

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 10 日現在

機関番号：82110

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2015

課題番号：25800209

研究課題名(和文)核磁気共鳴法を用いたスピンの生成とスピンの伝導、生成機構の解明

研究課題名(英文)Generation and elucidation of spin current by NMR

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 先端基礎研究センター・副主任研究員

研究者番号：30455282

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：回転する物体中の粒子には磁場が生じることが予言されている。この磁場をバーネット磁場という。我々は核磁気共鳴法をもちいて固体中に生じたバーネット磁場を測定することに成功した。われわれは試料とNMR検出コイルを同じ早さで回転させることによって、核磁気モーメントの符号を反映したNMRシフトが生じることを見いだした。この結果はバーネット磁場の直接的証拠である。NMRを用いたバーネット磁場の測定は未知の核磁気モーメントの符号を決定できる。

研究成果の概要(英文)：A magnetic field is predicted to emerge on a particle in a rotating object. This emergent field is called a "Barnett field". We show that nuclear magnetic resonance (NMR) enables a direct measurement of the Barnett field in solids. We rotated both a sample and a NMR coil synchronously at high speed and found an NMR shift whose sign reflects the sign of the nuclear magnetic moments. The result provides direct evidence of the Barnett field. NMR for the Barnett field enables the unknown signs of nuclear magnetic moments in solids to be determined.

研究分野：スピントロニクス

キーワード：核磁気共鳴 バーネット効果

1. 研究開始当初の背景

スピントロニクスでは電子の磁気分極した流れであるスピン流が中心的役割を果たしている。近年ではスピン流生成の手法としてとして光、磁化、熱等を利用した様々な方法が開発されている。これらの方法の中心原理は光や磁化が持つ角運動量と伝導電子スピンの持つ角運動量との相互変換である。我々の研究グループでは、今までスピントロニクスに用いられることのなかった角運動量源として物質内部の核スピンと物質そのものの力学的な回転運動の角運動量に着目し、これら新規な角運動量源からのスピン流生成をめざしている。

スピン流生成法としてスピンプンピングが知られている。これは金属と強磁性体の二層薄膜構造に対してマイクロ波を照射し、強磁性層の強磁性共鳴 (FMR) によって電子の磁気モーメントを歳差運動し、金属層にスピン流を生成する方法である。これを応用し、当初計画では核磁気共鳴 (NMR) によって誘起される核スピンの歳差運動を利用し、スピン流を生成する計画であったが、これとは平行に磁化の回転運動によるスピン流生成を、より包括的に理解するために空間の回転運動におけるスピン系のダイナミクスの研究を行っていた過程で当初予期せぬ進展があった。[雑誌論文③, ④, ⑤]

2. 研究の目的

回転系におけるスピン系は量子相対論により厳密に定式化され、そこから導出されるスピン-ローテーションカップリング ($\mathbf{S} \cdot \boldsymbol{\Omega}$) が主要な働きをする。ここで、 \mathbf{S} はスピン、 $\boldsymbol{\Omega}$ は回転の角速度を表す。この相互作用は古典的には $\mathbf{L} \cdot \boldsymbol{\Omega}$ で表され (\mathbf{L} は角運動量)、回転座標系で角運動量に働くコリオリ力に対応する。また、この相互作用は有限の磁気回転比 (γ) を持つ、すなわち、磁気モーメントを有する粒子に対しては有効磁場として働く。強磁性体を回転させることによって磁化を生じさせるバーネット効果は、この有効磁場を起源としている。この有効磁場をバーネット磁場と呼ぶ。

バーネット磁場は1粒子のスピンに作用する有効磁場であるため、強磁性体以外でも回転によって磁化は変化する。我々のグループでは常磁性状態の Gd 単体において、回転によって生じる常磁性磁化の変化を観測することに成功している[雑誌論文②]。核スピン系はスピン間の相互作用が電子系と比較して弱く、典型的な常磁性状態と考えられる。バーネット効果の本質が1粒子に働く有効磁場であることを考えると、核スピン系においてもバーネット効果は起こり得る。ここでバーネット磁場による核磁化の変化を評価すると、常磁性帯磁率は磁気回転比の2乗に比例し、バーネット磁場は磁気回転比の1乗に

反比例するため、バーネット磁場による磁化の変化は磁気回転比の1乗に比例する。このため、核スピンの磁気回転比の大きさは電子の磁気回転比と比較して 1/10,000 程度と非常に小さいので、回転による核スピン系の磁化の変化は非常に小さくなり測定が難しい。しかしながら、バーネット磁場は磁気回転比に反比例するため、核スピンに作用するバーネット磁場の大きさは電子系よりも大きくなる。このため、核スピン系においてバーネット効果を測定する場合には磁化の変化を測定するよりも、バーネット磁場そのものを測定したほうが容易である。NMR は核スピンに働く磁場を高精度で測る測定手法であるため、我々は NMR を用いて回転によって生じるバーネット磁場を観測することとした。

3. 研究の方法

バーネット磁場は回転する物体に働く有効磁場であるため、回転する物体と同じ座標系で測定する必要がある。このことは、コリオリ力を観測するためには回転座標系上で観測する必要があることと同様である。これを実現するために、NMR の信号検出器と試料と同時に回転させる方法を新規開発した (図 1)。

通常の NMR 測定で用いる信号検出部分は容量可変コンデンサーとコイルから構成される共振回路である。このコイル部分に測定試料を挿入し、コイルにラジオ波を生じさせることで試料内部の核スピン系を励起する仕組みである。本研究ではこのコイルに高速回転が可能な回転子と信号検出用の共振回路を新たに挿入する。

回転子内部の共振回路は、固定容量チップコンデンサーと二つのコイルで構成する。二つのコイルはそれぞれ相互誘導用のコイル (誘導コイル) と試料を励起するためのコイル (試料コイル) であり、誘導コイルは回転軸と平行に、試料コイルは回転軸と垂直に配置する。この共振回路の共振周波数は、チップコンデンサーの容量を調整することで測定周波数に同調する。誘導コイルと試料コイルのインダクタンスにもよるが、コンデンサーの容量が 100pF 程度で共振周波数は数十 MHz となる。通常の NMR 装置におけるコイルは、ここでは回転共振回路にラジオ波を誘導するためのコイルとして用いる。ここではこのコイルを静止コイルと呼ぶ。静止コイルと誘導コイルは電磁的に結合するよう、同心円状に重なるように位置を調整する。

NMR スペクトロメーターから送られてきたラジオ波は静止コイルと誘導コイル部分の電磁的結合を通じて内部の共振回路に誘導され、試料コイルに振動磁場を生じ、試料内部の核スピン系を励起する。核スピン系から生じるラジオ波は、誘導コイルから静止コイルに送られ、NMR スペクトロメーターに

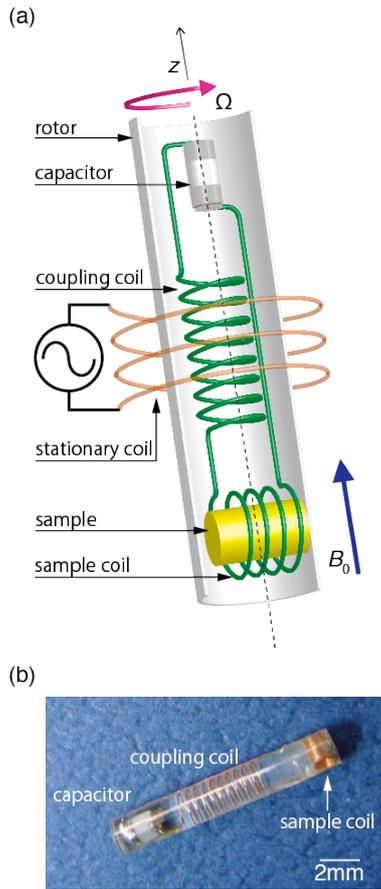


図 1 共振回路のイラスト (a) と実際に使用した物の写真 (b)。

送られる仕組みになっている。誘導コイルと静止コイルは機械的に切り離されているため、試料と共振回路の高速回転が可能となっている。

図 1 (b) に実際に測定に用いた回転共振回路を示す。回転共振回路は遠心力によって破壊されることを防ぐために、回転共振回路全体をエポキシ樹脂 (Stycast 1266) に埋め込んである。エポキシ樹脂の形状は外径 2.2mm、長さ 13mm の円筒形である。試料空間は内径 1mm、長さ 1.5mm である。外径 0.05~0.1mm 程度の銅エナメル線を用いてコイルを作成し、誘導コイルは内径 1mm で 10 巻程度、試料コイルは内径 1mm で 20 巻程度である。

外部磁場 B_0 は回転軸と平行に印加する。これにより励起用コイルは外部磁場に対して垂直方向になるため、核スピンを励起できる配置になっている。回転によって生じるバーネット磁場は回転軸と平行または反平行であるため、核が感じる内部磁場 B_n は、 $B_n = B_0 + B_\Omega$ となる。回転数を変化させると B_Ω が変化するので、NMR 共鳴線のシフトが観測されるのである。

4. 研究成果

図 2 (a) に InP における ^{115}In の、(b) に Si 単体における ^{29}Si の NMR スペクトルの回転数および回転方向依存性を示す。核磁気モーメントの符号が正の ^{115}In の場合 (図 2(a))、回転数に比例して NMR 共鳴線のシフトは増大する。また、磁場の方向に対して逆方向に回転させた場合、共鳴線は逆方向にシフトする。このことは、回転方向を反転することによってバーネット磁場の向きが反転したことを示している。さらに図 2 (b) に核磁気モーメントの符号が負である ^{29}Si を用いた実験結果を示す。回転に対する NMR 共鳴線のシフトの応答は、核磁気モーメントの符号が正の ^{115}In とは逆向きになる。このことは、バーネット磁場の符号が核磁気モーメントの符号にも依存していることを示している。

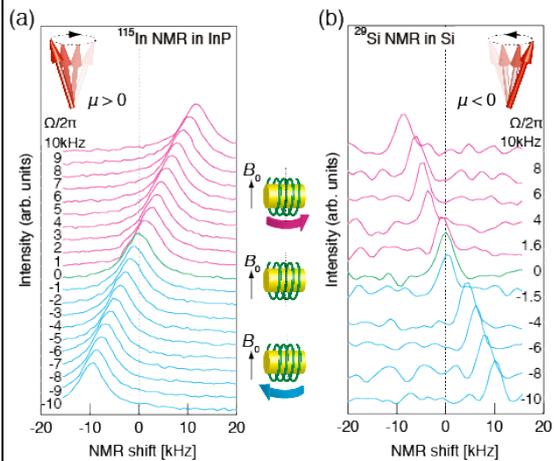


図 2 (a) InP 中の ^{115}In 、(b) Si 単体中の ^{29}Si の NMR シフトの回転数依存性を示す。両図とも、横軸の原点は回転数 0Hz における NMR 共鳴線の中心周波数で決めている。

図 3 に様々な核種を用いて測定した回転に対する NMR 共鳴線のシフトを示す。すべての核種において共鳴線のシフトは回転数に比例し、シフトの絶対値は回転数とほぼ同じである。正の核磁気モーメントを持つ核種 (^7Li 、 ^{19}F 、 ^{23}Na 、 ^{115}In) では傾きは 1 であるのに対して、負の核磁気モーメントを持つ核種 (^{29}Si 、 ^{119}Sn) では傾きは -1 である。

核スピンを舞台に、力学的回転運動とスピンの相互作用を、NMR 測定法を用いて研究した。回転している物体中のスピンは慣性力が作用する。この慣性力は磁気モーメントに対しては有効磁場として振る舞い、この有効磁場を観測するためには、観測座標系を物質と同じ回転座標系に取る必要があった。新規に高速回転が可能な共振回路を考案することにより、回転座標系における観測を可

能とし、バーネット磁場の観測に成功した。また、ここで述べたバーネット効果以外にも、核スピン系におけるベリー位相の蓄積を NMR や核四重極共鳴 (NQR) を用いて検出に成功しており、現在論文を執筆中である。

本研究では核スピン系に対して力学回転の効果を見てきたが、ここで得られた知見は電子スピン系の力学回転効果を考える上でも有用である。本研究で得た知見を基礎として、我々の研究グループによって、流体中の局所回転運動からスピン流を生成することに成功している[雑誌論文①]。その中心原理はスピンに働く慣性力、スピン回転相互作用であり、その慣性力そのものを観測するためには観測対象とするスピンと同じ座標系から現象を観測する必要がある。

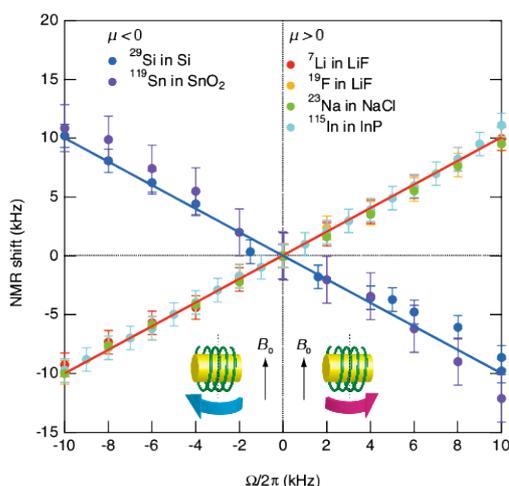


図 3 様々な核種における NMR シフトの回転に対する応答。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 8 件)

① 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). DOI: 10.1038/nphys3526 査読有

② M. Ono, H. Chudo, K. Harii, S. Okayasu, M. Matsuo, J. Ieda, R. Takahashi, S. Maekawa, and E. Saitoh “Barnett effect in paramagnetic states” *Phys. Rev. B* **92** 174424(1-4) (2015). DOI: 10.1103/PhysRevB.92.174424 査読有

③ K. Harii, H. Chudo, M. Ono and M. Matsuo, J. Ieda, S. Okayasu, S. Maekawa, and E. Saitoh

“Line Splitting by Mechanical Rotation in Nuclear Magnetic Resonance” *Jpn. J. Appl. Phys.* **54** 050302(1-3) (2015). DOI: 10.7567/JJAP.54.050302 査読有

④ H. Chudo, K. Harii, M. Matsuo, J. Ieda, M. Ono, S. Maekawa. and E. Saitoh “Rotational Doppler effect and Barnett field in spinning NMR” *J. Phys. Soc. Jpn.* **84** 043601(1-4) (2015). DOI: 10.7566/JPSJ.84.043601 査読有

⑤ H. Chudo, M. Ono, K. Harii, M. Matsuo, J. Ieda, R. Haruki, S. Okayasu, S. Maekawa, H. Yasuoka, and E. Saitoh “Observation of Barnett Fields in Solids by Nuclear Magnetic Resonance” *Appl. Phys. Express* **7** 063004(1-4) (2014). DOI: 10.7567/APEX.7.063004 査読有

[学会発表] (計 23 件)
登壇のみ記載

① 中堂博之、松尾衛、針井一哉、家田純一、前川禎通、齊藤英治
“核四重極共鳴法におけるベリー位相”
日本物理学会 第 71 回年次大会, 東北学院大学 (宮城県仙台市), 2016 年 3 月 20 日

② H. Chudo
“Barnett field observed by NMR and NQR”
Asia-Pacific Workshop (APW) – CEMS Joint Workshop, RIKEN(Wako, Saitama) Jan. 25 (2016).

③ 中堂博之、針井一哉、松尾衛、家田純一、前川禎通、齊藤英治
“Barnett field observed by spinning NQR”
新学術領域スピン変換科学年次報告会, 東北大学 (宮城県仙台市), 2016 年 1 月 7 日

④ 中堂博之、松尾衛、針井一哉、家田純一、前川禎通、齊藤英治
“NQR 測定法を用いたバーネット効果と回転ドップラー効果の観測”
日本物理学会 2015 年秋季大会, 関西大学 (大阪府吹田市), 2015 年 9 月 17 日

⑤ H. Chudo
“Spin rotation effects observed by NMR/NQR –Barnett effect, Rotation Doppler effect, and Berry phase”
Gordon Research Conference, Spin Dynamics in Nanostructures, Hong Kong, China, Jul. 27 (2015).

⑥ 中堂博之、小野正雄、針井一哉、松尾衛、
家田純一、春木理恵、岡安悟、安岡弘志、前
川禎通、齊藤英治

“核磁気共鳴法によるバーネット効果の観
測”

第 75 回応用物理学会秋季学術講演会，北海
道大学（北海道札幌市），
2014 年 9 月 20 日

⑦ 中堂博之、小野正雄、針井一哉、松尾衛、
家田純一、安岡弘志、前川禎通、齊藤英治

“NMR/NQR 測定法を用いたバーネット効
果と回転ドップラー効果の観測”

日本物理学会 2014 年秋季大会，中部大学
（愛知県春日井市）2014 年 9 月 10 日

⑧ H. Chudo, M. Ono, K. Harii, R. Haruki,
S. Okayasu, M. Matsuo, J. Ieda, S.
Maekawa, H. Yasuoka, and E. Saitoh

“Direct observation of Barnett field by
spinning nuclear magnetic resonance”

Spin Mechanics 2, Tohoku University
(Sendai, Miyagi) Jun. 21 (2014).

⑨ 中堂博之、小野正雄、針井一哉、松尾衛、
家田純一、春木理恵、岡安悟、安岡弘志、前
川禎通、齊藤英治

“核磁気共鳴法によるバーネット効果の観
測”

日本物理学会 第 69 回年次大会，東海大学
（神奈川県平塚市），2014 年 3 月 28 日

6. 研究組織

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 先端基礎研究セン
ター・副主任研究員

研究者番号：30455282