



丸文研究奨励賞 受賞者

関 真一郎

東京大学 大学院工学系研究科総合研究機構  
准教授

## 新規磁気スキルミオン物質の 開拓と機能探索

磁石の中の渦巻きを利用した新しい情報デバイスの可能性

### 研究の背景

現代の情報社会は、エレクトロニクスの発展によって支えられており、電子の集団の新しい制御法を探すことは、電子機器の小型化・低消費電力化といった課題に対して根本的な解決策を与える可能性を秘めている。電子は電荷とスピンの2つの自由度を持つ粒子であり、従来の半導体エレクトロニクスが電荷の自由度のみを利用していたのに対し、もう1つの自由度であるスピンを積極的に活用する電子技術はスピントロニクスと呼ばれ、革新的な特徴・機能を持つデバイスを実現するための切り札として高い期待が寄せられている。

この分野で最近、特殊な磁性体の中で

生じる電子スピンの渦巻き構造(磁気スキルミオン)が、幾何学的に安定なナノサイズの粒子としての性質を持つことが発見され、次世代の磁気記憶素子のための新しい情報担体の候補として、大きな注目を集めている(図1(a))。磁気スキルミオンの実験的な研究が本格化したのは2010年代に入ってからであり、その一般的な物質設計指針の確立や、新たな制御手法の開拓が課題となっていた。

### 研究の成果

本研究によって得られた主な成果は、以下の3項目に集約される。

1. 新機構に基づく、世界最小の直径のスキルミオンを伴う新物質の発見  
従来、スキルミオンの安定化には、空間反転対称性の破れた特殊な結晶構造の下で生じるDzyaloshinskii-Moriya相互作用が必須であるとされ、この場合には数十～数百nm程度の直径のスキルミオンが実現することが知られていた。しかし、超高密度な情報担体としてスキルミ

オンを活用するためには、ありふれた結晶構造の物質で、より小さな直径のスキルミオンを実現することが重要である。本研究では、遍歴電子を利用した全く新しいスキルミオン生成機構に着目することで、空間反転対称性の保たれた単純な結晶構造を持つ新物質 $GdRu_2Si_2$ において、既知の物質としては世界最小となる直径1.9nmのスキルミオンを発見することに成功した(図2) [1]。上記の結果は、遍歴電子の媒介する相互作用を利用すれば、ありふれた構造の物質で普遍的に極小サイズのスキルミオンを安定化できることを示しており、全く新しいスキルミオン物質の設計指針を与えていると考えられる。スキルミオンを情報担体として捉えたとき、その直径を小さくすることはそのまま情報の高密度化に直結するため、上記の世界最小サイズのスキルミオンの発見は、応用上も極めて大きなインパクトがあると言える。

2. スキルミオンを生じる世界初の絶縁体物質の発見と、その電場制御の実現  
従来、スキルミオンは金属中の電流で動かせることが知られていたが、この方法

図1 (a) 磁気スキルミオン粒子と、  
(b) 磁気スキルミオンひもの模式図

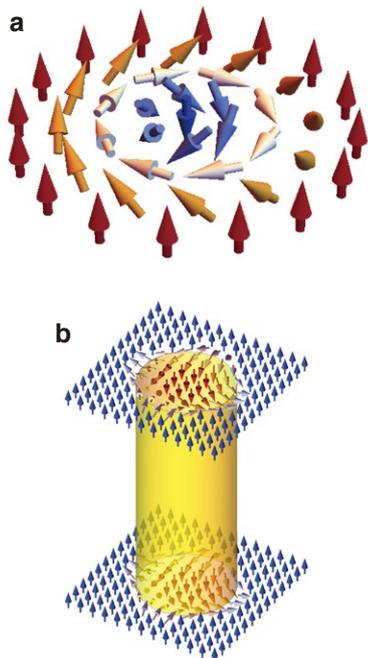
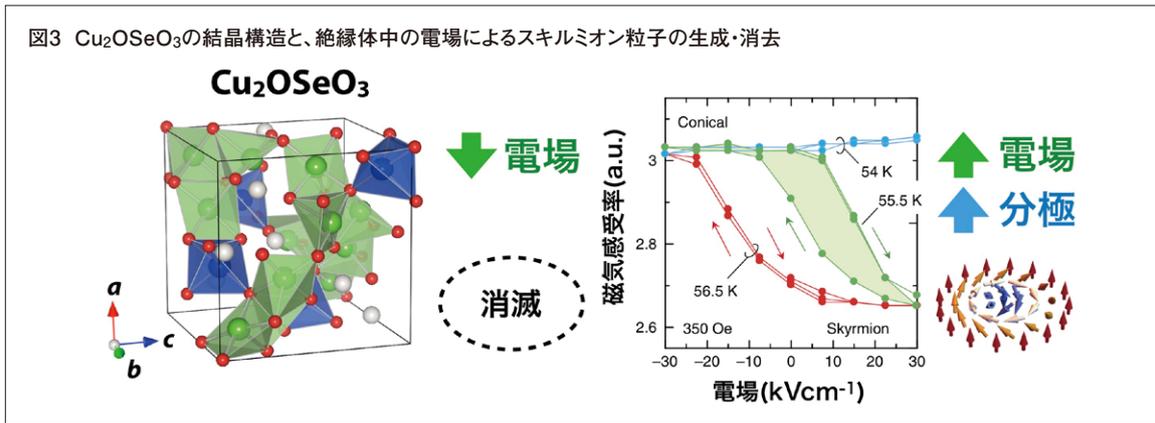


図2 (a)、(b)  $GdRu_2Si_2$ の結晶構造と、透過型ローレンツ電子顕微鏡で観察したナノサイズのスキルミオン像  
(c) スキルミオン物質の設計指針

	a	b	c			
	$GdRu_2Si_2$	Field map	物質設計指針	発現機構	物質例	Skyrmion 直径
従来			反転対称性の破れた結晶構造	DM相互作用	B20合金 $Cu_2OSeO_3$	100~10 nm
本研究			高対称な構造の希土類合金	RKKY + 多体相互作用 [遍歴電子由来]	$GdRu_2Si_2$ $Gd_2PdSi_3$	< 3nm

図3 Cu<sub>2</sub>OSeO<sub>3</sub>の結晶構造と、絶縁体中の電場によるスキルミオン粒子の生成・消去

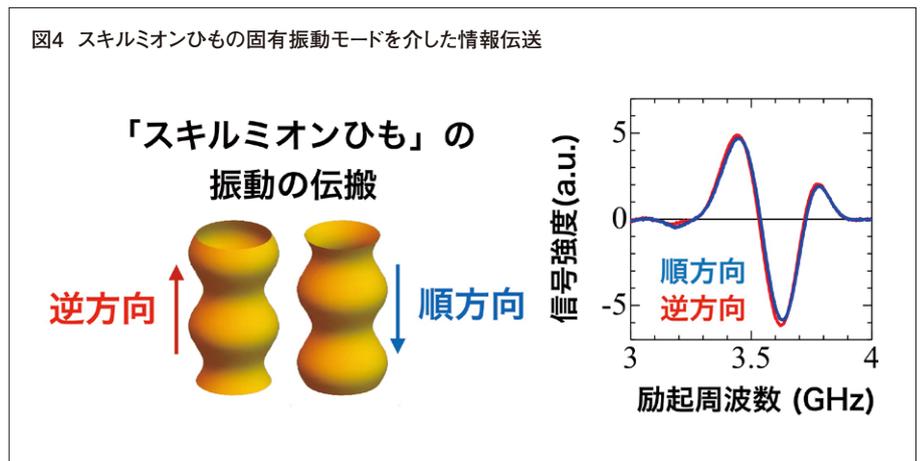


ではジュール発熱(電流の2乗に比例)に伴うエネルギー損失が避けられないという課題があった。本研究では、対称性に立脚した独自の物質設計指針に基づいて、スキルミオンを伴う初めての絶縁体物質(Cu<sub>2</sub>OSeO<sub>3</sub>)を発見することに成功し、さらに絶縁体中のスキルミオンが系の対称性の低下を通じて電気分極を誘起していることを明らかにした[2]。このようなスキルミオンと電気分極の強い結合は、電場によってスキルミオンの安定性やダイナミクスを制御できることを強く示唆しており、実際にその後、電場によるスキルミオンの生成・消去・駆動が実験的に確認されている(図3)[3]。金属中の電流とは異なり、絶縁体中の電場はジュール損失を生じないことから、上記の発見はスキルミオンを電氣的に制御するための、よりエネルギー効率の高い画期的な新手法を与えていると考えられる。

### 3. 「スキルミオンひも」の固有振動モードを介した情報伝送の実証

渦巻き状のスピンの構造であるスキルミオンは、2次元系では粒子として振舞うのに対し、3次元系では「ひも」としての性質を持つことが理論的に予測されている(図1(b))。本研究では、このスキルミオンひもの振動を利用した情報伝送の可能性に着目し、伝搬スピン波分光法と呼ばれる測定手法を用いて、「ひも」の中を振動が伝わる様子を詳細に調べた。その結果、スキルミオンひもがGHz周波数帯域に3つの固有振動モードを持つこと、またこの励起モードが「ひも」の直径の1000倍以上の非常に長い距離にわたって信号を伝達できることを発見した(図4)。スキルミオンひもの振動は、電線上の電気信号と異なりジュール損失を生じな

図4 スキルミオンひもの固有振動モードを介した情報伝送



いことから、上記の結果は、スキルミオンひもをフレキシブルで超低消費電力な新しい情報伝送路として活用できる可能性を示していると考えられる[4]。

### 将来の展望

スキルミオンは、現行の磁気メモリ(HDDなど)で使われている磁区・磁壁に比べて2桁以上高い情報密度を実現でき、かつ5桁以上小さな電流で駆動できることが実験的に明らかとなっており、情報化社会における記憶容量・消費電力の問題を解決するための切り札として、社会的にも大きな注目を集めている。上記の一連の研究成果は、ス

キルミオンの超高密度・超低消費電力な情報担体としての応用展開をさらに大きく後押しするものであり、次世代の画期的な磁気情報素子の開発に貢献することが期待される。

### 謝辞

本研究の遂行にあたっては、理化学研究所 創発物性科学研究センター(CEMS)(センター長:十倉好紀教授)および東京大学大学院工学系研究科物理工学専攻・総合研究機構の皆さん、さらに国内外の数多くの共同研究者の方々にご協力いただきました。この場を借りて、関係する全ての皆様に深くお礼申し上げます。

### References(参考文献)

- [1] N. D. Khanh, T. Nakajima, X. Z. Yu, S. Gao, K. Shibata, M. Hirschberger, Y. Yamasaki, H. Sagayama, H. Nakao, L. C. Peng, K. Nakajima, R. Takagi, T. Arima, Y. Tokura, S. Seki, Nature Nanotechnology 15, 444 (2020) .
- [2] S. Seki, X. Z. Yu, S. Ishiwata, Y. Tokura, Science 336, 198 (2012) .
- [3] Y. Okamura, F. Kagawa, S. Seki, Y. Tokura, Nature Communications 7, 12669 (2016) .
- [4] S. Seki, M. Garst, J. Waizner, R. Takagi, N. D. Khanh, Y. Okamura, K. Kondou, F. Kagawa, Y. Otani, Y. Tokura, Nature Communications 11, 256 (2020) .