

第8回キラル物性若手の会 2018年度 冬の学校

日時

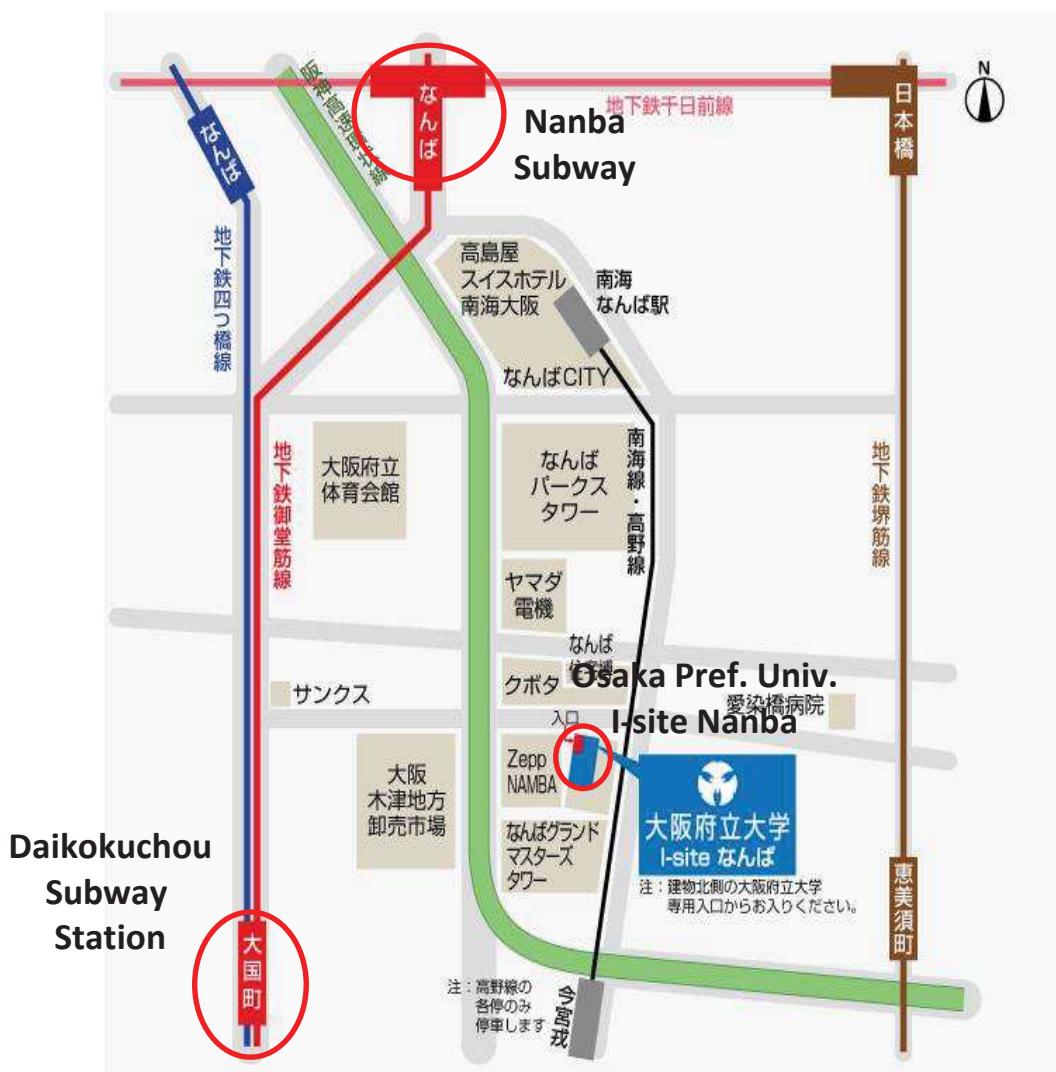
2018年12月12日（水）～14日（金）

場所

大阪府立大学

I-siteなんば 2F セミナールームA1+A2

<https://www.osakafu-u.ac.jp/isitenanba/>



地下鉄御堂筋線「大国町駅（1番出口）」下車

東へ約450m、徒歩約7分

地下鉄御堂筋線「なんば駅」 下車

南へ徒歩約15分

プログラム

* 12月12日(水) *

13:30-13:40 開会

13:40-15:40 大阪府大・宍戸先生 フェルミ面の量子振動による実験的観測法 1

15:40-16:00 休憩

16:00-17:00 大阪府大・宍戸先生 フェルミ面の量子振動による実験的観測法 2

17:00-18:00 グループディスカッション 1

19:00- 懇親会

場所：鮮魚個室居酒屋 利休 難波千日前店 大阪府大阪市中央区千日前2-8-17 オリエンタルホテル&ダ・オーレ

<https://tabelog.com/osaka/A2701/A270202/27091511/>

* 12月13日(木) *

10:00-12:00 グループディスカッション 2

12:00-13:30 昼食

13:30-15:30 東大・松浦先生 磁性入門講義 1

15:30-15:50 休憩

15:50-17:50 東大・松浦先生 磁性入門講座 2

* 12月14日 (金) *

10:00-12:00 グループディスカッション 3

12:00-13:30 昼食

13:30-15:30 茨城大・佐藤先生 光渦と磁性

15:30-15:50 休憩

15:50-16:50 若手による口頭発表（発表25分+討論5分）

15:50-16:20 高橋 浩久（放送大学）

16:20-16:50 橋谷田 俊（分子科学研究所）

16:50-17:00 閉会

連絡先 高橋浩久 090-3953-4420

懇親会について

初日のセッション終了後、難波で懇親会を行います。スタッフの方には6500円程度、ポスドクの方には5000円、学生の方には3000円のご負担を頂く予定です。皆様のご参加を心からお待ちしております。

参加者リスト Participants List

氏名	所属	役職
井上 克也	広島大学大学院理学研究科	教授
岸根 順一郎	放送大学	教授
戸川 欣彦	大阪府立大学大学院工学研究科	教授
佐藤 正寛	茨城大学理学部物理学領域	准教授
宍戸 寛明	大阪府立大学大学院工学研究科	准教授
松浦 弘泰	東京大学大学院理学系研究科	助教
橋谷田 俊	分子科学研究所 岡本グループ	研究員
澤田 祐也	大阪大学大学院理学研究科附属 AHMF	研究員
高橋 浩久	放送大学大学院文化科学研究所	D3
奥村 駿	東京大学大学院工学系研究科・求研	D1
大隈 理央	九州工業大学大学院・美藤研	M2
小倉 光裕	広島大学大学院理学研究科・井上研	M1
土屋 直人	広島大学大学院理学研究科・井上研	M1
石貫 達也	広島大学理学部化学科・井上研	B4
泉 雄大	広島大学理学部化学科・井上研	B4
青木 瑠也	大阪府立大学大学院工学研究科・戸川研	M2
中山 翔太	大阪府立大学大学院工学研究科・戸川研	M2
島本 雄介	大阪府立大学大学院工学研究科・戸川研	M2
乾 皓人	大阪府立大学大学院工学研究科・戸川研	M1
奥村 慧	大阪府立大学大学院工学研究科・戸川研	M1
松島 陽介	大阪府立大学大学院工学研究科・戸川研	M1
吉武 侑耶	大阪府立大学大学院工学研究科・戸川研	M1
西明寺 達哉	大阪府立大学工学域・戸川研	B4
塙田 航平	大阪府立大学工学域・戸川研	B4
西上 勇希	大阪府立大学工学域・戸川研	B4
早川 尚	大阪府立大学工学域・戸川研	B4
水谷 圭吾	大阪府立大学工学域・戸川研	B4
村田 裕樹	大阪府立大学工学域・戸川研	B4
星 幸治郎	東邦大学大学院理学研究科	D1
杉下 将哉	東邦大学大学院理学研究科	M1

フェルミ面の量子振動による実験的観測法

大阪府立大学 工学研究科 宮戸寛明

金属の電気伝導は自由電子が担っているが、必ずしも等方的な伝導性を持つわけではない。これは金属結晶が持つ対称性により束縛されているからにほかならない。固体中の電子は原子核が作る周期ポテンシャルの中を波として伝わっていくため、実空間で考えるよりも、これをフーリエ変換した逆格子空間（波数空間）で考える方が便利である。電子はフェルミ粒子であるので同一の量子状態は1つの粒子しか占めることが出来ない。エネルギーが低い状態から電子を順に詰めていき、電子が占有する最も高いエネルギーをフェルミエネルギーと呼ぶ。フェルミエネルギーを取る波数をフェルミ波数と呼び、3次元の逆格子空間においてフェルミ波数で構成された曲面をフェルミ面と呼ぶ。フェルミ面は言わば金属の貌とでも呼ぶべきものであり、金属における伝導電子が関与した種々の現象を考える上でベースとなるものである。近年、キラル結晶などのように結晶構造に反転中心を持たず、スピン軌道相互作用が強い物質において、スピン縮退が解けてフェルミ面が分裂する様子が実験的に調べられており、特に興味が持たれる。本講義ではフェルミ面の実験的な観測手法として量子振動についての解説を行い、実際のキラル結晶での実験結果についても紹介したい。

磁性入門

東京大学理学系研究科 松浦 弘泰

本講義では、これから磁性の勉強・研究を始めたい人、基礎事項を復習したい人向けの入門講義を行う。物性物理だけでなく、有機合成など様々な分野の方々が参加されるのを想定し、式をほとんど用いることなく、図等を用いて直観的に磁性発現機構の微視的な理解を試みる。具体的には、孤立原子・イオン状態、結晶場理論、超交換相互作用や DM 相互作用などを基礎的な点から解説し、それらの実践的な使い方を紹介する。隨時、演習問題を行い、これらの概念の理解を深めることができるように工夫する予定である。

トポロジカル光波による高速磁性制御法および物性測定法の提案

佐藤正寛 茨城大継

近年、光学・レーザー科学的研究の発展により、平面波やガウスビームなどの標準的な光源に加えて、電磁場の時空分布が幾何学的な特性を持つトポロジカル光波[1]と呼ばれるレーザービームの生成・制御法が幅広い周波数帯において確立している。光学、物理学、化学、生命科学、レーザー加工を含む工学分野、など多彩な領域でトポロジカル光波の応用研究が成されている。実際、2014年のノーベル化学賞や今年(2018年)のノーベル物理学賞は、トポロジカル光波に深く関わるレーザー科学的研究に与えられている。しかし残念ながら、工学、化学、生命科学の研究対象よりも微視的な自由度(電子や電子スピニ)を扱う固体物性物理学とトポロジカル光波の研究の相互作用は非常に希薄であった。

一方、標準的なレーザーは以前から固体物性研究で活用されており、最近のレーザー技術の恩恵の下、光物性科学の研究は急速に発展している。特に、磁気光学やスピントロニクス[2]、マルチフェロイクス(強磁性誘電体)[3]、光誘起相転移、フロケ・エンジニアリング[4]を含む非平衡量子系の理論など、レーザーや電磁波に対する固体の応答やそれら AC 外場による物性制御を主題とする物性研究が猛烈な勢いで進展している。

このような状況から、トポロジカル光波の固体物性科学への応用を考えるのにふさわしい時期が来ていると言えるだろう。最近我々は、トポロジカル光波の典型である光渦(ラゲール・ガウシアン)ビーム[5]とベクトルビーム[6]を用いた固体磁性の高速制御や新しい観測方法を理論的に提案している。

光渦とは軌道角運動量を持つレーザービームである。これに関わる研究では、(1)高周波数帯(紫外や可視光)光渦ビームを巧くカイラル強(反強)磁性体に照射し、その加熱効果でスキルミオンやスキルミオニウムと呼ばれるトポロジカル磁気欠陥を高速生成する方法、(2)テラヘルツ帯光渦ビームを強磁性体やカイラル磁性体に照射することで、ビームの角運動量に応じて、らせん状に伝搬するスピノ波、スカラースピノカイラリティ、複数スキルミオンを生成する方法、などを提案することに成功している。

ベクトルビームは、ビーム伝搬方向と垂直面内において動径方向へ電磁場が振動する特徴をもつトポロジカル光波である。これをレンズで集光すると、伝搬方向と平行な成分を持つAC磁場(または電場)のみが生じる空間を生成することができる。特にテラヘルツ以上の電場を伴わないAC磁場はこのベクトルビームの特性を使わなければ容易に実現できる外場環境ではない。我々は、このベクトルビームの特性を巧く利用することで(3)磁性金属のフェルミ面を光学的に測定する方法、(4)スピノ軌道相互作用が強い半導体、マルチフェロイクス、生体分子の磁気応答を観測する方法を提案している。

本講演では、まずトポロジカル光波の基本的な特性について紹介し、その後、上記の我々の最近の研究成果について丁寧に解説したい。トポロジカル光波が固体物性科学において大きな可能性を秘めた対象であることが伝わるように努めたい。

[1] 例えは *The Angular Momentum of Light*, edited by D. L. Andrews, and M. Babiker (Cambridge University Press, 2012); 尾松孝茂, 光学42巻12号(2013年)「トポロジカル光波とその広がる可能性」

[2] 例えは *Spin Current*, edited by S. Maekawa, S. O. Valenzuela, E. Saitoh, and T. Kimura (Oxford University Press, 2012); A. Kirilyuk, A. V. Kimel, and T. Rasing, Rev. Mod. Phys. **82**, 2731 (2010).

[3] 例えは Y. Tokura, S. Seki, and N. Nagaosa, Rep. Prog. Phys. **77**, 076501 (2014).

[4] 例えは A. Eckardt, Rev. Mod. Phys. **89**, 011004 (2017); 佐藤正寛・高吉慎太郎・岡隆史, 日本物理学会誌 2017年11月号「レーザー駆動超高速スピントロニクスとフロケエンジニアリング」

[5] H. Fujita and M. Sato, PRB **95**, 054421 (2017) (Editor's Suggestion); PRB **96**, 060407(R) (2017); 藤田浩之・佐藤正寛, 固体物理 2018年9月号「光渦レーザーによる磁性制御の展望」

[6] H. Fujita and M. Sato, Sci. Rep. **8**, 15738 (2018); arXiv:1811.10617.

2次元電子ガスの光渦応答電流

放送大院文化科学

高橋浩久, Igor Proskurin, 岸根順一郎

1909年には電磁波がスピン角運動量を運ぶことを Poyntingにより示されていたが[1]、らせん状波面を持つ光渦ビームが軌道角運動量の自由度も運ぶことを Allen らによって示された[2]。そのトポロジカルな性質は、情報通信分野などでの応用が期待されている。また、振幅がベッセル関数で記述されるベッセルビームでは回折が生じないため[3]、光操作技術での応用も期待されている非常に興味深い光ビームである。光渦の他の特徴として、光軸上とその周りのリング状に光強度が0になる特異性を持つことも挙げられる。またさらに、光渦には軌道角運動量の正負に対応した左右の非対称性（キラリティ）があるため、キラル物性との関連も非常に興味深い。

光渦に関する研究が現在精力的になされており、中でも光渦自身の性質に関する理解は深まりつつある一方、それと物質との相互作用についての理解はあまり進んでいとは言い難く、その進展が強く望まれている。

我々は垂直磁場が印加された円盤上に分布する2次元電子ガスと光渦との相互作用を考える。この系では電子軌道角運動量が良い量子数になる。本発表では、2次元電子ガスとベッセル光渦ビーム[3,4]との相互作用による光応答電流への光渦軌道角運動量の影響を議論する。量子ホール効果において、ホール電流がバルク電流の寄与によるものかエッジ電流によるものかについての議論がなされているが[5]、光渦リング状プロファイルを利用することで、エッジ電流のみの寄与であると確定できることも示す[6]。

[1] J. H. Poynting, Proc. R. Soc. Lond. Ser. A **82**, 560 (1909).

[2] L. Allen, M. W. Beijersbergen, R. J. C. Spreeuw, J. P. Woerdman, Phys. Rev. A **45**, 8185 (1992).

[3] J. Durnin, J. Opt. Soc. Am. A **4**, 651 (1987).

[4] K. T. McDonald, “Bessel Beams,” arXiv:physics/0006046v1 (2000).

[5] K. v. Klitzing, Physica B **184**, 1 (1993). 小宮山進, 生産研究, **45**, 27 (1993).

[6] H. T. Takahashi, I. Proskurin and J. Kishine, J. Phys. Soc. Jpn, **87**, 113703 (2018).

金属ナノ構造における近接場光のキラリティ

分子科学研究所 橋谷田 俊

E-mail: shunjun@ims.ac.jp

物質表面にしみ出す光の薄い膜である「近接場光」は、ナノフォトニクス（ナノスケールの光科学技術）において重要な役割を担う[1]。近接場光は、光を放射する全ての物質の周辺で発生するが、その発生領域は物質の寸法程度であるという特徴を持つ。このため、ナノサイズの物質を近接場光の発生に用いれば、レンズを利用する従来の光学では実現できなかったナノサイズの光源を創り出すことができる。このナノ光源を利用すれば、数 10 nm という高い空間分解能を有する光学顕微鏡（走査型近接場光学顕微鏡（SNOM））を構築することができ、従来不可能であった単一のナノ物質の光学特性を詳細に調べることができる[2]。また、ナノ光源は空間的に非一様な光であるため、通常の（空間的に一様な）光では不可能な物質励起を可能にする[3]。

近接場光の発生には、金属ナノ構造がしばしば用いられる。その理由の一つは、金属ナノ構造に光を照射すると金属中の伝導電子の集団振動であるプラズモンが共鳴励起され、大きな電気分極が生じ、非常に強い近接場光（プラズモン場）が発生するためである。このプラズモン場の強度は、入射光強度の 10^6 倍程度になることがあるため、極微量物質の分光分析[4]や従来困難であった分子の光化学反応を高い効率で誘起することが可能になる[5]。最近、キラルな幾何構造を有する金属ナノ構造体のプラズモン場を用いると極微量のキラル分子を検出できることが実験により示され[6]、プラズモン場のキラリティの分光学的特性にも注目が集まっている。

我々は、プラズモン場のキラル特性（偏光特性）を実験的に解明することを目指して、SNOM を用いた偏光解析ナノイメージングを進めている。これまでに我々は、対称性の高い金ナノロッドと金ナノディスクにおいて局所的に円偏光状態の近接場光が発生することを見出している[7]。また、金ナノロッドにおける近接場光の偏光状態を左楕円偏光から右楕円偏光までアクティブに制御することに成功している[8]。これらの成果は、近接場光（プラズモン場）のキラリティを設計・制御するための指針を与えるものと期待される。

- [1] 大津元一; 小林潔. 近接場光の基礎. **2003**, オーム社.
- [2] Okamoto, H. *et al. Phys. Chem. Chem. Phys.* **2015**, 17, 6192–6206.
- [3] Takase, M. *et al. Nat. Photon.* **2013**, 7, 550–554.
- [4] Kneipp, K. *et al. Phys. Rev. Lett.* **1997**, 78, 1667–1670.
- [5] Ueno, K. *et al. J. Am. Chem. Soc.* **2008**, 130, 6928–6929.
- [6] Hendry, E. *et al. Nat. Nanotechnol.* **2010**, 5, 783–787.
- [7] Hashiyada, S.; Narushima, T.; Okamoto, H. *ACS Photon.* **2018**, 14, 1486–1492.
- [8] Hashiyada, S.; Narushima, T.; Okamoto, H. Submitted/ in Revision.

キラル磁性体 CrNb_3S_6 の電子スピン共鳴測定

大阪大学大学院理学研究科附属先端強磁場科学研究センター
澤田祐也

キラル磁性体 CrNb_3S_6 は零磁場下において c 面内に揃った Cr^{3+} イオンの局在スピンが c 軸方向に沿ってらせん状に配列し、 c 軸方向に垂直に磁場を印加することで、らせんの捻りが周期的にほどけたカイラルソリトン格子(CSL)を形成する物質である。これまで我々は、この物質の x-band(周波数 9.28 GHz)電子スピン共鳴(ESR)測定による CSL ダイナミクスに関する研究を行ってきた。昨年行われたキラル若手の会では、CSL 相においてスパイク状の ESR シグナルが特徴的に現れるこことを報告した(図 1(a))。このスパイク状 ESR シグナルは、外部印加磁場に重畠する変調磁場周波数および変調磁場強度、さらに照射マイクロ波の出力強度にほとんど依存せずに観測されることから、CSL の形成に起因して本質的に現れるシグナルであると考えている。ESR シグナルをフーリエ変換することで得られたパワースペクトルでは、スパイク状 ESR シグナルに起因すると考えられる複数のピークが明瞭に確認された(図 1(b))。この結果は、特性周波数の存在を示唆する。以上のような現状を踏まえて今回のキラル若手の会では、今後、本研究を推進していく上での戦略(実験および理論の双方)について紹介したいと考えている。

本研究は、萩原政幸(大阪大学先端強磁場科学研究センター)、吉澤大智(分子科学研究所)、井上克也教授(広島大学)、秋光純特任教授、高阪勇輔博士(岡山大学)、岸根順一郎教授(放送大学)、戸川欣彦准教授、島本雄介氏(大阪府立大学)、美藤正樹教授(九州工業大学)、中野岳仁博士(茨城大学)、野末泰夫教授(大阪大学)との共同研究であり、独立行政法人日本学術振興会の科研費基盤 S(No. 25220803)および研究拠点形成事業(A. 先端拠点形成型)の助成を得て行われた。ここに謝意を表します。

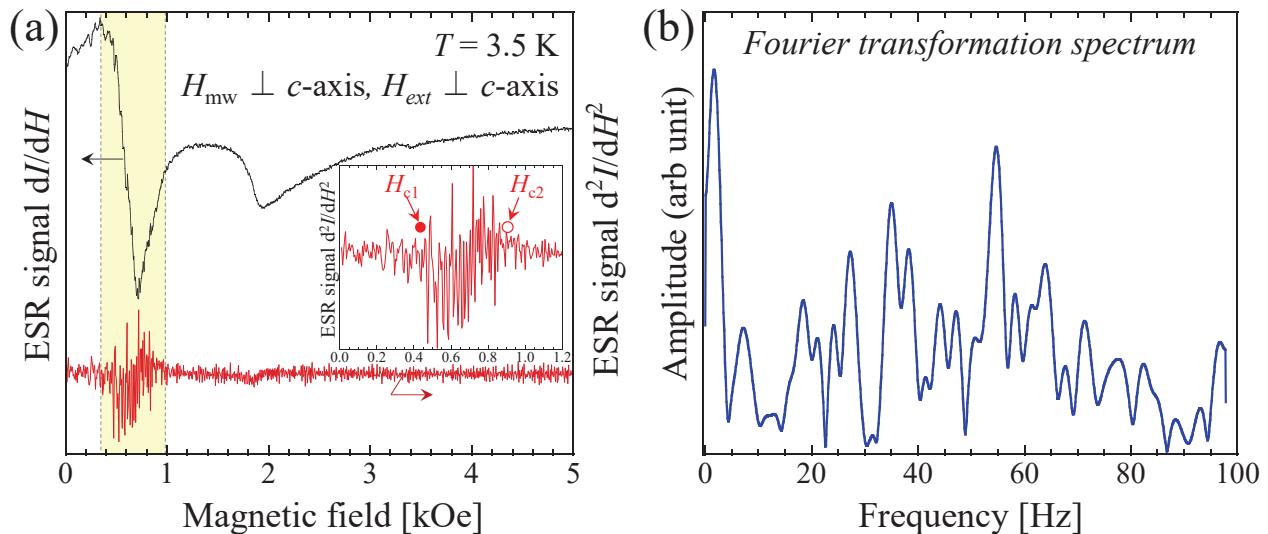


図 1. (a) CSL 相において観測されたスパイク状の ESR シグナル。(b) ESR シグナルのフーリエスペクトル。

カイラル磁性が示す非相反スピン輸送の数値的研究

東大工^A, 東邦大理^B

奥村 駿^A, 石塚 大晃^A, 加藤 康之^A, 大江 純一郎^B, 求 幸年^A

Numerical study on nonreciprocal spin current in conical magnetic states

^ADept. of Appl. Phys. The Univ. of Tokyo, ^BDept. of Phys. Toho Univ.

S. Okumura^A, H. Ishizuka^A, Y. Kato^A, J. Ohe^B, and Y. Motome^A

近年、空間反転対称性のないカイラルな格子構造をもった磁性体が注目を集めている。こうした系では、スピン軌道相互作用に起因して、Dzyaloshinskii-Moriya 相互作用が働くことにより、螺旋磁性やスキルミオンといった特徴的な磁気構造や、それに伴う異常ホール効果や電気磁気効果などの特異な物性が現れることが知られている。とりわけ一軸性を有するカイラル磁性体については長年にわたって精力的な研究がなされ、CrNb₃S₆などの磁性金属ではゼロ磁場で螺旋磁性、螺旋軸に平行な磁場下でコニカル磁性が現れることが報告されている（図1）[1]。このような磁気構造のもとでは、系の空間反転対称性と時間反転対称性が同時に破れているため非相反な輸送現象が発現しうる[2]。

我々は、そのような非相反輸送現象を探索する目的で、遍歴電子をあらわに取り込んだ理論模型[3,4]を用いて、伝導現象に関する研究を行った。具体的には、カイラル螺旋磁性やコニカル磁性の磁気構造を仮定し、線形 Landauer 公式によるコンダクタンスの計算を行った。その結果、螺旋軸に沿って伝播するスピン流に、螺旋の右巻きと左巻きのカイラリティに依存した非相反性が現れることを見出した。とくに、特定の方向に偏極したスピン流では、カイラリティだけでなく、磁化の傾角の方向（コーン角の正負）によっても非相反性のスイッチングが可能であることを明らかにした（図2）。本講演では、コニカル磁性が示すスピン流の非相反性の起源として、サンプル端での伝導電子の磁気モーメントや磁気トルクの期待値の計算結果について詳しく議論する。

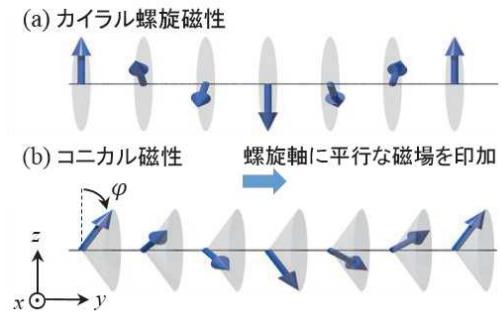


図1：(a)カイラル螺旋磁性と(b)コニカル磁性の模式図。

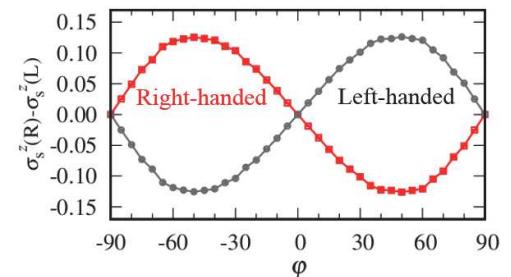


図2： z 軸方向に偏極した非相反スピン流コンダクタンスのコーン角 φ 依存性。赤色の線は右巻き、灰色の線は左巻きの磁気構造に対応している。

[1] T. Miyadai *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **52**, 1394 (1983).

[2] G. Rikken *et al.*, Phys. Rev. Lett. **87**, 236602 (2001).

[3] S. Okumura, Y. Kato, and Y. Motome, J. Phys. Soc. Jpn. **86**, 063701 (2017).

[4] S. Okumura, Y. Kato, and Y. Motome, J. Phys. Soc. Jpn. **87**, 033708 (2018).

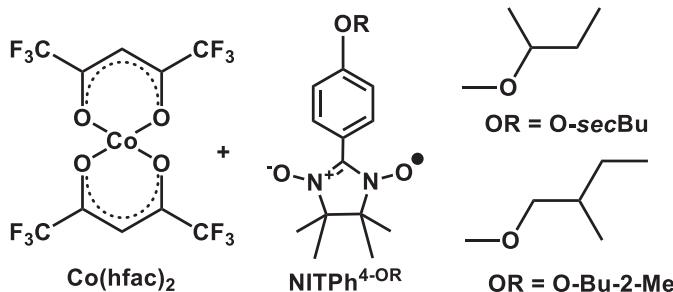
コバルトとニトロキシドラジカルからなるキラル分子磁性体の作製および物性評価

小倉 光裕¹、Kseniya Maryunina^{1,2}、西原 穎文^{1,2}、井上 克也^{1,2}

¹広島大学理学研究科, ²CresCent(Chirality Research Center)

金属—ニトロキシド錯体をベースとした1次元ポリマー鎖錯体は、分子設計の容易性やそれに伴う特異な物性との組み合わせによって、新たな多機能性材料として大いに期待されている。近年では、Co(hfac)₂と4-アルコキシフェニル置換されたニトロキシドラジカルを用いたポリマー鎖錯体[Co(hfac)₂NIT-Ph^{4-OR}]_nは、降温時に強磁性転移を示した後、磁壁の凍結が観測される。その温度を境にして、保持力が小さい軟磁性から保持力の大きい硬磁性へと切り替わることが報告されている^[1]。このような系にキラリティを導入することで、結晶構造上のキラリティによる相互作用と、磁気スピン間の交換相互作用の競合により、新たに特異物性を発現することが期待される^[2]。しかしながら、キラル磁性体の報告例は極めて少なく、これらの化合物が示す物性がキラリティ由来のものか、異なる性質からくるものなのか未だ明らかにされていない。そのため、光学活性な化合物とラセミ体の物性を比較することは、結晶構造のキラリティと磁気スピンとの相関を見つけるのに大変重要である。

本研究では、Co(hfalc)₂と、キラルとラセミ体を置換基に導入したニトロキシドラジカル(NIT-Ph^{4-OBu-2-Me}, NIT-Ph^{4-OsecBu})を用いた1次元鎖錯体の合成を目指した。得られた錯体の合成過程、結晶構造、および磁気挙動について考察した。



• Reference

- [1] Y. Numata et al., *J. Am. Chem. Soc.*, **2007**, 129, 9902. T. Ishida et. al., *Inorg. Chem.*, **2009**, 45, 7012. Y. Okamura et al., *Bull. Chem. Soc. Jpn.*, **2010**, 83, No. 6, 716-725.
[2] Y. Togawa et al., *J. Phys. Soc. Jpn.* **2016**, 85, 112001.

• Acknowledgement

This work was supported by a Grant-in-Aid for Scientific Research (S) (No. 25220803), CResCent (Chirality Research Center), JSPS Core-to-Core Program (A. Advanced Research Networks).

強弾性を有する有機無機 2 次元ペロブスカイト型化合物における 磁気物性

土屋 直人¹, 青木 沙耶¹, 中山 祐輝¹, Kseniya Maryunina², 西原 穎文^{1,2},
鈴木 孝至^{2,3}, 井上 克也^{1,2}

¹ 広島大院理, ²CResCent (Chirality Research Center), ³ 広大院先端

マルチフェロイックを示す化合物は近年注目されている。マルチフェロイックとは、強磁性・強誘電性・強弾性などの強的秩序のうち二つ以上を有することを指す。強磁性と強誘電性の相関、いわゆる電気磁気効果が近年盛んに研究されている。典型的な例として、サイクロイド型らせん磁性を形成すると逆 DM 相互作用により原子の変位が起き、強誘電性を発現する^[1]。このように DM 相互作用により 2 つの強的秩序が強く結びつく。しかし、強磁性・強弾性の相関(磁気弾性効果)に関しては、明らかになっていないことが多いのが現状である。当研究室では、有機無機 2 次元ペロブスカイト型化合物を用いて、磁気弾性効果に関する研究を行っている。

最近、 $(C_6H_5C_2H_4NH_3)_2Fe^{II}Cl_4$ において、力学的応力により強弾性ドメインの制御を行うことで自発磁化の方向を変換できることが明らかとなった^[2]。しかし、この化合物は強弾性転移温度が高い(433 K)ため、測定に種々の困難が伴うことや、2 倍の鉄は酸化され易いなどの問題が生じる。そのため、磁気弾性効果の研究を進める点では、強弾性温度が低く空気中で安定な化合物の合成が求められる。そこで、今回 1,3-プロパンジアミンとマンガンからなる有機無機 2 次元ペロブスカイト型化合物 $H_3NC_3H_6NH_3Mn^{II}Cl_4$ に注目した。この化合物は室温付近で構造相転移が報告されている^[3]。この化合物が強弾性を有しているのかを偏光顕微鏡を用いて調べた。室温下で、力学的応力を加えたところ複数のドメインが形成されたことから、この化合物は強弾性を有していることが明らかとなり、室温で強弾性ドメイン制御が可能であることが分かった。当日は、磁気弾性効果に関する、最新の結果及び今後の展望について議論する。

[1] T. Kimura, et al, *Nature*, 426, 55 (2003)

[2] Y. Nakayama, et al, *Angew. Chem. Int. Ed.*, 56, 1 (2017)

[3] J. C. Crowley, et al, *J. Phys. Chem.* 86, 4046 (1982)

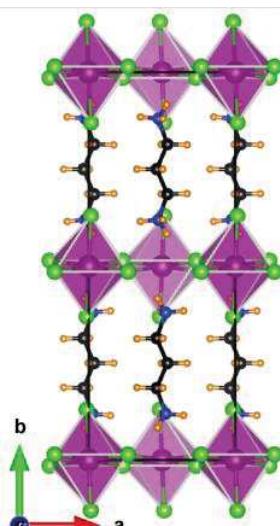


図 1 $H_3NC_3H_6NH_3Mn^{II}Cl_4$ の
結晶構造(293 K)

強磁性と強弾性を有する 有機無機ペロブスカイト型化合物の合成と物性評価

石貫 達也¹, 土屋 直人², 青木 沙耶², 中山 祐輝², 西原 穎文^{2,3}, 井上 克也^{2,3}

¹ 広島大理, ² 広島大院理, ³ CResCent (Chirality Research Center)

マルチフェロイック化合物は、主に「強磁性」「強誘電性」「強弾性」等の強的秩序のうち複数の強的秩序を有する化合物である。マルチフェロイック化合物として主に $TbMnO_3$ ^[1] 等の無機酸化物において報告がされている。近年では有機無機複合化合物でもマルチフェロイクスの研究が盛んに行われている。しかし、これらの報告の多くは強磁性と強誘電性に関する議論であり、強磁性と強弾性の相関について報告されている例はほとんどない。

そこで、本研究では有機無機ペロブスカイト型化合物に注目した。これはハロゲンと遷移金属から構成される八面体が二次元シートを構成し、シート間に有機アンモニウムカチオンが挟まれた構造を有する。今回は、強磁性を有することが報告されている化合物 $(C_6H_5C_2H_4NH_3)_2CuCl_4$ ^[2] における強磁性・強弾性の協奏効果を目的としている。TG-DTA 測定において $T = 410K$ 付近で重量変化を伴わない顕著なピークが観測されたことから、この温度付近で構造相転移が起きていると考えられる。この化合物が強弾性を有しているか調べるため、単結晶を $410K$ 以上に加熱した後で冷却し、偏光顕微鏡で観察したところ強弾性ドメインが観測された。これより、 $410K$ 以下でこの化合物は強弾性である可能性が示唆された。強弾性相転移では高対称相から低対称相への相転移により常弾性から強弾性へと転移すると考えられる。しかし、転移点以上での構造解析にはまだ至っていない。当日は本研究の結果の詳細を報告し、今後の研究の展望についても議論していく。

[1] T. Kimura, T. Goto, H. Shintani, T. Arima, Y. Tokura, *Nature.*, **2003**, 426, 55–58

[2] A. O. Polyakov, A. H. Arkenbout, J. Baas, G. R. Blake, A. Meetsma, A. Caretta, P. H. M. van Loosdrecht, and T. T. M. Palstra, *Chem. Mater.*, **2012**, 24, 133-139

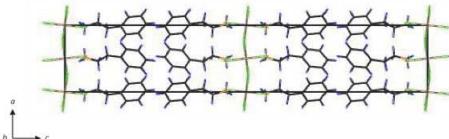


Fig.1 $(C_6H_5C_2H_4NH_3)_2CuCl_4$ の結晶構造

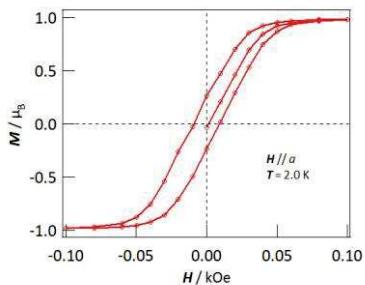


Fig.2 $(C_6H_5C_2H_4NH_3)_2CuCl_4$ の磁化測定

二次元レイヤー型錯体のアニオン交換による物性制御

泉雄大¹,Kseniya Maryunina³,西原禎文^{2,3},Dominique Luneau^{3,4},井上克也^{2,3}

¹広島大理,²広島大院理,³CresCent(Chirality Research Center),⁴Lyon University

ある種の有機金属錯体においては、金属イオンと配位子との間に電子移動が起こり電荷分布やスピン状態の異なる異性体が圧力や温度、光照射によって相互変換を起こすことが報告されている。このような電子移動による異性体の相互変換を一般に原子価互変異性現象と呼び、また様々な外場による誘起が可能なことから多機能性スイッチング材料としての応用性も見込まれている。

有機無機配位高分子 $[\text{Mn}_2(\text{NNIm})_3]\text{A}$ ($\text{A}=\text{counter anion}$)は、マンガンと配位子との間で電子移動が発生し、スピン状態の異なる2つの準安定相をとることが報告されている^{[1][2]}。当化合物は金属と配位子がハニカム状の2次元レイヤー構造をとっており、その層間にカウンターアニオンとして複数の化学種をとりうることが可能となっている。そして異なるカウンターアニオンを導入した当化合物は、それぞれ異なる物性を示す。しかし、カウンターアニオンが相転移にどうの影響を与えるかは判明しておらず、その詳細を調査している。カウンターアニオンの交換によって転移温度や転移のステップ数が意図的に変更できれば、物性制御の観点から有用であると考えられる。本研究では、検討されたカウンターアニオンのなかでも唯一二段階の相転移を示した BF_4^- 導入体について、その中間安定相の発現に焦点を当てて、カウンターアニオンが金属-配位子間の電子移動機構に及ぼす影響を評価することを目的としている。また光渦によるキラル発現の可能性も検討する。

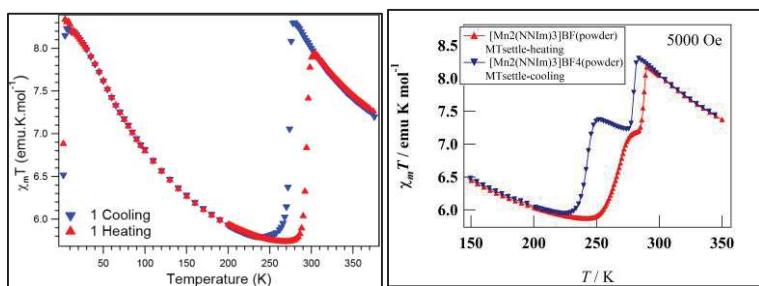


図 1. Temperature dependence of $\chi_{\text{m}}\text{T}$ in a 5000 Oe magnetic field

[1]A. Lannes et al, *J. Am. Chem. Soc.* **2016**, 138, 16493–16501

[2]D. Luneau et al, *Coordination Chemistry Reviews*, **2005**, 249, 2591–2611

・Acknowledgement

This work was supported by JSPS Core-to-Core Program, A. Advanced Research Networks.

This work was supported by a Grant-in-Aid for Scientific Research (S) (No. 25220803)

“Toward a New Class Magnetism by Chemically-controlled Chirality” .

マイクロメートルスケールのらせん軸長を有するキラル磁性体 CrNb_3S_6 単結晶試料の磁化測定

九工大院工^A, 広大キラル国際研究拠点^B, 東大総合文化^C, 岡山大異分野基礎研^D, 広大院理^E
大隈理央^A, 若山登^A, 田中将嗣^A, 美藤正樹^{A,B}, 篠崎美沙子^C, 加藤雄介^{B,C},
高阪勇輔^{B,D}, 秋光純^D, 井上克也^{B,E}

Magnetization measurements for single crystal of chiral magnet CrNb_3S_6 with the micrometer-scale of chiral helical axis

^AGrad. Sch. of Eng., Kyushu Inst. of Tech., ^BCResCent, Hiroshima Univ., ^CThe Univ. of Tokyo, ^DRIIS,
Okayama Univ., ^EGrad. Sch. of Sci., Hiroshima Univ.

M. Ohkuma^A, N. Wakayama^A, M. Tanaka^A, M. Mito^{A,B}, M. Shinozaki^C, Y. Kato^{B,C},
Y. Kousaka^{B,D}, J. Akimitsu^D, K. Inoue^{B,E}

キラル磁性体 CrNb_3S_6 は一軸性のジャロシンスキー・守谷(DM)ベクトルを有し、 $T_c = 130$ K 以下ではキラルらせん磁気構造を示す。 T_c 以下の温度においてらせん軸である c 軸に垂直に直流磁場を印加することで、キラルソリトン格子(CSL)と呼ばれる磁気超格子が安定化される。これまでにバルク・マイクロサンプルに対する磁気抵抗・磁気測定によって、以下のことがわかっている。①ソリトンが自然生成・消滅するようなものではなく、試料の正面を通じて出入りする[1]。②らせん軸方向の結晶サイズ(L_c)や形状を変えることでソリトンの出入りの振る舞いが劇的に変わる[1-4]。③ L_c をらせん周期近傍まで小さくしても CSL が出現する[5]。最近では、減磁過程において、Surface twist に由来する Surface barrier が消失する磁場において集団的なソリトンの侵入が許されることが理論的に示唆され、マイクロサンプルの磁気抵抗の結果と非常に良い一致を示している [6]。

我々は昨年の秋の物理学会で、 L_c が $10 \mu\text{m}$ で断面積(S_{ab})がサブミリスケールで異なる複数の試料について報告した[7]。今回、断面積がサブミリスケールで c 軸長が $3 \mu\text{m}$ 程度の試料を用意した。

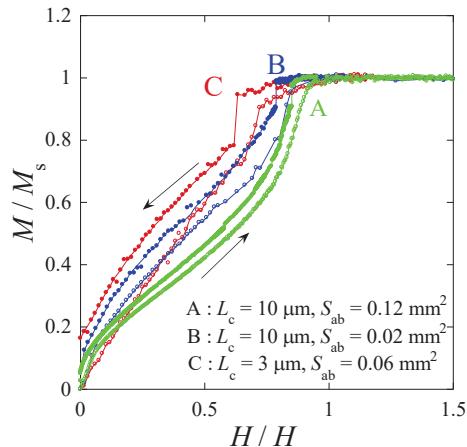


図 1. CrNb_3S_6 単結晶の磁化過程

図 1 は 10 K における L_c が $10 \mu\text{m}$ の試料 A,B と $3 \mu\text{m}$ の試料 C の磁化過程である。A, B の比較から、断面積を小さくすることで最大の離散変化を示す磁場が低磁場側に移ることは分かるが、 L_c を小さくしてもより低磁場側に移ることが分かった。現在 L_c が $3 \mu\text{m}$ のサンプルをもう一つ測定中であるので、講演ではそのサンプルの磁化過程もあわせて報告する。サブミリスケールの領域において、系統的にサイズを変えた場合のソリトンの出入りについて議論したい。本研究は、独立行政法人日本学術振興会の科研費基盤 S (No. 25220803) および研究拠点形成事業 (A.先端拠点形成型) の助成を得て行われた。

- [1] M. Mito *et al.*, Phys. Rev. B **97**, 024408 (2018).
- [2] Y. Togawa, *et al.*, Phys. Rev. B **92**, 220412 (2015).
- [3] K. Tsuruta *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **85**, 013707 (2016).
- [4] K. Tsuruta *et al.*, J. Appl. Phys. **120**, 143901 (2016).
- [5] L. Wang *et al.*, Phys. Rev. Lett. **118**, 257203 (2017).
- [6] M. Shinozaki *et al.* Phys. Rev. B **97**, 214413 (2018)
- [7] 大隈理央 他, 日本物理学会 2017 年秋季大会 22pF21-9

キラル磁性体 CrNb_3S_6 における非相反伝導

青木 瑠也, 戸川 欣彦

大阪府立大学 工学研究科

キラル磁性体では Heisenberg 交換相互作用と Dzyaloshinskii-Moriya 相互作用が競合するため、キラル磁気ソリトン格子(CSL)や磁気スキルミオンと呼ばれるキラル磁気構造を発現し、大きな着目を集めている。キラル磁気秩序に起因する離散的な磁気抵抗効果やトポロジカル Hall 効果などといった非自明な電気伝導現象が報告されており、大変興味深い[1]。

また、キラルな物質では、円二色性や旋光性などの光学活性に代表されるように種々のキラル応答を示す。電気伝導の場合には、電気磁気キラル(eMCh)効果と呼ばれる電流と磁場に関する方向二色性に起因して電気伝導に非相反応答が誘起される[2]。eMCh 効果はキラル構造を有した非磁性体での報告が大半であり、近年大きな注目を集めているキラル磁性体における eMCh 応答は非常に興味深い。ごく最近、キラル磁性を示す B20 型 MnSi 結晶において eMCh 効果が観察され、転移温度直上の常磁性領域においてキラルスピinn 摆らぎにより eMCh 効果が増大することが報告された[3]。しかしながら、多軸性キラル磁性体である MnSi では不可避的に発現する磁区構造が eMCh 応答を抑制するためか、キラル磁気構造との相関は明らかではない。そこで、我々は単軸性キラル磁性体 CrNb_3S_6 における eMCh 効果の検出に取り組んだ[4]。六方晶結晶 CrNb_3S_6 は零磁場下でキラルらせん磁性を示し、印加磁場の向きに応じて CSL やキラルコニカル相を示す。単軸性キラル磁性体の磁気相図は簡潔であり、磁気ドメイン構造の形成もない。したがって、 CrNb_3S_6 はキラル磁気構造と非相反電気伝導特性の相関を調べるのに適した物質といえる。

eMCh 効果によって誘起される非相反電気信号は電流の 2 乗に比例するため、電圧の 2 次高調波において検出することができる。我々は入力した交流信号の 2 次高調波をロックイン検出し、キラル磁性結晶 CrNb_3S_6 における eMCh 効果を系統的に調べた。常磁性相では結晶キラリティに起因する応答やキラルスピinn 摆らぎによる応答を確認した。一方、キラルコニカル相では非相反伝導が劇的に変化し、転移温度近傍で非相反応答が異常に増大することを見出した。また、キラル磁気秩序下では磁化 M に比例する磁気の寄与が存在し、その大きさが結晶構造に起因する従来の寄与の大きさよりも 3 衍ほど大きいことを明らかにした。すなわち、キラル磁気構造が非相反伝導現象に大きな影響を与えており、本講演では、単軸性キラル磁性体 CrNb_3S_6 における eMCh 効果の測定結果を示し、キラル磁気構造との相関について議論する。

[1] Y.Togawa *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **85**, 112001 (2016).

[2] G. L. J. A. Rikken *et al.*, Phys. Rev. Lett. **87**, 236602 (2001).

[3] T. Yokouchi *et al.*, Nat. Commun. **18**, 866 (2017).

[4] R. Aoki, Y. Kousaka, and Y. Togawa, submitted.

キラル磁性体 CrNb_3S_6 における磁気共鳴特性

大阪府大院工^A
島本雄介^A, Francisco Goncalves^A, 戸川欣彦^A

キラル磁性結晶 CrNb_3S_6 ではキラルな結晶構造に起因する Dyzaloshinskii - Moriya 相互作用が働く。そのため、スピノンが片巻きのらせん状にねじれた部位（ソリトン）が整列するキラルソリトン格子（CSL）が形成される。CSL は巨視的なスケールに渡ってスピノンの位相配列が揃った位相コヒーレントな磁気秩序であり、その周期はらせん軸に垂直な磁場に応じて変化する。CSL に起因して様々な物性機能が発現することが期待される。例えば、位相コヒーレンスとトポロジカルなソリトンの離散性を反映した多値的な磁気抵抗が検出された[1]。CSL の位相物体としての集団運動を検出することは興味深い[2]。実際、 CrNb_3S_6 結晶における磁気共鳴実験では励起方向に強く依存する共鳴特性や共鳴周波数の非対称性が見出された[3]。

本研究では CrNb_3S_6 薄膜試料における磁気共鳴特性の詳細を調べている。試料面直方向に結晶らせん軸を配置した試料において、磁場 \mathbf{H} を面内かつ励起磁場 \mathbf{h}_{mw} に垂直 ($\mathbf{h}_{mw} \perp \mathbf{H}$ 配置) または平行な方向 ($\mathbf{h}_{mw} \parallel \mathbf{H}$ 配置) に印加した（挿入図）。スピノンの向きが全て揃う強制強磁性状態において $\mathbf{h}_{mw} \perp \mathbf{H}$ 配置では磁気共鳴が観測されるが、 $\mathbf{h}_{mw} \parallel \mathbf{H}$ 配置では観測されない。この特徴は強磁性体における平行励起の振舞いと一致する。一方、CSL 状態ではいずれの配置でも磁気共鳴を示すことが分かった。加えて、多数の離散的な共鳴周波数の変化が明瞭に観測された（図 1）。各ステップは磁場絶対値の増加に伴い周波数が大きくなる。講演では磁気共鳴や磁気抵抗特性を踏まえて CSL ダイナミクスの起源に関する議論を行う。

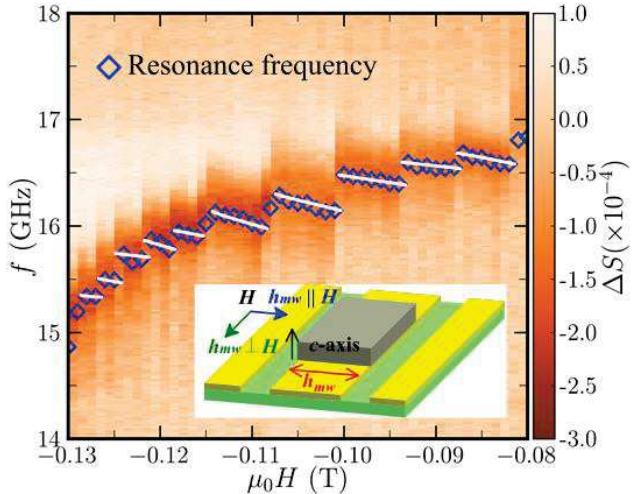


図 1: CrNb_3S_6 結晶の磁気共鳴特性。
(挿入図) 磁気共鳴測定のセットアップ。

- [1] Y. Togawa *et al.*, Phys. Rev. B **92**, 220412 (2015).
- [2] J. Kishine *et al.*, Phys. Rev. B **79**, 220405(R) (2009).
- [3] F. J. T. Goncalves, Y. Shimamoto *et al.*, Phys. Rev. B **93**, 104402 (2017).

キラル磁気秩序ダイナミクスの非局所配置測定

大阪府大院工 中山翔太, 戸川欣彦

キラル磁性体 CrNb_3S_6 では、結晶キラリティに起因する Dzyaloshinskii-Moriya 相互作用と Heisenberg 型交換相互作用が競合することによって、Cr に局在する磁気モーメントが c 軸方向にらせん状にねじれたキラルらせん磁気秩序が形成される。磁場を c 軸と垂直に印加すると、磁場強度に応じて、らせん構造が周期的にほどけたキラルソリトン格子 (CSL) に変化する[1]。CSL の周期は 48 nm から試料サイズまで変調可能であり、試料全体に渡って一様に現れる。また、CSL は結晶欠陥や膜厚変調などの外的搅乱に対して堅牢である。これらは CSL が結晶キラリティに保護された巨視的スピニ位相秩序であることを意味する。位相コヒーレントな CSL に局所的な変化を与えると、その変化は試料全体に波及し、非局所的な応答を引き起こすことが期待できる。

非局所応答に由来する CSL ダイナミクスを観察するため、 CrNb_3S_6 単結晶を用いて、非局所電流配置における起電力計測を行った。マイクロメータースケールに微細化した CrNb_3S_6 試料へ部分的にパルス電流を流し、スピントルクによる CSL ダイナミクスを誘起する。試料逆側の電流がほとんど流れない場所において発生する電圧信号の実時間測定を行った。入力パルスの立ち上がりと立下りに大きな起電力が検出される。臨界磁場以上で検出される電圧信号を参照信号として差分を取ると、磁場に依存する有意な起電力が検出されていることがわかった。起電力の強度は CSL のソリトン密度に応じて変化することが見出された。これらの実験データは、試料の一部を局所的に励起すると CSL 全体が振動するという描像を与え、CSL 振動子系の強制振動が誘起されていると解釈することも可能である。また、CSL ダイナミクスに起因したスピニ起電力の発生も期待できる[2]。

講演では、磁場依存性、温度依存性、パルス幅・立ち上がり時間依存性、伝搬距離依存性などの実験データの詳細を示し、その発生起源について議論したい。

[1] Y. Togawa *et al.*, PRL **108**, 107202 (2012).

[2] J. Kishine *et al.*, PRB **86**, 214426 (2012).

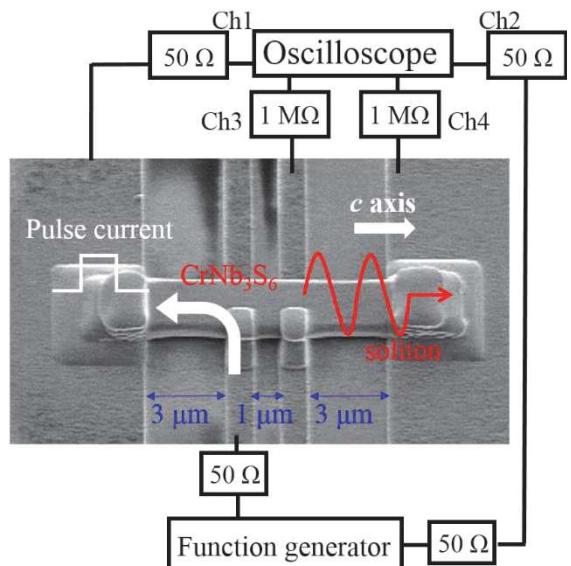


図1 非局所電流配置の概略図

キラル磁性体 CrNb_3S_6 における電界制御測定

大阪府大院工^A

乾皓人^A, 戸川欣彦^A

キラル磁性体はその結晶の対称性に応じて反対称性交換相互作用 (Dzyalosinskii-Moriya interaction : DMI) を示す [1, 2]。そのため Heisenberg 交換相互作用と DMI が競合し、スピニンが片巻きにらせん配列したキラルらせん磁気秩序 (CHM) が発現する。CHM の周期は 2 つの相互作用の比で、らせんの巻き方向は DMI の符号で決まる。DMI は隣接スピン間で作用し、 $\mathbf{D} \cdot \mathbf{S}_i \times \mathbf{S}_j$ で表される。微視的機構は守谷によりスピン軌道相互作用を含めた 2 次の摂動計算より導出された。これより DMI は電子構造に依存することが示唆される。

本研究ではイオン性液体を用いた電界ドーピング法に着目する。ゲート電極に電圧を印加するとイオン性液体の界面に電気 2 重層が形成されて電界が誘起される。この構造は金属 - 絶縁体 - 半導体電界効果トランジスタ (MOSFET) における絶縁層をイオン性液体に置き換えたものであり、電気 2 重層トランジスタ (Electric Double Layer Transistor : EDLT) と呼ばれる。EDLT では MOSFET と比較して試料表面により大きなキャリアを誘起できる。この手法は様々な研究で利用されており、例えば KTaO_3 において超伝導転移が誘起されることが報告された [3]。同様に、EDLT を用いて試料表面にキャリアを誘起しキラル磁性体の電子状態を変化させる。 \mathbf{D} の変調を介してらせん巻き数や向きを制御することを試みる。EDLT を用いた電界ドーピングの手法は他の化学的手法や圧力制御と比較して試料の結晶構造を変化させないという利点がある。

発表では CrNb_3S_6 [4] や YbNi_3Al_9 [5] などに代表されるキラル磁性結晶における電界ドーピング下での電気特性について議論する。マイクロメータサイズに微細加工した CrNb_3S_6 単結晶を用いて EDLT 構造を作製し、ゲート電圧印加によりキャリアを誘起する。ゲート電圧印加下での抵抗の温度依存性と磁気抵抗を測定した。磁気抵抗の大きさがゲート電圧に応じて変化する様子が観測された。

参考文献

- [1] I. Dzyaloshinskii, J. Phys. Chem. Solids **4**, 241 (1958). [2] T. Moriya, Phys. Rev. **120**, 91 (1960).
- [3] K. Ueno *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **83**, 032001 (2014). [4] Y. Togawa *et al.*, Phys. Rev. Lett. **108**, 107202 (2012). [5] T. Matsumura *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn., **86**, 124702 (2017).

キラル磁性体 YbNi_3Al_9 薄膜の作製と評価

大阪府大工^A, 大阪府大ナノ拠点研^B, 名工大院工^C

奥村 慧^A, 宮戸寛明^{A,B}, 大原繁男^C, 戸川欣彦^{A,B}

Fabrication and evaluation of chiral helimagnet YbNi_3Al_9 thin films

^ADepartment of Physics and Electronics, Osaka Prefecture University

^BNanoSquare Research Institute, Osaka Prefecture University

^CGraduate School of Engineering, Nagoya Institute of Technology

A. Okumura^A, H. Shishido^{A,B}, S. Ohara^C, Y. Togawa^{A,B}

YbNi_3Al_9 は重い電子系とスピニカル秩序の 2 つの特性を併せ持つ稀有な物質であり、 $T_M = 3.4$ K で常磁性からカイラル磁性へ相転移する [1, 2]。マイクロメーターサイズに微細加工された YbNi_3Al_9 試料において c 軸に垂直な方向に磁場をかけると離散的な磁気抵抗変化を示すことが観察された[3]。これは YbNi_3Al_9 においてカイラルソリトン格子が形成されていることを示唆している。この物質群の薄膜作製法を確立することができれば、カイラル磁性メゾスコピック系や強磁性体との接合系などを構築することが容易となる。バルク単結晶とは異なる新奇な物性を見出すことができるであろう。

我々は分子線エピタキシー法を用いて YbNi_3Al_9 のエピタキシャル薄膜を合成することに成功した。基板には a 面サファイヤ基板を用いた。X 線回折から、面間方向には $[11\bar{2}0]$ と $[10\bar{1}0]$ 方向への配向が観察された。面内方向へは $[0001]_{\text{YbNi}_3\text{Al}_9} // [10\bar{1}0]_{\text{Al}_2\text{O}_3}$ と $[10\bar{1}0]_{\text{YbNi}_3\text{Al}_9} // [0001]_{\text{Al}_2\text{O}_3}$ に配向する結晶ドメインが主であるが、 $[10\bar{1}0]_{\text{YbNi}_3\text{Al}_9} // [10\bar{1}0]_{\text{Al}_2\text{O}_3}$ と $[0001]_{\text{YbNi}_3\text{Al}_9} // [0001]_{\text{Al}_2\text{O}_3}$ に配向するドメインもわずかに観察された。これより、面間方向で $[11\bar{2}0]$ 配向する結晶ドメインがエピタキシャル成長していると考えられる。発表では製膜した結晶構造の詳細に加え、低温での輸送特性について議論する。

参考文献

- [1] T. Yamashita, R. Miyazaki, Y. Aoki, and S. Ohara, J. Phys. Soc. Jpn. **81**, 034705 (2012).
- [2] T. Matsumura *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **86**, 124702 (2017)
- [3] R. Aoki, Y. Togawa, and S. Ohara, Phys. Rev. B **97**, 214414 (2018).

卍型金ナノ構造による近接場と磁気共鳴の相互作用

松島陽介、島本雄介、Francisco Goncalves、戸川欣彦

大阪府立大院工

磁気共鳴とは、磁性体に特定の周波数の電磁波を印加した際に、そのエネルギーを吸収することで磁化に歳差運動が定常的に誘起される現象である。磁性体の緩和定数などを同定する方法として強磁性体を中心に古くから研究がされており、磁気共鳴を利用した広帯域なバンドパスフィルターや高速磁化反転スイッチが実現されるなど学術・応用の面から現在でも盛んに研究がされている。近年では、光と磁気ダイナミクスに関する研究が活性化している。例えば、円偏光を磁性体に照射することで、スピノン歳差運動が誘起されることが報告された[1]。これは逆ファラデー効果で説明される。

一方、円偏光よりも強くねじれた回転する光電場であるキラルプラズモンを用いた研究も盛んに行われている。2010年にはGlasgow大学のKadodwalaらのグループが、金キラルプラズモンを用いてpg以下のタンパク質のキラリティを検出することに成功している[2]。キラルプラズモンではキラルな金ナノ構造近傍に円偏光よりもせんピッチの短い光電場が発生することがわかっている。この金属ナノ構造の特性が、逆ファラデー効果の増強に寄与する可能性がある。（この金属ナノ構造の特性の逆ファラデー効果への影響は明らかになっていない。）

そこで本研究では、キラルプラズモンが磁気共鳴に及ぼす影響を明らかにする事を目的とした。CPW上に作製したパーマロイに卍型金ナノ構造を描画し、磁気共鳴測定を行う。光照射を行うことによる磁気共鳴スペクトルの変化を観察する。

将来的には、キラルソリトン格子とキラルプラズモンの相互作用を磁気共鳴で検出する研究へ展開する。

[1] V. Kimel *et al.*, Nature **435**, 655 (2005).

[2] E. Hendry *et al.*, Nat. Nanotechnol. **5**, 783 (2010).

キラルプラズモンによるキラル磁気秩序の応答

大阪府大院工^A, 分子研^B

吉武 侑耶^A, 橋谷田 俊^B, 島本 雄介^A,

Francisco Goncalves^A, 岡本 裕巳^B, 戸川 欣彦^A

キラルな結晶構造を有する磁性体ではスピンが片巻きらせん状かつ周期的に配列したキラルらせん磁気秩序が現れる。磁場印加によりキラルソリトン格子が形成され、らせん周期が磁場強度に応じて変化する。臨界磁場以上ではスピンがすべて平行に配列した強制強磁性状態となる。例えば、キラル磁性結晶 CrNb_3S_6 では、磁気相転移温度 ($\sim 130\text{K}$) 以下でらせん周期が 48 nm から試料サイズまで連続的に大きくなる[1]。しかしながら、磁場以外を用いてらせん周期を変調する方法は現在見出されていない。

光を金属ナノ構造に照射すると、ナノ構造に局在した光電場（プラズモン場）が誘起される。発生するプラズモン場の電場強度は入射光より増強され、波長は大幅に圧縮されている。また最近、金属ナノ構造がキラルな形状を有する場合、強くねじれたプラズモン場（キラルプラズモン場）が生じることが明らかになった。ねじれの向きはナノ構造のキラリティによって決定する。キラルプラズモン場は可視光の波長よりも小さなスケールのキラル物質と効率的に相互作用すると考えられる。実際、円型金ナノ構造にキラルプラズモン場を誘起させるとキラル分子の検出感度が大幅に向かうことが報告された[2]。一般に、円型金ナノ構造に誘起されるキラルプラズモン場の波長は数十 nm のスケールとなる。これは CrNb_3S_6 結晶におけるキラル磁気秩序の空間スケールと同程度である。そのため、両者は効率的に相互作用することが期待される。

本研究では、円型金ナノ構造とキラル磁気秩序からなるキラル結合系の光学応答を調べることを研究目的とする。マイクロメーターサイズに微細加工した CrNb_3S_6 結晶上に円型金ナノ構造を作製し、光照射下での磁気抵抗測定を行う。磁気相転移温度以下では、磁気抵抗の大きさはキラル磁気秩序の磁気構造を反映することがわかっている。この特性に着目し、光照射がもたらすキラル磁気秩序の変調を検出する。当日はキラルプラズモン場がキラル磁気秩序に与える影響について議論したい。

[1] Y. Togawa *et al.*, PRL, **108**, 107202 (2012).

[2] E. Hendry *et al.*, Nat. Nanotechnol, **5**, 783 (2010).

YbNi₃Al₉ の薄膜の作製と物性探索

大阪府立大学 工学域 電気電子系学類 電子物理工学科

西明寺達哉, 奥村慧, 宮戸寛明, 戸川欣彦

YbNi₃Al₉ は空間群 R32 に属し、*c* 軸に平行な向きにらせん軸を持つ。この YbNi₃Al₉ の興味深い点は、重い電子系とスピニカル物質という二つの性質を合わせ持つ初めての物質であるという点である。重い電子系とは、電子間のクーロン反発力が強く働くため、有効質量が極端に大きくなる性質を持つ系であり、一般的な金属とは異なる性質を示す。また、YbNi₃Al₉ はスピニカル物質であり、T=3.4 K 付近で常磁性体からカイラル強磁性に転移する[1]。この物質の薄膜生成の条件を確立することができれば、微細加工によるメゾスコピックな系の作製や、強磁性体との接合によるスピニ注入が可能になり、バルク単結晶では困難な実験を行うことができるようになる。

YbNi₃Al₉ 薄膜の成膜には分子線エピタキシー法を用いている。基板は *c* 面サファイア基板を用いた。今回作製した薄膜は X 線解析により、面間方向に [11̄20]、面内方向に [0001] YbNi₃Al₉ // [10̄10] Al₂O₃ にエピタキシャル成長したドメインと面間方向に [10̄10]、面内方向に [0001] YbNi₃Al₉ // [10̄10] Al₂O₃ に配向したドメインが存在することが分かった。

当日の発表では、YbNi₃Al₉ の物性と薄膜の成膜条件や作製した薄膜の X 線解析による簡単な評価を述べる。

参考文献

- [1] S.Ohara *et al.*, Journal of Physics: Conference Series 273 (2011) 012048.

キラル結晶における電流誘起磁化効果の測定

大阪府立大学 工学域 電気電子系学類 電子物理工学課程

塙田航平, 島本雄介, 宍戸寛明, 戸川欣彦

電気的入力で磁気的応答を生み出す電気磁気効果が盛んに研究されている。マルチフェロイクス物質が主な研究材料であり、元々生じている磁気秩序のスピニ構造が、電場印加により変調され、磁気的応答を生み出す。これらの物質群は磁気秩序を伴っており、時間反転対称性が破れている。

一方、非磁性体は磁気構造を持たず、時間反転対称性を有する。この状況においても、物質が空間反転対称性を破っていれば、時間反転対称性を破る電気的入力である電流を印加することで、磁化を生み出す可能性がある。これは電流誘起磁化効果（Edelstein 効果）と呼ばれ、近年盛んに議論されている。

対称性の考察に基づけば、ジャイロトロピックな点群を持つ物質は電流誘起磁性を示しうる。微視的な起源はバルク系でのスピニ分裂である。空間反転対称性が破れている物質ではスピニ軌道相互作用により、バンド構造が角運動量の反転に対しエネルギー分裂する。これはよく知られている表面・界面系におけるラシュバ効果とは異なる[2]。熱平衡状態では、波数の分布が対称になっているため、試料全体の磁化はゼロとなる。一方、外部から電流を印加すると、波数分布の重心が変化し、スピニ分布が非対称になり、試料全体に磁化が誘起される。実際に、単体半導体テルルのバルク結晶において、 100Acm^{-2} の電流密度に対して 10^{-1}mT 程度の磁化が誘起されることが NMR により観測された[1]。

本研究では、キラルな結晶構造を持つ CrNb_3S_6 に注目する。空間反転対称性が破れた結晶構造を持つ物質であり、電流誘起磁性が観測されると期待される。発現する磁化は小さいと予想されるため、実験では高感度な磁化検出手法が必要となる。信号強度は電流密度に比例する。電流密度を稼ぐためには試料の微細化が有利に働く。また、バルク物質としての Edelstein 効果を実証するには、表面状態のみならず試料全体での評価が必要となる。

我々は、磁気共鳴測定や SQUID 顕微鏡観察を用いて、 CrNb_3S_6 における電流誘起磁性観測を試みている。当日は、ベクトルネットワークアナライザとコーポラーナーウェーブガイドを用いた磁気共鳴測定の手法やデバイスの作製方法について説明し、 CrNb_3S_6 における電流誘起磁性観測の意義について議論したい。

[1] T. Furukawa, Y. Shimokawa, K. Kobayashi, and T. Itou, Nat. Commun. **8**, 954 (2017).

[2] E. I. Rashba Sov. Phys. Solid State. **2**, 1109 (1960).

磁気積層ハイブリッド系におけるスピノン機能開拓

大阪府立大学 電子物理工学課程 量子物性研究グループ

西上 勇希、青木 瑠也、乾 眞人、宍戸 寛明、戸川 欣彦

本研究では、キラル磁性体やキラル結晶に期待されるスピノンフィルター効果、方向二色性、電気磁気キラル効果、離散応答などの特異な輸送特性を調べ、キラル物質群に固有の新しい物質機能を見出すことを目指している。現段階ではスピノンフィルター効果の実証を目指と定めている。

単軸性キラル磁性結晶 CrNb_3S_6 に着目して研究を進めている。 CrNb_3S_6 は Cr イオンがインターラートされた板状の遷移金属カルコゲナイト結晶である。空間群 $P6_322$ に属するが、左手系の結晶構造が優勢と報告されている。磁気相転移温度 130 K 以下では、らせん状のキラル磁気秩序を発現する。キラル磁気秩序は電気輸送特性に強い影響を与え、離散的な磁気抵抗などといった興味深い輸送特性を示す[1]。また、左手系の磁気構造が観察されており、結晶構造のキラリティとの強い相関が示唆されている。このように結晶構造と磁気構造がともにキラリティを示すことは、キラル物質応答を精査する上で大変興味深い。

らせん構造をもつ有機物において注入される電子のスピノン偏極方向（電子の上向きスピノンと下向きスピノン）に応じて伝導率に違いが生じること（スピノンフィルター効果）が報告された[2]。また、ビスマスの細線をねじって機械的に作製されたらせん細線では、細線に印加する磁場と電流の向き、また、ねじりの方向に応じて、伝導率に違いが生じること（電気磁気キラル効果）が見出された[3]。これらはキラルな構造が示す特有のスピノン応答と考えられる。キラルな結晶構造とキラルな磁気秩序を併せ持つキラル磁性結晶 CrNb_3S_6 において特異的なスピノン伝導を検証できれば結晶と磁気の寄与を分離して評価することができるであろう。

キラル磁性体と強磁性体の磁気積層ハイブリッド系を作製することでスピノンフィルター効果の実証を進めている。強磁性体側からスピノン偏極した電流をキラル磁性体に注入する。強磁性体の磁化状態を変化させ上向きスピノンと下向きスピノンに対する伝導率の違いを検出する。しかしながらスピノン偏極流はスピノン拡散長(約 10~1000nm)程度で緩和すると考えられる。試料サイズをスピノン拡散長以下にし、かつ、検出可能な抵抗値を保つために微小な断面積にする必要がある。これらを踏まえて CrNb_3S_6 結晶の微小柱状構造のスピノンフィルター素子の作製に取り組んでいる。

[1] Y. Togawa et al., Phys. Rev. B 92, 220412 (2015).

[2] V. Kiran et al., Adv. Mater. 28, 1957 (2016); M. Kettner et al., J. Phys. Chem. C. 119, 14542 (2015).

[3] G. L. J. A. Rikken et al., Phys. Rev. Lett. 87, 236602 (2001).

磁気共鳴を用いたキラリティ検出

早川尚、島本雄介、戸川欣彦

大阪府立大学 工学研究科 電子・数物系専攻 電子物理工学分野

タンパク質やアミノ酸のようなキラル物質を検出する方法として古くから光学活性が用いられてきた。光学活性では可視域の光を用いることが多いが、近年、マイクロ波を用いたキラル物質の検出法が報告された[1]。具体的には、イットリウム鉄ガーネット(YIG)ディスクにおける磁気共鳴を用いたキラリティ検出法が見出された。磁気共鳴とは磁性体がマイクロ波領域の電磁波を共鳴吸収する現象である。YIGディスク中に磁気共鳴を励起すると、ディスク上には、波長が自由空間に存在する電磁波より短く、渦状構造を持つ電磁波が発生する。この電磁波はディスク直上に配置したキラル分子の電気分極にトルクを与えるが、その反作用でYIGの磁化にトルクが加わる。このトルクによって磁気共鳴の共鳴周波数が変化する。キラル分子のキラリティが異なるとトルクの向きは反転するため、共鳴周波数変化の方向が異なる。そのため、キラリティ判別を実現することができる。定性的にはこのように説明されるが、メカニズムの詳細は解明されていない。

本研究では、マイクロ波によるキラリティ検出の原理の解明と感度の向上を目的とする。先行研究では、十分な感度で検出するためには数 mg の試料を必要とすると報告されている。本手法の応用を考えると検出感度の向上は重要な研究課題といえる。そこで我々はキラルプラズモン場による増強効果を併用することを検討している。キラルな金ナノ構造では、らせんピッチが短く、強度増強された光電場(キラルプラズモン場)が生じることが知られている。2010年にGlasgow大学のKadodwalaらのグループはこのキラルプラズモン場を用いてpg以下のタンパク質を検出することに成功した[2]。従来のキラル分光法では十分な感度で検出するために試料が数 mg 以上必要であったことから6ケタ近い感度の向上であり大きな注目を集めている。同様に、金ナノ構造近傍に発生するキラルプラズモン場を利用することでマイクロ波によるキラリティの検出感度が大幅に向かう可能性がある。

実験では、磁性体ディスクと磁気共鳴検出用回路を基板上に作製する。磁性体ディスク上にはキラルな金ナノ構造を配置し、ベクトルネットワークアナライザを用いて磁気共鳴測定を行う。キラリティの異なる分子を配置し、キラリティ検出に挑戦する。

参考文献

- [1] E. Hollander et al., J. Appl. Phys. 122, 034901 (2017)
- [2] E. Hendry et al., Nat. Nanotechnol. 5, 783 (2010)

遷移金属カルコゲナイトの薄膜成長と物性評価

水谷圭吾^A、島本雄介^A、宍戸寛明^A、高阪勇輔^B、戸川欣彦^A

^A大阪府立大学 工学域 電気電子系学類 電子物理工学課程

^B岡山大学 異分野基礎科学研究所

遷移金属カルコゲナイトである CrNb_3S_6 のバルク単結晶はキラルな結晶構造(空間群 $P6_322$)を持ち、Heisenberg 対称性交換相互作用に加えて反対称性交換相互作用を示す [1, 2]。それらが競合することで Cr の持つ局在スピンがらせん状に配列したキラルらせん磁気秩序が形成される。らせん軸と垂直に磁場を印加すると、磁場強度に応じて、らせん構造が周期的にほどけたキラルソリトン格子(CSL)に変化する。 CrNb_3S_6 単結晶を μm サイズに微細加工することで、CSL のトポロジカルなソリトンの離散性を反映した多値的な磁気抵抗が観測された [3]。 CrNb_3S_6 は mm オーダーのバルク単結晶の作製方法が確立されているが、基板への薄膜成長は実現していない。基板への成膜が可能になれば、微細加工の幅が広がり、バルク単結晶では困難な実験が可能となり、最終的にはデバイス化につながることが期待される。そこで、本研究では基板への CrNb_3S_6 の成膜を目指した。

CrNb_3S_6 のバルク単結晶の育成方法として化学輸送法が用いられている。固体原料に気体反応物を用いて、気体化合物として輸送する方法である [4, 5]。 CrNb_3S_6 粉末と気体反応物を石英管に真空封入したものを電気炉の適切な温度位置に配置する。電気炉は中心が最も高温となるような温度勾配を持つが、低温側に向かって化学輸送が生じる。石英管の端に CrNb_3S_6 が結晶成長するため、石英管内の低温側へ基板を設置することで、基板に CrNb_3S_6 の薄膜が成長すると考えられる。基板には CrNb_3S_6 と同じ六方晶である c 面サファイア基板を用いる。温度勾配や育成時間などを変化させることで膜圧制御を試みる。当日は、化学輸送法を用いた CrNb_3S_6 のバルク単結晶の育成方法や石英管への基板の固定方法を議論する。

[1] I. Dzyaloshinskii, J. Phys. Chem. Solids **4**, 241 (1958).

[2] T. Moriya, Phys. Rev. **120**, 91 (1960).

[3] Y. Togawa, *et al.*, Phys. Rev. B **92**, 220412 (2015).

[4] T. Miyadai *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **52**, 1394 (1983)

[5] Y. Kousaka *et al.*, Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A **600**, 250 (2009)

キラル磁気秩序における時空相関

村田裕樹, 中山翔太, 戸川欣彦

大阪府立大学工学域 電気電子系学類 電子物理工学課程

キラル磁性体 CrNb_3S_6 は磁気相転移温度(130K)以下で結晶キラリティに起因する反対称性交換相互作用 Dzyloshinskii-Moriya 相互作用が誘起されキラルらせん磁気秩序を形成する。らせん軸に垂直に磁場をかけた場合、キラル磁気ソリトン格子(CSL)と呼ばれるらせんの周期が伸びたキラル磁気秩序に変化していく[1]。CSL は巨視的空間スケールに渡って位相の揃った磁気秩序であることが直接観察により明らかにされた。

我々は位相コヒーレントな CSL に局所的に外力を与える際のダイナミクスに注目している。CSL の一部に誘起される揺らぎは CSL 中を伝搬すると考えられる。しかしながら、その振動ダイナミクスにおいて CSL がどの様な内部変形を示しながら伝播するかは明らかにはなっていない。CSL が示す時間的・空間的な揺らぎを精査し、CSL が有する時空相関を解明することは興味深い。CSL の時空間的な揺らぎを利用したアメーバ計算[2]などの生態系アルゴリズムの実装が期待されている。

本研究では、CSL の時空相関を解明する手始めとして、CSL のパルス電流応答を調べている。CSL の磁気構造は磁気抵抗測定を用いて検出することができる。 CrNb_3S_6 単結晶試料に局所的にパルス電流を印加し、集団的な CSL ダイナミクスを誘起する。試料端部に設けた電圧端子間で抵抗測定を行い、磁気秩序の変化をモニターする。

発表当日はキラル磁性体 CrNb_3S_6 のパルス電流印加によるキラル磁気秩序の変化測定から得られた知見をもとに、振動ダイナミクスの起源を議論する。

参考文献

- [1] Y. Togawa *et al.*, Phys. Rev. Lett. **108**, 107202 (2012).
- [2] M. Aono *et al.*, Comm. of the ACM **50(9)**, 69 (2007).

熱勾配下の磁気スカーミオンダイナミクスによる異常ネルンスト効果

東邦大理

星 幸治郎, 大江 純一郎

Numerical study on the anomalous Nernst effect induced by skyrmion dynamics under thermal gradient.

Dept. of Phys. Toho Univ.

Koujiro Hoshi and Jun-ichiro Ohe

近年、スピニカルリトロニクス分野において、熱勾配下における異常ネルンスト効果やスピニ存電気伝導が大きな注目を集めている。スカーミオン格子において、その特異な磁化構造によってトポロジカルホール効果が生じる[1]。また、スカーミオン結晶において巨大な異常ネルンスト効果が生じると報告された[2]。これらの効果はスカーミオン格子のトポロジカルな磁化構造による創発磁場によって伝導電子の軌道が曲げられることによって生じる。先行研究[2]では、スカーミオンの磁化構造は静的な系を扱った。しかし、現実の系では、試料に熱勾配が印加されると、磁化ダイナミクスが誘起される。

本件研究では、熱勾配下の磁気スカーミオンダイナミクスによって誘起される異常ネルンスト効果(ANE)とゼーベック効果(SE)を数値計算を用いて調べる。まず、熱勾配下のスカーミオンの磁化構造を得るために、強磁性交換相互作用、Dyaloinsky-Moriya 相互作用、外部磁場、熱揺らぎによるランダム磁場を導入した Landau-Lifshitz-Gilbert 方程式を計算した。得られた磁化構造と 4 端子構造における再帰的 Green 関数と Brower の公式を用いて、各々の端子で検出されるポンピング電流を計算した。ANE(SE)は熱勾配に対して横(縦)方向の端子のポンピング電流の差とした。計算の結果、磁気スカーミオン構造の存在によって ANE が生じる事が分かった。また、スカーミオンの密度を大きくすることによって異常ネルンスト効果がトポロジカルチャージに比例することが分かった。この結果はスカーミオンの密度の増大によって伝導電子が感じる有効磁場が増大したことによる。

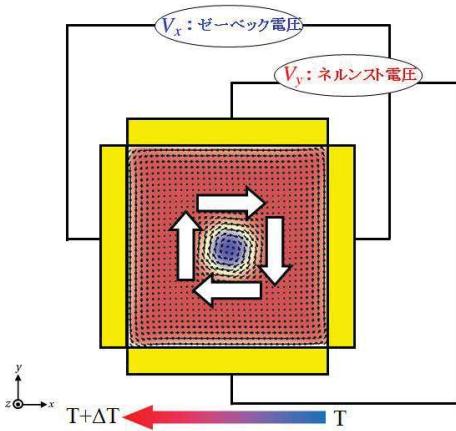


図 1: 数値計算のセットアップ

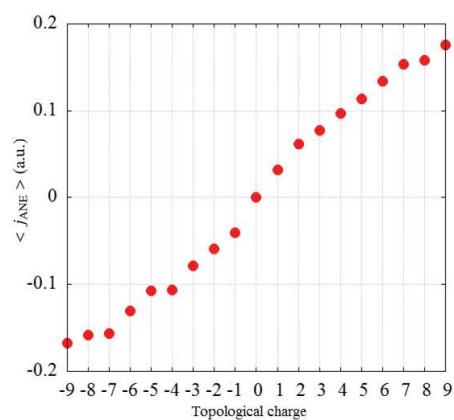


図 2: ANE のトポロジカルチャージ 依存性

[1] P. Bruno, V. K. Dugaev, and M. Taillefumier, Phys. Rev. Lett. **93**, 096806 (2004).

[2] Y. P. Mizuta and F. Ishii, Scientific Reports **6**, 28076 (2016).

カイラルソリトン格子中のスピン波伝播の数値的研究

東邦大理^A,大阪府大工^B,放送大教^C

杉下将哉^A, 戸川欣彦^B, 岸根順一郎^C, 大江純一郎^A

Spin-wave transmission through chiral soliton lattice

^A Toho University, ^BOsaka Prefecture University, ^CThe Open university of Japan

M. Sugishita^A, Y. Togawa^B, J. Kishine^B, J. Ohe^A

CrNb_3S_6 に代表される単軸のカイラル磁性体中では、Dzyaloshinskii-Moriya 相互作用と Heisenberg 型の強磁性交換相互作用が競合し、数十 nm 程度の周期で磁化がらせん状に配置された、らせん構造が実現する。らせん構造は、カイラルらせん磁気構造 (Chiral Helimagnet, CHM) と呼ばれる。この状態に、らせん軸に垂直な方向に磁場を印加することによって、らせん構造が周期的にほどけ、カイラルソリトン格子 (Chiral Soliton Lattice, CSL) と呼ばれる特異な磁気構造に変化する。CSL の存在は 2012 年戸川らによって、試作した単軸のカイラル磁性体 CrNb_3S_6 で、ローレンツ透過型電子顕微鏡での観測により証明された [1]。このようなカイラリティによってトポロジカル的に保護されている磁化構造は、デバイスに適しているため、近年注目されている。

本研究では、CSL と強制強磁性(FFM)上で発生するスピン波の伝わり方を研究した。磁化構造の動く速さを速くすることは、マグノンデバイスを作るうえで非常に重要である。計算方法は、図 1 のように input の位置にあるソリトンに交流磁場を印加し、output の位置にあるソリトンの磁化の振動を計算した。CSL は各ソリトンがバネで繋がった連成振動子のように考えることができる。そのため、FFM に比べて多くの共鳴条件がある。この共鳴条件下でのスピン波の伝わる振幅は、FFM でのスピン波の伝わる振幅より非常に大きい。この結果から CSL と FFM を比較することで、CSL のスピン波の伝わる大きさの優位性を示す。

[1] Y. Togawa et al. Phys. Rev. Lett. **108**, 107202 (2012).

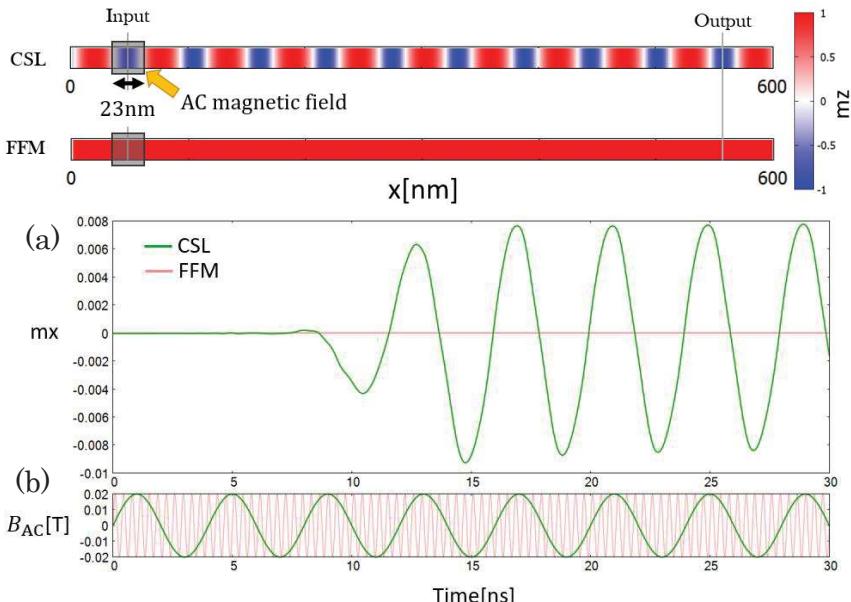


図 1 CSL と FFM の計算システム。スピン波は部分的な交流によって励起され、Output の位置まで伝播される。

図 2

(a) 図 1 の Output の位置の mx 成分。AC 磁場は $t=0$ に Input の位置に印加される。

(b) 印加交流磁場。CSL と FFM の共鳴周波数はそれぞれ、0.2GHz と 2.8GHz である。