

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 4 年 5 月 24 日現在

機関番号：82401

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17H02927

研究課題名(和文) スピンと巨視的回転の相互作用が切り拓くスピントロニクスの新展開

研究課題名(英文) Coupling between spin and mechanical rotation in spintronics

研究代表者

前川 禎通 (Maekawa, Sadamichi)

国立研究開発法人理化学研究所・創発物性科学研究センター・上級研究員

研究者番号：60005973

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 16,760,000円

研究成果の概要(和文)：希土類鉄ガーネットでは希土類イオンと鉄イオンの磁気モーメントが反強磁性的に結合し、それぞれの秩序変数の温度変化が異なることから希土類と鉄の磁気モーメントの大きさが等しくなったところで磁化が消失し、磁気補償温度を持つ。また、希土類と鉄ではg-因子が異なるため、磁気補償温度と角運動量補償温度は一般に異なるため、角運動量と直接結合する力学回転を用いれば、角運動量補償温度が求められる。当研究では、温度可変な角運動量物性測定装置を開拓し、希土類鉄ガーネット、(Ho,Dy)<sub>3</sub>Fe<sub>5</sub>O<sub>12</sub>、の角運動量補償温度を求めた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

スピントロニクスの重要な材料である希土類鉄ガーネットは、フェリ磁性体であり、一般に磁気補償温度(TM)と角運動量補償温度(TA)が違っている。角運動量補償温度(TA)近傍では、磁化の運動が早くなることから、スピントロニクスへの様々な応用が期待されるが、これまではTAを直接に測定する方法がなかった。今回我々は、力学回転装置を開発し、ガーネット効果を用いてTAを直接検する方法を得た。これを用いて、(Ho,Dy)<sub>3</sub>Fe<sub>5</sub>O<sub>12</sub>のTAとTMの関係を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：In rare earth iron garnets, magnetic moments of rare earth ions and iron ones couple antiferromagnetically. Since the g-factors of rare earth ions and iron ones are different, there exists two compensation temperatures, i.e., magnetic compensation temperature (TM) and angular momentum compensation temperature (TA). Although TM is observed by the magnetization measurement, there was no direct method to measure TA. We have developed the mechanically rotational machine to measure TA. By using this, both TM and TA in (Ho, Dy)<sub>3</sub>Fe<sub>5</sub>O<sub>12</sub> have been determined. Since the magnetization dynamics becomes high near TA, this method is expected to contribute to spintronics.

研究分野：スピントロニクス

キーワード：ガーネット パーネット効果 フェリ磁性 力学回転

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

1915年にアインシュタイン達は、力学回転と磁気モーメントの結合を見出し(アインシュタインド・ハース効果)、電子の角運動量が磁気の起源であることを明らかにした。物質の持つ角運動量は、電子スピン、原子核スピン、力学回転、流体の渦(局所回転)等多彩である。角運動量の保存則を用いてこれらの角運動量の相互変換を行えば、様々なデバイスへの応用が記載される。

### 2. 研究の目的

物質の持つ様々な角運動量(スピン)と力学回転との相互作用を明らかにし、力学回転による角運動量制御法を確立するとともに、力学回転運動を組み込んだスピントロニクス(スピンメカトロニクス)を開拓する。1915年にアインシュタイン達は、力学回転と磁気モーメントの結合を見出し(アインシュタインド・ハース効果

)、電子の角運動量が磁気の起源であることを明らかにした。物質の持つ角運動量は、電子スピン、原子核スピン、力学回転、流体中の渦(局所回転)等多彩である。

これらの角運動量間の相互変換を用いて、非慣性系におけるゲージ理論を枠組みとし、現代的手法を駆使した実験手法と組み合わせ、スピントロニクスの新たな展開をはかる。

### 3. 研究の方法

角運動量変換の舞台として核スピン系と電子スピン系を想定し、(1)核バーネット効果、(2)バーネット効果による角運動量補償点の探索、(3)スピン注入アインシュタインド・ハース効果、(4)核スピンプンピングを具体的な研究対象として、理論、実験の両面から現象の詳細を明らかにする。(1)力学的に回転するスピン系では断熱的に量子化軸が時間変化することからスピンベリー位相が蓄積される。当該研究グループが新規開発したコイル回転NMR法を用いると回転系で測定しているため、コリオリ力に対応するバーネット磁場も有効であるため、ベリー位相とバーネット効果の協力現象という希有な現象を観測できる。本年度は様々な核スピンの核種に対して系統的に測定を行い詳細を明らかにする。(2)我々が所有しているバーネット効果測定装置は室温でのみ測定を行えたが、これを低温に拡張する。圧縮空気を用いて回転を行っているがこれを窒素ガスにし、液体窒素を用いた熱交換器で高圧窒素ガスを冷却し、回転体に吹き付け低温における回転を実現する。そのため装置設計と構築を行う。(3)スピン流を注入する手法として、2系統の実験系を用意する。白金細管に水銀を満たし、白金に電流を印加することによって白金中のスピホール効果によって水銀にスピンを注入し、流体の駆動をレーザー干渉計で測定する。また、YIG(Yttrium Iron Garnet)基板上にマイクロ流路を微細加工したガラス基板を貼り付け、マイクロ流路内に水銀を加圧により流し込み、YIGのスピンプンピングによって水銀にスピンを注入し水銀の変位を高解像度カメラで測定する。

### 4. 研究成果

磁場は磁気モーメントと結合する。一方、力学回転は角運動量と結合するため、磁場に対する応答と回転に対する応答の違いから、物質の持つ磁気回転比が求められる。また、希土類鉄ガーネットでは希土類イオンと鉄イオンの磁気モーメントが反強磁性的に結

合し、それぞれの秩序変数の温度変化が異なることから希土類と鉄の磁気モーメントの大きさが等しくなったところで磁化が消失し、磁気補償温度を持つ。ところが希土類と鉄ではg-因子が異なるため、磁気補償温度と角運動量補償温度は一般に異なる[1]。角運動量と直接結合する力学回転を用いれば、角運動量補償温度の直接観測が可能である。当研究では、希土類鉄ガーネット、 $(\text{Ho,Dy})_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ 、の角運動量補償温度を求めた。角運動量補償温度では磁化の運動が早くなることが知られており、スピントロニクスへの応用上、有用な研究へと発展が期待される。さらに、YIGやCo等の強磁性薄膜に白金薄膜を蒸着し、強磁性層の原子核に対して核磁気共鳴(NMR)を行い、白金の両端電圧を測定した。強磁性体のNMRにおいて特有のpulling効果による共鳴の増幅効果を利用した。pulling効果とは核スピンと電子スピンとの間の超微細相互作用によって核スピンの共鳴歳差運動にマクロな磁化が追隨して回転するものである。この状態はスピンプンピングに必要な電子スピン系の回転運動状態を核磁気共鳴によって強制的に作り出していることに対応する[2]。

#### 引用論文：

[1] "Observation of the Angular Momentum Compensation by Barnett Effect and NMR" H. Chudo, M. Imai, M. Matsuo, S. Maekawa and E. Saitoh: J. Phys. Soc. Jpn. **90**, 081003 (2021).

[2]"Barnett field, rotational Doppler effect, and Berry phase studied by nuclear quadrupole resonance with rotation" H. Chudo, M. Matus, S. Maekawa and E. Saitoh: Phys. Rev. B **103**, 174308 (2021).

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計14件（うち査読付論文 14件／うち国際共著 4件／うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Ieda Jun'ichi, Barnes Stewart E., Maekawa Sadamichi	4. 巻 87
2. 論文標題 Magnetic Anisotropy by Rashba Spin-Orbit Coupling in Antiferromagnetic Thin Films	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 053703 ~ 053703
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.87.053703	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Sugimoto Takanori, Mori Michiyasu, Tohyama Takami, Maekawa Sadamichi	4. 巻 97
2. 論文標題 Magnetic phase diagram of a frustrated spin ladder	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 144424-1-10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.97.144424	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Imai Masaki, Ogata Yudai, Chudo Hiroyuki, Ono Masao, Harii Kazuya, Matsuo Mamoru, Ohnuma Yuichi, Maekawa Sadamichi, Saitoh Eiji	4. 巻 113
2. 論文標題 Observation of gyromagnetic reversal	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 052402 ~ 052402
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5041464	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Han Wei, Otani YoshiChika, Maekawa Sadamichi	4. 巻 3
2. 論文標題 Quantum materials for spin and charge conversion	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 npj Quantum Materials	6. 最初と最後の頁 41535-1-16
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41535-018-0100-9	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

1. 著者名 Tang Chi, Song Qi, Chang Cui-Zu, Xu Yadong, Ohnuma Yuichi, Matsuo Mamoru, Liu Yawen, Yuan Wei, Yao Yunyan, Moodera Jagadeesh S., Maekawa Sadamichi, Han Wei, Shi Jing	4. 巻 4
2. 論文標題 Dirac surface state?modulated spin dynamics in a ferrimagnetic insulator at room temperature	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Science Advances	6. 最初と最後の頁 8660 ~ 8660
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1126/sciadv.aas8660	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Bo Gu, S. Takahashi, and S. Maekawa	4. 巻 96
2. 論文標題 Enhanced magneto-optical Kerr effect at Fe/insulator interfaces	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Phys. Rev. B	6. 最初と最後の頁 214423(1-6)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.96.214423	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Y. Ohnuma, M. Matsuo, and S. Maekawa	4. 巻 96
2. 論文標題 Theory of the spin Peltier effect	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Phys. Rev. B	6. 最初と最後の頁 134412(1-4)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.96.134412	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 D. Kobayashi, T. Yoshikawa, M. Matsuo, R. Iguchi, S. Maekawa, E. Saitoh, and Y. Nozaki	4. 巻 119
2. 論文標題 Spin Current Generation Using a Surface Acoustic Wave Generated via Spin-Rotation Coupling	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Phys. Rev. Lett.	6. 最初と最後の頁 077202(1-5)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.119.077202	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Y. Ogata, H. Chudo, B. Gu, N. Kobayashi, M. Ono, K. Harii, M. Matsuo, E. Saitoh, and S. Maekawa	4. 巻 442
2. 論文標題 Enhanced orbital magnetic moment in FeCo nanogranules observed by Barnett effect	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 J. Magn. Magn. Mater.	6. 最初と最後の頁 329-331
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jmmm.2017.06.101	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 M. Matsuo, Y. Ohnuma, and S. Maekawa	4. 巻 96
2. 論文標題 Theory of spin hydrodynamic generation	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Phys. Rev. B	6. 最初と最後の頁 020401(R)(1-5)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.96.020401	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Y. Seo, K. Harii, R. Takahashi, H. Chudo, K. Oyanagi, Z. Qiu, T. Ono, Y. Shiomi, and E. Saitoh	4. 巻 110
2. 論文標題 Fabrication and magnetic control of Y3Fe5O12 cantilevers	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Appl. Phys. Lett.	6. 最初と最後の頁 132409(1-4)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.4979553	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 A. Okada, S. He, B. Gu, S. Kanai, A. Soumyanarayanan, S. T. Lim, M. Tran, M. Mori, S. Maekawa, F. Matsukura, H. Ohno, and C. Panagopoulos	4. 巻 144
2. 論文標題 Magnetization dynamics and its scattering mechanism in thin CoFeB films with interfacial anisotropy	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 PNAS	6. 最初と最後の頁 3815-3829
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1073/pnas.1613864114	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 N. Kobayashi, K. Ikeda, Bo Gu, S. Takahashi, H. Masumoto, and S. Maekawa	4. 巻 8
2. 論文標題 Giant Faraday rotation in metal-fluoride nanogranular films	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Scientific Reports 8	6. 最初と最後の頁 4978(1-8)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-018-23128-5	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 M. Matsuo, Y. Ohnuma, T. Kato, and S. Maekawa	4. 巻 120
2. 論文標題 Spin Current Noise of the Spin Seebeck Effect and Spin Pumping	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Phys. Rev. Lett.	6. 最初と最後の頁 037201(1-5)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.120.037201	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計33件 (うち招待講演 26件 / うち国際学会 6件)

1. 発表者名 能崎幸雄
2. 発表標題 表面弾性波のスピン트로ニクスへの応用
3. 学会等名 電気学会全国大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 今井正樹
2. 発表標題 バーネット効果による角運動量補償点の直接観測
3. 学会等名 日本物理学会年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 栗宗勇貴
2. 発表標題 Cu,Tiにおけるスピン渦度結合由来の生成スピン流の比
3. 学会等名 日本物理学会年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 家田淳一
2. 発表標題 反強磁性薄膜におけるラッシュバ効果による磁気異方性とその電界制御
3. 学会等名 日本物理学会年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 小林大眞
2. 発表標題 スピン回転結合による表面弾性波を用いたスピン流生成
3. 学会等名 日本物理学会年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Sadamichi Maekawa
2. 発表標題 Spin Mechatronics - Mechanical Effects on Spintronics
3. 学会等名 International conference on Superconductivity and Magnetism(ICSM2018 ) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年



1. 発表者名 Sadamichi Maekawa
2. 発表標題 Spin mechatronics - Mechanical effects on spintronics
3. 学会等名 Kavli ITS Workshop on Topological Matter and Quantum Computing (TMQC) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Sadamichi Maekawa
2. 発表標題 Spin Mechatronics: - Mechanical generation of spin current -
3. 学会等名 Ljubljana'18 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Sadamichi Maekawa
2. 発表標題 Spin Mechatronics-A. Einstein meets Spintronics-
3. 学会等名 Quantum Complex Matter 2018 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Sadamichi Maekawa
2. 発表標題 Spin Mechatronics: Mechanical generation of spin current
3. 学会等名 Spin Summit 2018 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 前川禎通
2. 発表標題 アインシュタイン先生、スピンとロニクスに会う
3. 学会等名 第三回新機能材料研究会（招待講演）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 前川禎通
2. 発表標題 Spin Mechatronics - A.Einstein meets Spintronics -
3. 学会等名 日本物理学会秋季大会（招待講演）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 小林伸聖
2. 発表標題 Giant Faraday Effect of (Fe,FeCo)-(Al-,Y-fluoride) Nanogranular Films
3. 学会等名 電気学会研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 小林伸聖
2. 発表標題 金属 フッ化物系ナノグラニューラー膜の巨大ファラデー効果
3. 学会等名 日本磁気学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Sadamichi Maekawa
2. 発表標題 Spin-Rotation Coupling
3. 学会等名 "COLLECTIVE SPIN DYNAMICS IN NANOSTRUCTURES" workshop 2018 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 S. Maekawa
2. 発表標題 Spin Seebeck and Spin Peltier Effects
3. 学会等名 6th JSPS Core-to-Core Workshop (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 S. Maekawa
2. 発表標題 Spin Seebeck and Spin Peltier Effects
3. 学会等名 CEMS-Tsinghua-APW Joint Workshop (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 S. Maekawa
2. 発表標題 Spin Currents in Spintronics
3. 学会等名 Lecture at Ecole polytechnique (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 S. Maekawa
2. 発表標題 Spin Seebeck and Spin Peltier Effects
3. 学会等名 Workshop "Spin, charge and energy transport in novel materials" (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 家田淳一
2. 発表標題 電子スピンを用いた反強磁性磁化制御
3. 学会等名 応用物理学会スピントロニクス研究会・日本磁気学会スピントロニクス専門研究会共同主催研究会「反強磁性スピントロニクスの新展開」(招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 J. Ieda
2. 発表標題 Spintronic micro-power generation
3. 学会等名 International conference on condensed matter physics (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 S. Maekawa
2. 発表標題 Theory and Experiment on Spin Currents
3. 学会等名 MAINZ Summer School New Directions in Spintronic Research (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 S. Maekawa
2. 発表標題 Spin Peltier effect
3. 学会等名 Spin Summit 2017 (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 S. Maekawa
2. 発表標題 Mechanical Generation of Spin Current
3. 学会等名 13th International Workshop on Magnetism and Superconductivity at the Nanoscale (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 S. Maekawa
2. 発表標題 Spin Mechatonics-Prof. A. Einstein meets Spintronics-
3. 学会等名 The lecture at the University of Zaragoza (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 S. Maekawa
2. 発表標題 Theory of Heat and Spin Current
3. 学会等名 Spin caloritronics 8 (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 S. Maekawa
2. 発表標題 Spin Transport in Spintronics
3. 学会等名 3rd Computational Chemistry (CC) symposium (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 S. Maekawa
2. 発表標題 Spin Transport in Spintronics
3. 学会等名 Lecture at Peking University (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 S. Maekawa
2. 発表標題 Mechanical effects on spintronics
3. 学会等名 The KITS 2017 Forum: New Horizons in Condensed Matter Physics (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 S. Maekawa
2. 発表標題 Mechanical Effects on Spintronics
3. 学会等名 Spin mechanics 4 (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 S. Maekawa
2. 発表標題 Spin transport in a variety of systems
3. 学会等名 SHINES Workshop on Spins and Heat (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 S. Maekawa
2. 発表標題 Spin Seebeck and Spin Peltier Effects
3. 学会等名 Lecture at University of California-Riverside (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 家田淳一
2. 発表標題 反強磁性体のラシュバ効果と磁気異方性
3. 学会等名 東北大学電気通信研究所共同プロジェクト研究会 (招待講演)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	中堂 博之 (Chudo Hiroyuki)  (30455282)	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 原子力科学研究所 先端基礎研究センター・研究副主幹  (82110)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	小野 正雄  (Ono Masao)  (50370375)	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 原子力科学研究所 先端基礎研究センター・研究副主幹   (82110)	
研究分担者	緒方 裕大  (Ogata Yudai)  (80757691)	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   (82110)	削除：平成30年3月1日
研究分担者	G u B o  (Gu Bo)  (90631333)	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・研究員   (82110)	削除：平成30年3月1日

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関