

# スキルミオンに対する移動エントロピーとその緩和時間の評価

森弘樹<sup>1</sup>、後藤穰<sup>1,2</sup>、石川諒<sup>3</sup>、三木颯馬<sup>1</sup>、野村光<sup>1,2</sup>、鈴木義茂<sup>1,2</sup>

(大阪大学<sup>1</sup>、大阪大学 CSRN<sup>2</sup>、アルバック協働研<sup>3</sup>)

Evaluation of transfer entropy and its relaxation time for skyrmions

H.Mori<sup>1</sup>, M.Goto<sup>1,2</sup>, R.Ishikawa<sup>3</sup>, S.Miki<sup>1</sup>, H.Nomura<sup>1,2</sup>, Y.Suzuki<sup>1,2</sup>

(Osaka Univ.<sup>1</sup>, CSRN-Osaka<sup>2</sup>, ULVAC, Inc.<sup>3</sup>)

## はじめに

近年、ブラウンian計算機や確率 bit (p-bit) デバイスのようにランダム性や確率的な特性を利用した計算機の研究が進められている。これらの系では情報が伝搬する様子が必ずしも明瞭ではないため、それらの定量評価が重要である。そこで、我々は移動エントロピー<sup>1)</sup>に着目した。移動エントロピーは2つの確率的な時系列データ間の情報の伝搬を表す。さらに、その緩和時間から情報が保持される時間を評価できる。このような確率的なふるまいを固体中かつ室温で観察できる系の一つにスキルミオンがある。スキルミオンはトポジカルに安定な粒子状のスピンの構造である。さらに、スキルミオン同士が持つ斥力相互作用を利用し、多数のスキルミオンを用いた演算や情報伝達の実現が期待されている。本研究では、正方形の箱に閉じ込めた2つのスキルミオンのブラウン運動の様子から移動エントロピーとその緩和時間を評価した。

## 解析方法

サンプル構造は SiO<sub>2</sub> 基板[Ta (5.0 nm)|Co<sub>16</sub>Fe<sub>64</sub>B<sub>20</sub> (1.26 nm)|Ta (0.23 nm)|MgO (1.5 nm)|SiO<sub>2</sub> (3.0 nm)]である。さらに正方形のパターンで SiO<sub>2</sub> (0.5 nm) を追加成膜すると、パターンの形にスキルミオンが閉じ込められる<sup>2)</sup>。Fig.1 は磁気光学カー効果顕微鏡にて観察した、箱に閉じ込められた2つのスキルミオンである。黄線はブラウン運動するスキルミオン A の位置の軌跡を表す。この軌跡を2値の時系列データとして用い、得られた確率分布から移動エントロピーを評価した。

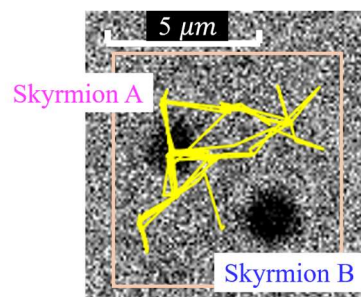


Fig.1, The moving trajectory of skyrmion A

## 解析結果

Fig.2 は時間経過に対する移動エントロピーを片対数表示した図である。桃点(青点)は、 $n-j$ ステップ目のスキルミオン A(B)から $n$ ステップ目のスキルミオン B に流れた移動エントロピーを表す。 $a_{n-j}$  ( $b_{n-j}$ ) はスキルミオン A(B)の位置の確率変数を、 $n, j$  は離散時間を表す。茶点は相関の無い2つの乱数列から求めた移動エントロピーを表し、雑音等価信号に相当する。 $b_{n-j} \rightarrow b_n$ の移動エントロピーは時間経過と共に減衰し、一方、 $a_{n-j} \rightarrow b_n$ の移動エントロピーはピークを持つ。これは情報伝達にかかる時間遅れを表現している。また、各結果に対する移動エントロピーの緩和時間は1秒程度のオーダーであり、スキルミオンが情報を保持できる時間がわかった。本研究は JSPS 科研費 JP20H05666 と JST、CREST、JPMJCR20C1 の助成を受けた物である。

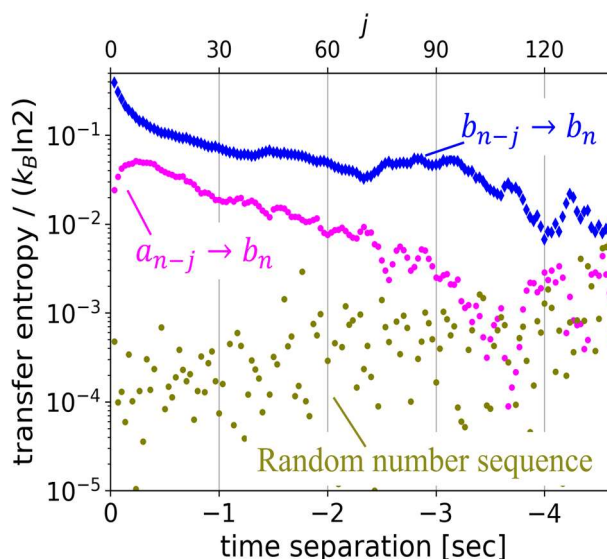


Fig.2, The transfer entropy between skyrmion A and skyrmion B

## 参考文献

- 1) T. Schreiber, *Phys. Rev. Lett.* **85**, 461 (2000)
- 2) Y. Jibiki *et al.*, *Appl. Phys. Lett.* **117**, 082402 (2020)

# 傾斜電界によるスキルミオンの分布と運動の制御

石川諒、後藤穰\*、野村光\*、鈴木義茂\*  
(アルバック協働研、\*阪大基礎工、\*阪大 CSRN)

Control of distribution and motion of skyrmions by sloped electric field

R. Ishikawa, \*M. Goto, \*H. Nomura, \*Y. Suzuki  
(ULVAC Inc., \*Osaka Univ., \*CSRN-Osaka)

## 研究背景

スキルミオンはトポロジカルに保護された磁極粒子であり、固体中に安定に存在する<sup>1,2)</sup>。スキルミオンは次世代の情報担体としての応用が期待されており、スキルミオンを利用したレーストラックメモリ<sup>3)</sup>やロジック<sup>4)</sup>が提案されている。これらの応用とは別に、スキルミオンが固体中でブラウン運動する性質を利用した確率的計算や省エネルギー計算といった応用も提案されている。我々のグループでは磁性連続膜上でスキルミオンを任意の位置に閉じ込める回路<sup>5)</sup>やブラウン運動するスキルミオン間の反発的な相互作用を利用したセルラーオートマトン型素子<sup>6)</sup>などをこれまでに開発してきた。ブラウン運動するスキルミオンを利用した計算機において、情報の入力部分にはスキルミオンの運動を外部から制御する方法が必要である。本研究では、スキルミオンが生じる接合上に配置した電極に電流を流し、電極内の電圧降下により傾斜した電界を生じさせることでスキルミオンを外部から制御する手法を実験的に検討した。

## 実験方法

スパッタリング法により Ta/CoFeB/Ta/MgO/SiO<sub>2</sub> 接合を作製した。この接合に追加で SiO<sub>2</sub> を 50 nm 成膜し、その上に電極を形成した。Fig.1 に示すように電極は 100 nm の厚い Ru 層と 2 nm の薄い Ru 層から成る。面内方向に電流を流すとき、二つの電極間には電位差が生じている。この電位差により、傾斜した電界が形成される<sup>7)</sup>。2つの電極間に電圧をかけながら 2 nm の Ru 電極下の磁気構造を磁気光学カー効果(MOKE)顕微鏡により観察することで、傾斜電界下における磁壁構造およびスキルミオンの分布と運動について調べた。

## 実験結果

Fig. 2 はスキルミオンの運動を MOKE 顕微鏡により観察した像である。Fig. 2(a)は電圧をかける前の像であり、スキルミオンは等方的に分布している。Fig. 2(b)、(c)および(d)はそれぞれ、シグナル(s)側に +5.5 V の電圧をかけてから 0.5 秒、1.5 秒および 5.0 秒後の像である。スキルミオンの分布は徐々に右側に偏っていき、5.0 秒後には観察視野内にスキルミオンはほぼ存在しなくなっている。これは、傾斜した電圧により垂直磁気異方性の傾斜が形成されることで、スキルミオンが安定して存在する領域が変化すると同時に、垂直磁気異方性の傾斜に沿ってスキルミオンがブラウン運動により移動しているためであると考えられる。電圧の極性を切り替える実験等を含めて講演当日は報告する。

本研究は、JSPS 科研費 20H05666、及び JST、CREST、JPMJCR20C1 の助成を受けたものである。

## 参考文献

- 1) T. H. R. Skyrme, Nucl. Phys. **31**, 556 (1962)
- 2) U. K. Röbner, *et al.*, Nature **442**, 797 (2006)
- 3) A. Fert, *et al.*, Nat. Nanotechnol. **8**(3), 152 (2013).
- 4) X. Zhang, *et al.*, Sci. Rep. **5**, 9400 (2015).
- 5) Y. Jibiki, *et al.*, Appl. Phys. Lett. **117**, 082402 (2020)
- 6) R. Ishikawa, *et al.*, Appl. Phys. Lett. **119**, 072402 (2021)
- 7) H. Kakizakai *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. **56** 050305 (2017)

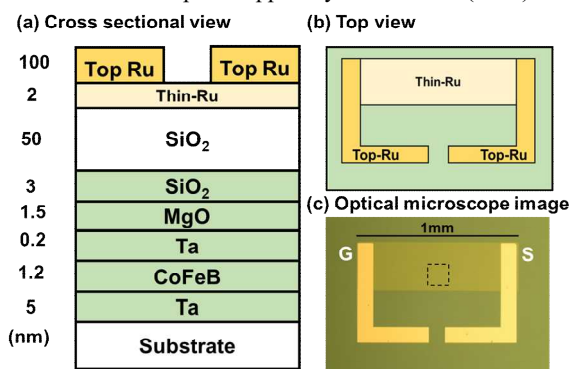


Fig. 1 (a) Cross sectional view and (b) top view of sample configuration (c) Optical microscope image of the sample

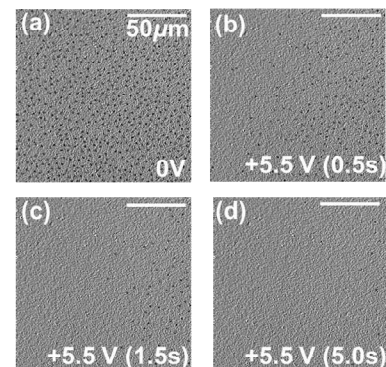


Fig. 2 MOKE microscope images of the sample with applying (a)0V or (b)~(d) +5.5 V (b), (c) and (d) show MOKE images 0.5 s, 1.5 s and 5.0 s after applying +5.5 V respectively. Observed region is indicated by dashed square in Fig. 1(c).

## 磁気スキルミオンのブラウン運動を用いた 同期回路素子のシミュレーション

三木颯馬、石川諒\*、田村英一、野村光、後藤穰、鈴木義茂  
(阪大基礎工、阪大 CSRN、\*アルバック協働研)

Micromagnetic simulation of the conservative-join circuit  
operated by the Brownian motion of skyrmions

S. Miki, R. Ishikawa\*, E. Tamura, H. Nomura, M. Goto, Y. Suzuki  
(Osaka Univ., CSRN-Osaka, \*ULVAC, Inc.)

### はじめに

磁性薄膜中に発現する磁気スキルミオンはトポロジカルに安定なスピン構造で粒子としてふるまい、電流やエネルギー勾配、熱揺動などで駆動できることから磁気メモリや確率計算機などへの応用が期待されている。スキルミオンは固体中でありながら液体中同様のブラウン運動をすることから、我々はスキルミオンをトークンとしたブラウン計算機<sup>1)</sup>への応用を目指している。このブラウン計算に必要な3つの回路素子のうち Hub と Ratchet の2つに対しては既にその動作を確認した<sup>2,3)</sup>。しかしながら2つの同時入力に対し2つの出力を行う同期回路素子の Conservative-join (C-join)は実証されていない。本研究ではスキルミオンを用いたブラウン計算機の実現に向けて、マイクロマグネティックシミュレーションによる C-join 回路の動作確認を目的とする。

### シミュレーション方法

シミュレーションは室温 (300K) を仮定して行う。磁気異方性エネルギー障壁によって描かれた回路中にスキルミオンを閉じ込め<sup>2,3)</sup>、回路中に小さなエネルギー差 (ポケット) を導入してスキルミオンの運動をコントロールする、Fig. 1(a)。出力となるスキルミオンを待機させるため出力回路に浅いエネルギーポケットを設定し、さらにスキルミオン間に働く反発相互作用を大きくし待機させたスキルミオンが発出できるよう入力ポケットのエネルギーを調節する。

### シミュレーション結果

Fig. 1(b)は 130 ns 経過後のシミュレーション結果である。入力を担う2つのスキルミオンがブラウン運動により回路を探索した後、エネルギーポケットに落ち、入力スキルミオンが膨張する。その後待機している2つのスキルミオンが入力スキルミオンとの反発相互作用によりエネルギーポケットから発出される。発出された後、入力スキルミオンを電圧印加により消去し、回路を初期化する。また、入力スキルミオンが1つの場合では反発相互作用が小さいために、待機しているスキルミオンは発出されないことを確認した。本発表では実験における、本素子を実現するために必要な要素技術についても議論する。本研究は株式会社アルバック、JSPS 科研費 20H05666、及び JST、CREST、JPMICR20C1 の助成を受けたものである。

### 参考文献

- 1) J. Lee, and F. Peper, ACRI, Ascoli Piceno (2010)
- 2) Y. Jibiki, **S. Miki**, et al. *Appl. Phys. Lett.* **117**, 082402 (2020)
- 3) **S. Miki**, et al. JSAP Spring meeting, Kanagawa (2022).

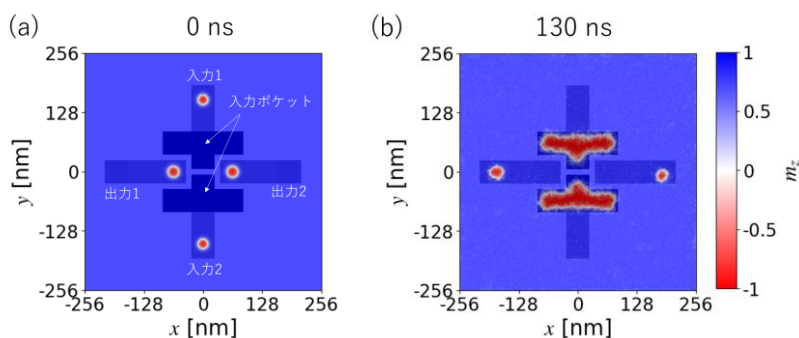


Fig. 1 Simulating condition and simulation results. (a) circuit design of C-join. Deep blue region shows the circuit to confine the skyrmions. (b) simulation results.

# 講演取消