

特定課題研究2 キラルスピン物質科学の探索

戸川 欣彦

Exploring Chiral Spin Material Science

Yoshihiko TOGAWA

研究代表者：戸川 欣彦（大阪府立大学・工学研究科）

コアメンバー：岸根順一郎（放送大学・教養学部）

加藤 雄介（東京大学・総合文化研究科）

大江純一郎（東邦大学・理学部）

山本 浩史（分子科学研究所）

佐藤 琢哉（東京工業大学理学院・物理学系）

橋谷田 俊（理化学研究所）

高阪 勇輔（大阪府立大学・工学研究科）

宍戸 寛明（大阪府立大学・工学研究科）

2020年度の研究活動では「CSL非線形ダイナミクス」と「物質キラリティが誘導する量子スピン偏極」の研究テーマを中心に研究を推進した。物質合成（高阪，宍戸，戸川，山本）・物性計測（戸川，宍戸，山本）・光計測（佐藤，橋谷田）・理論（岸根，加藤，大江）と物理／化学／物性理論の専門家が協力し合う研究体制を敷き，キラル物質合成，キラル磁性，分子エレクトロニクス，光学精密計測，凝縮系物理，量子伝導などの分野にまたがって，基盤学理・基礎物性・物質機能・デバイス応用を体系化するキラルスピン物質科学を創出することを目指した。

研究テーマの一つは研究代表者らがこれまで先導してきたキラル磁性研究に関連するものであり，キラルな結晶構造を持つ磁性体に現れるキラルスピンソリトン格子（CSL）が示す非線形ダイナミクスに着眼する。その学理を構築し，超高速スイッチなどのデバイス機能を検証し，従来型電荷・磁気デバイスと異なる原理で動作する超高速・超低消費電力スピndeviceへの道筋を描くことを目指す。もう一つはキラル物質が誘導する量子スピン偏極現象である。研究代表者らがキラル無機結晶においてスピン偏極現象を実証したことにより，この現象はキラル有機分子からキラル無機結晶までの広範なキラル物質が示す普遍的な物質応答であることが明らかになった。研究をより深化させるとともに，従来の磁性の枠を越えてキラル物質において磁性体や磁場を不要とするスピン偏極技術を確立する。これらの研究活動を通じて，物性研究における物質キラリティの意義を中核に据えた「キラル（スピン）物質科学」を創出する。

研究代表者は研究連動のイニシアティブをとった。研究会・研究打合せを企画し，互いの研究進捗を確認すると共に，活発に議論する機会を定期的に設けて，参画するコアメンバー間の共同研究を促進した。

研究会を開催するにあたり特に留意したのは、自由な雰囲気において自然体で討論が進むことである。研究会の実施に加えてvirtualラボの活用などを通じて、博士課程の学生や若手研究者などを含む研究グループ間での交流を促進し、コアメンバー内での共同研究をより活性化させた。一方、計画していた国際共同研究／研究会／学会の開催は、渡航制限や各国での研究活動が制約されたことを受けて、その大半を2021年度以降に順延した。以下に、代表的な活動内容を示す。

【活動内容】

・夏の研究会 virtual (分散型)

第1回：8/20 (木) 13:00–16:00 キラル磁性ダイナミクス

第2回：8/31 (月) 13:00–16:00 キラル物性

第3回：9/3 (木) 13:00–16:00 キラル物性理論・キララル物質合成

第4回：9/7 (月) 13:00–16:00 キラル光物性

昨年1月に開催した研究会以降の研究進捗について議論した。物性ではCSLフォノンの磁気共鳴検出、逆スピンホール効果を用いたCISS応答検出、CISS応答のマクロ磁化測定、理論ではキララルフォノン、物質合成ではキララル無機結晶の合成、光物性ではラマン応答や光増強電場応答などの報告が行われた。コロナ禍で緊急事態宣言が発令したことも一因となり、人の往来が困難となり共同研究が停滞している。その中で共同研究の進め方についてアイデアを交換した。

・オンライン特別講義 (公開型)

日程：第1回 12/3 (木) 13:00～、第2回 12/10 (木) 13:00～、第3回 12/17 (木) 13:00～

オンライン特別講義を企画した。講師に張紀久夫先生をお呼びして「単一階層構造を意識したマイクロ・マクロ電磁応答理論」と題して集中講義を行っていただいた。「単一感受率理論」についてじっくりお話を伺うことができる貴重な機会となった。物質の電磁応答理論に見られる(1) 相対論的QED, (2) 非相対論的QED, (3) 微視的半古典論, (4) 巨視的半古典論の違いは相対論、電磁場の量子化、荷電粒子の量子力学、の扱い方により生じるものであり、明確な近似によって関係づけられた1つの階層構造を形成すべきである。必要最小限の変数とモデルに依らない定式化を用いて、スピンゼーマン項、スピン軌道相互作用などの相対論的補正を含む波動方程式に基づいて(3), (4)が導出される過程とその帰結たる「単一感受率理論」の意味が論じられた。非局所応答理論のマクロ電磁応答への展開について具体的な事例を交えながら非局所応答理論の意義が討論され、非局所応答理論が最近の物性研究における重要キーワードをいくつも包含していることが明確に示された。キララル物質系の理論体系を構築するために威力を発揮すると期待され、非局所応答理論を展開するため討論会を継続していく。

・研究室公開セミナー (オンライン)

動画公開期間：2021/2/26 (金)–2021/3/5 (金)

プログラム

前日より 動画配信開始 (個々に視聴)

13:00–17:00 オンライン会場・個別討論

18:00 討論会

オンライン討論会を開催した。研究グループでの研究進捗を紹介する動画を事前配信し、研究会当日には virtual ラボを活用してオンライン形式で個別討論する形式とした。本年度はコロナ禍対応のため対面式研究会の開催が困難になっている。それも一因となり、博士/修士課程の学生や若手研究者などの交流が阻害されている。学生を含めてごっくばらんに議論する機会となった。研究室を超えた交流を促進することでコアメンバー間での共同研究がより一層に活性化するものと期待している。

・豊田理研オンライン研究会 (2020年度ファイナル)

日程：第1回 3/15 (月) 13:00–18:00, 第2回 3/16 (火) 13:00–19:00,
第3回 3/17 (水) 13:00–20:00

特定課題研究「キラルスピノ物質科学の探索」の2020年度を締めくくるオンライン研究会を行った。キラル物質、キラル光学応答、キラル磁性・キラリティ誘起スピノ選択性 (CISS) を含むキラル物性、理論を題材に、指導学生を含むコアメンバーがそれぞれの研究進捗を発表し、現状の課題及び今後の研究方向性について議論した。

初日には2セッションと自由討論の時間を設けた。光物性では東工大・佐藤グループからキラル物質におけるラマン応答が報告された。続いて、分子研の山本がCISSを用いたスピノトロニクス展開について論じた。

2日目は理論研究を中心に3セッションをアレンジした。放送大の岸根はキラルフォノンに関する進捗を報告した。工学院大の高橋が光渦と2次元電子系の応答について紹介した。続いて、東邦大の大江はメゾスコピック系におけるCISS応答について解説した。東大駒場の加藤は反強磁性キラルらせんに関する研究進捗を紹介した。

最終日のセッションでは、キラル光応答を題材に、理研の橋谷田がアキラル系からの円偏光発生現象やキラルプラズモン場を用いたキラル分子検出に関する研究進展を報告した。キラル物質のセッションでは大阪府大の高阪がキラル結晶合成の進捗について報告した。新規物質、左右結晶の作り分けなどの研究成果を得た。

多岐に及ぶ話題において議論が展開された。本年度の総括となる研究会であり、キラリティを軸に物質合成・物性・光物性・理論について多様な観点から意見交換を行うことができ大変有意義な時間を過ごすことができた。今度も更に活発に研究活動を展開したい。

【研究成果】

本研究活動が貢献している共同研究や研究成果 (論文) として次のものが挙げられる。

キラル物性応答 (物質合成—物性計測—理論)

- H. Shishido, A. Okumura, T. Saimyoji, S. Nakamura, S. Ohara and Y. Togawa, Thin film growth of heavy fermion chiral magnet YbNi_3Al_9 , *Applied Physics Letters*, **118** (2021) 102402/1-5.
- 数理科学 2021年3月号 No.693, 特集/カイラリティとは何か —物質と数理における役割に迫る—, 岸根順一郎, 巻頭言, pp. 5-8; 戸川欣彦, カイラリティとは何か —物質科学の視点から—, pp. 9-15; 山本浩史, [コラム] 化学における「キラリティ」, pp. 66-67.
- J. Kishine, A. S. Ovchinnikov and A. A. Tereshchenko, Chirality-Induced Phonon Dispersion in a Noncentrosymmetric Micropolar Crystal, *Physical Review Letters*, **125** (2020) 245302/1-6.
- Y. Togawa, T. Akashi, H. Kasai, G. W. Paterson, S. McVitie, Y. Kousaka, H. Shinada, J. Kishine and J. Akimitsu, Formations of Narrow Stripes and Vortex-Antivortex Pairs in a Quasi-Two-Dimensional Ferromagnet K_2CuF_4 , *Journal of Physical Society of Japan*, **90** (2021) 014702/1-8, selected as Editors' choice.

- K. Hoshi, J. Kishine and J. Ohe, Coupled-oscillator collective mode of a magnetic chiral soliton lattice, *Physical Review B*, **102** (2020) 134414/1-7.
- Y. Nabei, D. Hirobe, Y. Shimamoto, K. Shiota, A. Inui, Y. Kousaka, Y. Togawa and H. M. Yamamoto, Current-induced bulk magnetization of a chiral crystal CrNb_3S_6 , *Applied Physics Letters*, **117** (2020) 052408/1-5.
- G. W. Paterson, A. A. Tereshchenko, S. Nakayama, Y. Kousaka, J. Kishine, S. McVitie, A. S. Ovchinnikov, I. Proskurin and Y. Togawa, Tensile deformations of the magnetic chiral soliton lattice probed by Lorentz transmission electron microscopy, *Physical Review B*, **101** (2020) 184424/1-12.
- A. Inui, R. Aoki, Y. Nishiue, K. Shiota, Y. Kousaka, H. Shishido, D. Hirobe, M. Suda, J. Ohe, J. Kishine, H. M. Yamamoto and Y. Togawa, Chirality-Induced Spin-Polarized State of a Chiral Crystal CrNb_3S_6 , *Physical Review Letters*, **124** (2020) 166602/1-6.

【今後の予定】

国内での研究会を継続して開催する。2020年度に開催予定であった国際的な研究会はいずれも順延している。MRM-2020での国際シンポジウムはMRM-2021に開催予定であり、物理と化学で共同してchiralityに関するシンポジウムを企画している。また、開催に協力しているTelluride workshopは2021年以降に、Gordon Research Conferenceは2022年度に先送りされた。国際的なオンライン研究会も定期的に企画されており、中核的な研究グループとして関わっていく。