

表面弾性波によるスキルミオン生成

—発熱を抑えたスキルミオン生成の実現—

東京大学物性研究所 大谷 義近

はじめに

近年、次世代の低消費電力・高密度・不揮発性のメモリ素子の研究が盛んに行われている。その候補の一つが「スキルミオン」と呼ばれる粒子状のスピンの構造である[1]。スキルミオンは、中心のスピンの向きが反対であり、その遷移領域はスピンの向きが連続的に変化した構造をしている。この遷移領域のスピンの向きの変化の仕方が異なるネール型、プロッホ型、アンチ型など様々な型のスキルミオンが存在し、どの型のスキルミオンが安定化するかは、生成される物質の構造によって決まる[2]。

トポロジカル磁気構造をとるスキルミオンは、温度や磁場といった外部からの乱れによって壊れにくく、低電流で発熱を抑えて駆動されることから、スキルミオンを用いた低消費電力・高信頼性素子の実現への期待が高まっている。とりわけ、重金属と磁性金属の積層薄膜では、ジャロシンスキー守谷(DM)相互作用と呼ばれる、隣り合うスピンを傾けようとする相互作用が作用するために、中間部分のスピンの向きが外側を向いた「ネールスキルミオン」が室温以上でも安定化することが明らかになっており、応用の観点から注目を集めている。

一方で、スキルミオンを低消費電力素子に応用するには、スキルミオンの駆動だけでなく、生成の際も発熱を抑える必要がある。しかし、これまでの積層薄膜における電流を用いたスキルミオンの生成方法では、発熱が大きく、これを解決することが課題となっていた。加えてこの方法では、薄膜を特殊な形状に加工する必要があり、薄膜の特定部分でしかスキルミオンが生成されないという問題もあった。

1. 研究方法および結果

本研究では、上述の電流の代わりに「表面弾性波」と呼ばれる物質表面を伝搬する超音波に着目した[3]。表面弾性波は、電場をかけると伸び縮みする圧電材料上に形成されたくし形電極に交流の電場を印加することで、発熱を抑えて励起することができる。また、表面弾性波はミリメートルオーダーという長い距離を伝搬することができる。さらに、表面弾性波による磁性材料のひずみとスピンとの間には、磁気弾性結合と呼ばれる相互作用が存在することから、

表面弾性波によって磁気構造を制御できることが知られている。

まず、図1に示すように白金(Pt)/コバルト(Co)/イリジウム(Ir)積層薄膜を成膜し、表面弾性波を励起するためのくし形電極を持つ素子に加工した。

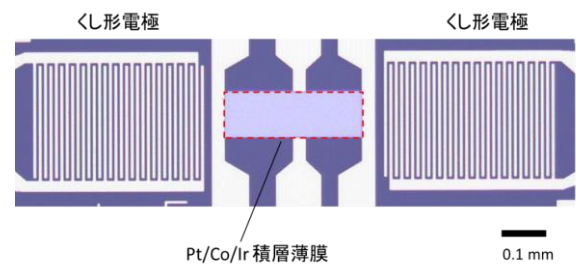


図1 素子構造の顕微鏡像：実験に用いた素子の顕微鏡像。中央の赤の破線で囲まれた部分が Pt/Co/Ir 積層薄膜、両側が表面弾性波を励起するためのくし形電極。

続いて、サーモグラフィカメラを用いて、くし形電極に交流電場を印加することにより表面弾性波を励起したとき、Pt/Co/Ir 薄膜の温度がほとんど上昇しないことを確認した(図2)。

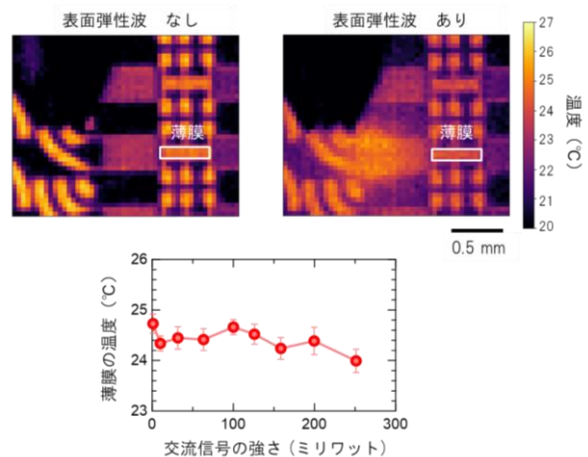


図2 表面弾性波励起による温度上昇：(上)サーモグラフィカメラによって撮影した、表面弾性波を励起する前(左)と励起中(右)の温度の分布。薄膜の領域(白い四角)では温度の変化がほぼないことが分かる。

(下)薄膜領域の平均温度を、表面弾性波を励起する交流信号の強さに対してプロットしたグラフ。交流信号の強さを強くしても、温度がほぼ変わらないことが分かる。

次に、磁気カー顕微鏡を用いて、表面弾性波を励起したときの磁気構造の変化を観察した。図3に示すように、面直方向に磁場をかけて、全てのスピンの同じ方向にそろった強磁性状態を作り、その状態で表面弾性波を励起すると、スキルミオンが生成されることが分かる。

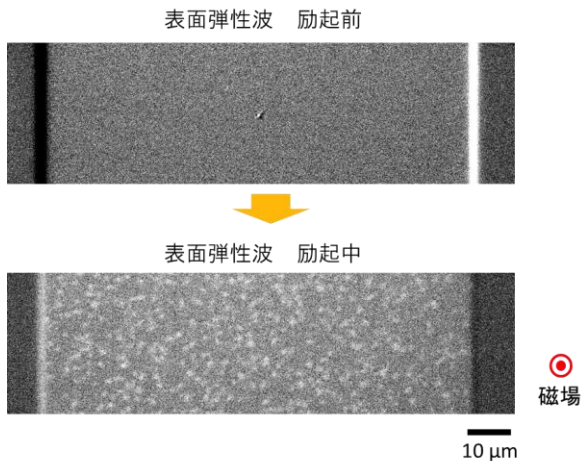


図3 表面弾性波によるスキルミオン生成：カー顕微鏡を用いて撮影した、表面弾性波を励起する前(上)と励起中(下)の磁気構造。一様なグレイの像(上)は強磁性状態を表す。白い斑点(下)がスキルミオンである。磁場は面直方向にかかっている。

さらに、くし形電極にかける交流電場の周波数や強さに対するスキルミオン生成の依存性を詳しく調べることで、観測されたスキルミオンが表面弾性波により生成されることを確認した。興味深いことに、表面弾性波の長い伝搬距離を反映してスキルミオンが数百マイクロメートルにもおよぶ広い領域で生成される事が分かった。

実験的に観測された表面弾性波によるスキルミオン生成の起源や詳細な過程を明らかにするために、数値計算をおこなった。図4に数値計算から得られたスキルミオン構造の生成過程を示す。まず、磁気弾性結合を仮定することで、表面弾性波によるスキルミオンを生成できることを確かめ、その後、数値計算の結果を詳細に調べた。その結果明らかになったスキルミオンの生成過程は以下のとおりである。

表面弾性波を印加してから 0.6 ナノ秒後に磁気弾性結合を通して空間的に不均一な有効トルクが生じ、不均一な磁化の揺らぎが生じる。次にこの不均一な有効トルクによりスピンの局所的に反転する。このとき、反転した部分の磁気構造は、ネールスキルミオンの構造とアンチスキルミオンの構造の対構造となる。一方、積層薄膜ではネール型のスキルミオンは安定であるのに対し、アンチスキルミオンは不安定なため、この対構造のうちアンチスキルミ

オンの構造の部分だけすぐに消滅し、結果としてネールスキルミオンが形成されることが明らかとなった。

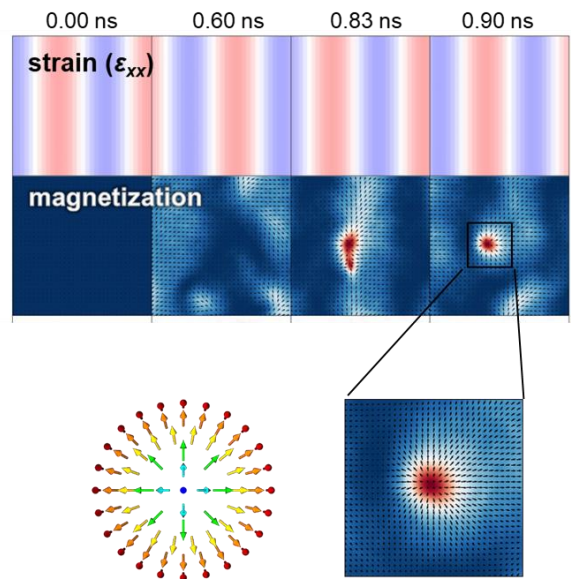


図4 数値計算から得られたネールスキルミオン構造の生成過程 (上)表面弾性波による周期的なひずみ分布の時間変化(中)表面弾性波の変化に対応する磁化状態。時間発展とともに磁気弾性結合を通じて生じるトルクにより磁化が不安定になり、0.83 ナノ秒後にはスキルミオンとアンチスキルミオンの対構造の生成から0.90 ナノ秒後には(下)ネールスキルミオン構造に落ち着く。

2. まとめと将来展望

本研究では、重金属と磁性金属の積層薄膜では、上向きの中心部分から下向きの外側へと放射状にスピンの向きが変わる「ネールスキルミオン」(図4下)が室温以上でも安定化すること、および表面弾性波とスピンの相互作用に着目し、発熱を抑えながら薄膜試料の広い領域にネールスキルミオンを生成することに成功した。現在のところ、本研究で示したように表面弾性波のスキルミオンの生成は、実現したが、スキルミオンの駆動は未解決である。このように表面弾性波を用いたスキルミオンの制御に関する研究は、端緒についたばかりである。上述の課題を解決できれば、スキルミオンを比較的により低いエネルギーで生成することができることから、低消費電力素子の実現に大きく貢献すると考えている。

謝辞

本研究成果は、理化学研究所量子ナノ磁性研究チーム：基礎科学特別研究員 横内智行氏(現在東大総合文化助教)、同チーム：研究員 Rana Bivas 氏、理化学研究所

創発光物性研究チーム：チームリーダー 小川直毅氏、東京大学 大学院工学系研究科 物理工学専攻：准教授 関真一郎氏、物質・材料研究機構 磁性スピントロニクス材料研究拠点磁気記録材料グループ：研究員 杉本聡志氏、スピン物性グループ：グループリーダー 葛西伸哉氏との共同研究によるものです。本研究は、文部科学省科学研究費補助金 新学術領域「ナノスピン変換科学」研究計画班「A01：磁氣的スピン変換(研究代表者：大谷義近)」(No. JP26103002)の一環として行われました。

- [1] A. Fert, V. Cros, & J. Sampaio, Skyrmions on the track. *Nat. Nanotech.* **8**, 152-156 (2013).
- [2] N. Nagaosa, & Y. Tokura, Topological properties and dynamics of magnetic skyrmions. *Nat. Nanotech.* **8**, 899-911 (2013).
- [3] T. Tokouchi, S. Sugimoto, B. Rana, S. Seki, N. Ogawa, S. Kasai, & Y. Otani, Creation of magnetic skyrmions by surface acoustic waves. **15**, 361-366 (2020).

