



東京大学  
THE UNIVERSITY OF TOKYO



国立大学法人東京大学  
独立行政法人理化学研究所

## ナノスケールのスピン渦「スキルミオン」を利用した

### マイクロ波整流効果を発見

#### - マイクロ波応答の新原理を実証 -

#### 1. 発表者：

- 岡村 嘉大 (東京大学大学院 工学系研究科 物理工学専攻 修士課程2年)  
賀川 史敬 (東京大学大学院 工学系研究科 物理工学専攻 講師)  
望月 雅人 (青山学院大学理工学部 物理・数理学科 准教授)  
久保田 将司 (理化学研究所 創発物性科学研究センター 客員技師)  
関 真一郎 (東京大学大学院 工学系研究科 物理工学専攻 特任講師(現:理化学研究所 創発物性科学研究センター ユニットリーダー)・科学技術振興機構 さきがけ研究者)  
石渡 晋太郎 (東京大学大学院 工学系研究科 物理工学専攻 准教授)  
川崎 雅司 (東京大学大学院 工学系研究科 物理工学専攻 教授・理化学研究所 創発物性科学研究センター グループディレクター)  
小野瀬 佳文 (東京大学大学院 総合文化研究科関連基礎科学系 准教授)  
十倉 好紀 (理化学研究所 創発物性科学研究センター センター長・東京大学大学院 工学系研究科 物理工学専攻 教授)

#### 2. 発表のポイント：

- ・スキルミオン<sup>(注1)</sup>にマイクロ波を照射すると、その伝搬方向によってスキルミオンにおけるマイクロ波の吸収量が異なることを発見
- ・磁性が電界に応答することを利用した、マイクロ波アイソレータ<sup>(注2)</sup>の新原理を実証
- ・スキルミオンを利用した、新方式のマイクロ波整流デバイス実現に道筋

#### 3. 発表概要：

最先端研究開発支援プログラム(FIRST)課題名「強相関量子科学」(中心研究者:十倉好紀)の事業の一環として、東京大学大学院工学系研究科の岡村嘉大 大学院生、賀川史敬 講師及び理化学研究所創発物性科学研究センターの十倉好紀センター長らの研究グループは、物質中に生じるスピンの渦「スキルミオン」が、マイクロ波の吸収量はその伝搬させる向きに依存して変化するという機能性を有することを発見しました。

物質には磁性が存在し、私たちの生活において広く応用されています。身の回りには磁石はもちろん、パソコンの磁気ヘッドなどその活躍の場は多岐にわたります。磁性は電子のスピンが規則正しく配列することにより発現しますが、複雑なスピン配列には本来の磁石としての性質だけではなく、付加的な機能性が生じることがしばしばあります。最近になり、スピンの

渦巻き状に配列した「スキルミオン」が特殊な結晶構造を持つ磁性体中において発見されました。スキルミオンはその特殊なスピン配列ゆえに粒子としての性質を持ち、また一つが数十ナノメートルという大きさであるために、次世代の記憶素子における情報担体としての可能性が指摘されています。現在ではその学術基盤構築、ひいては応用にむけ、スキルミオンの新奇な外場応答の探索が盛んに進められています。今回岡村嘉大大学院生らの研究グループは、電磁波の一種であるマイクロ波の透過率を精密に測定することによって、スキルミオンが磁気共鳴<sup>(注3)</sup>を起こす際に吸収されるマイクロ波の量がマイクロ波の伝搬方向によって変わるという現象の観測に成功しました。本成果で見出された新規機能性やその動作原理を応用することで、マイクロ波整流デバイスや電場を加えることによって透磁率が変わるインダクタなど、スキルミオンを基盤とした応用の可能性が示されました。

本研究は、JST さきがけの関 真一郎 博士、東京大学の川崎 雅司 教授らと共同で行われ、2013年8月30日（日本時間）に英国科学誌「Nature Communications」のオンライン版で公開されました。

本研究の一部は科学技術振興機構（JST）戦略的創造研究推進事業個人型研究（さきがけ）の「新物質科学と元素戦略」研究領域（細野秀雄研究総括）における課題の一環として行われました。

#### 4. 発表内容：

##### <研究の背景>

昨今のスピントロニクス<sup>(注4)</sup>分野においては、省電力メモリ素子の構築などを目的として、電子のスピン自由度を活用した現象の研究が盛んにおこなわれています。特に、スピンが織りなす複雑な磁気構造は、豊かな物性を示すことが知られており、最近では、スキルミオンとよばれる電子スピンの作るナノスケールの渦が注目されています[図1(a)]。スキルミオンは構成するスピンがあらゆる方向を向き、粒子的な形状をしているため、次世代の演算、記憶素子における情報担体として利用できる可能性が指摘されており、現在、スキルミオンの制御手法の確立やスキルミオンを基盤としたデバイスの構築へ向けて、新奇な応答や機能性の探索が盛んにおこなわれています。

本研究では、マイクロ波（ギガヘルツ）領域におけるスキルミオンの電磁波応答に着目しました。先行研究から、スキルミオンに特定の周波数のマイクロ波を照射することで、スキルミオンが磁気共鳴（反時計回りの回転運動）を起こすことが知られていました[図1(b)]。磁気共鳴はギガヘルツと周波数が高いために高速のダイナミクスが期待され、実際に強磁性体においては磁気共鳴を用いることで磁化の制御にも活用されています。また、ギガヘルツの電磁波は、電子レンジに用いられていることはよく知られていますが、この他にも無線通信や無線送電などにも応用されており、汎用性の高い電磁波であります。これに対し、スキルミオンという特殊な磁気構造がマイクロ波領域でどのような機能性を有するのかが明らかになっていませんでした。

##### <研究の経緯>

東京大学大学院 工学系研究科 物理工学専攻 岡村 嘉大 大学院生らの研究グループは、スキルミオンの新たな電磁波応答を探索する上で、ある磁場温度域になるとスキルミオンが発現する物質  $\text{Cu}_2\text{OSeO}_3$ （Cu：銅、O：酸素、Se：セレン）に着目しました[図1(c)]。 $\text{Cu}_2\text{OSeO}_3$ にマイクロ波を照射するとその振動磁場成分と相互作用し、スキルミオンが回転運動する磁気

共鳴を起こすことがすでに報告されています [図 1(b)]。Cu<sub>2</sub>OSeO<sub>3</sub>はマルチフェロイクス<sup>(注5)</sup>としての性質を有するので、振動磁場だけでなく振動電場によっても磁気共鳴を起こせる可能性があります [図 1(d)]。さらには、Cu<sub>2</sub>OSeO<sub>3</sub> が振動磁場、振動電場のそれぞれと相互作用し同時に磁気共鳴を起こすことができれば、両者の干渉効果によってマイクロ波の伝搬方向に依存した共鳴の強さやそれに伴うマイクロ波の吸収量の変化という電気磁気光学効果の発現が期待されます。以上のことから、Cu<sub>2</sub>OSeO<sub>3</sub> はスキルミオンのギガヘルツ帯の機能性を探索するには格好の素材であると考え、スキルミオン相におけるマイクロ波応答を調べることにしました。

#### <研究内容>

岡村 嘉大 大学院生らの研究グループは、Cu<sub>2</sub>OSeO<sub>3</sub> について、磁場を加えていくと中間磁場でスキルミオンが発現する温度 (57 K、-216°C) において、10 メガヘルツから 4 ギガヘルツまでのマイクロ波の吸収スペクトルを測定しました。スキルミオン相に対応する 300 Oe (エルステッドと読み、磁場の強さを表す単位) の磁場を加えた時の吸収スペクトルが図 2(a) であり、ピークが観測され、磁気共鳴が起こっていることがわかります。先行研究によれば低周波側のピークがスキルミオンの磁気共鳴(反時計回り回転モード)に対応しています [図 1(b)]。図 2(b)のように電磁波の伝搬方向をかえて測定した吸収スペクトルの差スペクトルを図 2(c)に示します。+300 Oe のデータにおいて、吸収の差スペクトルは有限値を示しており、マイクロ波の吸収量がマイクロ波の照射方向に依存していることがわかります。さらに磁場の符号を反転させると (-300 Oe)、吸収の差スペクトルも符号が反転しており、この現象がスキルミオンの持つ磁化方向とマイクロ波の伝搬方向の相対関係で決まっていることがわかります。これらの実験結果はマイクロ波の伝搬方向に依存してその吸収率が変化するという、マイクロ波領域における新規性能を実証したものとと言えます。

#### <展望>

本研究により、スキルミオンが磁気共鳴においてマイクロ波を吸収する際、マイクロ波を伝搬させる方向に応じて吸収が異なるという新たな電磁波応答が見出されました。同様の機能性を持つマイクロ波素子としてファラデー効果<sup>(注6)</sup>を利用したマイクロ波アイソレータなどが知られていますが、電気磁気光学効果を利用したマイクロ波整流の実証は今回が初めてであり、この新原理を用いることで従来のものとは異なるマイクロ波整流デバイスの実現できる可能性が示唆されました。また、今回の結果は絶縁体中スキルミオンの電場応答性を実証したという側面も持つことから、ジュール発熱によるエネルギー損失を伴わない超低消費電力な磁気記憶・演算素子の開発や、電界で透磁率を制御可能なインダクタといったデバイスにも貢献することが期待されます。

#### 5. 発表雑誌：

雑誌名：「Nature Communications」 (オンライン版：8月30日)

論文タイトル：Microwave magnetoelectric effect via skyrmion resonance modes in a helimagnetic multiferroic

著者: Y. Okamura, F. Kagawa, M. Mochizuki, M. Kubota, S. Seki, S. Ishiwata, M. Kawasaki,  
Y. Onose, and Y. Tokura  
DOI 番号 : 10.1038/ncomms3391

## 6. 問い合わせ先 :

<研究内容に関すること>

岡村 嘉大 (オカムラ ヨシヒロ)  
東京大学 大学院工学系研究科 物理工学専攻 修士課程 2年

十倉 好紀 (トクラ ヨシノリ)  
独立行政法人理化学研究所 創発物性科学研究センター センター長  
東京大学 大学院工学系研究科 物理工学専攻 教授  
〒351-0198 埼玉県和光市広沢 2-1  
Tel : 048-462-1111 (代表)

<「最先端研究開発支援プログラム」に関すること>

独立行政法人 日本学術振興会 研究事業部 最先端研究助成課  
Tel : 03-3263-1698  
E-mail : first@jsps.go.jp  
URL : <http://www.jsps.go.jp/j-first/index.html>

<創発物性科学研究センターに関すること>

平林 泉 (ヒラバヤシ イズミ)  
独立行政法人理化学研究所 創発物性科学研究センター 強相関量子科学研究支援チーム チームリーダー  
URL: <http://www.cems.riken.jp/jp/>

独立行政法人理化学研究所 創発物性科学研究推進室

<報道担当>

東京大学大学院工学系研究科 広報室 永合 由美子

## 8. 用語解説：

### (注1) スキルミオン

渦巻き状の形になっているスピンの超構造体。スキルミオンは、あらゆる方向をむくスピンの構成されており、外側は磁場に平行（図 1(a)では上向き）で、中心に向かうに従い徐々にその向きを変え、中心では磁場に反平行（図 1(a)では下向き）になっている。

### (注2) アイソレータ

マイクロ波や光波の伝送回路で用いられる回路素子の一つで、伝送線路の一方向から入射された電磁波は伝搬するが、その逆方向から入射されたものは伝搬せず素子に吸収されるという機能をもつ。この素子は通常、磁性体のもつファラデー回転の機能を利用している。

### (注3) 磁気共鳴

外部磁場中におかれた電子スピンに対して、高周波磁場を加えるとある特定の共鳴周波数において、応答が急激に大きくなりスピンの歳差運動をする現象。

### (注4) スピントロニクス

電子の電荷とスピンの両方の自由度を用いた新しいエレクトロニクス。従来のエレクトロニクスは電荷のみを利用したが、それに加え量子力学的な自由度のスピンを加えるため、より画期的なデバイスへの応用が期待される。

### (注5) マルチフェロイクス

広義では複数の秩序が同時に存在するような系を指す。ここでは特に、磁性と誘電性が同時に存在し、それらが同時に強く結合している物質群のこと。

### (注6) ファラデー効果

直線偏光が磁場と平行に進むとき、偏光面が回転する現象のこと。

9. 添付資料：

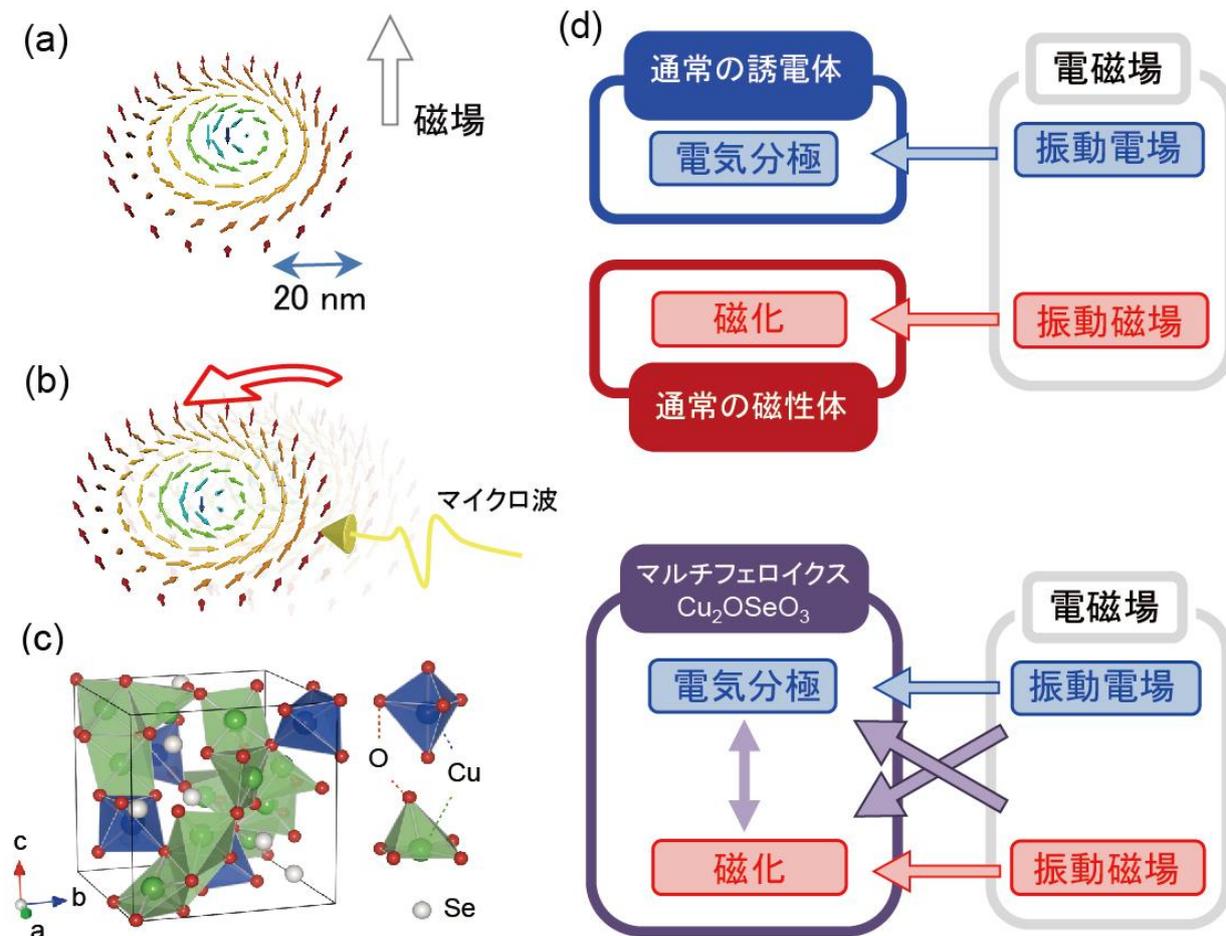


図 1. (a) スキルミオンの概念図。(b) スキルミオンの磁気共鳴の概念図 (反時計回り回転モード)。(c)  $\text{Cu}_2\text{OSeO}_3$  の結晶構造。(d) 通常誘電体、磁性体とマルチフェロイクスの比較の概念図。

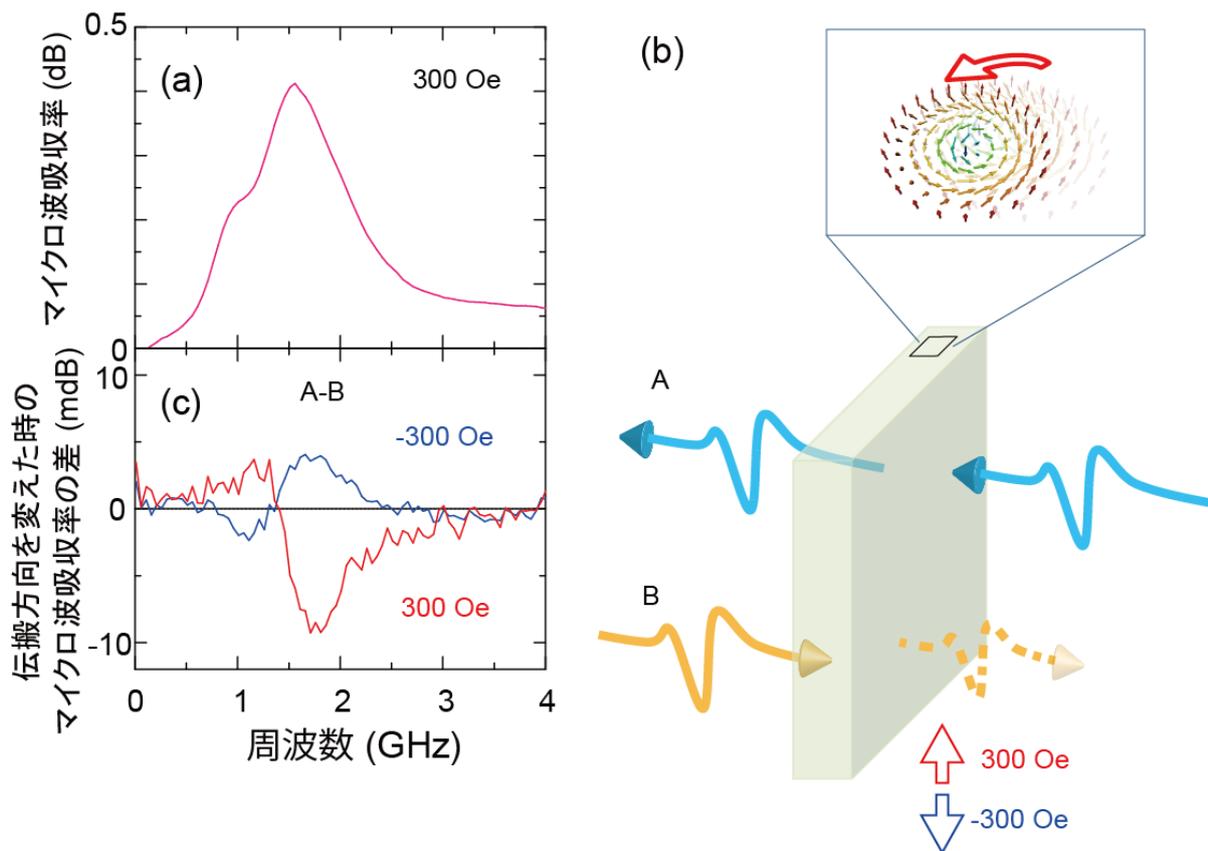


図2. (a)スキルミオン相 (57 K, 300 Oe) におけるマイクロ波吸収スペクトル。(b)本研究の概念図。伝搬方向によってマイクロ波の伝搬率(吸収率)が異なる。(c)伝搬方向を変えた際のマイクロ波の吸収の差。それぞれ赤線、青線は300 Oe, -300 Oeのときのデータ。