

キラル物性若手の会 2016年度 第2回 秋の学校

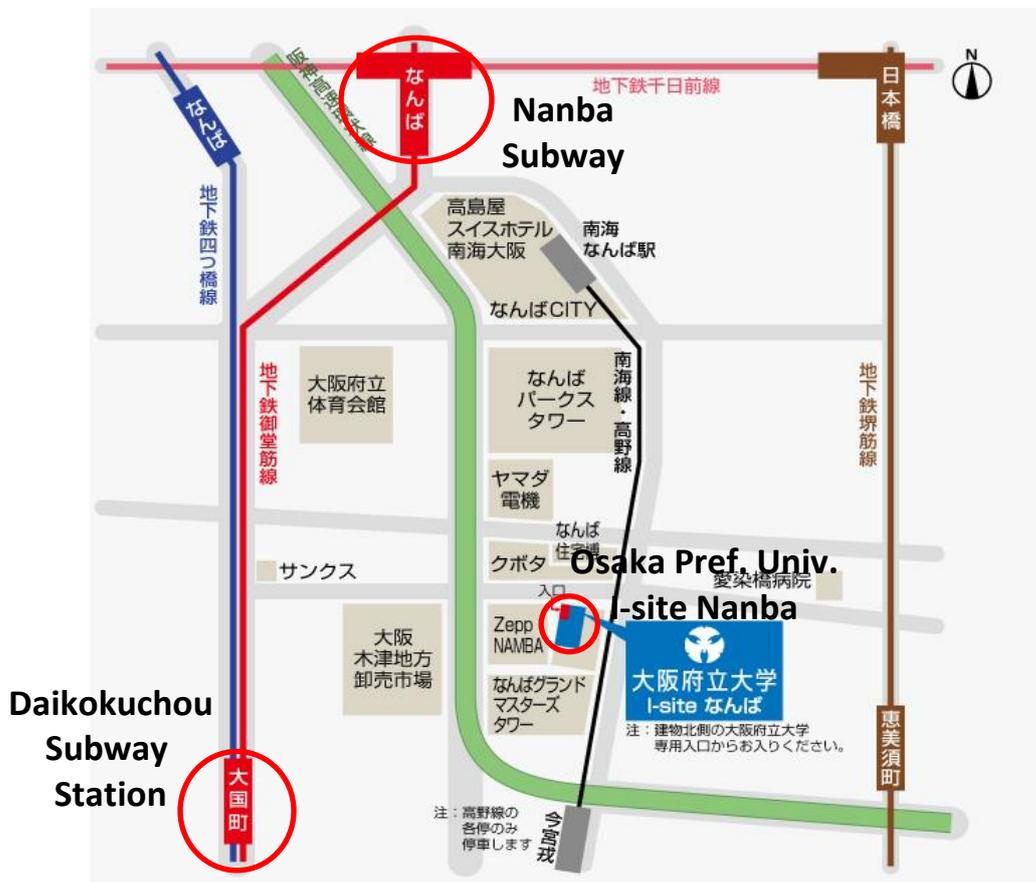
日時
2016年12月12日～13日

Date
December 12th-13th 2016

場所
大阪府立大学
I-site なんば 2F セミナールームS1

Place
Osaka Prefecture University
2F Seminar Room S1, I-site Nanba

<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

About 7 minutes on foot from Daikokutyou subway
(1st Exit) on the Midousuji Subway line

地下鉄御堂筋線「なんば駅」下車
南へ徒歩約15分

About 15 minutes on foot from Nanba subway station
on the Midousuji Subway line

式次第

Program

* 12月12日(月) *
13:00~13:10 開会
13:10~16:20 松浦先生の磁性入門講義
16:30~18:00 グループディスカッション1

December 12th (Mon.)
13:00~13:10 Opening
13:10~16:20 Lecture By Dr. Matsuura about Magnetism
16:30~18:00 Group discussion1

19:00~ 懇親会

場所：道頓堀クラフトビール醸造所 なんばCITY
大阪府大阪市中央区難波5-1-60 なんばCITY南館1F
TEL 050-5786-1046

<http://r.gnavi.co.jp/k195065/>

19:00~ A social gathering

location : Dotonbori craft beer brewery at Namba CITY
Namba 5-1-60 Namba CITY South Building 1F
Chuo-ku, Osaka-shi, Osaka

TEL 050-5786-1046

<http://r.gnavi.co.jp/k195065/>

*12月13日(火) *

9:30~11:30 Leonovさんのスキルミオンミニ講義

11:30~13:00 昼食

13:00~15:10 若手による口頭発表(以下詳細)

口頭発表は、1人発表20分+討論10分

(李理さんは、発表20分+討論30分)

13:00~13:50 李理(広島大学 井上研PD)

14:00~14:30 米村潤一郎(大阪府立大学 戸川研M2)

14:30~15:00 十河忠幸(大阪府立大学 戸川研M2)

15:00~15:30 奥村駿(東京大学 求研M1)

15:40~16:50 グループディスカッション2

16:50~ 閉会

December 13th (Tue.)

9:30~11:30 Lecture By Dr. Leonov about Skyrmion

11:30~13:00 Lunch Time

13:00~15:10 Oral presentation by young researchers

Presentation time : 20 min. Discussion time : 10 min.

Dr.Li: Presentation time : 20 min. Discussion time : 30 min

13:00~13:50 Li Li (Hiroshima Univ.)

14:00~14:30 Junichiro Yonemura (Osaka Pref. Univ.)

14:30~15:00 Tadayuki Sogo (Osaka Pref. Univ.)

15:00~15:30 Shun Okumura (The University of Tokyo)

15:40~16:50 Group discussion2

16:50~ Closing

連絡先 高橋浩久 090-3953-4420
遠藤健作 090-5137-9780

Hirohisa TAKAHASHI
Kensaku ENDO

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、6000円程度、学生の方には3000円のみご負担頂く予定です。皆様のご参加を心からお待ちしております。

muSR によるカイラルソリトン格子状態の磁場印加ダイナミクス の理論的予想

放送大院文化科学
高橋浩久

**Theoretical Predictions on Dynamics of Chiral Soliton Lattice State by Applied Magnetic
Fields in muSR**

Div. of Arts and Sci., The Open University of Japan,

Hirohisa T. Takahashi

カイラル磁性体に関する研究が、理論的、実験的側面から非常に精力的に行われており [1,2]、特に、らせん軸に垂直方向に磁場を印加することで生じるカイラルソリトン格子状態がローレンツ電子顕微鏡によって確認され [3]、基礎科学においても応用においても強い興味を惹きつけている。また、カイラルソリトン格子状態にらせん軸に平行な磁場を印加すると Döring-Becker-Kittel 機構により散逸のないスピン流が生じることが理論的に予言されている [1]。

なお、ミュオンスピン回転法というのは、低速なミュオンを入射すると結晶内部でクーロン力によって停止し、その停止位置での内部磁場を感じてミュオンスピンの歳差運動を行い、その後、ミュオンが崩壊して放出する陽電子の放出方向がミュオン崩壊時のスピンの方向に偏るという角度依存性があることを利用し、その陽電子の分布を通じて結晶内部の磁気構造を探る手法である。したがって、磁場の空間変化や時間変化を観測するのに適した手法であると言える。

今回の議論では、交流磁場の場合と瞬間磁場の場合において、ミュオンスピン回転法と呼ばれる観測方法を通じて、カイラルソリトン格子状態のスピン流がどのように見えるかについて議論を行う。

[1] J. Kishine and A. S. Ovchinnikov in *Solid State Physics*, ed. R. E. Camley and R. L. Stamps (Academic Press: New York) **66**, (2015).

[2] Y. Togawa, Y. Kousaka, K. Inoue, and J. Kishine, *J. Phys. Soc. Jpn.* **85**, 112001 (2016).

[3] Y. Togawa, T. Koyama, K. Takayanagi, S. Mori, Y. Kousaka, J. Akimitsu, S. Nishihara, K. Inoue, A. Ovchinnikov, J. Kishine, *Phys. Rev. Lett.* **108**, 107202 (2012).

純有機ビラジカル液晶の合成と磁性

(京大院人間環境¹・ロシア科学アカデミー²・慶応大理工³・阪大院基礎工⁴・JST さきがけ⁵)
 ○武元佑紗¹・Elena Zaytseva^{1,2}・吉岡直樹³・鈴木克明¹・内田幸明^{4,5}・下野智史¹・加藤立久¹・
 Dmitrii G. Mazhukin²・田村類¹

Preparation and Magnetic Properties of All Organic Biradical Liquid Crystals

(KYOTO Univ.,¹ NIOCH SBRAS,² KEIO Univ.,³ OSAKA Univ.,⁴ JST-PRESTO⁵)

Yusa Takemoto,¹ Elena Zaytseva,^{1,2} Naoki Yoshioka,³ Katsuaki Suzuki,¹ Yoshiaki Uchida,^{4,5} Satoshi Shimono,¹ Tatsuhisa Kato,¹ Dmitrii G. Mazhukin,² Rui Tamura¹

¹Graduate School of Human and Environmental Studies, Kyoto University, Yoshida-nihonmatsu-cho, Sakyo-ku, Kyoto 606-8501, Japan; ²N. N. Vorozhtsov Novosibirsk Institute of Organic Chemistry, Siberian Branch of Russian Academy of Science, Novosibirsk 630090, Russia; ³Department of Applied Chemistry, Keio University, 3-14-1 Hiyoshi, Kohoku-ku, Yokohama 223-8522, Japan; ⁴Graduate School of Engineering Science, Osaka University, 1-3 Machikaneyama-cho, Toyonaka, Osaka 565-0871, Japan; ⁵PRESTO, Japan Science and Technology Agency (JST), 4-1-8 Honcho, Kawaguchi, Saitama 332-0012, Japan

Summary: Here we report the preparation and magnetic properties of two different types of all-organic biradical liquid crystalline (LC) compounds (*S,S,S,S*-**1** and (*R,S*)-**2**). (*S,S,S,S*-**1**) showed a chiral nematic phase and (*R,S*)-**2** did a discotic phase. By SQUID magnetization measurement, (*S,S,S,S*-**1**) showed strong magnetic interaction ($\bar{J} > 0$) at the crystal-to-LC phase transition, while (*R,S*)-**2** exhibited antiferromagnetic interactions at low temperatures and a substantial increase in the molar magnetic susceptibility (χ_M) at the crystal-to-discotic LC phase transition.

【緒言】 これまで、棒状の有機常磁性液晶相中では、分子長軸周りの回転が高速であるため、分子間では磁気相互作用は発現しないと考えられていた。しかし、我々が合成した負の誘電異方性を持つ純有機ラジカル液晶性化合物の磁化の温度依存性を SQUID 磁束計を用いて測定したところ、結晶相から液晶相への相転移の際に磁化率の上昇が見られ、液晶相中において強い磁氣的相互作用が発現することが示唆された(磁気液晶効果、 $\bar{J} > 0$)。次いで、電子スピン共鳴(EPR)分光法を用いて、液晶試料の磁化率の温度依存性を測定したところ、同様に結晶相から液晶相への相転移の際に磁化率の大きな上昇が見られた。この現象は、弱い磁場を印加すると、液晶相中で一種のスピングラス状の強い磁氣的相互作用が発現することに由来していると考えられる^{1,2}。

【実験】 コア中にビラジカル構造を有する化合物を合成した。偏光顕微鏡観察と X 線回折(XRD)測定により液晶相の同定を行った。また、EPR 分光法によりラジカル間の分子間磁気相互作用と SQUID 磁束計を用いてモル磁化率の温度依存性を測定し、ビラジカル化合物の磁気挙動の観測を行った。

【結果と考察】

今回、コア中にビラジカル構造を有する化合物の合成に成功した。偏光顕微鏡観察結果から、化合物(S,S,S,S)-**1**はfan-like textureを示し、化合物(R,S)-**2**はmosaic textureを示した。XRDパターンの解析により、(S,S,S,S)-**1**はキラルネマチック相 (N^{*}) を、(R,S)-**2**はレクタングュラーカラムナー相 (Col_r) を示すことが分かった。また、EPR分光法では、(S,S,S,S)-**1**のTHF溶液中 (1.0 × 10⁻⁴ mol/L) では、常温の測定において、孤立したNOラジカルに由来する3本線のみが観測され、分子内ラジカル間に磁気相互作用は見られなかった。一方で、(R,S)-**2**のTHF溶液中 (1.0 × 10⁻⁴ mol/L) では、5本線が見られた。これは分子内のスピン同士が相互作用し、三重項状態が存在していることを示唆している。さらに、SQUID磁束計を用いてモル磁化率の温度依存性を測定したところ、(S,S,S,S)-**1**の場合は、結晶相から液晶相への相転移の際に、磁化率の大きな上昇が見られ、N^{*}相において強い磁氣的相互作用 ($\bar{J} > 0$) が働いていることが分かった²⁾。一方、(R,S)-**2**の場合は、固体状態では低温域において反強磁性的相互作用が、固体-液晶相転移においてはモル磁化率の上昇が見られるなど、興味深い磁気挙動が観測されたので報告する。

Acknowledgment: This work was supported by JSPS Core-to-Core Program, A. Advanced Research Networks, JSPS KAKENHI (No. 26248024) and RFBR (16-33-00238 mol a).

References

- [1] a) Uchida, Y. *et al. J. Am. Chem. Soc.* **2010**, *132*, 9746; b) Suzuki, K. *et al. J. Mater. Chem.* **2012**, *22*, 6799; c) Suzuki, K. *et al. Soft Matter* **2013**, *9*, 4687; d) Tamura, R. *et al. Handbook of Liquid Crystals*, 2nd edition, Wiley-VCH, **2014**, vol. 8, pp. 837-864; e) Tamura, R. *et al. Advances in Organic Crystal Chemistry: Comprehensive Reviews 2015*, Springer, **2015**, pp. 689-706.
- [2] Suzuki, K. *et al. Chem. Commun.* **2016**, *52*, 3935

カイラルらせん磁性体/超伝導体二層構造における渦糸状態の磁場依存性

福井 臯丈, 加藤 勝, 戸川 欣彦
大阪府立大学工学研究科

カイラルらせん磁性体は強磁性交換相互作用と Dzyaloshinsky-Moriya 相互作用の競合により、スピンの一つの軸の周りをらせん回転するように配列する磁性体である[1]。さらに、磁場印加により、ソリトンの形の磁気秩序が周期的に現れる磁気構造に変化することも知られている[2]。

我々は、カイラルらせん磁性体/超伝導体二層構造に着目した。超伝導体は外部からの磁場を排除する Meissner 効果を持つ。しかし、磁場が大きいと部分的に超伝導を壊し、磁場が量子磁束の形で侵入することで渦糸が形成される。この渦糸の数は磁場の増加と共に増加して、均一な磁場下では三角格子を作るように配列することが知られている。一方、渦糸は強磁性体からの影響を受けることも知られている[3]。強磁性体/超伝導体の二層構造においては、強磁性体の磁気構造により作られる磁場が超伝導体に与えられることで、自発的に渦糸が形成される。その配置は強磁性体ドメイン構造に依存して、渦糸のピン止め効果による臨界電流の向上のような効果も報告されている。カイラルらせん磁性体はヘリカルな磁気構造を持つため、強磁性体との層構造の場合とは異なった特異な影響を超伝導体に与えることが期待できる。

我々は、カイラルらせん磁性体が超伝導体に与える影響について、超伝導体に現れる渦糸状態に焦点を当てた[4,5]。そのために、カイラルらせん磁性体と超伝導体の二層構造における渦糸配列を数値シミュレーションによって調べており、本討論ではその結果を報告する。

参考文献

- [1] J. Kishine, et al., Prog. Theor. Phys. Suppl., 159, 82 (2005)
- [2] Y. Togawa, et al., Phys. Rev. Lett., 108, 107202 (2012)
- [3] I. F. Lyuksyutov, V. L. Pokrovsky, Adv. Phys., 54, 1 (2005)
- [4] S. Fukui, M. Kato, and Y. Togawa, Supercond. Sci. Technol., 29, 125008 (2016)
- [5] S. Fukui, M. Kato, and Y. Togawa, Physica C, 530, 51 (2016)

キラル磁性体 CrNb_3S_6 微細試料のキラルソリトン格子磁気共鳴

十河忠幸^A, Francisco Goncalves^{A,B,C,D}, 島本雄介^A, 吉澤大智^E, 萩原政幸^{C,E}, Robert Stamps^D, 高阪勇輔^{B,C}, 秋光純^{B,C}, 西原禎文^{B,C}, 井上克也^{B,C}, I. G. Bostrem^F, VI. E. Sinitsyn^F, A. S. Ovchinnikov^F, 岸根順一郎^{C,G}, 戸川欣彦^{A,C,D,H}
 大阪府大工^A, 広大理^B, 広大キラル拠点^C, グラスゴー大学^D,
 阪大院理先端強磁場^E, ウラル連邦大学^F, 放送大^G, JST さきがけ^H

結晶構造がキラリティを有する磁性体では Heisenberg 型交換相互作用と Dzyaloshinskii - Moriya (DM) 相互作用の競合により、磁場中においてキラル磁気秩序を発現する。ゼロ磁場下では、スピンのキラル結晶軸に沿ってらせん状に配列したキラルらせん磁気秩序 (CHM) を基底状態として形成する。キラル結晶軸に対して垂直に外部磁場を印加すると CHM のスピンらせん構造は周期的にほぐれ、強制強磁性領域とらせん構造が整列したキラル磁気ソリトン格子 (CSL) に遷移する。臨界磁場を越えるとすべてのスピンの磁場印加方向に揃い、強制強磁性状態 (FFM) となる。

最近、単軸性キラル磁性体 CrNb_3S_6 において、磁場中で CSL が形成されることがローレンツ電子顕微鏡法を用いた実空間・逆空間解析により明らかにされた[1]。CSL は試料全体に様に現れ、磁場を印加することによりらせん周期が変化することや試料の欠陥構造等に対して極めて安定に存在することが直接観察された。これらの振る舞いは CSL が巨視的なスピン位相コヒーレンスを持つことに由来している。巨視的位相コヒーレンスを持ち、ナノスケールの磁気秩序を制御することが出来るキラル磁気秩序に対して、その集団運動を調べることは興味深い。そこで、本研究では磁気共鳴に注目し、集団運動の性質や振る舞いを明らかにすることを目的とした。

本講演では、ベクトルネットワークアナライザとコープレナーウェーブガイド (CPW) を用いて行ったマイクロメーターサイズの CrNb_3S_6 における磁気共鳴実験の詳細を示す。CPW のシグナル線上に誘起される交流磁場に対してキラル結晶軸を平行(I)に配置した場合と垂直(II)に配置した場合の磁気共鳴や試料サイズ依存性などを測定した。FFM 領域では、配置にかかわらず、同様の磁気共鳴周波数の磁場依存性 $f_{\text{res}}(H)$ が観察された。この振舞いは定性的には、従来の強磁性共鳴と同様に、Kittel の式に基づき解析できる。配置(I)では、 $f_{\text{res}}(H)$ の変化がソリトン密度の変化にスケールする振舞いが見出された。また、配置(II)では、 $f_{\text{res}}(H)$ はゼロ磁場に関して対称であり、配置(II)では非対称となる。また、試料サイズが小さくなるほど共鳴周波数が高くなる傾向も見られた。これらの磁気共鳴の結果とローレンツ電子顕微鏡法や磁気抵抗測定から得られた知見を元に、CSL の集団運動の特性に関して議論する。

参考文献: [1] Y. Togawa *et al.*, Phys. Rev. Lett. **108**, 107202 (2012). [2] J. Kishine *et al.*, Phys. Rev. B **89**, 014419 (2014). [3] Y. Togawa *et al.*, Phys. Rev. B **92**, 220412(R) (2015).

キラル磁性体 CrNb_3S_6 における磁気相図の角度依存性

米村潤一郎^A, 木田孝則^B, 吉澤大智^B, 高阪勇輔^{C,D}, 秋光純^{C,D},
西原禎文^{C,D}, 井上克也^{C,D}, 岸根順一郎^{D,E}, 萩原政幸^{B,D}, 戸川欣彦^{A,D,F}
大阪府大院工^A, 阪大院理先端強磁場^B,
広大理, 広大キラル物性拠点^D, 放送大^E, JST さきがけ^F

キラル磁性体 CrNb_3S_6 は結晶構造にキラリティを有しており、ジャロシンスキー・守谷 (DM) 相互作用と交換相互作用が競合することで、キラルらせん磁気秩序が発現する。零磁場下ではらせん構造は連続的であるが、結晶らせん軸に対して垂直な磁場下では、周期的かつ非線形にねじれた磁気秩序であるキラルソリトン格子へと変化する。キラルソリトン格子のらせん周期は磁場強度に応じて増減する。臨界磁場以上では磁気モーメントが一様に揃った強制強磁性状態へと相転移する。また、らせん軸に平行な磁場下においては、磁気モーメントがコーン状に配列したコニカル相が形成されることが知られている。

我々はこれらのキラル磁気秩序が示す相転移現象の特性を議論するために、熱力学量の一つである磁化に重点を置いた精密測定を行っている。磁気輸送特性において、試料のサイズ効果が重要であることが明らかになりつつある[1]。そのため、微細試料の磁化を検出できるようにするため、磁気トルク測定法[2]を採用した。磁気トルク測定は微細試料の磁化の相対的変化を捉えることに適した測定手法である。磁化と磁場の磁気異方性から生じる磁気トルクを、 CrNb_3S_6 微細化試料を先端に取り付けたマイクロカンチレバーを用いて検出する。検出感度などを含めて、磁気トルク測定法の優位性を議論したい。

また、2つの相転移現象の性質の違いを明らかにするには、遷移過程を解明することが重要である[3]。そのため、磁場印加角度依存性の測定を進めている。磁化データをもとに磁気相図を作製した。さらに、微細化試料やバルク単結晶試料において、磁気抵抗の角度依存性を測定した。これらのデータを踏まえ、相転移の特性に関する総合的な議論を展開したい。

参考文献

- [1] Y. Togawa *et al.*, Phys. Rev. B **92**, 220412(R) (2015).
- [2] E. Ohmichi *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **73**, 3022(2002).
- [3] V. Laliena *et al.*, Phys. Rev. B **93**, 134424 (2016).

キラル基板上の鏡像異性体ナノ構造のキラルプラズモン反応

遠藤 健作¹、橋谷田 俊²、Malcolm Kadodwala³、岡本 裕巳²、戸川 欣彦^{1, 3}

1 大阪府立大学、2 分子科学研究所、3 グラスゴー大学

自然界には、手、ウイルス、タンパク質、DNA など、非常に多くの種類のキラルな物質がある。キラルとは、鏡像が互いに重ね合わすことができない性質のことを指す。キラルな物質が右手系か左手系かによって異なる性質を示すことは広く知られており、物質のキラリティを区別することは非常に重要である。

キラルなタンパク質やアミノ酸の検出には、昔から、円二色性(Circular dichroism : CD)分散計が用いられている。その検出原理は右円偏光と左円偏光の吸収度合いの差が異なるという性質（光学活性）による。しかし、タンパク質のサイズと円偏光のらせんピッチの空間スケールのミスマッチにより、CD スペクトルの変化は小さくなる。これらを検出するためには、相当量の物質が必要であることが問題であった。

近年、キラルな金ナノ構造を光励起することで、非常にらせんピッチの短い円偏光電場が発生することが見出された。その特性を用い、ごく微量のタンパク質を高感度 ($\leq \text{pg}$) に検出することが可能であることが報告された[1]。金ナノ構造を用いたキラル物質検出の研究が盛んになってきている。

本発表では、初めに、キラルな金ナノ構造を用いるとなぜキラルなタンパク質を検出できるのかを説明する。次に、我々が研究を進めている金ナノ構造を用いた固体結晶のキラリティ検出について紹介する。具体的には、左右の結晶キラリティを有する水晶基板上に400nm 四方の Γ 型やS字型の金ナノ構造を作製し、これらを用いた水晶のキラリティの検出を試みている。参照物質として石英ガラス基板を用いる。 Γ 型金ナノ構造の場合、基板に対する入射方向に関わらずスペクトルが同じになるなど興味深い結果が得られつつある。この振舞いは先行研究[2]と同様の傾向を示しているが、S字型においては違った傾向が得られているなど、そのメカニズムは必ずしも明らかではない。これらの実験結果について議論する機会としたい。

[1] E. Hendry *et al.*, *Nat. Nanotechnol.*, **5**, 783-787 (2010).

[2] M. Kuwata-Gonokami *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **95**, 227401 (2005)

キラリ磁性体 CrNb_3S_6 における非対称応答

村本 陽拓¹、戸川 欣彦^{1, 2, 3}

大阪府立大工¹、グラスゴー大物理天文²、JST さきがけ³

キラリ磁性体 CrNb_3S_6 では、磁気相転移温度 (130 K) 以下でキラリ軸に垂直に磁場を印加すると、キラリソリトン格子 (CSL) と呼ばれる磁気モーメントがらせんを巻いた長周期構造が形成される。CSL は試料全体に一樣に現れ、試料の欠陥構造などに対して安定に存在する[1]。これは CSL が巨視的なスピン位相コヒーレンスを持つことを示している。磁場を増加させるとソリトンが段階的にほだけ、ソリトン密度が減少する。飽和磁場 (~2300 Oe) を超えると、磁気モーメントは磁場方向に揃い、強制強磁性状態 (F-FM) に遷移する。

ソリトン密度の変化は磁気抵抗効果により観測できる。これはソリトン密度の減少に伴い伝導電子の散乱が弱くなるためである。また、マイクロメートル程度に微細化した試料 (マイクロサンプル) では、磁気抵抗に顕著なヒステリシスが現れる。特に、減磁過程では F-FM が保持された過飽和状態が 1000 Oe 近くまで観察される。この臨界磁場を下回ると、ソリトン密度が急激に増大する。このような過飽和状態の崩壊は電気抵抗の急激な上昇として検出することができる。

CSL に局所的な変化を与えると、位相コヒーレンスのため、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と期待される。実際、マイクロサンプルに電流を用いて局所的にパルス磁場を印加すると、試料全体に渡って過飽和 (F-FM) 状態から CSL への磁気相転移が誘起されることが見出された。本研究ではこのような非局所応答を系統的に調べ、その起源を解明することを研究目的としている。

局所磁場印加用の金細線の数を増やしたデバイスを作製した。電流パルスの加わる方向を変えたところ、閾値が 15 倍近く変わることがわかった。加えて、金細線の位置により閾値が大きく異なる様子が見出された。試料配置に対して閾値分布が非対称となる結果が得られた。試料と金細線の間隔を制御するなどデバイス構造を改良し、上述のデバイスにおいて得られた非対称応答の起源を調べている。

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

キラル磁性体／強磁性体積層構造の輸送特性

青木 瑠也, 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

本研究は六方晶キラル磁性体 CrNb_3S_6 薄膜と強磁性体の積層構造を作製し、その輸送特性を調べることが目的とする。

キラル磁性体では、強磁性交換相互作用と Dzyaloshinsky-Moriya 相互作用が競合し、らせん状のキラル磁気秩序が発現する。最近、立方晶系のキラル磁性体 MnSi や FeGe の薄膜において、らせんの巻き数に応じた磁気抵抗効果の離散化が報告された[1-2]。30 nm から 200 nm の膜厚とらせん周期 (MnSi : 14 nm, FeGe : 72 nm) の関係から 2, 3 段階のステップ状の変化が観察されているが、その離散性は明瞭ではない。一方、マイクロメートルサイズに微細化された単軸性キラル結晶 CrNb_3S_6 において明瞭なステップが観察されている[3]。したがって、 CrNb_3S_6 結晶の数百 nm 以下の薄膜では離散性がより明瞭になることが期待される。

また、キラル分子構造を持った有機物において、Fe 探針を用いた伝導性 AFM による伝導度特性が調べられ、伝導度が Fe 探針のスピンの状態に依存することが報告された[4]。これは上向きのスピンを持つ電子と下向きのスピンを持つ電子の電気伝導に差異が生じ、スピンフィルター効果が現れているためと解釈されている。したがって、キラル磁性体と強磁性体の積層構造を作製して、強磁性体からスピン偏極した電流を注入することで、スピンフィルター効果などの特異な輸送特性が現れることが期待できる。その際、キラル磁気秩序に由来する伝導特性の離散化や可変性などの特異的な機能を見出すことは大変興味深い。

現在、キラル磁性体と強磁性体の積層構造を作製するための工程を確立している。第一段階として、 CrNb_3S_6 結晶を数百 nm 以下の薄膜に微細加工して、面間抵抗を測定できるような電極を作製している。これにより、離散性と膜厚の関係を系統的に調べ、さらには薄膜上下面に磁性体などの異種材料を接合し、スピン依存した電気伝導特性を調べる予定である。

参考文献

- [1] M.N.Wilson, *et al.*, Phys. Rev. B **88**, 214420 (2013).
- [2] N.Kanazawa, *et al.*, Phys. Rev. B **94**, 184432 (2016).
- [3] Y.Togawa, *et al.*, Phys. Rev. B **92**, 220412 (2015).
- [4] V.Kiran, *et al.*, Adv. Mater. **28** (2016).

キラル磁性体 CrNb_3S_6 におけるスピン起電力の検出

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

磁壁などの非一様な磁気構造が磁場などの外力によって駆動されるとスピン起電力を生じることが理論的に提案され[1,2]、単一の磁壁構造を含むパーマロイ磁性細線などにおいて実験的な検証が進んでいる [3,4]。

キラル磁性体 CrNb_3S_6 はキラルな結晶構造を持つ。転移温度を下回るとゼロ磁場では、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を形成する。 c 軸と垂直に磁場を印加すると、らせん周期が磁場強度に応じて周期的にほどけた磁気秩序であるキラルソリトン格子 (CSL) を形成する。CSL の形成過程はローレンツ電子顕微鏡を用いて直接観察されている [5]。CSL は試料全体に一様に現れ、試料の欠陥構造などに対して安定に存在する。この安定性は CSL が巨視的スケールに渡って位相コヒーレンスを示すことに由来する。また、CSL は 360 度磁壁が連続的に連なった超格子構造とみなすことができる。従って、CSL の集団運動により、スピン起電力が巨大化することが期待される [6]。

本研究では、 CrNb_3S_6 単結晶において、CSL ダイナミクスを発生させ、スピン起電力を検出することを研究目的とする。マイクロメーター程度に微細化した CrNb_3S_6 単結晶に局部的に交流磁場を印加し、CSL ダイナミクスを発生させる。CSL の位相コヒーレンスのため、試料全域に CSL ダイナミクスが誘起されると期待される。FFT アナライザーを用いた周波数スペクトル測定により、試料に設けた電圧端子間に発生する起電力を計測する。

局所的な交流磁場を印加すると起電力が測定された。臨界磁場以上で測定された起電力を基準として差分を取ると、数十 nV の有意な起電力が見出された。また、起電力の大きさがソリトンの数に応じて変化する様子が観測された。これらの結果から差分として検出された起電力はスピン起電力であると推察される。現在、交流磁場の大きさや周波数依存性など系統的な実験を重ねている。また、CSL ダイナミクスの誘起方法を改良したデバイスの作製を進め、スピン起電力の巨大化を狙っている。

参考文献

- [1] S. E. Barnes and S. Maekawa, *Phys. Rev. Lett.* **98**, 246601 (2007).
- [2] L. Berger, *Phys. Rev. B* **33**, 1572 (1986).
- [3] S. A. Yang *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **102**, 067201 (2009).
- [4] M. Hayashi *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **108**, 147202 (2012).
- [5] Y. Togawa *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **108**, 107202 (2012).
- [6] J. Kishine *et al.*, *Phys. Rev. B* **86**, 214426 (2012).

キラル磁性体 CrNb_3S_6 におけるスピン波の伝搬特性

島本雄介¹、十河忠幸¹、Francisco Goncalves¹、戸川欣彦¹

¹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

キラル磁性体 CrNb_3S_6 はキラルな結晶構造を有している。キラル磁性体では、ジャロシンスキー・守谷相互作用と交換相互作用が競合するため、ゼロ磁場下で、スピン配列が片巻きのらせん状にねじれたキラルらせん磁気秩序が出現する。らせん軸に垂直な方向に磁場を印加することで、らせんのねじれを非線形かつ周期的にほどくことができ、キラルソリトン格子 (CSL) を形成する。キラルソリトン格子は試料全体にわたって一様に現れることが確認されている[1]。磁場の大きさが転移磁場を超えると、スピンのすべてが平行に配列した強制強磁性状態となる。このような巨視的なスケールにわたってスピン位相コヒーレンスを持ち、ナノスケールのスピン配列構造を制御できる CrNb_3S_6 においてスピン波の伝搬の特性を調べることは大変興味深い。そこで本研究では、 CrNb_3S_6 結晶のスピン波応答を測定し、その性質や振る舞いを明らかにすることを目的としている。

本研究では、コプラナーウェーブガイド (CPW) を用いたアンテナ配置でスピン波伝搬特性を測定している[2]。CPW の真上に空間的に不均一なマイクロ波を発生させ、スピン波を励起する。スピン波の波数は CPW を流れる電流密度分布から推定される。 $5 \mu\text{m}^{-1}$ 程度の波数を励起できるよう CPW を設計し、電子線リソグラフィ法などを用いてサファイア基板上に作製した。スピン波の伝搬特性は、ベクトルネットワークアナライザを用いて S パラメーター (S_{12} , S_{21} , S_{11} , S_{22}) の周波数スペクトルを計測することにより、評価している。

CrNb_3S_6 結晶および CSL の異方性を配慮して、スピン波の伝搬方向に面内で垂直な方向に磁場を印加した場合と、平行な方向に磁場を印加した場合について測定を行っている。講演では、強制強磁性領域と CSL 領域におけるスピン波スペクトルの振る舞いの違い、印加磁場方向と伝搬方向に関する非相反性について報告する。

参考文献

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

[2] V. Vlaminck, M. Bailleul, Phys. Rev. B **81**, 014425(2010)

一軸性カイラル磁性伝導体に対する数値的研究

東京大学工学系研究科

奥村 駿、加藤 康之、求 幸年

近年、空間反転対称性のないカイラルな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 相互作用といった反対称交換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トポロジーで特徴づけられる磁性や、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。このようなカイラル磁性体の一つとして、一軸性を有する磁性伝導体 CrNb_3S_6 が精力的に研究されている。 CrNb_3S_6 は、ゼロ磁場では低温で螺旋磁性を示すが、磁場を印加することによってその螺旋構造が部分的にほどけ、カイラルソリトン格子と呼ばれる特徴的な磁性を示すことが知られている。このカイラルソリトン格子は磁場の大きさに応じてソリトン数が増えるという性質を持ち、ソリトンが少なくなるにつれて電気抵抗が小さくなる負の磁気抵抗効果が実験的に見出されている[1]。こうしたカイラルソリトン格子の形成に対して、連続体近似[2]や局在スピン模型を用いた理論研究[3,4]はなされているものの、遍歴電子をあらわに取り込んだ理論的な研究は未だ十分には行われていない。

そこで本研究では、カイラルソリトン格子の形成と電気伝導性との関係を微視的に解明する目的で、Dzyaloshinskii-Moriya 相互作用を取り込んだ次元近藤格子モデルに対してモンテカルロ法を適用することにより、局在スピンだけでなく遍歴電子の自由度を取り入れた研究を行った。その結果、ゼロ磁場において、低温で螺旋磁性が発現することを見出した。さらに、磁場を印加することにより、カイラルソリトン格子が形成され、磁場の増加によるソリトン密度の減少に伴って電気伝導度が増大する負の磁気抵抗効果が現れることも見出した。

- [1] For review, see Y. Togawa *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **85**, 112001 (2016).
- [2] J. Kishine and A. S. Ovchinnikov, Solid State Physics Vol.66 (2015).
- [3] Y. Nishikawa and K. Hukushima, Phys. Rev. B **94**, 064428 (2016).
- [4] M. Shinozaki *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **85**, 074710 (2016).

A Chiral Molecule-Based Magnet Behaving Two Magnetic Ground States within One Crystal Structure

Li Li,¹ Sadafumi Nishihara,^{1,2,3} Katsuya Inoue,^{1,2,3} Mohamedally Kurmoo^{3,4}

¹Department of Chemistry, Graduate School of Science; ²Institute for Advanced Materials Research, Hiroshima University & Natural Science Center for Basic Research and Development; ³Center for Chiral Science; Hiroshima University, Japan.

⁴Institut de Chimie de Strasbourg, CNRS-UMR 7177, Université de Strasbourg, France.

Molecular materials crystallizing in chiral space groups have additional possibility of non-linear but chiral organization of moment directions, which have resulted in the direct observation of chiral solitons and skyrmions for some metallic systems.

Here, we report the syntheses, crystal structures and magnetic properties of the unknown optical enantiomers $[\{\text{Mn}^{\text{II}}(\text{D-NH}_2\text{ala})\}_3\{\text{Mn}^{\text{III}}(\text{CN})_6\}]n\text{H}_2\text{O}$ (**D-1**) and $[\{\text{Mn}^{\text{II}}(\text{L-NH}_2\text{ala})\}_3\{\text{Mn}^{\text{III}}(\text{CN})_6\}]n\text{H}_2\text{O}$ (**L-1**)¹ where NH₂ala is aminoalanine and their reported analogue, $[\{\text{Mn}^{\text{II}}(\text{L-NH}_2\text{ala})\}_3\{\text{Cr}^{\text{III}}(\text{CN})_6\}]n\text{H}_2\text{O}$ (**L-2**)² as a reference. In the course of this work, the rare and unique occurrence of two very different magnetic ground states, spin-glass and ferrimagnet, for basically one framework structure has been observed for **1** which is not the case for **2**. An extensive X-ray structure study of numerous crystals reveals a subtle structural change involving the uniaxial distortion of Mn^{III}(CN)₆ and a rotation are responsible. Magnetic properties of several powder samples prepared under different conditions and of single crystals as a function of temperature, field, *ac*-frequency, external pressure and period of dehydration highlight the following: (a) the two MGS are not related to the chirality, (b) there is short-range order ferrimagnetism, (c) the long-range ordering is hypothesized to be associated to the competition of one weak next-neighbor interaction, $J_3(\text{Mn}^{\text{II}}-\text{O}-\text{C}-\text{O}-\text{Mn}^{\text{II}})$, and the asymmetric DM exchange interaction (D) originating from the orbital contribution of the Mn^{III}(CN)₆, and (d) D can be tuned by chemical pressure through dehydration as a function of time and not by isotropic external pressure. The absence of such behavior for the Mn-Cr system is that D remains weak under all manipulations. A clear structure-magnetic properties relationship has been established between the critical transition temperature (T_{Curie} or T_{Blocking}) and the absolute magnetization in 5 Oe below that temperature as a function of the Mn^{II}-N≡C angle.

This work has demonstrated how one subtle structural difference can have large influence on the magnetic properties and also the importance of the asymmetric DM exchange interactions in controlling the magnetic ground state not only between two fixed states but progressively.

References

- [1] L. Li, S. Nishihara, K. Inoue, M. Kumoo, *Inorganic Chemistry*, **2016**, *55*, 3047-3057.
 [2] H. Imai, K. Inoue, K. Kikuchi, Y. Yoshida, M. Ito, T. Sunahara, S. Onaka, *Angew. Chem. Int. Ed.* **2004**, *43*, 5618-5621.

A Dimension-Reversible Cyanide-Bridged Chiral Magnet upon Dehydration/Rehydration and the Associated Magnetism

Li Li,¹ Sadafumi Nishihara,^{1,2,3} Katsuya Inoue,^{1,2,3}

¹ Department of Chemistry, Graduate School of Science; ² Institute for Advanced Materials Research, Hiroshima University & Natural Science Center for Basic Research and Development; ³ Center for Chiral Science; Hiroshima University, Japan.

The association of chiral ligands with achiral connectors is a rational synthetic approach towards the elaboration of chiral magnets which are expected to show fascinating physico-chemical properties, for example, asymmetric magnetic anisotropy and magnetochiral properties.^{1,2}

Using this approach, the chiral molecule-based magnet $[\text{Mn}^{\text{II}}(S\text{-pnH})(\text{H}_2\text{O})][\text{Mn}^{\text{III}}(\text{CN})_6]\cdot\text{H}_2\text{O}$ ($S\text{-pn} = S\text{-1,2-diaminopropane}$), $\mathbf{1}\cdot 2\text{H}_2\text{O}$, has been prepared³. The latest research on this coordination polymer indicates that it is robust enough to transform the single crystal structure upon dehydration as well as rehydration. Meanwhile, the magnetic properties changes reversibly associated with the structural phase transition.

The in-situ X-ray diffraction which performed on one selected single crystal shows the dehydration of $\mathbf{1}\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ happens on heating from 293K to 363K, and then does not change anymore on cooling to 293K under nitrogen atmosphere. Losing the two water molecules, the dehydrated form $[\text{Mn}^{\text{II}}(S\text{-pnH})][\text{Mn}^{\text{III}}(\text{CN})_6]$, $\mathbf{1}$, has generated. Different from the 2D square-network of $\text{Mn}^{\text{II}}\text{-Mn}^{\text{III}}$ with bridging cyanide of $\mathbf{1}\cdot 2\text{H}_2\text{O}$, dehydrated $\mathbf{1}$ has a 3D network with an additional cyanide bridge between layers. And $\mathbf{1}$ can return to hydrated phase $\mathbf{1}\cdot\text{HP}$ under air atmosphere at 293K which has the same structure as $\mathbf{1}\cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Furthermore, all of the hydrated form and dehydrated form crystalize in the same space group, $P2_12_12_1$, and sharing the same crystal axes.

The as-prepared complex $\mathbf{1}\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ exhibits long range ordering at 21K to a ferrimagnet as reported. After dehydrated, the curie temperature was enhanced to 44K, which can be attributed to not only the increased number of the magnetic neighbors through the cyanide groups but also the shorten of the average distance of the cyanide-bridged Mn^{II} and Mn^{III} ions. And rationally, the magnetic properties changes reversibly accompany to the structural changes. Unlike the soft ferrimagnet $[\text{Mn}^{\text{II}}(S\text{-pnH})(\text{H}_2\text{O})][\text{Cr}^{\text{III}}(\text{CN})_6]\cdot\text{H}_2\text{O}$ ², both $\mathbf{1}\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ and $\mathbf{1}$ have relatively large coercive field at 2K of 300Oe. The magnetic hardness must be associated with the magnetic anisotropy of Mn^{III} ion.

Powder X-ray diffraction and IR spectra also suggest the structural phase transition is reversible. This work developed the multifunctions of such kind of molecule-based magnets.

References

- [1] J. Kishine, K. Inoue and Y. Yoshida, *Prog. Theor. Phys.*, **2005**, *159*, 82-95.
- [2] M. Mito, J. Kishine, K. Inoue et al., *Phys. Rev. B.*, **2009**, *79*, 012406.
- [3] W. Kaneko, S. Kitagawa and M. Ohba, *J.A.C.S.*, **2007**, *129*, 248-249.

磁性体にキラリティーを導入したキラル磁性体は、磁気効果と光学効果との組み合わせによる磁気光学効果によって磁気不斉円二色性 (MChD) のような特異な物性を発現する。

中でも、分子磁性体にキラリティーを導入した分子性キラル磁性体は、その光透過性も合わさって、光・磁性・電氣的性質が相関する多重機能性の発現が期待される。

一方で、このようなキラル磁性体は報告例が少なくその物性は未だ不明な点が多い。本研究では、新規分子性キラル磁性体の合成とその物性測定を行い、キラル磁性体特有の物性を

見出すことを目的としている。

ギ酸と遷移金属から成る空間反転対称性の破れた磁性体の合成とその物性測定

(広島大院・理¹, 広島大IAMR², 広島大キラル物性拠点³) ○一楽陽司¹・Maryunina Ksenia^{1,3}・西原禎文^{1,2,3}・井上克也^{1,2,3}

1. 緒言

空間反転対称性の破れた磁性体にはDM(Dzyaloshinskii-Moriya)相互作用によって、キラルらせん磁性やキラルコニカル磁性といった非平行な磁気秩序を生じることが知られている。このような磁性体の中にキラル磁性体がある。キラル磁性体とは、磁気秩序上においてスピン同士を束縛して静止させようとする交換相互作用と構造上のキラリティーから生じるDM相互作用の競合により、スピンのらせんを形成した磁性体を言う。これらの磁性体は様々な電子スピンドバイスへの応用が期待されていることから近年盛んに研究が行われている。

有機-無機ハイブリッド型化合物 $[\text{NH}_4][\text{M}^{\text{II}}(\text{HCOO})_3]$ ($\text{M}=\text{Mn,Co,Ni}$)はギ酸と遷移金属から成る骨格を有し(Metal Organic Frameworks, MOF)、誘電および磁性についてそれぞれ強誘電転移、反強磁性または弱強磁性オーダーを示すことからマルチフェロイクス物質になりうる可能性があるとして研究が行なわれている。また、この他にも多孔性や光学特性などももつことから基礎研究、および新しい素材やデバイスへの応用などの面においても注目を集めている。このように様々な特性をもつが、本研究ではこの化合物のもつキラリティーについて焦点を当てて研究を行なっている。

$[\text{NH}_4][\text{M}^{\text{II}}(\text{HCOO})_3]$ ($\text{M}=\text{Mn,Co,Ni}$)はキラルな空間群 $P6_322$ に属し、 c 軸方向にらせん軸をもつ。このように結晶構造上にキラリティーを有することから、理論的にはキラルソリトンを発現し、その磁気構造はキラルになることが示唆されている^[1]。しかし、磁気構造の解明に繋がる実験的事実は未だに報告されておらず、詳細な磁気構造は知られていない。そこで本研究では、単結晶試料を用いた種々の測定を行なうことで詳細な磁気構造の解明を試みた。

2. 実験

実験は試験管を用いた溶液拡散法によりそれぞれの単結晶を育成した。得られた単結晶は単結晶X線構造解析により構造を決定した。磁気特性はSQUID磁束計でそれぞれの単結晶試料の c 軸に対して平行と垂直な方向から磁場をかけて直流磁化率を測定した。その結果、 $[\text{NH}_4][\text{Mn}(\text{HCOO})_3]$ の単結晶では反強磁性オーダーが、 $[\text{NH}_4][\text{Co}(\text{HCOO})_3]$ と $[\text{NH}_4][\text{Ni}(\text{HCOO})_3]$ の単結晶では弱強磁性オーダーがそれぞれ確認でき、このことから単結晶試料による磁気測定に成功した。この結果をふまえて、キラル磁性に特有な磁気挙動が観測可能な交流磁化率測定を行ない、得られた結果についてキラル磁性の観点から議論する。

3. 参考文献

[1] L.M. Volkova and D.V. Marinin, Institute of Chemistry, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Science, 690022 Vladivostok, Russia (2015).

パラ位にエチル基を導入したフェニルニトロキシドラジカルを用いた自然分晶による分子磁性体の合成

村上 正樹¹, 森田 那月¹, 北尾 大樹¹, 佐藤 翔矢¹,
西原 禎文^{1,2,3}, Kseniya Maryunina^{1,3}, 井上 克也^{1,2,3}

¹広島大院・理, ²広島大 IAMR, ³広島大キラル物性拠点

キラル分子磁性体の特徴は、固体中の常磁性中心金属と、ラジカルの特有の組み合わせによって、キラル、あるいはスピン位相のそろった磁気構造を示すことである。これによって、非対称な磁気異方性や、キラルソリトン構造や、様々な磁気光学効果 (e.g. 非線形磁気光学効果、磁気不斉二色性) をもたらず[1]。分子磁性体にキラリティーを導入する方法は大まかに二通りあり、キラルな配位子を用いることで生成物に直接不斉中心を持たせるという方法と、アキラルな分子同士を反応させ、自己集合させることで、らせん形成や異なる配位形態を形成することにより、キラリティーを持たせるという方法である。後者の現象は一般に自然分晶と呼ばれ、この自然分晶によってキラル化合物を合成する例は非常にまれであり、詳細な仕組みは明らかになっていない。

我々の研究では、分子磁性体の合成に $M^{II}(\text{hfac})_2$ とフェニル基の置換したニトロニトロキシドラジカル(NITPh)を用いている。この NITPh のメタ位、およびメタ位とパラ位にメトキシ基を導入した NITPh と $Mn(\text{hfac})_2$ を反応させることで、 $P6_1$ あるいは $P6_5$ という空間群を有するキラルらせん構造の錯体を形成するということが、近年の我々の研究で明らかとなり、自然分晶によるキラル化合物の合成に成功した数少ない例となった。この結果を受け、当研究室では、NITPh への様々な置換基を導入や、異なる中心金属の導入を試み、新たな錯体の合成をしている。そして、得られた錯体の中心金属の配位環境や配位子の構造が、得られた結晶のキラリティーの有無にどのように関係するのかを考察している。

現在、私は新たに、パラ位にエチル基を置換した NITPh の Mn 錯体と Co 錯体の合成に成功した。そのうち Co 錯体は $P3_2$ のキラルな空間群を有しており、Mn 錯体は $C2/c$ のアキラルな空間群を有していた。これらの詳細な磁氣的性質を示し、さらに、得られた結晶構造のデータと、過去の報告例とを比較し、自然分晶をと化合物の構造との関係性を議論していく。

参考文献

- [1] K. Inoue, Sh. Ohkoshi, H. Imai in *Magnetism: Molecules to Materials*, V, eds: J. S. Miller, M. Drillon, Wiley-VCH: New York (2003) 41. R. Sessoli, M. E. Boulon, A. Caneschi, M. Mannini, L. Poggini, F. Wilhelm, A. Rogalev: *Nature Physics* 11 (2015) 69.

参加者リスト Participants List

氏名	所属	役職
井上克也	広島大学院理学研究科	教授
戸川欣彦	大阪府立大学院工学研究科	准教授
松浦弘泰	東京大学院理学系研究科	助教
Andrey Leonov	広島大学院理学研究科	研究員
高橋浩久	放送大学院	D2
武元佑紗	京都大学院人間環境学研究科・田村研	D2
勝本啓資	大阪大学基礎工学研究科産業科学研究所・小口研	M2
福井阜丈	大阪府立大学院工学研究科・加藤研	D2
十河忠幸	大阪府立大学院工学研究科・戸川研	M2
米村潤一郎	大阪府立大学院工学研究科・戸川研	M2
遠藤健作	大阪府立大学院工学研究科・戸川研	M1
村本陽拓	大阪府立大学院工学研究科・戸川研	M1
青木瑠也	大阪府立大学工学域・戸川研	B4
中山翔太	大阪府立大学工学域・戸川研	B4
島本雄介	大阪府立大学工学域・戸川研	B4
奥村駿	東京大学院工学研究科・求研	M1
李 理	広島大学院理学研究科・井上研	PD
林宏太郎	広島大学院理学研究科・井上研	M1
一楽陽司	広島大学院理学研究科・井上研	M1
村上正樹	広島大学理学部化学科・井上研	B4