

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 29 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24540372

研究課題名(和文)核磁気共鳴法による重い電子系及び鉄系超伝導体の研究

研究課題名(英文)NMR study of heavy-fermion and iron-based superconductors

研究代表者

八島 光晴(Yashima, Mitsuharu)

大阪大学・基礎工学研究科・助教

研究者番号：10397771

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究課題では特に重い電子系超伝導体の方で大きな成果を得られることができた。重い電子系超伝導ではその多くが磁気ゆらぎを起因とした超伝導メカニズムが推測されているが、重い電子系化合物CeIrIn5において磁気ゆらぎ以外の寄与(候補としては電気的なゆらぎ)が超伝導を引き起こしている可能性を提案することができた。また、この新しいタイプの超伝導に磁気相関を加えた所、超伝導転移温度Tcが上昇させることに成功し、2つのゆらぎを組み合わせることでTcを増大させることが可能であることを示すことができた。この結果は、室温超伝導の実現に貢献できる成果である。

研究成果の概要(英文)：In this research project, I obtained important NQR experimental results in the field of the heavy-fermion superconductivity. It is generally considered that spin fluctuation induces superconductivity in many heavy-fermion superconductors. However, I suggested that superconductivity is derived from some kind of fluctuations except for spin ones in heavy-fermion compound CeIrIn5. It is probable that the fluctuation related with the occurrence of superconductivity in CeIrIn5 is electric rather than magnetic. Next, I added a magnetic interaction to CeIrIn5 by the Cd doping. The addition of a magnetic interaction leads to the increase in Tc, suggesting that the collaboration of two interactions (maybe spin and electric fluctuations) is able to enhance Tc. I believe that this important experimental result contributes to the realization of a room temperature superconductor.

研究分野：物性物理

キーワード：超伝導 強相関電子系 磁気共鳴 圧力効果

## 1. 研究開始当初の背景

本研究課題が対象としているのは、鉄系超伝導体と重い電子系超伝導体(価数揺らぎなどの電気的なゆらぎが起源か?)である。両者とも、銅酸化物高温超伝導体のような磁性起源の超伝導とは異なり、新しいタイプの超伝導現象と考えられる。現在、超伝導の分野は、超伝導転移温度を160Kから上げることができず停滞気味である。したがって、より高い温度の超伝導を実現するために、これまで研究されてきた超伝導とは異なるタイプの超伝導に注目する必要があるのではないかと考えた。鉄系超伝導の方は、高温超伝導体に比べ多少転移温度が低いとはいえ、55Kに届く試料も見つかっており、かなり高温のため、銅酸化物系を超えるポテンシャルを持った物質である。また、重い電子系超伝導体もこれまで磁気ゆらぎ超伝導が主だったのが、電気的な寄与もぎろんされるようになり、そのメカニズムを見直す必要がある。これらの超伝導を通して、より高い $T_c$ を実現する方法を模索する必要がある。

## 2. 研究の目的

室温超伝導を実現するために、新しいタイプの超伝導現象に注目したいと考え、鉄系超伝導体と重い電子系超伝導体(磁気ゆらぎ以外のもの)を研究の対象とした。

鉄系超伝導体は最近発見された超伝導でその発現メカニズムがまだよく理解されておらず、その解明が強く待たれている状態である。今回、超伝導の性質を調べる上で強力な測定方法であるNMR測定から鉄系超伝導体の性質を明らかにしたいと考えている。

また、重い電子系超伝導では、磁気ゆらぎ以外のゆらぎが起源となっているのではないかと考えられる超伝導がいくつか発見されており(CeIrIn<sub>5</sub>、CeCu<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>、...)、これまで大半が磁気ゆらぎをメインとした超伝導メカニズムの研究が行われてきた中、これらは新しいタイプの超伝導(磁気ゆらぎ以外という意味)であり、そのメカニズムのはまだあまり解明されていない状況である。特に電気的なゆらぎを観測するのは非常に難しく、あまり研究成果が出てこないため、今回NQR法(核四重極共鳴法)を用いてこのタイプの超伝導の研究に取り組みたいと考えている。まずは、電気的なゆらぎと超伝導の関係を示唆する結果が得られればと考えている。

本研究課題を通して超伝導の分野において革新的な進歩をもたらすような研究成果を挙げることができるものと期待している。

## 3. 研究の方法

本研究課題で主に用いる測定手段は、

NMR/NQR(核磁気共鳴/核四重極共鳴)法である。NMR/NQR法は、これまでも超伝導の研究で用いられてきており、超伝導メカニズムの解明に貢献してきた非常に強力な測定法手段である。核磁気緩和時間 $T_1$ からは、超伝導ギャップの構造を調べることができ、ナイトシフト測定からはギャップの対称性(シングレットかトリプレットか?)も同定することができる。またノーマル状態では $T_1$ 測定から磁気ゆらぎの情報を抽出することができるため、磁気ゆらぎと超伝導の関係を明らかにしてきた。今回もその点を利用するつもりであるが、NQR法を用いることで磁気的な性質だけでなく電気的な性質を明らかにすることができるため、電気的な特性も明らかにできればと考えている。

今回の研究では圧力を用いるため、ピストンシリンダー型の圧力セルを用意する。また、極低温(1ケルビン以下)での測定も想定されるため、希釈冷凍機も使用する。

## 4. 研究成果

研究課題は主に重い電子系超伝導体や鉄系高温超伝導体に注目している。まず鉄系高温超伝導体についてであるが、NMR測定から鉄系の超伝導メカニズムについて調べている。今回は特にPドーピングされたSrFe<sub>2</sub>As<sub>2</sub>における超伝導特性に注目しており、この試料ではPドーピング量を変えることで、基底状態が反強磁性超伝導常磁性と変化していくことが分かっている。NMR測定から、反強磁性スピンゆらぎが大きく発達したドーピング(P:30%)で超伝導転移温度 $T_c$ が最大になると、スピンゆらぎが消失したドーピング(P:60%)で超伝導も消失していることが明らかになり、反強磁性スピンゆらぎが超伝導発現に重要であることが分かった。また、超伝導ギャップの対称性が $S_{\pm}$ 波であることを示唆する結果も得られており、反強磁性スピンゆらぎ超伝導のシナリオで矛盾はない。

次に、重い電子系超伝導体の結果であるが、本研究課題初年度でCeIrIn<sub>5</sub>の超伝導が反強磁性スピンゆらぎではなく、電気的なゆらぎ(価数ゆらぎもしくは四重極ゆらぎなど)を起源としているのではないかとという結果を報告している。ここで、磁気ゆらぎによる超伝導をSC1とし、それ例外を起源とする超伝導をSC2とする。最終年度ではSC2に反強磁性相関を加えたらどうなるのかに注目しNQR測定を行った。反強磁性相関はInをCdに置換することで可能である。実際、Cdドーピングすることによって $T_c$ が増大することを発見し、電気的なゆらぎと反強磁性スピンゆらぎの2つの相互作用がうまく協調し $T_c$ を増大させることが可能であることを明らかにした。この成果は今後室温超伝導を実現していく上で重要なもので、一つの相互作用ではなく2つの相互作用をうまく組み合わせ

いくことで、これまで得られなかったような高い  $T_c$  を持つ超伝導ができる可能性を示している。

#### 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 7件)

Possibility of  
Valence-Fluctuation-Mediated  
Superconductivity in Cd-Doped  $CeIrIn_5$   
Probed by In NQR; M. Yashima, N. Tagami,  
S. Taniguchi, T. Unemori, K. Uematsu, H.  
Mukuda, Y. Kitaoka, Y. Ota, F. Honda, R.  
Settai, Y. Onuki; Phys. Rev. Lett. **109**,  
117001 (2012); 査読有.

High- $T_c$  Nodeless  $s(+/-)$ -wave  
Superconductivity in (Y, La)  $FeAsO_{1-y}$  with  
 $T_c=50$  K: As-75-NMR Study  
; H. Mukuda, S. Furukawa, H. Kinouchi, M.  
Yashima, Y. Kitaoka, P. M. Shirage, H.  
Eisaki, A.  
Iyo, Y. Ota, F. Honda, R. Settai, Y. Onuki;  
Phys. Rev. Lett. **109**, 157001 (2012); 査読  
有.

Antiferromagnetic Order and  
Superconductivity in  
 $Sr-4(Mg_{0.5-x}Ti_{0.5+x})(2)O_6Fe_2As_2$  with  
Electron Doping: As-75-NMR Study;  
Keisuke Yamamoto, Hidekazu Mukuda,  
Hiroaki Kinouchi, Mitsuharu Yashima,  
Yoshio Kitaoka, Mamoru Yogi, Shinya Sato,  
Hiraku Ogino, Junichi Shimoyama; J.  
Phys. Soc. Jpn. **81**, 5372 (2012); 査読有.

Unconventional multiband  
superconductivity with nodes in  
single-crystalline  $SrFe_2(As_{0.65}P_{0.35})_2$  as  
seen via P-31 NMR and specific heat; T.  
Dulguun, H. Mukuda, T. Kobayashi, F.  
Engetsu, H. Kinouchi, M. Yashima, Y.  
Kitaoka, S. Miyasaka, S. Tajima; Phys.  
Rev. B **85**, 144515 (2012); 査読有.

Emergence of Novel Antiferromagnetic  
Order Intervening between Two  
Superconducting Phases in  
 $LaFe(As_{1-x}Px)O$ :  $^{31}P$ -NMR Studies;  
Hidekazu Mukuda, Fuko Engetsu,  
Takayoshi Shiota, Kwing To Lai, Mitsuharu  
Yashima, Yoshio Kitaoka, Shigeki  
Miyasaka, Setsuko Tajima; J. Phys. Soc.  
Jpn. **8**, 083702 (2014); 査読有.

Enhancement of superconducting  
transition temperature due to

antiferromagnetic spin fluctuations in  
pnictides  $LaFe(As_{1-x}Px)(O_{1-y}Fy)$ :  
P-31-NMR studies; H. Mukuda, F. Engetsu,  
K. Yamamoto, K. T. Lai, M. Yashima, Y.  
Kitaoka, A. Akemori, S. Miyasaka, and S.  
Tajima, Setsuko Tajima; Phys. Rev. B **89**,  
064511 (2014); 査読有.

[学会発表](計 4 4件)

八島光晴、Superconducting  
characters under pressure in heavy fermion  
compounds  $CeIr(In_{1-x}Cd_x)_5$  studied by  
In-NQR; The 19th International Conference  
on Magnetism with Strongly Correlated  
Electron Systems (ICM2012)、2012年07月  
13日、Busan, Korea

八島光晴、椋田秀和、北岡良雄、宍  
戸寛明、本多史憲、摺待力生、大貫惇睦、重い  
電子系化合物  $CeIr(In_{1-x}Cd_x)_5$  の圧力下  
115In-NQR による研究; 日本物理学会、2012  
年09月20日、横浜国立大学

八島光晴、植松克吉、畦森達也、谷  
口庄一、田上尚基、田中裕子、椋田秀和、北  
岡良雄、本多史憲、摺待力生、大貫惇睦;  
Heavy-fermion superconductor  
 $CeIr(In_{1-x}Cd_x)_5$  studied by In-NQR; 重い  
電子系の形成と秩序化 第4回研究会、2013  
年01月13日、東京工業大学

八島光晴、植松克吉、畦森達也、谷口庄  
一、田上尚基、田中裕子、椋田秀和、北岡良  
雄、本多史憲、摺待力生、大貫惇睦、重い  
電子系化合物  $CeTIn_5$  ( $T = Co, Rh, Ir$ ) の圧力下  
In-NQR; 日本物理学会、2013年03月27日、  
広島大学

八島光晴、Superconducting characters  
under pressure in heavy fermion compounds  
 $CeIr(In_{1-x}Cd_x)_5$  studied by  
In-NQR; Strongly Correlated Electron  
Systems (SCES2013)、2013年08月05日~2013  
年08月09日、東京大学

八島光晴、椋田秀和、北岡良雄、大泉智聖、  
中野智仁、武田直也、重い電子系化合物  
 $CePt_2In_7$  の圧力下 In-NQR; 日本物理学会、  
2013年09月25日~2013年09月28日、徳  
島大学

八島光晴、椋田秀和、北岡良雄、大泉智  
聖、中野智仁、武田直也、重い電子系化合物  
 $CePt_2In_7$  の圧力下 In-NQR; 日本物理学会、  
2014年03月27日~2014年03月30日、東  
海大学

八島光晴、谷恭兵、椋田秀和、北岡良雄、  
宍戸寛明、本多史憲、摺待力生、大貫惇睦、

重い電子系化合物  $\text{CeIr}(\text{In}_{1-x}\text{Cd}_x)_5$  の压力下  
In-NQR；日本物理学会、2014年09月07  
日、中部大学

八島光晴、道添竜治，棕田秀和，北岡良  
雄，穴戸寛明，撰待力生，大貫惇睦、重い電  
子系化合物  $\text{CeRhIn}_5$  における不整合反強磁性  
と超伝導の In-NQR による研究；日本物理学  
会、2015年03月21日～2015年03月21日、  
早稲田大学

八島光晴、棕田秀和，北岡良雄，穴戸寛  
明，本多史憲，撰待力生，大貫惇睦、重い電  
子系化合物  $\text{CeIr}(\text{In}_{1-x}\text{Cd}_x)_5$  の压力下 In-NQR  
II；日本物理学会、2015年03月21日～2015  
年03月21日、早稲田大学

〔その他〕

ホームページ等

[http://www.kitaokalab.mp.es.osaka-u.ac.  
jp/index.html](http://www.kitaokalab.mp.es.osaka-u.ac.jp/index.html)

## 6．研究組織

### (1)研究代表者

八島 光晴 (Yashima Mitsuharu)

大阪大学・大学院基礎工学研究科・助教

研究者番号：10397771