

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 6 月 22 日現在

機関番号：82108

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2011

課題番号：21540372

研究課題名（和文） Ce および Yb 化合物の強相関電子帯構造の第一原理計算

研究課題名（英文） First Principle Band Calculations for Ce and Yb Compounds

研究代表者

柳町 治 (YANAGIMACHI OSAMU)

独立行政法人物質・材料研究機構・量子ビームユニット・NIMS 特別研究員

研究者番号：60005957

研究成果の概要（和文）：4f 電子系にたいする第一原理バンド計算法を動的平均場理論(DMFT)により発展させた。結晶場分裂、スピン軌道相互作用分裂、 $f^1 \rightarrow f^0, f^2$  仮想励起による交換相互作用を取り入れた。AuCu<sub>3</sub> 型 Ce 化合物(CePd<sub>3</sub>, CeRh<sub>3</sub>, CeIn<sub>3</sub>, CeSn<sub>3</sub>)への適用を進め、計算ノウハウの蓄積を行なった。近藤温度はほぼ実験結果を再現する。CeIn<sub>3</sub> 以外では DMFT 計算によるフェルミ面形状は局所密度近似のものと一致した。CeIn<sub>3</sub> では DMFT の結果がサイクロトロン質量まで含めて de Haas-van Alphen 効果の実験結果を再現する。

研究成果の概要（英文）：The first principle band calculation method for 4f electron systems is developed based on dynamical mean field theory. The calculations take into account the crystal-field splitting, the spin-orbit interaction and the exchange process of  $f^1 \rightarrow f^0, f^2$  virtual excitations. Applications to Ce compounds with the AuCu<sub>3</sub>-type structure (CePd<sub>3</sub>, CeRh<sub>3</sub>, CeIn<sub>3</sub>, CeSn<sub>3</sub>) are carried out, and calculation know-how's are accumulated. Kondo temperatures of these compounds are reasonable reproduced. The Fermi surfaces are obtained to be almost identical to those of bands calculated by the local density approximation except for CeIn<sub>3</sub>. For CeIn<sub>3</sub>, experimental results of de Haas-van Alphen effect are reproduced including the results of cyclotron masses.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	1,700,000	510,000	2,210,000
2010 年度	800,000	240,000	1,040,000
2011 年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	3,000,000	900,000	3,900,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・物性 II 4303

キーワード：強相関系 バンド計算

## 1. 研究開始当初の背景

Ce や Yb 等、4f 希土類化合物には高濃度近藤状態や価数揺動状態など、強相関電子系としての性質を示すものが多い。このような系は磁性などに局在した電子としての性質を示すが、他面ではバンド分散など遍歴電子と

しての性質も示す。局在・遍歴性を併せもつ電子系の電子構造を記述するのは極めて難問であった。動的平均場理論(DMFT)が提唱され、強相関電子系の電子状態に対する第一原理的アプローチへの突破口が 2005 年頃に開かれた [G.Kotliar 他:Physics Today 57

(2004) 53]。当該課題の開始時期には、3d 電子系にたいしては様々な局面で DMFT バンド計算の適用が行われていたが、4f 電子系への本格的適用は幾つかの困難のために進んでいなかった。本課題はこれらの困難点を克服して、4f 電子系に適用可能な DMFT に基づく第一原理バンド k 離散の手法の開発と発展を進めることを主な目的とした。

DMFT の発展とともに、Ce 系にもその適用を進める試みも行われていた。しかしながら、希土類化合物において重要なスピン軌道相互作用分裂や結晶場分裂を自己エネルギーに取り入れるには困難点があり、これを取り入れる段階には進まないうた。また、近藤温度を定量的に評価するためには  $f$ - $f$  価数揺らぎに加えて  $f$ - $f$  揺らぎ媒介による交換相互作用プロセスも正しく取り入れることが必須である。このような立脚点のもと、DMFT に現れる補助 1 不純物問題を解く際に、これらを取り入れることの可能な NCAF<sup>2</sup>vc (noncrossing approximation with  $f^2$  vertex correction) と呼ぶ解法を我々は発展させた。この方法と LMTO バンド計算法と結びつけた、LMTO-DMFT プログラムコードを本課題の開始時に既に開発していた [O.Sakai 他: J.Phys.Soc.Jpn. **76** (2007) 044707]。しかしながら、開発したプログラムは先行例のないものであるため、適用にあたり自らノウハウを蓄積する必要があった。また、DMFT 法には計算の不安定化を引き起こす様々の要因があり、新しいタイプの物質に適用する毎に新たな問題が出現し、その解決を通して進化を続けているという状況にあった。

AuCu<sub>3</sub> 型格子は単純立方格子(sc)の簡単な結晶構造である。その中に高い近藤温度をもつ CeSn<sub>3</sub>、常圧では反強磁性転移を示すが加圧により超伝導を示すようになる CeIn<sub>3</sub>、特異な磁気励起スペクトルを示す CePd<sub>3</sub>、d-バンドと 4f 状態の混成の非常に大きい CeRh<sub>3</sub> 等、多様な Ce 化合物が含まれる。これらの物質の電子状態を第一原理 DMFT バンド計算により統一的に理解することは 4f 強相関電子系の特徴を明らかにする上で重要なことである。また、これらの物質への DMFT 計算の統一的適用は、DMFT 計算の実用化のためのノウハウの蓄積の上で有用であると期待された。

## 2. 研究の目的

本課題では

(1) AuCu<sub>3</sub> 型の Ce と Yb 化合物群への DMFT バンド計算への適用により、角度分解及び角度積分光電効果、近藤効果と結晶場効果の競合の動的磁気励起、de Haas-van Alphen(dHvA)効果等によるフェルミ面構造

などを第一原計算により求め、蓄積された実験結果との比較対照を行う。このことを通して、強相関 4f バンドを第一原理的に、かつ統一的に捉える手法と概念を発展させる。

(2) NCAF<sup>2</sup>vc 部分の独立パッケージ化。研究開始時に稼働している LMTO-DMFT コードは補助的 1 不純物問題を解く NCAF<sup>2</sup>vc 部分の独立性が不十分なため、他研究グループへの提供が困難である。この部分のパッケージとしての独立化と計算の安定化を高め、供用を容易にする。

(3) Yb 化合物への適用。Yb は Ce と電子・空孔を入れ替えた関係にあり、強相関 4f 電子状態の統一的理解の上で注目を集めている。NCAF<sup>2</sup>vc コードを Yb にも適用可能な version に発展させ、DMFT 計算の適用を試みる。

## 3. 研究の方法

(1) 研究開始時に稼働している LMTO-DMFT コードを version1 として、version1 による AuCu<sub>3</sub> 型 Ce 化合物への第一原理 DMFT バンド計算を進める。

(2) 上記の研究と並行して、1 サイト問題の解法部分 NCAF<sup>2</sup>vc ルーチンの独立化を進め、version2 パッケージの開発を進める。

## 4. 研究成果

(1) 4d 遷移金属バンド系、CePd<sub>3</sub> と CeRh<sub>3</sub> の 4f 状態と占有電子数計算法。-近藤温度と結晶場分裂の第一原理計算による再現と 4f バンドの温度依存性-[発表論文⑥]

CePd<sub>3</sub> と CeRh<sub>3</sub> では Pd や Rh の 4d バンドと Ce の 4f 状態の大きな混成がある。しかしながら CePd<sub>3</sub> においては 4d 状態はフェルミエネルギーより深く位置するため、フェルミエネルギーにおける c-f 混成はあまり強くない。一方、CeRh<sub>3</sub> では 4d バンドの大きな状態密度がフェルミエネルギーにおいても存在する。このため、非常に高い近藤温度  $T_K=4700\text{K}$  (0.4eV) が導かれた。

CePd<sub>3</sub> に対する非弾性磁気散乱スペクトルの計算結果を図 1 に示す。磁気モーメントの行列要素を基底  $\Gamma_8$  内のみで考慮したケースの破線は近藤効果による  $\Gamma_8$  内での準弾性散乱スペクトルと解釈できる。このピーク位置のエネルギーから近藤温度  $T_K=310\text{K}$  (27meV)、実線のスペクトルから  $\Gamma_8$  を基底状態とする結晶場分裂 480K (41meV) と評価した。磁気励起スペクトルは低温では結晶場励起と近藤効果による準弾性励起成分が略一体化した構造となる。室温ではふたつの成分がやや分離した形状になる。この結果は中性子非弾性散乱により観測されている磁気散乱と良い対応を示した。結晶場分裂の起源は主に c-f

混成の立方場分裂による。これは結晶場分裂を取り入れた第一原理 DMFT バンド計算において自動的に求められる量である。

図 2a に CePd<sub>3</sub> の低温領域における (111) 表面放出の角度分解光電スペクトルの計算結果を示す。一番下側の線は波数ベクトルの代表値が  $\Gamma$  点の場合で、一番上側は波数ベクトルの代表値が M 点に対応する。下側から上側へ代表値が  $\Sigma$  軸に沿って、 $\Gamma$ - $\Sigma$ -M と変化する。表面に垂直な深さ方向の波数ベクトルの寄与は足し合わされるので、波数ベクトルが R-S-X と変化する部分も含んでいる。代表点が  $\Gamma$  点の場合にフェルミエネルギー直下に大きな強度があり、M 点方向に進むにつれこのピークの強度は減少し、M 点ではフェルミエネルギー近辺では強度がない。これは 4f バンドが  $\Gamma$  点と R 点でフェルミエネルギーの下に位置し、M 点と X 点では上に位置する分散を持っていることによる。4f バンド分散のこの特徴は局所密度近似 (LDA) によるバンドの様子とよく似ている。ただし、DMFT 計算による 4f バンド幅は 0.07eV 程度で、LDA による 4f バンド幅 0.3eV の 1/5 程度である。

図 2b に T=150K の場合の角度分解光電スペクトルを示す。代表点が  $\Gamma$  の場合のスペクトル強度が減少し、かつスペクトル全体がエネルギーの高い方向にシフトしている。室温のケースではこの傾向がさらに著しくなる。角度分解光電スペクトルのこのような温度変化の原因は昇温につれ 4f バンドがフェルミエネルギーに対しエネルギーの高い側にシフトすることにある。CePd<sub>3</sub> の低温におけるバンドの様子は半金属的であるが、4f バンドのシフトにより、フェルミ面構造は LaPd<sub>3</sub> に似た一価金属的なものに徐々に変化する。計算された角度分解光電スペクトルの特徴は、低温において実験結果と良い対応を示す [S. Danzenbacher 他: Phys. Rev. B72 (2005)]。

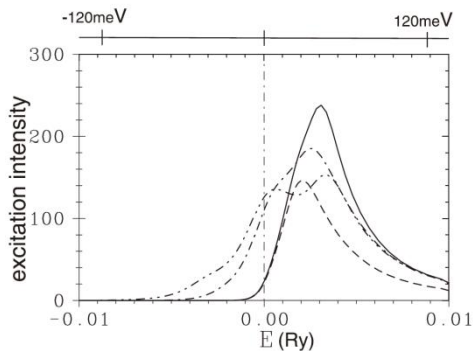


図 1. CePd<sub>3</sub> の磁気励起スペクトル。実線は T=37.5K、一点鎖線は T=150K、二点鎖線は T=300K でのスペクトルである。破線は磁気モーメントの行列要素が結晶場基底状態  $\Gamma_6$  内のみ存在すると仮定した場合の T=37.5K での励起スペクトルである。

昇温に伴う変化についての実験的検証を期待する。

4f 電子を遍歴バンドとして取り扱う場合の CePd<sub>3</sub> は偶数電子系となり、電子フェルミ面に含まれる電子数と同数の正孔を含む正孔フェルミ面の生じる半金属的バンド構造となる。このことを正しく再現するには占有電子数を正確に計算する必要がある。相互作用系で占有電子数と波数ベクトル空間での占有と非占有の境界-フェルミ面-を結びつけるのは Luttinger 和則である。NCAF<sup>2vc</sup> はこの和則の成立を保障する近似理論になっていない。また、一般の DMFT 法もこの和則の成立を保障していない。スペクトルを実際に  $k-\omega$  で積分する方法、寿命幅が零の場合には波数空間の占有状態と  $k-\omega$  での積分が一致するよう変形した式、renormalized band picture (RNB) による占有電子数の計算などを試みた。RNB とは DMFT 計算で求めた自己エネルギーの虚部を無視し、さらに実部のエネルギー依存性をフェルミエネルギーでの 1

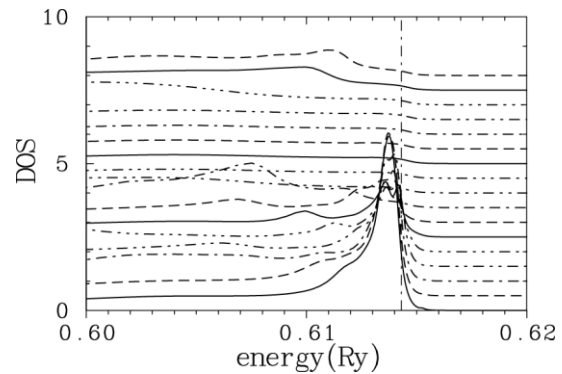


図 2a CePd<sub>3</sub> の T=37.5K における角度分解光電スペクトル。放出面は (111) 表面である。一番下側に示したスペクトルから最上側に示したスペクトルまで波数ベクトルの代表値は  $\Gamma$ - $\Sigma$ -M と変化する。詳しくは本文を参照のこと。

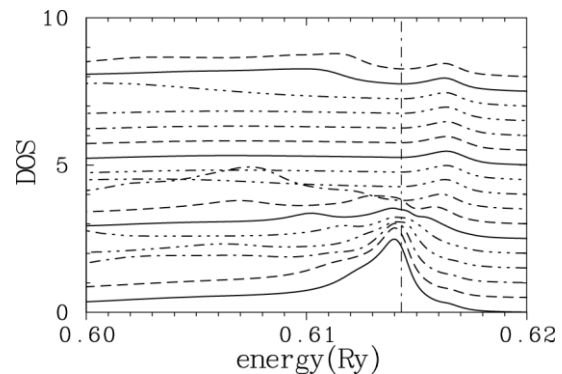


図 2b CePd<sub>3</sub> の T=150K における角度分解光電スペクトル。説明は図 2a を参照のこと。

次式近似で置き換えてバンド分散を求める方法をいう。この方法で  $T=0\text{K}$  での質量増大とフェルミ面形状は正しく得られる。各々の方法で異なる占有電子数が得られたが、後の二者は低温領域で比較的近い値を与える。LDA バンド計算に似た取り扱いが可能であることや、フェルミ面形状を RNB 描像で求めることなどを考慮して、占有電子数の計算は RNB 描像で求めたものを使用した。

(2) 近藤温度の低い系  $\text{CeIn}_3$  の電子構造と  $\text{dHvA}$  効果の計算。-DMFT バンド計算と LDA バンド計算が異なるフェルミ面形状を与えるケース-[発表論文②]

$\text{CeIn}_3$  は常圧の下では  $T_N=10\text{K}$  で反強磁性状態 (AF) に転移する。しかし、 $p=2.7\text{GPa}$  程度の加圧により  $T_N$  はほぼ絶対零度まで減少し、また  $T_C=2.1\text{K}$  で超伝導状態に転移するようになる。図 3 に圧力  $p=2.75\text{GPa}$  の場合の  $\text{CeIn}_3$  につき、DMFT 計算の結果を RNB 描像で示したバンド構造を示す。結晶場基底状態は  $\Gamma_7$ 、その状態空間内での近藤温度は  $30\text{K}$ 、結晶場励起エネルギーは  $240\text{K}$  と得られた。4f バンドの幅は約  $0.007\text{eV}$  で LDA 計算によるバンド幅  $0.3\text{eV}$  の  $1/40$  程度である。この値は、相関効果による質量増大の値 30 の逆数にほぼ等しい。得られた分散の特徴のひとつは  $\Gamma$  点で  $\Gamma_7$  バンドがフェルミエネルギーより低く位置し、占有状態となっていることである。LDA 計算では

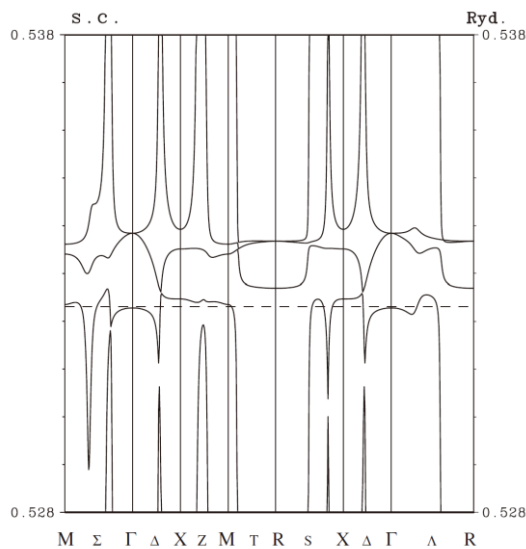


図 3 圧力  $p=2.75\text{GPa}$  における格子定数 ( $a=8.7327$  a. u.) の場合の  $\text{CeIn}_3$  の RNB 描像によるバンド分散。横軸は sc 格子の Brillouin zone の対称点と軸を示す。横の破線はフェルミエネルギーを示す。フェルミエネルギーにかかる分散の小さいバンドは結晶場のもとで  $\Gamma_7$  対称性成分を主とする 4f バンドである。このバンドは  $\Gamma$  点でフェルミエネルギーの下に位置している。

$\Gamma_7$  がフェルミエネルギーより高く位置し、非占有状態となっている。図 4 に示すように、DMFT 計算では  $\Gamma$  点を中心とする孤立した電子面が現れる。一方、LDA 計算では  $\Gamma$  を中心にした孤立正孔面が生じ、その周囲にシエルのな連結した電子領域が生じる。R 点を中心とした大きな電子的フェルミ面は両計算に共通に生じる。

$\text{CeIn}_3$  以外の  $\text{AuCu}_3$  型 Ce 化合物ではフェルミ面構造は基本的に LDA 計算のものと同じである。また、他の物質に対する DMFT 計算でも LDA 計算と一致するのが通例である。 $\text{CeIn}_3$  の  $\text{dHvA}$  振動数は従来 LDA バンドのフェルミ面形状をもとに解釈されてきた。DMFT バンドによる  $\text{CeIn}_3$  の  $\text{dHvA}$  振動数の磁場方位依存性を図 5 に示す。略  $1 \times 10^4$  T と  $4.5 \times 10^3$  T の振動数を持つブランチは各々 R 点と  $\Gamma$  点を中心とする電子 pocket による信号である。これらは攝待等の加圧下の  $\text{dHvA}$  実験 [R. Settai 他: J. Phys. Soc. Jpn **79** (2005) 3016] の a, d ブランチによく対応し、DMFT バンド計算の結果により実験の再解釈が可能であることを示す。各ブランチのサイクロトロン質量の角度依存性の実験結果もほぼ再現し、質量増大のバンド依存性を定量的に正しく与える。

図 5 では a, d ブランチ以外にも多数の信号が示されている。実験的にはまだこれらは観測されていない。ただし、この部分は図 4 の  $\Gamma$  点と R 点の電子 pocket の間に生じている複雑な形状の小さい電子面からのものである。バンド分散の極めて詳細な部分に依存し、細かい点での実験との一致は期待出来ない。

$\text{CeIn}_3$  において、DMFT 計算によるフェルミ面構造が LDA 計算によるものとトポロジ的に一致しなかったため、DMFT 計算結果で実験の再現が可能か否かが課題となり、フェルミ

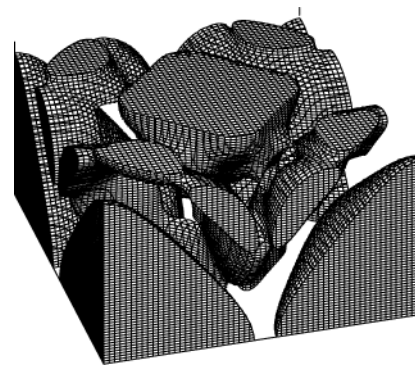


図 4 格子定数  $a=8.7327$  a. u. の  $\text{CeIn}_3$  のフェルミ面形状。sc 格子の Brillouin zone を  $z=0$  の xy 面で切つてある。上面の中心が  $\Gamma$  点、下面の各コーナーが R 点である。ハッチしてある領域が電子領域である。 $\Gamma$  点と R 点に各々孤立した電子 pocket が存在する。

面形状、dHvA 信号の計算を詳細に行い、実験と比較対照する必要が生じた。計算ルーチンのこの部分は我々の DMFT ルーチンと神戸大播磨グループの LDA ルーチンで使用されるものを結びつけることにより可能となった。

CeIn<sub>3</sub> は常圧下では低温で AF に転移する。LDA+U 的描像により AF での計算を行なった。非常に浅い 4f 占有状態を仮定する場合に dHvA 振動数を再現することを示した。従来、CeIn<sub>3</sub> の AF 状態は典型的局在 4f 電子状態と考えられていたが、4f バンド性を併せ持つ可能性を示した。局在 4f 状態とする根拠のひとつに、陽電子消滅実験により占有状態電子の運動量分布が 4f を局在とした LaIn<sub>3</sub> の伝導バンドのそれにより解釈出来ることがある。本課題では常磁性状態を仮定した DMFT 計算により、4f バンドの立場でも陽電子消滅による運動量分布が再現可能であることを示した。4f 成分に対する質量増強が大きいので、4f バンドがフェルミエネルギーを切る場合に運動量分布の跳びは小さい。このため極低温の高精度測定の場合を除き、運動量分布の大体の振る舞いは 4f バンドを取り除いた伝導バンドによるものと類似になる。常圧下で近藤温度 8K、結晶場励起 160K が得られた。格子定数のわずかな変化により DMFT で得られ

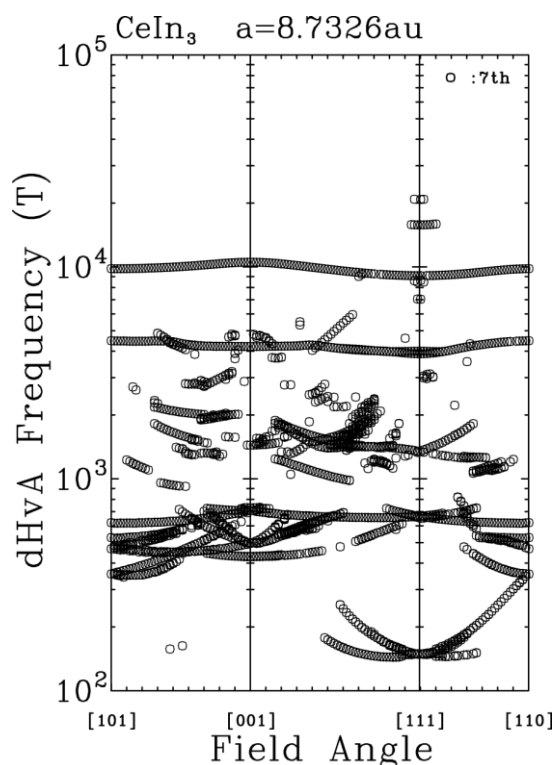


図5 DMFT バンドによる CeIn<sub>3</sub> の dHvA 振動数の磁場方位依存性。略  $1 \times 10^4$  T と  $4.5 \times 10^3$  T の振動数を持つブランチは各々 R 点と  $\Gamma$  点を中心とする電子 pocket による信号である。

る特性温度は大きく変化する。

当初計画では NCAf<sup>2</sup>vc ルーチンの部分の独立化を進め、さらに Yb 系への適用が可能となるよう発展させる予定であった。しかしながら、占有電子数の計算法、フェルミ面形状と dHvA 計算ルーチンの組み込みなどに時間がとられ、独立化の段階で留まり、Yb への適用は現在進行中の課題となった。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 7 件)

① Osamu Sakai, Heavy Fermion 4f Band in the “Localized” AF Ordering Regime of CeIn<sub>3</sub>, JPSJ Online-News and Comments [April 9 2012].

② Osamu Sakai and Hisatomo Harima, Band Calculations for Ce Compounds with AuCu<sub>3</sub>-Type Crystal Structure on the Basis of Dynamical Mean Field Theory: II. CeIn<sub>3</sub> and CeSn<sub>3</sub>. J. Phys. Soc. Jpn., 査読有, **81**, 2012, 024717-1-13.

③ Masashi Hase, Vladimir Yu Pomjakushin, Lukas Keller, Andreas Dönni, Osamu Sakai, Tao Yang, Rihong Cong, Jianhua Lin, Kiyoshi Ozawa, and Hideaki Kitazawa, Spiral magnetic structure in spin-5/2 frustrated trimerized chains in SrMn<sub>3</sub>P<sub>4</sub>O<sub>14</sub>, Phys. Rev. B, 査読有, **84**, 2011, 184435-1-5.

④ Osamu Sakai and Hisatomo Harima, First Principle DMFT Band Calculation for Ce Compounds with AuCu<sub>3</sub>-type Crystal Structure, J. Phys. Soc. Jpn., 査読有, **80**, 2011 SA127-1-3.

⑤ K. Oyoshi, S. Nigo, J. Inoue, O. Sakai, H. Kitazawa and G. Kido, Formation and disruption of current paths of anodic porous alumina films by conducting atomic force microscopy, Applied Surface Science, 査読有, **257**, 2010, 837-841.

⑥ Osamu Sakai, Band Calculations for Ce Compounds with AuCu<sub>3</sub>-type Crystal Structure on the basis of Dynamical Mean Field Theory: I. CePd<sub>3</sub> and CeRh<sub>3</sub>, J. Phys. Soc. Jpn., 査読有, **79**, No11, 2010, 114701-1-11.

⑦ Toshiya Inami, Noriki Terada, Hideaki Kitazawa and Osamu Sakai, Resonant Magnetic X-ray Diffraction Study on the Triangular Lattice Antiferromagnet GdPd<sub>2</sub>Al<sub>3</sub>, J. Phys. Soc. Jpn., 査読有 **78**, No8, 2009, 084713-1-5.

〔学会発表〕(計 8 件)

- ①酒井治, 播磨尚朝, DMFT 計算による  $\text{CeIn}_3$  と  $\text{CeSn}_3$  のフェルミ面構造とサイクロトロン質量, 日本物理学会 2012 年第 67 回年次大会, 2012 年 3 月 26 日, 関西学院大学西宮上ヶ原キャンパス(西宮市)
- ②阿野元貴, 藤田雅也, 三本啓輔, 赤津光洋, 根本祐一, 後藤輝孝, 小野宏基, 武田直也, 酒井治, Andreas Donni, 北澤英明, 希土類化合物  $\text{Ce}_3\text{Pd}_{20}\text{Si}_6$  の近藤効果 II, 日本物理学会 2011 年度秋季大会, 2011 年 9 月 24 日, 富山大学五福キャンパス (富山市)
- ③松尾一穂, 藤田雅也, 阿野元貴, 荒木幸治, 立川喜章, 三本啓輔, 赤津光洋, 根本祐一, 後藤輝孝, 武田直也, 酒井治, Andreas Donni, 北澤英明, 超音波による  $\text{Ce}_3\text{Pd}_{20}\text{Si}_6$  の近藤効果の研究, 日本物理学会第 66 回年次大会, 2011 年 3 月 25 日, 新潟大学五十嵐キャンパス(新潟市)
- ④酒井治, 播磨尚朝, 動的平均場理論による  $\text{CeIn}_3$  に対する第一原理バンド計算 II, 日本物理学会第 66 回年次大会, 2011 年 3 月 25 日, 新潟大学五十嵐キャンパス (新潟市)
- ⑤酒井治, 播磨尚朝, 動的平均場理論による  $\text{CeIn}_3$  に対する第一原理バンド計算, 日本物理学会 2010 年度秋季大会, 2010 年 9 月 18 日, 大阪府立大学中百舌鳥キャンパス(堺市)
- ⑥酒井治, DMFT の現状と課題, 日本物理学会第 65 回年次大会, 2010 年 3 月 21 日, 岡山大学津島キャンパス (岡山市) .
- ⑦酒井治, 北澤英明, 結晶場近藤効果競合系の比熱・帯磁率の計算簡易パッケージ CXcal の紹介とそれによる実験の解析, 日本物理学会第 65 回年次大会, 2010 年 3 月 21 日, 岡山大学津島キャンパス (岡山市) .
- ⑧酒井治, 動的平均場理論による金銅 3 型 Ce 化合物の第一原理バンド計算 II, 日本物理学会 2009 年秋季大会, 2009 年 9 月 25 日, 熊本大学黒髪キャンパス(熊本市).

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

柳町 (酒井) 治

(YANAGIMACHI (SAKAI) OSAMU )

独立行政法人物質・材料研究機構・量子ビームユニット・NIMS ポスドク研究員

研究者番号 : 60005957

### (2) 研究分担者

なし

### (3) 連携研究者

北澤 英明 ( KITAZAWA HIDEAKI )

独立行政法人物質・材料研究機構・量子ビームユニット・ユニット長

研究者番号 : 00195257

鈴木 博之 ( SUZUKI HIROYUKI )

独立行政法人物質・材料研究機構・量子ビームユニット・主幹研究員

研究者番号 : 60354370