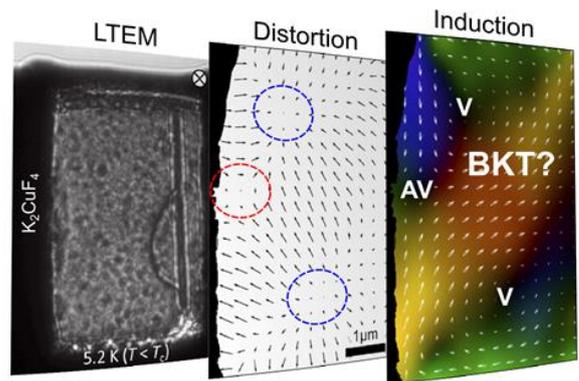


「消えては結ぶ磁気の渦」 ノーベル賞予言に迫る渦と反渦の観察

大阪府立大学(学長：辰巳砂 昌弘)と放送大学(学長：來生 新)および岡山大学(学長：楨野 博史)は、大阪府立大学 大学院 工学研究科 電子・数物系専攻 戸川 欣彦(とがわ よしひこ)教授と、放送大学 教養学部 岸根 順一郎(きしね じゅんいちろう)教授、岡山大学 異文化基礎科学研究所 秋光 純(あきみつ じゅん)特任教授らの研究チームは、株式会社日立製作所(以下、日立製作所と表記)と共同で、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を直接観察することに世界で初めて成功したことを発表しました。“消えては結ぶ磁気の渦”は結晶が磁性を示すようになる温度をまたいで観察されます。この観察結果は、半世紀前に理論予言され2016年にノーベル物理学賞が授けながらも、これまで実験が報告されていなかった“磁性体における2次元系特有の相転移(解説1)現象”を示している可能性があります。物質が示す多彩な相転移現象に潜む普遍的な性質を明らかにする基礎学術的に重要な研究成果であり、日本物理学会が発刊する「Journal of the Physical Society of Japan」誌に掲載されました。

■本研究のポイント■

- ・2次元性の強い磁性結晶 K_2CuF_4 で渦と反渦の磁気模様が対を成して現れる様子を観察しました。
- ・電界放出透過型電子顕微鏡を用いて超高感度の磁気構造解析を摂氏-269度近くの極低温で行いました。実施可能な施設は我が国にしかありません。
- ・観察結果は2次元系物質の相転移現象の特徴と整合していますが、更なる検証が必要です。
- ・この現象は1970年代に理論予言され、物理学における基本概念の一つとして2016年にはノーベル物理学賞が授けられましたが、理論模型となった磁性体では実験報告がありませんでした。



図： K_2CuF_4 結晶において観察された渦と反渦状の磁気模様
結晶が磁性を示すようになる温度の摂氏-267度以下になると渦と反渦の様子が対を成して現れる。右端の図で矢印と色は渦巻く様子を示している

1. 研究の背景

かたつむりや貝殻など渦巻き状の生き物を見かけることがあります。このような渦構造は日常的にも馴染み深く、例えば、水が渦巻きながら吸い込まれる様子を目にします。竜巻、渦潮、台風はよりスケールの大きな渦ですし、宇宙には遥かに巨大な銀河が存在します。一方、極微の世界には量子化された渦が現れることが知られています。自然界においてそのサイズの大小を問わず渦が幅広く存在することは不思議なことであり、多くの人々の関心を惹きつけてきました。

「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ります。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ます。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ました。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きました。

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ます。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す。ベレジンスキー、コステリッツ、サウレス（解説2）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」を理論予言しました。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ました。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）と呼ばれています。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ました。「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」の概念と直結します。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ました。

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ます。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ません。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す。そのため、「2次元磁石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ます。

2. 研究成果について

今回、研究グループは、 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ました。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す。

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ります。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す。

日立製作所は長年にわたり電界放出透過型電子顕微鏡の研究開発をリードしてきました。世界最高性能を誇る超高圧ホログラフィー電子顕微鏡を開発し、それを活用した最先端の基礎研究を行ってきました。例えば、電子線の波動性を示す二重スリット実験、ベクトルポテンシャルの存在を裏付けるアハラノフ・ボーム効果の実験・検証、超伝導体に現れる渦構造である超伝導磁束量子の観察が知られています。2017年度からは文部科学省：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「アトミックスケール電磁場解析プラットフォーム」事業を開始しています。これにより超高圧ホログラフィー電子顕微鏡が研究コミュニティに公開され、一般ユーザーが利用することが可能となりました。

研究グループは、この機をとらえて、 K_2CuF_4 磁性結晶における磁気構造観察に挑戦しました。 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ることがわかっており、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いました。しかしながら、磁石への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ませんでした。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す。

半世紀前に合成された K_2CuF_4 磁性結晶を手元で大切に保管していたことが幸運でした。研究グループはまず結晶構造や磁気特性を調べ、試料品質が合成当時のままに保たれていることを確認しました。続

いて、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を確認しました。磁気転移温度以下の低温では磁石となっ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ます。転移温度である摂氏-267 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ました。得られた磁気変化はごく微弱で観察が困難でしたが、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を見出しました。英国・グラスゴー大学の共同研究者の協力を得てデータ解析を行い、観察された磁気構造をわかりやすく可視化しました。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わかりました。この間、寒材として使用する液体ヘリウム供給が日本国内で不安定になり、実験の進捗は大きく妨げられました。これらの困難を乗り越えつつ、3年に及ぶ実験・検証の末、対を成す渦と反渦を観察することに成功しました。

予想外の実験結果も得ています。渦と反渦を形成する面と垂直な方向の磁気構造を解析したところ、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を見出しました。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、理論による検証を進めています。

一方、理論予言では、磁気転移温度より高温では渦と反渦は乖離して動き回っていると予想されています。今回用いた観察手法では時間分解能の関係から、また、用いた実験試料の面積が小さいことによる制約のためか、動き回る渦を観察することはできていません。研究グループで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ます。

本研究では 2 次元の強い磁性物質 K_2CuF_4 において対を組んだ磁気渦と反渦を直接観察することに世界で初めて成功しました。この振舞いは、ノーベル物理学賞が授けられながらも長らく実験検証が行われていなかった 2 次元磁石の磁気相転移現象に関連している可能性があります。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、最終的な実証に向けての重要な一歩となる研究成果です。低次元磁性物質の相転移現象に関する知見は高密度磁気メモリデバイスや量子計算デバイスの開発などにも役立ちます。基礎学術的また応用的見地からも今後の研究の進展が望まれます。

3. 研究体制について

今回の研究は、大阪府立大学の戸川欣彦教授と岡山大学の秋光純教授らが実験的検証を、放送大学の岸根順一郎教授が理論的考察を進めました。また、 K_2CuF_4 磁性結晶は、東京大学物性研究所の平川金四郎名誉教授に提供いただきました。

4. 研究助成資金等

本研究は JSPS 科研費基盤研究(JP17H02767,JP17H02923)の助成による研究支援、及び文部科学省先端研究基盤共用促進事業(新たな共用システム導入支援プログラム JPMXS0410500020)で共用された機器を利用して行いました。

5. 専門用語

解説1：相転移

水の分子は、温度が上がるにつれ、氷→水→水蒸気とその形態を変えます。このような状態の変化を相転移と呼びます。水の相転移は固体・液体・気体の各相の間で生じます。また、鉄は室温では強い磁気（強磁性）を帯びた磁石ですが、770℃以上の温度では磁気が消失します（常磁性）。これも磁気特性の異なる相の間で生じる変化であり、典型的な相転移現象です。

解説2：コステリッツとサウレス

一般に、平面状（2次元）の物質では長距離秩序を伴う相転移が起きないことが知られています。しかしながら、1973年にコステリッツとサウレスは、長距離秩序がなくても、渦と反渦が生じて、渦と反渦が結合したり、乖離したりするタイプの転移が起きうることを提案しました。この理論研究は、「渦」という自由度に光を当てただけでなく、物質科学に「トポロジー」の考えを導入するきっかけとなりました。この功績に対して2016年のノーベル物理学賞が授けられました。

研究論文名：「Formations of Narrow Stripes and Vortex-Antivortex Pairs in a Quasi-Two-Dimensional Ferromagnet K_2CuF_4 」

著者： Yoshihiko Togawa, Tetsuya Akashi, Hiroto Kasai, Gary Paterson, Stephen McVitie, Yusuke Kousaka, Hiroyuki Shinada, Jun-ichiro Kishine, and Jun Akimitsu

公表雑誌：日本物理学会誌「Journal of the Physical Society of Japan」

公表日：2020年12月7日（月）（日本時間）

URL：<https://doi.org/10.7566/JPSJ.90.014702>

DOI：10.7566/JPSJ.90.014702