

BUSSEIKEN DAVOR 第60巻 第2号 2020年7月

キラル結晶の右手系・左手系で反転する放射状スピン構造を発見 反強磁性金属薄膜におけるテラヘルツ異常ホール効果の観測 1兆分の1秒で起こる超高速な磁性の変化を元素別に解明 表面弾性波によるスキルミオン生成 一発熱を抑えたスキルミオン生成の実現ー





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















contents

1	キラル結晶の右手系・左手系で反転する放射状スピン構造を	発見	
	场	逐野 昌人、近藤 猛	ī
4	反強磁性金属薄膜におけるテラヘルツ異常ホール効果の観測		-
	松田 拓也、神田 夏輝、松永 隆佑、肥	後 友也、中辻 知	1
7	1兆分の1秒で起こる超高速な磁性の変化を元素別に解明	山本 航平	:
9	表面弾性波によるスキルミオン生成		
	-発熱を抑えたスキルミオン生成の実現-	大谷 義近	:
12	第3回放射光科学賞受賞研究報告	辛 埴	i
18	第 24 回日本放射光学会奨励賞を受賞して	横山 優一	
20	NPSCS2020 の優秀ポスター賞を受賞して	小林 鮎子	-
22	リーディング大学院 (MERIT) での 5 年間	山田 昌彦	:
23	客員所員を経験して	中西 尚志	
24		近藤 浩太	
25		新部 正人	

【ISSP ワークショップ】

- 26 〇「次世代放射光へのイノベーション」 Innovations to the Next-Generation Synchrotron
- 28 【物性研究所セミナー】

【物性研ニュース】

- 29 〇人事異動
- 32 〇令和元年度外部資金の受入について

編集後記

物性研だよりの購読について

キラル結晶の右手系・左手系で反転する放射状スピン 構造を発見

極限コヒーレント光科学研究センター 坂野 昌人、近藤 猛

概要:

自然界には、右手と左手、あるいは右ネジと左ネジのよ うに、鏡に映した姿がもとの姿と重ならないものがあり、 これらの性質をキラルであるという(図1)。2 つの非等価 なキラルな結晶、いわゆる右手系と左手系の結晶は、自然 界において、生物学的、化学的、物理的にそれぞれ異なる 反応を示す。また、キラルな結晶構造の内部では、電気 と磁気がお互いに関係しあうことが知られている[1-3]。 一方、固体内電子の電気的・磁気的関係を結びつけるため には、スピン軌道相互作用が必要であり、原子番号の大き な重い元素を持つ化合物で特にその作用が強くなる[4-6]。 キラルな結晶構造を持ち、かつ強いスピン軌道相互作用を 合わせ持つ物質は、非磁性であっても、スピン流などの磁 気的性質を引き出し得ることから、スピントロニクス分野 で特に注目されている。しかしながら、その特異な電気磁 気特性の起源となるスピン偏極した電子構造を直接的に観 測した例がこれまでになく、キラル結晶内の電子とスピン の結合状態は未解明であった。

本研究では、キラルな結晶構造を有するテルル単体を研 究対象とし、スピン分解・角度分解光電子分光を用いて、 スピン構造の直接観測を行った。重元素であるテルル原子 は強いスピン軌道相互作用を有しているため、電子とスピ ンが強く結合した状態が期待される。我々は、熱濃硫酸で 表面処理した際にできる腐食孔の形によって右手系結晶と 左手系結晶を判別し、それぞれの試料に対して、詳細な電 子構造およびそれに付随するスピン偏極構造を観察した。

まず、左手系結晶に対してスピン分解・角度分解光電子分 光実験を行い、スピン構造を調べた。その結果、電子の z 方向の運動量が、z 方向のスピンのみと結合していること が分かった。通常、スピン軌道相互作用は、電子の運動量 と垂直な向きにスピンを結合させたがる性質がある。しか し、今回の結果は、それに反して、運動量と平行方向にス ピンが結合していることを示している。つまり、スピンが 運動量空間において放射状に広がる特異な振る舞いを同定 したことになる。さらに、右手系結晶の測定を行うことで、 左手系結晶とはスピン構造が反対向きになることを見出し、 キラル結晶に起因するスピンの性質を明らかにした[7,8]。



図 1. テルル単体の結晶構造。鏡写しの関係にある左手系結晶 (左上)と右手系結晶(右上)が存在する。それらは、熱濃硫酸によ る腐食孔の形(下段の赤枠)で判別することができる。

実験結果:

角度分解光電子分光(ARPES) 測定(hv= 63-93 eV)は、 KEK の Photon Factory にある BL28 で行ない、スピン分 解 ARPES 測定は、広島シンクロトロン放射光センター (HiSOR)の BL-9B で行なった。結晶のキラリティーは、 高温の濃硫酸によって形成される非対称なエッチピットを 観察することによって決定した(図1)。図 2(a-f)に、光の エネルギーを変えることで図 2(g)で色付けする運動量面を 網羅するバンド分散を示す。価電子帯は、H点近傍でフェ ルミレベルと交差するが、その頂点位置は H 点より僅か にずれる。一方、 $E-E_{\rm F}$ =-0.15 eV に達する 2 番目に高い エネルギーのバンド上部はちょうど H 点上に位置する。 $E-E_{\rm F}$ =-2.0 eV まで観測し得られたホール型のバンド分散 は、第一原理での計算結果と良く一致することを確認した。 スピンの自由度を考慮すると、これらは6つの孤立ペア状態 (H4、H5、および4つのH6バンド)に割り当てられる[7]。

1 物性研だより第 60 巻第 2 号



図 2. (a-f) (g) で色付けする運動量面上の様々な運動量カットで測定したバンド構造。(g) 3 次元的ブリルアンゾーンと投影された 2 次元 ブリルアンゾーン。(h) スピン分解 ARPES で測定した k 点(#1~#13 および#5'の青丸)。(i) z 軸に沿ったスピン磁気モーメントにつ いて hv = 18 eV で測定した左手系結晶のスピン分解エネルギー分布曲線。赤(青)色はスピンアップ(ダウン)成分を示す。赤丸と青丸は 強度ピークの位置を示す。(j) 価電子帯の ARPES 画像。白い線は (i) の測定カットを表す。赤丸と青丸は (i) で示すスピン分解スペク トルのピーク位置を示す。(k) スピン分解 ARPES 画像。左手系結晶に対するスピン分極の z 成分(P₂)をプロットしている。(l) 価電子帯 の k に沿って計算されたスピン分極(P₂)。(m)#5(H 点近傍)と#5'(H'点近傍)で左手系結晶に対し測定したスピン分解スペクトル、およ び右手結晶の#5(H 点近傍) で測定したスピン分解スペクトル。

エネルギー的に1番高いバンドと2番目に高いバンドは二 重群の表現(それぞれ H4 と H5)で記述されるためスピン 縮退が解ける。D3 対称性から、H 点では正味のスピン分 極を必要としないが、H 点から外れると有限のスピン分極 が発生することが期待される。

価電子帯のスピン分極を議論するために、スピン分 解 ARPES 実験を行った。使用した光子エネルギーは hv = 18 eVで、1番目および2番目にエネルギーの高いバ ンドがはっきりと観察された(図 2(j))。図 2(i)は、H 点周 りの様々な運動量kで測定された左手系結晶のスピン分解 ARPES スペクトル(特にここでは z 成分)を示している。 重要なことに、スピンアップ(赤)とスピンダウン(青)の強 度間で明確な違いを示し、2つの大小関係がH点を境に反 転している。一方、他のスピン磁気モーメント成分は、ス ピンアップとスピンダウンでほぼ同等の強度を示すことを 確認した。#1-#13 [図 2(h)の青丸]で測定された k 点は k_z 方向にほぼ平行に配置されているため、スピン分解 ARPES の結果は、最高エネルギーに位置する価電子帯の H点周りで、放射状のスピン構造が形成されていることを 示している。これは、キラルな結晶構造に特徴的なスピン の性質である。

実験的に決定されたスピン分極バンド分散を図 2(k)に示 す。これは、図 2(j)の ARPES 画像に対応するスピン分極 の z 成分(*P*₂)をマッピングしたものである。パネル上の赤 丸と青丸は、図 2(i)で示すスペクトルのピーク位置を記し ている。この測定結果は、図 2(l)の K-H-K(または *k*_z 方 向)に沿った計算結果と一致しており、1 番目および 2 番 目にエネルギーが高いバンドでそれぞれ外向きおよび内向 きに放射状のスピン構造が形成されることを示している。

ブリルアンゾーン中のH'点とH点は、同等ではない隅 に位置する(図2(h)参照)。これらの2つのk点は、時間反 転とD3対称性によって相互に関係付けられており、同じ 外向きの放射状スピン構造がその周りに形成されることが 期待される。図2(m) に示すように、同じ左手系結晶の実 験結果(H'点近傍の#5'とH点近傍の#5'で得られたスピン 分解ARPESスペクトル)から、確かにそれを確認できた。 キラル結晶特有の機能をさらに示すために、反対のキラリ ティーを持つ結晶(右手系結晶)も測定した。その結果、z 方向のスピン分極が左手系結晶の分極とは逆転しているこ とを観測した(図2(m))。つまり、右手系結晶のスピン構 造は左手系結晶の場合とは反対向きとなり、内向きの放射 状となることが明らかとなった(図3)。



図 3: テルル単体のスピン構造の概略図。矢印は スピンの向きを表している。左手系結晶(左)と右 手系結晶(右)は鏡写しの関係にあり、外向き・内 向きの放射状スピン構造が反転する。

まとめと今後の展望:

今回、最も単純なキラル結晶であるテルル単体を用いて、 キラルな結晶構造特有のスピン状態を実験的に解明した。 本結果を起点として、今後、様々なキラル結晶におけるス ピン状態の解明が進むものと考えられる。また、スピンが 電子の運動量と平行に向き放射状となる特異なスピン構造 からは、非従来型のスピントロニクス機能が創発できる可 能性があるため、キラル構造を有する物質をデバイス応用 させる発展研究が今後期待される。

謝辞:

本研究は理化学研究所の平山元昭研究員、東京工業大学 科学技術創成研究院の笹川崇男准教授、東京工業大学理学 院の村上修一教授、産業技術総合研究所の三宅隆研究チー ム長、東京大学の岩佐義宏教授、石坂香子教授、辛埴特別 教授、広島大学放射光科学研究センターの奥田太一教授ら の研究グループとの共同研究として行われました。この場 をお借りして御礼申し上げます。

- [1] L. D. Barron, Chirality 24, 879 (2012).
- [2] N. B. Baranova, Yu. V. Boddanov, and B. Ya. Zel'Dovich, Opt. Commun. 22, 243 (1977).
- [3] V. I. Belinicher and B. I. Sturman, Sov. Phys. Usp. 23, 199 (1980).
- [4] G. Dresselhaus, Phys. Rev. 100, 580 (1955).
- [5] E. I. Rashba, Sov. Phys. Solid State 1, 368 (1959).
- [6] R. C. Casella, Phys. Rev. Lett. 5, 371 (1960).
- [7] M. Sakano et al., Phys. Rev. Lett. 124, 136404 (2020).
- [8] J. Hugo Dil, Physics 13, 45 (2020).

反強磁性金属薄膜におけるテラヘルツ異常ホール効 果の観測

極限コヒーレント光科学研究センター 松田 拓也、神田 夏輝、松永 隆佑 量子物質研究グループ 肥後 友也、中辻 知

研究背景

物質が持つスピン自由度を活用したスピントロニクスデ バイスは、ハードディスクを始めとして我々の日常生活に 普及しており、現在も精力的に研究が進められている。既 存のスピントロニクスで用いられる代表的な材料は、スピ ンが一様な方向に揃い大きな磁気秩序(磁化)が現れる強磁 性体であり、磁化を情報の単位としてデータ処理が行われ ている。ただしデータ処理の速度は強磁性スピンの歳差運 動の速さであるギガヘルツ(GHz=10⁹ Hz)周波数で制限さ れている。近年、スピン情報処理のさらなる高速化を目指 す試みの中で、強磁性とは対照的に隣り合うスピンが互い に打ち消しあった反強磁性体が注目されている。反強磁性 スピンの歳差運動は強磁性スピンと比べて2-3桁ほど速く テラヘルツ(THz=10¹² Hz)周波数で駆動することが可能 である。さらに全体としての磁化がほぼゼロであるため漏 れ磁場が小さく隣接素子への磁気的影響が無視できること などから、反強磁性体は次世代の高速スピントロニクス材 料として期待されている。しかし反強磁性スピンの外場に 対する応答は強磁性スピンと比べて非常に小さいため、磁 気秩序の情報を読み出すことが難しく、これが反強磁性体 の実用化を阻んでいた。

2015年に中辻教授らのグループによって、マンガン (Mn)とスズ(Sn)の化合物である反強磁性金属化合物 Mn₃Sn が強磁性並みに大きな異常ホール効果を室温で示 すことが報告された[1]。Mn₃Sn は温度などに依存して 様々なスピン秩序が現れるフラストレーション磁性体の1 種であり、室温付近では積層カゴメ格子上のMn原子のスピ ンが ab 面内で逆 120 度構造と呼ばれるスピン配置をとる。 このときスピンが打ち消し合って全体としての磁化はほぼ ゼロであるが、複数のスピンがクラスター八極子という秩 序(図 1(a))を形成しているため、時間反転対称性が破れて いるという特徴がある[2]。これによって異常ホール効果



図1 室温における反強磁性金属 Mn₃Sn のスピン秩序と Mn₃Sn 薄膜におけるテラヘルツ周波数帯の異常ホール効果。 (a) Mn₃Sn の反強磁性スピン秩序。スピンの向きはすべて打ち消し合っているが、複数のスピンが集まった1つのユニット「クラスター 八極子」を単位として時間反転対称性を破る秩序を形成している。(b) Mn₃Sn 薄膜にテラヘルツ光を入射し、それが持つ交流電場に対し て異常ホール効果が生じると、反強磁性スピン秩序の向きに応じて、透過した光の偏光が回転する。青矢印は光の偏光方向を表す。 (c) 開発したテラヘルツ時間領域分光システムの偏光計測精度。(d) Mn₃Sn 薄膜を透過したテラヘルツ光の偏光回転角スペクトル。

のほか、異常ネルンスト効果[3]、磁気光学カー効果[4]が 相次いで報告されるなど、Mn₃Sn は反強磁性としての高 速スピン運動と強磁性に匹敵する外場への巨大応答の両方 を併せ持つ物質として現在大きな注目を集めている。 Mn₃Sn のスピン運動速度に相当するテラヘルツ周波数帯 における異常ホール効果の振る舞いを調べること、さらに テラヘルツの速さで磁気情報を高速に読み出すことは需要 な課題である。

本研究では、2018年に中辻教授らのグループが開発した高品質 Mn₃Sn 薄膜[5]を用いて、異常ホール効果をテラ ヘルツ周波数帯で観測する実験に取り組んだ。以下ではそ の実験結果について紹介する。

実験結果

テラヘルツ周波数帯の電気伝導計測を行うために、超短 パルスレーザーによってテラヘルツ光パルスを発生・検出 するテラヘルツ時間領域分光(THz-TDS)を用いた。THz-TDS は、Kramers-Kronig 変換なしに光学伝導度などの 応答関数の実部と虚部を計測できること、1 ピコ秒以下の時 間分解能で高速に伝導度を測定できることなどが挙げられ る。テラヘルツ光を Mn₃Sn 薄膜に入射した際に異常ホール 効果が生じると試料を透過した光の偏光面が回転すること に注目し(図1(b))、偏光回転を精密に計測することができる テラヘルツ偏光分解計測装置を開発した[6]。図 1(c)は本研 究で開発したシステムの偏光計測精度の評価を示しており、 0.5-1.5 THz の周波数帯において 20 分の積算時間で 0.05 mrad 以下という極めて高精度な分光系を構築した。この 光学系を用いて、室温で Mn₃Sn 薄膜を透過したテラヘル ツ光の偏光回転計測を行ったところ、図1(d)に示すように 4 mrad ほどの偏光回転角が観測された。クラスター八極

子秩序の異なった向きに応じて偏光回転が逆方向に生じる 振る舞いも確認されたほか、この観測された偏光回転角か ら異常ホール伝導度 $\sigma_{xy}(\omega)$ に換算すると $\sigma_{xy}(\omega) \sim 20 \Omega^{-1}$ cm⁻¹ ¹となり、直流電気抵抗測定で観測されていた値とよく一致 する。これらの結果はテラヘルツ周波数帯における異常 ホール効果が観測されたことを意味している[6]。

通常直流で計測される異常ホール伝導はキャリアが無散 逸に流れることが特徴であるが、周波数が高くなるといず れ損失が生じると考えられる。本研究では 6 THz ほどの 広い帯域にわたって異常ホール伝導度 σ_{xv}(ω)の計測が可能 なテラヘルツ偏光分解計測装置を構築し、広帯域測定を 行った[6]。図 2(a)は σ_{xy}(ω)の実部(無散逸電流)および虚部 (散逸電流)のスペクトルを示す。1THz付近の周波数にお ける $\sigma_{xy}(\omega)$ の虚部は 0.4 Ω^{-1} cm⁻¹ であり、実部に比べて十 分小さく、テラヘルツ周波数においてもほぼ無散逸な異常 ホール電流が生じることがわかった。一方、1 THz より高 周波で徐々に損失が目立ってくることが見いだされた。こ れはバンド間遷移の寄与が現れているものと考えられる。 またテラヘルツ異常ホール効果の温度依存性を計測したと ころ、室温から冷却すると 250 K 近傍で σ_{xy}(ω)が消失する ことを確認した(図 2(b))。これは、各 ab 面内の逆 120 度 構造のスピン配置が c 軸に沿って回転して螺旋状のスピン 秩序を形成するスピン再配置相転移が生じ、時間反転対称 性が回復する方向に働くためであると考えられる。

本研究のもう一つの特徴は、まったくのゼロ磁場下で異 常ホール効果が計測されたことにある。異常ホール効果自 体は本来磁場なしで起こる現象であるが、従来の直流電気 抵抗計測による異常ホール効果の測定では微弱な信号から 電極の接触抵抗の影響などを排除するために外部から磁場 を正と負の方向にそれぞれ与えてスピン秩序を再配置し、



図2 テラヘルツ時間領域分光で計測された異常ホール伝導度 σ_{vy}(ω)。 (a) 散逸性及び無散逸性の異常ホール伝導度の周波数変化。(b) テラヘルツ異常ホール伝導度の温度依存性。250 K 付近を境にした急激 な減少がスピン再配置相転移に対応すると考えられる。

その差分から異常ホール効果を検出するのが一般的である。 しかし本研究ではテラヘルツ周波数帯の光によって非接触 に計測を行うため、計測中に全く磁場を必要としない。そ の結果、いったん磁場を与えてから半年以上経過した Mn₃Sn 薄膜においても異常ホール効果を測定することが 可能となり、磁場を与えた直後と変わらない値を示すこと を確かめた。これは Mn₃Sn 薄膜における磁気秩序情報が 非常に長期間持続することを示している。

今後の展開

本研究では光学的に非接触な手法でテラヘルツ周波数帯 の応答を調べたが、最近では基板上でテラヘルツ電流の発 生から検出まで行ってホール伝導を観測する技術も報告さ れており[7]、Mn₃Sn の微小領域の異常ホール効果をオン チップで捉えることも可能になると考えられる。さらに高 強度テラヘルツ磁場を用いて反強磁性スピンの向きを非熱 的に高速に反転させる可能性も注目されており、今後テラ ヘルツ非線形応答の研究も興味深い。

また反強磁性体 Mn₃Sn が示す異常ホール効果は、その 発現機構自体が学術的にも興味が持たれているテーマであ る。これまでの研究で、Mn₃Sn がワイル粒子と磁性を併 せ持つ新しいトポロジカル物質であることが明らかになっ ており[8]、ワイル粒子の電磁応答を調べる上でも本研究 で開発されたテラヘルツ偏光回転を用いた分光手法が非常 に有効であると考えられる。本研究から1ピコ秒以下の非 常に短い時間で異常ホール効果を観測可能になったことを 示したため、物質の状態が高速に変化する非平衡状況下に おける時間変化を詳細に調べることが可能となった。異常 ホール効果の発現機構には、物質のトポロジーに由来する 内因的機構と、不純物に由来する外因的機構があることが 知られており、今後は非平衡状態における高速ダイナミク スを調べることでメカニズムが明らかになることが期待さ れる。

謝辞

本研究はジョンズホプキンズ大学の N. P. Armitage 教 授との共同研究である。また物性研究所の三輪真嗣准教授 および黒田健太助教との議論と、徳永将史准教授および木 下雄斗特任助教の実験協力のもと行われた。

また本研究は、JST さきがけにおける研究課題「高強度 テラヘルツ電場による量子多体系の非平衡物理の探索」 (研究代表者:松永隆佑)、JST-CREST における研究課 題「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」(研究代表者:中辻知)、並びに文部科 学省科学研究費補助金 基盤研究(B)における研究課題「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」(研究代表者:松永隆佑)、基盤研究(A)における 研究課題「ワイル磁性体における電気磁気応答の発現機構 の解明」(研究代表者:中辻知)および新学術領域(研究領 域提案型)「J-Physics:多極子伝導系の物理」における 研究計画班「A01:局在多極子と伝導電子の相関効果」 (研究代表者:中辻知)の一環として行われた。

- S. Nakatsuji, N. Kiyohara, and T. Higo, Nature 527, 212 (2015).
- [2] M.-T. Suzuki, T. Koretsune, M. Ochi, and R. Arita, Phys. Rev. B 95, 094406 (2017).
- [3] M. Ikhlas, T. Tomita, T. Koretsune, M.-T. Suzuki, D. Nishio-Hamane, R. Arita, Y. Otani, and S. Nakatsuji. Nat. Phys. 13, 1085 (2017).
- [4] T. Higo, H. Man, D. B. Gopman, L. Wu, T. Koretsune, Olaf M. J. van 't Erve, Y. P. Kabanov, D. Rees, Y. Li, M. T. Suzuki, S. Patankar, M. Ikhlas, C. L. Chien, R. Arita, R. D. Shull, J. Orenstein, and S. Nakatsuji, Nat. Photon. 12, 73 (2018).
- [5] T. Higo, D. Qu, Y. Li, C. L. Chien, Y. Otani, and S. Nakatsuji, Appl. Phys. Lett. 113, 202402 (2018).
- [6] T. Matsuda, N. Kanda, T. Higo, N. P. Armitage, S. Nakatsuji, and R. Matsunaga, Nat. Commun. 11, 909 (2020).
- [7] J. W. McIver, B. Schulte, F.-U. Stein, T. Matsuyama,
 G. Jotzu, G. Meier & A. Cavalleri, Nat. Phys. 16, 38 (2020).
- [8] K. Kuroda, T. Tomita, M.-T. Suzuki, C. Bareille, A. A. Nugroho, P. Goswami, M. Ochi, M. Ikhlas, M. Nakayama, S. Akebi, R. Noguchi, R. Ishii, N. Inami, K. Ono, H. Kumigashira, A. Varykhalov, T. Muro, T. Koretsune, R. Arita, S. Shin, T. Kondo, and S. Nakatsuji. Nat. Mater. 16, 1090 (2017).

1兆分の1秒で起こる超高速な磁性の変化を元素別 に解明

我々は、X線自由電子レーザーSACLAの硬X線のビーム ラインBL3において、強磁性合金FePt薄膜の時間分解磁 気円二色性(時間分解XMCD)測定に成功しました[1]。 FePt薄膜は、鉄と白金の両方が磁性を示すことが知られ ています。硬X線磁気円二色性測定により白金サイトの光 誘起磁気ダイナミクスを元素選択的な情報が初めて得られ ました。可視光レーザーによる時間分解磁気光学カー効果 の測定との比較により、鉄の方が白金に比べて高速に消磁 されることが示されました。本研究では、X線自由電子 レーザーの円偏光を制御する技術をSACLAに導入するこ とで、硬X線磁気円二色性の時間分解測定により、世界で 初めて非磁性元素である白金の1ピコ秒(1兆分の1秒)以 下の超高速な磁性変化を直接観測しました。

近年、光誘起スピンダイナミクスは、その非自明な過程の 解明という理学的な観点からのみならず、スピンの光制御 という応用の観点からも興味を持たれています。多くの磁 性体の光誘起スピンダイナミクスが多くの手法により調べ られてきた結果、さまざまな新奇な光誘起のスピンダイナ ミクス現象が発見されてきました。たとえば、光によって スピンの向きを反転・制御する全光学的磁化反転は、特に 強い注目を集めている現象の一つです。この現象は、外部 磁場を使わない非接触的なスピン制御を nm スケールで実 現できることから、磁気記録媒体への応用も期待されてい ます。FePt はこの現象を示す強磁性体のものとして興味 分子科学研究所 山本 航平

が持たれています。

今回我々が着目した FePt は白金が垂直磁気異方性の発現 に重要な役割を担っています。XMCD を利用した元素選 択的な時間分解測定は、主に 3d 元素 L 端の軟 X 線を用い て行われてきました。しかし、白金に関しては、充分な XMCD 強度を示す X 線領域は硬 X 線領域に存在するため、 時間分解 XMCD を利用した白金の磁性ダイナミクスに関す る研究例はこれまでありませんでした。そこで、我々は数 10fs の硬 X 線パルスが得られる SACLA BL3 において、ポ ンププローブ法を用いた、時間分解 XMCD を行いました。

測定セットアップを図1に示します。SACLA BL3のX線 は直線偏光しています。ダイアモンドX線移相子により左 右円偏光に変換します。得られた円偏光X線からチャンネ ルカット分光器により Pt L 端のX線をとりだします。試 料に X 線を入射し、蛍光 X 線を MPCCD (multi port charge coupled device)を用いて検出します。Zn フィル ターによる弾性 X 線のカット、MPCCD 検出器での波高 弁別により、Pt La の蛍光 X線を選択的に取得し、吸収量 としました。同軸に可視光レーザーが入射するようになっ ています。両パルスの間隔はタイミングモニターにより測 定され、ジッタが補正できるようになっており、時間分解 能は 50fs 程度になりました。



図 1:時間分解 XMCD 測定のセットアップ。SACLA から発生した幅 10 フェムト秒程度の X 線 (図中オレンジ色の線)と幅 30 フェムト秒程度のレーザー光 (赤線)を用いる。

結果を図2に示します。青が白金サイトの、赤が鉄サイト の磁化の変化を示します。強磁性 FePt 薄膜において鉄と 白金で異なる時間スケールのダイナミクスを示すというこ とがわかりました。最初にレーザーが照射されると、状態 密度の点から励起エネルギー程度の領域にあるが優先的に 励起されます。励起されたマジョリティスピンは super diffusive current として白金サイトに流れ込み、結果とし てこのような元素依存性が実現した可能性があると考えて います。 K. Yamamoto, Y. Kubota, M. Suzuki, Y. Hirata, K. Carva, M. Berritta, K. Takubo, Y. Uemura, R. Fukaya, W. Nishimura, K. Tanaka, T. Ohkochi, T. Katayama, T. Togashi, K. Tamasaku, M. Yabashi, Y. Tanaka, T. Seki, K. Takanashi, P. Oppeneer, H. Wadati, New J. Phys. 21 123010 (2019)



図2:時間分解XMCD 測定で観測された磁化の時間変化の様子。 遅延時間0でレーザーが試料に照射される。青が白金のXMCD 強度、赤が可視光磁気光学カー回転角、すなわち白金と鉄の磁化 を示す。

本研究で、X線自由電子レーザーを用いた硬X線磁気円二 色性による時間分解測定に成功し、強磁性 FePt 合金薄膜 における元素依存した光誘起磁化ダイナミクスを見出しま した。見出したダイナミクスは光誘起磁化反転などの FePt 薄膜での光誘起現象の解明に寄与すると思われます。

謝辞

本研究は筆者が東京大学物性研究所の和達大樹研究室 (現在:兵庫県立大学)に所属していた時に行ったものです。 高輝度光科学研究センター・久保田雄也、鈴木基寛、東京 大学物性研究所・平田靖透(現在:防衛大学校)、田久保耕 (現在:東京工業大学)、高エネルギー加速器研究機構・ 深谷亮、分子科学研究所・上村洋平(現在:ポールシェ ラー研究所)、理化学研究所・矢橋牧名、玉作賢治、兵庫 県立大学・田中義人、ウプサラ大学・Peter Oppenner、 東北大学金属材料研究所・関剛斎、高梨弘毅の各氏・各研 究グループとの共同研究です。

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」(JP19H05824)、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。

表面弾性波によるスキルミオン生成

- 発熱を抑えたスキルミオン生成の実現-

はじめに

近年、次世代の低消費電力・高密度・不揮発性のメモリ 素子の研究が盛んに行われている。その候補の一つが「ス キルミオン」と呼ばれる粒子状のスピン構造である[1]。ス キルミオンは、中心のスピンと外側のスピンの向きが反対 であり、その遷移領域はスピンの向きが連続的に変化した 構造をしている。この遷移領域のスピンの向きの変化の仕 方が異なるネール型、ブロッホ型、アンチ型など様々な型 のスキルミオンが存在し、どの型のスキルミオンが安定化 するかは、生成される物質の構造によって決まる[2]。

トポロジカル磁気構造をとるスキルミオンは、温度や磁 場といった外部からの乱れによって壊れにくく、低電流で 発熱を抑えて駆動されることから、スキルミオンを用いた 低消費電力・高信頼性素子の実現への期待が高まっている。 とりわけ、重金属と磁性金属の積層薄膜では、ジャロシン スキー守谷(DM)相互作用と呼ばれる、隣り合うスピンを 傾けようとする相互作用が作用するために、中間部分のス ピンが外側を向いた「ネールスキルミオン」が室温以上で も安定化することが明らかになっており、応用の観点から 注目を集めている。

一方で、スキルミオンを低消費電力素子に応用するには、 スキルミオンの駆動だけでなく、生成の際も発熱を抑える 必要がある。しかし、これまでの積層薄膜における電流を 用いたスキルミオンの生成方法では、発熱が大きく、これ を解決することが課題となっていた。加えてこの方法では、 薄膜を特殊な形状に加工する必要があり、薄膜の特定の部 分でしかスキルミオンが生成されないという問題もあった。

1.研究方法および結果

本研究では、上述の電流の代わりに「表面弾性波」と呼 ばれる物質表面を伝搬する超音波に着目した[3]。表面弾 性波は、電場をかけると伸び縮みする圧電材料上に形成さ れたくし形電極に交流の電場を印加することで、発熱を抑 えて励起することができる。また、表面弾性波はミリメー タオーダーという長い距離を伝搬することができる。さら に、表面弾性波による磁性材料のひずみとスピンとの間に は、磁気弾性結合と呼ばれる相互作用が存在することから、

東京大学物性研究所 大谷 義近

表面弾性波よって磁気構造を制御できることが知られている。

まず、図1に示すように白金(Pt)/コバルト(Co)/イリジウム(Ir)積層薄膜を成膜し、表面弾性波を励起するためのくし形電極を持つ素子に加工した。



図 1 素子構造の顕微鏡像:実験に用いた素子の顕微鏡像。 中央の赤の破線で囲まれた部分が Pt/Co/Ir 積層膜、両側が 表面弾性波を励起するためのくし形電極。

続いて、サーモグラフィカメラを用いて、くし形電極に 交流電場を印加することにより表面弾性波を励起したとき、 Pt/Co/Ir 薄膜の温度がほとんど上昇しないことを確認した (図 2)。



図 2 表面弾性波励起による温度上昇:(上)サーモグラフィカ メラによって撮影した、表面弾性波を励起する前(左)と励起 中(右)の温度の分布。薄膜の領域(白い四角)では温度の変化 がほぼないことが分かる。

(下)薄膜領域の平均温度を、表面弾性波を励起する交流信 号の強さに対してプロットしたグラフ。交流信号の強さを強 くしても、温度がほぼ変わらないことが分かる。

次に、磁気カー顕微鏡を用いて、表面弾性波を励起した ときの磁気構造の変化を観察した。図3に示すように、面 直方向に磁場をかけて、全てのスピンが同じ方向にそろっ た強磁性状態を作り、その状態で表面弾性波を励起すると、 スキルミオンが生成されることが分かる。



オン的な構造の部分だけすぐに消滅し、結果としてネール スキルミオンが形成されることが明らかとなった。



図 3 表面弾性波によるスキルミオン生成:カー顕微鏡を用い て撮影した、表面弾性波を励起する前(上)と励起中(下)の磁気 構造。一様なグレーの像(上)は強磁性状態を表す。白い斑点 (下)がスキルミオンである。磁場は面直方向にかかっている。

さらに、くし形電極にかける交流電場の周波数や強さに 対するスキルミオン生成の依存性を詳しく調べることで、 観測されたスキルミオンが表面弾性波により生成されるこ とを確認した。興味深いことに、表面弾性波の長い伝搬距 離を反映してスキルミオンが数百マイクロメートルにもお よぶ広い領域で生成される事が分かった。

実験的に観測された表面弾性波によるスキルミオン生成 の起源や詳細な過程を明らかにするために、数値計算をお こなった。図4に数値計算から得られたスキルミオン構造 の生成過程を示す。まず、磁気弾性結合を仮定することで、 表面弾性波によるスキルミオンを生成できることを確かめ、 その後、数値計算の結果を詳細に調べた。その結果明らか になったスキルミオンの生成過程は以下のとおりである。

表面弾性波を印加してから 0.6 ナノ秒後に磁気弾性結合 を通して空間的に不均一な有効トルクが生じ、不均一な磁 化の揺らぎが生じる。次にこの不均一な有効トルクにより スピンが局所的に反転する。このとき、反転した部分のス ピン構造は、ネールスキルミオン的な構造とアンチスキル ミオン的な構造の対構造となる。一方、積層薄膜ではネー ル型のスキルミオンは安定であるのに対し、アンチスキル ミオンは不安定なため、この対構造のうちアンチスキルミ

図 4 数値計算から得られたネールスキルミオン構造の生成過程 (上)表面弾性波による周期的なひずみ分布の時間変化(中)表面 弾性波の変化に対応する磁化状態。時間発展とともに磁気弾性 結合を通じて生じるトルクにより磁化が不安定になり、0.83 ナ ノ秒後にはスキルミオンとアンチスキルミオンの対構造の生成 から0.90ナノ秒後には(下)ネールスキルミオン構造に落ち着く。

2. まとめと将来展望

本研究では、重金属と磁性金属の積層薄膜では、上向き の中心部分から下向きの外側へと放射状にスピンの向きが 変わる「ネールスキルミオン」(図4下)が室温以上でも安 定化すること、および表面弾性波とスピンの相互作用に着 目し、発熱を抑えながら薄膜試料の広い領域にネールスキ ルミオンを生成することに成功した。現在のところ、本研 究で示したように表面弾性波のスキルミオンの生成は、実 現したが、スキルミオンの駆動は未解決である。このよう に表面弾性波を用いたスキルミオンの制御に関する研究は、 端緒についたばかりである。上述の課題を解決できれば、 スキルミオンを比較的に低いエネルギーで生成することが できることから、低消費電力素子の実現に大きく貢献する と考えている。

謝辞

本研究成果は、理化学研究所量子ナノ磁性研究チー ム:基礎科学特別研究員 横内智行氏(現在東大総合文化 助教)、同チーム:研究員 Rana Bivas 氏、理化学研究所 創発光物性研究チーム:チームリーダー 小川直毅氏、東 京大学 大学院工学系研究科 物理工学専攻:准教授 関真 一郎氏、物質・材料研究機構 磁性スピントロニクス材料 研究拠点磁気記録材料グループ:研究員 杉本聡志氏、 スピン物性グループ:グループリーダー 葛西伸哉氏との 共同研究によるものです。本研究は、文部科学省科学研究 費補助金 新学術領域「ナノスピン変換科学」研究計画班 「A01:磁気的スピン変換(研究代表者:大谷義近)」(No. JP26103002)の一環として行われました。

- A. Fert, V. Cros, & J. Sampaio, Skyrmions on the track. Nat. Nanotech. 8, 152–156 (2013).
- [2] N. Nagaosa, & Y. Tokura, Topological properties and dynamics of magnetic skyrmions. Nat. Nanotech. 8, 899-911 (2013).
- [3] T. Tokouchi, S. Sugimoto, B. Rana, S. Seki, N. Ogawa,
 S. Kasai, & Y. Otani, Creation of magnetic skyrmions by surface acoustic waves. 15, 361–366 (2020).

.....

第3回放射光科学賞受賞研究報告

2020年1月の放射光学会年会にて、第3回放射光科学賞 を受賞いたしました。本賞は、放射光科学の進展に大きく貢 献したものに与えられるとあります。第1回は北村英男氏、 第2回は雨宮慶幸氏に続く3回目です。物性研だよりに寄 稿しないかと依頼されましたが、放射光学会誌に既に同様の 報告記事を書いていますので、両方の編集部の了解を得て、 放射光学会誌(33号2巻142ページ、2020年)の記事を基 に、手を入れた記事を以下に掲載させていただきました。

軟X線放射光を用いた先端電子状態分光の開発と 物性研究の開拓

軟X線の定義は余りはっきりしないが、いちばん広く考 えると 10eV くらいから 2000eV くらい(1000Åくらいか ら 6Åくらい)である。固体中の電子の持つ波長と同じく らいのスケールを持つために、電子状態を観測するのに もっとも適している光である。特に、運動量空間での電子 の情報は、角度分解光電子分光や角度分解非弾性散乱でな くてはほとんど実験ができないと言ってもよい。固体物理 研究者が普段用いている他の実験方法ではほとんど不可能 で、軟X線分光の独壇場と言っても良い。従って、固体物 理ではもっとも強力な実験方法と言っても良い。しかし、 他の実験手段よりも分解能が余り良くないということと、 超高真空が必要であるためにハンドリングしにくいという 欠点があった。筆者は、たまたま、光電子分光や共鳴非弾 性散乱(RIXS)が発展し始める黎明期を過ごしてきた。黎明 期とは苦しかったが楽しい時期でもある。本稿では、光電 子分光とRIXSの黎明期がどんな様子だったかを述べたい。

1. SOR-RING で始まった軟X線放射光を用いた 先端電子状態分光

SOR-RING(表紙写真)とは 1970 年代に、東京都田無市(現在は西東京市)にあった世界で最初に物性研究用に建設された放射光加速器施設である。当時、日本は、先人たちの努力によって放射光の先進国であった。現在、SOR-RING は、シャットダウンしており、歴史的資産として SPring-8 の普及棟に、見学用として飾られている。

東京大学・総長室・特別教授室 辛 埴

直径およそ 4m の放射線シールド無しのむき出しの放射光 施設である。あまりにも小さいので、放射光リング全体を 見渡すことがいつでも出来た。私は、SOR-RING で物性 研究が始まった頃の大学院生だった。元々、当時、六本木 の物性研で華麗に行われている磁性や光物性の研究を大学 院で行うつもりだった。六本木の物性研では世界でも最先 端の電子状態研究が行われていた。しかし、当時の放射光 科学のレベルはそれらの物性研究には全く及ばなかった。 私の勘違いかもしれないが、放射光をやっているというだ けで、物性研究をまともにやっていないような偏見が有っ たように思い、華麗な物性研究をしている六本木の人たち に対していつも気後れしていた。

最初、大学院に入ったときは、三宅・加藤分光器¹⁾ (三宅和夫先生と加藤利三先生が考案した分光器でその後、 海外で開発されたフリッパー分光器や SX700 分光器の原 型である)という古い分光器を改造することから始めた²⁾。 六本木で行われている磁性や光物性の研究とはほど遠かっ た。角度分解光電子分光(ARPES)というものがアメリカ にあるらしくバンド構造が直接分かると言うことは、毎週 の輪講の論文で学んでいた。もちろん SOR-RING でも角 度分解光電子分光を行う事は重大な使命であった。最初は、 2 重円筒鏡型角度分解光電子分光器で、次は、回転型の静 電半球光電子分光器(村田好正先生と、大門寛氏の自作 だったかと思う)で、実験した³⁾。しかし、結局、卒業す るまで角度分解光電子分光でデータを取ることは全く出来 なかった。SOR-RING は輝度が全く足りず、暗すぎて角 度分解までは出来なかったのである。それどころか、角度



図1 モット転移を観測したかったが、分解能が悪いために、 遷移金属化合物の光電子スペクトルは全く温度変化しなかった。 スペクトルの格好が花札の坊主が似ていることと、釣りのボ ウズ(魚が釣れなかったことを言う)の3つをかけて、「今日も ボウズだった」と、毎日、自虐的に冗談を言っていた SOR-RING 時代。 積分型の普通の光電子分光でも強度や分解能が全く足りな かった。博士課程のテーマとして、六本木の物性研で流 行っていたモット転移に興味を持って、直接、金属絶縁体 相転移を光電子分光で見てみようと散々色んな物質を試み た。失敗の連続でその影も形も見ることは出来なかった (図 1)。悪戦苦闘の上、私が博士課程の終盤で、やっと、 酸化バナジウムという物質でモット転移の尻尾をつかむこ とが出来た。温度によって、フェルミ準位付近の状態密度 の変化を観測することができ、やっと、酸化バナジウムの 物性と軟 X 線分光がコンシステントになった⁴⁾。現在ほど ではないが、先端電子状態の尻尾くらいはつかむことが出 来るようになったのである。

実は、輝度が低くても、光電子分光器の分解能が悪くて も、角度分解が出来なくとも、出来るサイエンスがあった。 共鳴光電子分光である。共鳴光電子分光とは、放射光の励 起エネルギーを変えながら光電子スペクトルを測定するこ とである。放射光以外の軟X線光源では、現在でも不可能 な実験である。遷移金属化合物を例にとると、ちょうど内 殻の共鳴エネルギーのところで、オージェスペクトルとサ テライトスペクトルが重なり、図2に示すように3d電子 の部分状態密度を反映してスペクトル強度が共鳴的に増え る現象である 5)。共鳴光電子分光による結論は、物性研究 者からは、当時、余り重要であると考えられていなかった。 筆者も当たり前すぎて重要であるとは思っていなかったが、 後に、これが物質の電子構造の重大な発見につながった。 藤森淳氏らによる電荷移動物質の発見である。これまでの 常識にとらわれずに、実験結果を素直に見れば、実は、サ テライトとよばれるものが 3d バンドであり、最初、フェ ルミ準位直下にあるため、3d バンドと考えられていたバ ンドは電荷移動バンドと呼ばれるものであった 6)。この発 見により、銅酸化物高温超伝導体も電荷移動物質の1種で あると考えられ、その本質を解明する上で極めて重要と なった。今となってみれば、SOR-RING における最大の 発見は、普段我々が見過ごしていたところにあった。

2. 光電子分光

光電子分光が、先端電子状態分光の手段となりえるため には、何よりも高分解能が重要である。ちょうど、高温超 伝導体の発見に伴って、分解能が 100meV を切り出すと、 目に見えて ARPES が物性研究に有効であることが分かり だしてきた。特に、10meV を切り出すと、数ある物性研 究の手段の中で、もっとも有力な実験手段のうちの1つと なることは、今やほとんど常識になりつつある。



それでは、分解能の限界はどこにあるだろうか?図3は、 分解能の歴史をプロットしたものである。2000年くらい まで、分解能が飛躍的に上がって来たが、それ以降は、分 解能に限界がありそうである。実際、分解能 1meV 以下 を公表している放射光施設は存在するが、実際の ARPES 測定では5meV程度が限界である。この分解能の限界は、 主として、光電子のクーロン力に起因するスペースチャー ジ効果が原因であることが分かっている。実際に、放射光 光源のパラメータを入れて計算すると分解能は、数 meV くらいとなる [¬]。スペースチャージ効果は光源の性質に直 結した物理現象なので、回避することは出来ない。放射光 光源の性質を 100%知った上でないと、分解能 1meV を 切ることは容易ではないと思われる。

分解能以外のもう1つの光電子分光の発展は、表面が清 浄でない試料の光電子分光測定を可能にすることである。 これは、光電子分光の可能性を大いに広げることになる。



特に、産学連携への道筋をつけることになる。そのために は光電子のバルク敏感性を利用することである。10eV 以 下の光か硬X線を使った光電子分光の開発が必要である。 10eV 以下の光の利用に関してはレーザー光が放射光より 圧倒的に有利であるが⁸、ここでは割愛する。硬X線を用 いた超高分解能光電子分光の開発は、SPring-8 で急速に 発展した。ほとんど、日本が発祥の分光法と言っても良い。 硬 X 線光電子分光は、石川哲也氏のグループにより、 SPring-8の高輝度硬X線を利用した高分解能分光ビーム ラインの開発があって初めて可能になった 9 (図 4)。特に、 高エネルギー分解能で微小スポットサイズが可能になった ことが最大の理由である。一方、高田恭孝氏は数度の極端 斜入射配置を取ることによって、光電子強度が2桁近く上昇 することを明らかにし、クロスセクションが小さいという 硬 X 線光電子の最大の欠点を克服することに成功した 10) (図 5)。この微小スポット、極端斜入射配置のメリット は、硬 X 線だけではなく、軟 X 線でも成功を収めている。 室隆桂之氏や大橋治彦氏らが建設した SPring-8・ BL25SU では、軟 X 線でも VUV 並に ARPES ができるこ とが明白になっている 11)。



3. 軟X線非弾性散乱(RIXS)

博士課程を出た後に、東北大の助手になったために、し ばらく、放射光とは無関係な研究をしていたが、再び、物 性研の SOR 施設に戻り、新鮮な気持ちで、放射光を見直 す機会を得た。8 年のあいだに放射光はとんでもなく進歩 していた。軟X線の分野では、アンジュレータの出現と、 高分解能光電子分光器の著しい発展である。その結果、放 射光を用いた光電子分光の分解能は図3のように劇的な変 化を遂げていた。 東北大時代は、非線形ラマン散乱の研究をしていたが、 アンジュレータ光がレーザー並みの高輝度になっているこ とを知ったために、光散乱実験が放射光でも可能ではない かと思った。ちなみに放射光 RIXS もレーザーラマン散乱 も光学プロセスとしては同じである。

近代的な RIXS は、物性研に戻る直前に出版されていた 1988 年の Nordgren の論文が最初かと思われる¹²⁾。TiN の RIXS を行う事によって N2 p 状態密度と Ti3d 部分状態 密度を分離して観測できた。Nordgren 自身は、RIXS と 言うよりも N の K 殻と Ti の L 殻を利用した蛍光と思って いた節がある。実際、論文のタイトルに蛍光を用いている。

ラマン散乱と RIXS との間では、もっとも大きな違いが 2つある。図6のように、1つは RIXS では内殻を用いた 共鳴効果を用いるために、元素選択性があることである。 共鳴ラマン散乱というのはあるが、内殻を利用することは 出来ない。もう1つは、軟X線そのものは運動量を持つた めに、散乱角を振ることによって素励起の運動量依存性が 測定できるようになる。ラマン散乱(ブリルアン散乱)でも マグノンなどのごく小さい運動量を検知することは可能で あるが、ブリルアンゾーンの全運動量空間で観測すること は不可能である。現在では、RIXS の高分解能化が著しく、 世界中で競争になっている。その結果、phonon、マグノ ン、d-d遷移、オービトンに至まで、ほとんどの素励起の 運動量依存性が報告されている¹⁴⁾。RIXS は固体中の素励 起を観測する万能の測定装置である。今後は、未知の素励 起も観測されるかもしれない。これらの素励起は、これま での実験では観測することが難しかったもので、驚きの連 続であると言っても良い。詳細は、割愛させていただくが、 他に多数の論文が出版されているのでそちらを参照された い¹⁴⁾。更にRIXSにはラマン散乱と同じように選択則は存 在するはずであるが、軟X線では良い偏光子があまりない ためにラマン散乱ほどは進んでいない。この点ではラマン 散乱よりも遅れている。いずれも基本的に4重極子成分の 揺らぎによる素励起である。

ちなみに、RIXS は、歴史的に、表 1 のように様々な名称を用いられてきた。表 1 では、用いられてきた名称を大雑把であるが、古い順番に並べた。小谷章雄先生と私が、 RIXS のレビュー¹³⁾を書いたときに、RIXS という名称をこれまで軟X線ではほとんど用いられていなかったが RIXS に統一することにした(用語の統一は Review of Modern Physics の使命だそうである)。今では、RIXS が 共通の用語として世界中で統一されている。



- (Resonant) Soft X-ray Fluorescence Spectroscopy
- (Resonant) Soft X-ray Emission Spectroscopy
 (SXES)
- (Resonant) Soft X-ray Raman Scattering
- (Resonant) Inelastic Soft X-ray Scattering (RIXS)
- 表 1 すべて同じ RIXS を意味する様々な用語。現在は RIXS に統一されている¹³⁾。

一方、RIXS の新しい使い方として、原田慈久氏と徳島 高氏らは、独自の溶液セルを開発し¹⁵⁾、液相物質の電子 状態を観測する道を拓いた。特筆すべき成果として水 ^{16,17)}と金属タンパク質¹⁸⁾の研究が挙げられる。水がミク ロに不均一な水素結合分布を持っていることを明らかにし た研究は、最初の出版から¹⁰年を経てようやくその解釈 が正しいことが証明されつつある¹⁸⁾。一方、酸素貯蔵機 能で知られる金属タンパク質ミオグロビンの反応中心にあ る鉄イオンの価数とスピン状態を決定した研究では、共同 研究者の理論家とともにクラスター計算手法を拡張し、鉄 が希薄磁性半導体中の遷移金属イオンに近い拡張 Haldane-Anderson モデルで記述される状態にあること を示した¹⁶⁾。このように、金属タンパク質の活性部位の 電子状態について従来の常識を超えた新しい知見を与える 可能性を、放射光を用いた分光計測技術によって拓いた。



4. おわりに

今回、放射光科学賞を受賞できたことは、大変な名誉で ある。たくさんの共同研究者に感謝したい。軟X線は、可 視光やX線に比べると光学素子や検知器などが難しく、未 解決な問題が山のように残っている。また、真空なども、 取り扱いがいちばん難しい光領域である。逆に言うと、分 光学や計測法、検知器などの、未開の分野がほとんど無限 に広がっている分野である。若者が大活躍できる素地が十 分にある。また、幸いにして、新しい放射光光源の開発が 始まっているので、これをチャンスとして、これまでのも のにとらわれない新しい軟X線科学を創生していってもら いたい。先端物性を行うためには、まず、分光学のブレー クスルーが必要である。黎明期とは苦しいが楽しい時期で もある。この分野の飛躍的な発展を望んでいる。

参考文献

- K.Miyake, R.Kato, H.Yamashita, Science of light,18(1969)39.
- 辛埴、菅滋正、軌道放射物性研究施設利用者ハンド ブック(1979) 70.(絶版)
- S.Suga, M.Taniguchi, S.Shin, H.Sakamoto, M.Yamamoto, S.Seki, Y.Murata, and H.Daimon, Nucl. Instrum. & Methods 222 (1984) 80.
- S.Shin, S.Suga, M.Taniguchi, M.Fujisawa, H.Kanzaki, A.Fujimori, H.Daimon, Y.Ueda, K.Kosuge, and S.Kachi, Phys. Rev. B 41 (1990)4993.
- Kakizaki, K.Sugeno, T.Ishii, H.Sugawara, I.Nagakura, and S.Shin, Phys. Rev. B28 (1983) 1026.
- Fujimori and F.Minami, Phys.Rev.B 30 (1984)957.
 A. Fujimori, M. Saeki, N. Kimizuka, M. Taniguchi and S. Suga, Phys.Rev.B 34, (1986)7318.
- 7) P.Balzer and S. Shin, Unpublished
- T.Shimojima1,K.Okazaki,S.Shin, J.Phys.Soc.Jpn, 84, (2015)072001.
- T. Ishikawa, K. Tamasaku and M. Yabashi *et al.*, Nucl. Instrum. Methods A547, (2005)42.
- 10) Y. Takata, K. Tamasaku, T. Tokushima, D. Miwa, S. Shin, and T. Ishikawa, M. Yabashi, K. Kobayashi, J. J. Kim, T. Yao, T. Yamamoto, M. Arita, H. Namatame and M. Taniguchi, Appl. Phys. Lett., 84, (2004)4310. Y Takata, K Tamasaku, Y Nishino, D Miwa, M Yabashi, E Ikenaga, K Horiba, M Arita, K Shimada, H Namatame, H Nohira, T Hattori, S Södergren, B Wannberg, M Taniguchi, S Shin, T Ishikawa, K Kobayashi, J. Electron Spectrosc. Relat. Phenom. 144 (2005)1063. Y.Takata, M.Yabashi, K.Tamasaku, Y.Nishino, D.Miwa, T.Ishikawa, E.Ikenaga, K.Horiba, S.Shin, M.Arita, K.Shimada, H.Namatame, M.Taniguchi, H.Nohira, T.Hattori, S.Sodergren, B.Wannberg, K.Kobayashi, Nucl. Methods Phys. Res., Instrum. Section A 547(2005)50.
- Unpublished. 以下の論文に、一部記述がある。T. Kinoshita, T. Muro, T. Matsushita, H. Osawa, T. Ohkochi, F. Matsui, H. Matsuda, M. Shimomura, M. Taguchi, and H. Daimon: Jpn. J. Appl. Phys. 58, (2019)110503.

- J-E.Rubenssson, N.Wassdahl, G.Gray, J.Rindstedt, R.Nholm, S.Cramm, N.Martensson, J.Nordgren, Phys. Rev. Lett. 60(1988)1759.
- 13) Kotani and S.Shin, Rev. Mod. Phys. 73 (2001) 203.
- L.Ament, M.Veenendaal, T.Devereaux, J.Hill, J.Brink, Rev. Mod. Phys. 83 (2011) 705.
- T.Tokushimaa, Y.Harada, Y.Horikawa,
 O.Takahashi, Y.Senba, H.Ohashi, L.Pettersson,
 A.Nilsson, S.Shin, Journal of Electron Spectroscopy and Related Phenomena 177 (2010) 192
- T.Tokushima, Y.Harada, O.Takahashi, Y.Senba,
 H.Ohashi, L.G.M.Pettersson, A.Nilsson, S.Shin,
 Chemical Physics Letters 402 (2008) 387.
- K.Yamazoe, J.Miyawaki, H.Niwa, A.Nilsson, and Y. Harada, J. Chem. Phys. 150, 204201 (2019);
- Y.Harada, M.Taguchi, Y.Miyajima, T.Tokushima,
 Y.Horikawa, A.Chainani, Y.Shiro, Y.Senba,
 H.Ohashi, H.Fukuyama, S.Shin, Journal of
 Physical Society of Japan., 78 (2009) 044802
- 19) Nilsson and L.G.M. Pettersson, Nature Commun.6(2015)1.

.....

第24回日本放射光学会奨励賞を受賞して

公益財団法人高輝度光科学研究センター 博士研究員 横山 優一

受賞対象となった研究は「共鳴非弾性軟X線散乱による 電子状態解明およびコヒーレント軟X線散乱による時空間 分解計測の開発」です。この研究は放射光の高輝度X線が 持つエネルギー可変性・パルス性・コヒーレンスなどを活 かしたもので、エネルギー分解・時間分解・空間分解とい う計測次元の異なる3つの研究テーマから構成されており ます。以下で研究テーマについて簡単に紹介させていただ きます。

エネルギー分解による計測では、スピン状態について長 年議論が続いていた遷移金属酸化物 LaCoO3 を研究対象に しました。従来型のX線吸収計測ではスピン状態の判別が 困難でしたが、コバルト L3 端の共鳴を用いた非弾散乱計 測を行うことで外的な刺激(特に歪み)によるスピン状態の 違いを観測することに成功し、理論計算と合わせることで スピン状態を特定することができました[1]。一方、時間 分解計測では、私が博士課程で在籍していた和達研究室の メンバーと共同で大型放射光施設 SPring-8 の東京大学物 性研ビームライン(BL07LSU)に時間分解軟 X 線回折・吸 収分光装置を立ち上げ、電子状態や構造のダイナミクスを X線領域で計測可能なシステムを構築しました[2]。この 装置を用いて、4f希土類金属の Eu 化合物を対象に、光誘 起価数ダイナミクスを放射光X線の時間幅であるピコ秒ス ケールで明らかにすることに成功しました[3]。最後の空 間分解計測では、半径が数 10 から数 100 nm の渦状磁気 構造である磁気スキルミオンを観測対象としました。磁気 スキルミオンは、微小な電流で動かすことができる安定的 な構造体のため、次世代の情報媒体として期待されていま す。この磁気スキルミオンの挙動を観測可能な手法の一つ がコヒーレントなX線を用いた回折イメージング法です。 計測により得られるのは2次元回折像ですが、計測で失わ れた位相情報をアルゴリズムによって回復させることで実 空間像を再構成することができます。私達はこの位相回復

アルゴリズムにおいて、情報学的手法のスパースモデリン グを取り入れることに成功し、ノイズが大きく統計精度の 悪いデータや情報欠損により不完全なデータからでも実空 間像の再構成を可能にしました[4]。磁気スキルミオンの 挙動観測においては繰り返し計測ができずX線パルス1発 (シングルショット)での計測が重要となるため、本手法は 有効と考えられます。

将来的には複数の次元を組み合わせた計測に取り組みた いと考えています。注目しているのは、放射光よりも高輝 度かつ短パルスでコヒーレンスが高い X 線自由電子レー ザーを利用した時空間分解計測です。開発したスパース位 相回復アルゴリズムをX線自由電子レーザーと組み合わせ ることによってシングルショットによる磁気スキルミオン の挙動観測を実現させたいと考えております。

ここで紹介させていただいた研究は多くの方々との共同 研究によって成し遂げられました。博士課程の指導教員で あった和達大樹教授(現:兵庫県立大学)、旧和達研究室メ ンバーの平田靖透博士(現:防衛大)、田久保耕博士(現: 東工大)、山本航平さん(現:分子研)、物質・材料研究機 構でご指導いただいた山崎裕一博士および共同研究してい ただいた皆様に心から感謝申し上げます。

[関連論文]

- "Tensile-Strain-Dependent Spin States in Epitaxial LaCoO₃ Thin Films", Y. Yokoyama, Y. Yamasaki, M. Taguchi, Y. Hirata, K. Takubo, J. Miyawaki, Y. Harada, D. Asakura, J. Fujioka, M. Nakamura, H. Daimon, M. Kawasaki, Y. Tokura, and H. Wadati, Phys. Rev. Lett. **120**, 206402 (2018).
- [2] "Capturing ultrafast magnetic dynamics by timeresolved soft x-ray magnetic circular dichroism", K. Takubo, K. Yamamoto, Y. Hirata, Y. Yokoyama, Y. Kubota, S. Yamamoto, S. Yamamoto, I. Matsuda, S. Shin, T. Seki, K. Takanashi, and H. Wadati, Appl. Phys. Lett. **110**, 162401 (2017).
- [3] "Photoinduced valence dynamics in EuNi₂(Si_{0.21}Ge_{0.79})₂ studied via time-resolved x-ray absorption

spectroscopy", Y. Yokoyama, K. Kawakami, Y. Hirata, K. Takubo, K. Yamamoto, K. Abe, A. Mitsuda, H. Wada, T. Uozumi, S. Yamamoto, I. Matsuda, S. Kimura, K. Mimura, and H. Wadati, Phys. Rev. B **100**, 115123 (2019).

 [4] "Sparse Phase Retrieval Algorithm for Observing Isolated Magnetic Skyrmions by Coherent Soft X-ray Diffraction Imaging", J. Phys. Soc. Jpn. 88, 024009 (2019).

NPSCS2020 の優秀ポスター賞を受賞して

2020年2月3-4日に柏の葉カンファレンスセンターで 行われた新学術領域ナノスピン変換科学の国際学会 New Perspective in Spin Conversion Science (NPSCS2020)に て、Best Poster Award for Young Researcher を受賞する 栄誉にあずかりました。本研究領域は接合状態とスピン変 換機能の探索を軸に国内外の連携研究を促進してきた実績 をもち、NPSCS2020は平成26年度からのプロジェクト 終了に伴う節目の学会となりました。発表された50件の ポスターの中から、海外招待講演者11人の選考を経て2 人の学生発表者に本賞が授与され、その名誉の一端を担え ましたことを大変光栄に感じております。この場をお借り し、大谷先生、中辻先生、肥後博士、Qu 博士をはじめと する本研究にご協力頂いた全ての方々に心より感謝申し上 げます。

受賞の対象となった研究は、「非共線反強磁性体 Mn₃Sn 薄膜における輸送特性」です。次世代のスピントロニクス を担う重要な材料として、近年反強磁性体が非常に大きな 注目を集めています。反強磁性体は自発磁化をもたないこ とから素子間の磁気的相互作用が僅かであり、漂遊磁界に よる干渉が起きません。加えて、磁気異方性に比べゼーマ ンカップリングが非常に小さいことから外部磁場の擾乱に も強いといった特徴を持ちます。また、従来のデバイスに 用いられてきた強磁性体と比べ、3 桁以上速い動作性能を 示しテラヘルツスケールでの制御が可能と言われています [1]。これらの利点は、不揮発性メモリに代表されるよう な次世代記憶素子の作製において、強磁性体では実現が困 難であった高密度高速化を可能にすると期待が寄せられて います。一方で、副格子間で磁化が打ち消し合うことから スピン構造の制御が難しく、かつ強磁性体に匹敵する大き さの電磁気的な応答を得られないといった、応用上の困難 がありました。ところが近年、磁化のない反強磁性体でも バンド構造に起因する巨大な電磁気応答が観測され、特に 反強磁性体 Mn₃Sn 等では応答を磁気構造により制御でき ることが明らかになってきました。

反強磁性体六方晶 Mn₃Sn は空間群 P63/mmc に属し、 Mn 元素がカゴメ格子上に配置されています。ネール温度

ナノスケール物性研究部門 大谷研究室 小林 鮎子

430Kから Mn 組成に依存し 250K 程度まで、異なる向き のスピンをもつ二種のカゴメ面が交互に積層した逆 120 度構造と呼ばれる非共線スピン構造を形成しています [2,3]。磁化をもたない系にもかかわらず、強磁性秩序と 同様に巨視的に時間反転対称性が破れていることが、巨大 な電磁気応答の現れる要因です。Mn₃Sn の場合は秩序変 数が磁化ではなく、クラスター磁気八極子(2 層のカゴメ 格子上の 6 つのスピンからなる構造)が強敵に秩序してい ることがわかります。

実際の系では強磁性体の 1/1000 程度の微小なキャント 磁化~6 mps/f.u.を有していることと、面内での磁気異方 性が小さいことが上記の磁気八極子の制御を可能にしてい ます。面内方向へ数10mTの磁場を印加すると磁気八極子 のドメインが反転し、これにより強磁性体と同程度の異常 ホール効果や異常ネルンスト効果が室温かつゼロ磁場で観 測されています。近年大谷研究室からは、従来の時間反転 に偶のスピンホール効果に対し、磁気八極子の反転に伴い スピン蓄積の符号も変わる磁気スピンホール効果が発見さ れました。[4]

MnaSn は温度により多彩な磁気構造を有することが知 られています。250K より低い温度領域では結晶の合成方 法に応じてカゴメ面のスピンが螺旋状に遷移し巨視的な時 間反転対称性を保ったヘリカル相へと相転移する場合があ ります。ヘリカル相では c 軸方向の並進対称性が破れフェ ルミ面にギャップが空くことが知られていますが、近年こ れがテラヘルツ測定からも確かめられました。さらに低温 の 10K 程度以下ではクラスタースピングラス構造となり、 局所的な磁化をもつことで強磁性のような振舞いを示しま す。クラスタースピングラス構造では局所的にスピンが非 共面成分をもつことで、ホール効果に磁場や磁化に依存せ ず実空間のベリー曲率のみに起因するトポロジカルホール 効果の報告がなされました[5]。

スピン構造に由来した多彩な輸送特性を研究する一つの 手段に、薄膜試料を用いスピン構造を制御することがあげ られます。薄膜化を行う大きな利点としては、バルクでは 観測することの難しいスピン拡散長のオーダーの物理現象 を研究出来ること、またより応用を見据えた素子作製が可 能になることが一般的です。このような理由から、現在で は我々を含め多くの研究グループが Mn₃Sn 薄膜の作製を 行っています[6]。

本研究では高品質な Mn₃Sn 薄膜を作製するとともに、 薄膜化により結晶の配向性の精密な制御を行い、配向性に 依存した新奇な磁気輸送特性を測定することを目標としま した。薄膜作成方法としてマグネトロンスパッタ法を採用 し、製膜条件を詳細に変化させることで Si/SiO2 基板上に 異なる配向性を示す Mn₃Sn 多結晶薄膜の合成に成功しま した。配向性は X線回折測定により確かめられ、Mn組成 と関連性があることが明らかになりました。得られた試料 を用い、様々な温度条件下において磁気輸送特性を観測し たところ、特定の温度下で配向度の高い試料でのみ磁気構 造由来の非従来型磁気輸送特性が得られ、配向性が磁気構 造に大きく寄与していることを示唆する結果を得ました。 反強磁性体 Mn₃Sn は磁化が非常に小さく、試料体積の小 さい薄膜試料では通常の磁化測定が難しいという課題があ ります。本研究は輸送特性というプローブを通して磁気構 造を評価するという試みを実現したものといえます。一方 で、実際の局所的な磁気構造や、Mn3Sn の異なる相同士 の相関など、未だ明らかでない部分も多く、より精密な研 究を行う予定です。

- [1] T. Jungwirth et al., Nat. Nanotech. 5, 231 (2016).
- [2] S. Nakatsuji, N. Kiyohara, and T. Higo, Nature 527, 212 (2015).
- [3] A.K. Nayak et al., Sci.Adv. 2, 1501870 (2016).
- [4] M. Kimata et al., Nature 565, 627-630 (2019).
- [5] P. K. Rout et al., Phys. Rev. B (2019).
- [6] T. Higo, D. Qu, Y. Li, C.L. Chien, Y. Otani and S. Nakatsuji, Appl. Phys. Lett. 113, 202402 (2018).



リーディング大学院(MERIT)での5年間

今回 MERIT Award を受賞するにあたって、研究面で の活動以上にリーディング大学院(MERIT)における活動 が評価されたと考えているので、それについて詳しく書い ていきたい。MERIT の活動で最も印象に残っているのは、 主に土曜日に行われたコロキウム1及び、コロキウム2の 活動である。

コロキウム1では同期の学生たちが一人ずつ自分の研究 について短い時間で口頭発表するというものであった。 簡単に思えるかもしれないが、聴衆は物理学だけでなく物 質科学のあらゆる分野から集まっているため全ての聴衆に わかるように説明するのが難しい。逆に聞く側も他分野に 対する寛容さが試される場面もあり、異分野とのコミュニ ケーションがいかに難しいか痛感させられた。

一方のコロキウム 2 では、数人ずつのグループに分か れて独自の活動を行い、それについて発表するというグ ループワークに発展している。著者を含むグループでは 東京大学のオープンキャンパスの場を借りて、高校生向 けに物質科学の面白さを伝えるサイエンスコミュニケー ションの活動を行った。こちらも演示実験をどうするか、 実際のオープンキャンパスでどのように楽しんでもらう か、それをどのようにアウトプットとしてまとめるか四 苦八苦があり、アカデミアの外とのコミュニケーション もまた一筋縄にはいかないことを思い知らされた経験で あった。しかし、このような通常の研究活動では得られ ない体験が将来役に立つと信じて現在も研究を続けてい る。

コロキウムの他にも MERIT 特別講義や自主キャンプな どの企画が定期的に開かれ、MERIT で過ごした時間は充 実したものであった。また、このような活動は同時に気分 転換にもなるので、結果として平日の研究活動に集中する 原動力になったようにも思う。研究面でも量子化学の知識 を生かした物質設計を中心とする、自分の特徴を生かした 研究が評価されたものと考えており、今後もよりいっそう 学際的な研究に取り組む励みとなった。このような様々な 活動が評価されたことをもって MERIT Award を受賞で きたことを光栄に思う。

大阪大学基礎工学研究科 山田 昌彦

最後に、大学院の5年間様々な面でサポートいただい た押川先生、多田先生、および秘書の辻さんには大変お 世話になりました。この場をお借りして感謝の意を申し 上げます。

客員所員を経験して

物質・材料研究機構 国際ナノアーキテクトニクス研究拠点 中西 尚志

令和元年(2019 年)度後期に、中性子科学研究施設・ 山室修教授にホストいただき、客員教授としてお世話にな りました。客員期間中は、山室研究室のスタッフ・秋葉宙 助教、D3 学生の楡井真実くん、事務補佐員の本田裕子様 には多大なご支援をいただき、また有意義な実験、議論等 させていただきました。厚く御礼申し上げます。

客員所員として取り組んだ研究テーマは「新規機能性液 体の中性子散乱」です。客員所員として山室先生にお声か けいただくまでに、TIA かけはしの事業を通じて2年間の 共同研究(フィジビリティーステージ)後、平成 30 年度よ り科学研究費補助金 基盤研究(A)において、共同研究を 展開していました。これら共同研究の一環として、同研究 テーマを進めさせていただきました。先ず、機能性液体と は?との問いが浮かぶと思いますので簡単に説明します。 機能性分子の分子間相互作用を精密に制御・抑制すること で、不揮発性、粘性、発光性などの機能を持つ常温液体材 料を開発しており、この液体材料のことを「機能性液体」 と呼んでいます。機能性液体を素材に、伸縮可能なエレク トレット圧電素子、振動センサやアクチュエータなどの応 用に向けた研究を本務の物質・材料研究機構では主に展開 しています。機能性液体として合成する分子は、光や電子 機能を有するπ共役系分子を柔軟で嵩高い分岐アルキル鎖 で取り囲んだ構造となっており、孤立・保護されたπ共役 ユニットは、外場から安定化されています。分岐アルキル 鎖の柔軟性が融点を低下させ、孤立したπ共役ユニットか らは分子固有の光・電子機能が液体バルク状態でも発揮で きる特徴があります。山室研究室では、液体分子のナノ組 織構造や分子運動ダイナミクスを徹底的に検討することを 目的とし、機能性液体の「物質」としての理解

乱実験に参加させていただきました。客員所員として配分 頂きました予算を本旅費に充てさせて頂きました。国内の SPring-8の放射光実験以外に、関連の大型研究施設での 実験経験が無かった筆者にとっては、非常に刺激的な時間 でした。前半、少々のトラブルもあり、滞在期間中に複数 サンプルを余すこと無く実験し終えることができるのか、 ビーム照射時間を計算・アップデートしながら過ごした時 間は貴重な経験となりました。我々の研究対象となってい る液体分子ではアルキル鎖の役割は重要であり、中性子散 乱測定を用いることで、その運動の緩和時間や空間領域な どの詳細な知見が得られると期待しています。ちなみに、 ドイツで新型コロナウイルスの感染が広がる前のスケ ジュールだったのは幸運でした。もしタイミングが半月ほ ど遅かったら、帰国がままならなかったと思います。

また、高感度断熱型熱量計を用いて、機能性液体のガラ ス化に伴う熱容量・エントロピー変化を見積り、アルキル 鎖の乱れの度合いを評価するなどの検討も山室先生、楡井 君との共同研究として行っています。得られる情報とエレ クトレット性能を比較検討することで、分子構造、液体構 造物性とエネルギー変換システム連動した新学理の創出に 貢献できるものと期待しています。

最後に、客員所員として受け入れていただきました山室 先生、研究室メンバー、並びに物性研関係者の皆様に改め て厚く御礼申し上げます。今回、山室先生との共同研究を 更に深化させることができました。物性研とつくばとは物 理的にも近い利点がございますので、山室先生をはじめと する物性研の先生方とは、引き続き共同研究を行わせてい ただけますと幸いです。

日的とし、機能性液体の「物質」としての理解 を深める研究を推進しました。

主に行った実験は、ドイツのミュンヘン工科 大学にある FRM-II 研究用原子炉にて実施した 中性子散乱になります。研究対象物質として は、物質・材料研究機構で合成したアルキル鎖 長の異なる複数の機能性液体となり、FRM-II には山室先生、秋葉助教、楡井くんと 4 人で 2020年2月23日~27日の間滞在し、中性子散



理化学研究所 創発物性科学研究センター 近藤 浩太

私は、2019 年 4 月から 1 年間、東京大学物性研究所で 客員所員をさせて頂きました。ホストである大谷義近教授 はじめ、一色弘成助教、水野隼翔特任研究員、共同研究を させて頂いた中辻知教授、冨田崇弘特任助教、肥後友也特 任助教、Hanshen Tsai 特任研究員、三輪真嗣准教授、秘 書の金田洋子さんには、大変お世話になりました。関係者 の皆様に厚くお礼申し上げます。

物性研究所には、私が理化学研究所に入所した 2012 年 から 2~3 カ月に 1 度程度の頻度で、実験や議論のために 訪問してきました。その後、2017 年頃からは、中辻研究 室が発見したトポロジカル反強磁性体に関する共同研究が 始まりました。そこでは、研究室の垣根を越えて、活力に あふれた若手研究者や優秀な学生が集まっており、議論も 実験も非常に活発に行われていました。そのような環境で、 より密に研究をしたいと思い、客員所員として応募し採用 して頂きました。

客員研究のテーマは、トポロジカル磁性体におけるスピ ン伝導特性と磁気ダイナミクスの解明です。Mn₃Sn など のトポロジカル反強磁性体は、巨大なベリー曲率によって 反強磁性体にもかかわらず、巨大な電気的・光学的応答を 示す材料として注目されています[1, 2]。2019 年には、こ のような新しい材料を用いることで、スピン構造の反転に 伴って、生成するスピン蓄積の偏極方向が反転する新たな スピンホール効果(磁気スピンホール効果)が見つかってい ます[3]。この客員所員期間中には、主に、この磁気スピ ンホール効果由来のスピントルクの計測などに取り組みま した。また、肥後友也特任助教、Hanshen Tsai 特任研究 員らと協力して、トポロジカル反強磁性体の電流反転を実 現しました[4]。そして、これらの実験成果について、国 内外問わず様々な研究者と活発に議論をする機会に恵まれ、 大変有意義な時間を過ごすことができました。

さらに、今回の客員研究とはテーマが異なりますが、物 性研究所に行く機会が増えたことで、三輪真嗣准教授との 共同研究を加速させることができ、これまで行ってきた物 質界面でのスピン流-電流の相互変換現象に関する発展課 題として、分子/金属界面におけるスピン流-電流変換を 実現し、学術論文誌で発表することができました[5]。 客員所員としての1年間は、あっという間に終わってし まいましたが、今後も引き続き共同研究を進めさせていた だきたいと思っております。また、物性研究所には、様々 な研究グループにおいて充実した実験設備と、第一線で活 躍されている研究者の方々が在籍していますので、共同研 究の幅を広げていけたらと考えています。今後ともよろし くお願い致します。

- S. Nakatsuji, N. Kiyohara, and T. Higo Nature 527, 212–215, (2015).
- [2] T. Higo et al. Nat Photonics 12, 73-78, (2018).
- [3] M. Kimata, H. Chen, K. Kondou *et al*, Nature 565, 627-630, (2019).
- [4] H. Tsai, T. Higo, K. Kondou *et al.*, Nature **580**, 608 (2020).
- [5] H. Isshiki, K. Kondou *et al.*, Nano. Lett. **19**, 7119-7123 (2019).

兵庫県立大学・高度産業科学技術研究所 新部 正人

2019年度の1年間、松田巌先生のホストで、物性研究 所の客員准教授として大変お世話になりました。私は SPring-8 サイトにある兵庫県立大学の放射光施設: NewSUBARU で軟X線領域の吸収分光・発光分光を行っ ています。前の年に松田先生が私の担当しているビームラ インで実験されたのが縁で、客員所員に応募しないかと勧 められました。研究テーマは「ホウ素化合物単原子シート の電子状態研究」ということですが、実はこの分野は私の 専門ではありませんでした。SPring-8 との競合を避ける ため、NewSUBARU は比較的エネルギーの低い軟 X 線に 特化して作られており、炭素 C やホウ素 B の K 端では SPring-8 より明るい光源となっています。昨今、グラ フェンをはじめとする二次元物質の研究が活発に行われ、 ホウ素化合物でも Dirac Nodal Loop (DNL)の存在が予想 されるなど、研究が盛んに行われています。松田先生とは 共同研究といいますか、いろいろと教えて頂きながら、上 のテーマを何とか熟してきたという感じです。

物性研の所員になりまして、まず感じたことですが、人 が大事に扱われているということでした。客員所員のため の部屋があり、研究予算もあり、年度の初めには客員所員 のための講演会も用意されていました。教授会での紹介、 森初果所長との食事会もあり、一人の研究者として、多く のプロパー職員に認められて仕事をスタートできたことは、 良かったと思います。

4月に、イタリアのトリエステ近郊にある放射光施設: Elettra で角度分解光電子分光(ARPES)装置を使った実験 をしました。Elettraは、1994年にユーザー供用を始めた ヨーロッパで最初の第3世代軟X線光源です。向こうでお 会いした日本人研究者の藤井純さんの話では「もう、どこ もボロボロですよ」ということでしたが、私から見れば、 いまだに世界的に高い研究レベルを保っており、ヨーロッ パ中から利用者が訪れていて、すばらしい施設だなと思い ました。Elettra では、原研の深谷先生、研究室に入った ばかりの学生の佐藤祐輔君、NewSUBARU に実験に来た ことのあるソルボンヌ大の Mathis Cameau 君、松田先生、 それに Elettra の BL 担当者 3 名と共に、Al(111)基板上に 成長させたシリセンの ARPES を測定しました。ARPES は私にとっては初めての経験であり、バンド分散が簡単に 測定できることに感激しました。

その後は、客員の予算を使って、二つの国際会議に参加 できました。ひとつは、7月にサンフランシスコで開催さ れたVUVX-19会議で、開催日が独立記念日と重なったの で、花火大会などあって、街は賑やかでした。ここで、 NewSUBARU で取得した 5-7 員環ネットワークを持つホ ウ素化合物 TmAlB₄ などの B-K 端 XAS, XES スペクトル を、筑波大の N.T. Cuong さんの行った DFT 計算ととも に発表しました。もうひとつは、9月末に新潟で開催され たホウ素とホウ化物に関する国際シンポジウム (ISBB2019)で、ここで初めて、ホウ素というのは実に多 種多様な組成の化合物、結晶構造をとる元素なのだという ことを知りました。私は、HOPG にドープした微量ホウ 素と、Ni 基板上に成長させた自立膜に近い性質を持つ h-BN 膜の XAS, XES スペクトルについて、2 件のポス ター発表をしました。会場で TmAlB4 から単独の 5-7 員 環Bネットの抽出に成功された筑波大の近藤剛弘先生にお 会いできたことも収穫になりました。

また同室の山本達先生と共同研究できたことも、実に刺 激的でした。このように物性研の客員所員になることによ り、様々なネットワークの中で研究を展開する経験をでき たことは、私にとって大きな財産となりました。松田先生 の「我々が新しい物理を作るんですよ」という言葉を胸に 刻んで、今後の研究人生を進めて行きたいと思います。



Elettra での実験風景

ISSP ワークショップ

「次世代放射光へのイノベーション」 Innovations to the Next-Generation Synchrotron

日時:2020年2月14日 場所:物性研究所本館 6階大講義室(A632) WEB中継:SPring-8 中央管理棟1階会議室

主催:東京大学物性研究所

共催:東京大学放射光分野融合国際卓越拠点 VUV·SX 高輝度光源利用者懇談会

協賛:日本放射光学会 日本表面真空学会

研究会提案代表者:松田巖

世話人:松田巖、有馬孝尚、小森文夫、原田慈久、三村秀和、近藤猛

次世代放射光施設の計画が始動し、2023 年度からの共 同利用に向けて建設が始まった。一般財団法人光科学イノ ベーションセンター(PhoSIC)と量子科学技術研究開発機 構(QST)が担当するビームラインとして 10 本が予定され ており、それぞれについて我が国の科学技術の研究ニーズ 及びシーズに応える次世代放射光実験手法の提案及び検討 が具体的に進められている。その中にはナノ集光、偏光ス イッチング、多次元イメージング、超高分解能測定など、 従来の放射光施設では実現が不可能であった新たなX線光 学技術の開発が含まれ、さらにインフォマティクスに基づ いた解析法や AI ロボットを用いた自動測定技術の導入も 予定されている。このように次世代放射光施設では、科学 技術の大きなイノベーションが期待される。

そこで我々は次世代放射光施設において期待されるこれ ら新技術とそれらを活用して初めて実現するフロンティア サイエンスの展望を議論するワークショップを開催した。 プログラムではまず、中村哲也氏(PhoSIC)と高橋正光氏 (QST)にそれぞれのビームラインを総括的にご紹介いただい た。ワークショップ後半では、「次世代放射光利用への技術 改革」をテーマとして、これらの研究で我が国を先導する 若手研究者を招待してご講演いただいた。ワークショップ ではさらにポスターセッションも設け、院生とポスドクを 中心にそれぞれの研究を発表し、招待講演者も交えて新し い放射光科学について若手同士で活発な議論が行われた。

研究会は1日開催であったが、91名もの方にお集まりいた だき大盛況に終わった。2023 年から利用が開始される「次 世代」放射光施設に向けて、我が国の放射光科学のが「次世 代」の研究者によっても大きく発展することが感じられた。

最後に、本ワークショップの企画・準備・開催・報告の各 段階で多くの物性研事務部および SOR 施設の方々にご協力 いただいたことに深く感謝いたします。以下に研究会で撮っ た集合写真、研究会ポスター、プログラムを掲載します。



図1 参加者集合写真



図2研究会ポスター

プログラム

<u>セッション:次世代放射光施設ビームライン</u>

座長:松田巖 10:30 挨拶 森初果 (東京大学) 10:35 次世代放射光施設における共用ビームラインの整備構想 11:05 次世代放射光パートナービームライン計画概要 11:35 ポスターショートレビュー

<u>ポスターセッション</u>

座長:松田巌 13:00-14:15 次世代放射光要素技術開発、BL07LSU成果、SOR 施設成果

セッション:次世代放射光利用への技術改革

座長:原田慈久

14:15 AI-ロボット合成システムの導入による無機薄膜材料研究 14:45 インフォマティクス活用で広がる顕微分光の可能性 15:15 回転楕円ミラーを用いた軟 X 線集光

中村哲也(東北大学/PhoSIC)

高橋正光 (量子科学技術研究開発機構)

清水亮太(東京工業大学) 永村直佳(物質·材料研究機構) 本山央人 (東京大学)

<休憩>

16:00 軟 X 線雰囲気光電子分光を用いた不均一触媒反応のオペランド分光測定 小板谷貴典 (分子科学研究所) 16:30 共鳴非弾性軟 X 線散乱の超高分解能化への挑戦 宮脇淳 (東京大学) 17:00 磁性・スピントロニクス材料科学のための高輝度軟 X 線ビームライン 上野哲朗(量子科学技術研究開発機構) 17:30 閉会の挨拶 有馬孝尚 (東京大学) 18:00 懇親会

27 物性研だより第 60 巻第 2 号

物性研究所セミナー

標題:Benchmark of density functional theory for superconductors 日時:2020年6月9日(火) 午後4時~午後5時 場所:ZOOM開催 講師:河村 光晶 所属:東京大学物性研究所 要旨:

The first-principle calculation of the superconducting properties, such as the transition temperature (Tc) is of great interest to explore new materials as well as to understand the mechanism of known superconductor. Density functional theory for superconductors (SCDFT) is one of the frameworks for such calculations; this method enables us to perform fully non-empirical simulation in the superconducting phase within reasonable computational cost. In this method, we can treat the electron-phonon interaction, the electron-electron repulsion, and the spin-fluctuation (SF) mediated interaction in a first-principles manner. However, the accuracy of the current approximated functional of SCDFT has not been verified systematically, although such verification is highly desirable before we apply this method to the wide range of materials.

For this purpose, we performed systematic benchmark calculations for elemental bulks [1]. We developed a method to treat the spin-orbit interaction (SOI) together with SF and examined their effect on Tc. We found the following results: (1) The calculations, including SOI and SF, reproduce the experimental Tc quantitatively. (2) The effect by SOI is small excepting a few elements such as Pb, Tl, and Re. (3) SF reduces Tcs, especially for the transition metals, while this reduction is too weak to reproduce the Tcs of Zn and Cd. (4) We reproduced the absence of superconductivity for alkaline (earth) and noble metals. These calculations confirm that our method can be applied to a wide range of materials and implies a direction for the further improvement of the methodology.

[1] M. Kawamura, Y. Hizume, and T. Ozaki, Phys. Rev. B 101, 134511 (2020).



【研究部門等】

〇令和2年3月31日付け

(定年退職)

氏	名	所 属	職	名	備考
柴 山	充 弘	附属中性子科学研究施設	教	授	総合科学研究機構 中性子科学センター長へ

(辞 職)

	氏	名	所 属	職	名	備考
橘	高	俊一郎	凝縮系物性研究部門	助	教	中央大学理工学部 准教授へ
狭	間	優 治	機能物性研究グループ	助	教	株式会社 日本総合研究所 コンサルタントへ
矢	治	光一郎	附属極限コヒーレント光科学研究 センター	助	教	物質・材料研究機構 主任研究員へ

(配置換)

氏	名	所 属	職	名	備	考
酒 井	明 人	量子物質研究グループ	助	教	令和2年4月1日より 究科 講師へ	東京大学大学院理学系研

〇令和2年4月1日付け

(採用)

氏 名	所 属	職名	備考
村 山 千壽子	凝縮系物性研究部門	助 手	物性研究所 教務職員より
野村未来	低温液化室	技術職員	物性研究所 学術支援職員より

(兼務)

氏	名		所 属	職	名	備考
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2年4月1日~令和3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:令和元年4月1日~令和3年3月31日
常行	真	司	附属計算物質科学研究センター	教	授	本務:東京大学大学院理学系研究科 期間:令和元年4月1日~令和3年3月31日
藤堂	眞	治	附属計算物質科学研究センター	教	授	本務:東京大学大学院理学系研究科 期間:令和元年4月1日~令和3年3月31日

(委嘱「客員:テーマ限定型」)

	氏	名		所 属	職	名	備考
田	中	秀	数	附属中性子科学研究施設	教	授	本務:東京工業大学理学院 教授 期間:令和2年4月1日~令和3年3月31日
今	中	康	貴	附属極限コヒーレント光科学研究 センター	教	授	本務:物質・材料研究機構低温応用ステーション ステーション長 期間:令和2年4月1日~令和3年3月31日
樋	山	みや	やび	機能物性研究グループ	准 教	授	本務:群馬大学大学院理工学府 准教授 期間:令和2年4月1日~令和3年3月31日

(委嘱「客員:テーマ提案型」)

氏	名	所 属	職名	備考
髙 山	あかり	ナノスケール物性研究部門	准教授	本務:早稲田大学理工学術院 専任講師 期間:令和2年4月1日~令和3年3月31日
本 山	岳	附属物質設計評価施設	准教授	本務:島根大学学術研究院理工系 准教授 期間:令和2年4月1日~令和3年3月31日
井 原	慶 彦	附属国際超強磁場科学研究施設	准教授	本務:北海道大学大学院理学研究科 講師 期間:令和2年4月1日~令和3年3月31日

○令和2年5月1日付け

(採用)

	氏	名	所 属	職	名	備考
武	田	晃	凝縮系物性研究部門	助	教	物性研究所 特任研究員より
齋	藤	開	附属中性子科学研究施設	助	教	高エネルギー加速器研究機構 物質構造科学研究 所より

〇令和2年6月1日付け

(採用)

氏	名	所 属	職	名	備考
森	泰 蔵	ナノスケール物性研究部門	助	教	東京大学大学院新領域創成科学研究科より

〇令和2年7月1日付け

(採用)

氏	名	所 属	職 名	備考
木村	隆志	附属極限コヒーレント光科学研究 センター	准教授	東京大学大学院工学系研究科より

【事務部】

〇令和2年4月1日付

(転 出)

	氏	名		所 属	職名	備考
大	島	潤		物性研究所	副事務長	大学改革支援・学位授与機構評価事業部国際課課長 補佐へ
久	保	忠	明	物性研究所	副事務長	法学政治学研究科等副事務長へ
木	船		聡	物性研究所	係長	農学系総務課研究支援チーム係長へ

(転入)

	氏	名		所 属	職	名	備考
Ξ	澤	毅	: 4	物性研究所	副事	務長	法学政治学研究科等副事務長より
山	П	武 志	4	物性研究所	係	長	医学部附属病院医療運営課 医療評価・安全チーム<医療訴訟担当>係長より
Ξ	浦	幸 栄	4	物性研究所	係	長	教養学部等総務課教室事務チーム係長より

(昇 任)

氏	名	所 属	職	名	備考
高 橋	志 生	物性研究所	主	任	物性研究所 一般職員より

(兼務)

氏	名	所 属	職名	備考
矢 口	隆紀	物性研究所	上席係長	物性研究所上席係長(免:総務係長)

令和元年度外部資金の受入について

1. 奨学寄附金

件 数	金額(円)
31	70,785,404

<受託研究>

研究題目	委託者	受入金額(円)	研究代表者
水素をプローブとした固溶型ナノ合金の状態 解析	(国)科学技術振興機構	15,600,000	附属中性子科学研究施設 教授 山室 修
エネルギーの効率的な創出、変換・貯蔵、利 用の新規基盤技術の開発	(共)自然科学研究機構	19,700,000	機能物性研究グループ 教授 杉野 修
エネルギー貯蔵材料の動作下超高分解能放 射光軟X線電子状態解析	(国)産業技術総合研究所	18,515,000	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
基礎科学のフロンティアー極限への挑戦(基礎科学の挑戦-複合・マルチスケール問題を通した極限の探求)(サブ課題 B 相転移と流動)(サブ課題 D 量子力学基礎と情報)	(大)東北大学	34,258,000	附属物質設計評価施設 教授 川島 直輝
次世代の産業を支える新機能デバイス・高性 能材料の創成	文部科学省	216,466,000	附属計算物質科学研究センター 教授 常行 真司
基盤的計算機シミュレーション手法の磁石材 料開発への展開	(国)物質·材料研究機構	54,605,915	附属計算物質科学研究センター 教授 常行 真司
基盤的計算機シミュレーション手法の検討と 水素を含む新規材料候補の探索と物性解析	(大)東京工業大学	1,900,000	附属計算物質科学研究センター 教授 常行 真司
高強度テラヘルツ電場による量子多体系の非 平衡物理の探索	(国)科学技術振興機構	5,239,000	附属極限コヒーレント光科学研究センター 准教授 松永 隆佑
高感度かつ色覚認識可能な視覚再生のため の高機能光遺伝学ツールの開発	(大)名古屋工業大学	1,000,000	機能物性研究グループ 准教授 井上 圭一
「革新型蓄電池実用化促進基盤技術開発」の うち「第一原理計算による異相界面における 原子構造とイオン伝導現象の解明」	(国)産業技術総合研究所	3,333,000	機能物性研究グループ 助教 春山 潤
電子構造のトポロジーを利用した機能性磁性 材料の開発とデバイス創成	(国)科学技術振興機構	137,410,000	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)科学技術振興機構	16,900,000	ナノスケール物性研究部門 教授 大谷 義近
リモートコントロールによるハイスループット材 料合成の実証実験	(国)科学技術振興機構	13,000,000	ナノスケール物性研究部門 教授 Mikk Lippmaa
固体高分子形燃料電池利用高度化技術開発 事業/普及拡大化基盤技術開発/非白金系 触媒の革新的高機能化のためのメカニズム解 析(酸化物)	(国)エネルギー・産業技術 総合開発機構(NEDO)	6,405,000	機能物性研究グループ 教授 杉野 修
高輝度・高効率次世代レーザー技術開発/ 次々世代加工に向けた新規光源・要素技術 開発/超高速利得スイッチ LD をシードとす るレーザー加工用光源の開発	(国)エネルギー・産業技術 総合開発機構(NEDO)	117,124,000	機能物性研究グループ 教授 秋山 英文
CPS 型レーザー加工機システムによるスマート製造推進拠点/戦略的イノベーション創造 プログラム(SIP)	内閣府	390,000,000	附属極限コヒーレント光科学研究センター 教授 小林 洋平
光 OFF 型オプシンによる高感度かつ自然な 視覚再生	(国)科学技術振興機構	16,825,900	機能物性研究グループ 助教 永田 崇
ワイル磁性体を用いた熱発電デバイスの研究 開発	(国)エネルギー・産業技術 総合開発機構(NEDO)	9,698,000	量子物質研究グループ 特任教授 中辻 知
"All-optical" な電気生理学による植物個体 の膜電位操作技術の創出	(国)科学技術振興機構	12,545,000	機能物性研究グループ 特任研究員 井上(今野) 雅恵
フロッケ・エンジニアリングとトポロジカル非線 形光学効果の理論	(国)科学技術振興機構	390,000	機能物性研究グループ 教授 岡 隆史
승 計		1,090,914,815	

<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
パルス超強磁場を用いた創発物性研究	(国)理化学研究所	10,000,000		附属国際超強磁場科学研究施設 准教授 徳永 将史
新しい強磁場マグネット用高強度・高導電率 導体の開発	(国)物質・材料研究機構	0		附属国際超強磁場科学研究施設 教授 金道 浩一
強相関f電子系化合物の物性科学研究	(国)日本原子力研究開発機構	0		凝縮系物性研究部門 教授 榊原 敏郎
次世代ナノデバイスの動作中評価を実現する 革新的オペランド顕微技術	(国)産業技術総合研究所	0		附属極限コヒーレント光科学研究センター 准教授 近藤 猛
発光特性解析を用いた宇宙用太陽電池高性 能化の研究	(国)宇宙航空研究開発機構、 (大)京都大学	559,746		機能物性研究グループ 教授 秋山 英文
次世代磁気イメージング法 SQUID-STM の 開発	(学)金沢工業大学	0		凝縮系物性研究部門 助教 下澤 雅明
磁歪の光ファイバセンサによる高速検出	(国)産業技術総合研究所	0		附属国際超強磁場科学研究施設 助教 池田 暁彦
濃厚ポリマーブラシのレジリエンシー強化とト ライボロジー応用	(大)京都大学 他16機関	0		附属物質設計評価施設 助教 樋口 祐次
人工知能とデータ科学に基づく光受容タンパ ク質の開発	(国)理化学研究所、 (大)名古屋工業大学	2,656,500		機能物性研究グループ 准教授 井上 圭一
強磁場 NMR の開発と物性研究(物性研一物 性科学研究機関連携研究)	(大)北海道大学		2,000,000	附属国際超強磁場科学研究施設 教授 金道 浩一
多重膜環境下における熱物性測定法の開発 と新奇物性探索(物性研-物性科学研究機 関連携研究)	(大)横浜国立大学		1,000,000	附属物質設計評価施設 教授 上床 美也
放射光及びレーザー光電子分光による強相 関電子系の電子状態研究	(国)日本原子力研究開発機構	0		附属極限コヒーレント光科学研究センター 准教授 岡崎 浩三
次世代レーザー及び加工の共通基盤技術開 発に関する研究	(国)産業技術総合研究所	0		附属極限コヒーレント光科学研究センター 教授 小林 洋平
生体・医療・バイオ分野における先端レー ザー加工過程の解明と加工プラットフォーム のオープンイノベーション化の実現	(国)産業技術総合研究所	0		附属極限コヒーレント光科学研究センター 教授 小林 洋平
薄ディスクレーザー励起光パラメトリックチャー プ増幅装置に関する研究開発	(国)量子科学技術研究開発 機構	0		附属極限コヒーレント光科学研究センター 准教授 板谷 治郎
光触媒性を有する最先端コート剤の開発	(地独)地方独立行政法人 神奈川県立産業技術総合研 究所、他1機関	0		附属中性子科学研究施設 教授 柴山 充弘
軟 X 線検出器の性能の評価に関する研究	(国)産業技術総合研究所		1,000,000	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
軟 X 線用 CMOS 検出器のための裏面照射 化技術の開発	(大)東北大学		5,000,000	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
【企業との共同研究 19件】		76,493,400		
合 計		89,709,646	9,000,000	

編集後記

コロナ禍の中、7月には東京大学活動制限レベルが緩和されたことに伴い、来所の 際の感染防止対策実施の制約のもと、共同利用が漸次行われています(スパコン共同 利用は順調です)。一方、ウェブでの研究会などには通常より多くの方が参加されて おり、新しいスタイルとして皆様もその有効性を実感されているかと思います。ま た、論文を書く時間ができた、という声を聞きますが、ちなみに物性研では、6月か ら論文数は増加の傾向が見られ、プレスリリースも増えており、論文の出版までのプ ロセスの期間を考えると、この後も沢山の成果をご紹介できるかと、編集側としては 見守っているところです。

今号の表紙は、辛先生の受賞記事で紹介されている SOR-RING の写真です。光電 子分光は、今や物性研究においては押しも押されもしない花形研究の1つとなってい ますが、その黎明期における手探りな様子が書かれているとともに、当時の SOR-RING と六本木との構図を羨んだり、うまくいかない実験を花札を用いて自虐的に 例えているところは、辛先生のお人柄が出ていると思います。

鈴木博之

