

論文の内容の要旨

論文題目 Electric-field control and microwave functionality of
magnetic skyrmions
(磁気スキルミオンの電場制御とマイクロ波機能性)

氏 名 岡村 嘉大

近年の物性研究において、トポロジーという観点が重要な理解を与えるものであることがわかってきた。その研究の舞台の一例として、トポロジカルな安定性を有するスキルミオンと呼ばれる磁気構造体が盛んに研究されている。これまでのスキルミオン研究では、金属においてスキルミオンの示す磁気輸送現象や電流を用いたスキルミオンの駆動などが中心として行われており、絶縁体におけるスキルミオン物性はほとんど未開拓な状況であった。

本博士論文では、その中でも特に電気磁気効果を有する物質に注目することで、スキルミオンの電場制御や電気磁気光学効果の実証など、静的・動的電気磁気効果といったスキルミオン物性を明らかにした。第1、2章では、現在までのスキルミオン研究の概観そして実験手法についてそれぞれ述べた。第3章では、スキルミオンを示すと同時に、磁性と誘電性が強く結合するマルチフェロイクスとしての性質を持つ Cu_2OSeO_3 において、スキルミオンの電場制御を行った。バルク結晶、薄膜について、それぞれ磁化測定、小角軟 X 線散乱を用いることで、それぞれ異なる相転移ダイナミクスを明らかにした。第4章では、マイクロ波分光測定を行うことで、スキルミオンの内部自由度の変形による二つの磁気励起モードを発見した。また、特にブリージングモードは磁場によるスキルミオン格子の融解に敏感であることがわかった。第5章では、第4章で発見したスキルミオンの磁気励起モードが方向二色性と呼ばれる電気磁気光学効果を示すことを明らかにし、またその効果がどのような機構を介して生じるものなのかについて議論した。以下、各章について概説する。

第3章 マルチフェロイック Cu_2OSeO_3 におけるスキルミオンの電場制御

スキルミオンを制御する上でスキルミオンの生成消滅は必要不可欠であり、外場を印加することによるスキルミオンの安定性制御が研究されてきた。その中でも、電場

による制御はジュール熱による損失のない方法であり、マルチフェロイック物質においてスキルミオンが発見されて以来、重要な課題であった。

まず前半の内容においては、磁化率測定によりスキルミオン相の電場依存性を調べ、正（負）電場によりスキルミオン相が拡大（縮小）することを明らかにした（図1）。これはスキルミオンとコニカル磁気構造の電気分極の相対的な大きさによって理解することができる。さらには正電場を印加しながらスキルミオンを冷却すると、最低温まで準安定状態として残ることがわかった。これは、電場により熱力学的な安定性だけでなく準安定性も変化していることによるものであり、この性質を利用することで、スキルミオンとコニカル磁気構造の不揮発スイッチも実現した。

以上ではバルク結晶においてスキルミオンの安定性について議論したが、後半では薄膜におけるスキルミオンの電場応答について小角軟 X 線散乱を用い調べた。バルク結晶ではスキルミオンとコニカル磁気構造の競合であったが、薄膜ではコニカル磁気構造が不安定化するため、スキルミオンに正、負に電場を印加すると異なるヘリカル磁気構造に変形することがわかった。特に正電場を印加した際にできるヘリカル磁気構造は、温度磁場掃引では現れない磁気構造であることがわかった。

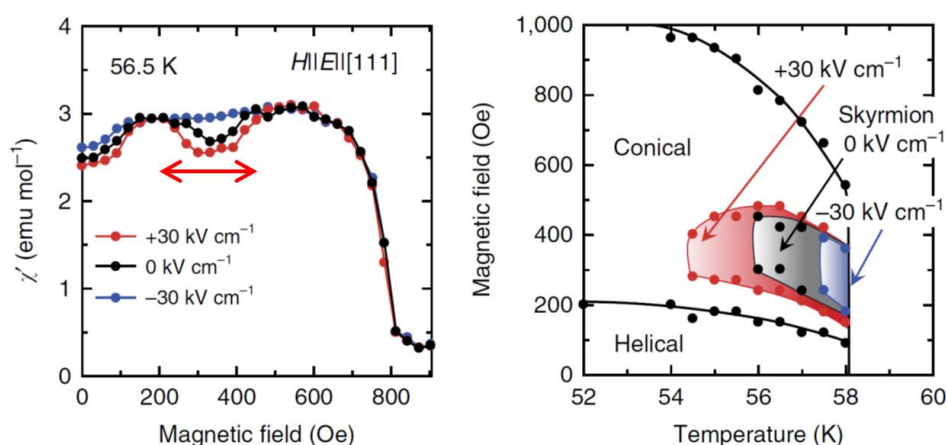


図 1: （左）電場下における交流帯磁率の磁場依存性。中間磁場におけるディップがスキルミオン相に対応する。（右）電場下における磁気相図。スキルミオン相が正・負電場下において拡大・縮小する。

第4章 スキルミオンの共鳴モードの観測

本章では、スキルミオンの磁気励起モードについて調べた。スキルミオンは強磁性や反強磁性などの従来の磁気構造とは違い複雑な内部構造を有するため、それに対応して多彩な磁気励起モードが発現することを明らかにした。

まず前半の内容においては、スキルミオンの磁気励起を観測するために、マイクロ波領域の広帯域吸収分光を行った。静磁場とマイクロ波の振動磁場が垂直・平行な配

置においてスキルミオン相に特徴的な吸収ピークを観測した（図2）。理論計算と比較することで、それぞれがスキルミオンのコアの反時計回り回転モード・ブリージングモードに対応していることが分かった。

以上の内容に加え、さらに広い磁場領域においてスキルミオンの共鳴モードについて調べるために、準安定スキルミオン状態での分光を行った。反時計回転モードについては、前節で観測したものを延長したような振る舞いが観測された一方で、ブリージングモードでは、高磁場領域において、共鳴周波数が変化しなくなるという振る舞いを観測し、スキルミオン格子とは異なる振る舞いを示すことがわかった。磁場履歴依存性について詳しく調べることで、その磁場領域がスキルミオンがガラス状態として存在する領域に対応していると結論付けた。

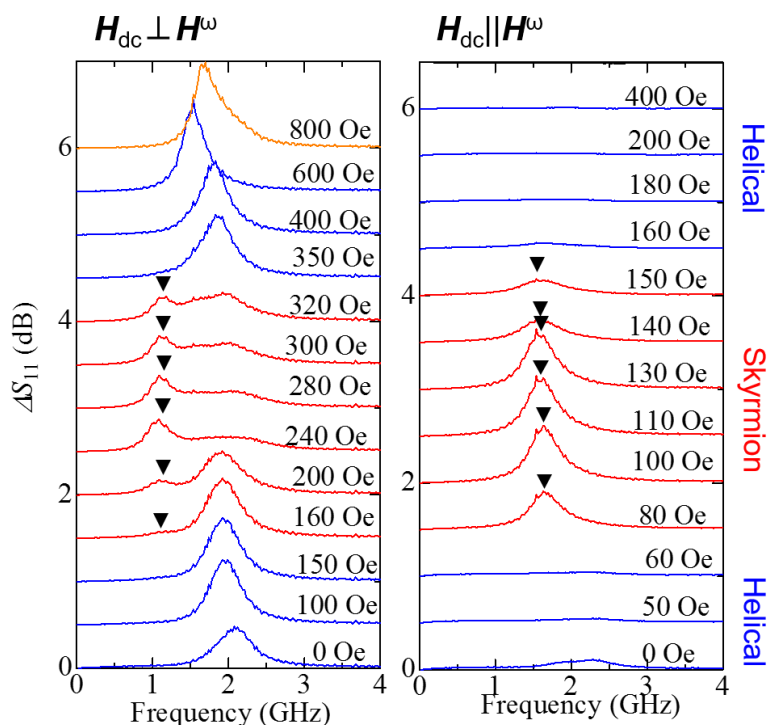


図2: $H_{dc} \perp H^\omega$ 、 $H_{dc} \parallel H^\omega$ におけるマイクロ波スペクトル。黒矢印はスキルミオンによる共鳴吸収を指している。

第5章 スキルミオン共鳴モードのマイクロ波方向二色性

マイクロ波領域の磁気励起は通常、マイクロ波の振動磁場成分によって励起されるが、マルチフェロイクスでは強い磁性と誘電性の結合により、電場成分によっても励起可能になる。この性質を利用することで、一方から光が入射する際と他方から入射する際に応答の大きさが異なるという、方向二色性と呼ばれる電気磁気効果の実現が可能になる。本章では、前章で発見したスキルミオンの励起モードを用い、この現象の実証そしてそのミクロな機構の解明を行った。

前半では、磁場とマイクロ波の伝播方向が垂直な配置において実験を行った。電気分極、磁場とマイクロ波の伝播方向がすべて垂直なときのみ方向二色性を観測し、対称性

に従う選択則を実証した。さらにスキルミオンの二つの共鳴モードにおいて、方向二色性を観測した。特に、反時計回り回転モードとブリージングモードについて方向二色性の符号が反転しており、これが理論計算と整合する結果であることを確認した(図3)。

以上では磁場とマイクロ波の伝播方向が垂直な配置を調べたが、後半では平行な配置を調べた。結晶方位と伝播方向を系統的に調べることで、物質の電気磁気効果と方向二色性がどのように関係しているかということを示した。ここから得られた法則により、スキルミオンの反時計回り回転モードとブリージングモードについて方向二色性の符号が反転することも定性的に説明できることがわかった。

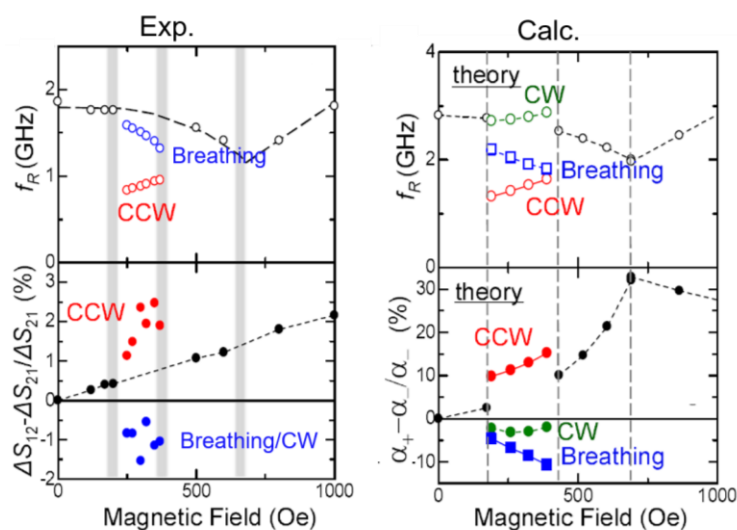


図 3: 磁気共鳴の共鳴周波数、方向二色性の磁場依存性。左：実験、右：理論計算。

第6章 結論

本博士論文では、スキルミオンの電場制御、そしてマイクロ波機能性について調べ、以下のような知見を得た。

- ① スキルミオン相を有するマルチフェロイック Cu_2OSeO_3 において、スキルミオン相の電場制御を行った。バルク、薄膜試料において異なる相転移ダイナミクスを観測した。
- ② スキルミオンの内部自由度の変形による二つの磁気励起モードの発見に成功した。
- ③ このうち特にブリージングモードの変化を追うことで、スキルミオン格子のガラス転移を明らかにした。
- ④ スキルミオンの磁気励起モードを利用した方向二色性の観測に成功した。
- ⑤ 方向二色性の機構について、系の電気磁気結合を考えることで理解できることを示した。また、これをもとにスキルミオンの磁気励起モードの方向二色性についても同様に理解できることを示した。