

## 自己評価報告書

平成 23 年 4 月 15 日現在

機関番号：14501

研究種目：新学術領域研究

研究期間：2008～2012

課題番号：20102002

研究課題名（和文） 純良単結晶育成とドハース・ファンアルフェン効果による

フェルミ面の研究

研究課題名（英文） Fermi Surface Study by Single Crystal Growth and de Haas-van Alphen Effect

研究代表者

播磨 尚朝 (HARIMA HISATOMO)

神戸大学・大学院理学研究科・教授

研究者番号：50211496

研究代表者の専門分野：固体電子論

科研費の分科・細目：物理学・物性 II

キーワード：強相関電子系、結晶育成、電子構造、低温物性、磁性

## 1. 研究計画の概要

$f$  電子系化合物は、比較的局在性の強い  $f$  電子と結晶中を自由に動き回っている伝導電子とが混成し、その結果、重い電子系、多極子秩序、異方的超伝導など特色ある物性が発現する。本研究では、ドハース・ファンアルフェン (dHvA) 効果による実験とバンド理論を用いて、以下の項目を明らかにする。

- (1) 系統的なフェルミ面の研究から明らかになる  $f$  電子系の普遍性と多様な描像
- (2) 重い電子形成に関わる温度、磁場、圧力をパラメータとした  $f$  電子の役割
- (3) 量子臨界点近傍でのフェルミ面の変貌
- (4) 非フェルミ液体近傍に出現する超伝導とその電子状態の性質
- (5) 結晶に反転対称性のない化合物のフェルミ面とそこに出現する超伝導の性質

## 2. 研究の進捗状況

[平成 20 年度]以下の様な新たな知見を得た。

(1)  $4f$  電子の価数が降温とともに変わることから知られる価数揺動物質  $\text{YbCu}_2\text{Si}_2$  と 2 価の  $\text{YbCu}_2\text{Ge}_2$  の dHvA 効果の実験からフェルミ面を決定し、両物質の違いも明らかにした。 $\text{YbCu}_2\text{Si}_2$  では  $30\sim 40\text{m}_0$  のサイクロトロン質量を持つ重い伝導電子が検出された。その結果は LDA+ $U$  法に基づくエネルギーバンド計算の結果がよく再現し、 $\text{YbCu}_2\text{Si}_2$  における  $4f$  電子の電子相関の重要性が明らかにされた。

(2)  $\text{CeRu}_2(\text{Si}_x\text{Ge}_{1-x})_2$  は  $f$  電子が局在する強磁性体から Si 濃度の増加とともに反強磁性・常磁性の重い電子系へと変化するが、 $c$  面内に磁場を加え、dHvA 効果の測定から有効質量とフェルミ面の変化を調べた。dHvA 信号は強磁性・反強磁性相境界で大きく変化する。一方、

量子臨界点近傍では、有効質量が増強されるが周波数に不連続的な変化が見られないことを明らかにした。

(3) 新奇超伝導体  $\text{NpPd}_5\text{Al}_2$  の超伝導特性を詳細に調べるために、超ウラン化合物用比熱測定装置を開発し実験を行った。上部臨界磁場における電子比熱係数の極めて大きなとびを観測し、この系の異常な超伝導・常伝導特性を明らかにした。 $\beta\text{-US}_2$  で、 $5f$  電子系としては非常に珍しい局在的磁性を観測した。[平成 21 年度]次の成果があった。

(1) 新物質の探索：アクチノイド金属間化合物の探索を行い、新たに  $\text{URu}_2\text{Al}_{10}$ 、 $\text{UOs}_2\text{Al}_{10}$  を発見し物性を同定した。また、新しい Yb 化合物の育成にも成功した。

(2) 圧力下の物性研究：反強磁性体である  $\text{CeIrSi}_3$ 、 $\text{CeCoGe}_3$ 、 $\text{CeIrGe}_3$  はそれぞれ約 2、7、25 GPa の圧力下で磁気秩序が消滅し、重い電子系超伝導体になることを圧力下電気抵抗測定から明らかにした。

(3) 量子臨界点近傍でのフェルミ面の変貌：結晶反転対称性を持たない圧力誘起超伝導体  $\text{CeRhSi}_3$  のフェルミ面研究において、参照系の  $f$  電子が遍歴である  $\text{CeCoSi}_3$  の研究を通じて、これらのフェルミ面とは異なることを明らかにした。

(4) Yb 化合物における  $4f$  電子の遍歴性の検証：立方晶の重い電子系  $\text{YbT}_2\text{Zn}_{20}$  ( $T$ : Co, Rh, Ir) の単結晶育成に成功し、メタ磁性転移を見出した。例えば  $\text{YbIr}_2\text{Zn}_{20}$  では  $H_m=10\text{T}$  でメタ磁性転移が起き、サイクロトロン有効質量、電気抵抗の A 値、あるいは比熱係数  $C/T$  は、転移磁場  $H_m=10\text{T}$  でピークを持つことを見出した。これは、ネール点  $T_N$  に変わって、Yb 化合物ではメタ磁性の転移磁場  $H_m$  が電子状態を変える指標となることを

示唆している。

(5)重い電子系形成に関わる $f$ 電子の役割：  
URu<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>における 17.5Kの非磁性相転移は  
25年間にわたって秩序変数が同定されずに  
隠れた秩序と呼ばれていたが、空間群の群論  
的考察によりこの秩序状態が格子歪みと結  
合しない電子間相互作用に起因した新奇な  
電荷秩序状態であることを提案した。

[平成 22 年度]5月に本計画研究班主催のワ  
ークショップ「小さなフェルミ面と大きなフ  
ェルミ面」を開催し、理論班を含む領域内なら  
びに領域外の研究者と活発な討論を行ない、  
今後の研究方向について共通の認識を得る  
機会を持った。また、新しいカゴ状物質の  
CeT<sub>2</sub>Al<sub>10</sub>(T=Fe, Ru, Os)の電子状態や電場  
勾配に関して、領域内で共同研究を開始した。

### 3. 現在までの達成度

②おおむね順調に進展している。

(理由)

Yb系化合物のフェルミ面の研究が着実に進  
んでおり、空間反転対称性を持たない物質の  
研究も連携研究者を加えて着実に進展して  
いる。URu<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>の隠れた秩序状態のモデルに  
関する理論的な提案は世界的な注目を浴び  
て実験的研究に大きな刺激を与えた。

### 4. 今後の研究の推進方策

今後の重点研究項目として以下の3項目  
を掲げる。

(1)空間反転対称性のない超伝導物質の物性  
解明：特に圧力下の量子臨界点近傍のフェル  
ミ面の変化や、バンドに依存した重い有効質  
量の磁場依存性に注目して重い電子の起源  
にせまる。

(2)カゴ状重い電子系 Yb 化合物の物性解明：  
カゴ状物質は一般に単位胞が大きく理論的  
な計算も容易ではないが、計算機環境も整っ  
たので精密な計算が可能である。同時に圧力  
変化で量子臨界点近傍のフェルミ面の変化  
を実験的に検証し、この系の  $f$  電子の役割を  
明らかにする。

(3)URu<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>における隠れた秩序の解明：純  
良単結晶を用いて、隠れた秩序相から反強磁  
性相にわたり物性の変化を調べ、隠れた秩序  
状態の本質に迫る。同時にさらなる理論的な  
検証も行ない、必要な実験の提案を行なう。

分担者も含めて必要な設備は整っている  
ので、上記項目を中心にして新しい公募班と  
も協力して研究を推進していく。

### 5. 代表的な研究成果

(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 8 8 件)

① Anomalous Behavior of the  
Upper-Critical-Field in Heavy-Fermion

Superconductor CeRhSi<sub>3</sub>: T. Sugawara, (他 5 名)  
H. Aoki, (6 名中 3 番目): J. Phys. Soc. Jpn. 79  
(2010) 063701-1-4. (査読有)

② Metamagnetic Behavior in Heavy-Fermion  
Compound YbIr<sub>2</sub>Zn<sub>20</sub>: T. Takeuchi, (他 18 名) Y.  
Haga, (19 名中 15 番目) Y. Ōnuki (19 名中 19  
番目) J. Phys. Soc. Jpn. 79 (2010) 064609-1-15.  
(査読有)

③ Why the Hidden Order in URu<sub>2</sub>Si<sub>2</sub> Is Still  
Hidden - One Simple Answer: □H. Harima, K.  
Miyake, J. Flouquet: □J. Phys. Soc. Jpn. 79  
(2010) 033705-1-4. (査読有)

④ Possible Existence of Magnetic Polaron in  
Nearly Ferromagnetic Semiconductor β-US<sub>2</sub>: S.  
Ikeda, (他 17 名) Y. Haga, (18 名中 17 番目) and Y.  
Ōnuki (18 名中 18 番目): J. Phys. Soc. Jpn. 78  
(2009) 114704-1-10. (査読有)

⑤ de Haas-van Alphen Effect and Fermi Surface  
Properties in High-Quality Single Crystals  
YbCu<sub>2</sub>Si<sub>2</sub> and YbCu<sub>2</sub>Ge<sub>2</sub>: Nguyen Duc Dung  
(他 13 名) Y. Haga, (14 名中 3 番目) H.  
Harima, (14 名中 13 番目) and Y. Onuki (14 名中  
14 番目): □J. Phys. Soc. Jpn. 78 (2009)  
084711-1-14. (査読有)

[学会発表] (計 2 6 2 件)

① Y. Haga, Y. Homma, D. Aoki, T. D. Matsuda,  
N. Tateiwa, H. Sakai, S. Yoshio, T. Sugai, A.  
Nakamura, E. Yamamoto, Y. Onuki, H. Harima,  
“Unconventional magnetism and  
superconductivity in the ternary actinide  
compounds AnPd<sub>5</sub>Al<sub>2</sub>” International Conference  
on Strongly Correlated Electron Systems, 2010  
年 7 月 1 日, Santa Fe, USA

② H. Harima, “Stealth Coupling in URu<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>”,  
International Conference on Strongly Correlated  
Electron Systems, 2010 年 6 月 28 日, Santa Fe,  
USA

③ Y. Onuki, “ $4f$ -itinerant Nature in Heavy  
Fermion Compounds YbCu<sub>2</sub>Si<sub>2</sub> and  
YbIr<sub>2</sub>Zn<sub>20</sub>,” International Conference on Core  
Research and Engineering Science of Advanced  
Materials, 2010 年 6 月 2 日 Osaka University  
Convention Center

④ Y. Matsumoto, N. Kimura, T. Komatsubara, H.  
Aoki, M. Kimata, T. Terashima, and S. Uji  
“Anomalous Behavior of the dHvA Oscillations  
in Ce<sub>x</sub>La<sub>1-x</sub>Ru<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>” International Conference on  
Magnetism, 2009 年 7 月 27 日 Congress Center,  
Kalsruhe, Germany

⑤ H. Harima, “Fermi Surfaces of heavy fermion  
Yb-compounds” International Conference on  
Magnetism, 2009 年 7 月 27 日, Kalsruhe,  
Germany

[その他]

領域全体のホームページ

<http://www.heavy-electrons.jp/>