

A02 量子凝縮系およびソフトマターにおける自己組織化現象に対する流れの影響の解明

お茶の水女子大学基幹研究院自然科学系 工藤和恵
名古屋大学工学研究科 川口由紀

スピン自由度を持つボース・アインシュタイン凝縮体（スピノル BEC）のうち強磁性相にあるもの（強磁性 BEC）では、従来の強磁性体と同様な磁区パターンが観察されることがある。しかし、従来の強磁性体と異なり、強磁性 BEC には超流動的な流れが存在し、この流れの存在が、磁区パターンのダイナミクスに影響を与える。強磁性相へのクエンチ後にできる磁化の秩序構造は、時間とともにその特徴的なサイズが増大する。ドメイン成長の後期には、時間のべき乗に比例した成長則が多くの場合に見られる。強磁性 BEC におけるドメインサイズの成長則は、イジング模型的な異方性の場合には、古典 2 成分流体の非常に粘性の小さい場合の成長則と一致する [1]。また、超流動的な流れが存在しない場合は、2 成分合金などと同じドメイン成長則を示し、流れが存在する場合よりも成長が遅い。一方で、異方性が XY 模型的な場合は複雑であり、まだ普遍的なドメイン成長則が広く認識されているわけではない。2 次元系ではスピン渦の対消滅がドメイン成長を支配するが、BEC では渦の構造と超流動的な流れが密接に関係している。そして、その組み合わせが多数あるうえにそれらが時間変化する。異方性が XY 模型的な場合にも、イジング模型的な場合のように普遍的なドメイン成長則を見いだすために研究を進めてきた。

強磁性 BEC では、スピン自由度と質量流（超流動的な流れ）の相互作用によって、渦がいくつかの種類に分類される。具体的には、スピン渦の巻数と質量流の循環の組み合わせによって分類できる。例えば、循環も巻数も ± 1 の場合は渦芯でも磁化が残る。このような渦を Mermin-Ho 渦 (MHV) と呼ぶ。MHV はスピン渦の構造だけ見れば従来の強磁性体と同様であるが、質量流の循環も考慮すると、(循環, 巻数) = $(+, +)$, $(-, -)$, $(+, -)$, $(-, +)$ の 4 種類の渦があり、循環も巻数も互いに異なる渦同士が対消滅できる。つまり、対消滅できる渦のグループが 2 つ存在する。BEC の基礎方程式である Gross-Pitaevskii (GP) 方程式、および GP 方程式からいくつかの仮定と近似を用いて導出した流体方程式で数値シミュレーションを行うと、古典 XY 模型のドメイン成長則から少し外れた成長をすることが分かった。流体方程式を使うと質量流を取り除いた場合の数値シミュレーションができるが [1]、その場合は古典 XY 模型の場合と同じドメイン成長則に従うことが確認できる [2]。ただし成長の速さは、質量流の存在する場合と比較して非常に遅い。すなわち、強磁性 BEC では超流動的な流れによってドメイン成長が促進されている。超流動的な流れのもう一つの効果は、渦の種類が増えて対消滅できる渦のグループが 2 つになることである。異なるグループに属する渦とは対消滅できないという仮定の下で成長則を補正すると、数値シミュレーション結果が補正された成長則に従うことが分かった [2]。

実は MHV のみが存在するような状況を実験的に再現することは難しい。通常の方法で強磁性相へのクエンチを行うと、ポーラー・コア渦 (PCV) が多数発生し、それらが対消滅していく。PCV は循環が 0 で巻数が ± 1 の渦であり、渦芯で磁化が消える。この場合は、古典 XY 模

型の場合とは異なる成長則を示すことが海外の研究グループによって明らかになった [3]。このように初期条件や渦の種類によって成長則が異なることから、系統的にドメイン成長則を調べていくことが必要であると言える。

ソフトマターの系における自己組織化現象としては、高分子溶液である塗料を乾燥させた場合の不均質な塗膜の形成に注目して研究を進めてきた。まず簡単な実験として、身近な塗料（マニキュア）の液滴を、プラスチック基板およびガラス基板上に落として、その乾燥パターンを観察した。ガラス基板上の液滴では、表面の形状に変化がほとんど見られなかった。

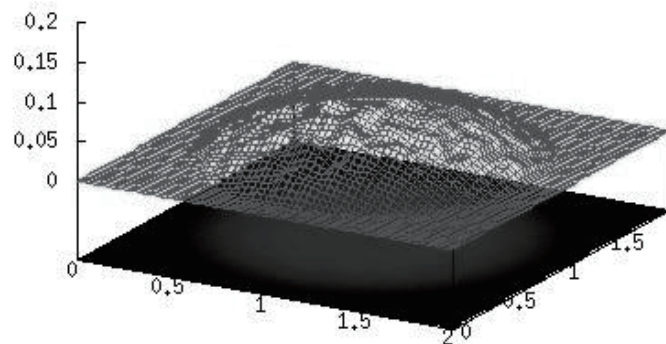


図1. 塗料の乾燥パターンの数値シミュレーション。乾燥後に表面にシワができる様子を再現した。

それに対してプラスチック基板上の液滴では、乾燥後に表面にシワができているのが観察された。これを再現するための簡潔な数理模型を考案し、数値シミュレーションによって、シワの発生を再現した（図1）。

基板の違いで乾燥パターンに違いが生じる原因としては、基板の気体透過率と基板表面の性質の2つが考えられた。プラスチック（ポリスチレン）は気体透過率がガラスに比べて非常に大きい。そのため、乾燥する際に基板を通して蒸発する可能性がある。そこでプラスチック基板の下にガラス基板を貼りつけて再度実験したところ、プラスチック基板だけの場合と同様にシワができることが確認された。したがって、基板表面の性質がより重要であると考えられる。実際に、この実験で使ったガラス基板とプラスチック基板の濡れ性を調べてみると、ガラス基板は非常に濡れやすく、プラスチック基板は濡れにくい性質を持っていることが分かった。したがって、ガラス基板では溶液の流れの効果が効きやすく、プラスチック基板では流れの効果が効きにくいと考えられる。

シワのようなパターンの発生は、液滴表面の擾乱が成長することによって起こる。流れの効果が大きければ、その擾乱を抑えるように溶液が流れることでシワの発生が防げる。流れの効果が効きにくければ、その擾乱の成長を抑えきれずにシワが発生することになると考えられる。数理モデルでは、移流項の係数に基板表面の性質を反映させることができる。数値シミュレーションでは、その係数を変化させることでシワの発生の有無を制御できることが分かった。

参考文献：

- (1) K. Kudo and Y. Kawaguchi, *Phys. Rev. A* **88**, 013630 (2013).
- (2) K. Kudo and Y. Kawaguchi, *Phys. Rev. A* **91**, 053609 (2015).
- (3) L. A. Williamson and P. B. Blakie, arXiv:1504.06404 (2015).