

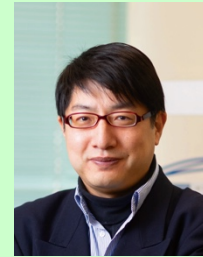
## 核スピン流の物性科学開拓と核スピン熱電変換

Investigation of nuclear spin-current science  
and nuclear thermoelectric conversion

課題番号：19H05600

齊藤 英治 (SAITOH, Eiji)

東京大学・大学院工学系研究科・教授



### 研究の概要（4行以内）

原子核とスピン流物性を繋ぐ新たな学問領域「核スピン流科学」を建設する。スピン流科学では、これまで電子角運動量を利用して多彩な物性機能を作り出してきた。一方で、量子センサーや情報担体として期待されている核スピンを組み込むことができなかった。本研究では、これらの独立した領域を統一し、拡大したスピン流物性概念がもたらす新学問の形成を目指す。

研究分野：物性物理学およびその関連分野

キーワード：スピントロニクス、スピン流、核スピントロニクス、核スピン流

### 1. 研究開始当初の背景

スピントロニクスは、電子のスピンを利用することで新しい物性現象や電子機能を創出することを目指した学術分野である。応用面では、磁気ランダムアクセスメモリ（MRAM）の実現など情報社会に不可欠な基盤技術として進化し続けている。スピントロニクス物理が提示した重要概念にスピン流がある。スピン流は電子スピン角運動量の流れであり、電流のスピン版である。スピントロニクス物性の多くは、スピン流の運ぶ角運動量と深く関連しており、スピン流の概念のもとに磁化やフォノンなどの固体中の様々な角運動量概念が統一されてきた。一方で、世界各所での長年の挑戦にも関わらず、量子センサーや情報担体として注目されている核スピンだけはスピン流科学に結び付けられなかった。そのような中で、研究代表者らは核スピンからスピン流を取り出す現象「核スピンポンピング」を見出した。これにより長い間分断されてきた核スピン科学と電子スピン流科学の統合に突破口が開いた。

### 2. 研究の目的

核スピンポンピングの発見により、核スピン流の検出法が確立され、核スピン流物性開拓の基盤が整った。今、従来のスピントロニクスで開拓されたほとんど全ての物理現象に対応した現象群が、核スピンの世界で発見を待って眠っているタイミングである。研究代表者らが拓いたこのチャンスを逃すことなくこれらの現象群を開拓し、核と電子スピン流が融合し飛躍的に拡大した物性概念が

もたらす新学問「核スピン流科学」を建設する。本研究を通じてこれまで想像もできなかった“核スピンを使った環境熱発電”など、質的に新しい現象群を見出す。

### 3. 研究の方法

電子スピン流の科学では、角運動量の相互変換が確立している自由度である電子（個別スピン及び磁化）・格子（熱及び力学運動）の間の相互変換の学理が肝となっている。電子スピン流に対して体系化されてきた現象群全てに、核スピンに拡張された対応物があると期待できる。従って、核スピントロニクスの科学の開拓を達成するためには、以下の3つの学術領域を開拓すればよい：【A】核スピン流熱物性、【B】核スピン—電子スピン流物性・核スピン流分光学、【C】核スピン流の力学効果。角運動量の相互変換が確立している自由度と核スピンの相互作用によるスピン流物性を個々に調べ上げることで、スピン流物性と核スピンの結合系が全て網羅されるからである。これにより、核スピンによる熱発電や核スピン流伝送、核スピン強結合といった、これまで存在しなかったカテゴリーの現象群が開拓される。

### 4. これまでの成果

本研究課題の中核をなす核スピンゼーベック効果の実証に成功した。スピンゼーベック効果は、磁性体と金属薄膜を接合した系に温度勾配を付けることで、接合界面近傍にスピン流が誘起される現象であり、逆スピンホール効果と組み合わせることで、熱発電を可

能にする。これまで本現象は電子スピン系（マグノン）に限られており、低温・強磁場下ではマグノン励起の凍結により、信号が消失する振る舞いが観測されてきた。一方核スピンは、電子スピンと同程度の角運動量をもつと同時に、磁気回転比が電子に比べて約1000分の1であるため、ゼーマン効果が極めて小さく常磁性的である。従って核スピンは極低温・強磁場下でも高いエントロピーをもつ。もし核スピンゼーベック効果により原子核の角運動量をスピン流として取り出すことができれば、それを逆スピンホール効果を介して測定可能な熱起電力に変換できる。

我々は大きな核スピン $I=5/2$ をもち天然存在比100%の $^{55}\text{Mn}$ 核を含む反強磁性絶縁体材料 $\text{MnCO}_3$ を対象に希釈冷凍機を用いてスピンゼーベック効果の温度・磁場依存性を系統的に測定した。すると信号強度が超低温100 mKまで増大し、且つ信号が強磁場下(14 T)でも抑制されないことを見出した。この振る舞いは、従来の電子スピンゼーベック効果では説明されない。我々は、 $\text{Pt/MnCO}_3$ 界面におけるコリンハ緩和に由来した核スピン流生成機構を提案し、このメカニズムにより実験結果が定量的に再現されることを示した。本研究を通じて、核スピンによる初めての熱電変換現象—核スピンゼーベック効果—が実証された。

また核スピンゼーベック効果の普遍性を確かめるべく、 $\text{MnCO}_3$ と同様に $^{55}\text{Mn}$ 核を含む容易軸反強磁性体 $\text{MnF}_2$ をターゲットに本現象の開拓を行った。すると、 $\text{MnF}_2$ のスピンフロップ相( $B > 9.3$  T)において、電圧信号の磁場印加角度 $\theta$ 依存性にキック構造が観測された。電子スピンによる輸送が生じた場合、コサイン $\theta$ 型の依存性が予想されるが、実験結果はそのシナリオから大きく逸脱している。我々は核スピン—電子スピン結合系の2スピンモデルのエネルギー最小化問題を解き、核スピン分極の外部磁場方向への射影成分の角度依存性が実験結果の外形と一致することを示した。これにより、この系においても核スピンゼーベック効果が実証された。

さらに、核スピン流の輸送効果を調べるために、核スピン流検出の端子間距離を様々に変えた $\text{Pt/MnCO}_3$ デバイスを作製し、非局所熱スピン流輸送の系統的实验を行った。これにより核スピン流の輸送特性を決定し、拡散長を初めて定量することに成功した。

また核スピン流分光学の構築に向け、低温・強磁場広帯域マイクロ波反射分光計を立ち上げた。 $\text{MnCO}_3$ を対象に核・電子スピンドイナミクスを調べ、その磁場分散の全貌を明らかにした。系統的な測定を広い磁場・温度領域で行い、核・電子スピンのモデルパラメータを決定した。また入力マイクロ波強度が大きい条件において、明瞭な非線形吸収を観測した。これは従来議論されていた、核ス

ピン温度の上昇による非線形効果では説明されない。現在までに2光子吸収による非線形プロセスを考慮した理論計算により、非線形励起の再現に成功している。

## 5. 今後の計画

これまでの研究により、「核スピン流科学」の建設に向けた重要な進展が得られている。今後は、核スピンペルチェ効果の実証や、核スピン—他素励起結合系の分光学や非線形効果の深堀り、また核スピンと力学効果の結合現象の開拓を行う。

## 6. これまでの発表論文等 (受賞等も含む) 【発表論文】

- [1] K. Yamamoto, G. C. Thiang, P. Pirro, K.-W. Kim, K. Everschor-Sitte, and E. Saitoh, “Topological Characterization of Classical Waves: The Topological Origin of Magnetostatic Surface Spin Waves”, *Physical Review Letters* **122**, 217201 (2019).
- [2] K. Harii, Y.-J. Seo, Y. Tsutsumi, H. Chudo, K. Oyanagi, M. Matsuo, Y. Shiomi, T. Ono, S. Maekawa, and E. Saitoh, “Spin Seebeck mechanical force” *Nature Communications* **10**, 2616 (2019).
- [3] K. Oyanagi, S. Takahashi, L. J. Cornelissen, J. Shan, S. Daimon, T. Kikkawa, G. E. W. Bauer, B. J. van Wees, and E. Saitoh, “Spin transport in insulators without exchange stiffness” *Nature Communications* **10**, 4740 (2019).
- [4] R. Ramos, T. Hioki, Y. Hashimoto, T. Kikkawa, P. Frey, A. J. E. Kreil, V. I. Vasyuchka, A. A. Serga, B. Hillebrands, and E. Saitoh, “Room temperature and low-field resonant enhancement of spin Seebeck effect in partially compensated magnets” *Nature Communications* **10**, 5162 (2019).
- [5] R. Takahashi, H. Chudo, M. Matsuo, K. Harii, Y. Ohnuma, S. Maekawa, and E. Saitoh, “Giant spin hydrodynamic generation in laminar flow” *Nature Communications* **11**, 3009 (2020).

他41件

## 【受賞】

- [1] 齊藤英治(代表) Highly Cited Researchers 2019 (Clarivate Analytics)、2019年11月。
- [2] 齊藤英治(代表) 東北大学名誉教授 称号付与、2020年4月。
- [3] 齊藤英治(代表) Highly Cited Researchers 2020 (Clarivate Analytics)、2020年11月。
- [4] 塩見雄毅(分担) 第14回日本物理学会若手奨励賞(領域3) 「エキゾチック物質における新奇スピン流現象の開拓」、2020年9月。

## 7. ホームページ等

<https://saitoh.t.u-tokyo.ac.jp/>