

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成25年5月30日現在

機関番号：14301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2011～2012

課題番号：23654118

研究課題名（和文） 圧力誘起超伝導体の磁場侵入長の精密測定

研究課題名（英文） Penetration depth measurements of pressure induced superconductors

研究代表者

松田 祐司 (MATSUDA YUJI)

京都大学・大学院理学研究科・教授

研究者番号：50199816

研究成果の概要（和文）：本研究では、トンネルダイオードとマイクロ波表面インピーダンス超伝導体の磁場侵入長の変化を高精度で測定できる装置を開発した。これにより主として鉄系高温超伝導体における超伝導ギャップ関数の構造が元素置換と圧力に対しどのように変化してゆくかを調べた。

研究成果の概要（英文）：We have measured the penetration depth of iron pnictides high temperature superconductors by using tunnel diode oscillator and microwave surface impedance apparatus. We studied how the superconducting gap evolves with iron substitution and pressure in iron based superconductors.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	2,900,000	870,000	3,770,000

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：強相関係

1. 研究開始当初の背景

超伝導ギャップ構造の決定は、超伝導対形成機構を知る上で重要である。鉄系超伝導体では物質によりノードを持つものと持たないものが存在していた。また重い電子系超伝導体では圧力誘起により超伝導が出現するものが多く存在していた。近年、重い電子系、鉄ヒ素系化合物、有機化合物等において、常圧では反強磁性や強磁性などの磁気秩序を示すが、圧力をかけることにより磁気秩序が抑制され超伝導を示す物質が数多く発見されている。そのような系では多くの場合、超伝導は磁気秩序が消失するいわゆる量子臨界点近傍において生じ、磁気臨界揺らぎや価数揺動といった従来の超伝導体とは異なる機構により生じていることが明らかになりつつあり、その超伝導発現機構の解明は物性物理学の最重要課題の一つである。超伝導機構を解明する上で決定的に重要なことは超伝導ギャップ関数の構造を決定することで

ある。特に非従来型の発現機構を持つ超伝導体では、超伝導ギャップ関数の符号がフェルミ面上で反転し、ギャップ構造にノード（ゼロ点）が現れることがある。特に研究開始当初の具体的な超伝導物質に関する興味ある背景の例を挙げると

1)鉄プニクタイト高温超伝導体では、超伝導ギャップにノード構造をもつものと持たないものの2種類存在する。圧力により連続的に電子状態を変化させ、どのような電子構造のときにノード構造が出現しどのようにときに消失するのかを解明することは、この系の超伝導発現機構を理解する上で極めて重要であると考えられる。

2)UGe₂, URhGe, UCoGe では強磁性状態で超伝導が起こる。これらの系ではスピン3重項ノンユニタリー型の超伝導が実現している可能性が強いが、その超伝導ギャップ構造

はほとんど解明されていない。また URu₂Si₂ は超伝導ギャップ関数がポイントノードを持ち、時間反転対称性の破れた超伝導状態が実現されている可能性がある。このような系におけるギャップ関数の圧力効果の研究は、これまでに存在が知られていなかった新奇超伝導状態の発見に繋がると考える。

磁場侵入長の測定により超流動電子密度が決定でき、その温度変化と傾きから超伝導ギャップの大きさやノード構造の詳細を知ることができる。希釈冷凍機温度までの極低温で超伝導体の磁場侵入長測定が可能であるのは、世界でも数カ所に限られており、これまで我が国では不可能であった。最近我々のグループは、希釈冷凍機中で磁場侵入長を世界最高の感度で測定することに成功した。本研究で開発する圧力中の磁場侵入長測定装置は世界にも類を見ないものであった。

2. 研究の目的

本研究の目的は、主として異方的超伝導体の超伝導ギャップ構造を精密な磁場侵入長測定により決定することである。特に鉄系超伝導体や重い電子系超伝導体において、元素置換や圧力によりどのように超伝導ギャップ構造が変化するかを詳細に研究することが本研究の目的である。本研究では2年の年度内に測定装置を完成させ、上述の超伝導体を含むさまざまな非従来型超伝導体の磁場侵入長測定を試みたい。これにより非従来型の超伝導状態の理解が大きく進むことが期待できる。本研究の目的は、圧力中で100~mK以下の極低温までの超伝導体の磁場侵入長の変化を0.02nmの高精度で測定できる装置を世界で初めて開発することである。これにより圧力によって電子状態を連続的に変化させたとき非従来型の超伝導発現機構をもつ超伝導体の超伝導ギャップ関数の構造がどのように変化してゆくかを詳細に調べ、超伝導発現機構の理解を格段に進歩させることをめざす。一般にフォノン機構以外の非従来型の発現機構を持つ超伝導体の超伝導状態は不純物（ランダムネス）に非常に敏感である。電子状態は構成元素の化学置換により変化させることができるが、化学置換では系に不純物を導入してしまうため、しばしば超伝導ギャップ関数の構造決定が困難になってしまう。これに対し圧力効果では不純物の影響を変化させることなく、不純物効果を最小限に抑えた状態で、電子状態を連続的に変化させることができる。さらに磁場侵入長の実験は100mm程度のサイズの微小単結晶でも精密測定が可能であることも大きな利点である。したがって本研究で行う超伝導ギャップ関数の圧力効果の実験は非従来型の超伝導発現機構の解明にとって決定的に重要

となる

3. 研究の方法

磁場侵入長測定ではトンネルダイオードを用いたMHz発振回路を用い、回路を構成するコイル中に超伝導体試料を挿入し、磁場侵入長の変化に伴うインダクタンスの変化を発振周波数の変化として測定する。本測定では発振器の極めて高い安定性が重要であり、タップコイル法と呼ばれる超安定化発振器を用いる必要がある。このような発振器は世界で数カ所が採用しているが、最近 Yb 我々は我が国では初めてこの超安定化発振器の発振に成功しただけでなく、世界最高感度で磁場侵入長の測定を行うことにも成功した。この発振器のコイル部分を圧力セル中に配置することにより圧力下での磁場侵入長測定法の開発を行う。我々は Yb 圧力セル中の高周波インピーダンス測定は、すでにケンブリッジ大学のグループと共同で行った経験がありこれらをふまえて本研究は、技術的に高度ではあるがチャレンジングで十分に実現可能なテーマであり、卓越した研究成果が期待できると判断した。具体的な方法として、

1) 鉄プニクタイト高温超伝導体の中で、反強磁性体 BaFe₂As₂ を母物質とする超伝導体 Ba_{1-x}K_xFe₂As₂ では、最適ホールドープ ($x \sim 0.3$, $T_c = 38\text{K}$) では超伝導ギャップがノードを持たないのに対し、過剰ホールドープの KFe₂As₂ ($x = 1$, $T_c = 4\text{K}$) では明確なラインノードを持つことがわかっている。しかしながら中間的なホール濃度を持つ試料は元素置換では作製することができない。圧力印可によりノードを持たないものから持つものへ連続的に変化させることができると期待でき、この系の超伝導発現機構の解明が大きく進むと考える。

2) 最近発見された UCoGe は常圧で超伝導と強磁性が共存し超流動ヘリウム3に類似したスピン3重項超伝導状態の実現が有力視されている。最近の実験で強磁性揺らぎと超伝導の関係が指摘されているが、この系の超伝導ギャップ構造はほとんど明らかになっていない。この系では圧力を印可することにより強磁性揺らぎを連続的に制御できるため、超伝導と強磁性揺らぎの関係を明らかにできると考える。この系は試料が不均一になりやすいことが知られているが、本実験では微小試料で測定が可能であるためこの問題も回避できると考える。

この他にも、電荷秩序近傍で生ずる圧力誘起有機超伝導体の超伝導対称性の解明や、空間反転対称性の破れた圧力誘起超伝導体の超

伝導状態の解明の研究等の幅広い応用が可能になる。トンネルダイオード発振器とマイクロ波表面インピーダンス測定装置を開発し、磁場侵入長の測定を行う。、具体的には圧力中で 100 mK 以下の極低温までの超伝導体の磁場侵入長の変化を 0.02nm の高精度で測定できる装置を世界で初めて開発することである。

4. 研究成果

本研究で行う磁場侵入長測定では、発振器の安定性が重要であるが、我々は、圧力中でタップコイル法と呼ばれる超安定化発振器の開発に成功した。また、圧力測定ではピストンシリンダー中で高周波インピーダンスの測定をケンブリッジ大学と共同で行った。鉄系超伝導体で特に等価元素置換系に対し様々な元素置換を行い、全領域で超伝導ギャップ関数にノードが存在することを明らかにした。また圧力中で磁場侵入長を測定できるトンネルダイオード発信装置を開発した。これにより圧力中での磁場侵入長測定が 4.2 K まで可能となった。現在ゼロ圧力中では分解能的に満足の行くものが得られているが、圧力中では様々なトラブルがあり、当初の予定よほどの分解能は得ることが出来ていない。しかしながら超伝導ギャップ関数を決定するためには十分な分解能は得られている。また現在ヘリウム 3 温度までの測定には成功しており、近い将来希釈冷凍機温度までの測定が可能になると考えている。

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 6 3 件)

(1) "A sharp peak of the zero-temperature penetration depth at optimal composition in the iron-based superconductor $\text{BaFe}_2(\text{As}_{1-x}\text{Px})_2$ "

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
DOI: 10.1126/science.1219821

(2) "Electronic nematicity above the structural and superconducting transition in $\text{BaFe}_2(\text{As}_{1-x}\text{Px})_2$ "

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
doi:10.1038/nature11178

(3) "Emergent Rank-5 'Nematic' Order in URu_2Si_2 "

H. Ikeda, M.-T. Suzuki, R. Arita, T. Takimoto, T. Shibauchi, and Y. Matsuda
Nature Physics 8, 528-533 (2012), 査読有
doi:10.1038/nphys2330

(4) "Extremely strong-coupling superconductivity in artificial two-dimensional Kondo lattices"

Y. Mizukami, H. Shishido, T. Shibauchi, M. Shimozawa, S. Yasumoto, D. Watanabe, M. Yamashita, H. Ikeda, T. Terashima, H. Kontani, and Y. Matsuda
Nature Physics 7, 849-853 (2011), 査読有
doi:10.1038/nphys2112

(5) "Rotational Symmetry Breaking in the Hidden-Order Phase of URu_2Si_2 "

R. Okazaki, T. Shibauchi, H. J. Shi, Y. Haga, T. D. Matsuda, E. Yamamoto, Y. Onuki, H. Ikeda, and Y. Matsuda
Science 331, 439-442 (2011), 査読有
DOI:10.1126/science.1197358

(6) "Highly Mobile Gapless Excitations in a Two-Dimensional Candidate Quantum Spin Liquid"

M. Yamashita, N. Nakata, Y. Senshu, M. Nagata, H. M. Yamamoto, R. Kato, T. Shibauchi, and Y. Matsuda
Science 328, 1246-1248 (2010), 査読有
DOI:10.1126/science.1188200

(7) "Tuning the Dimensionality of the Heavy Fermion Compound CeIn_3 "

H. Shishido, T. Shibauchi, K. Yasu, T. Kato, H. Kontani, T. Terashima, and Y. Matsuda
Science 327, 980-983 (2010), 査読有
DOI:10.1126/science.1183376

(8) "Thermal-transport measurements in a quantum spin-liquid state of the frustrated triangular magnet $k\text{-(BEDT-TTF)}_2\text{Cu}_2(\text{CN})_3$ "

M. Yamashita, N. Nakata, Y. Kasahara, T. Sasaki, N. Yoneyama, N. Kobayashi, S. Fujimoto, T. Shibauchi, and Y. Matsuda
Nature Physics 5, 44-47 (2009), 査読有
doi:10.1038/nphys1134

[学会発表] (計 1 2 3 件)

(1) Yuji Matsuda, Quantum spin liquid, 3rd Japan-Israel Binational Workshop on

Quantum Phenomena, 2013年3月11日～3月13日、沖縄

(2) Yuji Matsuda, Two dimensional confinement of heavy fermion in artificial superlattices, REIMEI-Workshop: Heavy Fermion Superconductivity explored by anisotropic magnetic fluctuations in actinide compounds, 2013年2月18日～2月19日、東京

(3) Yuji Matsuda, Superconducting gap structure, hidden quantum criticality and nematic transition in $\text{BaFe}_2(\text{As}_{1-x}\text{P}_x)_2$, Bristol-Kyoto Symposium, 2013年1月9日～1月13日、ブリストル (イギリス)

(4) Yuji Matsuda, Novel Pauli paramagnetic quantum phase in a Mott insulator, Exotic Phases of Frustrated Magnets Conference, 2012年10月8日～10月12日、サンタバーバラ (アメリカ)

(5) Yuji Matsuda, Two dimensional confinement of heavy fermion in artificial superlattices, Materials and Mechanism of Superconductivity, 2012年7月29日～8月3日、ワシントン DC (アメリカ)

(6) Yuji Matsuda, Nematic transition and quantum critical point in iron-pnictide superconductors, Japanese-German Symposium, 2012年7月14日～7月17日、伊豆

(7) Yuji Matsuda, Quantum criticality and electronic nematic phase in iron-pnictides, 19th International Conference on Magnetism with Strongly Correlated Electron Systems, 2012年7月8日～7月13日、プサン (韓国)

(8) Yuji Matsuda, Novel Pauli-paramagnetic quantum phase in a Mott insulator, International Workshop Itinerant Spin-orbital Systems: from Magnetic Frustration to Novel Superconductivity, 2012年5月20日～5月25日、ドレスデン (ドイツ)

(9) Yuji Matsuda, Superconducting gap structure of iron-pnictide superconductors, International Conference on Superconductivity and Magnetism, 2012年4月29日～5月4日、イスタンブール (トルコ)

〔図書〕 (計2件)

松田祐司、NTS出版、超伝導現象と高温超伝導、2013、490-501

6. 研究組織

(1) 研究代表者

松田 祐司 (MATSUDA YUJI)

京都大学・大学院理学研究科・教授

研究者番号：50199816