

研究種目：基盤研究 (C)  
 研究期間：2006～2008  
 課題番号：18540361  
 研究課題名（和文） プルトニウム金属およびプルトニウム化合物の磁性と超伝導の  
 微視的理論研究  
 研究課題名（英文） Microscopic Research for Magnetism and Superconductivity of  
 Plutonium Metal and Plutonium Compounds  
 研究代表者  
 堀田 貴嗣 (HOTTA TAKASHI)  
 首都大学東京・大学院理工学研究科・准教授  
 研究者番号：00262163

## 研究成果の概要：

Pu 金属の $\delta$ 相（面心立方晶）では、物性を担う 5f 電子は局在的と考えられてきたが、近年の実験によると、5f 電子の磁気モーメントは非常に小さく、局在性に疑問が投げかけられていた。本研究では、Pu イオンを面心立方格子に配置した理論模型を数値的に解析し、5f 電子の磁気モーメントではなく、5f 軌道が整列している可能性を指摘した。また、圧力による誘起磁気モーメントを予言しており、実験による検証が可能である。

## 交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	1,700,000	510,000	2,210,000
2007年度	900,000	270,000	1,170,000
2008年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：物性理論

科研費の分科・細目：物理学・物性Ⅱ

キーワード：強相関係、磁性、超伝導、低温物理

## 1. 研究開始当初の背景

一般に、アクチノイド金属は周期表の如何なる系列の金属よりも数多くの結晶構造をとることが知られているが、そのなかでもプルトニウム (Pu) の特異性は際立っている。Pu は極めて大きな熱膨張係数を持っているが、固体相の一つである $\delta$ -Pu（面心立方晶）においては、熱膨張係数は負の値をとり温度上昇とともに収縮する。さらに、密度から言うと、液相よりも小さいという極めて異常な振る舞いをしている。このような特異な変化の原因は、主にバンド計算において、Pu 金属の 5f 電

子の金属結合に関係した遍歴と局在の拮抗として議論されている。温度上昇とともに起こる大きな体積膨張により、 $\alpha$ -Pu（単斜晶）で見られる 5f 電子の遍歴性が、バンド幅の減少を伴って一次転移的な構造変化により局在的に変化していくというものである。この観点からすると、 $\delta$ -Pu がもっとも局在性が強く、この相が磁気的であることを要請するが、Ga を少量ドーピングして低温まで面心立方構造を保った $\delta$ -Pu に対する $\mu$ SR測定によると、磁気モーメントが存在したとしても $10^{-3}\mu_B$ 以下であり、実験的には磁気相は否定されつつある。電子

の遍歴と局在の拮抗は、磁性の発現と密接に関連しているが、局在性が強まるにもかかわらず磁性が発現しないという理由が理解されない。これは、物性物理の基本的な問題のほずであるが、それに関する $\delta$ -Puの重要性は広く認識されておらず、強相関電子系の観点から新たな光を当て、解決する必要があった。

さて、Pu単体金属の磁性に関する問題に加えて、Pu金属間化合物の超伝導も極めて興味深い問題を提供する。最近、ロスアラモス研究所においてPuCoGa<sub>5</sub>が転移温度 $T_c=18.5$ Kの“高温”超伝導を示すことが発見され、次いで、PuRhGa<sub>5</sub>も $T_c=8.7$ Kの超伝導となることが欧州超ウラン元素研究所で発見され、大きな話題を呼んでいる。希土類およびアクチノイド化合物の超伝導の歴史は古く、1979年にF. SteglichによってCeCu<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>の超伝導が発見されて以来、重い電子系の超伝導と総称され、物性物理分野における中心的研究テーマの一つとなり、その後、Ce系化合物だけではなく、U系化合物においてもいくつかの超伝導体が発見されてきた。最近では、先にあげたPu化合物以外に、Prを含むスクッテルダイト化合物における超伝導、CeTIn<sub>5</sub>(Tは遷移金属)における超伝導、UGe<sub>2</sub>やURhGeにおける強磁性と共存する超伝導などが次々と発見されている。これらに共通していることは、電子相関効果によって重くなった準粒子そのものがクーパー対を形成することであるが、強い短距離斥力の影響で電子は互いに避けあい、BCS理論における等方的なs波対ではなく、p波あるいはd波などの異方的なクーパー対が凝縮する。

このような非BCS型の超伝導を理解するために、結晶の対称性やs波以外のクーパー対の対称性も考慮して、Ginzburg-Landau理論を拡張する現象論的研究が1980年代に盛んに行われ、実験結果の解釈において理解が進んだ。そして、銅酸化物超伝導体と同様、f電子系の超伝導においても、反強磁性スピン揺らぎが重要な役割を果たしていると考えられるようになってきた。実際、PuCoGa<sub>5</sub>やPuRhGa<sub>5</sub>のNMR・NQR測定によると、 $T_c$ 直下にコヒーレンスピークがなく、 $T_c$ 以下で核磁気緩和率が $T^3$ に比例することから、銅酸化物と同じd波超伝導であることが結論されている。しかし、対称性はそれでよいとしても、d電子とf電子の違いを無視して単純に“反強磁性スピン揺らぎ”と結論してよいのか、Pu化合物で $T_c$ が異常に高くなるのはなぜかなど、根源的な疑問は未解決のままであった。

## 2. 研究の目的

本研究計画では、Pu金属およびPu化合物を強相関電子系として捉え直し、その磁性と超伝導を微視的観点から理論的に解明することにより、電子の遍歴性と局在性の拮抗に起因した特異な現象の統一的描像への到達を目指

すことを目的とした。具体的には、まず、Pu金属やPuTGa<sub>5</sub>(T=Co, Rh)を念頭において、f電子が5個ある系の微視的モデルの構築を行う。次に、Pu金属に対するモデルを主に数値的手法によって解析し、磁性が抑制される機構を明らかにする。また、5f電子のモデルを解析的手法によって調べ、特異な超伝導が出現する可能性を探る。

## 3. 研究の方法

### (1) 微視的電子モデルの構築

f電子系に対しては、これまでにj-j結合描像に基づく軌道縮退ハバードモデルの構成法を開発してきたが、これをPu金属およびPu化合物に適用する。この手法によるモデルは、局所的なf電子相互作用項と遍歴項から成る。局所的なf電子項は結晶場項とクーロン相互作用項から成るが、前者は単なるポテンシャル項である。後者に対しては、 $j=5/2$ のf電子波動関数によるクーロン積分を計算する必要があるが、これについてはラカー係数による表式を既に得ているので問題はない。f電子の遍歴項については、d電子の場合と同様、実際の結晶格子上で跳び移り積分を評価する必要があるが、結晶構造の違いがd電子の時よりもさらに色濃く物性に反映される。通常、電子の波動関数は複素であるが、適当な線形結合を取れば、実にすることができる。しかし、j-j結合におけるf電子の波動関数の場合は、実にはできるとは限らない。そのために、f電子の跳び移り積分は、跳ぶ方向によっては複素になる場合がある。実際、 $\delta$ -Puの面心立方格子の場合、跳び移り積分が複素になることがわかっている。そうすると、電子波動関数の間に干渉効果が生じて、それがバンド構造に大きな変化をもたらし、ベリー位相効果とも相まって、特異な物性を引き起こす可能性がある。一方、PuTGa<sub>5</sub>はHoCoGa<sub>5</sub>型の正方晶であり、Puイオンだけを取り出すと、単純立方格子をz軸方向に引き伸ばした直方体をしている。そこで、z軸方向の跳び移り積分を面内のそれよりも小さく取ることで、正方晶の影響を取り入れる。

### (2) モデルの数値的研究

モデルが完成すれば、それをさまざまな手法で研究することになるが、電荷、スピンに加え、軌道自由度を含む多電子系であるので、それを解くのは容易なことではない。とりわけ、 $\delta$ -Puに対する面心立方格子のように幾何学的フラストレーションを含む場合、いきなり平均場近似などを適用するのは危険であり、まず、先入観の入らない解析を実行し、そのモデルに対する知識を得るべきである。そのために、厳密対角化法やシミュレーションなどの数値的手法を適用する必要がある。

本研究ではまず、面心立方格子の最小単位

である4サイトの正三角錐上で軌道縮退ハバード模型をハウスホルダー法によって対角化し、どのような基底状態が実現しているかを明らかにする。その際、多極子感受率を計算し、温度依存性や相互作用依存性を調べるが、最適な多極子状態の決定に注意を払う必要がある。たとえば、 $\Gamma_{40}$ 八極子 $T_{40\alpha}$  ( $\alpha=x, y, z$ )は双極子 $J_{40\alpha}$ と同じ対称性に属するので、それらを適当に混ぜてできる磁気モーメント演算子 $M_{\alpha}=pT_{40\alpha}+qJ_{40\alpha}$ の応答が磁化率となる。係数 $p, q$ は、 $M$ の応答を最適化することによって決定される。また、波数依存性もあるので、そこにさらに四極子も混入してくる可能性が考えられる。これらを先入観なしに決定するには、ランク3までの多極子成分（双極子3成分、四極子5成分、八極子7成分の合計15成分）とサイトに依存する多極子感受率を要素にもつ行列を計算し、それを対角化する。そして、最大固有値をもつ状態が最適な多極子状態を表すことになる。このような計算を、相互作用や温度を変えながら繰り返し実行し、相互作用によって最適化多極子感受率が增强されるか否かを詳細に調べる。もちろん、わずか4サイトであるから、感受率の発散による秩序の検出はできないが、增强される成分を見ることにより、どのような秩序化の傾向にあるかの手がかりが得られる。加えて、 $\delta$ -Puの磁性に関して正確な知見が得られるというメリットがある。そこでまず、最適な多極子感受率が磁気モーメントや四極子モーメントを持つかどうかを確認する。たとえば、磁気モーメントを持たずに四極子モーメントだけを持てば、 $\delta$ -Puの矛盾を解消する手がかりとなる。磁気モーメントを持つ場合でも、それがどのくらいの大きさになるのか、また、相互作用によって感受率が抑制されるか增强されるかを調べる。

### (3) モデルの解析的研究

(2)の数値的研究と同時に、解析的手法による超伝導の研究も行う。乱雑位相近似や揺らぎ交換近似で得られた準粒子間の有効相互作用を用いて Eliashberg方程式を解き、準粒子状態および超伝導対形成の様子を調べる。特に、軌道縮退がある場合、スピンおよび軌道の揺らぎが助け合ってトリプレット対が出現する、という予想がある一方で、揺らぎが打ち消し合うので超伝導は生じない、とも考えられる。対形成に対する複数の自由度の揺らぎの影響を明らかにすることは重要である。また、スピン・軌道揺らぎを多極子揺らぎで表現することによって、多極子揺らぎによるエキゾチックな超伝導対出現の規則性を明らかにする。

ところで、多軌道系には別の重要な効果がある。それはベリー位相の効果で、運動量空間において2枚のバンドが円錐型交差を持つ

構造に現れる。この場合、電子数にも依存するが、複数のフェルミ面が現れることがある。対称性の異なる2枚のバンドがフェルミ面を構成している場合、通常、準粒子対形成はそれぞれのバンド内で生じると考えられる。しかし、円錐型交差で結びつく2枚のバンドの場合、その電子状態はベリー位相接続によって繋がっている。そのような場合は、2枚のバンドをまたぐような対が現れ、それが異常な超伝導対を生み出す可能性が考えられる。このようなシナリオを、 $j$ - $j$ 結合描像に基づく現実的な $f$ 電子モデルで追求する。

## 4. 研究成果

### (1) 金属プルトニウムの磁性

Pu 金属の $\delta$ 相（面心立方晶）においては、負の熱膨張係数やバンド計算結果から、 $5f$ 電子の局在性が強く、磁氣的であると考えられてきた。しかし、Gaを少量ドーピングして低温まで面心立方構造を保った $\delta$ -Puに対する $\mu$ SR測定によると、磁気モーメントが存在したとしても $10^{-3}\mu_B$ 以下であり、磁気相は否定されつつある。そこで、これらの矛盾を解消するために、 $\delta$ -Puで磁性が発現しない理由を多極子自由度の競合の観点から研究した。

本研究代表者はこれまでに、 $f$ 電子系に対して、 $j$ - $j$ 結合描像に基づく軌道縮退ハバード模型の構成法を開発してきたが、これをPu金属に適用した。得られたモデルは、 $f$ 電子遍歴項、 $f$ 電子結晶場項、クーロン相互作用項から成る。図1に示すように、面心立方格子の最小単位である4サイトの正三角錐上で軌道縮退ハバード模型をハウスホルダー法によって対角化し、どのような基底状態が実現しているかを調べた。そして、多極子感受率を計算し、その温度依存性や相互作用依存性を検討したが、最適な多極子状態の決定に注意をした。具体的には、ランク3までの多極子成分（双極子3成分、四極子5成分、八極子7成分の合計15成分）とサイトに依存する多極子感受率を要素にもつ行列を計算し、それを対角化した。最大固有値をもつ状態が、最適な多極子状態を表すことになる。このような計算を、相互作用や温度を変えながら繰り返し実行し、相互作用によって最適多極子感受率が增强されるか否かを詳細に調べた。

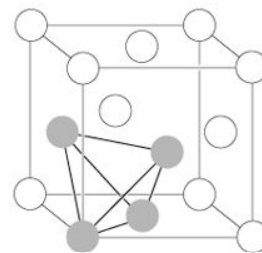


図1：面心立方格子中の4サイトクラスター

結果を図2に示す。横軸は $\Gamma_7$ と $\Gamma_8$ レベルのエネルギー差 $\Delta$ 、縦軸はクーロン相互作用を表すラカーパラメーターの一つ $E_2$ である。 $\delta$ -Puに対して、 $\Delta$ は $-0.01\text{eV}$ 程度、 $E_2$ は $0.1\text{eV}$ 程度と考えられ、そのパラメーター領域では非磁性の電荷四極子揺らぎが増強され、磁気双極子や磁気八極子の揺らぎは抑制されることがわかった。これは、 $\delta$ -Puにおいて磁性が観測されないことと矛盾しない。

今後、 $\delta$ -Puに関する実験結果との比較・検討を行う必要があるが、四極子揺らぎが優勢な相であるすると、圧力印加によって $\Delta$ の絶対値は大きくなるので、横磁気モーメントが誘起されることを予言しており、実験による検証が可能となる。

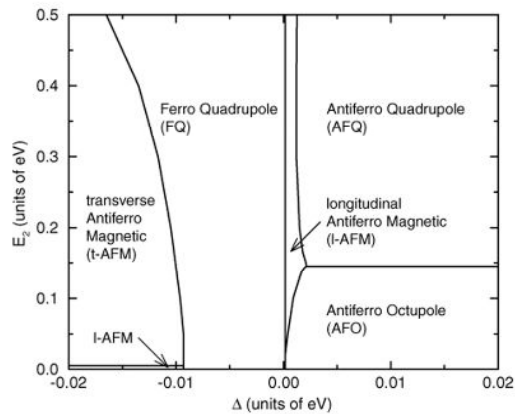


図2: d-Puに対する基底状態相図。

## (2) f 電子多体系の多極子状態

次に、サイト数を増やして場の量子論的な計算を行うか、シングルサイト近似によって伝導電子と結合させたモデルを数値繰り込み群法によって解析するか、2つの研究の方向性がある。ここでは、不純物サイトでクーロン相互作用、スピン軌道相互作用、結晶場ポテンシャルを考慮した軌道縮退アンダーソンモデルを考え、 $\text{Pu}^{3+}$ イオンを想定してf電子が5個の場合にこのモデルを数値繰り込み群法によって解析した。その結果、 $\Gamma_8$ 四重項が基底状態の場合は四極子および八極子揺らぎが、 $\Gamma_7$ 二重項が基底状態の場合は双極子揺らぎが低温において支配的になることを見出した。4サイトの結果ともコンシステントであるが、非磁性の多極子状態発現には結晶場ポテンシャルの影響が大きいと考えられる。また、今後の研究に向けて、古典電磁気学における多極子展開のアナロジーを利用して、f電子の多極子を一体の電荷・スピン演算子として表現するための一般論を展開し、線形応答理論に基づく多極子感受率の計算から多極子状態を曖昧さなしに決定するスキームを完成させた。これにより、複数f電子がある場合の多極子状態の研究、特に多極子揺らぎによる超伝導の研究が容易になると予想される。

## (3) $f^5$ 状態の物性

3価のプルトニウムイオンは5個のf電子を有するので、 $f^5$ 電子状態に起因する物性の研究を集中的に行った。特に、f電子を5個有する系における近藤効果に関して、磁場に鈍感な重い電子状態が発現する機構として多極子近藤効果を提唱した。アイデアは単純で、磁場が直接結合するのは双極子モーメントであり、それ以上の高次の多極子モーメントは磁場とは直接結合せず、双極子モーメントとの重なりを通して磁場とは間接的に結合するので、四極子以上の多極子モーメントに関する近藤効果、すなわち多極子近藤効果は一般に、磁場にはあまり影響されないと予想される。これを確かめるために、軌道縮退アンダーソンモデルに基づいて、磁場下で多極子感受率、エントロピー、比熱を計算し、多極子モーメントに関する近藤効果が磁場によってどのように変化するかを調べた。

具体的には、7軌道アンダーソンモデルを数値繰り込み群法によって解析し、電子比熱係数 $\gamma$ の磁場依存性を調べた。 $\gamma$ が磁場に全く依存しないという結果は得られなかったが、10テスラ以上の高磁場側では $\gamma$ は磁場に殆ど依存しないことを明らかにした。さらに、非調和フォノンとの結合を加えたホルスタインアンダーソンモデルも同様の手法で解析し、磁場に鈍感な重い電子状態の理解を深めた。

また、軌道秩序相近傍に出現する新奇な超伝導の可能性について、乱雑位相近似の範囲で一定の成果を得ることができ、学会発表を行った。今後、論文にまとめて出版することを予定している。

## 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 33 件)

① Magnetically Robust Multipole Kondo Effect, 査読有, Takashi Hotta, J. Phys.: Conf. Ser. **150**, 042061-1-4 (2009).

② Effect of Rattling Phonons on Sommerfeld Constant, 査読有, Takashi Hotta, J. Phys. Soc. Jpn. **77**, 103711-1-4 (2008).

③ Field-Induced Multipole States of Sm-Based Filled Skutterudites, 査読有, Takashi Hotta, J. Phys. Soc. Jpn. **77**, 074716-1-9 (2008).

④ Multipole as f-Electron Spin-Charge Density in Filled Skutterudites, 査読有, Takashi Hotta, J. Phys. Soc. Jpn. **77** Suppl. A, 96-101 (2008).

⑤ Antiferro-quadrupole state of orbital-degenerate Kondo lattice model with  $f^2$

- configuration, 査読有, Hiroaki Onishi and Takashi Hotta, J. Phys. Soc. Jpn. **77** Suppl. A, 199-201 (2008).
- ⑥ Exotic Kondo effects in electron-phonon systems, Takashi Hotta, 査読有, Physica B **403**, 1371-1372 (2008).
- ⑦ Multipole State of Heavy Lanthanide Filled Skutterudites, 査読有, Takashi Hotta, J. Phys. Soc. Jpn. **76**, 083705-1-5 (2007).
- ⑧ Enhanced Kondo Effect in an Electron System Dynamically Coupled with Local Optical Phonon, 査読有, Takashi Hotta, J. Phys. Soc. Jpn. **76**, 084702-1-8 (2007).
- ⑨ Multipole Susceptibility of Multiorbital Anderson Model Coupled with Jahn-Teller Phonons, 査読有, Takashi Hotta, J. Phys. Soc. Jpn. **76**, 034713-1-11 (2007).
- ⑩ Kondo Effect in an Electron System with Dynamical Jahn-Teller Impurity, 査読有, Takashi Hotta, J. Phys. Soc. Jpn. **76**, 023705-1-5 (2007).
- ⑪ Spin-orbital gap of multiorbital antiferromagnet with geometrical frustration, 査読有, Hiroaki Onishi and Takashi Hotta, Phys. Rev. B **75**, 014410-1-8 (2007).
- ⑫ Multipoles in  $\delta$ -Pu, 査読有, Takashi Hotta, J. of Alloys Compd. **444-445**, 162-167 (2007).
- ⑬ Microscopic Aspects of Multipole Properties of Filled Skutterudites, 査読有, Takashi Hotta, J. Magn. Magn. Mater. **310**, 1691-1697 (2007).
- ⑭ Relativistic Band-Structure Calculations for Electronic Properties of Actinide Dioxides, 査読有, Takahiro Maehira and Takashi Hotta, J. Magn. Magn. Mater. **310**, 754-756 (2007).
- ⑮ Effect of Hund's Rule Coupling on SU(4) Spin-Orbital System, 査読有, Hiroaki Onishi and Takashi Hotta, J. Magn. Magn. Mater. **310**, 790-792 (2007).
- ⑯ Superconductivity in f-Electron Systems Controlled by Crystalline Electric Fields, 査読有, Katsunori Kubo and Takashi Hotta, J. Magn. Magn. Mater. **310**, 572-574 (2007).
- ⑰ Quasi-Kondo Phenomenon due to Dynamical Jahn-Teller Effect, 査読有, Takashi Hotta, Phys. Rev. Lett. **96**, 197201-1-4 (2006).
- ⑱ Effective Crystalline Electric Field Potential in a j-j Coupling Scheme, 査読有, Takashi Hotta and Hisatomo Harima, J. Phys. Soc. Jpn. **75**, 124711-1-15 (2006).
- ⑲ Orbital-Controlled Superconductivity f-Electron Systems, 査読有, Katsunori Kubo and Takashi Hotta, J. Phys. Soc. Jpn. **75**, 083702-1-5 (2006).
- ⑳ Spin, charge, and orbital correlations in the one-dimensional  $t_{2g}$ -orbital Hubbard model, 査読有, Jose C. Xavier, Hiroaki Onishi, Takashi Hotta, and Elbio Dagotto, Phys. Rev. B **73**, 014405-1-9 (2006).
- ㉑ Electronic Properties of Transuranium Compounds with HoCoGa<sub>5</sub>-Type Tetragonal Crystal Structure, 査読有, Takahiro Maehira, Takashi Hotta, Kazuo Ueda, and Akira Hasegawa, New J. Phys. **8**, 24-1-20 (2006).
- ㉒ Magnetic Susceptibility of Multiorbital Systems, 査読有, Katsunori Kubo and Takashi Hotta, J. Phys. Soc. Jpn. **75**, 013702-1-4 (2006).
- ㉓ Orbital ordering phenomena in d- and f-electron systems, 査読有, Takashi Hotta, Reports on Progress in Physics **69**, 2061-2155 (2006).
- ㉔ Relativistic Band-Structure Calculation for PrCoIn<sub>5</sub>: A Theoretical Approach to Pr-Based Compound from Itinerant Picture, 査読有, Takahiro Maehira and Takashi Hotta, J. Phys. Soc. Jpn. **75** Suppl., 262-265 (2006).
- ㉕ Multipole Ordering and Fluctuations in f-Electron Systems, 査読有, Katsunori Kubo and Takashi Hotta, J. Phys. Soc. Jpn. **75** Suppl., 232-237 (2006).
- ㉖ Multipole Correlations in Low-Dimensional f-Electron Systems, 査読有, Hiroaki Onishi and Takashi Hotta, J. Phys. Soc. Jpn. **75** Suppl., 266-269 (2006).
- ㉗ Stripe Charge Ordering in Triangular-Lattice Systems, 査読有, Hiroaki Onishi and Takashi Hotta, AIP Conference Proceedings **850**, 1075-1076 (2006).
- ㉘ Spin-charge-orbital ordering in triangle-based lattices, 査読有, Hiroaki Onishi and Takashi Hotta, Physica B **378-380**, 589-591 (2006).
- ㉙ Electronic structure and the Fermi surface of

ThRhIn<sub>5</sub> in comparison with Uranium and Transuranium Compounds, 査読有, Takahiro Machira and Takashi Hotta, Physica B **378-380**, 1027-1028 (2006).

⑫ Multipole ordering in f-electron systems, 査読有, Katsunori Kubo and Takashi Hotta, Physica B **378-380**, 1081-1082 (2006).

⑬ Magnetic and orbital fluctuations in filled skutterudites, 査読有, Takashi Hotta, Physica B **378-380**, 51-53 (2006).

[学会発表] (計 14 件)

① 軌道秩序相近傍の超伝導, 堀田貴嗣, 日本物理学会第 64 回年次大会, 立教学院池袋キャンパス, 2009 年 3 月 27 日

② 非調和性局所フォノンによる電子比熱係数の増強, 堀田貴嗣, 日本物理学会 2008 年秋季大会, 岩手大学上田キャンパス, 2008 年 9 月 22 日

③ Magnetically Robust Multipole Kondo Effect, Takashi Hotta, *25<sup>th</sup> International Conference on Low Temperature Physics*, Amsterdam, Holland, August 8, 2008.

④ Sm 系充填スクッテルダイト化合物の多極子状態, 堀田貴嗣, 日本物理学会第 63 回年次大会, 近畿大学本部キャンパス, 2008 年 3 月 23 日

⑤ Multipoles in f-electron systems, Takashi Hotta, *Heavy Fermion Frontier workshop in honor of Joe D. Thompson's 60th birthday*, Bishops Lodge in Santa Fe, NW, U.S.A., November 13, 2007.

⑥ Multipole expansion of f-electron spin-charge density in filled skutterudites, Takashi Hotta, *International Conference on "New Quantum Phenomena in Skutterudite and Related Systems"*, Kobe, Japan, September 28, 2007.

⑦ 重希土類充填スクッテルダイト化合物の多極子状態, 堀田貴嗣, 日本物理学会第 62 回年次大会, 北海道大学札幌キャンパス, 2007 年 9 月 23 日

⑧ Multipoles in f-electron systems, Takashi Hotta, *NSFC-JSPS Joint Conference on Novel Quantum Phenomena in Strongly Correlated Electronic Systems*, Renmin University of China, Beijing, P. R. China, June 27, 2007.

⑨ Exotic Kondo effects in electron-phonon systems, Takashi Hotta, *International Symposium on Strongly Correlated Electron Systems*, Houston, U. S. A., May 14, 2007.

⑩ 電子フォノン系の近藤効果, 堀田貴嗣, 日本物理学会 2007 年春季大会, 鹿児島大学郡元キャンパス, 2007 年 3 月 19 日

⑪ Novel magnetism in actinide compounds with active orbital degrees of freedom, Takashi Hotta, *The 2<sup>nd</sup> Indo-Japan Seminar "Novel Magnetic Materials and their Electronic Structures"*, Tokyo, February 28, 2007.

⑫ 動的ヤーンテラー近藤効果, 堀田貴嗣, 日本物理学会 2006 年秋季大会, 千葉大学, 2006 年 9 月 23 日

⑬ Microscopic Aspects of Multipole Properties of Filled Skutterudites, Takashi Hotta, *International Conference on Magnetism 2006 (ICM2006)*, Kyoto, Japan, August 24, 2006.

⑭ Microscopic theory of magnetism and superconductivity of Pu and PuMGa<sub>5</sub> on the basis of a j-j coupling scheme, Takashi Hotta, *Plutonium Futures – The Science 2006*, Asilomar Conference Grounds, Pacific Grove, U.S.A., July 12, 2006.

[図書] (計 1 件)

① Ferromagnetism in undoped manganites, Takashi Hotta, *Progress in Ferromagnetism Research* (356 pages), ed. V. N. Murray, p.19-38, Nova Science Inc., New York (2006).

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

<http://ccmp1.phys.metro-u.ac.jp/ccmp/member/hotta/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

堀田 貴嗣 (HOTTA TAKASHI)

首都大学東京・大学院理工学研究科・准教授  
研究者番号 : 00262163

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし