

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 5 月 25 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：平成 2009 年度 ～ 平成 2011 年度

課題番号：21340099

研究課題名（和文） マイクロ波による重い電子系超伝導体の研究

研究課題名（英文） Microwave studies of heavy-fermion superconductors

研究代表者

芝内 孝禎 (SHIBAUCHI TAKASADA)

京都大学・大学院理学研究科・准教授

研究者番号：00251356

研究成果の概要(和文):本研究では、マイクロ波を用いた強相関電子系の低温物性測定により、低エネルギー電子状態の研究を行った。特に、重い電子系ウラン化合物で現れる「隠れた秩序」相の主なバンドのフェルミ面における有効質量の構造をサイクロトロン共鳴により決定することができた。また、鉄系超伝導体の磁場侵入長測定により、超伝導ギャップ構造と超伝導相における量子臨界点の存在を明らかにした。

研究成果の概要(英文): We studied low energy electronic properties of strongly correlated electron systems by using microwave. In uranium heavy-fermion compound, we observed cyclotron resonance for the first time, from which we determined the electronic mass structure of the main Fermi surface sheets in the so-called hidden-order phase. We also measured the magnetic penetration depth in iron-based superconductors and determined the superconducting gap structure. We also found the quantum critical point inside the superconducting phase.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	6,700,000	2,010,000	8,710,000
2010 年度	4,500,000	1,350,000	5,850,000
2011 年度	3,600,000	1,080,000	4,680,000
年度			
年度			
総計	14,800,000	4,440,000	19,240,000

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：サイクロトロン共鳴、有効質量、フェルミ面、超伝導ギャップ、磁場侵入長

1. 研究開始当初の背景

電子間の相互作用が強い d 電子および f 電子系では、磁気秩序近傍において温度以外のパラメータで磁気秩序を抑制すると、量子臨界点近傍のつよい量子揺らぎのため、非フェルミ液体的物性や異方的超伝導の出現などの異常物性がしばしば観測され、その振る舞いを理解することは物理学の最重要課題の一つである。

この問題に対して、電子構造や、超伝導の秩序パラメータの構造を決定することが最も基本的かつ重要であることは言を俟たない。特に特定の波数を持つゆらぎが、電子相関や準粒子散乱の波数方向依存性や超伝導の対称性に大きく関わるため、異方的超伝導を理解する上で、有効質量や散乱時間がどのような異方性を持つかを明らかにすることは本質的である。このような情報を得るために、

高磁場量子振動の測定などがなされているが、有効質量の重いバンドほど、観測する条件が厳しくなり、多くの物質で比較的軽いフェルミ面は見えているが、超伝導の起源を議論する上で最も重要である重いフェルミ面が見えていないという状況となっている。

2. 研究の目的

本研究の目的は、この重要な問題に対する新しい切り口として、マイクロ波を用いて、電子の有効質量・散乱時間をダイレクトに測定できる実験手段であるサイクロトロン共鳴により、強相関超伝導体の電子構造について詳細な研究を行うことである。さらに同じ高周波を用いる実験により、超伝導状態における重要な物理量である磁場侵入長の測定が可能であるため、極低温領域までの測定システムを開発し、超伝導ギャップ構造の情報を得ることも重要な目的の一つである。

3. 研究の方法

測定はマイクロ波領域の透過型空洞共振器を用いて、試料によるマイクロ波吸収および共振周波数の変化を、磁場や温度の関数として測定する。サイクロトロン共鳴実験では、磁場によるサイクロトロン周波数とマイクロ波周波数が一致する磁場で、吸収ピークが現れ、その共鳴磁場から対応するサイクロトロン軌道の有効質量を直接求めることができる。磁場と試料の角度を変化させて有効質量の角度依存性から、フェルミ面における有効質量の構造を決定可能である。

超伝導状態では、共振周波数の温度依存性から、磁場侵入長の温度変化が測定可能である。さらに、超伝導転移温度以上の常伝導状態における表面抵抗と表面リアクタンスの同時測定により、磁場侵入長の絶対値を見積もることも可能である。

4. 研究成果

本研究では、マイクロ波を用いて強相関電子系の低温物性測定を行った。特に、重い電子系化合物の URu_2Si_2 の「隠れた秩序」相と、鉄系超伝導体 $\text{BaFe}_2(\text{As}, \text{P})_2$ の超伝導相において、重要な知見を得た。以下に代表的な成果を述べる。

(1) 「隠れた秩序」相における電子構造の決定

まず、重い電子系化合物 URu_2Si_2 では、磁場中のマイクロ波吸収測定においてサイクロトロン共鳴を観測し、26年間の謎であった「隠れた秩序」相のフェルミ面の主な構造の同定に成功した。ここで明らかになったのは、最も信号の強い共鳴を与える α バンドとよばれるホール面で、バンド計算や量子振動の測定からは明らかにされていなかった有効質量の分裂を発見し、 $[110]$ 方向にホットス

ポットを持つことを強く示唆する結果を得た。この結果は、「隠れた秩序」相において正方晶の面内4回対称性を破る電子構造となっていることを示しており、以前我々がトルク測定により提唱した電子ネマティック状態となっていることをフェルミ面の異方性としてとらえたものであると考えられる。これにより、「隠れた秩序」の対称性が面内4回対称性を破るものに絞られ、理解が格段に進むことが期待される。この結果は現在論文にまとめ国際雑誌に投稿中である。

(1) 「隠れた秩序」相における電子構造の決定

次に、新しいマイクロ波測定装置として、誘電体であるルチルを用いた5 GHz帯の共振器を設計・作製し、鉄系超伝導体 $\text{BaFe}_2(\text{As}, \text{P})_2$ の超伝導状態における磁場侵入長測定を行った。特に、 10° を超す高いQ値と、低温において試料の引き抜きを可能にしたことにより、今までは困難であった磁場侵入長の絶対値の見積もりを高い精度で行うことができるようになった。様々なP置換量の $\text{BaFe}_2(\text{As}, \text{P})_2$ 単結晶試料での磁場侵入長の絶対値測定を行った結果、低置換量で現れる反強磁性秩序が完全に抑制される30%置換付近において、絶対零度における磁場侵入長の値が鋭いピーク構造を持つことを明らかにした。この結果は、超伝導ドームの内部の絶対零度において臨界的な揺らぎが存在していることを実験的にはじめて直接示したものであり、反強磁性量子臨界点が超伝導状態内に存在することを示すものである。この結果はScience誌に論文が掲載予定である。

今回明らかとなった超伝導状態内の量子臨界性は、新しい展開として、磁気秩序近傍の非従来型超伝導体における根本的な物理の問題として様々な発展が期待される。今回調べた鉄系超伝導体に限らず、重い電子系超伝導体や有機超伝導体でも観測できる可能性を秘めており、磁氣的な長距離秩序相の近傍でおこる非従来型の超伝導を示す様々な物質において系統的な測定を行うことにより、強相関電子系の超伝導と磁気量子臨界点の関連性を明らかできると考えられる。

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 35 件) すべて査読あり

① K. Hashimoto, K. Cho, T. Shibauchi, S. Kasahara, Y. Mizukami, R. Katsumata, Y. Tsuruhara, T. Terashima, H. Ikeda, M. A. Tanatar, H. Kitano, P. Walmsley, A. Carrington, R. Prozorov, and Y. Matsuda, "A Sharp Peak of the Zero-Temperature Penetration Depth at Optimal Composition

in the Iron-Based Superconductor $\text{BaFe}_2(\text{As}_{1-x}\text{P}_x)_2$ ", *Science* (to be published).

② S. Kasahara, H. J. Shi, K. Hashimoto, S. Tonegawa, Y. Mizukami, T. Shibauchi, K. Sugimoto, T. Fukuda, T. Terashima, A. H. Nevidomskyy, and Y. Matsuda, "Nematic and Meta-Nematic Transitions in the Iron Pnictides", *Nature* (to be published).

③ S. Kasahara, K. Hashimoto, H. Ikeda, T. Terashima, Y. Matsuda, and T. Shibauchi, "Contrasts in Electron Correlations and Inelastic Scattering between LiFeP and LiFeAs Revealed by Charge Transport", *Phys. Rev. B* **85**, 060503(R) (2012).

DOI:10.1103/PhysRevB.85.060503

④ T. Iye, Y. Nakai, S. Kitagawa, K. Ishida, S. Kasahara, T. Shibauchi, Y. Matsuda, and T. Terashima, "Microscopic Evidence of Direct Coupling between Magnetic and Superconducting Order Parameters in $\text{BaFe}_2(\text{As}_{1-x}\text{P}_x)_2$ ", *J. Phys. Soc. Jpn.* **81**, 033701 (2012).

DOI: 10.1143/JPSJ.81.033701

⑤ K. Hashimoto, S. Kasahara, R. Katsumata, Y. Mizukami, M. Yamashita, H. Ikeda, T. Terashima, A. Carrington, Y. Matsuda, and T. Shibauchi, "Nodal versus Nodeless Behaviors of the Order Parameters of LiFeP and LiFeAs Superconductors from Magnetic Penetration-Depth Measurements", *Phys. Rev. Lett.* **108**, 047003 (2012).

DOI: 10.1103/PhysRevLett.108.047003

⑥ C. Putzke, A. I. Coldea, I. Guillamon, D. Vignolles, A. McCollam, D. LeBoeuf, M. D. Watson, I. I. Mazin, S. Kasahara, T. Terashima, T. Shibauchi, Y. Matsuda, and A. Carrington, "de Haas-van Alphen Study of the Fermi Surfaces of Superconducting LiFeP and LiFeAs ", *Phys. Rev. Lett.* **108**, 047002 (2012).

DOI: 10.1103/PhysRevLett.108.047002

⑦ Y. Wang, J. S. Kim, G. R. Stewart, P. J. Hirschfeld, S. Graser, S. Kasahara, T. Terashima, Y. Matsuda, T. Shibauchi, and I. Vekhter, "Volovik Effect in a Highly Anisotropic Multiband Superconductor: Experiment and Theory", *Phys. Rev. B* **84**, 184524 (2011).

DOI: 10.1103/PhysRevB.84.184524

⑧ Y. Mizukami, H. Shishido, T. Shibauchi, M. Shimozawa, T. Yasumoto, M. Yamashita, H. Ikeda, T. Terashima, H. Kontani, and Y. Matsuda, "Extremely Strong-Coupling Superconductivity in Artificial Two-Dimensional Kondo Lattices", *Nature*

Physics **7**, 849-853 (2011).

DOI: 10.1038/nphys2112

⑨ M. Yamashita, Y. Senshu, T. Shibauchi, S. Kasahara, K. Hashimoto, D. Watanabe, H. Ikeda, T. Terashima, I. Vekhter, A. B. Vorontsov, and Y. Matsuda, "Nodal Gap Structure of Superconducting $\text{BaFe}_2(\text{As}_{1-x}\text{P}_x)_2$ from Angle-Resolved Thermal Conductivity in a Magnetic Field", *Phys. Rev. B* **84**, 060507(R) (2011).

DOI: 10.1103/PhysRevB.84.060507

⑩ B. J. Arnold, S. Kasahara, A. I. Coldea, T. Terashima, Y. Matsuda, T. Shibauchi, and A. Carrington, "Nesting of Electron and Hole Fermi Surfaces in Nonsuperconducting BaFe_2P_2 ", *Phys. Rev. B* **83**, 220504(R) (2011).

DOI: 10.1103/PhysRevB.83.220504

⑪ J. S. Kim, G. R. Stewart, S. Kasahara, T. Shibauchi, T. Terashima, and Y. Matsuda, "Specific Heat Discontinuity, ΔC , at T_c in $\text{BaFe}_2(\text{As}_{0.7}\text{P}_{0.3})_2$ - Consistent with Unconventional Superconductivity", *J. Phys.: Condens. Matter* **23**, 222201 (2011).

DOI: 10.1088/0953-8984/23/22/222201

⑫ T. Shimojima, F. Sakaguchi, K. Ishizaka, Y. Ishida, T. Kiss, M. Okawa, T. Togashi, C.-T. Chen, S. Watanabe, M. Arita, K. Shimada, H. Namatame, M. Taniguchi, K. Ohgushi, S. Kasahara, T. Terashima, T. Shibauchi, Y. Matsuda, A. Chainani, and S. Shin, "Orbital-Independent Superconducting Gaps in Iron-Pnictides", *Science* **332**, 564-567 (2011).

DOI: 10.1126/science.1202150

⑬ K. Kumagai, H. Shishido, T. Shibauchi, and Y. Matsuda, "Evolution of Paramagnetic Quasiparticle Excitations Emerged in the High-Field Superconducting Phase of CeCoIn_5 ", *Phys. Rev. Lett.* **106**, 137004 (2011).

DOI: 10.1103/PhysRevLett.106.137004

⑭ T. Yoshida, I. Nishi, S. Ideta, A. Fujimori, M. Kubota, K. Ono, S. Kasahara, T. Shibauchi, T. Terashima, Y. Matsuda, H. Ikeda, and R. Arita, "Two-Dimensional and Three-Dimensional Fermi Surfaces of Superconducting $\text{BaFe}_2(\text{As}_{1-x}\text{P}_x)_2$ and Their Nesting Properties Revealed by Angle-Resolved Photoemission Spectroscopy", *Phys. Rev. Lett.* **106**, 117001 (2011).

DOI: 10.1103/PhysRevLett.106.117001

⑮ S. Kasahara, T. Shibauchi, K. Hashimoto, Y. Nakai, H. Ikeda, T. Terashima, and Y. Matsuda, "Abrupt Recovery of Fermi-Liquid Transport

Following the Collapse of the c Axis in $\text{CaFe}_2(\text{As}_{1-x}\text{P}_x)_2$ Single Crystals", *Phys. Rev. B* **83**, 060505(R) [Rapid Commun.] (2011).

DOI: 10.1103/PhysRevB.83.060505

⑩ R. Okazaki, T. Shibauchi, H. J. Shi, Y. Haga, T. D. Matsuda, E. Yamamoto, Y. Onuki, H. Ikeda, and Y. Matsuda, "Rotational Symmetry Breaking in the Hidden-Order Phase of URu_2Si_2 ", *Science* **331**, 439-442 (2011).

DOI: 10.1126/science.1197358

⑪ C. J. van der Beek, M. Konczykowski, S. Kasahara, T. Terashima, R. Okazaki, T. Shibauchi, and Y. Matsuda, "Quasiparticle Scattering Induced by Charge Doping of Iron-Pnictide Superconductors Probed by Collective Vortex Pinning", *Phys. Rev. Lett.* **105**, 267002 (2010).

DOI: 10.1103/PhysRevLett.105.267002

⑫ L. E. Klintberg, S. K. Goh, S. Kasahara, Y. Nakai, K. Ishida, M. Sutherland, T. Shibauchi, Y. Matsuda, and T. Terashima, "Chemical Pressure and Physical Pressure in $\text{BaFe}_2(\text{As}_{1-x}\text{P}_x)_2$ ", *J. Phys. Soc. Jpn.* **79**, 123706 (2010).

DOI: 10.1143/JPSJ.79.123706

⑬ L. Krusin-Elbaum, T. Shibauchi, Y. Kasahara, R. Okazaki, Y. Matsuda, R. D. McDonald, C. H. Mielke, and M. Hasegawa, "Interlayer Magnetotransport in the Overdoped Cuprate $\text{Tl}_2\text{Ba}_2\text{CuO}_{6+x}$: Quantum Critical Point and Its Downslide in an Applied Magnetic Field", *Phys. Rev. B* **82**, 144530 (2010).

DOI: 10.1103/PhysRevB.82.144530

⑭ Y. Nakai, T. Iye, S. Kitagawa, K. Ishida, H. Ikeda, S. Kasahara, H. Shishido, T. Shibauchi, Y. Matsuda, and T. Terashima, "Unconventional Superconductivity and Antiferromagnetic Quantum Critical Behavior in the Isovalent-Doped $\text{BaFe}_2(\text{As}_{1-x}\text{P}_x)_2$ ", *Phys. Rev. Lett.* **105**, 107003 (2010).

DOI: 10.1103/PhysRevLett.105.107003

⑮ S. K. Goh, Y. Nakai, K. Ishida, L. E. Klintberg, Y. Ihara, S. Kasahara, T. Shibauchi, Y. Matsuda, and T. Terashima, "Anisotropic Superconducting Properties of Optimally Doped $\text{BaFe}_2(\text{As}_{0.65}\text{P}_{0.35})_2$ under Pressure", *Phys. Rev. B* **82**, 094502 (2010). DOI: 10.1103/PhysRevB.82.094502

⑯ R. Okazaki, M. Shimozawa, H. Shishido, M. Konczykowski, Y. Haga, T. D. Matsuda, Y. Onuki, Y. Yanase, T. Shibauchi, and Y. Matsuda, "Anomalous Temperature Dependence of Lower Critical Field in

Ultraclean URu_2Si_2 ", *J. Phys. Soc. Jpn.* **79**, 084705 (2010).

DOI: 10.1143/JPSJ.79.084705

⑰ K. Hashimoto, A. Serafin, S. Tonegawa, R. Katsumata, R. Okazaki, T. Saito, H. Fukazawa, Y. Kohori, K. Kihou, C. H. Lee, A. Iyo, H. Eisaki, H. Ikeda, Y. Matsuda, A. Carrington, and T. Shibauchi, "Evidence for Superconducting Gap Nodes in the Zone-Centered Hole Bands of KFe_2As_2 from Magnetic Penetration-Depth Measurements", *Phys. Rev. B* **82**, 014526 (2010). DOI: 10.1103/PhysRevB.82.014526

⑱ M. Yamashita, N. Nakata, Y. Senshu, M. Nagata, H. M. Yamamoto, R. Kato, T. Shibauchi, and Y. Matsuda, "Highly Mobile Gapless Excitations in a Two-Dimensional Candidate Quantum Spin Liquid", *Science* **328**, 1246-1248 (2010). DOI: 10.1126/science.1188200

⑲ J. S. Kim, P. J. Hirschfeld, G. R. Stewart, S. Kasahara, T. Shibauchi, T. Terashima, and Y. Matsuda, "Specific Heat vs Field in the 30 K Superconductor $\text{BaFe}_2(\text{As}_{0.7}\text{P}_{0.3})_2$ ", *Phys. Rev. B* **81**, 214507 (2010). DOI: 10.1103/PhysRevB.81.214507

⑳ K. Hashimoto, M. Yamashita, S. Kasahara, Y. Senshu, N. Nakata, S. Tonegawa, K. Ikada, A. Serafin, A. Carrington, T. Terashima, H. Ikeda, T. Shibauchi, and Y. Matsuda, "Line Nodes in the Energy Gap of Superconducting $\text{BaFe}_2(\text{As}_{1-x}\text{P}_x)_2$ Single Crystals as Seen via Penetration Depth and Thermal Conductivity", *Phys. Rev. B* **81**, 220501(R) (2010). DOI: 10.1103/PhysRevB.81.220501

㉑ S. Kasahara, T. Shibauchi, K. Hashimoto, K. Ikada, S. Tonegawa, H. Ikeda, H. Takeya, K. Hirata, T. Terashima, and Y. Matsuda, "Evolution from Non-Fermi- to Fermi-Liquid Transport via Isovalent Doping in $\text{BaFe}_2(\text{As}_{1-x}\text{P}_x)_2$ Superconductors", *Phys. Rev. B* **81**, 184519 (2010). DOI: 10.1103/PhysRevB.81.184519

㉒ C. J. van der Beek, G. Rizza, M. Konczykowski, P. Fertey, I. Monnet, T. Klein, R. Okazaki, M. Ishikado, H. Kito, A. Iyo, H. Eisaki, S. Shamoto, M. E. Tillman, S. L. Bud'ko, P. C. Canfield, T. Shibauchi, and Y. Matsuda, "Flux Pinning in $\text{PrFeAsO}_{0.9}$ and $\text{NdFeAsO}_{0.9}\text{F}_{0.1}$ Superconducting Crystals", *Phys. Rev. B* **81**, 174517 (2010).

DOI: 10.1103/PhysRevB.81.174517

㉓ H. Shishido, T. Shibauchi, K. Yasu, T. Kato, H. Kontani, T. Terashima, and Y. Matsuda, "Tuning the Dimensionality of

the Heavy Fermion Compound CeIn_3 ", *Science* **327**, 980-983 (2010).

DOI: 10.1126/science.1183376

⑩ H. Shishido, A. F. Bangura, A. I. Coldea, S. Tonegawa, K. Hashimoto, S. Kasahara, P. M. C. Rourke, H. Ikeda, T. Terashima, R. Settai, Y. Onuki, D. Vignolles, C. Proust, B. Vignolle, A. McCollam, Y. Matsuda, T. Shibauchi, and A. Carrington, "Evolution of the Fermi Surface of $\text{BaFe}_2(\text{As}_{1-x}\text{P}_x)_2$ on Entering the Superconducting Dome", *Phys. Rev. Lett.* **104**, 057008 (2010).

DOI: 10.1103/PhysRevLett.104.057008

⑪ Y. Nakai, T. Iye, S. Kitagawa, K. Ishida, S. Kasahara, T. Shibauchi, Y. Matsuda, and T. Terashima, " ^{31}P and ^{75}As NMR Evidence for a Residual Density of States at Zero Energy in Superconducting $\text{BaFe}_2(\text{As}_{0.67}\text{P}_{0.33})_2$ ", *Phys. Rev. B* **81**, 020503(R) (2010).

DOI: 10.1103/PhysRevB.81.020503

⑫ M. Yamashita, N. Nakata, Y. Senshu, S. Tonegawa, K. Ikada, K. Hashimoto, H. Sugawara, T. Shibauchi, and Y. Matsuda, "Thermal Conductivity Measurements of the Energy-Gap Anisotropy of Superconducting LaFePO at Low Temperatures", *Phys. Rev. B* **80**, 220509(R) (2009). DOI: 10.1103/PhysRevB.80.220509

⑬ Y. Kasahara, H. Shishido, T. Shibauchi, Y. Haga, T. D. Matsuda, Y. Onuki, and Y. Matsuda, "Superconducting Gap Structure of Heavy-Fermion Compound URu_2Si_2 Determined by Angle Resolved Thermal Conductivity", *New J. Phys.* **11**, 055061 (2009).

DOI: 10.1088/1367-2630/11/5/055061

⑭ K. Hashimoto, T. Shibauchi, S. Kasahara, K. Ikada, S. Tonegawa, T. Kato, R. Okazaki, C. J. van der Beek, M. Konczykowski, H. Takeya, K. Hirata, T. Terashima, and Y. Matsuda, "Microwave Surface-Impedance Measurements of the Magnetic Penetration Depth in Single Crystal $\text{Ba}_{1-x}\text{K}_x\text{Fe}_2\text{As}_2$ Superconductors: Evidence for a Disorder-Dependent Superfluid Density", *Phys. Rev. Lett.* **102**, 207001 (2009).

DOI: 10.1103/PhysRevLett.102.207001

⑮ H. Shishido, K. Hashimoto, T. Shibauchi, T. Sasaki, H. Oizumi, N. Kobayashi, T. Takamasu, K. Takenaka, Y. Imanaka, T. D. Matsuda, Y. Haga, Y. Onuki, and Y. Matsuda, "Possible Phase Transition Deep Inside the Hidden Order Phase of Ultraclean URu_2Si_2 ", *Phys. Rev. Lett.* **102**, 156403 (2009).

DOI: 10.1103/PhysRevLett.102.156403

[学会発表] (計 18 件) 招待講演のみ記載

① T. Shibauchi, "Symmetry Breaking in the Hidden Order Phase of URu_2Si_2 ", UK-Japan workshop, Tokyo, Japan, January 16-17, 2012.

② T. Shibauchi, "Quantum Criticality and Superconducting Gap Structure in $\text{BaFe}_2(\text{As}_{1-x}\text{P}_x)_2$ ", 26th International Conference on Low Temperature Physics (LT26), Beijing, China, August 11-17, 2011.

③ T. Shibauchi, "Quantum Criticality and Superconducting Gap Structure in Iron-Pnictide Superconductors", The 13th International Workshop on Vortex Matter in Superconductors, Chicago, IL, USA, August 1-5, 2011.

④ T. Shibauchi, "Nodal s-wave superconductivity in $\text{BaFe}_2(\text{As}_{1-x}\text{P}_x)_2$ ", Eighth International Conference on New Theories, Discoveries and Applications of Superconductors and Related Materials (New3SC-8), Chongqing, China, June 8-11, 2011.

⑤ T. Shibauchi, "Nodal s-wave superconductivity in $\text{BaFe}_2(\text{As}_{1-x}\text{P}_x)_2$ ", Superconductivity: 100 years young, Natal, Brazil, May 16-27, 2011.

⑥ T. Shibauchi, "Nodal s-wave superconductivity in $\text{BaFe}_2(\text{As}_{1-x}\text{P}_x)_2$ ", The workshop on Unconventional Superconductivity, Minneapolis, Minnesota, USA, April 22-24, 2011.

⑦ T. Shibauchi, "Non-Fermi liquid transport and non-universal gap structure in iron-based superconductors", 2011 Villa Conference on Iron Pnictide Superconductors (VCIPS 2011), Las Vegas, Nevada, USA, April 21-22, 2011.

⑧ T. Shibauchi, "Non-Fermi liquid transport properties and quantum criticality in $\text{BaFe}_2(\text{As}_{1-x}\text{P}_x)_2$ ", Physical Phenomena at High Magnetic Fields (PPHMF VII), Tallahassee, Florida, USA, December 4-8, 2010.

⑨ T. Shibauchi, "Iron-based superconductors: Spin vs orbital fluctuations", Kyoto Autumn School 2010 - The 7th workshop of the A3 foresight program "Joint Research on Novel Properties of Complex Oxides", Kyoto, Japan, November 7-11, 2010.

⑩ T. Shibauchi, "Broken Rotational Symmetry in the Hidden Order Phase of URu_2Si_2 ", Plutonium Futures - The

Science 2010, Keystone, Colorado, USA, September 19-23, 2010.

⑪ T. Shibauchi, "Non-Fermi-liquid transport properties and non-universal gap structure in iron-based superconductors", International Workshop on Recent Progress on Spectroscopies and High-Tc Superconductors, Tohoku University, Sendai, Japan, August 9-11, 2010.

⑫ T. Shibauchi, "Non-universal Gap Structure in Fe-pnictide High-Temperature Superconductors", International Conference on Superconductivity and Magnetism (ICSM2010), Antalya, Turkey, April 2010.

⑬ T. Shibauchi, "Non-Fermi Liquid Transport Properties in Fe-Pnictide and Heavy Fermion Materials", UK-Japan meeting, Bristol, UK, February 2010.

⑭ T. Shibauchi, "Non-universal Gap Structure in Fe-pnictide High-Temperature Superconductors", 5th International Workshop on Nanomagnetism and Superconductivity (coma-ruga2009), Coma-ruga, Spain, July 2009.

⑮ 芝内孝禎, 「URu2Si2 の隠れた秩序 -- フェルミ面における回転対称性の破れ」, 新学術領域研究「重い電子系の形成と秩序化」ワークショップ ～超伝導、多極子の物理における最近の話題～, 東京大学物性研究所, 2012/1/10-11.

⑯ 芝内孝禎, 「マクロ測定と超伝導～発展「トルク測定とネマティック状態」」, 第2回重い電子系若手秋の学校, 高野山大学, 2011/9/26-30.

⑰ 芝内孝禎, 「BaFe2(As,P)2 における量子臨界現象」, 基研研究会「鉄系高温超伝導の物理」, 京都大学基礎物理学研究所, 2011/6/16-17.

⑱ 芝内孝禎, 「鉄系超伝導体におけるノンユニバーサルな超伝導ギャップ構造」, 日本物理学会第65回年次大会, 岡山大学, 2010/3/20-23.

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

○取得状況 (計0件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

[その他]
ホームページ等

<http://kotai2.scphys.kyoto-u.ac.jp/index.php>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

芝内 孝禎 (SHIBAUCHI TAKASADA)
京都大学・大学院理学研究科・准教授
研究者番号：00251356

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：