

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 4 日現在

機関番号：32621

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23540399

研究課題名(和文)ミュオンスピン緩和から見る鉄系・銅系超伝導体におけるスピン相関と超伝導の関連

研究課題名(英文) Muon-spin-relaxation study of the relationship between the spin correlation and superconductivity in iron-based and high-Tc cuprate superconductors

研究代表者

足立 匡 (Adachi, Tadashi)

上智大学・理工学部・准教授

研究者番号：40333843

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円、(間接経費) 1,170,000円

研究成果の概要(和文)：鉄系、銅系超伝導体におけるスピン相関と超伝導の関連を明らかにするために、不純物を置換した鉄系 $\text{Fe}_{1-y}(\text{Co}, \text{Ni}, \text{Zn})_y\text{Se}_{0.3}\text{Te}_{0.7}$ (Fe系)と銅系電子型 $\text{Pr}_{1.3-x}\text{La}_{0.7}\text{Ce}_x\text{CuO}_{4+d}$ (Pr系)の高品質単結晶を用いてミュオンスピン緩和測定を行った。その結果、Fe系では不純物によるスピン相関の著しい発達を見出し、超伝導電子対の形成には軌道のゆらぎが効いている可能性が高く、スピン相関の効果は弱いと結論した。一方、Pr系では、低温で超伝導と短距離磁気秩序が共存することを見出し銅系ではスピン相関が電子対の形成に効いていると結論した。

研究成果の概要(英文)：In order to investigate the relationship between the spin correlation and superconductivity, we have performed muon-spin-relaxation measurements using high-quality single crystals of the impurity-substituted iron-based superconductor  $\text{Fe}_{1-y}(\text{Co}, \text{Ni}, \text{Zn})_y\text{Se}_{0.3}\text{Te}_{0.7}$  and of the electron-doped high-Tc cuprate  $\text{Pr}_{1.3-x}\text{La}_{0.7}\text{Ce}_x\text{CuO}_{4+d}$ . Impurity-induced development of the spin correlation has been found in  $\text{Fe}_{1-y}(\text{Co}, \text{Ni}, \text{Zn})_y\text{Se}_{0.3}\text{Te}_{0.7}$ , suggesting the orbital fluctuations as a glue of electron pairs. In  $\text{Pr}_{1.3-x}\text{La}_{0.7}\text{Ce}_x\text{CuO}_{4+d}$ , it has been found that the superconductivity coexists with a short-range magnetic order at low temperatures. This novel coexistence can be understood in terms of the band picture including the strong electron correlation. Accordingly, it has been concluded that in cuprates, the spin correlation plays an important role on the appearance of superconductivity and that in iron-based superconductors, the appearance of the superconductivity is not so affected by the spin correlation.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・物性

キーワード：強相関電子系 超伝導材料・素子 低温物性 放射線・X線・粒子線 磁性

### 1. 研究開始当初の背景

一般に、電子間に強い引力が働くことで高い転移温度で超伝導が発現する。強い引力の源として銅系超伝導体におけるスピン相関がある。銅系超伝導体では、強相関電子がもたらす反強磁性秩序相が不安定になることで超伝導が出現する。一方、電子相関が弱い鉄系超伝導体では、スピン密度波 (SDW) 相が不安定になることで超伝導が出現する。このように、強相関と弱相関の違いはあるものの、両系ともに磁性相を壊すことで超伝導が出現する。しかし、鉄系におけるスピン相関は超伝導の電子対の形成に効いているのか、また、銅系のスピン相関との共通点はあるのかについては分かっていない。

今まで、銅系超伝導体における電子対の形成にスピン相関が効いているのはほぼ間違いないと思われてきた。しかし、銅系電子型超伝導体において、元素置換によるキャリアドーブがない母物質で超伝導が発現すると報告された。この原因を明らかにすることで、銅系のスピン相関をより深く理解できると期待されるため、銅系電子型のスピン相関の詳細な研究が急務となっている。

### 2. 研究の目的

鉄カルコゲナイド超伝導体と銅系超伝導体におけるスピン相関と超伝導の関連を明らかにするために、高品質な単結晶試料と多結晶試料を準備し、電気抵抗率、磁化率、比熱、ミュオンスピン緩和 ( $\mu$ SR) 法を用いて、電子状態とスピン相関の詳細を明らかにすることを目的とした。

### 3. 研究の方法

鉄カルコゲナイド  $\text{Fe}_{1-y}(\text{Co}, \text{Ni}, \text{Zn})_y\text{Se}_{0.3}\text{Te}_{0.7}$  ( $y = 0 - 0.05$ ) の単結晶をブリッジマン法で育成した。また、銅系電子型  $\text{Pr}_{1.3-x}\text{La}_{0.7}\text{Ce}_x\text{CuO}_{4+\delta}$  ( $x = 0 - 0.15$ ) と銅系ホール型  $(\text{Bi}, \text{Pb})_2\text{Sr}_2\text{CuO}_{6+\delta}$  の単結晶をフローティングゾーン法で育成した。育成した単結晶に対して、粉末 X 線回折、X 線背面ラウエ、ICP 組成分析、EPMA 組成分析などを行い、品質を評価した。

不純物を置換した銅系ホール型  $\text{La}_{2-y}\text{Sr}_y\text{Cu}_{1-y}\text{Fe}_y\text{O}_4$  の幅広い  $x$  と  $y$  組成の多結晶を固相反応法で作製した。

超伝導特性を調べるために、電気抵抗率、磁化率、比熱の測定を行った。また、 $\mu$ SR 測定は英国 RIKEN-RAL、スイス PSI、東海村の J-PARC/MUSE で行った。

### 4. 研究成果

【鉄カルコゲナイド超伝導体における不純物が誘起したスピン相関の発達】

$\text{Fe}_{1-y}(\text{Co}, \text{Ni}, \text{Zn})_y\text{Se}_{0.3}\text{Te}_{0.7}$  ( $y = 0 - 0.05$ ) の高

品質の単結晶の育成に成功した。 $\mu$ SR 測定の結果、 $y = 0$  では 1.6 K までスピン相関の発達は見られなかったが、 $y = 0.02$  と  $0.05$  ではミュオンスピンの緩和が速くなり、低温でスピン相関が著しく発達することを突き止めた。特筆すべきは、不純物の種類によってスピン相関の発達の様子が異なることである。すなわち Co と Ni を比較すると、どちらも  $y = 0.02$  ではスピン相関が発達するが、 $y = 0.05$  では相関の発達が弱まる。また、Ni よりも Co の方がスピン相関の発達は顕著である。一方、Zn の場合は、 $y$  の増加とともにスピン相関は単調に発達し、3 種類の不純物の中でもっともスピン相関を発達させることがわかった。超伝導転移温度  $T_c$  を評価した結果、Co と Ni は  $T_c$  を下げるが、Zn は  $T_c$  をほとんど変えないことがわかった。

これらの結果は次のように解釈できる。不純物は、SDW の揺らぎをピン止めする効果と、電子ドーブによってフェルミ面のネスティングを悪くする効果がある。Co と Ni の場合、どちらの効果も有するが、Zn は d 軌道のエネルギー準位がフェルミエネルギーよりかなり深い位置にあるので、電子ドーブしない。Zn のケースで見られるように、SDW をピン止めしてスピン揺らぎを抑えるにも関わらず  $T_c$  が下がらないということは、電子対の形成にスピン相関はそれほど効いておらず、軌道のゆらぎが効いている可能性が高いと言える。一方、スピン相関が効いていると仮定すると、不純物は超伝導に関与するとされている  $(\pi, 0)$  の SDW 揺らぎではなく、FeTe で観測されている  $(\pi, \pi)$  の揺らぎを選択的にピン止めすることを示唆する。これを確かめるためには、中性子散乱実験などを行うことが重要である。

【銅系電子型超伝導体における超伝導と短距離磁気秩序の新奇な共存】

$\text{Pr}_{1.3-x}\text{La}_{0.7}\text{Ce}_x\text{CuO}_{4+\delta}$  ( $x = 0 - 0.15$ ) の高品質の単結晶の育成に成功した。 $x = 0.10$  において、磁場中での ab 面内電気抵抗率の測定を行った。その結果、As-grown では半導体的な温度依存性と、低温での variable-range hopping 伝導が見られ、キャリアは強局在状態であることがわかった。一方、750 K で還元して超伝導を示す試料では、低温で  $\log T$  に比例した後最低温に向かって飽和する振る舞いと負の磁気抵抗が観測された。これらは近藤効果に特徴的な振る舞いであり、還元によって金属的な状態に移り変わったことを意味する。

$\mu$ SR 測定の結果、As-grown では反強磁性長距離秩序が形成されるが、還元した超伝導試料では、低温で Cu スピン相関が著しく発達することを見出した。縦磁場での測定の結果、試料中の 8 割程度の領域で短距離磁気秩序が形成され、残りの 2 割の領域では Cu スピンがゆっくりと揺らいでいることがわかった。一方、比熱の測定から見積もった超伝導体積

分率は少なくとも6割はあるので、試料中で超伝導領域と短距離磁気秩序領域が共存している可能性が高い事が示された。これらの結果は、母物質での超伝導を説明する強い電子相関を考慮したバンド描像で理解できる。

【銅系ホール型超伝導体のオーバードープ領域における2つの磁気秩序と超伝導とストライプ相関の密接な関わり】

$\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{Cu}_{1-y}\text{Fe}_y\text{O}_4$ の幅広い $x$ と $y$ 組成の多結晶の作製に成功した。オーバードープ領域の試料を用いた磁化率と $\mu\text{SR}$ 測定の結果、低温で磁気転移が2回起こることを突き止めた。解析の結果、高温では伝導電子が媒介するRKKY相互作用によるFeスピンのスピングラス状態であると結論した。また、低温での磁気転移温度のホール濃度依存性を調べた結果、アンダードープ領域からホール濃度の増加とともに単調に減少し、不純物を置換しない $y = 0$ で超伝導が消失するホール濃度付近で消えることがわかった。これらのことから、低温での磁気秩序は所謂電荷とスピンのストライプ秩序である可能性が高く、超伝導の発現にストライプ相関が密接に関わっている可能性が極めて高いと結論した。

【銅系ホール型超伝導体の極過剰ドープ領域における強磁性揺らぎ】

$(\text{Bi,Pb})_2\text{Sr}_2\text{CuO}_{6+\delta}$ の高品質の単結晶の育成に成功した。また、酸化、還元処理によって幅広いホール濃度を有する単結晶を準備することができた。

ab面内電気抵抗率の測定の結果、超伝導が消失する極過剰ドープ領域において温度の $4/3$ 乗に比例する振る舞いを見出した。これは、2次元強磁性臨界揺らぎに特徴的な振る舞いである。また、磁化の測定から低温高磁場側で磁化が飽和する傾向があることを見出した。これらの振る舞いは、 $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ の極過剰ドープ領域で報告されているものと同様であり、低温で強磁性秩序が形成される可能性が高いことを示すものである。今後は、より低温での磁化測定と $\mu\text{SR}$ 測定を行い、強磁性秩序の詳細を明らかにする予定である。

以上の結果から、銅系ホール型・電子型超伝導体では、Cuスピン相関が電子対の形成に効いている可能性が極めて高いこと、また、鉄カルコゲナイド超伝導体ではスピン相関よりも軌道の揺らぎが電子対の形成に効いている可能性が高いことが結論された。スピン相関も軌道のゆらぎも、電子相関を起源とすることから、高い転移温度を有する超伝導体では電子相関が重要な役割を担っている可能性が高いと結論された。

## 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23件)

- [1] M. Ohno, T. Kawamata, T. Noji, K. Naruse, Y. Matsuoka, T. Adachi, T. Nishizaki, T. Sasaki and Y. Koike, “Thermal conductivity and annealing effects in the iron-based superconductor  $\text{FeSe}_{0.3}\text{Te}_{0.7}$ ”, J. Phys. Soc. Jpn. **83**, 044704 (1-6) (2014). 査読有
- [2] Risdiana, L. Safriani, W. A. Somantri, T. Saragi, T. Adachi, I. Kawasaki, I. Watanabe and Y. Koike, “Possible existence of the stripe correlations in electron-doped superconducting cuprates  $\text{Eu}_{1.85}\text{Ce}_{0.15}\text{Cu}_{1-y}\text{Ni}_y\text{O}_{4+\alpha-\delta}$  studied by muon-spin-relaxation”, Adv. Mater. Res. **896**, 354-357 (2014). 査読有
- [3] M. Suzuki, I. S. Suzuki, T. Adachi and Y. Koike, “Specific heat of stage-2  $\text{MnCl}_2$  graphite intercalation compound: Co-existence of spin glass phase and incommensurate short-range spin order”, J. Phys. Soc. Jpn. **82**, 124710 (1-7) (2013). 査読有
- [4] T. Adachi, Y. Mori, M. Kato, T. Nishizaki, T. Sasaki, N. Kobayashi and Y. Koike, “Evolution of the electronic state through the reduction annealing in electron-doped  $\text{Pr}_{1.3-x}\text{La}_{0.7}\text{Ce}_x\text{CuO}_{4+\delta}$  ( $x = 0.10$ ) single crystals: Antiferromagnetism, Kondo effect and superconductivity”, J. Phys. Soc. Jpn. **82**, 063713 (1-5) (2013). 査読有 (Papers of Editors' Choice)
- [5] T. Inabe, T. Kawamata, T. Noji, T. Adachi and Y. Koike, “Superconducting symmetry studied from impurity effects in single-crystal  $\text{Fe}_{1-y}\text{M}_y\text{Se}_{0.3}\text{Te}_{0.7}$  ( $M = \text{Co}, \text{Ni}, \text{Zn}$ )”, J. Phys. Soc. Jpn. **82**, 044712 (1-7) (2013). 査読有
- [6] S. Wakimoto, K. Ishii, H. Kimura, K. Ikeuchi, M. Yoshida, T. Adachi, D. Casa, M. Fujita, Y. Fukunaga, T. Gog, Y. Koike, J. Mizuki and K. Yamada, “Resonant inelastic X-ray scattering study of intraband charge excitations in hole-doped high- $T_c$  cuprates”, Phys. Rev. B **87**, 104511 (1-7) (2013). 査読有
- [7] M. Miyazaki, T. Adachi, Y. Tanabe, H. Sato, T. Nishizaki, K. Kudo, T. Sasaki, N. Kobayashi and Y. Koike, “Inhomogeneity of superconductivity and stripe correlations at  $x \sim 0.21$  in  $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ ”, J. Phys.: Conf. Series **400**, 022074 (1-4) (2012). 査読有
- [8] M. Imaizumi, T. Noji, T. Adachi and Y. Koike, “Superconductivity and electronic state of annealed single-crystals of  $\text{FeSe}_{1-x}\text{Te}_x$  ( $0.6 < x < 1$ ) studied by specific heat”, J.

- Phys.: Conf. Series **400**, 022034 (1-4) (2012).  
査読有
- [9] D. Miu, T. Noji, T. Adachi, Y. Koike and L. Miu, “On the nature of the second magnetization peak in  $\text{FeSe}_{1-x}\text{Te}_x$  single crystals”, Supercond. Sci. Technol. **25**, 115009 (1-7) (2012).査読有
- [10] Y. Koike and T. Adachi, “Impurity and magnetic field effects on the stripes in cuprates”, Physica C **481**, 115-124 (2012).査読有
- [11] C. V. Kaiser, W. Huang, S. Komiya, N. E. Hussey, T. Adachi, Y. Tanabe, Y. Koike and J. E. Sonier, “Curie-like paramagnetism due to incomplete Zhang-Rice singlet formation in  $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ ”, Phys. Rev. B **86**, 054522 (1-8) (2012).査読有
- [12] K. M. Suzuki, T. Adachi, Y. Tanabe, H. Sato, Y. Koike, Risdiana, Y. Ishii, T. Suzuki and I. Watanabe, “Distinct Fe-induced magnetic states in the underdoped and overdoped regimes of  $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{Cu}_{1-y}\text{Fe}_y\text{O}_4$  revealed by muon spin relaxation”, Phys. Rev. B **86**, 014522 (1-9) (2012).査読有
- [13] Risdiana, T. Adachi, I. Watanabe and Y. Koike, “Cu-apin fluctuations in hole- and electron-doped high- $T_c$  superconducting cuprates relating to stripe pinning”, AIP Conf. Proc. **1454**, 275-278 (2012). 査読有
- [14] M. A. Baqiya, H. Widodo, L. Rochmawati, Darminto, T. Adachi and Y. Koike, “Ferromagnetism in 2212 phase Bi-Sr-Ca-Cu-O nano-superconductors”, AIP Conf. Proc. **1454**, 260-263 (2012). 査読有
- [15] N. L. Saini, H. Oyanagi, T. Adachi, T. Noji, H. Sato and Y. Koike, “In-plane Cu-O bond distribution and charge inhomogeneity in  $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$  as a function of doping”, J. Appl. Phys. **111**, 112622 (1-4) (2012).査読有
- [16] K. Suzuki, T. Adachi, Y. Tanabe, H. Sato, Risdiana, Y. Ishii, T. Suzuki, I. Watanabe and Y. Koike, “Fe-substitution effects on the Cu-spin correlation in  $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{Cu}_{1-y}\text{Fe}_y\text{O}_4$  studied by muon spin relaxation”, Phys. Procedia **30**, 275-278 (2012).査読有
- [17] T. Noji, M. Imaizumi, T. Suzuki, T. Adachi, M. Kato and Y. Koike, “Specific-heat study of superconducting and normal states in  $\text{FeSe}_{1-x}\text{Te}_x$  (0.6  $x$  1) single crystals: Strong-coupling superconductivity, strong electron-correlation, and inhomogeneity”, J. Phys. Soc. Jpn. **81**, 054708 (1-7) (2012).査読有
- 有
- [18] M. Imaizumi, T. Noji, T. Adachi and Y. Koike, “Annealing effects on the crystal structure and physical properties of  $\text{FeSe}_{1-x}\text{Te}_x$  (0.6  $x$  1) single crystals”, Physica C **471**, 614-617 (2011).査読有
- [19] R.-H. He, M. Fujita, M. Enoki, M. Hashimoto, S. Iikubo, S.-K. Mo, H. Yao, T. Adachi, Y. Koike, Z. Hussain, Z.-X. Shen and K. Yamada, “Hidden itinerant-spin phase in heavily overdoped  $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$  superconductors revealed by dilute Fe doping: A combined neutron scattering and angle-resolved photoemission study”, Phys. Rev. Lett. **107**, 127002 (1-5) (2011).査読有
- [20] Y. Shindo, T. Goto, K. Nakamura, T. Takao, T. Adachi and Y. Koike, “ $^{63}\text{Cu}$ -NMR Study on High- $T_c$  Superconductor  $\text{La}_{2-x}\text{Ba}_x\text{CuO}_4$ ”, J. Phys.: Conf. Series **302**, 012010 (1-5) (2011). 査読有
- [21] P. M. C. Rourke, I. Mouzopoulou, X. Xu, C. Panagopoulos, Y. Wang, B. Vignolle, C. Proust, E. V. Kurganova, U. Zeitler, Y. Tanabe, T. Adachi, Y. Koike and N. E. Hussey, “Phase-fluctuating superconductivity in overdoped  $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ ”, Nature Phys. **7**, 455-458 (2011).査読有
- [22] T. Adachi, Y. Tanabe, K. Suzuki, Y. Koike, T. Suzuki, T. Kawamata and I. Watanabe, “Development of Cu-spin correlation in the  $\text{Bi}_{1.74}\text{Pb}_{0.38}\text{Sr}_{1.88}\text{Cu}_{1-y}\text{Zn}_y\text{O}_{6+\delta}$  high-temperature superconductors observed by muon spin relaxation”, Phys. Rev. B **83**, 184522(1-6) (2011).査読有
- [23] Y. Tanabe, T. Adachi, K. Suzuki, T. Kawamata, Risdiana, T. Suzuki, I. Watanabe and Y. Koike, “Similarity between Ni and Zn impurity effects on the superconductivity and Cu-spin correlation in  $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{Cu}_{1-y}\text{Ni}_y\text{O}_4$  high- $T_c$  cuprates: A comparison based on the hole trapping by Ni”, Phys. Rev. B **83**, 144521(1-6) (2011).査読有
- 〔学会発表〕(計95件)
- [1] 鈴木謙介, “ $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{Cu}_{1-y}\text{Al}_y\text{O}_4$  のオーバードープ領域における Al 誘起磁気秩序”, 日本物理学会第 69 回年次大会, 2014 年 3 月 27 - 30 日, 東海大学 (平塚市)
- [2] 倉嶋晃士, “Bi-2201 系銅酸化物の極過剰ドープ領域における強磁性揺らぎ”, 日本物理学会第 69 回年次大会, 2014 年 3 月 27 - 30 日, 東海大学 (平塚市)

- [3] 山本将弘, “ $\text{Pr}_{1.3-x}\text{La}_{0.7}\text{Ce}_x\text{CuO}_{4+\delta}$  ( $x = 0.10$ ) の NMR”, 日本物理学会第 69 回年次大会, 2014 年 3 月 27 – 30 日, 東海大学(平塚市)
- [4] 足立匡, “ $\mu\text{SR}$  から見た電子型  $T'$ -214 高温超伝導体における Cu スピン相関とノンドープ超伝導”, 物構研サイエンスフェスタ 2013, 2014 年 3 月 18 – 19 日, つくば市
- [5] T. Adachi, “ $\mu\text{SR}$  study of the spin correlation in iron-chalcogenide and electron-doped cuprate superconductors”, 3<sup>rd</sup> Workshop for Light/Quantum Beam Science Promotion, Tohoku University, 2014 年 3 月 7 日, Sendai, Japan (Invited)
- [6] 倉嶋晃士, “Bi-2201 系銅酸化物の極過剰ドープ領域における強磁性相の探索”, 応用物理学会東北支部第 65 回学術講演会, 2013 年 12 月 5 – 6 日, 山形大学(米沢市)
- [7] 高橋晶, “ミュオンスピン緩和から見た電子型超伝導体  $T'$ - $\text{Pr}_{1.3-x}\text{La}_{0.7}\text{Ce}_x\text{CuO}_{4+\delta}$  ( $x = 0.10$ ) における電子・スピン状態”, 応用物理学会東北支部第 65 回学術講演会, 2013 年 12 月 5 – 6 日, 山形大学(米沢市)
- [8] 足立匡, “ $T'$ 型銅酸化物と鉄カルコゲナイド超伝導体におけるスピンゆらぎの  $\mu\text{SR}$  による研究”, 第 7 回物性科学領域横断研究会, 2013 年 12 月 1 – 2 日, 東京大学(東京都)
- [9] T. Konno, “Superconducting gap structure of iron-chalcogenide superconductors  $\text{FeSe}_{1-x}\text{Te}_x$  ( $0.6 < x < 1$ ) studied by specific heat in magnetic fields”, International Workshop on Novel Superconductors and Super Materials 2013 by FIRST Program (NS<sup>2</sup>2013), 2013 年 11 月 21 – 22 日, Tokyo, Japan
- [10] T. Konno, “Specific heat in magnetic fields and Superconducting gap structure in  $\text{FeSe}_{1-x}\text{Te}_x$  ( $0.6 < x < 1$ )”, 26<sup>th</sup> International Symposium on Superconductivity (ISS2013), 2013 年 11 月 18 – 20 日, Tokyo, Japan
- [11] 足立匡, “ $T'$ 型銅酸化物における強磁場下輸送特性から見た還元による電子・スピン状態の変化 - 反強磁性, 近藤効果, 超伝導 -”, 東大物性研短期研究会「極限強磁場科学 - 場, 物質, プローブのリンクから融合へ -, 2013 年 10 月 30 日 – 11 月 1 日, 東京大学(柏市)
- [12] 鈴木謙介, “Fe を置換した  $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{Cu}_{1-y}\text{Fe}_y\text{O}_4$  における遍歴磁性と局在磁性”, 日本物理学会 2013 年秋季大会, 2013 年 9 月 25 – 28 日, 徳島大学(徳島市)
- [13] 高橋晶, “ $\mu\text{SR}$  から見た電子型超伝導体  $\text{Pr}_{1.3-x}\text{La}_{0.7}\text{Ce}_x\text{CuO}_{4+\delta}$  ( $x = 0.10$ ) におけるスピンドYNAMIXの還元効果”, 日本物理学会 2013 年秋季大会, 2013 年 9 月 25 – 28 日, 徳島大学(徳島市)
- [14] 足立匡, “ $\mu\text{SR}$  から見た鉄カルコゲナイド超伝導体  $\text{Fe}_{1-y}\text{M}_y\text{Se}_{0.3}\text{Te}_{0.7}$  ( $M = \text{Co}, \text{Ni}, \text{Zn}$ ) 単結晶におけるスピン相関の不純物置換効果”, 日本物理学会 2013 年秋季大会, 2013 年 9 月 25 – 28 日, 徳島大学(徳島市)
- [15] M. Horio, “Suppression of antiferromagnetic pseudogap in the electron-doped cuprate superconductor  $\text{Pr}_{1.3-x}\text{La}_{0.7}\text{Ce}_x\text{CuO}_{4+\delta}$  ( $x = 0.10$ )”, Light and Particle Beams in Materials Science 2013, 2013 年 8 月 29 – 31 日, Tsukuba, Japan
- [16] A. Takahashi, “ $\mu\text{SR}$  study of different magnetic states in electron-doped  $\text{Pr}_{1.3-x}\text{La}_{0.7}\text{Ce}_x\text{CuO}_{4+\delta}$  ( $x = 0.10$ ) single crystals”, International Symposium on Science Explored by Ultra Slow Muon (USM2013), 2013 年 8 月 9 – 12 日, Matsue, Japan
- [17] K. M. Suzuki, “Magnetic ground state of the Fe-substituted  $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{Cu}_{1-y}\text{Fe}_y\text{O}_4$ ”, International Symposium on Science Explored by Ultra Slow Muon (USM2013), 2013 年 8 月 9 – 12 日, Matsue, Japan
- [18] T. Adachi, “Impurity-induced development of the spin correlation in iron-chalcogenide superconductors”, International Symposium on Science Explored by Ultra Slow Muon (USM2013), 2013 年 8 月 9 – 12 日, Matsue, Japan
- [19] M. Horio, “Suppression of antiferromagnetic pseudogap in the electron-doped cuprate superconductor  $\text{Pr}_{1.3-x}\text{La}_{0.7}\text{Ce}_x\text{CuO}_{4+\delta}$  ( $x = 0.10$ )”, The International Conference on Strongly Correlated Electron Systems (SCES2013), 2013 年 8 月 5 – 9 日, Tokyo, Japan
- [20] T. Adachi, “ $\mu\text{SR}$  study of the spin fluctuation in electron-doped high- $T_c$  cuprates and impurity-substituted iron-chalcogenides”, ICC-IMR Workshop ‘Superconductivity Research Advanced by New Materials and Spectroscopies, 2013 年 7 月 23 – 25 日, Sendai, Japan (Invited)
- [21] M. Horio, “Suppression of antiferromagnetic pseudogap in the electron-doped cuprate

superconductor  $\text{Pr}_{1.3-x}\text{La}_{0.7}\text{Ce}_x\text{CuO}_{4+\delta}$  ( $x = 0.10$ )”, The 12<sup>th</sup> Asia Pacific Physics Conference, 2013 年 7 月 14 – 19 日, Makuhari, Japan

[22] Y. Koike, “Superconductivity in electron-doped and hole-doped T'-214 cuprates without excess oxygen”, Quantum in Complex Matter: Superconductivity, Magnetism and Ferroelectricity (SUPERSTRIPES2013), 2013 年 5 月 27 日 – 6 月 1 日, Ischia, Italy (Invited)

[23] Y. Koike, “Revised view on Superconductivity in T'-214 cuprates without excess oxygen”, Padjadjaran International Physics Symposium 2013 (PIPS2013), 2013 年 5 月 7 – 9 日, Bandung, Indonesia (Invited)

[24] 今野巧也, “鉄カルコゲナイド超伝導体  $\text{FeSe}_{1-x}\text{Te}_x$  ( $0.6 < x < 1$ ) 単結晶における比熱の磁場効果”, 日本物理学会第 68 回年次大会, 2013 年 3 月 26 – 29 日, 広島大学(東広島市)

[25] 足立匡, “T'型銅酸化物超伝導体  $\text{Pr}_{1.3-x}\text{La}_{0.7}\text{Ce}_x\text{CuO}_{4+\delta}$  ( $x = 0.10$ ) における還元アニールによる電子状態の変化: 反強磁性, 近藤効果, 超伝導”, 高温超伝導フォーラムキックオフミーティング, 2013 年 3 月 25 日, 広島大学(東広島市)

[26] K. M. Suzuki, “Distinct Fe-induced magnetic states in the underdoped and overdoped regimes of  $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{Cu}_{1-y}\text{Fe}_y\text{O}_4$  revealed by muon spin relaxation”, APS March Meeting 2013, 2013 年 3 月 18 – 22 日, Baltimore, USA

[27] 鈴木謙介, “ $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{Cu}_{1-y}\text{Fe}_y\text{O}_4$  におけるアンダードープ領域とオーバードープ領域で異なる Fe 誘起磁気秩序”, 第 1 回物構研サイエンスフェスタ, 2013 年 3 月 14 – 15 日, つくば市

[28] 足立匡, “鉄カルコゲナイド超伝導体における磁性と超伝導の  $\mu\text{SR}$  による研究”, 第 1 回物構研サイエンスフェスタ, 2013 年 3 月 14 – 15 日, つくば市

[29] 足立匡, “銅酸化物高温超伝導体における電荷・スピン秩序のミュオンスピン緩和/中性子散乱/ARPES による相補的研究”, 第 1 回物構研サイエンスフェスタ, 2013 年 3 月 14 – 15 日, つくば市(招待講演)

[30] 足立匡, “鉄カルコゲナイドとランタン系銅酸化物における磁性と超伝導の  $\mu\text{SR}$

による研究”, CMRC 研究会「ARPES, 中性子散乱,  $\mu\text{SR}$  を用いた強相関系研究の最近の発展」2012 年 12 月 6 – 7 日, 高エネルギー加速器研究機構(つくば市)(招待講演)

他 65 件, 総計 95 件

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕  
出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

〔その他〕  
ホームページ等  
<http://www.eas.sophia.ac.jp/profsors/teachers.html>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

足立 匡 (ADACHI Tadashi)  
上智大学・理工学部・准教授  
研究者番号: 40333843

### (2) 研究分担者

小池 洋二 (KOIKE Yoji)  
東北大学・大学院工学研究科・教授  
研究者番号: 70134038

### (3) 連携研究者

渡邊 功雄 (WATANABE Isao)  
理化学研究所・仁科加速器研究センター・  
専任研究員  
研究者番号: 40260195