

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 26 日現在

機関番号：22604

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23340107

研究課題名(和文)籠状構造を有する希土類希薄化合物に普遍的な特性と充填スカッテルダイトの固有特性

研究課題名(英文)Sorting out specific characters of the filled skutterudites from those common to the cage compounds with a low fractional ratio of a rare earth element.

研究代表者

佐藤 英行 (Sato, Hideyuki)

首都大学東京・理工学研究科・名誉教授

研究者番号：80106608

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,700,000円、(間接経費) 4,410,000円

研究成果の概要(和文)：充填スカッテルダイト(F-Sk: RT₄X₁₂)では、同一結晶構造の3つの構成要素(R=希土類、T=8族、X=15族元素)を置換するだけで、嘗てない多様な振舞が見出された。その原因として、希土類イオンが12個のXで構成される対称性の良い籠内に配置するため、伝導電子と4f電子の混じり合いが強められること等が挙げられている。本研究では、新たな新機能を有する籠状化合物の探索を推進するため、未探索のF-Sk及び新たな可能性を持つ籠状化合物の純良単結晶を育成して物性を比較することにより、F-Skに固有な振舞と籠状構造に共通する振舞を調べた。

研究成果の概要(英文)：In the filled skutterudite compounds (F-Sk: RT₄X₁₂) with a rare earth element (R) surrounded by a caged made of twelve pnictogens, various unpredictable novel behaviors have been found. Several factors, such as the enhanced hybridization of conduction electrons with 4f electrons by confining rare earth ions with in the pnictogen cage, have been sorted out as the reasons why such behaviors are realized in F-Sk compounds. To advance the study of new caged compounds exhibiting novel features more efficiently, we have investigated several F-Sk single crystals for the first time which had never been investigated due to the difficulty in grown single crystals at ambient pressure. We have also studied the basic physical properties of several other caged compounds with and without cubic crystal symmetry for the first time. Based on their systematic comparison, we have tried to sort out the specific characters of F-Sk from those common to the cage compounds.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・物性ⅠⅠ

キーワード：充填スカッテルダイト 強相関電子系 高压合成 ラットリング 重い電子

1. 研究開始当初の背景

化学式 $RETr_4Pn_{12}$ (RE: 希土類, Tr: Fe, Ru, Os, Pn: P, As, Sb) で表される充填スクッテルダイト化合物では、3つの構成要素を置換することにより、それまでにない多様な振舞いが見出された。精力的な研究の結果、それらの多くが、希土類イオンが12個のPnが作る「カゴ」内に内包されていることにより実現していることが分かってきた。具体的には、①12個のPn起源のp電子がREに束縛されたf電子を引き出す(c-f混成効果の増強)、②対称性の良いカゴに囲まれたことによる小さな結晶場分裂が起きる、③通常の立方対称性(O_h)に比較し適度に低い対称性(T_h)により二つの結晶場3重項が混じる、④希土類イオンのカゴ内での非調和的振動が起きる、などが上げられる。

研究の次の段階として、より広い視野で、希土類イオンを内包するカゴ状物質系における新奇特性の出現の可能性を検証し、新たな物質探索の指針を得ることは重要と考える。但し、その基準となる充填スクッテルダイト化合物では、いまだ、興味深い特性が期待されながら基礎物性が全く未調査なものや報告者により電気的基底状態が全く矛盾した結果のままなどが残されている。

特に、Pn=As系の研究は、適切なフラックスが見つからないこともあり、特に遅れている。最近、ポーランドHenkie教授グループにより、低圧(~4 MPa)の圧力管内でのCdAsフラックス法を用いた単結晶育成が行われたが、育成されたREは、La、Ce、Prのみであり、Nd以上の重希土類では育成に成功していない。

次に、希土類別に申請時の状況を整理する。Ce系は通常の化合物とc-f混成の強度を比較する上で有効であり、充填スクッテルダイトの、Tr、Pn依存性の系統性の検証は欠かせない。しかし、中間のカゴサイズを持つAs系の中で、 $CeFe_4As_{12}$ と $CeRu_4As_{12}$ については、電気的基底状態が大きく異なる報告が成されている。高圧下で合成した多結晶では粒界の影響が無視できないのに対し、低圧下CdAsフラックス法による単結晶ではCeサイトの欠損の可能性が指摘され、解決すべき課題として残されたままである。Sm系は、価数揺動、近接するJ多重項の自由度も持つという特徴を持つ重要な系であり、 $SmOs_4Sb_{12}$ で見出された「磁場に鈍感な重い電子状態」はその起源の解明は重要課題の一つとして残されている。それにかかわらず、Sm-As系では、 $SmFe_4As_{12}$ の多結晶を用いた限定的な報告があるのみであり、Tr = Ru、Osについては多結晶試料のさえもだれも作製に成功していない。Yb系はCe系と同様に通常化合物でもc-f混成に起因する興味深い特性が見出される系であるのに、これまでに単結晶育成の報告があるのは $YbFe_4Sb_{12}$ のみである。この物質では、常圧で作製された試料には(試料依存する)Ybの欠損があるため、報告者によ

る磁氣的基底状態が異なるという問題が指摘されていた。我々は高圧下で、Yb欠損がない単結晶を育成し、Yb充填した単結晶は非磁的な基底状態を持つことを確定した。それ以外のTr、Pnの組合せについては、誰も物性評価可能な大きさの単結晶の育成に誰も成功していなかった。

カゴ状物質の更なる研究の進展のためには、これら物質系の基礎物性の評価を行って充填スクッテルダイトの系統的な理解を深め、新たなカゴ状物質の特性を評価が成されることが必要である。

2. 研究の目的

本研究では、充填スクッテルダイト系で、興味深い特性が期待されながら未探索なものや大きく矛盾する結果が報告されたまま残されているもののうち、重要なRE-Tr-Pnの組み合わせを選択して単結晶を育成して特性評価を行い、充填スクッテルダイトの全体像を把握する。その上で、類似したカゴ状構造を持つ物質系の評価を行って比較することにより、カゴ状希薄希土類化合物に普遍的な特性と充填スクッテルダイトに固有な特性を明らかにすることを目的とする。

3. 研究の方法

残された充填スクッテルダイトは、いずれも通常の常圧フラックス法による育成は困難である。従って、限られた研究期間を考慮し、希土類元素については、興味深い特性が期待できるCe、Sm、Yb系に的を絞って、高圧フラックス法により純良単結晶を育成する。

(1) 充填スクッテルダイトの計画

Ce系については、 $CeOs_4As_{12}$ と $CeRu_4As_{12}$ に的を絞り、高圧下(~4 GPa)に於けるAs自己フラックス法により単結晶を育成し、基礎物性(磁気特性、比熱、電子輸送効果)の評価を行うこととした。

Sm系については、 $SmTr_4As_{12}$ (Tr: Ru, Os)に重点を置き、高圧下As自己フラックス法により単結晶を育成し、基礎物性の評価を行う。また、多結晶を用いた報告で相転移の種類に矛盾が見られる $SmFe_4As_{12}$ についても、単結晶を育成し、矛盾の原因の解明を目指す。

Yb系の単結晶育成は最も困難が予想されるので、カゴのサイズが最も小さい $YbFe_4P_{12}$ と最も大きな $YbOs_4Sb_{12}$ に集中して、各々PとSbを自己フラックスとして単結晶を育成し、基礎物性の評価を行う。この選択は、単にカゴサイズのみによるのではない。Fe-P系ではPr系としては最も重い電子系であり、低温で高次の多極子による興味深い秩序相を示す $PrFe_4P_{12}$ やSm系として初めての強磁性転移を示す重い電子物質 $SmFe_4P_{12}$ が見出されている。一方、Os-Sb系では、初めてのPr系重い電子超伝導体 $PrOs_4Sb_{12}$ や磁場に鈍感な重い電子物質 $SmOs_4Sb_{12}$ が見出されている

ことを考慮した。

(2) 比較すべきカゴ状希土類化合物の選択と計画

充填スクッテルダイト同様に立方対称性を持つ $RETr_2Al_{20}$ (RE =希土類, Tr =遷移金属, $X=Al, Zn$) 及び $RE_4Tr_{12}Sn_{25}$ (Tr : Pt, Pd) を、異方的な(菱面体結晶構造)ものとして RAu_3Al_7 ($RE=La, Ce, Pr, Sm, Yb$) を選択した。 $RETr_2Pn_{20}$ 系は既に我々を含め、複数のグループが研究を進めていたので、 Sm 系の磁場に鈍感な重い電子の振舞いと Yb 系の c - f 混成強度の評価に重点を置いて計画を進めた。 $R_4Pt_{12}Sn_{25}$ については、 c - f 混成効果が弱いことを示唆する既報の結果を検証することに絞った。

$REAu_3Al_7$ については、異方性の大きな結晶構造を持つにもかかわらず、Lattner 等による、異方性を無視した一部の物理量の測定報告しか無かった。本研究では、常圧下フラックス法により単結晶サイズの大型化を図り、異方性を考慮した基礎物性の評価を行うことに重点を置いた。また、 $4f$ 電子を持つ全ての RE を含む試料の参照物質として欠かせない $RE=La$ の結晶育成は常圧下では誰も成功していなかったため、高圧下での結晶育成を目指した。

4. 研究成果

(1) 充填スクッテルダイトの特性の全体像を捉えるのに必要な単結晶の高圧下フラックス法による育成と基礎物性評価:

① Ce 系充填スクッテルダイト

Ce 系では、 $CeFe_4As_{12}$ と $CeRu_4As_{12}$ が、ともに、高圧下で合成された多結晶と定圧下フラックス法で育成単結晶試料では、電気的基底状態が全く矛盾するという問題が、解決されないまま残されている。

$CeFe_4As_{12}$ に関して、Baumbach 等は低圧下フラックス法で育成した単結晶では、電気抵抗と格子定数が相関して、大きな試料依存性を示すことから、格子定数を変化させて c - f 混成強度を制御する可能性を提案した。報告された格子定数の大きな試料依存性を確かめるため、我々は高圧下で単結晶を育成してその検証を行った。測定した電気抵抗は報告と類似した試料依存性を示すのに対し、格子定数の試料依存性は極めて小さいことを確認した(図 1(a))。また、他の基礎物性の試料依存との詳細な比較を行い、半導体的な基底状態が本質的であるとの結論を得た。

一方、 $CeRu_4As_{12}$ では、半導体的基底状態を示す高圧合成多結晶と金属的基底状態を示す低圧育成の単結晶の各々の弱点(粒界の寄与と Ce の欠損)を持たない、高圧下フラックス法で育成した単結晶を用いて測定を行い、金属的な基底状態が本質であることを確かめた(図 1(b))。これらの結果から、 As

系では、低圧下での結晶育成でも希土類サイトの欠損は極めて小さいこと、 c - f 混成強度が P 系と Sb 系の間にある Ce - As 系では、混成ギャップの生成が結晶の純良性に非常に敏感であることが明らかとなった。

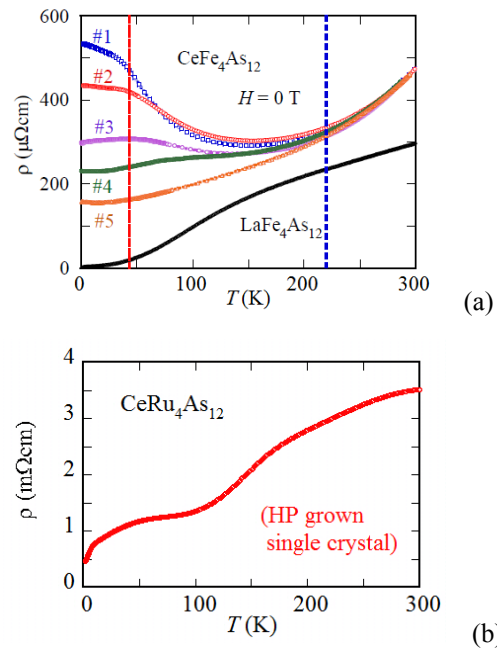


図 1 (a) $CeFe_4As_{12}$ 、(b) $CeRu_4As_{12}$ の比抵抗の温度依存性。

② Sm - As 系充填スクッテルダイト

我々は、高圧下 As セルフフラックス法により、初めて $SmOs_4As_{12}$ の単結晶育成に成功し、基礎物性の評価を行った。

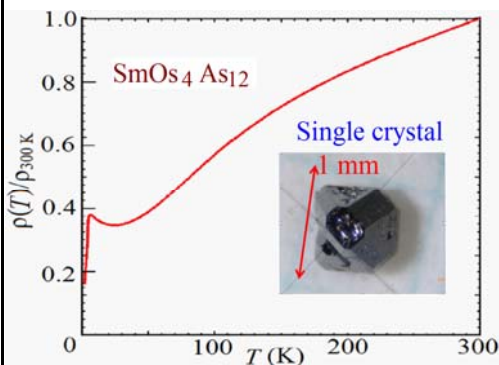


図 2 室温の値で規格化した電気抵抗率の温度依存。挿入図は育成された単結晶。

その結果、 ~ 5.0 K に強磁性的転移を示し、電子比熱係数は転移温度より高温側で ~ 500 mJ/K^2 のほぼ一定値を取り、電気抵抗は転移温度以上で顕著な $-\ln(T)$ を示すことを見出した(図 2)。これは、この物質が重い電子強磁性体であることを示している。一方、 $SmRu_4As_{12}$ は 2.4 K に多極子によると思われる非磁性的な相転移を起こし、相転移以上の振舞は、電気抵抗の $-\ln(T)$ 依存性、電子比熱係数の増強など、 $SmOs_4As_{12}$ と類似した振舞を示

すことを確かめた。更に、Feのd電子により比較的高い強磁性的な相転移(39 K)を示すSmFe₄As₁₂でも、フォノン散乱による電気抵抗の成分を差し引くと、転移温度の高温側に電気抵抗の $-\ln(T)$ 依存性、の存在が現れる。このことは、SmTr₄As₁₂の全てに共通して、転移温度以上で近藤散乱が寄与していることを示す。

③ Yb系スキテルダイト

YbFe₄P₁₂とYbOs₄Sb₁₂の単結晶育成に初めて成功し、基礎物性の測定を行った。YbFe₄P₁₂については、多結晶試料で報告された~0.8 Kにおける比熱係数の巨大ピークの検証を行ったところ、単結晶試料では振幅が桁違いに減少したことから、不純物によるものと判断した(図3(b))。一方、~1 K以下で報告されている非フェルミ液体的挙動(電子比熱係数の対数的温度依存)が再現されることを確認した。

得られたYbOs₄Sb₁₂の単結晶の電気抵抗は通常の金属的伝導を示し、希土類化合物としては純良と判断できる残留抵抗比(>20)の試料で測定した帯磁率(図3(b))はYb²⁺から期待されるPauli磁性であり、強いc-f混成を示唆している。

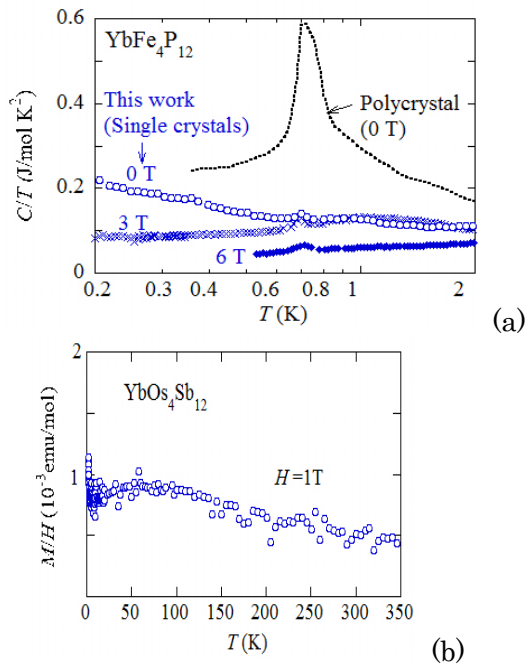


図3 (a) YbFe₄P₁₂の比熱係数の温度依存、(b) YbOs₄Sb₁₂の帯磁率の温度依存。

(2) スキテルダイト以外のカゴ状化合物

① RETr₂Al₂₀ (RE:Sm, Yb, Tr:Ti, 5族元素)

SmTr₂Al₂₀系は、立方晶構造でありSmが16個のAlに囲まれた、カゴ状構造をもつ。この系では、磁場に鈍感な磁気相転移や重い電子状態が現れ、その起源の探索がなされている。我々はSmTa₂Al₂₀の電子輸送効果測定を行い、通常の近藤格子系で期待される負の磁気抵抗が現れないこと、及び低温・低磁場

で緩和時間の異方性が大きいことを見出した。

初めにTr=Tiでの磁場に鈍感な振舞の発見に続き、TiをV, Cr, Taに置き換えて系統的な物性評価を行った結果、全ての物質において磁場に鈍感な相転移を見出し、秩序相での磁場に鈍感な重い電子状態を確認した。ここでは、特に基底状態を電子散乱の視点から詳しく検討した結果(図4)を紹介する。

磁気抵抗は全温度・磁場領域で、電子のサ

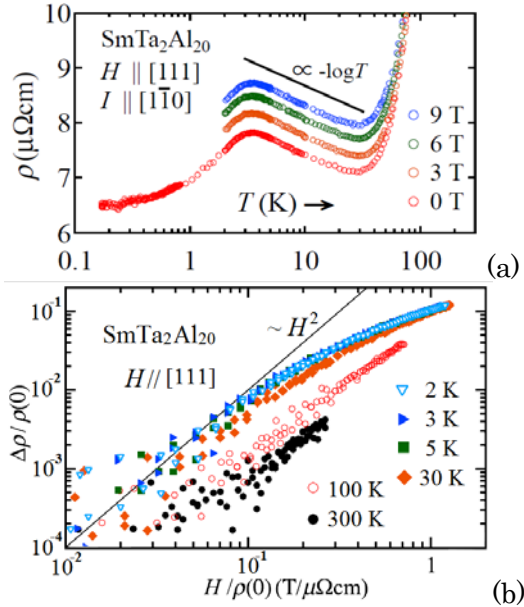


図4(a) 比抵抗の温度依存、(b) 磁気抵抗のKohlerプロット。

イクロトン運動による正の磁気抵抗が支配しており、近藤効果を示唆する3~30 Kの $-\ln(T)$ 依存の温度領域では、 $\rho(T)$ は磁場により並行移動しているだけであり、 $-\ln(T)$ 依存性の磁場鈍感性を示している。図4(b)の $H/\rho_0 < 0.1$ では、磁気抵抗は全ての温度で期待される $\sim H^2$ 依存性に近づくが、低磁場の $\Delta\rho/\rho_0$ は温度低下とともに増大し、2 Kでは室温より1桁以上増大している。これは、基底状態の電子散乱の波数依存性が極めて大きいことを示しており、高物質の磁場に鈍感な重い電子状態の機構を明らかにするうえで重要な特徴と考えられる。

低温で磁場が増加すると飽和傾向を見せるが、これは中間磁場を経て、補償金属であるSmTa₂Al₂₀に期待される高磁場条件での $\sim H^2$ 依存性へのクロスオーバー領域に入ったこと示している。一方、波数ベクトルの大きなフォノンによる散乱が優勢となる高温では電子散乱の波数依存性が減少し、同じ有効磁場 H/ρ_0 で $\Delta\rho/\rho_0$ は大幅に減少するため、強磁場にスムーズに繋がっている。一方、ホール比抵抗の磁場依存性には、高次の項が支配的になっていることは、Smの平均価数が大きく3価から外れていることはないことを示しており、X線吸収分光実験により評価した中

間価数と矛盾する結果となった。

② REAu₃Al₇ (RE:La, Ce, Sm, Yb)

高圧下フラックス法を適用することにより、参照物質として不可欠な LaAu₃Al₇ の単結晶育成に初めて成功した (図 5(a))。

測定を行った全ての希土類で、基礎物性は結晶の異方性を反映して顕著な異方性を見出した。

Ce 系は、2.6 K に強磁性的転移を示す。磁化容易軸は c 面内にあり、有効ボーア磁子数は Ce³⁺ に期待される値と一致している。電気抵抗は金属的で、~20 K に極小を示して近藤効果を示唆する -ln(T) 依存性を示すが、基本的に c-f 混成効果は小さい。SmAu₃Al₇ では、0 磁場では、転移点以下に大きな電子比熱係数など SmTr₂Al₂₀ と類似した振舞を見せるが、明白な磁場依存を示すことが決定的な違いである。重い電子状態形成の起源の解明に繋がると考えられる。Pr, Tm では、測定された物性は基本的に局在 3 価イオンとして理解され、c-f 混成を示唆する結果は得られていない。

一方、YbAu₃Al₇ の帯磁率は、僅かな不純物に起因する低温の上昇を磁場により抑制すると、100 K 以下で一定であり (図 5(b))、電気抵抗の単調な金属的振舞を考慮すると Yb²⁺ と考えられる。一方、YbOs₄Sb₁₂ と異なり、100K 以上で上昇し、~300 K でピークを持つ振舞を考慮すると、近藤温度が数百 K の近藤物質と考えるべきであり、充填スクッテルダイトや RETr₂Al₃ 系に比較して c-f 混成は小さい。

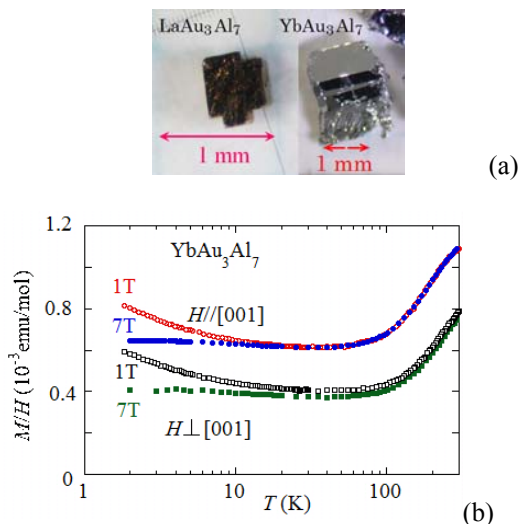


図 5 (a) 育成した LaAu₃Al₇、YbAu₃Al₇ 単結晶、(b) YbAu₃Al₇ の帯磁率。

③ その他のカゴ状物質

Ce₄Pt₁₂Sn₂₅ については、既報のとおり、c-f

混成は小さいにもかかわらず、反強磁性転移温度が低く、RKKY 相互作用が得意に抑制されていることが確認された。

(3) まとめ

充填スクッテルダイトでは、希土類元素が共有結合性の強い 12 個の 15 族元素により形成されたカゴ内に在り、同じ結晶構造のまま 3 つの構成要素を置換することにより、それまで 4f 電子系で見出されてきた殆どの振舞いが出現する。それに加え、小さな結晶場分裂に関わる超伝導や磁場に鈍感な重い電子系など、極めて強い 4f 電子と伝導電子の混成が実現し、複数電子を持つ希土類ゆえに可能になる新奇な振舞いが見出された。

新たな段階として、この充填スクッテルダイトの特徴を取り入れた新たな物質系の探索を進めるための一助として、以下に本研究の成果を簡単にまとめ、全体像をつかむ材料としたい。

始めに、RETr₄Pn₁₂ (RTP)、RETr₂Al₂ (RTA)、RETr₂Zn₂₀ (RTZ)、RE₃Au₂Al₇ (RAA)、の 4 つの系について、c-f 混成強度を反映する Ce と Yb 系の帯磁率と電気抵抗の温度依存の振舞いを、本研究の結果をこれまでの報告と総合して整理する。

● 帯磁率

Ce 系 ⇒ RTP, RTA : パウリ常磁性、RTZ (T=Ir) : 緩やかなピーク (~110 K、中間原子価)、RAA : キュリーワイス常磁性 (結晶場、異方的強磁性)

Yb 系 ⇒ RTP, RTA : パウリ常磁性、RTZ : 増強常磁性・強相関電子、RAA : パウリ常磁性 (緩やかなピーク~300 K、中間原子価)。

● 電気抵抗

Ce 系 ⇒ RTP : 近藤半導体 (半金属)、RTA : 通常金属的、RTZ (T=Ir) : 中間原子価的肩構造 (~150 K)、RAA : 弱い近藤効果的振舞

Yb 系 ⇒ RTP : 通常金属的 (弱い近藤効果、非フェルミ液体)、RTA : 通常金属的、RTZ : 中間原子価的肩構造、RAA : 通常金属的。

これに、電子比熱係数の情報を加えて混成効果の大きさ概略を整理すると、

$$\text{RTP} \sim \text{RTA} > \text{RTZ} > \text{RAA}$$

となり、異方性が大きなカゴ構造での小さな c-f 混成効果は予想された結果である。その他につき単純化した印象を整理すると、初めの 3 つは、強弱の差はあれ、比較的対称性の良いカゴ状物質の共通性を反映しており、2 番目と 3 番目の差は、Pn と X のフェルミ面に近いバンドの特性が决定着のように見える。1 番目と、2・3 番目の差は局所対称性により微妙な差 (T_h) が生んでいる。

一方、カゴ状構造に関わる、格子振動のデバイモデルからのずれは共通して観測される。しかし、単純ないわゆるラットリングとして整理できるのは RTP であり、他の物質系

については、より詳細な検討が待たれる。

本研究は完全とは言えないが、結晶育成の困難さから知見が得られていなかった物質のうち、必須と思われる試料の結晶育成を行って基礎物性を調べたことは意義あることと信ずる。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 10 件)

- ① Y. Ogawa, H. Sato, M. Watanabe, T. Namiki, S. Tatsuoka, R. Higashinaka, Y. Aoki, K. Kuwahara, J. Yamaura, Z. Hiroi, Electronic State of $\text{CeFe}_4\text{As}_{12}$ Investigated by Using Single Crystals Grown under High Pressure of 4 GPa, *J. Phys. Soc. Jpn.* **83**, 2014, 034710 (7p), DOI: 10.7566/JPSJ.83.034710
- ② A. Yamada, R. Higashinaka, R. Miyazaki, K. Fushiya, T. D. Matsuda, Y. Aoki, W. Fujita, H. Harima, and H. Sato, Anomalous Field-Insensitive Correlated Electron Behaviors in $\text{SmTa}_2\text{Al}_{20}$, **82**, 2013, 123710 (5 p), DOI: 10.7566/JPSJ.82.123710
- ③ Anomalous Low-Lying Thermal Excitations Deep Inside the Ferromagnetic State in Filled Skutterudite $\text{NdFe}_4\text{As}_{12}$, R. Higashinaka, K. Takeda, T. Namiki, Y. Aoki, and H. Sato, *J. Phys. Soc. Jpn.* **82**, 2013, 114710 (6p), DOI: 10.7566/JPSJ.82.114710
- ④ Characterization of the Mysterious High Field Ordered Phase around $\text{H}/[111]$ and Finding of a New Phase Boundary in $\text{PrFe}_4\text{P}_{12}$, H. Aoki, H. Sato, D. Kikuchi, H. Sugawara, A. Pourret, K. Behnia, S. Uji, T. Terashima, R. Higashinaka, and Y. Aoki, *J. Phys. Soc. Jpn.* **81**, 2012, 084703 (11p). DOI: 10.1143/JPSJ.81.084703
- ⑤ Magnetic Excitation in Totally Symmetric Staggered Ordered Phase of $\text{PrFe}_4\text{P}_{12}$, K. Iwasa, L. Hao, M. Kohgi, K. Kuwahara, J. Mignot, H. Sugawara, Y. Aoki, T. D. Matsuda, and H. Sato, *J. Phys. Soc. Jpn.* **81**, 2012, 094711 (9p), DOI: 10.1143/JPSJ.81.094711
- ⑥ K. Magishi, H. Sugawara, M. Takahashi, T. Saito, K. Koyama, T. Saito, S. Tatsuoka, K. Tanaka, and H. Sato, Effects of Filling Fraction on Magnetic Properties of Filled Skutterudite $\text{RFe}_4\text{Sb}_{12}$ ($\text{R} = \text{La}, \text{Ce}$) Synthesized under High Pressure, *Phys. Soc. Jpn.* **81**, 2012, 124706 (5p), DOI: 10.1143/JPSJ.81.124706
- ⑦ R. Miyazaki, Y. Aoki, R. Higashinaka, and H. Sato, T. Yamashita and S. Ohara, Heavy quasiparticles formed in the ferromagnetic Yb layers in the Kondo helical magnet YbNi_3Al_9 as revealed by specific-heat measurements, *Phys. Rev. B* **86** (2012) 155106 (6p), DOI: 10.1103/PhysRevB.86.155106
- ⑧ T. Saito, H. Sato, K. Tanaka, S. Tatsuoka, M. Ueda, R. Higashinaka, T. Namiki, Y. Aoki, Y. Utsumi, K. Kuwahara, and T. Hosoya, Strong

Effect of Yb Filling Fraction on the Magnetic Ground State of the Filled Skutterudite $\text{YbFe}_4\text{Sb}_{12}$, *J. Phys. Soc. Jpn.* **80** (2011) 063708, DOI: 10.1143/JPSJ.80.063708

- ⑨ R. Higashinaka, A. Nakama, M. Ando, M. Watanabe, Y. Aoki, and H. Sato: Magnetic and transport properties of $\text{YbT}_2\text{Al}_{20}$ ($\text{T} = \text{Ti}, \text{V}$ and Cr), *J. Phys.: Conf. Ser.* **273** (2011) 012033, DOI:
- ⑩ 佐藤 英行, 青木 勇二, 菅原 仁, 播磨 尚朝, 充填スクッテルダイト RT_4X_{12} (R : 希土類, T : 遷移金属, X : P, As, Sb) —その結晶構造が可能にした多彩な振る舞い—, セラミックス, 依頼原稿, **47** (2012) 340-345

[学会発表など] (計 4 件)

- ① H. Sato, The research project on the filled skutterudites in Japan, International Workshop “From Blue Pigment to Green Energy”, Sept. 5-8, 2011, Vikersund, Norway.
- ② H. Sato, Electronic state of 4f-electrons confined in nanoscale cages, International Conference of New Science Created by Materials with Nano Spaces: From Fundamentals to Applications, Nov. 23-26, 2011, Sendai.
- ③ 佐藤英行, $\text{PrFe}_4\text{P}_{12}$ に於ける高磁場秩序相 { $\text{H}/[111]$ } 及び新たな高磁場相境界の評価, 日本物理学会, 2012年3月24日, 関西学院大学.
- ④ 佐藤英行, 充填スクッテルダイトに残された問題と新たなカゴ状物質, 依頼講演, 新学術領域研究「重い電子系の形成と秩序化」WS ~カゴ状構造に宿る強相関物性, 2012年9月26日, 首都大学東京

6. 研究組織

- (1) 研究代表者
佐藤 英行 (SATO Hideyuki)
首都大学東京・大学院理工学研究科・教授
研究者番号: 80106608
- (2) 連携研究者
青木 勇二 (AOKI Yuji)
首都大学東京・大学院理工学研究科・教授
研究者番号: 20231772
松田達磨 (MATSUDA Tatsuma)
首都大学東京・大学院理工学研究科・准教授
研究者番号: 30370472
東中 隆二 (HIGASHINAKA Ryuuji)
首都大学東京・大学院理工学研究科・助教
研究者番号: 30435672
桑原 慶太郎 (KUWAHARA Keitaro)
茨城大学・大学院理工学研究科・准教授
研究者番号: 90315747
並木 孝洋 (NAMIKI Takahiro)
富山大学・大学院理工学研究部・准教授
研究者番号: 40535340