

スキルミオンのアクティブマター挙動

望月 維人 <早稲田大学理工学術院先進理工学部 masa_mochizuki@waseda.jp>

張 溪超 <早稲田大学理工学術院総合研究所 xichaozhang@aoni.waseda.jp>

劉 小晰 <信州大学工学部 liu@cs.shinshu-u.ac.jp>

生き物の中には、ムクドリやイワシ、ユスリカのように、その群れが特徴的な時空間パターンを持つダイナミックな集団運動を示すものがある。このような集団を構成する要素を**アクティブマター**と呼ぶ。興味深い例として、ある種のバクテリアや生体分子は、要素同士が衝突した時や、それが閉じ込められている容器の壁にぶつかった時に、左右どちらか一方の決まった方向に運動する傾向があり、その結果、集団として渦巻き運動を起こすことが知られている。

このようなアクティブマターが示す不思議な集団運動の研究は、ここ30年ほどの間に活発に行われてきた。しかし、これまでに知られていたほとんどの例は生物学的な起源を持つものであり、自己駆動機構を持たない磁性体や強誘電体などエレクトロニクスに活用されている物質や材料では、アクティブマター的な挙動や現象が観察されたことはなかった。

一方、現在のエレクトロニクス研究では、磁性体中に発現する**磁気スキルミオン**と呼ばれる磁気構造が盛んに研究されている(以下、単にスキルミオンと呼ぶ)。スキルミオンはナノからマイクロメートルサイズの大きさを持つ磁気構造で、磁性体中で粒子のように振る舞う。さらに、その磁化配列は位相幾何学により特徴付けられ、「+1」あるいは「-1」の位相幾何学量(トポロジカル数)を持っている。スキルミオンは、熱揺らぎによって**ブラウン運動**を示すことが知られており、それを活用した乱数生成やランダムな順序入れ替え、省電力な情報処理技術も活発に研究されている。

本研究では、磁性体試料の上に作り込んだ「キラルフラワー」と呼ばれる左巻きと右巻きの障害物の配置パターンにスキルミオンを閉じ込めると、そのブラウン運動が

スキルミオンの「トポロジー(-1か+1か)」とキラルフラワーの「**キラリティ**(左巻きか右巻きか)」に依存した結果を生み出すことを理論的に実証した。具体的には、熱揺らぎによりランダムに動き回るスキルミオンが、キラルフラワー構造を構成する障害物にぶつかると、スキルミオンのトポロジーに依存して壁に対して右か左のどちらか一方の決まった方向に反射され、その結果として、スキルミオンがある方向に巻いているキラルフラワー構造からは脱出できないのに、逆向きに巻いているキラルフラワー構造には永久に閉じ込められるといった現象が起こることを発見した。

この結果は、スキルミオンと空間構造パターンがトポロジーとキラリティに依存した相互作用をすることで、ランダムなブラウン運動から右回りと左回りの対称性が破れた結果が生じることを意味している。この非自明な結果は、ポテンシャル勾配、つまり力の方向と直交する方向に動くというスキルミオンの特殊な運動形態に由来するものであり、力を受けた方向に運動する通常の(ニュートン力学に従う)古典粒子では起こらない現象である。このような現象を活用することで、異なるトポロジーを持つ磁気構造を選別するトポロジーソーティング技術の実現も可能になる。

従来、生物や生物起源の物質や材料のみが示すはずであったアクティブマター挙動が、磁化の配列パターンに過ぎないスキルミオンで見つかったことにより、この分野の研究に新しい展開が期待される。また、スキルミオンのような非生物起源の素材は、生物起源の素材に比べてエレクトロニクス応用に圧倒的に有利である。そのため、アクティブマターの持つデバイス機能を研究する新しい融合分野の創成が期待できる。

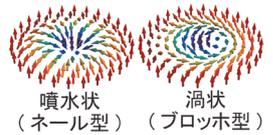
用語解説

アクティブマター:

自ら動き回る粒子や要素、あるいはその集団のこと。個々の要素はバラバラに動くが、集団になると要素間の相互作用や、要素を閉じ込めている境界との相互作用により、特徴的な集団運動の時空間パターンを形成する。

磁気スキルミオン:

磁性体において結晶を構成する磁性原子の磁気モーメントが噴水状、あるいは渦状に配列した磁気構造。大きさが数ナノメートルから数マイクロメートルと微小なため、磁性体中を粒子のように動き回ることができる。



ブラウン運動:

微粒子が不規則に運動する現象のこと。特に、熱揺らぎによって引き起こされるランダムな運動を指すことが多い。

キラリティ:

「手」を意味するギリシャ語が語源の言葉で、鏡に映した像(鏡像)が元の像(原像)に回転操作だけでは戻らない関係のこと。「手」や「ねじ」はキラリティを持つ構造であり、「右手と左手」や「右ねじと左ねじ」は相互に鏡像の関係にあるが、回転操作だけでは互いの構造にはならない。