

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 12 日現在

機関番号：14301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2013

課題番号：24654103

研究課題名(和文)角度分解トンネル分光測定の開発

研究課題名(英文)Development of angle dependent tunneling spectroscopy

研究代表者

笠原 成 (KASAHARA, SHIGERU)

京都大学・理学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：10425556

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円、(間接経費) 870,000円

研究成果の概要(和文)：非従来型超伝導体の超伝導秩序対称性を決定する新しい手法として、トンネル分光スペクトルの磁場中角度依存性に着目し、この観測をすることを目的として、基盤技術となる薄膜・素子作製技術の開発と確立を行った。これと相補して、ノード構造を有する鉄系超伝導体について、従来の低エネルギー準粒子励起を調べる手法を応用することで超伝導対称性の決定を行った。

研究成果の概要(英文)：Tunneling spectrum under magnetic field and its in-plane angle dependence would offer a novel way to determine the superconducting gap symmetry in the unconventional superconductors. Development of high quality thin films and devices based on that are highly required. Conditions to make ultra-thin films of the parent compound of iron-based superconductors are established in this work. The gap symmetry of some iron-based superconductors having nodes is also investigated via quasi-particle excitation at low temperatures and their evolution for different scattering levels.

研究分野：物性II

科研費の分科・細目：超伝導・密度波

キーワード：異方的超伝導 低温物性 強相関電子系

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 超伝導秩序関数の対称性は、電子対の引力相互作用を強く反映している。格子振動によって電子対が媒介される従来型の超伝導では、フェルミ面上に等方的なエネルギーギャップが形成され、その超伝導秩序関数は  $s$  波の対称性を持つ。これに対し、格子振動以外の電子対媒介を起源とする非従来型超伝導では、異方的相互作用を反映してエネルギーギャップにゼロ点(ノード)が存在する特異な超伝導対称性をもつことがある。例えば、銅酸化物超伝導体では様々な実験から  $d_{x^2-y^2}$  の対称性を持つことが明らかになってきており、このような超伝導秩序関数を与える発現機構として、反強磁性揺らぎを起源とする電子対の媒介が議論されている。従って超伝導秩序関数の対称性を実験的に明らかにすることは、非従来型超伝導の発現機構を解明する上で極めて重要なプロセスである。特に超伝導ギャップ関数にラインノードが存在する場合、その位置を特定し超伝導対称性を決定することが重要となる。近年では、銅酸化物超伝導体に加えて、重い電子系化合物や鉄ニクタイトなど、非従来型と考えられる超伝導体相次いで発見されており、このような非従来型超伝導の発現機構を解明するためにも、超伝導秩序関数の対称性を決定することが強く求められる。

(2) 超伝導エネルギーギャップ構造を明らかにするには、準粒子の低エネルギー励起を調べることが最も有力な手段である。これには磁場侵入長や熱伝導率、比熱、あるいはトンネル分光などの手法が有効であり、温度や有限エネルギーに対する準粒子励起の振る舞いを調べることで、超伝導ギャップ構造におけるノードの有無を知ることが可能となる。ただし、これらの温度依存性やエネルギー依存性の情報のみでは、ノードの有無についての判別は可能であるが、超伝導対称性を決定することは出来ない。この為、超伝導対称性を特定する手法として、これまでの研究では、超伝導状態において外部磁場を印加し、熱伝導や比熱など、準粒子励起に敏感な物理量の磁場方向依存性を精密に測定する“角度分解測定”が用いられてきた。

## 2. 研究の目的

本研究では、これらの手法に加えて、非従来型超伝導体の対称性を決定する新たな手法を確立することに目的とした。具体的には、状態密度のエネルギー依存性を直接反映す

るトンネル分光スペクトル実験に着目し、その磁場中角度変化を観測する手法の開発と確立をすることを目的とした。このためには非従来型超伝導体の薄膜試料作製技術、およびその素子作製技術の確立が大きなウェイトとなる。またこれと相補して、従来手法から超伝導ギャップ関数の不純物散乱強度依存性、組成依存性などを調べることで超伝導対称性を決定するを行なった。

## 3. 研究の方法

(1) 超伝導対称性を決定する新しい実験手法として、トンネル分光の角度分解測定を新たに提唱し、その実験技術の開発と確立を行う。これはトンネルスペクトル、すなわち微分コンダクタンスのバイアス電圧特性が、電子のエネルギー状態密度を与えることを応用しており、従来行われてきたトンネル分光測定を発展させたものになる。ノード構造をもつ非従来型超伝導体の場合、磁場がノード方向に印加された場合と非ノード方向に印加された場合とで状態密度に差が生まれ、これにより超伝導対称性を知ることが可能となる。研究の対象とする物質系としては、近年注目を集めている鉄系超伝導体に着目した。鉄系超伝導体の最も興味深い点は、超伝導ギャップ構造が物質に依存して大きく異なることにある。例えば“122系”とよばれる  $\text{BaFe}_2\text{As}_2$  を母物質とした鉄系超伝導体では、ホールドープ型の  $(\text{Ba}_{1-x}\text{K}_x)\text{Fe}_2\text{As}_2$  では最適組成近傍ではフルギャップ構造を持つのに対し、過剰ホールドープ域では超伝導ギャップ関数にラインノードが存在することが明らかになっている。また等電子価数置換型である  $\text{BaFe}_2(\text{As}_{1-x}\text{P}_x)_2$  ではすべての組成範囲においてラインノード構造を持つことが磁場侵入長、熱伝導率、核磁気共鳴などの測定から明らかになっている。そこでパルスレーザー蒸着により  $\text{BaFe}_2(\text{As}_{1-x}\text{P}_x)_2$  の薄膜試料を作製技術の確立を試み、そのトンネル分光素子作製を行うことで、角度分解トンネル分光測定を試みる。

(2) 上記の相補的手法として、従来の準粒子励起を調べる実験から、ノードの有無のみではなく、超伝導対称性を決定することを試みる。 $d$  波対称性のようにラインノードが対称性によって守られた超伝導の場合、その存在は不純物散乱などの外部要因に対してロバストである。一方、超伝導ギャップ関数が大きな異方性をもつことに起因して、偶発的に符号反転がおきる偶発ノードの場合、対称性

としては拡張  $s$  波 ( $A_{1g}$  対称性)であり、不純物や組成などの変化によって、ギャップ関数の異方性が変化し、ノードがリフトされる。従って、ノードを有する鉄系超伝導体である  $BaFe_2(As_{1-x}P_x)$  および  $(Ba_{1-x}K_x)Fe_2As_2$  において、準粒子励起の不純物依存性、組成依存性を詳細に調べることで超伝導対称性を決定することが可能である。

#### 4. 研究成果

(1) 過剰ドーパ域において超伝導ギャップ関数にラインノードを有することが明らかになっているホールドーパ型の鉄系超伝導体  $Ba_{1-x}K_xFe_2As_2$  について、準粒子の低エネルギー励起に敏感なプローブである熱伝導率に着目し、その絶対零度極限における残留値の磁場依存性・組成依存性を調べることで超伝導対称性の決定を行った。これにより、本物質の超伝導対称性が対称性によって要請される  $d$  波超伝導ではなく、偶発ノードをともなった  $s$  波超伝導 ( $A_{1g}$  対称性)であることを決定し、更に2つのホールフェルミ面において、超伝導ギャップ関数の符号が反転をおこなっていることを明らかにした。

(2)  $BaFe_2(As_{1-x}P_x)_2$  において電子線照射による人工点欠陥の導入をおこない、これに対する磁場侵入長の系統的変化を調べた。その結果、人工欠陥の導入に対してラインノードが消失し、有限の超伝導ギャップが開いていることを示す熱活性型の磁場侵入長の変化が観測された。これは超伝導ギャップ関数の異方性が散乱によって抑制され、これによりノードがリフトされたことを示しており、本物質が偶発ノードを有していたことを直接的に示している。従ってその超伝導対称性は、拡張  $s$  波 ( $A_{1g}$  対称性)であると決定される。

(3) 鉄系超伝導体の中でも最も単純な構造をもつ  $FeSe$  について、過去にない純良な単結晶を用いて、極低温における熱伝導率、および磁場侵入長測定、および走査型トンネル分光測定におけるトンネルスペクトルを調べ、準粒子の低エネルギー励起を調べた。その結果、この物質は超伝導ギャップ関数にラインノードを持つ異方的超伝導体であることが明らかになった。この系では不純物散乱レベルの強い単結晶試料では、ノードレスな超伝導が実現することが報告されている。このように不純物散乱によってノーダルからノードレスへとギャップ構造が変化する事実は、観測されたラインノードが超伝導ギャップ

関数の大きな異方性に起因して現れる偶発ノードであることを示している。従ってこの物質の超伝導対称性が本質的に  $A_{1g}$  対称性を持つものと決定される。

(4) 鉄系超伝導体の母物質  $BaFe_2As_2$  について、パルスレーザー蒸着法による薄膜試料作製を行い、ターゲット多結晶の純良化、基盤加熱温度や蒸着速度等の各種条件の選定を行った。これにより反射高速電子線解説が可能で高い平坦性を有する薄膜試料の作製が可能となり、超薄膜の作製が可能となった。この輸送現象測定を行ったところ、バルク単結晶における構造磁気相転移温度よりも高温域から、電気抵抗率およびホール係数の温度依存性に異常が現れることが明らかになった。この系ではこれまでに電子系が結晶の面内対称性を破るネマティック電子状態の存在が構造磁気相転移温度以上で見出されており、今回の薄膜試料において異常が観測された温度もネマティック電子状態への転移温度と一致している。これはエピタキシャル薄膜試料において、基板との格子不整合に起因する歪み効果が存在することで、輸送現象に異常が現れたものと解釈できる。

(5) 同薄膜作製技術を用いて超伝導特性を示す  $BaFe_2(As_{1-x}P_x)$  のエピタキシャル薄膜の作製を試みた。しかしながら良好な表面平坦性をもち超伝導を示す薄膜を得るには至らなかった。その後、別グループより本物質の薄膜作製には  $1000^\circ\text{C}$  以上の基板温度において薄膜作製を行う必要が報告され、当グループで有する薄膜作製環境では実現が不可能であることが明らかとなった。このため研究成果(1-3)で述べた実験への計画変更が必要であったが、新たな手法による超伝導対称性の決定という点において、十分な成果を挙げるに至り、関連分野において大きな波及をもたらすことができた。

#### 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 16 件)

(1) “Doping evolution of the quasiparticle excitations in heavily hole-doped  $Ba_{1-x}K_xFe_2As_2$ : A possible superconducting gap with sign-reversal between hole pockets”, D. Watanabe, T. Yamashita, Y. Kawamoto, S. Kurata, Y. Mizukami, T. Ohta, S. Kasahara, M. Yamashita, T. Saito, H. Fukazawa, Y. Kohori, S. Ishida, K. Kihou, C. H. Lee, A. Iyo, H. Eisaki, A. B. Vorontsov, T. Shibauchi, and Y. Matsuda, *Phys. Rev. B* **89**, 115112 (2014). (査読有)

(2) “A sharp peak of the zero-temperature penetration depth at optimal composition in the iron-based superconductor  $\text{BaFe}_2(\text{As}_{1-x}\text{P}_x)_2$ ”, K. Hashimoto, K. Cho, T. Shibauchi, S. Kasahara, Y. Mizukami, R. Katsumata, Y. Tsuruhara, T. Terashima, H. Ikeda, M. A. Tanatar, H. Kitano, N. Salovich, R. W. Giannetta, P. Walmsley, A. Carrington, R. Prozorov, and Y. Matsuda, *Science* **336**, 1554-1557 (2012). (査読有)

(3) “Electronic nematicity above the structural and superconducting transition in  $\text{BaFe}_2(\text{As}_{1-x}\text{P}_x)_2$ ”, 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, *Nature* **486**, 382-385 (2012). (査読有)

(4) “Nodal versus Nodeless Behaviors of the Order Parameters of  $\text{LiFeP}$  and  $\text{LiFeAs}$  Superconductors from Magnetic Penetration-Depth Measurements”, K. Hashimoto, S. Kasahara, R. Katsumata, Y. Mizukami, M. Yamashita, H. Ikeda, T. Terashima, A. Carrington, Y. Matsuda, and T. Shibauchi, *Phys. Rev. Lett.* **108**, 047003 (2012). (査読有)

(5) “Epitaxial Thin Films of  $\text{ATiO}_{3-x}\text{H}_x$  ( $A = \text{Ba}, \text{Sr}, \text{Ca}$ ) with Metallic Conductivity”, Takeshi Yajima, Atsushi Kitada, Yoji Kobayashi, Tatsunori Sakaguchi, Guillaume Bouilly, Shigeru Kasahara, Takahito Terashima, Mikio Takano, and Hiroshi Kageyama, *J. Am. Chem. Soc.* **134**, 8782-8785 (2012). (査読有)

[学会発表] (計 49 件)

(1) “鉄系超伝導における量子臨界現象とネマティック電子状態の研究” (招待講演) 笠原成, 日本物理学会第 69 回年次大会, 2013 年 03 月 27-30 日, 東海大学, 神奈川県平塚市.

(2) “STM/STS 測定で見た  $\text{FeSe}$  純良単結晶の超伝導ギャップ”, 綿重達哉, 花栗哲郎, 幸坂祐生, 岩谷克也, 付英双, 笠原成, 渡辺大樹, 水上雄太, 三上拓也, 川本雄太, 蔵田聡, 芝内孝禎, 松田祐司, A. Bohmer, T. Wolf, C. Meingast, H. v. Lohneysen, 日本物理学会第 69 回年次大会, 2013 年 03 月 27-30 日, 東海大学, 神奈川県平塚市.

(3) “ $\text{FeSe}$  における準粒子干渉効果”, 花栗哲郎, 綿重達哉, 幸坂祐生, 岩谷克也, 付英双, 笠原成, 渡辺大樹, 水上雄太, 三上拓也, 川本雄太, 蔵田聡, 芝内孝禎, 松田祐司, A. Bohmer, T. Wolf, C. Meingast<sup>C</sup>, H. v. Lohneysen, 日本物理学会第 69 回年次大会, 2013 年 03 月 27-30 日, 東海大学, 神奈川県平塚市.

(4) “ $\text{FeSe}$  純良単結晶における輸送現象測定”,

遠藤僚太, 山下卓也, 三上拓也, 笠原成, 芝内孝禎, 松田祐司, Anna Bohmer, Thomas Wolf, Christoph Meingast, Hilbert Lohneysen, 日本物理学会第 69 回年次大会, 2013 年 03 月 27-30 日, 東海大学, 神奈川県平塚市.

(5) “ $\text{FeSe}$  のレーザー角度分解光電子分光”, 岡崎浩三, 堀尾眞史, 藤森淳, 大田由一, 山本遇哲, 幸埴, 渡部俊太郎, C.-T.Chen, 笠原成, 芝内孝禎, 松田祐司, A. Bohme, T. Wolf, P. Adelman, C. Meingast, H. v. Lohneysen, 日本物理学会第 69 回年次大会, 2013 年 03 月 27-30 日, 東海大学, 神奈川県平塚市.

(6) “Optical conductivity of clean-limit superconductor  $\text{LiFeAs}$ ”, R.P.S.M. Lobo, A.V. Pronin, G. Chanda, J. Wosnitzer, S. Kasahara, T. Shibauchi, Y. Matsuda, American Physical Society March Meeting, March 3-7, 2014, Denver, Colorado, USA.

(7) “Nodal superconducting state in clean single crystals of  $\text{FeSe}$ ”, S. Kasahara, T. Mikami, Y. Mizukami, Y. Kawamoto, S. Kurata, D. Watanabe, T. Shibauchi, Y. Matsuda, A.E. Bohmer, T. Wolf, C. Meingast, H. v. Lohneysen, American Physical Society March Meeting, March 3-7, 2014, Denver, Colorado, USA.

(8) “The gap structure of  $\text{BaFe}_2(\text{As}_{1-x}\text{P}_x)_2$  determined from specific heat measurements”, L. Malone, Y. Mizukami, P. Walmsley, C. Putzke, S. Kasahara, T. Terashima, T. Shibauchi, Y. Matsuda, A. Carrington, American Physical Society March Meeting, March 3-7, 2014, Denver, Colorado, USA.

(9) “Anomalous behaviour of critical fields near a superconducting quantum critical point in  $\text{BaFe}_2(\text{As}_{1-x}\text{P}_x)_2$ ”, C. Putzke, A. Carrington, P. Walmsley, L. Malone, J.D. Fletcher, P. See, D. Vignolles, C. Proust, S. Badoux, S. Kasahara, Y. Mizukami, T. Shibauchi, Y. Matsuda, American Physical Society March Meeting, March 3-7, 2014, Denver, Colorado, USA.

(10) “Quasi-particle interference and possible orbital order in  $\text{FeSe}$ ”, T. Hanaguri, T. Watashige, Y. Kohsaka, K. Iwaya, Y. Fu, S. Kasahara, D. Watanabe, Y. Mizukami, T. Mikami, Y. Kawamoto, S. Kurata, T. Shibauchi, Y. Matsuda, A. Bohmer, T. Wolf, C. Meingast, H. v. Lohneysen, American Physical Society March Meeting, March 3-7, 2014, Denver, Colorado, USA.

(11) “The low temperature Fermi surface of  $\text{IrTe}_2$  probed by quantum oscillations”, Samuel Blake, Amalia Coldea, Matthew Watson, Arjun Narayanan, Alix McCollam, Shigeru Kasahara,

Takuya Yamashita, Daiki Watanabe, Takasada Shibauchi, Yuji Matsuda, Robert Schoonmaker, American Physical Society March Meeting, March 3-7, 2014, Denver, Colorado, USA.

(12) "Influence of twin boundaries on superconducting gap nodes in FeSe single crystal studied by STM/STS", T. Watashige, T. Hanaguri, Y. Kohsaka, K. Iwaya, Y. Fu, S. Kasahara, D. Watanabe, Y. Mizukami, T. Mikami, Y. Kawamoto, S. Kurata, T. Shibauchi, Y. Matsuda, A. Bohmer, T. Wolf, C. Meingast, H. v. Lohneysen, American Physical Society March Meeting, March 3-7, 2014, Denver, Colorado, USA.

(13) "Nodal s-wave superconductivity in iron based superconductors", (Invited talk) S. Kasahara, IUMRS-ICA, Dec 16-20, 2013, Bangalore, India.

(14) " $\text{BaFe}_2(\text{As}_{1-x}\text{P}_x)_2$  のバンド分散, フェルミ面の組成依存性", 吉田鉄平, 出田真一郎, 西一郎, L. C. C. Ambolode, 鈴木博人, 藤森淳, 下志万貴博, 品田慶, 石坂香子, Walid Malaeb, 辛埴, 中島陽佑, 安齋太陽, 井野明洋, 有田将司, 生天目博文, 谷口雅樹, 組頭広志, 小野寛太, 笠原成, 寺嶋孝仁, 芝内孝禎, 松田祐司, 中島正道, 内田慎一, 富岡泰秀, 伊藤利充, 木方邦宏, 李哲虎, 伊豫彰, 永崎洋, 池田浩章, 有田亮太郎, S. K. Mo, Z.X. Shen, Z. Hussain, 日本物理学会 2013 年秋季大会, 徳島大学, 2013 年 9 月 25-29 日, 徳島県徳島市.

(15) "アルカリ金属系鉄ニクタイトの単結晶作製と輸送係数測定", 遠藤僚太, 綿重達哉, 笠原成, 芝内孝禎, 松田祐司, 日本物理学会 2013 年秋季大会, 徳島大学, 2013 年 9 月 25-29 日, 徳島県徳島市.

(16) "FeSe 純良単結晶における磁場侵入長および熱伝導率測定", 笠原成, 渡邊大樹, 水上雄太, 三上拓也, 川本雄太, 蔵田聡信, 芝内孝禎, 松田祐司, Anna Bohmer, Thomas Wolf, Peter Adelman, Christoph Meingast, 日本物理学会 2013 年秋季大会, 徳島大学, 2013 年 9 月 25-29 日, 徳島県徳島市.

(17) "電子線照射により点欠陥を導入した  $\text{BaFe}_2(\text{As}_{1-x}\text{P}_x)_2$  の輸送現象測定", 三上拓也, 水上雄太, 川本雄太, 蔵田聡信, 笠原成, 松田祐司, 芝内孝禎, M. Konczykowski, C. J. van der Beek, B. Boizot, R. Prozorov, 日本物理学会 2013 年秋季大会, 徳島大学, 2013 年 9 月 25-29 日, 徳島県徳島市.

(18) "電子線照射した  $\text{BaFe}_2(\text{As}_{1-x}\text{P}_x)_2$  における点欠陥の磁氣的性質", 水上雄太, 川本雄太, 蔵田聡信, 三上拓也, 橋本顕一郎, 笠原成,

M. Konczykowski, C. J. van der Beek, B. Boizot, R. Prozorov, Y. Wang, A. Kreisel, P. J. Hirschfeld, V. Mishra, 松田祐司, 芝内孝禎, 日本物理学会 2013 年秋季大会, 徳島大学, 2013 年 9 月 25-29 日, 徳島県徳島市.

(19) "重い電子系 ABAB'型人工超格子における空間反転対称性の超伝導への影響", 遠藤僚太, Swee K. Goh, 下澤雅明, 小林遼, 西山卓也, 渡邊大樹, 池田浩章, 笠原成, 柳瀬陽一, 寺嶋孝仁, 芝内孝禎, 松田祐司, 日本物理学会 2013 年秋季大会, 徳島大学, 2013 年 9 月 25-29 日, 徳島県徳島市.

(20) "熱伝導率測定からみたオーバードープ領域の  $(\text{Ba}_{1-x}\text{K}_x)\text{Fe}_2\text{As}_2$  における超伝導ギャップ構造", 渡邊大樹, 山下卓也, 笠原成, 太田卓見, 山下穰, 齊藤拓, 深澤英人, 小堀洋, 石田茂之, 木方邦宏, 伊豫彰, 李哲虎, 永崎洋, Anton B. Vorontsov, 芝内孝禎, 松田祐司, 日本物理学会第 68 回年次大会, 2013 年 3 月 26-29 日, 広島大学, 広島県東広島市

(21) "磁場侵入長測定からみたオーバードープ領域の  $(\text{Ba}_{1-x}\text{K}_x)\text{Fe}_2\text{As}_2$  における超伝導ギャップ構造", 川本雄太, 水上雄太, 蔵田聡信, 笠原成, 齊藤拓, 深澤英人, 小堀洋, 石田茂之, 木方邦宏, 伊豫彰, 李哲虎, 永崎洋, 芝内孝禎, 松田祐司, 日本物理学会第 68 回年次大会, 2013 年 3 月 26-29 日, 広島大学, 広島県東広島市

(22) "磁場侵入長測定から見た  $\text{LaFeAsO}_{1-y}$  の超伝導ギャップ構造のドーピング依存性", 蔵田聡信, 水上雄太, 川本雄太, 笠原成, 石角元志, 石田茂之, 鬼頭聖, 伊豫彰, 永崎洋, 社本真一, 松田祐司, 芝内孝禎, 日本物理学会第 68 回年次大会, 2013 年 3 月 26-29 日, 広島大学, 広島県東広島市

(23) "電子線照射により不純物散乱を制御した  $\text{BaFe}_2(\text{As}_{1-x}\text{P}_x)_2$  における超伝導ギャップ構造の変化", 水上雄太, 川本雄太, 橋本顕一郎, 笠原成, M. Konczykowski, C. J. van der Beek, B. Boizot, R. Prozorov, Y. Wang, A. Kreisel, P. J. Hirschfeld, V. Mishra, 芝内孝禎, 松田祐司, 日本物理学会第 68 回年次大会, 2013 年 3 月 26-29 日, 広島大学, 広島県東広島市

(24) "PLD 法による  $\text{BaFe}_2\text{As}_2$  超薄膜の作製", 綿重達哉, 笠原成, 下澤雅明, 石井航, 芝内孝禎, 寺嶋孝仁, 松田祐司, 日本物理学会第 68 回年次大会, 2013 年 3 月 26-29 日, 広島大学, 広島県東広島市

(25) "Electron irradiation of iron-based superconductors", S. Demirdis, C.J. van der Beek, M. Konczykowski, S. Kasahara, T. Terashima, R. Okazaki, T. Shibauchi, Y. Matsuda, D. Colson, P. Gierlowski, R. Prozorov, American Physical

Society March Meeting, March 18–22, 2013, Baltimore, Maryland, USA.

(26) “Thermodynamic signatures of quantum criticality in  $\text{BaFe}_2(\text{As}_{1-x}\text{P}_x)_2$ ”, P. Walmsley, C. Putzke, L. Malone, S. Kasahara, T. Shibauchi, Y. Matsuda, A. Carrington, American Physical Society March Meeting, March 18–22, 2013, Baltimore, Maryland, USA.

(27) “Impurity-induced changes in the superconducting order parameter in iron-based superconductors  $\text{BaFe}_2(\text{As}_{1-x}\text{P}_x)_2$ ”, Yuta Mizukami, Y. Kawamoto, K. Hashimoto, S. Kasahara, M. Konczykowski, C.J. van der Beek, B. Boizot, R. Prozorov, Y. Wang, A. Kreisel, J. Hirschfeld, V. Mishra, Y. Matsuda, T. Shibauchi, American Physical Society March Meeting, March 18–22, 2013, Baltimore, Maryland, USA.

(28) “Nematic transition and hidden quantum critical point in iron-pnictide superconductors”, Shigeru Kasahara, American Physical Society March Meeting, March 18–22, 2013, Baltimore, Maryland, USA.

(29) “Sign-changing nodal s-wave gap in heavily over doped  $(\text{Ba}_{1-x}\text{K}_x)\text{Fe}_2\text{As}_2$  evidenced from thermal-transport measurement”, Shigeru Kasahara, Takuya Yamashita, Takumi Ota, Takasada Shibauchi, Yuji Matsuda, Minoru Yamashita, Hideto Fukazawa, Taku Saito, Yoh Kohori, Shigeyuki Ishida, Kunihiro Kiho, Chul-Ho Lee, Akira Iyo, Hiroshi Eisaki, Anton Vorontsov, American Physical Society March Meeting, March 18–22, 2013, Baltimore, Maryland, USA.

(30) “Angle Dependent Specific Heat Study of  $\text{BaFe}_2(\text{As}_{0.7}\text{P}_{0.3})_2$ ”, Liam Malone, Yuta Mizukami, Philip Walmsley, S. Kasahara, T. Shibauchi, Y. Matsuda, Antony Carrington, American Physical Society March Meeting, March 18–22, 2013, Baltimore, Maryland, USA.

(31) “A de Haas-van Alphen study of the Fermi surface of  $\text{LiFeP}$ ”, C. Putzke, A. Carrington, I. Guillamon, A. Coldea, M. Watson, D. Vignolles, D. LeBoeuf, A. McCollam, I.I. Mazin, S. Kasahara, T. Terashima, T. Shibauchi, Y. Matsuda, American Physical Society March Meeting, March 18–22, 2013, Baltimore, Maryland, USA.

(32) “ $(\text{Ba}_{1-x}\text{K}_x)\text{Fe}_2\text{As}_2$  のホールドーブエンド近傍における超伝導ギャップ構造(熱伝導率測定)”, 山下卓也, 渡邊大樹, 笠原成, 山下穰, 芝内孝禎, 松田祐司, 齊藤拓, 深澤英人, 小

堀洋, 木方邦宏, 伊豫彰, 李哲虎, 永崎洋, 日本物理学会 2012 年秋季大会, 2012 年 9 月 18-21 日, 横浜国立大学, 神奈川県横浜市.

(33) “ $\text{Ba}_{1-x}\text{K}_x\text{Fe}_2\text{As}_2$  のホールドーブエンド近傍における超伝導ギャップ構造(磁場侵入長測定)”, 川本雄太, 水上雄太, S.K.Goh, 笠原成, 芝内孝禎, 松田祐司, 齊藤拓, 深澤英人, 小堀洋, 木方邦宏, 伊豫彰, 李哲虎, 永崎洋, 日本物理学会 2012 年秋季大会, 2012 年 9 月 18-21 日, 横浜国立大学, 神奈川県横浜市.

(34) “ $\text{LaFeAsO}_{1-y}$  の最適ドーブ試料における磁場侵入長測定から見た超伝導ギャップ構造”, 水上雄太, 川本雄太, S. K. Goh, 笠原成, 石角元志, 石田茂之, 鬼頭聖, 伊豫彰, 永崎洋, 社本真一, 寺嶋孝仁, 芝内孝禎, 松田祐司, 日本物理学会 2012 年秋季大会, 2012 年 9 月 18-21 日, 横浜国立大学, 神奈川県横浜市.

(35) “鉄系超伝導体  $\text{BaFe}_2(\text{As}_{1-x}\text{P}_x)_2$  における不純物効果”, 川島裕貴, 下田愛子, 家哲也, 北川俊作, 石田憲二, 笠原成, 芝内孝禎, 松田祐司, 寺嶋孝仁, 日本物理学会 2012 年秋季大会, 2012 年 9 月 18-21 日, 横浜国立大学, 神奈川県横浜市.,

(36) “Contrasts in the normal and superconducting properties of  $\text{LiFeAs}$  and  $\text{LiFeP}$  superconductors”, S. Kasahara, K. Hashimoto, H. Ikeda, T. Terashima, Y. Matsuda and T. Shibauchi, The 10<sup>th</sup> international conference on Materials and Mechanisms of Superconductivity High Temperature Superconductors ( $\text{M}^2\text{S-HTSC}$ ), 29, Jul. - 3, Aug. 2012, Omni Shoreham Hotel, Washington DC, USA.

[その他]

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

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

笠原 成 (KASAHARA, Shigerus)  
京都大学・大学院理学研究科・助教  
研究者番号：10425556

### (2)連携研究者

寺嶋 孝仁 (TERASHIMA, Takashito)  
京都大学・低温物質科学研究センター・教授  
研究者番号：40252506