物性研だより

BUSSEIKEN DAYORI

第 63 巻
第 2 号
2023 年度

次世代半導体製造向けの極微細穴あけ加工を実現

カゴメ格子金属で実現する不純物に強い非従来型超伝導

1分子を用いた電子波の超高速分岐器
–1分子への超高速スイッチ集積化実現へ期待–

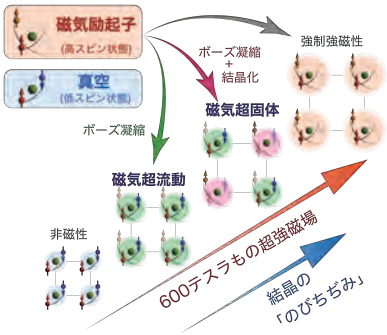
地球全体に分布するロドプシン保有細菌の新たな光エネルギー獲得戦略
–キサントフィルを用いた集光アンテナの発見–

熱流注入で磁気を観る
–原子間力顕微鏡を用いた簡易的磁気イメージング法の開発–

一度壊れて復活する反強磁性
–元素置換による量子性の出現–

磁性体における内因性異常ホール効果の超高速非平衡ダイナミクス

一瞬しか発生しない世界最強1000テスラ級超強磁場中で
結晶の「のびちぢみ」の計測に成功
～酸化物で新たな量子状態とそれらの間の相転移の兆候を発見～



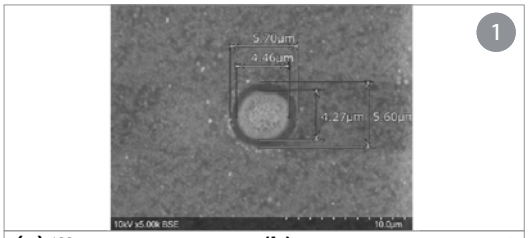
東京大学 物性研究所
THE INSTITUTE FOR SOLID STATE PHYSICS
THE UNIVERSITY OF TOKYO

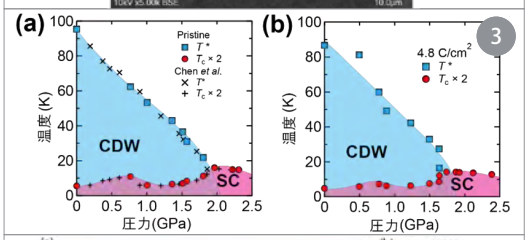
Copyright ©2023 Institute for Solid State Physics, The University of Tokyo. All rights Reserved.

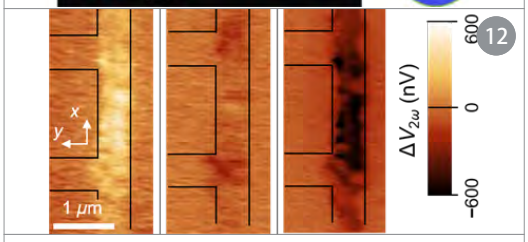
ISSN 0385-9843

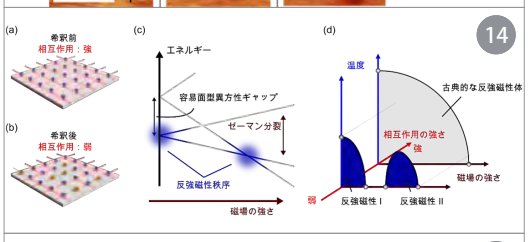
第 63 巻
第 2 号
2023 年度

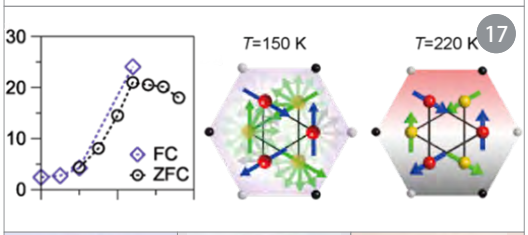
contents











1 次世代半導体製造向けの極微細穴あけ加工を実現 小林 洋平

3 カゴメ格子金属で実現する不純物に強い非従来型超伝導
六本木 雅生、橋本 顕一郎、芝内 孝禎、上床 美也

6 1 分子を用いた電子波の超高速分岐器
－1 分子への超高速スイッチ集積化実現へ期待－ 柳澤 啓史

8 地球全体に分布するロドプシン保有細菌の新たな光エネルギー獲得戦略
－キサントフィルを用いた集光アンテナの発見－ 井上 圭一

12 熱流注入で磁気を観る
－原子間力顕微鏡を用いた簡易的磁気イメージング法の開発－
一色 弘成、大谷 義近

14 一度壊れて復活する反強磁性 －元素置換による量子性の出現－ 渡辺 義人

17 磁性体における内因性異常ホール効果の超高速非平衡ダイナミクス
松田 拓也、松永 隆佑

20 一瞬しか発生しない世界最強 1000 テスラ級超強磁場中で
結晶の「のびちぢみ」の計測に成功
～酸化物で新たな量子状態とそれらの間の相転移の兆候を発見～
池田 暁彦、那須 譲治、松田 康弘

22 第 13 回 (令和 2022 年度) 分子科学会賞を受賞して 森 初果

24 ISSP 学術奨励賞を受賞して 今城 周作

25 日本放射光学会 学生発表賞を受賞して 新井 陽介

26 日本放射光学会学生発表賞を受賞して 櫻井 快

27 物性研を退任して 勝本 信吾

29 外国人客員所員を経験して Uwe Bovensiep

31 Sonia Haddad

33 客員所員を経験して 楠瀬 博明

34 遠藤 仁

36 多田 靖啓

【物性研究所短期研究会】
37 ○固体におけるエニオンと分数統計粒子研究の最前線
41 ○物性研究所スパコン共同利用・CCMS 合同研究会「計算の時代における物性科学」報告
45 【物性研究所談話会】
47 【物性研究所セミナー】
【物性研ニュース】
56 ○東京大学物性研究所人事異動一覧
58 ○令和 4 年度外部資金の受入について
60 ○東京大学物性研究所教員公募について
編集後記
物性研だよりの購読について

次世代半導体製造向けの極微細穴あけ加工を実現

物性研究所 LASOR　　小林 洋平

近年 EUV 露光プロセスが確立してきているが、日本の半導体製造は 40 nm のプロセスルールで止まっていた。そのような状況の中、昨今の経済安全保障の問題で日本でも先端半導体を作れる体制にしたいとの思惑から、熊本に台湾 TSMC とソニー、デンソーが出資する JASM が 20 nm 台のプロセスルールの半導体工場を建設中である。さらに、シングル nm の最先端半導体の製造プロセスを実現するために、2022 年 8 月に Rapidus 株式会社が設立された。Rapidus には 700 億円の国の投資が行われていたが、この 4 月には経産省が新たに 2600 億円の投資をすると発表している。加えて、2022 年 12 月に LSTC という技術研究組合が発足した。これは最先端半導体技術の研究開発を行う組織である。このように、今日本では最先端半導体技術をキャッチアップして EUV 露光による半導体製造を行うべく体制を構築しつつある。

上記はいわゆる半導体前工程についての状況であるが、半導体製造には後工程もある。大きく分けると露光までが前工程、パッケージングが後工程である。前工程でシリコンチップができると、それを回路基板に実装する必要がある。ムーアの法則で年々前工程の微細化が進み、現在は 3 nm プロセスにまで到達しているが、前工程の微細化が進むにつれて、後工程の微細化も求められている。チップの微細化が進めばチップに配置された電極の数が増加し、電極間の距離がどんどん短くなるため、通常のプリント回路基板(PCB)では受けきれない。そのため、チップと PCB との間にビルドアップ基板と呼ばれる中間的な基板を配置する必要がある。

この模式図を図 1 に示す。この研究は半導体チップと PCB とをつなぐビルドアップ基板の微細加工に関するものである。ビルドアップ基板の絶縁層には無機フィラーが入っている樹脂のフィルムが使われており、味の素株式会社が開発した味の素ビルドアップフィルム(ABF)が世界で大きなシェアを持っている。特に、PC においては 100% のシェアである。皆さんが今使っている PC のチップの下には必ず味の素のフィルムが実装されているのである。日本の企業は材料に強いことを示す象徴的な事案であろう。図 1 にあるように、ビルドアップ基板は多層になっており、微細なチップの電極を PCB につなぐ役割を持つ。この配線をするには、層間を繋ぐために微細な穴あけが必要となる。現在はこの穴径は 40~50 μm であり、レーザー加工であけられている。用いられているレーザーは炭酸ガスレーザーであり、このためのレーザー加工機は三菱電機が大きなシェアを持つ。皆さんのスマホの基板も大部分は三菱の加工機で穴あけがなされている。今後の穴径微細化に関しては、炭酸ガスレーザーは波長が 10 μm であるため、これ以上の微細化は難しい。一方で今後の半導体実装には、インテルのロードマップでも表記されているが、10 μm 以下の微細穴あけが必要とされている。

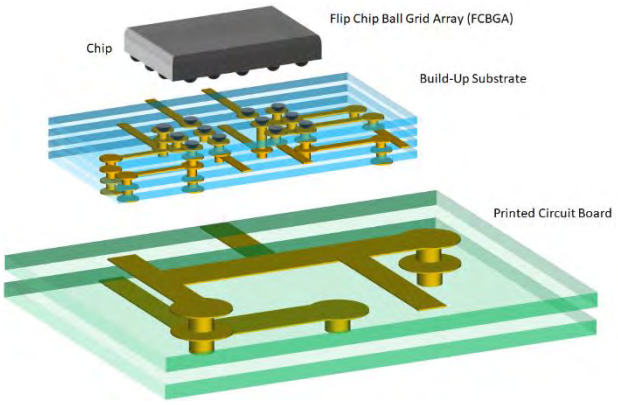


図 1 ：先端半導体パッケージの模式図

本研究開発は、次世代のビルドアップ基板の微細穴あけに成功したというものである。微細穴あけには短波長のレーザーが必要となる。NEDO「高輝度高効率次世代レーザー技術開発」プロジェクトにおいて、スペクトロニクス株式会社は波長 266 nm、パルス幅 15 ps 程度の大出力レーザーを開発した。これを三菱電機の加工機に実装した装置が東京大学柏 II キャンパスに設置されており、TACMI コンソーシアムの加工プラットフォームとして運営されている。波長 266 nm で出力は 50 W を誇り、他に比べて一桁程度の高出力化を実現している。

微細な穴あけをするには材料も工夫をする必要がある。上述の味の素には微細加工に適した ABF を提供していただいた。

最後に、レーザー、材料、加工機がそろっても所望の形状を実現するには条件出しが必要になる。通常職人が経験と勘で長い時間をかけて新しい加工に適したパラメータ探索を行う。我々はSIPのプロジェクトでレーザー加工におけるサイバーフィジカルシステムの構築を行ってきた。新たな加工に関してパラメータ探索の時間を9割削減することを目指して、全自動のデータ収集機と AI とを組み合わせた装置開発を行った。この全自動データ収集機はマイスターデータジェネレータ(MDG)と命名され、同じく柏Ⅱキャンパスで稼働している。

はたして、レーザー(スペクトロニクス社)、加工機(三菱電機)、材料(味の素)、そしてパラメータ探索(東京大学)の 4 者の共同研究により、ABF に 6 ミクロン以下の穴あけをすることに成功した。これは次世代のパッケージング技術において、レーザー加工で 10 ミクロン以下の穴あけができることを世に示した例となり、今後ロードマップの組み換えなどに進めるよう、さらなる共同研究を進める計画である。

本内容は 2022 年 10 月にプレスリリースを行った。

https://www.issp.u-tokyo.ac.jp/maincontents/news2.html?pid=16823

なお、TACMI コンソーシアムについては下記リンクを参照されたい。100 法人を超える会員が参画しており、協調領域の醸成のための情報共有を図っている。

http://www.utripl.u-tokyo.ac.jp/tacmi/

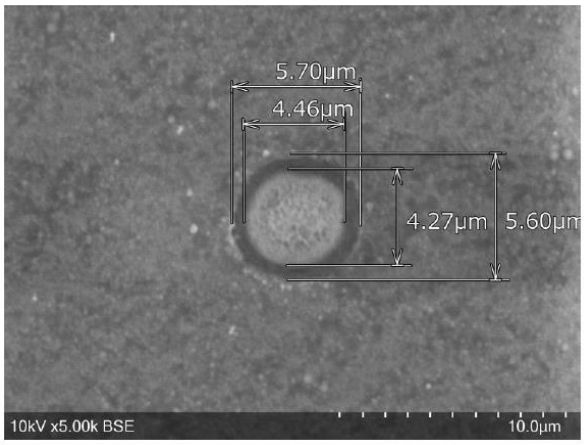


図 3：ABF にあけた微細穴の電子顕微鏡写真。6 ミクロン以下の穴が開いていることが分かる。

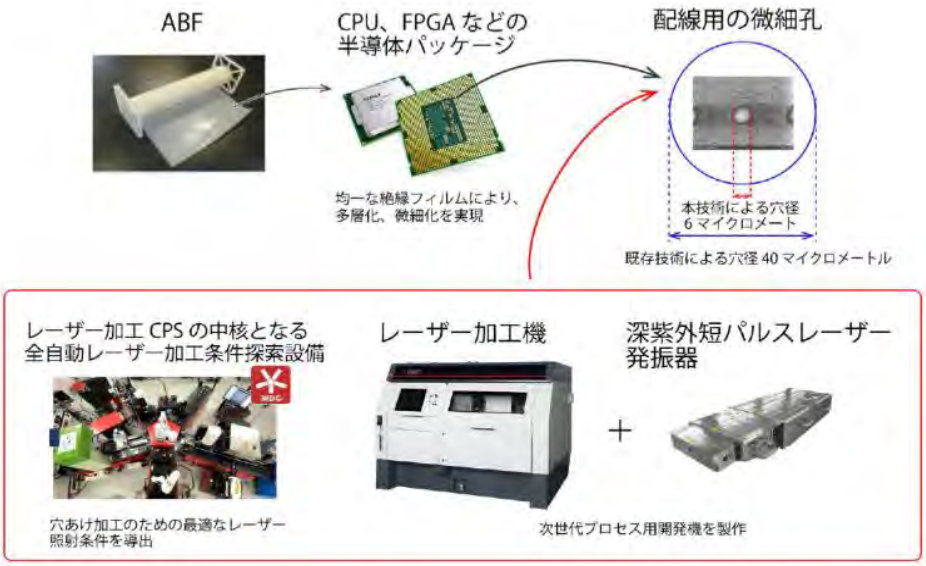


図 2：4 法人連携の模式図

カゴメ格子金属で実現する不純物に強い非従来型超伝導

東京大学大学院新領域創成科学研究科　六本木 雅生、橋本 顕一郎、芝内 孝禎
物性研究所・附属物質設計評価施設　上床 美也

研究背景

カゴメ格子物質は、磁性絶縁体を中心に、長らく、カゴメ格子がもつ幾何学的フラストレーションに起因した量子スピン液体の舞台として研究されてきた。ところが近年、カゴメ格子をもつ金属や半金属において、ディラック点やフラットバンド、ファン・ホーベ特異点に関連した創発物性に大きな注目が集まっている。そのような中、2019 年に発見された新規カゴメ格子金属 AV_3Sb_5(A = K, Rb, Cs)(図 1a)が大きな注目を集めている[1-3]。これらの物質群では、V の d 軌道から構成されるバンド分散に、カゴメ格子で期待されるディラック点やファン・ホーベ特異点が存在することが明らかにされている。さらに電荷密度波(CDW)転移および超伝導転移が観測されることから、カゴメ格子系における多様な量子相を理解する上で、非常に重要なプラットフォームとしてこの系が盛んに研究されている。特に CDW 相では、時間反転対称性の破れや結晶の持つ回転対称性の破れが報告されており、その起源について活発な議論が行われている[3]。これらの物質群では、このような特異な CDW 相において超伝導が発現するため、超伝導が非従来型であるのか、また時間反転対称性を破っているのかということに興味が持たれる。本物質群の超伝導ギャップ構造に関しては、発見当初は、熱伝導率[4]などのいくつかの実験においてノードを示唆する実験結果が報告されたが、その後、磁場侵入長[5]や STM[6]などの多くの実験において、フルギャップ超伝導を支持する実験結果が報告されている。

また、本物質群では、圧力を印加すると、CDW 相が抑制される一方で、超伝導転移温度 T_c は上昇し、CDW 相が消失する圧力で T_c は最大値を示し、超伝導ドームを形成する[7]。興味深いことに、CDW 相が消失した高圧超伝導相において、T_c 直下でゼロ磁場ミューオンスピン緩和率の増大が観測されており、高圧超伝導相で時間反転対称性の破れた超伝導が実現している可能性が指摘されている[8]。カゴメ格子系の超伝導は、ハバードモデルによって研究されており、ファン・ホーベ特異点近傍のフィリングでは時間反転対称性が破れたフルギャップのカイラル d 波超伝導が実現する可能性が理論的に指摘されている[9]。

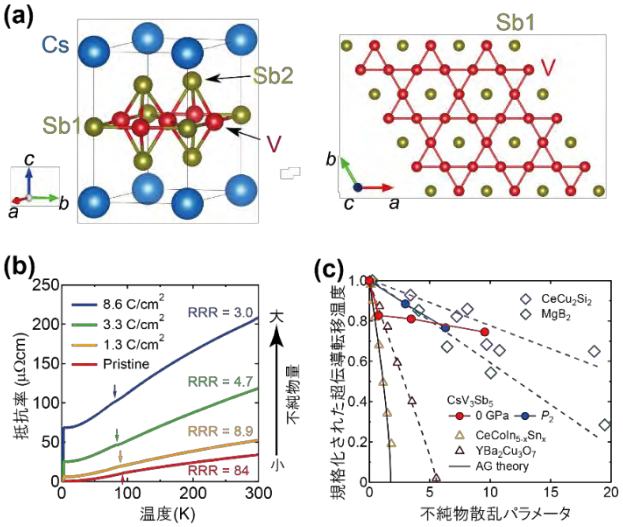


図 1: (a) CsV_3Sb_5 の結晶構造。V と Sb1 からなる二次元シートが左図のようなカゴメ格子構造を形成しており、二次元カゴメ格子のシート間に Cs がインターカレートされた構造になっている。(b) 不純物導入前後における CsV_3Sb_5 の電気抵抗率の温度依存性。不純物量は C/cm² の単位で表され、pristine は不純物導入前の試料を表している。 (c) 超伝導転移温度(T_c)の不純物散乱パラメータ依存性。横軸は不純物量に対応しており、CsV_3Sb_5 の超伝導転移温度は赤丸(常圧下)と青丸(高圧下、二番目の超伝導ドームのピークに対応する圧力(P_2))で表している。

研究目的と方法

以上述べてきたように、本物質群の超伝導対称性を明らかにするためには、常圧下と高圧下において、時間反転対称性の破れの有無も含めて、超伝導ギャップ構造を調べる必要がある。特に、カゴメ格子系の場合、ノードのないフルギャップ超伝導であっても、s 波の超伝導ではなく、カイラル超伝導の可能性があるため、超伝導ギャップの位相に敏感な測定が求められる。そこで我々は、超伝導波動関数の位相に敏感なバルク測定として、不純物効果に着目した。

一般的に超伝導ギャップに符号反転がない s 波超伝導は非磁性不純物に強く、非磁性不純物を導入しても、超伝導転移温度や超伝導ギャップ構造は大きく変化しないことが知られている[10]。一方、超伝導ギャップに符号反転が存

在する銅酸化物高温超伝導や重い電子系超伝導などの非従来型超伝導では、非磁性不純物によって超伝導転移温度が大きく抑制され、超伝導ギャップがゼロになるノード近傍に不純物状態密度が形成されることが知られている[11]。したがって、カイラル d 波超伝導の場合、乱れが少ないときにフルギャップ超伝導であっても、乱れを導入すると、不純物状態密度が形成され、磁場侵入長などの超伝導準粒子の低エネルギー励起に敏感な物理量の温度変化は熱活性型から冪乗へと変化することが期待される。

そこで本研究では、不純物効果が CsV_3Sb_5 の超伝導転移温度や超伝導ギャップ構造にどのような影響を与えるかを系統的に調べた[12]。物質中への非磁性不純物の導入には、高エネルギーの電子線を試料に照射することで不純物量を制御できる電子線照射と呼ばれる手法を用いた。この手法により不純物量を制御した CsV_3Sb_5 単結晶試料に対し、常圧および高圧下での電気抵抗測定から超伝導転移温度の変化を調べ、さらに磁場侵入長の温度依存性測定から超伝導電子密度を導出し、不純物が超伝導ギャップ構造に与える影響を詳細に調べた。

実験結果

図 1b に電子線照射量が 0, 1.3, 3.3, 8.6 C/cm^2 の CsV_3Sb_5 単結晶試料の電気抵抗率の温度依存性を示す。電子線照射量を増やすにつれて、電気抵抗率が大幅に増大し、それに伴い、CDW 転移温度 T_{CDW} および超伝導転移温度 T_c が低下することが分かった。図 1c に T_c の不純物依存性を示す。T_c は不純物量が少ない領域で大きく抑制される一方で、その後は不純物量を増やしても転移温度がほとんど変化しないことが分かった。このような不純物応答は従来型の BCS 超伝導体とも非従来型の銅酸化物高温超伝導体で見られる応答とも異なっている。

そこで、本物質の超伝導に対する不純物効果をより詳細に調べるために、希釈冷凍機に搭載されたトンネルダイオード発振器を用いて、50 mK の極低温まで磁場侵入長測定を行い、超伝導電子密度の温度依存性を導出した（図 2a）。不純物導入前でも、超伝導電子密度は低温領域において平坦な熱活性型の温度依存性を示しており、フルギャップ超伝導が実現していることが分かる。しかしながら、単一の等方的なフルギャップ超伝導では超伝導電子密度の全温度域の実験結果を説明することができず、むしろ図 2b のように、マルチバンドかつ異方的なギャップ構造を持っていると実験結果をうまく再現できることが分かった。非常に興味深いことに、試料に不純物量を導入していくと、超伝導電子密度が平坦になる温度領域が高温側に広がっていく振る舞いが観測された。この結果は、不純物の導入により、もともと異方的であった超伝導ギャップが平均化され、最終的に 2 つのギャップが等方的でほとんど同じ大きさになると考えるとうまく解釈できる。このことは、CsV_3Sb_5 においては、不純物を導入しても、フルギャップ超伝導が維持され、符号反転のないフルギャップ超伝導が実現している、つまりカイラル超伝導は実現していないことを意味している。本実験により明らかになった超伝導転移温度の非単調な不純物依存性および異方的なフルギャップ超伝導は、CDW 秩序に関係したボンド秩序揺らぎにより実現する異方的 s 波超伝導において理論的に期待される振る舞い[13]とよく一致しており、CsV_3Sb_5 における超伝導が格子揺らぎではなく、ボンド秩序の揺らぎによって生じる非従来型であることを示唆している。

さらに、高圧下で現れる超伝導相に対する不純物効果を調べるために、ピストンシリンダーセルを用いて、電子線照射量が 0, 4.8, 8.6 C/cm^2 の CsV_3Sb_5 単結晶試料の圧力下電気抵抗率測定を行い、圧力下電子相図を作成した（図 3 (a–c)）。全ての照射量において、圧力を印加すると CDW 相が抑制され、2 つのピークをもつ超伝導ドームが観測される。上述した通り、不純物を導入すると CDW 相が抑制され、T_{CDW} が 0 K になる圧力(P_2)が低圧側にシフトする。それに伴い、超伝導ドームも低圧側にシフトする。ここで重要なことは、残留抵抗比(RRR)が 3 である電子線照射量 8.6 C/cm^2 の試料においても、超伝導が生き残っていることであり、このことは、高圧下の超伝導相でも不純物に非常に

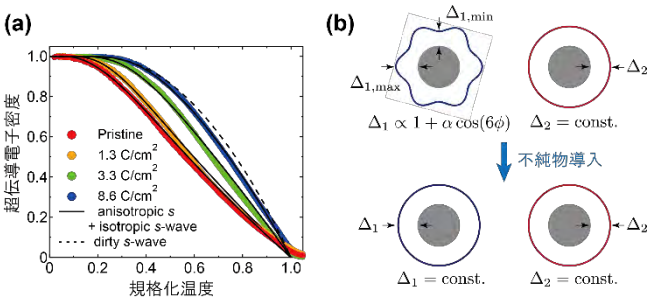


図 2: (a) 不純物導入前後における超伝導電子密度の温度依存性。実線は等方的 s 波と異方的 s 波超伝導を仮定したフィッティングより得られた結果を表し、破線は dirty な等方的 s 波超伝導の場合の結果を表している。(b) CsV_3Sb_5 における不純物による超伝導ギャップ構造の変化。不純物導入前では異方的な超伝導ギャップ構造をしているが、不純物量を増やしていくと、超伝導ギャップの大きさが平均化され、最終的には 2 つのギャップが等方的でほとんど同じサイズになる。

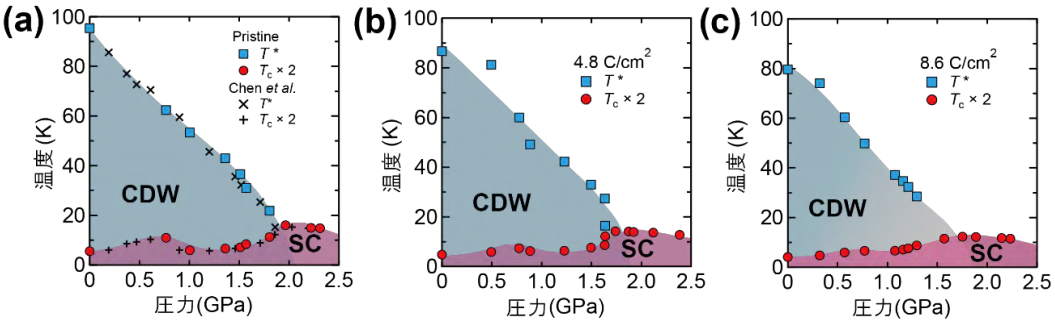


図 3: CsV_3Sb_5 の圧力下電子相図。それぞれ(a) 電子線未照射、(b) 4.8 C/cm^2、(c) 8.6 C/cm^2 電子線照射後の試料における相図。見やすさのために、超伝導転移温度(T_c)は 2 倍で表示している。

強い符号反転のない *s* 波超伝導が実現していることを強く示唆している。そこで、高圧下の超伝導相において、T_c の不純物効果を調べるために、P_2 における T_c の不純物効果を調べた(図 1c)。高圧下の超伝導相においても、T_c の不純物に対する減少は穏やかで、符号反転のない *s* 波超伝導で期待される振る舞いと非常に良い一致を示している。常圧下の結果とあわせて考えると、CsV_3Sb_5 では、常圧下、高圧下ともに、符号反転のない *s* 波超伝導が実現していると結論できる。

まとめ

今回我々は、CsV_3Sb_5 において、超伝導転移温度や超伝導ギャップ構造に対する不純物効果を系統的に調べた。その結果、CsV_3Sb_5 において、常圧下および高圧下ともに、不純物に強い、符号反転のない *s* 波超伝導が実現していることを明らかにした。本結果は、CsV_3Sb_5 において、格子揺らぎではなく、ボンド揺らぎによる非従来型超伝導が実現していることを示唆している。

謝辞

本研究は科学研究費学術変革領域研究(A)「高密度共役の科学」(領域代表者：関修平教授) [JP20H05869]、新学術領域研究(研究領域提案型)「量子液晶の物性科学」(領域代表：芝内孝禎教授) [JP19H05824]、科学研究費基盤研究(A)「複合環境下における圧力誘起物性現象の研究」(研究代表：上床美也) [JP19H00648]等の助成を受けて行われました。

参考文献

[1] B. R. Ortiz *et al.*, Phys. Rev. Mater. **3**, 094407 (2019).
[2] B. R. Ortiz *et al.*, Phys. Rev. Lett. **125**, 247002 (2020).
[3] T. Neupert *et al.*, Nat. Phys. **18**, 137–143 (2022).
[4] C. C. Zhao *et al.*, arXiv:2102.08356 (2021).
[5] W. Duan *et al.*, *Sci. China Phys. Mech. Astron.* **64**, 107462 (2021).
[6] Han-Shu Xu *et al.*, Phys. Rev. Lett. **127**, 187004 (2021).
[7] K. Y. Chen *et al.*, Phys. Rev. Lett. **126**, 247001 (2021).
[8] R. Gupta *et al.*, Commun. Phys. **5**, 232 (2022).
[9] X. Wu *et al.*, Phys. Rev. Lett. **127**, 177001 (2021).
[10] P. W. Anderson, J. Phys. Chem. Solids **11**, 26–30 (1959).
[11] D. A. Bonn *et al.*, Czechoslov. J. Phys. **46**, 3195–3202 (1996).
[12] M. Roppongi *et al.*, Nat. Commun. **14**, 667 (2023).
[13] R. Tazai *et al.*, Sci. Adv. **8**, eabl4108 (2022).

1 分子を用いた電子波の超高速分岐器
－1 分子への超高速スイッチ集積化実現へ期待－

現・静岡大学電子工学研究所（元・JST 及び物性研究所）　柳澤 啓史

我々の日常には欠かせないコンピュータ、そのコンピュータは多くの高速に動くスイッチから成り立っている。このスイッチをより早く動かすこと、より多く集積することがより速いコンピュータを作製することに重要となってくる。コンピュータのスイッチは電気的に駆動されているが、光パルスによりスイッチを駆動すると千倍から百万倍速いスイッチの作製が可能である[1,2]。このような超高速スイッチの速度は光パルスの時間幅や強度等といった特性の向上が鍵となっており、現在光パルスの技術発展と共に盛んに研究がおこなわれている。

我々の取り扱うスイッチもまさにこの超高速スイッチであるが、構造は図 1(a)に示すような非常に単純なものである。我々のスイッチは先端がとがった針と対向電極からなり、ここに光パルスを照射すると、針先端から電子が放出され電気信号となる[1]。これと同値の電気回路はその右に示すように光によりゲートを開けるトランジスタである。我々はこれまでこのような超高速スイッチを集積化する技術に注力してきた。集積化には電子が放出される位置を制御することが重要になってくる。例えば、図 1(b)に示すように、10nm(1nm＝10^{-9}m)程度離れた A，B という電子放出があったとする。プラズモニクスの効果を用いると、A から電子を出したり、B から電子を出したりできることを我々は過去の研究で見出した[3,4]。この状況は下図に示すように、超高速スイッチが並列に配置された回路と同じで、光によりそれぞれのスイッチを独立に制御することができる。すなわち、電子放出位置を光で制御することは超高速スイッチの集積化へとつながる。

さらに小さな領域へとスイッチを集積化するには電子の取り出し精度を上げる必要がある。しかし、上記のプラズモニクス効果を用いた方法ではさらなる精度の向上は技術的に難しかった。このような中、我々はフラーレン 1 分子の量子的な効果を用いることで、電子の固体からの取り出しを sub-0.5nm の精度で光制御できると考え、その実証に成功した[5]。この実験を実現するために最近我々が同定した 1 分子電子源を用いた[6]。1 分子電子源は針上に分子を蒸着した系により実現できる。このような針に強電界を印加すると、針上に 1 分子の突起が現れ、そこから電子が放出される。これが一分子電子源である。1 分子電子源では基板金属から出た電子が 1 分子のみを通過して真空中に放出される。

この 1 分子を通過する際の電子の透過確率は 1 分子の分子軌道に依存するため、結果として放出パターンが分子軌道の形となる。簡単な表現をすると、分子軌道はアパーチャーのような役割をし、電子の波がそのアパーチャーを通過すると、アパーチャーと同じ形の電子波となる。例えばリング状のアパーチャーであった場合、電子がそのアパーチャーを通過するとリング状の波となる。重要なのはこのアパーチャーの形が 1 分子に入射する電子のエネルギーに依存していることである。つまり、例えば光により電子を励

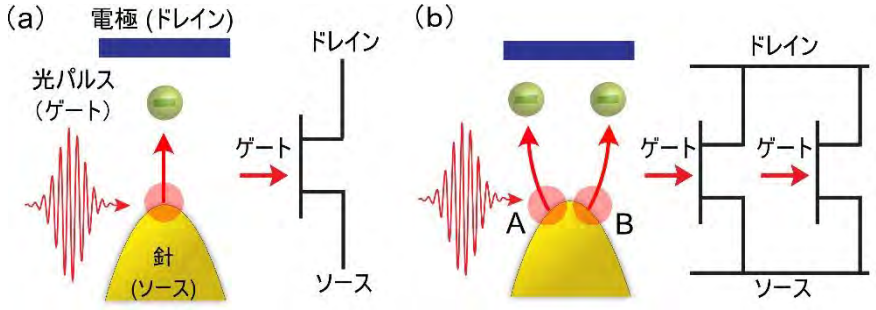


図 1:(a)先鋭化された金属針から光誘起により放出される電子の模式図とその現象と同値な回路。
(b)光を用いた電子放出サイト選択技術の模式図とその現象と同値な回路図。

起し、エネルギーを変えてあげれば、結果としてアパーチャーの形が変わることになる。アパーチャーはフラーレン 1 分子(1nm)と同じような大きさであり、アパーチャーの形を変えることは、sub-0.5nm 程度の精度で電子の放出位置を変化させることに対応する。

以上のことを概念的に示すと図 2(a)のようになる。図では１分子に左から電子波が入射している(緑の波)。この例で、光を用いない場合は、1 分子の中央から電子が放出される(右へ抜ける緑の波)。この場合のアパーチャーは円状になっている。一方で、光を入射することで、アパーチャーの形がリング状になり、結果として電子波はリング状になり 1 分子から出ていく。我々はまさにこの現象を観測することに成功した。図 2(b)に、実際に観測した１分子からの放出パターンを示す。上図が光を用いない場合で、下図が光照射を行った場合である。光照射により大きくパターンが変化していることがわかる。

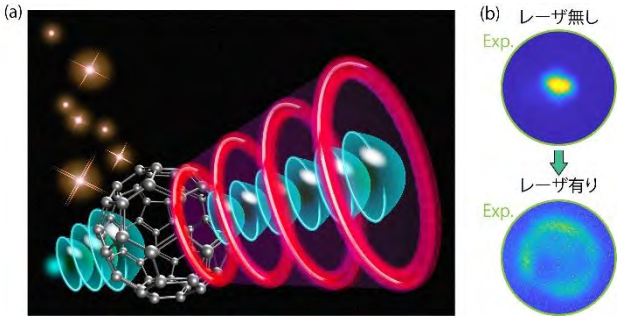


図 2：緑の半球は電子の波の進行を示しており、左側からフラーレンに入り、光照射がない場合は、そのまま右側へと通過する。光の粒が照射される場合、右へ抜け出る電子は、例えば、赤色のリング状の波へと変化する。

以上の現象は図 3(a)に示すような電車分岐器と概念的には同じである[7]。我々の場合は図 3(b)に示すように、電車ではなく電子の波である。電子の進む線路は光を照射した際に下図のように変更される。理論的には光のパラメータを変えると、さらに線路の分岐方向を変えられるはずで、このような技術ができれば、1 分子にいくつもの超高速スイッチを集積化することにつながる。通常スイッチを集積化すれば、物全体の大きさは大きくなるが、我々の技術ではいくらスイッチを集積化しても１分子からサイズは変わらない。集積化限界を突破する技術として期待される。今後はこの光の制御性をもっと上げられるように研究を進めていく予定である

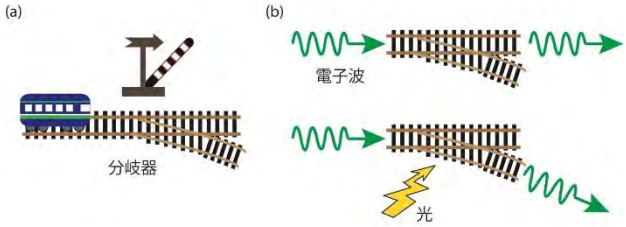


図 3：電車(a)と電子(b)の分岐器の概念図。

謝辞：

本研究は、Ludwig-Maximilians-University Munich の Markus Bohn 氏、Florian Goschin 氏、Matthias, F. Kling 氏、近畿大学の鬼頭宏任氏との共同研究で行われた。また、本研究は、「JST さきがけ「量子技術を適用した生命科学基盤の創出」領域、研究課題名：原子分解能・低速電子ホログラフィーの開発(課題番号：JPMJPR19GA)」、「DFG プロジェクト資金(課題番号：389759512)」、「光科学技術研究振興財団助成金」、「住友財団助成金」、「村田学術振興財団助成金」、「PETACom」、「精密測定財団助成金」の支援により実施された。

参考文献：

1) P. Hommelhoff, Y. Sortais, A. Aghajani-Talesh, and M. A. Kasevich: Phys. Rev. Lett. **96**, 077401 (2006).
2) M. Ludwig, G. Aguirregabiria, F. Ritzkowsky, T. Rybka, D. C. Marinica, J. Aizpurua, A. G. Borisov, A. Leitenstorfer, and D. Brida: Nat. Phys. **16**, 341–345 (2020)
3) H. Yanagisawa, C. Hafner, P. Doná, M. Klöckner, D. Leuenberger, T. Greber, M. Hengsberger, and J. Osterwalder: Phys. Rev. Lett. **103**, 257603 (2009).
4) H. Yanagisawa, M. Ciappina, C. Hafner, J. Schoetz, J. Osterwalder, and M. F. Kling, Scientific Reports 7, 12661 (2017).
5) H. Yanagisawa, M. Bohn, H. Kitoh-Nishioka, F. Goschin, and M. F. Kling: Phys. Rev. Lett. 130, 106204 (2023).
6) H. Yanagisawa, M. Bohn, F. Goschin, A. P. Seitsonen, and M. F. Kling: Sci. Rep. **12**, 2174 (2022).
7) H. Yanagisawa, **真空と表面**, in press.

地球全体に分布するロドプシン保有細菌の新たな光エネルギー獲得戦略
－キサントフィルを用いた集光アンテナの発見－

物性研究所・機能物性研究グループ　　井上 圭一

研究概要

地球上に存在するほぼ全ての生物は、太陽光由来のエネルギーを使うことで生命活動を行なっています。しかしながら、太陽光を生物が利用可能な化学エネルギーに変換できる生物は限られています。代表例は、クロロフィル色素を利用し光合成を行う生物(植物や一部の微生物)ですが、海洋や河川では光合成生物だけでなく、レチナール色素と結合した光受容タンパク質(微生物型ロドプシン：注 1)を用いて太陽光を化学エネルギーに変換する微生物も数多く存在することが知られています。つまり、水圏環境ではこれら 2 種類の光受容機構が生態系に光エネルギーを取り込む窓口になっています。

今回、本研究グループは、イスラエル、スペイン、ドイツの研究グループとの国際共同研究により、淡水湖および海洋に生息する微生物が、レチナール色素に加えてカロテノイド色素(注 2)の一種であるキサントフィル(ゼアキサンチンやルテイン)も結合するロドプシンを持つことを発見しました。さらに、これらの色素は受容した光エネルギーをレチナール色素に移動させる集光アンテナとして働くこと、集光アンテナを持つロドプシンが水圏微生物に幅広く分布することを明らかにしました。今回の発見により、水圏生態系においてロドプシンは集光アンテナを駆使し、従来の試算を上回る量の光エネルギーを受容することが示唆されました。生態系を理解する上で、光エネルギーを受け取る生物の光受容効率を把握し、生態系に流れ込む光エネルギー量を正確に算出することは避けては通れない課題です。本研究の成果は、全球レベルでの水圏生態系の理解の深化につながると期待されます。

研究の背景

ほぼ全ての生態系は太陽の光エネルギーを基盤に成立しており、生態系は光エネルギーを化学エネルギーに変換する生物によって支えられています。特に海洋や河川、湖沼などの水圏生態系では、植物プランクトンやシアノバクテリアなどの微生物が光合成を行なっており、これらの光合成生物のみが光エネルギーを変換できる、と長い間考えられていました。

ところが 2000 年、海洋細菌を対象としたメタゲノム解析(注 3)から、光合成とは全く異なる、微生物型ロドプシンと呼ばれる光エネルギー受容機構の存在が報告されました。プロテオロドプシン(以降：PR)と名付けられたそのロドプシンは、結合したレチナール色素が光エネルギーを受容すると水素イオン(H^+)を細胞の内側から外側へ輸送し、生物が利用可能な電気化学的ポテンシャルを形成します。その後の研究から、海洋表層に生息する細菌の過半数が PR 遺伝子を保有し、特定の海域では PR は光合成に匹敵するほどの光エネルギーを受容すると試算されています。また、微生物型ロドプシンは海洋だけでなく、河川や湖沼に生息する微生物からも次々と発見されており、生態系に流れ込む光エネルギー量を把握する上で、ロドプシンの光受容効率の理解は非常に重要だと考えられています。しかしながら、微生物型ロドプシンの光受容はレチナール色素のみが担うのか？それともレチナール色素にエネルギー伝達可能な集光アンテナを持つのか？などの、基本的な特徴すらよく分かっていませんでした。

研究の内容と成果

微生物型ロドプシンは一般的に、レチナール色素のみが光エネルギーを受容しますが、キサントロドプシン(以降：XR)は、レチナール色素の他にサリニキサンチンというカロテノイド色素と結合し、レチナール色素が受容できない青～緑色の光を利用することができます。このような光受容を補助する色素は集光アンテナと呼ばれ、XR は一般的なロドプシンより幅広い波長域の光を受容できることが知られています。しかし、集光アンテナを備えたロドプシンは僅か 3 種類しか知られておらず、陸域の特定の環境に生息する微生物が持つ例外的な光受容機構であると考えられていました。また、既知の集光アンテナとして機能するカロテノイド色素は、ロドプシンタンパク質の立体構造上の制約から、全て 4-ケト環構造(注 4)という共通した構造を持ちます(図 1)。

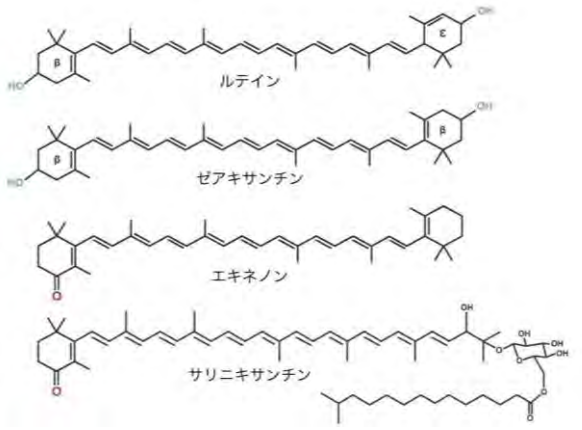


図 1：カロテノイド色素の構造式。本研究により集光アンテナとして機能することが示されたゼアキサンチン、ルテインと、既知の集光アンテナであるサリニキサンチンとエキネノンの構造式の比較。ゼアキサンチンとルテインは 4–ケト環構造(赤色の酸素原子)を持たない。

本研究では、陸域の特殊な環境以外に生息する微生物も、集光アンテナを備えたロドプシンを持つのかを調べました。イスラエルの淡水湖であるガリラヤ湖に生息する微生物を対象にメタゲノム解析を行い、ロドプシン遺伝子を探索しました。この遺伝子を大腸菌に異種発現(注 5)させた後、精製したロドプシンタンパク質へ、湖水から抽出・濃縮した色素を添加しました。その結果、レチナール色素の他に、ゼアキサンチンやルテインと結合する XR を見出しました(図 2)。さらに、この XR が利用できる光の波長を調べた結果、結合したゼアキサンチンやルテインが集光アンテナとして働き、受容した光エネルギーの約 40%をレチナール色素に移動させることが明らかになりました。

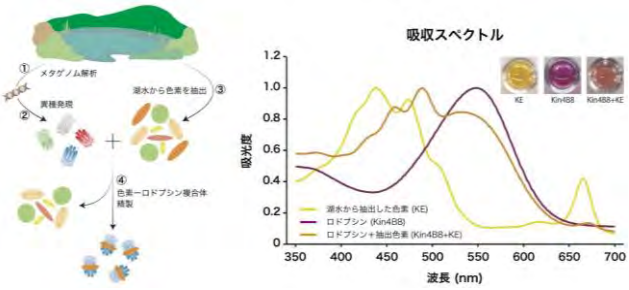


図 2：実験の流れとカロテノイド色素と結合したキサントロドプシンの吸収スペクトル。左図は実験の流れ、右図は結果を示している。キサントロドプシンと湖水から抽出した色素の一部(ルテイン)が結合したことが分かる。

本研究で見出された XR が、なぜ 4–ケト環構造を持たないゼアキサンチンを集光アンテナとして使うことができるのかを調べるため、クライオ電子顕微鏡を用いた単粒子構造解析(注 6)により、この XR の立体構造を決定しました(図 3)。

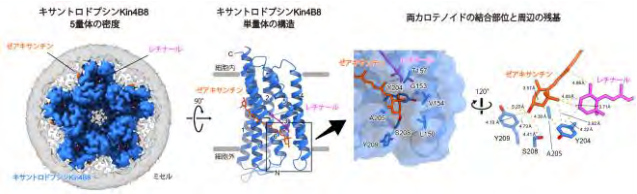


図 3：ゼアキサンチンが結合したキサントロドプシン Kin4B8 の立体構造。左図は得られた 5 量体の密度マップと、モデル構築した Kin4B8 単量体の構造。右図はゼアキサンチンの結合様式を示している。

XR は 5 量体を形成しており、タンパク質の表面に大きな横穴が空いた単量体のそれぞれの外側に、ゼアキサンチンが結合していました。結合したゼアキサンチンの水酸基環は横穴にはまっており、レチナール色素と直接相互作用していました。また、ゼアキサンチンの水酸基は溶媒に露出しており、まわりの親水性アミノ酸であるセリンやチロシンと相互作用していました。一方、既知の 4–ケト環構造を持つカロテノイドと結合する XR では、これらの残基の極性は疎水性になっており、これらの横穴を構成するアミノ酸残基の性質や構造の違いが、XR の間で結合するカロテノイド色素の違いを決めていると考えられます。

一方、地球表面積の約 7 割を占める海洋では、海洋表層に生息する細菌の半数以上が PR を保有することが知られていますが、その立体構造の特徴から集光アンテナを持たないと考えられていました。そこで学術研究船「淡青丸(注 7)」を用いた研究航海で、西部北太平洋から分離した海洋細菌(*Tenacibaculum* sp. SG–28)を対象とし、SG–28 株の持つ PR が集光アンテナを備えるかどうかを調べました。SG–28 株の持つ PR 遺伝子を大腸菌に異種発現させてタンパク質を精製した後、SG–28 株から抽出したカロテノイド色素を添加し、再度タンパク質精製を行いました。一連の解析から、SG–28 株が持つ PR は、SG–28 株が産生するゼアキサンチンを集光アンテナとして用いることを示しました(図 4)。

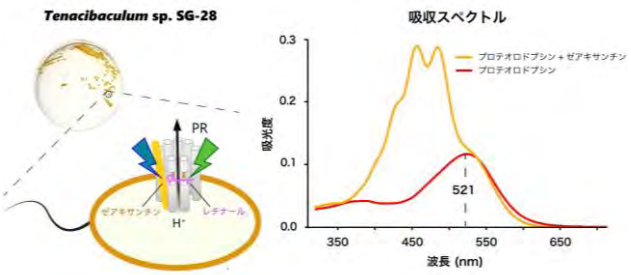


図 4：集光アンテナによるプロテオロドプシン(PR)の光エネルギー受容量の変化。左図は海洋細菌 *Tenacibaculum* sp. SG-28 のコロニーの写真と SG-28 株のもつプロテオロドプシンの模式図、右図はプロテオロドプシンの吸収スペクトルを示している。ゼアキサンチンと結合することで、プロテオロドプシンは短波長側の幅広い光エネルギーを受容することが出来る。

さらに、これまでに実施されたメタゲノムデータを利用し、各水圏環境から検出されたロドプシン全体に対し、集光アンテナを備える上で必要なアミノ酸を持つロドプシンの割合を調べました。その結果、集光アンテナを持つロドプシンは全世界の淡水域および、海域に広く分布することが明らかとなりました(図 5)。

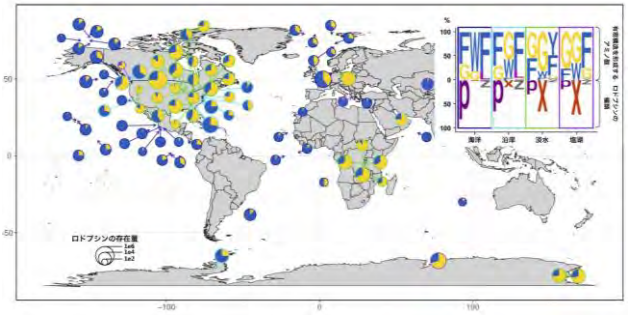


図 5：集光アンテナを持つロドプシンの地理的分布
メタゲノムデータを用いて作成した、集光アンテナを備えたロドプシンの地理的分布を示している。ロドプシンが集光アンテナを備えるかどうかは、ロドプシンタンパク質上の特定の位置のアミノ酸の種類で推定することができる。この位置のアミノ酸がグリシン(G、黄色)であると横穴がある構造を形成し(＝集光アンテナを備える)、それ以外のアミノ酸(フェニルアラニン(F)やトリプトファン(W)など、いずれも青色)であると横穴を形成せず、集光アンテナを持てない。ロドプシンのタイプはプロテオロドプシン(P、紫色)、キサントロドプシン(X、赤色)、それ以外のロドプシン(Z、灰色)を示す。海洋、沿岸、淡水、塩湖など幅広い環境に、横穴構造を形成するロドプシンが遍在すると推定される。

謝辞

本研究成果は、イスラエル工科大学・Oded Béjà 教授、東京大学大学院理学系研究科・濡木 理教授、志甫谷 渉助教、村越 峻也氏(修士課程学生)、ワイツマン研究所・Mordechai Sheves 教授、東京大学大学院新領域創成科学研究科／東京大学大気海洋研究所・吉澤 晋 准教授、藤原敬允氏(博士課程学生)、名古屋工業大学大学院工学研究科・神取 秀樹特別教授との共同研究として行われました。

掲載論文：A. Chazan†, I. Das†, T. Fujiwara†, S. Murakoshi†, A. Rozenberg†, A. Molina-Márquez, F. K. Sano, T. Tanaka, P. Gómez-Villegas, S. Larom, A. Pushkarev, P. Malakar, M. Hasegawa, Y. Tsukamoto, T. Ishizuka, M. Konno, T. Nagata, Y. Mizuno, K. Katayama, R. Abe-Yoshizumi, S. Ruhman, K. Inoue, H. Kandori, R. León, W. Shihoya*, S. Yoshizawa*, M. Sheves*, O. Nureki* and O. Béjà* († : equally contributed) “Phototrophy by antenna-containing rhodopsin pumps in aquatic environments” (2023) *Nature*, **615**, issue 7952, pp. 535-540

（注 1）微生物型ロドプシン
7 回膜貫通型の光受容タンパク質であり、発色団としてレチナール色素と結合する。ロドプシン遺伝子は細菌、アーキア、真核微生物、巨大ウイルスに広く分布することが知られている。

（注 2）カロテノイド色素
主に 400~500 nm の波長の光を吸収し、黄色、橙色、赤色を示す天然色素群。

（注 3）メタゲノム解析
海水などの環境サンプルから抽出した DNA の塩基配列を網羅的に解読し、培養実験を介さずにサンプル中の微生物を解析する方法。解読された DNA の配列データはメタゲノムデータと呼ばれる。

（注 4）4-ケト環構造
炭素が形成する 6 員環構造において、4 番目の炭素原子がケトン基をもつ構造。これまでに立体構造が決定された集光アンテナを持つロドプシンでは、カロテノイド色素のケトン基がロドプシンとの結合部位を形成している。

（注 5）異種発現
目的遺伝子の DNA を人工的に他の生物に組み込んで、特定のタンパク質を作らせる実験手法。

（注 6）単粒子構造解析
電子顕微鏡で撮影した多数の生体分子の画像から、その立体構造を決定する構造解析手法。目的試料の結晶を作製しなくても立体構造情報を得ることができる。

（注 7）淡青丸
独立行政法人海洋研究開発機構が所有していた学術研究船。本研究で用いた海洋細菌（*Tenacibaculum* sp. SG-28）は KT-09-11 次研究航海で分離し、吉澤研究室で維持してきたサンプルである。

熱流注入で磁気を観る
－原子間力顕微鏡を用いた簡易的磁気イメージング法の開発－

物性研究所・ナノスケール物性研究部門　一色 弘成
物性研究所・ナノスケール物性研究部門　大谷 義近

【研究の背景】

磁性体を研究する上で、磁気イメージングは直観的な磁気情報を得る有用な実験手法である。近年の磁性トポロジカル材料の急激な発展に伴い、新物質の磁気を高空間分解能で迅速に観ることがますます重要になっている。例えば、非共線反強磁性体 Mn_3Sn の磁壁構造 [1]は明らかにされておらず、その実験的観察が喫緊の課題となっている。これまでに様々な磁気イメージング法が開発されているが、高い空間分解能を持つものは、高額かつ複雑な測定装置を必要とする。そこで、広く普及している原子間力顕微鏡を用いて、非共線反強磁性体にも適用可能で簡便に磁気イメージングができる新しい方法の開発に取り組んだ。

本研究で着目した異常ネルンスト効果は、物質の磁化と温度勾配の外積方向に電場を生成する現象である。原子間力顕微鏡の探針をサーマルアンカーとして用いることで試料細線に局所的に垂直温度勾配を作り、異常ネルンスト電圧の空間分布を取得して磁気イメージングを行う。探針から熱流を注入しゼーベック効果やジュール熱などの熱電効果をマッピングする試みには長い歴史がある [2]。現存する装置には特殊探針やレーザーが使われており、大変高価な装置である。しかし、本研究では従来の手法に比べて非常に簡便かつ容易な新手法を紹介する。

【実験の概要】

本実験では、探針を試料細線に接触させて、局所的に垂直温度勾配を作る。試料細線の磁化が短軸方向を向いているとき、局所的な異常ネルンスト電圧が細線の両端で検出される。磁化が反転すると電圧の符号が反転する。したがって、探針を接触モードで走査しながら、異常ネルンスト電圧をマッピングすることで磁気イメージングが可能となる。図 1(a)に測定の模式図を示す。平衡状態では、探針の接触による試料の局所的な温度勾配は生じない。そのため、試料細線の隣に設けたヒーターを用いて、試料を数 K だけ加熱する必要がある。図 1(b)に素子の原子間力顕微鏡トポグラフィー像と電極の配置を示す。本研究では、手法のデモンストレーションのために、異常ネルンスト効果が非常に大きいことで知られる強磁性 Weyl 半金属 Co_2MnGa[3]を用いた。ヒーターには 1 kHz, 4 mA の交流電流を流す。ジュール熱は 2 倍の周波数で生じるので、試料両端の異常ネルンスト電圧を 2 倍の周波数(2 kHz)で測定することで、直流測定に比べてノイズを大幅に減らすことができる。実験は大気・室温で行った。探針材料は窒化シリコンで、市販のものを用いた。原子間力が 20 nN に固定されるようにフィードバックを掛けながら接触モードで走査し、試料両端に生じる電圧を観察した。

図 1(b)の四角で囲われた領域の、異常ネルンスト電圧をマッピングした結果を図 2 に示す。図 2(a), (b), (c)の上段

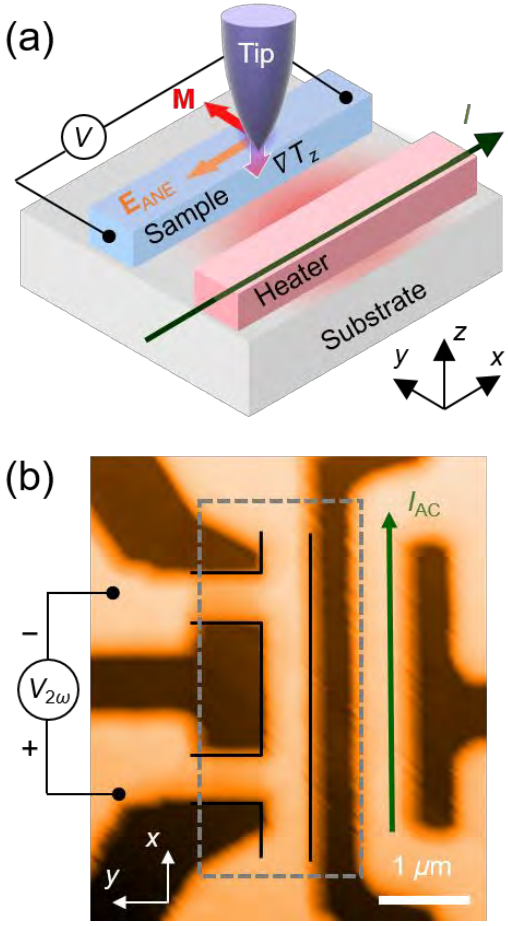


図 1 (a)本測定の模式図、(b)素子の原子間力顕微鏡トポグラフィー像と電気測定の配置

ははそれぞれ、外部磁場を+134 mT, −17 mT, −134 mT 印加したときの結果である。磁場を短軸方向に+134 mT 印加し、試料表面上に探針があるときは一様に正の電圧が得られる。この電圧信号の強度は、ヒーターに流した電流の大きさの 2 乗に比例する。一方、−134 mT 印加すると信号の符号が反転することがわかった。これらの結果から、得られた電圧信号は、局所的な温度勾配により生じる異常ネルンスト効果に由来することがわかる。さらに、磁場を+134 mT から掃引して−17 mT にした場合は細線の中ほどに、明・暗(正・負電圧)のペアが現れる。これは、この場所に 180°磁壁が存在することを反映している。図 2 の下段に OOMMF により得られた、それぞれの磁場化での Co_2MnGa の磁気構造のシミュレーションの結果を示す。上段の実験結果と良い一致を示していることがわかる。試料細線の端を跨ぐように探針を走査した時の異常ネルンスト電圧の空間分布から、空間分解能は約 80 nm と見積もられた。また、パーマロイ($Ni_{80}Fe_{20}$)細線でも同様の磁気的信号が観察されたことから、異常ネルンスト効果が比較的小さい物質に対しても、本手法は適用可能であることがわかった。

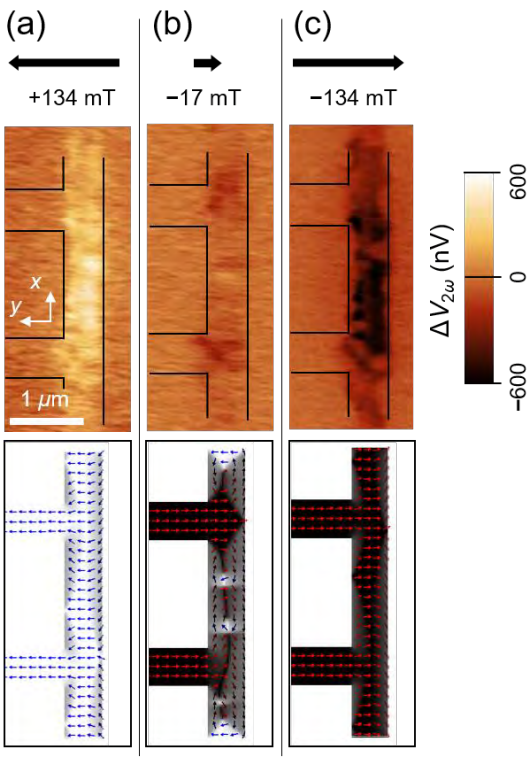


図 2　異常ネルンスト電圧をマッピング像. マッピングの範囲は、図 1(b)の点線で囲われた領域. (a), (b), (c)ははそれぞれ、+134 mT, −17 mT, −134 mT の外部磁場を印加したときの結果. 下段はそれぞれの外部磁場のもとで計算された磁化の分布.

【まとめと今後の展開】

原子間力顕微鏡の探針を用いて試料表面近傍に局所的に温度勾配を作り、異常ネルンスト電圧を測定することで磁気イメージングを行う新手法を開発した [4]。本研究のユニークな点は、(1)細線加工と通常の原子間力顕微鏡以外は必要としない非常に簡易的な方法で、(2)約 80 nm の高い空間分解能の磁気イメージングを実現したことである。今後は、非共線反強磁性体 Mn_3Sn の磁壁構造の観察に取り組む予定である。

近年、異常ネルンストサーモパイル素子を使った、エネルギーハーベスティングが注目されている。本手法を利用することで、素子の最適化に必要不可欠な、素子内部の磁気熱電効果マッピングを容易に行うことができると期待される。しかし、現時点では、本手法の定量性については疑問が残る。探針と試料の機械的な接触だけでは、誘起される温度勾配の大きさを説明することができない。したがって、試料と探針の間に存在する水や空気による熱伝導を考察する必要がある。今後、探針と試料間の熱輸送のモデルを構築して、定量的な磁気熱電係数のマッピング法として発展させたい。

参考文献

[1] S. Sugimoto, Y. Nakatani, Y. Yamane, M. Ikhlas, K. Kondou, M. Kimata, T. Tomita, S. Nakatsuji, and Y. Otani, *Electrical Nucleation, Displacement, and Detection of Antiferromagnetic Domain Walls in the Chiral Antiferromagnet Mn3Sn*, Commun. Phys. **3**, 111 (2020).

[2] Y. Li, Y. Zhang, Y. Liu, H. Xie, and W. Yu, *A Comprehensive Review for Micro/Nanoscale Thermal Mapping Technology Based on Scanning Thermal Microscopy*, Vol. 31 (2022).

[3] A. Sakai et al., *Giant Anomalous Nernst Effect and Quantum-Critical Scaling in a Ferromagnetic Semimetal*, Nat. Phys. **14**, 1119 (2018).

[4] N. Budai, H. Isshiki, R. Uesugi, Z. Zhu, T. Higo, S. Nakatsuji, and Y. Otani, *High-Resolution Magnetic Imaging by Mapping the Locally Induced Anomalous Nernst Effect Using Atomic Force Microscopy*, Appl. Phys. Lett. **122**, (2023).

一度壊れて復活する反強磁性
－元素置換による量子性の出現－

ケルン大学理論物理学研究所　　渡辺 義人
（元　東大新領域　有馬・徳永研究室　博士課程学生）

はじめに

磁性材料を構成する磁性イオンの磁気モーメントは、多くの場合、身近に存在する磁石と同様の性質を示す。例えば、反強磁性秩序状態に強い外部磁場を印加すると反強磁性秩序が壊れるが、これは古典的な磁気モーメントが強制的に印加磁場方向を向くことで反強磁性相関が保てなくなったためである。一方で、S = 1/2, 1 といった小さなスピン量子数の磁気モーメントを持つ系では、古典的な磁気モーメントから逸脱した振る舞いが観察されることがわかっており、このような量子磁性体における新奇な量子相や量子臨界現象の研究が盛んに行われている。

低温で印加磁場を変化させたときに発生する量子磁性体のボース・アインシュタイン凝縮(BEC)は、ボゾンであるスピン波励起が基底状態に量子凝縮する典型的な量子現象である。これまでの研究は主に、強い量子性が期待できる小さなスピン量子数の系に焦点が当てられており、実験と理論の両面から多くの知見が得られている[1]。$S > 1$ の量子スピン系では、各磁気モーメントが単一サイトレベルで多くの自由度(エネルギー準位)を持つため、より多彩な現象が期待できる。しかし、実際には古典的な磁気モーメントの性質が支配的であることが多い。その原因は、競合する相互作用が内部の詳細なエネルギー分裂を覆い隠してしまうためである。この競合する相互作用を抑制し、$S > 1$ の量子スピン系において新たな量子効果や現象を明らかにする方法が課題となっている。

研究手法

$S > 1$ のスピン系の磁気 BEC 現象の発現機構を明らかにするため、本研究[2]では擬二次元磁性体 $Ba_2CoGe_2O_7$ を対象とした。この物質では、磁性を担うコバルトイオン(Co, S = 3/2)が正方格子上に配列している。Co の磁気モーメントには容易面型の単一イオン異方性が存在し、ゼロ磁場時には基底状態の二重項と励起状態の二重項にエネルギーが分裂する。磁気モーメント間には反強磁性相互作用が働き、6.7 K 以下で反強磁性秩序を示す。後に示すようにこの相互作用が強すぎるため、外部に対する応答は古典スピン系で予測されるものと類似しており、S = 3/2 に固有の量子的な性質は見られない[3]。そこで、本研究では Co の一部を非磁性イオンの亜鉛イオン(Zn)で置き換える磁性イオン希釈を行った。これにより、Co−Co ボンドが減少し、系全体の有効的な相互作用が弱くなることで、Co スピンの異方性によるエネルギー分裂に由来する量子相転移現象の発現が期待される[図 1 (a, b)]。

まず、S = 3/2 の系における磁気 BEC 現象を概観する。

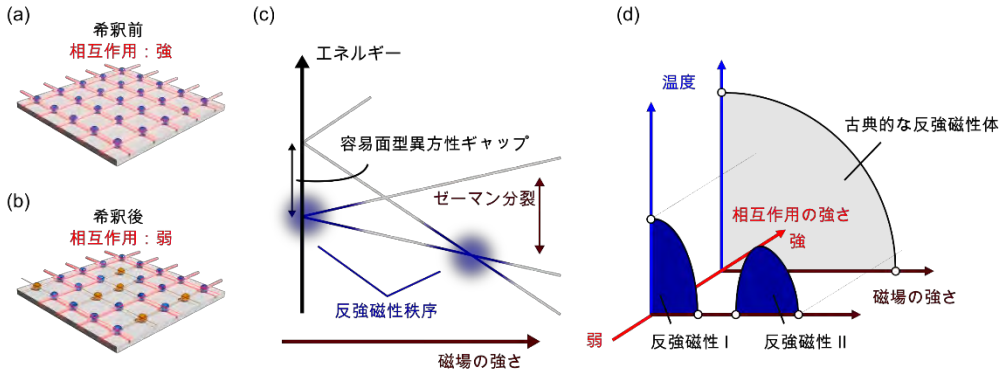


図 1：磁性イオン希釈概念図（a、b） 磁性イオンのコバルト(青)の一部を非磁性イオンの亜鉛(黄)で置き換えることにより、磁気秩序を安定化させている相互作用をしているボンド(赤)が減少し、系全体としての平均的な相互作用の大きさが減少する。**(c)** 容易面型異方性を持つ S=3/2 スピンの一軸磁場下エネルギー準位図。**(d)** 磁気相互作用変調に伴う温度磁場相図の発展概念図。

図 1　(c)に容易面型の異方性をもつ S = 3/2 スピンの一軸方向に磁場を印加した際のエネルギー準位図を示す。ゼロ磁場では基底二重項が擬似的な S = 1/2 スピンと見なされ、反強磁性秩序が形成される。c 軸方向に磁場を印加すると、基底二重項がゼーマン分裂し、反強磁性状態が一度壊れる。しかし、さらに印加磁場を強くすると、励起二重項の片方と基底二重項の片方がエネルギー縮退する。この磁場近傍では縮退している二重項が再び S=1/2 の自由度として振る舞い、ゼロ磁場と似た反強磁性秩序が復活する。従って、S = 3/2 スピンの容易面型異方性がある系に一軸方向に磁場を印加すると、図 1(d)の青色で示されるように、二つの反強磁性相とそれらを隔てる三つの BEC 型量子臨界点からなる特異な温度磁場相図が予想される。

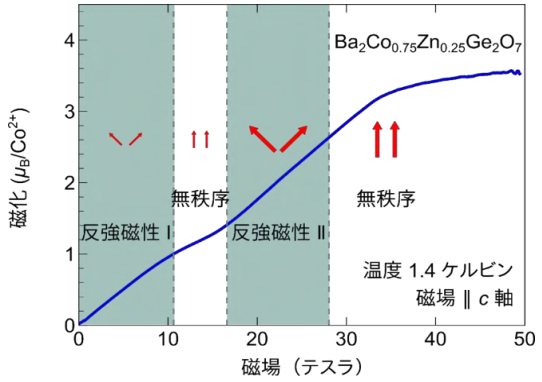


図 2：$Ba_2Co_{0.75}Zn_{0.25}Ge_2O_7$ の磁化の磁場依存性　赤い矢印は磁気モーメントが磁場方向にそろえられている様子を模式的に示している。15 テスラ付近で一度磁場方向に磁気モーメントがそろい磁気秩序が消失した後さらに強い磁場で再び反強磁性秩序が現れ、磁気モーメントが磁場からずれた方向を向く。30テスラ以上では再び磁気秩序が消失し、磁気モーメントは磁場方向を向く。

しかしながら、このシナリオは磁気モーメント間に働く相互作用が磁気モーメントの異方性に比べ十分小さい場合にのみ適用される。相互作用が大きくなると、反強磁性秩序が安定化する。図 1(d)では、それぞれのドームが大きくなるにつれて二つのドームが合流し、最終的には一つの特徴のない反強磁性ドーム(灰色)になる様子が模式的に示されている。この場合、磁気モーメントの離散的な準位が磁場下で発展していく様子は強すぎる磁気相互作用によって隠されてしまう。

次に実験結果に移る。本研究では、様々な亜鉛置換率の結晶を作製し、0.3 ケルビンまでの低温環境や、50 テスラのパルス磁場下での誘電率、磁化、磁歪などの性質を調査した。コバルトの 25%を亜鉛で置き換えた場合に、15 テスラ付近の磁場領域で飽和磁化のおよそ 1/3 の位置に磁化プラトーが観察された(図 2)。これは基底二重項のうちの片方に磁場によって完全に偏極した状態に対応する。言い換えれば、反強磁性秩序が磁場により破壊された量子常磁性状態が実現している。また、同じ磁場領域で、磁歪や誘電率にも異常な外部磁場応答が観察されることが明らかになった。さらに印加磁場を強くすると、磁化プラトーが終了し、30 テスラの飽和まで再び磁化が増加することが明らかになった。この振る舞いは S = 3/2 で相互作用が弱い場合に期待される反強磁性→無秩序相→反強磁性→無秩序相の連続する相転移現象の描像と一致する。希釈により狙い通り相互作用が弱まった結果であると言える。

図 3 に温度磁場相図を示す。$Ba_2CoGe_2O_7$ では単一であった反強磁性ドームが、希釈量が 25%の時には二つの反強磁性ドームに分裂していることが分かる。ただし、この組成では二つのドームは 1.0 ケルビン以下で合流している。ドームの完全な分裂を実現するには、希釈量を増やし磁気相互作用を更に抑制することが有効であると考えられる。そこで、37.5%希釈した組成に対し追加で実験を行った結果、実際にドームの分裂がより顕著になることが確認できた。

最後に、パーコレーション転移という別の相転移を考慮する。希釈量 41%は正方格子のパーコレーション閾値として知られている。これ以上希釈すると、系の端から端まで繋がる Co サイトのクラスターが存在しなくなり、長距離秩序も全ての磁場領域で原理的に存在しなくなる。そのため、41%より小さい希釈量でドームの完全分裂が起こるかどうかは非自明な問題である。

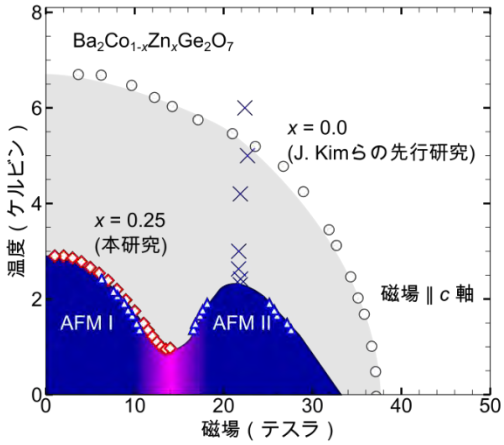


図 3：希釈による温度磁場相図の発展　相境界は誘電率の温度磁場依存性測定から精度良く決定された。

本研究では、中間磁場領域で系が有効的なS = 1の系と見なされることに着目し、ドームの分裂可能性が系のパラメータに依存し、本系ではそれが可能なパラメータ領域にいることを示した。数値計算結果[4]からは、35%程度の希釈でドームの分裂が起こると予想される。このことは25%希釈ではドームが低温で合流していたが、37.5%希釈ではドームの分裂が顕著に見えていたことと矛盾しない。一方で、容易面型異方性の値が本系より弱い場合には、希釈量を増やしていってもドームが完全に分裂することなく自明なパーコレーション転移が生じる。つまり、希釈による磁気相互作用変調には適用限界が存在する。この知見は他の物質で同様の相互作用の制御を試みる際重要な参考となると考えられる。

まとめと今後の展望

本研究では S = 3/2 のスピン系において磁気 BEC 現象を明らかにするため、擬二次元磁性体 $Ba_2CoGe_2O_7$ を用いた。Co イオンを非磁性の Zn イオンで置き換えることで、相互作用が弱まり、BEC 型の量子相転移現象が観察された。また、希釈量 41%のパーコレーション閾値を考慮し、ドームの分裂可能性について検討した。

本研究で用いた磁性イオン希釈により相互作用を弱める方法は、他の物質探索にも応用が可能であることから、量子物性の基本的な理解の進展や量子技術の発展への貢献が期待できる。また、本物質は、理論的な合意が得られていないランダムネスのある物質における量子臨界現象の貴重な実験的検証の場を提供している。今後は、数値計算結果や、応力などの不規則性を伴わない制御方法で得られる実験結果との比較を通じて、これらの現象への理解が深化することが期待される。

謝辞

本研究成果は東京大学新領域創成科学研究科の厳正輝氏、水上雄太氏、橋本顕一郎氏、芝内孝禎氏、車地崇氏、徳永祐介氏、有馬孝久氏、東京大学物性研究所の三宅厚志氏、徳永将史氏、電気通信大学大学院情報理工学研究科の池田暁彦氏との共同研究で行われました。また、本研究は科学研究費補助金基盤研究[19H01835]、および新学術領域研究「量子液晶の物性科学」）領域代表：芝内孝禎教授）[JP19H05824、 JP19H05826]などの助成を受けて行われました。

[1] V. Zapf *et al*. Rev. Mod. Phys. **86**, 563 (2014).
[2] Y. Watanabe *et al*. Nat. Commun. **14**, 1260 (2023).
[3] J. Kim *et al*. Nat Commun. **5**, 4419 (2014).
[4] T. Roscilde *et al*. Phys. Rev. Lett. **99**, 047205 (2017).

磁性体における内因性異常ホール効果の超高速非平衡ダイナミクス

物性研究所　極限コヒーレント光科学研究センター　　松田 拓也
物性研究所　極限コヒーレント光科学研究センター　　松永 隆佑

研究背景

磁性体に電場を印加すると時間反転対称性の破れに起因して電子の軌道が曲げられ、電場と垂直方向にも電流が流れる。これは異常ホール効果として古くから知られ、経験的に大きな磁化を持つ強磁性体で巨大に現れる現象であると考えられてきた。しかし近年、物質のトポロジーの観点から理解が進展し、磁化というより運動量空間上のベリー曲率が重要であることがわかってきた。この寄与は内因性異常ホール効果と呼ばれ、ホール伝導度は

$$\sigma_{xy}^{\mathrm{int}} = \frac{e^2}{\hbar}\sum_n \int \frac{\mathrm{d}\boldsymbol{k}}{(2\pi)^3} f\big(\epsilon_n(\boldsymbol{k})\big) B_{n,z}(\boldsymbol{k}) \qquad (1)$$

のように電子分布関数$f\big(\epsilon_n(\boldsymbol{k})\big)$とベリー曲率$B_{n,z}(\boldsymbol{k})$の積分で表すことができる。縦伝導は電子や不純物などの散乱によってジュール熱が発生するのに対して、内因性の異常ホール伝導は散乱現象とは無関係に起こり、エネルギーを消費しない無散逸電気伝導が生じるという点でも興味が持たれている。一方、不純物との散乱によって生じる外因性異常ホール効果も知られており、異常ホール効果が観測されるとその起源が内因性か外因性かが必ず議論の対象となっている。

異常ホール効果の微視的起源を探る手法として、ゲート電圧や元素置換によってフェルミエネルギーや散乱確率を制御して、縦伝導度と異常ホール伝導度の関係性を調べる方法がよく知られている。従来のこのような研究は、熱平衡あるいはそれに近い状況を前提として、直流電気抵抗測定により調べられてきた。一方、物質の性質が時々刻々と変化していく非平衡状態における異常ホール効果を調べる研究例はわずかしかなく、その時間スケールも 100 ピコ秒(ps)程度に留まっている。よって、それよりも速い時間スケールで異常ホール効果がどのように振る舞うのかは全くの未解明であった。

そこで我々は、非平衡下の磁性体における異常ホール効果の超高速ダイナミクスを調べる研究を立案し、その舞台としてトポロジカル磁性体 Mn_3Sn に注目した。Mn_3Sn は全体としての磁化が非常に小さい反強磁性体であるにも関わらず、特異な磁気構造によって強磁性体並みに巨大な異常ホール効果を室温で示すことが 2015 年に物性研究所(当時)の中辻教授、肥後特任准教授らによって明らかにされた[1]。2018 年にはバルク単結晶に匹敵する巨大応答を示す Mn_3Sn 薄膜の作製も報告され[2]、高速磁気情報処理デバイスの実現に向けて大きく注目されている。我々は 2020 年に Mn_3Sn 薄膜に対するテラヘルツ波パルスの偏光回転計測を行い、DC 極限の異常ホール伝導度を 0.1 ps 以下の非常に短い時間で観測することに成功した[3]。本研究[4]ではその技術を用いて、非平衡下における異常ホール伝導の超高速ダイナミクスの時間分解計測を行った。

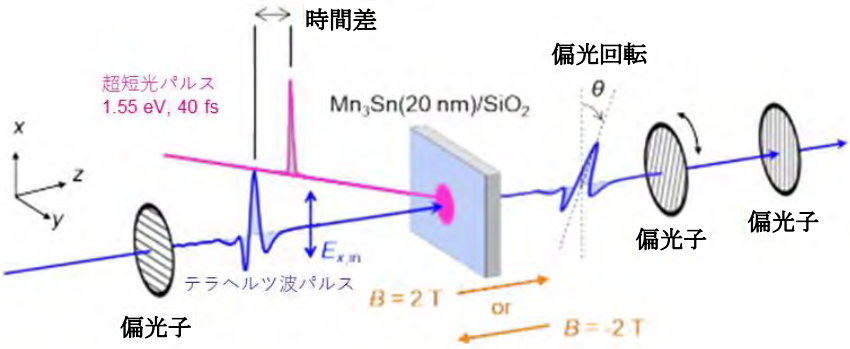


図 1 実験系の模式図。超短光パルスを試料に照射し、それと時間差をつけたテラヘルツ波パルスを入射して、透過した偏光面の回転を検出することで、ホール伝導度の変化を調べることができる。

実験結果

図1に示すように、SiO_2基板上に作製された厚み20 nmのMn_3Sn薄膜に対してフォトンエネルギー1.55 eV、パルス幅 40 fs の超短光パルスレーザーを照射し、それによって生じる超高速変化をテラヘルツ波パルスの偏光回転を通して観測した。図 2(a)および 2(b)はある励起密度においてそれぞれ光パルスを照射してから 0.52 ps 経ったときの縦伝導度スペクトル$\sigma_{xx}(\omega)$とホール伝導度スペクトル$\sigma_{xy}(\omega)$を示している。光照射によって$\sigma_{xx}(\omega)$はほとんど変化せず、散乱確率がたかだか 3%ほど変化したのみであった。一方、$\sigma_{xy}(\omega)$は 40%にも及ぶ劇的な変化を示すことがわかった。この実験結果から、ホール伝導度$\sigma_{xy}(\omega)$は、散乱によって生じる縦伝導度$\sigma_{xx}(\omega)$とは本質的に異なるメカニズムで生じていることがわかる。これは外因性異常ホール効果では説明できないことを意味している。

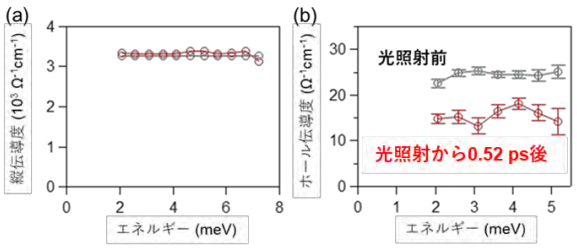


図 2 光パルス照射前とその直後の縦伝導度とホール伝導度の周波数特性。光パルス照射前後で(a)縦伝導度はほぼ変化しないが、(b)ホール伝導度は 40%も変化が生じる。

一般に、物質に超短光パルスを当てた直後の 0.1 ps ほどの時間帯スケールでは、物質中の電子だけが光のエネルギーを受け取って電子の温度が瞬間的に数 100 K まで急上昇するが、格子やスピンはまだほとんど変化を受けておらず、電子系とそれ以外の温度が分離した特殊な状態が現れる。2 温度モデルによるシミュレーションから、本研究の実験条件では、Mn_3Sn では光照射直後に電子温度が 700 K 近く上昇する一方、格子温度はほぼ変化していないと考えられる(図 3(a))。すなわち、超短光パルス照射後 0.1 ps ほどの超高速時間領域では、バンド構造そのものは変化せず、電子分布関数$f(\epsilon_n(\boldsymbol{k}))$のみが変化しているものと考えられる。その場合内因性異常ホール伝導度$\sigma_{xy}^{\mathrm{int}}$の電子温度依存性は式(1)から比較的簡単に計算することが可能であり、から実験結果と計算結果が良い一致を示すことが分かった(図 3(b))。これは光パルス照射による異常ホール効果の超高速変化が内因性機構でよく説明できることを意味している。

内因性異常ホール効果は式(1)が示すようにフェルミエネルギーE_F以下の電子状態とベリー曲率で決まる。ただしベリー曲率$B_{n,z}(\boldsymbol{k})$はバンド構造の(反)交差点で極大となり、図 3(c)に示すように各(反)交差点の上下のブランチは逆符号のベリー曲率$B_{n,z}(\boldsymbol{k})$を持っている。そのためE_Fより十分下の状態の寄与は式(1)の積分を実行することでほとんどキャンセルされ、実際の内因性異常ホール効果はE_F近傍の電子分布の影響を受けやすい。したがって、本研究は超短光パルスを照射して電子温度を瞬間的に急上昇させたことで、異常ホール効果の巨大な変化を引き出すことに成功した。本研究によって、異常ホール効果の超高速変化を調べることでそのミクロな起源を判別可能であることが初めて明らかになった。

磁性体に光を当てると電子温度上昇がすぐに磁化に影響を与え、磁化が高速に変化することも古くから知られている。これは超高速消磁と呼ばれており、本研究の実験結果も一見すると電子温度上昇ではなく消磁が起こったためのようにも考えられる。その点を検証するため、本研究では

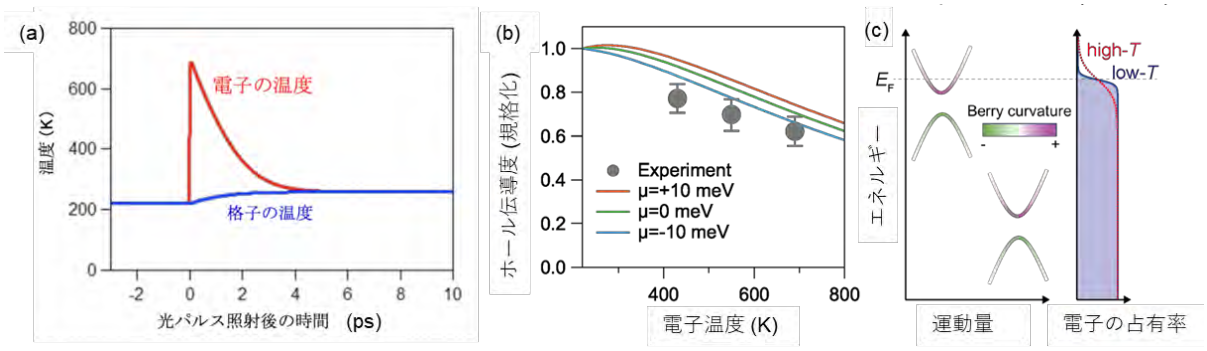


図 3 (a)光パルス照射後の電子温度と格子温度変化の計算結果。光照射によってまず電子温度が急激に上昇し、その後で電子格子相互作用を通してエネルギーが移り格子温度が上昇する。(b)ホール伝導度の電子温度依存性。灰色丸が実験値で実線が理論計算値である。(c)左が(反)交差点周りのベリー曲率の模式図、右がエネルギーに対する電子の占有率を表している。青実線は電子温度が低い時で光照射により電子温度が急上昇し電子分布関数が赤破線のように変化する。

Mn_3Sn が約 200 K を境に起こす特殊な相転移に注目した。200 K 以下では図 4(a)のようにクラスター八極子相からヘリカル相へ転移し、異常ホール効果が減少する。よって、もしヘリカル相で光パルスを照射して超高速消磁に相当することが起これば、光励起後に異常ホール効果が増強すると考えられる。実際に 150 K で実験を行った結果、光励起後 0.1 ps の異常ホール効果は減少し、その後 2-3 ps の時間をかけて増強に転じることがわかった。これは 0.1 ps 程度の時間で起こる変化は超高速消磁では説明できず、あくまで電子系の変化によるものであることを明確に示している(図 4(b))。

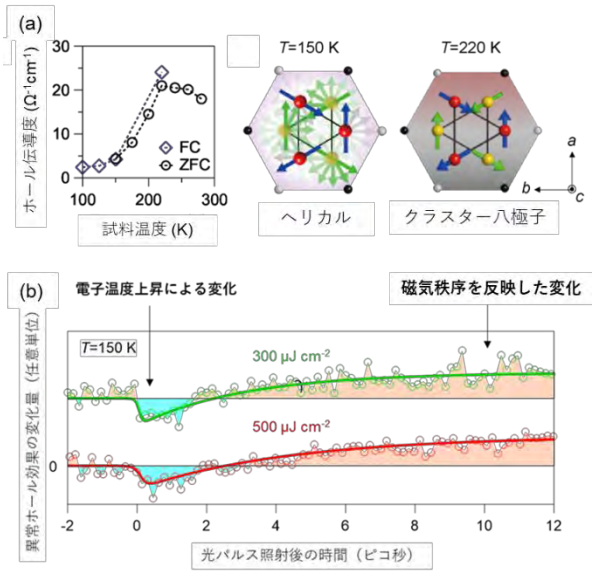


図 4 (a)左がホール伝導度の温度依存性、右が試料温度 150 K の時と 220 K の時のスピン配置。(b)試料温度 150 K で計測された異常ホール効果の変化の時間発展。光パルス照射直後に異常ホール効果がまず減少し、時間が経過してから今度は符号が変わって増強に転じた。それぞれが電子温度の上昇と、磁気秩序の発達に相当する変化を表している。

今後の展開

本研究によって、磁性体の異常ホール効果の微視的起源が超高速非平衡ダイナミクスから判別可能にする全く新しい手法を切り拓くことに成功した。従来の手法は試料の質そのものが変化してしまう可能性があったが、本手法は光学的に非接触に判別可能という大きな利点がある。また異常ホール効果を利用すると磁気秩序の向きを電流として読み出すことが可能であるが、高速磁気情報処理デバイス開発という点でも異常ホール効果の超高速変化のメカニズムは重要である。本研究から、磁化を高速に書き込んでさらに高速に読み出すためには、電子温度の上昇を抑えることが本質的に重要であるという設計指針が得られた。また本手法は強磁性体、フェリ磁性体やトポロジカル磁性体を対象とした実験へ波及すると考えられ、今後の非平衡物性物理学のほか高速スピントロニクスの研究にも大きく資することが期待される。

謝辞

本研究は東京大学物性研究所(当時)の神田夏輝助教、同大学大学院理学系研究科の中辻知教授、島野亮教授、肥後友也特任准教授、吉川尚孝助教、平井誉主在氏、松尾拓海氏、Hanyi Peng 氏および東北大学の是常隆准教授との共同研究によるものです。ここに感謝申し上げます。なお本研究は、科学技術振興機構(JST) 戦略的創造研究推進事業 さきがけ「トポロジカル材料科学と革新的機能創出」研究領域(研究総括：村上 修一)における研究課題「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」課題番号 JPMJPR20LA(研究者：松永 隆佑)、未来社会創造事業「スピントロニクス光電インターフェースの基盤技術の創成」課題番号 JPMJMI20A1(代表者：中辻 知)、並びに文部科学省 科学研究費補助金 基盤研究(B)「モノサイクル高強度テラヘルツ磁場発生技術開拓とワイル磁性制御」課題番号 19H01817(研究代表者：松永 隆佑)、特別研究員奨励費「空間反転対称性の破れたワイル半金属における非線形テラヘルツ応答の解明」課題番号 21K13858(研究代表者：松田 拓也)、若手研究「テラヘルツ分光によるワイル反強磁性体の電磁応答の解明と高速制御」課題番号 20J01422(研究代表者：松田 拓也)、および基盤研究(A)「ワイル磁性体における電気磁気応答の発現機構の解明」課題番号 JP19H00650(研究代表者：中辻 知)の一環として行われました。

参考文献

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

[2] T. Higo, D. Qu, Y. Li, C. L. Chien, Y. Otani, and S. Nakatsuji, Appl. Phys. Lett. 113, 202402 (2018).

[3] T. Matsuda, N. Kanda, T. Higo, N. P. Armitage, S. Nakatsuji, and R. Matsunaga, Nat. Commun. 11, 909 (2020).

[4] T. Matsuda, T. Higo, T. Koretsune, N. Kanda, Y. Hirai, H. Peng, T. Matsuo, N. Yoshikawa, R. Shimano, S. Nakatsuji, and R. Matsunaga, Phys. Rev. Lett. 130, 126302 (2023).

一瞬しか発生しない世界最強 1000 テスラ級超強磁場中で結晶の「のびちぢみ」の計測に成功

～ 酸化物で新たな量子状態とそれらの間の相転移の兆候を発見 ～

電気通信大学大学院情報理工学研究科　基盤理工学専攻　池田 暁彦
東北大学大学院理学研究科　物理学専攻　那須 譲治
東京大学物性研究所　附属国際超強磁場科学研究施設　松田 康弘

固体中には天文学的ともいえる数の電子が漂っており、それらの運動の様子がその固体の電気的・磁気的な性質を決めています。遷移金属酸化物では、電子の自由度である電荷、スピン(電子の磁石としての性質)、軌道(電子密度の空間的な偏り)などがお互いに強い相関を持つことで、超伝導相をはじめとした多彩な電気的・磁気的秩序相が現れることが知られており、機能物質として注目されています。

遷移金属酸化物の中でも特にコバルト酸化物($LaCoO_3$)には、特有な自由度として「スピン状態」を持つことが知られており、この秩序現象が探索されていました。スピン状態は物質の電気・磁気・光学特性と強い相関があるため、電気・磁気・光学的性質を併せ持つ新奇なスイッチング素子が実現できる可能性があります。また、スピン状態は近年、「磁気励起子」として見直され、その結晶化やボーズ・アインシュタイン凝縮に起因した「超流動状態」や「超固体状態」の実現可能性が熱く議論されていました[1]。

私たちは、2016 年に $LaCoO_3$ の超強磁場中での磁化測定から、磁場に誘起される磁気と電子状態が結合した謎の秩序相を 2 種類発見しました[2]。さらに 2020 年、超高速ひずみ計測法を用いて 200 テスラの超強磁場中における結晶の「のびちぢみ」を世界で初めて測定し、これによって $LaCoO_3$ の電子状態を解明することに成功しています[3, 4]。

しかしながら、磁気励起子のボーズ･アインシュタイン凝縮に関する観測までには至っていませんでした。さらに強い極限的磁場を用いることで、$LaCoO_3$ において超流動状態や超固体状態が実現できると予想されていましたが、この解明には大爆発を伴う 1000 テスラ級の超強磁場発生技術が必要であり、そのような強磁場はこれまで世界でも日本の東京大学物性研究所でのみ発生できる限られた状況にありました。その上、超強磁場の発生時間は 10 マイクロ秒程度(1 マイクロ秒は 100 万分の 1 秒)と一瞬であり、繰り返して発生することもできないため、爆発が起こるなか、一瞬のうちに一発で物性を計測する技術が求められていました。

そこで今回、私たちは開発した 1000 テスラ級の超強磁場発生技術に、同様に最近開発した超高速シングルショットひずみ計測技術を導入し、これらを利用した磁気超流動状態の解明を目指しました。

【手法・成果】

私たちは、2018 年に開発した新型の電磁濃縮法超強磁場発生装置を用いて世界最強磁場を発生させました[5]。さらにファイバーブラッググレーティングを使って独自開発した 100 メガヘルツの超高速ひずみ計測法を導入しました(図 2)。これにより最強磁場が発生した一瞬のうちに、600 テスラまでの $LaCoO_3$ の格子ひずみを超高速に一発で観測しました。

図 1　1000 テスラ発生に用いる新型電磁濃縮法装置の概念図。まず 5 メガジュールのコンデンサ電源に電気エネルギーを蓄積します。つぎに電磁濃縮コイルに放電します。電磁濃縮コイルは受け取ったエネルギーを利用して、金属ライナー(筒)を高速収縮します。金属ライナー中の初期磁束(3 テスラ程度)は急速に高密度化し 1000 テスラ級の超強磁場が発生します。超強磁場発生直後にコイルは大爆発します。この爆発は金属ライナーを収縮するさせる際の反作用と、発生した超強磁場自体の反発力によるものです。

これにより、超強磁場中で結晶が「のびちぢみ」する過程が明らかになり、特徴的な新たな電子磁気状態が存在することを確認しました(図 3)[6]。

図 2　爆発を伴う超強磁場発生中に一瞬のうちに一発で「のびちぢみ」を計測するために利用した超高速ひずみ計測装置の概略図。計測対象の結晶側面に光ファイバーを接着します。光ファイバーはファイバーブラッググレーティングという「ひずみゲージ」の機能を持つものを使用しています。「のびちぢみ」はファイバーを通して離れた場所で検出します。特別に開発した 100 メガヘルツ超高速計測法を利用して、一瞬のうちに一発でひずみを計測します。

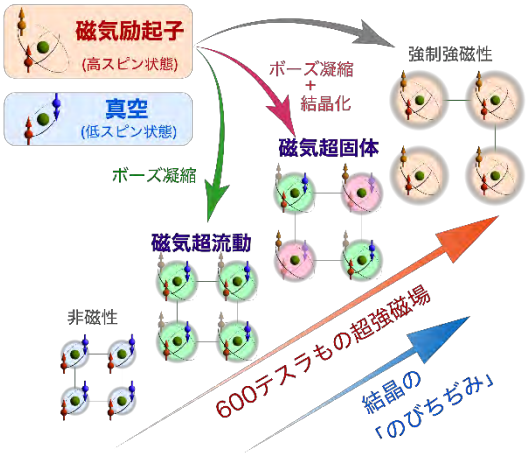


図 3　コバルト酸化物に超強磁場を印加することで新奇な磁気状態とそれらの間の相転移が生じる様子の概念図。$LaCoO_3$ には「真空(低スピン)」と「磁気励起子(高スピン)」の状態があります。磁場をかける前はすべてのコバルトイオンが真空状態です。600 テスラまでの超磁場をかけると変化が起こり、磁気超流動状態や磁気超固体状態が発現します。磁気励起子は結晶格子を押し広げる性質があるので、今回の「のびちぢみ」計測によりこれらの変化の兆候を観測しました。最終的にはすべてのコバルト酸化物が完全に磁化した状態になると期待されますが、今回はその観測には至っていません。

磁気励起子を有するコバルト酸化物の磁場誘起相転移は「のびちぢみ」を見れば観測することができます。超強磁場中で磁気励起子が固体を組んだ場合は、外部磁場の変化に対して結晶の「のびちぢみ」は起こらない一方で、超強磁場中で磁気励起子が超流動状態や超固体状態になった場合は、量子力学的効果が強くなるために外部磁場の変化に応じて結晶が連続的に「のびちぢみ」することが従来予想されていました。

これらの成果は固体物理最大の難問の解決に向けた重要な糸口になります。さらに、$LaCoO_3$ の基本的な性質を明らかにするもので、コバルト酸化物を用いた微小なスイッチなどのデバイス開発に大きく役立つ知見になると考えられます。

本研究で新たに見つかった超強磁場で起こる磁気励起子の秩序状態には、未解明な点がまだ多くあります。今後は X 線自由電子レーザーを用いて 100 テスラ領域における微視的な研究を行い[7, 8]、その詳細を明らかにする予定です。ファイバーブラッググレーティングを利用した超高速ひずみ計測法は、超伝導体から金属まであらゆる固体物質に適用できるため、超強磁場の発生と計測技術を併用することによって、1000 テスラ級の超強磁場においてさらに新たな電子状態や相転移などが発見できると期待されます。

参考文献

1) Jan Kuneš, J. Phys.: Condens. Matter **27** 333201 (2015).

1) A. Ikeda, T. Nomura, Y. H. Matsuda, A. Matsuo, K. Kindo, K. Sato, Phys. Rev. B **93**, 220401(R) (2016).

3) A. Ikeda, T. Nomura, Y. H. Matsuda, S. Tani, Y. Kobayashi, H. Watanabe, K. Sato, Rev. Sci. Instrum. **88**, 083906 (2017).

4) A. Ikeda, Y. H. Matsuda, K. Sato, Phys. Rev. Lett. **125**.177202 (2020).

5) D. Nakamura, A. Ikeda, H. Sawabe, Y. H. Matsuda, and S. Takeyama Rev. Sci. Instrum. **89**, 095106 (2018).

6) A. Ikeda, Y. H. Matsuda, K. Sato, Y. Ishii, H. Sawabe, D. Nakamura, S. Takeyama, J. Nasu, Nat. Commun. **14**, 1744 (2023).

7) A. Ikeda, Y. H. Matsuda, X. Zhou, T. Yajima, Y. Kubota, K. Tono, M. Yabashi, Phys. Rev. Research **2**, 043175 (2020).

8) A. Ikeda, Y. H. Matsuda, X. Zhou, S. Peng, Y. Ishii, T. Yajima, Y. Kubota, I. Inoue, Y. Inubishi, K. Tono, M. Yabashi, Appl. Phys. Lett., **120**, 142403 (2022).

第 13 回(令和 2022 年度)分子科学会賞を受賞して

凝縮系物性研究部門　　森　初果

この度、大変光栄なことに、令和 4 年度分子科学会賞受賞の栄誉に恵まれました。受賞業績題目は、「分子性物質における電子機能開拓」です。分子科学会のホームページによると、「対象者は、分子科学研究分野において特に独創的で新たな研究領域の創成に結びつく質の高い研究成果をあげ、分子科学の発展に長年寄与したと認められる研究者」ということです。

本テーマである「分子系を対象とした新機能開拓」は私のライフワークであり、魅力ある機能を有する分子を集積させたときに発現する、分子ならではの新機能を開拓することを目指し、研究を進めてきました。これまでの研究室のアクティビティーが認められたことを大変嬉しく思うとともに、共同研究者である研究室のメンバー、および所内・所外の研究者の皆様に、心より感謝致します。また、この賞に推薦下さいました京都大学理学研究科化学専攻の鈴木俊法教授、および分子科学会の選考委員会に御礼申し上げます。

分子を基盤としたπ電子系機能物質は、伝導性・磁性・誘電性等を併せ持ち外部刺激に対して巨大な応答を示す物質として、20 世紀に人類が生み出した優れた機能物質群の一つとして広く認知されています。高度な機能性を持つ新奇分子性物質の発見と機能発現機構の学理構築は、21 世紀の持続可能社会の建設に向けて、さらにその重要性を増しています。本研究では、分子の物性パラメーター(酸化還元能、酸塩機能、分子の形状、分子軌道とエネルギー準位、キラリティー、水素結合・配位結合能、分子配列等)を巧みに制御する独自のアプローチによって多数の革新的機能性分子性物質を開発し、当該分野の開拓と学理構築を進めました。特に、1)強相関π電子系超伝導体の発見[1,2]、2)電荷秩序系分子性導体の系統的なπ電子機能の制御と電場応答効果の発見、3)電子機能と水素機能が結合した新機能の創成[3–5]においては、分子系物性における従来の枠組を大きく拡げました。

現在は、1), 2)の発展系として強相関から弱相関電子系まで、系統的に幅広く制御が可能で、低分子と高分子の間に位置するオリゴマー伝導体の開発、物性研究による学理構築、企業との共同研究による薄膜エレクトロニクスへの展開を進めています。これまでの低分子性伝導体の学理を踏まえ、新物質であるオリゴマー伝導体の学理構築から、材料への基礎研究にも踏み込んでいこうと思っております。分子系物質・材料において、新たな量子物質および機能性物質としての魅力を引き出そうと思っておりますので、今後ともどうぞよろしくお願い申し上げます。

図 第 13 回（令和 2022 年度）分子科学会賞を分子科学会長から授与。

代表論文：

(1) “A new ambient pressure organic superconductor Based on BEDT-TTF with T_c Higher than 10 K (T_c=10.4 K) “, H. Urayama-Mori, H. Yamochi, G. Saito, K. Nozawa, T. Sugano, M. Kinoshita, S. Sato, K. Oshima, A. Kawamoto, and J. Tanaka, Chem. Lett., 17, 1988, 55-58.

(2) “Checkerboard-type charge-ordered state of a pressure-induced superconductor, *beta*-(*meso*-DMBEDT-TTF)$_2$PF$_6$ “, S. Kimura, H. Suzuki, T. Maejima, H. Mori, J. Yamaura, T. Kakiuchi, H. Sawa, and H. Moriyama, J. Am. Chem. Soc., 128 (2006) 1456-1457.

(3) “Hydrogen bond-promoted metallic state in a purely organic single-component conductor under pressure”, T. Isono, H. Kamo, A. Ueda, K. Takahashi, A. Nakao, R. Kumai, H. Nakao, K. Kobayashi, Y. Murakami, and H. Mori, Nature Commun., 4, 1344(1-6) (2013).

(4) “Hydrogen-bond-dynamics-based switching of conductivity and magnetism: a phase transition caused by deuterium and electron tansfer in a Hydrogen-Bonded Purely Organic Conductor Crystal”, A. Ueda, S. Yamada, T. Isono, H. Kamo, A. Nakao, R. Kumai, H. Nakao, Y. Murakami, K. Yamamoto, Y. Nishio, and H. Mori, J. Am. Chem. Soc., 2014, 136(34), 12184-12192.

(5) “Proton–electron-coupled functionalities of conductivity, magnetism, and optical properties in molecular crystals”, H. Mori, S. Yokomori, S. Dekura, and A. Ueda, Chem. Commun., 2022, 58, 5668–5682. Invited featured article.

ISSP 学術奨励賞を受賞して

国際超強磁場科学研究施設　特任助教　　今城 周作

この度は私の「ロングパルス強磁場を活用した新たな研究分野の開拓」という研究に対し、ISSP 学術奨励賞が授与される栄誉に浴し、身に余る光栄に存じます。金道教授を始めとする多くの共同研究者の皆様のご助力による賜物であり、深く感謝申し上げます。また、2023 年 3 月当時に物性研所長であった森教授が世界で初めて合成に成功した有機超伝導体の強磁場研究[1]も今回受賞した研究内容に含まれており、森教授から直接賞を授けていただいたのは大変な栄誉でした。

私は 2018 年 3 月に大阪大学大学院理学研究科化学専攻で博士号を取得し、4 月から物性研究所附属国際超強磁場科学研究施設の金道研究室に特任助教として着任しました。大学・大学院は化学専攻であったため、自身で有機伝導体の合成を行い、自作測定装置で得られた単結晶の物性測定を行うのが大学院時代の研究でした。ただ、私は興味が移ろい易かったために研究テーマを勝手に自分で増やし、また、研究以外でも様々な課外活動にも放蕩していたため、なかなか一つのことに集中した成果を残すことはできませんでした。しかし、当時の指導教員であった中澤康浩教授は私のペースに任せた指導をしてくださったため、なんとか学位を取得できました。このような研究環境の出身だったために、（未熟な若造の傲慢な思い上がりで恥ずかしい限りですが）我儘に自分の好き放題に研究をさせてもらえるポストを探していたところ、縁があって現所属の金道研究室に特任助教として受け入れていただけることになりました。

金道浩一教授にも私の研究方針を尊重していただき、この 5 年間は自由に自分の研究に集中することができました。ロングパルスマグネットを用いた物性測定技術に関する研究を中心に、大学院時代の研究の継続として有機伝導体の強磁場物性研究も行いました。金道研が属する強磁場施設は共同利用施設ということもあって、様々な研究分野出身の研究者が在籍しており、多岐に渡る測定技術を学べる貴重な環境でした。着任時にはパルス強磁場未経験の完全な素人だったのですが、強磁場施設の皆様のご助力でなんとか研究をスタートすることができました。また、施設の共同利用研究も担当させていただくことで、自身と異なる研究分野の研究者との交流によって刺激を受けて大変勉強になりました。施設内外の多くの方にお世話になりながら興味の赴くままに研究を進めることで、拙いながらも自身の研究へと昇華することができ、幸いにも数多くの成果[1-14]を挙げることができました。前述したように興味が移ろい易いために研究が色々な方面へと発散してしまったためにそれぞれの研究成果の詳細を述べるのは難しいのですが、全て、強磁場施設の充実した研究設備・多彩な分野出身の優秀なスタッフ・研究のみに集中させてもらえる研究室、という大変恵まれた環境に支えられ成果です。今後は自身の研究を更に発展させるだけでなく、強磁場施設・金道研究室の研究にも貢献していきたいと思っております。

[1] S. Imajo et al., *Nat. Commun.* **13**, 5590 (2022).
[2] S. Imajo et al., *Phys. Rev. Lett.* **129**, 147201 (2022).
[3] S. Imajo et al., *Phys. Rev. B* **105**, 125130 (2022).
[4] S. Imajo et al, *Crystals* **11**, 1358 (2021).
[5] S. Imajo et al, *Phys. Rev. Research* **3**, 033026 (2021).
[6] S. Imajo et al, *Phys. Rev. B* **103**, L220501 (2021).
[7] S. Imajo et al, *Phys. Rev. B* **103**, L201117 (2021).
[8] S. Imajo et al, *Rev. Sci. Instrum.* **92**, 043901 (2021).
[9] S. Imajo et al, *Phys. Rev. B* **103**, L060508 (2021).
[10] S. Imajo et al., *Phys. Rev. Lett.* **125**, 177002 (2020).
[11] S. Imajo et al, *Phys. Rev. Research* **1**, 033184 (2019).
[12] S. Imajo et al, *J. Phys. Soc. Jpn.* **88**, 083705 (2019).
[13] S. Imajo et al, *J. Phys. Soc. Jpn.* **88**, 023702 (2019).
[14] S. Imajo et al, *J. Phys. Soc. Jpn.* **87**, 123704 (2018).

日本放射光学会 学生発表賞を受賞して

極限コヒーレント光科学研究センター　近藤研究室　　新井 陽介

この度、2023 年 1 月 7-9 日に立命館大学びわこ・くさつキャンパスで開催された第 36 回日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウムにおいて、JSR2023 学生発表賞を受賞しました。本賞は、同年会・シンポジウムにて将来性・独創性のある優秀な発表を行った学生に授与されるものです。このような栄誉ある賞を由緒ある学会からいただき、大変光栄に思います。

今回の受賞対象となった発表題目は「少数キャリア半金属 CeX における強相関メカニズムの系統的な変化」です。本研究では少数キャリア半金属 CeX (X＝P, As, Sb, Bi)[1] における準粒子状態の違いに注目しました。以下、その内容について簡単にご紹介させていただきます。

現代テクノロジーを支える機能物性には相転移に伴う秩序形成の働きが欠かせません。素励起（ボソン）は、この秩序状態からのズレに対する復元力として定義されますが、電子ボソン結合という形で伝導電子と協奏的に相互作用し、このとき形成される準粒子が超伝導や巨大磁気抵抗などの強相関現象を引き起こします。したがって、この準粒子を特徴付ける相互作用を解明して理解することは物質科学の重要なテーマの 1 つです。

そこで我々が目をつけたのが CeX (X＝P, As, Sb, Bi)[1] の異常磁性です。この物質群は温度・磁場・圧力といった外部環境に応じて Ce 4*f* の局在磁気モーメントによる多彩な磁気構造を形成します[2,3]。なかでも CeSb の磁気相転移は特異に複雑で「悪魔の階段」と呼ばれ、磁場や圧力のない状況でも 7 回の転移が生じます。これまでに我々は、この CeSb で 4*f* 結晶場励起と伝導電子の結合した「多極子ポーラロン」という新しい準粒子が形成されることを、レーザー角度分解光電子分光（ARPES）やレーザーラマン分光によって明らかにしてきました[4,5]。

その一方、CeX の中で CeSb の隣に位置する CeAs は磁場や圧力のない状況で 1 回の転移しか示さず、CeSb と対照的に単純な磁気相転移を示します。したがって, CeAs では CeSb と異なった準粒子状態の形成が示唆されます。そこで本研究では、レーザーARPES・レーザーラマン分光・非弾性 X 線散乱（IXS）を利用して、CeAs で形成される準粒子状態を調べ、CeSb との比較を行いました。実験の結果、CeSb では 4*f* 結晶場励起のみと伝導電子の結合した準粒子が形成されるのに対して、CeAs では伝導電子が 4f 結晶場励起だけでなく光学フォノンとも結合した準粒子状態が形成されることが明らかになり、伝導電子と光学フォノンの結合の影響に違いがあることが見出されました。このことは電子構造のわずかな差異に基づいた相互作用の変化が CeX に存在することを示しており、こうした違いが CeX の異常磁性の発現機構に大きな影響を与えていることが示唆されます。

最後になりますが、日頃よりご指導いただいております近藤猛准教授、広島大学の黒田健太准教授をはじめ、本研究にご協力いただいたすべての共同研究者の皆様に、この場をお借りして心より御礼申し上げます。

[1] K. Kuroda, et al., Phys. Rev. Lett. 120, 086402 (2018).
[2] J. Rossat-Mignod et al., J. Magn. Magn. Mater. 52, 111 (1985).
[3] M. Kohgi et al., Phys. B: Condens. Matter 281-282, 417 (2000).
[4] K. Kuroda, Y. Arai et al., Nat. Commun. 11, 2888 (2020).
[5] Y. Arai et al., Nat. Mater. 21, 410 (2022).

日本放射光学会学生発表賞を受賞して

極限コヒーレント光科学研究センター　木村研究室　博士１年　　櫻井　快

この度、2023 年 1 月に立命館大学びわこ・くさつキャンパスで開催された第 36 回日本放射光学会年会・放射光化学合同シンポジウムにてポスター発表を行い、学生発表賞を受賞いたしました。この賞は同年会・シンポジウムにて・将来性・独創性のある優秀な発表を行った学生に授与されます。このような名誉ある賞をいただき、大変光栄に思います。受賞対象となった発表タイトルは「軟X線タイコグラフィを利用した細胞内化学状態イメージング技術の開発」です。軟 X 線 XAFS タイコグラフィという高分解能スペクトルイメージング手法と機械学習を組み合わせ、化学状態分布の可視化を行いました。以下で詳細の紹介をします。

タイコグラフィ法は 2010 年代以降急激に研究が発展している顕微イメージング手法です。試料構造からのコヒーレントな回折パターンをもとに、コンピュータ上で再構成計算を行うことで、試料の透過率だけでなく、位相のシフト量も定量的に検出できます。そのため、様々な応用が展開されており、特に理想的な結像光学系を構築することが困難なX線領域の波長域では応用は著しく、これまで微小な集積回路の内部三次元構造の可視化や、ナノ粒子中の化学状態のマッピングなどの成果が報告されています。

化学状態マッピングは様々な波長でタイコグラフィ計測を行い、ハイパースペクトル画像を生成することで実現できます。X 線吸収スペクトルは含有物質の化学状態に依存して変化するため、各ピクセルにおけるスペクトル構造から化学状態のマッピングを行います。本研究では SPring-8 BL07LSU 東京大学物質科学ビームラインにて、木村研究室が独自開発したタイコグラフィ装置[1]を利用しました。この装置は反射型集光素子を活用し、一般に使用されるゾーンプレートと比べ色収差が無いため、多波長での計測を迅速かつ正確に実行可能です。実験ではマウス神経芽細胞腫とラット神経のハイブリット細胞をサンプルとして使用し、窒素吸収端と酸素吸収端の計 205 点のエネルギーでイメージングを行いました。

次に、各ピクセルのスペクトルに対し教師なし学習での分類を行い、化学状態を自動分類するプログラムを開発しました。分類にはニューラルネットワークの一種である変分オートエンコーダーを用いてスペクトルの特徴抽出を行い、抽出した特徴を基に混合ガウスモデルによる分類を実施しました。結果として、細胞内構造に対応するスペクトル分類に成功しました。現在の二次元イメージングでは光軸方向に特徴が平均化されていますが、将来的に三次元計測を導入することで平均化されていないスペクトルが得られ、本分類手法が更に効果を発揮することが期待されます。今後の博士課程の研究では三次元計測の他、再構成アルゴリズムの開発や生細胞計測に向けた装置開発を行い、応用範囲を広げていく計画です。

最後に、細胞サンプルをご提供くださり、データの解釈を議論いただいた物性研究所の井上圭一先生、寶本俊輝様、国立国際医療研究センターの志村まり先生、機械学習での解析方法について助言を下さった吉見一慶先生に深く感謝いたします。また本実験には東京大学浅野キャンパスの武田先端知ビルスーパークリーンルームの半導体プロセス装置を利用しました。施設利用にご協力下さったスタッフの皆様に感謝いたします。

[1] Takashi Kimura et al. Opt. Express, 30, 26220 (2022).

物性研を退任して

勝本 信吾

物性研をこの 3 月で退任し、1 か月半ほど経った。物性研の皆さんは、新緑の中研究に励まれているところだと拝察する。私が物性研に着任したのは 30 年前の 4 月 1 日、風の強い日で、窓に吹き付ける風で桜の花びらが上方に吹き上げられていたのが映像として記憶に残っている。この 30 年間、色々なことがあったが、物性研の所員としての重責を十分に果たせたか、と言えば、甚だ心許ない。コロナに祟られた最後の 3 年は、制度的に研究室の人間を減らして行くことになった。とにかく、3 月 30 日に離任式をしていただき、着任時同様、一人で物性研を出ることになった。

「退任して」という題目なので、退任後に所員時代を振り返って何らかの感想や意見を記すものだと思うし、実際私自身が「物性研だより」の編集をしていた頃も、退職された先生方にそのように依頼していた。が、4 月 1 日に今度の大学から辞令をいただいて以来、予想していなかった忙しさの渦に巻き込まれ、「振り返り」の余裕がない、というのが現状である。一般的な私大では 3 月までは入試、4 月は新入学生を迎えて通常でも多忙なところへ、今年は少し特別な事情が重なりこの状況となった。物性研では大学としては恵まれた環境で自由に研究をさせていただいたので、時間が経って頭が整理されれば、そのような感想が出てくるものと思う。が、今はとても無理なので、この 30 年に携った研究の潮流について簡単に復習(読者はとっくにご存じのことばかりなので)してお茶を濁したい。

30 年前、物性研に着任して、覚悟はしていたが、何もないゼロからのスタートを切ることになった。そんな時、III-V 族の半導体に磁性イオンを混入するとキャリア誘起の強磁性が生じるという発見に関与することができ、そこからスピントロニクス分野に巻き込まれていった。フロンティアであり、マンパワーも含めそれほど重装備の実験インフラを持たずともオリジナルな研究ができるのは有難かった。しかし、希薄磁性半導体スピントロニクス分野は次第に衰退した。半導体という材料から期待される電荷自由度との強い結合や光学との結合もそれほど目覚ましいものではなく、実用につながらないことが要因の一つである。この点は、最近になって見直しの動きも出ている。金属系のスピントロニクスは、スピン自由度に着目すると常磁性金属において半導体の少数キャリア物理と同様、少数スピン物理が成立することが大変面白く感じられた。が、私自身は「量子」スピントロニクスをやりたいと考えていた。

当初から考えていた微小超伝導接合を使ったマクロ量子系のコヒーレンスの実験を始めることができたのは、着任から 2 年も経過した後のことである。この実験の目標は、時間ドメインでのクーパー対あるいは量子渦のコヒーレンス振動を観測し、これが、超伝導接合をシャントする通常の抵抗の値に対してどのように変化するか調べることであった。解放量子系で量子ビットと環境の結合に一定のモデルを適用し、フィードバック効果が相転移を引き起こし、量子系と古典系とを多体系の異なる相として捉えることができる、という極めて魅力的な話であった。同時に頭にあったのは、量子ドットのように電子を局在させる系を、AB リングのような量子干渉計の中に置いたら、量子干渉効果がどうなるか、という実験であった。

この 2 つの内、量子ドット-量子干渉計の実験は 95 年に我々がようやく手を付けられる状態になった途端に Heiblum のグループから発表されてしまい、大いに落胆した。が、まだまだ多くのやることがあると考え、実験を継続した。結局、このテーマについては、多くの新しい知見を得ることができ、粘った甲斐のある結果になった。一方、超伝導微小接合の量子コヒーレンス振動も、99 年に中村らが発表し、更に落胆することになった。ただ、その後研究の潮流はこれを量子ビット(現在はこの電荷量子ビットではなく、トランズモンが主流ではあるが)として量子情報処理に使う方へ向かっていった。Lindblad 型の方程式で扱い得るような、環境(多数自由度系)が常にリセットされているような場合には、相転移は起こらないので我々のターゲットとはかなり異なっている。環境との相互作用頻度が高い領域ではまだやることがありそうに思って色々と考え、実験的なトライアルも行ってきたが、「これ」というような結果は得られずじまいであった。いくつか、研究の分岐とも言えるところで誤判断もあり、後悔は大きいが、後の祭りである。この方向の研究は、超伝導-絶縁体転移以降、あまり目立った進歩がないように思われるの

も残念である。

スピントロニクスとの関りはすでに述べたが、もっと量子性が前面に出てくるような現象を調べる、「量子」スピントロニクス分野を切り拓きたい、とは考えていた。やはり前述の量子ドット-干渉計複合系でスピン近藤効果も含めたスピンの影響を色々と調べたのもその一環である。スピン自由度の量子干渉効果は最も手っ取り早く量子性を使ったものになりそうに思われた。しかし、干渉効果を示すための波動関数の位相にはスピンを通して獲得したものか、空間運動により獲得したものかの差はないので、これらの実験的区別は思いの他難しく、それらしい結果も得られたものの、確証を得るには至らなかった。量子ドットを使って導波路から電子をサンプリングするやり方では、間違いなくスピンの効果を見ることができるが、ドット上でこのような操作を行いながら導波路系全体をコヒーレントに保つのはこれも難しい課題だった。

境界的な現象として、ディラック方程式では、光速の電子はジグザグ運動する、Zitterbewegung と呼ばれる現象のスピン軌道版として、スピン軌道系でスピン偏極電子がジグザグ運動する様子を磁気抵抗揺らぎで見ることができたのは面白いものに感じた。また、量子情報操作に欠かせない、断熱／非断熱制御の重要性も再認識した。このことをトポロジカル状態の境界に現れるコヒーレントな状態のスピン制御に応用することを考えた。量子ホール絶縁体、トポロジカル絶縁体、量子ホールと超伝導体のハイブリッド系、スピン三重項超伝導体など、頭の中では研究の花火が盛大に打ちあがっている状態であったが、研究室は縮小する一方だったし、その他色々と面倒な問題が生じて花火の多くは幻に終わった。が、量子ホール絶縁体とスピン三重項超伝導に関しては、スタッフ・学生の尽力で一定の成果を挙げることができた。今後彼らがテーマの一部として更に知見を広げていってくれることを期待したい。

3 月までの研究について雑駁に述べてきた。どちらかと言えば、研究の夢、というか野望の話が多かったが、いざ物性研を離れて、今の自分に立ち戻ると、私立大の現実に直面しなければならない。大変に忙しいことはすでに述べた通りであるが、その理由のひとつに、学生さんたちに単に教えるのではなく自ら学んでもらう、という状況を出現させるため、単純に考えると逆のようだが教員の方が大きなエネルギーを使わなければならない、ということがある。一定の効果はあるとは思うが、残念ながらその労力に対する効率は高いとは言い難い。それでも次々と仕事を増やさざるを得ないのは、詮索しても仕方ないことではあるが、学生数の減少により人気取り合戦が生じていること、お上が大学改革だ評価だと新企画を出すたびに何かが増え、減ることはない、という小中高で生じていることが大学でも起こっていることが主な要因ではないかと疑っている。

大変な状況ではあるが、物理学の次に関心があった電子通信工学分野に身を置き、半世紀近く若い学生諸君の明るい笑いに包まれ、なかなかに楽しい日々を過ごしている。物性研の皆さん、機会があったら、また飲んで話しましょう！

外国人客員所員を経験して

Uwe Bovensiepen
University of Duisburg-Essen, Germany
uwe.bovensiepen@uni-due.de

The ISSP is internationally well known for its sophisticated experimental facilities and my key motivation to visit the institute for a research stay was two-fold. At first the opportunity to participate in pump-probe experiments which combine angle-resolved photoemission with mid-infrared excitation, which is a very recent development, got my attention. The reason is that several years ago we speculated in a paper about manipulation or control of the excited, non-equilibrium response of solid-state materials that could be achieved by tuning the excitation wavelength to suitable resonances in comparison to unspecific laser heating of the electron gas. Second, I had looked for an opportunity to experience living and working Japan for a somewhat extended time. My 6-month visit from October 2022 until March 2023 turned out to provide exactly that and I can now report that both goals were achieved. Together with the "4gouki" team of Prof. Kozo Okazaki's group we obtained first tr-ARPES results using mid-infrared pumping and we all hope that this collaboration will remain fruitful in the coming time also after my departure.

Arriving at the ISSP was very smooth and a real pleasure due to all the preparations by the international liaison office. My apartment and office were well prepared, all formalities went well, and I was welcomed in the research group. Thus, I felt home far away from home more or less immediately, although Japan in very different from my home country. I was stunned several times by the overwhelming friendliness and help provided by the Japanese people. I will never forget such a unique experience.

Shortly after my arrival Dr. Takeshi Suzuki, the research associate of Prof. Okazaki, approached me with the idea of a research seminar series to discuss the work of the closely related researchers and on my work. This series was not only a pleasure because I could share my work, but in particular because of the truly exceptionally high-quality discussion during and after the seminar. My interaction with the participants was every time very wide and deep. While not directly a consequence of this seminar series the current planning of mutual exchange of students between the ISSP and the Faculty of Physics, University of Duisburg-Essen may have been supported by it. Given the expertise in layered boron-based materials Prof. Iwao Matsuda and his group proposed to grow a crystal for a new table-top soft x-ray spectrometer which my group in Duisburg has developed recently. Already several weeks before my departure I received the first crystal. What a welcome surprise! So, we still had time for optimization and adjustment to the experimental limitations. Furthermore, I am very grateful for the opportunity to witness a high magnetic field experiment in the MegaGauss laboratory which broadened my experimental horizon considerably. This was a truly impressive experience.

I had various opportunities to visit collaborators and colleagues in Japan. The discussions were very interesting and promise to be fruitful in the future. I visited Prof. Ryo Shimano at Hongo campus of the University of Tokyo, who I know from his work close to my own interest and we met at several conferences already. The opportunity to discuss with Prof. Yoshihiro Iwasa, Prof. Tetsuo Hanaguri, and Dr. Christopher Butler on 1*T*-TaS_2 was motivated by our mutual interest and previous work on this very interesting layered material. The chance to visit Profs. Kenta Kuroda and

Taichi Okuda in Hiroshima opened a further potential collaboration and I am grateful for the opportunity to visit the Peace Memorial. Furthermore, I visited with Dr. Hiroshi Eisaki and Dr. Kunie Ishioka, who are colleagues at the AIST and NIMS, respectively. These visits were excellent opportunities and refresh our collaboration and joint scientific interests. All in all, my stay has proven to be a great opportunity to develop new personal connections and start new collaborations. As such it was very fruitful already.

Leaving the academic aspects aside, my visit was also an unparalleled personal experience. The rich Japanese culture and heritage is very impressing as I could experience, e.g., jointly with my wife Dörte Schreinert in Nikko. The beautiful Japanese nature is a real treasure, which I experienced during hiking on Tsukuba mountain jointly with the research group and on the occasion of a bicycle tour in Ibaraki. All this is backed with an excellent and unique cuisine and according to my own experience it is simply impossible to get bad food in Japan. Finally, I want to mention my various visits to onsen places. I will miss these relaxation times and various others, now cherished, activities. Since the success of my efforts to learn Nihongo remains limited so far, there are many reasons to return sometime in the future.

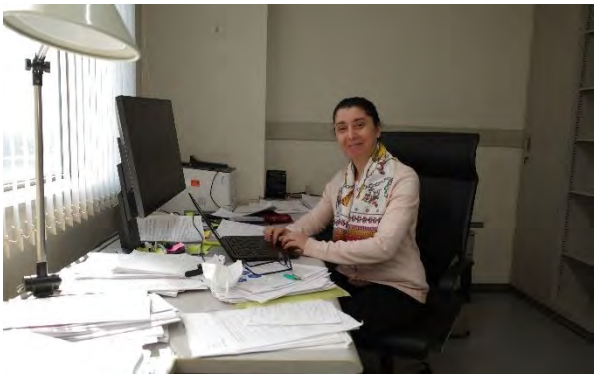
外国人客員所員を経験して

Sonia Haddad
University of Tunis El Manar (Tunisia)
sonia.haddad@fst.utm.tn

The ISSP visiting professor program opens the way not only to establish a strong collaboration between international research groups, but also to build a bridge between different cultures.

I am greatly honored to take part in this program and be a visiting professor at ISSP, the world-renowned research institute. I was eager to start, in December 2021, my visit of nine months in the group of Prof. Toshihito Osada. However, due to Covid restrictions, my visit was postponed to the beginning of June 2022. Before arriving at Japan, the first thing which caught my impression is the great efficiency of the ISSP International Liaison office (ILO) staff, and in particular Mrs. Yuko Ishiguchi and Ms. Ayano Hashiguchi, who kindly took care of all the administrative procedures related to my visit. Once I arrived at ISSP, I was deeply touched by the warm hospitality of Prof. Osada and all the members of his lab. Mrs. Hanae Ara, the secretary of Prof. Osada-lab (Osa-lab) and Dr. Kazuhito Uchida were of a great help and managed to smoothly organize my stay in the lab.

During my visit, I enjoyed discussions with Osa-lab members, especially during the weekly meetings, which have been a nice opportunity to learn about thermoelectric transport in Dirac materials and to discover new topics of interest. I also leant a lot during the seminars organized at ISSP. For my research activities in ISSP, I first focused my priorities to conduct, with Prof. Osada, a collaborative research on thermoelectric transport in twisted heterostructure of two-dimensional (2D) materials. However, Prof. Osada introduced me, during several discussions, to spintronics as a high-quality research area in Japan. He put me in contact with Prof. Takeo Kato who is leading a theoretical group at ISSP, with a rich activity on spintronics and mesoscopic physics. I then established with Prof. Kato a project on spin pumping effect in twisted bilayer graphene. We theoretically studied the correction to the ferromagnetic resonance (FMR) linewidth through an interface separating a ferromagnet and a twisted bilayer graphene (TBG) adjacent to a monolayer of a transition metal dichalcogenide, namely the WSe2. We found that spin pumping, through such junction, provides not only a direct probe of the flat bands of TBG but also an accurate measurement of the magic twist angle, at which strongly correlated electronic states emerge. Our results have been presented during the APS virtual March meeting 2023 and were posted recently on arxiv. During my stay at ISSP, I also had the opportunity to visit other Japanese universities. I am grateful to Prof. Keizo Murata (Professor Emeritus at Osaka Metropolitan University (OMU)) and Prof. Akira Terai (OMU) for organizing my visit to OMU. I am impressed by their warm welcome and generous hospitality. I am grateful to Prof. Murata who introduced me to the ISSP visiting professor program. I had also the possibility to participate in a workshop on DFT in Yukawa institute at Kyoto University, where the organizers gathered researchers from condensed matter and nuclear physics.



During my stay in Kyoto, I had the chance to visit the labs of Prof. Yoshiteru Maeno and Prof. Shingo Yonezawa. I am thankful for them for shearing their recent research activities and giving me a deep description of their research facilities. I had also enjoyed a Japanese tea ceremony with Prof. Maeno in his lab.

Besides research activities, I had the chance to establish friendships in Osa-lab. I am grateful to Dr. Andhika Kiswandhi (Andhi) who helped me to have an easy and friendly stay in Japan. Thank you Andhi for the cheerful discussions. I also deeply appreciated exchanges with Dr. Murayama Chizuko who introduced me to many Japanese traditions.

I also enjoyed the delicious Japanese cookies brought by Dr. Mitsuyuki Sato. I am deeply indebted to Prof. Hatsumi Mori, the ISSP director, Prof. Osada, Prof. Keizo Murata, the ILO and the International Lodge staff for their priceless help and extreme kindness after my cycling misadventure.

I had also the chance to discover, during weekends, the amazing culture of Japan and its splendid nature. I cannot forget the autumn colors and the amazing cherry blossom (Sakura).

客員所員を経験して

明治大学理工学部　　楠瀬 博明

2022 年度は，常次宏一先生と秘書の辻さんの行き届いたホスピタリティのおかげで、客員所員として大変充実した一年を送ることができました。物性研には、これまでにも研究会やセミナーなどの機会に度々お邪魔することはありましたが、2020 年度以降はコロナ禍の影響で長らく足を運ぶこともなく、今回客員として久しぶりに柏キャンパスを訪れました。私は 2013 年度にも客員所員としてお世話になったことがありますが、そのときと比べて、物性研の陣容も私自身も世の中も大きく様変わりしており、最初にキャンパスの入口に来たときには、この 10 年弱の出来事が色々と思い出されて感慨深いものがありました。

さて、客員研究のテーマは「拡張多極子基底を用いたモデル構築手法の一般化と固体物性研究への展開」という些か誇大なタイトルですが、前回の客員以降に特に大きく進展した多極子の理論をさらに大きく展開させようというのが主な眼目です。「多極子」は電磁気学に登場する双極子などの物理的実体を記述する物理量というのが一般的な認識だと思いますが、そのような認識を改めて、「多極子」を電子系や格子系を対称性に基づいて記述するための最適な完全基底とみなすことで、物質科学の見方が変わってきます。固体物性を特徴づけるのは、回転や時間・空間反転の対称性が失われた「異方性」なので、角度空間に関する完全系である多極子が最適だというわけです。お馴染みの電気・磁気多極子のほかにパリティの性質が逆転した電気・磁気トロイダル多極子を加えると完全基底を構成できます。そこで、我々は馴染みの薄い磁気トロイダル多極子、電気トロイダル多極子について順に研究を進めてきて、物質中のカイラリティを記述する「秩序変数」が電気トロイダル単極子であることから、最近はカイラリティの物理に注力しています。

そのような経緯で、常次先生とは「カイラル・フォノン」について微視的な立場で研究を始めました。カイラリティは鏡映と空間反転の対称性をもたない状態と定義されますが、これにより、電場や電流のような極性量と角運動量のような軸性量があらゆる方向で結合します。極性・軸性ベクトルのスカラー結合が電気トロイダル単極子というわけで、カイラル結晶のフォノンにおいて、カイラリティの特徴や電気トロイダル単極子がどのように顔を出すのか、ということを主に議論しました。常次先生と私は、物理の着想や記述法の好みが大きく違っているのですが、お互いに意思疎通ができる（常次先生が上手く譲歩してくださっている）のが議論相手によいところです。常次先生の指摘は鋭いので、考えがまとまらずモヤモヤしているところがクリアになって、消耗はしますが大変有意義です。こういう意思疎通がしっかりできるが視点や発想が異なる組み合わせというのは、研究活動において重要なことだと思います。

このカイラリティというホットな話題で、ISSP ワークショップ「カイラル物質科学の新展開」を開催させていただき、コロナ禍の研究者の皆さんの「議論飢え」もあり、3 日間で延べ 500 名の大変盛況な研究会となりました。私は成り行き任せの性格なため、この主催にあたっても、常次先生の緻密なチェックと辻さん、鈴木さんを中心とした秘書さん・学生さん達の強力なバックアップに大いに助けられました。本務では秘書さんはおらず事務手続きは普段すべて自分でやっているので、有能な秘書さんに頼れる環境は羨ましくもあり、来所の手続きもテキパキとやってくださるのでとても快適でした。また、ぜひお世話になりたいところです。

当初は、折角の機会なので他の理論や実験の先生方、若手の方々とも積極的に交流を深め、共同研究の種を増やそうと思っていましたが、楽しい時間が経つのは思いの外はやく、気がついたら客員の期間が終わってしまいました。この点は心残りですが、今後ときどきお邪魔する良い口実になりそうです。

最後になりましたが、コロナ禍の制限があるなかで客員として受け入れてくださった前所長の森先生をはじめとする所員の先生方、快適な環境を提供してくださった理論事務の辻さん、鈴木さん、物性研共同利用係および総務係の方々にこの場を借りて感謝申し上げます。

客員所員を経験して

KEK 物質構造科学研究所中性子　　遠藤 仁

2022 年度に客員所員を勤めました、KEK 物構研中性子の遠藤仁です。ホストになって頂いた眞弓皓一准教授はじめ、附属中性子科学研究施設の皆様に感謝致します。私は 2005 年 12 月から震災直前となる 2010 年 10 月の間に附属中性子科学研究施設にて勤務させて頂いておりましたので、今回古巣に戻る様な形となりました。実は、物性研所属中、「物性研だより」に寄稿する機会には残念ながら一度も恵まれませんでしたので、今回、この原稿依頼を喜んで引き受けた次第です。

私はドイツのユーリッヒ研究所で中性子小角散乱法を主な実験手法として博士課程を修了し、それ以降、現在まで一貫して中性子散乱を用いて物性研究を続けて来ました。「ドイツで博士号を獲ろう」と思い立ったのは、日本での修士課程の実験で JRR3 の中性子散乱装置を使わせて貰った際、自分の取ったデータが欧米の装置で得られたデータと比較して余りにも劣っていた事に驚愕した事が契機でして、日本に戻ってからは「欧米の装置に負けない」中性子散乱研究をする事を常に肝に銘じています。

中性子散乱で良い結果を得る為の要素は、「中性子強度」・「実験装置」・「試料」・「解析」が挙げられます。私が日本に戻った頃、「中性子強度」では欧米との差は埋め難く、従って、それ以外の要素で対抗するしか方法がありませんでした。実際、物性研在職中は、SANS-U と iNSE という JRR3 の２台の中性子散乱実験装置の高度化に取り組むとともに、試料に部分重水素化を施すコントラスト変調法を駆使して多体系の物性研究を行い、また良い共同研究者にも恵まれ、結果として研究成果に恵まれ、無事に物性研を「卒業」する事が出来ました。しかしながら、JAEA に移籍した直後に東日本大震災が発生し、JRR3 の再稼働の目処が立たないまま、2013 年に KEK に異動し、以来、J-PARC MLF での中性子スピンエコー装置の開発に従事しています。

J-PARC MLF の中性子源は、震災を乗り越えて徐々にその出力を挙げ、現時点においてパルス中性子源としては世界最高の中性子強度（１パルス当たり）を達成するに至りました。遂に日本において「中性子強度」という点でも世界のトップに立ち、私が大学院生で研究を始めた頃には想像できなかった研究環境が実現しました。この状況は今後 10 年以上継続する事になりますので、その間に更に良い研究成果を上げるべく努力を重ねて行きたいと考えております。

さて、今回客員所員を引き受けたのは、震災により 10 年以上の停止を余儀なくされた JRR3 の再稼働に際し、昔担当していた iNSE の再立ち上げに協力する事が目的の一つでした。残念ながら JRR3 停止の間、iNSE はほぼ手付かずの状態でした。実験ホールに入って久しぶりに装置と対面した時、「時が止まった」様な感覚に襲われました。iNSE に限らず、中性子スピンエコー装置は世界に 10 台しか存在せず、開発はもちろん維持管理も難しい装置ですので、装置の再起動を決意してくれた山室教授と眞弓准教授、実務に当たっている小田助教、及び附属中性子科学研究施設のスタッフの皆様に改めて感謝申し上げます。iNSE は、JRR3 改造に伴い 1990 年代初頭から装置建設が始まり、代々の装置担当者（現在の小田さんで５代目）の不断の努力の結果として、装置が存続しております。昨年度中は、中性子スピンエコー信号の観測に無事辿り着き、いよいよ今年度から本格的な運用が期待されるところまで辿り着きました。前代の装置担当者として、装置が見事に復活を遂げたのは非常に嬉しい限りで、多少なりとも協力する事ができ、今回良い機会を頂いたと思っております。また一緒に活動して、小田さんの装置に関する理解の深さと、眞弓さんの運営能力の高さに感銘を受けました。今後の物性科学及び中性子科学の発展に必ずや寄与してくれるものと期待しています。

最後に、今後の JRR3 における中性子科学研究への期待を述べたいと思います。J-PARC の中性子源が JRR3 の中性子源を大きく凌駕してしまった今後においても、JRR3 では質の高い研究が可能です。むしろ、一般的な「共同利用」は J-PARC にある程度任せ、研究・教育にじっくりと時間を割いても良いのではないかと個人的には思います。私がドイツで博士課程の研究をさせて頂いた際、ほぼ毎月、原子炉で実験する機会を得ており、サイエンスと装置が良い研究の両輪である事を実感する事ができました。J-PARC MLF では、装置側と利用側との分業が極端

に進みつつあり、その結果、装置側は装置の維持管理で一杯一杯になってしまい、利用側は装置の特性を活かした研究が提案できない状況になりつつある事を危惧しています。JRR3 で(多少共同利用は犠牲にして)サイエンスと装置とが密接にリンクした研究を積極的に推進する事で、その様な現状を打破する推進剤となってくれる様な人材が出てくれるのではないか？と無責任に考えつつ、ペンを置きます。

客員所員を経験して

広島大学大学院先進理工系科学研究科　　多田 靖啓

2022 年度の一年間にわたり、物性研究所客員所員として大変お世話になりました。まず最初に、受け入れ先である押川所員をはじめとする関係者の方々や秘書の辻さんをはじめとする事務的な対応をして下さった皆様にお礼を申し上げます。コロナ禍が明けつつあった 2022 年度に柏キャンパスを頻繁に訪れることができたことを、とてもうれしく思っております。

私の研究課題は、量子多体系における対称性やその非自明な性質に関する理論的研究でした。近年、物性物理学において系のもつ対称性はますます重要性を増しています。従来の対称性が自発的に破れた相だけでなく、対称性によって守られた相や新しいタイプの対称性によって区別される相など、対称性に関わる物理は急速に発展しています。さらに、これらを場の理論的観点からとらえようという分野横断的な研究も進展しています。そのような中で、私の設定した具体的な課題は 2 つあり、(i)対称性に守られた(SPT) gapless な状態、及び(ii)磁場中での空間対称性によって特徴づけられる状態に関するものでした。ここでは、これらの研究の動機付けについて簡単にご紹介したいと思います。

1 つ目の gapless SPT 状態のポイントは、その名の通り、エネルギーギャップのない励起をもつ基底状態を対象にしていることです。2010 年くらいからギャップのある SPT 状態については、非常に多くの研究がなされてきました。それらの系を理解する上で不可欠なのがエネルギーギャップの存在です。その拡張として、ギャップのない系を考えたくなるものですが、実はこれは大変難しい問題でまだまだ発展途上にあります。Gapless SPT はそのような研究の一つと解することができます。

2 つ目の磁場中での対称性は、量子状態の分類の一般論などと関連しています。理論的に対称性の帰結を理解することは非常に大切であり、様々な SPT 状態、さらには高次 SPT 状態と呼ばれる状態の存在が明らかにされてきました。高次 SPT では空間対称性が重要になるのですが、一般に相互作用のある量子多体系における空間対称性に守られた量子相については、まだ理解されていないことが多くあります。磁場中の空間対称性の研究は、そのような目標の第一歩だということができます。

客員所員として一年間を過ごした今、頻繁に物性研究所を訪れる機会を頂けたからこそ、これらの研究を進展させることができたと感じています。実際、対面で色々と議論することを通して、1 つ目の gapless SPT については物性研の博士課程学生らと論文を一つ出版することができました。また、2 つ目の磁場中対称性についても、受け入れ先である押川所員との論文を現在投稿中です。心残りなのは、実験の先生方と議論する機会をあまり積極的に作れなかったということです。とくに、磁場中対称性については元々は電子系の数値計算から始まった研究であり、具体的な物質や実験との関係も大変重要です。これは 2022 年 5 月に物性研で行われた磁場中物性に関する研究会で発表させて頂いた内容ではあるのですが、今後より説得力のある研究を発展させていきたいと感じています。Gapless SPT と磁場中対称性についてまだ現在進行中の研究もありますので、今後とも物性研の方々とはお会いする機会もあるかと思います。そのような際には、是非、楽しく議論させて頂ければ幸いです。

物性研究所短期研究会

固体におけるエニオンと分数統計粒子研究の最前線

https://yamashita.issp.u-tokyo.ac.jp/tanki230213/

【日程】2023 年 2 月 13 日(月)－14 日(火)

【場所】柏キャンパス図書館 1 階メディアホールと Zoom によるハイブリッドミーティング

【研究会提案者】宇田川 将文、大谷 義近、長田 俊人、押川 正毅、笠原 裕一、橋坂 昌幸、山下 穣

固体中の電子は多数が凝縮することでその姿を大きく変え、その環境の持つ次元や対称性に応じて、別の新粒子とみなすことのできる素励起を形成する。2 次元系におけるエニオン粒子もそうした新粒子の一つで、フェルミオンともボゾンとも違う分数統計に従う。このエニオンの一種である非可換エニオンは誤り耐性をもつトポロジカル量子コンピューティングを可能にする粒子として大きな注目を集めている。非可換エニオンは偶数分母の分数量子ホール状態で実現が期待されるだけでなく、その性質を持つマヨラナ粒子の実現が半導体ナノ細線、トポロジカル超伝導体、キタエフ磁性体などの様々な系において期待されており、精力的に研究されている。

このように、様々な系でマヨラナ粒子を中心としたエニオンの研究が行われているが、それぞれの分野での研究動向について、お互いにあまり知らない状況であった。そこで、それぞれの分野における進展や今後の課題について互いに情報共有し、今後の研究発展や分野融合のきっかけになるような場とすべく、この短期研究会を開催した。特に、2 次元量子ホール系、1 次元量子細線、トポロジカル超伝導、キタエフスピン液体の 4 つのテーマに着目し、それぞれの第一線で活躍する研究者によるチュートリアル講演を依頼した。また、非可換エニオンはトポロジカル量子コンピューティングの構成要素として注目されている観点から、名古屋大学の加藤晃太郎氏から量子情報分野から見たトポロジカル量子計算の現状についてもチュートリアル講演をいただいた。これに加えて、各分野での最新の研究成果に関する 11 件の招待講演と、一般講演として 12 件のポスター講演が行われた。

この研究会では分数量子ホール系におけるブレーディング実験の進展、トポロジカル超伝導状態におけるマヨラナフェルミオンとその量子細線実験におけるマヨラナゼロモード検出の課題、キタエフ候補物質の α-$RuCl_3$ における実験の進展と α-$RuCl_3$ 以外の候補物質探索にむけた取り組み、エニオンの数理、非可換エニオンを用いたトポロジカル量子計算の実際とエラー対策の課題など、様々なトピックが紹介された。チュートリアル講演は 50 分と長いため、講演者の方の準備は大変であったと思われるが、どの講演も非常にわかりやすくまとまっていて大変好評であった。

会議は柏キャンパス図書館のメディアホールによる対面の会議と、Zoom 配信を組み合わせたハイブリッド形式で行われた。現地には 2 日間でのべ約 120 人の参加があり、オンラインからも 160 名近い参加者があった。

初対面の参加者も多い研究会であり、また、講演後の踏み込んだ議論を活発化させるためにも講演間のコーヒーブレイクの時間が長いプログラムにした。結果、いろいろな裏話を含めて、普段聞けない話が聞ける貴重な機会になったように思う。また、会議中に急遽、柏キャンパスの食堂の一つが工事で閉鎖されることになったため、主催者側でお弁当を用意して別室に移動して食事をとってもらう形になった。移動の手間がかかったが、結果的に会議参加者で集まって昼食をとりながら様々な議論ができて有意義であった。こうした会場設営のため、山下研秘書の菱沼さん、押川研秘書の辻さん、長田研秘書の荒さん、大谷研秘書の金田さんにはコーヒーブレイク会場の準備から昼食会場の準備と片付けに多大な協力をいただいた。ここに改めて感謝申し上げます。

物性研短期研究会「固体におけるエニオンと分数統計粒子研究の最前線」

チュートリアル講演 ５０分講演＋１０分質疑	招待講演 ２５分講演＋５分質疑

１日目：２月１３日（月）

	講演者	タイトル
9:00 - 9:15	所長挨拶、諸案内	
	Session 1 座長：山下　穣（東大物性研）	
9:15 - 10:15	橋坂　昌幸（NTT物性科学基礎研究所）	分数量子ホール系におけるエニオンの観測と制御
10:15 - 10:45	藤澤　利正（東京工業大学）	整数・分数量子ホール系における朝永ラッティンジャー液体の電荷分数化現象
10:45-11:15	工藤　耕司（ペンシルバニア州立大学）	非可換準電子状態の可解模型の構築
	休憩１５分	
11:30 - 12:00	仲井　良太（九州大学）	超伝導接合系におけるトポロジカル超伝導相とエニオン
12:00 - 12:30	小塚　裕介（物質材料研究機構）	２次元電子系のエッジ状態と超伝導接合
12:30 - 14:00	昼食＋ディスカッション	
14:00 - 16:00	Poster session	
	Session 2 座長：長田　俊人（東大物性研）	
16:00 - 17:00	加藤　晃太郎（名古屋大学）	非可換エニオンによるトポロジカル量子計算
17:00 - 18:00	佐藤　昌利（京都大学基礎研）	トポロジカル超伝導
18:00 - 18:30	町田　理（理化学研究所）	トポロジカル超伝導体FeSeTeにおけるマヨラナ準粒子検出

２日目：２月１４日（火）

	Session 3 座長：大谷　義近（東大物性研）	
9:30 - 10:30	松尾　貞茂（理化学研究所）	半導体超伝導体接合を用いたマヨラナゼロモード研究の現状
	休憩３０分	
11:00 - 11:30	田仲　由喜夫　（名古屋大学）	超伝導体接合におけるマヨラナフェルミオンと奇周波数クーパー対の理論
11:30 - 12:00	藤　陽平（東京大学）	量子細線・レイヤーによる3次元トポロジカル相の構成
12:00 - 12:30	高田　真太郎（産総研）	固体電子系における量子計算の実現に向けた飛行電子の制御
12:30 - 14:00	昼食＋ディスカッション	
	Session 4 座長：押川　正毅（東大物性研）	
14:00 - 15:00	求　幸年（東京大学）	Kitaevスピン液体とエニオン
	休憩３０分	
15:30 - 16:00	笠原　裕一（京都大学）	キタエフスピン液体における半整数熱量子ホール効果の観測
16:00 - 16:30	芝内　孝禎（東京大学）	キタエフスピン液体における磁場角度依存マヨラナギャップの比熱による検証
16:30 - 17:00	宇田川　将文（学習院大学）	キタエフスピン液体におけるマヨラナゼロモードの観測とSTM

Poster session: 2/13 14:00 - 16:00	
高橋 雅大	Non-local spin correlation as a signature of Ising anyons trapped in vacancies of the Kitaev spin liquid
那須 譲治	キタエフ量子スピン液体におけるスピン輸送のフラックス散乱
山田 昌彦	行列積くりこみ群の開発
原田 千宏	「キタエフ量子スピン液体におけるバイゾンの磁場制御」
阿南 宇紘	円偏光誘起トポロジカル超伝導の時間発展シミュレーション
岡本 佳比古	元素置換したノーダルライン半金属CaAgP単結晶における表面超伝導
堀 眞弘	２次元準結晶におけるトポロジカル超伝導相
小山 慎之介	キタエフ模型における有限温度のマグノン減衰
金賀 穂	非線形光学応答におけるグラフェン中の電子とキタエフ磁性体中のマヨラナ粒子
加藤 岳生	一次元電子系における単電子生成と電流ノイズ
若村 太郎	トポロジカル物質Td-$MoTe_2$薄膜における超伝導特性
車地　崇	面内ホール効果と対称性

*ポスターは研究会の全期間中、掲示できます。

写真１：集合写真

写真 2：講演時の様子

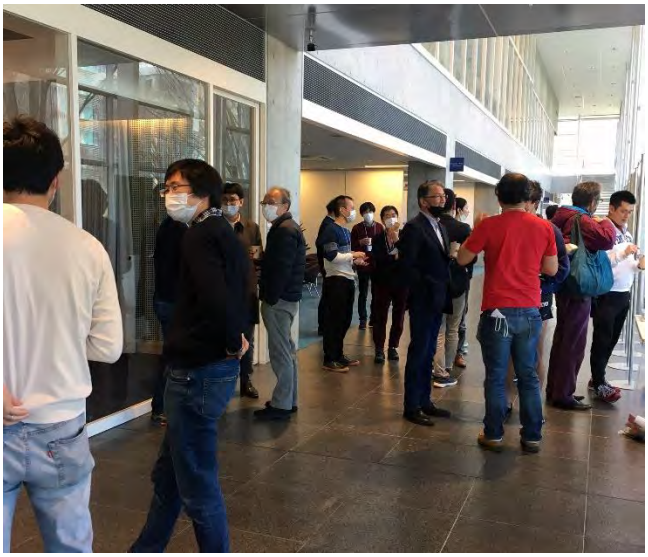


写真 3：プロムナードでのディスカッション

物性研究所短期研究会

物性研究所スパコン共同利用・CCMS 合同研究会「計算の時代における物性科学」報告

物質設計評価施設　川島 直輝

日時：2023 年 4 月 3 日(月)-4 日(火)
場所：東京大学物性研究所 6 階大講義室
https://www.issp.u-tokyo.ac.jp/maincontents/seminar/all2.html?ptype=seminar&pid=17808
所外組織委員：畝山多加志（名古屋大学）、初貝安弘（筑波大学）、渡邉聡（東京大学）、河村光晶（東京大学）、森田悟史（慶応義塾大学）
所内組織委員：川島直輝、尾崎泰助、杉野修、野口博司、福島鉄也、井戸康太、中野裕義、春山潤、福田将大、吉見一慶

本短期研究会は、物性研スパコン共同利用と CCMS の成果報告会も兼ねて、毎年計算機関連の所員が輪番で代表世話人を努めている研究会である。

近年、機械学習、人工知能、量子計算、暗号資産、ビッグデータ活用計算、などなど、計算にまつわるトピックスを主要なメディア上で目にしない日は無くなった。我々の日常生活は広い意味の計算にすでに大きく依存しており、今後その依存度はますます高まっていくものと予想される。この潮流は当然に物性計算の世界にも大きなインパクトを持つと同時に、物性科学分野の活動がこうした潮流にもたらす寄与も決して小さくない。物性研共同利用スパコンでは、2022 年度に enaga から kugui へとシステム C の更新を行い、現在総理論演算性能が約 8PF となっている。一方、計算の大規模化にはアクセラレータの利用が必須であり、物性計算における GPU のより一層の活用が一つの懸案事項となっている。これらのような背景から、物性研スパコンユーザおよび CCMS 関係者が集い、最近の計算事例にもとづく情報交換の場を持つことによって、近年の計算動向と我々のコミュニティがどのように相互作用していくべきかについて考察を深める場とすることを目指して開催された。

今回は 3 年ぶりの完全オンサイト開催とし、会議室の利用人数上限のルールも一応まだ残っている中で、参加人数が多すぎたり少なすぎたりしないかやや不安であったが、最終的には参加登録数 70、実際に参加した方は 4 月 3 日が 60 名、4 月 4 日が 55 名となり、どうにか想定内におさまった。各講演に続く討論も活発に行われた。(図 1) 口頭招待講演は有田(東京大学)と古家(NVIDIA)による 2 件の特別講演を含めて 16 件、ポスター講演は 25 件であった。ポスターについては、ポスター賞にエントリーしたポスターのなかから、参加者全員による投票によって、増木亮太(東京大学)、福井毅勇(東京大学)、冨山翔平(物性研)の 3 件を優秀ポスター賞受賞者として選定し、研究会の最後に表彰式を行った。

オンラインではなかなか十分な効果をだすことが難しいポスターセッション(図 2)やささやかながら懇親会(図 3)も開催し、コミュニティメンバ間の相互交流を促進するうえで久しぶりの良い機会となったものと思う。

■■■ プログラム ■■■

■ **2023 年 4 月 3 日（月）**

-----セッション 1----- （座長 福田 将大）

13:00～13:10　開会挨拶（物性研所長　廣井 善二）

13:10～14:00　有田 亮太郎（東京大学）【特別講演】
「転移温度の第一原理計算」

14:00～14:30　濱田 幾太郎（大阪大学）
「密度汎関数理論計算に基づく単一原子触媒の研究」

14:30～15:00　　藤野 智子（物性研究所）
「ドープ型 PEDOT をモデルとした単結晶性オリゴマー型伝導体の開発」
15:00～15:20 休憩
-----セッション 2----- （座長 春山 潤）
15:20～15:50　　小林 亮（名古屋工業大学）
「分子動力学法を用いた非一様固体内のイオン伝導解析」
15:50～16:20　　島村 孝平（熊本大学）
「機械学習原子間ポテンシャルの訓練方法の検討及び分子動力学法への応用」
16:20～16:50　　大谷 実（筑波大学）
「第一原理計算と古典溶液論によるハイブリッド計算法を用いた電気化学シミュレーション」

-----ポスターセッション-----
16:50～18:10　　ポスター発表 [6 階ラウンジ]

■ 2023 年 4 月 4 日（火）
-----セッション 3 ----- （座長 井戸 康太）
9:30～10:20　　古家 真之介（NVIDIA）【特別講演】
「GPU コンピューティングを活用した物性研究」
10:20～10:30 休憩
-----セッション 4 ----- （座長 森田 悟史）
10:30～11:00　　吉田 恒也（京都大学）
「数値的対角化を用いた強相関非エルミートトポロジーの解析」
11:00～11:30　　小布施 秀明（北海道大学）
「非エルミート・トポロジカル相と Julia による任意精度演算」
11:30～12:00　　井戸 康太（物性研究所）
「機械学習・データ科学手法を活用した第一原理有効ハミルトニアンの網羅的解析」
12:00～13:00 昼食
-----セッション 5 ----- （座長 吉見 一慶）
13:00～13:30　　田村 亮（物質・材料研究機構）
「ブラックボックス最適化による物性研究」
13:30～14:00　　中野 裕義（物性研究所）
「異方的アクティブマターと外部駆動格子ガスに共通する協同現象」
14:00～14:30　　星 健夫（鳥取大学）
「富岳における超並列データ駆動科学と全反射高速陽電子回折 (TRHEPD) への応用」
14:30～14:50 休憩
-----セッション 6 ----- （座長 野口 博司）
14:50～15:20　　眞弓 皓一（東京大学）
「MD シミュレーションを用いた高強度高分子ゲルの力学物性発現メカニズム解明」
15:20～15:50　　福田 順一（九州大学）
「液晶の秩序構造とその光学的性質に関する数値的研究」
15:50～16:20　　大槻 道夫（大阪大学）
「弾性体の摩擦の物体形状による制御」
16:20～16:25　　ポスター賞表彰式・閉会挨拶

■ ポスター講演

PA-1　増木 亮太（東京大学）
「フォノン理論に基づいた有限温度における結晶構造の第一原理計算」

PA-2　山口 直也（金沢大学）
「LCPAO 法における一様電場下第一原理計算手法の開発とスピンテクスチャへの応用」

PA-3　Chandro Pardede（金沢大学）
“Accelerated Density Functional Calculation using GPU”

PA-4　天野 智仁（東京大学）
「ルチル型 TiO_2 の格子誘電特性：自己無撞着フォノン法による第一原理的研究」

PA-5　Li Hengyu (物性研究所)
“Ab initio Molecular Dynamics Simulation accelerated by On-the-fly Machine Learning”

PA-6　小正路 崚太郎（物性研究所）
「最密球充填構造と四元系水素化物の網羅的探索」

PA-7　安 碩奎（物性研究所）
「内殻準位分光の密度汎関数計算」

PB-1　福井 毅勇（東京大学）
「環境と結合したキタエフ模型における磁場誘起転移」

PB-2　張 成燻（物質・材料研究機構）
「大規模並列計算を用いた f 電子系におけるキタエフ型相互作用の研究」

PC-1　本間 健司（物性研究所）
「核ノルム正則化によるテンソルネットワークのループ最適化」

PC-2　赤松 克哉（物性研究所）
“Numerical Study on the Faithfulness of Real-Space Renormalization Group Maps”

PC-3　菊地 駿太（慶應義塾大学）
「分子動力学法による脂質二重膜の揺らぎの測定」

PC-4　山本 哲也（慶應義塾大学）
「赤血球モデルのエネルギースペクトル解析」

PC-5　冨山 翔平（物性研究所）
「分子シミュレーションにおける自由エネルギー計算手法の高次内挿による改良」

PZ-1　三澤 貴宏（物性研究所）
「有機反強磁性体における強相関トポロジカル絶縁体」

PZ-2　品岡 寛（埼玉大学）
“Multi-scale space-time ansatz for correlation functions of quantum systems based on quantics representations”

PZ-3　吉見 一慶（物性研究所）
「東京大学物性研究所データリポジトリに関する紹介」

PZ-4　渕崎 員弘（愛媛大学）
「畳み込みニューラルネットワークのメモリヒステリシスによって連続/不連続転移を判断可能か？」

PZ-5　日沼 洋陽（産業技術総合研究所）
「$In2O_3$ 担持金属ナノ粒子における酸素空孔生成エネルギーの金属依存性の探索」

PZ-6　青山 龍美（物性研究所）
「2022 年度東京大学物性研究所ソフトウェア開発高度化プロジェクトの活動紹介」

PZ-7　森田 悟史（物性研究所）
「古典ダイマー模型における Ashkin-Teller 型相転移」
PZ-8　春山 潤（物性研究所）
「第一原理計算を用いた金属/吸着水系の二次非線形感受率の解析」
PZ-9　篠原 康（NTT）
「高強度パルスを照射された水晶中の電子エネルギー分布の第一原理計算」
PZ-10　森井 洋平（東北大学）
「機械内複雑流動のマルチスケールシミュレーション」
PZ-11　榊原 寛史（鳥取大学）
「ニッケル酸化物超伝導体の圧力効果の第一原理バンド計算」

図 1：講演後の質疑応答

図 2：ポスターセッションの様子

図 3：懇親会の様子

物性研究所談話会

標題：令和５年度前期　客員所員講演会
日時：2023 年４月 20 日(木) 午前 10 時～午前 11 時 30 分
場所：物性研究所本館　大講義室（A632）・ZOOM 同時開催
要旨：

10:00-10:10　所長挨拶（廣井　善二）
10:10-10:30　樋山　みやび（群馬大学　准教授）
合成・定量計測・理論計算による ホタル生物発光基質類似体の研究
10:30-10:50　塚原　規志（群馬工業高等専門学校　准教授）
多孔性の２次元有機金属構造体をテンプレートとした、金属クラスター成長
10:50-11:10　貞清　正彰（東京理科大学）
配位高分子中におけるゲスト誘起超マグネシウムイオン伝導
11:10-11:30　星　健夫（鳥取大学）
富岳における超並列データ駆動科学と全反射高速陽電子回折(TRHEPD)への応用

標題：特異な磁気状態を示す多軌道強相関物質の開拓
日時：2023 年６月２日(金) 午後４時～午後５時
場所：物性研究所本館　大講義室（A632）・ZOOM 同時開催
講師：高木 里奈
要旨：

電子同士が強く相互作用する物質中では、電子の電荷・スピン・軌道・格子といった複数の自由度が顕在化し、相転移現象や秩序構造の起源となります。また最近では、電子構造や磁気構造におけるトポロジーの概念が、新しい電子相開拓の鍵となることがわかってきています。我々は、こうした強相関やトポロジーが絡んだ電子相発現の舞台となる物質開拓を行っています。本講演では、遷移金属イオン M を含む単一分子性導体 M(tmdt)2 における強相関電子相の形成と、トポロジカル磁気相を伴う EuAl4 に関する研究内容を中心に紹介します。遷移金属イオン M が有機配位子 tmdt で挟まれた M(tmdt)2 は、一種類の分子種の積層のみで伝導体を形成しており、電子相関に加え、M を主体とする dpσ 軌道と tmdt の pπ 軌道のエネルギー差によって電子状態が特徴づけられます。これら軌道間のエネルギー差が小さい Au(tmdt)2 では、反強磁性転移に向けて分子内電荷移動が生じており、軌道間の自己ドーピングによって誘起された特異な磁気秩序であることが明らかになりました。EuAl4 は二種類の元素からなる比較的シンプルな結晶構造の金属間化合物ですが、Eu2+の局在スピンと伝導電子の結合により、温度・磁場・元素置換によって磁気スキルミオン格子相をはじめとする様々な磁気秩序相を示すことがわかってきました。本講演ではこれらの研究内容に加え、今後の研究展望についても発表する予定です。

【講師紹介】

高木先生は令和５年４月に凝縮系物性研究部門に着任され、固体中の電子が持つ複数の自由度が絡み合う新しい量子相を示す物質を実験的に研究されています。本日の講演では特に、遷移金属を含む分子性導体とトポロジカル磁気秩序を示す金属化合物についての研究をご紹介いただけました。

標題：タンパク質分子モーターによる細胞内輸送現象への極値理論の応用
日時：2023 年 6 月 2 日(金) 午後 3 時～午後 4 時
場所：物性研究所本館　大講義室（A632）・ZOOM 同時開催
講師：林　久美子
要旨：

細胞を対象とした物性計測は、細胞内現象のメカニズムを理解するために重要である。生きている、つまり外部からエネルギー注入があり内部でエネルギー消費がある細胞は複雑な非平衡環境にあり、統計力学法則が破綻するため、最も物性計測が難しい対象の一つと言える。本談話会では極値統計学を細胞内物性の理解に役立てる新しい試みを話したい。これまで、極値統計学は防災分野で津波の高さや台風の最大風速の見積もりに利用されたり、陸上競技のデータ解析などに利用されたりしてきた。その他にも経済活動やヒトの寿命推定にも利用されている。（統計数理研究所の「極値理論の工学への応用」研究会で毎年活発な応用が議論されている。本講演は 2022 年度研究会で発表に基づく。）

本研究では、これまで主に社会現象に利用されてきた極値統計学を、ナノスケールのタンパク質の動態解析に応用する。輸送現象は無生物だけでなく生体内にも存在し、キネシンは細胞中心から末端に向かう順行性輸送、ダイニンは末端から細胞中心に向かう逆行性輸送を担う分子モーター(運び手)として知られている。物質は小胞(粒子)として輸送されるため、粒子に蛍光ラベルを施すことで、輸送動態を蛍光イメージング法で観察できる。動態観察から輸送速度データを取得した。極値統計を用いた輸送速度解析の結果、キネシンによる順行性輸送速度データが典型的なワイブル分布を示す一方で、ダイニンによる逆行性輸送速度データは異常な振る舞いを示した。両者の異なる振る舞いから、分子モーターの細胞内での物理性質の相違を議論したい。

【講師紹介】

林先生は令和 5 年 4 月に物性研機能物性グループに着任され、理論と実験の双方から非平衡統計力学と生物物理学を研究されています。本日の講演では特に、細胞内蛍光イメージングの実験と数学を用いたデータ解析の両方をご紹介いただけました。

物性研究所セミナー

標題：Functional-renormalization-group approach to classical liquids
日時：2023 年 3 月 15 日(水) 午後 4 時～午後 5 時
場所：物性研究所本館 6 階 第 5 セミナー室（A615）とオンライン（Zoom）のハイブリッド形式
講師：横田　猛
所属：理化学研究所 数理創造プログラム
要旨：

Accurate and efficient ways to analyze classical liquids are desired in various contexts including chemical reactions. Traditional approaches include the renormalization-group (RG) methods such as the hierarchical reference theory. However, these traditional approaches rely on the knowledge of hard-core reference systems to include the effect of short-range repulsion. Recently, we have developed an RG approach that does not rely on a hard-core reference system [1]. We have introduced the functional RG to rigorously describe the RG flow and the cavity distribution functions to treat short-range repulsion. In this talk, I will present the formulation and numerical demonstrations in a one-dimensional solvable model, where our approach shows better accuracy than the conventional integral-equation methods such as the hypernetted chain and the Percus-Yevick equation.

[1] T. Yokota, J. Haruyama, O. Sugino, Phys. Rev. E 104, 014124 (2021).

標題：空間反転対称性の破れた有機・無機ハイブリッドペロブスカイト系化合物における光 - スピン物性
日時：2023 年 3 月 17 日(金) 午前 11 時～午後 0 時
場所：Online
講師：谷口 耕治 教授
所属：東京工業大学理学院
要旨：

有機・無機ハイブリッドペロブスカイト(OIHP)系化合物は、優れた太陽電池材料としての特性を示すことなどから、その光物性が近年注目を集めている。OIHP 系化合物は、無機骨格に磁性元素や重元素を組み込むことが可能であり、優れた光物性をスピン物性と結合させる舞台として興味深い系である。最近、我々のグループでは、OIHP 系化合物へのキラリティの導入を介して、空間反転対称性の破れを制御した物質開発を行ってきた。本セミナーでは、新規に開発した空間反転対称性の破れた系において、発現が確認された非反転対称性誘起の光 - スピン結合物性として、非相反的方向二色性と非線形光伝導現象に関して発表した。

標題：Spin-derived electric polarization and chirality density inherent in localized electron orbitals
日時：2023 年 3 月 27 日(月) 午後 4 時～午後 5 時
場所：Online
講師：星野 晋太郎
所属：埼玉大学
要旨：

In solid state physics, any phase transition is commonly observed as a change in the microscopic distribution of charge, spin, or current. However, there is an exotic order parameter inherent in the localized electron orbitals that

cannot be primarily captured by these three fundamental quantities.

This order parameter is described as the electric toroidal multipoles connecting different total angular momenta under the spin-orbit coupling. The corresponding microscopic physical quantity is the spin current tensor on an atomic scale, which induces spin-derived electric polarization aligned circularly and the chirality density derived from the Dirac equation [1].

We also derive the equation of continuity for chirality density and discuss its relation to chiral anomaly and optical chirality. These findings link microscopic spin currents and chirality in the Dirac theory to the concept of multipoles and provide a new perspective for quantum states of matter.

This work has been done in collaboration with H. Ikeda and M.-T. Suzuki.

[1] S. Hoshino, M.-T. Suzuki, H. Ikeda, arXiv:2210.02148 (2022).

標題：動的平均場法による多極子感受率と多極子相互作用の導出
日時：2023 年 3 月 28 日(火) 午後 4 時～午後 5 時
場所：物性研究所本館 6 階 第 5 セミナー室 (A615) 及び Online
講師：大槻 純也
所属：岡山大学異分野基礎科学研究所
要旨：

近年、動的平均場近似によって多体効果を考慮した強相関化合物の電子状態計算法、いわゆる LDA+DMFT 法(または DFT+DMFT 法)が急速な発展を見せている。この方法を用いることで、3d 軌道や 4f 軌道などの局在性の強い軌道を含む電子状態を記述することが可能となる。それにより、電子の局在状態における磁性(多極子秩序)や遍歴状態における磁性と超伝導も統一した近似で議論できるようになると期待される。

我々は、この方法論により多極子感受率を評価することで、強相関化合物の多極子相転移の予測を目指して研究を行っている。講演では特に、この研究に関する下記の 2 つの進展について紹介した。

・強相関極限で厳密なベーテ・サルペータ方程式の近似公式 [1]

・4f 電子系の多極子秩序の典型物質である CeB6 への応用 [2]

ひとつめは、多極子感受率の計算でネックとなる軌道数の 4 乗に比例した成分数を持つベーテ・サルペータ方程式の扱いを簡略化するものである。ふたつめでは、第一原理計算と組み合わせた計算により、CeB6 における反強四極子秩序(II 相)の相転移温度が適度な精度で見積もられた例を紹介した。

[1] J. Otsuki, K. Yoshimi, H. Shinaoka, Y. Nomura, Phys. Rev. B 99, 165134 (2019).
[2] J. Otsuki, K. Yoshimi, H. Shinaoka, H. O. Jeschke: arXiv:2209.10429.

標題：Quantum Geometric Light-Matter Interactions and Optical Control in Correlated and Open Quantum Systems

日時：2023 年 3 月 31 日(金) 午前 10 時～午前 11 時

場所：Online

講師：Martin Claassen

所属：The University of Pennsylvania

要旨：

Irradiation with light provides a powerful tool to interrogate, control or induce new quantum states of matter out of equilibrium, however a microscopic understanding of dynamics and light-matter coupling in solids remains a profound challenge. This talk will discuss three aspects for steering and probing correlated topological matter, dissipative electron systems and superconductors with light. I will show that THz radiation can grant a new quantum-geometric handle to steer correlated quantum materials such as magic-angle twisted bilayer graphene, whereby light dynamically dresses the Wannier functions of interacting electrons which govern the low-energy dynamics. I will then discuss how light can couple to open electronic quantum systems interacting with Markovian reservoirs, to permit a spectroscopic probe of dissipation-engineered Lindbladian band structures and exceptional points in low-dimensional systems. Finally, I will argue that dynamical symmetry breaking with tailored light pulses can explore metastable phases in superconductors with competing instabilities, as a route to stabilize elusive triplet paired states.

標題：π共役分子の一次元配列を基点とした未来材料探索

日時：2023 年 4 月 13 日(木) 午後 3 時～午後 4 時

場所：物性研究所本館 6 階 第 5 セミナー室（A615）

講師：宮島 大吾

所属：凝縮系物性研究部門、JST さきがけ

要旨：

有機材料(=分子性材料)の物性は構成する分子の構造と集合様式によって決まる。計算科学の発展により分子単体の物性はかなり正確に予測できるようになりつつあるが、分子の集合構造の予測は未だ困難である。 集合構造を制御するツールとして、我々はこれまでアミド基の水素結合を利用し超分子ポリマーやカラムナー液晶の研究を行ってきた。重合様式・強誘電性など、アミド基の特性を生かした種々の物性・機能を報告してきた 1-3)。さらに近年超分子重合と自己複製反応を組み合わせた固相超分子重合の系も見出した 4)。しかしながら、アミド基のような水素結合ユニットや Metal Organic Framework (MOF)に用いられる配位結合を用いることが必ずしも物性面において良い結果をもたらすわけではない。本セミナーではアミド基など強い分子間相互作用ユニットを用いないπ共役分子の配列制御と、その分子配列戦略に基づく未来材料探索について紹介した 5-8)。

1) Science, 336, 209–213, 2012.
2) Science, 347, 6222, 646–651, 2015.
3) Nature Chem. 9, 1133-1139, 2017.
4) Nat. Mater. 21, 253-261, 2022.
5) J. Am. Chem. Soc., 142, 3326-3330, 2020.
6) Angew. Chem. Int. Ed., 60, 16377-16381, 2021.
7) Angew. Chem. Int. Ed., 60, 3261–3267, 2021.
8) Nature, 609, 502–506, 2022.

標題：Microscopic theory of spin Hall magnetoresistance
日時：2023 年 4 月 14 日(金) 午後 4 時～午後 5 時
場所：物性研究所本館　大講義室（A632）/Online
講師：加藤 岳生
所属：東京大学物性研究所
要旨：

Magnetoresistance has been one of the important phenomena in spintronics for a long time. Recently, a novel type of magnetoresistance called spin Hall magnetoresistance (SMR) has been observed in a bilayer system composed of a normal metal and a ferromagnetic insulator. While its qualitative behavior has been explained well by the semiclassical theory based on a mixing conductance [1], this theory could not describe temperature dependence of the SMR. In this talk, I present a microscopic theory [2,3] for SMR by formulating a spin conductance in terms of spin susceptibilities. We reveal that SMR is composed of static and dynamic parts; The static part originates from spin flip caused by an interfacial exchange coupling. On the other hand, the dynamic part, which is induced by the creation or annihilation of magnons, has an opposite sign from the static part. I also present the temperature dependence of SMR derived by our theory using the spin-wave approximation [2] and a quantum Monte Carlo simulation [3].

[1] Y. T. Chen, et al., Phys. Rev. B 87, 144411 (2013).
[2] T. Kato, Y. Ohnuma, and M. Matsuo, Phys. Rev. B 102, 094437 (2020).
[3] T. Ishikawa, M. Matsuo, and T. Kato, Phys. Rev. B 107, 054426 (2023).

標題：Higher-group symmetry of topological order and stabilizer codes
日時：2023 年 4 月 18 日(火) 午後 4 時～午後 5 時
場所：物性研究所本館 6 階 第 5 セミナー室（A615）
講師：小林 良平
所属：University of Maryland
要旨：

Topologically ordered phases can host interesting classes of non-trivial topological defects of varying codimensions. Among the topological defects, the invertible defects form an algebraic structure called higher-group. In this talk we explain how the higher-group structure of invertible global symmetry emerges in discrete gauge theory of generic dimensions, and show various examples of the higher-group symmetry in topological order mainly focusing on (3+1)-dimensional stabilizer codes. The emergent global symmetry of a stabilizer model is understood as a logical gate acting on the logical qubits. We explain that the higher-group structure of global symmetry in general leads to non-Pauli logical gate realized by the action of emergent global symmetry, e.g., Control-Z logical gate of (3+1)-dimensional Z2 toric code.

標題：Error-correction assisted measurement of Membrane operators in Ultracold Atom simulators
日時：2023 年 4 月 27 日(木) 午後 4 時～午後 5 時
場所：物性研究所本館 6 階 第 5 セミナー室 (A615)
講師：Gil Young Cho
所属：Pohang University of Science and Technology
要旨：

Exotic quantum many-body state, such as Haldane and spin liquid phases, can exhibit intriguing features like fractional excitations and non-abelian statistics, and provide new understandings of quantum entanglement in many-body systems. They are often indistinguishable from trivial states from the perspective of Landau's symmetry breaking paradigm and are classified by non-local correlators. However, the characterization of these phases is experimentally challenging since the non-local correlators are sensitive to incoherent errors like atom losses, which suppress its signals exponentially. Additionally, there has not been much progress in developing protocols, which systematically identify and mitigate the incoherent errors in the analog quantum simulator. Here, we address these challenges by developing an error correction protocol for large-scale neutral atom quantum simulators using optical lattices, which simulate the strong-correlation physics of the paradigmatic two-dimensional Bose-Hubbard model. We develop and apply a new error correction approach based on the Ising model, which enables us to identify and remove uncorrelated errors in the quantum simulations. After correcting such incoherent errors, we observe a dramatic improvement of the parity correlator and find the perimeter scaling law in two-dimensional Mott insulators. Furthermore, the error model provides a statistical estimation of number fluctuations, from which we can measure the generalized brane order parameter. Our work provides a promising avenue for investigating and characterizing exotic phases of matters in large-scale quantum simulations.

標題：Exploring Electron Pairing Symmetry in CsV3Sb5-Derived Kagome Superconductors Utilizing Ultrahigh Resolution laser-ARPES
日時：2023 年 4 月 27 日(木) 午後 0 時 15 分～午後 1 時 15 分
場所：Online
講師：Yigui Zhong
所属：Okazaki group in LASOR
要旨：

The newly discovered kagome superconductors AV3Sb5 (A=K, Rb, Cs) represent a promising platform for investigating the interplay between band topology, electronic order, and lattice geometry [1, 2]. Despite extensive research efforts on this system, the nature of the superconducting ground state remains elusive and a consensus on the electron pairing symmetry has not been achieved so far. In this talk, I will report our ultrahigh resolution and low-temperature angle-resolved photoemission spectroscopy (ARPES) studies on two exemplary CsV3Sb5-derived kagome superconductors — Cs(V0.93Nb0.07)3Sb5 with the appearance of charge order and Cs(V0.86Ta0.14)3Sb5 without charge order in the normal state [3]. Additionally, I will present our studies of electronic kinks in the band structure [4] and temperature-dependent muon spin relaxation rate, and discuss the possible pairing mechanisms for these kagome superconductors. Overall, our findings contribute to a better understanding of the nature of superconductivity and its intertwined orders in kagome quantum materials.

References:

[1] Neupert, T. et al., Nature Physics 18, 137 (2021).

[2] Yin et al., Nature 612, 647-657 (2022).
[3] Zhong, Y. et al., Nature, in press, arXiv:2303.00875.
[4] Zhong. Y. et al., Nat. Commun., in press, arXiv:2207.02407.

標題：Zeros of Green functions in topological insulators – A tool for visualizing topological phases
日時：2023 年 5 月 15 日(月) 午後 1 時～午後 2 時
場所：Online
講師：Takahiro Misawa
所属：ISSP
要旨：

Recently, we have found that the zeros of the diagonal components of the Green functions are useful quantities for detecting a wide range of topological insulators [1]. In particular, we have shown that the zeros of the Green functions traverse the band gap due to band inversions in the topological phases. Utilizing this feature, we can distinguish topological phases by seeing whether the zeros traverse the band gap. For microscopic models of the conventional six classes of topological insulators, we show that the traverses of the zeros universally occur in the topological phases. We also show that higher-order topological insulators, which have recently attracted much attention, can also be detected by the zeros of the Green functions.

Interestingly, the recently rediscovered eigenvector-eigenvalue identity [2], which is a simple but long-time-overlooked mathematical formula in linear algebra, plays an important role in the analysis of the zeros of the Green functions. Furthermore, by using the zeros of the Green function, we find that a conventional antiferromagnetic Mott insulator in κ-(BEDT-TTF)2Cu[N(CN)2]Cl can be regarded as a correlated topological insulator [3].

References

[1] T. Misawa and Y. Yamaji, Phys. Rev. Research 4, 023177 (2022).
[2] P. Denton, S. Parke, T. Tao, and X. Zhang, Bull. Am. Math. Soc. 59, 31 (2022). The story on the finding of the eigenvector-eigenvalue identity is available at https://www.quantamagazine.org/neutrinos-lead-to-unexpected-discovery-in-basic-math-20191113/
[3] T. Misawa and M. Naka, arXiv:2301.04490.

標題：Anomalous spin wave excitations in quantum antiferromagnets CsFeCl3 and RbFeCl3
日時：2023 年 5 月 17 日(水) 午後 11 時～午後 0 時
場所：物性研究所本館 6 階 第 5 セミナー室（A615）及び Zoom（ハイブリッド開催）
講師：林田 翔平
所属：Max-Planck-Institute for Solid State Research
要旨：

The alkali-metal trichloroferrates AFeCl3 (A = Cs and Rb) are prototypical S = 1 triangular quantum antiferromagnets with strong planar magnetic anisotropy [1]. Under the influence of hydrostatic pressure [2] or chemical composition [3], they are known to exhibit quantum phase transitions between gapped quantum-paramagnetic and magnetically ordered states. A combination of quantum criticality and geometrical frustration makes spin dynamics in AFeCl3 complex and intriguing. However, a comprehensive understanding is still lacking. In this talk, I present a detailed quantitative analysis of the spin-wave excitations by neutron scattering technique [2,3] and the extended spin-wave theory (ESWT) [4]. The spin-wave analysis seems to work reasonably well for CsFeCl3, but the ESWT fails already on a quantitative level for RbFeCl3. The most striking finding is that the measured spin-

wave intensity is highly anisotropic in the long-wavelength limit, whereas the ESWT simulation based on short-range interaction alone predicts an isotropic spectrum. We conclude that this discrepancy is attributed to long-range dipolar interactions [5].

References
[1] H. Yoshizawa et al., J. Phys. Soc. Jpn. 49, 144 (1980).
[2] S. Hayashida et al., Sci. Adv. 5, eaaw5639 (2019).
[3] S. Hayashida et al., Phys. Rev. B 99, 224420 (2019).
[4] M. Matsumoto, S. Hayashida, and T. Masuda, J. Phys. Soc. Jpn. 89, 034710 (2020).
[5] L. Stoppel, S. Hayashida et al., Phys. Rev. B 104, 094422 (2021).

標題：Spin-to-charge conversion with various quantum materials
日時：2023 年 5 月 22 日(月) 午後 2 時～午後 3 時
場所：物性研究所本館 6 階 第 5 セミナー室 (A615)
講師：Subhankar Bedanta
所属：National Institute of Science Education and Research (NISER)
要旨：

The precession of magnetization in a ferromagnet (FM) can transmit pure spin current into an adjacent heavy metal (HM) via spin pumping. This pure spin current gets converted to charge current due to high spin orbit coupling (SOC) of the HM due to the inverse spin Hall effect (ISHE). I will discuss recent ISHE results on Co2Fe0.4Mn0.6Si/Pt bilayers, where Co2Fe0.4Mn0.6Si is a full Heusler alloy. Damping analysis indicates the presence of significant spin pumping at the interface of Co2Fe0.4Mn0.6Si and Pt [1]. I will also discuss ISHE experiments on some other combinations such as CoFeB/IrO2 and manganite based La0.66Sr0.34MnO3/Pt bilayers. [2-3] Recently AFM materials having high SOC have been found to be a good replacement of HM in spin current based study. We have performed the ISHE study of CoFeB (10 nm)/ AFM (d nm) where we considered various AFM such as Mn2Au, IrMn, Mn3Ga etc. The systematic angle dependent ISHE measurements have been carried out to disentangle the different spin rectification effects viz. anisotropic magnetoresistance and anomalous Hall effect [4 – 6]. Further I will show the ISHE study on topological insulator (TI)/ferromagnetic Bi2Se3/CoFeB films [7,8]. ISHE experiments have also been performed to demonstrate that TIs are potential candidates to replace HM as they possess high spin-orbit coupling.

Acknowledgements: I like to thank my collaborators and funding agencies for their generous support.

[1] B. B. Singh et al., NPG Asia Materials, 13, 9 (2021).
[2] B. Sahoo et al. Adv. Quant. Technol. 2021, 2000146 (2021).
[3] P. Gupta et al., Nanoscale, 13, 2714-2719, (2021).
[4] B. B. Singh and S. Bedanta, Phys. Rev. Applied 13, 044020 (2020).
[5] B. B. Singh et al., Phys. Rev. B 102, 174444 (2020).
[6] K. Roy et al., J. Phys. D – Appl. Phys. 54, 425001 (2021).
[7] B. B. Singh et al., PSS Rapid 2018, 1800492 (2018).
[8] B. B. Singh et al., ACS Applied Material & Interfaces 12, 53409 (2020).

標題：Drude weights and f-sum rules for linear and nonlinear conductivities
日時：2023 年 5 月 26 日(金) 午後 4 時～午後 5 時
場所：物性研究所本館　第 5 セミナー室(A615) /Online
講師：押川 正毅
所属：物性研究所
要旨：

Conductivity is one of the most important characteristics of materials. Nonlinear conductivities are of increasing experimental and theoretical interest recently, but the subject is largely open. I will discuss our recent approach to the fundamentals of the nonlinear conductivities. An application of a spatially uniform electric field can be formulated as an insertion of Aharonov-Bohm flux. By considering the energy gain of the system in the two opposite limits of flux insertion ー adiabatic and sudden, we can derive the two renowned formulae on linear conductivities: Kohn formula for Drude weights and the f-sum rule, in a unified manner. Furthermore, they can be naturally generalized to all orders of nonlinear conductivities.

The Drude weight obtained from the nonlinear generalization of Kohn formula often turns out to be divergent. We argue that the divergence is due to the order of limits intrinsic to the Kohn formula, in which the adiabatic (zero frequency) limit is taken before the thermodynamic limit.

References:

1.Watanabe and M. O., Phys. Rev. B 102, 165137 (2020).
2.Watanabe, Y. Liu, and M. O., J. Stat. Phys. 181, 2050 (2020).
3.Takasan, M.O., and H. Watanabe, Phys. Rev. B 107, 075141 (2023).

標題：Specific Heat of Quantum Materials in high magnetic fields 強磁
日時：2023 年 5 月 26 日(金) 午前 11 時～午後 0 時
場所：Online
講師：Dr. Christophe Marcenat
所属：CEA-Grenoble
要旨：

In the introduction, I will briefly explain recent improvements in the technique of modulation calorimetry which allows ultra high sensitivity and provides a new tool for fermiology and the study of quantum oscillations.

Thereafter I will illustrate these new possibilities in 3 different cases : the (ultra) quantum limit of graphite, the search for chargeless fermions in Kondo insulators, and the exotic superconductivity in UTe2.

標題：マグノン流体における Wiedemann-Franz 則の破れ

日時：2023 年 6 月 9 日(金) 午後 4 時～午後 5 時

場所：物性研究所本館 6 階 A615 号室 及び Online

講師：佐野 涼太郎

所属：京都大学理学研究科

要旨：

量子輸送現象は、基礎・応用両面での重要性から、物性物理学において大きな関心を集めてきた。さらに近年における実験技術の躍進により、量子輸送の研究はますます加速しつつある。最近実現できるようになった超純良な系では、準粒子間の強い相互作用によって輸送特性が大きく変えられ、流体力学的な兆候が現れることが報告され始めている。その最も顕著な例として、金属における流体力学的な電荷輸送が挙げられ、「電子流体力学」と呼ばれる新たな潮流を生み出してきた[1]。実際、この概念の登場を皮切りに、負の非局所抵抗[2]や Wiedemann-Franz (WF) 則の破れ[3]など様々な非従来型の輸送現象が明らかにされつつある。

一方で近年、超純良な強磁性絶縁体の実現により、マグノン流体への道もまた開拓され始めている[4]。マグノンは、ジュール熱を伴わないスピンの担い手として注目されており、特に流体力学的なマグノン輸送は電子流体と同様、従来的な自由粒子描像を超えたこれまでにない革新的な機能性を秘めている[5]。しかしながら現時点では、この領域特有の時間および長さスケールに直接アクセスできるプローブがないため、マグノン流体の観測は未だに実現されていない。

そこで本研究では、特に時間スケールに着目することにより、マグノン流体方程式を導出するとともに、スピン伝導度および熱伝導度を考察した[7]。さらに、流体力学領域に特有なスピン流と熱流の緩和機構の違いにより、従来的な輸送領域で成り立つマグノン WF 則[6]が大きく破れることを明らかにした。従って本結果は、マグノンの流体的な振る舞いが実現していることを示唆する重要な証拠となるのみならず、マグノン流体観測に大きく貢献すると期待される。

[1] J. Crossno, et al., Science 351, 1058 (2016).

[2] D. Bandurin, et al., Science 351, 1055 (2016).

[3] J. Gooth, et al., Nat. Comm. 9, 4093 (2018).

[4] C. Du, et al., Science 357, 195 (2017).

[5] C. Ulloa, et al., PRL 123, 117203 (2019).

[6] K. Nakata, et al., PRB 92, 134425 (2015).

[7] R. Sano and M. Matsuo, PRL 130, 166201 (2023).

東京大学物性研究所人事異動一覧

【研 究 部 門 等】

発令日	氏 名	部門・施設名等	職 名	備 考
〈 採 用 〉				
R5.4.1	林 久美子	機能物性研究グループ	教授	東北大学大学院工学研究科応用物理学専攻准教授より
	橋坂 昌幸	ナノスケール物性研究部門	准教授	日本電信電話株式会社 物性科学基礎研究所 特別研究員より
	山浦 淳一	附属物質設計評価施設	准教授	高エネルギー加速器研究機構 物質構造科学研究所 研究員より
	大熊 隆太郎	附属物質設計評価施設	助教	オックスフォード大学 Postdoctral Research Assistantより
	三澤 貴宏	附属計算物質科学研究センター	特任准教授	北京量子信息科学研究院 Associate Researcherより
〈 昇 任 〉				
R5.4.1	高木 里奈	凝縮系物性研究部門	准教授	東京大学大学院工学系研究科附属総合研究機構戦略研究部門 助教より
〈 再 雇 用 〉				
R5.4.1	内田 和人	凝縮系物性研究部門	一般技術職員	凝縮系物性研究部門 技術専門員より
〈 兼 務 〉				
R5.4.1	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5年4月1日～令和6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5年4月1日～令和6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5年4月1日～令和6年3月31日
〈 客 員:テーマ限定型 〉				
R5.4.1	樋山 みやび	機能物性研究グループ	客員准教授	本務:群馬大学大学院理工学府・准教授 期間:令和5年4月1日～令和6年3月31日
	塚原 規志	ナノスケール物性研究部門	客員准教授	本務:群馬工業高等専門学校・准教授 期間:令和5年4月1日～令和6年3月31日
	貞清 正彰	附属中性子科学研究施設	客員准教授	本務:東京理科大学理学部・講師 期間:令和5年4月1日～令和6年3月31日
〈 客 員:テーマ提案型 〉				
R5.4.1	星 健夫	附属物質設計評価施設	客員准教授	本務:鳥取大学大学院工学系研究科・准教授 期間:令和5年4月1日～令和6年3月31日

発令日	氏　名	部門・施設名等	職　名	備　　考

〈 定 年 退 職 〉

R5.3.31	勝本　信吾	ナノスケール物性研究部門	教授	東京都市大学　教育講師へ
	川口　孝志	附属国際超強磁場科学研究施設	技術専門員	附属国際超強磁場科学研究施設 特任専門職員へ
	内田　和人	凝縮系物性研究部門	技術専門員	凝縮系物性研究部門　一般技術職員へ

〈 任 期 満 了 〉

R5.3.3	Haddad Sonia	凝縮系物性研究部門	特任教授	凝縮系物性研究部門　特任研究員へ
R5.3.31	三宅　厚志	附属国際超強磁場科学研究施設	助教	東北大学金属材料研究所　准教授へ
	神田　夏輝	附属極限コヒーレント光科学研究センター	助教	理化学研究所　研究員へ
	森田　悟史	附属物質設計評価施設	助教	慶應義塾大学理工学研究科 特任准教授へ
	BOVENSIEPEN UWE	附属極限コヒーレント光科学研究センター	特任教授	デュースブルク＝エッセン大学物理学部 教授へ
	福島　鉄也	社会連携研究部門	特任准教授	産業技術総合研究所　機能材料コンピュテーショナルデザイン研究センター 研究チーム長へ
	出倉　駿	凝縮系物性研究部門	特任助教	東北大学多元物質科学研究所　助教へ
	奥村　駿	機能物性研究グループ	特任助教	東京大学大学院工学系研究科　助教へ

〈 辞 職 〉

R5.3.31	野村　肇宏	附属国際超強磁場科学研究施設	助教	東京電機大学　講師へ
	矢島　健	附属物質設計評価施設	助教	名古屋大学大学院工学研究科　准教授へ

令和４年度外部資金の受入について

1. 奨学寄附金

件　　数	金 額（円）
24	52,162,856

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	(国研)科学技術振興機構	18,330,000	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	(国研)科学技術振興機構	159,289,000	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	(国研)科学技術振興機構	10,660,000	ナノスケール物性研究部門 教授　大谷　義近
時空間で精密制御した輻射場による表面反応プロセス	(国研)科学技術振興機構	10,660,000	機能物性研究グループ 教授　吉信　淳
ゲル・腱・靭帯の構造・ダイナミクスの解明	(国研)科学技術振興機構	18,200,000	附属中性子科学研究施設 准教授　眞弓　皓一
2次元ホウ素未踏マテリアルの創製と機能開拓	(国研)科学技術振興機構	52,780,000	附属極限コヒーレント光科学研究センター 教授　松田　巌
“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	(国研)科学技術振興機構	7,345,000	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	(国研)科学技術振興機構	13,000,000	ナノスケール物性研究部門 特任研究員　柳澤　啓史
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	(国研)科学技術振興機構	7,467,200	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	(国研)科学技術振興機構	15,795,000	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
多体波動関数物性の量子シミュレーション	(国研)科学技術振興機構	5,200,000	物性理論研究部門 助教　池田　達彦
高強度テラヘルツ光によって誘起された量子スピン流の学理創出	(国研)科学技術振興機構	5,850,000	物性理論研究部門 特任研究員　玉谷　知裕
ファンデルワールス結晶の対称性制御とトポロジカル非線形輸送	(国研)科学技術振興機構	10,426,000	凝縮系物性研究部門 准教授　井手上　敏也
強相関ソフトマターの時空間階層構造解析	(国研)科学技術振興機構	7,800,000	附属中性子科学研究施設准 教授　眞弓　皓一
異種混合配列オリゴマーによる超高伝導性材料の創製	(国研)科学技術振興機構	10,400,000	凝縮系物性研究部門 助教　藤野　智子
オペランド軟X線反応イメージングの開発	(国研)科学技術振興機構	4,160,000	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
AIが先導するオートメーションタンパク質工学の創出	(国研)科学技術振興機構	1,430,000	機能物性研究グループ 准教授　井上　圭一
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	(国研)量子科学技術研究開発機構	508,689,000	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
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	(国研)産業技術総合研究所	5,512,009	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
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	(国研)産業技術総合研究所	8,250,000	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	(国研)　物質・材料研究機構	10,010,000	機能物性研究グループ 教授　杉野　修
パワーレーザーDX プラットフォーム	(大)大阪大学	4,400,000	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
磁性材料を対象としたハイスループット計算に関わる研究開発	(国研)　物質・材料研究機構	5,200,000	データ統合型材料物性研究部門 特任准教授　福島　鉄也
データ連携部会	(国研)　物質・材料研究機構	13,000,000	附属物質設計評価施設 教授　尾崎　泰助

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	(国研)新エネルギー・産業技術総合開発機構	4,956,000	機能物性研究グループ 教授　杉野　修
ICTデータ活用型アクティブ制御レーザー加工技術開発	(国研)新エネルギー・産業技術総合開発機構	6,994,000	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
石炭灰を主原料とした新規なリサイクル連続長繊維の応用研究	(国研)新エネルギー・産業技術総合開発機構	9,714,000	附属物質設計評価施設 教授　上床　美也
水素利用等高度化先端技術開発／スケーリング則を脱するカソード触媒の基盤研究：酸化物をベースとした非白金触媒の理解	(国研)新エネルギー・産業技術総合開発機構	12,922,000	機能物性研究グループ 教授　杉野　修
合　　計		948,439,209	

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
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			附属国際超強磁場科学研究施設 教授　金道　浩一
パルス超強磁場を用いたトポロジカル機能の研究	(国研)理化学研究所	30,000,000		附属国際超強磁場科学研究施設 准教授　徳永　将史
新しい強磁場マグネット用高強度・高伝導率導体の開発	(国研)物質・材料研究機構		1,430,000	附属国際超強磁場科学研究施 教授　金道　浩一
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	(国研)理化学研究所			機能物性研究グループ 准教授　井上　圭一
強磁場共用装置を用いた強相関電子系における磁気特性、輸送特性の解明・開発に関する研究	(国研)物質・材料研究機構			附属物質設計評価施設 教授　廣井　善二
軟 X 線検出器の性能の評価に関する研究	(国研)産業技術総合研究所			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
磁歪の光ファイバセンサによる高速検出(2)	(国研)産業技術総合研究所			附属国際超強磁場科学研究施設 教授　松田　康弘
量子物質の創発と機能のための基礎科学―「富岳」と最先端実験の密連携による革新的強相関電子科学	(大)早稲田大学	6,765,000		附属極限コヒーレント光科学研究センター 准教授　近藤　猛
Flat-jet を用いた溶液中のアト秒ダイナミクスに関する研究	(国研)理化学研究所			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
L-SSPS 用レシーバ太陽電池高性能化の研究	(国研)宇宙航空研究開発機構	499,084		機能物性研究グループ 教授　秋山　英文
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	(国研)産業技術総合研究所			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
熱回収型太陽電池に関する研究	(国研)産業技術総合研究所			機能物性研究グループ 教授　秋山　英文
【企業との共同研究　13 件】		109,890,150		
合　　計		147,154,234	1,430,000	

東京大学物性研究所教員公募について

１．職名および人数

助教　１名

２．所属

物性研究所附属物質設計評価施設

３．就業場所

物性研究所柏キャンパス（千葉県柏市柏の葉 5-1-5）

４．公募内容

物質設計評価施設川島研究室の中核的スタッフとして、大規模数値計算の手法を用いて物性科学研究を推進する。とくに新しい計算手法の開発、およびそれを用いた量子および古典統計力学系などの研究を行う。スパコン全国共同利用やオープンソースソフトウェア開発などの分野振興活動にも積極的に関与することが期待される。

５．応募資格

博士号または同等の資格を有する、または着任までに取得見込の方

６．契約時期

採用決定後なるべく早い時期

７．任期

任期は 5 年とする。ただし、再任は可とし 1 回を限度とする。

８．試用期間

採用された日から 6 月間（東京大学教職員就業規則第 8 条による）

９．応募締切

令和 5 年 8 月 23 日（水）必着

10．提出書類

（イ）応募の場合

○履歴書（東京大学統一履歴書（https://www.u-tokyo.ac.jp/ja/about/jobs/r01.html）を用いること）

○業績リスト（特に重要な論文に○印を付けること）

○主要論文の別刷（3 編、コピー可）

○研究業績の概要（A4 用紙 2–3 枚程度）

○研究計画書（A4 用紙 2–3 枚程度）

○応募者についての推薦書、または、意見書（作成者から書類提出先へ直送）

（ロ）推薦の場合

○推薦書

○履歴書（東京大学統一履歴書（https://www.u-tokyo.ac.jp/ja/about/jobs/r01.html）を用いること）

○業績リスト（特に重要な論文に○印を付けること）

○主要論文の別刷（3 編、コピー可）

○研究業績の概要（A4 用紙 2–3 枚程度）

○研究計画書（A4 用紙 2–3 枚程度）

11．提出方法

郵送または電子メール

提出先：〒277-8581 千葉県柏市柏の葉 5-1-5　東京大学物性研究所総務係

電話：04-7136-3207　email：issp-jinji@issp.u-tokyo.ac.jp

○郵送の場合

「物性研究所附属物質設計評価施設教員（川島研）応募書類在中」、又は「物性研究所附属物質設計評価施設教員（川島研）推薦書類在中」の旨を朱書し、簡易書留等配達状況が確認可能な方法で送付すること

○電子メールの場合

空の電子メールを件名「物性研究所附属物質設計評価施設教員（川島研）応募」にて上記提出先に送付し、その後返信される電子メールに記載された書類提出先フォルダに応募書類一式をアップロードすること（応募の場合、推薦書または意見書は、作成者から書類提出先へ直送のこと）

※勤務日 2〜3 日以内に返信メールが届かない場合には総務係へご連絡ください。

12. 照会先

提出手続きに関する問い合わせは提出先に、それ以外は下記まで問い合わせること

東京大学物性研究所　附属物質設計評価施設　教授　川島 直輝

e-mail: kawashima@issp.u-tokyo.ac.jp

13. 募集者名称

国立大学法人東京大学

14. 就業時間

専門業務型裁量労働制により、1 日 7 時間 45 分勤務したものとみなされる。

15. 休日

土・日、祝日、年末年始（12 月 29 日〜1 月 3 日）

16. 休暇

年次有給休暇、特別休暇等

17. 賃金等

学歴・職務経験等を考慮して決定。昇給制度あり

諸手当：賞与（年 2 回）、通勤手当（原則 55,000 円まで）のほか、本学の定めるところによる。

18. 加入保険

文部科学省共済組合、雇用保険

19. その他

○東京大学物性研究所教授会の議を経て審査決定します。ただし、適任者のない場合は決定を保留します。

○東京大学は男女共同参画を推進しており、女性の積極的な応募を歓迎します。

○外為法等の定めにより、国外機関との兼業や外国政府等からの多額の収入があり、本学における研究上の技術の共有が制限される場合には、本学教職員としての職務の達成が困難となる可能性があります。そのため、着任後の兼業等については、本学における研究上の技術の共有に支障のない範囲に留める必要があります。

○提出書類等は返却しませんので、了解の上、応募または推薦してください。また、履歴書は本公募の用途に限り使用し、個人情報は正当な理由なく第三者への開示、譲渡及び貸与することは一切ありません。

○受動喫煙防止措置の状況は屋内原則禁煙（喫煙場所設置）です。

令和 5 年 6 月 23 日

東京大学物性研究所長　　廣井　善二

東京大学物性研究所教員公募について

１．職名および人数

教授または准教授　１名

２．所属

物性研究所附属物質設計評価施設

３．就業場所

物性研究所柏キャンパス（千葉県柏市柏の葉 5-1-5）

４．公募内容

高圧力を基軸とする広い意味での電子物性研究を積極的に行い、新規な物理現象の観測を通して物性物理学の新たな潮流を生み出す意欲的な研究者を公募する。高圧発生技術や高圧下での先端的な研究手法の開発を積極的に展開し、高圧物性分野を牽引するとともに、物性研究所が担う共同利用に貢献する研究者を希望する。

５．応募資格

博士号または同等の資格を有する、または着任までに取得見込の方

６．契約時期

採用決定後なるべく早い時期

７．任期

満 56 歳に達する年度の初めに任期 5 年の任期制に入り、再任は１回を限度とする。なお、任期制の詳細については下記照会先に問い合わせること。

８．試用期間

採用された日から 6 月間（東京大学教職員就業規則第 8 条による）

９．応募締切

令和 5 年 8 月 31 日（木）必着

10．提出書類

（イ）応募の場合

○履歴書（東京大学統一履歴書（https://www.u-tokyo.ac.jp/ja/about/jobs/r01.html）を用いること）

○業績リスト（特に重要な論文に○印を付けること）

○主要論文の別刷（5 編、コピー可）

○研究業績の概要（A4 用紙 2−3 枚程度）

○研究計画書（A4 用紙 2−3 枚程度）

○応募者についての推薦書、または、意見書（作成者から書類提出先へ直送）

（ロ）推薦の場合

○推薦書

○履歴書（東京大学統一履歴書（https://www.u-tokyo.ac.jp/ja/about/jobs/r01.html）を用いること）

○業績リスト（特に重要な論文に○印を付けること）

○主要論文の別刷（5 編、コピー可）

○研究業績の概要（A4 用紙 2−3 枚程度）

○研究計画書（A4 用紙 2−3 枚程度）

11．提出方法

郵送または電子メール

提出先：〒277-8581 千葉県柏市柏の葉 5-1-5　東京大学物性研究所総務係

電話：04-7136-3207　email：issp-jinji@issp.u-tokyo.ac.jp

○郵送の場合

「物性研究所 附属物質設計評価施設 教員応募書類在中」、又は「物性研究所 附属物質設計評価施設教員推薦書類在中」の旨を朱書し、簡易書留等配達状況が確認可能な方法で送付すること

○電子メールの場合

空の電子メールを件名「物性研究所 附属物質設計評価施設 教員応募」にて上記提出先に送付し、その後返信される電子メールに記載された書類提出先フォルダに応募書類一式をアップロードすること（応募の場合、推薦書または意見書は、作成者から書類提出先へ直送のこと）

※勤務日 2～3 日以内に返信メールが届かない場合には総務係へご連絡ください。

12. 照会先

提出手続きに関する問い合わせは提出先に、それ以外は下記まで問い合わせること

東京大学物性研究所　附属物質設計評価施設　教授　岡本 佳比古

e-mail: yokamoto@issp.u-tokyo.ac.jp

13. 募集者名称

国立大学法人東京大学

14. 就業時間

専門業務型裁量労働制により、1 日 7 時間 45 分勤務したものとみなされる。

15. 休日

土・日、祝日、年末年始（12 月 29 日～1 月 3 日）

16. 休暇

年次有給休暇、特別休暇等

17. 賃金等

学歴・職務経験等を考慮して決定。昇給制度あり

諸手当：賞与（年 2 回）、通勤手当（原則 55,000 円まで）のほか、本学の定めるところによる。

18. 加入保険

文部科学省共済組合、雇用保険

19. その他

○東京大学物性研究所教授会の議を経て審査決定します。ただし、適任者のない場合は決定を保留します。

○東京大学は男女共同参画を推進しており、女性の積極的な応募を歓迎します。

○外為法等の定めにより、国外機関との兼業や外国政府等からの多額の収入があり、本学における研究上の技術の共有が制限される場合には、本学教職員としての職務の達成が困難となる可能性があります。そのため、着任後の兼業等については、本学における研究上の技術の共有に支障のない範囲に留める必要があります。

○提出書類等は返却しませんので、了解の上、応募または推薦してください。また、履歴書は本公募の用途に限り使用し、個人情報は正当な理由なく第三者への開示、譲渡及び貸与することは一切ありません。

○受動喫煙防止措置の状況は屋内原則禁煙（喫煙場所設置）です。

令和 5 年 5 月 16 日

東京大学物性研究所長　　廣井　善二

東京大学物性研究所教員公募について

１．職名および人数

助教　１名

２．所属

物性研究所附属国際超強磁場科学研究施設

３．就業場所

物性研究所柏キャンパス（千葉県柏市柏の葉 5-1-5）

４．公募内容

小濱研究室では、強磁場下で発現する新奇な物理現象の発見やその理解を目指している。強磁場下での物性実験や新たな測定技術の開発を推進でき、国内外の研究者と連携して共同利用・共同研究を展開することに積極的な若手研究者を公募する。

５．応募資格

博士号または同等の資格を有する、または着任までに取得見込の方

６．契約時期

採用決定後なるべく早い時期

７．任期

任期は 5 年とする。ただし、再任は可とし 1 回を限度とする。

８．試用期間

採用された日から 6 月間（東京大学教職員就業規則第 8 条による）

９．応募締切

令和 5 年 9 月 4 日（月）必着

10．提出書類

（イ）応募の場合

○履歴書（東京大学統一履歴書（https://www.u-tokyo.ac.jp/ja/about/jobs/r01.html）を用いること）

○業績リスト（特に重要な論文に○印を付けること）

○主要論文の別刷（3 編、コピー可）

○研究業績の概要（A4 用紙 2−3 枚程度）

○研究計画書（A4 用紙 2−3 枚程度）

○応募者についての推薦書、または、意見書（作成者から書類提出先へ直送）

（ロ）推薦の場合

○推薦書

○履歴書（東京大学統一履歴書（https://www.u-tokyo.ac.jp/ja/about/jobs/r01.html）を用いること）

○業績リスト（特に重要な論文に○印を付けること）

○主要論文の別刷（3 編、コピー可）

○研究業績の概要（A4 用紙 2−3 枚程度）

○研究計画書（A4 用紙 2−3 枚程度）

11．提出方法

郵送または電子メール

提出先：〒277-8581 千葉県柏市柏の葉 5-1-5　東京大学物性研究所総務係

電話：04-7136-3207　email：issp-jinji@issp.u-tokyo.ac.jp

○郵送の場合

「附属国際超強磁場科学研究施設（小濱研究室）助教応募書類在中」、又は「物性研究所附属国際超強磁場科学研究施設（小濱研究室）助教推薦書類在中」の旨を朱書し、簡易書留等配達状況が確認可能な方法で送付すること

○電子メールの場合

空の電子メールを件名「物性研究所附属国際超強磁場科学研究施設（小濱研究室）助教応募」にて上記提出先に送付し、その後返信される電子メールに記載された書類提出先フォルダに応募書類一式をアップロードすること（応募の場合、推薦書または意見書は、作成者から書類提出先へ直送のこと）

※勤務日 2〜3 日以内に返信メールが届かない場合には総務係へご連絡ください。

12. 照会先

提出手続きに関する問い合わせは提出先に、それ以外は下記まで問い合わせること

東京大学物性研究所　附属国際超強磁場科学研究施設　准教授　小濱 芳允

e-mail: ykohama@issp.u-tokyo.ac.jp

13. 募集者名称

国立大学法人東京大学

14. 就業時間

専門業務型裁量労働制により、1 日 7 時間 45 分勤務したものとみなされる。

15. 休日

土・日、祝日、年末年始（12 月 29 日〜1 月 3 日）

16. 休暇

年次有給休暇、特別休暇等

17. 賃金等

学歴・職務経験等を考慮して決定。昇給制度あり

諸手当：賞与（年 2 回）、通勤手当（原則 55,000 円まで）のほか、本学の定めるところによる。

18. 加入保険

文部科学省共済組合、雇用保険

19. その他

○東京大学物性研究所教授会の議を経て審査決定します。ただし、適任者のない場合は決定を保留します。

○東京大学は男女共同参画を推進しており、女性の積極的な応募を歓迎します。

○外為法等の定めにより、国外機関との兼業や外国政府等からの多額の収入があり、本学における研究上の技術の共有が制限される場合には、本学教職員としての職務の達成が困難となる可能性があります。そのため、着任後の兼業等については、本学における研究上の技術の共有に支障のない範囲に留める必要があります。

○提出書類等は返却しませんので、了解の上、応募または推薦してください。また、履歴書は本公募の用途に限り使用し、個人情報は正当な理由なく第三者への開示、譲渡及び貸与することは一切ありません。

○受動喫煙防止措置の状況は屋内原則禁煙（喫煙場所設置）です。

令和 5 年 4 月 28 日

東京大学物性研究所長　　廣井　善二

東京大学物性研究所教員公募について

１．職名および人数

助教　１名

２．所属

物性研究所附属国際超強磁場科学研究施設

３．就業場所

物性研究所柏キャンパス（千葉県柏市柏の葉 5-1-5）

４．公募内容

徳永研究室では非破壊型パルスマグネットを用いた物性測定技術の開発・高度化を行い、その技術を用いた物性研究を行っている。本公募では、徳永研究室が取り組んでいる研究の発展に貢献するとともに、他研究室とも連携した強磁場科学の新しい展開に意欲を持ち、さらに共同利用の支援にも積極的に取り組む研究者を募集する。強磁場実験の経験は問わないが、低温実験または試料作製などの基礎的実験技術を有する研究者が望ましい。

５．応募資格

博士号または同等の資格を有する、または着任までに取得見込の方

６．契約時期

採用決定後なるべく早い時期

７．任期

任期は 5 年とする。ただし、再任は可とし 1 回を限度とする。

８．試用期間

採用された日から 6 月間（東京大学教職員就業規則第 8 条による）

９．応募締切

令和 5 年 9 月 29 日（金）必着

10．提出書類

（イ）応募の場合

○履歴書（東京大学統一履歴書（https://www.u-tokyo.ac.jp/ja/about/jobs/r01.html）を用いること）

○業績リスト（特に重要な論文に○印を付けること）

○主要論文の別刷（3 編、コピー可）

○研究業績の概要（A4 用紙 2−3 枚程度）

○研究計画書（A4 用紙 2−3 枚程度）

○応募者についての推薦書、または、意見書（作成者から書類提出先へ直送）

（ロ）推薦の場合

○推薦書

○履歴書（東京大学統一履歴書（https://www.u-tokyo.ac.jp/ja/about/jobs/r01.html）を用いること）

○業績リスト（特に重要な論文に○印を付けること）

○主要論文の別刷（3 編、コピー可）

○研究業績の概要（A4 用紙 2−3 枚程度）

○研究計画書（A4 用紙 2−3 枚程度）

11．提出方法

郵送または電子メール

提出先：〒277-8581 千葉県柏市柏の葉 5-1-5　東京大学物性研究所総務係

電話：04-7136-3207　email：issp-jinji@issp.u-tokyo.ac.jp

○郵送の場合

「物性研究所附属国際超強磁場科学研究施設（徳永研究室）助教応募書類在中」、又は「物性研究所附属国際超強磁場科学研究施設（徳永研究室）助教推薦書類在中」の旨を朱書し、簡易書留等配達状況が確認可能な方法で送付すること

○電子メールの場合

空の電子メールを件名「物性研究所附属国際超強磁場科学研究施設（徳永研究室）助教応募」にて上記提出先に送付し、その後返信される電子メールに記載された書類提出先フォルダに応募書類一式をアップロードすること（応募の場合、推薦書または意見書は、作成者から書類提出先へ直送のこと）

※勤務日 2～3 日以内に返信メールが届かない場合には総務係へご連絡ください。

12. 照会先

提出手続きに関する問い合わせは提出先に、それ以外は下記まで問い合わせること

東京大学物性研究所　附属国際超強磁場科学研究施設　准教授　徳永 将史

e-mail: tokunaga@issp.u-tokyo.ac.jp

13. 募集者名称

国立大学法人東京大学

14. 就業時間

専門業務型裁量労働制により、1 日 7 時間 45 分勤務したものとみなされる。

15. 休日

土・日、祝日、年末年始（12 月 29 日～1 月 3 日）

16. 休暇

年次有給休暇、特別休暇等

17. 賃金等

学歴・職務経験等を考慮して決定。昇給制度あり

諸手当：賞与（年 2 回）、通勤手当（原則 55,000 円まで）のほか、本学の定めるところによる。

18. 加入保険

文部科学省共済組合、雇用保険

19. その他

○東京大学物性研究所教授会の議を経て審査決定します。ただし、適任者のない場合は決定を保留します。

○東京大学は男女共同参画を推進しており、女性の積極的な応募を歓迎します。

○外為法等の定めにより、国外機関との兼業や外国政府等からの多額の収入があり、本学における研究上の技術の共有が制限される場合には、本学教職員としての職務の達成が困難となる可能性があります。そのため、着任後の兼業等については、本学における研究上の技術の共有に支障のない範囲に留める必要があります。

○提出書類等は返却しませんので、了解の上、応募または推薦してください。また、履歴書は本公募の用途に限り使用し、個人情報は正当な理由なく第三者への開示、譲渡及び貸与することは一切ありません。

○受動喫煙防止措置の状況は屋内原則禁煙（喫煙場所設置）です。

令和 5 年 5 月 25 日

東京大学物性研究所長　　廣井　善二

東京大学物性研究所教員公募について

１．職名および人数

助教　１名

２．所属

物性研究所凝縮系物性研究部門（高木研究室）

３．就業場所

物性研究所柏キャンパス（千葉県柏市柏の葉 5-1-5）

４．公募内容

高木所員と協力して、無機および有機結晶を研究対象として、電子相関やトポロジーに着目した新奇電子物性の開拓を推進する研究者を募集する。物質合成、電気輸送測定、核磁気共鳴測定、微細加工のいずれかにおいて経験を有しており、大学院学生の指導や国際共同研究にも意欲のある方を希望する。

５．応募資格

博士号または同等の資格を有する、または着任までに取得見込の方

６．契約時期

採用決定後なるべく早い時期

７．任期

任期は 5 年とする。ただし、再任は可とし 1 回を限度とする

８．試用期間

採用された日から 6 月間（東京大学教職員就業規則第 8 条による）

９．応募締切

令和 5 年 10 月 16 日（月）必着

10．提出書類

（イ）応募の場合

○履歴書（東京大学統一履歴書（https://www.u-tokyo.ac.jp/ja/about/jobs/r01.html）を用いること）

○業績リスト（特に重要な論文に○印を付けること）

○主要論文の別刷（3 編、コピー可）

○研究業績の概要（A4 用紙 2−3 枚程度）

○研究計画書（A4 用紙 2−3 枚程度）

○応募者についての推薦書、または、意見書（作成者から書類提出先へ直送）

（ロ）推薦の場合

○推薦書

○履歴書（東京大学統一履歴書（https://www.u-tokyo.ac.jp/ja/about/jobs/r01.html）を用いること）

○業績リスト（特に重要な論文に○印を付けること）

○主要論文の別刷（3 編、コピー可）

○研究業績の概要（A4 用紙 2−3 枚程度）

○研究計画書（A4 用紙 2−3 枚程度）

11. 提出方法

郵送または電子メール

提出先：〒277-8581 千葉県柏市柏の葉 5-1-5　東京大学物性研究所総務係

電話：04-7136-3207　email：issp-jinji@issp.u-tokyo.ac.jp

○郵送の場合

「物性研究所凝縮系物性研究部門（高木研究室）教員応募書類在中」、又は「物性研究所凝縮系物性研究部門（高木研究室）教員推薦書類在中」の旨を朱書し、簡易書留等配達状況が確認可能な方法で送付すること

○電子メールの場合

空の電子メールを件名「物性研究所凝縮系物性研究部門（高木研究室）教員応募」にて上記提出先に送付し、その後返信される電子メールに記載された書類提出先フォルダに応募書類一式をアップロードすること（応募の場合、推薦書または意見書は、作成者から書類提出先へ直送のこと）

※勤務日 2～3 日以内に返信メールが届かない場合には総務係へご連絡ください。

12. 照会先

提出手続きに関する問い合わせは提出先に、それ以外は下記まで問い合わせること

東京大学物性研究所　凝縮系物性研究部門　准教授　高木 里奈

e-mail: rina.takagi@issp.u-tokyo.ac.jp

13. 募集者名称

国立大学法人東京大学

14. 就業時間

専門業務型裁量労働制により、1 日 7 時間 45 分勤務したものとみなされる。

15. 休日

土・日、祝日、年末年始（12 月 29 日～1 月 3 日）

16. 休暇

年次有給休暇、特別休暇等

17. 賃金等

学歴・職務経験等を考慮して決定。昇給制度あり

諸手当：賞与（年 2 回）、通勤手当（原則 55,000 円まで）のほか、本学の定めるところによる。

18. 加入保険

文部科学省共済組合、雇用保険

19. その他

○東京大学物性研究所教授会の議を経て審査決定します。ただし、適任者のない場合は決定を保留します。

○東京大学は男女共同参画を推進しており、女性の積極的な応募を歓迎します。

○外為法等の定めにより、国外機関との兼業や外国政府等からの多額の収入があり、本学における研究上の技術の共有が制限される場合には、本学教職員としての職務の達成が困難となる可能性があります。そのため、着任後の兼業等については、本学における研究上の技術の共有に支障のない範囲に留める必要があります。

○提出書類等は返却しませんので、了解の上、応募または推薦してください。また、履歴書は本公募の用途に限り使用し、個人情報は正当な理由なく第三者への開示、譲渡及び貸与することは一切ありません。

○受動喫煙防止措置の状況は屋内原則禁煙（喫煙場所設置）です。

令和 5 年 7 月 3 日

東京大学物性研究所長　　廣井　善二

編　集　後　記

物性研だよりでは、研究成果だけでなく、舞台の裏側や研究者の思考のいきさつを垣間見られるのが、面白みの一つかと思います。

先端材料＆研究現場で、非常に面白く読ませて頂いたのは、1 件目の小林先生の記事です。小林先生のレーザー研究の概要とともに NEDO での活動は存じていたものの、研究と半導体先端分野がこのように結びついていると理解できていませんでした。また、ビルドアップ基板のフィルムを味の素から提供されたと、サラッと書かれています。数少ない私の企業とのお付き合いですが、このような先端材料が提供はなかなかして頂けなかったので、少し驚きました。コンソーシアムのお陰でしょうか。

勝本先生の記事では、まさに試行錯誤なども含めていきさつを語って頂いております。先生には、記事の冒頭に書かれたように、是非「物性研究所」を振り返っての、ご感想や、ご意見について伺う機会があって欲しいと思います。

今号では、8 件も研究紹介があり、また、客員所員のお話があり、私の理解力が及ばないことも加わって、全てについてご紹介するのはできませんでしたが、いずれも、背景や研究のいきさつも含めて、興味深い記事となっていますので、是非、ご一読を。

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