

# 科学研究費助成事業（基盤研究（S））公表用資料

## 〔令和4（2022）年度 中間評価用〕

令和4年3月31日現在

研究期間：2020年度～2024年度  
課題番号：20H05666  
研究課題名：情報熱力学的スピントロニクスへの創成

研究代表者氏名（ローマ字）：鈴木義茂 (Yoshishige SUZUKI)  
所属研究機関・部局・職：大阪大学・大学院基礎工学研究科・教授  
研究者番号：50344437

### 研究の概要：

スピントロニクス分野に「情報流(移動エントロピー)」の概念を導入し、スピントロニクスで扱う電子スピン系における情報熱力学の学理を構築する。具体的には磁気スキルミオンの熱運動を利用した素子情報熱機関ととらえその情報熱力学的な性能を明確化する。この応用として超低消費エネルギー計算機の動作を実証する。このことを通して省エネルギーで知的な情報システムを構築する基礎を確立する。

研究分野：応用物性

キーワード：スピントロニクス・スキルミオン・ブラウニアン計算機

### 1. 研究開始当初の背景

1980-90年代における巨大な磁気抵抗効果の発見を契機として創始された「スピントロニクス」は、磁気ハードディスクの記憶容量の爆発的な増大と「スピン流」と呼ばれる角運動量の流れに関する学理の確立をもたらした。さて、現在はIT機器の消費エネルギーの爆発的な増大が持続可能な人類の発展を危ういものにしており、「スピン流はエネルギーを消費しない」ため有用と考えられた。しかし、その生成にエネルギーを要することがスピントロニクスの省エネ化に限界を与えている。一方、生体は情報処理システムとみてもエネルギー効率が高い。生体における情報処理は情報熱力学によって議論されているがスピントロニクスの省エネ化に関する情報熱力学的なアプローチはほとんど行われていない。

### 2. 研究の目的

そこで、本研究では、スピントロニクス素子/回路の究極的な省エネ化を実現するために、この分野に情報熱力学の概念を導入し、エネルギーをほとんど必要とせずに動作するスピントロニクス素子/回路に関する学理を作り出すことを目的とする。そのために磁気スキルミオンからなる系を用いる。磁気スキルミオンはトポロジカルに安定化した粒子状の磁気構造であり数 nm から数  $\mu\text{m}$  という大きさを持つ。具体的には磁気スキルミオンのブラウン運動を用いたブラウニアン計算機の実証を通してスピントロニクス素子における情報流(移動エントロピー)の概念の重要性を明らかにし、この概念を中核とする情報熱力学的スピントロニクスの学理を明らかにする(図1)。

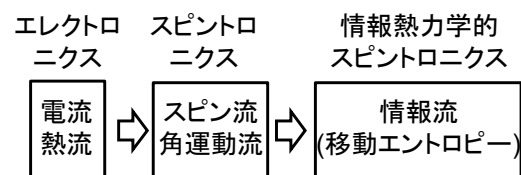


図1 スピン流から情報流(移動エントロピー)を扱うスピントロニクスへのパラダイムシフト。

### 3. 研究の方法

トンネル磁気抵抗素子などのスピントロニクス素子で広く使われている CoFeB 超薄膜(厚さ 1-2nm 程度)を Ta, Pt などの重金属の上にスパッタ法により成長する。さらに酸化防止のために表面を薄い SiO<sub>2</sub> 膜で覆う。このようにして作製された複合膜には界面 DMI (Dzyalonshtinskii-Moriya interaction) のために粒子状の磁区である磁気スキルミオンが発生する。この研究ではスキルミオンを磁気光学顕微鏡により観察するために比較的大きなスキルミオンを作製する(直径 1 $\mu\text{m}$  程度)。磁気スキルミオンはブラウン運動する黒い点として観察される。画像を録画しその中心座標をトラックすることにより拡散係数などを求めることができる。SiO<sub>2</sub> 層の膜厚を変えるとスキルミオンの発生磁界などが変化する。これは、SiO<sub>2</sub> 層から受ける応力が変化するためと考えられている。そこで、非常に薄い SiO<sub>2</sub> 層をワイヤー状あるいは正方形の箱状に追加製膜するとスキルミオンを閉じ込めるチャンネルやポテンシャル井戸を作製することができる。これらのパターンを組み合わせたり、さらに電界を印加するための電極を取り付けるなどして素子が作製される。パターンニングのためには電子線および光リソグラフィとイオンミリングあるいはリフトオフを利用する。数値シミュレーションは Landau-Lifshitz-Gilbert (LLG) 方程式を数値的に解くことによって行われる。

#### 4. これまでの成果

○最初に磁気スキルミオンのダイナミクスを詳細に調べた。磁気光学顕微鏡で観察したブラウン運動の軌跡とシミュレーションの比較[1]し、さらに解析的な理論も構築[2]した。その結果、スキルミオンの拡散流を記述するためには拡散係数をテンソルとすることが必要であること、ポテンシャル揺らぎ(調和関数的)の中の熱運動は原理的に図2に示すようなハイポトロコイドの熱励起であることを見出した。ハイポトロコイドはゆっくりとした大きな回転とそれとは逆回りの小さく速い回転運動の重ね合わせである。熱平衡においてはこれら二つの回転運動は逆向きで同じ大きさの角運動量をもつために角運動量の総和はゼロになる。スキルミオンの運動を粗視化して観察すると大きな時計回りの回転のみが観察されあたかも永久回転運動をしているように見える。しかし、実際には角運動量はゼロであり Bohr-Van Leeuwen の定理に反しないことを見出した。この結果は日本物理学会の Hot topic として取り上げられた。

○続いて二つのスキルミオンを正方形の箱型ポテンシャル井戸に閉じ込めてその熱運動を観察した。スキルミオン間には反発力が発生するために二つのスキルミオンは正方形の対角線上に並ぶ傾向があるこの配置は2通りあるためにその配置の間で熱的な振動が生じる。その時に過去のスキルミオンから現在のスキルミオンに受け渡される移動エントロピー(情報流)を計算して図3に示した。異なるスキルミオン間では情報の移動に時間がかかることが見て取れる。移動エントロピー解析は熱的なスピントロニクス回路の解析に有用と考えられる。

○ハブ・ラチェット・C-join から構成されるブラウン計算機をモデル化し消費エネルギーと計算速度の関係を調べた。ハブは3叉路、ラチェットはスキルミオンを一方向にのみ透過する素子、C-join は二つのスキルミオンを同期させる素子である(図4)。C-join は非可逆的な素子であり通常はエネルギーを消費する。このモデルを 2bit の全加算器に適用した場合、各ビットの加算結果が出る都度データの受け渡しを行うなら C-join の非可逆性をなくして( $\gamma^+ = \gamma^-$ )、計算回路が全くエネルギーを消費しない状態にしても比較的短時間に計算が終了することを見出した。即ち個々の回路ユニットがゼロエネルギーで計算する回路システムの構築が可能であることを見出した。

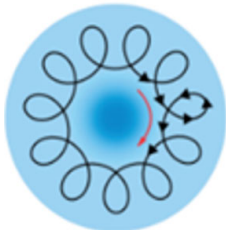


図2 ハイポトロコイド

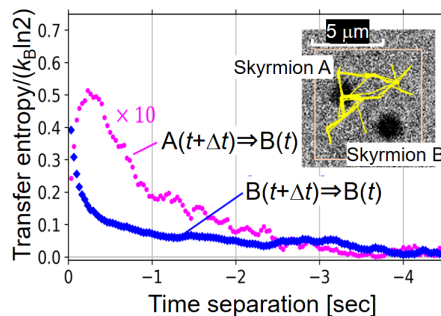


図3 正方形のポテンシャル Box に閉じ込められた二つのスキルミオン間の移動エントロピー

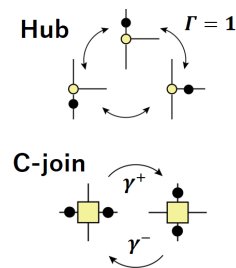


図4 ハブと C-join のモデル化

#### 5. 今後の計画

- ・実際のブラウン計算機やセルラオートマトンなどの回路シミュレーターを開発し内部の情報の流れ(移動エントロピー)を可視化するとともに計算性能と移動エントロピーの関係を調べる。
- ・トンネル磁気キャパシタンス効果の原理を明らかにする。
- ・自律型ラチェット、C-joinなどの素子を含むブラウン計算機の原理的動作を実験的に明らかにする。
- ・異なる回路構成/駆動方法における計算速度・計算能力と消費エネルギーの関係を明らかにし、ブラウン計算の情報熱力学的な限界に関する知見を得る。

これらの研究を通して移動エントロピーのスピントロニクスにおける役割を明確化し、情報熱力学的スピントロニクスの基礎を構築する。さらに究極の省エネルギー計算機はどのように構成させるべきかについての指針を与える。

#### 6. これまでの発表論文等(受賞等も含む)

1. "Brownian Motion of Magnetic Skyrmions in One- and Two-Dimensional Systems", Soma Miki, Yuma Jibiki, Eiiti Tamura, Minori Goto, Mikihiko Oogane, Jaehun Cho, Ryo Ishikawa, Hikaru Nomura, and Yoshishige Suzuki, Journal of Physical Society of Japan J. Phys. Soc. Jpn. 90, 083601\_1-5 (2021).査読有's Choice/JPS Hot Topic
2. "Diffusion of a magnetic skyrmion in two-dimensional space", Yoshishige Suzuki, Soma Miki, Yusuke Imai, Eiiti Tamura, Physics Letters A, 413, 127603\_1-5 (2021), 査読有
3. "Stochastic skyrmion dynamics under alternating magnetic fields", M. Goto, H. Nomura, and Y. Suzuki, J. Mag. Mag. Mat., 536, 167974\_1-5 (2021).査読有

他

#### 7. ホームページ等

<http://suzukilab.jp.org/>  
<https://doi.org/10.7566/JPSHT.1.053>