

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 5 月 18 日現在

機関番号：15401

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2020～2023

課題番号：20H01854

研究課題名(和文) 圧力磁場誘起らせん秩序の観測によるキラリティ自発形成機構の研究

研究課題名(英文) Study of chirality formation through observation of pressure and magnetic-field induced spiral magnetic orderings

研究代表者

松村 武 (Matsumura, Takeshi)

広島大学・先進理工系科学研究科(先)・教授

研究者番号：00312546

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,700,000円

研究成果の概要(和文)：キラル磁性体YbNi₃Ga₉における圧力誘起価数転移に伴うらせん磁気秩序，さらに磁場中での形成が期待されるキラルソリトン格子の観測を目標として，超伝導磁石に設置可能なX線回折用の小型ダイヤモンドアンビルセルを製作した．ヘリウムガス圧により，10GPaでも結晶性の劣化がない加圧を実現し，共鳴X線回折実験を行った．また，反転心を持たない正方晶化合物EuIrGe₃での反対称相互作用の観測，CeCoSiでの構造相転移の発見，YbNi₃Al₉についてのスピン波励起の観測，EuNiGe₃の磁場誘起磁気スキルミオン相におけるヘリシティ統合など，結晶対称性と磁気らせんヘリシティに関する研究の進展があった．

研究成果の学術的意義や社会的意義

電子のスピンや軌道運動が起源となって生じる磁性は本質的に量子力学的な現象である．電子自身もスピンは，電荷と同様，素粒子としての一性質であり，電荷と違って周囲の空間とは本来無関係の存在である．ところが，実際の磁性体では周囲の空間対称性とは無関係ではなく，キラル磁性体で観測されるように，特定の巻き方をもった様々ならせん構造を示す．本研究でいくつかの具体的な事例を集中的に研究し，特定の空間対称性をもった固体物質中で電子スピンのどのように空間と関係しているかを実験的に観測し，明らかにすることができた．この研究がさらに進展することで，スピンと空間との関係性への理解が深まるものと期待される．

研究成果の概要(英文)：We made a compact diamond anvil cell for X-ray diffraction, suitable for installation in a superconducting magnet, with the aim of observing the spiral magnetic order accompanying pressure-induced valence transition in the chiral magnet YbNi₃Ga₉, and further, the expected formation of chiral soliton lattices in a magnetic field. We succeeded in applying pressure without crystal degradation even at 10 GPa using helium gas pressure, and conducted a resonant X-ray diffraction experiment. Additionally, we obtained more significant results than initially anticipated, including the observation of antisymmetric magnetic exchange interactions in the noncentrosymmetric magnet EuIrGe₃, discovery of a structural phase transition in CeCoSi, observation of spin wave excitations in YbNi₃Al₉, and helicity unification in the magnetic skyrmion phase of EuNiGe₃ induced by a magnetic field.

研究分野：磁性

キーワード：キラル磁性体 反対称相互作用 らせん磁気ヘリシティ 共鳴X線散乱 磁気スキルミオン格子 キラル磁気ソリトン格子

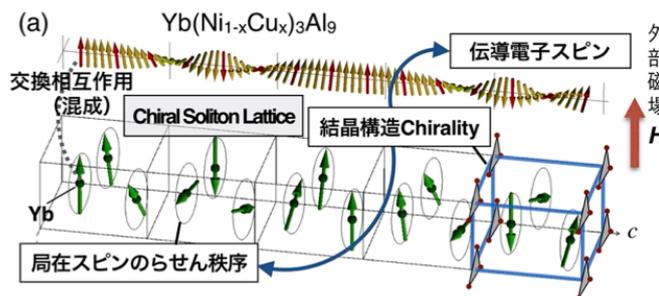
科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

物質の構造に反転中心も鏡映面もなく、エネルギー的に等価でありながら右手系と左手系の2種類の結晶が存在し得る磁性体がキラル磁性体である。生命の世界ではキラリティは極めて重要な役割を担っており、DNAやアミノ酸などの活動に直接的な影響を与えている。物性物理においても、酒石酸結晶の旋光性が左右の結晶形態で異なることをパスツールが発見して以来、物質のミクロな内部構造の違いがマクロな動的性質の違いになって現れることが認識され、キラリティは重要な概念となっている。

キラルな結晶構造を有する磁性体では、近年、非自明な秩序構造がマクロスケールで出現する創発的なスピン秩序形成が注目されている。立方晶 MnSi など B20 型結晶において渦巻き状の磁気秩序ユニットが六方格子を組むスキルミオン格子(SkL)や、六方晶 CrNb3S6 における一軸性のらせん磁気構造で“ひねり”(ソリトン)が周期的に配列したキラルソリトン格子(CSL)の形成である。これまでは、SkL も CSL も d 電子系遷移金属化合物でしか確認されていなかったが、最近、同様な例が f 電子系でも相次いで発見されている。これらの現象の起源にあるのが、対称性が低い結晶中でスピンや軌道の自由度が感じるねじれた相互作用、いわゆる Dzyaloshinskii-Moriya (DM)の反対称相互作用である。これにより、右巻きらせんと左巻きらせんのエネルギー縮退が解け、一方の巻き方(ヘリシティ)を持ったらせん磁気構造が安定化する。

f 電子系では新物質の発見が相次いでおり、大原(名工大)らによって見出された三方晶空間群 R32 のキラル磁性体 Yb(Ni,Cu)3Al9 では、磁場中共鳴 X 線回折によって、結晶キラリティとらせんヘリシティの対応関係を明らかにすると同時に、磁場中で磁気 CSL が実現していることが実証された。琉球大グループで研究が進められている EuTGe3 系 (I4mm, T=遷移金属) の一つ EuNiGe3 は、鏡映面はあるが反転中心はもたない。ゼロ磁場でらせん磁気秩序があり、磁化過程に奇妙な中間相が現れる。これも類似の創発らせん構造の可能性が高いが、ミクロな実験はなされておらず、全くの未開拓領域である。結晶構造とは無関係(格子非整合)に磁気エネルギー利得を最大にする構造をとり得ることが、こうした創発的な構造が現れるための重要な要素であり、異方性が弱いことが重要な鍵を握っていると思われる。



2. 研究の目的

研究が進む Yb(Ni,Cu)3Al9 については、そもそも対称相互作用 J_{ij} や反対称 DM 相互作用のベクトル D_{ij} の大きさが未知である。そのため、伝導電子媒介型相互作用を基礎とした、らせん秩序や CSL 形成に関する理論モデルのスタート地点が不明瞭な状況になっている。d, f 電子系で微視的機構も秩序形成のスケールも違っているのに、類似の創発的秩序形成が見られることは、この現象における普遍性の存在を示している。ここに、どのようなスケールが成り立つのか、普遍性の鍵を握るパラメータは何か、という本質的な問いが生じる。結晶構造にキラリティがない場合でも創発的らせん構造が見られる現象の背景には、自然には本質的にらせんを好む機構が潜んでいることが推測される。どのような機構でらせんが生み出され、どのような場合に顕著に観測されるのだろうか。

こうした問題に取り組むため、本研究では、近年新物質の発見が相次ぐ f 電子系らせん磁性を広く対象とし、磁気キラルソリトン格子に代表される非線形で創発的らせん磁気構造とその動的状態を、放射光 X 線と中性子線を相補的に利用することでミクロに観測する。それにより、反対称 DM 相互作用や相互作用競合型の磁気フラストレーションをもたらすパラメータを明らかにし、キラル結晶、Rashba 型結晶、高対称結晶それぞれに対して、どのような機構でらせん秩序形成へとつながっているのかを解明する。

3. 研究の方法

Yb(Ni, Cu)3Al9 に対して中性子非弾性散乱による結晶場励起の分散やスピン波分散の測定を行い、交換相互作用 J_{ij} や反対称相互作用 D_{ij} を決定する。らせん発現機構については、常圧下で Yb²⁺ の非磁性状態にある YbNi3Ga9 が、Yb³⁺ への量子臨界圧力 9 GPa を超えたとき、どのようならせん磁気構造、および磁場中での CSL が出現するのかを圧力下磁場中共鳴 X 線回折で観測し、混成強度をパラメータとして、遍歴・局在二重性におけるらせん磁気関連の変化を探究する。

鏡映面を持つが反転心を持たない EuTGe3 系については、円偏光 X 線を駆使した磁場中共鳴 X 線回折によって磁場で誘起される創発的らせん秩序構造を観測し、その機構解明に迫る。

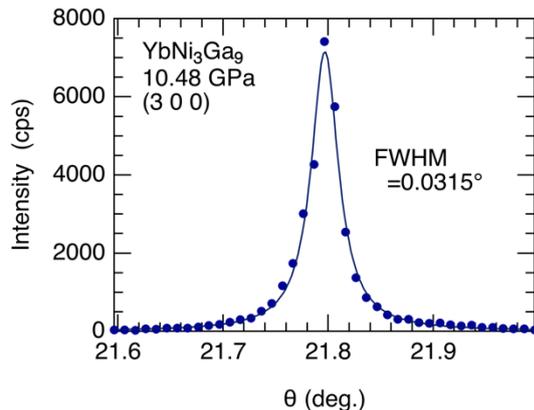
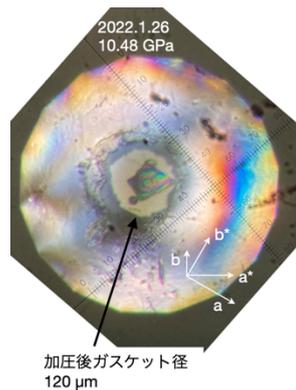
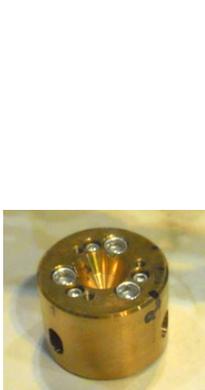
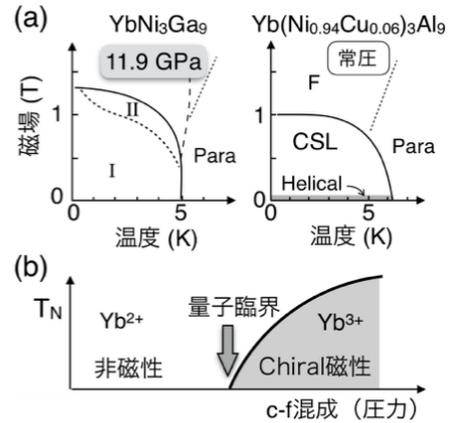
4. 研究成果

(1) キラル磁性体 YbNi3Ga9 における圧力誘起磁気秩序の探索

YbNi3Ga9 は常圧では価数揺動状態にあつて磁気秩序を示さない。しかし、圧力をかけることで Yb 3 価の磁気状態が安定化し、 $P_c=9$ GPa 以上で磁気秩序状態が出現する。その臨界現象、および磁性発現機構に興味を持たれている。10 GPa 以上になると磁気転移温度 5 K の安定した磁気秩序相が現れる。また、圧力誘起磁気秩序相の磁気相図からは、YbNi3Ga9 においても YbNi3Al9 系と同様なキラル磁気ソリトン格子の形成が強く示唆される。磁性が発現する際には DM 相互作用に起因するキラル磁性特有のらせん磁性およびキラル磁気ソリトン格子が形成されると期待される。本研究では、単結晶を用いた圧力下での放射光共鳴 X 線回折により、YbNi3Ga9 における圧力誘起らせん磁気秩序を観測し、らせんの波数の圧力依存性や温度依存性を明らかにすることを目的とした。

9 GPa 以上で生じる磁気反射は、YbNi3Al9 と同様、波数ベクトル $(0, 0, q)$ に観測されると予想される。反射強度を稼ぐため、DAC のキュレット面に試料の c 面が平行になるように設置することで、照射面積を大きくとり有効体積も稼げると考えて、透過配置での観測を試みた。吸収係数から計算される試料の最適厚さは約 15 μm であり、この厚さまでは研磨治具を使って、顕微鏡で随時厚さ確認をしながら手作業で研磨した。そして、最終段階で試料が自然に割れたり、ナイフで軽く触れるだけで割れたりした試料の中から、幅が 60~70 μm 程度の適当な大きさのものを選別した。

低温磁場中での X 線回折実験のために製作した小型 DAC を下図に示す。これは高压下での XMCD 実験用に用いられていた DAC を X 線回折用に改良し、60° の開口角を上流と下流にもたせ、最大回折角 60° での実験ができるようにしたものである。直径 23 mm で、内径 30 mm の超伝導マグネット内に設置できるサイズになっている。Yb の L3 吸収端 8.94keV の X 線を十分に透過するよう、厚さ 1 mm のダイヤモンドをアンビルとして取り付け、単結晶試料と圧力測定用のルビーを設

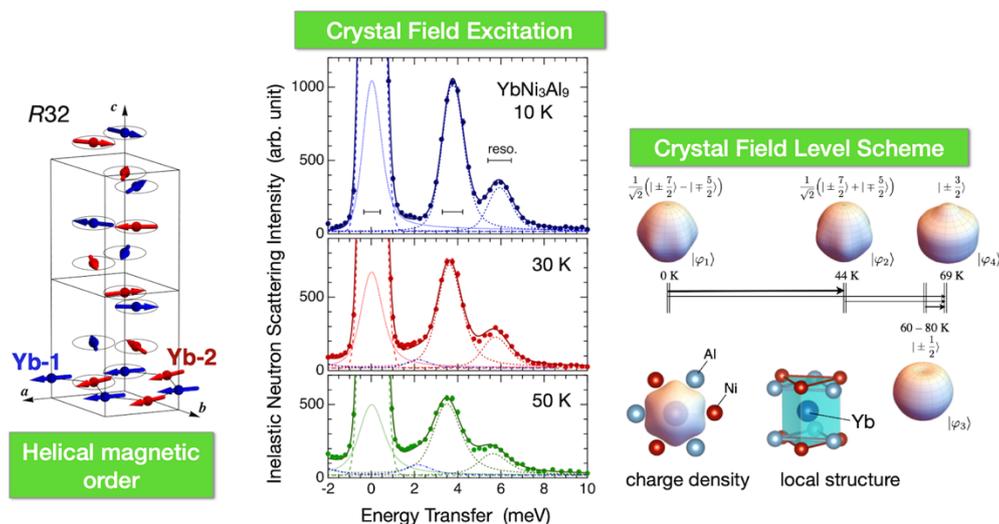


置した。ガスケットには厚さ 55 μm のレニウムを使用し、初期ガスケット径は 210 μm である。ヘリウムガスを圧力媒体として DAC に封入する作業は SPring-8 の専用設備を用いて行った。

単結晶で磁気回折信号を探索する共鳴 X 線回折実験で最も重要なポイントが、試料の結晶性の劣化なしに加圧がされていることである。結晶性の劣化は磁気回折ピークの観測にとって最大の悪条件となる。そのためのヘリウムガス加圧であり、10.5 GPa での結晶性を確認した結果が図 (右) のロッキングスキャンである。半値全幅が 0.0315° という鋭いピーク形状を維持しており、常圧での結晶性がそのまま、全く劣化せずに保たれていることがわかる。強度面でも、途中にアッテネータ 1 mm を入れた状況で 8000 cps 近いカウント数が得られており、 $5\sim 6$ 桁弱い磁気反射の観測に十分期待が持てる状況を作ることができたと評価できる。結果としては、 YbNi_3Ga_9 で圧力誘起の磁気回折ピークを観測することはできなかったが、圧力下実験での技術的蓄積が多く得られた。

(2) キラルらせん磁性体 YbNi_3Al_9 における結晶場波動関数

中性子非弾性散乱により、キラルな結晶構造を持つらせん磁性体 YbNi_3Al_9 における結晶場励起の観測を行った。決定された Yb の結晶場固有関数を示す。三軸分光器を用いて中性子非弾性散乱実験を行い、非弾性散乱スペクトルの解析に加えて、磁化、磁化率、比熱などの物性データも説明できるような結晶場固有関数を決定した。測定に用いたのは当研究室で育成した単結晶の薄片多数を集めたものである。鏡映対称面も反転対称中心も存在しないキラルな結晶構造で、通常の対称型磁気交換相互作用に加えて、Dzyaloshinskii-Moriya 型の反対称磁気相互作用が働くことで、巻き方が一つに定まったらせん磁気秩序が現れる。 $\text{Yb}(\text{Ni}_{1-x}\text{Cu}_x)_3\text{Al}_9$ では、磁場下でキラル磁気ソリトン格子が出現する。こうしたキラル磁性を考える上での基礎となる結晶場波動関数がこれまで未解決であったが、本研究によってこれが明らかになった。それによると、結晶場基底状態は $|\pm 7/2\rangle$ と $|\pm 5/2\rangle$ を 1:1 で重ね合わせた単純な形で、第一励起状態もそれと直交した同じ形のものである。これが低温・低磁場領域で c 面内を容易面とする異方性をもたらしており、高温・高磁場では c 軸が容易軸になる起源であることがわかった。



(3) キラル磁性体におけるらせん磁気秩序と電気四極子秩序の競合

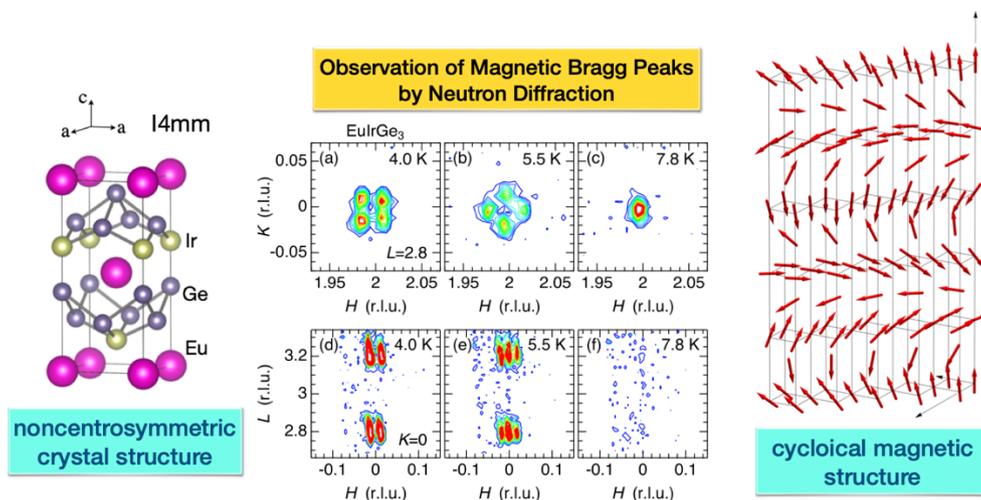
三方晶系の 1 軸性キラル磁性体 DyNi_3Ga_9 における多段逐次相転移の機構が明らかになった。多段相転移が格子非整合ならせん磁気秩序 ($T_N' < T < T_N$), 格子整合ならせん磁気秩序 ($T_N' < T < T_N'$), 強四極子秩序によって誘起される単斜晶系への転移とキャント強磁性を伴う $q=0$ の反強磁性秩

序 ($T \lt T_N'$) によるものであることが共鳴 X 線回折によって明らかになった。大きな軌道角運動量 ($L=5$) とスピン角運動量 ($S=5/2$) による巨大角運動量 ($J=15/2$) をもち、磁気双極子だけでなく大きな電気四極子自由度をもつキラリ磁性体で、Dzyaloshinskii-Moriya 相互作用による格子非整合ならせん磁気秩序と格子整合な強四極子秩序は相矛盾する秩序であるが、これらがどのように競合し、秩序が移り変わるのか、マクロ物性ではよくわからなかったミクロな機構が明らかになった。秩序モーメントが小さな転移温度直下では結晶場異方性が弱いため、DM 相互作用によるならせん秩序が実現するが、秩序モーメントが発達する低温では四極子秩序が支配的となつてならせん秩序は消える。一方、強い反強磁性交換相互作用は全温度領域で強く働き、ならせん秩序相では ab 面内の最近接 Dy モーメントが反強磁性的に結合したまま、c 軸方向にならせんを描いて伝播するという、新奇な構造をもたらすことが明らかになった。

(4) 反転中心をもたない磁性体 EuIrGe₃ におけるサイクロイド磁気構造

正方晶希土類化合物 EuIrGe₃ の結晶構造には反転中心が存在しない。c 軸を含む鏡映対称面は存在しており、キラリではない。しかし、c 軸に垂直な鏡映面がないため、c 軸方向に極性をもった結晶構造であると言える。このような空間に $S=7/2$ のスピンを並べると、どのような磁気構造で安定化するだろうか。Eu の 4f 電子スピンはスピン軌道結合を介して周囲の 3 次元空間の対称性を感じ取っており、それが磁気構造に反映されているはずである。その関係を探るという観点でこの物質の磁気構造を調べてみた。ほぼ等方的な $S=7/2$ の磁性体でありながら、 $T_N=12.2$ K、 $T_N'=7.0$ K、 $T_N^*=5.0$ K と、3 段階もの逐次相転移を示すのも不思議である。J-PARC の SENJU を使った中性子磁気回折、KEK-PF BL3A での共鳴 X 線回折を駆使して各相での磁気構造を特定した。その結果、 T_N で c 軸方向に波数 (0, 0, 0.792) で伝播する縦波サイン波型構造、 T_N' で波数 (0.017, 0, 0.8) となつて ac 面内で回転するサイクロイド構造、 T_N^* でサイクロイド面が 45 度回転して波数 (0.012, 0.012, 0.8) のサイクロイド構造になることがわかった。

さらに、結晶構造に反転対称性がある場合は、巻き方はどちらであってもエネルギーに差はなく、両者がドメインを形成して共存するのだが、反転対称性をもたない EuIrGe₃ では、Dzyaloshinskii-Moriya 型の反対称交換相互作用のため、サイクロイドヘリシティの縮退が解け、片方に決まるはずである。実験でそれを確かめた。円偏光 X 線を使った共鳴 X 線回折によって、4 つの q ベクトルに対応するサイクロイド磁気ドメインがそれぞれ固有のヘリシティを有していることが確認された。しかも、それらのヘリシティはこの結晶構造がもつ C_{4v} の対称性 (4 回対称軸の c 軸を含む鏡映面が 4 枚) をそっくり反映したものになっており、反対称相互作用が確かに働いた結果であることも明らかになった。円偏光を使ったこの実験は KEK-PF 放射光施設の BL3A に設置された移相子システムを利用して行った。波数ベクトルをほんのわずかだけ c 軸から傾けることでサイクロイド磁気構造を作るのはなぜだろうか。結晶格子とどのような相互作用をしているのだろうか。磁気構造がわかったことで、次の新たな疑問が生まれている。



5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計21件（うち査読付論文 21件／うち国際共著 4件／うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 K. Kurauchi, T. Matsumura, M. Tsukagoshi, N. Higa, M. Kakihana, M. Hedo, T. Nakama, and Y. Onuki	4. 巻 92
2. 論文標題 Helicity Selection of the Cycloidal Order in Noncentrosymmetric EulrGe3	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 J. Phys. Soc. Jpn.	6. 最初と最後の頁 083701-1-4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.92.083701	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 S. Nakamura, T. Matsumura, K. Ohashi, H. Suzuki, M. Tsukagoshi, K. Kurauchi, H. Nakao, and S. Ohara	4. 巻 108
2. 論文標題 Discovery of antiferromagnetic chiral helical ordered state in trigonal GdNi3Ga9	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Phys. Rev. B	6. 最初と最後の頁 104422-1-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.108.104422	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 M. Tsukagoshi, T. Matsumura, S. Nakamura, and S. Ohara	4. 巻 92
2. 論文標題 Quadrupolar Domain Selection by Magnetic Field in DyNi3Ga9	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 J. Phys. Soc. Jpn.	6. 最初と最後の頁 115001-1-2
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.92.115001	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 R. Oishi, Y. Shimura, K. Umeo, T. Onimaru, T. Matsumura, M. Tsukagoshi, K. Kurauchi, H. Nitta, T. Takabatake	4. 巻 93
2. 論文標題 Collinear Antiferromagnet SmPt6Al3 with a Sm Honeycomb Structure Centered by Pt Triangles	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 J. Phys. Soc. Jpn.	6. 最初と最後の頁 034707-1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.93.034707	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 H. Ito, Y. Nakahira, N. Ishimatsu, Y. Goto, A. Yamashita, Y. Mizuguchi, C. Moriyoshi, T. Toyao, K.-i. Shimizu, H. Oike, M. Enoki, N. Carolina R. Navarro, A. Miura, and K. Tadanaga	4. 巻 145
2. 論文標題 Stability and Metastability of Li ₃ YCl ₆ and Li ₃ HoCl ₆	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Bull. Chem. Soc. Japan	6. 最初と最後の頁 21807-21816
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1246/bcsj.20230132	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 S. Sawada, K. Okai, H. Fukui, R. Takahashi, N. Ishimatsu, H. Maruyama, N. Kawamura, S. Kawaguchi, N. Hirao, T. Seki, K. Takanashi, S. Ohmura, and H. Wadati	4. 巻 122
2. 論文標題 Lattice constants and magnetism of L10-ordered FePt under high pressure	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Appl. Phys. Lett.	6. 最初と最後の頁 152406-1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0139441	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 M. Tsukagoshi, S. Kishida, K. Kurauchi, D. Ito, K. Kubo, T. Matsumura, Y. Ikeda, S. Nakamura, and S. Ohara	4. 巻 107
2. 論文標題 Crystal field excitation in the chiral helimagnet YbNi ₃ Al ₉	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Phys. Rev. B	6. 最初と最後の頁 104425-1-8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.107.104425	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 T. Matsumura, M. Tsukagoshi, Y. Ueda, N. Higa, A. Nakao, K. Kaneko, M. Kakihana, M. Hedo, T. Nakama, and Y. Onuki	4. 巻 91
2. 論文標題 Cycloidal Magnetic Ordering in Noncentrosymmetric EuIrGe ₃	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 J. Phys. Soc. Jpn.	6. 最初と最後の頁 073703-1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.91.073703	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Y. Kawamura, K. Ikeda, A. Nurshafiqah, B. A. Dalan, J. Hayashi, K. Takeda, C. Sekine, T. Matsumura, J. Gouchi, Y. Uwatoko, T. Tomita, H. Takahashi, and H. Tanida	4. 巻 91
2. 論文標題 Structural Phase Transition and Possible Valence Instability of Ce-4f Electron Induced by Pressure in CeCoSi	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 J. Phys. Soc. Jpn.	6. 最初と最後の頁 064714-1-8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.91.064714	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 T. Matsumura, S. Kishida, M. Tsukagoshi, Y. Kawamura, H. Nakao, and H. Tanida	4. 巻 91
2. 論文標題 Structural Transition in the Hidden Ordered Phase of CeCoSi	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 J. Phys. Soc. Jpn.	6. 最初と最後の頁 064704-1-8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.91.064704	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yusuke Kubo, Naoki Ishimatsu, Naoto Kitamura, Naomi Kawamura, Sho Kakizawa, Masaichiro Mizumaki, Ryuichi Nomura, Tetsuo Irifune and Hitoshi Sumiya	4. 巻 9
2. 論文標題 Visualization of the disordered structure of Fe-Ni Invar alloys by Reverse Monte Carlo calculations	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Frontiers in Materials	6. 最初と最後の頁 954110-1-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3389/fmats.2022.954110	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Naoki Ishimatsu, Kentaro Ishimoto, Kouji Sakaki, Yumiko Nakamura, Naomi Kawamura, Saori I. Kawaguchi, Naohisa Hirao, and Satoshi Nakano	4. 巻 7
2. 論文標題 Ferrimagnetic coupling between cobalt and light rare-earth samarium induced by dense hydrogenation of SmCo5 permanent magnet under high pressures	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Phys. Rev. Materials	6. 最初と最後の頁 024401-1-8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevMaterials.7.024401	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Fuminori Honda, Shintaro Kobayashi, Naomi Kawamura, Saori I. Kawaguchi, Takatsugu Koizumi, Yoshiki J. Sato, Yoshiya Homma, Naoki Ishimatsu, Jun Gouchi, Yoshiya Uwatoko, Hisatomo Harima, Jacques Flouquet, and Dai Aoki	4. 巻 92
2. 論文標題 Pressure-induced Structural Phase Transition and New Superconducting Phase in UTe ₂	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 J. Phys. Soc. Jpn.	6. 最初と最後の頁 044702-1-10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.92.044702	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Mitsuru Tsukagoshi, Takeshi Matsumura, Shinji Michimura, Toshiya Inami, and Shigeo Ohara	4. 巻 105
2. 論文標題 Competition between helimagnetic and ferroquadrupolar ordering in a monoaxial chiral magnet DyNi ₃ Ga ₉ studied by resonant x-ray diffraction	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Phys. Rev. B	6. 最初と最後の頁 014428-1-12
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.105.014428	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yusuke Kousaka, Satoshi Iwasaki, Taisei Sayo, Hiroshi Tanida, Takeshi Matsumura, Shingo Araki, Jun Akimitsu and Yoshihiko Togawa	4. 巻 61
2. 論文標題 Chirality-controlled enantiopure crystal growth of a transition metal monosilicide by a floating zone method	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Jpn. J. Appl. Phys.	6. 最初と最後の頁 45501
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/ac4e2f	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 N. Ishimatsu, S. Iwasaki, M. Kousa, S. Kato, N. Nakajima, N. Kitamura, N. Kawamura, M. Mizumaki, S. Kakizawa, R. Nomura, T. Irifune, and H. Sumiya	4. 巻 103
2. 論文標題 Elongation of Fe-Fe atomic pairs in the Invar alloy Fe ₆₅ Ni ₃₅	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Phys. Rev. B	6. 最初と最後の頁 L220102-1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.103.L220102	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Resta A. Susilo, Wen Deng, Jiajia Feng, Aifeng Wang, Naomi Kawamura, Naoki Ishimatsu, Saori Kawaguchi, Mingzhi Yuan, He Li, Weijun Ren, Takeshi Nakagawa, Cedomir Petrovic, and Bin Chen	4. 巻 3
2. 論文標題 Impacts of pressure to the structural, electronic and magnetic properties of Dirac semimetal EuMnBi ₂	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Phys. Rev. Research	6. 最初と最後の頁 043028-1-10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevResearch.3.043028	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 A. Singh, S. Kumar, M. Singh, P. Singh, R. Singh, V. K Gangwar, A. Lakhani, S. Patil, E. F. Schwier, T. Matsumura, K. Shimada, A. K. Ghosh, and S. Chatterjee	4. 巻 32
2. 論文標題 Anomalous Hall effect in Cu doped Bi ₂ Te ₃ topological insulator	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 J. Phys.: Condens. Matter	6. 最初と最後の頁 305602-1-11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-648X/ab8521	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 T. Matsumura, S. Michimura, T. Inami, C. H. Lee, M. Matsuda, H. Nakao, M. Mizumaki, N. Kawamura, M. Tsukagoshi, S. Tsutsui, H. Sugawara, K. Fushiya, T. D. Matsuda, R. Higashinaka, and Y. Aoki	4. 巻 102
2. 論文標題 Isotropic Parallel Antiferromagnetism in the Magnetic-Field-Induced Charge-Ordered State of SmRu ₄ P ₁₂ caused by p-f hybridization	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 214444-1-11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.102.214444	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 N. Ishimatsu, D. Miyashita, and S. I. Kawaguchi	4. 巻 102
2. 論文標題 Strong variant selection observed in the - martensitic transition of iron under quasihydrostatic compression along [111]	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 054106-1-10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.102.054106	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 K. Kuramochi, N. Ishimatsu, T. Sakai, N. Kawamura, T. Irifune	4. 巻 40
2. 論文標題 An application of NPD to double-stage diamond anvil cells: XAS spectra of rhenium metal under high pressures above 300 GPa	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 High Pressure Research	6. 最初と最後の頁 119-129
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/08957959.2019.1702174	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計35件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 3件)

1. 発表者名 松村武, 倉内憲伸, 塚越舜, 新田大翔, 比嘉野乃花, 垣花将司, 辺土正人, 仲間隆男, 中尾裕則, 大貫惇睦
2. 発表標題 反転心を持たない正方晶EuNiGe ₃ における歪んだ磁気スキルミオン三角格子の形成
3. 学会等名 日本物理学会 2024年春季大会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 谷田博司, 松岡紘人, 川村幸裕, 比嘉野乃花, 松村武, 三本啓輔, 柳有起, 山田武見, 室裕司, 福原忠, 並木孝洋, 桑井智彦
2. 発表標題 CeMnSiの磁場誘起相転移II
3. 学会等名 日本物理学会 2024年春季大会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 中村翔太, 渡邊俊介, 塚越舜, 倉内憲伸, 松村武, 中尾裕則, 大原繁男
2. 発表標題 カイラル金属磁性体Gd(Ni _{1-x} Cox) ₃ Ga ₉ の反強磁性らせん磁気秩序
3. 学会等名 日本物理学会 2024年春季大会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名	T. Matsumura, C. Tabata, K. Kaneko, H. Nakao, M. Kakihana, M. Hedo, T. Nakama, and Y. Onuki
2. 発表標題	Single helicity of the triple-q magnetic order in magnetic fields in cubic chiral antiferromagnet EuPtSi
3. 学会等名	International Conference on Strongly Correlated Electron Systems 2023 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年	2023年

1. 発表者名	K. Kurauchi, T. Matsumura, S. Kishida, T. Tagawa, N. Higa, K. Umeo, and H. Tanida
2. 発表標題	Disappearance of antiferromagnetic order of CeCoSi studied by specific heat under pressure
3. 学会等名	International Conference on Strongly Correlated Electron Systems 2023 (国際学会)
4. 発表年	2023年

1. 発表者名	M. Tsukagoshi, T. Matsumura, S. Nakamura, and S. Ohara
2. 発表標題	Reduction of the crystal symmetry in a chiral magnet DyNi ₃ Ga
3. 学会等名	International Conference on Strongly Correlated Electron Systems 2023 (国際学会)
4. 発表年	2023年

1. 発表者名	倉内憲伸, 松村武, 塚越舜, 新田大翔, 比嘉野乃花, 垣花将司, 辺土正人, 仲間隆男, 中尾裕則, 大貫惇睦
2. 発表標題	反転心を持たない正方晶化合物EuNiGe ₃ が形成する歪んだ三角格子磁気スカルミオン
3. 学会等名	日本物理学会 2023年年次大会
4. 発表年	2023年

1. 発表者名 新田大翔, 比嘉野乃花, 松村武, 谷田博司
2. 発表標題 比熱測定によるCeMnSiの磁場誘起相転移の観測
3. 学会等名 日本物理学会 2023年年次大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 中村翔太, 松村武, 大橋一諒, 鈴木大斗, 塚越舜, 倉内憲伸, 中尾裕則, 大原繁男
2. 発表標題 カイラル金属磁性体GdNi ₃ Ga ₉ の反強磁性らせん磁気秩序
3. 学会等名 日本物理学会 2023年年次大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 中島隆真, 松村武, 長谷川巧, 谷田博司
2. 発表標題 ラマン散乱による正方晶CeCoSiの構造相転移の研究
3. 学会等名 日本物理学会 2023年年次大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 松村武, 倉内憲伸, 塚越舜, 新田大翔, 比嘉野乃花, 垣花将司, 辺土正人, 仲間隆男, 中尾裕則, 大貫惇睦
2. 発表標題 反転心を持たない磁性体EuTGe ₃ (T=Ir, Ni, Rh)におけるらせん磁気構造と反対称磁気相互作用
3. 学会等名 日本物理学会 2023年年次大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 塚越舜, 松村武, 中村翔太, 大原繁男
2. 発表標題 キラル磁性体DyNi ₃ Ga ₉ のらせん磁気秩序と四極子秩序の競合
3. 学会等名 日本物理学会 2023年年次大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 松村武, 上田祥央, 塚越舜, 比嘉野々花, 中尾朗子, 金子耕士, 垣花将司, 辺土正人, 仲間隆男, 大貫惇睦
2. 発表標題 反転心を持たない磁性体Eu ₁ RGe ₃ におけるサイクロイド型磁気構造
3. 学会等名 日本物理学会 2022年秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 塚越舜, 倉内憲伸, 松村武, 石松直樹, 大原繁男, 田中良和
2. 発表標題 YbNi ₃ Ga ₉ の圧力誘起磁気秩序の探索 - 高圧下共鳴X線回折実験 -
3. 学会等名 日本物理学会 2022年秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 岸田卓, 松村武, 比嘉野乃花, 梅尾和則, 谷田博司
2. 発表標題 圧力下比熱測定によるCeCoSiの磁気相転移の観測
3. 学会等名 日本物理学会 2022年秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 川村幸裕, 池田翔, S. N. B. A. Dalan, 林純一, 武田圭生, 関根ちひろ, 松村武, 郷地順, 上床美也, 富田崇弘, 高橋博樹, 谷田博司
2. 発表標題 CeCoSiにおける圧力誘起構造相転移と価数不安定性の可能性
3. 学会等名 日本物理学会 2022年秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 倉内憲伸, 松村武, 塚越舜, 比嘉野乃花, 垣花将司, 辺土正人, 仲間隆男, 大貫惇睦
2. 発表標題 反転心を持たないEuIrGe ₃ の磁場中での磁気構造 ー対称性と磁気ドメインー
3. 学会等名 日本物理学会 2023年春季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 松村武, 倉内憲伸, 塚越舜, 比嘉野乃花, 垣花将司, 辺土正人, 仲間隆男A, 大貫惇睦
2. 発表標題 反転心を持たない磁性体EuNiGe ₃ のらせん磁気構造とその磁場変化
3. 学会等名 日本物理学会 2023年春季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 谷田博司, 松岡紘人, 川村幸裕, 比嘉野乃花, 松村武, 三本啓輔, 柳有起, 山田武見, 室裕司, 福原忠, 並木孝洋, 桑井智彦
2. 発表標題 時空間反転対称な反強磁性体CeMnSiの重い電子状態と磁気相図
3. 学会等名 日本物理学会 2023年春季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 塚越舜, 岸田卓, 倉内憲伸, 伊藤大地, 久保光野, 松村武, 池田陽一, 中村翔太, 大原繁男
2. 発表標題 キラル磁性体YbNi ₃ Al ₉ の結晶場状態の決定と物性の解析
3. 学会等名 日本物理学会 2023年春季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 松村武, 塚越舜, 上田祥央, 大原繁男, 田中良和
2. 発表標題 キラル磁性体YbNi ₃ Al ₉ (H c)におけるコニカル磁気構造
3. 学会等名 日本物理学会2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 塚越舜, 松村武, 中村翔太, 大原繁男
2. 発表標題 低温X線回折によるキラル磁性体DyNi ₃ Ga ₉ の格子歪みの観測
3. 学会等名 日本物理学会2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 川村幸裕, 岸田卓, 塚越舜, 谷田博司, 中尾裕則, 松村武
2. 発表標題 CeCoSiの低温秩序相における構造対称性の低下
3. 学会等名 日本物理学会2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 上田祥央, 松村武, 塚越舜, 比嘉野乃花, 中尾朗子, 金子耕士, 垣花将司, 辺土正人, 仲間隆男, 大貫惇睦
2. 発表標題 中性子および共鳴X線回折によるEuIrGe ₃ の磁気構造の研究
3. 学会等名 日本物理学会2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 岸田卓, 塚越舜, 松村武, 川村幸裕, 中尾裕則, 比嘉野乃花, 谷田博司
2. 発表標題 低温X線回折によるCeCoSiの格子異常の観測
3. 学会等名 日本物理学会2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 池田翔, 上田諒大, 林純一, 武田圭生, 関根ちひろ, 谷田博司, 松村武, 富田崇弘, 高橋博樹, 川村幸裕
2. 発表標題 CeCoSiの高圧低温下における粉末/単結晶X線回折
3. 学会等名 日本物理学会2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 倉内憲伸, 松村武, 塚越舜, 比嘉野乃花, 落合明
2. 発表標題 磁場中比熱によるCeTeの異常な磁気相転移の観測
3. 学会等名 日本物理学会 第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 岸田卓, 塚越舜, 松村武, 比嘉野乃花, 川村幸裕, 中尾裕則, 谷田博司
2. 発表標題 単結晶X線回折によるCeCoSiの低温秩序相での対称性の低下
3. 学会等名 日本物理学会 第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 塚越舜, 松村武, 岸田卓, 伊藤大地, 池田陽一, 藤田全基, 大原繁男
2. 発表標題 中性子非弾性散乱によるYbNi ₃ Al ₉ の結晶場状態の研究
3. 学会等名 日本物理学会 第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 久保優介, 石松直樹, 北村尚斗, 河村直己, 水牧仁一郎, 野村龍一, 柿澤翔, 角谷均, 入船徹男
2. 発表標題 圧力誘起インバー合金Fe ₅₅ Ni ₄₅ の圧力下EXAFSとXRDを用いたRMC法による合金構造解析
3. 学会等名 日本物理学会 2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 石松直樹, 金森奨, 石本賢太郎, 河村直己, 河口沙織, 榊浩司, 中村優美子, 中野智志
2. 発表標題 希土類-遷移金属化合物Gd ₂ Fe ₁₇ の水素誘起磁気構造の圧力変化: X線磁気円二色性による観測
3. 学会等名 日本物理学会 2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 塚越舜, 松村武, 道村真司, 稲見俊哉, 道村真司, 大原繁男
2. 発表標題 共鳴X線回折によるDyNi ₃ Ga ₉ の反強磁性フロップの観測
3. 学会等名 日本物理学会 第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 松村武, 道村真司, 稲見俊哉, 李哲虎, 松田雅昌, 中尾裕則, 水牧仁一朗, 河村直己, 筒井智嗣, 塚越舜, 菅原仁, 東中隆二, 松田達磨, 青木勇二
2. 発表標題 SmRu ₄ P ₁₂ 磁場誘起電荷秩序相における長短型反強磁性と格子変調
3. 学会等名 日本物理学会 第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 岡村英一, 丸岳克典, 松村武, 池本夕佳, 森脇太郎
2. 発表標題 TmTe, YbTeの圧力誘起半導体金属転移と赤外スペクトル
3. 学会等名 日本物理学会 第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 石松直樹, 岩崎駿, 甲佐美宇, 加藤盛也, 中島伸夫, 北村尚斗, 河村直己, 水牧仁一朗, 野村龍一, 柿澤翔, 角谷均, 入船徹男
2. 発表標題 Fe-Ni インバー合金の圧力下EXAFSとXRDを用いたRMC法による合金構造解析
3. 学会等名 日本物理学会 第76回年次大会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 T. Matsumura (ed. D. S. Inosov)	4. 発行年 2021年
2. 出版社 Jenny Stanford Publishing	5. 総ページ数 42
3. 書名 "Competing Order Parameters in Rare-Earth Hexa- and Tetraborides" in Rare Earth Borides	

〔産業財産権〕

〔その他〕

T. Matsumura's Web Page https://home.hiroshima-u.ac.jp/tmatsu/Matsumura/Home.html
--

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	石松 直樹 (Ishimatsu Naoki) (70343291)	広島大学・先進理工系科学研究科(理)・助教 (15401)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関		
オーストラリア	ANSTO		