

# 平成 30 年度 未来研究ラボシステム 研究成果報告書

研究種目： 新領域開拓

研究期間：平成 29 年 9 月～平成 31 年 3 月

研究課題名：バレンススキップ現象に由来する電荷近藤効果と新奇超伝導機構の物質探索  
ラボ長

所属：物質創成専攻・物性物理工学領域

氏名：椋田秀和

## 研究成果

### 【 研究目的 】

世界中で超伝導物質探索が行われているが、まだ室温に迫るような高温超伝導物質は発見されていない。フォノンを媒介とした BCS 理論(1957)で説明される通常金属の超伝導に対し、近年発見されてきた重い電子系超伝導(1979)、銅酸化物高温超伝導(1986)などではスピン機構が有力視されており、超伝導機構に驚くべき多様性があることが認識されつつある。革新的な室温超伝導実現の夢に向け、我々はフォノンやスピン以外の根本的に全く新しい超伝導機構が期待される物質探索に着手してきた。その中で本研究では、原子価スキップ元素をドーピングした新奇超伝導体で提唱されている「原子価スキップ現象に由来する新しい超伝導機構」の可能性に着目している。例えば、Tl イオンの場合+1 価( $6s^2$ )か+3 価( $6s^0$ )しかとれず、中間の+2 価( $6s^1$ )のエネルギーが高いのでとれない。それら+1 価(2 電子)か+3 価(空)の状態が縮退する状況が起これば、電荷  $2e$  をもつ束縛 2 電子が伝導電子と混成し電荷近藤効果を示すと共に、その現象に由来する新しい機構(Negative-U)の超伝導の発現が理論的に提唱されてきた。その候補物質の一つであった  $Pb_{1-x}Tl_xTe$  において、局所的な原子価の揺らぎに伴う電子状態の異常を原子スケールの視点から観測し、まだ誰も実証していない原子価スキップ現象と超伝導の相関をミクロな実験手法で裏付けるのが目標である。

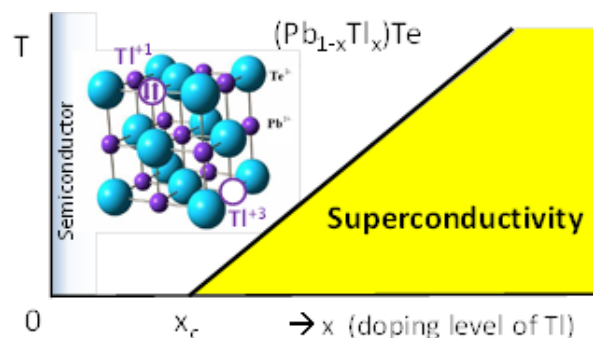


図 1  $Pb_{1-x}Tl_xTe$  の新奇な超伝導相図. NMR 測定を行い、ミクロな視点から原子価スキップ元素 Tl の電荷揺らぎと超伝導の関係を解明することを目的とする。

### 【 研究成果 】

#### (1) 隣接 Te サイトから探る Tl の局所電子状態 ～ $Pb_{1-x}Tl_xTe$ における Te-NMR

まず始めに、原子価スキップ現象に由来する新しい超伝導の候補物質の一つであった  $Pb_{1-x}Tl_xTe$  において、 $^{125}Te$  サイトの NMR 実験を行った。その結果、わずかにドーピングされた Tl 周りの局所電子状態が試料全体で一様ではなく、Tl の最近接 Te サイトでは核スピン緩和率( $1/T_1T$ )が異常に増大しており、ドーパントの Tl から離れるに従い減衰することがわかった(図 2)。この結果は、ドーパントによって新たに発生した局所電子状態の異常に示すものであり、全体の物性を平均化して観測するバルク測定では決して見ることのできない、原子スケールで空間分解できる NMR なら

では新しい情報である。さらに驚くべきことに、その温度依存性において、超伝導になる試料にのみ 10K 以下で  $1/T_1T$  の上昇が観測された (図 2)。「10K」は電荷近藤効果に伴う電気抵抗の上昇が見られる温度に対応することから、TI の+1 価または+3 価の縮退に伴う電荷揺らぎが、TI のごくごく近傍で、低温に向かって著しく増大して観測されることを意味する。低温で伝導電子との混成が強まる電荷近藤効果、つまり電荷近藤一重項の形成を示唆する世界で初めてのマイクロなプローブでの観測結果である。

これらの成果を受けて、それをさらに裏付けるために、次の 2 つの研究(2)(3)を展開した。

## (2) TI サイトの局所電子状態の直接観測

### ~ $Pb_{1-x}Tl_xTe$ における TI-NMR

さらに  $Tl^{+}$  と  $Tl^{3+}$  縮退に伴う電荷揺らぎが起きてい

るのかをさらに直接検証するために、異常の起源と思われる TI ドーパントサイトでの NMR 測定を試みた。TI サイトを直接見ているため、これまで Te サイトで観測されたものがより顕著に観測されることが予想される。実際に  $(Pb_{0.99}Tl_{0.01})Te$  において TI-NMR 測定を行なったところ、図 3 に示すように TI-NMR スペクトルは二つのピークの重ね合わせで観測された。これは、TI には核磁気回転比が近い  $^{203}Tl$  と  $^{205}Tl$  の二つの同位体が存在するためである。ピーク位置とスペクトルの概形には 30K 以下でわずかに変化が見られた。TI サイトの  $1/T_1T$  の温度依存性にも、30K 以下の低温でより顕著な  $1/T_1T$  の増大が見られることもわかってきた。この TI-NMR 測定で観測された低温に向かった  $1/T_1T$  の増大は、Te サイトにおける  $1/T_1T$  と比較するとより顕著であったことから、緩和率の異常な増大はドーパントの TI が起源と理解することができる。

また状態密度が低温で上昇することも Knight shift 測定から実験的に初めて見出すことができた。電荷近藤効果による TI 局在軌道と伝導電子との混成に伴い出現する Charge Kondo resonance peak の出現を世界で初めて捉えたものと思われる。理論から予測されていたが、この実験報告例はなかった現象である。空間平均してしまうようなバルク測定手法であれば、変化を捉えられないもので、今回異常の起源となる TI サイト NMR だからこそ観測できたものと考えられる。

## (3) ドーパントの種類依存性~ $Pb_{1-x}Na_xTe$ における $^{125}Te$ -NMR

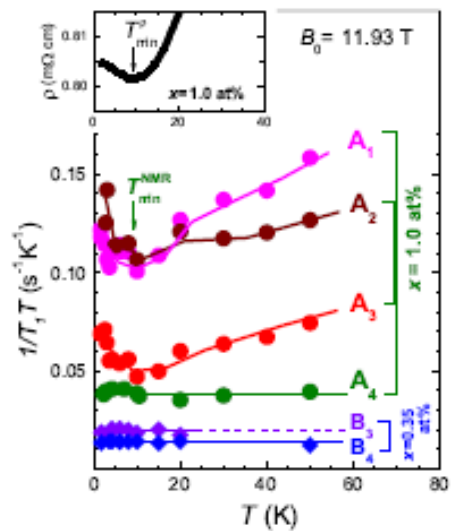


図 2  $(1/T_1T)$  の温度依存性。図中  $A_i$  は TI 近傍の Te サイトは  $i=1\sim 3$ 、遠方の Te サイトは  $i=4$  に相当。挿入図は本試料における電気抵抗の低温部での温度依存性。

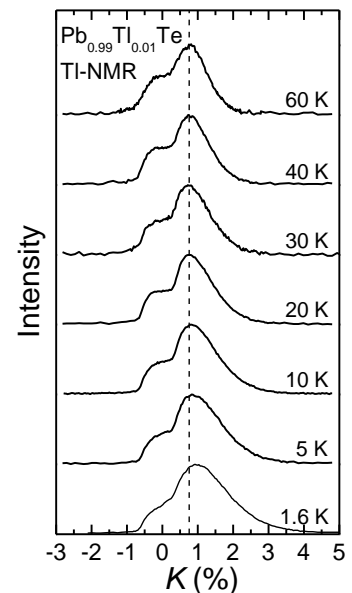


図 3 :  $(Pb_{0.99}Tl_{0.01})Te$  の TI-NMR スペクトルの温度依存性

この現象がドーパント Tl 由来であることを明確に示すために、Tl ではなく Na で置換した  $Pb_{1-x}Na_xTe$  ( $x \sim 0.01$ ) の  $^{125}Te$ -NMR 測定を行った。Na は Tl と異なり、バレンススキップ元素ではないため、電荷移動ゆらぎは存在せず、Tl ドープ試料のような低温における  $1/T_1T$  の増大は起きないはずである。実際に Na ドープ試料の  $^{125}Te$ -NMR 測定を行ったところ、Tl ドープと同様、スペクトルの高周波側の方が緩和時間  $T_1$  が短いことが分かった。このことは、Tl ドープと同様、Na ドープ周囲でも局所状態密度が増大していることを意味しているものと考えられる。しかし、10K 以下の  $1/T_1T$  の温度依存性に注目してみると、当初の期待通り、Tl ドープと異なり  $1/T_1T$  が増大しないことが確認できた。つまり、これまで議論してきた  $Pb_{1-x}Tl_xTe$  の 10K 以下の異常は、ドーパントが Tl であるときに特有のものと理解できる。

### 【 成果まとめ と 残された課題 】

Te サイトの NMR 実験からは、ドーパント Tl からの距離に依存して局所電子状態が空間変化していることが示唆された。電気抵抗の上昇と対応するミクロな情報として、電子状態の動的性質を反映する  $1/T_1T$  が 10K 以下の低温で異常に上昇していることが、超伝導の組成域の試料 ( $x=1.0at\%$ ) のみで観測された。一方超伝導にならない組成域の試料 ( $x=0, 0.35at\%$ ) にはその異常は観測されなかった。さらにこの結果を Tl サイト NMR 実験により、直接的に裏付けることに成功した。ドーパントの種類の違いを調べることで、ドーパントが Tl のときだけ異常が起こることを確かめた。

以上の成果は、理論的にも電荷近藤効果の特徴として説明でき、マクロ測定と理論から電荷近藤効果と呼ばれてきたこの現象が、今年度の実験により、ミクロな視点からも本質的であることを裏付けることができた。異常な揺らぎを伴う局所電子状態が超伝導を示す試料にのみ見られることがわかった。ドーパントの局在 6s 軌道の電子が、伝導電子と混成しながら、試料全体へ渡って広くコヒーレンスが発達していることが超伝導の出現条件と関連していると思われる。

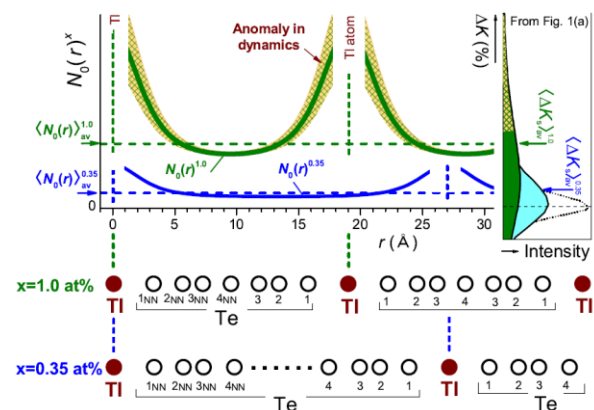


図 5 :  $(Pb_{1-x}Tl_x)Te$  の 異常な局所状態密度の予想される空間分布

本研究は当初、村上氏 (阪大工) と Fisher グループ (Stanford 大) から試料提供を受けて行った国際共同研究である。国内では、原子価スキップ元素を含んだ新超伝導物質を探索している伊豫彰氏 (産総研) に類似の性質をもつ可能性のある物質合成を提案し、共同研究をスタートさせている。理論面では、我々の成果を受けて三宅和正氏 (豊田理研) と松浦氏 (東大理) らは、我々の観測した異常な NMR 緩和率を説明する理論を出版した。産総研の長谷泉氏は第一原理計算からの新しい候補物質の提案をしてくださっている。このように、未来ラボの支援で研究交流がますます発展し、原子価スキップ現象が巨大な電子の集団となったときに現れる物性物理学の新概念の創成へ向け、阪大を中心に拠点形成ができつつ

あることはありがたいことである。

我々の研究成果は、日本物理学会など国内の会議をはじめ、国際会議での口頭研究発表、ならびに学術論文で成果を出版した。また、このたび、第23回超伝導科学技術賞の受賞が決定した。

**キーワード：**超伝導、原子価スキップ元素、電荷近藤効果、新しい超伝導機構

### 研究経費（H30年度）の内訳

備品費	消耗品費	旅費	謝金	その他	合計
1383710 円	373680 円	2610 円	0 円	0 円	1760000 円

### 共同研究者等

#### (1)共同研究者（氏名・所属）

共同研究者 Philip Walmsley Stanford university

共同研究者 Ian R. Fisher Stanford university

共同研究者 村上博成 大阪大学大学院工学研究科

共同研究者 八島光晴 大阪大学大学院基礎工学研究科

#### (2)研究協力者（氏名・所属・学年（学生の場合））

共同研究者 堀川瑠星 大阪大学大学院基礎工学研究科

共同研究者 松村隆史 大阪大学大学院基礎工学研究科

共同研究者 牧 翔太 大阪大学大学院基礎工学研究科

共同研究者 P. Giraldo-Gallo Stanford university

共同研究者 Ted H. Geballe Stanford university

### 発表論文等（平成31年3月31日現在）

研究代表者および主な共同研究者の研究業績のうち、本研究課題に関連するもののみを、現在から順に発表年次を過去に遡って記入してください。

[雑誌論文]

#### (1) Anomalous $^{125}\text{Te}$ Nuclear Spin Relaxation Coincident with Charge Kondo Behavior in

Superconducting  $\text{Pb}_{1-x}\text{Tl}_x\text{Te}$ , H. Mukuda, T. Matsumura, S. Maki, M. Yashima, Y. Kitaoka, K.

Miyake, H. Murakami, P. Giraldo-Gallo, T. H. Geballe, and I. R. Fisher,

J. Phys. Soc. Jpn. 87, 023706 (2018)

#### (2) $^{125}\text{Te}$ -NMR Study in Novel Superconductor $\text{Pb}_{1-x}\text{Tl}_x\text{Te}$ with Valence Skipping

- Dopants, H. Mukuda, M. Yashima, T. Matsumura, S. Maki, Y. Kitaoka, K. Miyake, H. Murakami, P. Giraldo-Gallo, T. H. Geballe, and I. R. Fisher, *J Supercond. Nov. Magn.* (2018). <https://doi.org/10.1007/s10948-018-4886-2>. (査読有)
- (3) Three superconducting phases with different categories of pairing in hole- and electron-doped  $\text{LaFeP}_{1-x}\text{As}_x\text{O}$ , S. Miyasaka, M. Uekubo, H. Tsuji, M. Nakajima, and S. Tajima, T. Shiota, H. Mukuda, H. Sagayama, H. Nakao, R. Kumai, and Y. Murakami, *Phys. Rev. B* 95, 214515 (2017).
- (4) Superconductivity and Antiferromagnetic Spin Fluctuations in  $\text{LaFe}(\text{As}_{1-x}\text{Px})(\text{O}_{1-y}\text{F}_y)$  probed by  $^{31}\text{P}$ -NMR, T. Shiota, H. Mukuda, M. Uekubo, F. Engetsu, M. Yashima, Y. Kitaoka, K. T. Lai, H. Usui, K. Kuroki, S. Miyasaka, and S. Tajima, *Journal of Physics: Conference Series*, 807, 052006 (2017)
- (5) Enhancement of  $T_c$  in  $\text{CeIr}(\text{In}_{1-x}\text{Cdx})_5$  studied by In-NQR, M. Yashima, K. Tani, K. Nishimoto, H. Mukuda, Y. Kitaoka, F. Honda, R. Settai, and Y. Onuki, *Journal of Physics: Conference Series*, 807, 052004 (2017)

[学会発表]

- (1) 「バレンススキップ現象が引き起こす電荷近藤効果と超伝導～ $\text{Pb}_{1-x}\text{Tl}_x\text{Te}$  における NMR 緩和率の異常～」 椋田秀和, 一般講演(口頭)、 高温超伝導フォーラム第5回会合 岩手大学理工学部テクノホール、2017年9月25日 (月)
- (2) ”Charge Kondo Effect and Superconductivity in  $\text{Pb}_{1-x}\text{Tl}_x\text{Te}$  probed by  $^{125}\text{Te}$ -NMR”, J-Physics 2017 International Workshop on Multipole Physics and Related Phenomena、 H. Mukuda、一般講演(口頭)、 Hachimantai Iwate, Sep 27, 2017
- (3) 有機超伝導体  $\beta''\text{-(ET)}_4\text{[(H}_3\text{O)Ga(C}_2\text{O}_4\text{)}_3\text{]Z}$  ( $\text{Z} = \text{CH}_2\text{Cl}_2, \text{PhNO}_2$ ) の D-NMR 八島光晴, 吉田幸司, 椋田秀和, 北岡良雄, 今城周作 A, 坪広樹 A, 中澤康浩 A 2017年9月 日本物理学会 秋季大会、岩手大学
- (4) A15型超伝導体  $\text{V}_3\text{Si}$  の Si-NMR による研究 II 安藝将也, 川崎祐, 岸本豊, 中村浩一, 小山岳秀 B, 水戸毅 B, 八島光晴 C, 椋田秀和 C, 小手川恒 D, 菅原仁 D, 2017年9月 日本物理学会 秋季大会、岩手大学
- (5) 三層型超低ドーパ銅酸化物における c 軸磁場下での Vortex 状態とスピン分極 坂本拓矢, 椋田秀和, 寺西慎伍, 八島光晴, 北岡良雄, 足立伸太郎 A, 石田茂之 B, 永崎洋 B, 内田慎一 B, 伊豫彰 B, 渡辺孝夫 A, 2017年9月 日本物理学会 秋季大会、岩手大学
- (6) Tl-NMR による  $\text{Pb}_{1-x}\text{Tl}_x\text{Te}$  超伝導体におけるドーパントの局所状態と電荷近藤効果 八島光晴, 堀川瑠星, 松村隆史, 牧翔太, 椋田秀和, 村上博成, P. Giraldo-Gallo, T. Geballe, I. Fisher, 21aF31-10、岩手大, Sep 21, 2017
- (7) 「バレンススキップ現象に由来する電荷近藤効果と新奇超伝導機構の探索」 椋田秀和, 一般講演(posters), 第2回豊中地区研究交流会 (阪大), 2018.1.10
- (8) 「新奇超伝導機構の探索」 椋田秀和, 一般講演(口頭)、ワークショップ「高温超伝導体とその関連物質における新奇な物理」 Sendai, Tohoku univ., 31Jan -1 Feb / 2018

- (9) 空間反転対称性の破れた超伝導体  $\text{PbTaSe}_2$  の合成と NMR/NQR 測定 横井滉平 A, 八島光晴 B, 村川寛 A, 椋田秀和 B, 酒井英明 A, C, 花咲徳亮 A 2018年3月 日本物理学会 春季大会、東京理科大
- (10) 重水素置換した有機超伝導体  $\beta''\text{-(ET)}_4\text{[(H}_3\text{O)Ga(C}_2\text{O}_4\text{)}_3\text{]Z}$  ( $\text{Z} = \text{CH}_2\text{Cl}_2, \text{PhNO}_2$ ) における D-NMR、八島光晴, 吉田幸司, 椋田秀和, 北岡良雄, 今城周作 A, 坪広樹 A, 中澤康浩 A 2018年3月 日本物理学会 春季大会、東京理科大
- (11) PbTe 系における電荷近藤効果の微視的電子状態とドーパント依存性 八島光晴, 堀川瑠星, 松村隆史, 牧翔太, 椋田秀和, 三宅和正 村上博成, P. Walmsley, P. Giraldo-Gallo, T. Geballe, I. Fisher、日本物理学会 第73回 一般講演(口頭) 24pK504-12, 東京理科大、野田、2018年3月24日
- (12) P-NMR による  $\text{LaFe(As,P)(O,H)}$  系の過剰電子ドーパ域にわたる軌道成分に依存した多重スピン揺らぎ、八島光晴, 鈴木一弘, 塩田貴佳, 椋田秀和, 上久保将大 A, 宮坂茂樹 A, 田島節子 A 2018年9月 日本物理学会 秋季大会、同志社大
- (13)  $(\text{Pb,Tl})\text{Te}$  超伝導体における不純物(Tl)サイトから見た NMR 緩和率の異常と電荷近藤効果 堀川瑠星, 八島光晴, 松村隆史, 牧翔太, 椋田秀和, 村上博成, P. Giraldo-Gallo, T. Geballe, I. Fisher 2018年9月 日本物理学会 秋季大会、同志社大
- (14) A15 型超伝導体  $\text{V}_3\text{Si}$  の Si-NMR による研究、森寛央, 野尻野旭, 川崎祐 A, 岸本豊 A, 中村浩一 A, 小山岳秀 B, 水戸毅 B, 八島光晴 C, 椋田秀和 C, 小手川恒 D, 菅原仁 D 2018年9月 日本物理学会 秋季大会、同志社大
- (15) 水素ドーパした  $\text{LaFeAs(O,H)}$  系における As サイトの P および Sb 置換した電子状態 鈴木一弘, 八島光晴, 塩田貴佳, 椋田秀和, 上久保将大 A, 辻拡和 A, 宮坂茂樹 A, 田島節子 A 2018年9月 日本物理学会 秋季大会、同志社大
- (16) A15 型超伝導体  $\text{V}_3\text{Si}$  の Si-NMR による研究 野尻野旭, 森寛央, 川崎祐 A, 岸本豊 A, 中村浩一 A, 小山岳秀 B, 水戸毅 B, 八島光晴 C, 椋田秀和 C, 小手川恒 D, 菅原仁 D 2019年3月 日本物理学会 春季大会、九州大
- (17) 大きな熱電変換出力因子をもつ  $\text{YbSi}_2$  の NMR 実験による動的電子状態 古和航, 八島光晴, 椋田秀和, 西出聡悟 A, S. Tanusilp B, 早川純 A, 黒崎健 B 2019年3月 日本物理学会 春季大会、九州大
- (18) 大きな鉄-鉄間距離をもつ鉄系超伝導体  $\text{Sr}_4\text{Sc}_2\text{O}_6\text{Fe}_2(\text{As}_{1-x}\text{Px})_2$  における局所構造と超伝導と電子相関 中村昂矢, 阪野文秀, 塩田貴佳, 圓月風子, 八島光晴, 椋田秀和, Y.F.Guo A, 山浦一成 A, 室町英治 A 2019年3月 日本物理学会 春季大会、九州大
- (19) ドーパントサイトから見た  $(\text{Pb}_{1-x}\text{Tlx})\text{Te}$  超伝導体における NMR 緩和率の異常と電荷近藤効果 堀川瑠星, 八島光晴, 松村隆史, 牧翔太, 椋田秀和, 三宅和正 A, 村上博成 B, P. Walmsley C, P. Giraldo-Gallo C, T. Geballe C, I. Fisher C 2019年3月 日本物理学会 春季大会、九州大
- (20) 過剰電子ドーパ  $\text{La}_{1111}$  系超伝導状態における高温域のスピン揺らぎ 鈴木一弘, 八島光晴, 塩田貴佳, 椋田秀和, 上久保将大 A, 辻拡和 A, 宮坂茂樹 A, 田島節子 A 2019年3月 日本物理学会 春季大会、九州大

- (21) 過剰電子ドーピングされた新しい Fe 系超伝導体における NMR/NQR 小内貴祥, 八島光晴, 椋田秀和, 伊豫彰 A, 石田茂之 A, 永崎洋 A, 吉田良行 A, 川島健司 B 2019 年 3 月 日本物理学会 春季大会、九州大
- (22) Spin polarization in vortex-solid phase in heavily-underdoped Bi2223 Hidekazu Mukuda (Osaka Univ.) The research forefront of high-Tc cuprates May 23 Tue. - 24 Wed. 2017 Iwamatsu Ryokan, Sakunami Onsen, Sendai, Japan
- (23) 「バレンススキップ現象が引き起こす電荷近藤効果と超伝導」椋田秀和 (阪大基礎工) 京都大学基礎物理学研究所研究会「超伝導研究の最先端：多自由度、非平衡、電子相関、トポロジー、人工制御」2017 年 6 月 19 日(月)–21 日(水) 湯川記念館パナソニック国際交流ホール
- (24) ”Spin polarization in vortex-solid phase in heavily-underdoped Bi2223” H. Mukuda SCES2017, Jul 16-21, Prague, Czech
- (25) ”Charge Kondo Effect and Superconductivity in Pb1-xTlxTe” H. Mukuda SCES2017, Jul 16-21, Prague, Czech
- (26) ”Charge Kondo Effect and Superconductivity in Pb1-xTlxTe probed by 125Te-NMR” H. Mukuda J-Physics 2017 International Workshop on Multipole Physics and Related Phenomena 27-Sep-17 Hachimantai Iwate
- (27) 「多層型銅酸化物の低ドーピング域での磁場誘起磁性」椋田秀和 (阪大基礎工) ワークショップ「高温超伝導体とその関連物質における新奇な物理」第 7 回東北大中性子グループワークショップおよび KEK 構造物性研究センター「局所構造誘起バルク現象」プロジェクトワークショップ 平成 30 年 1 月 31 日–2 月 1 日、東北大学金属材料研究所
- (28) LaFeAsO 系の 3 つの超伝導相ごとに異なる多軌道由来の多重スピン揺らぎ 椋田秀和 (阪大基礎工) 京都大学基礎物理学研究所研究会「電子相関が生み出す新規な秩序と超伝導現象：トポロジー、液晶状態、動的現象」2018 年 5 月 7 日-9 日 湯川記念館パナソニック国際交流ホール
- (29) ”Charge Kondo Effect and Superconductivity in Pb1-xTlxTe probed by 125Te-NMR” H. Mukuda ICSM2018, 4/29-5/3, Antalya, Turkey (Poster) 招待講演
- (30) Superconducting transition temperature and re-emergence of antiferromagnetic order in LaFe(As1-xPx)(O1-yFy) H. Mukuda ICSM2018, 4/29-5/3, Antalya, Turkey (Poster)
- (31) 「LaFeAsO 系の 3 つの超伝導相ごとに異なる多軌道由来の多重スピン揺らぎ」椋田秀和 (阪大基礎工) 高温超伝導フォーラム第 6 回会合、9.12.2018 京都大学
- (32) 「原子核スピンをもちいた超伝導研究」椋田秀和 (阪大基礎工) 第 3 回豊中地区研究交流会 2018 年 12 月 18 日, 阪大 豊中キャンパス
- (33) 「バレンススキップ元素を含む物質における電荷近藤効果と超伝導」椋田秀和 (阪大基礎工) つくば-柏-本郷 超伝導かけはしプロジェクト ワークショップ (2) 2019 年 1 月 15 日-16 日 物質・材料研究機構

[その他]

受賞： 第23回超伝導科学技術賞 (一般社団法人 未踏科学技術協会/超伝導科学技術研究会)  
「多層型銅酸化物における高温超伝導相図のNMRによる解明」  
清水直、北岡良雄、伊豫彰、常盤和靖諸氏と共同受賞 (2019. 4. 15)

**外部資金獲得状況・申請状況 (本研究課題に関連して、科研費、JST等の競争的資金、受託研究、奨学寄付金を受給された場合、また、申請された場合はその状況を記入ください)**

この未来ラボの共同研究者のメンバーに入ってもらい申請していた科研費挑戦的萌芽研究が、今年度から獲得できた。原子価スキップ現象が巨大な電子の集団となったときに現れる物性物理学の新概念の創成へ向け、阪大を中心に拠点形成ができる新しい段階へ研究を加速させることができた。本研究がきっかけとなり、民間企業である日立との共同研究をスタートした。

**参考となるHP等**