

カイラル対称構造の量子臨界点における 超伝導パリティと磁気フラストレーション

Superconductivity parity and magnetic frustration at quantum critical point of chiral lattice structure

(日本物理学会推薦)

| | | | | |
|-------|---|-------|--------------------|--------------------|
| 代表研究者 | 茨城大学 | 岩佐 和晃 | Ibaraki University | Kazuaki IWASA |
| 協同研究者 | 茨城大学 | 桑原慶太郎 | Ibaraki University | Keitaro KUWAHARA |
| | ISIS Facility, Rutherford Appleton Laboratory | | | Devashibhai ADROJA |

Topological effects on electronic states are attractive topics in solid-state physics. According to the theoretical study, chiral space groups provide three-dimensional (3D) Weyl fermion as a topologically protected state. A quantum criticality of the chiral structure is suggested to provide an enhancement of odd parity superconductivity. To search for such exotic electronic states, the compounds $R_3T_4Sn_{13}$ (R : rare earth elements, T : transition metal elements) were studied. The chiral structure phase transitions in of $La_3(Co_{1-x}Fe_x)_4Sn_{13}$, $La_3(Co_{1-x}Ru_x)_4Sn_{13}$, and $La_3(Rh_{1-x}Ru_x)_4Sn_{13}$ are suppressed, and the superconducting phase transition temperatures are enhanced with increasing the atomic substitution composition x . Thus, these materials are candidate systems showing the odd parity superconducting state induced by the chiral structure quantum criticality. Further, we investigated magnetic properties of $Ce_3T_4Sn_{13}$ (T : Ru, Rh, Ir), which do not undergo magnetic ordering despite the magnetic moments at the Ce ions. The considerably suppressed magnetic ordering can be explained by geometrical frustration effect associated with the characteristic crystal structure. The retained magnetic fluctuations robust at low temperatures indicate the Weyl fermions associated with hybridization of the $4f$ electrons with conduction electrons, which can be explained by the Weyl-Kondo semimetal state.

研究目的

物質中のトポロジカル電子状態、とりわけ Weyl 電子が近年世界的に調べられている。光のように質量がなく、かつ左巻／右巻に相当するカイラリティ(対掌性)を内在する粒子と言える Weyl 電子は、カイラル・非反転結晶構造中に現れるとされる[1]。本研究では、その典型例として期待できるカイラル構造相転移物質 $R_3T_4Sn_{13}$ (R : 希土類元素、 T : 遷移金属元素)における以下の物性現象を研究目的とした。

(1) 非反転対称構造量子臨界点での超伝導パリティ

重い電子系・銅酸化物・鉄系などの超伝導体において、磁気秩序相転移などが絶対零度に抑制された量子臨界点近傍で超伝導相が安定化するのに対し、非反転対称構造相の量子臨界点における超伝導の特徴が指摘されている[2, 3]。多くの超伝導が s 波の

Cooper 対であるのに対して、非反転対称構造量子臨界点近傍では奇パリティ p 波が増強されるという理論予想を検証するため、典型物質の探索を行った。

(2) 1次元鎖が組む3次元格子での量子スピン液体

低次元・三角・カゴメなどの格子上での反強磁性は、極低温でも磁気秩序しない量子スピン液体状態をもたらす[4, 5]。これまでは単一の磁気モーメント間の相互作用のフラストレーションによる現象を対象としているのに対し、本研究は、複数の磁気モーメントが形成する1次元反強磁性鎖を立体的に組んだ磁気フラストレーション格子を考え、これまでと異なる幾何学構造がもたらすスピン液体を追究した。

(3) 反転対称性の破れに保護される3次元 Weyl 電子

相対論的量子力学における Dirac 方程式の平面波解が絶縁体表面などの2次元系で実現した。さらに

空間反転対称性のない結晶や時間反転対称性が破れた磁性体ではカイラリティで区別されるバンド分裂による Weyl 解が予想されている[1]。この Weyl 電子がもたらしうる波数に対する線形バンド分散をとる電子が上記(1)の超伝導や(2)の磁気相互作用の起源となる物性現象を研究対象とした。

研究経過

(1) カイラル構造量子臨界点の創出と超伝導

非反転対称(カイラル)構造相が絶対零度に抑えられた量子臨界点をもつ超伝導体の探索を行った。

$\text{La}_3\text{Co}_4\text{Sn}_{13}$ と $\text{La}_3\text{Rh}_4\text{Sn}_{13}$ は高温相において空間群 $Pm\bar{3}n$ の反転対称がある結晶構造をとるが、それぞれ 160 K と 350 K で反転対称が失われたカイラルな構造(空間群 $I2_13$) に相転移する[6–8]。このカイラル結晶構造における希土類イオンの配置を Fig. 1 に示した。希土類イオンは立方晶格子の辺に平行な 1 次元鎖状の構造を形成し、それらが 3 次元格子を組む。さらに、希土類サイトは非等価な二種類 $R1, R2$ に別れている。一方、 $\text{La}_3\text{Ru}_4\text{Sn}_{13}$ に構造相転移は見られず、低温まで $Pm\bar{3}n$ の反転対称構造にある [10]。Co, Rh, Ru を含む物質は超伝導体であり、それぞれ 2.7 K, 2.9 K, 3.8 K で超伝導を示すことが知られている[11, 12]。これらに基づき $\text{La}_3(\text{Co}_{1-x}\text{Fe}_x)_4\text{Sn}_{13}$, $\text{La}_3(\text{Co}_{1-x}\text{Ru}_x)_4\text{Sn}_{13}$, $\text{La}_3(\text{Rh}_{1-x}\text{Ru}_x)_4\text{Sn}_{13}$ を合成し、元素置換量 x に対する構造相転移と超伝導の依存性を調べた。得られた単結晶試料について、蛍光 X 線組成分析と低温 X 線回折による結晶構造相転移の観測を行った。さらに

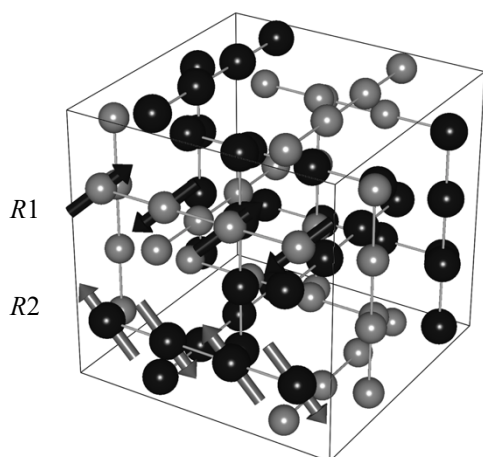


Fig. 1. Chiral crystal structure of $R_3T_4\text{Sn}_{13}$. Solid circles are R -ion sites, which form two inequivalent one-dimensional arrays $R1$ and $R2$. The figure was drawn using VESTA[9].

SQUID 磁気測定装置を用い、マイスナー効果による反磁性測定から超伝導転移温度を調べた。

$\text{La}_3(\text{Co}_{1-x}\text{Fe}_x)_4\text{Sn}_{13}$ において、 $x = 0$ では 160 K で出現するカイラル構造への相転移が、 $x = 0.1$ 程度で 94 K まで抑制された。このとき超伝導転移温度はほとんど変化せずに 2.7 K であった。Fe 置換物質は $x = 0.1$ 以上では安定に合成されないことが見いだされたので、より高濃度の Ru を導入できた $\text{La}_3(\text{Co}_{1-x}\text{Ru}_x)_4\text{Sn}_{13}$ を調べた。 $x = 0.024$ 程度の試料でのカイラル構造は 126 K 以下で出現し、 $x = 0.18$ 程度では構造相転移が消失した。超伝導転移温度は、構造相転移が消失していた $x = 0.5$ 近傍で 5.9 K まで上昇した。また $\text{La}_3(\text{Rh}_{1-x}\text{Ru}_x)_4\text{Sn}_{13}$ においても、 $x = 0.4$ 付近でカイラル構造への相転移が消失し、 $x = 0.5$ 近傍で超伝導転移温度が 6.0 K に上昇した。

(2) $\text{Ce}_3T_4\text{Sn}_{13}$ における量子スピン液体的振る舞い

$\text{Ce}_3T_4\text{Sn}_{13}$ (T : Co, Rh, Ir) は、過去にいわゆる重い電子系として報告され、近藤効果によって Ce 4*f* 電子と伝導電子が混成していると考えられた[13]。磁化率から Ce イオンの磁気モーメントの存在が確認されたにも関わらず、極低温でも磁気秩序しない。この現象は近藤効果によるものとして説明しうるが、その一方、この物質でも結晶構造がカイラル対称に相転移することが見いだされ[6–8]、電子状態の議論が改めて必要となった。特に、磁気モーメントが存在する結晶格子の幾何学的特徴によって、安定な磁気秩序がユニークに決まらないフラストレーション効果による量子スピン液体状態が想起された。

$\text{Ce}_3T_4\text{Sn}_{13}$ (T : Co, Rh, Ir) の Curie–Weiss 則にしたがう高温磁化率から見積もられる Weiss 温度は -30 K 程度であり、反強磁気相互作用エネルギーはこの温度程度である。しかし、Co, Rh の系では磁気秩序は現れず[14, 15]、唯一 Ir 系のみ生じる反強磁気秩序でさえ 0.6 K と極めて低温である[16]。この抑制された磁気秩序の原因を探るために中性子非弾性散乱測定を実施した[8]。まずカイラル構造では Ce イオンは非等価な 2 サイトを占め、異なる結晶場分裂準位を持つことが明らかとなった。この現象は、同じくカイラル結晶構造をとる Co, Rh 系でも観測されており[14, 15]、共通の性質と言える。解析により決定した Ce 4*f* 電子の結晶場分裂準位の基底状態である Kramers 二重項がもつ磁気モーメントの大きさは $0.97\mu_B$ と見積もられた。この磁気モーメントは Fig. 1 に示した Ce イオンの 1 次元鎖構造の方向に垂直な

成分であるが (図中の矢印)、磁気秩序に寄与しないことになる。さらに中性子散乱スペクトルのエネルギー幅から、カイラル構造中の非等価な 2 種類の Ce イオンの $4f$ 電子状態を推察した。一方のサイト (Fig. 1 の R1) ではスペクトルは鋭く、伝導電子との混成は小さい。他方のサイト (R2) ではスペクトルが比較的広く、混成効果が効いている。つまり、カイラル構造相は単純に一樣な重い電子系ではない。

(3) $\text{Ce}_3\text{Rh}_4\text{Sn}_{13}$ における Weyl-Kondo 電子の可能性

中性子非弾性散乱で $\text{Ce}_3\text{T}_4\text{Sn}_{13}$ の Kramers 二重項基底状態での磁気ダイナミクスを測定すると、約 0.2 meV にピークをとるスペクトルが得られた。この特性エネルギーは、Fig. 1 の最近接 Ce イオン間にはたらく反強磁気相互作用とみなせる。さらに $\text{Ce}_3\text{Rh}_4\text{Sn}_{13}$ の磁気ダイナミクスは、温度の 3 乗に比例する比熱の原因であることを見出した。たとえば局在磁気モーメントが単純立方格子を組んだ反強磁気秩序におけるスピン波励起の低温極限においても温度の 3 乗に比例する比熱が期待されるが、 $\text{Ce}_3\text{Rh}_4\text{Sn}_{13}$ では磁気秩序はないため、このようなスピン波描像は成立しない。

考察

(1) カイラル構造量子臨界点の創出と超伝導

$\text{La}_3\text{Co}_4\text{Sn}_{13}$, $\text{La}_3\text{Rh}_4\text{Sn}_{13}$ いずれも Ru 置換によりカイラル構造相転移が抑制された量子臨界点が存在する。さらに、カイラル構造が消失した領域で超伝導転移温度が約 2 倍に上昇する結果が得られ、理論的に示唆された反転対称構造の量子臨界点でのパリティ混成超伝導の増強が期待される物質群を見出したと言える。一方、合成された物質中での元素置換量は、合成前の元素仕込み量とは異なることがわかり、安定して物質を合成する条件の精査が課題となっており、現在、試料合成方法の改善を図っている。

(2) $\text{Ce}_3\text{T}_4\text{Sn}_{13}$ における量子スピン液体的振る舞い

前述したように、 $\text{Ce}_3\text{T}_4\text{Sn}_{13}$ (T : Co, Rh, Ir)において $1\mu\text{B}$ の磁気モーメントが存在するにも関わらず、磁気秩序は極端に抑制されている。低温で観測された磁気ダイナミクスは、Fig. 1 の結晶構造における 1 次元鎖方向の最近接 Ce イオン間の磁気モーメントを交替的に向かせようとする 0.2 meV 程度の反強磁気相互作用を示している。3 次元カイラル構造において、この 1 次元鎖は単位胞の辺に平行な三方向に配列する。この三方向の鎖が第二近接距離で三角形格子を

形成している。三角格子で磁気モーメントを反強的に配置する場合、ユニークな秩序構造が存在しないことが知られている。この幾何学的な磁気フラストレーションが有効であり、磁気構造形成が抑制され、量子スピン液体状態が出現したと考察できる。

(3) $\text{Ce}_3\text{Rh}_4\text{Sn}_{13}$ における Weyl-Kondo 電子の可能性

$\text{Ce}_3\text{Rh}_4\text{Sn}_{13}$ の磁気ダイナミクスとそれによる低温比熱は、反転対称性が存在しない、もしくはカイラル結晶構造で期待される Weyl 電子状態として理解しうる。 $\text{Ce}_3\text{Bi}_4\text{Pt}_3$ は空間群 $I4\bar{3}d$ の反転対称性のない半金属物質であり、磁気秩序が存在しないとされ、さらに特徴的な温度依存性を示す低温比熱が報告されている[17]。この原因は、非反転構造対称性がもたらす線形分散の電子バンドで特徴づけられる Weyl 電子が近藤効果を介して生じているためであるとされている。これらの結果から、 $\text{Ce}_3\text{Rh}_4\text{Sn}_{13}$ においても Weyl-Kondo 電子が実現していると考えられる。

(4) 今後の展望

本研究において、カイラル結晶構造の空間反転対称性の破れが Weyl 電子や量子臨界的に増強する超伝導をもたらすことを見出した。電子系におけるトポロジカル効果は磁気秩序にともなう時間反転対称性の破れによっても期待されている。Nd や Eu を含む同型物質が 2 K あるいは 10 K 程度で磁気秩序相に至ることが知られている[18, 19]。これらの物質では空間と時間に関する反転対称性が同時に破れることを意味するので、新たな電子状態を生む舞台と考えられる。これらの磁気秩序においても、上述した磁気秩序の抑えられた Ce 系同様に、弱い磁気秩序と特徴的な励起を持つことが予想される。本研究の展開として、すでに $\text{Nd}_3\text{T}_4\text{Sn}_{13}$ (T : Co, Rh), $\text{Eu}_3\text{Rh}_4\text{Sn}_{13}$ の物質合成と基礎物性測定に着手している。

参考文献

1. J. L. Mañes, Phys. Rev. B 85, 155118 (2012), etc.
2. V. Kozii and L. Fu, Phys. Rev. Lett. 115, 207002 (2015).
3. Y. Wang et al., Phys. Rev. B 93, 134512 (2016).
4. M. F. Collins, Magnetic Critical Scattering (Oxford University Press USA, 1989).
5. J. S. Gardner et al., Rev. Mod. Phys. 82, 53 (2010).
6. K. Iwasa et al., Phys. Rev. B 94, 075109 (2016).
7. K. Suyama et al., Phys. Rev. B 97, 235138 (2018).
8. K. Iwasa et al., J. Phys. Soc. Jpn. 90, 124701 (2021).

9. K. Momma and F. Izumi, *J. Appl. Crystallogr.* 41, 653 (2008).
10. K. Iwasa et al., submitted to *Commun. Phys.*
11. A. Ślebarski et al., *J. Alloys and Comp.* 646, 866 (2015).
12. N. Kase et al., *Phys. Rev. B* 83, 184509 (2011), *Physica C* 470 (2010) S541.
13. A.L. Cornelius et al., *Physica B* 378–380 (2006) 113, etc.
14. K. Iwasa et al., *Phys. Rev. B* 95, 195156 (2017).
15. K. Iwasa et al., in preparation.
16. S. Nakazato et al., *JPS Conf. Proc.* 30, 011128 (2020).
17. S. Dzsaber et al., *Phys. Rev. Lett.* 118, 246601 (2017).
18. C. W. Wang et al., *J. Phys.: Condens. Matter* 29, 435801 (2017).
19. A. Maurya et al., *JPS Conf. Proc.* 3, 017022 (2014).

研究の発表

口頭発表

1. 岩佐和晃, 中里晟也, 橋本大輔, 塩澤真未, 桑原慶太郎, 中尾裕則, 佐賀山基, 石角元志, 大原高志, 中尾朗子, 宗像孝司, 鬼柳亮嗣, F. Damay, J.-M. Mignot, 河村聖子, 村井直樹, 中島健次「 $\text{Ce}_3\text{Ir}_4\text{Sn}_{13}$ におけるカイラル構造相転移と磁気状態」(9aH3-10), 日本物理学会 2020 年秋季大会 (オンライン), 2020 年 9 月 8 日~11 日
2. K. Iwasa “Search for unconventional correlated electrons under chiral symmetry in rare-earth intermetallics” (invited, 20-O02), The 5th International Symposium of Quantum Beam Science at Ibaraki University (茨城大学量子線国際シンポジウム) - Chirality in Materials Science: Current Status and Future Prospects - (Online), November 19-21, 2020
3. 橋本大輔, 岩佐和晃, 中里晟也, 塩澤真未, 郡司和毅, 下田愛海, 鈴木詩織, 桑原慶太郎, 石角元志, 中尾裕則, 佐賀山基, 河村聖子, 村井直樹, 中島健次「 $\text{Ce}_3\text{Rh}_4\text{Sn}_{13}$ への Ru 置換によるカイラル構造量子臨界点」(15aH3-2), 日本物理学会第 76 回年次大会 (オンライン), 2021 年 3 月 12 日-15 日
4. 塩澤真未, 鈴木詩織, 岩佐和晃, 下田愛海, 中里晟也, 橋本大輔, 郡司和毅, 桑原慶太郎, 石角元志, 中尾裕則, 佐賀山基, 髭本亘, 伊藤孝「カイラル構造相転移をする超伝導体 $\text{La}_3(\text{Co}_{1-x}\text{Fe}_x)_4\text{Sn}_{13}$ と $\text{La}_3(\text{Co}_{1-x}\text{Ru}_x)_4\text{Sn}_{13}$ の元素置換効果」(15aH3-3), 日本物理学会第 76 回年次大会 (オンライン), 2021 年 3 月 12 日-15 日
5. 岩佐和晃, 中里晟也, 塩澤真未, 橋本大輔, 桑原慶太郎, 髭本亘, 伊藤孝, 中尾裕則, 佐賀山基, 石角元志「 $\text{La}_3\text{Ir}_4\text{Sn}_{13}$ におけるカイラル構造相転移と超伝導」(口頭発表 23aH3-5), 日本物理学会 2021 年秋季大会 (オンライン), 2021 年 9 月 20 日-23 日
6. Kazuaki Iwasa, Mami Shiozawa, Daisuke Hahimoto, Shiori Suzuki, Kazuki Gunji, Ami Shimoda, Keitaro Kuwahara, Hajime Sagayama, Hironori Nakao, and Motoyuki Ishikado “ Superconductivity enhancement and quantum critical point of chiral structure induced by atomic substitutions in $\text{La}_3\text{T}_4\text{Sn}_{13}$ ($T = \text{Co}$ and Rh) ,” The International Conference in Strongly Correlated Electrons systems SCES2020/21 (online), Parallel Session F4A – Unconventional Superconductivity – Friday 01 October
7. 岩佐和晃, 中里晟也, 橋本大輔, 塩澤真未, 桑原慶太郎, 佐賀山基, 河村聖子, 村井直樹, Devashibhai T. Adroja, Andre M. Strydom 「 $\text{Ce}_3\text{Ir}_4\text{Sn}_{13}$ のカイラル結晶構造相における磁気状態」(C-3), 第 21 回 日本中性子科学会年会 JSNS2021 (オンライン), 2021 年 12 月 1-3 日
8. 岩佐和晃, 塩澤真未, 橋本大輔, 鈴木詩織, 郡司和毅, 下田愛海, 桑原慶太郎, 佐賀山基, 中尾裕則, 石角元志「 $\text{La}_3\text{T}_4\text{Sn}_{13}$ ($T = \text{Co}, \text{Rh}$)への遷移金属元素置換によるカイラル構造の量子臨界と超伝導」(16pGB41-6), 日本物理学会第 77 回年次大会 (オンライン), 2022 年 3 月 15 日~19 日

ポスター発表

1. 橋本大輔, 岩佐和晃, 中里晟也, 塩澤真未, 桑原慶太郎, 石角元志, 中尾裕則, 佐賀山基, 河村聖子, 村井直樹, 中島健次「カイラル半金属 $\text{Ce}_3\text{Rh}_4\text{Sn}_{13}$ の構造相転移と磁性における Ru 置換効果の研究」(PSH-18), 日本物理学会 2020 年秋季大会 (オンライン), 2020 年 9 月 8 日~11 日
2. 塩澤真未, 岩佐和晃, 中里晟也, 橋本大輔, 桑原慶太郎, 石角元志, 中尾裕則, 佐賀山基, 髭本亘, 伊藤孝「 $\text{La}_3(\text{Co}_{1-x}\text{Fe}_x)_4\text{Sn}_{13}$ のカイラル構造相転移と超伝導」(PSH-19), 日本物理学会 2020 年秋季

- 大会 (オンライン), 2020 年 9 月 8 日~11 日
3. 永瀬裕也, 真砂全宏, 小手川恒, 藤秀樹, 塩澤真未, 橋本大輔, 中里晟也, 岩佐和晃 「キラル構造を持つ超伝導体 $\text{La}_3\text{Co}_4\text{Sn}_{13}$ および関連物質の NQR 測定による研究」 (PSH-110), 日本物理学会 2020 年秋季大会 (オンライン), 2020 年 9 月 8 日~11 日
 4. Ami Shimoda, Kazuaki Iwasa, “Crystal structure and magnetic property of $\text{Nd}_3\text{Rh}_4\text{Sn}_{13}$: a possible chiral magnet” (19-P12), The 5th International Symposium of Quantum Beam Science at Ibaraki University (茨城大学量子線国際シンポジウム) - Chirality in Materials Science: Current Status and Future Prospects - (Online), November 19-21, 2020
 5. Mami Shiozawa, Shiori Suzuki, K. Iwasa, A. Shimoda, D. Hashimoto, K. Gunji, S. Nakazato, K. Kuwahara, M. Ishikado, H. Nakao, H. Sagayama, W. Higemoto, T. U. Ito, “Atomic substitution effect on chiral structure and superconductivity of $\text{La}_3(\text{Co}_{1-x}\text{Fe}_x)_4\text{Sn}_{13}$ and $\text{La}_3(\text{Co}_{1-x}\text{Ru}_x)_4\text{Sn}_{13}$ ” (19-P13), The 5th International Symposium of Quantum Beam Science at Ibaraki University (茨城大学量子線国際シンポジウム) - Chirality in Materials Science: Current Status and Future Prospects - (Online), November 19-21, 2020
 6. Daisuke Hashimoto, Kazuki Gunji, K. Iwasa, S. Nakazato, M. Shiozawa, A. Shimoda, S. Suzuki, K. Kuwahara, M. Ishikado, H. Nakao, H. Sagayama, S. Ohira-Kawamura, N. Murai, K. Nakajima, “Ru-substitution effect on structural transitions and electronic states in chiral materials $\text{Ce}_3\text{Rh}_4\text{Sn}_{13}$ and $\text{La}_3\text{Rh}_4\text{Sn}_{13}$ ” (19-P14), The 5th International Symposium of Quantum Beam Science at Ibaraki University (茨城大学量子線国際シンポジウム) - Chirality in Materials Science: Current Status and Future Prospects - (Online conference), November 19-21, 2020
 7. 下田愛海, 桑原慶太郎, 中尾裕則, 佐賀山基, 大原高志, 中尾朗子, 石角元志, 岩佐和晃 「 $\text{Nd}_3\text{Rh}_4\text{Sn}_{13}$ におけるカイラル結晶構造相転移と反強磁気秩序」 (20pPSH-77), 日本物理学会 2021 年秋季大会 (オンライン), 2021 年 9 月 20 日-23 日
 8. 熊田隆伸, 岩佐和晃, 下田愛海, 尾本星太, 西口日向, 桑原慶太郎, 佐賀山基, 中尾裕則, 石角元志 「 $\text{Eu}_3\text{Rh}_4\text{Sn}_{13}$ の結晶構造相転移と反強磁気秩序の量子ビーム散乱研究」 (PC2-19_B-010), 2021 年度量子ビームサイエンスフェスタ (第 13 回 MLF シンポジウム, 第 39 回 PF シンポジウム) (オンライン), 2022 年 3 月 7 日-9 日
 9. 尾本星太, 岩佐和晃, 下田愛海, 熊田隆伸, 西口日向, 桑原慶太郎, 佐賀山基, 中尾裕則, 石角元志 「 $\text{Gd}_3\text{Ir}_4\text{Sn}_{13}$ の単結晶合成と放射光 X 線回折による構造相転移の研究」 (PC3-19_B-008), 2021 年度量子ビームサイエンスフェスタ (第 13 回 MLF シンポジウム, 第 39 回 PF シンポジウム) (オンライン), 2022 年 3 月 7 日-9 日
 10. 西口日向, 岩佐和晃, 下田愛海, 熊田隆伸, 尾本星太, 桑原慶太郎, 佐賀山基, 石角元志 「 $\text{La}_3\text{Co}_4\text{Sn}_{13}$ における結晶構造相転移と超伝導」 (PC4-23_B-006), 2021 年度量子ビームサイエンスフェスタ (第 13 回 MLF シンポジウム, 第 39 回 PF シンポジウム) (オンライン), 2022 年 3 月 7 日-9 日
 11. 下田愛海, 岩佐和晃, 桑原慶太郎, 佐賀山基, 中尾裕則, 石角元志, 大原高志, 中尾朗子 「 $\text{Nd}_3\text{T}_4\text{Sn}_{13}$ (T = Rh, Ir) におけるカイラル結晶構造相転移と反強磁気秩序」 (PC4-23_B-006), 2021 年度量子ビームサイエンスフェスタ (第 13 回 MLF シンポジウム, 第 39 回 PF シンポジウム) (オンライン), 2022 年 3 月 7 日-9 日
- 誌上発表
1. Kazuaki Iwasa, Seiya Nakazato, Daisuke Hashimoto, Mami Shiozawa, Keitaro Kuwahara, Hajime Sagayama, Seiko Ohira-Kawamura, Naoki Murai, Devashibhai T. Adroja, Andre M. Strydom, “Magnetic Excitations in Chiral-Structure Phase of $\text{Ce}_3\text{Ir}_4\text{Sn}_{13}$,” J. Phys. Soc. Jpn. 90, 124701 (2021) [9 pages] (Published online November 2, 2021, DOI: <https://doi.org/10.7566/JPSJ.90.124701>).