらを新たな相互変換角運動量としてスピントロニクスに取り込むことを目指した研究を計画した。

研究は、量子物性理論グループとの強力な連携体制のもとで遂行することとした。具体的には、まず、現象を支配する力学的回転運動とミクロな角運動量の相互作用の理論的枠組みを構築し、実験環境の構築が可能なものから実験に着手し、実験のブラッシュアップを繰り返すスタイルで研究を遂行した。数年間の試行錯誤の結果、複数の実験において再現性の高い実験結果を成果としてまとめられる段階に到達した。

2. 研究の内容

これまでに、主としてNMRを用いた力学的回転運動と核スピンの相互作用の検出、流体運動からのスピン流生成を示唆する実験結果の取得に成功した。

まず、今期を代表する成果として、NMRを用いた力学的回転運動と核スピンの相互作用の検出について紹介する。

力学的角運動量と原子核の角運動量を新たな相互変換角運動量としてスピントロニクスに取り込むことを目指

Abstract

In our research group, a mechanical angular momentum and nuclear angular momentum are focused on as new angular momentum source interacting with spin currents. We have succeeded in detecting the interaction between a mechanical rotation and nuclear spins by using a spectroscopic method for the first time and getting experimental data that suggest the generating a spin current from a mechanical motion of a liquid.

1. Background

Spintronics is a subject of great current interest that will be essential in next-generation electronics. Spintronics exploits an electronic charge and spin simultaneously so as to produce novel function and electronic property devices. Efficient generation and a high precision controlling methods for spin currents are indispensable to realizing the spintronics devices. Spin current is a flow of an electronic angular momentum. So far, angular-momentum transfer from a magnetic angular momentum and an angular momentum of an electromagnetic field to spin currents have been established for generating and controlling spin currents.

In our research group, a mechanical angular momentum and nuclear angular momentum are focused on as new angular momentum source interacting with spin currents. We have carried out study collaborating with Condensed Matter Theory Group (Mori group). Specifically, for the first we have built a theoretical framework for analyzing the interaction between a mechanical rotation and a microscopic angular momentum governs these phenomena, after that we performed the experiment one by one and again and again brushing up the experimental configurations. After several years of research, finally, we have reached the study phase that we can get reproducible result for publication.

した研究を遂行するにあたり、我々は核スピンのバーネット効果の検出を試みた。バーネット効果とは、現象論的には回転によってバーネット磁場と呼ばれる有効磁場が発生し、これによって磁性体が磁化する現象である[1]。現在では、この回転による磁化の変化は電子スピン角運動量と回転の相互作用（スピン回転相互作用）を起源とすることが分かっており、この現象を用いたスピン流生成理論が提案されている[2]。

このバーネット磁場 B_{Ω} は試料とともに回転する座標系への回転座標変換から理論的に求められる。 B_{Ω} は回転の角速度 Ω に線形依存している。

$$B_{\Omega}=(2m/qg)\Omega$$

ここで、 m と q と g はそれぞれ、粒子の質量、電荷、 g 因子である。

NMRでバーネット磁場を測定するには、試料と同じ回転座標での計測を実現せねばならない。その理由は、もし試料と検出器に相対速度があると、相対速度によるNMRシフト(回転ドップラー効果)が生じてバーネット磁場によるNMRシフトを打ち消してしまうためである。我々は新たなNMR手法を開発してこれを克服し、バー

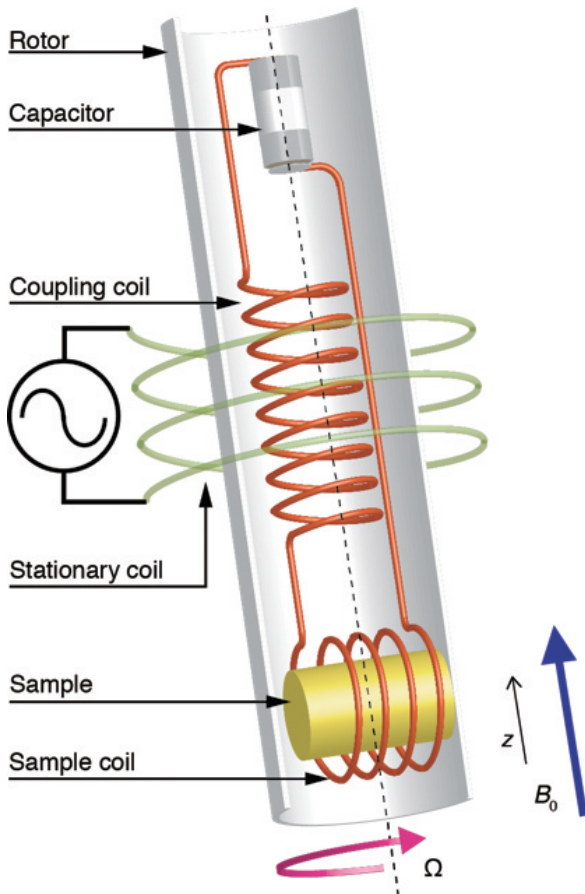


図1 実験アセンブリの模式図

Fig.1 An illustration of the experimental assembly

2. Contents of the study

We have succeeded in detecting the interaction between a mechanical rotation and nuclear spins by using a spectroscopic method for the first time and getting experimental data that suggest the generating a spin current from a mechanical motion of a liquid.

We would like to introduce main two results. The first is the detection of the interaction between a mechanical rotation and nuclear spins by using a spectroscopic method. In this study, we have tried to observe Barnett effect in solids by nuclear magnetic resonance. The Barnett effect is known as the magnetization of magnetic body by rotation, it implies that an effective magnetic field arises in a rotating body [1]. The change of magnetization by rotation originates in the interaction between electron spin angular momentum and rotation so that called spin-rotation coupling, and the Barnett effect has lately attracted attention again as a theory of spin current generation using Barnett effect had proposed [2]. The emergent field B_{Ω} , called Barnett field, can be derived theoretically from rotational coordinate transformation into the body-fixed frame. B_{Ω} acting on a particle is linearly depends on the angular velocity of rotation Ω :

$$B_{\Omega}=(2m/qg)\Omega$$

where m , q , and g are mass, charge and g -factor of the particle.

To measure the Barnett field by nuclear magnetic resonance (NMR) method, the detection has to be done on the rotating frame same as the body. The reason for this is that, if there are relative velocity between the signal detector and the body (signal emitter), an extrinsic NMR frequency shift arises from the relative velocity (rotational Doppler effect). To overcome the difficulty, we developed a new detection method in NMR, and directly measured the Barnett field [3]. The detection on the rotating frame was realized by the newly developed tuning circuit that consists of a sample and detection coil both installed in the same rotor.

Figure 1 shows the schematic illustration of the experimental assembly. The assembly comprises two components: the stationary coil placed along external field B_0 and connected to an NMR spectrometer, and a high-speed rotor consisting of a cylindrical capsule in which a specially arranged tuning circuit is installed. This circuit is composed of two small coils placed perpendicularly and connected in series, and a small capacitor. One of the two coils is arranged parallel to

ネット磁場の直接測定に成功した[3]。回転座標系での測定は同じ回転子の中に組み込んだ試料と新たに開発した検出コイルからなる同調回路で実現できた。

図1は実験アセンブリの模式図である。このアセンブリは大別して2つの構成要素からなっている。一つはNMRスペクトロメーターに繋がれて外部磁場 B_0 に沿って配置されている静置コイル(stationary coil)、もう片方は特異な配置を持つ同調回路が組み込まれた円筒状の高速回転子(rotor)である。この回路には小さなコンデンサ(capacitor)に直列接続され、かつ互いが直行する2つの小コイルが組み込まれている。片方の結合コイル(coupling coil)は静置コイル内に平行に配置されるようになっており、非接触ながら同調回路と静置コイル間の相互インダクタンスによる電気的な結合が成立している。もう片方の試料コイル(sample coil)は内部に試料を内包している。結合コイル内のRF場は試料コイルに転送され、NMR信号を誘導する周期的なRF場が試料コイル内に生じる。この仕様とすることで、試料コイルは試料と全く同じ回転速度で回すことができる。回転子は静置コイル内部に配置したまま、測定しながら $|\Omega/2\pi|=10\text{kHz}$ までの高速回転が可能である。

図2-Aは、InPを対象とした測定実験で得られた ^{115}In

the stationary coil to establish a coupling by a mutual inductance between the tuning circuit and the stationary coil (coupling coil). The other, the sample coil, holds a sample inside. The RF field in the coupling coil is transmitted to the sample coil and generates an oscillating RF field to induce an NMR signal. Under this configuration, the sample coil rotates at exactly the same angular velocity as the sample. The rotor is put inside the stationary coil and, during measurements, it is rotated up to $|\Omega/2\pi|=10\text{kHz}$.

In Fig. 2, we plot the ^{115}In NMR spectra at various values of the angular velocity Ω . Clearly, the NMR frequency increases linearly with Ω . Furthermore, by reversing the rotation direction, the direction of the NMR shift is also reversed; thus, the sign of B_Ω is reversed. The sign of the g-factor of ^{115}In is known to be positive; that is, the nuclear magnetic moment is parallel to its angular momentum. For the next, we measured the shifts for nuclei with negative g-factors. From the NMR spectra for ^{29}Si having negative g-factor, the direction of the NMR shift is clearly opposite to that for ^{115}In , indicating that the emergent Barnett field is opposite

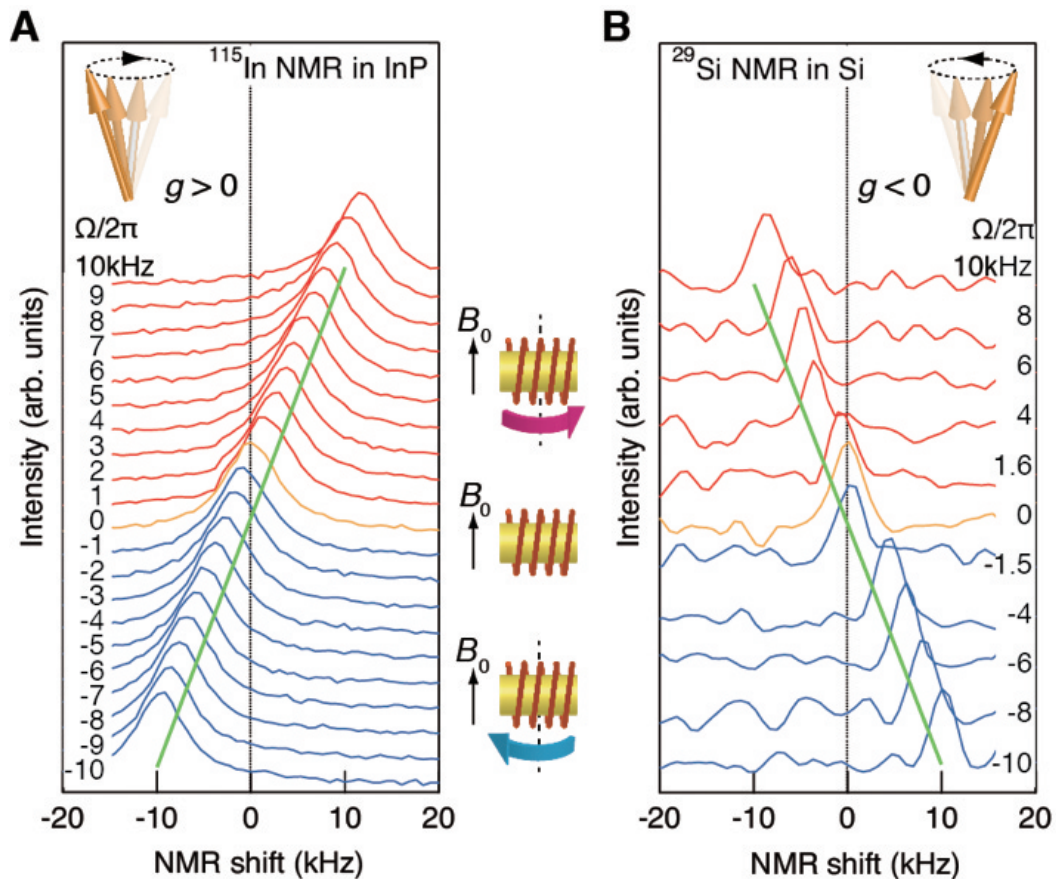


図2 正と負のg因子におけるNMRスペクトルの回転速度依存性

A) ^{115}In の場合、B) ^{29}Si の場合

Fig.2 NMR spectra for positive and negative g-factors

Spectra for (A) ^{115}In and (B) ^{29}Si NMR obtained at various angular velocities.

のNMRスペクトルを角速度 Ω でプロットしたものである。NMR周波数は Ω に対して線形的に比例して増加している。また、回転方向を逆転するとNMRシフトが逆方向、すなわち、 B_0 の向きが反転している。この ^{115}In のg因子は正、すなわち、核磁気モーメントは角運動量に平行であることが知られている。

加えて、我々は、負のg因子を持つ核種で測定を行った。図2-Bは、 ^{29}Si を対象とした測定実験で得られた ^{29}Si のNMRスペクトルを角速度 Ω でプロットしたものである。負のg因子を持つ ^{29}Si では回転方向に対するNMRシフトが ^{115}In の場合と逆転している。これは、バーネット磁場の発生方向が ^{115}In と真逆であること意味している。図3は、様々な核種の回転速度に対するNMRシフトを示したものである。すべてのサンプルのNMRシフトが Ω と比例関係にある。 ^7Li , ^{19}F , ^{23}Na と先に紹介した ^{115}In のg因子は正、 ^{119}Sn と先に紹介した ^{29}Si のg因子は負であるが、正のg因子の試料のNMRシフトは Ω に対してすべて正の傾き、負のg因子の試料はすべて負の傾きを持っている。

これらの結果は、原子核が外部磁場 B_0 以外の付加的な磁場を感じていることを意味しており、これがバーネット磁場の存在の直接的な証拠である。以上のとおり、我々はNMRを用いて原子核のバーネット磁場の直接測定に成功した。この結果は、力学的回転運動で核スピンを制御できることを意味する。

続いて、流体運動からのスピンの流生成実験について簡単に紹介する。この実験は理論グループとの共同研究に於けるスピンの流生成の理論予測に基づいて行なったものである。流体において、ストークス流れで生じるような渦度勾配が生じるならば、その力学運動から生じたスピンの流が流体に接する薄膜へと流れると我々は予測した。大きな渦度勾配が生じることが期待できる実験系として、エアブラシで流体をプラチナ薄膜に吹き付ける方法を検討し、逆スピンホール効果を測定することで、スピンの流発生信号の検出を試みた。図3は液体金属を用いた実験での逆スピンホール効果の検出電圧の変化を示したものである。プラチナ膜に流体を吹き付け始めると同時に電圧が生じ、流体を流す向きでその発生方向が変わっている。流体を流す向きと電圧の発生方向の相関は理論予測に一致している。様々な条件での再現実験を行ない、熱、圧力、摩擦等による起電力ではないことを確認したうえで、再設計した定量評価が可能な実験系で得た結果について、本原稿執筆現在、論文投稿中である。

3. 成果の意義と波及効果

NMRを用いた力学的回転運動と核スピンの相互作用の検出に世界で初めて成功し、力学的角運動量と原子核の角運動量を新たな相互変換角運動量としてスピントロニクスに取り込める可能性を示した。また、流体の渦運動とそこで生じる局所的なバーネット効果に着目したスピンの流生成理論を支持する実験結果を得た。上記のように、スピンの流駆動モーターや、スピンの流生成機の実現を

in direction to that for ^{115}In . In Fig. 3, we collected the NMR shifts for various nuclei as a function of rotation speed. In each sample, the NMR shift exhibits linear dependence on Ω . The g-factor for ^7Li , ^{19}F , ^{23}Na , and ^{115}In are known to be positive, while those for ^{29}Si and ^{119}Sn are negative. All the nuclei with positive g-factor display positive slopes, while all the nuclei with negative g-factors display a negative slope. These results mean that the nuclei feel additional magnetic field to the external field. It is a direct evidence for the existence of Barnett field. Thus, we have proved the interaction between a mechanical rotation and nuclear spins by NMR. This result shows the possibility of applying the interaction into spintronics as new angular momentum source interacting with spin currents.

We also carried out a spin injection experiment using a fluid motion, which is an experiment based on a theoretical prediction that is a collaboration with Condensed Matter Theory Group (Mori group). We have predicted that spin currents are injected from a mechanical motion of a fluid into a film attached to the fluid if it has vorticity gradient, e.g. it is yielded in Stokes flows. We have developed a method in which large vorticity can be yielded in a fluid using a gas actuator on a Pt thin film that is put on a substrate. By using this method, we have observed spin current signals in the thin film by using the inverse spin-Hall effect (ISHE). Figure 3 shows the alteration of voltage in the

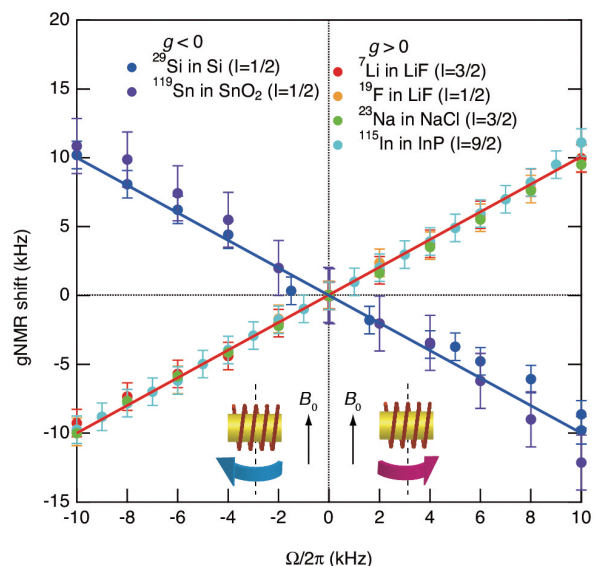


図3 回転数に対するNMRシフトの普遍的な振る舞い
縦軸のNMRシフトは $\Omega = 0$ における中心周波数を基準としている。

Fig.3 Universal behavior of NMR shifts as a function of the angular velocity Ω
Vertical axis represents NMR shifts; its origin is determined by the center frequency at $\Omega = 0$.

視野に入れた“スピメカトロニクス”の第一歩を踏み出し、スピメカトロニクス研究の波及をもたらす研究開発の指標を示した意義は大きい。上記の基本原理に基づき、例えばスピ流生成機やスピ流モーターとしてスピメカトロニクスは実現されるであろう。

4. 今後の予定

NMRを用いた力学的回転運動と核スピンの相互作用の検出では、力学回転との相互作用ならではの核スピン情報を取り出せる可能性があるため、核物理の専門家と連携してその可能性を追求したい。また、開発した測定手法の変更で、ベリー位相や回転ドップラー効果のようなスピンの回転運動に伴う物理現象も観測可能であることが分かってきたためこれにも取り組む。

流体運動を制御したスピ流生成実験では、MEMS技術を駆使して、現象論以上へと現象の理解を深めて行く計画である。また、スピ流を注入して物体を駆動させるといった逆効果の観測実験を計画している。

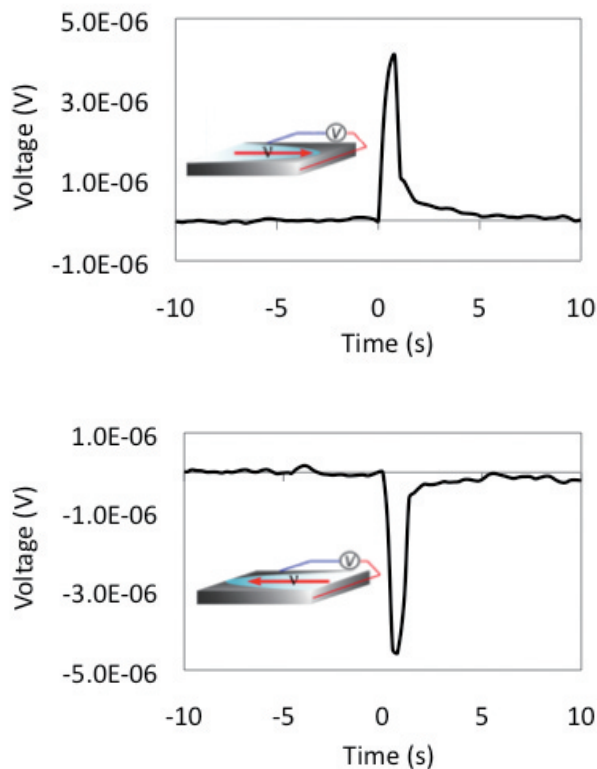


図3 液体金属吹き付けによるスピ流注入試行実験で得られた電圧変化

Fig.3 Alteration of voltage in the fluid spin injection experiment using a liquid metal

fluid spin injection experiment using a liquid metal. The voltage appears when a liquid metal flows on the Pt thin film pattern on a substrate and the polarity of the voltage changes with the direction of the flows. The correlation between the flow direction and the polarity is consistent with the above prediction and ISHE. The experimental results using experimental setup for qualitative measurement is under peer review now.

3. Importance of the result and its impact

We have proved the interaction between a mechanical rotation and nuclear spins by NMR. This result shows the possibility of applying the interaction into spintronics as new angular momentum source interacting with spin currents.

We have got experimental data that support a theoretical prediction for spin injection using a fluid motion. Thus, we have tried to take a first step to realize a new concept “spinmechatronics”, and we have shown the preliminary result that give an indication of research and development. Our approach is very significant in point of view to progress the base science and technology. Spinmechatronics will be realized, for instance, a spin-current dynamo or a spin-current motor based on the above principle.

4. Perspectives

There is a possibility that we can get information in nuclear spin by the developed experimental setup for observation of the interaction between a mechanical rotation and nuclear spins by NMR. We will do the experiment to observe it by collaborative study with nuclear physicists. We will do the experiment to measure Berry phase or rotational Doppler effect by using developed experimental setup because it can be used for the experiment with small change of the specification.

For a spin injection experiment, we will apply MEMS for a spin injection experiment using a fluid motion to explore the mechanism. We also design the experiment to measure the inverse effect.

参考文献 References

- [1] S. J. Barnett, Phys. Rev. 6, 239 (1915).
- [2] M. Matsuo, *et al.*, Phys. Rev. Lett. 106 (2011), 076601.
- [3] H. Chudo *et al.*, Appl. Phys. Express 7, 063004 (2014).