

磁気スキルミオンブラウン素子の開発*

石川諒^{*1}・後藤穰^{*2}・野村光^{*2}・鈴木義茂^{*2}

Development of Skyrmion Brownian Devices

Ryo ISHIKAWA^{*1}, Minori GOTO^{*2}, Hikaru NOMURA^{*2} and Yoshishige SUZUKI^{*2}

^{*1}Future Technology Research Laboratory, Research & Development HQ, ULVAC, Inc., 2-1 Yamadaoka, Suita, Osaka 565-0871, Japan

^{*2}Graduate School of Engineering Science, The University of Osaka, 1-3 Machikaneyama-cho, Toyonaka, Osaka 560-8531, Japan

Magnetic skyrmions are vortex-like spin textures that are stabilized due to topological protection and exhibit Brownian motion in solids. Owing to the high applicability of skyrmions in Brownian motion as an information carrier, it is expected to be applied to unconventional computers such as probabilistic and Brownian computing. Some work on how to control the Brownian motion of skyrmions is introduced in this manuscript.

1. はじめに

IoTや5Gなどにより進展するスマート社会化は持続可能な社会の基盤となることが期待されると同時にコンピュータにおける電力需要の増加を引き起こすことが懸念される。ゆえにコンピュータの高速化、小型化および省電力化などの革新は常に求められている。これらの革新を実現するための研究分野にスピントロニクスがある。現在の電子デバイスは電子が有する電荷を情報の保持や輸送の担い手として用いているが、これに対して電子が有するスピンの情報を付与することでデバイスの性能を向上させることが期待でき、様々な研究が行われている。スピンを利用した新たなデバイスにおける情報の担い手（情報担体）の研究対象のひとつに磁気スキルミオン（以下、スキルミオンとよぶ）がある。スキルミオンはトポロジカルに保護された渦状の磁気構造であり^{1,2)}、固体中でスピン秩序が伝播することで移動する。このスキルミオンに情報を持たせる応用研究が世界的に行われている。スキルミオンを情報担体として利用する例としてレーストラックメモリ³⁾やロジック⁴⁾がある。これらの応用は電流を利用しスキルミオンを駆動することでスキルミオンを運び、情報を処理する。それとは異なり、熱によるスキルミオンの運動を利用することも提案されている。スキルミオンは環境の熱によりブラウン運動を

示すことが知られており^{5,6)}、この性質を使えば超低消費電力コンピューティングやゆらぐ状態を利用した確率的なコンピューティングへの応用が期待できる。我々の研究グループではブラウン運動を示すスキルミオンを利用した新原理コンピューティングに向けてスキルミオンの制御手法を開発している。これまで、スキルミオンの制御は主に電流によって行われてきたが電流による手法はジュール熱の散逸を伴うために究極の省エネルギー化には不向きである。そこで本研究では電圧によるスキルミオンの制御を試みた。電圧によるスキルミオンの制御を含む最近の主な成果について本稿では紹介する。

2. スキルミオンによる情報の表現

スキルミオンの制御手法について紹介する前に、スキルミオンによる情報の表現について説明する。スキルミオンによる情報の表現はFig.1 (a) に示すようなスキルミオンの有無により状態を定義するものとFig.1 (b), (c) に示すようなスキルミオンの位置や配列を利用して情報を表すものがある。特に後者はスキルミオンのブラウン運動による状態の変化が起こりうるため新原理コンピューティングへの応用上重要な情報表現の手法である。

3. ブラウン運動を示す磁性多層膜の作製

スキルミオンが出現する磁性多層膜はマグネトロンスパッタリング法により室温で成膜された。多層膜構造はFig.2 (a) に示す通りであり、Co-Fe-B層とMgO層の間に挿入するTa層の膜厚をサブナノメートル単位で調整することにより垂直磁気異方性を制御し、必要

*Appl. Phys. Lett. **117**, 082402 (2020), Appl. Phys. Lett. **119**, 072402 (2021), Appl. Phys. Lett. **121**, 252402 (2022), 磁気学会会報 まぐね, **18**, 5 (2023) にて発表

^{*1} (株)アルバック 開発本部 未来技術研究所
(〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-1)

^{*2} 大阪大学大学院基礎工学研究科
(〒560-8531 大阪府豊中市待兼山町1-3)

な温度範囲でスキルミオンが出現する試料を得た。
Fig.2 (b) は磁気光学カー効果顕微鏡 (Magneto Optical Kerr Effect, MOKE顕微鏡) で磁性多層膜の積層方向

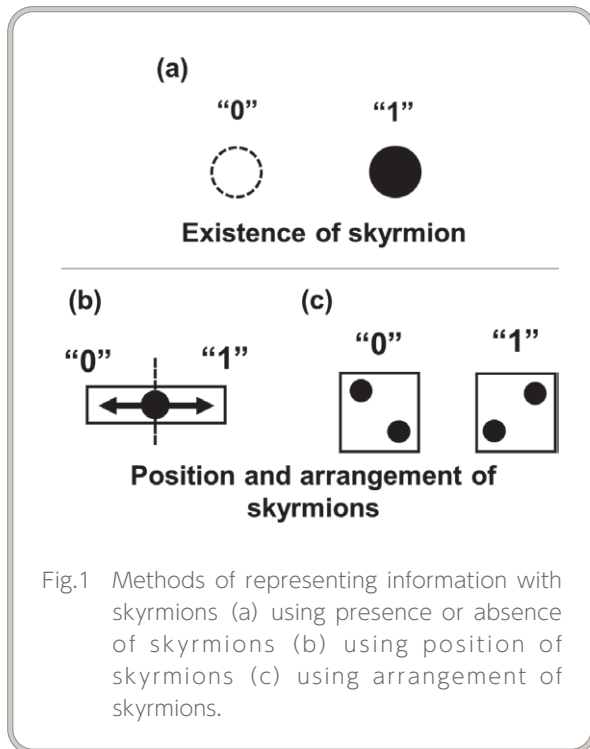


Fig.1 Methods of representing information with skyrmions (a) using presence or absence of skyrmions (b) using position of skyrmions (c) using arrangement of skyrmions.

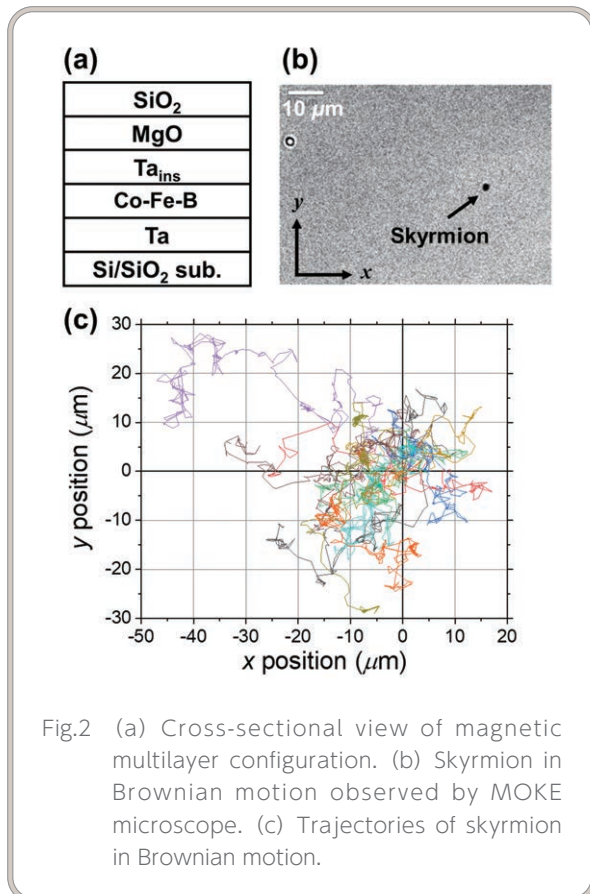
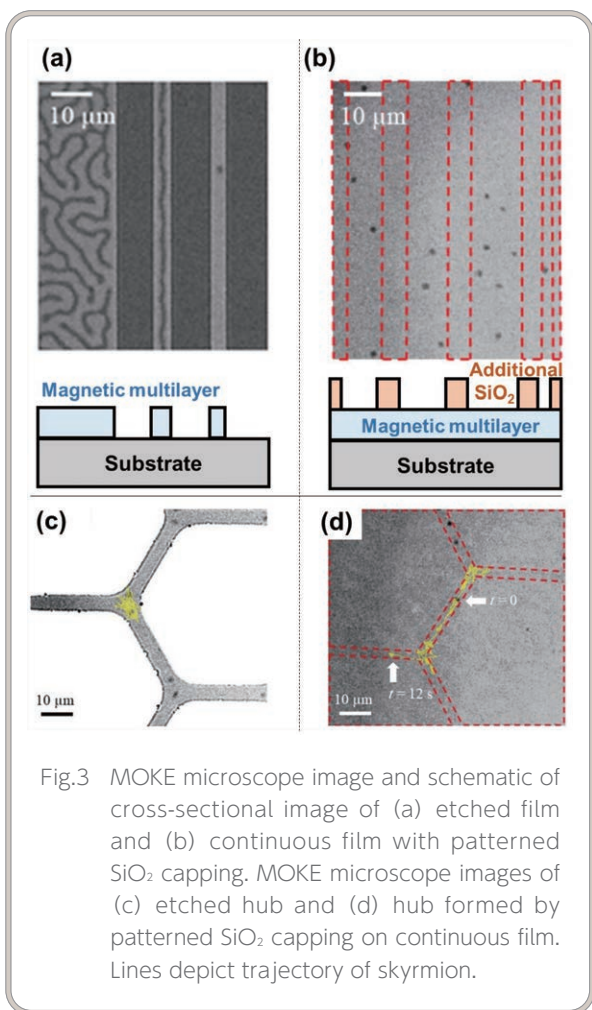


Fig.2 (a) Cross-sectional view of magnetic multilayer configuration. (b) Skyrmion in Brownian motion observed by MOKE microscope. (c) Trajectories of skyrmion in Brownian motion.

に垂直に外部磁場をかけながら磁気構造を観察したものであり、1～2 μmの大きさの黒い点がスキルミオンである。このスキルミオンはブラウン運動しており、Fig.2 (c) はスキルミオンのブラウン運動の軌跡を示している。スキルミオンのブラウン運動の活発さを示す拡散係数は10 μm²/s程度であった。この値は他の研究グループ^{5,7)}よりも大きな値である。このことは室温で成膜された磁性層がアモルファス状態でありピンングが少ないことに起因していると考えられる。

4. スキルミオン回路の形成

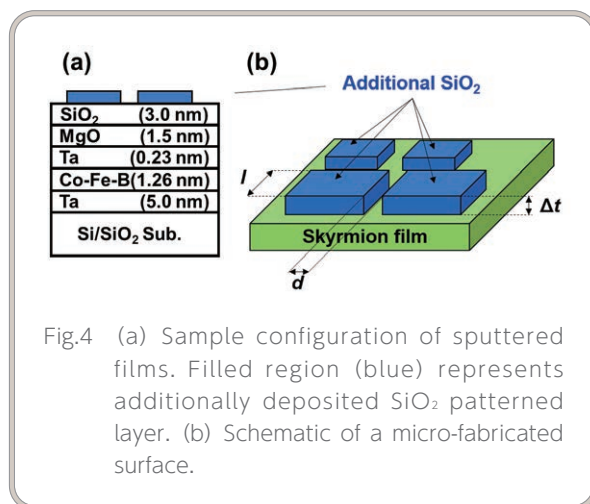
ブラウン運動するスキルミオンを情報担体として利用し、デバイスを作製するためにはスキルミオンを任意の場所に出現させたり、輸送させたりできる回路が必要となる。地引ら⁸⁾は磁性体多層膜をワイヤ状にエッチングして回路を形成する方法と磁性体多層膜の連続膜上に部分的にキャップSiO₂層を形成する方法の二つの方法によりスキルミオン回路を作製し、それぞれにおけるスキルミオンのブラウン運動の様子を比較した。Fig.3 (a) はエッチングにより磁性体多層膜をワイヤ状に加工する方法で作製したスキルミオン回路である。ワイヤを形成することでスキルミオンを通す回路（スキルミオンチャネル）を実現できる。しかし、磁性体ワイヤによる方法では、ワイヤ幅が狭いときにスキルミオンの安定性が失われる点やFig.3 (c) に示すような分岐回路（ハブ回路）においては分岐部分にスキルミオンがトラップされるといった問題点があることがわかった。そこで、連続な磁性多層膜上に部分的にSiO₂層を追加成膜することによりスキルミオンをチャネル内に閉じ込めることを試みた。この方法では、Fig.3 (b) に示すように、SiO₂が存在しない部分にのみスキルミオンが出現し、ブラウン運動することが確認された。つまり、部分的にSiO₂を追加成膜する方法でも、エッチングにより磁性体ワイヤを形成する方法と同様にスキルミオンの回路が形成できているといえる。これは、連続膜上に部分的に堆積されたSiO₂により下層の磁性膜の磁化特性が変化することでスキルミオンが感じるポテンシャルが変化するためであり、磁性膜の歪みがその変化の起源である可能性が考えられるが、詳しくは確認されていない。一方で、磁性体ワイヤによる方法とは異なり、Fig.3 (d) に示すハブ回路をSiO₂の追加成膜により形成すると、スキルミオンは分岐部分にトラップされず、スムーズにブラウン運動することが示された。これは、追加成膜による方法の場合には、磁性体ワイヤを形成した場合に生じる不均一な双極子磁場による強いピンングが生じないためで



ある。以上の結果からスキルミオンによりデバイスを作製するときには、連続膜上に部分的に薄膜を堆積する手法を用いることでブラウン運動を妨げないスキルミオン回路が形成可能であると結論付けられる。

5. スキルミオンによる セルラーオートマトン型素子の作製

上述した連続膜上に部分的にSiO₂を追加成膜する手法を利用した情報素子として、量子ドットセルラーオートマトンを模したスキルミオン素子を作製した。量子ドットセルラーオートマトンは四隅に量子ドットが配置された正方形のセルを利用した素子である。このセル内の量子ドットに二つの電子を閉じ込める場合、電子同士のクーロン斥力により二つの電子は最も距離をとれる対角位置をとり、二種類の配列（右上と左下のペアと左上と右下のペア）が最安定となる。この電子に占有された量子ドットの配列をFig.1 (c) に示すように2進数の「0」と「1」と定義することで量子ドットセルラーオートマトンはビットを表現する。また、



このセルを複数並べることでセル内だけではなく、セル間の情報伝達を実装することが可能である⁹⁾。この量子ドットセルラーオートマトンを模して、スキルミオンセルラーオートマトン素子を作製することを目指した。Fig.4に示すようにスキルミオンが出現する磁性多層膜の表面に微細加工により正方形のSiO₂が追加成膜された領域を形成した。Fig.4 (b) に示す l 、 d および Δt はそれぞれ正方形の一辺の長さ、正方形間の距離および追加成膜するSiO₂の厚さを示している。Fig.5は、MOKE顕微鏡を用いて観察した磁気構造を示しており、Fig.4で示した正方形の追加成膜領域のサイズ l は3.1~10.3 μm である。測定は室温(295 K)、空气中、外部垂直磁場0.25 mTで行った。SiO₂が追加成膜された領域では、直径1~2 μm のスキルミオンが出現し、 l が大きくなるにつれて正方形内に出現するスキルミオンの数が増加した。つまり、適切な大きさの正方形を作製することで、スキルミオンの数を制御することができるといえる。セルラーオートマトン型の計算では、2個のスキルミオンが正方形内に閉じ込められる必要があるため、今回の条件では $l=6.2$ μm が適切である。追加成膜厚 Δt に関しては、0.5 nm以下とすることで正方形の領域内外に磁区を形成せずにセルを形成可能であることがわかった⁹⁾。Fig.6 (b) は $l=6.2$ μm 、 $d=3.1$ μm 、 $\Delta t=0.2$ nmとした素子のMOKE顕微鏡観察像である。図からわかるようにそれぞれのセル内にスキルミオンのペアが閉じ込められており、スキルミオンセルラーオートマトンとして動作することが期待される。この実験ではFig.3 (b), (d) の実験とは異なり、追加成膜した部分にスキルミオンが生じている。これは、スキルミオン相が出現する条件が追加成膜により磁性膜が受ける影響のみに因るのではなく、Co-Fe-B層の垂直磁気異方性の程度や測定温度などにも依存するためであり、サ

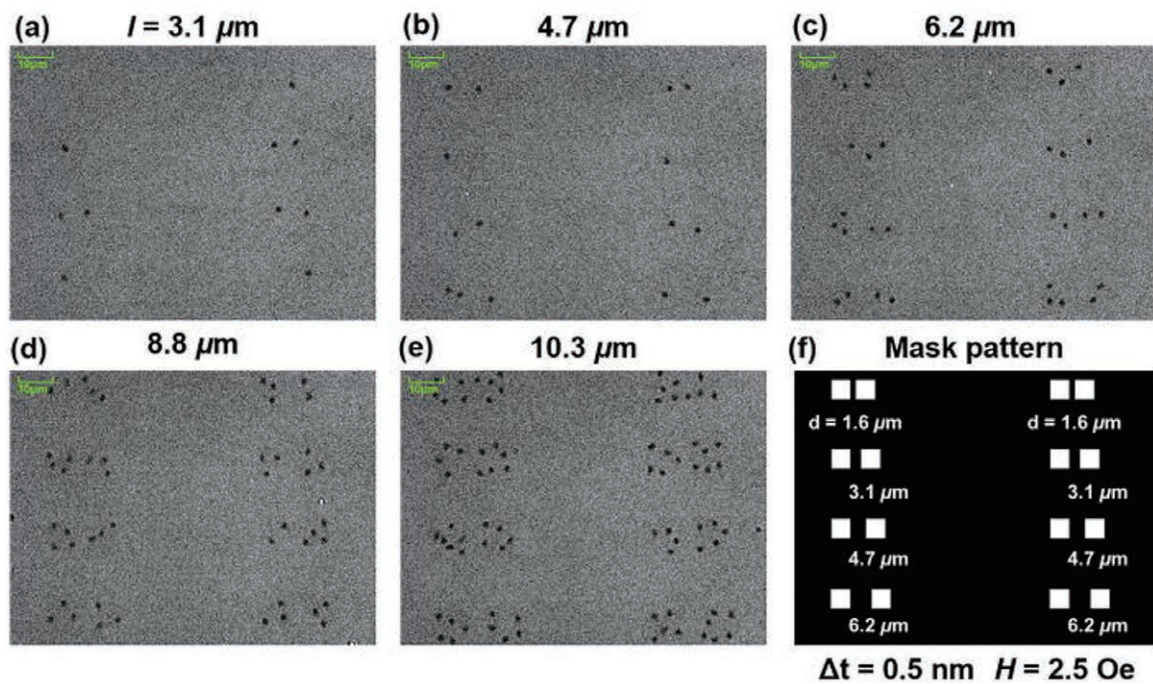


Fig.5 Square size (l) dependence of a magnetic structure. Thickness of the additional SiO_2 (Δt) and the external magnetic field were fixed at 0.5 nm and 0.25 mT, respectively.

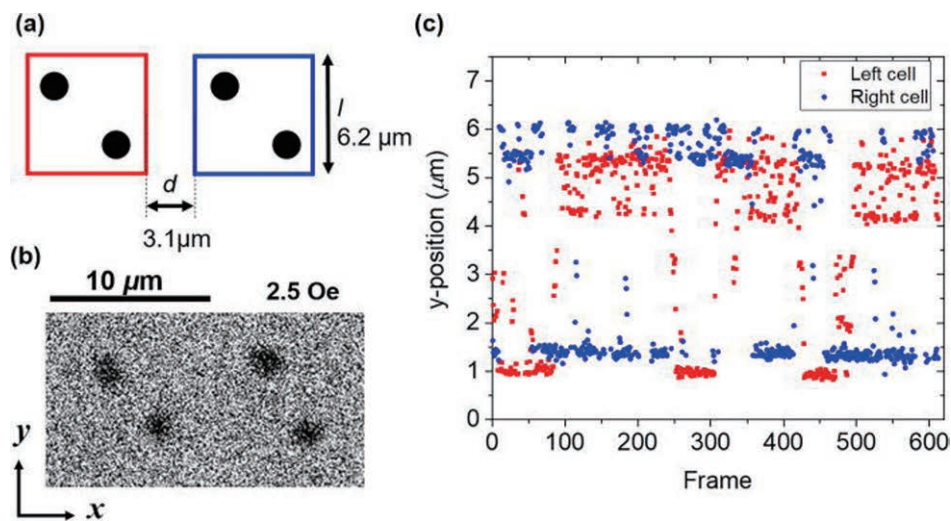


Fig.6 (a) Schematic of designed dimension. (b) MOKE microscope image of neighbored two squares confining two skyrmions. (c) Time-dependent y -position of two skyrmions that are nearest to the gap confined in the left (red) and right (blue) cells.

サンプルの作製条件と測定条件によっては追加成膜した部分においてスキルミオン相が安定することもあるためである。Fig.6 (c) は左右のセルに閉じ込めたブラウン運動するスキルミオンのうちギャップに近いものの y 座標を時間に対してプロットしたものである。赤の

プロットは左の正方形におけるギャップに近いスキルミオン、青のプロットは右の正方形のギャップに近いスキルミオンの y 座標をそれぞれ示している。このグラフから、左の正方形のスキルミオンが上に上がったとき、右の正方形のスキルミオンが下に下がっている

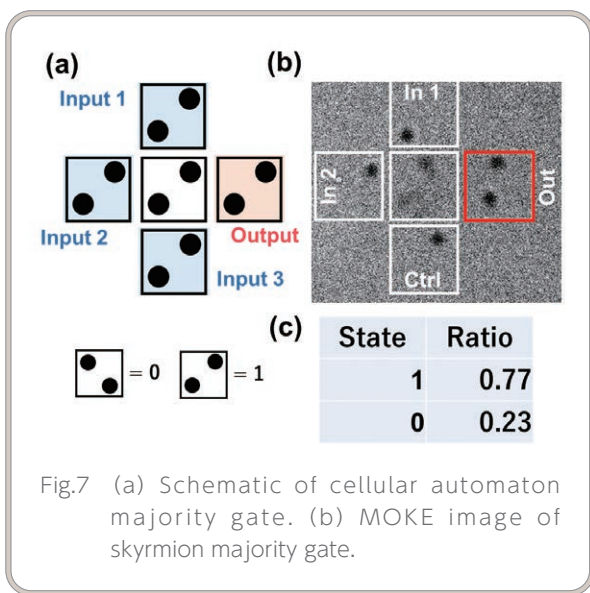


Fig.7 (a) Schematic of cellular automaton majority gate. (b) MOKE image of skyrmion majority gate.

ように、y座標が入れ替わるような挙動が見られた。この二つの座標の相関係数を計算すると、 -0.23 となり、負の相関を持つことが明らかになった。この結果は左右の正方形間でスキルミオンが反発しあうことで、情報が伝達する可能性を示唆している。ブラウン運動するスキルミオンを利用してゼロエネルギーで情報を処理する可能性を検証するために、量子ドットセルラーオートマトンで提案された多数決回路 (Fig.7 (a))

を模した素子 (Fig.7 (b)) を作製した。作製した素子の三つのInput部分はスキルミオンの大きさとほぼ同じ大きさの正方形領域を用いることでスキルミオンをブラウン運動しないようにしており、固定入力として働く。中央のセルと右側のOutput部分はFig.6 (a)と同じ、 $6.2 \mu\text{m}$ の正方形領域を形成してある。この素子では三つのInputすべてに「1」を入力しているためOutputが1となるのが正しい答えである。実際にOutput部分における二つのスキルミオンの相対的な位置から各時間における状態を決定すると全時間のうち「1」状態が占める割合が 0.77 となり確率的に正しい答えが得られることが示唆された。上述の二つの実験からスキルミオンのブラウン運動を利用したスキルミオンセルラーオートマトンでは、従来のセルラーオートマトンとは異なり、確率的な動作をすることがわかり、確率的コンピューティングへの応用が期待される。

6. 外部電圧によるスキルミオンの生成消滅とスキルミオン間相互作用による位置制御

スキルミオンのブラウン運動を利用することで情報の伝達や演算を行える可能性を示してきたが、確率的コンピューティングや超低消費電力コンピューティングへの応用には外部からの情報入力手法が不可欠であ

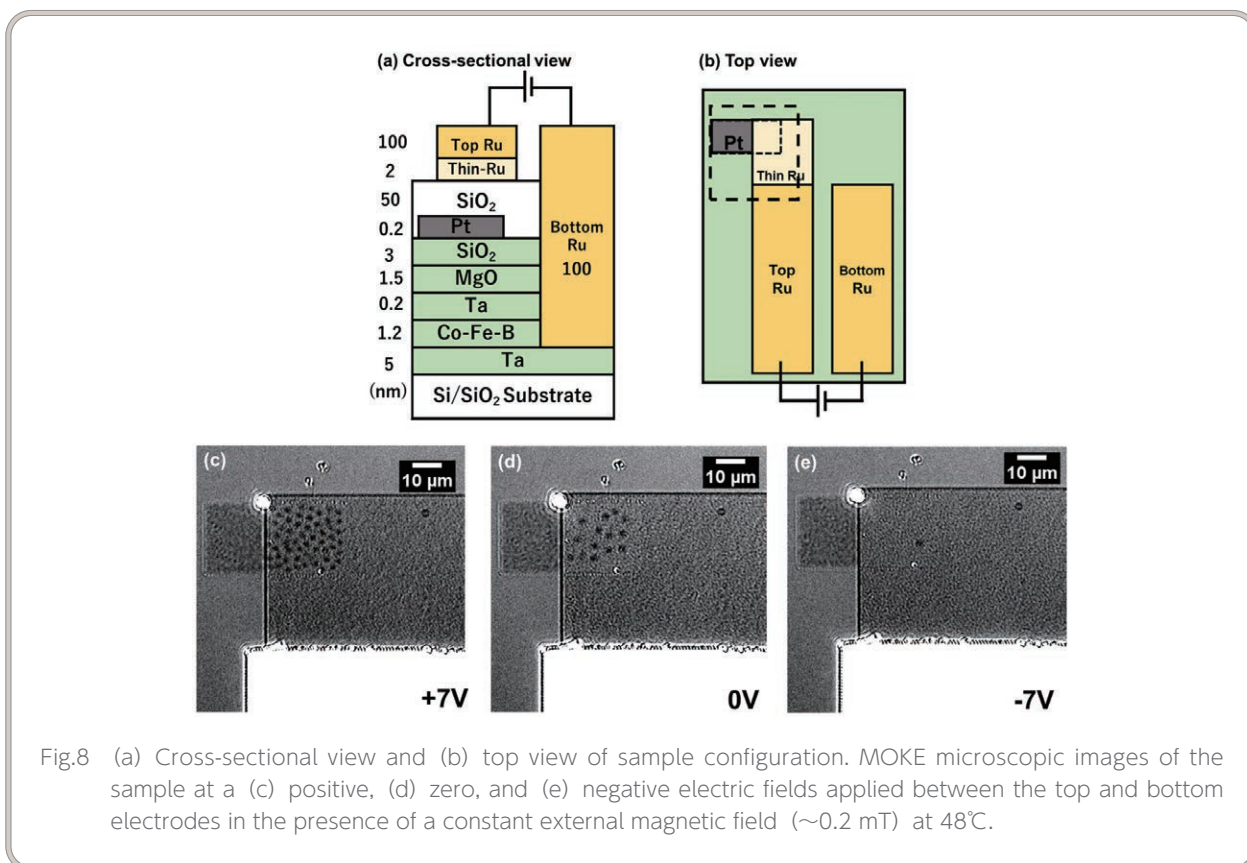


Fig.8 (a) Cross-sectional view and (b) top view of sample configuration. MOKE microscopic images of the sample at a (c) positive, (d) zero, and (e) negative electric fields applied between the top and bottom electrodes in the presence of a constant external magnetic field ($\sim 0.2 \text{ mT}$) at 48°C .

る。そこで、本研究では、電圧によりスキルミオンを生成し、そのスキルミオンを使って外部のブラウン運動するスキルミオンの位置に影響を与えることが可能かどうか検証した。素子構造をFig.8 (a), (b) に示す。上述したスキルミオンが出現する多層膜をRuの電極で挟んだ構造となっており、スキルミオンを閉じ込める回路の部分には0.2 nmの極薄いPtをかぶせてある。この構造を用いることにより、電圧をかけながらその直下をMOKE顕微鏡により観察できる。Fig.8 (c), (d), (e) はおよそ0.2 mTの外部磁場をかけた状態で、素子に電圧をかけたときのMOKE顕微鏡観察像である。

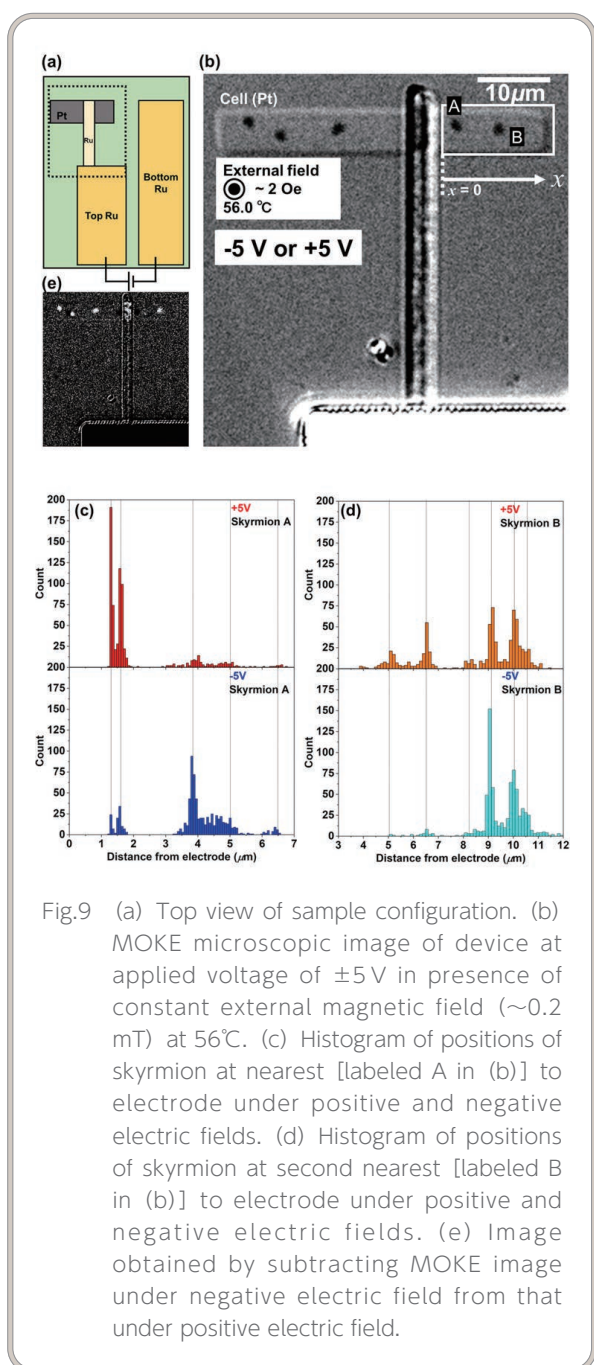


Fig.9 (a) Top view of sample configuration. (b) MOKE microscopic image of device at applied voltage of ± 5 V in presence of constant external magnetic field (~ 0.2 mT) at 56°C . (c) Histogram of positions of skyrmion at nearest [labeled A in (b)] to electrode under positive and negative electric fields. (d) Histogram of positions of skyrmion at second nearest [labeled B in (b)] to electrode under positive and negative electric fields. (e) Image obtained by subtracting MOKE image under negative electric field from that under positive electric field.

電圧が正から負に変化するにつれて、スキルミオンの密度が減少する様子が確認された。この変化は電圧により垂直磁気異方性に変調されることでスキルミオン相の安定性が変化したためと考えられる。次に、電圧によるスキルミオンの生成消滅を利用して、他のスキルミオンの位置を制御できるかどうか検証した。Fig.9 (a) に示すように電極を細くした素子を作製した。作製した素子に外部磁場を印加することで電極のない部分にスキルミオンを出現させたときのMOKE顕微鏡観察像がFig.9 (b) である。この実験ではスキルミオンを閉じこめた回路のうち電極の右側の領域 (Fig.9 (b) の白い四角で示された領域) に存在する二つのスキルミオンに注目した。+ 5 Vおよび- 5 Vを素子に印加した状態で25秒間ずつスキルミオンのブラウン運動を観察し、それぞれの位置を調べた。電極の右側端を $x = 0$ として、スキルミオンが占有した位置をヒストグラムにしたものがFig.9 (c) と (d) である。+ 5 Vの電圧が印加されているとき、より電極に近いスキルミオンAの平均位置は電極から $2.4\ \mu\text{m}$ の位置である。一方で、- 5 Vの電圧を印加した場合には $4.0\ \mu\text{m}$ が平均位置となっている。この距離の違いは、- 5 Vを印加した場合に電極の下にスキルミオンが生成されることで、電極のない部分のスキルミオンと磁気双極子相互作用により反発することで生じていると考えられる。実際に、+ 5 V印加中のMOKE顕微鏡観察像から- 5 V印加中のMOKE顕微鏡観察像を差し引くと、Fig.9 (e) のようになっており、負の電圧をかけた場合に周囲に存在するスキルミオンと同じ磁化の向きを持つ領域が形成されていることがわかる。この結果は電圧により生成したスキルミオンを利用することで、磁気双極子相互作用を介することで、電極外部のブラウン運動するスキルミオンの位置を変化させられることを示している。

7. 傾斜した電界によるスキルミオンの制御

面内方向に配置された電極により外部からスキルミオンを制御する手法として、磁気異方性の傾斜を形成することでスキルミオンを制御することを目指した研究を紹介する。傾斜した磁気的なポテンシャル下における磁壁移動速度の変化¹⁰⁾ についてはすでに調べられているが、ブラウン運動するスキルミオンの傾斜したポテンシャル下での振る舞いは調べられていない。Fig.10 (a), (b) は傾斜したポテンシャルを形成するための素子構造であり、極薄いRuの両端に厚いRuの電極を配置してある。Fig.10 (c), (d) は極薄Ru電極下の磁気構造のMOKE顕微鏡観察像であり、それぞれ0 Vと10 Vの電圧をFig.10 (b) のシグナル (S) 側に

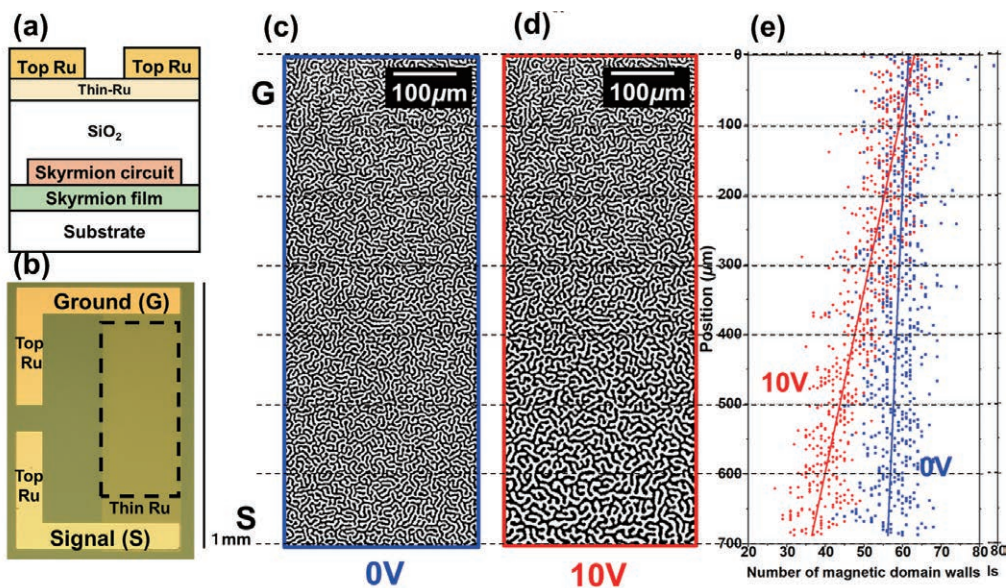


Fig.10 Cross-sectional and (b) top view of sample configuration. MOKE microscope observation by applying (c) 0 V and (d) +10 V between signal and ground electrode shown in (b). Position dependence of the numbers of magnetic domain wall in (c) and (d).

印加している。図から、電圧をかけた場合に迷路状磁壁の幅が端子間で徐々に変化していることが確認できる。この磁壁幅の変化を可視化するために、各画像を縦方向にスライスし、磁壁の数をカウントした。磁壁の幅が広いほど磁壁の数は減少することが予想される。Fig.10 (e) はその磁壁の数の画像水平方向の位置依存性であり、図中の直線は各電圧における磁壁の数の直線フィットである。電圧を大きくするにつれて、磁壁の数が減少しており、グランド側からシグナル側に向けての磁壁幅が広がっていることを示している。磁壁の幅は垂直磁気異方性が強いほど広がるため、今回作製した素子では正の電圧を面直方向にかけた場合に垂直磁気異方性が増強されることが明らかになった。また、磁壁幅が徐々に変化していることから垂直方向に傾斜した電圧を形成できているといえる。Fig.11は傾斜したポテンシャル下におけるスキルミオンの分布変化を観察したものであり、電圧を印加し始めた時点と比べて、時間が経過するとともに観察像の下側から上側にスキルミオンが移動していく様子が観察された。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。この手法はFig.1に示したスキルミオンの位置や配列により情報を表現することに応用可能である。

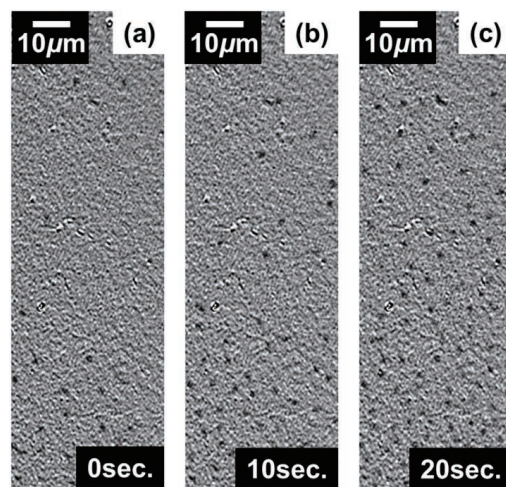


Fig.11 MOKE image showing the change of distribution of skyrmions. (a) initial state (b), (c) after 10 and 20 second applying voltage.

8. まとめ

ブラウン運動するスキルミオンによる新原理コンピューティング（確率的コンピューティングや超低消費電力コンピューティング）に向けたスキルミオンの制御手法に関する研究について紹介した。スキルミオン

回路の形成と電圧制御手法を開発することにより、ス
キルミオンの熱による確率的な振る舞いを新しいコン
ピューティングへ利用するための土台が形成されてき
ている段階である。今後はここで紹介した手法を用い
た情報素子を作製することで、ブラウン運動を利用す
ることによる省エネ性や確率的計算能力などを評価し
ていく必要がある。

文 献

- 1) T. H. R. Skyrme, Nucl. Phys. **31**, 556 (1962).
- 2) U. K. Röbler, A. N. Bogdanov, and C. Pfleiderer, Nature **442**, 797 (2006).
- 3) A. Fert, V. Cros, and J. Sampaio, Nat. Nanotechnol. **8** (3), 152 (2013).
- 4) X. Zhang, M. Ezawa, and Y. Zhou, Sci. Rep. **5**, 9400 (2015).
- 5) J. Zázvorka, F. Jakobs, D. Heinze, N. Keil, S. Kromin, S. Jaiswal, K. Litzius, G. Jakob, P. Virnau, D. Pinna, K. E.-Sitte, L. Rózsa, A. Donges, U. Nowak, and M. Kläui, Nature Nanotechnol. **14**, 658 (2019).
- 6) T. Nozaki, Y. Jibiki, M. Goto, E. Tamura, T. Nozaki, H. Kubota, A. Fukushima, S. Yuasa, and Y. Suzuki, Appl. Phys. Lett. **114**, 012402 (2019).
- 7) Le Zhao, Zidong Wang, Xichao Zhang, Xue Liang, Jing Xia, Keyu Wu, Heng-An Zhou, Yiqing Dong, Guoqiang Yu, KangL. Wang, Xiaoxi Liu, Yan Zhou, and Wanjun Jiang Phys. Rev. Lett. **125**, 027206 (2020).
- 8) Y. Jibiki, M. Goto, E. Tamura, J. Cho, S. Miki, R. Ishikawa, H. Nomura, T. Srivastava, W. Lim, S. Auffret, C. Baraduc, H. Bea, and Y. Suzuki, Appl. Phys. Lett. **117**, 082402 (2020).
- 9) C. S. Lent, P. D. Tougaw, W. Porod and G. H. Bernstein, Nanotechnology **4**, 49 (1993).
- 10) H. Kakizakai, K. Yamada, F. Ando, M. Kawaguchi, T. Koyama, S. Kim, T. Moriyama, D. Chiba, and T. Ono, Jpn. J. Appl. Phys. **56**, 050305 (2017).

【謝辞】

以下の方々に感謝いたします（敬称略）。大阪大学大学院基礎工学研究科 田村英一，地引勇磨，田中裕士，堀内遊宇，橋本拳，森弘樹，江本紘太，今西弘人，新村晨文。同大大学院工学研究科 劉超哲，同大大学院理学研究科 谷天太（以上，実験と理論）。情報通信研究機構 Peper Ferdinand（理論），三重大学大学院工学研究科 内海裕洋，伊藤康親（理論），産業技術総合研究所 野崎隆行（MR測定）。東北大学大学院工学研究科大兼幹彦（FMR測定）。京都大学化学研究所 塩田陽一（スパッタリング成膜），DGIST Chun-Yeol You, Jaehun Cho（BLS測定）。本成果はJST CREST（JPMJCR20C1），JSPS若手研究（23K13660），科研費 基盤研究S（JP20H05666），支援を受けたものです。