

令和 4 年 6 月 15 日現在

機関番号：82108

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K03755

研究課題名(和文)空間反転対称性を持たない新型結晶構造物質の超伝導状態

研究課題名(英文)Superconductivity in new type of noncentrosymmetric crystal structure compounds

研究代表者

磯部 雅朗 (ISOBE, Masaaki)

国立研究開発法人物質・材料研究機構・機能性材料研究拠点・首席研究員

研究者番号：10354309

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：空間反転対称性の破れた超伝導とは、結晶構造に対称中心が無い非対称な系で起こる超伝導を指す。そのような超伝導状態では、クーバー対の波動関数の対称性に奇関数の成分が混じると共に、上部臨界磁場が増大する可能性がある。本課題では、空間反転対称性の破れた超伝導のメカニズムを明らかにするため、研究代表者らが発見した新物質BaIrSi₂の超伝導状態について詳細に調べた。その結果、BaIrSi₂はBCS型の中間結合超伝導で説明できることが判明した。さらに、物性と電子構造などから得た知見を基に更なる物質探索を行った結果、別の新しい超伝導体BaRhSi₂とLi₂IrSi₂を発見することに成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

超伝導の社会利用をより広く実現するには、転移温度(T_c)・上部臨界磁場(H_{c2})・臨界電流(J_c)のブレークスルー的な改善が欠かせない。それには、既存物質の材料化の工夫だけでは限界があるため、物質固有の特性(物性)が極めて優れた物質を新たに見いだす必要がある。即ち、固体の電子論に立ち返った超伝導発現メカニズムの解明に関する研究が必要である。本研究課題では、“空間反転対称性の破れた超伝導”に着目し、その物性解明と新物質開発に取り組んだ。このような基礎研究を多く積み上げることで、将来的に、既存物質の性能を大幅に凌駕する新しい超伝導物質の発見に繋がると考える。

研究成果の概要(英文)：Noncentrosymmetric superconductivity refers to the superconductivity that occurs in spatially asymmetric systems which have no inversion center in the crystal structure. It has been theoretically predicted that in such a superconducting system, odd parity component is mixed in the Cooper pair wavefunction and that the upper critical magnetic field may become huge. In order to clarify the mechanism of noncentrosymmetric superconductivity, we studied the superconducting state in the new compound BaIrSi₂. As a result, it was found that BaIrSi₂ is a BCS-type intermediate coupling superconductor. Furthermore, we conducted new material search based on knowledge obtained from the physical properties and electronic structure in BaIrSi₂. We succeeded in discovering new type of superconductors BaRhSi₂ and Li₂IrSi₂.

研究分野：超伝導、強相関電子系

キーワード：超伝導 強相関電子系 空間反転対称性 電子構造

1. 研究開始当初の背景

超伝導の社会利用をより広く実現するには、転移温度(T_c)・上部臨界磁場(H_{c2})・臨界電流(J_c)の高性能化が欠かせない。しかし、従来型の金属はBCS理論によってその性能の上限が決まっており、 T_c は最高でも約40 K程度、 H_{c2} は T_c の1.86倍(単位:テスラT)とされている(パウリ極限)。つまり、限界を超えるより高性能の超伝導を実現するには、BCS理論に従わない“異常な(Unconventional)超伝導”に目を向ける必要がある。

近年注目されている“空間反転対称性の破れた超伝導”は、Unconventional超伝導のひとつと考えてよい。これは、結晶構造に対称中心が無い空間的に非対称な系で起こる超伝導のことを指す。従来の超伝導理論は空間対称性があることを前提としており、クーパー対の波動関数は偶奇性(パリティ)で分類できる。即ち、波動関数のスピンと軌道の成分は、シングレット()且つ偶数波(s- or d-wave)又は、トリプレット()且つ奇数波(p- or f-wave)の何れかである。対称性は、超伝導ギャップ構造を通じて超伝導特性に影響を与える。一方、空間反転対称性が無い場合にはパリティは保存されない。反対称スピン・軌道相互作用によりバンドのスピン縮退が解け、フェルミ面が分裂する。その結果、クーパー対は、シングレットとトリプレットの両者を成分とする“パリティ混合”状態が数学的基本解となる。但し、現実の物質に於いて偶数波と奇数波のどちらが優勢になるかは、電子の引力相互作用のチャンネルの強さに依存する。

空間反転対称性の破れた超伝導の最も際立った性質は、その高い上部臨界磁場(H_{c2})にある。例えば、 $CeRhSi_3$ は、僅か1 K程度の T_c にも拘わらず、20 Tにも及ぶ巨大な H_{c2} を示す。 H_{c2} は常磁性対破壊効果であるパウリ極限 H_p とローレンツ力対破壊効果である軌道極限 H_{orb} で制限され、両者を越えることはできない。しかし、空間反転対称性が破れた系では、反対称スピン軌道相互作用を介してスピンの向きが波数ベクトル k と垂直な方向に強く固定されるため、 H_p は著しく増大する。さらに、電子の有効質量を重くして H_{orb} が増大すれば、 H_{c2} を大きくすることができる。

空間反転対称性の破れた超伝導は、パリティ混合と高い上部臨界磁場の二点に於いて、基礎・応用の両面で興味深い研究対象となり得る。特に、従来物質の特性を超える新物質を開発することは極めて重要である。本研究課題の申請に当たり、研究代表者らは、対称中心のない新しい超伝導体 $BaIrSi_2$ ($T_c \sim 6$ K)を合成発見した。本物質はユニークな結晶構造を有し、Ir-Siの配位構造が著しく歪んでいる。そのため、Irの非充填5d電子軌道は大きな非対称結晶場中に置かれ、大きな反対称スピン軌道相互作用を発生すると考えられる。つまり、空間反転対称性の破れが大きい系の超伝導状態の特徴を知るには最適な物質と見なせる。この観点から、 $BaIrSi_2$ の超伝導物性を明らかにすることが、空間反転対称性の破れた超伝導の本質を探る上で重要であると考えに至った。

2. 研究の目的

本研究の目的は、空間反転対称性の破れた超伝導体を対象として、その異常な超伝導状態の性質を明らかにすると共に、高い上部臨界磁場(H_{c2})を持つ新たな超伝導体を開発することにある。

具体的には、代表者らが合成発見した対称中心の無い新型の結晶構造を有する新しい超伝導体 $BaIrSi_2$ を取り上げ、試料の高品質化を図ると共にその物性を詳細に調べる。比熱測定、 μ SR(ミュオン・スピン回転)測定、第一原理バンド計算等を行い、超伝導ギャップ構造と電子構造を明らかにする。さらに、これらの知見を基に物質探索を行い、新しい超伝導体を見いだすことを目的とする。

3. 研究の方法

空間反転対称性の破れた新超伝導体 $BaIrSi_2$ に関して、良質試料の作製、結晶構造解析、基礎物性測定、 μ SR測定、第一原理バンド計算を行う。これにより、 $BaIrSi_2$ の超伝導状態と電子構造を明らかにする。さらに、新規超伝導物質の物質探索を行う。

手順としては、まず、超高圧合成法を用いて良質の $BaIrSi_2$ 試料を作製する。この試料を用いてX線回折により結晶構造を決定する。次に、電気抵抗・磁化率・比熱を測定し、超伝導特性とギャップ構造を検討する。さらに、横磁場 μ SRの磁場侵入長の低温励起からギャップ構造を決定する。同時に、精密化された構造パラメータを用いてバンド計算を行い、電子構造を決定する。そして、これらの知見を基に超伝導物質探索を行う。Ir→Rh置換やBa→Liなどの置き換えを試みる。

4. 研究成果

本研究課題を遂行した結果、新規超伝導体 $BaIrSi_2$ に関して、以下の結果を得た。

(1) 試料作製

ベルト型プレス装置を用いて高温・高圧下での試料合成を行った。原料、処理温度・圧力・時間などの最適化検討を行い、その結果、6 GPa, 1600 の合成条件において単相試料が得られることを見いだした。

(2) 結晶構造

BaIrSi₂の結晶構造は、先ず走査型透過電子顕微鏡 (STEM) による格子像観察を行い、構造モデルを仮定した上で、X線 Rietveld 解析法を用いて構造パラメータの精密化を行った。図 1 に BaIrSi₂の結晶構造モデルと各方位から投影した STEM-ADF 像、X線回折プロファイル (Rietveld 解析結果) を示す。格子定数 $a = 15.05 \text{ \AA}$, $b = 8.03 \text{ \AA}$, $c = 8.03 \text{ \AA}$ 、斜方晶系、空間群 C22₂1 の結晶構造を有する。過去に報告例が無い新型の結晶構造である。単位胞内には Ir を中心とした 2 種類の Si 配位多面体 (Ir1-Si₄四面体、Ir2-Si₆八面体) が含まれ、その配位構造は著しく歪んでいる。

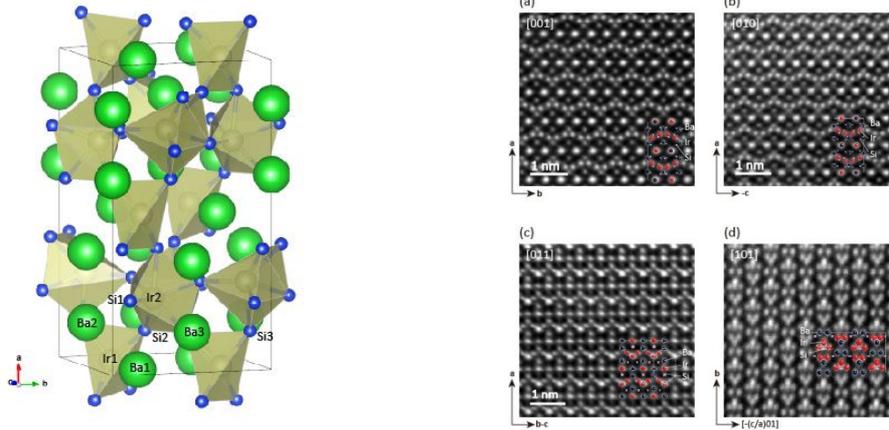


図 1 BaIrSi₂の結晶構造と STEM-ADF 像

(3) 電気抵抗、磁化率

図 2(a) に BaIrSi₂の電気抵抗の温度依存性を示す。 $T > T_c$ の常伝導部分の温度依存性はプロット・グリュナイゼン型に近く、格子散乱が支配的と推察された。約 6 K 以下では超伝導転移による抵抗減少が観測された。ゼロ磁場のときのオンセット T_c は 6.4 K、ゼロ抵抗は 5.9 K である。磁場下に於いて超伝導は抑制されるものの、5.5 T でも T_c (オンセット) 2 K 程度の超伝導は保持される。

図 2(b) に磁化率の温度依存性を示す。約 6 K 以下でマイスナー反磁性が観測された。バルク T_c は 5.8 K 程度である。測定最低温度 1.8 K 付近でのシールドング・シグナルは $-7.4 \times 10^{-2} \text{ emu/cm}^3$ で、完全反磁性の磁化率 $-1/4$ の約 93% に相当する。磁化曲線は 80 Oe 付近にピークを持ち、第 2 種超伝導体の典型的特徴を示す。しかし、初期磁化は 80 Oe 以下の低磁場でも僅かに湾曲しており、磁束の侵入による直線 (完全反磁性) からのズレが認められる。これにより、下部臨界磁場 H_{c1} は相当量に低いことが推測された。一方、上部臨界磁場 H_{c2} は M-H 曲線から、1.8 K に於いて $H_{c2} = 4 \sim 4.5 \text{ T}$ 程度と見積もられた。

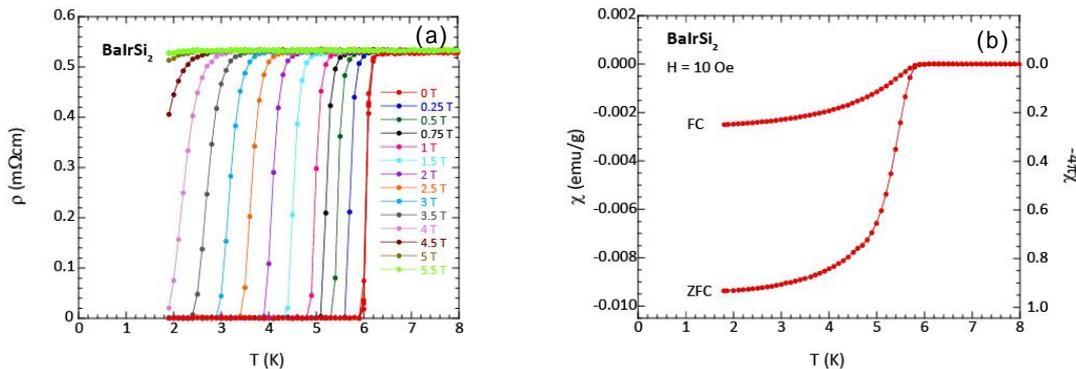


図 2 BaIrSi₂の電気抵抗率と磁化率の温度依存性

(4) 比熱

低温比熱測定により、 $T = 6 \text{ K}$ 付近に超伝導転移に伴う比熱の跳びが観測された。電子比熱係数 γ_n は約 5.5 mJ/molK^2 、デバイ温度 θ_D は約 300 K 程度と見積もられた。図 3(a) は、電子比熱 C_{el} の温度依存性である。バルクの超伝導転移温度 ($T_c = 5.8 \text{ K}$) は、転移前後のエントロピー・バランス、及び、超伝導状態 ($H = 0$) と常伝導状態 ($H = 7 \text{ T}$) の間のエントロピー・バランスを補償するように決められた。転移温度 ($T_c = 5.8 \text{ K}$) に於ける比熱の跳び (C_{el}/T_c) は、 γ_n の約 1.65 倍であり、BCS 理論の予想値 1.43 よりも大きい。このことから、本系は強結合 (中間結合) 超伝導であることが示唆された。W. L. McMillan の式から、電子・格子結合定数は $\lambda_{ep} = 0.8$ 程度と見積もられた。

図 3(b)は、ゼロ磁場に於ける電子比熱の温度依存性である。縦横軸ともに単位は規格化されている。縦軸は準粒子の密度に比例し、その低温励起を表現している。電子比熱の Arrhenius 的な熱励起が観測されることから、均一的な超伝導ギャップが開いていることが推測される。低温での電子比熱の減少率は弱結合 BCS よりもやや急峻であり、電子格子相互作用が(中間的に)強いことを反映している。

図 4 に電気抵抗測定と比熱測定から求めた上部臨界温度 H_{c2} の温度依存性を示す。BCS 模型による WHH 曲線ではなく、むしろ低温まで直線的に H_{c2} は上昇するように見える。比熱のバルク T_c で見ると、 H_{c2} の $T = 0$ K への外挿は概ね $H_{c2}(0) \sim 6$ T 程度と推定される。これは、BCS 理論のパウリ・リミット $1.86 \times T_c \sim 10.8$ T よりも低いことから、本系の H_{c2} はオービタル・リミットで制限されていることが分かる。本系の H_{c2} が WHH 曲線のような形状を示さない理由は不明であるが、フェルミ面のトポロジーが関与しているのかもしれない。

超伝導状態と常伝導状態の比熱の差から超伝導凝縮エネルギーを求め、超伝導物性パラメータを見積もった。熱力学的臨界磁場 $H_c \sim 490$ Oe、下部臨界磁場 $H_{c1} \sim 4$ Oe が見積もられた。さらに、GL 理論の関係式を用いて、磁場侵入長 ~ 640 nm、コヒーレンス長 ~ 7.4 nm、GL パラメータ $\xi_{GL} \sim 87$ が見積もられた。

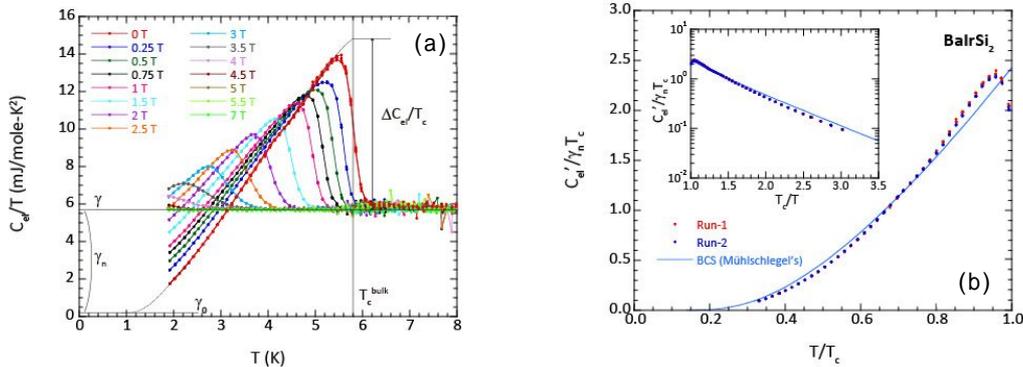


図 3 BaIrSi₂の電子比熱 C_e の温度依存性

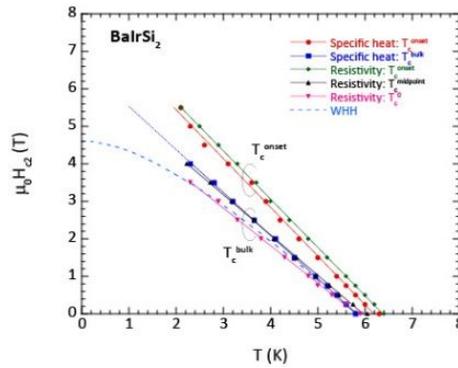


図 4 BaIrSi₂の上部臨界磁場 H_{c2} の温度依存性

(5) μ SR

J-PARC MFL D1 ビームラインに於いて横磁場 μ SR 測定を行った。印可磁場 $H = 80$ Oe ($H_{c1} < H < H_{c2}$)、温度 $T = 0.05$ K ($T < T_c$)の超伝導状態で、Asymmetry 時間スペクトルの減衰が観測された。これは、Abrikosov 磁束格子による内部磁場の不均一分布を反映している。ダンピング・パラメータ から超伝導に寄与する成分 n_s を抜き出し、磁場侵入長 λ を温度の関数として求めた。

n_s^2 は superfluid density; n_s (超伝導電子密度) に比例する。

測定結果から、 $T < T_c/3 \sim 2$ K 以下の低温で、 n_s^2 (即ち、superfluid density) は温度に対して殆ど変化が見られず、ほぼ一定であることが判明した。これは、超伝導ギャップの対称性がノードの無い均一ギャップに相当することを示唆する。さらに、 n_s^2 の温度依存性は、単一ギャップの s 波超伝導模型から予想される曲線(計算値)と良く一致する。この理論曲線への数値フィットにより、 $T_c \sim 5.8$ K、 $\lambda \sim 745$ nm、超伝導ギャップ $\Delta(0) \sim 1.12$ meV が求められた。ギャップ・パラメータ $\Delta(0)/k_B T_c \sim 2.40$ は、BCS 理論の値 1.76 よりも明らかに大きく、本系が強結合(中間結合)超伝導体であることを示している。

(6) 電子構造

図 5(a)(b)にスピン軌道相互作用 (SOC) が無い場合とある場合の BaIrSi_2 のバンド構造を示す。SOC によるバンド分裂が観測される。フェルミレベル E_F 直上の $0 < E < 1$ eV に $\Delta_G \sim 0.2$ eV のバンドギャップが存在する。 E_F は価電子帯の上部を掠めており、金属である。状態密度 (DOS) $N(E_F)$ から見積もられる電子比熱係数 γ_n^{cal} は実測値の γ_n よりも 13% 程度小さく、弱い電子相関が存在することを示唆する。部分状態密度も同時に計算された。 E_F 付近及び価電子帯は主に Ir 5d と Si 3p の混成軌道から構成されている。Ir 5d 軌道由来の DOS は -3 eV 付近のやや深い位置にピークを持つ。 E_F を 2 本のバンドが横切る。SOC によるバンド分裂の大きさは、ゾーン境界の E_F 近傍で $\Delta_{S0} \sim 0.12$ eV、ゾーン内の一般 k 点の E_F 近傍で $\Delta_{AS0} \sim 0.07$ eV 程度である。

図 6(a)(b)に SOC が無い場合とある場合のフェルミ面形状を示す。基本的に 2 枚のフェルミ面から構成されている。ひとつは、Z 点周りの閉じたフェルミ面 (茶色) もうひとつは、ゾーン全体に広がる大きなフェルミ面 (緑色) である。 Γ -Y 軸上のポケットは前者の派生である。SOC によりフェルミ面は 4 枚に分裂する。断面図を用いて SOC によるフェルミ面分裂の大きさを解析した結果、k 空間で平均して $\Delta q \sim 0.08$ nm⁻¹ 程度の分裂が見積もられた。

これにより、本系に於いて SOC によるフェルミ面分裂は十分に大きく、異なるフェルミ面間のクーパ対形成が起きる可能性は低いことが推測される。それにも拘わらず s 波的な超伝導が発現するのは、p 波チャンネルの引力相互作用が弱いためであり、SOC バンド分裂は空間反転対称性の破れた超伝導の発現には必要条件であっても十分条件では無いことを意味する。

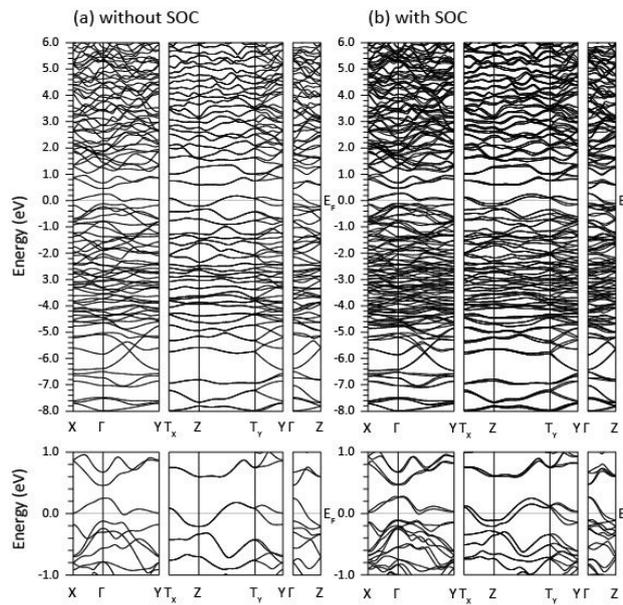


図 5 BaIrSi_2 のバンド構造 : (a) スピン軌道相互作用 (SOC) 無し、(b) SOC 有り

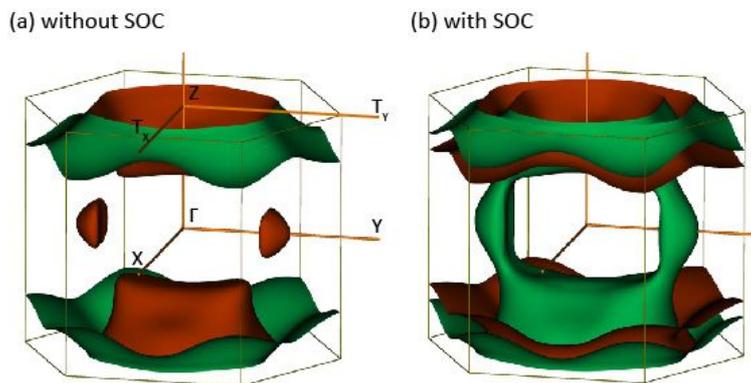


図 6 BaIrSi_2 のフェルミ面 : (a) スピン軌道相互作用 (SOC) 無し、(b) SOC 有り

本研究課題に於いては、新規超伝導体の探索も並行して行った。その結果、新規超伝導体 Li_2IrSi_2 ($T_c \sim 3.6$ K)、及び、 BaIrSi_2 と同型の新物質 BaRhSi_2 ($T_c \sim 5.1$ K) を合成発見した。超伝導などの詳細な物性については、別途報告予定である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 9件/うち国際共著 3件/うちオープンアクセス 9件）

1. 著者名 Isobe Masaaki, Kimoto Koji, Arai Masao, Kolodiaznyi Taras, Kanke Yasushi, Takayama-Muromachi Eiji	4. 巻 30
2. 論文標題 BaIrSi ₂ : A 5d Electron System Superconductor with a New Type of Noncentrosymmetric Crystal Structure	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 JPS Conf. Proc.	6. 最初と最後の頁 011179-1~6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSCP.30.011179	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 Tsuda Shunsuke, Sugiura Shiori, Hirose Hishiro T., Kikugawa Naoki, Ueda Shigenori, Isobe Masaaki, Uji Shinya	4. 巻 30
2. 論文標題 Substitution Effect of the Electronic Structure of Layered Iridium Oxides from Hard X-ray Photoemission Spectroscopy	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 JPS Conf. Proc.	6. 最初と最後の頁 011144-1~6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSCP.30.011144	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 Yoshida H. K., Dissanayake S. E., Christianson A. D., dela Cruz C. R., Cheng Y.-Q., Okamoto S., Yamaura K., Isobe M., Matsuda M.	4. 巻 102
2. 論文標題 Static and dynamic spin properties in the quantum triangular lattice antiferromagnet Ag ₂ CoO ₂	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 024445-1~10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.102.024445	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 Matsuda Masaaki, Dissanayake Sachith E., Yoshida Hiroyuki K., Isobe Masaaki, Stone Matthew B.	4. 巻 102
2. 論文標題 Magnetic excitations affected by spin-lattice coupling in the S=32 triangular lattice antiferromagnet Ag ₂ CrO ₂	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 214411-1~6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.102.214411	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 Yoshida H. K., Matsuda M., Stone M. B., dela Cruz C. R., Furubayashi T., Onoda M., Takayama-Muromachi E., Isobe M.	4. 巻 2
2. 論文標題 Partially disordered state with short-range spin correlation in S=5/2 classical triangular antiferromagnet Ag ₂ FeO ₂	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Research	6. 最初と最後の頁 043211-1~6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevResearch.2.043211	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 Ohtani Ryo, Matsunari Hiromu, Yamamoto Takafumi, Kimoto Koji, Isobe Masaaki, Fujii Kotaro, Yashima Masatomo, Fujii Susumu, Kuwabara Akihide, Hijikata Yuh, Noro Shin ichiro, Ohba Masaaki, Kageyama Hiroshi, Hayami Shinya	4. 巻 59
2. 論文標題 Responsive Four Coordinate Iron(II) Nodes in FePd(CN) 4	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Angewandte Chemie International Edition	6. 最初と最後の頁 19254~19259
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/anie.202008187	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 Ishigaki Takamasa, Nakada Yusuke, Tarutani Naoki, Uchikoshi Tetsuo, Tsujimoto Yoshihiro, Isobe Masaaki, Ogata Hironori, Zhang Chenning, Hao Dong	4. 巻 7
2. 論文標題 Enhanced visible-light photocatalytic activity of anatase-rutile mixed-phase nano-size powder given by high-temperature heat treatment	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Royal Society Open Science	6. 最初と最後の頁 191539-1~14
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1098/rsos.191539	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 Horigane K, Takeuchi K, Hyakumura D, Horie R, Sato T, Muranaka T, Kawashima K, Ishii H, Kubozono Y, Orimo S, Isobe M, Akimitsu J	4. 巻 21
2. 論文標題 Superconductivity in a new layered triangular-lattice system Li ₂ IrSi ₂	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 New Journal of Physics	6. 最初と最後の頁 093056-1~9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1367-2630/ab4159	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 Isobe Masaaki, Kimoto Koji, Arai Masao, Takayama-Muromachi Eiji	4. 巻 99
2. 論文標題 Superconductivity in BaIrSi ₂ : A 5d electron system with a noncentrosymmetric crystal structure	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 054514-1-14
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.99.054514	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 -

[学会発表] 計3件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件)

1. 発表者名 磯部雅朗、木本浩司、新井正男、室町英治
2. 発表標題 空間反転対称性の破れた新型結晶構造を有する5d電子系新超伝導体BaIrSi ₂
3. 学会等名 日本物理学会2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 宮崎一輝、髭本亘、網田裕斗、伊藤孝、磯部雅朗
2. 発表標題 μSR法で見た反転対称性を持たない結晶構造を持つBaIrSi ₂ の超伝導状態
3. 学会等名 日本物理学会2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Masaaki ISOBE, Koji KIMOTO, Masao ARAI, and Eiji TAKAYAMA-MUROMACHI
2. 発表標題 BaIrSi ₂ : A 5d Electron System Superconductor with a New Type of Noncentrosymmetric Crystal Structure
3. 学会等名 International Conference on Strongly Correlated Electron Systems 2019 (SCES 2019) (国際学会) (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

物質・材料研究機構 機能性材料研究拠点 上席研究員
<https://www.nims.go.jp/research/researcher/masaaki-isobe.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	新井 正男 (ARAI Masao) (40222723)	国立研究開発法人物質・材料研究機構・技術開発・共用部門・ステーション長 (82108)	

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
---------	---------