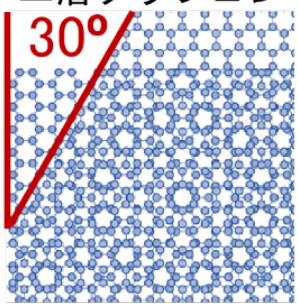
物性研だより

BUSSEIKEN DAYORI

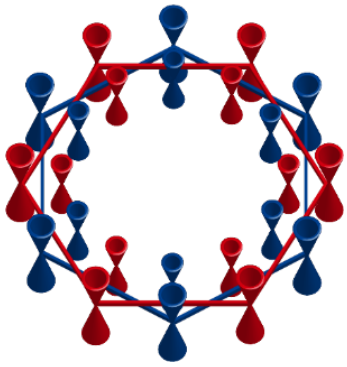
第 60 巻
第 1 号
2020 年 4 月

- 新型の光応答性タンパク質であるヘリオロドプシンの構造を解明
- 日韓共同研究でグラフェン準結晶状態の超高速変化を直接観測
—次世代光デバイス制御に新たな自由度—
- 有機分子へのスピントランスファー効果

「ねじれ」積層
二層グラフェン



「準結晶状態」



東京大学 物性研究所
THE INSTITUTE FOR SOLID STATE PHYSICS
THE UNIVERSITY OF TOKYO
Copyright ©2020 Institute for Solid State Physics, The University of Tokyo. All rights Reserved.
ISSN 0385-9843

第 60 巻
第 1 号
2020 年 4 月

contents

1 新型の光応答性タンパク質であるヘリオロドプシンの構造を解明 井上 圭一

4 日韓共同研究でグラフェン準結晶状態の超高速変化を直接観測
—次世代光デバイス制御に新たな自由度— 鈴木 剛、小森 文夫、松田 巌

6 有機分子へのスピントランスファー効果
蒲生 寛武、下瀬 弘輝、榎 涼斗、南谷 英美、塩足 亮隼、小谷 佳範、豊木 研太郎、中村 哲也、杉本 宜昭、好田 誠、新田 淳作、三輪 真嗣

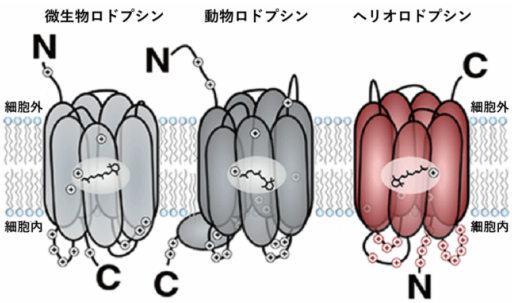
9 第 14 回凝縮系科学賞を受賞して 橘高 俊一郎

11 強磁場研究会優秀口頭発表賞を受賞して 栗原 綾佑

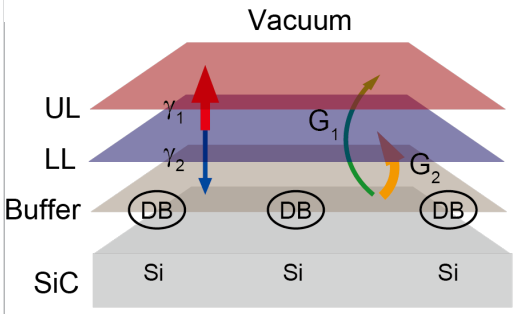
13 Advances in Engineering 社の Key Scientific Article に選出されて 玉谷 知裕

14 物性研で定年退職して 嶽山 正二郎

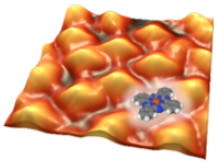
1

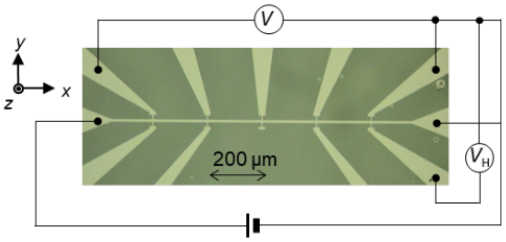


4



6





【理論滞在型国際ワークショップ】
19 ○Computational Approaches to Quantum Many-Body Problems (CAQMP2019)
【物性研究所短期研究会】
26 ○「強磁場コラボラトリーによる強磁場科学の新展開
—光科学との融合も視野に入れて—」
【ISSP ワークショップ】
30 ○レチナールタンパク質の光機能発現の物理と化学
33 ○ヘリウム危機の現状と今後の課題
35 【物性研究所セミナー】
【物性研ニュース】
41 ○人事異動
42 ○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

新型の光応答性タンパク質であるヘリオロドプシンの構造を解明

機能物性研究グループ　　井上 圭一

ロドプシン(注１）はヒトの目の中で視覚を担う膜タンパク質の１つで、光を認識し、視神経へ信号を伝えるための初期反応を担う。タンパク質内部に結合したビタミンＡの誘導体色素であるレチナール(注２)が光によって異性化しタンパク質の構造を動かすことで、情報伝達分子である三量体 G タンパク質(注３)を活性化する。細菌などの微生物にもロドプシンは存在し、その多くは光によってイオンを細胞内外に輸送する。そうした微生物ロドプシンを動物の脳神経細胞に発現させ、神経興奮や抑制を光で制御することによって動物の行動を操作するオプトジェネティクス(光遺伝学、注４)技術が近年新たに開発され、ロドプシンファミリーは基礎・応用両面から注目されている。

2018 年に、今までのロドプシンとはアミノ酸配列が大きく異なるヘリオロドプシンが発見された(図 1)。ヘリオロドプシンは古細菌や真正細菌のほか、藻類などの真核生物や巨大ウイルスから 500 種類以上発見されており、第 3 のロドプシンというべき存在である。ヘリオロドプシンは代表的な微生物ロドプシンであるバクテリオロドプシン(注５)と同様にレチナール色素を持つが、微生物由来のロドプシンに特徴的なイオンを輸送する性質はない。さらに光反応サイクルが遅いことから、ヘリオロドプシンは未知の情報変換分子を介した光情報伝達に関わるものと推測されている。

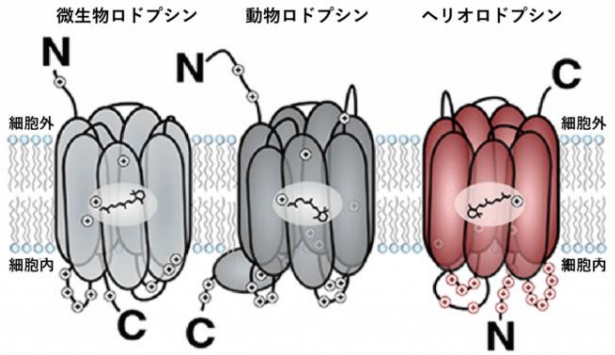


図 1　微生物ロドプシン(左)、動物ロドプシン(中)とヘリオロドプシン(右)

ヘリオロドプシンは動物や微生物由来のロドプシンと同様に 7 回膜貫通構造を持つと考えられ、そして微生物ロドプシン、動物ロドプシンが N 末端側を細胞外側に向けているのに対して、ヘリオロドプシンは N 末端側を細胞内に向けていると予測されている。しかし本当にそのような構造を持っているのか、明らかとはなっていなかった。さらにヘリオロドプシンを持つ生物種の多くはレチナール生合成系をもっておらず、環境中に存在するレチナールを取り込んで機能すると推測されていたが、その機構は不明であった。

そこで今回東京大学・濡木理教授、志甫谷渉日本学術振興会特別研究員および名古屋工業大学・神取秀樹教授らのグループと共にヘリオロドプシンの構造解析に取り組んだ結果、古細菌由来のヘリオロドプシンのＸ線結晶構造解析に成功した。さらに生物物理学的解析を専門とする分子科学研究所(現・名古屋工業大学)・古谷祐詞准教授や名古屋大学・内橋貴之教授、金沢大学・柴田幹大准教授と共同研究を行い、ヘリオロドプシンの構造と機能の相関について詳細に解明した。

ヘリオロドプシンの膜貫通領域の構造はバクテリオロドプシンと類似し、低い配列相同性にも関わらず両者が共通した構造を持つことが明らかとなった(図 2)。

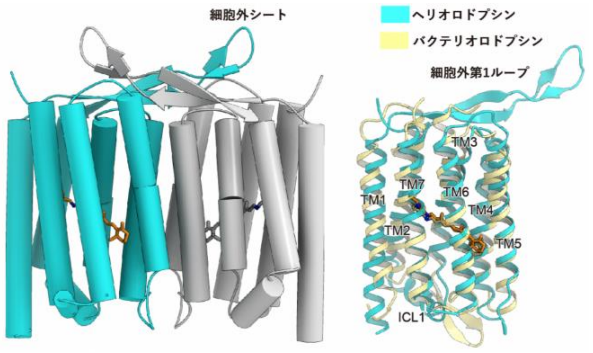


図 2　ヘリオロドプシンの全体構造。左は結晶中での二量体構造。右図はバクテリオロドプシンの構造との重ね合わせ。

さらに、バクテリオロドプシンとよく似た形でレチナールがリジンに共有結合していたことが分かった。一方、細胞外ループは伸びたシート構造をとっており、結晶構造中では隣の分子の上を覆うことで密な二量体を結晶構造中で形成していた。高速原子間力顕微鏡(AFM)観察(注６)に

よって、この二量体が脂質二重膜中の生理的な条件でも保たれていることを確認し、ヘリオロドプシンは基本的に二量体として機能することを明らかにした(図 3)。

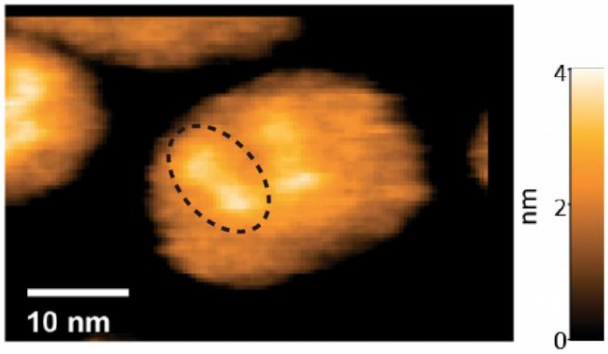


図3　高速AFMを用いた脂質膜内でのヘリオロドプシンの観察。結晶構造と同様な二量体が観察できる。

さらに細胞に発現させたヘリオロドプシンのN末端、C末端に異なる蛍光タグをつけることで、1 細胞イメージングを行い、確かにヘリオロドプシンは他のロドプシンと逆の膜トポロジーを持つことを明らかにした(図 1)。

ヘリオロドプシンの細胞外側は疎水的なアミノ酸残基で塞がっており、イオンや基質が通る隙間は存在しなかった(図 4)。こうしたアミノ酸残基はヘリオロドプシンの間で保存性が高く、全てのヘリオロドプシンは微生物ロドプシンのような輸送体としては機能できないと推測された。一方、細胞内側はレチナールから細胞内ループにわたって、水分子を介した広範な親水性相互作用が存在しており、光受容に伴うヘリオロドプシンの構造変化に重要であると考えられた。また時間分解赤外分光解析により、長寿命のO中間体における特徴的な構造変化が1秒間以上、持続することも明らかにされた。

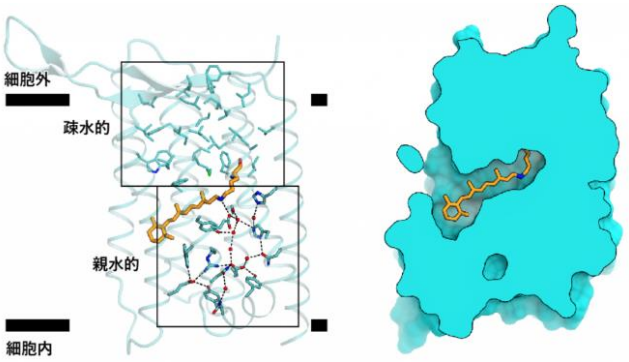


図 4　ヘリオロドプシンの分子内相互作用。左図は分子の内側を向いているアミノ酸を一覧で示している。右図は空間充填モデルの切断面であり、細胞内外に閉じていることがわかる。

ヘリオロドプシンの構造では、レチナールの上に今までのロドプシンにはみられない、大きな横穴が存在していた(図 5)。この穴を塞ぐようにヘリオロドプシンのアミノ酸を変異させると、レチナールの再構成効率が大きく低下した。したがって、この横穴はヘリオロドプシンが環境中からレチナールを効率的に取り込むために重要だと考えられる。

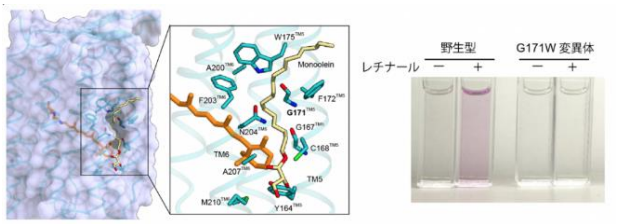


図 5　予想外に発見されたヘリオロドプシンの横穴。レチナールのイオノン環の上部に、大きな穴があいている。これは、直上にあるアミノ酸残基が側鎖のないグリシンになっているためである。精製したヘリオロドプシンのレチナールをヒドロキシルアミンを用いて解離させ、その後レチナールを再構成する実験を試みた結果、横穴を塞ぐ変異体 G171W ではレチナールは全く再構成されなかった。

本研究では、ヘリオロドプシンの立体構造が初めて決定されたが、ヘリオロドプシンはバクテリオロドプシンとはアミノ酸配列が大きく異なり、さらに膜に対する向きが反転しているにもかかわらず、 構造やレチナールの結合様式に多くの類似性がみられた。しかし、イオン輸送能がないことから、ヘリオロドプシンが関与する新規の光シグナル伝達システムが存在する可能性が高く、その解明に向けた今後のさらなる研究が期待される。また、こうした類似性は、「ロドプシン」というものが配列の縛りに囚われずに環境中にたくさん存在する可能性を示唆している。今後本構造情報を活用した配列解析によって、さらなる新型ロドプシンの発見が期待される。

謝辞：本研究は東京大学大学院理学系研究科の濡木理教授、志甫谷渉日本学術振興会特別研究員、および名古屋工業大学生命大学院工学研究科・神取秀樹教授、名古屋大学大学院理学研究科・内橋貴之教授、金沢大学新学術創成研究機構ナノ生命科学研究所・柴田幹大准教授、分子科学研究所(現・名古屋工業大学)・古谷祐詞准教授らの研究グループとの共同研究によって行われた。

また本研究は、科学技術振興機構(JST)戦略的創造研究推進事業(CREST)研究領域「光の特性を活用した生命機能の時空間制御技術の開発と応用」(研究総括：影山龍一

郎）研究課題「細胞内二次メッセンジャーの光操作開発と応用」（研究代表者：神取秀樹）の一環として行われた。

掲載論文：Shihoya, W., Inoue, K., Singh, M., Konno, M., Hososhima, S., Yamashita, K., Ikeda, K., Higuchi, A., Izume, T., Okazaki, S., Hashimoto, M., Mizutori, R., Tomida, S., Yamauchi, Y., Abe-Yoshizumi, R., Katayama, K., Tsunoda, S. P., Shibata, M., Furutani, Y., Pushkarev, A., Béjà, O., Uchihashi, T., Kandori, H., Nureki, O. "Crystal structure of heliorhodopsin." *Nature* (2019) **574**, 132-136.

（注１）ロドプシン：補因子としてレチナールを結合した 7 回膜貫通タンパク質。一次構造の違いにより微生物ロドプシン、動物ロドプシンに分類される。微生物ロドプシンは真核生物、真正細菌、古細菌より発見されており、光に応じてイオンを運ぶものやシグナルを細胞内に伝えるなど、さまざまな機能を持つロドプシンが存在する。

（注２）レチナール：光を吸収することで、物質に色を付けられる官能基のことを発色団と呼ぶ。ロドプシンでは、レチナールと呼ばれるビタミンＡの誘導体が発色団として働いている。多くの場合、この発色団であるレチナールはロドプシンのリジン残基と結合して存在している。光を吸収すると構造を変化させることによって、視覚を始めさまざまな現象に関与する。

（注３）三量体 G タンパク質：細胞内情報伝達に関わる GTP 結合タンパク質であり、ロドプシンのような 7 回膜貫通ヘリックス構造を持つ受容体タンパク質により活性化される。G タンパク質共役型受容体（GPCR）として総称される受容体は視覚などの感覚だけでなく、神経伝達物質やホルモンなどの情報伝達に関わり、創薬の重要なターゲットとなっている。

（注４）オプトジェネティクス（光遺伝学）：光学（optics）と遺伝学（genentics）を合わせた造語であり、創始者の Deisseroth 博士により名付けられた。2005 年に行われた最初の実験では、微生物由来のチャネルロドプシンを神経細胞に発現させ、光で神経を興奮させることにより神経の発火活動を制御に成功し、脳機能解明のための新手法として期待されている。オプトジェネティクスの語は現在では光で生物の活動を制御・操作する手法に対して広く使われる。

（注５）バクテリオロドプシン：代表的な微生物ロドプシン。高度好塩菌の細胞膜に存在する膜タンパク質で、発色団レチナールをもつため紫色をしている。光駆動プロトンポンプとしてエネルギー変換機能を担う。初めて立体構造が解明された膜タンパク質の１つ。

（注６）高速原子間力顕微鏡（AFM）：柔らかい板バネの先に付いた針の先端で試料に触れ、試料の表面形状を可視化する顕微鏡。針と試料の水平方向の相対位置を変えながら試料表面の高さを計測することにより、試料の表面形状を可視化する。試料の表面を高速（最速 16 フレーム/秒）にスキャンすることにより試料の動きを可視化することができる。

日韓共同研究でグラフェン準結晶状態の超高速変化を直接観測

―次世代光デバイス制御に新たな自由度―

附属極限コヒーレント光科学センター　　鈴木 剛、小森 文夫、松田 巌

1．はじめに

炭素原子一層のシートからなるグラフェンは、その優れた強度・伝導性・伝熱性から、次世代のデバイス素子を担う SUPER MATERIAL として注目されている。そして、層数を増やすことにより、バンド分散を線形(ディラックバンド)から質量とギャップを持つ形状にできることが示され、金属のみならず半導体としての利用も可能になってきた。さらにごく最近、二層グラフェンの「ねじれ角」が新たな自由度としてみいだされ、約 1.1° のねじれ角にすることで、モット絶縁体や超伝導など新奇な物性が現れることから大きな注目を集めている[1][2]。他方、ねじれ角を 30° にすることで、並進対称性を伴わない準結晶構造が生まれることが発見され、準結晶としての特異な物性を調べる舞台としても注目されている[3][4]。

準結晶状態ねじれ二層グラフェンの特徴として、上層と下層の元々のディラックバンドに加えて、上層と下層の層間相互作用を介して、ウムクラップ散乱の条件を満たすように、レプリカディラックバンドが現れることが報告されている[3][4]。図 1 に通常の二層グラフェン(a,c)と準結晶ねじれ二層グラフェン(b,d)の結晶構造とバンド構造の模式図を示す。

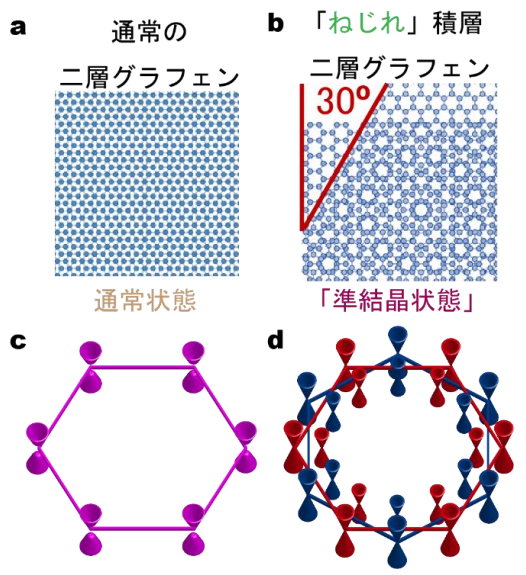


図 1　通常の二層グラフェンと準結晶 30° ねじれ二層グラフェンの結晶構造(**a,b**)とバンド構造(**c,d**)。d. 内側の小さいディラックバンドがレプリカディラックバンドに相当する。

2．実験結果と議論

このような背景の中、我々は、準結晶ねじれ二層グラフェン結晶における光励起後の過渡的な電子状態変化を直接調べるために、高次高調波レーザーを用いて時間分解光電子分光測定を行った[5]。図 2a,b に上層、下層ディラックバンドの平衡状態における角度分解光電子スペクトルを示し、図 2c,d にそれらの時間変化を示す。光励起直後に、電子が高いエネルギーまで励起され、その後、元の状態に素早く緩和していく様子が見て取れる。これをより詳しくみるために、角度方向に積分した光電子密度分布をフェルミディラック分布関数でフィッティングすることにより、過渡的な電子温度と化学ポテンシャルを求めた(図 2e,f)。参照として、通常のねじれていない二層グラフェンの結果も示す。温度に注目すると、上層と下層でほとんど変わらない振る舞いが現れ、これは、励起後の緩和ダイナミクスに共通の熱浴(フォノン散乱)が寄与していることを示唆している。次に、化学ポテンシャルに注目すると、通常の二層グラフェンではほとんど変化しないのに対し、準結晶ねじれ二層グラフェンでは、上層と下層で対照的な振る舞いが現れた。つまり、上層では化学ポテンシャルが減少するが、下層では増加する。このことは、1 ps 以下の超高速な時間領域では、電子分布が上層と下層で不均衡となることを意味している。

この観測された上層と下層における電子分布の不均衡を説明するために、それぞれの電子数の時間変化をレート方程式により表し、実験結果を再現するパラメータを求めた。図 3a に上層(UL)・下層(LL)・バッファー層(Buffer)の模式図と、電子が流出入する様子を表した。上層と下層間、下層とバッファー層間の流出入項をパラメータγ_1, γ_2 で示し、光励起に伴うバッファー層から上層と下層への流入項をパラメータ G_1, G_2 で示した。図 3b に、実験的に求めた電子数密度の時間変化をマーカーで示し、レート方程式の計算結果を実線で示す。再現されたパラメータは、$\gamma_1 = 1.5\ \mathrm{ps}^{-1}$, $\gamma_2 = 0.5\ \mathrm{ps}^{-1}$, $G_1 = 5 \times 10^{13}\ \mathrm{cm}^{-2}\ \mathrm{ps}^{-1}$, $G_2 = 8 \times 10^{13}\ \mathrm{cm}^{-2}\ \mathrm{ps}^{-1}$ であり、その大きさを図 3a に矢印の太さ

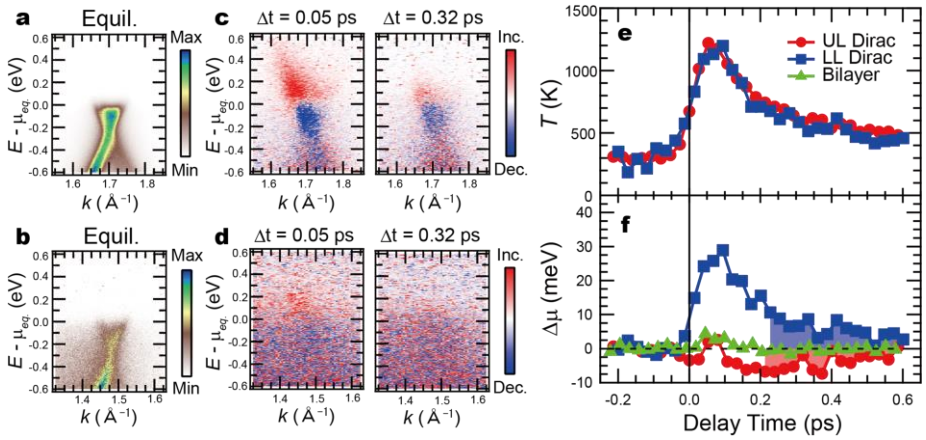


図 2 **a-d.** 上層と下層ディラックバンドの平衡状態における角度分解光電子スペクトル(**a,b**)と時間変化(**c,d**)。**e,f.** 上層(UL Dirac)と下層ディラックバンド(LL Dirac)の温度と化学ポテンシャルの時間変化。参照として通常の二層グラフェン(Bilayer)の結果も示す。

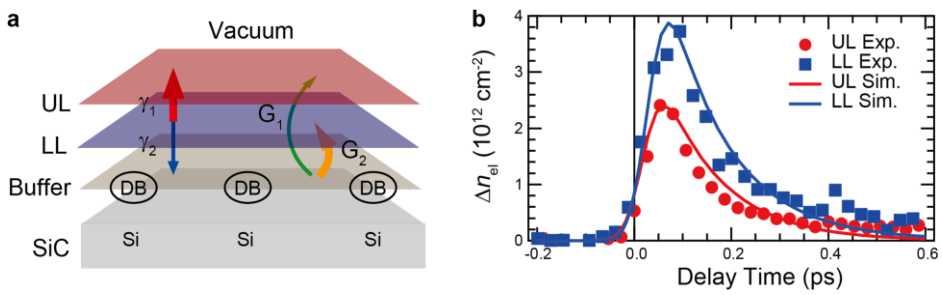


図 3 **a.** 上層・下層・バッファー層の模式図と電子の流出入する様子。**b.** 上層と下層ディラックバンドにおける電子数の時間変化(マーカー)と計算結果(実線)。

として表した。得られた結果から、励起に伴うバッファー層からの電子数流入の際に、上層と下層で顕著な違い($G_2 > G_1$)があることから、電子分布の不均衡が過渡的に生じることが明らかになった。

3．まとめと将来展望

本研究により、準結晶ねじれ二層グラフェン結晶において、1 ps 以下の超高速な時間領域で上層と下層で電子数が不均衡になることが明らかになった。光デバイスの観点から着目すると、わずか 3.4 Å の層間に 30 mV の電圧がかかっていることに相当し、これは過渡的ながら巨大な電場印加に相当する。今後、本研究によりもたらされた知見をもとに、次世代の光デバイスへの利用や新たな原子シートの探索につながることが期待される。

謝辞

本研究は、東京大学物性研究所(趙宇豪、渡邉真莉、徐佳笛、藤澤正美、金井輝人、石井順久、板谷治郎、岡﨑浩三、辛埴　各氏)、東北大学(諏訪健斗、吹留博一　各氏)、九州大学(田中悟氏)、及びシュンキュンカン大学(Sung Joon Ahn, Joung Real Ahn 各氏)の共同研究により行われた。また、文部科学省科学研究費補助金　新学術領域(研究領域提案型)「量子液晶の物性科学」(JP19H05826)、JSPS 科研費(16H06361, 18H03874, 18K19011, 18K13498, 18H01146, 19H00659, 19H01818, 19H00651)、文部科学省「光・量子飛躍フラッグシッププログラム(Q-LEAP)」(JPMXS0118068681)の助成のもとに行われました。ここに感謝申し上げます。

参考文献

[1] Y. Cao, *et al.*, Nature **556**, 43 (2018).
[2] Y. Cao, *et al.*, Nature **556**, 80 (2018).
[3] S. J. Ahn, *et al.*, Science **361**, 782 (2018).
[4] W. Yao, *et al.*, Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A. **115**, 6928 (2018).
[5] T. Suzuki, *et al.*, ACS Nano **13**, 11981-11987 (2019).

有機分子へのスピントランスファー効果

[1] 東北大学大学院工学研究科、[2] 大阪大学大学院基礎工学研究科、[3] 分子科学研究所、[4] 東京大学大学院新領域創成科学研究科、[5] 高輝度光科学研究センター、[6] 東京大学物性研究所量子物質研究グループ
蒲生寛武 [1]、下瀬弘輝 [2]、榎涼斗 [1]、南谷英美 [3]、塩足亮隼 [4]、小谷佳範 [5]、豊木研太郎 [5]、中村哲也 [5]、杉本宜昭 [4]、好田誠 [1]、新田淳作 [1]、三輪真嗣 [6, 2]

はじめに

分子磁性はスピントロニクスや量子情報分野において非常に注目を集めている[1]。理由のひとつとして、金属フタロシアニン等の錯体における電子スピンがコヒーレンスを保つ緩和時間が長いことが挙げられる[2]。これまでに錯体分子の電子状態を制御する方法として、金属界面を用いた研究が報告されてきた。例えば強磁性金属を用いると分子内にスピン偏極が生じたり[3]、スピン偏極率が 100%になるハーフメタリック特性[4]が現れることが知られている。他には有機半導体分子中でスピン流が観測されたり[5]、非磁性金属上で磁性分子の磁気異方性が非磁性金属との混成により変化した例もある[6]。このように金属/分子界面は分子におけるスピン物性研究において非常に魅力的な舞台である。この分子の機能性をスピントロニクスに利用するためには、分子における電子スピンの状態を制御し、読み出す必要がある。将来的に集積回路の実現を念頭に置くのであれば、制御や読み出しは光や磁場でなく電気的に行われる必要がある。しかし、これまでに分子における核スピンの電気的制御及び検出が極低温で行われているものの[7]、電子スピンの例はない。従って強磁性体の磁化に対して、スピン偏極電流との角運動量保存で磁化を動かすスピントルク[8]のように、分子スピンに対するスピントルクの確立が望まれている。

本研究では金属白金(Pt)と鉄フタロシアニン(FePc)分子から構成される系の磁気抵抗効果を精査した。この FePc 分子は Fe^{2+}イオンを有する磁性分子である。まず膜面に対して垂直磁場下の磁気抵抗効果に対して Hikami-Larkin-Nagaoka の式として知られる量子干渉効果（弱反局在）の解析[9]を行うことにより、FePc 分子の磁気モーメントが Pt の伝導電子に対して磁性不純物として作用することがわかった。さらに膜面に対して面内磁場下の磁気抵抗効果から、系がスピンホール磁気抵抗効果[10]を示すことを見出した。本結果は金属の Pt から磁性分子の FePc へとスピン角運動量が移行したことを示す結果であり、スピントランスファー効果によるスピントルクが分子に対してはたらくことを意味する。

実験結果

本研究実験では FePc 及び金属原子を含まないフタロシアニン(H_2Pc)の 2 種類の分子を用いた。分子構造及び積層構造は図 1(a)及び(b)の通りであり、厚さ 6 nm の Pt の上にフタロシアニン 1 分子層相当分(0.32 nm)を超高真空中下

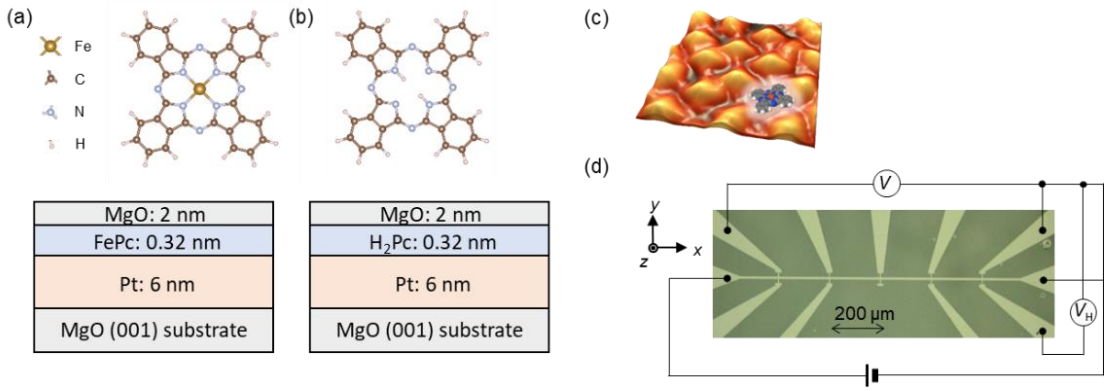


図 1 (a) 鉄フタロシアニン分子(FePc)デバイスの構造、(b)フタロシアニン(H_2Pc)デバイスの構造、(c) デバイスの走査プローブ顕微鏡像、(d)光学顕微鏡像

の蒸着法にて成膜した。同等の条件を用いて行ったプローブ顕微鏡を使った参照実験からは、図 1(c)に示すようにFePc 分子が Pt 表面上に平らに敷き詰められるように存在することがわかっている。図 1(a)及び(b)に示した多層膜をフォトリソグラフィー及び Ar イオンミリング法を用いてホール効果測定用デバイスに加工した。デバイスの光学顕微鏡写真が Fig. 1(d)である。ホール効果測定部分の幅は 10 μm、長さは 800 μm に設計した。この Pt 表面に吸着された FePc 分子が S = 1 に近いスピン状態を有することは大型放射光施設 SPring-8 でのX線吸収分光実験及び第一原理計算により確認している。

図 2(a)及び(b)は膜面垂直磁場下での磁気抵抗効果の測定結果である。Pt/H_2Pc デバイスにおいて、縦軸に示す規格化コンダクタンスの外部磁場による変化(Δδ)は測定温度を下げるほど大きくなっている。一方で Pt/FePc デバイスではほぼ変化がない。これは FePc 分子の吸着が Pt における弱反局在を壊すのに対し、H_2Pc 分子の吸着は Pt の伝導電子に対してほとんど影響を及ぼさないことを示している。実際に Hikami-Larkin-Nagaoka の式[9]から Pt/H_2Pc デバイスの位相コヒーレンス長及びスピン軌道長を求めると、それらは Pt 単層のものと同程度であった。このように磁性を持つ FePc を吸着させた時のみ、Pc 分子は Pt の伝導電子に対して磁性不純物としてはたらくことがわかった。吸着分子を変えても電気抵抗はほぼ変化しないため、FePc 単分子層は Pt の弱反局在を壊すのに十分であるにも関わらず Pt 中の散乱現象には影響を与えないことがわかる。

図 2(c)と(d)は膜面に対して面内方向に磁場を印加した時の磁気抵抗効果である。まず放物線状の正の磁気抵抗効果は外部磁場の二乗に比例する通常磁気抵抗効果、そして薄膜端部のスピン蓄積に起因する Hanle 磁気抵抗効果[11]等と考えられる。しかし、図 2(d)の Pt/FePc デバイスにおける磁気抵抗効果を注視すると、これらの正の磁気抵抗効果に重畳して負の磁気抵抗効果が生じていることがわかる。

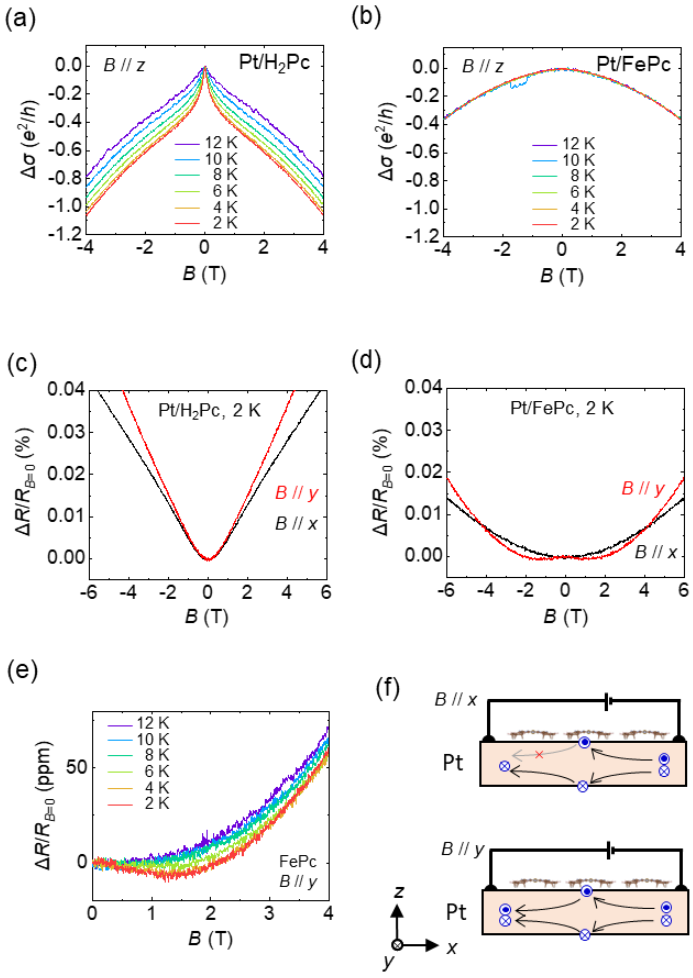


図 2 (a), (b) 膜面垂直磁場下での磁気抵抗効果。(c), (d)膜面内磁場下での磁気抵抗効果、(e) Pt/FePc で観測された負の磁気抵抗効果の温度依存特性、(f)スピンホール磁気抵抗効果の原理。

Pt/FePc デバイスにおける負の磁気抵抗効果は図 2(e)に示すように測定温度が上昇すると小さくなった。FePc 分子の強磁性転移温度は 4 K 付近であるため[12]、温度依存する負の磁気抵抗効果は FePc のスピン配列と密接な関係があり、スピンホール磁気抵抗効果[10]によるものと考えられる。

Pt に電流を流すとスピンホール効果[13]により Pt と FePc の界面にスピンが蓄積する。ここで蓄積スピンの FePc への吸収量、つまり Pt から FePc へのスピン角運動量移行量は FePc の面内スピン方向に依存して変化することが予想される。このスピン移行量の面内異方性は Pt と FePc の界面におけるスピン流反射量の異方性を生む。スピン流反射量は逆スピンホール効果に起因する負の縦抵抗成分と対応し、磁気抵抗効果が生じる。これが図 2(f)に示すスピンホール磁気抵抗効果の原理である。本研究では Pt/FePc 膜においてスピンホール磁気抵抗効果が観測されたことから、Pt から FePc 分子へのスピントランスファー(移行)を実証したといえる。

今後の展開

本研究では Pt のスピンホール効果を利用し、磁性分子へのスピントランスファー効果を初めて示した。これは磁性分子にスピントランスファートルクを与えられることを示しており、分子スピンの新たな制御手法として使える可能性がある。具体的には分子を用いた量子演算においてビットの初期化技術として使える可能性がある。本稿では紙面の都合上、詳細な説明を割愛した。本研究の詳細は文献[14]に記されている。

謝辞

本研究の一部は科学研究費助成事業(JSPS-KAKENHI (Nos.15H05699, 15H02099, 15H05854, 25220604 and 18H03880)により行われた。

引用文献

1. M. Cinchetti *et al.*, *Nat. Mater.* **2017**, *16*, 507-515.
2. M. Warner *et al.*, *Nature* **2013**, *503*, 504-508.
3. H. Wende *et al.*, *Nat. Mater.* **2007**, *6*, 516-520.
4. S. Sanvito, *Nat. Phys.* **2010**, *6*, 562-564.
5. M. Cinchetti *et al.*, *Nat. Mater.* **2009**, *8*, 115-119.
6. N. Tsukahara *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **2009**, *102*, 167203.
7. S. Thiele *et al.*, *Science* **2014**, *344*, 1135.
8. J. A. Katine *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **2000**, *84*, 3149.
9. S. Hikami *et al.*, *Prog. Theor. Phys.* **1980**, *63*, 707.
10. H. Nakayama *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **2013**, *110*, 206601.
11. M. I. Dyakonov, *Phys. Rev. Lett.* **2017**, *99*, 126601.
12. T. Gredig *et al.*, *Phys. Rev. B* **2012**, *86*, 014409.
13. Hirsch, J. E. Spin Hall effect. *Phys. Rev. Lett.* **1999**, *83*, 1834.
14. H. Gamou *et al.*, *Nano Lett.* **2020**, *20*, 75-80.

第 14 回凝縮系科学賞を受賞して

凝縮系物性研究部門　　橘高　俊一郎

この度、第 14 回凝縮系科学賞を受賞する栄誉に恵まれました。本賞は凝縮系科学に従事する優れた若手研究者を奨励することを願い、青山学院大学(現 岡山大学特任教授)の秋光純教授と東京理科大学の福山秀敏教授が私費を投じて 2006 年に創設された賞です。受賞対象者は、「物理・化学・材料科学にわたる、広い意味での凝縮系科学の研究に従事する若い研究者(博士学位取得後 10 年以内の者)」で、毎年、実験系・理論系各 1 名が選出されます(該当者無しの場合も有)。物性研からは第 1 回に中辻知氏、第 6 回に北川健太郎氏が受賞されています。今回、受賞の対象となった研究課題は「極低温精密比熱測定による超伝導ギャップ構造の決定」です。0.06 K 以下の極低温まで比熱の磁場角度依存性を高精度に測定できる世界最高水準の装置を完成させ、それを用いて様々な非従来型超伝導体のギャップ構造を解明したことが主な受賞理由です。中でも $CeCu_2Si_2$(T_c = 0.6 K)と Sr_2RuO_4(T_c = 1.5 K)の超伝導対称性について、従来の見方に再考を迫る実験事実を明らかにした点が高く評価されました。$CeCu_2Si_2$ に関する研究成果は物性研だより第 57 巻第 2 号(2017)の「第 11 回日本物理学会若手奨励賞を受賞して」で紹介しましたので、本稿では Sr_2RuO_4 の研究成果についてご紹介したいと思います。

Sr_2RuO_4 は、銅酸化物高温超伝導体と同じ層状ペロブスカイト構造を持つルテニウム酸化物超伝導体として 1994 年に報告されました。その発見からまもなく、NMR ナイトシフトやスピン偏極中性子散乱の実験から超伝導状態でスピン磁化率が変化していない可能性が指摘され、大変珍しいスピン三重項超伝導体の有力候補として大きな注目を集めるようになりました。その超伝導状態では時間反転対称性も破れていることが様々な実験から示唆され、クーパー対の軌道部分が k_x+ik_y のカイラル p 波超伝導が実現していると長年期待されてきました。Sr_2RuO_4 は 3 つの円筒状のフェルミ面を持ち、低温物性もフェルミ液体的と比較的シンプルな系であることから、理論研究も活発に行われ、本物質を舞台に「スピン三重項超伝導の物理」が大きく発展してきました。

一方で、スピン三重項超伝導の枠組みでは理解できない現象もいくつか報告されていました。その一つが ab 面に正確に磁場をかけた際に上部臨界磁場が低温で強く制限され、超伝導一次相転移が生じる現象です。パウリ常磁性効果と良く似ていますが、スピンが磁場方向に偏極できるスピン三重項超伝導状態ではそのような対破壊現象は期待できません。二つ目の問題は、超伝導ギャップ構造です。単純にはカイラル p 波は円筒状フェルミ面にノードを持たないはずですが、ラインノードの存在を示唆する実験結果が複数報告されていました。こうした問題に対して、我々のグループでは 2014 年に極低温磁化測定から一次相転移において明確な磁化の飛びが伴うことを突き止めました。通常の軌道効果だけでは、このように大きな磁化の飛びは期待できないため、パウリ常磁性効果でスピン磁化が変化したと解釈する方が自然です。さらに、2018 年には低磁場領域において極低温比熱が磁場の 1/2 乗に比例して上昇すること(ラインノードの存在を強く支持)、面内回転磁場中で観測される 4 回対称の比熱振動が $0.04T_c$(60 mK)の極低温まで低磁場では符号を変えずに観測されることを明らかにしました。本結果は、異方的なフェルミ速度を持つフェルミ面に水平ラインノードが備わっていれば自然に説明することができます。その超伝導ギャップ構造はカイラル p 波超伝導とは相容れないため、従来の有力説に強い疑問を呈する内容で論文にまとめました［受賞対象論文 3］。水平ラインノードはスピン三重項超伝導と相性が悪く、パウリ常磁性効果に酷似した現象も考慮すればスピン一重項超伝導であることが有力です。実際に、その翌年の 2019 年、米国の研究グループにより Sr_2RuO_4 の超伝導状態で NMR ナイトシフトが実は減少することが実験から明らかにされ、現在ではスピン一重項超伝導の可能性が活発に議論されるようになっています。こうした研究発展へのユニークな貢献が評価されて、今回の受賞に至りました。

振り返れば、私と Sr_2RuO_4 の付き合いも早 15 年になりました。出会いは 2004 年で、発見者である前野悦輝教授の研究室に 4 回生として加わり、Sr_2RuO_4 の一軸性圧力効果を卒業研究テーマに選んだことがきっかけです。このときの卒業研究を皮切りに、異方的圧力下の Sr_2RuO_4 では T_c が 3 K にまで倍増した超伝導状態が安定化することを実証し、数年後に論文にまとめて発表しました。実は、

Sr_2RuO_4 における NMR ナイトシフトの減少は T_c が上昇した一軸性圧力下で最初に報告されています。上昇した T_c と比べて低い温度で NMR ナイトシフトが減少したことから測定中の発熱が疑われ、低パルス出力での実験が追究されて常圧での観測に至ったそうです。私に研究への扉を開いてくれた一軸性圧力が昨年の重大発見の鍵を握っていたことには不思議な縁を感じました。今回の受賞を励みにして、今後も凝縮系科学の発展に役立てるように精進していきたいと思います。最後になりましたが、こうした研究成果はお世話になった多くの方々のサポートなしには得られませんでした。この場をお借りして深くお礼申し上げます。また、物性研究所という最高の環境で研究に没頭できたからこそ、今回の受賞に至ったものと深く感謝しております。これからも、多くの若手研究者が最高の環境で自由に研究に没頭できる物性研究所であることを心から願っております。今後ともどうぞよろしくお願い致します。

受賞対象論文

[1] "Multiband superconductivity with unexpected deficiency of nodal quasiparticles in $CeCu_2Si_2$"
S. Kittaka, Y. Aoki, Y. Shimura, T. Sakakibara, S. Seiro, C. Geibel, F. Steglich, H. Ikeda, and K. Machida
Phys. Rev. Lett. **112**, 067002 (2014).

[2] "Evidence for chiral *d*-wave superconductivity in URu_2Si_2 from the field-angle variation of its specific heat"
S. Kittaka, Y. Shimizu, T. Sakakibara, Y. Haga, E. Yamamoto, Y. Onuki, Y. Tsutsumi, T. Nomoto, H. Ikeda, and K. Machida
J. Phys. Soc. Jpn. **85**, 033704 (2016).

[3] "Searching for gap zeros in Sr_2RuO_4 via field-angle-dependent specific-heat measurement"
S. Kittaka, S. Nakamura, T. Sakakibara, N. Kikugawa, T. Terashima, S. Uji, D. A. Sokolov, A. P. Mackenzie, K. Irie, Y. Tsutsumi, K. Suzuki, and K. Machida
J. Phys. Soc. Jpn. **87**, 093703 (2018).

強磁場研究会優秀口頭発表賞を受賞して

国際超強磁場科学研究施設　徳永研究室　特任研究員　　栗原 綾佑

この度、2019 年 12 月に大阪大学で開催された強磁場科学研究会究会において、「$CeRhIn_5$ の磁場誘起電子ネマティック相と四極子効果」という発表を行い、若手向けの優秀口頭発表賞を受賞いたしました．この研究会では、強磁場に関連した研究を遂行する研究者を中心とし、26 件の口頭発表と 57 件のポスター発表によって最新の物性研究が報告・議論されました。以下に私の発表内容をご紹介いたします。

今回の研究対象物質である $CeRhIn_5$ は、重い電子系の物理の舞台として注目を集めてきました。結晶構造は $HoCoGa_5$ 型の正方晶であり、空間群は D_{4h}^1 ($P4/mmm$)です[1]。局在した 4f 電子の結晶場基底状態と第一励起状態、および第二励起状態はそれぞれクラマース 2 重項であり[2]、T_N = 3.8 K で反強磁性秩序を示します[1]。これまでは、静水圧力の印加による反強磁性の抑制と遍歴化、重い電子状態の形成、超伝導の発現が議論されました[1, 3]。

他方最近になり、2.5 K 以下かつ B^* ~ 30 T 以上 (B//[001])の強磁場領域で、電子ネマティック相という電子状態があると提案されました。$CeRhIn_5$ は正方晶であり z 軸周りの 4 回回転対称操作 $C_4^{\pm}$があるため、通常は[100]方向と[010]方向の電気抵抗や、[110]方向と[1-10]方向の電気抵抗はそれぞれ等価です。しかし、強磁場領域ではそれぞれ非等価になり、あたかも電子系の対称性が正方晶から顕著に低対称化するようにみえることがわかりました[4, 5]。磁化は 50 T まで単調な変化を示すため[2]、B^*は非磁性自由度由来と考えられます。それゆえ B^*以上の磁場領域では、最近様々な物質で盛り上がりを見せるような、電子ネマティック相が議論されています。他方、その発現機構や相を特徴づける秩序変数は未解決です。

このような、$CeRhIn_5$ で議論されている電子ネマティック相の電子状態の解明や秩序変数の決定のためには、超音波測定が有効だと考えました。超音波は、速度 v で結晶中を伝搬するとき格子の歪みεを誘起します。この歪みに対する結晶の固さは弾性定数 $C = \rho v^2$ (ρは結晶密度)として理解でき、音波屋が扱う物理量です。超音波は、その伝搬方向をうまく選ぶことで群の既約表現Γに従う既約な歪みε_Γを誘起できます。また、ε_Γは電子-格子相互作用を介して同じ対称性に属する電子系自由度の電気多極子 O_Γと結合するため、多極子の応答が弾性定数 C_Γに現れます。それゆえ、正方晶 $CeRhIn_5$で測定可能な弾性定数 C_{11}, C_{33}, C_{44}, C_{66}, および$(C_{11}-C_{12})/2$ を網羅的に調べ B^*で異常が現れる弾性定数の既約表現が分かれば、電子系の低対称化を特徴づける秩序変数として多極子 O_Γが決定できます。

以下では、非破壊パルスマグネットを用いた $CeRhIn_5$ の強磁場超音波測定の重要な実験結果を述べます。図 1 は、$CeRhIn_5$ の横波弾性定数$(C_{11}-C_{12})/2$ とその超音波吸収係数α_Γの磁場依存性です。磁場は、[001]方向から xy 面内に 6 度程度傾けた方向に印加しています。また内挿図は、この超音波が誘起している結晶の歪み$\varepsilon_{x^2-y^2}$ であり、正方晶底面の正方形を長方形に変形するものです。測定の結果、2.1 K 以下の B^* ~ 30 T 付近で$(C_{11}-C_{12})/2$ に異常を観測しました。2.5 K 以上では、B^*での弾性異常は見られません。また、超音波吸収係数α_Γ にも B^*での異常を観測しました。20 T 付近の弾性異常はメタ磁性に対応します。$(C_{11}-C_{12})/2$ は D_{4h} 群の既約表現 B_{1g} に属します。それゆえ実験結果は、B^*での対称性の低下が B_{1g} で特徴づけられることを示唆します。一方で、C_{11}, C_{33}, C_{44}, C_{66} は B^*での異常を示しませんでした。

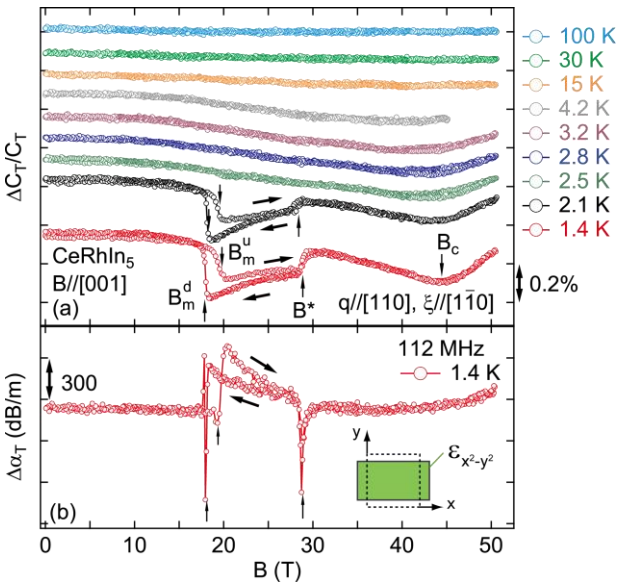


図 1　$CeRhIn_5$の(a) 弾性定数$(C_{11}-C_{12})/2$ と(b) 超音波吸収係数α_Γの磁場依存性。

以上の弾性定数測定から、B_{1g} 対称性が重要であることかわかりました。それゆえ対称性の観点から、電子ネマティック相の秩序変数が B_{1g} に属する電気四極子 $O_{x^2-y^2}$ ($\propto x^2-y^2$)として理解できると結論づけました。また、電気四極子 $O_{x^2-y^2}$ と結晶の歪み$\varepsilon_{x^2-y^2}$ との結合により、B^* では電子系のみならず結晶対称性も D_{4h}^1 のサブグループである D_{2h}^1 以下に低下すると予想されます。四極子秩序が実現するためには、系の量子状態が四極子自由度をもつ必要があります。詳細については述べませんが、Zeeman 相互作用による結晶場基底状態と第一励起状態の混成、および Ce-4f 電子と In-5p 電子の p-f 混成効果に由来する四極子自由度の獲得があるのではないかと考えています。

以上が今回の講演の概要になります。強磁場研究会は 3 日にわたって開催されましたが、受賞者の発表と授賞式は最終日に行われたようです。と言いますのも、家庭の都合で 2 日目に千葉へ戻ったため、残念ながら私は授賞式に参加できませんでした(授賞式の最中、同僚からは cool なコメントとともに、表彰状を代理で受け取る徳永先生の写真がきた)。

最後に、本講演を行うにあたりたくさんの方々にお世話になりました。特に、共著であり私が所属する研究室の徳永准教授と三宅助教、および純良単結晶試料提供をしていただいた新潟大学の摂待教授と広瀬助教にはこの場を借りて感謝申し上げます。余談ですが、私は新潟大学の後藤・根本研究室出身で、居室や実験室が隣接していたこともあり、摂待先生や広瀬さんには「色々なこと」で当時からお世話になっていました。また摂待先生は、後藤輝孝先生(退官して DIY を楽しんでいるらしい)を師とする私の兄弟子でもあるため、共同研究できたことはとてもうれしく思います。

[1] H. Hegger, *et al.*, Phys. Rev. Lett. **84**, 4986 (2000).
[2] T. Takeuchi, *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **70**, 877 (2001).
[3] H. Shishido, *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **74**, 1103 (2005).
[4] P. J. W. Moll, *et al.*, Nat. Commun.**6**, 6663 (2014).
[5] F. Ronning, *et al.*, Nature **548**, 313 (2017).

Advances in Engineering 社の Key Scientific Article に選出されて

東京大学物性研究所　加藤研究室　　玉谷 知裕

この度、出版された論文がカナダのリサーチ会社 Advances in Engineering 社(AIE)により key scientific article に選出されました。AIE 社は、主要な学術雑誌に掲載された工学系論文(化学工学、機械工学、材料工学、電気工学、生物工学、土木工学、ナノテクノロジー工学、一般工学など)の中から特に重要と認めた研究成果を選定し、自社の Web サイトで紹介しています。まず本研究を遂行するにあたり、共同研究者である加藤岳生氏、川畑史郎氏、小鍋悟氏、土川航太氏に深く感謝申し上げます。

今回選出していただいた論文は Journal of Physics: Condensed Matter 誌に掲載された "Surface plasmon polaritons in thin-film Weyl semimetals" でした。近年、グラフェンやトポロジカル絶縁体といった新奇な物質を用いたプラズモニクスが注目を集めています。その中でも特に注目を集めているのがワイル半金属を用いたプラズモニクスです。ワイル半金属における電磁応答は通常のマクスウェル電磁気学ではなくアクシオン電磁気学に従うことが知られており、この特異な性質を利用することで様々なデバイス応用の可能性が示唆されています。

このような状況下で我々は、実際の実験や応用を意識した 2 種類の絶縁体で挟まれた 3 層構造型のワイル半金属に注目し(図 1.)、その系における表面プラズモンポラリトンがどのような性質をもつかについて理論的に考察しました。特に薄膜ワイル半金属を用いた 3 層構造型における表面プラズモンポラリトンでは、2 つの境界面に局在した波動関数がお互いに干渉することによって新たな性質を示すことが期待されます。そしてその性質は、外側の絶縁体の種類やアクシオンベクトルの向き、さらにはワイル半金属の厚みによって制御することが可能だと推測されます。

このような考えに基いて、我々はワイル半金属における表面プラズモンポラリトンの理論を構築し、その分散関係が上記の条件に依存してどのように変化するかを考察しました。その結果、特にワイル半金属の持つアクシオンベクトルが表面プラズモンポラリトンの進行方向に対し平面内に垂直のときに、空間的に相反する分散関係が得られることを発見しました。更に、その相反性が外側の絶縁体の種類やワイル金属の厚みを微調整することで制御可能であることも示しました。このことはワイル半金属を用いることで光ビームをナノ空間に集束させるプラズモニック導波管の開発の可能性を示唆するものです。これらの応用への波及効果の高さから、今回同社に選出して頂きました。

最後に本研究を key scientific article に選出して頂いた AIE 社の方々にも心より感謝申し上げます。今後も面白く価値があると思っていただける研究を楽しんで遂行することを心がけたいと思っております。

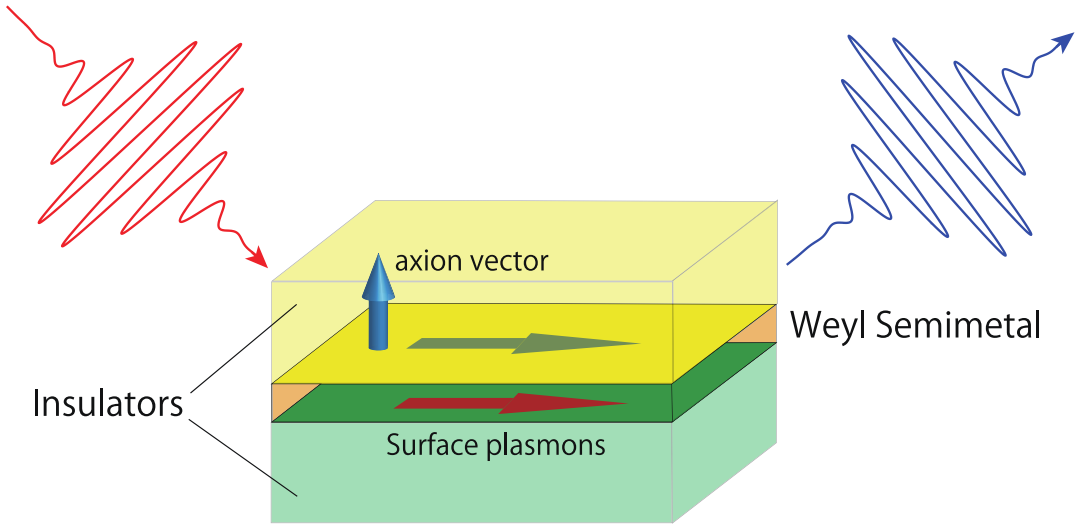


図 1. 3 層構造型の表面プラズモンポラリトンの模式図

物性研で定年退職して

嶽山 正二郎

表記のタイトルにちょっと違和感を覚える方が多いのではないでしょうか。「物性研を後にして」とか「物性研を離れて」などが定番でしょうか。敢えてこのタイトルにしました。これについては最後に述べることにします。今からおよそ 1/4 世紀前になりますが 1995 年 9 月刊行の「物性研だより」の中に、私が書いた「私の物性研」の記事を読むことができます。当時、物性研での助手を 7 年半勤めた後、新設された姫路工業大学理学部[1]に助教授として赴任して、4 年後になって執筆したものです。今読み返すと感慨深いのですが、この時、まさかに物性研で再び同様の執筆をすることになろうとは想像だにしておりませんでした。思えば私の人生で先々のことを考える余裕などなかったこともありますが、そもそも大学教員として定年退職を迎えることすら想定しておりませんでした。その後、千葉大理学部物理学科に教授として着任し、当時国内は大学改革の渦中で大変忙しい毎日でしたが、多くの経験と共に沢山の人達との出会いがあり、充実した日々でした。これも、たったの 4 年という短い期間でした。2003 年には、後ろ髪を引かれる思いで、学生たちと共に立派に創り上げた研究室と建物を後にして、柏の物性研に、しかも、助手時代に作り上げた実験装置や測定機器の匂いが残っている超強磁場研究室を引き継ぐことにあいなりました。

当時強磁場の世界は国内だけでなく海外でもほぼ同時期に大物リーダー達が挙って引退するなど、世代交代と共に新たな将来構想が議論され始めておりました。ヨーロッパ、中国では非破壊パルス 100 テスラ計画、一方、国内では、強磁場群雄割拠の時代から脱却して新しい世代による国内の主要施設の横の連結を強化しようとする「強磁場フォーラム」構想が議論されておりました。このような状況の中、あたかも多くの困難が待ち受けてそうな物性研強磁場への教授としての赴任は大変躊躇されましたが、千葉大の研究室を立ち上げたばかりで、毎日の生活で手一杯、また、学科長として外部評価、法人化移行への大量の資料作りに忙殺され、後先のことを考える余裕もないまま、所詮自分の将来を確固とした信念もなく流れに身を任せてきたことが仇となってしまい、気が付いたら物性研への着任が余儀なくされていたといった感じでした。これまた変なことを書きますが、たまたま柏であった研究会で強磁場実験室を訪れたとき、六本木助手時代に作り上げた装置たちが私が戻ることを渇望しているように感じられたことも物性研着任へと身を委ねた一因やも知れません。

案の定、物性研赴任開始早々50 歳にして膨らみかけたお腹を力んで凹まし、気合を入れ直さないとやってゆけないほどの毎日がスタートしました。何と言っても一番身に応えたのは、物性研強磁場実験室の再整備と平行して、立ち上げたばかりの千葉大研究室をうまく軟着陸させて閉じることでした。これまで研究室の立ち上げは何度も経験し、それなりに夢もあり楽しいものでしたが、研究室を閉じるということがこんなに大変なこととは思いませんでした。私の場合光物性分野から超強磁場分野に変わることもあって、たくさん抱えていた院生のテーマも完結しなければならないですし、また、物理学学科が抱える多くの授業の交代要員の確保もままならないので、少なくとも 1 年間は千葉大の授業も並行しなければなりません。同時に国内に残された次世代の強磁場研究者の再編成の任がおりてきました。当時引退した大物リーダー達とそれに続く有能な若い世代との間には 20 歳以上ものギャップがあって、当時の大物教授さん達が後継者育成に無頓着だったのではと思うほどでした。強磁場を離れて久しい私に何ができましょうか。強磁場の実験装置は装置で、柏には補正予算を使った移転のこともあってザックリの再設置状態で、納品後の 5 年間は何とかなったのでしょうが、これまた、かなりの手を入れなければならない状況でした。特に、破壊型パルス超強磁場発生装置である「一巻きコイル装置」や「電磁濃縮の装置」は 1980 年設置当時の設計図面を元に一新されておりましたが、やはり、20 年も経つと当時の製造に関わったニチコン社の精鋭技術者部隊はほぼ引退しており、大まかには同じ設計図で造られていましたが、隠れたところに多くの危険

[1] 現兵庫県立大学理学部、西播磨の大型放射光 SPRING8 から 1 km ほど離れた丘の上に戦後初めて創設された新設理学部として知られる。

な欠陥が散見しました。私は、超強磁場に関わる研究は 12 年ものブランクがありましたが、不思議にも装置の前に立つとその不調和音[2]が聞こえてきて、自然に体が動き、手を動かすことができました。助手時代に泥まみれになって装置と悪戦苦闘したことで私の小脳にはそのノウハウが叩き込まれていたようです。大脳の方ではすっかり記憶が喪失していましたが。

これら強磁場の装置群との格闘と並行して、物性研に赴任して明くる年の 2004 年には法人化の荒波が押し寄せてきました。物性研強磁場でも 100 テスラ計画を掲げて、当時原子力研究センターで廃棄されようとしていた[3]「フライホィール直流大型電源」[4]の移設事業概算要求[5]、この時、物性研の外部評価もスタート、物性研強磁場が初めて経験する施設への組織編成、そして 2006 年には晴れて「国際超強磁場科学研究施設」の創設、100 テスラ計画推進のための運用費の概算要求と、お日様が高い時は作業着をドロドロに汚しながらの大型小型の実験装置との格闘、地下ピットに潜っては頭に幾つものタンコブを作り、日が沈むと膨大な資料作りの日々で息つぐ間もありません。遠距離通勤もあって所員室にベッドを構えてほぼ泊り込みの毎日となりました。

流石に 2008 年頃には色々なことが落ち着いてきたのですが、間を待たずに国際諮問委員の大御所から嶽山名指しで「強磁場半導体への応用国際会議」を日本で開催するようにとの強い圧力がかかってきました。国内の主だった関係研究者諸氏も挙って嶽山がしないで誰がする？といったありがたいご指名、結局、2010 年夏の開催を目指して予算、会場の獲得に奔走することになり、再び帰宅できない日々が延々と継続することになりました。幸いにも東大生産研の町田先生と彼の研究室の力強い応援もあって、福岡国際会議場にて、海外の関係研究者諸氏を感銘させるほど豪華絢爛な会議の実現に至りました。この国際会議は、半導体国際会議のサテライトとして、1970 年初頭にドイツの半導体研究の巨頭ランドウエアー氏がその大いなる力で創設した豪華絢爛な国際会議でしたが、すでに 19 回目を迎えることになって当時の世界の経済を反映して、会議を維持していくことに陰りが生じていたようです。ところが、この会議が 1980 年に箱根で開催された折にフォン・クリッツイング氏がノーベル賞を授与れることになった「量子ホール効果の発見」の最初の招待講演があったことで、ランドウエアー氏には日本での開催に深い思い入れがあったようです。[6]

弱り目に祟り目とはよく言ったもので、国際会議の準備に追われる中、2009 年末には電磁濃縮法による「1000 テスラ計画」の概算要求という大嵐が私を直撃することになりました。最初はコンデンサ電源を含む電磁濃縮超強磁場発生装置のみの概算要求からスタートし、これが纏まってきた翌年の 3 月には仙台の定常強磁場発生装置の更新事業を包括することになり、全ての書類の書き直し作業に振り戻し、さらには、これがやっと纏まったかと思いきや、筑波の物材機構の定常強磁場も含めた強磁場オールジャパンの概算要求へと膨れ上がることになり、またまた昼夜を徹しての文科省ヒヤリングへの資料作りの振り出しに戻されました。この長丁場の戦いの末[7]、結局当該予算化の会計年度にもつれ込んでの 2010 年 6 月に「1000 テスラ計画」の部分のみに再度逆戻りでの再々申請となって「次世代パルス最強磁場発生装置の整備」の名目の下で 2010 年度、11 年度文科省最先端研究基盤事業[8]として予算化が認定される運びとなりました。早速、電磁濃縮による 1,000 テスラ磁場発生を可能にする超高速大電流コンデンサ電源の仕様策定と調達に向けた調査に乗り出しました。また同時に、超強磁場発生部とそれを囲う防爆ハウスの設計を開始することになりました。ところが調査を進めるにつれて大変不運な状況にあることに気づかされました。コンデンサに蓄積した巨大電気エネルギーから数メガアンペアに及ぶ巨大電流をマイクロ秒オーダーで高速放電するという高度に構築されてきたパルスパワー技術は、1990 年のバブル経済の崩壊とともに国内の主たる製造業でその技術の継承はほぼ消滅しており、それゆえ、海外にまで調査を広げて調達先を探すことになりました。中国、ロシア、欧州、米国など調査した結果、やっと、米国に私が要求する装置のスペックを満たす技術がかろうじて残されていた会社[9]を見つけることができました。ところが、この会社には日本の

[2] 装置内部で起こる様々な不具合や欠陥のこと。長年乗り馴れた愛車の調子がエンジンをかけた途端に感じとれるのに似た感覚のことをこのように表現してみた。

[3] 廃棄するだけでも 3 億円必要とのこと。

[4] 200MJ のエネルギー放出が可能な世界最大の直流発電機。ギネスブックに登録されている。

[5] 移設だけでも(建屋を含めて)15 億円ほど必要。4 年間で計 12 億円の概算要求を行なった。

[6] その後、この福岡での会議を最後にランドウエアー氏が逝去されたことを顧みるにつけ感慨深い。

[7] なんと半年も容赦なく続いた。

[8] 自民党から民主党へと政権が移行した時に文部科学省が打ち出した最先端研究開発戦略的強化費の助成事業。同時に「大型低温重力波望遠鏡の整備」など計 14 の事業が選定された。

[9] L3-アプライドテクノロジー社、多様な企業群を包括する企業連合体。

政府、大学関連機関への調達が直接できないなど様々な法的制限があることがわかり、諦めかけたとき、国内に仲介してくれる輸入会社[10]が見つかり、その協力を得て何とか発注にこぎつけることができました。

この米国の会社でも少数の引退間際のエンジニア達で技術がかろうじて保たれていたようです。発注した装置の設計から組み立てに到るまで製造に関わったチームの平均年齢は優に 60 才を超えていました。また、ちょうど時を同じくして、特殊な大電流高速作動ギャップスイッチ[11]などの特殊部品を実際に製造できる熟練職人を抱える町工場は殆ど廃業に追い込まれていたようです。部品設計を終えて製造に取りかかる段階で部品調達に予期せぬ困難に遭遇することになります。製造に関わる老練エンジニア達は私が要求する技術仕様の実現に向けた挑戦に最後の夢を見ていたようですが、如何せん、製造遅延と見積額の大幅な見直しが必要となり、この会社の経営上層部は製造継続不可能と判断し、契約解除とともに製造中止を一方的に通達してきました。全くの寝耳に水です。この装置は大学を通しての政府調達によるものですから、契約締結から 1 年以上も経っての計画中止はあり得ません。弁護士団[12]を交えて何度も米国の会社に赴いたり、日米電話会議など壮絶な交渉の結果、なんとか半年がかりで製造再開にこぎつけることができました。このような事態となりましたが、結局、政府調達の法的期限を 1 年超過して全装置がなんとか納品されました。しかしながら、このように米国工場で突貫工事で造られたことで、見かけは完成し設置されたコンデンサ電源内部のありとあらゆる部品に欠陥が見つかり、次から次へと深刻なトラブルに遭遇することになりました。

設置直後のギャップスイッチ内の欠陥が見つかり、それらの総入れ替えに始まり、その他様々な制御系のトラブルなど、次々と対応を余儀なくされました。ついに 2015 年 2 月に入るや 480 本の高圧ケーブルが集まる集電板の絶縁破壊が発生、原因調査から修復計画の立案、解体、改造、再組み上げに至るまで結局 2 年を費やすことになりました。米国の製造元は頼りにならないことから、5 人の強磁場の電磁濃縮装置に関わるスタッフのみで、数千個のパーツを分解して取り出し、洗浄、検査、改造作業を進めていきましたが、ほぼ同時に電源側の集電板にも高電圧耐圧欠陥構造が見つかり、これも全てのパーツ取り除き改造を加えてゆくことになりました。

2018 年に入ってから、修復した装置はなんとか電磁濃縮試運転が再開できるようになり、慎重に充電電圧を上げながらの実験を進めていく中で、やっと充放電 45 kV の段階にたどり着きました。全体で 5 メガジュールを構成する 10 個のコンデンサ電源ユニットがそれぞれ 1 つのギャップスイッチを有していて、それらが全て同期動作[13]するまでギャップスイッチのトレーニングが必要で、試運転を繰り返していたわけです。しかし、45kV 以下では全てのユニットが完全に同期するまでには至っていませんでした。それまでの経緯からおよそ 8-9 割の装置が同期してくれれば 1,000 テスラ達成が見込めると実験を試みたわけですが、この時は全てのユニットのギャップスイッチが同期してくれて[14]、1200 テスラの超強磁場が電磁濃縮法で発生できたわけです。電磁濃縮法では、ライナーと呼ぶ金属シリンダーをパルス電磁応力を使って超高速に収縮させて 3 テスラほどの初期磁束を濃縮させるのですが、達成する最高磁場とこのライナーの収縮速度に強い相関があり、1200 テスラの最高磁場に達成できたことは、取りも直さず、ライナー速度が 5 km/s 以上に達していたことを意味します。スタートボタンを押した直後の異常に大きな爆発音、これまで一度も聞いたことがない音色でした。私は、この瞬間 1,000 テスラ超えを直感し、思わず拳を握りしめていました。喜びの感動の一瞬です。案の定、凄まじい衝撃波のために 5 cm 厚みの鉄できた防爆室のドアが歪められ見事に破壊されていました。コンデンサ電源の 5 メガジュールの内 3.2 メガジュールのみで優に 1200 テスラに達することができたわけです。これまでの長くて苦難の日々が一気に報われる思いでした。

「銅内張コイル」という新型コイルの発想からその実現[15]、測定プローブとライナーを破壊する主コイルを基準に取り

[10] 株式会社ノビテック、L3 社の別部門とは X 線装置や高速カメラなどの輸入を扱っていた。

[11] 数 10kV、メガアンペアを超高速(サブミクロ秒)にスイッチするには「ギャップスイッチ」という 2 つの対局する電極の間隙(ギャップ)でスパーク発火させて作動させる特殊なスイッチが使われる。

[12] 輸入会社(ノビテック社)が対処するために急遽契約した国内および米国在住の有能な弁護士。

[13] 全てのギャップスイッチが 50 ナノ秒程度内で同期する必要がある。

[14] 新装置のギャップスイッチは 42 kV 以上で安定した同期動作することが後で判明。

[15] 銅内張コイルの開発には 3 年間を要した。従来型のコイルでは、実験値がシミュレーが予測する最高磁場値を超えることはなかった。この新型主コイルを採用することで、実験値はシミュレーション値の 1.1 倍と上方修正することになった。更に、パルス磁場波形(時間発展)は高い精度で一致するようになった。

付けるという斬新な考え方[16]、電源から磁場発生コイルまでの機械的電機的設計、全て過去の膨大な失敗の情報から学んで得られたものですが、これらが間違っていなかったことがこの実験結果として証明された瞬間でした。1970年代に近角聰信先生に始まり、三浦登先生に引き継がれた1,000 テスラ磁場達成への挑戦が半世紀の年月を経て遂に私の定年退職の間際に現実のものとなりました。ロシアや米国ではかつて爆薬を使った爆縮法で1,000テスラ以上、時に、2,800 テスラの到達磁場発生が報告されてますが、これは磁場検出コイルの電圧から読み取られたもので、この誘導法ではどのような工夫をしても精々600テスラが限界で、それ以上の強い磁場値には得られた値に信憑性に疑いが生じます。しかも、国際会議のプロシーディングでの報告に留まるものがほとんどです。破壊力の大きな爆薬を使った、野外のみで実施可能な全破壊的な実験になりますので、再現性や精密な物理計測は到底望めないものです。また、最近超強度パルスレーザーを使った超強磁場発生も報告されてますが、これも、再現性も疑われますし、また、物性計測どころか磁場値の正確な計測ですらままならないものです。今回の 1200 テスラという値は精密に校正された石英板のファラデー回転で測定されたもので[17]、これは、磁場値の信頼度は勿論のこと、同時に、この磁場値まで物性計測が可能であることが示されたことになります。しかも、コイルの形状パラメータや充電エネルギー、電圧を調整することで、磁場発生時間と空間をほぼ完全にコントロールできます。誰がやっても、マニュアル通りに実験を準備できれば同じ磁場発生が可能です。驚くほどの再現性が見込めます。このことから、人類が初めて手にした制御可能で、しかも高い信頼度での物理計測ができる1,000テスラ領域をカバーする磁場発生技術を確立できたと言えます。

これで 2003 年に物性研に赴任する折に掲げた公約「1,000 テスラの達成」を定年退職する前に果たすことができました。赴任当時はこれを 10 年間で達成することを目標としましたが、結局4年遅れとなってしまいました。電磁濃縮磁場発生装置の総入れ替えという遠回りをしたのでこの4年間の遅れは仕方ないことだったかもしれません。思えば、これまで開発に次ぐ開発で息のつく間もない物性研での 17 年でした。最後の年まで作業服を着ての奮闘[18]、絶えず戦々恐々とした毎日でしたが、言い換えると、最後の最後ギリギリまで大変充実した研究生活だったと言えます。物性研が半世紀にわたり掲げてきた電磁濃縮での1,000 テスラ達成という最後の締めができたこと、世界一ラッキーだったとも思えます。100 テスラ以上の破壊型のコイルを使う強磁場科学は、開発に時間がかかり、世界に競争相手もいない代わり、他から学ぶことができない孤独な研究です。排出される論文数も非破壊長時間パルス磁場でのそれに比べ 10 倍以上効率が悪いと言えます。開発した装置は実験毎に破壊されるので、全ては情報でしか残りません。測定物質が変わる毎に新たな開発となり、その成果を論文にするまで数年はかかります。論文に投稿しても他で再現できないことで大変厳しい閲読が付きまといます。一つの装置を構えて共同利用で試料を変えて次から次へと結果を出していくようなわけにはいきません。所謂、極めて効率の悪い研究です。昨今の効率のみが評価される時代に、このような効率の悪い研究に最後まで対峙できたことは研究者冥利につきるとも言えましょう。

私が助手で強磁場に関わり始めた 1980 年代は 20 テスラ以上の強磁場といえば限られた特殊な施設でしか得ることができませんでした。そこで行われる物性研究も極めて限られていて、パルス磁石で得られる 40 テスラ程度でも限られた施設とそこでの少数の専門家達の手に委ねられていました。それが今や米国、欧州、中国では非破壊で 100 テスラに近いあるいは超えた磁場発生が実現しており、しかも、1980 年代では到底考えられなかったような高度で精密な様々な物性計測が容易になされ、多くの共同研究のもとで物質科学の華やかな成果が創出されています。1980 年代には想像すらできなかった状況です。今現在では、大変特殊で困難を伴う100テスラから1,000テスラの磁場発生と物性計測ですが、これは非破壊的長時間パルス強磁場の世界の 40 年前に相当します。これを機会に 100 テスラから1,000テスラ超強磁場科学技術が加速し、近未来には、現在の100テスラ以下の非破壊的長時間パルス磁場と同様の簡便さと汎用性、それと信頼性をもって多くの物質科学の研究者を惹きつけ、物性研究所強磁場施設が世界を牽引する日々が来ることが想像されます。1200 テスラ達成の超強磁場発生と物性計測技術が次世代の強磁場研究者に上手く継承され、超強磁場物性科学が未来へ向けて発展し続けていくことでしょう。

[16] この方法により高速収縮ライナーが測定プローブに1 mm 以内に接近するまで計測が可能となっただけでなく、測定の再現性が格段に向上した。

[17] 石英板を使って 600 テスラ以上の磁場値を正しく測定できることを証明するだけでも数年にわたる実験を行っている。

[18] 作業服を着ての作業は幸せの時間であった。このことに感謝を込めて退職記念講演はお気に入り（1,200 円）の作業服で行なった。

最後に、なかなか先が見えない研究に私を信じてついて来てくれた嶽山研究室の大学院生たち、最初の助手として電磁濃縮法コイル開発に悪戦苦闘してくれた小嶋映二助教、これを引き継ぎ、私の超強磁場に関わる様々な技術を洗練し、より高いレベルへ引き上げてくれた中村大輔助教の貢献は多大です。私は、種々の物理実験では往往にして過去の経験に乗っかり直感で対処していく傾向にありますが、彼らは高い能力を持って科学的な裏付けで補ってくれました。澤部博信技術専門職員は日々の努力を惜しまずに装置と向き合ってくれて、特に、電磁濃縮装置の種磁場マグネット[19]の開発への貢献は顕著です。それから最後に、宮川光雄元副理事、歴代の事務長はじめ事務の方々にはご心配をかけ続けたにも関わらず絶え間ない支援を頂きました。このように周囲の優れた人々に大変恵まれていたと思います。

さて、また、ここで表題のことに戻ります。と言いますのは、2002 年当時の私の決断によっては、物性研ではなく千葉大にて定年退職を迎えていたはずだったのです。むしろ千葉大に赴任する時は全くもってそのつもりでおりました。千葉大では大変充実した日々でありました。そこでの 4 年間のことを書くとすれば、ここまでと同じくらいのページが必要なので止めておきますが、千葉大にて定年退職していたらどんなことを書いたのだろうかと想像するだけでも楽しくなります。そしてそこでお会いした院生、教員、事務方の人々は私の人生の宝になっております。その代わりに物性研でお会いした色々な人々にお会いする機会はなかったのでしょう。66 年間も生きながら稚拙な結論ですが、「何事も一生懸命生きていればどのようなことがあっても残るは楽しい思い出だけ」です。そしてそれはとても幸運なことだったということです。

---

[19] 電磁濃縮法の種磁場マグネットは、直径 15 cm、長さ 20 cm ほどの空間に 3-4 テスラのパルス磁場を初期磁場として発生させ、これをライナーで直径 1cm 程に絞理、濃縮する。2 つの種磁場コイルは主コイル直近に設置して使用する。それ故、ライナー濃縮速度が上がったことで、より強い衝撃波に対応できるマグネットの開発が必要となり、これに 15 年以上にわたり多くの労力を割くことになった。

理論滞在型国際ワークショップ
Computational Approaches to Quantum Many-Body Problems (CAQMP2019)

日時：7 月 16 日から 8 月 8 日（ワークショップ）、7 月 22 日、7 月 29 日、8 月 5 日（シンポジウム）
場所：物性研究所 615（レクチャー）、物性研大講義室（シンポジウム）
URL: https://www.issp.u-tokyo.ac.jp/public/caqmp2019/
アドバイザ：Ying-Jer Kao (National Taiwan University), Anders Sandvik (Boston University), Tao Xiang (Chinese Academy of Sciences)
プログラム委員：Kenji Harada (Kyoto University), Naoki Kawashima (ISSP) [chair], Yoshinobu Kuramashi (University of Tsukuba), Satoshi Morita (ISSP), Tomotoshi Nishino (Kobe University), Tsuyoshi Okubo (University of Tokyo), Tetsuya Sakurai (University of Tsukuba), Takafumi Suzuki (University of Hyogo), Synge Todo (University of Tokyo)
所内組織委員：森田悟史、三澤貴宏、本山裕一、山崎淳、吉見一慶、井戸康太、金子隆威、玉井敬一、川島直輝

本イベントは、理論系所員が輪番で組織委員を務める国際研究会であり、進展著しい分野をピックアップして、比較的少人数の研究者が通常の研究会よりも長い期間一か所に滞在することで議論を深め、期間中に共同研究を進めたり、そのきっかけを生み出すことなどをシリーズの趣旨としている。2006 年が第 1 回目で、2011 年が震災で中止になったため、今回が 13 回目であった。

筆者が組織委員となって開催した 2016 年度(TNQMP2016)に引き続き、今回のテーマは、テンソルネットワークとその応用である。前回は方法論自体が物性研究コミュニティの多くの人にとって聞きなれないものであり、ごく基本的なところからのレクチャーを含んだサマースクール的な会合であったが、前回から今回までのあいだにテンソルネットワーク法の応用や情報科学との接点について多くの進展があったので、それを反映して、第 1 週は新しい数値計算手法、第 2 週はテンソルネットワーク法の進展、第 3 週は情報科学との接点、第 4 週は実験との比較対照計算にそれぞれ重点をおいてプログラムを作成した。会合のフォーマットとしては、今回も、前回同様、毎週月曜日に通常の研究会形式で 30 分トークからなるシンポジウムを開催し、火曜日から金曜日までは午前・午後に最大 1 コマずつのゆとりあるスケジュールで行った。

今回の会議で行われたレクチャー・講演の中から筆者個人の主観で印象に残ったものを簡単に振り返ってみる。1 週目には、物性研外国人客員教授として長期間滞在されたこともある Anders Sandvik (Boston) が様々な量子臨界現象のプロトタイプとして重要な脱閉じ込め転移に関する最新の研究動向についてレビューを行った。また、テンソルネットワーク表示による繰り込み群の計算で標準的な HOTRG の開発者である Tao Xiang (CAS, Beijing) が 3 次元以上の高次元系におけるテンソルネットワーク繰り込み群や自動微分を応用した繰り込み群計算について解説を行った。2 週目には、Laurence Vanderstraeten (Ghent) がテンソルネットワーク表現に基づく高精度な変分法について最近の研究成果を紹介した。また、シンポジウムでは、藏増嘉伸(筑波大)が格子 QCD に向けたテンソルネットワークからのアプローチについて紹介し、Qibin Zhao(理研)が、機械学習におけるテンソルネットワークの利用の可能性について論じた。また、Hyun-Yong Lee(ISSP)がテンソルネットワーク表現を通じたキタエフモデルと古典統計力学モデルの関連についての成果を発表した。3 週目は情報科学との接点に関する講演として Lei Wang（CAS, Beijing)が深層学習における自動微分の応用事例を紹介し、さらに、自動微分のテンソルネットワークへの応用に関する最近の研究成果について述べた。自動微分は近年とくに注目されている計算技術であり、今回の研究会をきっかけとして、日本でも物性科学への応用が始まるのではないかと期待している。4 週目には、Cristian Batista (Tennessee)が三角格子反強磁性体 $Ba_3CoSb_2O_9$ を題材にして、1/S 展開や 1/N 展開法による動的構造因子の計算の最近の進展と新たに可能になった準粒子励起の特徴づけについて解説した。

レクチャー、シンポジウムを合わせて延べ参加者数は名簿に記名したものだけで、538 名(うちレクチャーは 380、シンポジウムは 158)であった。今回行われた多くのレクチャーは、すべて録画し、YouTube にアップロードした。(研究会ウェブサイトからリンクがはってあるので興味がある方は参照されたい。) 前回 TNQMP2016 のときと同様、とくに若手研究者にとって良い刺激になったのではないかと思う。2016 年の会議がきっかけとなって物性研のポスドクとなった Hyun-Yong Lee 氏が、この 3 年間で大変良い成果を挙げられ、今回の研究会で重要なプレゼンテーションを行ったことなども、会議の成果といえるのではないかと思う。

この会議を開催するにあたって、光冨さんはじめ理論部門秘書室スタッフの方々、国際交流室の石口さん、CCMS 事務局スタッフの方々、物性研事務部の方々に大変お世話になった。深く感謝申し上げる。(川島記)

CAQMP2019 Program

July 16

10:00 - 12:00 Naoki Kawashima

Introduction

15:00 - 16:00 Mingpu Qin

Study of 2D Hubbard model within the Simons Collaboration on the Many Electron Problem

---

July 17

10:00 - 11:00 Kenji Harada

Tensor network technique for stochastic process

15:00 - 17:00 Anders W. Sandvik

Deconfined quantum criticality in the 2D J-Q model

July 18

10:00 - 12:00 Ribhu Kaul

Field theories and QMC studies of spin systems

15:00 - 16:00 Satoshi Morita

Improvement of higher-order tensor renormalization group method

---

July 19

10:00 - 12:00 Tao Xiang

Overview on the Tensor Network Renormalization of (2+1)D Quantum Lattice Model

15:00 - 16:00 Ribhu Kaul

Designer Hamiltonians for quantum spin liquids and exotic valence bond ordered states

---

July 22 (Monday Symposium 1)

9:50 - 10:00 Hatsumi Mori

Opening Address

10:00 - 10:30 Anders W. Sandvik

Monte Carlo renormalization flows with dangerously irrelevant perturbations

10:30 - 11:00 Hidemaro Suwa

Finite-temperature self-consistent dynamical simulation

11:00 - 11:30 Tao Xiang

Tensor Network Renormalization of Quantum Spin Liquids

11:30 - 12:00 Tomotoshi Nishino

Phase Transition of the Classical Ising Model on the Sierpinski Carpet

13:00 - 13:30 Laurens Vanderstraeten

Variational tensor-network methods for problems in statistical mechanics

13:30 - 14:00 Kenji Harada

Informational aspect of directed percolation problem

14:00 - 14:30 Mingpu Qin

A self-consistent constrained path auxiliary field Quantum Monte Carlo method

14:30 - 15:00 Yoshinobu Kuramashi

Tensor Renormalization Group Approach to Scalar Field Theories in Particle Physics

15:30 - 16:00 Shumpei Iino

Boundary tensor renormalization group

16:00 - 16:30 Tokuro Shimokawa

Ripple state in the frustrated honeycomb-lattice antiferromagnet

16:30 - 17:00 Akihisa Koga

Ground-state and finite-temperature properties in the generalized Kitaev model

17:00 - 17:30 Shin Miyahara

Fractionally quantized Berry phases in spin systems

17:30 – 19:00 Poster session 1

July 23

10:00 - 12:00 Natalia Chepiga

Matrix Product States for frustrated spin chains, lattices with an extended Hilbert space and constrained models in 1D

15:00 - 16:00 Wenan Guo

Engineering Surface Critical Behavior of (2+1)-Dimensional Quantum Critical Points

---

July 24

10:00 - 12:00 Tomotoshi Nishino

Optimization Schemes in TNS

15:00 - 16:00 Guang-Ming Zhang

Gapless Coulomb state emerging from a self-dual topological tensor-network state

---

July 25

10:00 - 12:00 Laurens Vanderstraeten

Variational methods for tensor networks

15:00 - 16:00 Hyun-Yong Lee

Gapless Kitaev Spin Liquid to Loop and String Gases through Tensor Networks

---

July 26

10:00 - 12:00 Masatoshi Imada

Variational Monte Carlo method and applications to strongly correlated systems

15:00 - 16:00 Hai-Jun Liao

Differentiable Programming Tensor Networks

July 29 (Monday Symposium 2)

9:30 - 10:00 Lei Wang

Neural Canonical Transformations

10:00 - 10:30 Akiko Masaki-Kato

Model Compression of Deep Neural Network

10:30 - 11:00 Yusuke Nomura

Machine learning solvers for strongly-correlated systems

11:00 - 11:30 Tetsuya Sakurai

Development of Efficient Algorithms for Higher Order Tensor Renormalization Group

11:30 - 12:00 Keiichi Tamai

Statistical Description of Spatially Extended Classical Systems: Semi-bottom-up Approach

13:00 - 13:30 Qibin Zhao

Tensor Network Representations in Machine Learning

13:30 - 14:00 Ning Zheng

Nonnegative Tensor Ring Decomposition with Graph Laplacian Regularization

14:00 - 14:30 Hiroshi Shinaoka

Tensor learning approach to sparse QMC sampling of two-particle Green's function in DMFT

14:30 - 15:00 Tota Nakamura

Gaussian kernel method as an improved estimator of magnetization curve and spin gap

15:30 - 16:00 Synge Todo

Optical bistability in a low-photon-density regime

16:00 - 16:30 Jun Takahashi

Sign-problem free model for deconfined quantum criticality with plaquette VBS

16:30 - 17:00 Wen-Tao Xu

Tensor network state approach to quantum topological phase transitions and their criticalities of Z2 topologically ordered states

17:00 - 17:30 Hiroshi Ueda

Critical behavior of the two-dimensional dodecahedron model

17:30 – 19:00 Poster Session 2

July 31

10:00 - 12:00 Lei Wang

Secrets of Deep Learning

15:00 - 16:00 Natalia Chepiga

Floating phase versus chiral transition in 1D constrained models

---

August 5 (Monday Symposium 3)

9:30 - 10:00 Cristian D. Batista

Vison Crystals in an Extended Kitaev Model on the Honeycomb Lattice

10:00 - 10:30 Yoshi Kamiya

Non-semiclassical spin dynamics in the triangular lattice quantum antiferromagnet

10:30 - 11:00 Ryui Kaneko

Probing the numerical accuracy of the tensor-network representation for the Kitaev spin liquid

11:00 - 11:30 Chisa Hotta

Evaluating response functions from linear to nonlinear regime at finite temperature

11:30 - 12:00 Takahiro Misawa

Development of open-source software packages for quantum lattice models and their applications to quantum spin liquids

13:00 - 13:30 Zenji Hiroi

Dimensional reduction by geometrical frustration

13:30 - 14:00 Tsuyoshi Okubo

Large spin fluctuation in the magnetization process of frustrated square lattice Heisenberg model

14:00 - 14:30 Hyun-Yong Lee

Abelian and Non-Abelian Chiral Spin Liquids in a Compact Tensor Network Representation

14:30 - 15:00 Masaki Oshikawa

Universal Gap Scaling in Finite Quantum Ising Chains

15:30 - 16:00 Satoru Nakatsuji

Quantum Metamagnetic Transition in a Spin Ice Systems —Spin-Orbital-Liquid?—

16:00 - 16:30 Takafumi Suzuki

Quantized excitation spectra in quasi-one-dimensional S=1 Spin chains

16:30 - 17:00 Ying-Jer Kao

Fate of two quantum spin liquids on the kagome lattice

17:00 - 17:30 Toru Sakai

Numerical Diagonalization Study on Frustrated Magnets

17:30 – 19:00 Poster Session 3

August 6

10:00 - 12:00 Cristian D. Batista

Dynamical structure factor of the triangular Heisenberg model

15:00 - 16:00 Youhei Yamaji

Finite-temperature excitation spectra of spin-orbit coupled Mott insulators

---

August 7

10:00 - 12:00 Masaki Oshikawa

Response of Quantum Many-body System to U(1) Gauge Field

15:00 - 16:00 Yoshi Kamiya

Quantum Monte Carlo simulation of interacting Majorana fermions on the square lattice in the strong coupling limit

---

August 8

10:00 - 12:00 Tsuyoshi Okubo

Tensor network approach to two-dimensional frustrated spin systems

15:00 - 16:00 Ying-Jer Kao

Correlation functions and fixed points in quantum wire junctions: a tensor network approach

---

Poster Session 1 (July 22)

P-01 Nisheeta Desai

Spin-S Designer Hamiltonians and Square Lattice Spin-1 Haldane Nematic

P-02 Jun Takahashi

Graph-theoretic approach for multiple discrete symmetry breakings

P-03 Bowen Zhao

Symmetry enhanced discontinuous phase transition in a two-dimensional quantum magnet

P-04 Hideaki Oba

Cost reduction of a swapping part of ATRG

P-06 Shinichiro Akiyama

Phase transition of four-dimensional Ising model with higher-order tensor renormalization group

P-07 Daiki Adachi

Anisotropic Tensor Renormalization Group

P-08 Wangwei Lan

Tensor Renormalization Group Centered About a Core Tensor

Poster Session 2 (July 29)

P-01 Wen-Yuan Liu

Accurate finite PEPS algorithm and gapless spin liquid ground state of spin-1/2 J1-J2 Heisenberg model on squate lattices

P-02 Seishiro Ono

Toward data-driven investigation of bulk topological (crystalline) superconductors

P-03 Koki Kitai

Accelerating metamaterials design by quantum annealing

P-04 Chao Li

Topology Learning of Higher-order Tensor Network Decomposition via Genetic Algorithm

P-05 Vijay Chilkuri

Unitary Group Adapted Iterative Configuration Expansion Variational Ansatz: Implementation and Applications

P-06 Hiroki Oshiyama

Kibble-Zurek physics in the transverse Ising chain coupled to a bosonic bath

P-07 Yuichi Motoyama

Analytic continuation by combining the sparse modeling method with the Padé method

P-08 Kana Nataochi

Tensor renormalization group method with oblique projection for stochastic process

---

Poster Session 3 (August 5)

P-02 Tokuro Shimokawa

Ground state and thermodynamic properties of the S=1/2 bilayer breathing-kagome Heisenberg magnet

P-03 Seyed Reza Ghazanfari

Topological phase transition in the field induced Kitaev model on the Kagome lattice

P-04 Kota Mitsumoto

Simultaneous spin and orbital glass transitions in a model frustrated pyrochlore magnet without quenched disorder

P-05 Yuko Watanabe

Quantum Fluctuations in the Neutral Ground State of TTF-CA:

Resonating Hartree-Fock Approach beyond the Adiabatic Approximation

P-06 Takatoshi Fujita

Development of Large-Scale GW+Bethe-Salpeter Equation Method for Organic Optoelectronic Materials

P-07 Fumitatsu Iwase

Ab initio calculation of electric-field gradients in CCl3COHal (Hal=F, Cl, Br, I)

P-08 Munehisa Matsumoto

Scaling 4f-3d intermetallics

P-09 Yasuhiro Tada

DMRG study of spinless fermions on pi-flux square lattice

物性研究所短期研究会

「強磁場コラボラトリーによる強磁場科学の新展開 ―光科学との融合も視野に入れて―」

日時:2019 年 12 月 3 日(火)－12 月 5 日(木)

場所:大阪大学大学院理学研究科 J 棟 2 階・南部陽一郎ホール

URL: http://www.ahmf.sci.osaka-u.ac.jp/forum2019/

提案代表者及び報告者：萩原 政幸（大阪大学大学院理学研究科）

共同提案者：金道 浩一（東京大学物性研究所）、徳永 将史（東京大学物性研究所）、
松田 康弘（東京大学物性研究所）、野尻 浩之（東北大学金属材料研究所）
佐々木 孝彦（東北大学金属材料研究所）、田島 節子（大阪大学大学院理学研究科）
花咲 徳亮（大阪大学大学院理学研究科）、鳴海 康雄（大阪大学大学院理学研究科）

現在、オールジャパンの強磁場研究拠点の形成を目指して強磁場コラボラトリー計画(次世代強磁場施設)の実現に向けた様々な取り組みがなされてきている。その中にあって、東京大学物性研究所附属国際超強磁場科学研究施設と大阪大学大学院理学研究科附属先端強磁場科学研究センターがパルス強磁場コラボラトリー運営委員会を設置し、平成 28 年度から大阪大学でも物性研究所の共同利用申請の仕組みを用いて全国共同利用実験を実施している。両施設の協力による装置の開発、設備の整備、実験の実施により共同利用の実施課題数は約 5 割増しになり、物性科学における強磁場の重要性が益々認識されてきている。今後は東北大学金属材料研究所附属強磁場超伝導材料研究センターの定常強磁場施設を入れた強磁場コラボラトリーにより世界水準の研究環境を整備し強磁場科学をリードしていこうとしている。

パルス磁場領域で全国共同利用の一本化が実現した現在、強磁場を利用した様々な研究成果が出ているので、その成果を共有し、今後の強磁場科学の新たな展開を議論する場として本研究会を企画した。ネットワーク型の共同利用拠点としての活動を可視化するために、「物性研究所短期研究会」としては初めての試みとなる連携研究施設のある大阪大学で本研究会を開催した。また、トポロジカル物性研究で重要になっている遠赤外から赤外領域や、構造物性研究に不可欠のX線領域まで、広い意味での光科学と強磁場融合の将来展望を含む講演も企画し、今回 6 名の方にご講演いただいた。

本研究会 3 日間で 127 名の方々に研究会参加登録をしていただいた。記帳してもらった方々（一部記帳されなかった方もいらしたので出席者全員ではない)の人数は 3 日 91 名、4 日 80 名、5 日 55 名だった。3 日には合金系の強磁場効果、理論、マルチフェロイック系、重い電子系の強磁場物性が口頭発表された。その後、ポスターセッション（奇数番号、29 件)が行われた。4 日午前は上述のように光科学関連の研究者に講演していただき、強磁場科学との融合に関しての議論がなされた。4 日午後は強磁場フォーラム総会を開催して、強磁場フォーラムの 1 年間の活動報告、次期強磁場フォーラム幹事の選挙がなされた後、強磁場施設の現状報告と将来計画に関する発表がなされた。その後、第 1 回強磁場フォーラムフロンティア奨励賞授賞式が行われ、酒井英明氏(大阪大学大学院理学研究科)と吉田紘行氏(北海道大学大学院理学研究院)が受賞された。5 日午前はフラストレート磁性体と量子スピン系の強磁場磁性に関する口頭発表、午前後半は装置開発に関する口頭発表があった。その後、ポスター発表(偶数番号、28 件)行われた。午後にはワイル半金属、磁性半導体や近藤半導体系の講演が 4 件行われた。最後にポスドク以下の若い研究者を対象にした優秀発表賞と優秀ポスター賞の受賞者の発表と表彰を行って閉会した。

プログラム

■　12 月 3 日（火）

13:00-13:10　　開会の挨拶：萩原政幸（阪大先端強磁場）
　　東大物性研・所長挨拶

Session 1　（座長：鳴海康雄（阪大先端強磁場））

13:10-13:30　[O1-1] 木原　工（東北大金研）「メタ磁性形状記憶合金 $Ni_{50-x}Co_xMn_{31.5}Ga_{18.5}$ (x = 9 and 9.7)における磁場誘起バリアント再配列」

13:30-13:50　[O1-2] 左近拓男（龍谷大）「Ni_2MnGa 系強磁性合金の強制磁歪効果」

13:50-14:10　[O1-3] 猪崎優喜（電通大）「強スピン軌道結合系における異常なゼーマン効果の理論」

14:10-14:30　[O1-4] 小田竜樹（金沢大）「外部磁場下の密度汎関数計算法の開発」

14:30-15:30　ポスターセッション①（odd number）

Session 2　（座長：三田村裕幸（東大物性研））

15:40-16:00　[O1-5] 今城周作（東大物性研）「一次元不安定性によって誘起される誘電性と磁性の交差相関」

16:00-16:20　[O1-6] 大月保直（東北大金研）「空間反転対称性を持たない常磁性遷移金属錯体における二次の電気磁気効果」

16:20-16:40　[O1-7] 赤木　暢（阪大先端強磁場）「$Sr_2CoSi_2O_7$ におけるパルス強磁場 ESR の方向二色性」

16:40-17:00　[O1-8] 三宅厚志（東大物性研）「重い電子系超伝導 UTe_2 のメタ磁性転移」

17:00-17:20　[O1-9] 栗原綾佑（東大物性研）「$CeRhIn_5$ の磁場誘起電子ネマティック相と四極子効果」

17:30-18:30　　施設見学会（先端強磁場科学研究センター）　※希望者のみ

■　12 月 4 日（水）

Session 3　（座長：大久保晋（神戸大））

09:00-09:30　[O2-1] 佐々木孝彦（東北大金研）「SPring-8 赤外ビームラインでの磁場中顕微赤外分光」

09:30-10:00　[O2-2] 岡村英一（徳島大）「SPring-8 赤外放射光を用いた黒リンの磁気光学実験」

10:00-10:30　[O2-3] 上田健太郎（東大物工）「パイロクロア型イリジウム酸化物における磁場誘起相転移」

10:30-11:00　休憩（30 分）　※休憩前に集合写真

Session 4　（座長：松田康弘（東大物性研））

11:00-11:30　[O2-4] 藤岡　淳（筑波大）「強相関ディラック半金属 $CaIrO_3$ のモット臨界性と異常電磁気応答」

11:30-12:00　[O2-5] 木村真一（阪大生命機能）「ワイル半金属 TaAs の THz 磁気光学スペクトル」

12:00-12:30　[O2-6] 関山　明（阪大基礎工）「内殻光電子線二色性による強相関希土類 4f 軌道対称性の決定」

12:30-14:00　休憩（90 分）

第 15 回強磁場フォーラム総会

14:00-16:00　　強磁場フォーラム総会
　　強磁場フォーラムの第 14 期活動報告、質疑応答
　　次期フォーラム幹事選挙
　　各施設からの現状報告　各 15 分（10 分報告、5 分質疑応答）
　　その他報告事項
　　次期幹事選出
　　第 15 期活動方針の提案、質疑応答

16:00-16:10　　休憩（10 分）

16:10-16:40　第 1 回強磁場フォーラムフロンティア奨励賞授賞式
受賞講演（司会：太田　仁（神戸大））
17:30-19:30　懇親会　（らふぉれ）

■　**12 月 5 日（木）**

Session 5　（座長：田中秀数（東工大））

09:00-09:20　[O3-1] 秋元　昴（東大物性研）「Shastry-Sutherland 反強磁性体 $SrCu_2(BO_3)_2$ の磁場温度相図および有限勾配磁化プラトー」

09:20-09:40　[O3-2] 厳　正輝（東大物性研）「磁化および磁歪測定によるブリージングパイロクロア磁 性体の強磁場磁気相探索」

09:40-10:00　[O3-3] 池田暁彦（東大物性研）「超強磁場 500 T に至る低次元量子スピン系の磁歪の研究」

10:00-10:20　[O3-4] 山口博則（大阪府立大）「新規スピン交替鎖における Lieb-Mattis プラトーの観測」

10:20-10:40　休憩（20 分）

Session 6　（座長：木村尚次郎（東北大金研））

10:40-11:00　[O3-5] 井原慶彦（北海道大）「パルス強磁場中核磁気共鳴実験手法開発の現状と今後」

11:00-11:20　[O3-6] 櫻井敬博（神戸大）「高圧下強磁場 THz ESR の現状と今後の展望」

11:20-11:40　[O3-7] 石川裕也（福井大）「超低温・高周波領域における meanderline コイルを用いた Si:P の ^{31}P-DNP-NMR 測定」

11:40-12:40　ポスターセッション②（even number）

12:40-14:00　休憩（70 分）

Session 7　（座長：徳永将史（東大物性研））

14:00-14:20　[O3-8]　駒田盛是（阪大院理）「ワイル点を 1 つまたは 2 つ囲む系のランダウ準位の研究」

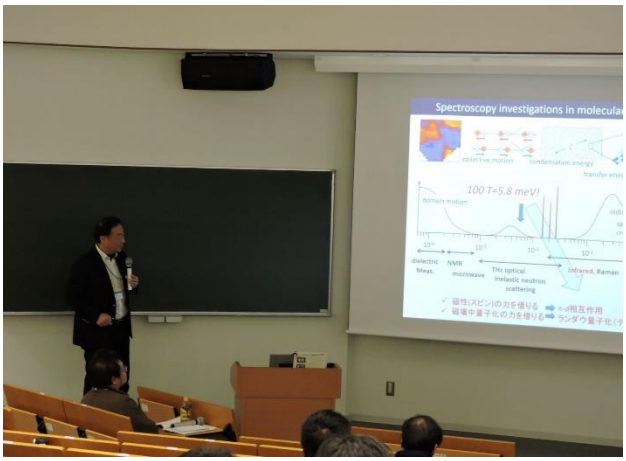
14:20-14:40　[O3-9]　石渡晋太郎（阪大基礎工）「極性磁性半導体におけるバンド変調由来の巨大正磁気抵抗効果」

14:40-15:00　[O3-10] 中村大輔（東大物性研）「近藤半導体 SmB_6,FeSi における磁場誘起半導体-金属転移」

15:00-15:20　[O3-11] 宍戸寛明（大阪府立大）「SmB_6/SrB_6 人工超格子の強磁場下磁気抵抗測定」

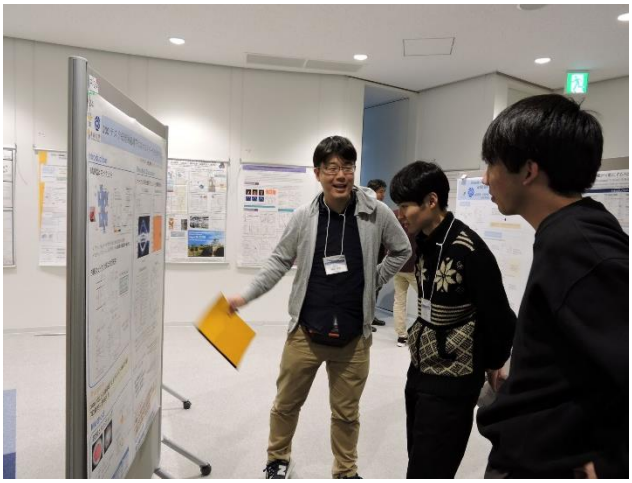
15:20-15:30　若手優秀発表賞・ポスター賞発表：萩原政幸（阪大先端強磁場）
閉会の挨拶：　野尻浩之（東北大金研）

参加者集合写真（南部陽一郎ホール裏で）



光科学分野の講演

口頭発表の様子



ポスター発表の様子

優秀口頭発表賞（左上）・優秀ポスター賞受賞者

第 1 回強磁場フォーラムフロンティア奨励賞受賞者

ISSP ワークショップ

レチナールタンパク質の光機能発現の物理と化学

日時：2019 年 9 月 5 日(木)～2019 年 9 月 6 日(金)
場所：東京大学物性研究所大講義室

世話人：井上 圭一（東京大学物性研究所）

レチナールタンパク質(ロドプシン)は動物や細菌、古細菌、単細胞藻類やウイルスなど極めて広範な生物種に存在する光受容型の膜タンパク質である。そしてレチナールタンパク質が近紫外光～可視光の波長域の光を吸収すると発色団のレチナールが異性化し、様々な種類のイオン輸送や酵素反応、細胞内シグナル伝達など多様な生理機能が発現される。従って光で反応をトリガーできるレチナールタンパク質の特質を活かすことで、先端的レーザー分光や軌道放射光、中性子などを用いたタンパク質の機能発現における非平衡過程についての研究を、他の非光受容系のタンパク質では困難な、極めて高い時空間分解能で調べることが可能となる。そこで今回、国内の代表的なレチナールタンパク質研究者による最先端の研究成果に関する講演を依頼し、当該分野の現状と解決すべき問題について意見交換を行うことを目的に、2019 年 9 月 5 日(木)～6 日(金)の 2 日間にわたって、ISSP ワークショップを物性研究所において開催した。また 2020 年 6 月 1 日(月)～6 日(土)には伊勢志摩においてレチナールタンパク質国際会議が開催されるが、本ワークショップはそのサテライトシンポジウムとしても位置付けられるものであり、2 日間でのべ 111 名(初日 58 名、2 日目 53 名)の参加があり、1 件の基調講演と 22 件の招待講演、さらに一般からの 24 件のポスター発表が行われた。

ワークショップ初日は、まず微生物および動物ロドプシンについての分光学的および構造生物学的な研究に関する 6 件の招待講演が行われた。特に大阪大学・水谷泰久教授からは陽イオンと陰イオンを互いに逆向きに輸送する微生物ロドプシンのイオン輸送モデルについて俯瞰的な説明がなされた。また大阪市立大学・寺北明久教授からは近年研究が大きく進展している非平衡型動物オプシンの分子特性やオプトジェネティクス応用についての講演がなされた。

その後ポスター発表を挟み、京都大学・七田芳則名誉教授(現・立命館大学・客員教授)のから基調講演が行われ、「ロドプシン研究の潮流」というタイトルで、150 年以上に及ぶレチナールタンパク質の研究と、1984 年から続くレチナールタンパク質国際会議の歴史について、近年の急激な研究動向の変化についても俯瞰しながら紹介いただいた。

初日の夜は柏キャンパス内のカフェテリアにおいて懇親会が催され、森初果物性研究所長から参加者へのご挨拶のあと、次回のレチナールタンパク質国際会議の主催者である名古屋工業大学・神取秀樹教授から国際会議の開催について紹介がなされた。

ワークショップ 2 日目は引き続きレチナールタンパク質の先端的なレーザー分光計測やオプトジェネティクス研究などに関する 13 件の招待講演やポスター発表がなされ、最後に神取教授によって来年の国際会議に向けた意気込みを述べていただき、盛況のうちにワークショップが閉会された。

本ワークショップでは開催期間全体を通じて常に活発な議論が展開され、開催目的であるレチナールタンパク質の最先端研究の現状や未解決問題についての知識の共有と意見交換が参加者の間でなされた。

最後に本ワークショップの実施に際し、提案者の研究室のスタッフ、秘書および学生、さらに物性研究所の関係者の皆様には多大なご協力をいただきました。この場をお借りして厚く御礼申し上げます。

プログラム

9 月 5 日（木)

12:50-13:00	開催の辞
座長：菊川 峰志（北海道大学）	
13:00-13:25	O-1 水谷 泰久（大阪大学） 「時間分解振動分光法とロドプシン研究」
13:25-13:50	O-2 川村 出（横浜国立大学） 「固体 NMR を用いたロドプシンの細胞膜中における構造解析」
13:50-14:15	O-3 加藤 英明（東京大学、JST・さきがけ） 「構造情報を利用した新規チャネル型ロドプシンの開発と探索」
14:15-14:30	休憩
座長：塚本 寿夫（分子科学研究所）	
14:30-14:55	O-4 寺北 明久（大阪市立大学） 「動物光平衡型オプシンの分子特性と光遺伝学ツールとしての有用性」
14:55-15:20	O-5 今元 泰（京都大学） 「ロドプシン光活性化の構造変化とダイナミクス」
15:20-15:45	O-6 松山 オジョス 武（理化学研究所） 「The action spectrum: lessons learned from melanopsin's tristability」
15:45-16:00	休憩
16:00-17:30	ポスター発表（奇数）
座長：井上 圭一（東京大学・物性研究所）	
17:30-18:15	基調講演・七田 芳則（立命館大学、京都大学・名誉教授） 「ロドプシン研究の潮流」
18:15-18:30	懇親会移動
18:30-20:30	懇親会（@柏キャンパス　カフェテリア）

9 月 6 日（金）

座長：今元 泰（京都大学）	
9:00- 9:25	O-7 山崎 洋一（奈良先端大学） 「水溶性光受容体 PYP の光化学反応と相互作用」

9:25- 9:50	O-8 須藤 雄気（岡山大学） 「微生物型ロドプシンによるボトムアップ型光操作ツール開発」
9:50-10:15	O-9 成 鍼（京都大学） 「チャネルロドプシンに関する理論研究」
10:15-10:30	休憩
座長：水谷 泰久（大阪大学）	
10:30-10:55	O-10 南後 恵理子（京都大学） 「X 線自由電子レーザーによるロドプシン類の分子動画解析」
10:55-11:20	O-11 藤澤 知績（佐賀大学） 「低温ラマン分光法によるナトリウムポンプロドプシンの初期構造変化の研究」
11:20-11:45	O-12 田原 進也（大阪大学） 「フェムト秒紫外誘導ラマン分光法による微生物型ロドプシンの超高速タンパク質応答の研究」
11:45-11:55	写真撮影
11:55-13:00	昼食
13:00-14:30	ポスター発表（偶数）
座長：須藤 雄気（岡山大学）	
14:30-14:55	O-13 八尾 寛（東京大学、東北大学・名誉教授） 「レチナールタンパク質の適材適所－オプトジェネティクスユーザーからの提言」
14:55-15:20	O-14 角田 聡（名古屋工業大学、JST・さきがけ） 「酵素型ロドプシンの分子機構」
15:20-15:45	O-15 塚本 寿夫（分子科学研究所、JST・さきがけ） 「無脊椎動物オプシンの物性を利用してイオンチャネルを光操作する」
15:45-16:00	休憩
座長：寺北 明久（大阪市立大学）	
16:00-16:25	O-16 菊川 峰志（北海道大学） 「微生物ロドプシンのホモ多量体形成の機能的意義」
16:25-16:50	O-17 村田 武士（千葉大学） 「耐熱性ロドプシンの立体構造と耐熱化メカニズム」
16:50-17:15	O-18 佐藤 恵太（岡山大学） 「Opn5 の分子機構多様性とその応用」
17:15-17:40	O-19 神取 秀樹（名古屋工業大学） 「ロドプシンを定義する」
17:40-17:50	閉会の辞

ISSP ワークショップ

ヘリウム危機の現状と今後の課題

URL: https://yamashita.issp.u-tokyo.ac.jp/ISSPWS191106/

【日程】2019 年 11 月 6 日（水）

【場所】東京大学物性研究所 6 階　大講義室

【主催】東京大学物性研究所

【共催】日本化学会、日本物理学会

【協賛】低温工学・超電導学会、応用物理学会

【研究会提案者】（物性研究所）森 初果、勝本 信吾、金道 浩一、近藤 猛、山下 穣、土屋 光、鷺山 玲子
（名古屋工業大学）大原 繁男（大阪大学）川村 光

ヘリウムが手に入らずに研究の継続が危ぶまれる「ヘリウム危機」が今起こっており、今後さらに深刻化する可能性が指摘されている。基礎研究にとってヘリウムは、水や電気と同じ「ライフライン」の一つであり、物性研究に限らず、化学や天文学など幅広い研究分野で欠くことのできないガスである。さらに、MRI を用いた医療や半導体、光ファイバーといった国内産業にとっても替えのきかない貴重なガスである。このヘリウムは 100%輸入に頼っているために、これまでにもたびたびヘリウムの輸入が不足する「ヘリウム危機」が起こっていた。しかし、これまでのヘリウム危機が関連施設の定期修繕やトラブルなどの一時的な原因で発生していたのとは異なり、今回のヘリウム危機は中国をはじめとする新興国における需要の増大とアメリカからのヘリウム供給の減少という構造的要因によって起こっており、今後より深刻化・長期化する恐れがある。

こうした中、研究機関における現在のヘリウムをめぐる状況と今後の対策を考えるために本ワークショップは開催された。プログラムでは研究の現場で今何が起きているかについて大学関係者からの講演があった後に、ガスレビュー社の小泉氏から業界全体を俯瞰した講演をいただいた。その後、ヘリウムリサイクルを推進するための規制緩和の可能性と、日本物理学会からの緊急提言のための講演があった。また、プログラム講演者以外の参加者からの発表やコメントなども全体討論として募り、ガス会社からのコメントや、琉球大学の液化機を利用した OIST のヘリウム液化の取り組みなどが紹介された。

研究発表を主体とした通常の物性研ワークショップとは大きく異なるテーマの研究会であったが、大学関係者だけでなく、ガス会社から関連業界、メディア関係者など様々な分野から約 120 名の参加者が集まった。様々な理由から、ヘリウムを多く利用する半導体などの関連業界からの講演をもらうことは叶わなかったが、当日参加者から光ファイバー業界におけるヘリウム再利用の取り組みについての紹介があるなど、非常に意義深い情報交換を行うことができた。また、本ワークショップをきっかけに、低温工学や天文学会の関係者とも交流を深めることができ、その後の緊急共同声明 (https://www.jps.or.jp/information/2019/12/helium.php) につなげることもできた。

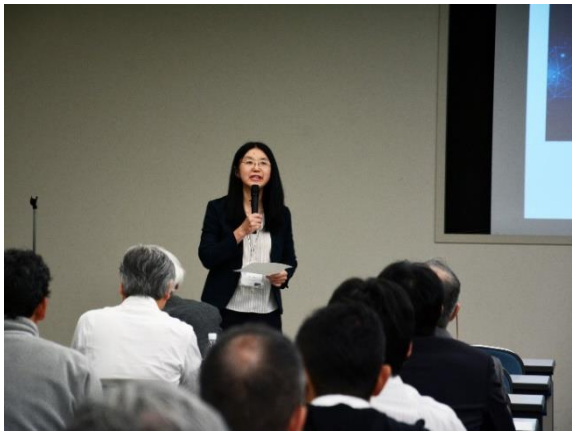
このワークショップを通じて非常に大きな注目を集めたトピックの一つが日本各地の研究施設にある既存の液化設備を生かしたヘリウムリサイクル構想であった。100%輸入に頼っている以上、ヘリウム危機の克服のためには国内でのリサイクル率を増加させる他ない。しかし、ヘリウムリサイクルのために蒸発したヘリウムガスを回収して再液化する施設を新設するためには億単位の多額の費用に、様々な法令上の許認可手続き、低温技術に熟練した技術職員の確保などが必要であり、そのハードルは極めて高い。そこで、研究機関における既存の液化施設を外部に開放することでヘリウムリサイクルをより効率的に進めようとする取り組みが進められている。ワークショップで紹介された、JAXA からのヘリウムガスを大阪大学で液化する取り組みや、OIST のヘリウムガスを琉球大学の液化機を利用して再液化する取り組みなどは今後のモデルケースとなるように思われた。さらに、石油や天然ガスの備蓄設備のように、こうした液化設備のある研究機関にヘリウム備蓄施設を増築することで、ヘリウム輸入の変動に備えることも今度の重要課題として盛んに議論された。

このヘリウム危機はヘリウムリサイクルに必要な技術開

発や制度改革を進める好機であると捉えることもできる。地球上におけるヘリウム資源が限られているのに対して、その替えのきかない特性から、今後もヘリウムの需要が高まることは必然である。このワークショップが、日本がヘリウムリサイクルの先進国となる契機となれば望外の喜びである。

【プログラム】

13:00	所長挨拶	
13:10 – 13:30	ヘリウム危機について	名古屋工業大学　大原　繁男
13:30 – 13:45	全国アンケート結果について	物性研　低温液化室　山下　穣
13:45 – 14:00	阪大での外部液化の取り組みについて	大阪大学　萩原　政幸
14:00 – 14:30	国家戦略としてのヘリウム備蓄～BLM を訪問して	東大低温センター　福山　寛
14:30 – 15:10	ヘリウムの世界需給と日本の調達見通し	ガスレビュー　小泉 善樹
	休憩（20 分）	
15:30 – 15:45	ヘリウムリサイクルに必要な規制緩和	物性研　低温液化室　土屋　光
15:45 – 16:00	ヘリウム危機に対する緊急声明案について	日本物理学会 副会長 勝本信吾
16:00 – 18:00	ガス会社からのコメント紹介、全体討論、フリーディスカッション	



物性研究所セミナー

標題：理論セミナー：Earth & Planetary Materials (to be) Explored by K and Fugaku Supercomputers and Quantum Beamlines

日時：2019 年 12 月 20 日(金)　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：飯高 敏晃

所属：理化学研究所

要旨：

Behavior of materials in deep Earth and planets, such as silicate minerals, iron alloys, water and hydrogen- and helium- gases in solid and liquid states, are still almost unknown. Our goal [1] is to establish the basic knowledge of these materials to understand the history of Earth and planets by combining the first principles quantum calculations on K and Fugaku Supercomputers with diffraction and spectroscopy measurements at quantum beamlines such as SPring-8, SACLA, and J-PARC.

In this talk I will introduce our calculation of X-ray Raman scattering spectrum of solid oxygen [2,3].

[1] Post-K Exploratory Challenge 1-1-C, “Structure and Properties of Materials in Deep Earth and Planets”. http://www.iitaka.org/~xmat/

[2] H. Fukui et al., PNAS, 201905771 (2019). http://dx.doi.org/10.1073/pnas.1905771116

[3] L. T. Anh et al., Sci. Rep. 9, 8731 (2019). http://dx.doi.org/10.1038/s41598-019-45314-9

標題：LASOR **セミナー：**Topological kagome magnet -Mn3Sn and Fe3Sn2

日時：2019 年 12 月 23 日(月)　午前 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)

講師：朱宮 奈那

所属：プリンストン大学

要旨：

Owing to the unusual geometry of kagome lattices, their electrons are useful for studying the physics of frustrated, correlated and topological quantum electronic states. In the presence of strong spin–orbit coupling, the magnetic and electronic structures of kagome lattices are further entangled, which can lead to hitherto unknown spin–orbit phenomena. In this talk, I will discuss two of the kagome magnets we studied, Mn3Sn and Fe3Sn2, using a scanning tunneling microscopy with a vector-magnetic- field capability and temperature control.

Mn3Sn is a strongly correlated antiferromagnet consisting of only kagome layers. We observe a pronounced resonance with a Fano line shape at the Fermi level resembling the Kondo resonance previously observed in some f-electron materials. The magnetic field and temperature dependence indicate its strongly interacting nature. Our new results uncover the emergent many-body resonance behavior in an antiferromagnetic topological material but without f-electrons.

Fe3Sn2 is a ferromagnet containing a kagome bilayer. We discover that its many-body electronic state couples strongly to the vector field with three-dimensional anisotropy, exhibiting a giant nematic energy shift. We further manipulate the nematicity with our vector magnetic field due to its giant spin-driven electronic responses, which points to the realization of an underlying correlated magnetic topological phrase. It provides new ways of controlling spin-orbit properties and exploring emergent phenomena in topological quantum materials [1].

[1] Yin, J., Zhang, S.S. et al. Nature 562, 91–95 (2018).

標題：ナノサイエンスセミナー：Nanoscopy of charge fluctuations in matter – Scanning Noise Microscope (SNoiM)-

日時：2019 年 12 月 26 日(木)　午後３時～午後４時

場所：物性研究所本館６階 第３セミナー室(A613)

講師：Dr. Qianchun Weng (**翁 銭春**)

所属：Surface and Interface Science Laboratory, RIKEN

要旨：

All material generates fluctuating electromagnetic (EM) evanescent field on its surface due to charge/current fluctuations, which are thermally agitated (thermal noise) or non-thermally excited (excess noise or shot noise). In general, current fluctuation (or noise) in a nanoscale region of the material carries key information of the local thermal/nonequilibrium phenomenon taking place at the given point [1]. In this seminar, I will describe an unprecedented novel microscope, called terahertz (THz) scanning noise microscope (Fig. 1(a)), which maps ultrahigh frequency (15-30 THz, 1 THz= 1012 Hz) current fluctuation with nanoscale spatial resolution. THz SNoiM is demonstrated to be a powerful and unique experimental tool for studying local nonequilibrium dynamics in a variety of material systems [2-4]. The example shown in Fig. 1(b) is the first direct visualization of hot electrons in a GaAs/AlGaAs quantum well (QW) device, which reveals the fundamental nature of non-local hot electron energy dissipation [4]. Physical processes probed by SNoiM are inaccessible with any other currently known methods. Particularly, it has been demonstrated [5] that conventional near-field microscope with external light excitation is unable to image the same phenomena that are visualized by SNoiM.

Reference:

[1] S. Komiyama, J. Appl. Phys. 125, 010901 (2019).
[2] S. Komiyama et al., arXiv: 1601.00368.
[3] Q. Weng et al., Nano Lett. 18, 4220 (2018).
[4] Q. Weng et al., Science 360, 775 (2018).
[5] Q. Weng et al., Appl. Phys. Lett. 114, 153101 (2019).

標題：理論セミナー：第一原理計算を用いた磁性体物性予測
日時：2019 年 12 月 27 日(金)　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：是常 隆
所属：東北大学理学研究科物理学専攻
要旨：

近年、ワイル点やベリー曲率といったバンドのトポロジカルな性質に着目した研究が盛んに行われている。強磁性体においては、これらは異常ホール効果や異常ネルンスト効果といった物理量につながることが知られている。このバンドのトポロジカルな性質は、第一原理的に得られたバンド構造を有効模型（タイトバインディング模型）で表すことによって、効率的に計算することが可能となる。

本セミナーでは、まずこのバンドのトポロジカルな性質と物性の関係[1]について概観し、強磁性体や Mn3Sn などにおける異常ホール効果や異常ネルンスト効果などの計算例を紹介する[2]。次に、この有効模型を作成する際に用いられる wannier90 と呼ばれるコードの最新版[3]について紹介し、これを用いた有効模型自動作成手法について説明する。この自動化手法を結晶構造データベースに適用して得られた強磁性体数千個に対する有効模型のリスト、およびそれを用いて得られた異常ホール効果、異常ネルンスト効果のデータベースについても紹介する。また、これらの物性値が結晶構造などの情報からどれほど予想できるのかを、機械学習を用いて解析した結果についても紹介する[4]。

[1] N. Nagaosa et al. Rev. Mod. Phys. 82 1539 (2010).
[2] M.-T. Suzuki et al. Phys. Rev. B 95 094406 (2017).
[3] G. Pizzi et al. Journal of Physics: Condensed Matter (2019). (arxiv:1907.09788).
[4] T. Koretsune et al. in preparation.

標題：ナノサイエンスセミナー：Programming electronic and spin states in 2D supramolecular architectures by modifications on the single atomic or molecular level
日時：2020 年 1 月 10 日(金)　午前 10 時 30 分～午前 11 時 30 分
場所：物性研究所本館 6 階　第 2 会議室(A635)
講師：Thomas A. Jung
所属：Paul Scherrer Institute and University of Basel, Switzerland
要旨：

Future quantum technologies rely on the understanding of the interaction between different electronic states in atoms or molecules. Surface supported atomic and molecular systems provide a base for such investigations with the particular advantage of addressability. In our work we establish on-surface architectures which exhibit extraordinary magnetic and quantum properties originating from the reduced dimensionality of the self-assembled and atomically precise architectures.

Quantum well arrays, exhibiting band-like electronic states [1] for example, can be produced by the interaction of porous on-surface networks with 2D Shockley-type surface states. These quantum wells have been modified by the adsorption / condensation of Xe atoms [2,3]. By designing the Xe filling pattern in the array, a quantum breadboard can be realized in remembrance of the breadboards used for testing electronic circuitry.

2D ‘checkerboard’ architectures of magnetic molecules containing different e.g. Fe, Mn spins, on exhibit particular magnetic properties and serve as templates for the modification of spins by e.g. ligands. On magnetic substrates their spin state is strongly determined by the substrate and can be selectively switched by ligation to e.g. NH3 [4]. On non-

magnetic Au(111), we have observed the first example of 2D ferrimagnetic long-range order and remanence due to the RKKY interaction mediated by the surface states of the support [5].

Self-assembled 2D architectures contribute to our understanding of fundamental interactions involved in low dimensional systems. In addition, we can put these in the framework of existing models towards their further development.

Reference

[1] Lobo-Checa, J. et al., Science 325, 300, (2009)

[2] Nowakowska, S. et al., Nat. Commun.
DOI: 10.1038/ncomms7071, (2015)

[3] Nowakowska, S. et al., Small 12, 3757, (2016)

[4] Ballav N., et al., JPCL, 4, 2303, (2013)

[5] Girovsky, J. et al., Nat. Commun.
DOI: 10.1038/ncomms15388, (2017)

標題：理論セミナー：Exploration on Deconfined Fractionalized Particles at Quantum Criticality: Fractional Chern Insulators and Quantum Magnets

日時：2020 年 1 月 14 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：Jong Yeon Lee

所属：Harvard University

要旨：

One of the most exotic phenomena in condensed matter systems is the emergence of fractionalized particles. However, until now, only a few experimental systems are known to realize fractionalized excitations. This calls for more systematic ways to find and understand systems with fractionalization. One natural starting point is to look for an exotic quantum criticality, where the fundamental degrees of freedom become insufficient to describe the system accurately. Furthermore, understandings in exotic quantum critical phenomena would provide a unified perspective on nearby gapped phases, i.e. a guiding principle to engineer the system in a desirable direction that may host anyons. In this talk, I would present my works on quantum phase transitions between fractional Chern/Quantum Hall insulators tuned by the strength of lattice potential [PRX 8, 031015 (2018)]. Here, the low-lying excitations are already fractionalized; therefore, the deconfined fractional excitations follows more naturally, which is described by Chern-Simons quantum electrodynamics. The numerical results using iDMRG as well as theoretical analysis of their emergent critical properties would be presented. In the end, I would discuss their spectroscopic signatures, providing a full analysis of experimental verification. If time allows, I would talk about my other recent works on quantum magnets in 1+1 dimension.

標題：ナノサイエンスセミナー：Chiral recognition, spin filtering and molecular machines in two-dimensional molecular systems

日時：2020 年 1 月 17 日(金)　午後 1 時 30 分～午後 2 時 30 分

場所：物性研究所本館 6 階 第 5 セミナー室(A615)

講師：Karl-Heinz Ernst

所属：Empa, Swiss Federal Laboratories for Materials Science and Technology and University of Zurich, Switzerland

要旨：

Molecular recognition among chiral molecules on surfaces is of paramount importance in biomineralization, enantioselective heterogeneous catalysis, and for the separation of chiral molecules into their two mirror-image isomers (enantiomers) via crystallization or chromatography. Understanding the principles of molecular recognition in general, however, is a difficult task and calls for investigation of appropriate model systems. One popular approach is thereby studying intermolecular interactions on well-defined solid surfaces, which allows in particular the use of scanning tunneling microscopy (STM). Examples of chiral amplification via the so-called 'sergeant-and-soldiers' effect as well as manipulation of chiral adsorbates via inelastic electron tunneling will be presented. In a Pasteur-type experiment at the nanoscale, molecules that constitute a dimer are spatially separated with a molecular STM tip and their absolute handedness is determined with submolecular resolution STM.

Moreover, we report spin-dependent filtering of electrons by monolayers of these helical molecules. Finally, the first successful electrical current-driven unidirectional motion of a synthetic molecule, the so-called nanocar, will be presented and compared to recent results obtained for smaller molecular machines propelled by inelastic electron tunneling.

標題：理論セミナー：Ab initio molecular properties on a quantum computer: Green's functions and response functions

日時：2020 年 2 月 14 日(金)　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：Taichi KOSUGI

所属：Tokyo Institute of Technology

要旨：

Since the information carrier of a programmable quantum computer is a set of qubits that exploits the principle of superposition, essentially parallel algorithms can exist and perform computation for classically formidable problems. Quantum chemistry is believed to be one of the most suitable research fields for quantum computation since its problem setting is quantum mechanical by definition. There exist multiple ab initio approaches to obtain the ground state of an interacting electronic system such as the variational quantum eigensolver (VQE) [1] and imaginary-time evolution [2]. Apart from which approach is adopted among them, the need for calculation of various physical properties of the target system arises. We proposed recently schemes for the construction of Green's function [3] and linear-response functions [4] of an interacting electronic system by using statistical sampling on a quantum computer. We performed classical simulations of such construction for molecular systems by comparing with the accurate ones based on the full configuration interaction calculations. The details of schemes and the results of simulations will be explained in the talk.

[1] Peruzzo et al., Nat. Commun. 5, 4213 (2014).
[2] Jones et al., Phys. Rev. A 99, 062304 (2019).
[3] Kosugi and Matsushita, Phys. Rev. A 101, 012330 (2020).
[4] Kosugi and Matsushita, arXiv:1911.00293

標題：セミナー：材料研究所の集客がなぜ４年で９倍増したのか ～若者が人生を変える科学広報とは～
日時：2020 年 2 月 20 日(木)　午前 10 時 30 分～午前 11 時 30 分
場所：物性研究所本館 6 階 大講義室(A632)
講師：小林 隆司
所属：物質・材料研究機構
要旨：

YouTube 登録者 10 万人超え。イベント 6 年連続集客記録更新…。

ＮＩＭＳは、地味で難解なはずの材料研究の世界に多くの若者を引き込み続けています。宇宙で大人気のＪＡＸＡをも超える高い訴求力を発揮しているため、Googleから表彰され、Yahoo！から提携を希望されるなど注目を集めています。

専門家以外の人に科学を伝えるとき、重要なのは「論理的」であることでしょうか。 本当はそれ以上に大切なのに、ほとんどの科学者が無視していることがあります。反対に、テレビ番組をつい最後まで見てしまう理由はなんでしょうか。答えは「逆算」ができているかどうかです。

考えたこともなかった、伝える技術。テレビが使うあの手とこの手、その一部をお伝えします。

「ＮＩＭＳのおかげで中学時代に興味を持ち材料系の大学に進学を果たした」「教科書を作って欲しい」「ＮＩＭＳで研究をしたい」などの投稿が、次世代を担う若者から続々と寄せられてくる秘密はいったいどこにあるのでしょうか。
ヒントは、難しい数式を避けるのではなく、その難解な数式を知りたくて仕方なくなるような『気持ちを作る』こと。

若者を惹きつけてやまないＮＩＭＳ広報が実践する「科学の伝え方」。この１時間で、あなたの持つ「コミュニケーション」の意味がガラリと変わるのではないでしょうか。本にも教科書にもない『伝える技術』。体感していただきましょう。

人　事　異　動

【研究部門等】

○令和元年 12 月 31 日付け

（辞　職）

氏　　名	所　　属	職　　名	備　　考
宮　町　俊　生	ナノスケール物性研究部門	助　　教	電気通信大学大学院情報理工学研究科 テニュア・トラック助教（卓越研究員）へ

○令和 2 年 1 月 1 日付け

（採　用）

氏　　名	所　　属	職　　名	備　　考
岡　　隆　史	機能物性研究グループ	教　　授	マックスプランク複雑物理学研究所、マックスプランク化学物理研究所 “Nonequilibirum Quantum Matter” group leader より

○令和 2 年 2 月 16 日付け

（採　用）

氏　　名	所　　属	職　　名	備　　考
栗　原　貴　之	附属極限コヒーレント光科学研究センター	助　　教	コンスタンツ大学　Zukunftskolleg Research Fellow より

○令和 2 年 2 月 28 日付け

（辞　職）

氏　　名	所　　属	職　　名	備　　考
Kang Woun	凝縮系物性研究部門	特任教授	梨花女子大学校自然科学大学物理学科　教授へ

東京大学物性研究所教員公募について

下記により助教の公募をいたします。適任者の推薦、希望者の応募をお願いいたします。

記

１．研究部門名等および公募人員数
　機能物性研究グループ、兼、附属極限コヒーレント光科学研究センター　　秋山研究室　助教１名
２．研究内容
　秋山研究室では、機能物性、非平衡および励起状態の物性を主題とし、半導体量子構造・半導体レーザー・太陽電池・生物発光などに注力した研究を行っている。秋山所員と協力し、所内・学内外の研究室との共同研究を積極的に推進し、先端レーザー分光・計測、物性物理・デバイス物理・光科学に挑戦する活力ある研究者を希望する。経験・過去の専門分野は問わない。
３．応募資格
　博士課程修了、またはこれと同等以上の能力を持つ方。（令和３年３月までに博士学位取得予定の方も可。）
４．任　　期
　任期５年。審査を経て、再任可。ただし、１回を限度とする。
５．公募締切
　令和２年５月２２日（金）必着
６．着任時期
　採用決定後なるべく早い時期、または令和３年４月１日
７．提出書類
　○推薦書または意見書（作成者から書類提出先に直送すること）
　○履歴書(下記 URL の東京大学統一履歴書フォーマットをダウンロードし作成すること)
　https://www.u-tokyo.ac.jp/ja/about/jobs/r01.html
　○業績リスト（特に重要な論文に○印をつけること）
　○主要論文の別刷（３編程度、コピー可）
　○研究業績の概要（２０００字程度）
　○研究計画書（２０００字程度）
８．書類提出方法 郵送又はメール送付
　郵　送：「秋山研究室 助教応募書類在中」と朱書し、簡易書留等配達状況が確認可能な方法で送付すること。
　メール：件名は「秋山研究室助教応募」とし、総務係までメールを送付すること。総務係から書類送付先フォルダを連絡するので、そちらに応募書類一式を保存すること。
９．書類提出先
　〒277-8581 千葉県柏市柏の葉５丁目１番５号
　東京大学物性研究所総務係
　電話：04-7136-3207　　e-mail : issp-jinji@issp.u-tokyo.ac.jp
10．本件に関する問い合わせ先
　東京大学物性研究所 機能物性グループ、兼、附属極限コヒーレント光科学研究センター　　教授　秋山 英文
　電話：04-7136-3385　　e-mail : golgo@issp.u-tokyo.ac.jp
11．選考方法
　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。
12．その他
　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。なお、お送りいただいた応募書類等は返却いたしませんので、ご了解の上お申込み下さい。また、履歴書は本応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。

令和２年２月４日
東京大学物性研究所長　　森　初果

編　集　後　記

今号から、前任の松田巌先生の後を引き継ぎ、広報委員として「物性研だより」を担当させて頂くことになりました。松田先生は、この「物性研だより」を現在のスタイルにリニューアルされた方であり、そのような方の後を引き継ぐというのは少々荷が重いようにも思いますが、この「物性研だより」が今後も物性研の研究成果や研究内容をよりわかりやすく伝え、より多くの人に読んでいただけるよう、微力ながら尽力させていただく所存です。

今号には、昨年の 3 月に定年退職を迎えられた嶽山正二郎の記事が掲載されています。嶽山先生が物性研に着任されたいきさつから、電磁濃縮法による 1200 テスラ達成までのご苦労、そして超強磁場物性科学への展望などが 4 ページ半に渡って書かれており、先生の超強磁場科学への想いが伝わってきます。作業服を着て講演された退職記念講演でのお姿も思い出されます。また、前任の松田巌先生と私も共同研究に参加した、グラフェン準結晶の記事も掲載されています。

ところで、今現在世間では、新型コロナウイルス感染症が広がり、これまでに経験したことが無いような深刻な事態に陥ろうとしています。東京大学でもその対応のための活動制限指針が発表され、物性研究所における研究活動も制限を余儀なくされようとしています。今後、このような事態がどのように収束していくのか、現時点では全く予想もつきませんが、一日も早く、この感染症による被害が最小限で収まり、平時と同様の研究活動を再開できることを願っています。

岡　﨑　浩　三

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