

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 8 月 9 日現在

機関番号：82110

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26247063

研究課題名(和文) スピンベリー位相が導く新しいスピン利用技術の開拓

研究課題名(英文) Development of new spin utilization technology led by Spin Berry Phase

## 研究代表者

前川 禎通 (Maekawa, Sadamichi)

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・センター長

研究者番号：60005973

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 26,000,000円

研究成果の概要(和文)：スピンベリー位相を利用した新規な電圧生成方法の理論的探索と、回転系における核スピンに蓄積されるスピンベリー位相の核磁気共鳴法による観測を行う。バブル磁区の集団運動によってスピン起電力が増強することを数値計算で示し、反強磁性体においても磁壁の駆動により電圧生成が可能であることを理論的に示した。核スピン系においては回転によって誘起される有効磁場(バーネット磁場)を観測することに成功し、ベリー位相とバーネット磁場のクロスオーバーを観測することにも成功した。

研究成果の概要(英文)：We performed theoretical researches of novel voltage generation methods using the spin Berry phase and observation of the spin Berry phase accumulation in the nuclear spin system on the rotating frame by the nuclear magnetic resonance method. We show that the spinmotive force is enhanced by collective motion of bubble magnetic domains using numerical calculation, and show theoretically that spinmotive force is also generated by domain wall motion in antiferromagnets. In the nuclear spin system we observed the effective magnetic field induced by rotation (Barnett field) and crossover behavior between the Berry phase and the Barnett field.

研究分野：スピントロニクス

キーワード：スピンベリー位相 スピン起電力 磁壁 回転系 バーネット効果 核磁気共鳴 国際共同研究

## 1. 研究開始当初の背景

電気回路を貫く磁束が時間変化すると起電力が発生する。ファラデーが 1831 年に発見したこの電磁誘導の法則により、モーター、発電機等が生まれ、人類は電気を自由に使うことができるようになった。1984 年に磁束が電子の波動関数の位相（ベリー位相）と関係づけられ、電磁誘導の法則の量子力学的解釈が与えられた。研究代表者らは、この概念を電子のスピン自由度を含む形に拡張し、2007 年に強磁性金属ではスピンの付随するベリー位相の時間変化が起電力を発生する現象「スピン起電力」を理論的に提唱し、以後実験グループとの共同研究で実証してきた。

このスピン起電力の発見は、スピン流（電子のスピン角運動量の流れ）の生成と制御を通じて次世代エレクトロニクス技術の創出をはかる「スピントロニクス」における新概念と位置づけられる。これまでスピントロニクスでは、1987 年の巨大磁気抵抗効果や 1996 年のスピン移行トルクといった新原理の発見に基づく新しいメモリ、磁気ヘッド、磁気センサーなど、既存のエレクトロニクス素子の高性能化を主眼とした応用とそれに資する基礎的研究が追及されてきた。これらはまた、究極的な「省エネルギー」技術の有力候補として広く認知されるようになってきている。これに加えスピン起電力は、磁気・電気エネルギー相互変換の新原理を提供し、ナノ磁性体を用いたエネルギーハーベスティングなどスピントロニクスに「創エネルギー」の基本概念を導入するものであり、当該分野の今後の発展に大きなパラダイムシフトをもたらす可能性を有している

## 2. 研究の目的

代表者らは共同研究者とともに、スピン起電力の基礎学理建設を行ってきた。その基礎となる概念が、スピンに付随するベリー位相である。本研究では、理論と実験の両面から物質中の様々なスピンベリー位相の働きに着目し、スピン起電力の研究をより広範囲に展開するとともに、核子のスピン自由度をその対象に含める。本研究の遂行により、当該分野に新基軸を打ち立て、世界に先駆けてスピンベリー位相を介した新しいスピン利用技術の基礎を築く。

## 3. 研究の方法

スピンベリー位相は、スピン系のハミルトニアン  $H_{\text{spin}}$  が時間変化するパラメータ  $R(t)$  に依存する場合に有効となる（図 1）。電子スピンに関しては、強磁性体の磁化と電子スピンの s-d 交換相互作用 (s-d int.) ハミルトニアンがそれに対応し、磁化  $M(t)$  のダイナミクスがスピンベリー位相をもたらす [ $R(t)=M(t)$ ]。一方、核子のスピンに関して

は、加速系におけるスピン・回転結合 (SR coup.) ハミルトニアンがその役割を果たし、実空間の座標系  $x(t)$  そのものが時間依存するパラメータとなる [ $R(t)=x(t)$ ]。

以上を踏まえ、次の 2 つの課題をターゲットとして掲げ、物質中のスピンベリー位相現象の一般原理解明を目指す。

(1) 複合強磁性ナノ構造体によるスピン起電力の出力増幅機構の探索

(2) 核子系におけるスピンベリー位相を用いたスピン制御技術の確立

(1) の課題では、電子スピンに関するこれまでの知見をベースとし、スピンベリー位相をもたらすスピン起電力の出力電圧の増大を目的とした研究を理論主導で実施する。一方、(2) の課題では、核スピンに関して当研究組織で進めてきた物体の力学運動に由来するスピン有効場の効果に関する研究を理論・実験の共同により精密化し、理論予測を実証するための力学回転系における核磁気共鳴測定システムを構築する。また、電子スピンと核スピンは超微細相互作用 (HF int.) により互いに結びついており、最終的にはこのチャンネルを介した両者の統合を

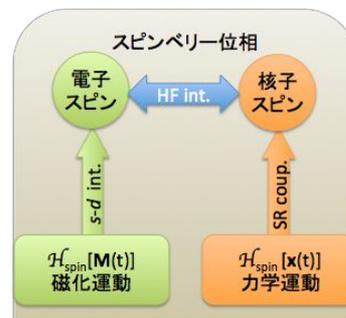


図 1 電子系と核子系のスピンベリー位相狙う。

## 4. 研究成果

(1) スピン起電力

磁気バブル格子によるスピン起電力

[主要雑誌論文リスト]

スピン起電力は、強磁性体において空間的に非一様な磁化構造が時間的に変動する状況で発現する。その典型例が磁場印加による磁壁（磁区の境界）の運動であり、局在磁化の向きが時間・空間双方に依存するためスピン起電力が生じる。実験グループとの共同研究により、パーマロイ細線における磁壁移動とそれに伴うスピン起電力信号の詳細な検討を行い [Phys. Rev. Lett. **108**, 147202 (2012)]、単一の磁壁運動によるスピン起電力に関しては理論解析手法を確立している。一方、磁性細線において単純に複数の磁壁を用意しただけではスピン起電力の相殺が生じてしまい、出力電圧の増大には不向きなことを事前に行った理論解析により突き止めている。

そこで、本研究では図 2 のようなバブル磁

区の系を考える。Gd-Co 等実際の磁性薄膜ではこのバブルが格子状に多数配列されており、磁場勾配により集団運動する。この場合、

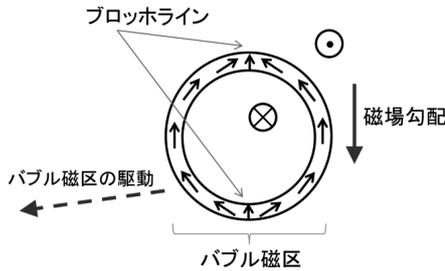


図2 バブル磁区の模式図。

個々のバブルの運動によるスピンの起電力は積算される。また、磁気バブルを用いることで、「磁場勾配」が電圧（スピン起電力）を生成することを明らかにした。

発生する電圧の特徴としては、(1)磁化と伝導電子スピンの相互作用における断熱過程と非断熱過程の寄与がバブル配列の運動方向に対しそれぞれ垂直方向と水平方向に分離される。また、(2)バブルの数に比例して出力電圧の値も増加する。これらの事実に基づき、電流駆動磁化ダイナミクスの非断熱性を記述する現象論的パラメータ  $n$  の値を直接測定する手段を与えた。同パラメータの決定には、これまでナノ細線中の電流誘起磁壁移動の解析などが実施されているが、ギルバート緩和定数  $\alpha$  との比  $(n/\alpha)$  や差  $(n - \alpha)$  の形で与えられるなど、他の実験パラメータから独立に求めることは一般に困難であった。磁気バブルによるスピン起電力の磁場勾配方向依存性を解析することで、

さらにスピン偏極率  $P$  の値も電圧測定から読み取ることができる。この手法を用いれば、近年応用上の観点からも注目が集まっている垂直磁化膜における重要な物質パラメータを個別に決定することができる。

本研究は、ドイツマインツ大学との国際共同研究成果である。

### 反強磁性体によるスピン起電力生成

[主要雑誌論文リスト]

近年、反強磁性体を舞台としたスピントロニクス現象に注目が集まっている。特に、反強磁性ダイナミクスの電氣的制御と検出という観点から、スピントルクやスピン起電力など、これまで強磁性体において確立し主要な役割を担っていた概念の再検討が重要な課題となる。理論的にも既にいくつかのアプローチが提案されているが、未だ十分なコンセンサスが得られてはいない。

本研究では、反強磁性磁気構造のダイナミクスによるスピン起電力を理論的に検討し、先行研究において考慮されていなかった、副格子磁化の傾角性（有限の磁化の存在）電子スピンと副格子磁化の交換相互作用にお

ける非断熱性、ラシュバスピン軌道相互作用の効果を取り込んだ。磁壁磁場駆動（図3）と反強磁性共鳴を具体的に取り上げ反強磁性単体から電圧生成が可能であることを明らかにした。

これらは反強磁性ダイナミクスの電氣的な検出方法を与えるものとして有益であり、スピン起電力の出力増大に向けた物質探索の可能性を広げるものでもある。

本研究は、ドイツマインツ大学との国際共同研究成果である。

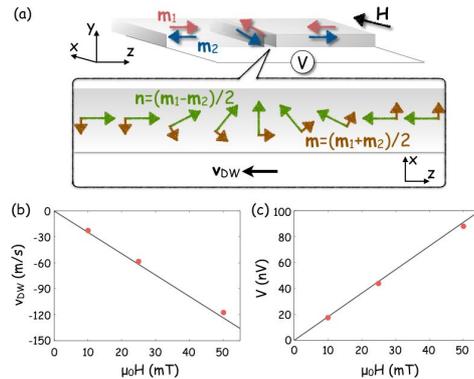


図3 傾角反強磁性磁壁の運動によるスピン起電力生成。(a)反強磁性秩序パラメータ  $n$  の空間変化に伴い磁化  $m$  も磁壁構造を形成し外部磁場  $H$  で駆動される。(b)磁壁速度および(c)スピン起電力の外部磁場依存性。

### (2) 核スピンベリ位相

核磁気共鳴法 (NMR) と核四重極共鳴法 (NQR) 法を用いて核スピンに作用するベリ位相とバーネット磁場を観測した。回転運動を観測する場合に注意する必要があることは、単純に試料を回転し、これを実験室系から観測しただけでは回転する試料と観測者の間に相対的な回転運動が生じてしまい、試料に生じる回転の効果を正しく測定できない場合があることである。この問題を解決するためには試料の回転と観測者の回転といった自由度を考慮し、観測したい現象に応じて使い分けることである。試料回転は簡単で、NMR においては既にスピニング NMR の手法が確立されており広く普及している。観測者の回転を実現するために図の様な装置を考案した。

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

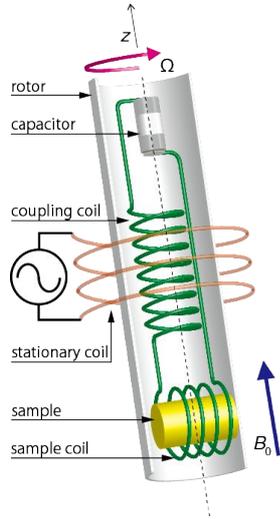


図 4 回転共振回路の一例

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、チップコンデンサの容量を調整することで測定周波数に同調する。

#### バーネット磁場の観測

[主要雑誌論文リスト、]

回転運動によって生じるバーネット磁場を NMR 測定法を用いて測定した。図 5(a) に InP における  $^{115}\text{In}$  の、(b) に Si 単体における  $^{29}\text{Si}$  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  $^{115}\text{In}$  の場合（図 5(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 5(b) に核磁気モーメントの符号が負である  $^{29}\text{Si}$  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  $^{115}\text{In}$  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

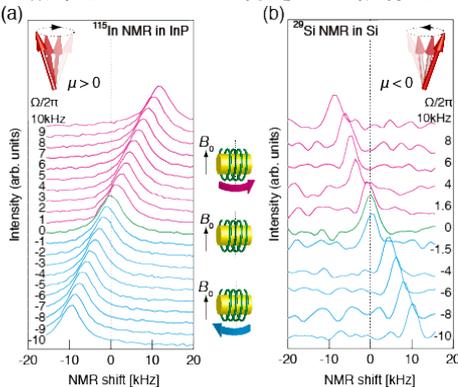


図 5 (a)  $^{115}\text{In}$  (b)  $^{29}\text{Si}$  NMR スペクトラムの回転数依存性

ることを示している。

#### バーネット磁場とベリー位相

前出の NMR 測定では回転軸と磁場が平行であるためベリー位相の蓄積はなくバーネット磁場によって NMR の共鳴線はシフトした。しかしながら、磁場中において、回転軸と磁場の方向が平行ではない場合には、回転する試料から見ると、実験室系で静止した磁場は時間依存して回転しているためベリー位相を考慮する必要がある。また、試料と同じ回転座標系ではバーネット磁場も生じているので、ベリー位相とバーネット磁場の両方を考慮する必要がある。図に、 $\text{C}_6\text{F}_6$  中の  $^{19}\text{F}$  NMR スペクトルの磁場方向依存性を示す。磁場と回転軸が平行の場合では+ シフトした一本の共鳴線であるが、 $\theta = 90^\circ$  付近では、核スピン  $l=1/2$  にもかかわらず、0 の 3 本に分裂する。さらに、 $\theta = 180^\circ$  に近づくにしたがって - にシフトした共鳴線だけになる。 $\theta = 0, 180^\circ$  は図の実験結果に対応しバーネット磁場のみが有効である。このような磁場方向依存性は回転系において時間依存する外部磁場を含んだハミルトニアンを断熱近似で解けば導出できることを示した。

この成果をまとめて現在投稿準備中である。

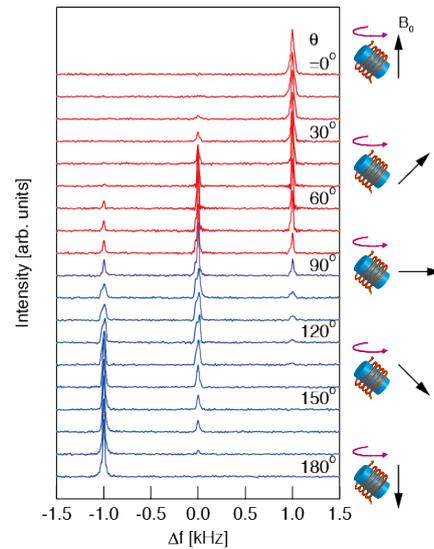


図 6  $\text{C}_6\text{F}_6$  中の  $^{19}\text{F}$  NMR スペクトラムの磁場方向依存性

## 5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 53 件)

主要雑誌論文 (全て査読有)

M. Matsuo, E. Saitoh, S. Maekawa,  
“Spin-mechatronics”, *J. Phys. Soc. Jpn.* **86**, 2017, 011011(1-7).  
DOI: 10.7566/JPSJ.86.011011

Y. Ogata, H. Chudo, M. Ono, K. Harii,  
M. Matsuo, S. Maekawa, E. Saitoh,  
“Gyroscopic g factor of rare earth metals”, *Appl. Phys. Lett.* **110**, 2017, 072409(1-4).  
DOI: 10.1063/1.4976998

Y. Yamane, J. Ieda, J. Sinova, “Spin transfer torque in antiferromagnetic textures: Efficiency and quantification method”, *Phys. Rev. B*, **94**, 2016, 054409(1-8).  
DOI: 10.1103/PhysRevB.94.054409

Y. Yamane, J. Ieda, J. Sinova, “Electric voltage generation by antiferromagnetic dynamics”, *Phys. Rev. B*, **93**, 2016, 180408(R1-5).  
DOI: 10.1103/PhysRevB.93.180408

D. Hirobe, M. Sato, T. Kawamata, Y. Shiomi, J. Uchida, R. Iguchi, S. Maekawa, E. Saitoh, “One-dimensional spinon spin currents”, *Nature Physics*, **13**, 2016, 30-34.  
DOI: 10.1038/nphys3895

R. Takahashi, M. Matsuo, M. Ono, K. Harii, H. Chudo, S. Okayasu, J. Ieda, S. Takahashi, S. Maekawa, E. Saitoh. “Spin hydrodynamic generation”, *Nature Physics*, **12**, 2016, 52-56.  
DOI: 10.1038/nphys3526

M. Matsuo, J. Ieda, S. Maekawa, “Mechanical generation of spin current”, *Front. Phys.* **3**, 2015, 54(1-10).  
DOI: 10.3389/fphy.2015.00054

M. Ono, H. Chudo, K. Harii, S. Okayasu, M. Matsuo, J. Ieda, R. Takahashi, S. Maekawa, E. Saitoh, “Barnett effect in paramagnetic states: Revisiting a method for determining gyromagnetic ratio”, *Phys. Rev. B*, **92**, 2015, 175524(1-4).  
DOI: 10.1103/PhysRevB.92.174424

K. Harii, H. Chudo, M. Ono, M. Matsuo, J. Ieda, S. Okayasu, S. Maekawa, E. Saitoh, “Line Splitting by Mechanical Rotation in Nuclear Magnetic Resonance”, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **54**, 2015, 050302(1-3).  
DOI: 10.7567/JJAP.54.050302

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

Y. Yamane, S. Hemmatiyani, J. Ieda, S. Maekawa, J. Sinova, “Spinmotive force due to motion of magnetic bubble arrays driven by magnetic field gradient”, *Scientific Reports*, **4**, 2014, 6901(1-5).  
DOI: 10.1038/srep06901

H. Chudo, M. Ono, K. Harii, M. Matsuo, J. Ieda, R. Haruki, S. Okayasu, S. Maekawa, H. Yasuoka, E. Saitoh, “Observation of Barnett fields in solids by nuclear magnetic resonance”, *Appl. Phys. Express*, **7**, 2014, 063004(1-4).  
DOI: 10.7567/APEX.7.063004

〔学会発表〕(計 85 件)

主要招待講演

S. Maekawa, “Mechanical Effects on Spintronics”, *Spin Mechanics* 4, 20 Feb 2017, Lake Louise, (Canada).

S. Maekawa, “Spin Hall Effects Due to Critical Spin Fluctuations”, *Spin Caloritronics* 7, 15 Jul 2016, Utrecht, (Netherlands).

S. Maekawa, “Spin Current; Its physics and applications”, *Insulatronics* 2016, 31 May 2016, Longyearbyen, (Norway).

M. Matsuo, “Spin hydrodynamic generation”, *Asia Pacific Workshop - CEMS Joint Workshop*, 25 Jan 2016, 理研, (埼玉県和光市).

S. Maekawa, “Phonons, Magnons and Spin Current”, *International Conference on Magnetism* 2015, 7 Jul

2015, Barcelona (Spain).

H. Chudo, "Spin rotation effects observed by NMR/NQR - Barnett effect, Rotational Doppler effect, and Berry Phase", Gordon Research Conference Spin Dynamics in Nanostructure, 26 Jul 2015, Hong Kong, (China).

S. Maekawa, "Mechanical generation of spin and spin current", Spin Mechanics 3, 26 Jul 2015, Munchen, (Germany).

S. Maekawa, "A. Einstein meets Spintronics", Gordon Godfrey Workshop, 2 Nov 2015, Sydney, (Australis).

S. Maekawa, "Various Method of Spin Current Generation and Manipulation", SPIE Optics+Photonics, 20 Aug 2014, San Diego, (USA).

S. Maekawa, "Various Method of Spin Current Generation and Manipulation", Spin Caloritronics 6, 17 Jul 2014, Irsee, (Germany).

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

〔その他〕(計 0 件)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

前川 禎通 (MAEKAWA, Sadamichi)  
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・センター長  
研究者番号：6 0 0 0 5 9 7 3

### (2) 研究分担者

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・研究副主幹  
研究者番号：3 0 4 5 5 2 8 2

### (3) 研究分担者

家田 淳一 (IEDA, Jun'ichi)  
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・研究副主幹

研究者番号：2 0 4 6 3 7 9 7

### (4) 研究分担者

小野 正雄 (ONO, Masao)  
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・研究副主幹  
研究者番号：5 0 3 7 0 3 7 5

### (5) 研究分担者

安立 裕人 (ADACHI, Hiroto)  
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・研究副主幹  
研究者番号：1 0 3 9 7 9 0 3

### (6) 研究分担者

松尾 衛 (MATSUO, Mamoru)  
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・任期付研究員  
研究者番号：8 0 5 8 1 0 9 0

### (7) 研究分担者

針井 一哉 (HARII, Kazuya)  
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・博士研究員  
研究者番号：0 0 6 3 3 9 0 0

### (8) 連携研究者

安岡 弘志 (YASUOKA, Hiroshi)  
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・嘱託研究員  
研究者番号：5 0 0 2 6 0 2 7

### (9) 連携研究者

齊藤 英治 (SAITOH, Eiji)  
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・客員研究員  
研究者番号：8 0 3 3 8 2 5 1