

### 磁場に対する円偏光活性をもつらせん導電性高分子の合成に成功

2024年2月22日  
筑波大学，高エネルギー加速器研究機構

近年，半導体分野においては，磁場を担うスピン（電子の自転）を制御することで電子機器の制御を行うなど，通信を担う技術としてスピントロニクスへの期待が高まっています。しかしながら，研究の多くは無機磁性体を対象としており，導電性高分子を基盤とした有機エレクトロニクス分野においては，スピントロニクスの研究はほとんどなされていません。本研究グループは1990年代後半よりトポロジ的な磁性の研究を進め，半導体分野のスピントロニクスに資する物質として，新規有機磁性体をいくつか報告してきました。

本研究では，これまでの有機磁性体（らせん導電性高分子）の開発の知見に基づき，らせん磁気活性導電性高分子の開発に成功しました。これにあたって，医療分野で移植手術や免疫不全に対する重要な薬剤であるシクロスポリンAを用いることを着想しました。シクロスポリンAは天然の菌類より抽出され，大きならせん誘起力をもつために，これを用いて合成した導電性高分子は極めて高いらせん構造を有すると考えられます。得られた導電性高分子について，シンクロトン放射光により微細構造を調べたところ，シクロスポリンAと同様のらせん構造を有していることが分かりました。また，マイクロ波領域で電子スピン活性を示し，磁場方向に対する異方性が認められました。このような性質は有機高分子では初めてであり，ポリマースピントロニクスの第一歩となるものです。

本研究成果は2024年2月22日，科学誌 *The Journal of Physical Chemistry* に掲載されました（この記事の続きは <https://www.kek.jp/wp-content/uploads/2024/03/pr20240222.pdf> をご覧ください）。

### 血液凝固因子の正常な分泌に必須なカーゴ受容体の全長構造をクライオ電子顕微鏡によって解明

2024年3月29日  
東北大学，九州大学，東京大学大学院理学系研究科，  
高エネルギー加速器研究機構

血液凝固因子などの分泌タンパク質は，細胞内の小胞体において合成された後，積荷（カーゴ）として特異的なカーゴ受容体によって認識され，効率よく細胞外へと分泌されています。カーゴ輸送の異常は，血液性疾患などの様々

な遺伝性疾患の原因となることが知られています。カーゴ輸送の中心を担うカーゴ受容体として，ERGIC-53 とその補助因子 MCFD2 が約40年前に同定され，ERGIC-53 の糖鎖を認識する領域（ドメイン）を中心に構造機能研究が進められてきました。しかしその全長構造は未決定で，全長において多様なカーゴを認識し輸送する仕組みは未解明のままでした。

東北大学多元物質科学研究所の渡部聡助教，稲葉謙次教授らの研究グループは，クライオ電子顕微鏡単粒子解析を用いて，全長 ERGIC-53 と補助因子 MCFD2 との複合体の立体構造を世界で初めて決定しました。構造解析の結果，全長構造はヘッド領域，ストック領域，膜貫通領域で構成されており，四葉のクローバーに類似した全体構造をとることが分かりました。また，ERGIC-53 の全長構造のダイナミックな構造変化の様子の可視化にも成功し，柔軟な構造変化を利用したカーゴ認識機構が明らかになりました。また，ERGIC-53-MCFD2 複合体のヘッド領域を高分解能で構造決定し，四量体形成の詳細な分子基盤が明らかになっただけでなく，MCFD2 において新たに亜鉛結合部位があることが分かり，分泌経路下流におけるカーゴの解離が亜鉛によって促進される機構が示唆されました。

本研究成果は，2024年3月16日に科学雑誌 *Nature Communications* に掲載されました。

研究成果は東京大学大学院理学系研究科の木瀬孔明特任准教授，濡木理教授，および高エネルギー加速器研究機構（KEK）物質構造科学研究所の米澤健人研究員（現：奈良先端科学技術大学院大学），清水伸隆教授らとの共同研究により得られたものです（この記事の続きは <https://www.kek.jp/wp-content/uploads/2024/03/pr20240329.pdf> をご覧ください）。

### 多彩なスピン構造の間のトポロジカル数スイッチングに成功—超高密度な新しい情報担体としての活用期待—

2024年3月29日  
東京大学，理化学研究所，北海道大学，  
J-PARC センター，高エネルギー加速器研究機構，  
科学技術振興機構

東京大学大学院工学系研究科の吉持遥人 大学院生，高木里奈 助教（研究当時），関真一郎 准教授らの研究グループは，同大学物性研究所の中島多朗 准教授，北海道大学大学院理学研究院の速水賢 准教授らとの共同研究を通じて， $\text{GdRu}_2\text{Ge}_2$  という希土類合金において，外部磁場の大きさを変化させることで，「楕円形スキルミオン」や「メロン-アンチメロン分子」，「円形スキルミオン」といった

多彩なスピン構造を観測することに成功しました。

磁性体で見られる電子スピンの渦構造である磁気スキルミオンは、トポロジーに保護された安定な粒子として振る舞うことから、次世代の情報担体の候補として注目を集めています。スキルミオンは従来、対称性の低い結晶構造を有する物質のみで発現すると考えられてきました。しかしながら、近年では新しい形成機構によって、対称性の高い物質において直径数ナノメートル (nm, 1 nm は 10 億分の 1 メートル) の極小サイズのスキルミオンが報告されています。

そこで本研究では、希土類合金  $GdRu_2Ge_2$  を対象として研究を行った結果、本物質では直径 2.7 ナノメートルの極小サイズのスキルミオンが実現しており、さらに外部磁場の大きさに応じて複数の多彩なスピン構造が発現することを明らかにしました。本成果は、極小サイズのスキルミオンにまつわる新しい物質設計指針を与える結果であることに加え、本物質で見られるスキルミオンとメロン-アンチメロン分子は異なるトポロジカル数によって特徴付けられることから、外部磁場による多値メモリ動作といった新たな応用展開につながる可能性を秘めています。

本研究成果は 2024 年 4 月 1 日 (英国夏時間) に英国科学誌「Nature Physics」オンライン版に掲載されます (この記事の続きは <https://www.kek.jp/wp-content/uploads/2024/04/pr20240401.pdf> をご覧ください)。

## ホタルの発光メカニズムを探れ！ 炭素原子 X 線吸収計測でルシフェリン分子の構造変化を解明

2024 年 4 月 12 日

群馬大学, 高エネルギー加速器研究機構,  
分子研科学研究所, SOKENDAI, 静岡大学

群馬大学大学院理工学府・工藤優斗 (2022 年度修士卒), 樋山みやび准教授, 板橋英之教授, 高エネルギー加速器研究機構 (KEK) 物質構造科学研究所・熊木文俊博士研究員, 足立純一講師, 分子科学研究所 (総合研究大学院大学)・長坂将成助教, 静岡大学・野口良史准教授, 名古屋大学・古賀伸明名誉教授による共同研究グループは、炭素原子の X 線吸収の計測および理論計算による分析を通じて、ホタル生物発光の発光色に大きく関わるホタルルシフェリンのフェノール性水酸基からの脱プロトン化が pH の変化により生じる様子を明らかにすることに成功しました。

本研究成果は 2024 年 1 月 5 日に「The Journal of Physical Chemistry A」に掲載されました (この記事の続きは <https://www.kek.jp/ja/press/202404121400> をご覧ください)。

## カイラル結晶構造と反強磁気秩序の自発的出現 時間と空間の反転対称性が同時に破れた新奇構造を発見

2024 年 4 月 26 日

茨城大学, 高エネルギー加速器研究機構,  
総合科学研究機構, 日本原子力研究開発機構,  
J-PARC センター, 静岡大学

茨城大学大学院理工学研究科の下田愛海さん (研究当時大学院生), 茨城大学原子科学研究教育センターの岩佐和晃教授を中心とするグループは、茨城大学大学院理工学研究科の桑原慶太郎教授, 高エネルギー加速器研究機構 (KEK) 物質構造科学研究所の佐賀山基准教授と中尾裕則准教授, 総合科学研究機構中性子科学センターの石角元志副主任技師と中尾朗子副主任研究員, J-PARC センターの河村聖子研究副主幹と村井直樹研究員と大原高志研究主幹, 東北大学金属材料研究所・高等研究機構の南部雄亮准教授の協力のもと, Remeika 相化合物のうちネオジム・ロジウム・錫 (スズ) を含む  $Nd_3Rh_4Sn_{13}$  が示す結晶構造相転移と磁気秩序の詳細を明らかにし, 空間反転と時間反転の対称性が逐次的・自発的に破れる相転移を発見しました。

結晶中の原子配列の対称性は物質の性質を決定づける因子です。例えば, 原子が存在する物質領域とその外側の真空の境界で空間反転対称性が破れた場合, 物質内部が絶縁体であっても, 境界表面では電流が生じるというディラック電子状態が知られています。また, 右手と左手, あるいは右ネジと左ネジのような対掌性の関係にある構造は, 鏡に映る実像と虚像の関係にありますが, 右と左それぞれは反転対称性が失われています。このようなカイラル対称性においてもワイル電子と呼ばれる特殊な電子状態が現れ, 実効的には質量のない電子が運動する半金属状態が期待されています。

本研究グループは, このような空間反転対称性の破れた結晶構造に自発的に相転移し, さらに磁気秩序によって時間反転対称性も破れうる物質を開拓すべく, Remeika 相化合物  $Nd_3Rh_4Sn_{13}$  を詳しく調べました。その結果, この物質がカイラル対称結晶構造に相転移し, さらに反強磁気秩序化することを明らかにしました。特に, ネオジムイオンの一次元鎖状格子の磁気モーメントが反強磁気状態を取りつつ, 隣接する一次元鎖と三角格子を介して連結して三次元構造をとるという特徴を明らかにしました。このような対称性の破れは新たなトポロジカル電子状態を示唆するものと期待できます。

本成果は, Physical Review B 誌の Editors' Suggestion として 2024 年 4 月 16 日付で公開されました (この記事の続きは <https://www.kek.jp/ja/press/202404261400> をご覧ください)。