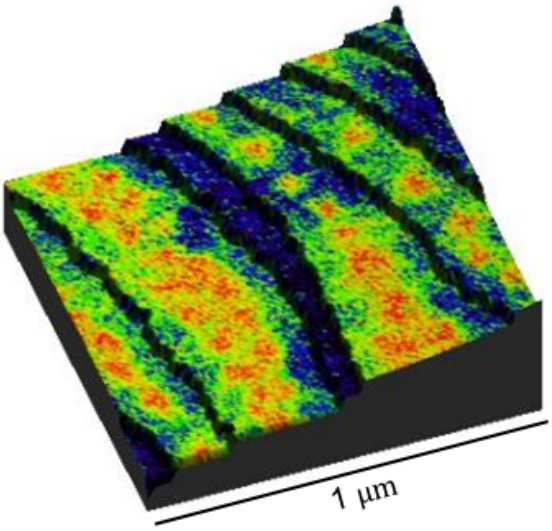
物性研だより

BUSSEIKEN DAYORI

第61巻
第2号
2021年度

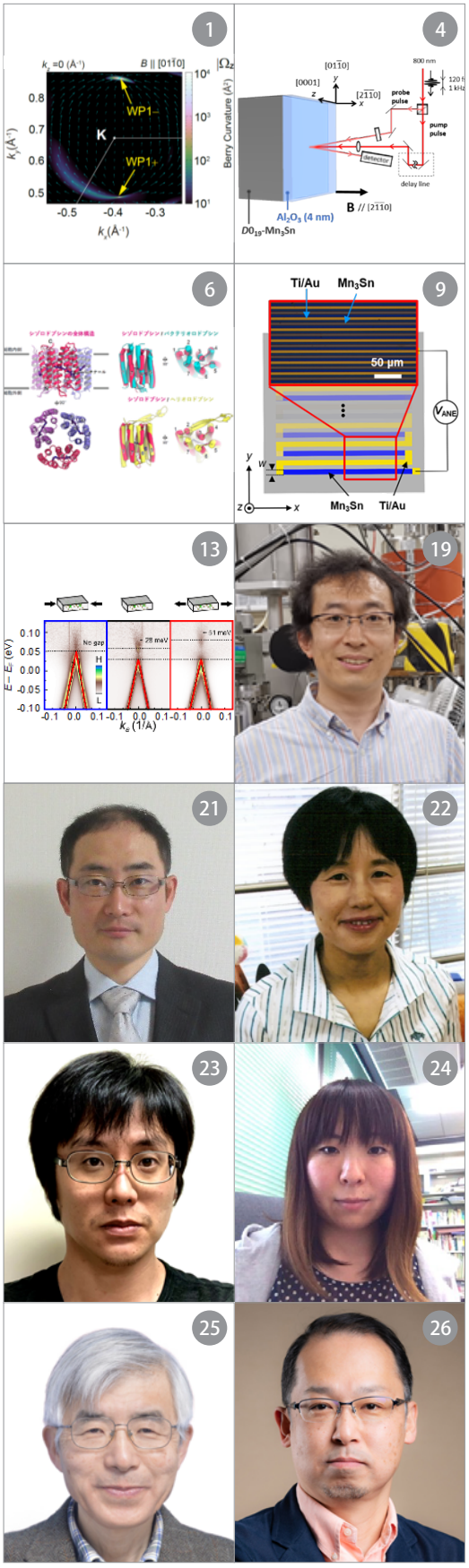
- 反強磁性体におけるワイル準粒子の発見と応用
- トポロジカル反強磁性金属Mn_3Snの巨大有効ダンピング
- アスガルドアーキアの持つ、光エネルギーを使って水素イオンを取込むタンパク質の構造を解明
- 不揮発性メモリや熱流センサー開発に繋がる反強磁性体の普遍的機能性の実証
- $ZrTe_5$における弱いトポロジカル絶縁体状態の観測と制御



東京大学 物性研究所
THE INSTITUTE FOR SOLID STATE PHYSICS
THE UNIVERSITY OF TOKYO
Copyright ©2021 Institute for Solid State Physics, The University of Tokyo. All rights Reserved.
ISSN 0385-9843

第 61 巻
第 2 号
2021年度

contents



1 反強磁性体におけるワイル準粒子の発見と応用 冨田 崇弘、見波 将、中辻 知

4 トポロジカル反強磁性金属 Mn_3Sn の巨大有効ダンピング
三輪 真嗣、飯浜 賢志、野本 拓也、冨田 崇弘、肥後 友也、Ikhlas Muhammad、坂本 祥哉、大谷 義近、有田 亮太郎、水上 成美、中辻 知

6 アスガルドアーキアの持つ、光エネルギーを使って水素イオンを取込むタンパク質の構造を解明 井上 圭一

9 不揮発性メモリや熱流センサー開発に繋がる反強磁性体の普遍的機能性の実証
肥後 友也、中辻 知

13 $ZrTe_5$ における弱いトポロジカル絶縁体状態の観測と制御 Peng Zhang、近藤 猛

15 日本物理学会学生優秀発表賞を受賞して 佐藤 優大

17 理学系研究科研究奨励賞を受賞して 田中 宏明

18 第 15 回日本物理学会若手奨励賞を受賞して 多田 靖啓

19 外国人客員所員を経験して Shaoqiang Chen

21 客員所員を経験して 本山 岳
22 樋山 みやび
23 井原 慶彦
24 高山 あかり
25 田中 秀数
26 今中 康貴

【ISSP ワークショップ】
28 ○「物性科学におけるデータ科学の今と未来」
31 ○The International Workshop on Quantum Magnets in Extreme Conditions
37 【物性研究所談話会】
38 【物性研究所セミナー】
【物性研ニュース】
48 ○人事異動
51 ○令和２年度外部資金の受入について
編集後記
物性研だよりの購読について

反強磁性体におけるワイル準粒子の発見と応用

[1] 東京大学物性研究所・量子物質研究グループ
[2] 東京大学・大学院理学系研究科
冨田 崇弘 [1]、見波 将 [2]、中辻 知 [1,2]

1．はじめに

近年、固体物理において電子状態のトポロジカルな性質に起因する新現象が脚光を浴びている。中でも我々のグループが進めているカイラル反強磁性体 Mn_3X は、自発的に時間反転対称性を破った共面磁気構造を持つトポロジカル磁性物質である。Mn_3Sn にて巨大な異常ホール効果と巨大なネルンスト効果が発見されて以降[1-3]、理論計算と光電子分光実験からトポロジカルな準粒子であるワイル粒子がカイラル異常とともに確認され [4]、その後巨大な熱ホール効果 [5]、巨大な磁気光学カー効果 [6]、磁気スピンホール効果・逆スピンホール効果 [7]、電流誘起磁気ドメイン反転の実験 [8] など数々のトポロジカルな性質に由来する新現象が見つかっている。中でも、異常ネルンスト効果と呼ばれる非従来型の横熱電変換効果の観測により、ネルンスト型の熱電材料探索の潮流の礎を築いただけでなく [9-11]、室温での次世代環境発電モジュールとしても注目を集めている。また、スピントロニクス材料としても注目されており、ゼロ磁場での巨大異常ホール効果を利用した次世代メモリ材料の開発が展開されている。ワイル半金属状態を有する反強磁性体 Mn_3Sn に多くの重要な発見が相次いでいるが、未だにワイル準粒子の固体中での振る舞いは未解明な部分が多い。姉妹物質である Mn_3Ge においても同様なワイル準粒子に由来する挙動が見られており、それらの最近の研究成果を本稿にて紹介する [12]。

2．実験結果

ワイル半金属状態は、スピン軌道相互作用に加え空間反転対称性もしくは時間反転対称性が破れた系で実現する。従来の空間反転対称性を破れた系ではゼロ磁場の異常ホール効果は現れないが、自発磁化をもつ磁性体では、時間反転対称性を破り、ゼロ磁場において異常ホール効果が発現する。巨大なゼロ磁場の異常ホール効果が見つかれば、巨大な応答をドメイン反転だけで制御が可能となり新規なメモリ材料の候補として利用ができる。このコンセプトのもと我々は 2015 年に世界に先駆けて反強磁性体 Mn_3Sn において、ゼロ磁場での巨大な異常ホール効果を室温で発見 [1]、2016 年には姉妹物質である Mn_3Ge（図 1a）において同現象をゼロ磁場で発見した [2]。本研究では、低温までのゼロ磁場の異常ホール効果に加え、ゼロ磁場の異常ネ

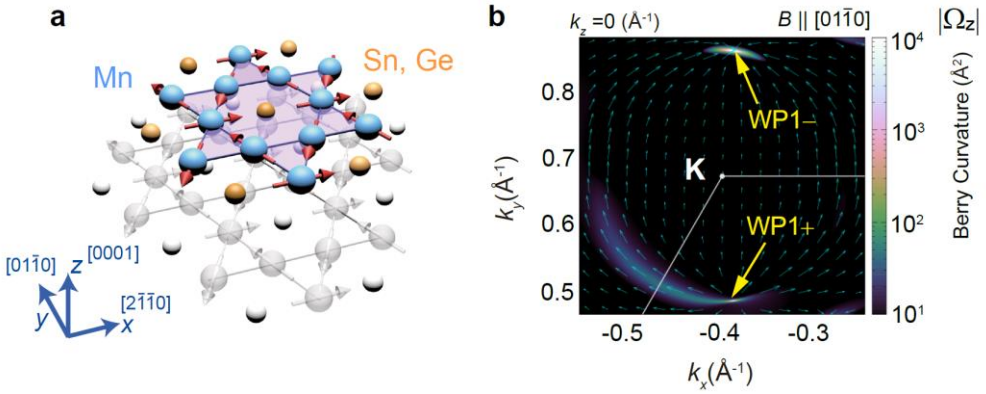


図 1: 反強磁性体 Mn_3X (X = Sn, Ge)の磁気構造とのワイル準粒子生成の概念図。**(a)** 反強磁性体 Mn_3Ge の実空間での結晶構造と磁場中での磁気構造。z = 0 面と z = 1/2 面の二層を持つカゴメ格子構造と呼ばれる三角形ベースの結晶構造。磁場 B ||[2$\bar{1}\bar{1}$0]にかけた場合の逆スピン三角構造と呼ばれる Mn スピンの磁気構造の様子 [13]。 **(b)** K 点の周囲に形成されていたリング状のノーダルラインは、スピン軌道相互作用を考慮することによりギャップが生じワイル点を形成する。このワイル点は Mn の磁気構造に対応した正負のペア（WP1＋と WP1−）で現れ、運動量空間内に正負のワイル点を持つワイル半金属状態が生成される。図は Mn_3Ge の $E - E_F$ = 36 meV でのベリー曲率 Ω_z の等高線プロット。矢印はベリー曲率の面内成分 (Ω_x, Ω_y)。

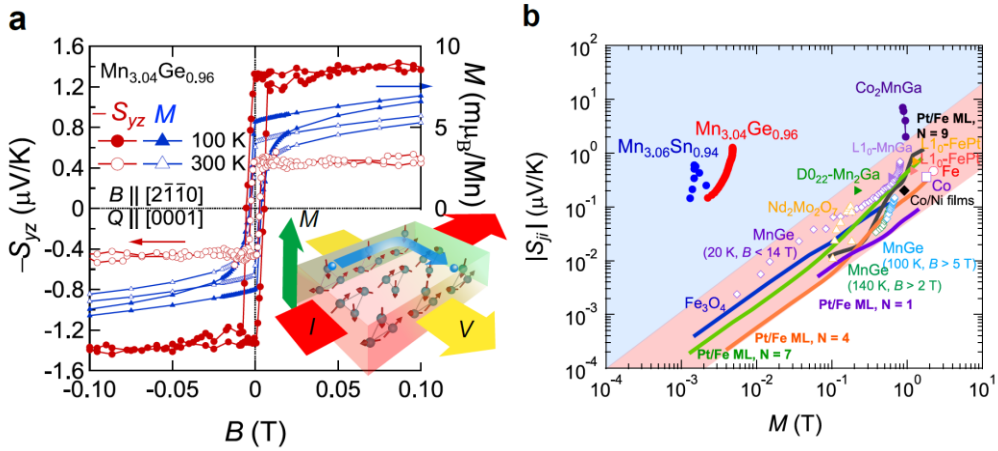


図 2: (a) Mn_3Ge における異常ネルンスト係数と磁化の温度依存性。ゼロ磁場の異常ネルンスト効果は磁化反転にともない符号も変化する。挿入図は、Mn_3Ge の電流 I とホール電圧 V ならびに磁化 M の方向を示す。**(b)** 様々な異常ネルンスト効果を持つ物質の磁化依存性。磁性体のワイル半金属は青いエリアで現れ、従来の金属磁性体(赤いベルト)より巨大な異常ネルンスト効果を示す [12]。

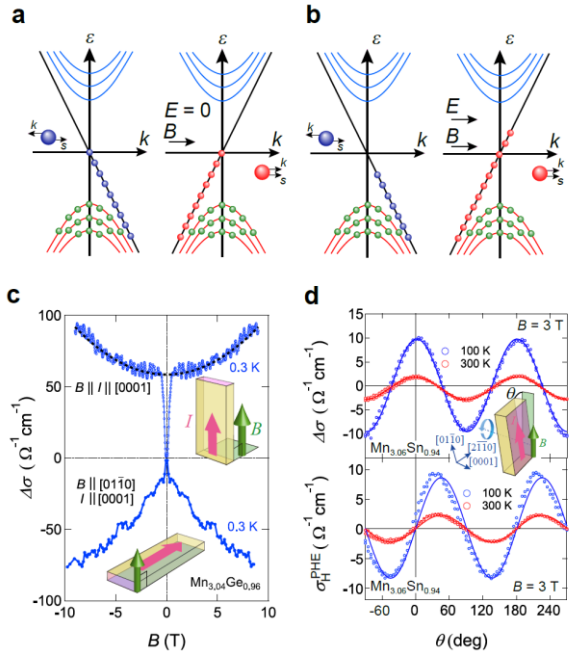


図 3: (a, b) 異なるカイラリティを持つ正負のワイルノードに磁場をかけると、量子化されたランダウレベルに分裂する(図 a)。更に電流 I(電場)を磁場 B と平行に加えた際、正負のワイルノード間でチャージポンピングが起こり、磁場の増加にともなう電気抵抗の減少が見られる。これはカイラル異常と呼ばれる現象で、ワイル準粒子による効果である。**(c)** 反強磁性体 Mn_3Ge の電気伝導率の磁場変化。磁場 B が電流 I と垂直の場合には、正の磁気抵抗(負の伝導率)を示すのに対して、電流と電圧が平行の際に負の磁気抵抗(正の伝導率)が現れる。**(d)** ホール伝導度とプラナーホール効果の角度依存性がそれぞれ余弦波と正弦波となるため、カイラル異常の効果を裏付ける [12]。

ルンスト効果（図 2a, b）を測定した結果、反強磁性体の中で最大値となる 1.3 μV/K を示すことを発見した [12]。これは、第一原理計算からワイル準粒子を考慮した内因性機構にともなう異常ホール効果と異常ネルンスト効果から期待される値と一致しており、物質のバンド構造に由来する内因性起源を示唆している。内因性機構では、運動量空間の仮想磁場、すなわちベリー曲率により異常ホール伝導率が定義される。実際に理論計算では仮想磁場の起源である正負のワイル準粒子と呼ばれるモノポールが 10^4 (A^2) オーダーの巨大なベリー曲率を示し、フェルミ面近傍に現れている（図 1b)。従来の強磁性体材料では、異常ホール効果や異常ネルンスト効果が磁化に比例して現れることが経験則として知られているが、磁化がほぼない反強磁性体において従来の強磁性体金属と同程度のサイズの効果が発現することを確認した。このような磁化のスケーリングから逸脱した振る舞いは、反強磁性体 Mn_3X におけるワイル半金属状態に起因していると考えられる（図 2b)。

ワイル準粒子が生じる際にカイラル異常と呼ばれる「電流と磁場を平行にかけた際に現れる負の磁気抵抗効果」と「ホール信号が磁場と同一面内に現れる大きなプラナーホール効果」が現れる。本研究でも Mn_3Ge のカイラル異常が低温 300 mK で観測され、磁性体でのワイル準粒子の存在を確認できた（図 3a–d)。プラナーホール効果は、通常金属や強磁性体を持つ物質でも殆ど現れない。近年 $ZrTe_5$、Cd_3As_2、GdPtBi、WTe_2 などの 3 次元ディラック半金属で観測されており [14]、小さな磁化をもつ反強磁性体 Mn_3Ge で見られたことはワイル半金属のトポロジカ

ル効果と考えられる。Mn_3Ge は Mn_3Sn と異なりサブミリKの低温でも磁気秩序が生じないため非弾性散乱の効果と電子の熱励起による効果を排除したワイル半金属での電子状態を明らかにできる優位性があり今後更なる研究が必要である。

３．まとめと今後の展望と応用

反強磁性体 Mn_3X (X = Sn, Ge) において巨大な異常ホール効果とならびに巨大な異常ネルンスト効果を観測した。理論との統一的な理解により、これらの現象が本物質の磁性ワイル準粒子をともなうトポロジカルな性質に由来したものであることを明らかにした。これらのゼロ磁場での量子輸送現象は熱電技術だけでなくメモリ応用技術等にも期待される。異常ホール効果は電流と垂直に得られる起電力応答のため素子構造の単純化が可能であること、反強磁性体の特有な効果として強磁性体で問題となる漏れ磁場による素子間の干渉効果も問題とならないため高集積化が可能となる優位性がある。また反強磁性体は強磁性体よりも 3 桁以上の速い動作性能を示すため高速化も期待できる。今後、消費電力を抑えた巨大なデータ蓄積ならびに高速動作が可能な反強磁性不揮発性メモリ材料として期待できる。

４．謝辞

本研究では、共同研究者である東京大学大学院新領域創成科学研究科大学院生 Muhammad Ikhlas 氏には実験面から多くのサポートを頂きました。また、東京大学大学院理学系研究科・特任研究員の Taishi Chen 氏ならびに Mingxuan Fu 氏、東北大学理学研究科の是常 隆 氏、金沢大学ナノマテリアル研究所の石井史之 氏、東京大学大学院工学系研究科の有田亮太郎 氏には研究当初からさまざまな助言を頂きました。ここに深く感謝申しあげます。

参考文献

[1] S. Nakatsuji, N. Kiyohara, and T. Higo, Nature **527**, 212–215 (2015).

[2] N. Kiyohara, T. Tomita, and S. Nakatsuji, Phys. Rev. Applied **5**, 064009/1–10 (2016).

[3] M. Ikhlas, T. Tomita, T. Koretsune, M.–T. Suzuki, D. Nishio–Hamane, R. Arita, Y. Otani, and S. Nakatsuji, Nature Phys. **13**, 1085–1090 (2017).

[4] K. Kuroda, T. Tomita, M. –T. Suzuki, C. Bareille, A. A. Nugroho, P. Goswami, M. Ochi, M. Ikhlas, M. Nakayama, S. Akebi, R. Noguchi, R. Ishii, N. Inami, K. Ono, H. Kumigashira, A. Varykhalov, T. Muro, T. Koretsune, R. Arita, S. Shin, T. Kondo and S. Nakatsuji (2021), Nature Mater. **16**, 1090–1095 (2017).

[5] K. Sugii, Y. Imai, M. Shimozawa, M. Ikhlas, N. Kiyohara, T. Tomita, M.–T Suzuki, T. Koretsune, R. Arita, S. Nakatsuji, M. Yamashita, **arXiv**:**1902.06601.**

[6] T. Higo, H. Man, D. B. Gopman, L. Wu, T. Koretsune, O. M. J. van ’t Erve, Y. P. Kabanov, D Rees, Y. Li, M.–T. Suzuki, S. Patankar, M. Ikhlas, C. L. Chien, R. Arita, R. D. Shull, J. Orenstein, and S. Nakatsuji, Nature photonics **12**, 73–78 (2018).

[7] M. Kimata, H. Chen, K. Kondou, S. Sugimoto, P. K. Muduli, M. Ikhlas, Y. Omori, T. Tomita, Allan. H. MacDonald, S. Nakatsuji & Y. Otani, Nature **565**, 627–630 (2019).

[8] S. Sugimoto, Y. Nakatani, Y. Yamane, M. Ikhlas, K. Kondou, M. Kimata, T. Tomita, S. Nakatsuji, Y. Otani, Commun. Phys. **3**, 111 (2020).

[9] T. Tomita, M. Ikhlas and S. Nakatsuji, Journal Phys. Soc Conf. Proc. **30,** 011009/1–5 (2020).

[10] 冨田崇弘，肥後友也，中辻 知，固体物理トピックス Vol. **54**, P85–99 (2019). アグネ技術センター.

[11] 冨田崇弘，日本磁気学会・第 217 回研究会資料，P23–28 (2018).

[12] T. Chen, T. Tomita, S. Minami, M. Fu, T. Koretsune, M. Kitatani, I. Muhammad, D. Nishio–Hamane, R. Ishii, F. Ishii, R. Arita, and S. Nakatsuji, Nat. Commun. **12**, 572 (2021).

[13] Y. Chen, J. Gaudet, S. Dasgupta, G. G. Marcus, J. Lin, T. Chen, T. Tomita, M. Ikhlas, Y. Zhao, W. C. Chen, M. B. Stone, O. Tchernyshyov, S. Nakatsuji, and C. Broholm, Phys. Rev. B **102**, 054403/1–15 (2020).

[14] J. Hu, S.–Y. Xu, N. Ni, and Z. Mao, Annual Review of Materials Research **49**, 207 (2019).

トポロジカル反強磁性金属 Mn_3Sn の巨大有効ダンピング

[1] 東京大学物性研究所、[2] トランススケール量子科学国際連携研究機構、[3] 東北大学学際科学フロンティア研究所、[4] 東北大学材料科学高等研究所、[5] 東京大学大学院工学系研究科、[6] 東京大学大学院理学系研究科、[7] 理化学研究所創発物性科学研究センター
三輪真嗣[1,2]、飯浜賢志[3,4]、野本拓也[5]、冨田崇弘[1]、肥後友也[1,6]、Ikhlas Muhammad[1]、坂本祥哉[1]、大谷義近[1,2,7]、有田亮太郎[6,7]、水上成美[4]、中辻知[1,2,6]

スピンダイナミクス、すなわちスピンが歳差運動する様子を理解することはスピントロニクスデバイスの研究において最も重要な課題のひとつである。従来のスピントロニクスデバイスでは強磁性体が用いられてきたが、反強磁性体では交換相互作用がスピンダイナミクスにあらわに影響するため THz 帯域の超高速動作を行える可能性がある。従って反強磁性スピントロニクスデバイスの研究が盛んになっているが、この反強磁性スピントロニクスデバイスにおいてもスピンダイナミクスの制御及び観測が必須となる。しかし、反強磁性体におけるスピンダイナミクスの観測、特に時間軸での観測は反強磁性の絶縁体に限られていた。

最近、カイラル反強磁性金属である Mn_3X が異常ホール効果をはじめとした強磁性金属同等の磁気応答を示すことから注目を集めている。この磁気応答はカイラル反強磁性金属の隠れた強的秩序と対応しており、この強的秩序の偏極方向に対応して運動量空間におけるワイル点近傍の大きなベリー曲率は符号を変える。カイラル反強磁性金属の強的秩序は拡張磁気八極子偏極と呼ばれ、反強磁性スピントロニクスデバイスのさらなる発展にはこの拡張磁気八極子偏極のダイナミクスを明らかにする必要がある。そこで本研究ではカイラル反強磁性体 Mn_3Sn を用いて、時間分解磁気光学カー効果(Time-resolved magneto-optical Kerr effect: TR-MOKE)による拡張磁気八極子偏極の実時間観測を試みた。

本研究ではバルク単結晶の $D0_{19}$-Mn_3Sn を用いた。Mn_3Sn は六方晶 Ni_3Sn 型の結晶構造であり、[0001]方向に *ABAB* のように積層された Mn 原子で構成される 2 種類のカゴメ面から構成される。図 1 の赤丸は A 面、青丸は B 面上の Mn 原子をそれぞれ表している。Mn 原子のスピン方向を時計回りの順で見たとき、それぞれの Mn 原子のスピン方向はマイナス 120 度ずつ回転する。Mn_3Sn ではこのようなスピン構造が交換相互作用及び Dzyaloshinskii-Moriya 相互作用により安定である[1,2]。そしてこのスピン構造が拡張磁気八極子という強的秩序を有する[3]。例えば図 1 の縦線を鏡とすると、この Mn スピン集団は強磁性体の磁化と同じ鏡映対称性を示す。

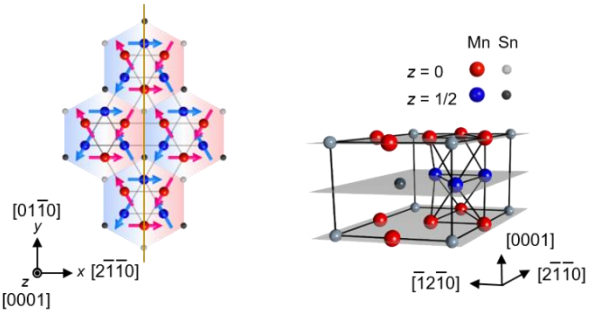


図 1：トポロジカル反強磁性金属 Mn_3Sn の結晶及びスピン構造

図 2(a)は TR-MOKE 測定の概略図である。Mn_3Sn の(2-1-10)面に対して垂直に磁場を 2 T 印加し、同方向から直線偏光のパルスレーザーを用いて励起パルス光と測定パルス光によるストロボスコープ法による測定を行った。図 2(b)が結果の一部である。まず励起パルス光は測定パルス光による MOKE 強度を減少させる。これは強磁性金属で観測される超高速減磁と同様の現象である[4]。その後、MOKE 強度は 0.3 ps あたりから回復し、回復の途中で小さいながら明瞭な振動を示す。この振動成分を解析するために黒曲線のバックグラウンド信号を引いたものが図 1(b)の下のパネルのデータである。図 1(c)は TR-MOKE の結果を長い時間軸で測定したものである。図 1(b)及び 1(c)の下のパネルからは振動の周波数(ω_I, ω_{II})が決定でき、それぞれ $\omega_I = 0.86$ THz と $\omega_{II} = 18$ GHz であった。この振動は外部磁場を Mn_3Sn 表面に対して垂直に印加した時に最も顕著に観測された。TR-MOKE 信号は表面に垂直な拡張磁気八極子の偏極成分に比例するため、TR-MOKE 信号における振動成分は八極子秩序の大きさが振動することを意味する。

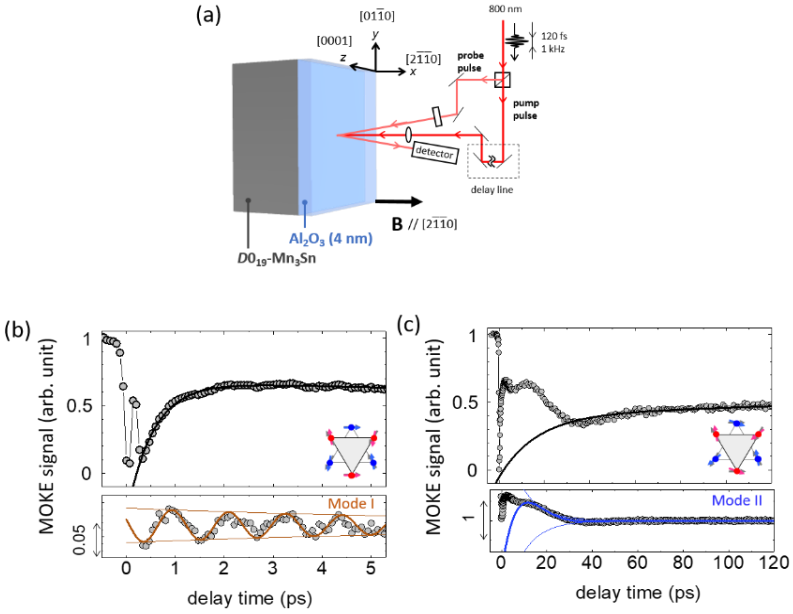


図 2：(a) 測定概略図、(b) (c) 測定結果

図 1(b)及び 1(c)から決定される 2 つの振動(mode I 及び mode II)は拡張磁気八極子のダイナミクスに由来する。具体的には mode I は光学振動モード、mode II は強磁性体の一斉歳差運動と似たモードである。図 1(c)を解析すると Mn_3Sn の拡張磁気八極子のダイナミクスは交換相互作用があらわに作用することで有効ダンピング（スピンの歳差運動における摩擦）が極めて大きく 1 程度となることがわかる。結果として Mn_3Sn の拡張磁気八極子偏極が向きを変えるのに必要な時間は 10 ps 以下、すなわち 10 ps 以下でスピン構造を反転できることがわかった。これは強磁性体の磁化と比べて約 100 倍速いスピン反転が可能であることを強く示唆する結果である。そして、今回の実験結果から得た物性値を考慮した理論計算からは拡張磁気八極子のドメイン壁の速度が 10 km/s を超えることがわかった。これは運動量補償温度近傍のフェリ磁性体のドメイン壁速度(~2 km/s)[5]よりも速い値である。なお、本研究は反強磁性金属におけるスピン歳差運動に由来する振動を時間軸で初めて検出した例である[6]。

[1] S. Nakatsuji *et al.*, Nature **527**, 212 (2015).
[2] S. Tomiyoshi and Y. Yamaguchi, J. Phys. Soc. Jpn. **51**, 2478 (1982).
[3] M.-T. Suzuki *et al.*, Phys. Rev. B **95**, 094406 (2017).
[4] E. Beauprepaire *et al.*, Phys. Rev. Lett. **76**, 4250 (1996).
[5] K.-J. Kim *et al.*, Nat. Mater. **16**, 1187 (2017).
[6] S. Miwa *et al.*, Small Sci. **1**, 2000062 (2021).

アスガルドアーキアの持つ、光エネルギーを使って水素イオンを取込むタンパク質の構造を解明

機能物性研究グループ　　井上 圭一

研究の背景

私たちヒトを含む動物や植物などは、細胞の中に遺伝情報をコードした DNA を包む核を持ち、真核生物と呼ばれる。一方で、大腸菌などの細菌やアーキアは細胞内に核を持たず、原核生物と呼ばれている。その中で、近年アスガルドアーキアと呼ばれるグループの原核生物が、ゲノム配列の比較から真核生物に最も近い種であることが明らかになってきた。2020 年には、海洋研究開発機構(JAMSTEC)を中心とした研究グループによって、アスガルドアーキアの培養の研究が報告されており(Imachi *et al.*, 2020)、原核生物と真核生物の境界の研究が盛んになっている。

このアスガルドアーキアのゲノムには、光のエネルギーを使ってさまざまな生理機能を発揮するロドプシン(注 1)の中で、これまでにないタイプのものが存在する。これはシゾロドプシンと呼ばれ、光エネルギーを使って細胞内へ水素イオンを取り込む機能を持つ分子である(図 1)(Inoue *et al.*, 2020)。アスガルドアーキアが真核生物へと変化する過程で、太陽光や酸素のある環境に順応するために、シゾロドプシンによる水素イオンの取込みが関わっている可能性も示唆されている。南極で見つかった別の種類の生物が持つタンパク質も同様の配列と機能を持っており、シゾロドプシンは生物界に幅広く存在するといわれている。

シゾロドプシンのアミノ酸配列は、長年知られているバクテリオロドプシン(注 2)に代表されるタイプ 1 グループと、2018 年に見つかった新種であるヘリオロドプシン(注 3)の中間に位置しており、どちらに分類されるのか不明であった(図 1)。また、微生物が持つ水素イオンを運ぶロドプシンの数は、バクテリオロドプシンのような細胞外へ運ぶものが大部分であり、細胞内に運ぶものはごく少数である。その中でもシゾロドプシンは、他の内向き輸送型のロドプシンと比べ、非常に高効率な輸送を行うことが報告されている(Inoue *et al.*, 2020)。こうしたロドプシンとアミノ酸配列が大きく異なるシゾロドプシンの構造や、水素イオンを細胞内に運ぶ仕組みはわかっていなかった。

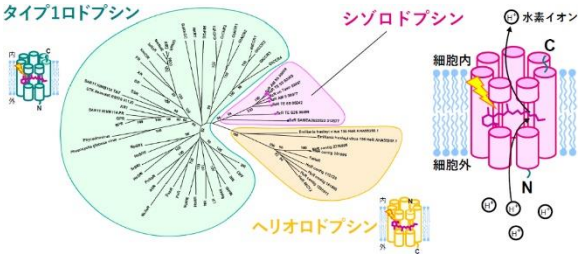


図 1：既知のロドプシンの系統樹と、シゾロドプシンの内向き水素イオン輸送の模式図。

研究の内容と成果

今回、本研究グループは、X 線結晶構造解析を用いてシゾロドプシンの立体構造を明らかにした(図 2)。シゾロドプシンは 3 量体を形成しており、今までのロドプシンと同様に 7 本の膜貫通ヘリックス(TM)とアミノ酸の一つであるリジンに共有したレチナール色素(注 4)で構成されていた。シゾロドプシンがタイプ 1 ロドプシンとヘリオロドプシンどちらに近いのか調べるために、構造を比較したところ、シゾロドプシンの細胞内や細胞外のループ構造はバクテリオロドプシンに近く、ヘリオロドプシンとは大きく異なっていた。従って、シゾロドプシンはタンパク質を構成するアミノ酸の配列こそ両者の中間であるが、既存のタイプ 1 に分類されることがわかった。

図 2：シゾロドプシンの構造(左)シゾロドプシン 3 量体の全体構造　(右)シゾロドプシンとバクテリオロドプシンおよびヘリオロドプシンとの重ね合わせ。

次に、水素イオンの輸送メカニズムについて調べた。暗状態では、水素イオンはレチナールのシッフ塩基に結合し

ており、光刺激が入るとそこから離れて、シゾロドプシンの細胞内側に存在するグルタミン酸を通して細胞内に放出される(図 3 左)。一般的な水素イオンポンプでは、水素イオンはグルタミン酸などのアミノ酸残基や水分子の間を、玉突きのように移動していくことで輸送される。しかしシゾロドプシンでは、このグルタミン酸は細胞内への水素イオンの輸送には必須であるにもかかわらず、水素イオンはこのアミノ酸にトラップされず、直接タンパク質から細胞の中へ放出されることが示唆されており、シゾロドプシンの水素イオン輸送メカニズムには大きな謎があった。特徴的なことに、シゾロドプシンの細胞内側に面している部分は他のロドプシンと比べて短く、特に TM6 は約 13 アミノ酸残基分短いものであった(図 2 右)。こうした構造的特徴によって、細胞内側のグルタミン酸が溶媒に露出しやすい構造を取っていることが明らかになった(図 3 左)。水素イオンの通り道にあるアミノ酸改変体タンパク質を用いた実験によって、溶媒がタンパク質内部に流入しやすいことも示された(図 3 右)。

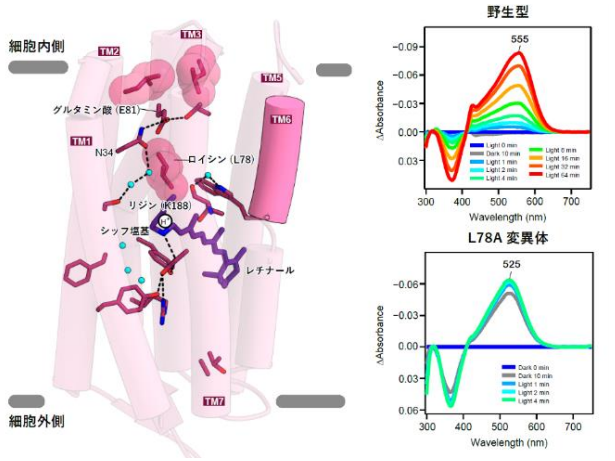


図 3：細胞内側が溶媒に露出しやすいシゾロドプシンの特徴(左)
細胞内側に着目した、シゾロドプシンの水素イオン輸送経路。TM6 が短いため他のロドプシンのように細胞内側を覆うことができず、グルタミン酸 81(E81)は 2 つのロイシンによってのみ溶媒から隔たれている。シッフ塩基と E81 の間には、ロイシン 78 が経路を塞いでおり、光活性化時はロイシン 78 が動くことで水素イオンが細胞内に移動すると考えられる。
(右)ロイシン 78 を改変した変異体(下)では、タンパク質内部にまで外から水や試薬が入り込み、野生型のシゾロドプシン(上)と比べて、光を当てない場合でもレチナールが容易に反応してしまうことを示すタンパク質の光吸収変化が見られた。

こうした結果をもとに、光によって構造変化するとタンパク質内部に溶媒が入り込み、水素イオンがグルタミン酸に誘引されながら細胞の中へ直接放出されるという、シゾロドプシン独自の内向きプロトン輸送モデルを提唱した(図 4)。

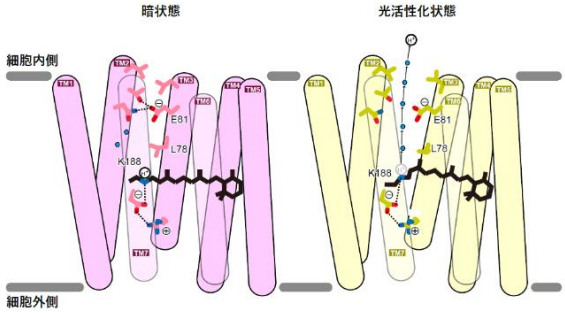


図 4：シゾロドプシンの内向き水素イオン輸送モデル

今後の展望

本研究は、細胞内に水素イオンを効率的に取り込むために、シゾロドプシンの形が進化してきたことを示しており、アスガルドアーキアでの生理的な重要性が示唆される。今後は、本来のアスガルドアーキアの中で細胞の内向き水素イオン輸送がどのような役割を果たすのか、その解明に向けた研究が必要になると思われる。 本研究で明らかになった、細胞の中へ直接水素イオンを放出するというメカニズムは、生体内での水素イオン輸送機構に一石を投じるものであり、他のタンパク質の分子メカニズムの理解へつながると期待される。また、神経細胞へシゾロドプシンを発現することで、任意の神経細胞の興奮を光で操作することが可能になると考えられ、脳の神経細胞が関連するうつ病などの発病メカニズムの研究や、血液の酸性化に伴う、細胞疾患であるアシドーシスなどの機構解明に向けた分子ツールとして、構造情報をもとにしたシゾロドプシンの改変や医学研究への応用も期待される。

謝辞

本研究は、日本学術振興会における科学研究費助成事業の特別推進研究「物理刺激で制御される膜蛋白質の分子機構の解明」(課題番号：16H06294　研究開発代表者：濡木理)や基盤研究(B)「光駆動型内向きプロトンポンプの輸送メカニズム解明とオプトジェネティクスへの応用」(課題番号：17H03007　研究代表者：井上圭一)、若手研究「非古典的ロドプシンの構造機能解析」(課題番号：20K15728　研究代表者：志甫谷 渉)の一環で行われた。また、本研究は、国立研究開発法人日本医療研究開発機構(AMED)「創薬等ライフサイエンス研究支援基盤事業」の一環として、放射光施設などの大型施設の外部開放を行うことで優れたライフサイエンス研究の成果を医薬品等の実用化につなげることを目的とした「創薬等先端技術支援基盤プラットフォーム(BINDS)」の支援により行われた。

また、科学技術振興機構(JST) CREST「細胞内二次メッセンジャーの光操作開発と応用」(研究代表者：神取秀樹)の支援により行われた。

掲載論文： Akimitsu Higuchi†, Wataru Shihoya†,*, Masae Konno, Tatsuya Ikuta, Hideki Kandori, Keiichi Inoue*, Osamu Nureki*. "Crystal Structure of Schizorhodopsin Reveals Mechanism of Inward Proton Pumping" (2021) *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **118**, No. 14, e2016328118

(注 1) ロドプシンタンパク質
動物から細菌などの微生物まで、幅広い生物種の細胞膜上に存在する太陽光を吸収してさまざまな生物学的機能を発現するタンパク質。動物の持つロドプシンは視覚など光に関わるシグナル伝達を行う受容体であるのに対し、微生物の持つロドプシンの多くは光のエネルギーを使ってイオンを輸送する。従ってその機能は互いに大きく異なり、進化的にも全く別系統であるにも関わらず、光を吸収するために共にビタミン A の誘導体であるレチナール色素をタンパク質内部に結合し、7 本の膜を貫通するらせん(ヘリックス)からなるタンパク質構造を持つなど多くの共通点がある。
(注 2) バクテリオロドプシン
初めて発見された微生物ロドプシンであり、光駆動型の水素イオン排出ポンプとして働く。細胞内外で水素イオンの濃度勾配を作ることで、これを別のタンパク質が利用してエネルギーを作る。
(注 3) ヘリオロドプシン
2018 年に報告された、既知の微生物および動物ロドプシンのいずれとも異なる、第 3 のロドプシンタンパク質。タイプ 1 ロドプシンと同様に、微生物や巨大ウイルスなどが持つが、細胞内の分子配向がタイプ 1 ロドプシンや動物ロドプシンに対して反転しているという構造的な特徴を持つ。2019 年には X 線結晶構造解析によって、原子レベルでの三次元構造が解明されたが、いまだヘリオロドプシンの分子機能は不明である。
(注 4) レチナール色素
通常アミノ酸は可視領域に吸収を持たないため、アミノ酸で構成されるタンパク質もそれ単体では可視光を利用することができない。それに対してロドプシンはタンパク質内部に、体内の酵素反応でビタミンAから生じるレチナールと呼ばれる色素を結合している。ロドプシンのタンパク質内部にあるレチナールが可視光を吸収するとその構造が変化し、それを通じてタンパク質部分にも変化が起こり、さまざまな生理機能を発現することが可能になる。

不揮発性メモリや熱流センサー開発に繋がる反強磁性体の普遍的機能性の実証

量子物質研究グループ　肥後 友也
中辻 知

【研究の背景】

私たちの身の回りでは多くの磁性体が利用されており、その代表的なものとして強磁性体と反強磁性体が知られています。磁石として広く使われている強磁性体は電気・熱・光に対して磁化に比例した応答を示します。そのため、磁化によって応答の大きさを制御できます。例えば、パソコンやスマートフォンなどの情報処理端末を省電力化する技術として期待されている不揮発性磁気メモリ（MRAM）では、強磁性金属層–非磁性絶縁層–強磁性金属層からなるトンネル磁気抵抗素子が持つ強磁性層の磁化の向きによって変化する電気的応答を「0」と「1」の情報記録単位として用いています。この素子では、磁化が膜に対して垂直方向に向くことで高密度・省電力化が期待できます。このような特性は磁石や他の強磁性体を用いたデバイスにおいても同様で、磁化が向き易い方向（磁化容易軸）を最適化することでその機能性が大きく向上します。

特定の方向に磁化容易軸を向けるために、結晶構造に由来する結晶磁気異方性や異種材料界面の効果に由来する界面磁気異方性を用いた材料や多層膜（界面）構造の設計が行われています。その一方で、強磁性体は棒状であれば長手方向に、薄膜であれば膜に平行方向に磁化されやすい性質を持ちます。これは形状磁気異方性に由来するもので、強磁性体の持つ磁化の大きさに比例してその寄与も大きくなります。そのため、巨大な応答が期待される磁化の大きな強磁性体を用いたデバイスでは形状選択の自由度が低くなり、十分な特性を得るために形状・結晶・界面磁気異方性のバランスをよく考える必要がありました [1,2]。形状磁気異方性の影響を抑える方法としては、隣り合うスピン同士が互いを打ち消しあうために正味の磁化がゼロとなっている反強磁性体の利用が考えられます。しかし、磁化を持たないという反強磁性体の性質は、利点であると同時に強磁性体が示すような電気・熱・光に対する巨大な応答を得ることが困難であるというデバイス応用上の欠点でもあり、上記アイデアの実験的な検証は行われていませんでした。

本研究では、室温かつゼロ磁場において巨大な応答を示す反強磁性体 Mn_3Sn を用いて、自発磁化がない（もしくは非常に小さい）という反強磁性体の持つ普遍的な機能性の実証と不揮発性メモリやセンサーデバイスへの応用を試みました。

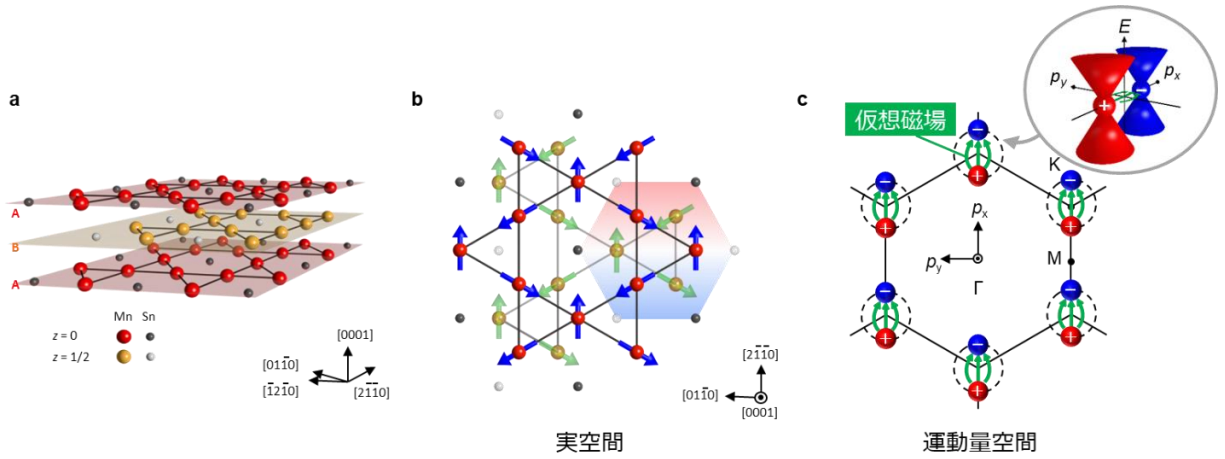


図１　トポロジカル反強磁性体 Mn_3Sn の結晶構造と磁気構造、運動量空間における仮想磁場
(a) Mn_3Sn は c 軸方向に磁性原子のマンガン（Mn、赤と黄の球）からなるカゴメ格子が積層した構造を持ち、420 K（約 150 ℃）以下で、Mn のスピンが逆 120 度構造と呼ばれる反強磁性秩序を示します。(b) 二層のカゴメ格子上のスピンを見ると、六角形で示されているクラスター磁気八極子と呼ばれる 6 つのスピンからなるユニットが同じ方向にそろっていることがわかります。(c) Mn_3Sn では、実空間での反強磁性スピン構造（クラスター磁気八極子）の向きと運動量空間におけるワイル点の対（赤（＋）と青（－）の球）、仮想磁場の向きが対応しています。磁気八極子の向きを変えることで仮想磁場を制御することができます。

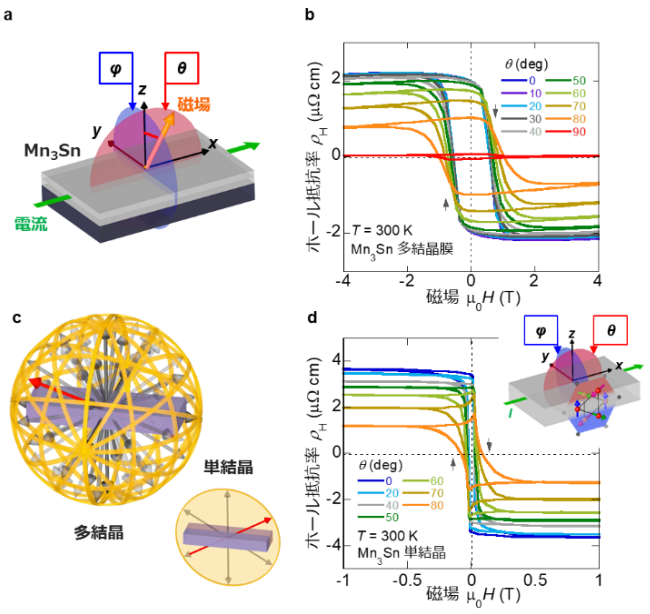


図２　Mn_3Sn における異常ホール効果の磁場依存性の測定と多値記憶機能の実証

(a) 異常ホール効果測定の概要図。磁場の角度を膜面直方向から θ と φ 方向へと変えながら磁場掃引し、y 方向に生じるホール電圧(抵抗率)の測定を行いました。(b) Mn_3Sn 多結晶薄膜試料におけるホール抵抗率の磁場依存性。磁場は θ 方向へ変化させていますが、φ 方向においても同様の多値記憶機能を確認しました。(c) 多結晶/単結晶試料における磁気八極子(赤矢印)の安定化する方向を示す概要図。Mn_3Sn のようにカゴメ面内に磁化容易面(より正確には $[2\bar{1}\bar{1}0]$ に磁化容易軸)を持つ場合、多結晶化することで正味の磁気八極子の全方向への指向性が現れます。(d) Mn_3Sn 単結晶薄膜試料におけるホール抵抗率の磁場依存性。磁場は θ 方向へ変化させています。φ 方向では多値記憶機能は確認できませんでした。これらの結果は図 2c に示すように多結晶試料/単結晶試料では 3 次元空間/2 次元面内に磁気八極子や仮想磁場を向けられることを示しています。

【実験結果】

マンガン(Mn)とスズ(Sn)からなる反強磁性体 Mn_3Sn(図 1a と 1b)に着目して研究を行いました。反強磁性体 Mn_3Sn [3] は空間群 $P6_3/mmc$ に属する六方晶の系で、磁性元素 Mn からなるカゴメ格子が ABAB の順序で積層した構造を持ち、逆 120 度構造と呼ばれる非共線スピン構造が(0001)面内において T = 430 K の高温から現れます。この反強磁性スピン構造は、磁化ゼロの状態においても強磁性秩序の場合と同様に巨視的に時間反転対称性を破ります。これは、2 層のカゴメ格子に 3 つの副格子からなるスピンを 6 つ配置されたスピン構造(クラスター磁気八極子 [4])が強的に秩序していることからも理解できます。Mn_3Sn では、磁化ではなくクラスター磁気八極子が磁気秩序変数となっています。その為、クラスター磁気八極子を外部磁場によって制御することで強磁性体に匹敵するほど大きな異常ホール効果 [3] や異常ネルンスト効果 [5]、磁気光学カー効果 [6] を得ることができます。さらに、Mn_3Sn は磁気ワイル粒子を持つトポロジカル磁性体であることも明らかにされました [7]。すなわち、Mn_3Sn は反強磁性体であるものの、ワイル粒子の作る巨大な仮想磁場[実空間換算で 100－1000 テスラ(T)に相当]を運動量空間において持つため、上記の巨大応答が現れます(図 1c)。この仮想磁場の向きは Mn_3Sn の持つクラスター磁気八極子の向きと対応関係にあり、カゴメ格子面内でクラスター磁気八極子の向きを制御することで、仮想磁場とそれに由来した巨大応答を制御できます。より最近では、クラスター磁気八極子の向きを磁場だけでなく電気的に制御することも可能になりました [8]。

本研究 [9] では、スパッタリング法を用いて反強磁性体 Mn_3Sn の多結晶薄膜をシリコン基板上に作製し、磁場に対する異常ホール効果の変化を測定しました。磁場の印加方向を膜の面直から面内方向(θ と φ 方向)へと変化させ

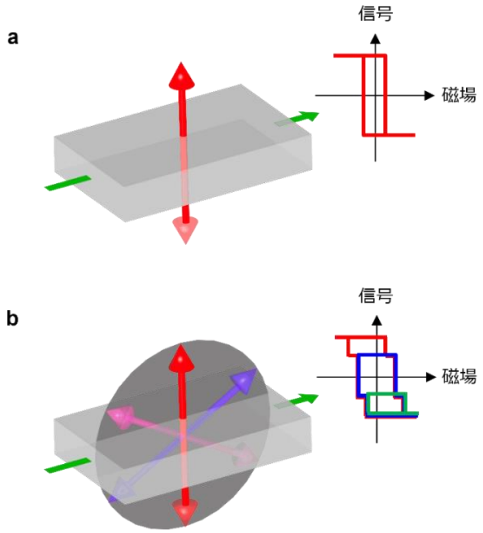


図３　単一グレインからなる強磁性体と反強磁性体の磁気異方性

(a) 大きな結晶磁気異方性を持つ強磁性体の単結晶/単一グレイン試料において期待される磁化方向と読み出し信号。(b) 反強磁性体 Mn_3Sn の単結晶/単一グレイン試料において期待される磁化方向と読み出し信号。磁化の大きい強磁性体では、磁化を膜面内へ寝せようとする形状磁気異方性に打ち勝つために大きな結晶磁気異方性や界面磁気異方性が必要となります。この場合、強い 1 軸性の磁気異方性が必要となり、読み出し信号は 2 値化します。磁化の非常に小さい反強磁性体では、形状磁気異方性の影響がほぼ無視でき、面性の磁気異方性程度の比較的弱い結晶磁気異方性においても、磁化(より正確には磁気八極子や仮想磁場)の向きをそろえることができます。このような場合、多値記憶を行うことが可能となります。

ながら磁場掃引した実験において、多値記憶が可能であることを確認しました(図 2a と 2b)。異常ホール効果は仮想磁場の面直成分に比例します。そのため、読み出し信号の磁場方向による変化は、磁場方向に磁気八極子と仮想磁場がそろい、面直方向への投影成分が変化していることに対応しています。つまり、本結果は 3 次元空間の全方向に自在に仮想磁場(磁気八極子と平行)を向け、ゼロ磁場おいてもその状態を保持できるという特性を示しています(図 2c)。この特性は Mn_3Sn の磁化が非常に小さく形状磁気異方性の影響を受けないことと、カゴメ格子面内に磁気容易軸/面を持つことに由来しています。また、単結晶(単一グレイン)試料においても、カゴメ格子に平行な 2 次元面内のみではあるものの、同様の多値記憶が可能であることを実証しました(図 2d)。形状磁気異方性に比べて十分大きな結晶磁気異方性を持つ強磁性体においても、多結晶試料では同様の機構での多値記憶が可能です。しかし、単結晶試料では大きな形状磁気異方性のために磁化の向く方向が一方向に制限され、2 値の信号しか取れません(図 3a)。反強磁性体 Mn_3Sn において見いだした新たな情報記憶手法は、数－数 10 nm の単一グレインからなる記憶素子において、「0」と「1」の 2 つの情報単位だけでなく、3 つ、あるいは、それ以上の情報を 1 つの素子で書き込み・読み出しできる可能性を示しています(図 3b)。今後、実際にメモリにおいて求められる素子サイズまで微細化した試料での原理実証が望まれます。

また、形状磁気異方性の影響が小さいという特性は、異常ネルンスト効果を用いた磁気デバイスにおいてもその機能を発揮します。異常ネルンスト効果は磁気的な性質を用いて熱を電気に変換する熱電効果ですが、ゼーベック効果とは異なり熱流と垂直方向に発電できます(図 4a と 4b)。従来の薄膜関連技術が適用でき、安価に大面積・フレキシブルな熱電デバイス作製が可能という利点から、熱の流れを可視化する熱流センサーへの応用が期待されています。センサーの熱流感度は素子の長さに比例するため、細線構造が要求されます。面直方向に流れる熱流に対して測定する場合には、図 4b に示すように磁化(Mn_3Sn の場合は磁気八極子)を短辺に向けてそろえる必要があります。この磁化方向は形状磁気異方性に反したものであるため、強磁性体を用いた熱流センサーでは、結晶磁気異方性や膜の積層構造を最適化することで実用に足る機能を得ています。一方で、仮想磁場に由来する巨大な異常ネルンスト効果を示す Mn_3Sn では、形状磁気異方性の影響を受けずに磁気八極子や仮想磁場の向きをそろえることができるため、細線化した試料においてもその熱電特性が非常に簡単に維持できます。Mn_3Sn 多結晶と電極の細線からなる熱流センサーを作製し(図 5a)、異常ネルンスト効果によって生じた電圧の磁場依存性を測定したところ、1 W/cm^2 程度の熱流によりサブ mV 程度の大きな信号が、 ±0.9 T 程度の大きな磁場まで反転せずに現れていることを確認しました(図 5b)。また、ゼロ磁場におけるネルンスト電圧が熱流に対して線形に比例する特性を示し、熱流センサーとして機能することも確認しました(図 5c)。単位面積当たりの熱流感度は 1.3 mV/W とこれまで報告されていた強磁性体を用いた異常ネルンスト熱流センサーや市販の廉価版ゼーベック熱流センサーに匹敵する性能を示す一方で、外部磁場に対する安定性が 10－100 倍高くなる(上記の強磁性体を用いたセンサーでは反転磁場が 0.01－0.1 T 程度)ことが分かりました。

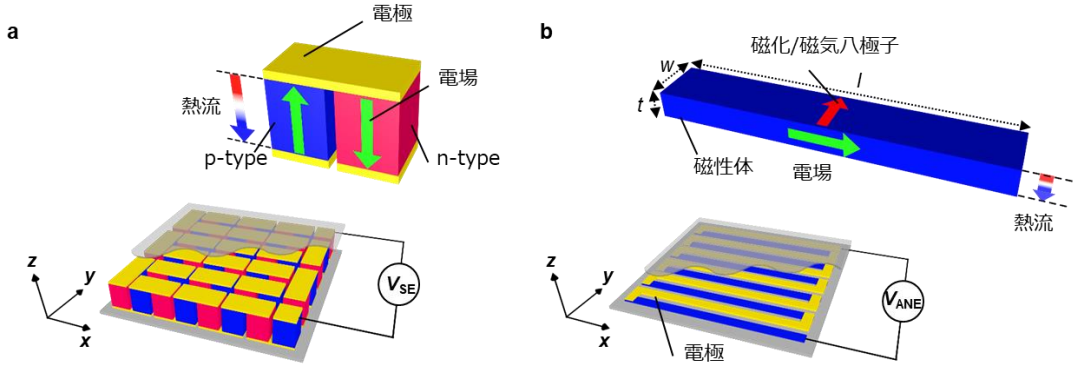


図 4　ゼーベック効果と異常ネルンスト効果を用いた熱電デバイス

(a)ゼーベック効果を用いた 3 次元ピラー構造を持つ熱電デバイスの概略図。(b)異常ネルンスト効果を用いた 2 次元サーモパイル構造を持つ熱電デバイスの概略図。ゼーベック効果／ネルンスト効果では、それぞれ熱流に対して並行方向／垂直方向に起電力(電圧)が生じます。そのため、異常ネルンスト効果を用いたデバイスでは、従来の薄膜作製・加工技術を適用でき、大面積化もしくはフレキシブル化が容易です。

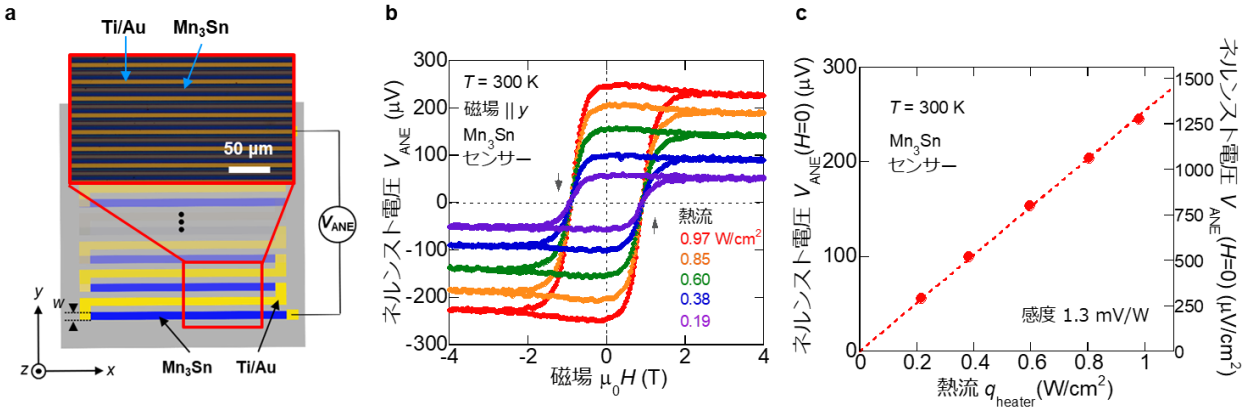


図５　反強磁性体 Mn_3Sn を用いた異常ネルンスト熱電デバイスにおける熱流センシング

(a) Mn_3Sn と電極からなる異常ネルンスト熱流センサーの概要図と光学顕微鏡による観察像。測定ではセンサーの面直(−z)方向に熱流、面内(y)方向に磁場を印加し、異常ネルンスト効果によって生じる電圧を測定しています。(b) 印加する熱流を変えた際に Mn_3Sn 異常ネルンスト熱流センサーにおいて生じる電圧の磁場依存性。(c) Mn_3Sn 異常ネルンスト熱流センサーにおいてゼロ磁場で生じる電圧の熱流依存性。ネルンスト電圧は熱流に比例しており、センサーとして機能していることがわかります。

【まとめと今後の展開】

反強磁性体は、(i) スピンダイナミクスが THz 帯と強磁性体の場合に比べて 2−3 桁ほど早く、デバイスの超高速化が期待できる、(ii) 漏れ磁場を作らず、デバイスの高密度化に適している、(iii) 転移温度が室温以上の物質が金属・絶縁体・半導体を問わず得られ材料選択の自由度が高いといった特徴から、省電力・超高速駆動・超高密度化が求められるビヨンド 5G 世代の磁気デバイスの中心素材として近年注目を集めています。今回、本研究グループでは情報(巨大な電気信号)の読み出しが可能な反強磁性体 Mn_3Sn を用いて、「(iv) 形状磁気異方性が無視できるほど小さく、デバイス形状の自由度が高い」という新たな反強磁性体の機能を実証しました。

この特性によってもたらされる、単一グレインの記憶素子における多値記憶機能は、脳神経を模擬した脳型計算機や量子コンピュータの実現へつながる技術であり、すでに知られていた高密度化・超高速化が可能といった反強磁性体の利点 (i)−(iii)と併せて、次世代のスピントロニクスデバイスの開発にブレークスルーをもたらします。また、磁性材料の細線構造が重要となる異常ネルンスト熱流センサーにおいても、デバイス形状の自由度が高く外部磁場擾乱に強いセンサーの作製が可能となり、既存のゼーベック熱流センサーを性能・コスト面で大きく上回る異常ネルンスト熱流センサーの開発が期待できます。

【謝辞】

本研究は東大物性研の大谷義近 氏、Danru Qu 氏(現・台湾 中央研究院)、Muhammad Ikhlas 氏、上杉良太 氏、浜根大輔 氏、理化学研究所の近藤浩太 氏、米国ジョンズホプキンス大学の Chia-Ling Chien 氏、Yufan Li 氏との共同研究、石井梨恵子 氏、西川尚 氏、小林鮎子 氏、成田秀樹 氏、三輪真嗣 氏や薬師寺啓 氏との議論のもと行われました。ここに感謝を申し上げます。

[1] M. T. Johnson et al., Rep. Prog. Phys. **59**, 1409 (1996).
[2] R. Skomski, J. M. D. Coey, Scr. Mater. **112**, 3 (2016).
[3] S. Nakatsuji, N. Kiyohara, and T. Higo, Nature **527**, 212 (2015).
[4] M.-T. Suzuki et al., Phys. Rev. B **95**, 094406 (2017).
[5] M. Ikhlas, T. Tomita et al., Nature Phys. **13**, 1085 (2017).
[6] T. Higo et al., Nature Photon. **12**, 73 (2018).
[7] K. Kuroda, T. Tomita et al., Nature Mater. **16**, 1090 (2017).
[8] H. Tsai, T. Higo et al., Nature **580**, 608 (2020).
[9] T. Higo, Yufan Li, K. kondou, D. Qu, M Ikhlas, R. Uesugi, D. Nishio-Hamane, C. L. Chien, Y. C. Otani, S. Nakatsuji, Adv. Funct. Mater. **31**, 2008971 (2021).

$ZrTe_5$における弱いトポロジカル絶縁体状態の観測と制御

極限コヒーレント光科学研究センター
Peng Zhang, 近藤 猛

概要：

3 次元のトポロジカル絶縁体は「強い」と「弱い」で区別される。「強い」トポロジカル絶縁体は、過去十数年にわたり、理論と実験の両面から広く研究されてきた。「強い」トポロジカル絶縁体では、すべての表面にスピン偏極した 2 次元のディラックコーンが存在し、完全な後方散乱は禁止される。しかし、180°方向以外の散乱は可能である。一方、「弱い」トポロジカル絶縁体では、側面にのみトポロジカル表面状態が発現することが期待される。偶数層では、隣り合う 2 つの層が互いに結合する結果トポロジカル的に自明な相となるため、文字通り「弱い」（あるいは強固ではない）と見なされてきた。しかし、表面電子の非局在化により、実際には強固であることが今では分かっている。「弱い」トポロジカル絶縁体では層間の結合が弱いため、一般的にはトポロジカル表面状態が擬 1 次元的な分散となり、180°方向以外の散乱も禁止されるため、散逸のないスピン流が形成できるものと期待される。このような利点にもかかわらず、理論的に提案される「弱い」トポロジカル絶縁体の候補物質は少ない。また、試料側面の測定は容易ではなく、実験的な実証が困難である。例外として、Bi_4I_4 では上面と側面の両方において自然劈開が可能である [1]。しかし、このような結晶構造では、トポロジカル表面状態を発現する側面のみを大面積で準備することが難しく、応用面で不利となる。数少ない候補物質の中で最もよく研究されてきたものが、ファンデルワールス層状構造からなる $ZrTe_5$ である[2]。この物質は非常に高い移動度を示すため、デバイス応用への期待も大きい。それにもかかわらず、$ZrTe_5$ はそもそもトポロジカル絶縁体なのか、そうであるとしても「強い」か「弱い」かの分類が未だ実験的に決着していない。その最大の理由は、側面におけるバンド構造の観測がこれまで成功していないことにある。この研究のもう一つの難点は、$ZrTe_5$ が複数のトポロジカル相に近接しているため、その内の一つを理論的に同定しづらいことである。一方、この特徴は、物理的パラメータを微調整することで、バルクのトポロジーを制御できる魅力的な機能性を齎し得る。

本研究で我々は、放射光を用いたナノ顕微 ARPES（イタリア Elettra）、およびレーザーを用いたスピン分解 ARPES（物性研究所）を用いることで、「弱い」トポロジカル絶縁体に由来する表面電子状態を $ZrTe_5$ において初めて見出した[3]。さらに、バルクのバンドギャップを外部歪によって制御し、より安定な「弱い」トポロジカル絶縁体状態や理想的なディラック半金属状態を実現した。$ZrTe_5$ は指向性の高いスピン流及び調整可能なバンドギャップを有することが分かり、デバイス応用する上での優れた物質である。

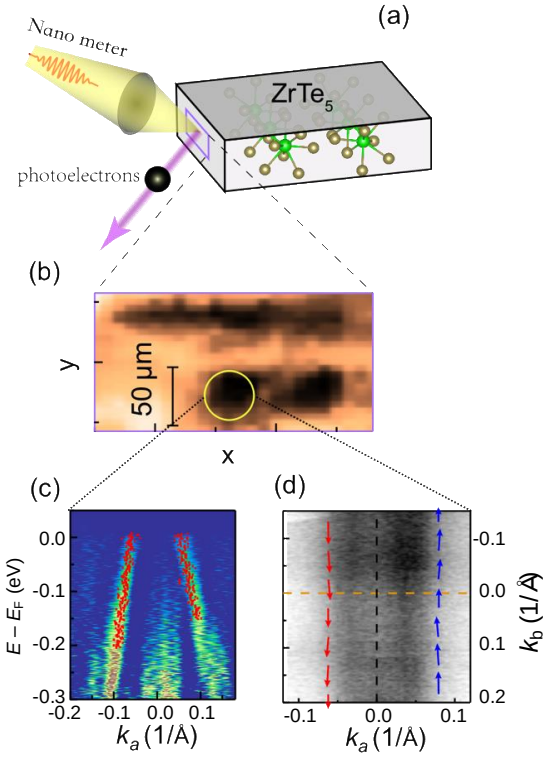


図 1 側面のナノ ARPES 測定。(a) 実験セットアップの模式図。(b) ナノ ARPES による実空間での強度マップ。～50μm の範囲でのみ光電子強度が強くなっている。(c) 結晶構造を構成する鎖の方向に沿って観測したバンド分散。決定されたホール型の分散は、トポロジカル表面電子構造の一部を成す。(d) (c)の表面電子構造が形成するフェルミ面。赤と青の矢印でスピン構造を示す。

結果：

「弱い」トポロジカル絶縁体を実証するためには、結晶の上面と側面の電子状態を共に調べる必要がある。ところ

が、結晶の一般的な性質として、綺麗な結晶平坦面は特定の方位に限られ、その他の方位では凹凸の多い荒い結晶面しか得られない。「弱い」トポロジカル絶縁体が理論的に考案されて以降、その有力候補として $ZrTe_5$ が提案され、それを実証する様々な実験が試みられてきた。$ZrTe_5$ の上面では綺麗な結晶平坦面が得られ易いため、その表面における電子状態は観察されていた。一方、スピン流が期待される肝心の側面に対しては、荒い結晶表面しか得られず観察が困難であることから、その本質的な電子状態が研究できずにいた。そこで本研究では、ナノサイズまで極限集光した放射光を用いた光電子分光(ナノ ARPES)により研究を進めた。その結果、巨視的には凹凸の多い乱れた表面も、局所的には平らで綺麗な面が微小ながらも点在することを見出した(図１)。我々は、その微小な結晶平坦面にピンポイントで光を照射し、外に飛び出す光電子のエネルギー、運動量、およびスピンの情報を得ることで、$ZrTe_5$ が「弱い」トポロジカル絶縁体である証拠を掴んだ。

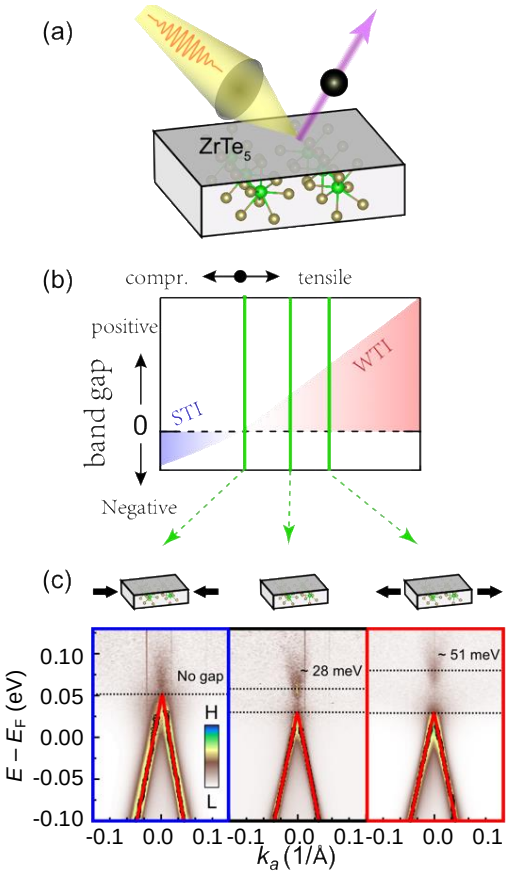


図 2 結晶に歪みを加えつつ上面をレーザーARPES で測定した結果。(a) 実験セットアップの模式図。(b) $ZrTe_5$ 結晶に引っ張り歪み及び圧縮歪みを印加した際に予想されるトポロジカル相図。(c) $ZrTe_5$ 結晶に引っ張り歪み及び圧縮歪みを印加しつつ、上面から観察したバンド構造。

側面の金属性が示された一方で、「弱い」トポロジカル絶縁体状態が安定であるためには、上面における絶縁性が高いことが要求される。上面からも同じく電子状態を詳細に観測した結果、絶縁性の直接的な評価値となるバンドギャップが 30meV 程度と比較的小さいことが分かった。$ZrTe_5$ の絶縁性を高め、「弱い」トポロジカル絶縁体状態をより安定させるために我々が考案した手法は、結晶に圧力歪みを加えることである。実際に、ネジで締め付ける程度の圧力印加で、バンドギャップを２倍以上も増大させられることを明らかとした(図２)。我々の x 線散乱実験から、加えた歪みは結晶の大きさに対して 0.4%引き延ばした状態にあることを確認した。一方、圧力印加で結晶を縮ませることで逆にギャップを閉じ、ディラック半金属状態となることも実証することができた(図２)。理論計算からは、$ZrTe_5$ 結晶を 0.3%まで縮めることでバンド反転が生じ、「強い」トポロジカル絶縁体に変化させられることも推定できる。これらの歪み値は十分に小さいため、ピエゾ素子に $ZrTe_5$ 結晶を貼り付けて伸張または圧縮により調整することで、「弱い」トポロジカル絶縁体、ディラック半金属状態、さらには「強い」トポロジカル絶縁体までものトポロジカル相転移を生じさせ、スピン流の制御が可能になるものと期待できる。

今後の展望：

「強い」トポロジカル絶縁体はこれまで多くの物質で発見されているのに対し、「弱い」トポロジカル絶縁体を実現した例はまだほんの数例しかない。特に $ZrTe_5$ は「弱い」トポロジカル絶縁体の概念が提唱されたのち最初期に提案された候補物質として最も有名な物質である。その性質を本研究で初めて解明し、$ZrTe_5$ を巡る論争に終止符が打たれたことで、この物質を中心として、指向性に優れるスピン流が実現される「弱い」トポロジカル絶縁体を活用する応用研究が活発化されることが期待される。特に、ピエゾ素子で実現可能なほどに僅かな歪みでトポロジカル状態を制御して見せた本研究の結果は、理想的なスピン流を生成する新しい物質設計指針を示すと共に、その技術を用いたスピントロニクスデバイスの開発につながることが期待される。

参考文献:

[1] R. Noguchi *et al.*, Nature, **566**, 518 (2019).

[2] H. Weng, X. Dai & Z. Fang, Phys. Rev. X, **4**, 011002 (2014).

[3] P. Zhang *et al.*, Nature Commun. **12**, 406 (2021).

日本物理学会学生優秀発表賞を受賞して

ナノスケール物性研究部門　長谷川研究室　　佐藤 優大

2020 年 9 月に行われた日本物理学会 2020 年秋季大会(オンライン)において、以下に述べる研究内容の講演を領域 6(金属・低温)及び領域 9(表面・界面、結晶成長)で行い、両領域での学生優秀発表賞を受賞いたしました。この場をお借りして、ご指導いただいた長谷川幸雄教授、土師将裕助教、共同研究させていただいた物質・材料研究機構の内橋隆博士、吉澤俊介博士をはじめとする本研究にご協力いただいたすべての方々に感謝申し上げます。

受賞対象となった研究は「単原子層超伝導体におけるステップ誘起臨界磁場増大効果に関する研究」です。低温で電気抵抗がゼロになる超伝導現象は、外部磁場によってその超伝導性が破壊されます。いかに外部磁場に強い超伝導体を作るかは非常に大きな課題ですが、この点を克服する一つの方法として、超伝導体を薄膜化することが挙げられます。超伝導体は、その厚さが超伝導現象を特徴づける長さであるコヒーレンス長よりも薄くなると、面内磁場に対して超伝導が壊れにくくなります。これは面直方向の電子の運動が制限され、超伝導を担うクーパー対の軌道対破壊が抑制されるためです。近年では、極限的に薄くした超伝導体として、半導体基板上に単原子層の Pb や In を付けた金属単原子層超伝導体が注目されており[1]、面内磁場に対して強いことも既に報告されています。このことから、薄膜化と同様に、面内にも電子の運動を制限する構造があれば、面直磁場に対しても強い金属単原子層超伝導体ができることが期待できます。これを実現するために、我々は金属単原子層に自然に形成されるステップ構造に着目しました。実際、Si(111)表面上の$\sqrt{7}\times\sqrt{3}$- In 構造では、テラスに挟まれたステップが、テラス間の電子状態の結合を弱め、ジョセフソン接合として機能することが報告されています[2]。以下では、我々が見出したステップ誘起の臨界磁場増大効果を紹介します。

まず用いた系は Si(111)面上の$\sqrt{3}\times\sqrt{43}$-Pb 構造です。基板上の 1.23 ML の Pb からなる相で、$\sqrt{3}$ 間隔と$\sqrt{7}$ 間隔の Pb 原子が周期的に配列した原子配置を有しています。走査トンネル顕微鏡(STM)による低温でのトンネル分光測定から、超伝導ギャップは 0.28 meV であることが判っています。この単原子層超伝導体での磁場下でのギャップ測定から、局所的に形成されたコヒーレンス長より狭いテラスにおいて、隣接する幅広なテラスに比べ高い面直磁場でも超伝導が壊れないことを見出しました(図 1)。この面直臨界磁場増大効果は、テラス幅が狭くなるほど強くなります。この系では、ステップによりテラス間結合が強く分断されるため、幅狭なテラスは一次元的なナノストライプ構造として振る舞い、面直磁場に対する軌道対破壊効果が抑制されることを明らかにしました[3]。

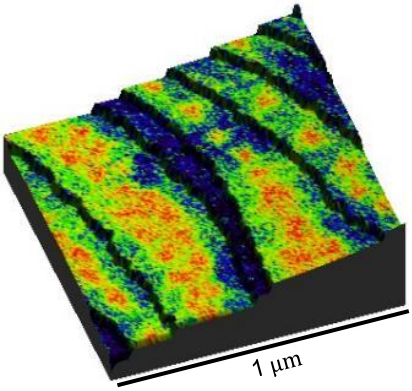


図 1: Pb-$\sqrt{3}\times\sqrt{43}$ 構造のゼロバイアスコンダクタンス(ZBC)分布図。オレンジ色の領域は渦糸で、幅狭なテラスでは渦糸が入らず超伝導ギャップが残っていることを示している（青色）。

次に、非常に幅狭な間隔でステップを持つ Si(111)微傾斜基板上の Pb 単原子層の一つである Striped

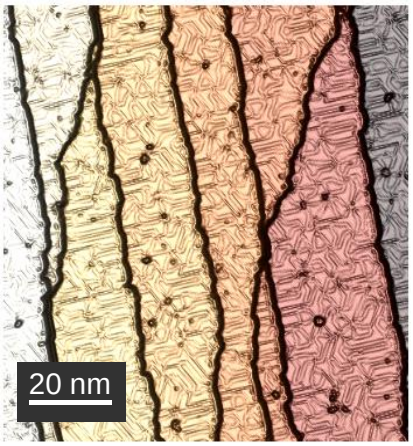


図 2: Si(111)微傾斜面上の Pb-SIC 構造の STM 像。SIC 構造がステップ端を含むテラス全体に均一に形成される。

incommensurate (Pb-SIC)構造に着目しました。この相も√3 間隔と√7 間隔の Pb 原子からなる系ですが、被覆量は 1.33 ML、臨界温度 1.5 K(超伝導ギャップ 0.35 meV)と√3×√43 構造とは若干異なっており、また、同表面のステップは、√3×√43 構造ほどには、テラス間の結合を遮断しないことが判っています。

この系では、表面電気伝導測定と STM の 2 つの測定から面直臨界磁場の増大を観測することができました。表面電気伝導測定では、微傾斜面上に形成された Pb-SIC 構造は平坦面上に形成された薄膜に比べて、超伝導転移温度 T_c が減少することが観測され、これはステップが超伝導体の乱れとして機能するとして説明されます。また、STM 測定では、画像化された超伝導渦糸がステップ垂直方向に縮んでいることを明らかになりました。これは、ステップの導入により、コヒーレンス長のステップ垂直方向成分が実効的に短くなったことを意味しており、このことが面直磁場での臨界磁場増大の原因であることを実証することができました。

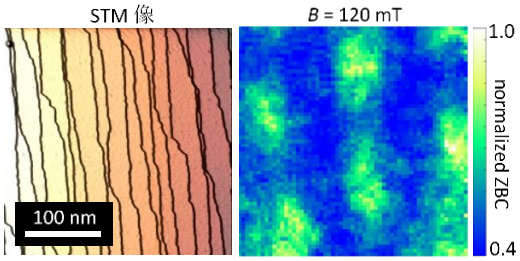
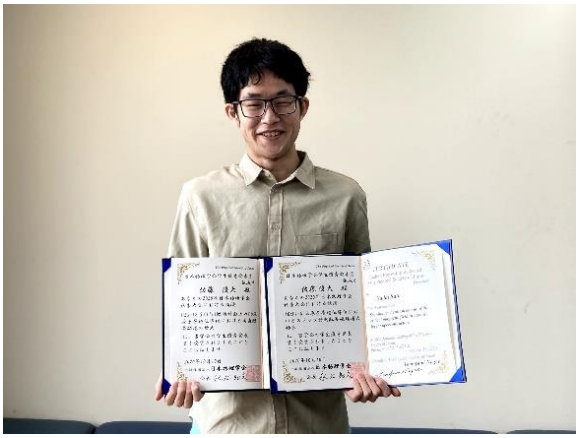


図 3: Si(111)微傾斜面上の Pb-SIC 構造の STM 像(左)と同じ領域で取得した ZBC 分布図(右)。ステップ方向に伸びた渦糸が観察されている。

本研究を通して、薄膜面内及び面直の全方向の磁場に対して超伝導特性が壊れにくい超伝導体の作製につながると期待されます。特に、Pb-√3×√43 構造のようなテラス間結合を強く分断する系を、微傾斜基板上に形成することができれば、さらなる臨界磁場の増大が期待されます。また、半導体基板上の金属単原子層は二次元超伝導の研究の場としても興味深い系です。乱れや磁場により誘起される超伝導絶縁体転移(superconductor-insulator transition; SIT)や関連する量子金属相やボーズ絶縁層の出現は、二次元超伝導の主要な研究テーマであり、量子相転移の一つとして現在もさかんに研究されています。半導体基板上の金属単原子層超伝導相は、STM による局所的な超伝導測定が可能であり、乱れとして機能するステップ密度の制御性が非常に容易であることから、ナノスケールで SIT を調べるのに適しています。今後はより詳細な研究により、ステップがもたらす超伝導の多彩な振る舞いについて明らかにしていく計画です。

[1] T. Zhang *et al.*, Nature Physics **6**, 104 (2010).
[2] S. Yoshizawa *et al.*, Phys. Rev. Lett. **113**, 247004 (2014).
[3] F. Oguro, Y. Sato *et al.*, Phys. Rev. B **103**, 085416 (2021).



受賞で戴いた賞状との撮影写真

理学系研究科研究奨励賞を受賞して

理学系研究科物理学専攻 近藤研究室　　田中 宏明

この度、理学系研究科研究奨励賞(修士課程)を受賞いたしました。この賞は、修士課程を修了した学生のうち、研究活動において特に顕著な業績を挙げた者に授与されるものです。受賞対象となった私の研究成果[1]、特に実験手法として用いた角度分解光電子分光について紹介していきます。

角度分解光電子分光(angle-resolved photoemission spectroscopy, ARPES)は、光電効果を利用した電子状態観測の手法です。固体結晶試料に仕事関数より高いエネルギーを持つ紫外光・X 線を入射することで電子を光電子に励起し、エネルギーと運動量の保存則から固体結晶中の電子状態を明らかにします。…というように説明されるのですが実際にはこんなに簡単ではありません。エネルギーの保存則は(固体結晶中でのエネルギー)+(励起光のエネルギー)=(光電子のエネルギー)であり容易に理解できるのですが、運動量保存則はそうはいきません。(いわゆる)運動量 **p** は連続的な並進対称性に対応する保存量ですが、固体結晶にそのような対称性はありません。その代わりになるのは離散的な並進対称性と Bloch 波数ベクトル **k**(もしくは結晶運動量$\hbar\mathbf{k}$)になります。

ARPES における運動量保存則というのはこの Bloch 波数ベクトル **k** と光電子運動量の関係なのですが、これを数式として表すことはできないと私は理解しています。Bloch 波数ベクトルに対応する離散並進対称性の選び方は任意性があり、選び方と関係なく一意に決まる光電子運動量と選び方に依存する Bloch 波数ベクトルに完全な対応関係を構築することはできません。この点を普遍的に説明することは(おそらく誰も)できておらず、私の研究における根本的な疑問として今も残っています。

ARPES における一般論としては、電子構造の「主たる周期」に対応する並進対称性をとると、結晶運動量$\hbar\mathbf{k}$ と光電子運動量が対応すると考えられています。「主たる周期」としては基本的に最小の単位格子をとることが多く、この点に関し気を付けるべきは底心・体心・面心・菱面のようなセンタリングがあり慣用単位格子・基本単位格子が異なる場合です。カゴメ格子積層結晶 Fe_3Sn_2(空間群 $R\bar{3}m$)に関する私の研究[1]も、カゴメ格子面を反映した慣用単位格子とそれより小さくカゴメ面を反映しない基本単位格子の違いに注目した議論が主な成果となっています。ARPES における運動量保存則といえば自明なもののようですが、一見当たり前のものも研究の対象になりうるということを体感できました。

ARPES で用いる「主たる周期」は「基本的に」最小の単位格子ですが、そうではない例も沢山あります。最近まで取り組んでいた研究[2]では、インターカレートした場合・AB 積層結晶の場合に ARPES スペクトルの周期が基本単位格子と対応しないことを示し、その起源として波動関数の形状効果を議論しています。バンド分散が直接観測できると形容される ARPES ですが、そのスペクトルにはまだまだ調べるべき事柄が残されています。博士課程ではこうしたテーマをより深く議論できることを目指しています。

最後になりましたが、修士課程の研究でお世話になった共同研究者の皆さま、放射光施設のスタッフの皆さまに深く御礼申し上げます。今後ともどうぞよろしくお願いいたします。

[1] Hiroaki Tanaka *et al.*, Phys. Rev. B **101**, 161114 (R) (2020).

[2] Hiroaki Tanaka, Shota Okazaki *et al., submitted.*

第 15 回日本物理学会若手奨励賞を受賞して

元　量子物質研究グループ押川研究室（現　広島大学先進理工系科学研究科）　多田 靖啓

この度、第 15 回(2021 年)日本物理学会若手奨励賞(領域 6)を受賞する栄誉に恵まれました。共同研究者の押川正毅所員と押川研究室の博士課程学生(当時)だった Wenxing Nie さんをはじめとする、お世話になった方々に感謝申し上げたいと思います。

さて、今回の受賞対象となった研究は、「カイラル超流動体のもつ自発的な軌道角運動量はいかほどの値か？」という問題に関する理論的研究です。カイラル超流動体というのは、フェルミオンが 2 つずつクルクルと相対的に回転しながらペアを組んでいる状態ですので、系全体としてこの回転由来の軌道角運動量をもつだろうと期待できます。問題は、その軌道角運動量の大きさを明らかにせよ、というものです。この問題は古くて新しい問題で、もともとは 1970 年代の 3He におけるカイラル超流動状態の発見に関連して始まったのですが、2000 年代以降にトポロジカル超伝導との関連においてリバイバルがありました。非常にざっくり述べますと、1970 年代頃は、「フェルミオン対の相対回転(公転)は、ボソン粒子の自転とみなせるか」という点が重要な争点で、それぞれの視点に立脚した理論が乱立し、議論が発散気味だったように感じます。2000 年以降になると、BCS-BEC 量子相転移やエッジカレントという物理が広く認識されるようになり、理論的理解が大きく進展しました。例えば 2000 年～2010 年くらいに、トポロジカル性を考慮した非常に明快な理論計算がいくつか報告され、理論としてはほぼ収束したかのようにも思われました。一方で、こういった美しい計算はしばしば理想的な状況設定をしているので、そこから少し設定をいじった場合に、理論結果がどのように変更されうるのかについては注意が必要です。実際、一般に実験は理想的な状況とは異なる環境で行われるものであり、理論としてはそのズレについても考慮することが求められます。ただし、普通のバルク物性を議論するときにはこのズレの影響は小さいことが多く、そこまで考慮しなくてもよいことがほとんどです。それゆえ、この「バルク物理量の robustness」は暗黙のうちに仮定されることが多いと思います。

今回の私の研究は、このあたりの微妙な問題を含めて、カイラル超流動体の軌道角運動量を理論的に議論したものです。[1,2,3] その中で特に、「理想的な状況から少しだけ設定をいじると、軌道角運動量は非常に大きく変化しうる」ということを示しました。つまり、素朴に期待される「バルク物性としての軌道角運動量の robustness」は成り立ちません。これは一見すると直感に反する結果のように思われますが、学部レベルの教科書的な基本に立ち返って考察すると自然に導かれる結論です。もう少し詳しく述べると、カイラル超流動体の軌道角運動量に関しては、上述の暗黙の仮定についての前提条件(外場中での熱力学極限の存在)が成立しない、ということがその根本的理由です。論文で行った議論は非常に単純ですが、単純すぎるがゆえに意外と盲点で気が付くまでに随分と時間がかかってしまいました。

それにもかかわらず研究を遂行することができたのは、自由に研究をさせてくれた物性研究所の懐の深さのおかげだと感じています。また、この研究の途中で、頭脳循環という研究プログラムの一環としてドレスデン(ドイツ)にある Max Planck 研究所に長期滞在できたことは非常にありがたい経験でした。改めて、物性研究所や科学研究費などの研究環境に感謝を表したいと思います。そして、そのような環境への恩返しのためにも、今後とも微力ながら物理学の発展に貢献していきたいと考えています。

[1] Yasuhiro Tada, Wenxing Nie, and Masaki Oshikawa, “Orbital Angular Momentum and Spectral Flow in Two Dimensional Chiral Superfluids”, Phys. Rev. Lett.114, 195301 (2015).

[2] Yasuhiro Tada, “Non-thermodynamic nature of the orbital angular momentum in neutral fermionic superfluids”, Phys. Rev. B 97, 214523 (2018).

[3] 多田靖啓、「カイラル超流動体の軌道角運動量は何によって決まるか？」、日本物理学会誌74, 93 (2019).

外国人客員所員を経験して

Shaoqiang Chen
East China Normal University
sqchen@ee.ecnu.edu.cn

Since I deeply respect ISSP, the Institute for Solid State Physics, the University of Tokyo, as an excellent research institute in the world, it was my great honor to visit ISSP as a visiting professor from December 2020 to May 2021. Affected by COVID-19 and by the resulted expiration of my visa, my visiting to ISSP was delayed two times. However, thanks to the great helps from Prof. Akiyama, Ms. Ishiguchi, and the other staffs of ISSP, I finally entered Japan in December 2020 successfully, just before the national announcement of entry restriction because of the serious situation of COVID-19. How lucky I was at that time!

In this visit to ISSP, I felt that I was coming back to home: I had been working as a PD in ISSP for five years from 2009 to 2014, focusing on the researches of T-shaped quantum wires and solar cells. Everything is still familiar to me. Although it is very serious outside, I feel safe and calm as normal in ISSP. Thanks to the kind guidance from Prof. Akiyama and the excellent facilities of ISSP, I have learned a lot of important knowledges and experimental skills, which are the solid foundations for my further researches.

In 2014, I joined East China Normal University in Shanghai as a professor, and started new researches on optical properties of perovskite microstructures. Perovskite materials with excellent optoelectronic properties, have shown remarkable progresses in both the field of solar cells and light emitting devices. For solar cells, conversion efficiencies more than 25% have been achieved, and for light emitting devices, perovskite-based vertical cavity surface emitting lasers (VCSEL) and distributed feedback (DFB) lasers have been fabricated, and very fascinating single-mode lasing properties have been demonstrated.

In order to study the detailed lasing mechanisms in perovskite based microcavities, I came back to ISSP, and started cooperation with Akiyama Lab with the supports of ISSP visiting professorship. We have developed a low-temperature liquid-phase growth method, and have fabricated various kinds of $CsPbBr_3$ perovskite micro-cavities, such as micro-hemispheres, microplates, micro-rods, and micro-cubes, on different substrates, with a size from several tens to 200 micrometers. A substrate dependence of the perovskite microstructures with this growth method has been observed. With the excitation of a femtosecond laser beam from a Ti: sapphire ultrafast laser system, all the microcavities show lasing behaviors under elevated excitation densities, both Fabry-Perot mode and whispering-gallery mode have been observed in the lasing spectra of the microcavities. The higher carrier density more that Mott density at lasing threshold indicates the lasing behavior in these perovskite microcavities should mainly be related to electron-hole plasma rather than exciton.

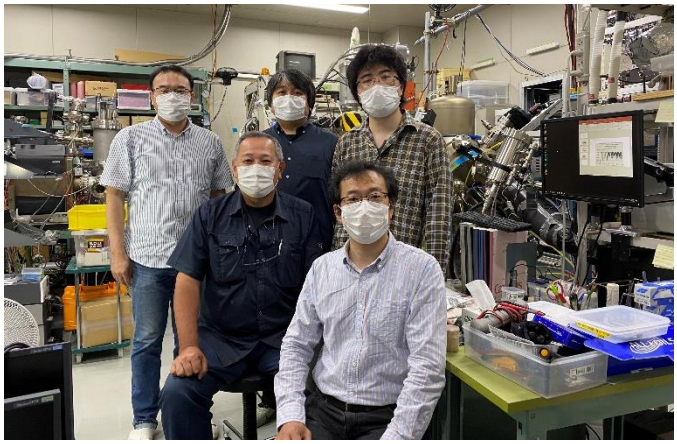
We measured the spectrally- and temporally-resolved lasing images of the microcavities with a streak camera, and have observed two importance features of the lasing from perovskite microcavities with increasing excitation fluences, one is the redshift of the dominant lasing spectra to low energy side due to the band gap renormalization (BGR) effect, another one is the blueshift of each lasing mode to higher energy side due to the reduction of the refractive index caused by the high injection carrier density. The lasing dynamics is merged with the transient BGR effect and the transient change of refractive index in perovskite microcavities.

We also fabricated $CsPbBr_3$ perovskite nanocrystals with a ligand-assisted recrystallization method, and sandwiched the perovskite nanocrystals with two high-reflectivity distributed Bragg reflectors (DBRs) to form a

VCSEL device, and single-mode lasing of the VCSEL has been observed. With an excitation power over 2 times of the threshold, short pulses with a pulse width around 23 ps have been obtained from the perovskite based VCSEL, demonstrating a potential application in short pulse generation of perovskite based VCSELs.

In the 5 months stay in ISSP, I really enjoyed trying new experiments, finding new phenomenon, and discussing new results with the members in Akiyama lab. We have already published 6 cooperated papers about these research results. The fruitful cooperation of this period will stimulate even more interesting results in the future.

ISSP is already a high-level international research institute, but the visiting professorship of ISSP promotes in-depth international cooperation and will make ISSP even famous. I gained benefits very much from this visiting professorship, and I want to give my sincere thanks to ISSP and all the members in Akiyama lab. Thank you very much!



客員所員を経験して

島根大学大学院自然科学研究科　　本山 岳

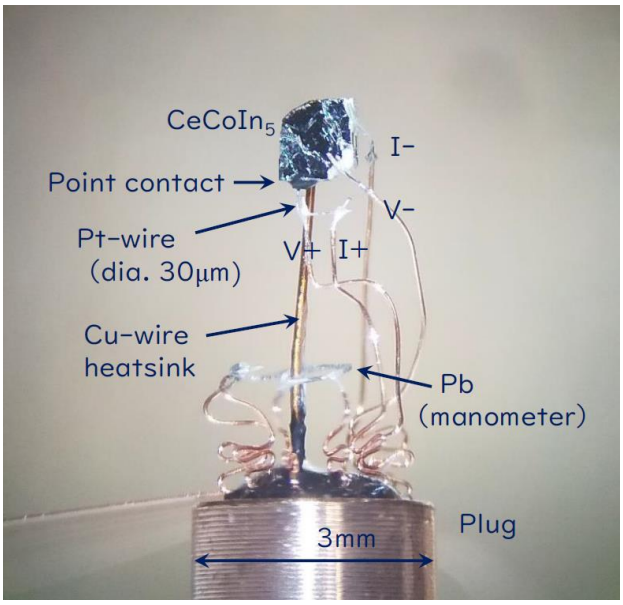
令和２年４月から１年間、物性研究所で客員所員をさせて頂きました。ホスト研究室の上床美也教授、郷地順助教、秘書の長崎尚子さん、その他の関係者の皆様には大変お世話になりました。上床研究室には、松林和幸（現：電通大）准教授が助教をされていた頃から毎年お世話になっています。特に私が島根大学に赴任直後の研究設備が整っていなかった時期に、毎度訪れるたびに実験のサポートから有益な議論まで多くの支援を頂きました。厚くお礼申し上げます。

私はこの 1 年間上床研究室で、18T/20T（4.2K/2.2K）超伝導マグネット付き希釈冷凍機を利用して圧力下点接合分光実験に取り組みました。本課題は、重い電子系化合物の物質探索とともに私が注力している課題で、物性研共同利用研究でも度々申請してきました。点接合分光法は、トンネル分光法と類似しているものの有限の接合があるために界面での特異な伝導を観測できる利点と、一方で接合界面での伝導の影響により対象物質毎の点接合の作成条件の評価が難しいことが特徴となっています。近年の取り組みによって、Sn, Pb, Nb のような単金属超伝導体において圧力下で実行可能となってきました。適応範囲を磁場中かつ対象物質を重い電子系化合物へと拡げるために、客員所員の期間を利用して、$CeCoIn_5$ において高磁場で空間変調する超伝導状態が実現する FFLO 状態の観測に挑戦しました。

FFLO 相内でスペクトルが磁場に敏感に変化することを期待して取り組みましたが、残念ながら期間内に FFLO 状態の観測には至りませんでした。今回、点接合分光測定を試みた点接合のセッティングの様子を図に示します。今年度、不幸にもコロナ禍となり物性研への訪問が困難になってしまい、緊急事態宣言が解除された年度末に 2 泊 3 日で１回のみの挑戦となってしまいました。島根県では感染者が少なかったため、コロナウィルスに対する緊張感はいつまでも継続し、帰県後に１週間の自宅待機の必要性もあり、結果、島根県の感染拡大の防止には貢献できたものの、点接合分光測定に関しては今後も引き続き挑戦していくこととなりました。

一方でこのような状況では、実験環境も大きく変化していきます。様々なところでアフター（ウィズ）コロナにおける実験環境の議論を聞きます。我々の研究室でも上床研究室の環境を参考に遠隔操作による実験の検討を始めました。これまでは真空ポンプの音・デジタルマルチメータが表示している値など現場にいて感じ取ることの出来る空気感を大事にするように教育していたので、コンピュータに頼るのは最小限にしていました。しかし、これからの学生さんはオンラインで発表する能力が必要とされるのと同様に、オンラインで実験を行いその空気感を読み取ること・オンラインの実験環境を構築することが必要な能力とされる時世になったのだと考えを改めました。

上記は末端の些細な一例で、困難に直面した時には様々に解決策を提示してくださいました。常に新しい技術を試験し、その結果を惜しみなく教授してくださる上床先生をはじめ物性研の皆様に非常に感謝しております。私自身希釈冷凍機の改良をしてきましたが、新しい技術の開発には労力と時間が必要で、成果が伴わない場合が多々あります。このような開発が評価され、また、共同利用研究などで新しい挑戦の機会を私どもに与えて下さる物性研究所のこのようなシステムに深く感謝いたします。今後もどうぞよろしくお願いいたします。



点接合分光測定の圧力セル内部の様子

客員所員を経験して

群馬大学　　樋山　みやび

2020 年度の 1 年間、客員所員として、受け入れ先の秋山英文教授ならびに秋山研究室のみなさんには大変お世話になりました。私は、2013 年から 2017 年まで、4 年ほど特任研究員として秋山研究室で過ごさせていただきました。この期間に、機能物性研究グループの杉野修教授、当時杉野研にいた野口助教(現静岡大准教授)、極限コヒーレント光科学研究センターの原田慈久教授と共同研究を進めることができました。

秋山研では、ホタル生物発光の基質であるルシフェリンと、発光体であるオキシルシフェリンの電子励起状態を解明するため、量子化学計算により吸収・蛍光スペクトルの解析を行ってきました。ホタル生物発光は pH や温度で発光色が変化します。この発光色を決定しているのはオキシルシフェリンであることは知られていますが、オキシルシフェリンにはケト型、エノール型、エノレート型が存在し、どの構造が発光色に関与しているか不明です。そのため、pH や温度で発光色が変化する理由を説明できるほど、発光メカニズムは解明されていません。

秋山研にて計算を進めて行くうちに、量子化学計算だけでは溶媒効果の扱いが難しいことがわかってきました。ちょうどその頃、野口助教との共同研究が始まり、溶媒の水分子を露わに取り入れたオキシルシフェリン水溶液の大規模分子動力学計算を行うことにより、「基底状態ではエノール型が安定になる」という結果が得られました。このとき得られた構造を用いて、オキシルシフェリン吸収スペクトル計算を行ったところ、実験吸収スペクトルをよく再現する結果となりました。野口助教との共同研究はさらに発展し、ケト型・エノール型・エノレート型それぞれに配位する水分子の様子が基底状態の場合と異なることから、「励起状態ではオキシルシフェリンのケト型が最も安定」という結果が得られています。

群馬大に移ってからは、物性研共同利用に申請することで、学生たちとともに秋山研での生物発光実験と物性研スパコンを利用した理論計算を行ってきました。今回の客員期間では、半年ほど県外への移動が規制されていたため、10 月からやっと物性研で実験を開始することができました。物性研からの支援により、群馬大の学生たちは比較的長期にわたり秋山研で実験することができ、群馬大で合成したケージド化合物の光解離実験や、ホタル生物発光の基質類似体を使った生物発光実験を進めることができました。また、物性研のスパコン利用に関して、大型計算機室のスタッフからのサポートを直接受けることができ、非常に助かりました。

客員所員の研究期間はあっという間に終わってしまいましたが、今後、物性研共同利用を申請して、共同研究を発展させていきたいと考えています。最後になりますが、秋山教授、杉野教授、秋山研のみなさん、大型計算機室スタッフのみなさんに改めて感謝したいと思います。

客員所員を経験して

北海道大学大学院理学研究院　　井原 慶彦

2020 年度の一年間、小濱芳允所員にホストをしていただき客員准教授としてお世話になりました。コロナ禍という未曽有の事態に見舞われ、来所がままならない状況の中、オンラインでの研究打ち合わせ、およびオンライン飲み会で小濱研究室メンバーの皆さんとは楽しく議論させていただきました。また、北大の所属研究室におけるパルス磁場環境の拡充のため金道先生には大変お世話になりました。厚くお礼申し上げます。

2019 年度末に客員准教授として「磁場誘起量子凝縮相の微視的電子状態解明」をテーマとした研究を推進できることが決まったころは、まさか世界がこれほどまでに一変してしまうとは想像もしていませんでした。物性研へ滞在しパルス磁場中 NMR 測定に没頭できる日々への期待は儚く消え去り、最初の緊急事態宣言が発令される直前の 2020 年 3 月に訪問したのを最後に、物性研での出張実験はおろか、所属研究室における研究活動も大きく制限される試練の年となってしまいました。自宅での研究を余儀なくされた結果、自然と手はデータ整理および論文執筆へと向かい、これまで取りためていた実験結果をまとめる時間が長くなりました。そんな中で、オンライン会議システムを利用し、小濱先生および研究室メンバーと有益な議論ができたことは、私にとっての大きなモチベーションとなっていました。

本来、この誌面では客員所員として物性研に滞在し、達成した成果の一端をご紹介できればよかったのですが、今回はそれが叶わないため、代わりに私たちの研究と、客員所員として実施しようとしていた計画を紹介させていただきます。私たちは、ここ数年で装置開発を進めてきたパルス磁場中 NMR 測定を使って、非常に強い磁場中で実現する興味深い量子状態の観測を目指しています。原子核スピンをミクロな測定プローブとして、原子核を取り巻く電子スピンからの影響を観測する NMR 測定は、強い磁場により核磁化の分極を大きくすることで測定感度が向上するため、一般的には強磁場との相性がとても良い測定手法であると言えます。しかし、パルス磁場となると事情は全く異なり、高速で時間変動する磁場に対しピンポイントで共鳴条件を満たすラジオ波を照射するという、針に糸を通すような精密制御が求められます。この問題を克服するため、世界的にはマグネットを巨大化し、磁場発生時間を長くすることで時間変動を抑え、共鳴を見つけやすくするというアプローチが取られています。一方で、小濱研究室で開発されているフラットトップパルス磁場は磁場波形を能動的に制御し、マグネットサイズはそのままで磁場の時間変動を抑え込むことができます。針のたとえでいうと、糸を通す穴が大きな針が登場したと言えます。これにより測定難易度は大きく低下し、パルス磁場中 NMR 測定開発が一気に実用化レベルまで進展しました。

2020 年度の当初計画では、物性測定が行えるレベルまで仕上がってきた装置を利用し、強磁場中で興味深い量子状態を示す量子スピン系、マルチフェロイック系、そして希土類化合物などに対してパルス磁場領域でのミクロな電子状態を明らかにしていく予定でした。また、希土類系などの伝導体や核スピン緩和時間の長い試料の測定に必要となるロングパルスマグネットでの NMR 装置開発も進めたいと考えていました。物性研での長期滞在が難しくなったことで、ロングパルスマグネットを利用した測定はできませんでしたが、代わりに北大に導入したミニパルスで 20 テスラを超える磁場領域までの測定ができるようになり、これを用いてマルチフェロイック系における磁場誘起磁気構造変化を捉えること成功したことはこのプロジェクトで達成できた一つの成果と言えます。この系では、つい最近物性研において 30 テスラまでの測定も実現し、第二の磁気構造変化が存在することも明らかになってきています。

世界的に困難な一年間ではありましたが、その中でも前に進むことができたのは小濱先生、金道先生らとの共同研究が後押ししてくれていたからだと思います。大手を振って出張実験ができるようになった暁には、またお世話になりたいと考えております。今後ともどうぞよろしくお願いいたします。

客員所員を経験して

早稲田大学先進理工学部　　高山 あかり

「対称性の破れた原子層構造における新奇物性解明の研究」を研究テーマに、2020 年度の物性研客員所員として採用いただきました。採用通知をいただいた時点ではできるだけ柏キャンパスに常駐して実験しようと意気込んでいたのですが、残念ながら新型コロナウイルスによる緊急事態宣言の発令等で訪問制限がかかり、実際に訪問できたのは 9 月になってからでした。2020 年度以前にも物性研共同利用で年に何度か物性研訪問を訪問する機会があったのですが、結果的に 2020 年度の訪問期間が過去一番短くなってしまったのが心残りです。

このような状況ではありましたが、受入先の小森文夫先生の下、走査トンネル電子顕微鏡(STM)による単原子層ホウ素シート「ボロフェン」の成長条件の決定を目標に研究を行いました。本研究テーマは物性研の松田巌先生との共同研究である「陽子と光子を用いた電子ビーム協奏利用によるディラック電子系ボロフェンの研究(基盤研究 B)」の一環であり、ホウ素がハニカム格子を組んだボロフェンについて、基板上での成長条件を明らかにすることで構造解析およびバンド構造の詳細な理解につなげることを目的としています。小森研には、融点の高いホウ素を蒸発させ、基板に原子 1 層分を蒸着し、表面観察を行うという実験に適した装置があり、目的に沿って実験することができました。実際の実験は、基板となる Ag(111)単結晶を清浄化してホウ素を蒸着して STM 観察する、ということを朝から晩まで 2〜3 ヶ月ひたすら繰り返す、というなかなかハードな内容だったのですが、修士 2 年の学生が主体的に頑張って取り組んでくれました。今回の実験の結果、基板に対するボロフェンの成長方位は基板のテラスサイズに影響することを見出し、実験をした学生の修士論文となりました(ちなみに、この学生はこの春から物性研松田巌研究室で博士課程に進学しました。客員所員となったことが少しは縁になったのかなと思っています)。

研究以外の話になりますが、柏キャンパスは非常に居心地が良く大変気に入っています。柏の葉キャンパス駅から柏キャンパスまでがちょうど良い散歩コースだったり(何度か終電ギリギリで駅まで走りましたが)、秋晴れの空がきれいに広がっていたり、ランチにお寿司を食べたり、カフェテリアのコーヒーで一息ついたり…。何よりずっと実験していられるという空間が最高です。また、柏キャンパスでは共同研究者をはじめ、顔馴染みの学生さんまで、たくさんの方々に声がけしていただきました。この数年は学生教育がメインになって自分で直接実験することが少なくなってきていますが、物性研で生き生きと研究している皆さんと交流すると、私も実験頑張ろう！という意識が強くなります。特にコロナ禍で実験が進まない時期でもあったので、この時期に採用していただいたのは自身を奮い立たせる上でも有り難い研究環境でした。

期間中、受入所員の小森文夫教授をはじめ、松田巌教授、飯盛拓嗣氏、柳澤啓史氏には大変お世話になりました。私のみならず一緒に訪問した学生へも丁寧に指導して下さり、大変感謝しております。客員所員の任期中はコロナ禍の制限もあり、あまり貢献できませんでしたが、物性研で実験したい研究テーマがまだまだありますので、引き続き共同利用に申請したいと思います。

客員所員を経験して

東京工業大学　理学院　物理学系　　田中 秀数

2020 年度に中性子科学研究施設の益田隆嗣所員を受け入れ教員として、1 年間客員所員を務めました。益田研究室とはこれまで基底一重項磁性体 $CsFeCl_3$ の圧力誘起秩序相での位相モード（Nambu-Goldstone モード）と振幅モード（Higgs モード）のハイブリッドモードの観測など、圧力誘起量子相転移とそれに伴う新奇な磁気励起の共同研究を行ってきました。その縁で益田所員より客員所員のお話を頂きました。2020 年度は本務先の東工大で物理学系長（東大での専攻長に該当）が決まっており、忙しい一年になることが予想されましたので、お引き受けすべきか否かを考えましたが、定年まで残された期間が少なかったので、このような時こそ時間を見つけて集中的に研究に取り組もうと思い、お引き受けすることに致しました。ここ 5 年間ほどスピン 1/2 の三角格子反強磁性体などのフラストレーションの強い量子スピン系の磁気励起を中性子散乱で調べ、スピノン励起の存在を強く示唆する結果が得られていましたので、この研究を更に深めることを研究テーマと致しました。

せっかく 1 年間物性研で客員所員を務めるので、この間に新物質を開拓し、その物質の磁気励起を測定したいと考え、緊急事態宣言下の 2020 年 4 月から半年間、ハロゲン化合物のフラストレート量子スピン系の物質開拓を行いました。この年はコロナ禍のために本務先で物理学系長として対応しなければならないことが多く、緊急事態宣言下でも殆ど毎日出勤しておりました。また、授業がオンラインとなり、その準備にかなり時間が取られましたが、物質作成は四六時中実験室に詰めなければならないことはありませんので、空き時間を有効活用して新物質開拓に勤しみました。ある結晶構造を参考に元素を変え、合成法を変えて色々と試しましたが、残念ながら求めるフラストレート量子スピン系の新物質はできませんでした。それで益田所員とも相談をし、基底状態がシングレットのスピンダイマー系 $KCuCl_3$ の圧力誘起量子相転移を中性子散乱で研究することに致しました。$KCuCl_3$ は固体で最初に Higgs モードが確認された $TlCuCl_3$ の姉妹物質で、量子相転移の臨界圧力は 0.82 GPa です。2021 年 2 月に 1 週間のビームタイムを頂き、中性子散乱実験を行いました。結晶を b 軸が中心軸になるように直径 4 mm、長さ 10 mm の円柱状に成形し、上床所員の考案した圧力セルに入れて加圧し、J-PARC 物質・生命科学実験施設に設置された高分解能チョッパー分光器 HRC を用いて実験を行いました。このとき、益田所員の他、助教の浅井晋一郎さんと博士課程の菊地帆高さんには実験のセットアップで大変お世話になりました。菊地さんが実に手際よく加圧装置を扱い、丁度臨界圧力になるように加圧してくれたのには感心しました。このときの実験では臨界圧力の他に比較のために常圧での励起スペクトルを測定しました。圧力セルに入れるために試料サイズを小さくしなければなりませんでしたが、明瞭な励起スペクトルが観測され、安堵致しました。次のステップは圧力を臨界圧力以上にして Higgs モードを含む磁気励起の分散関係の全容を観測することです。この実験は本原稿の締め切り 6 月 11 日の翌週に予定されています。

客員所員在任中には国際超強磁場科学研究施設の金道研究室と共同で、スピン 1/2 の三角格子反強磁性体 $Ba_3CoSb_2O_9$ の磁場中量子相転移を磁化測定で詳しく調べる実験にも取り組みました。この実験は主にリモートで行いました。こちらで試料ホルダーに試料を詰め、金道研の技術専門職員の松尾晶さんに送って測定してもらいました。この実験は磁場の方向を三角格子面から変化させ、量子相転移の磁場角度相図を求めることを目的に行いました。様々な角度を持った石英試料ステージを松尾さんに用意してもらい、その上に単結晶 1 個を載せて測定しました。単結晶が 1 個の場合には複数個の場合に比べて結晶方位のバラツキがなくなるために、相転移での磁化の異常が鋭くなります。また強磁場の測定技術は日進月歩で、小さな試料でも十分な感度で磁化を測定することができました。この為に、以前の測定では検出できなかった新たな量子相転移を幾つか捉えることができました。

客員所員在任中の 1 年間はコロナ禍のために、物性研に出向くことは殆どありませんでしたが、益田研究室や金道研究室の皆さんのご好意とご協力で気持ちよく楽しく研究を行うことができました。改めてお礼を申し上げます。

客員所員を経験して

物質・材料研究機構　　今中 康貴

コロナの嵐が吹き荒ぶ昨年度、物性研究所の客員所員を経験するという貴重な機会を得ることができました。まさかこのような１年になるとは当初予想しておりませんでしたが、おおよそ四半世紀ほど前に六本木キャンパスで心血注いで行っていた一巻きコイル法によるサイクロトロン共鳴の測定を、当時三浦登先生の助手をされていた松田康弘先生と共に再び行うというのは、ある種感慨深いものもありました。

右の写真は私が学生の頃の六本木のＣ棟の横型一巻きコイル装置の前でとった写真です。当時は最高磁場 150T での半導体のサイクロトロン共鳴や磁気分光、磁性体の磁化測定、電子スピン共鳴、ファラデー回転などの計測が非常に高度に整備され、国内外の研究者の多様な研究に供されており、世界でも唯一物理の議論に絶えうるメガガウス領域での様々な成果がこの一巻きコイル超強磁場発生システムによりもたらされていました。

今思えば三浦先生のおかげで、世界中の強磁場物性研究のトップランナーたちと一緒に実験する機会にも恵まれまして（当時は入れ替わり立ち替わりよく来るなと思っていましたが。。。）、破壊型特有のショット後のなんとも言えない焦げた匂いとともに顔も手も真っ黒にしながら実験をしていたことを懐かしく思い出す次第です。

一巻きコイル装置においては、柏の葉キャンパスに移ってから縦型も追加され、横型のヘリウムフロー型クライオスタットでは難しい 4K 以下の測定や 200T 近い測定が安定的に可能となるなど、六本木時代では叶わなかった測定が可能となったことは大変大きな発展と思います。

逆に時代の流れであまり行われなくなった測定もあり、その一つが今回取り組みましたサイクロトロン共鳴という測定かもしれません。100T 領域での共鳴を観測するため、いわゆる遠赤外領域のレーザーラインが必要となりますが、発振強度が大きいラインが少ないことや、遠赤外光をミラー系で一巻きコイルの中に設置されたフロー型クライオスタットの中にあるわずか 1.5mmΦ 程度の試料に集光し、さらに反対側の検出器まで導くことなど、非常に難しいアライメントが求められることもあり、人の移り変わりやテーマの変遷に伴い、実験の機会が減ってしまったことは

自然の流れだったのかもしれません。

しかしながら近年、これまで研究しつくされたはずの狭ギャップ半導体や半金属試料において、トポロジカル絶縁体やグラフェンのような従来にも増して興味深い物質が発見されるに至り、遠赤外光を使って非接触に輸送的情報が得られるサイクロトロン共鳴の測定が非常に有効ではないかという内容で提案させていただき、今回客員所員としての活動をさせていただくことになりました。

春先はいきなりコロナによる日常事態宣言があったことからも、実際にはなかなか柏の葉には出向けずにおりましたが、少し状況が落ち着いてきた秋口よりまとまったマシンタイムを何回か取っていただき、遠赤外レーザーの調整や様々な関連装置の立ち上げのための調査などから始め、当時の記憶を部分的にたどりながら松田先生やポスドクの Yang 君との協力のもと、最終的には当初の予定通りにサイクロトロン共鳴の実験をいくつかの試料について進めることができました。

いくつか測定を行った試料の中にビスマスがありますが、ビスマスは六本木時代に強磁場で重点的に研究され、強磁場中での半金属-半導体転移など非常に興味深い成果が得られた物質でもあります。近年では ARPES による表面状態の研究も進んでいましたが、サイクロトロン共鳴については、半金属の高いプラズマ周波数のため、バルク試料では限定的な測定が行われていました。

今回東京大学理学部の長谷川研から提供していただいた薄膜試料を使うことで透過型のサイクロトロン共鳴測定が可能となり、一巻きコイル法で測定を行ったところ、非常

に複雑なサイクロトロン共鳴とその膜厚依存に関する興味深いデータを初めて得ることができました。

特に試料膜厚による急激な共鳴吸収強度の変化はキャリア濃度の変化と直接関係し、フェルミエネルギーと電子や正孔バンドとの相対的なエネルギー位置の変化によるものと考えられ、現在、薄膜試料における膜厚による金属絶縁体転移の可能性について検討しているところです。

今回久しぶりに行わせていただいた超強磁場サイクロトロン共鳴測定ですが、ある意味非常に強力なオンリーワンツールともなりますので、このままで立ち止まることなく、是非ともさらなる発展を、特に若い強磁場研究者に目指していただければと個人的には思っております。

最後に今回の客員所員の活動を受け入れていただいた松田康弘先生、ハードな実験を毎回お手伝いいただいたYang Zhuo 君、強磁場関係者の皆様に感謝いたしまして、私の客員所員の体験談を終わらせていただきたいと思います。ありがとうございました。

ISSP ワークショップ

「物性科学におけるデータ科学の今と未来」

物質設計評価施設　　川島 直輝

開催期日：2021 年 2 月 22 日（月）、24 日（水）

場　　所：ZOOM 開催

URL：　https://www.issp.u-tokyo.ac.jp/maincontents/seminar/all2.html?ptype=seminar&pid=12422

世話人名：川島 直輝（東大物性研）、尾崎 泰助（東大物性研）、杉野 修（東大物性研）、野口 博司（東大物性研）、福島 鉄也（東大物性研）、井戸 康太（東大物性研）、福田 将大（東大物性研）、吉見 一慶（東大物性研）、田村 亮（東大新領域、物質・材料研究機構）

近年、物質科学の課題解決へのアプローチとして、理論科学、実験科学、計算科学に加え、データ科学が活用されてきている。データ科学を活用することで、新しいシミュレーション方法の構築、データの高精度化、物質探索の加速などの応用研究が進められている。その一方で、基礎となるデータを今後どのように管理し、再活用していくかという点も重要になりつつある。本ワークショップは、データ活用に関連してアプリケーション開発やデータリポジトリ立ち上げなどを行っている吉見(物質設計評価施設)が中心となって企画し、物性・生命化学系のデータ科学手法を用いた最先端の応用事例および、データの利活用という観点からデータベース構築及びその保持、連携に関する取り組みに関して意見交換を行った。さらに、これらの事例をもとに、パネルディスカッションを行い、データを切り口に今後どのようなフレームワークが構成され、また今後の応用研究へと発展していくかについての議論した。初日は物性・生命化学系の分野における機械学習の応用研究を中心とし、2日目はデータリポジトリ・データベース関連に関する最先端の取り組みに関連した話題を中心として講演・議論をお願いした。全体で209件の参加登録があり、実際の参加は瞬間最大値が初日が150、2日目が120であった。研究発表をいくつか挙げると杉野(物性研)は物性研究の基礎的な側面における機械学習の応用、とくに、Kohn-Sham交換相関ポテンシャルの計算について、尾崎、福島(物性研)、知京(物材機構)はハイスループット計算やそれに基づく物性データベースの構築について述べた。機械学習の実験データ解析への応用に関連して、寺山(横浜市立大)はタンパク質分子の3次元構造推定、井上(物性研)はアミノ酸配列からの機能予測について議論した。データリポジトリやデータベース構築に関連して、桂(物材機構)が既存の文献からのデータベース構築とその応用について、田浦(東大情基セ)がmdxプロジェクトの現状について報告した。また、小林(物性研)はデータの蓄積と機械学習に基づくレーザー加工技術について、三宅(産総研)がデータ同化による計算データと実験データの統合的利用の試みについて磁石材料の事例を紹介した。これらの研究発表や報告に基づいて、パネルディスカッションでは、データの組織的取り扱いや今後の応用の展望について、小林(物性研)、田村(東大新領域、物材機構)、桂(物材機構)、庄司(トヨタ)がパネリスト、吉見(物性研)がモデレータとなって、意見交換を行った。

■プログラム

●　2 月 22 日（月）

座長　川島 直輝

13:00～13:05　　**森 初果**（東京大学 物性研究所）　はじめに

13:05～13:50　　**常行 真司**（東京大学大学院理学系 研究科）
マテリアルズインフォマティクスの近況について

座長　杉野 修

14:00～14:30　　**土師 将裕**（東京大学 物性研究所）
圧縮センシングによる走査トンネル顕微鏡の高精度測定

14:30～15:00　**木村 隆志**（東京大学 物性研究所）
機械学習を利用したコヒーレント回折イメージング高度化の試み

15:00～15:30　**田村 亮**（東京大学大学院新領域創成科学研究科，物質・材料研究機構）
ベイズ最適化と材料・物性研究への応用

座長　井戸 康太

15:45～16:15　**尾崎 泰助**（東京大学 物性研究所）
網羅計算による結晶構造探査

16:15～16:45　**杉野 修**（東京大学 物性研究所）
粒子密度の機械学習と密度汎関数理論

座長　野口 博司

17:00～17:30　**寺山 慧**（横浜市立大学）
クライオ EM 密度マップからの生体分子ダイナミクス情報推定-データベース・シミュレーション・機械学習の融合-

17:30～18:00　**井上 圭一**（東京大学 物性研究所）
タンパク質のボトムアップ機能向上への機械学習法の応用

座長　福田 将大

18:00～19:00　ポスター発表

● 2 月 24 日（水）

座長　田村 亮

10:00～10:30　**桂 ゆかり**（物質・材料研究機構）
Starrydata: 論文中のグラフから集めた材料実験データのデータベース

10:30～11:00　**徐　一斌**（物質・材料研究機構）
ビッグデータ時代の材料データベース

11:00～11:30　**田浦 健次朗**（東京大学 情報基盤センター）
mdx: データ科学・データ駆動科学のための大学の情報基盤とコミュニティ創成を目指して

座長　古宇田 光

11:30～11:50　**小川 浩司**（文部科学省）
マテリアル DX プラットフォーム構想実現のための取り組み

座長　福島 鉄也

13:00～13:30　**小林 洋平**（東京大学 物性研究所）
レーザー加工の学理探索におけるデータ科学

13:30～14:00　**三宅 隆**（産業技術総合研究所）
データ駆動手法による遷移金属合金の探索と理解

14:00～14:30　**知京 豊裕**（物質・材料研究機構）
データ駆動型材料研究の潮流と自律的材料探索の可能性

座長　尾崎 泰助

14:45～15:15　**福島 鉄也**（東京大学 物性研究所）
高速・高精度の第一原理計算を用いたハイスループットスクリーニング手法の開発
~不規則系物質への応用~

15:15～15:45　**庄司 哲也**（トヨタ自動車株式会社）
物質材料の研究開発の DX とデータ利活用の現状と課題

座長　吉見 一慶

16:00～17:00　パネルディスカッション ~データの扱い方・質の確保に向けて~

小林 洋平（東京大学 物性研究所）

田村 亮（東京大学大学院新領域創成科学研究科，物質・材料研究機構）

桂 ゆかり（物質・材料研究機構）

庄司 哲也（トヨタ自動車株式会社）

17:00～17:05　**川島 直輝**（東京大学 物性研究所）

終わりに

ISSP ワークショップ

The International Workshop on Quantum Magnets in Extreme Conditions

【日時】 2021 年 3 月 22 日（月） 21:00-24:00
2021 年 3 月 23 日（火） 21:00-24:00
2021 年 3 月 24 日（水） 21:00-24:00
2021 年 3 月 25 日（木） 21:00-24:00
2021 年 3 月 26 日（金） 21:00-24:00

【会場】 Zoom による研究会形式

【世話人】小濱芳允（物性研）、Marcelo Jaime (Los Alamos National Laboratory)、Frédéric Mila (École Polytechnique Fédérale de Lausanne)

【URL】 https://ykohama.issp.u-tokyo.ac.jp/qmec2020/index.html

超高圧、強磁場、超低温などの極限環境下では、物質は特殊な状態を示す。歴史的には超低温における超流動や超伝導現象、超高圧における絶縁体―金属（超伝導）転移、強磁場での量子ホール効果など多種多様な現象が知られている。近年でも、100 GPa 以上の超高圧領域で水素化物の室温超伝導が実現されたように、極限環境を取り巻く技術発展と呼応して、新奇現象が発見され、物性物理コミュニティに話題を提供し続けている。

本研究会はそのような極限環境下での物性物理についての国際会議であり、特に量子スピン系の最近の話題にフォーカスを絞った。量子スピン系では、$RuCl_3$ の量子スピン液体や、$SrCu_2(BO_3)_2$ のプラケット状態やスピンネマテック相など、極限環境下での新しいトピックスが近年報告されており、活発な議論が期待できた。しかし COVID-19 の拡大のため、多くの国際会議がキャンセルされており、例えば強磁場物性の国際会議である The International Conference on Research in High Magnetic Fields (RHMF)は 2020 年度の開催が見送られていた。このような状況を踏まえて本研究会では、2020 年 9 月の開催を見送ったものの、素早く 2020 年度内でのオンライン開催を決め、世界の研究者が最新の研究成果について議論する場を提供した。そもそも物性研は 2018 年に達成された 1200 テスラの超強磁場発生や、物質設計評価施設における多重極限環境など、世界に誇る極限環境を発生できる施設である。極限環境についての本国際会議を主催するに相応しい研究所であり、この開催を通じて更なる国際ネットワークの構築も進められた。

もう一つの本研究会の特徴は日本時間で 21:00～24:00 という深夜開催のスケジュールが挙げられる。このスケジュールはヨーロッパ、アメリカ、アジアという 3 つの地域から等しく参加者を募るために設定した。本会議の登録者は 438 人となったが、ここで日本からの参加者は全体の 3 割程度の 100 名ほどであり、ヨーロッパおよびアメリカからの参加者が大変多い会議となった。参加費を徴収しなかったためか、学生や若手研究者のみならず、Natue Physics 誌のシニアエディターなど、様々な大学・企業から参加があり、最近のトピックスについて活発な議論が進んだ。このような多種多様の参加者が集う国際会議で、森所長のオープニングトーク、5 名の物性研所属者による招待講演、そして瀧川元所員の引退についての報告も兼ねたクロージングトークがあった。これらは、物性研究所の国際的な物性コミュニティにおける存在感や発信力の向上に繋がると考えられる。Zoom による参加人数の集計では、320 人（月）、234 人（火）、221 人（水）、179 人（木）、151 人（金）の参加者が確認され、5 日間の延べ参加人数は 1105 人となった。25 名の招待講演者の中で 4 名の女性研究者が発表したこと、12 名のアジアの研究者、8 名のヨーロッパの研究者、5 名のアメリカの研究者が発表したことも記述しておく。また参加が難しかった研究者も後々見返すことができるように、一部の発表スライドは、国際会議のホームページにアップロードした。

本研究会を終えて、オンライン形式の国際会議の有効性を確認できた。しかしながら同時に、Excursion、Banquet、Poster Session、集合写真撮影など、大規模なオンライン会議では開催が難しいイベントの不足を痛感す

ることになった。このようなイベントを途中で挟めなかったことが、参加者の息切れを誘うことになり、日を追うごとに参加者の減少が見られる原因となった。（1200 人程度の参加人数を途中で見積もったが、結果的に 1105 人とやや下回った。）参加者の顔ぶれを確認すると、学会の初日は若手が非常に多く、一方シニア研究者は最終日まで参加する傾向があった。本研究会は 25 名の招待講演者で構成されており、全て質の高い発表であったため、研究内容をよく知るシニア研究者は最後まで参加したと思われる。一方、学生や若手にとってはPoster Sessionなどで、学会により深く参加してもらう必要性があった。オンライン会議特有の難しさであるが、一方通行の情報発信では、内情をよく知らないと興味が続かないことが一因と思われる。このような反省点があるものの、全体としては盛況な国際会議となった。特に、多くの参加者から 2023 年に The *second* International Workshop on Quantum Magnets in Extreme Conditions を開催したいと提案を頂いたのは、特筆すべき事項と思われる。これが実現すれば、本会議は記念すべき第 1 回目であり、これは第 2、第 3 と続きうる本会議で、将来的にも物性研の影響力が保たれることを意味している。そういった意味でも、本会議を物性研主催で行ったことは、大変有意義であった。

【謝辞】

本国際会議のホームページは小濱研究室の松井一樹研究員によって作成されました。Zoom 会議の進行も松井一樹研究員、および同研究室の大学院生である厳正輝、神田朋希、松山直史らによって行われました。また瀧川仁元所員および鈴木博之 URA はプログラムやスケジュール等について有用なアドバイスを下さいました。瀧川仁元所員および廣井善二所員には司会を担当して頂きました。森初果所長、瀧川仁元所員、廣井善二所員、松田康弘所員、武田晃助教には講演を行っていただきました。この場をお借りして、皆様に深く感謝申し上げます。

【プログラム】

講演者		所属	題目
3 月 22 日（月）		座長	Prof. Mladen Horvatić
NA	21:00	Hatsumi Mori	ISSP
			Opening talk (1)
NA	21:15	Marcelo Jaime	Los Alamos national Lab
			Opening talk (2)
1	21:30	Frédéric Mila	École Polytechnique Fédérale de Lausanne
			The saga of the Shastry- Sutherland compound $SrCu_2(BO_3)_2$
2	22:00	Masashi Takigawa	ISSP
			High pressure phases of the Shastry-Sutherland spin system $SrCu_2(BO_3)_2$
3	22:30	T. Sakurai	Kobe University
			Development of Multi-extreme THz ESR System and Its Application to Orthogonal Dimer Spin Substance $SrCu_2(BO_3)_2$
4	23:00	Anders W. Sandvik	Boston University
			On the phase transition between plaquette-singlet and antiferromagnetic phases in $SrCu_2(BO_3)_2$ under high pressure
5	23:30	Sara Haravifard	Duke University
			Phase Diagram of Shastry-Sutherland Compound $SrCu_2(BO_3)_2$ at High-Pressure and High-Field
3 月 23 日（火）		座長	Prof. Masashi Takigawa
6	21:00	H. M. Ronnow	École Polytechnique Fédérale de Lausanne
			Neutron Scattering and Specific Heat Results from the Shastry-Sutherland Compound $SrCu_2(BO_3)_2$ Under Pressure

7 21:30 P. Sengupta Nanyang Technological University
Weyl-triplons in $SrCu_2(BO_3)_2$

8 22:00 P. Corboz University of Amsterdam
Tensor network study of $SrCu_2(BO_3)_2$ under pressure

9 22:30 Yoshimitsu Kohama ISSP
Entropy near the magnetization plateau of $SrCu_2(BO_3)_2$

10 23:00 A. Saul Centre Interdisciplinaire de Nanoscience de Marseille
Magnetoelastic interaction in the two-dimensional magnetic material $MnPS_3$ studied by first principles calculations and Raman experiments

3 月 24 日（水曜） 座長 Prof. Zenji Hiroi and Frédéric Mila

11 21:00 Marcelo Jaime Los Alamos National Laboratory
Field-dependent thermal, magnetic, and lattice properties of the quantum spin liquid candidate α-$RuCl_3$

12 21:30 Alix McCollam High Field Magnet Laboratory (HFML-EMFL)
The high field Fermi surface of $CeRhIn_5$

13 22:00 Y. Kato Univ. of Tokyo
Magnetic-field-induced tunability of magnon bound states: Scattering resonances and Efimov states in $Yb_2Ti_2O_7$

14 22:30 Nicolas Laflorencie CNRS
Disorder-Induced Revival of Bose-Einstein Condensation in the Quantum Magnet DTNX at High Magnetic Fields

15 23:00 Adrian E. Feiguin Northeastern University
A time-dependent approach to inelastic scattering spectroscopies in and away from equilibrium; beyond perturbation theory

3 月 25 日（木曜） 座長 Dr. Marcelo Jaime

16 21:00 Zenji Hiroi ISSP
Dimensional Reduction by Geometrical Frustration

17 21:30 Mladen Horvatić LNCMI-CNRS
Distinguishing dimensionality of a spin system: determination of the Tomonaga-Luttinger parameter K in quasi-1D systems

18 22:00 Yasuhiro H. Matsuda ISSP
Metastable magnetization plateau states observed in an S = 1 two-leg spin ladder by fast sweeping of a magnetic field up to 150 T

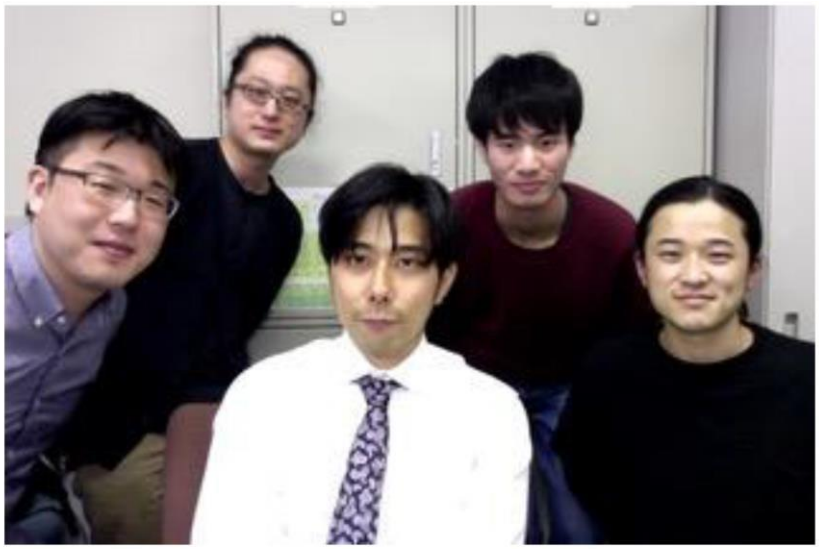
19 22:30 S. Kimura Tohoku University
Multiferroic Behaviors in the Quantum Spin Dimer System

20 23:00 J. L. Musfeldt University of Tennessee
Phase diagram, magnetoelectric coupling, and spin-lattice interactions in multiferroic $(NH_4)_2[FeCl_5{\cdot}(H_2O)]$

3 月 26 日（金曜） 座長 Dr. Nicolas Laflorencie

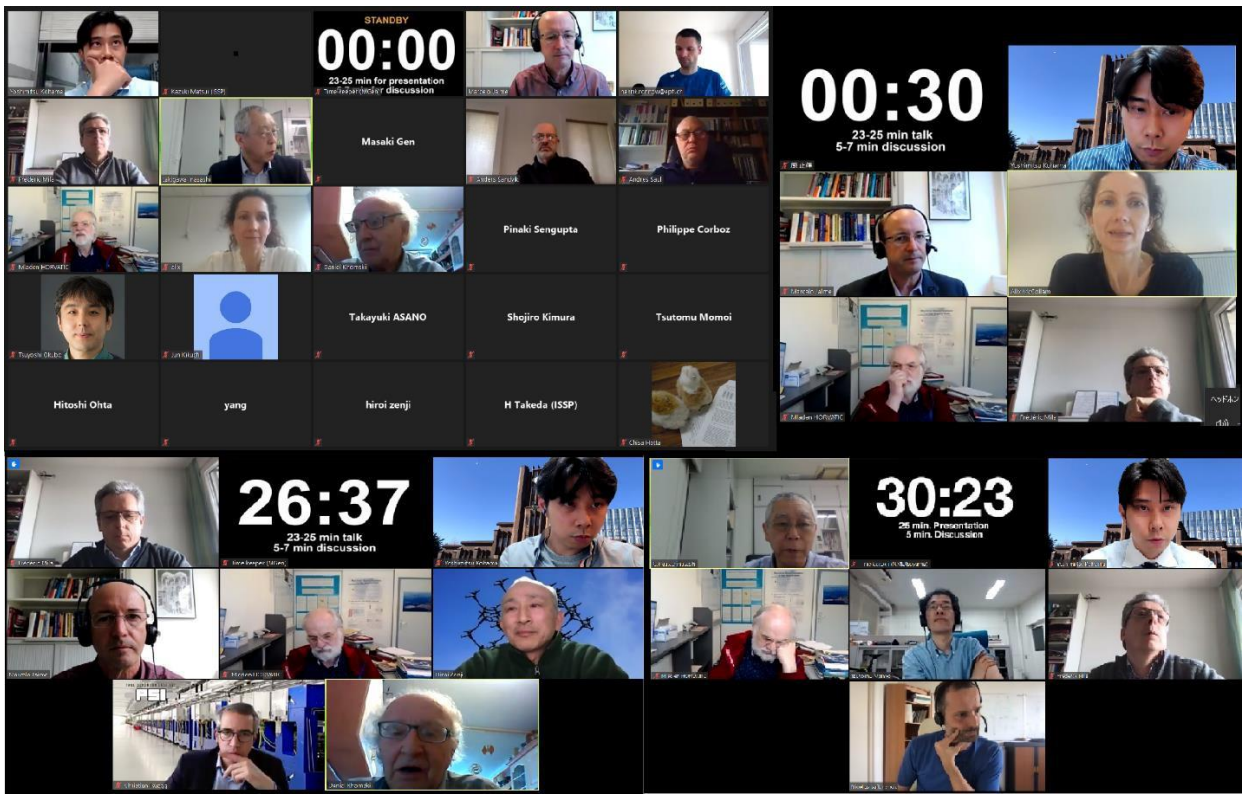
21	21:00	Tsutomu Momoi	RIKEN
		Coupled Trimer Description of Kagome Compound Volborthite	
22	21:30	Tsuyoshi Okubo	The University of Tokyo
		Large spin fluctuation in the magnetization process of frustrated square lattice Heisenberg magnets	
23	22:00	H. Takeda	ISSP
		Pressure induced phase transition in the J1-J2 square lattice antiferromagnet $RbMoOPO_4Cl$	
24	22:30	C. Hotta	The University of Tokyo
		Origin of exotic trimerized charge order in 5d pyrochlore electronic system with strong spin- orbit coupling	
25	23:00	Ch. Rüegg	Paul Scherrer Institute
		Unconventional Criticality in a Frustration-free, Multi-bilayer Quantum Dimer System	
NA	23:30	Yoshimitsu Kohama	ISSP
		Closing talk	

【写真など】

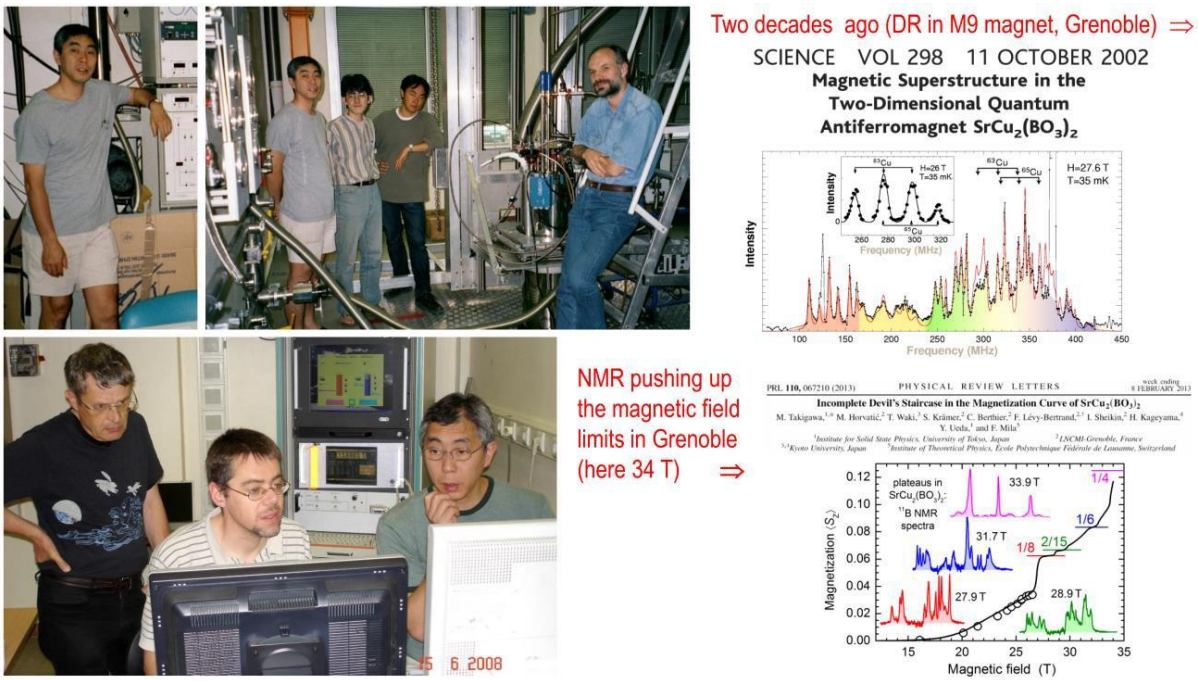


本会議運営の実行部隊。オンライン会議であれば、少人数でも十分ハンドリングできることが示された。

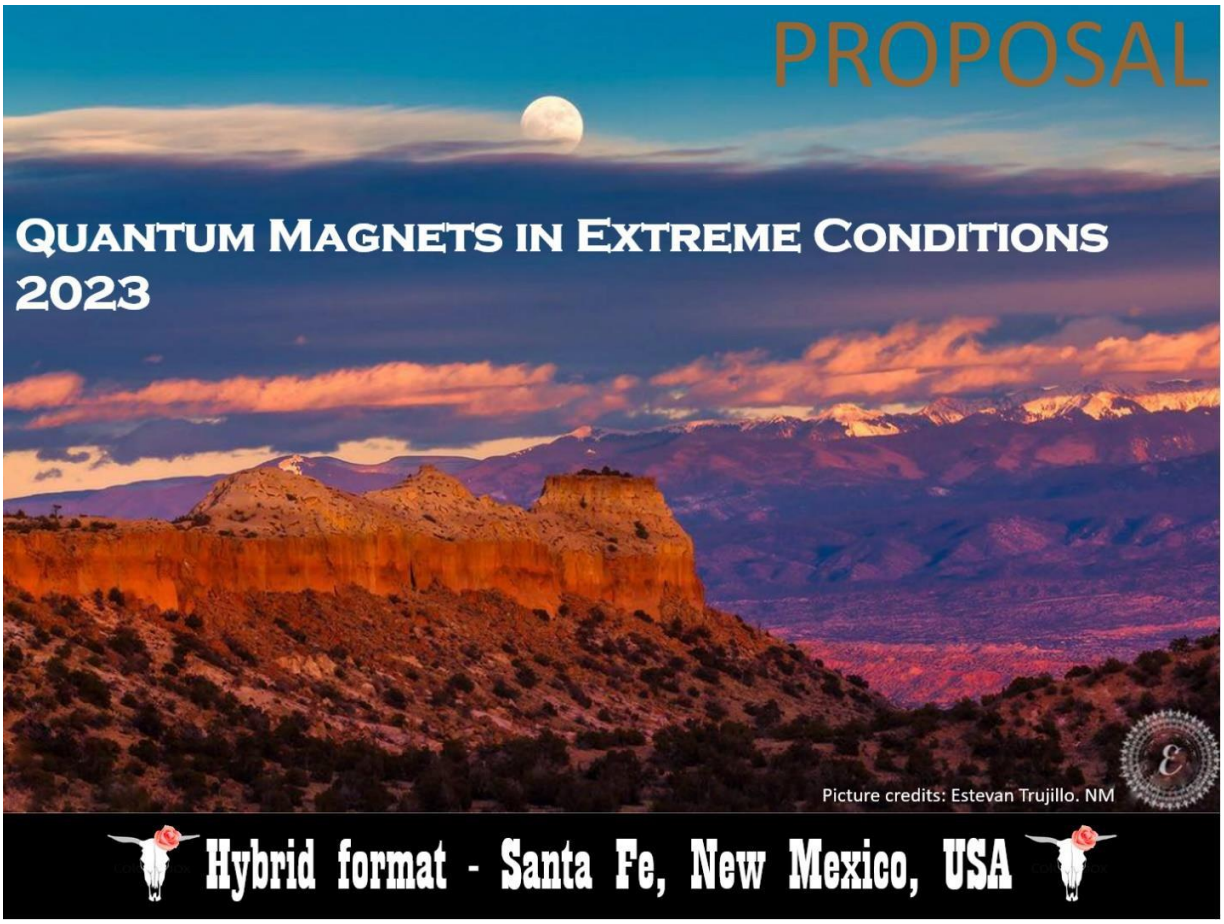
学会初日となる 3 月 22 日（月曜）の発表者。森所長のオープニングトークに始まり、最後まで盛況であった。



3 月 23 日（火曜）からの 3 月 26 日（金曜）の議論の様子。$CrRhIn_5$ の量子振動など、量子スピン系に関わらない広いテーマについて報告があった。



学会最終日のクロージングで Mladen Horvatić 教授が用意したスライド。瀧川元所員との共同研究の思い出、そしてこれからの更なる研究の発展についてやり取りがあった。Frédéric Mila 教授からも瀧川元所員との共同研究が自身の研究キャリアの内で最初のピークだったと言及があった。若い理論研究者は瀧川元所員のようなスマートな実験研究者と共同研究すべき、との言葉が送られた。



本会議最後のスライド。オーガナイザーの一人である Marcelo Jaime 博士により用意された。2023 年に本会議を Los Alamos 研究所主催(New Mexico)で行いたいとの考えを示し、理解が得られた。

物性研究所談話会

標題：令和２年度 物性研究所 退職記念講演会
日時：2021 年 3 月 5 日(金) 午前 10 時～午後 5 時 50 分
場所：オンライン開催
要旨：

本講演は、新型コロナウイルス感染症対策のため、オンライン(ZOOM)配信となりました。

10:00−10:10　所長挨拶
10:10−10:20　小森　文夫 先生　業績紹介
10:20−11:50　小森　文夫 先生　ご講演
「低温・表面・光」

13:30−13:40　所長挨拶
13:40−13:50　榊原　俊郎 先生　業績紹介
13:50−15:20　榊原　俊郎 先生　ご講演
「研究生活 40 年 − 多くの人に支えられて」

16:00−16:10　所長挨拶
16:10−16:20　瀧川　仁 先生　業績紹介
16:20−17:50　瀧川　仁 先生　ご講演
「核磁気共鳴と過ごした謎解きの日々」

標題：令和３年度前期　客員所員講演会
日時：2021 年 5 月 13 日(木) 午前 10 時～午後 12 時 10 分
場所：オンライン開催
要旨：

10:00−10:10　所長挨拶（森　初果：物性研究所長）

10:10−10:40　林 智広（東京工業大学）
「表面水和と生体適合性」

10:40−11:10　稲村 泰弘（日本原子力研究開発機構）
「J−PARC, MLF における中性子散乱データ収集とデータ処理」

11:10−11:40　RIETVELD, Ivo B（パリ第 5 大学/ルーアン大学）
「医薬品における固体状態」

11:40−12:10　陳　少強（華東師範大学）
「CsPbX3 ペロブスカイト微小共振器の発振特性とそのメカニズム」

物性研究所セミナー

標題：理論セミナー：Classical spin field theories and implications in 2+1 dimensions
日時：2021 年 3 月 16 日(火)　午前 10 時 30 分～午前 11 時 30 分
場所：オンライン開催
講師：Dr. Sayak Dasgupta
所属：University of British Columbia and ISSP
要旨：

Micromagnetic field theories effectively capture the long-range static structures and dynamics of ordered spin systems at temperatures below their ordering temperatures. The field theory, if expressed in the correct form, further elucidates hidden features in the order. We discuss two such instances. First, we take a look at the 2+1D XY ferromagnet whose continuum field theory has been extensively studied in the context of the Kosterlitz-Thouless phase transition [1]. We show how the field theory describes an interpolation of the quantum statistics of a magnetic vortex–from bosonic to fermionic–using a duality map to 2+1D electromagnetism[2].

Second, we examine the field theory of a generic 3-sublattice antiferromagnet in 2D, exemplified by the Heisenberg model on the triangular [3] and kagome [4] lattices. In a ground state, spins from the 3 sublattices are coplanar and at angles of 120° to one another such that S1+S2+S3=0. The six normal modes, either keep the spins in this plane (the a modes) or take them out of the plane (the b modes). The soft modes bx, by, and a0 respect the ground-state condition S1+S2+S3=0 and are the Goldstone modes of the spontaneously broken SO (3) symmetry. The hard modes ax, ay, and b0 generate a net magnetization and are hence energetically costly.

The a0 singlet has a simple scalar field theory. The field theory of the b doublet is reminiscent of the elasticity theory of a 2-dimensional isotropic solid with two distinct “speeds of sound”. Thus the 3 branches of low-frequency spin waves generally have 3 distinct velocities. The nearest-neighbor Heisenberg models on the triangular and kagome lattices are exceptional in that sense. The former exhibits an accidental degeneracy of the spin-wave velocities between the two b modes. The nearest-neighbor kagome model is similar to a two-dimensional solid with a vanishing shear modulus and thus a zero speed for the transverse part of the b doublet (the weather-vane mode) while the longitudinal part of the doublet is degenerate with the a0 mode. The 3 speeds can be readily calculated for any lattice model. The doublet a = (ax,ay) mediates the coupling between external perturbations – such as an applied magnetic field – and the antiferromagnetic order parameter. We apply this field theory to the hexagonal antiferromagnet Mn3Ge [5,6,7].

[1] J. M. Kosterlitz,J. Phys. C7, 1046 (1974).

[2] S. Dasgupta, S. Zhang, I. Bah, and O. Tchernyshyov, Phys. Rev. Lett. 124, 157203 (2020).

[3] A. V. Chubukov, S. Sachdev, and T. Senthil, “Large-S expansion for quantum antiferromagnets on a triangular lattice,” J. Phys.: Condens. Matter 6, 8891 (1999).

[4] A. B. Harris, C. Kallin, and A. J. Berlinsky, “Possible Néel orderings of the Kagomé antiferromagnet,” Phys. Rev. B 45, 2899 (1992).

[5] S. Nakatsuji, N. Kiyohara, and T. Higo, “Large anomalous Hall effect in a non-collinear antiferromagnet at room temperature,” Nature 527, 212 (2015).

[6] Y. Chen, J. Gaudet, S. Dasgupta, G. Marcus, J. Lin, Y. Zhao, W. C. Chen, M.B. Stone, O. Tchernyshyov, S. Nakatsuji, C. Broholm, “Antichiral spin order its Goldstone modes and their hybridization with phonons in the topological semimetal Mn3Ge”, Phys. Rev. B 102, 054403 (2020).

[7] S. Dasgupta and O. Tchernyshyov, Phys. Rev. B 102, 144417 (2020).

標題：理論セミナー：第一原理バンド計算からの有効モデル構築
日時：2021 年 3 月 26 日(金)　午後４時～午後５時
場所：オンライン開催
講師：榊原 寛史
所属：鳥取大学
要旨：

第一原理バンド計算は物質の全体的な電子構造を決定する手法であるが、揺らぎなどの電子相関効果を計算するコストはかなり大きい。そこで、(1)第一原理バンド計算から低エネルギー有効模型を導出し(2)それを用いて電子相関効果を数値的に計算するという方法がしばし用いられる。いわゆるハバード型の模型の構築については、最局在ワニエ軌道(MLFW [1])がよく用いられる。近年はホッピング積分だけでなく制限 RPA 法(cRPA [2])を用いて電子間相互作用のパラメータも第一原理的に見積もることができる。しかしながら、MLWF にはいくつかの問題点がある。発表では、MLWF 及び cRPA で構築した新規ニッケル酸化物超伝導体[3]について得られた模型を紹介する。そこで、揺らぎ交換近似[4]を適用し水銀系銅酸化物と比較した結果を説明する[5]。続いて、LAPW 法と LMTO 法の融合手法である PMT 基底関数法[6,7]を用いた新しい有効模型構築方法について説明し、それをいくつかの単純な物質に適用した結果を紹介する。

[1] N. Marzari and D. Vanderbilt, Phys. Rev. B 56, 12947 (1997).
[2] F. Aryasetiawan, M. Imada, A. Georges, G. Kotliar, S. Biermann, and A. I. Lichtenstein, Phys. Rev. B 70, 195104 (2004).
[3] D. Li et al., Nature 572, 624 (2019).
[4] N. E. Bickers, D. J. Scalapino, and S. R. White, Phys. Rev. Lett. 62, 961 (1989).
[5] H. Sakakibara, H. Usui, K. Suzuki, T. Kotani, H. Aoki, and K. Kuroki, Phys. Rev. Lett. 125, 077003 (2020).
[6] T. Kotani and M. van Schilfgaarde, Phys. Rev. B 81, 125117 (2010).
[7] T. Kotani, H. Kino, and H. Akai, J. Phys. Soc. Jpn 84, 034702 (2015).

標題：強磁場コラボラトリーセミナー：近藤半導体 YbB12 のテーマと新展開
日時：2021 年 4 月 23 日(金)　午前 10 時～午前 11 時
場所：オンライン開催
講師：伊賀 文俊
所属：茨城大学大学院理工学研究科
要旨：

SmB6 と並ぶ代表的近藤半導体 YbB12 のこれまでの歴史を今一度振り返り、どのような問題意義があって、そして今何がホットな話題として取り上げられているか、総花的ながら提示を試みたい。

標題：理論セミナー：HOTI from string theory
日時：2021 年 5 月 14 日(金)　午後４時～午後５時
場所：オンライン開催
講師：Prof. Koji Hashimoto
所属：Graduate School of Science, Kyoto University
要旨：

The higher order topological insulators (HOTIs) are a good playground to ask questions on spatial dimensionality in general physics. String theory, as a consistent quantum gravity, has a peculiar ability to control spacetime dimensions

to accommodate various physics systems. In 2016, we eventually discovered the notion of continuum HOTI, independently from the major work by Benalcazar et al., where our findings were naturally derived by applying the ideas of solitons, duality, and branes, which are major ingredients used in string theory, to topological materials. This talk explains our path, and discusses the physical origin of the continuum HOTIs from such string-theoretic or field-theoretic viewpoints.

標題：強磁場コラボラトリーセミナー：秩序型ラーベス相構造を利用した超伝導体の開発
日時：2021 年 5 月 21 日(金)　午前 11 時～午後 0 時
場所：オンライン開催
講師：工藤 一貴
所属：大阪大学大学院理学研究科
要旨：

ラーベス相化合物 AB2 は様々な結晶構造を示し、物質開発の魅力的な舞台を与えてくれる。代表的な結晶構造は MgZn2 型、MgCu2 型、MgNi2 型であり、それらを元にして様々なラーベス相構造が派生する。例えば、MgZn2 型の B サイトが TM3/4X1/4 のように秩序占有されると、TM のブリージングカゴメネットワークと X の三角形ネットワークができる。本セミナーでは、最近私たちが報告した秩序型ラーベス相超伝導体 Li2IrSi3、Mg2Ir3Si と、部分秩序型ラーベス相超伝導体 Mg2Ir2.3Ge1.7 を紹介する。さらに、時間が許せば、これまで報告した関連物質を紹介し、三角形、ハニカム、カゴメネットワークを持つ超伝導体の物質開発について述べたい。

標題：理論セミナー：Fermion Doubling Theorems in two-dimensional non-Hermitian lattices
日時：2021 年 5 月 28 日(金)　午後４時～午後５時
場所：オンライン開催
講師：Dr. Ching-Kai CHIU
所属：理化学研究所　数理創造プログラム
要旨：

The fermion doubling theorem（ニールセン＝二宮の定理）plays a pivotal role in Hermitian topological materials. It states, for example, that Weyl points must come in pairs in three-dimensional semimetals.
In this talk, I review the doubling theorem for various Hermitian systems and present an extension of the doubling theorem to non-Hermitian lattice Hamiltonians.

We work on two-dimensional non-Hermitian systems without any symmetry constraints, which can host two different types of topological point nodes, namely, (i) Fermi points and (ii) exceptional points. We show that these two types of protected point nodes obey doubling theorems, which require that the point nodes come in pairs.

Reference: Phys. Rev. Lett. 126, 086401 (2021).

標題：LASOR セミナー:ワイル反強磁性金属 Mn3Sn 薄膜のテラヘルツ異常ホール効果
高繰り返しシングルショット分光法の開発とマルチ時間スケールダイナミクスのへ応用
日時：2021 年 5 月 28 日(金)　午前 10 時～午後 0 時
場所：オンライン開催
要旨：

1. 松田 拓也　（松永研究室）

【講演タイトル】
ワイル反強磁性金属 Mn3Sn 薄膜のテラヘルツ異常ホール効果
【概要】
反強磁性スピンはテラヘルツ周波数帯で動作するため高速スピントロニクスの観点からも近年注目を集めているが、強磁性と比べて外場に対する応答が非常に小さいためにスピン秩序の情報を読み出すことが難しいという問題点が実用化を阻んでいる。近年、スピン多極子秩序に由来したワイル反強磁性金属 Mn3Sn が、室温で強磁性並みの巨大な異常ホール効果を示すことが明らかにされ注目を集めている[1,2]。本研究では、高精度偏光分解テラヘルツ時間領域分光系を開発し、Mn3Sn 薄膜の異常ホール効果をテラヘルツ周波数帯で観測した。その結果、強磁性体並みに大きな異常ホール電流がテラヘルツ周波数帯でもほぼ無散逸に流れることや、スピン秩序が半年以上経過しても安定に保持されること等を明らかにした[3]。本講演では得られた結果の詳細や今後の展望について紹介したい。

[1] S. Nakatsuji, N. Kiyohara, and T. Higo, Nature 527, 212–215 (2015).
[2] K. Kuroda et al., Nature Mater. 16, 1090–1095 (2017).
[3] T. Matsuda et al., Nature Commun. 11, 909 (2020).

2. 小林 真隆　（秋山研究室）

【講演タイトル】
「高繰り返しシングルショット分光法の開発とマルチ時間スケールダイナミクスのへ応用」
【概要】
物質の超高速応答の理解は、次世代の半導体デバイスや相変化材料を用いた記憶デバイスの開発に重要である。光誘起の相変化現象では、電子励起に伴うサブピコ秒の速い緩和ダイナミクスが引き金となり、ナノ秒～マイクロ秒の広範な時間スケールで構造変化が生じる不可逆現象であるが、このダイナミクスを完全に理解するためには、構造変化途中を含めた高速ダイナミクスを連続的に測定する必要がある。本研究では、超高速の波形信号の変化をリアルタイムで測定可能な高繰り返しシングルショット分光手法を開発し、超短パルスレーザーを用いた微細加工の観測に応用することで、1 パルス毎の表面構造の変化に伴うキャリアダイナミクスの変化を明らかにした。

標題：理論セミナー：Electron correlation effects near Van Hove singularities: Application to twisted bilayer graphene and supermetal
日時：2021 年 6 月 4 日(金)　午後 4 時～午後 5 時
場所：オンライン開催
講師：磯部 大樹
所属：東京大学 大学院工学系研究科 物理工学専攻
要旨：

Electron correlation decorates the condensed matter physics, bringing symmetry breaking and ordered phases. It becomes vital when many electrons are active, namely near a Van Hove singularity (VHS) where the density of states (DOS) diverges. Since a VHS accompanies the topological transition of the Fermi surface, tunable materials are

desirable to observe VHS-related behaviors, for example, by strain or pressure. The seminar focuses on moiré superstructures made of van der Waals materials; twisted bilayer graphene allows band dispersion design by the stacking angle, and correlated insulating and superconducting states are observed near the so-called magic angle.

First, we introduce a theory that describes a possible mechanism for correlated insulating and superconducting states in twisted bilayer graphene [1]. Our analysis of a hot-spot model shows that d- or p-wave superconductivity and charge/spin-density wave emerge from Coulomb repulsion near VHS. We further investigate the tunable nature of twisted bilayer graphene, which invokes the notion of a high-order VHS [2]. We show that tuning a single tuning parameter, such as a twist angle of a moiré material, pressure, and strain, realizes a high-order VHS realizes a power-law divergence in the DOS in two dimensions, unlike the usual logarithmic one. We could attribute the origin of the so-called magic angle to the high-order VHS. Finally, we discuss correlation effects at a high-order VHS [3]. We perform a renormalization-group analysis to find a nontrivial metallic state, where various divergent susceptibilities coexist, but no long-range order appears. We term such a metallic state as a supermetal. Our controlled analysis at the interacting fixed point reveals that an interacting supermetal is a non-Fermi liquid.

[1] H. Isobe and L. Fu, Phys. Rev. Research 1, 033206 (2019).
[2] N. F. Q. Yuan, H. Isobe, and L. Fu, Nat. Commun. 10, 5769 (2019).
[3] H. Isobe, N. F. Q. Yuan, and L. Fu, Phys. Rev. X 8, 041041 (2018).

標題：理論セミナー：原子層合金の安定構造に基づく新たなマテリアルデザイン
日時：2021 年 6 月 9 日(水)　午後４時～午後５時
場所：オンライン開催
講師：小野 頌太
所属：岐阜大学工学部電気・電子情報工学科
要旨：

グラフェンやシリセンなど様々な「原子層半導体」の物性研究が活発に行われているが、「原子層合金」の合成例は少なく、その安定構造の理解は進んでいない。また、グラフェンの積層がグラファイトであるような構造間の相関関係、より一般には「2D 構造とそれをビルディングブロックとする 3D 構造の安定性関係」が合金において存在するのかどうかは明らかではない。このような背景のもと、我々の研究グループでは形成エネルギーやフォノン計算に基づく「原子層合金科学」を展開している（単純金属 [1]、ポロニウム [2]、Lennard-Jones 結晶 [3]、二元合金 [4]、Pb-Sb 表面合金 [5]、Cu 規則合金 [6,7]）。本セミナーでは、上述の安定性に関する相関関係が存在することを示した最近の第一原理計算結果を報告する。まず、2D 単純金属の積層による 3D 単純金属の安定化を議論する [1,2]。次に、Cu 規則合金に焦点を絞り、同様の安定性関係が成立することを示し、Bh や L11 構造などの準安定構造の存在を予言する [7]。また、3D 規則合金の実験的合成の有無が 2D 構造の安定性を決める例を示し、新たなマテリアルデザインの方法を模索する [4]。

[1] S. Ono, Phys. Rev. B 102, 165424 (2020).
[2] S. Ono, Sci. Rep. 10, 11810 (2020).
[3] S. Ono and T. Ito, Phys. Rev. B 103, 075406 (2021).
[4] S. Ono and H. Satomi, Phys. Rev. B 103, L121403 (2021).
[5] S. Ono, J. Yuhara, and J. Onoe, Chem. Phys. Lett. 776, 138696 (2021).
[6] S. Ono and D. Kobayashi, Phys. Rev. B 103, 094114 (2021).
[7] S. Ono, arXiv:2105.05499.

標題：理論セミナー：Topological physics in synthetic quantum and classical matter
日時：2021 年 6 月 11 日(金)　午後４時～午後５時
場所：オンライン開催
講師：Prof. Tomoki Ozawa
所属：AIMR, Tohoku University
要旨：

Initially found in solid-state electron systems, the quantum Hall effect and topological insulator physics have recently been influencing a wide range of quantum as well as classical systems. In this talk, I will give a brief overview of the recent progress of topological physics in AMO-related systems, with an emphasis on my own works. Here, AMO systems stand for atomic, molecular, and optical systems. The talk will focus, in particular, on the progresses made in ultracold atomic gases and photonic (polaritonic) cavity arrays. Some topics which I plan to cover in depth include synthetic dimensions and the notion of quantum geometric tensor.

標題：理論セミナー：Time-periodic ground-states
日時：2021 年 6 月 18 日(金)　午後４時～午後５時
場所：オンライン開催
講師：Le Minh Cristian
所属：東京大学理学系研究科物理学専攻
要旨：

While we cannot define a ground-state of time-dependent quantum systems in general, the time-periodic systems can overcome this issue due to the application of Floquet theory. In principle this application results in a static-like system, so it would follow that there can be an equivalent ground-state for these time-periodic systems. Indeed we can define one from the average-energy [1], and in this seminar we will explain the procedures for doing so. We will also explore the properties of this ground-state and how it can be applied to develop practical calculations.

[1] C. M. Le, R. Akashi, and S. Tsuneyuki, Defining a Well-Ordered Floquet Basis by the Average Energy, Physical Review A 102, 042212 (2020).

標題：量子物質セミナー：核磁気共鳴測定で探る正方格子スピン系の圧力効果
日時：2021 年 6 月 24 日(木)　午後 12 時 15 分～午後 1 時 15 分
場所：オンライン開催
講師：武田 晃
所属：凝縮系物性研究部門　山下研究室
要旨：

最近接格子間に磁気的相互作用 J1、次近接格子間に J2 が働く正方格子スピン系は磁気的相互作用の競合するフラストレート磁性体として興味が持たれている。反強磁性的な相互作用 J1 が J2 に比べて十分強い場合にはチェッカーボード状に反強磁性スピンが配列した磁気秩序相が現れ、逆に J2 が J1 に比べて強ければストライプ状の磁気秩序相が実現する。二つの磁気相は J2/J1~0.5 で切り替わり、その狭間にはスピン液体の出現が予想されている。しかしながら、これまでに合成されたモデル物質はいずれも反強磁性秩序を示し、狭間の相の発見には至っていない。
我々は、圧力により J2/J1 を制御することで中間相の探索を試みた。本発表では、圧力下で二つの反強磁性相の間の転移が生じる Mo 酸化物[1]を紹介したい。我々は圧力下において核磁気共鳴測定を行い、圧力印加による磁気構造の変化と磁

気相転移の原因と思われる構造転移を明らかにした[2]。発表では、まず、核磁気共鳴測定により得られる物質中の内部磁場の情報が磁性や電子状態の解明に如何に役立つのかについて説明し、次いで詳しい実験結果を紹介したい。

[1] H. Ishikawa et al., Phys. Rev. B 95, 064408 (2017).
[2] H. Takeda et al., Phys. Rev. B 103, 104406 (2021).

標題：理論セミナー：Quadruple-q hedgehog-lattice spin texture in breathing-pyrochlore Heisenberg antiferromagnets
日時：2021 年 6 月 25 日(金)　午後４時～午後５時
場所：オンライン開催
講師：Kazushi AOYAMA
所属：Osaka University
要旨：

Recently, topological spin textures such as the magnetic skyrmion and its three-dimensional analogue, the magnetic hedgehog, have attracted much attention. Although the skyrmion and hedgehog have the same topological character, the latter has a singular point at its texture center, so that the hedgehog is sometimes called the magnetic monopole. Of recent particular interest is the hedgehog lattice which is a periodic array of the monopoles and anti-monopoles. Although the hedgehog lattice is known to be stabilized by the Dzyaloshinskii-Moriya (DM) interaction [1,2,3], a mechanism other than the DM interaction has not been reported so far.

In this talk, we show that the hedgehog lattice is realized in the classical J1-J3 Heisenberg model on the breathing pyrochlore lattice without the DM interaction [4]. A quadruple-q state with the ordering vector of q = (± 1/2, ±1/2, ±1/2), which is realized for a large third nearest-neighbor antiferromagnetic exchange interaction along the bond direction J3, turns out to become the hedgehog-lattice state on the breathing lattice, while on the uniform lattice, it is a collinear state favored by thermal fluctuations. We will also demonstrate that in a magnetic field, the structure of the (1/2, 1/2, 1/2) hedgehog lattice is changed from cubic to tetragonal, resulting in a nonzero net spin chirality which in a metallic system, should yield a Hall effect of chirality origin.

Please access here for the registration: https://forms.gle/AMo5tqQoNoTR2e8Q9

[1] N. Kanazawa et al., Nat. Commun. 7, 11622 (2016).
[2] B. Binz and A. Vishwanath, Phys. Rev. B 74, 214408 (2006).
[3] J. H. Park and J. H. Han, Phys. Rev. B 83, 184406 (2011).
[4] K. Aoyama and H. Kawamura, Phys. Rev. B 103, 014406 (2021).

標題：強磁場コラボラトリーセミナー：S= 1 有機ビラジカルの物質開発
日時：2021 年 6 月 30 日(水)　午後４時～午後５時
場所：オンライン開催
講師：細越 裕子
所属：大阪府立大学大学院理学研究科
要旨：

有機ビラジカルを用いた S=1 磁性体について、最近の進展を紹介する。二次元磁気格子を中心に、フラストレート系や、S=1/2 強磁性ダイマー系なども含め、物質設計と物性を概説する。

標題：理論セミナー：Symmetry-based indicator theories and beyond for predicting topological materials
日時：2021 年 7 月 2 日(金)　午後４時～午後５時
場所：オンライン開催
講師：Dr. Tiantian Zhang
所属：Department of Physics and TIES, Tokyo Institute of Technology
要旨：

Topological electronic materials are new quantum states of matter hosting novel linear responses in the bulk and anomalous gapless states at the boundary, and are for scientific and applied reasons under intensive research in physics and in materials sciences. In 2019, three groups including us [1-3] scanned through a total of 39519 materials available in structural databases and found that as many as 8056 of them are actually topological (8889 if spin-orbital coupling is neglected). In order to make the calculated result more valuable, we built a topological material database based on it [4]. All the results are available and searchable at http://materiae.iphy.ac.cn/. We also plotted the band structure as well as the local density of states (DOS), shown on the same website.

In this talk, I will firstly make a brief introduction on topological band theory (TBT), especially for the symmetry-based indicator part [5-7], then introduce the efficient and fully automated algorithm in diagnosing 39519 non-magnetic materials basing on the TBT. At last, I will show how to use the topological material website by some material examples, such as the twofold unconventional Weyl node with C=4, associating with experimental results [8-9]

References

[1] T. Zhang, Y. Jiang, Z. Song, et al., Nature 566, 475-479 (2019).
[2] M. Vergniory, L. Elcoro, et al., Nature 566, 480–485 (2019).
[3] F. Tang, H. Po, et al., Nature 566, 486–489 (2019).
[4] http://materiae.iphy.ac.cn/
[5] H. Po, A. Vishwanath, H. Watanabe, Nat. Comm. 8, 50 (2017).
[6] Z. Song, T. Zhang, Z. Fang, C. Fang, Nat. Comm. 9, 3530 (2018).
[7] Z. Song, T. Zhang, C. Fang, Physical Review X 8, 031069 (2018).
[8] T. Zhang, R. Takahashi, C. Fang, S. Murakami, PRB 102 (12), 125148 (2020).
[9] H Li, T Zhang, et al., PRB 103 (18), 184301 (2021).

標題：理論セミナー：Magnetic materials design by representation theory & first-principles calculation
日時：2021 年 7 月 9 日(金)　午後４時～午後５時
場所：オンライン開催
講師：Prof. Michi-To SUZUKI
所属：Institute for Materials Research, Tohoku University
要旨：

Diversity of physical properties of magnets provides a fascinating playground in condensed matter physics. What is interesting to note is that there are many restrictions for physical properties in magnets imposed by magnetic structure. It is often useful to represent some aspect of magnetic structure by using symmetry, order parameter, and topology. For example, it has been known that the finite elements of a linear response tensor are identified by the magnetic point group, which characterizes macroscopic symmetry of the magnetic structure.

Cluster multipole method is first suggested to identify the multipole order parameters related to anomalous Hall effect in antiferromagnets [1, 2] and is further developed to generate the orthonormal symmetrized magnetic structure

bases providing multipole expansion for a given crystal structure [3]. The symmetrized magnetic bases are useful to produce high symmetric magnetic alignments which can be good candidates of stable magnetic structures for a magnetic compound. We recently applied the cluster multipole method combined with first-principles theory to investigate the transport phenomena of magnetic systems with predicting stable magnetic structures [4, 5] and established a framework to systematically evaluate the stable magnetic structures for given crystal systems [6]. In this talk, I introduce an overview of cluster multipole method and application to the study of magnetic compounds.

[1] Michi-To Suzuki, Hiroaki Ikeda, Peter M. Oppeneer, J. Phys. Soc. Jpn. 87, 041008 (2018).
[2] M.-T. Suzuki, T. Koretsune, M. Ochi, R. Arita, Phys. Rev. B 95, 094406 (2017).
[3] M.-T. Suzuki, T. Nomoto, R. Arita, Y. Yanagi, S. Hayami, H. Kusunose, Phys. Rev. B 99, 174407/1-10 (2019).
[4] Vu Thi Ngoc Huyen, Michi-To Suzuki, Kunihiko Yamauchi, Tamio Oguchi, Phys. Rev. B 100, 094426/1-9 (2019).
[5] Vu Thi Ngoc Huyen, Yuki Yanagi, Michi-To Suzuki, arXiv:2104.13704 (2021).
[6] M.-T. Huebsch, T. Nomoto, M.-T. Suzuki, and R. Arita, Phys. Rev. X 11, 011031 (2021).

標題：強磁場コラボラトリーセミナー：立体的な曲面構造をもつグラフェンの電子物性
日時：2021 年 7 月 20 日(火)　午前 11 時～午後 0 時
場所：オンライン開催
講師：田邉 洋一
所属：岡山理科大学 理学部 基礎理学科
要旨：

グラフェンは、高い電気伝導性、熱伝導性、光学特性に加えて、安価で軽量、化学耐性、機械耐性に優れた原子層物質です。このグラフェンがもつ特徴を保持したまま立体的な構造を作製すると特異な物性や優れた特性を発揮すると言われており、この予測から幾何学的にいかに綺麗で折り目のない高品質なグラフェンシートを高密度に空間へ詰め込むかがグラフェンを利用したデバイスの特性向上に重要とされ、その物性理解と立体デバイスへの応用を目指した研究が現在盛んに行われています[1]。我々は、これまで、3 次元ナノ多孔質グラフェンという 3 次元多孔質金属表面上への CVD 合成により作製した立体的な曲面構造をもつグラフェンを舞台として、その電子物性の理解を目指して研究を行ってきました。本講演では、本物質による電気 2 重層トランジスタの開発とその物性[2]、並びに、グラフェンの曲がり具合を示す曲率半径を意図的に変えた場合の電子物性について紹介します[3]。

[1] 例えば、M. Koshino and H. Aoki, Phys. Rev. B 93, 041412 (2016).
[2] Y. Tanabe et al., Adv. Mater. 28, 10304–10310 (2016).
[3] Y. Tanabe et al., Adv. Mater. 32, 2005838 (2020).

標題：量子物質セミナー：弱強磁性体オルソフェライトにおけるスピン再配列転移のコヒーレント制御とスピノイズ分光
日時：2021 年 7 月 21 日(水)　午後 12 時 15 分～午後 1 時 15 分
場所：オンライン開催
講師：栗原 貴之
所属：極限コヒーレント光科学研究センター　板谷研究室
要旨：

反強磁性体におけるマグノンダイナミクスはテラヘルツ(THz)帯域に達し，典型的な強磁性体の歳差運動に比べて 1-2 桁近く高いことから，超高速のスピントロニクスデバイス応用への期待が高まりつつある。希土類オルソフェライト

（RFeO3,R=希土類）はこうしたサブ THz のマグノン周波数を持つ典型的なキャント型反強磁性体であり，超短パルスレーザーやテラヘルツ波を用いた磁気制御のプラットフォームとして 2010 年前後から盛んに研究が行われている。

オルソフェライトを特徴づけるのはスピン再配列転移である。オルソフェライトは内部の希土類電子系の状態に応じて磁気異方性が大きく変化し，特定の温度領域において磁気秩序の配列方向が温度に応じて回転する。この再配列転移領域では外場に対する敏感性が高まり，比較的小さな光強度でも大きな磁気的応答を示す。また，ポテンシャルが大きくソフトニングすることから，有限温度による熱揺らぎの影響が観測可能なまでに増大する。

今回のセミナーでは，こうしたスピン再配列転移に際して生じるサブ THz 帯域のスピンダイナミクスの観測と，光によるその制御に関する最近の研究を紹介する。

[1] T.K. et al., Phys. Rev. Lett. 120, 107202 (2018).
[2] J. Lu et al., Phys. Rev. Lett. 118, 207204 (2017).
[3] G. Fitzky, TK, et al., Submitted (2021).

標題：理論セミナー：Scalable Boltzmann machine learning by quantum annealer
日時：2021 年 7 月 30 日(金)　午後４時～午後５時
場所：オンライン開催
講師：Prof. Masayuki Ohzeki
所属：Graduate School of Information Sciences, Tohoku University/Institute for Innovative Research Tokyo Institute of Technology/Sigma-I Co. Ltd.
要旨：

In this talk, we demonstrate iterative-structured machine learning such as deep learning by using the D-Wave Advantage.

As is well known, the D-Wave quantum annealer outputs many realizations of the spin configurations following the Gibbs-Boltzmann distribution. The D-Wave quantum annealer is thus expected to be used in the Boltzmann machine learning and related models to compute the expectation at each epoch during the learning process. However, due to the bottleneck to newly input the parameters on the quantum processing unit, the efficient implementation is not demonstrated for deep architecture. In particular, the sampling conditioned on the visible variables demands repetition of the sampling by changing the parameters of the machine learning model.

We propose a new algorithm to perform the efficient Boltzmann machine learning including the hidden units and generalization to the iterated-structured machine learning such as deep learning. In addition, we introduce several aspects of our proposal. The first topic is that the architecture can be regarded as the variational circuits consisting of the quantum processing units on the D-Wave quantum annealer. The second one is that, by taking some limitation on several conditions, we find a relationship between our proposed method and several machine learning methods. The third one is that our technique makes it easier to perform the Boltzmann machine learning with the continuous variables available for practical applications.

人　事　異　動

【研究部門等】

○令和３年３月31日付け

（定年退職）

氏　　名	所　　属	職　　名	備　　考
瀧　川　　仁	凝縮系物性研究部門	教　　授	高エネルギー加速器研究機構　物質構造科学研究所 協力研究員へ
榊　原　俊　郎	凝縮系物性研究部門	教　　授	
小　森　文　夫	ナノスケール物性研究部門	教　　授	東京工業大学　物質理工学院　研究員へ

（辞　職）

氏　　名	所　　属	職　　名	備　　考
多　田　靖　啓	量子物質研究グループ	助　　教	広島大学先進理工系科学研究科 量子物質科学プログラム　准教授へ
中　村　大　輔	附属国際超強磁場科学研究施設	助　　教	理化学研究所　研究員へ

○令和３年４月１日付け

（採　用）

氏　　名	所　　属	職　　名	備　　考
小　林　真　隆	機能物性研究グループ	助　　教	横浜国立大学大学院理工学府 日本学術振興会特別研究員(DC-1)より
木　内　久　雄	附属極限コヒーレント光科学研究センター	助　　教	京都大学産官学連携本部　特定助教より
竹　尾　陽　子	附属極限コヒーレント光科学研究センター	助　　教	東京大学大学院工学系研究科精密工学専攻 日本学術振興会特別研究員(DC-1)より
沼　澤　宙　朗	機能物性研究グループ	特任助教	マサチューセッツ工科大学 PostDoctoral Researcher(JSPS)より

（昇　任）

氏　　名	所　　属	職　　名	備　　考
長　田　俊　人	凝縮系物性研究部門	教　　授	凝縮系物性研究部門　准教授より
松　田　康　弘	附属国際超強磁場科学研究施設	教　　授	附属国際超強磁場科学研究施設　准教授より
松　田　　巌	附属極限コヒーレント光科学研究センター	教　　授	附属極限コヒーレント光科学研究センター 准教授より

（兼　務）

氏　　名	所　　属	職　　名	備　　考
常　行　真　司	附属計算物質科学研究センター	教　　授	本務：東京大学大学院理学系研究科 期間：令和３年４月１日～令和４年３月 31 日
藤　堂　眞　治	附属計算物質科学研究センター	教　　授	本務：東京大学大学院理学系研究科 期間：令和３年４月１日～令和４年３月 31 日
川　島　直　輝	データ統合型材料物性研究部門	特任教授	本務：物性研究所附属物質設計評価施設 期間：令和３年４月１日～令和４年３月 31 日
尾　崎　泰　助	データ統合型材料物性研究部門	特任教授	本務：物性研究所附属物質設計評価施設 期間：令和３年４月１日～令和４年３月 31 日

（委嘱「客員：テーマ限定型」）

氏　　名	所　　属	職　　名	備　　考
稲　村　泰　弘	附属中性子科学研究施設	客員准教授	本務：日本原子力研究開発機構　研究員 期間：令和３年４月１日～令和４年３月 31 日
林　　智　広	附属極限コヒーレント光科学研究センター	客員准教授	本務：東京工業大学物質理工学院材料系　准教授 期間：令和３年４月１日～令和４年３月 31 日

○令和３年５月 31 日付け

（任期満了）

氏　　名	所　　属	職　　名	備　　考
陳　　少　強	機能物性研究グループ	特任教授	華東師範大学　教授へ

【事務部】

○令和３年３月31日付け

（転　出）

氏　　名	所　　属	職　　名	備　　考
簗　瀬　森　明	物性研究所	上席係長 （兼：共同利用係長）	本部施設企画課上席係長へ
満　田　洋　光	総務係	一般職員	本部人事企画課一般職員 （文部科学省行政実務研修生　研修出向）へ
坂　牧　一　博	附属図書館柏地区図書課 研究情報係	係　　長	附属図書館柏地区図書課　柏サービスチーム係長へ

○令和３年４月１日付け

（転　入）

氏　　名	所　　属	職　　名	備　　考
竹　山　牧　子	共同利用係	係　　長	柏地区共通事務センター人事チーム主任より
松　尾　理　穂	総務係	一般職員	本部人事企画課給与制度チーム一般職員より
守　屋　文　葉	附属図書館柏地区図書課 情報管理チーム	主　　査 （物性研図書室担当）	附属図書館情報サービス課主査（国際資料担当）より

令和２年度外部資金の受入について

1. 奨学寄附金

件　　数	金 額（円）
19	99,231,646

2. 受託研究

研　究　題　目	委 託 者	受 入 金 額（円）	研 究 代 表 者
フロッケ・エンジニアリングとトポロジカル非線形光学効果の理論	(国)科学技術振興機構	8,672,300	機能物性研究グループ 教授　岡　隆史
電子構造のトポロジーを利用した機能性磁性材料の開発とデバイス創成	(国)科学技術振興機構	158,971,800	量子物質研究グループ 特任教授　中辻　知
トポロジカル磁性体のスピントロニクス技術の開発	(国)科学技術振興機構	27,040,000	ナノスケール物性研究部門 教授　大谷　義近
水素をプローブとした固溶型ナノ合金の状態解析	(国)科学技術振興機構	0	附属中性子科学研究施設 教授　山室　修
リモートコントロールによるハイスループット材料合成の実証実験	(国)科学技術振興機構	0	ナノスケール物性研究部門 教授　Mikk Lippmaa
光 OFF 型オプシンによる高感度かつ自然な視覚再生	(国)科学技術振興機構	16,445,000	機能物性研究グループ 助教　永田　崇
“All-optical”な電気生理学による植物個体の膜電位操作技術の創出	(国)科学技術振興機構	26,455,000	機能物性研究グループ 特任研究員　井上(今野)　雅恵
原子分解能・低速電子ホログラフィーの開発	(国)科学技術振興機構	37,310,000	ナノスケール物性研究部門 特任研究員　柳澤　啓史
基盤的計算機シミュレーション手法の磁石材料開発への展開	(国)物質・材料研究機構	62,199,330	附属計算物質科学研究センター 教授　常行　真司
基盤的計算機シミュレーション手法の検討と水素を含む新規材料候補の探索と物性解析	(大)東京工業大学	1,700,000	附属計算物質科学研究センター 教授　常行　真司
第一原理自動網羅計算に基づいた高精度・高速度のハイスループット材料計算ソフトウェアの開発・拡張と磁気特性の評価	(国)産業技術総合研究所	9,900,000	データ統合型材料物性研究部門 特任准教授　福島　鉄也
次世代二次電池・燃料電池開発による ET 革命に向けた計算・データ材料科学研究	(国)物質・材料研究機構	9,790,000	機能物性研究グループ 教授　杉野　修
エネルギー貯蔵材料の動作下超高分解能放射光軟 X 線電子状態解析	(国)産業技術総合研究所	5,999,753	附属極限コヒーレント光科学研究センター 教授　原田　慈久
水素利用等高度化先端技術開発／超高電位を目指した酸化物カソードの開発・先端計測と理論解析による触媒能発現機構の解明	(国)エネルギー・産業技術総合開発機構	19,861,000	機能物性研究グループ 教授　杉野　修
体外式膜型人工肺(ECMO)配管内壁コーティング材料の改良に関する研究開発	(国)日本医療研究開発機構	48,712,124	附属極限コヒーレント光科学研究センター 教授　原田　慈久
トポロジカル半金属を用いたテラヘルツ高速エレクトロニクス・スピントロニクス素子開拓	(国)科学技術振興機構	3,900,000	附属極限コヒーレント光科学研究センター 准教授　松永　隆佑
ベクトル波形制御された高強度高周波テラヘルツパルスによる物質制御	(国)科学技術振興機構	7,800,000	附属極限コヒーレント光科学研究センター 助教　神田　夏輝
時空間で精密制御した輻射場による表面反応プロセス	(国)科学技術振興機構	4,030,000	機能物性研究グループ 教授　吉信　淳
皮膚に対する接着/脱離スイッチングを実現するスマートハイドロゲル表面の開発	(国)科学技術振興機構	0	附属中性子科学研究施設 助教　李　响
ゲル・腱・靭帯の構造・ダイナミクスの解明	(国)科学技術振興機構	20,988,500	附属中性子科学研究施設 准教授　眞弓　晧一
ビックデータアプローチによる X 線レーザーイメージングの高度化	(国)科学技術振興機構	1,820,000	附属極限コヒーレント光科学研究センター 准教授　木村　隆志
次々世代加工に向けた新規光源・要素技術開発／超高速利得スイッチ LD をシードとするレーザー加工用光源の開発	(国)エネルギー・産業技術総合開発機構	83,506,000	機能物性研究グループ 教授　秋山　英文
CPS 型レーザー加工機システムによるスマート製造推進拠点	内閣府	502,000,000	附属極限コヒーレント光科学研究センター 教授　小林　洋平
合　　計		1,057,100,807	

3. 共同研究

研　究　題　目	相 手 側 機 関	相手側負担分	本学負担分	研 究 担 当 教 員
次世代レーザー及び加工の共通基盤技術開発に関する研究	(国)産業技術総合研究所	0		附属極限コヒーレント光科学研究センター 教授　小林　洋平
新しい強磁場マグネット用高強度・高導電率導体の開発	(国)物質・材料研究機構	0		附属国際超強磁場科学研究施設 教授　金道　浩一
磁歪の光ファイバセンサによる高速検出	(国)産業技術総合研究所	0		附属国際超強磁場科学研究施設 助教　池田　暁彦
人工知能とデータ科学に基づく光受容タンパク質の開発	(国)理化学研究所、(大)名古屋工業大学	0		機能物性研究グループ 准教授　井上　圭一
第一原理計算によるネオジム永久磁石内部の交換結合定数解析	(財)高度情報科学技術研究機構、(大)東京工業大学	0		附属物質設計評価施設 教授　尾崎　泰助
初期変換効率および放射線耐性向上のための太陽電池構造の検討	(国)宇宙航空研究開発機構	499,070		機能物性研究グループ 教授　秋山　英文
生体・医療・バイオ分野における先端レーザー加工過程の解明と加工プラットフォームのオープンイノベーション化の実現	(国)産業技術総合研究所	0		附属極限コヒーレント光科学研究センター 教授　小林　洋平
次世代レーザー及び加工の共通基盤技術開発に関する研究	(国)産業技術総合研究所	0		附属極限コヒーレント光科学研究センター 教授　小林　洋平
パルス超強磁場を用いた創発物性研究	(国)理化学研究所	10,000,000		附属国際超強磁場科学研究施設 准教授　徳永　将史
薄ディスクレーザー励起光パラメトリックチャープ増幅装置に関する研究開発	(国)量子科学技術研究開発機構	0		附属極限コヒーレント光科学研究センター 准教授　板谷　治郎
強相関 f 電子系化合物の物性科学研究	(国)日本原子力研究開発機構	0		凝縮系物性研究部門 教授　榊原　敏郎
強磁場 NMR の開発と物性研究(物性研－物性科学研究機関連携研究)	(大)北海道大学		2,000,000	附属国際超強磁場科学研究施設 教授　金道　浩一
多重膜環境下における熱物性測定法の開発と新奇物性探索(物性研－物性科学研究機関連携研究)	(大)横浜国立大学		1,000,000	附属物質設計評価施設 教授　上床　美也
軟 X 線検出器の性能の評価に関する研究	(国)産業技術総合研究所		0	附属極限コヒーレント光科学研究センター 教授　原田　慈久
軟 X 線用 CMOS 検出器のための裏面照射化技術の開発	(大)東北大学		0	附属極限コヒーレント光科学研究センター 教授　原田　慈久
【企業との共同研究　22 件】		49,388,920		
合　　計		59,388,920	3,000,000	

編　集　後　記

今号では、昨年度の客員所員の方々の寄稿があります。高山先生の記事に“朝から晩まで２～３カ月ひたすら繰り返す”が象徴的で目にとまったのですが、コロナ禍の中でも、客員所員となられた先生方が、この機会に研究に打ち込まれる意欲が綴られています。また、本山先生の記事では“オンラインで実験を行いその空気感を読み取ること”が、これからの学生に求められるとの記載がありましたが、コロナ終息後で状況が通常に戻ったとしても、オンラインでの実験は共同利用研として取り組み続ける課題となり、そこには何か血の通った工夫が必要と感じました。昨年度において、コロナ禍での印象的なことの１つが、ISSP ワークショップの報告にある、オンラインによる国際ワークショップ です。世界の参加者が参加できるように、日本側が遠慮した（？）時間設定となった毎晩 9 時からの会議で、参加人数は 5 日間での延べ参加人数が 1000 人を越えて、参加登録者の２／３は海外でした。こちらもコロナ終息後は、オンサイト・オンラインのハイブリッドでの会議運営が通常となると共同利用研として想定しているところです。一方、大学を取り巻く状況に目を転じると、内閣府で 10 兆円の大学ファンド事業などの議論が進んでいます。大学の法人化からしばらく経ちましたが、大きな波がやってきました。と、こちらも共同利用研として注意深く見守っているところです。

鈴　木　博　之

物性研だよりの購読について

物性研だより発行のメール連絡を希望される方は共同利用係まで連絡願います。

また、物性研だよりの送付について下記の変更がある場合は、お手数ですが共同利用係まで連絡願います。

記

１．送付先住所変更（勤務先⇔自宅等）
２．所属・職名変更
３．氏名修正（誤字脱字等）
４．配信停止
５．送付冊数変更（機関送付分）
６．メール配信への変更

変更連絡先：東京大学物性研究所共同利用係
〒277-8581　柏市柏の葉 5-1-5
メール：issp-kyodo@issp.u-tokyo.ac.jp