

研究種目：若手研究 (A)

研究期間：2006～2008

課題番号：18684018

研究課題名 (和文) 空間反転対称性のない重い電子系超伝導の物理の開拓

研究課題名 (英文) Exploring the physics of superconductivity in non-centrosymmetric heavy fermion system

研究代表者

木村 憲彰 (Noriaki Kimura)

東北大学・大学院理学研究科・助教

研究者番号：30292311

研究成果の概要：

結晶の空間反転対称性が破れた重い電子系超伝導体について、上部臨界磁場の温度依存性の測定を行い、従来知られているどの超伝導物質よりも磁場によって壊れにくい性質を持っていることを明らかにし、重い電子の性質と空間反転対称性の破れによって、これまででない超伝導の新奇な性質が発現することを証明した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	12,500,000	3,750,000	16,250,000
2007年度	6,900,000	2,070,000	8,970,000
2008年度	3,600,000	1,080,000	4,680,000
年度			
年度			
総計	23,000,000	6,900,000	29,900,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・物性II

キーワード：空間反転対称性, 重い電子系超伝導, 上部臨界磁場, 量子臨界点, 磁性と超伝導

## 1. 研究開始当初の背景

従来知られている超伝導体は、銅酸化物や重い電子系などの強相関電子系において発現する非s波超伝導を含め、結晶の空間反転対称性が存在する。そのため、超伝導電子対は反転対称性を前提として考えられていた。ところが、2004年に重い電子系  $\text{CePt}_3\text{Si}$  において、結晶構造に空間反転対称性のない超伝導体が発見された。この発見を契機に、空間反転対称性の破れた(non-Centrosymmetric)超伝導(nCS超伝導とよぶことにする)が注目を集めている。nCS超伝導では、既存のシングレットやトリプレットといったクーパ対の描像が nCS超伝導では成り立たず、新

奇な超伝導の発現が期待されるからである。

## 2. 研究の目的

本研究では、2005年に研究代表者が発見した空間反転対称性のない重い電子系圧力誘起超伝導体  $\text{CeRhSi}_3$  の超伝導に関する研究を推進するとともに、同じ結晶構造を持つCe-113系の超伝導を探索し、nCS超伝導の物理を開拓することを目的とした。

## 3. 研究の方法

上記目的を達成するために以下のテーマに焦点を絞って研究を行った。

(1)  $\text{CeRhSi}_3$ における超伝導の異方性の解明:

超伝導上部臨界磁場の異方性を電気抵抗の磁場依存性から求める。

(2)  $\text{CeRhSi}_3$  の特異な超伝導相図の詳細研究: 超伝導上部臨界磁場の温度依存性を、電気抵抗測定を用いて、さまざまな圧力で求める。

(3) 関連物質開発:

$\text{CeRhSi}_3$  と同じ結晶構造を持つ関連物質をチヨクラスキー法、フラックス法などで育成し、物性を明らかにする。

#### 4. 研究成果

(1)  $\text{CeRhSi}_3$  における超伝導の異方性の解明:  $\text{CeRhSi}_3$  の超伝導上部臨界磁場が極めて異方的で、磁場を c 軸に印加したときの臨界磁場を超伝導転移温度で割った値(超伝導の磁場に対する耐性を意味する)は、これまで知られている超伝導物質をはるかに上回ることを明らかにした(図1参照)。またその原因は、重い電子に由来する短いコヒーレンス長と空間反転対称性の破れに起因する常磁性対破壊効果の喪失に由来することを明らかにした。

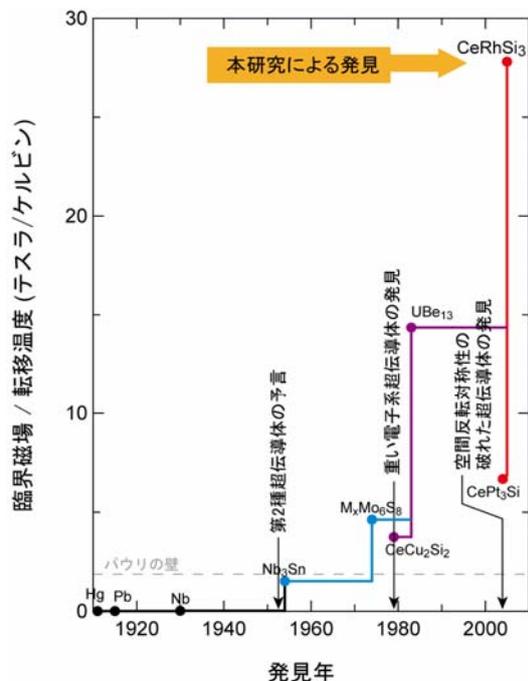


図1 強磁場(磁場に強い)超伝導の発見年表  
新しい機構の超伝導の発見によって磁場への耐性が飛躍的に向上している。

(2)  $\text{CeRhSi}_3$  の特異な超伝導相図の詳細研究: 上記の超伝導上部臨界磁場の温度依存性(超伝導相図)をさまざまな圧力で測定した。反強磁性転移が観測される圧力から、超伝導転移のみが観測される圧力へ変化するに従い、超伝導相図に折れ曲がりが見出された。また、この折れ曲がりから、磁気

秩序と思われる電気抵抗の以上を観測した。以上のことから、 $\text{CeRhSi}_3$  の温度-圧力-磁場相図は図2のようなものと考えられる。超伝導は、反強磁性が消失する近傍で発現し、反強磁性相によって超伝導の性質(上部臨界磁場)が影響を受けること明らかとなった。特に後者の性質は、いままでの重い電子系圧力誘起超伝導体には見られなかった新しい

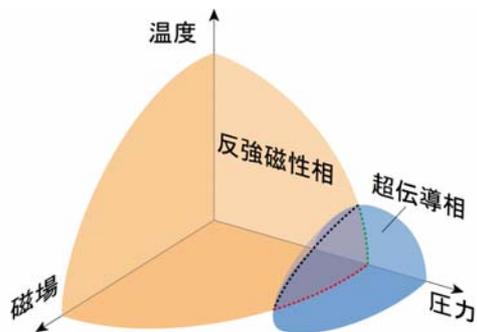


図2 重い電子系の温度-圧力-磁場相図  
超伝導相は反強磁性相が消失する圧力近傍で発生する。反強磁性相の隣接する磁場で、超伝導上部臨界磁場の性質が変化する。性質である。

(3) 関連物質開発:

$\text{CeRhSi}_3$  の関連物質として  $\text{CeCoSi}_3$  の純良単結晶を育成し、電気抵抗及びドハース・ファンアルフェン効果の測定を行った。 $\text{CeCoSi}_3$  は過去に超伝導の報告がなされていたが、これは不純物  $\text{CoSi}_2$  によるものと同定した。ドハース周波数の角度依存性からは、 $\text{CeCoSi}_3$  のフェルミ面は  $\text{CeRhSi}_3$  のフェルミ面と大きく異なり、むしろ FLAPW 法による  $\text{CeRhSi}_3$  のバンド計算の結果と定性的に一致していることが明らかとなった。このことは、同じ遍歴した  $4f$  電子状態においても、フェルミ面のトポロジーに違いが見られることがあることを意味する。

#### 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 25 件)

1. K. Ueno, S. Nakamura, H. Shimotani, A. Ohtomo, N. Kimura, T. Nojima, H. Aoki, Y. Iwasa, M. Kawasaki; Electric-field-induced superconductivity in an insulator; Nature Mat. 7 (2008) 855-858 査読あり
2. T. Terashima, M. Kimata, S. Uji, T. Sugawara, N. Kimura, H. Aoki, H. Harima; Fermi surface in  $\text{LaRhSi}_3$  and  $\text{CeRhSi}_3$ ; Phys. Rev. B 78 (2008)

- 205107 1-5 査読あり
3. M. Sugi, Y. Matsumoto, N. Kimura, T. Komatsubara, H. Aoki, T. Terashima, S. Uji; Fermi surface properties of  $\text{CeRu}_2(\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x)_2$  in magnetic fields above the metamagnetic transitions; Phys. Rev. Lett. 101 (2008) 056401 1-4 査読あり
  4. R. P. Smith, M. Sutherland, G. G. Lonzarich, S. S. Saxena, N. Kimura, S. Takashima, M. Nohara, H. Takagi; Marginal breakdown of the Fermi-liquid state on the border of metallic ferromagnetism; Nature 455 (2008) 1220-1223 査読あり
  5. Y. Matsumoto, M. Sugi, N. Kimura, T. Komatsubara, H. Aoki, I. Satoh, T. Terashima, S. Uji; Continuous evolution of fermi surface properties above metamagnetic transitions in  $\text{Ce}_x\text{La}_{1-x}\text{Ru}_2\text{Si}_2$ ; J. Phys. Soc. Jpn. 77 (2008) 053703 1-4 査読あり
  6. T. Isshiki, N. Kimura, H. Aoki, T. Terashima, S. Uji, K. Yamauchi, H. Harima, D. Jaiswal-Nagar, S. Ramakrishnan, A. K. Grover; de Haas-van Alphen effect in the mixed state of  $\text{LuNi}_2\text{B}_2\text{C}$ : Anisotropy and field dependence of the damping due to superconductivity; Phys. Rev. B 78 (2008) 134528 1-12 査読あり
  7. F. Tomioka, I. Umehara, T. Ono, M. Hedo, Y. Uwatoko, N. Kimura; Development of heat capacity measurement system under high pressure; Jpn. J. Appl. Phys. Part 1 - Regul. Pap. Short Notes Rev. Pap. 46 (2007) 3090-3095 査読あり
  8. F. Tomioka, M. Hedo, I. Umehara, T. Ono, Y. Uwatoko, N. Kimura, S. Takayanagi; Heat capacity of  $\text{CeRhSi}_3$  under pressure; J. Magn. Magn. Mater. 310 (2007) 340-342 査読あり
  9. T. Terashima, Y. Takahide, T. Matsumoto, S. Uji, N. Kimura, H. Aoki, H. Harima; Fermi surface and superconductivity in noncentrosymmetric  $\text{CeRhSi}_3$ ; Phys. Rev. B 76 (2007) 054506 1-4 査読あり
  10. T. Terashima, K. Enomoto, T. Konoike, T. Matsumoto, S. Uji, N. Kimura, M. Endo, T. Komatsubara, H. Aoki, K. Maezawa;  $\text{UGe}_2$ : Low-temperature resistivity measurements in a wide range of magnetic field and pressure; J. Magn. Magn. Mater. 310 (2007) E116-E117 査読あり
  11. M. Sugi, T. Fujiwara, Y. Matsumoto, T. Isshiki, N. Kimura, T. Komatsubara, H. Aoki, I. Satoh, T. Terashima, S. Uji; Metamagnetic transitions, electronic structures and quantum critical point of  $\text{CeRu}_2(\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x)_2$ ; J. Magn. Magn. Mater. 310 (2007) 331-333 査読あり
  12. D. J. Nagar, T. Isshiki, N. Kimura, H. Aoki, S. Ramakrishnan, A. K. Grover; Angular dependent study of the peak effect phenomenon in a weakly pinned single crystal of  $\text{LuNi}_2\text{B}_2\text{C}$ ; Physica C 460 (2007) 1215-1217 査読あり
  13. Y. Muro, M. Ishikawa, K. Hirota, Z. Hiroi, N. Takeda, N. Kimura, H. Aoki; Crystalline Electric Field Effect and Magnetic Properties of  $\text{CeRhSi}_3$  Single Crystal; J. Phys. Soc. Jpn. 76 (2007) 033706 1-3 査読あり
  14. S. I. Kimura, N. Kimura, H. Aoki; Low-energy electrodynamics of heavy quasiparticles in  $\text{ZrZn}_2$ ; J. Phys. Soc. Jpn. 76 (2007) 084710 1-5 査読あり
  15. N. Kimura, Y. Muro, H. Aoki; Normal and superconducting properties of noncentrosymmetric heavy fermion  $\text{CeRhSi}_3$ ; J. Phys. Soc. Jpn. 76 (2007) 051010 1-14 査読あり
  16. N. Kimura, K. Ito, H. Aoki, S. Uji, T. Terashima; Extremely high upper critical magnetic field of the noncentrosymmetric heavy fermion superconductor  $\text{CeRhSi}_3$ ; Phys. Rev. Lett. 98 (2007) 197001 1-4 査読あり
  17. N. Aso, H. Miyano, H. Yoshizawa, N. Kimura, T. Komatsubara, H. Aoki; Incommensurate magnetic order in the pressure-induced superconductor  $\text{CeRhSi}_3$ ; J. Magn. Magn. Mater. 310 (2007) 602-604 査読あり
  18. T. Terashima, K. Enomoto, T. Konoike, T. Matsumoto, S. Uji, N. Kimura, M. Endo, T. Komatsubara, H. Aoki, K. Maezawa; Magnetic-field and pressure dependence of low-temperature resistivity in  $\text{UGe}_2$ ; Phys. Rev. B 73 (2006) 140406 査読あり
  19. M. Sugi, T. Fujiwara, T. Isshiki, N. Kimura, T. Komatsubara, H. Aoki; Metamagnetic transitions and electronic structures of  $\text{CeRu}_2(\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x)_2$ ; Physica B 378-80 (2006) 810-811 査読あり
  20. S. Nakamura, H. Yamamoto, M. Endo, H. Aoki, N. Kimura, T. Nojima, S. Kunii; Non-Fermi liquid and heavy fermion behavior in  $\text{Ce}_x\text{La}_{1-x}\text{B}_6$  with qu-

- adropolar moments; Physica B 378-80 (2006) 148-149 査読あり
21. S. Nakamura, M. Endo, H. Yamamoto, T. Isshiki, N. Kimura, H. Aoki, T. Nojima, S. Otani, S. Kunii; Unusual evolution of the conduction-electron state in  $Ce_xLa_{1-x}B_6$  from non-Fermi liquid to Fermi liquid; Phys. Rev. Lett. 97 (2006) 237204 1-4 査読あり
  22. T. Isshiki, M. Endo, M. Sugi, N. Kimura, S. Nakamura, T. Nojima, H. Aoki, S. Kunii; Spin-split fermi surfaces in  $Ce_xLa_{1-x}B_6$  and  $Pr_xLa_{1-x}B_6$ ; Physica B 378-80 (2006) 604-606 査読あり
  23. T. Fujiwara, M. Sugi, N. Kimura, I. Satoh, T. Komatsubara, H. Aoki; Single-crystal growth and magnetic properties of  $CeAu_2Si_2$ ; Physica B 378-80 (2006) 812-814 査読あり
  24. M. Endo, S. Nakamura, T. Isshiki, N. Kimura, T. Nojima, H. Aoki, H. Harima, S. Kunii; Evolution of Fermi surface properties in  $Ce_xLa_{1-x}B_6$  and  $Pr_xLa_{1-x}B_6$ ; J. Phys. Soc. Jpn. 75 (2006) 114704 1-11 査読あり
  25. M. Endo, T. Isshiki, N. Kimura, H. Aoki, S. Kunii; De Haas-van Alphen effect of  $PrB_6$  in commensurate and incommensurate phases; Physica B 378-80 (2006) 607-609 査読あり

[学会発表] (計 4 件)

1. N. Kimura, Strong anisotropy of the upper critical field in the non-centrosymmetric heavy fermion superconductor  $CeRhSi_3$ , 25th International Conference of Low Temperature Physics (LT25), 2008 年 8 月 6-13 日, アムステルダム(オランダ) (招待講演)
2. 木村憲彰, 空間反転対称性のない重い電子系  $CeRhSi_3$  の圧力誘起超伝導の発見, 日本物理学会第 62 回年次大会, 2007 年 9 月 21-24 日, 北海道大学(第 1 回物理学会若手奨励賞受賞講演)
3. 木村憲彰,  $CeRhSi_3$  の圧力下超伝導の異方性, 日本物理学会 2006 年秋季大会, 2006 年 9 月 23-26 日, 千葉大学(シンポジウム招待講演)
4. N. Kimura, A New Noncentrosymmetric Heavy-fermion Superconductor  $CeRhSi_3$ , International Conference on Magnetism 2006 (ICM2006), 2006 年 8 月 20-25 日, 京都

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

木村 憲彰 (KIMURA NORIAKI)  
 東北大学・大学院理学研究科・助教  
 研究者番号：30292311

### (2) 研究分担者

( )

研究者番号：

### (3) 連携研究者

( )

研究者番号：