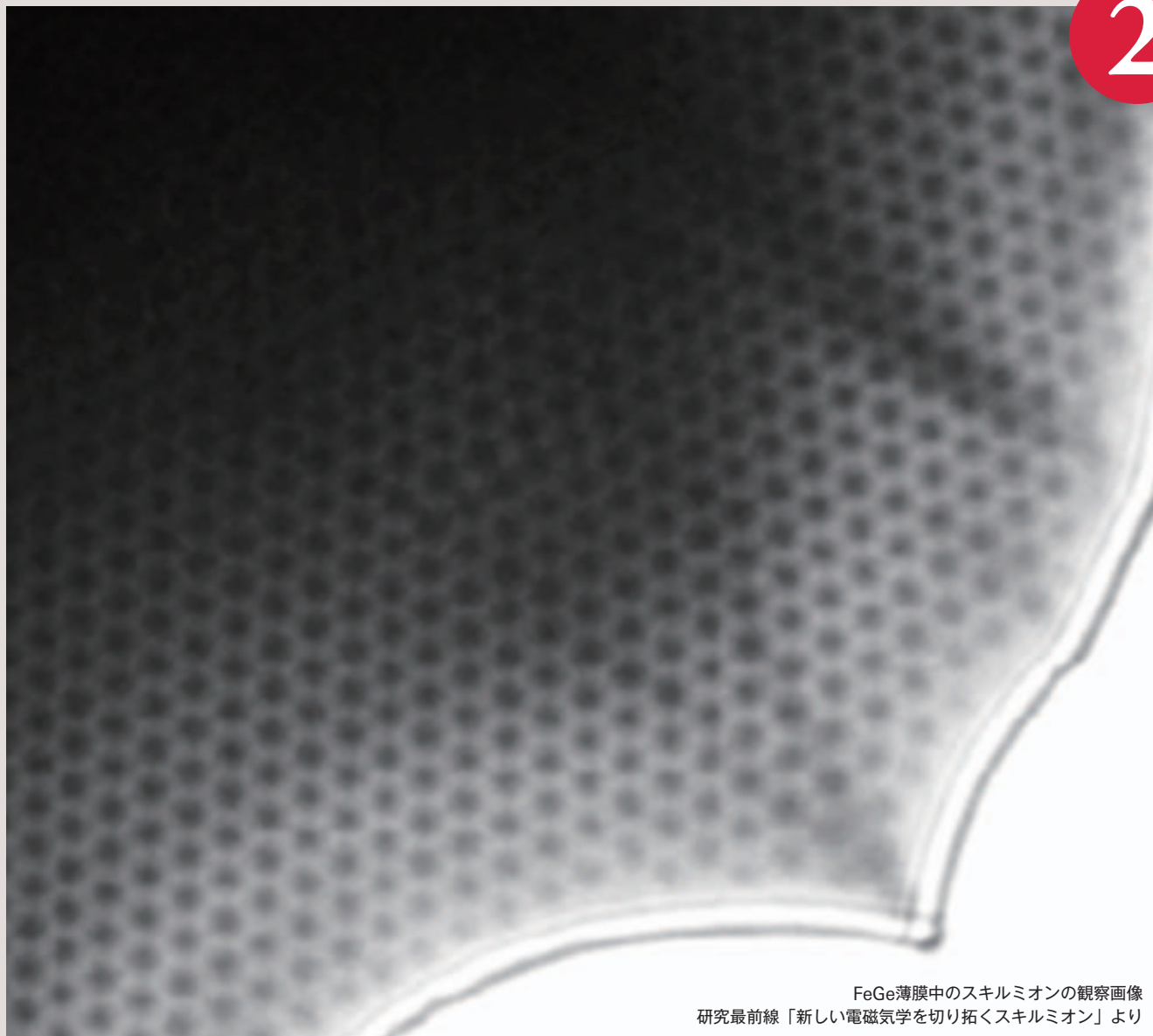


RIKEN

NEWS

No.404 February 2015

2



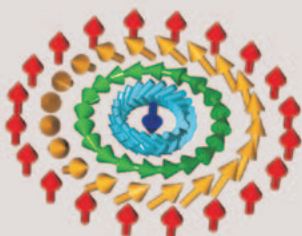
FeGe薄膜中のスキルミオンの観察画像
研究最前線「新しい電磁気学を切り拓くスキルミオン」より

研究最前線 ②

大特集

新しい電磁気学を切り拓く スキルミオン

究極の省エネルギー情報技術の実現を目指す



FACE ⑭

走査型トンネル顕微鏡を
6台立ち上げた研究者

TOPICS ⑮

- ・脳科学総合研究センター
「Summer Program 2015」
参加者募集のお知らせ
- ・新研究室主宰者の紹介

原酒 ⑯

山歩きから得たもの

新しい電磁気学を切り拓く スキルミオン

究極の省エネルギー情報技術の実現を目指す

2010年、理研創発物性科学研究センターの于 秀珍^{ウ・シュウシン} 上級研究者らは、磁石の中でたくさんの電子スピンの渦状に並んだ構造「スキルミオン」(図1)の直接観察に世界で初めて成功した(図2)。スキルミオンは、半世紀前に素粒子物理学において、理論的に導入された仮想粒子だった。磁石の中に生成されるスキルミオンは、直径が数~100nmほどの粒子のように振る舞い、ほとんど電力を使わずに移動させることができる。これを情報の記録や計算に利用することで、“超”省電力型の情報処理装置を実現できると期待されている。さらにスキルミオンは、まるで巨大な磁場のように、運動する電子の軌道を変える力を持ち、従来の電磁気学の常識を超える現象を引き起こす。今、スキルミオンによって新しい電磁気学が切り拓かれようとしている。

創発物性科学研究センター

十倉好紀 (とくら・よしのり)
センター長

于 秀珍 (ウ・シュウシン)
強相関物性研究グループ 上級研究者

小椎八重 航 (こしばえ・わたる)
強相関理論研究グループ 上級研究者

関 真一郎 (せき・しんいちろう)
スピン創発機能研究ユニット ユニットリーダー

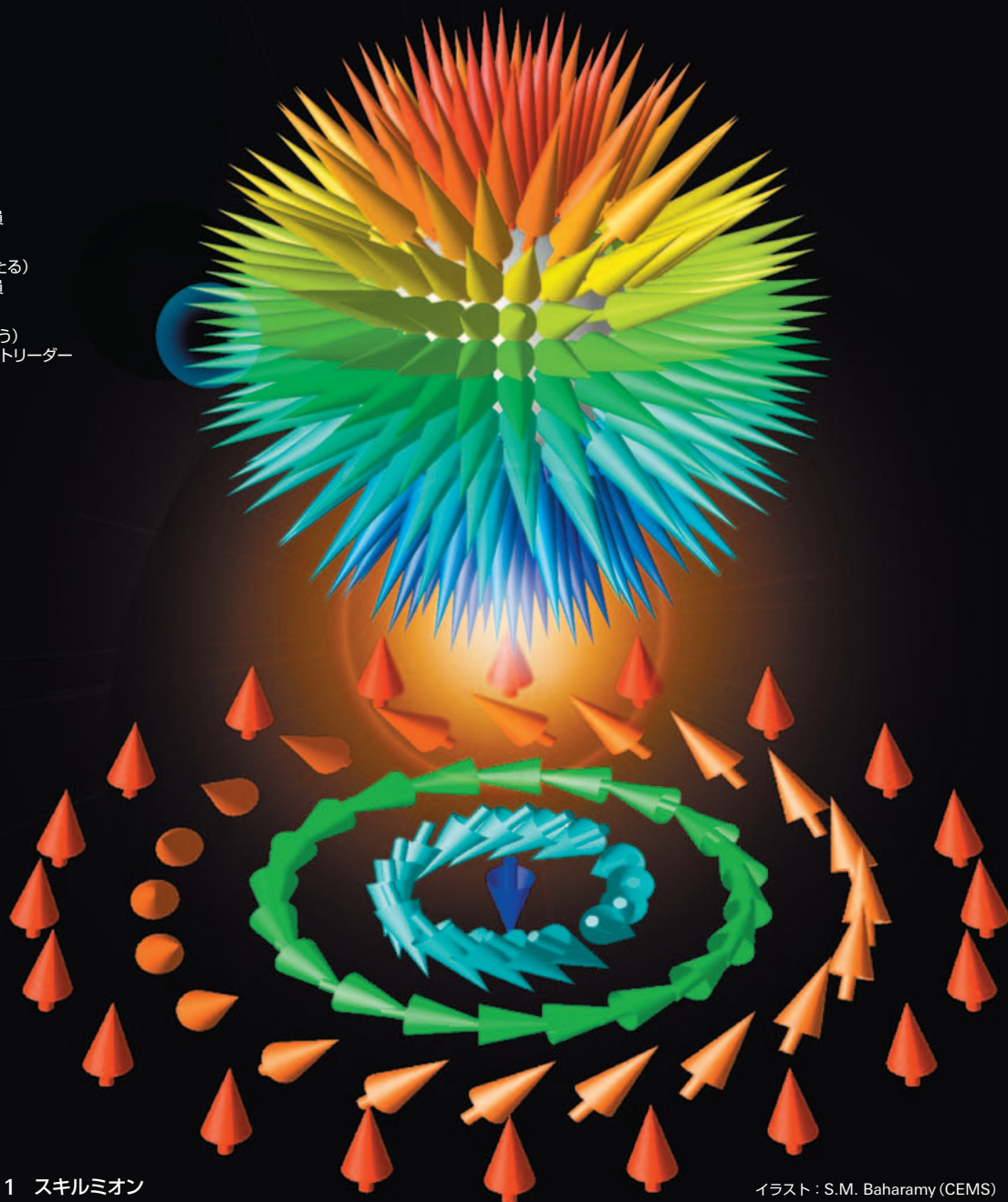


図1 スキルミオン

イラスト：S.M. Baharamy (CEMS)

「スキルミオンは、創発の典型例です」と、創発物性科学研究センター（CEMS）の十倉好紀 センター長は指摘する。創発とは、複数の異なる要素が組み合わさることで、それぞれの要素を単純に足し合わせた以上の優れた機能が現れることだ。「スキルミオンは、物質中に数千個ほどの電子スピンの集まり、まるで安定した1個の粒子のように振る舞うもので、新たな機能を発揮します」

図1下の矢印は、スキルミオンをつくる電子スピンの向きを示している。その渦巻き構造を形づくる矢印の始点を1点に集めると、図1上に示したように矢印の終点は球を覆うようにあらゆる方向を向く。

電子スピンとは、直感的に例えるならば、電子の自転のようなものだ。自転に右回り・左回りという向きがあるように、電子スピンも向きを持つ。物質中のそれぞれの電子のスピンの向きは、そろっていたり、ばらばらだったりするのだが、多くの電子スピンの向きがそろると、その物質は磁力を持つ。電子スピンは微小な磁石であり、磁力の源となっている。

もともとスキルミオンとは、1962年に素粒子物理学の理論家である英国のトニー・スキルム（Tony Skyrme）博士によって、原子核をつくる陽子や中性子のような核子の物理を記述するために提唱されたものだ。時を経て1989年には、磁石の中の電子スピンの向きがスキルミオンをつくる可能性が理論的に予言された。

それから20年後の2009年、ドイツの研究グループが中性子回折法で、マンガンとシリコンから成る金属MnSiの中のスキルミオンの結晶を観察することに成功した。

「とても素晴らしい研究だと興奮しました。ただし、それは1個ずつのスキル

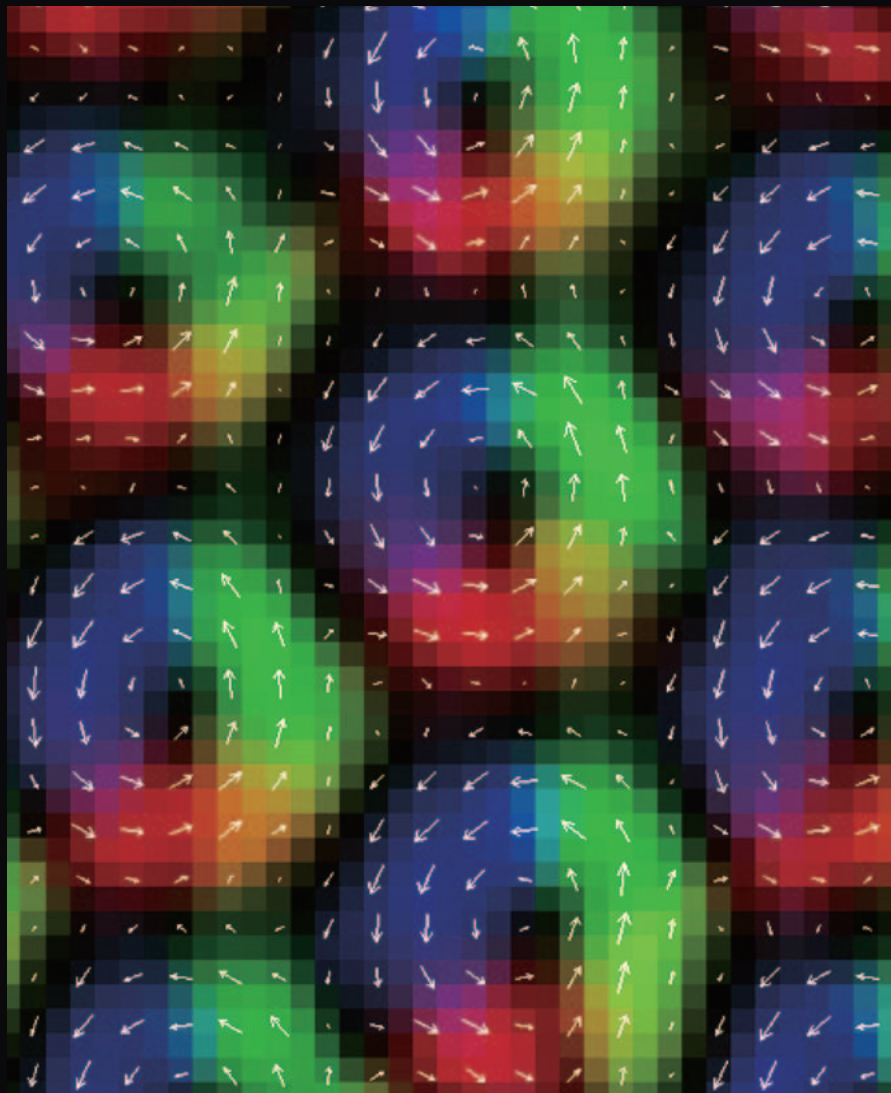


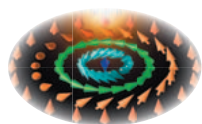
図2 2010年に直接観察されたスキルミオン
スキルミオンが並び結晶をつくっている。

ミオンを観察したものではなく、電子スピンの向きがどのように並んでいるのかも分かりませんでした」と十倉センター長は語る。図1下のように電子スピンの渦巻き状に並んだ様子は、まだ誰も直接目にしていなかったのだ。

十倉センター長は2001年、産業技術総合研究所に強相関電子技術研究センターを立ち上げ、物質中で電子スピンがつくるスキルミオンのようなミクロな構造の性質を調べる研究を進めた。そし

て2007年、理研に研究グループを設け、2013年にCEMSを設立した。

「強相関電子技術研究センターのときに私たちの研究グループに加わったのが、于秀珍さんです。物質・材料研究機構の松井良夫先生のところで電子顕微鏡の技術を学んだ彼女は、「神の眼」を持っています。私は2009年のドイツの研究グループの論文を読み、すぐ于さんに、電子顕微鏡でスキルミオンを直接観察するように指示しました」



スキルミオンの直接観察に成功！ 室温でスキルミオンを生成できる物質を探す



図3 スキルミオンを観察する電子顕微鏡

スキルミオンの直接観察に成功した于 秀珍 上級研究員（右）と理論面からスキルミオンの研究を進めている小椎八重 航 上級研究員（左）。

スキルミオンの発生には外部からの磁場が必要であり、それが実験を難しくしていた。ローレンツ電子顕微鏡法は空間分解能が高く、ナノメートルサイズのスピンの構造を観察に適しているが、専用機は日本国内で数台しかない。しかも、試料には外部磁場をわずか0.08テスラしかかけられない。一方、汎用型電子顕微鏡では試料に約2テスラという強い磁場がかかる磁界型レンズが使われるため、スキルミオンをはじめとするスピン構造が壊れてしまう。「そこで私はあえて、汎用型電子顕微鏡の磁界型レンズ由来の磁場を制御しながら、ローレンツ電子顕微鏡の手法を適用してスキルミオンの生成を観察するという、常識破りの方法で観察を行いました」と于 研究員は説明する。

撮影：藤牧徹也

「十倉先生からスキルミオンを直接観察するように言われたとき、それは難しい、見えなくても当然だと思いました」と于秀珍 上級研究員（以下、于 研究員）は振り返る。「まず、スキルミオンがナノメートルスケールという極微のスピンの構造であることが問題でした」

CEMSでは、永長直人 副センター長が率いる理論家のグループや、物質開発や物性測定を行うグループ、そして于 研究員のように観察を行う研究者たちが、緊密に連携しながら研究を進めている。「ドイツの研究グループがMnSiで中性子回折法によって観察したのは、直径が約20nmのスキルミオンの集合体（格子構造）です。私たちはMnSiと同じ結晶構造を持つ、鉄・コバルト・シリコンから成る金属 $\text{Fe}_{0.5}\text{Co}_{0.5}\text{Si}$ に注目しました。この物質ならば、直径が90nmほどの比較的大きなスキルミオンが安定的に生成でき、スキルミオン1個を独立に観察できると予想しました。ただし、安定なスキルミオンを電子顕微鏡の装置の中で生成し、直接観察するのは難しいことでした」

于 研究員は $\text{Fe}_{0.5}\text{Co}_{0.5}\text{Si}$ を厚さ20nmほどの薄片にし、その薄片に磁場をかけてスキルミオンを生成し、ローレンツ電子顕微鏡法により直接観察する実験を始めた（図3・図4）。

「どのような温度と磁場でスキルミオンが生成されるのか、情報がないままで実験をスタートしました。そのため、温度と磁場を少しずつ変えながら観察を続けました。スキルミオンが生成されれば、モニターに小さな斑点が映るはずです。それを見逃さないように部屋を暗くし独りでモニターを見続けるという、高い集中力が必要な実験でした。実験を始めて3ヶ月がたったある日、ついに小

さな斑点がモニターに現れました（図5）。あのときは、自分がどこにいるのかわからなくなるほど興奮しました」

于 研究員はスキルミオンを直接観察することに世界で初めて成功したのだ。それにより、薄膜の中でスピンの渦巻き構造を持つスキルミオンが1個の粒子として安定に存在することが確かめられた。

成功の一番の要因は？「十倉先生と松井先生に信頼していただき、研究一筋で努力し続けてきたからです。すぐに観察結果を十倉先生に報告したところ、それまで進めていた仕事を中断して、永長先生を呼んで議論を始められました」

さらに于 研究員は、スキルミオンが生成されてから消滅していくまでの過程を詳細に調べた。その結果、わずか数十ミリテスラという弱い磁場と、5~30K（約-268~-243℃）という広い温度範囲でスキルミオンが比較的安定に生成されることを確認し、2010年に『Nature』に発表した（図2）。この直接観察の成功を契機に、スキルミオンの研究は急進展を見せている。

「私たちは2012年、鉄とゲルマニウムから成る FeGe の薄膜に弱い電流を流すと、スキルミオンが移動することを確かめました。その電流は、ハードディスクなどでN極とS極の磁化の向きを反転させて情報を書き込むときに必要な電流の、わずか10万分の1でした。スキルミオン1個の渦は直径が数~100nmほどと極めて小さく高集積化ができるので、情報の記録に利用すれば、ほとんど電力を消費しない大容量メモリーを実現できるでしょう」（表紙）

FeGe は約275K（約2℃）でスキルミオンを生成できるが、メモリーに利用するには、数十℃の室温以上でスキルミオ

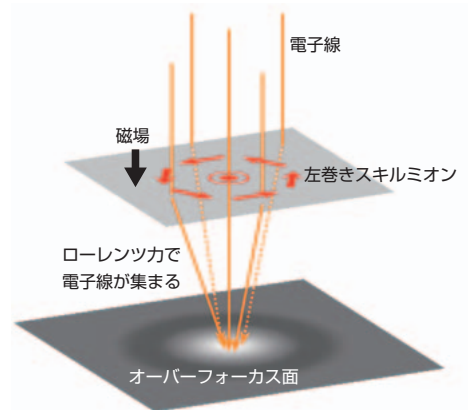


図4 ローレンツ電子顕微鏡法によるスキルミオンの観察

電子が磁場の中で運動すると、ローレンツ力を受ける。左巻きのスキルミオンを透過する電子線は、オーバーフォーカス面上にローレンツ力が集まり明るい斑点の像をつくる。逆に右巻きのスキルミオンでは、電子線が広がり暗い斑点として観察される。

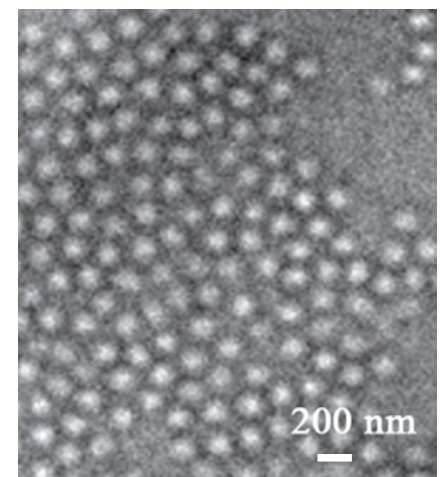
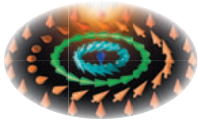


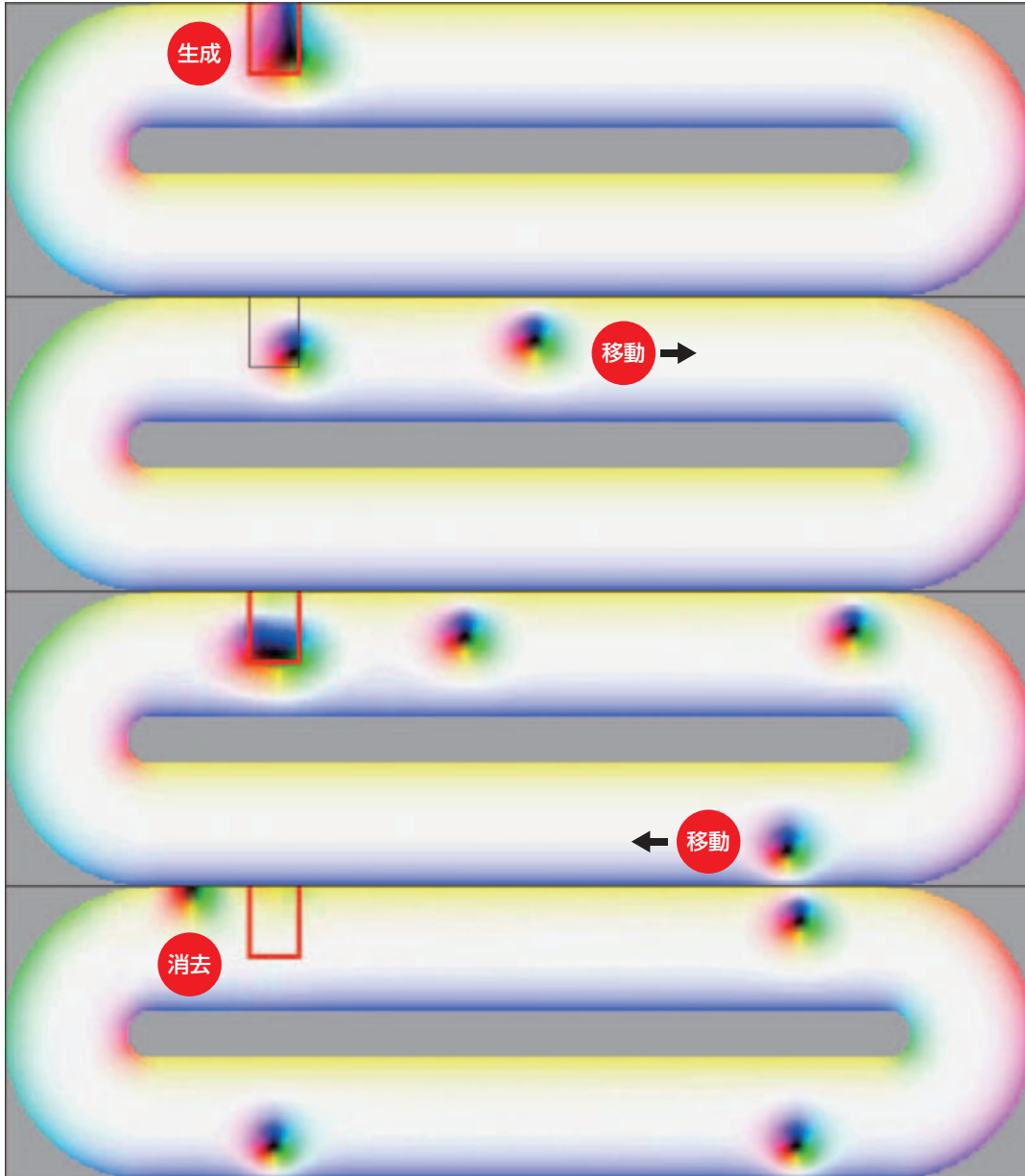
図5 最初に観察された $\text{Fe}_{0.5}\text{Co}_{0.5}\text{Si}$ 薄膜中のスキルミオン像（白い斑点）

MnSiや $\text{Fe}_{0.5}\text{Co}_{0.5}\text{Si}$ は、らせん状の結晶構造を持つ磁石である。それに応じて電子スピンの向きも少しずつ変わり、らせん状に整列している。そこに極低温で弱い磁場をかけると、らせん状のスピンの渦巻き状になり、スキルミオンが現れる。

ンが安定に生成できる物質を探索する必要がある。「CEMS客員研究員の徳永祐介さん（東京大学 准教授）たちが、室温でスキルミオンが生成される可能性のある物質を設計し、試料をつくっています。そして私がおその薄膜を観察して、実際にどの温度でスキルミオンが生成されるのかを調べています」



磁石の中に宇宙誕生が見えてくる



トラックの赤枠内にパルス磁場を加えてスキルミオンを順次生成する。

トラックの走向方向と垂直に微弱な電流を流すと、スキルミオンはトラックを右回りに移動する。

いったん生成されたスキルミオンは、とても安定な粒子のように振る舞う。

赤枠内のパルス磁場によりスキルミオンを消去することもできる。

図6 スキルミオンの生成・移動・消去のシミュレーション

パルス磁場によりスキルミオンを生成・消去し、電流でスキルミオンを移動させる。

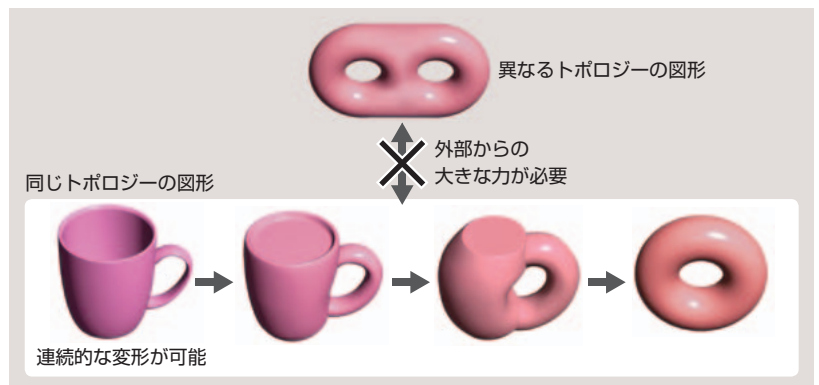


図7 トポロジーによる図形の分類

コーヒーカップは連続的に変形してドーナツの形にすることができるため、コーヒーカップとドーナツは同じトポロジーの図形に分類される。しかし、ドーナツにもう一つ穴を開けるには連続的な変形では無理で、外部から大きな力を加える必要がある。二つ穴のドーナツと、一つ穴のドーナツやコーヒーカップは、異なるトポロジーの図形に分類される。

イラスト：吉原成行

なぜ、スキルミオンは極めて弱い電流で移動させることができるのか。理論面からスキルミオンの研究を行っている小椎八重 航 上級研究員（以下、小椎八重 航 研究員）は次のように解説する。「移動させたい方向に電流を流せば、その方向にスキルミオンは移動します。しかし、それには強い電流を流す必要があります。野球のカーブボールは、回転するボールに生じる運動方向に対して垂直な力、マグナス力を利用したものです。渦巻き構造のスキルミオンにも、マグナス力が働きます。これを利用すると、実はとても弱い電流でスキルミオンを動かすことができます。移動させたい方向と垂直に電流を流すのです」

そもそもスキルミオンが移動するとはどういうことなのか。「それは、これもまた野球場で見られる光景ですが、観客席で起きる応援の様子、ウェーブに似ています。ウェーブでは、それぞれの観客は座席にとどまったままですが、立ち上がる動作の連係で人がつくる波形が猛スピードで応援席を駆け巡っていきます。スキルミオンの移動でも、それぞれの電子スピンは移動せず、電子スピンの向きが次々に入れ替わっていきます」

スキルミオンをメモリーに利用するには、移動だけでなく、生成と消去を自在に行う必要がある。「スキルミオンが生成される温度や磁場の範囲は物質により決まっています。例えば、物質を部分的に加熱して生成の温度範囲に入れることでスキルミオンを生成し、加熱あるいは冷却して温度範囲から外すことでスキルミオンを消去することができますと考えられます。スキルミオンは、情報の書き込み速度の速いメモリーに応用できるでしょう」

小椎八重 航 研究員は、コンピュータ・

シミュレーションにより、スキルミオンを生成・消去させる方法や、移動させるための電流の流し方などの具体的な条件を明らかにしている（図6）。

いったん生成されたスキルミオンは、変形することはあっても、破壊する目的で外部から熱などを与えない限り消滅することはない、とても安定な粒子のように振る舞う。数千個の電子スピが集まった構造が、なぜ安定な粒子となるのか。「それはトポロジー（位相幾何学）によって説明されます。もともとスキルミオンは、トポロジー理論に基づき粒子とは何かを記述するために提唱されました」

トポロジーは、形が本質的に同じものか異なるものかを分類する理論だ。例えば、コーヒーカップの形を伸ばしたり、縮めたり、曲げたりして連続的に変形させていくと、ドーナツの形にすることができる。コーヒーカップとドーナツは同じトポロジーの図形だ。しかし、ドーナツにもう1個の穴を開けるには連続的な変形では無理で、外部から大きな力を加える必要がある。そのため一つ穴と二つ穴のドーナツは、異なるトポロジーの図形に分類される（図7）。

「スキルミオンの電子スピンの並び方も、外部から大きな力を加えない限りトポロジーが変わりません。一度スキルミオンが生成されると、形は変わっても消滅しにくく粒子として安定です。トポロジカルな安定性があるのです」

小椎八重 航 研究員は、磁石の中でスキルミオンが生成される瞬間についてもコンピュータ・シミュレーションによって詳しく分析している。「まずスキルミオンと、それとはスピンの並び方が異なる“反スキルミオン”のペアができます。やがて反スキルミオンが消滅して、スキ

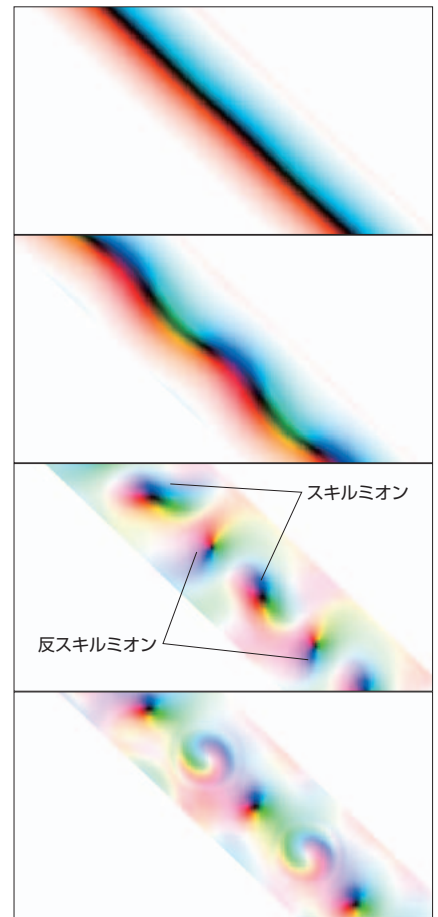


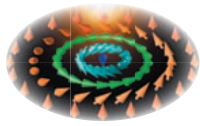
図8 スキルミオンの生成過程のシミュレーション

スキルミオンと反スキルミオンが対で生まれ、スキルミオンだけが残る。

ルミオンだけが生き残ります（図8）。その過程は、宇宙誕生直後に、粒子がつくられる過程と似ています」

宇宙誕生直後には、まず粒子と反粒子のペアが生まれ、やがて粒子だけが残ったと考えられている。

「宇宙誕生のときには、“宇宙ひも”と呼ばれる特殊な領域ができたといわれています。スキルミオンの生成過程をシミュレーションすると、それと似た領域も現れます。磁石の中に宇宙誕生が見えてくるのです。宇宙誕生を実験することはできませんが、磁石の中にできるスキルミオンならば、さまざまな条件で実験することが可能です。しかもそれを電子顕微鏡などで観察したり、実験結果をコンピュータ・シミュレーションなどで理論的に分析したりすることができます。スキルミオンは応用面だけでなく、基礎科学としてもとても魅力的な研究テーマです」



スキルミオンを1ビットとする “超”省電力型メモリー

スキルミオンを利用すると、具体的にどのようなメモリーを実現できるのか。「2013年、フランスのアルベール・フェール博士（2007年ノーベル物理学賞受賞）が、レーストラックメモリーにスキルミオンを使うアイデアを発表しました」と、関 真一郎 ユニトリリーダー（以下、関UL）は説明を始める。レーストラックメモリーは、IBMが開発中の次世代の磁気メモリーだ。

現在普及している磁気メモリーであるハードディスクでは、ディスク表面にあるスピンのそろった「磁区」と呼ばれる領域の磁化（N極・S極）の向きを0と1に対応させて情報を記録する（図9）。そのために駆動部の先に付いた磁気ヘッドをディスクに近づけ、コイルに電流を流して磁場を発生させて磁区の磁化の向きを反転させる。ハードディスクは低コストだが、磁気ヘッドを任意の磁区までいちいち移動しなければならないので、書き込み速度に限界があり、衝撃にも弱い（図10）。

一部で商用化が始まったMRAMには駆動部はないが、1ビットごとにトランジスタが必要になるのでコストが掛かるという課題がある（図11）。

「レーストラックメモリーは、ハードディスクとMRAMのいいとこ取りをした仕組みです。レールのような細長い磁石に約1,000個の磁区を収納できます。磁区と磁区の境界である磁壁を電流で移動させて、1個のトランジスタで情報を書き込みます。駆動部がなく、トランジスタも約1,000ビットにつき1個なので、製造コストを下げるができます」（図12）

レーストラックメモリーの磁区の代わりにスキルミオンを用いると、さらに大きなメリットが生まれる（図13）。「スキルミオンの有無を0と1に対応させるのです。磁区の幅は最小でも50nmですが、直径が数nmのスキルミオンを使えば、1,000倍以上の情報の高密度化を実現できます。また、スキルミオンなら磁壁を動かす電流の10万分の1ほどの弱い電流で駆動できるので、大幅な省電力化が図れます。レールの磁石に不純物などの欠陥があると、磁壁は面なので引っ掛かってしまいますが、スキルミオンは粒子なので欠陥を避けて移動でき、この特徴が駆動電流の低減に大きく貢献していると考えられています」

今後、情報機器がさらに普及することで、電力消費が大きく増えることが予想されている。「情報機器の消費電力のうち、メモリーが大きな部分を占めています。スキルミオンでメモリーを劇的に省電力化することで、エネルギー問題の解決に大きく貢献することができるでしょう」

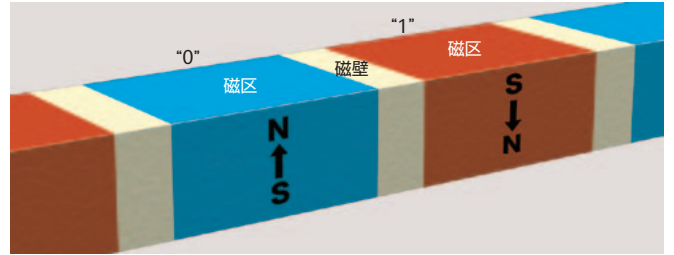


図9 磁区と磁壁
磁区のN極・S極の向きを0と1に対応させて情報を記録する。磁区と磁区の境界は磁壁と呼ばれる。



図10 ハードディスク
駆動部の先に付けられた磁気ヘッドで磁区の磁化の向きを操作して情報を書き込む。駆動部があるため書き込み速度に限界があり、衝撃に弱い。

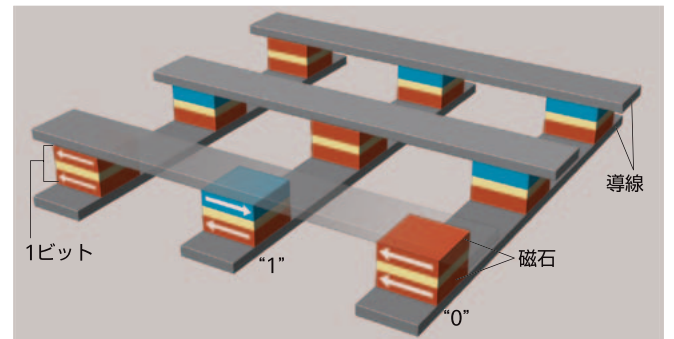


図11 最新の磁気メモリーMRAM

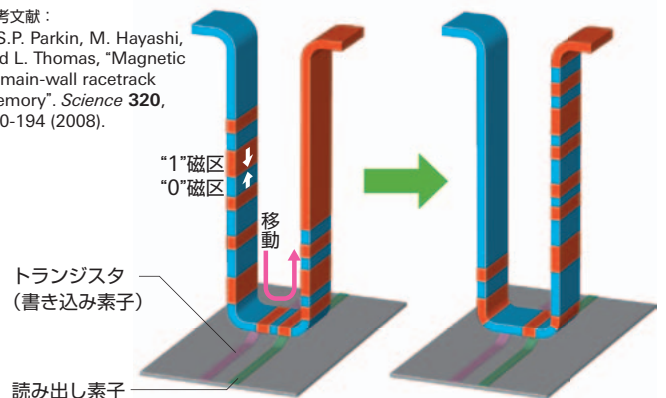
格子状に並べた導線の交点ごとにメモリーの1ビットとなる二つの磁石を配置し、それぞれの磁石の向きが平行か反平行かを0と1に対応させる。駆動部はないが、1ビット当たり1個のトランジスタが必要。

図12 レーストラックメモリー

細いレール上の磁区を電流で移動させて、1個のトランジスタで情報を書き込む。

参考文献：

S.S.P. Parkin, M. Hayashi, and L. Thomas, "Magnetic domain-wall racetrack memory". *Science* **320**, 190-194 (2008).



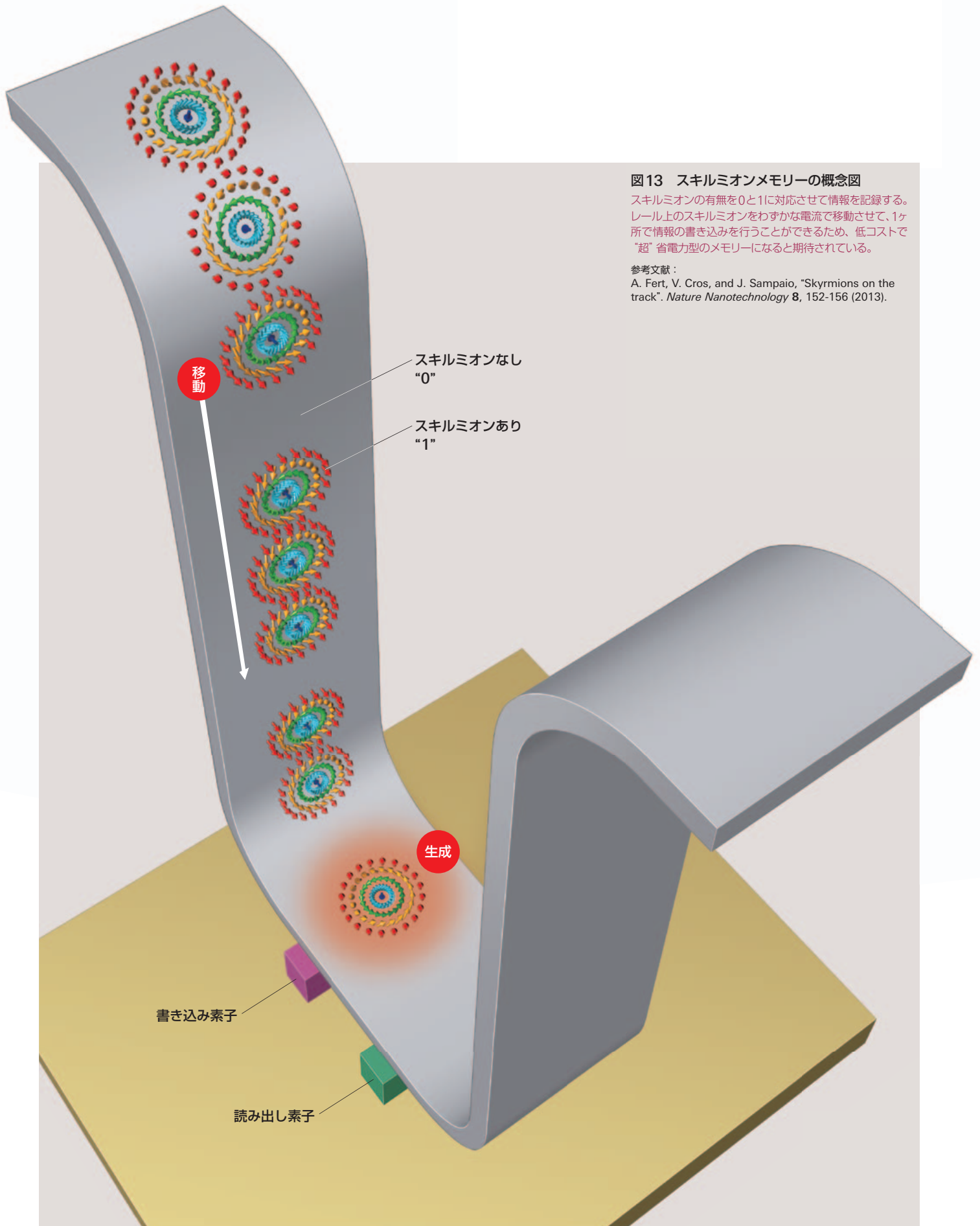


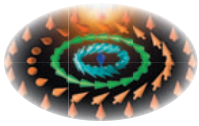
図13 スキルミオンメモリーの概念図

スキルミオンの有無を0と1に対応させて情報を記録する。レール上のスキルミオンをわずかな電流で移動させて、1ヶ所で情報の書き込みを行うことができるため、低コストで“超”省電力型のメモリーになると期待されている。

参考文献：

A. Fert, V. Cros, and J. Sampaio, "Skyrmions on the track". *Nature Nanotechnology* **8**, 152-156 (2013).

イラスト：吉原成行



マルチフェロイクス・スキルミオンメモリーで究極の省電力化を実現する

スキルミオンメモリーでも、スキルミオンを移動させるときに、弱い電流を流す必要がある。関ULは、電流を流さずにスキルミオンを移動させる、ほとんど電力を消費しないスキルミオンメモリーの実現を目指している。

「そのために、マルチフェロイクスという絶縁体を利用します」と関UL。マルチフェロイクスは、常識を覆す機能を持つ物質だ。普通、磁化の向きを反転させて情報を書き込むためには磁場をかける。そのために電磁石のコイルに電流を流して磁場を発生させるには、ある程度の電力が必要であり、電流は電気抵抗により熱を発生して、その分の電力が無駄に消費される。一方、マルチフェロイクスは、磁場ではなく電場によって磁化を反転させることができる。電流を使わないので電力消費を抑えることができる。

なぜ、マルチフェロイクスでは電場で磁化が反転するという常識外れの現象が起きるのか。マルチフェロイクスは、二つの性質を併せ持つ。一つは、外部からの電場がなくてもプラスとマイナスの電荷が偏る分極という性質であり、もう一つは、外部からの磁場がなく

でも磁化してN極とS極から成る磁石になる性質だ。分極と磁化の結び付きが強いマルチフェロイクス物質を電極で挟み、電極のプラスとマイナスを入れ替えると、分極の向きが反転すると同時に、N極とS極も反転する(図14)。

「私はマルチフェロイクスの物質をつくる研究を続けてきました。マルチフェロイクスの機能が現れる結晶の特徴と、スキルミオンを生成できる結晶の特徴を併せ持った物質を数多く設計しました。そして、それらの物質を1種類ずつつくり板状の薄い結晶にして、于研究員にスキルミオンができるかどうか電子顕微鏡で確かめてもらう実験を進めました。すると幸いなことに、その中の一つの物質で実際にスキルミオンが観察されました」

それは Cu_2OSeO_3 という銅を含む酸化物だった(図15・図16)。その一方の表面にはプラス、もう一方の表面にはマイナスの電荷が集まり分極している。そしてスキルミオンが存在する場所には、分極したプラスあるいはマイナスの電荷が周囲よりも余分に存在していることが分かった。

関ULたちがその研究を報告した

2012年の『Science』の論文は、多くの研究者たちに大きな衝撃を与えた。「 Cu_2OSeO_3 では分極とスキルミオンが強く結合していて、電場の勾配を与えれば、余分な電荷が集まった場所が移動すると同時にスキルミオンも移動すると考えられるからです。それにはほとんど電力を消費しません」(図17)

MnSiや $\text{Fe}_{0.5}\text{Co}_{0.5}\text{Si}$ 、FeGeなど、さまざまな物質中でスキルミオンをつくり出せるようになってきたが、いずれも電流が流れる金属だ。一方、 Cu_2OSeO_3 は電流が流れない絶縁体だ。この絶縁体にスキルミオンを生成できることを示したのは、関ULたちが世界で初めてだ。さらにそれは、新たな発想・発展を生み出していく。関ULは、電場勾配以外の方法でも絶縁体中のスキルミオンを移動できる可能性があると指摘する。

金属に電流を流すとスキルミオンが移動するのは、スピンの向きがそろった電子の流れの影響をスキルミオンが受けるからだ。電子の電荷の流れが電流であるのに対し、スピンの流れを「スピン流」と呼ぶ。スピン流は、電流だけでなく光や音波、温度勾配などさまざまな方法で発生させることができる。CEMSの永長 副センター長や于 研究員たちは2014年、金属に同心円状の温度勾配をかけてスピン流を発生させるとスキルミオンが一方に回転することを確認した。「ただし金属中では、スピン流が流れると同時に電流も流れる分、エネルギーが無駄になります。一方、絶縁体ならば、N極・S極の向きの揺らぎが波として伝わる『スピン波』と呼ばれる現象を利用することで、電流を伴わないスピン流を流すことができます。そのような電力ロスのないスピン流によりスキルミオンを動かすことができるはずです」

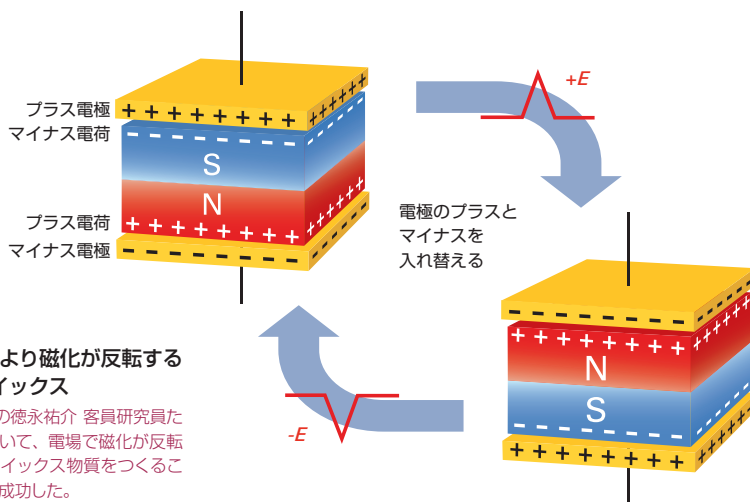


図14 電場により磁化が反転するマルチフェロイクス

2012年、CEMSの徳永祐介 客員研究員たちは、極低温において、電場で磁化が反転するマルチフェロイクス物質をつくることに世界で初めて成功した。



図15 スキルミオンを生成できる絶縁体 Cu_2OSeO_3 をつくり出した装置と関 真一郎ユニットリーダー

今後の大きな目標の一つは、室温への挑戦だ。 Cu_2OSeO_3 でスキルミオンを生成できるのは60K（約-213℃）付近の低温に限られる。室温でスキルミオンを生成できるマルチフェロイクスの絶縁体をつくり出し、それでレーストラックメモリをつくれれば、ほとんど電力を消費しない究極の省電力型メモリとなる。

「現在までに数十種類のマルチフェロイクス絶縁体をつくりましたが、スキルミオンを生成できたのは、 Cu_2OSeO_3 だけです。まだ、私たちが把握できていないスキルミオン生成に必要な条件があるのでしょう。どれだけ自然の仕組みに沿って物質を設計するかで、実験の成否が決まります。それがこの分野

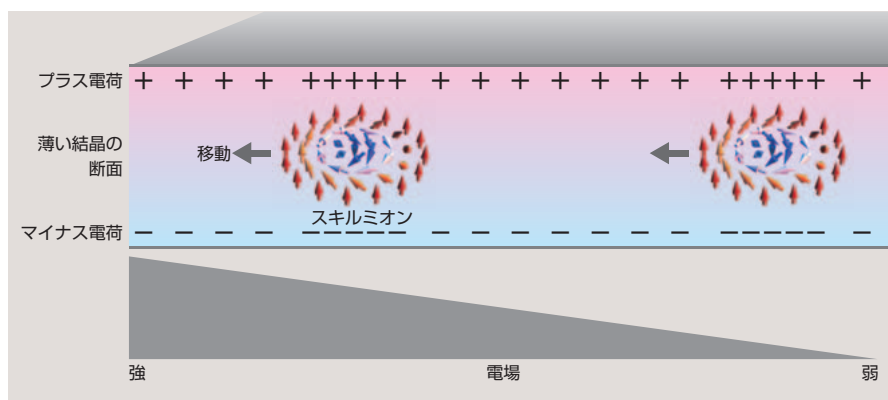


図17 絶縁体中のスキルミオンを電場勾配で動かす

スキルミオンが存在する場所の表面には、プラスとマイナスの電荷が余分に存在している。電場勾配により余分な電荷が集まった場所が移動すると同時にスキルミオンも移動すると考えられる。

の研究の醍醐味です。CEMSでは、室温でスキルミオンを生成できる金属をつくる研究も進んでいます。それも参考にしながら、室温でスキルミオンを生成できる絶縁体をつくる実験を進めていま

す。さらに、そのような絶縁体でレーストラックメモリのレールを実際につくり、スキルミオンを電場勾配やスピン流で移動できるかどうか確かめたいと思います」

スキルミオンで「創発電磁気学」を切り拓き 新しいエネルギー革命を引き起こす

十倉好紀 センター長に聞く

■ 従来の電磁気学を超えた 新しいパラダイム

— 今後、スキルミオンの研究をどのように進めていく計画ですか。

十倉: 基礎研究としてやるべきことがたくさんあります。その大きなターゲットが「創発磁場」です。スキルミオンがあると、物質中の電子はそこに巨大な磁場があるかのように軌道が曲げられます(図18)。それが創発磁場です。例えば、10nm四方に1個の密度でスキルミオンがあると、そのそばを走る電子は、400テスラという普通の実験室ではつくり出すことができない極めて巨大な創発磁場の影響を受けます。

私はCEMSの永長直人 副センター長や田口康二郎チームリーダー(強相関物質研究チーム)たちと、スピンの傾いた構造が電子に大きな創発磁場を与え

ることを2003年に世界で初めて指摘し、研究を続けてきました。ですから、2009年にドイツの研究グループがスキルミオンの結晶を間接的に発見したときに、とても興味を持ったのです。

創発磁場は、これまでの電磁気学では想定されていません。創発磁場が働くときの電子の振る舞いを理解するには、新しい電磁気学を切り拓く必要があります。それを「創発電磁気学」と呼んでいます。

— スキルミオンは、もともと素粒子物理学で提唱された構造ですね。

十倉: 1962年に提唱されてしばらくたった後に、超ひも理論におけるM理論で有名なエドワード・ウィッテン博士(1990年フィールズ賞受賞)がスキルミオンを高く評価したことで、大きな注目を集めるようになったそうです。ス

キルミオンのように素粒子物理学で考えられていた現象が、物質の中で次々と見つかるようになってきました。近年、素粒子物理学の理論家も参入して、物性物理学は新しい発展期を迎えています。キーワードは、トポロジーです。例えば最近、トポロジカル絶縁体と呼ばれる新しいタイプの物質が発見され、大きな注目を集めています(『理研ニュース』2012年11月号および2014年12月号「研究最前線」参照)。

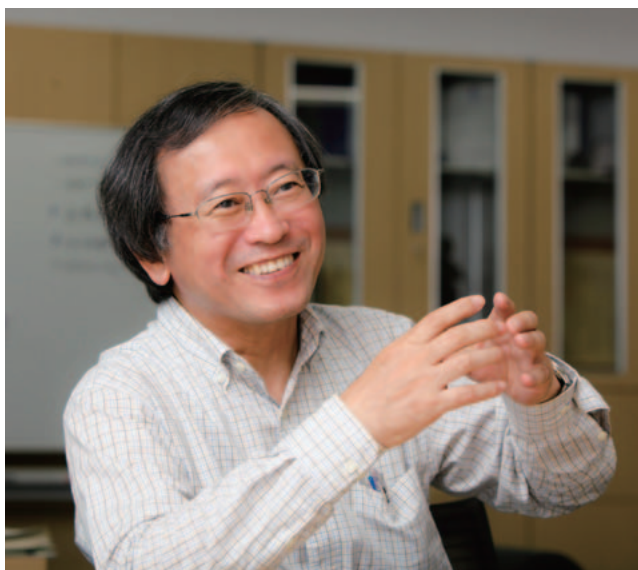
— 宇宙誕生のときに起きたと考えられている現象も、物質中で見られるそうですね。

十倉: 私は、スキルミオンがモノポールのように働く可能性に注目しています。モノポールとは単極の磁石です。宇宙誕生のときには存在したと考えられているモノポールですが、実験的には実証されていません。例えば、棒磁石をどんなに小さくしていてもS極あるいはN極だけの単極にはなりません。ところが、スキルミオンは磁石の中でモノポールと同じような状態をつくり出し、その創発磁場が運動する電子の軌道を曲げると考えられます(図19)。そのような従来の電磁気学ではまったく想定しない状態をスキルミオンでつくり出して研究することで、創発電磁気学を築いていきたいと思います。

■ スキルミオン研究の パイオニアとして

— CEMSの強みはどこですか。

十倉: 理論や物質開発、物性測定、観察など、各分野の一流の研究者が集ま



撮影: STUDIO CAC

十倉好紀

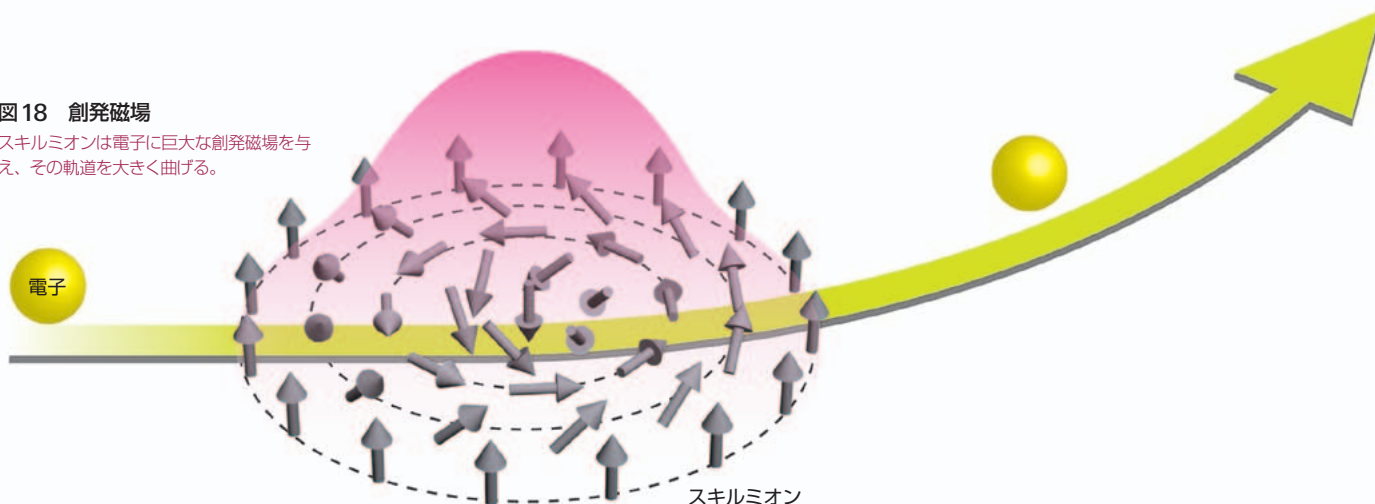
(とくら・よしのり)

創発物性科学研究センター
センター長

1954年、兵庫県生まれ。工学博士。東京大学大学院工学系研究科博士課程修了。1994年より東京大学大学院工学系研究科物理学専攻教授。産業技術総合研究所強相関電子技術研究センター長などを経て、2007年、理研グループディレクター。2013年4月より現職。専門は強相関電子科学。

図18 創発磁場

スキルミオンは電子に巨大な創発磁場を与え、その軌道を大きく曲げる。



り、総力戦で研究を進めている点です。さらに東京大学や物質・材料研究機構など国内の研究グループと共同研究を行うとともに、2009年にスキルミオンの間接観察を発表したドイツの研究グループなどとも交流し、フェアに競争しながら研究を進めています。私たちはこの分野のパイオニアとして、このシグナルを測定できればスキルミオンが生成されたといえる、といった基準づくりを進めています。それにより、さらに多くの研究グループがスキルミオン研究に参入しやすくなるはずで

■ プロトタイプをつくり実証する

——スキルミオンは、省エネルギー技術への応用も期待されています。

十倉：これまでスキルミオンは特殊な結晶構造の物質だけにしか生成されないと考えられていました。しかし最近、CEMSと東京大学との共同研究により、フェライト磁石のようなありふれた磁石でも、薄膜化して少し条件を整えれば、スキルミオンを生成できるらしいということが分かってきました。

私たちは応用に向けた物質を探索し、その物質を使ってスキルミオンメモリーのプロトタイプをつくり機能を実証したいと考えています。それにより、産業界の人たちが興味を持ち、スキルミオンデバイスの開発を始めてくれる

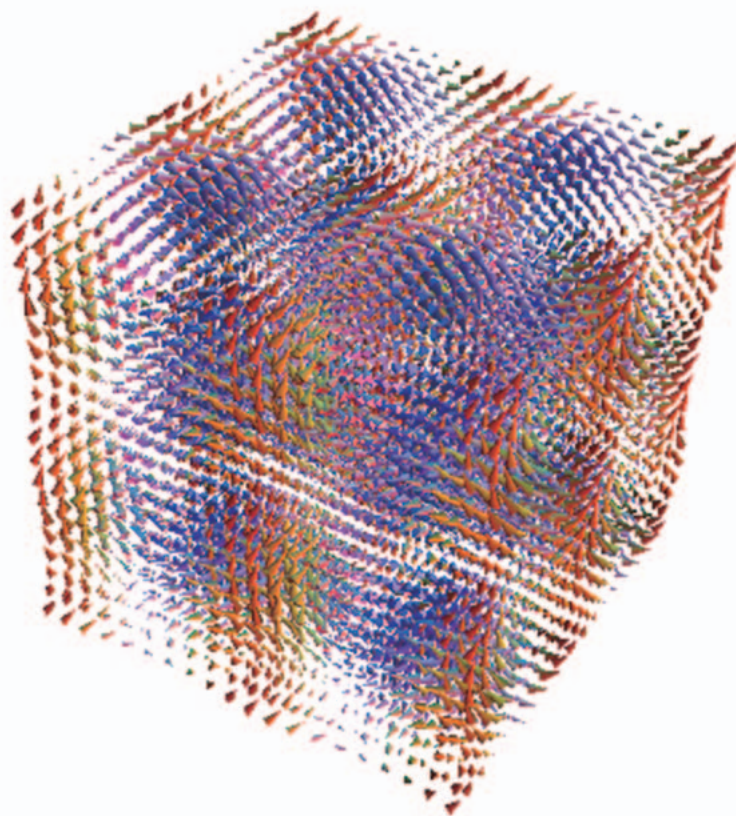


図19 スキルミオンがつくり出すモノポール状態

スキルミオン(赤)と反スキルミオン(青)が、物質中の電子にS極あるいはN極だけのモノポールのよう

に動く可能性がある。

段階までもっていくことが私たちの役目です。

さらにメモリーだけでなく、計算に必要なAND・OR・NOTといった論理回路もスキルミオンで実現したいと考えています。それには2個のスキルミオンを回路に入力して対消滅させるなど、スキルミオンの相互作用を制御す

る必要があります。

私たちは、スキルミオンで創発電磁気学を切り拓くとともに、その原理に基づくまったく新しい技術を生み出し、持続可能な社会の実現に向けた21世紀のエネルギー革命に貢献することを目指していきます。

(取材・執筆：立山 晃／フォトンクリエイト)

走査型トンネル顕微鏡を 6台立ち上げた研究者

「私が新たに移る研究室には、毎回、空っぽの実験室があります。そこに走査型トンネル顕微鏡 (STM) 装置を立ち上げてきました」と岩谷克也 上級研究員 (以下、研究員)。原子レベルで鋭い探針を物質表面に近づけ電圧をかけるとトンネル電流が流れる。STMは、そのトンネル電流の強さが常に一定になるように表面を走査していくことで原子1個ずつに対応した凹凸を測定して、原子の像をつくる顕微鏡だ。「きれいな原子の像が見えてくると、とても感動します。しかし、ノイズの原因となる振動対策などを行い、安定したトンネル電流を長時間保ちながら、きれいな原子の像を描き出していくことは容易ではありません」。岩谷研究員は2014年、自身6台目となるSTMを立ち上げ、試料に圧力をかけて物性が変化する様子をSTMで測定するという実験に取り組んでいる。



岩谷克也

創発物性科学研究センター
創発物性計測研究チーム 上級研究員

いわや・かつや

1975年、青森県生まれ。博士 (学術)。青森県立青森高等学校卒業。東京大学大学院総合文化研究科広域科学専攻相関基礎科学系博士課程修了。理研高木磁性研究室 基礎科学特別研究員、University College London 博士研究員、東北大学原子分子材料科学高等研究機構 助教を経て、2013年4月より現職。

函館への連絡船が出る青森市の港の近くで育った岩谷研究員。「プロ野球の選手になりたかったのですが、中学校ではサッカー部に入りました。坊主刈りにするのが嫌だったからです (笑)」。教科では数学が好きだったと振り返る。「高校生のとき、『大学への数学』という雑誌に載っていた難問を、1週間くらいかけて解いていました」

東京大学へ進学し、物性物理の研究室に。「大学院修士課程のとき、2種類の異なる超伝導体を苦労して作製し、その電子状態の違いを調べました。しかし、そのときに用いた測定法では違いが分からず、がっかりしました」。その研究室で助手をしていたのが、現在所属する創発物性計測研究チームを率いる花栗哲郎チームリーダーだった。「2000年に博士課程へ進むとき、花栗さんから、北澤宏一教授の研究室に移りSTMを立ち上げるので来ないか、と誘われました。STMは物質の電子状態を詳細に測定することができます。現在のチームで同僚の幸坂祐生さん (上級研究員) も加わり、STMの実験に取り組みましたが、当時は3人も素人同然でした」

博士号を取得し、理研を経て、2006年4月から2年半、英国のUniversity College London (UCL) へ。「日本では夜遅くまで実験をするのが普通でしたが、UCLではみんな定時

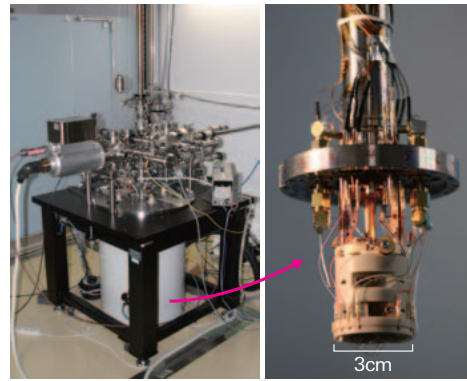


図 岩谷 上級研究員が理研CEMSに立ち上げたSTM

写真の黒いテーブルはパッシブ除振台で、その上に試料表面と探針を準備する超高真空チャンバーが搭載されている。テーブル下の白い円筒形の冷凍機が床下まで続き、STMヘッド (右写真) が内蔵されている。

に帰ります。一番驚いたのは、STMで苦労しながら一緒に実験をしていた学生が、ようやく測定がうまくいき始めたときに、彼女とディナーの約束があるから、と帰ってしまったことです。UCLでの経験から私も仕事のスタイルを変え、誰よりも早く実験室に来て、できるだけ早く帰るようになりました」

朝は4時に起きて読書をするのが日課になった、と岩谷研究員。「英国では、仕事だけでなく、さまざまな分野の知識がなければ対等に会話ができません。海外を経験して日本の政治や経済、歴史に興味を持つようになり、数年間、それらの分野の本を読みました。でも、政治や経済、歴史は人によって見方が異なり、結局、何が正しいのか分かりません。最近になって、真理を探究する物理がやっぱり面白いと思うようになり、学生のときに読むべきだった本などを読んでいます」

東北大学 助教を経て、2013年の創発物性科学研究センター (CEMS) 設立と同時に理研へ戻ってきた。「今回は初めて、実験室にはすでにSTMが設置されていたのですが、壊れていました。それをきちんと整備して測定を始めたのですが、その矢先に海外への移設が決まり、また実験室が空っぽになってしまいました。やっぱりそうなるのか、自分は空っぽの実験室から始める運命なのだ、と悟りましたね (笑)」

岩谷研究員は、試料に圧力をかけながら電子状態を測定できる、これまでにないSTMの開発を行っている。「すべてを設計し、部品を一から組み上げました。物質に圧力をかけると電子状態が変化して絶縁体が金属になったりします。特にCEMSで研究されている強相関電子系物質は、外部からのわずかな刺激で物性ががらりと変わります。しかし、そのときの電子状態の変化を原子スケールで測定した例はありません。さらに、鉄系超伝導体やトポロジカル絶縁体などさまざまな物質を対象に、圧力をかけたときの電子状態の変化をSTMで測定することに挑戦していくつもりです」

(取材・執筆：立山 晃/フォトンクリエイト)

脳科学総合研究センター「Summer Program 2015」参加者募集のお知らせ

脳科学総合研究センターでは、2015年6月10日から8月5日にかけて受け入れるインターンシップ・レクチャーコースおよび2015年7月20日から7月24日にかけて行われるレクチャーコースに参加する大学院生、ポスドクを募集します。インターンシップコースでは希望ラボでの実験を行い、レクチャーコースでは“Sculpting Neural Circuits and Behavior”というテーマのもと海外および国内の第一線の研究者が講義を行います。レクチャーコース期間中、ラボ訪問のほか、ポスター発表、レセプションなどが行われます。プログラムはすべて英語で行われます。

問い合わせ：理研BSIサマープログラム実行委員会
info.summer@brain.riken.jp



招待講師

Allan Basbaum (UCSF)
榎本和生 (東京大学)
Michela Fagiolini (Harvard University)
Wenbiao Gan (NYU Langone Medical Center)
Aaron Gitler (Stanford University)
Takao Hensch (Harvard University)
Roozbeh Kiani (NYU)
松崎政紀 (基礎生物学研究所)
Nirao Shah (UCSF)
Rachel Wong (University of Washington)
山中章弘 (名古屋大学)



新研究室主宰者の紹介

新しく就任した研究室主宰者を紹介します。

- ①生まれ年、②出生地、③最終学歴、④主な職歴、
⑤活動内容・研究テーマ、⑥信条、⑦趣味

創発物性科学研究センター



量子凝縮体研究チーム
チームリーダー
上田正仁 うえだ・まさひと

- ①1963年 ②大阪府 ③東京大学大学院理学系研究科修士課程 ④NTT基礎研究所、広島大学、東京工業大学、東京大学 ⑤冷却原子気体、情報熱力学、量子情報・測定 ⑥一日一日を大切に ⑦音楽、ランニング

環境資源科学研究センター



植物共生研究チーム
チームリーダー
林 誠 はやし・まこと

- ①1966年 ②東京都 ③東京大学大学院理学系研究科博士課程 ④大阪大学、ミュンヘン大学、農業生物資源研究所 ⑤植物と微生物との共生 ⑥Carpe Diem ⑦音楽

仁科加速器研究センター



ミュオンデータチーム
チームリーダー
松崎禎市郎 まつざき・ていichろう

- ①1952年 ②東京都 ③東京工業大学理学部応用物理学科博士課程 ④理研仁科加速器研究センター ⑤ミュオン原子核捕獲反応による核変換 ⑥一心欲見仏 ⑦隅田川テラス散歩

山歩きから得たもの

植木雅志 うえき・まさし
長田抗生物質研究室 専任研究員

ハイキングや遠足として、ほとんどの人たちは山歩きの経験があるのではないだろうか。私も、小学校（兵庫県西宮市）の遠足で仁川から甲山に幾度となく行った。標高300m程度だが、地元では定番の山で、興味深い植生に富んでいることで知られている。

■
国土地理院の地形図で、山として記載されているものは、1万5000以上あるという。高い順に、富士山（3,776m）、北岳（3,193m）、奥穂高岳（3,190m）、間ノ岳（3,190m）から、天保山（大阪市、4.5m）、日和山（仙台市、3m）へと続く。国土の7割が山岳といわれるだけあって、山の数は驚くほど多い。

■
深田久弥（1903～1971年）は、登山家・随筆家として知られるが、多くの山を歩いた経験に基づき、その中から100座の山を選定した。それが「日本百名山」で、基本的には標高1,500m以上の山の中から、山の品格・歴史・個性を基準にして選んだ。登山ブームといわれ始めて久しいが、最近では老若男女を問わず、山や空を体感するために多くの人があらゆる山を訪れている。どの山に行こうか、と思いを巡らすときに、やはり参考になるのが「日本百名山」であり、私も専らこの100座をすべて巡りたいと思って、山行の行き先を決めている。

■
山ごとに趣が異なり、それぞれの個性が面白いが、印象に残っている一つに、雲ノ平がある。富山駅前からバスに乗って登山口へ。薬師岳（2,926m）、黒部五郎岳（2,840m）、鷲羽岳（2,924m）の三つの百名山を巡って、雲ノ平を通過して戻るコースで、3泊4日の行程だ。終始いい天気恵まれ、壮観な山々の連なりや、広大な空を見ながら、山行を楽しんだ。夜には三脚を立て、満天の星を試行錯誤しながら撮影するのも楽しみの一つだ。山歩きで楽しみにしていることは、つらい思いをして到着した雲上の頂から見る景色とともに、普段の生活ではまず会うことの



写真・雲ノ平山荘にて

ない人たちとの一期一会である。山小屋には、出身も仕事も年齢もさまざまな人々が集まっているが、その山を登ってきたという共通の経験を持つ人たちが、狭い空間を共有している。同じ釜の飯を食っているのである。

■
「どうして山に行くのか」とよく聞かれる。大層な理由はなく、そこには普段決して接することのない別世界があるからだろう。やはり登るときはつらい。風雨にさらされたときの山歩きは、さらにつらい。山小屋には水も満足にないことが多く、数日間風呂に入れないことなどは普通である。そのつらい状況を、いかにして乗り切るか。乗り切ったときの達成感、ほかでは得難い。乗り切るためには、携行物の選別、ルート選定、体力増進など多岐にわたる準備が不可欠であり、すでに計画段階から山歩きは始まっている。山行中でも体調管理、天候の遷移などに気を配らなければならない。

■
実は、私の普段の仕事と山歩きとは共通部分が多い。微生物を分離・培養し、新規な代謝産物を取得する工程は、見つかるまではつらく長い道程と感じる。しかし、見つかるほかでは得られない達成感がそこにある。地図がある山歩きとは異なり、研究には地図はなく、むしろ地図を自分で描いていくのが研究であり、先を見通すことはできない。しかし、しっかりした準備を行い、つらい行程を乗り越えて、その先にある別世界へたどり着く忍耐は、山歩きから学んでいるところが大きい。

■
皆さんも一度、まだ見ぬ別世界へ出掛けてみてはいかがだろうか。もちろん、そのときは準備万端で。

寄附ご支援のお願い

理研を支える研究者たちへの支援を通じて、日本の自然科学の発展にご参加ください。

問合せ先 ● 理研 外部資金室 寄附金担当

Tel : 048-462-4955 Email : kifu-info@riken.jp (一部クレジットカード決済が可能です)



http://www.riken.jp/