

## 特定課題研究3 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）

高阪 勇輔（大阪府立大学・工学研究科）

橋谷田 俊（理化学研究所）

初年度の研究活動では、次にあげる二つの研究対象を設定して、物理/化学/物性理論の専門家が協力しながら、研究を推進した。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おける研究ターゲットであり、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である。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ndeデバイスへの道筋を描くことを目指している。いま一つは、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普遍的に誘導すると期待される量子スピン偏極現象である。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とを目指している。これらの活動を通して「キラルスピン物質科学」と呼ぶべき研究領域を創出する。

研究代表者は、研究構想の中核として、物質合成（高阪，山本）・物性計測（戸川，山本）・光計測（佐藤，橋谷田）・理論（岸根，加藤，大江）の研究連動のイニシアティブをとった。次の研究会・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、参画メンバー間、また、国際的な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議論が進むことである。そのため、プログラムの時間を明確に区切らずに、質疑・議論を重要視した。これにより柔軟な視点でアイデアを練る機会を得ることができ、新たな共同研究が生まれている。これらの研究活動を基に、大型予算（科研費）の申請を行い、ロードマップを作成した。

## 【活動内容】

- 第1回研究会 (5/8(水)-11(金), 5/8 放送大学東京文京学習センター/茗荷谷, 5/9-5/11 放送大学本部/海浜幕張)  
参加コアメンバー: 山本, 大江, 岸根, 戸川  
テーマ: キラル結晶におけるスピン応答 (理論, 物性計測)  
討論内容: 最新の実験データ, 数値計算データ, 理論モデル構築
- 第2回研究会 (5/18(土), 分子科学研究所/岡崎)  
参加コアメンバー: 山本, 橋谷田, 岸根, 戸川  
テーマ: キラル物質におけるスピン応答 (理論, 物性計測)  
討論内容: 第80回岡崎コンファレンスで入手した最新情報を踏まえた今後の研究展開について.  
なお, 第80回岡崎コンファレンス (5/15-18), 第80回分子科学フォーラム (5/17), トヨタ産業技術記念館へのエクスカージョン (5/18) に合わせて開催した.
- 第3回研究会 (6/12(水), 大阪府立大学/堺)  
参加コアメンバー: 山本, 高阪, 戸川  
参加スタッフ: 廣部 (分子研)  
学生参加者: 乾, 大江, 尾藤, 平尾, 保坂 (大阪府大)  
テーマ: キラル物質におけるスピン応答 (物性計測)  
討論内容: 電気的検出に関する実験データ
- キックオフ会議 (6/19(水)-20(金), ホテルおかだ/箱根湯本)  
参加コアメンバー: 橋谷田, 佐藤, 大江, 加藤, 岸根, 高阪, 戸川  
参加スタッフ: 宍戸 (大阪府大)  
学生参加者: 乾 (大阪府大)  
テーマ: キラル物質におけるスピン応答 (物質合成, 理論, 光計測, 物性計測)  
討論内容: 趣旨説明と運営方針, 初年度計画, 物質合成戦略, 理論体系 (結合振動子系), 光計測 (超高速応答), 光計測 (プラズモン), 物性計測 (スピン応答)
- 第4回研究会 (6/20(木)-21(金), 箱根静雲荘/箱根強羅)  
参加コアメンバー: 大江, 加藤, 岸根, 戸川  
参加スタッフ: 宍戸 (大阪府大)  
学生参加者: 乾 (大阪府大)  
テーマ: キラル物質におけるスピン応答 (理論, 物性計測)  
討論内容: 話題提供 (80<sup>th</sup> Okazaki Conf./結晶学スクール), 理論体系 (磁気相図/キララル反強磁性体), 物性計測 (低次元磁性/Kosterlitz-Thouless (KT) 転移の直接観察)

- ・第5回研究会（7/12(木), Hotel Karelia/ロシア・ペトロザボーツク (RUSSIA Petrozavodsk))

参加コアメンバー：岸根, 高阪, 戸川

国際共同研究者：Alexander Ovchinnikov (ロシア・ウラル連邦大学)  
Javier Campo (スペイン・ザラゴザ大学)

テーマ：キラル物質におけるスピン応答 (物質合成, 理論, 物性計測)

討論内容：理論体系 (キラルソリトン系集団ダイナミクスのモード解析, 磁気相図/低温での磁気渦相安定性), 物性合成戦略, 物性計測 (非相反伝導). なお, 国際ワークショップ DMI 2019 (2019/7/8-7/12) に併せて開催した.
  
- ・第6回研究会 (7/18(木)-9(金), 分子科学研究所/岡崎)

参加コアメンバー：山本, 岸根, 戸川

参加スタッフ：廣部 (分子研), 須田 (分子研)

学生参加者：乾 (大阪府大), 鍋井 (総研大)

テーマ：キラル物質におけるスピン応答 (物性計測)

討論内容：物性計測 (電気的検出), 研究会計画 (12月分)
  
- ・第7回研究会 (8/1(木)-2(金), 理化学研究所/和光)

参加コアメンバー：橋谷田, 佐藤, 戸川

テーマ：キラル物質におけるスピン応答 (光計測)

討論内容：キラル結合系における電磁キラリティ転送, キラル磁性-キラルプラズモン結合系の光磁気応答
  
- ・第8回研究会 (10/5(土)-7(月), 国民宿舎箱根太陽山荘/箱根)

招待講演者：張紀久夫 先生, 石橋善弘 先生

参加コアメンバー：岸根, 山本, 橋谷田, 佐藤, 大江, 加藤, 高阪, 戸川

参加スタッフ：宍戸 (大阪府大)

学生参加者：松本慧大 (東工大博士課程), 島本雄介 (府大博士課程), 乾 皓人 (府大修士課程), 鈴木裕太 (東大修士課程)

テーマ：キラル物質におけるスピン応答 (物質合成, 理論, 光計測, 物性計測)

討論内容：研究進捗と議論※

  - ◎物性計測 (スピン応答の概論と検出, 集団ダイナミクス/共鳴・伝搬・非相反)
  - ◎物質戦略 (キラル磁性系候補物質, 膜合成, ナノ粒子, 吸着・共鳴現象)
  - ◎招待講演1 (強誘電体のドメインウォールの活性化エネルギー)
  - ◎招待講演2 (非局所応答理論 — 一般的背景, 微視的+巨視的応答の形 —)
  - ◎キラル光学応答 (超高速分光によるスピンドイナミクス, キラルプラズモン場)
  - ◎理論体系 (キラル磁性系の磁気相図, 相安定性, 表面バリア, キラル反強系, キラル磁性系集団運動モード)
  - ◎戦略会議 (予算申請計画, 国際共同研究など)

- 第9回研究会 (11/7(木)-8(金), ダイワロイネットホテル姫路/姫路)
  - 招待講演者: Malcolm Kadodwala 教授 (英国・グラスゴー大学)
  - 参加コアメンバー: 橋谷田, 戸川
  - 学生参加者: 吉武侑弥 (府大修士課程)
  - テーマ: キラル物質におけるスピン応答 (光計測)
  - 討論内容: 研究進捗と議論
    - ◎キラル光学応答 (キラル磁気プラズモン, 電磁キラリティ転送, 増強場変調)
    - ◎物性計測 (吸着・共鳴現象)
    - ◎招待講演 (プラズモン増強キラル分光とバイオセンシングとその応用)
  
- 第10回研究会 (11/14(木)-15(金), 11/14 御影公会堂/東灘区, 11/15 ホテルプラザ神戸/六甲アイランド)
  - 招待講演者: 張紀久夫 先生, 石橋善弘 先生
  - 参加コアメンバー: 岸根, 山本, 佐藤, 橋谷田, 高阪, 戸川
  - 学生参加者: 島本雄介 (大阪府大博士課程)
  - テーマ: キラル物質におけるスピン応答 (理論, 光計測, 物性計測)
  - 討論内容: ◎招待講演 (非局所応答理論 —マクロな電磁応答, キラル応答の諸様相—)
    - ◎理論 (物質中の Optical Chirality/Zilch, キラル物質系への非局所応答理論の展開)
    - ◎キラル光学応答 (超高速分光を用いたスピン波イメージング, プラズモン応答)
    - ◎物性計測 (研究進展とイスラエル訪問記)
    - ◎戦略会議 (予算申請計画, 国際共同研究など)
  
- 第11回研究会 (11/24(日)-27(水), 11/24-26 別所温泉中松屋, 11/26-27 ホテルルートインGrand上田駅前/信州上田)
  - 参加コアメンバー: 岸根, 加藤, 大江, 橋谷田, 高阪, 戸川
  - コア外メンバー: 宍戸 (大阪府大スタッフ)
  - テーマ: キラル物質におけるスピン応答
  - 討論内容: ◎Qua Vadis (ロードマップ) の作成/現状の課題及び今後の研究方向性
    - ◎Qua Vadis/キラル物質 キラル無機結晶のキラリティ制御, 無機系不斉合成の意義
    - ◎Qua Vadis/キラル物性 キラル磁性系の熱力学/ダイナミクス, キラル結合系における電磁キラリティ転送, 応用展開
    - ◎Qua Vadis/理論 キラル磁性系の熱力学/ダイナミクス, 結合振動子系のダイナミクス, 孤立ソリトン滑走, 量子キラル磁性系, 物質中の電磁キラリティ, 非局所電磁応答

- ・ 第12回研究会 (12/10(火)-16(月), 12/10-11 大阪セッション 大阪府立大/堺, 12/12-13 横浜セッション ホテルエディット横濱/桜木町, 12/14-15 東京セッション 放送大学文京センター/茗荷谷)

招待講演者: Yossi Paltiel 教授 (イスラエル・ヘブライ大学)

参加コアメンバー: 大阪セッション 高阪, 戸川

横浜セッション 山本, 岸根, 戸川, 佐藤, 加藤

東京セッション 山本, 岸根, 戸川, 佐藤, 橋谷田, 加藤, 大江

コア外メンバー: 大阪セッション 宍戸 (大阪府大スタッフ)

大阪セッション 島本, 吉武, 奥村, 尾藤, 平尾 (大阪府大)

テーマ: キラル物質におけるスピン応答

討論内容: 招待講演, 超伝導ハイブリッド系

- ・ 第13回研究会 (1/17(金)-21(火), 1/17-18 ホテルルートインGrand上田駅前/信州上田, 1/18-21 別所温泉中松屋)

招待講演者: Alexander Ovchinnikov 教授 (ロシア・ウラル連邦大学)

参加コアメンバー: 岸根, 加藤, 大江, 佐藤, 橋谷田, 戸川

コア外メンバー: 宍戸 (大阪府大スタッフ)

高橋浩久 (放送大博士課程), 松本慧大 (東工大博士課程), 島本雄介 (府大博士課程), 鍋井庸次 (総研大修士課程), 乾皓人 (府大修士課程), 鈴木裕太 (東大修士課程)

テーマ: キラル物質におけるスピン応答

討論内容: 初年度の研究活動の総括, 現状の課題, 及び, 今後の研究方向性

## 【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.

CSL非線形ダイナミクス (物質合成-物性計測-理論)

G. W. Paterson, *et al.*, Order and Disorder in the Magnetization of the Chiral Crystal  $\text{CrNb}_3\text{S}_6$ , *Physical Review B*, **99** (2019) 224429/1-11, selected as an Editors' Suggestion.

J. Kishine, *et al.*, Theory of standing spin waves in finite-size chiral soliton lattice, *Physical Review B*, **100** (2019) 024411/1-16.

Y. Shimamoto, *et al.*, Switching behavior of the magnetic resonance in a monoaxial chiral magnetic crystal  $\text{CrNb}_3\text{S}_6$ , *Applied Physics Letters*, **115** (2019) 242401/1-4, selected as a Featured Article.

F. J. T. Goncalves, *et al.*, Field driven recovery of the collective spin dynamics of the chiral soliton lattice, *Applied Physics Letters*, **116** (2020) 012403/1-5, selected as an Editor's Pick.

キラルプラズモン応答 (物性計測-光計測)

C. Gilroy, *et al.*, Roles of superchirality and interference in chiral plasmonic biodetection, *Journal of Physical Chemistry C*, **123** (2019) 15195-15203.

**【今後の予定】**

これまでの研究活動を踏まえ、今後も「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」を研究テーマに据えて研究に取り組む。そのため、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）の研究体制を組み、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，量子伝導を専門とする研究者が協同して，研究を推進する。また，各研究室の博士課程の学生や若手研究者などの交流を促進し，参画コアメンバー間での，また，国際的な共同研究をより活性化させる。これにより，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す。

研究会は「非線形格子力学系とキラル磁性の融合」，「キラルプラズモン場とキラル磁性の結合系」，「キラル磁性のスピン系デバイス応用への展望」，「キラル物質の創製と機能：左右産み分けを目指して」，「キラル物質の磁気光学応答」，「キラルスピン物質科学への道」などをテーマとして開催する。1年目の活動を通して，互いの研究進捗を確認し自由に意見交換を行う機会を積極的に設けることが，研究を促進する上で極めて有効であることがわかった。2年目の研究活動に於いても研究会を積極的に開催する。また，自由な雰囲気において自然体で討論が進むことも重要である。研究会のスタイルは2019年度と同様とし，できる限り時間にゆとりを持たしたプログラム構成とする。国際的な共同研究を促進するために海外学会に参加する機会も積極的に活用する。