

## 「消えては結ぶ磁気の渦」: 擬 2 次元磁性体における渦と反渦の観察

[1] 要旨: 2次元性の強い磁性結晶において渦と反渦の磁気模様が対を成して現れる様子が世界で初めて観察された。あたかも“消えては結ぶ磁気の渦”として、結晶が磁性を示すようになる温度をまたいで渦と反渦の対構造が現れる。“磁性体における 2次元系特有の相転移現象 (ベレジンスキー・コステリッツ・サウレス転移)”は半世紀前に理論予言され、今や統計力学の基本概念の一つとして確立されている。2016年にはノーベル物理学賞が授けられた。にもかかわらず、これまで磁性体において実際の実験で観察されていない。本研究は半世紀以上にわたって停滞していた難題に突破口を与えるべく実施されたものであり、最終的な実証に向けての重要な一歩となる。

### [2] 本文

「なぜ渦ができるか?」という素朴な疑問は渦を構成する粒子の在り方にかかわる根本的な問いにつながる。渦では無数の粒子が集まり一体となって回転運動している。研究者達は数理モデルを用いて個々の粒子の振舞いをモデル化し渦の形成過程を調べてきた。このような理論解析とその実験検証を通して、長年にわたって、渦が存在する意義が論じられている。

1970年代には“渦の存在”と“物質の状態を示す相転移現象”との関係が活発に議論されている。相転移とは、低温になると水が氷に固まる、また、磁石に磁力線が生じるといった物質の秩序が変化する現象のことである。ベレジンスキー、コステリッツ、サウレスは「相転移に伴って、渦と反渦が生成され、対を組むように結びつき、また、離れていくこと」を理論予言した。2次元磁性体という平面方向にのみ相互作用が働く磁石が示す相転移の振舞いを解析し、このような渦と反渦の結合・乖離が引き起こす相転移の本質を明らかにした。この相転移は提唱者の頭文字をとってBKT転移 (あるいはKT転移) と呼ばれている。この理論提言は2次元空間では相転移が生じないという従来の常識を覆し、物理学の進展に大きく貢献した。「渦」の本質は一旦生じた渦の芯が消えずに保たれることであり「トポロジー」の概念と直結する。コステリッツとサウレスは、物質科学にトポロジーの概念を持ち込んだ業績により、2016年のノーベル物理学賞を受賞した。

この理論予言はヘリウム4の超流動薄膜やルビジウムの冷却原子気体や超伝導薄膜などで観察されている。しかしながら、これまで研究のモデルとなった磁石では実証されていない。元来の理論予言が実験で観察されていないのはノーベル賞では珍しいことである。そのため、「2次元磁性体の相転移に伴う渦と反渦の対を観察すること」は研究者にとって長年の夢となっている。

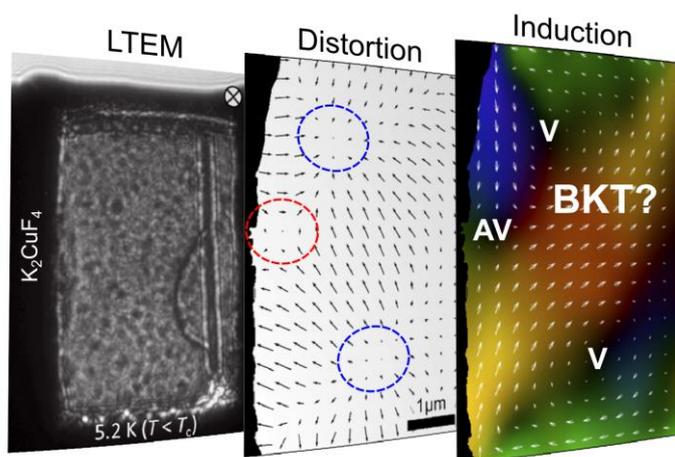


図 1.  $K_2CuF_4$  結晶において観察された渦 (Vortex) と反渦 (Anti-Vortex) 状の磁気模様。

大阪府立大学大学院工学研究科らの研究チームは  $K_2CuF_4$  磁性結晶という 2 次元性の強い磁性体が相転移を示すとき、渦と反渦に渦巻いた磁気模様が対を組んで現れる様子を観察することに世界で初めて成功した。電界放出透過型電子顕微鏡を用いて摂氏-269 度付近の極低温において  $K_2CuF_4$  磁性結晶の磁気状態を観察した実験である。この成果は、日本物理学会が発行する英文誌 *Journal of the Physical Society of Japan (JPSJ)* の 2021 年 1 月号に掲載された。

極微の世界に現れる磁気の渦を観察するには特殊な観察技術が必要となる。本研究で使用した電界放出透過型電子顕微鏡を用いた磁気構造解析は電子線の波動性を利用し高空間分解能で電磁場分布を観察する有力な実験手法である。極低温での実験を行うため、株式会社日立製作所が開発した超高圧ホログラフィー電子顕微鏡が用いられた。この装置は文部科学省：先端研究基盤共用促進事業（共用プラットフォーム形成支援プログラム）の支援を受けた「アトミックスケール電磁場解析プラットフォーム」事業により公開され、一般ユーザーが利用することが可能となっている。

$K_2CuF_4$  磁性結晶は 2 次元磁性体として理想的な相互作用を示す物質であり、ベレジンスキー、コステリッツ、サウレスの理論予言を実現する有力候補の磁性物質と期待されてきた。しかしながら、磁気相転移を示す温度が摂氏-267 度と極低温であり、これまで磁気構造観察による実験検証が行われていなかった。この物質の結晶育成が困難なことも研究が進まなかった一因である。

半世紀前に合成された  $K_2CuF_4$  磁性結晶が研究グループに大切に保管されていたことは幸運であった。結晶構造や磁気特性から試料品質が合成当時のままに保たれていることが確認された。単結晶試料を透過型電子顕微鏡観察用に微細加工し、1MV ホログラフィー電子顕微鏡内で観察用試料を摂氏-267 度の磁気転移温度より低い温度まで冷却できることが確かめられた。磁気転移温度以下の低温では磁性を帯びた試料が発する磁力線により電子顕微鏡像に変化が生じる。転移温度をまたぐように温度を上下しながら、超高感度で  $K_2CuF_4$  磁性結晶の磁気状態を観察した。得られた磁気変化はごく微弱で観察が困難であったが、磁気模様の変化を注意深く観察することで、渦をほのめかす磁気模様が現れていることが見出された。英国・グラスゴー大学の共同研究者がデータ解析を行い、観察された磁気構造をわかりやすく可視化した。その結果、渦と反渦状の磁気構造が対を成して形成されていることが明らかになった。

予想外の実験結果も報告されている。渦と反渦を形成する面と垂直な方向の磁気構造の解析では磁気転移温度より高い温度から周期的な磁気縞模様が現れることが見出された。これは 2 次元秩序が結晶という 3 次元世界に織り込む新しいタイプの構造であり、理論による検証が望まれる。研究グループは大面積超薄膜試料での実験や高温での揺らぎ状態にある渦のダイナミクスを検出する実験計画を進めている。今後の進展が待たれる。

原論文（12 月 7 日公開済）

Formations of Narrow Stripes and Vortex-Antivortex Pairs in a Quasi-Two-Dimensional Ferromagnet  $K_2CuF_4$

Y. Togawa, T. Akashi, H. Kasai, G. Paterson, S. McVitie, Y. Kousaka, H. Shinada, J. Kishine, and J. Akimitsu: *J. Phys. Soc. Jpn.* **90**, 014702 (2021).

< 情報提供：戸川 欣彦（大阪府立大学）

岸根 順一郎（放送大学）

秋光 純（岡山大学） >