

令和 2 年 6 月 15 日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K14328

研究課題名(和文) 純良単結晶によるウラン系エキゾチック超伝導の対称性と磁気応答の研究

研究課題名(英文) Study of superconducting symmetry and magnetic response in the uranium exotic superconductors using high-quality single crystals

研究代表者

清水 悠晴 (Shimizu, Yusei)

東北大学・金属材料研究所・助教

研究者番号：90751115

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では強い相関を持つ遍歴5f電子がもとなり非従来型超伝導を示すウラン化合物に着目し、超伝導対称性及び磁気応答、非フェルミ液体、強磁場物性を探索した。(U,Th)Be13の超伝導準粒子励起構造や超伝導状態での磁気応答を明らかにし、UBe13の高圧下極低温実験からその上部臨界磁場の圧力・温度依存性がスピン三重項超伝導で説明できることが明らかになった。またUPd2Al3・UNi2Al3の超伝導状態における極低温物性測定及びU(Pd1-xNix)2Al3のパルス強磁場磁化測定も実施した。U(Pd1-xNix)2Al3において遍歴メタ磁性転移(UNi2Al3では78T)を観測することに成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

アクチノイド化合物は、5f電子が遍歴性と局在性の両面的な性質を持ち、強いスピン軌道相互作用を持つことによって、非従来型超伝導のみならず、多極子秩序、非フェルミ液体、トポロジカル絶縁体など、多岐にわたる異常な量子現象をもたらす。アクチノイド元素であるウラン元素を含む超伝導は、これまでに見つかっている超伝導体の中でも最も異常な超伝導・磁気特性を持つといっても過言ではなく、従来の遍歴3d電子系や局在4f電子系の物理の枠組みでは捉えられない重要な学術的位置を占めている。特に、30年以上も未解明であったUBe13、(U,Th)Be13の超伝導対称性に関する成果は非常に高い学術的価値がある。

研究成果の概要(英文)：In the present work, we studied the superconducting symmetry, magnetic response, non-fermi-liquid behavior, and high-field properties of exotic uranium superconductors. The quasiparticle excitations in the unconventional superconducting state of (U,Th)Be13 and its magnetic response have been studied using single-crystalline samples, and it has been revealed that the second transition is owing to the change in the superconducting order parameter. The superconducting symmetry of UBe13 has also been investigated using the temperature variation of upper critical field  $H_{c2}$  under high pressures. It has been shown that the pressure and temperature dependence of the  $H_{c2}$  in UBe13 is successfully explained by the spin-triplet superconductivity. Moreover, the physical properties of heavy-fermion superconductors UPd2Al3 and UNi2Al3 have also been investigated using single-crystalline samples. The metamagnetic transition has been observed for the first time in UNiAl3 (at 78 T) and U(Pd,Ni)2Al3.

研究分野：強相関電子磁性・超伝導

キーワード：ウラン化合物 非従来型超伝導 超伝導対称性 磁気応答 純良単結晶 強磁場物性

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

希土類・アクチノイド元素を含む重い電子系化合物においては、従来の枠組みでは理解できない超伝導や非フェルミ液体などの特異な量子現象が発見されている。非従来型超伝導体は、「超伝導と磁性の共存」や「時間反転対称性の破れた磁気的な超伝導秩序変数」などのエキゾチックな振舞いを起こすと考えられている。その超伝導発現機構に関しては、磁気量子ゆらぎや、電気多極子等の量子ゆらぎを媒介としたメカニズムの可能性が議論されているが、明確に実証された例は非常に少なく、国内外で精力的に実験・理論研究が行われている。ウラン系化合物における非従来型超伝導の対称性の解明は、Ce、Pr 元素を含む  $f$  電子系超伝導のみならず、有機超伝導、鉄系超伝導、トポロジカル超伝導などのエキゾチック超伝導発現機構解明への波及効果をもたらす。さらに、ウラン化合物においては極低温・超高圧・強磁場下における未踏領域が多く残されており、複合極限環境下における精密物性による超伝導特性の解明だけではなく、未踏領域に潜む新奇物性現象の探索を行うことが重要である。本研究で着目した  $\text{UBe}_{13}$  ( $T_c = 0.85 \text{ K}$ ) や  $\text{UNi}_2\text{Al}_3$  ( $T_c = 1.1 \text{ K}$ ) は、約30年前に発見されたウラン系超伝導体であるが[文献①、②]、異常かつ興味深い超伝導特性を持つにも関わらず、単結晶試料育成の困難さゆえ、超伝導特性を理解する上で要となる超伝導ギャップ構造や磁気応答などについては未解明の部分が多い。そのため、純良単結晶試料を用いた希釈冷凍機温度領域までの極低温精密物性測定が必須であった。

2. 研究の目的

(1) 異常な多重相図 [図 1 (a)] を示す  $\text{U}_{1-x}\text{Th}_x\text{Be}_{13}$  において[文献③]、その超伝導ギャップ構造(準粒子励起構造)を明らかにする。さらに、超伝導状態での磁気応答を調べ、 $T_{c2}$  における未解明の相転移の起源を明らかにし、「縮退した超伝導秩序変数に関する相転移」か「超伝導相内の磁気転移」なのかを解明する。一方、(2)  $\text{UNi}_2\text{Al}_3$  の超伝導ギャップ構造と超伝導相の磁気応答を調べ、スピン三重項超伝導の可能性をマクロ物性により検証し、さらにその強磁場物性を探索する。

3. 研究の方法

主に  $\text{U}_{1-x}\text{Th}_x\text{Be}_{13}$ 、 $\text{UNi}_2\text{Al}_3$  系の純良単結晶育成を行った。単結晶育成はフラックス法、チョクラスキー引き上げ法により行い、X線回折や、PPMS(電気抵抗・比熱  $0.3 < T < 300 \text{ K}$ )、MPMS(磁化  $2 < T < 300 \text{ K}$ ) などの基礎物性測定装置により試料評価を行った。得られた純良単結晶試料に加え、多結晶試料に対しても、希釈冷凍機・ $^3\text{He}$ 冷凍機を用いて極低温精密物性測定や高圧下物性測定を行った。さらに、パルス磁場を用いて上記ウラン系化合物の強磁場物性探索を行った。

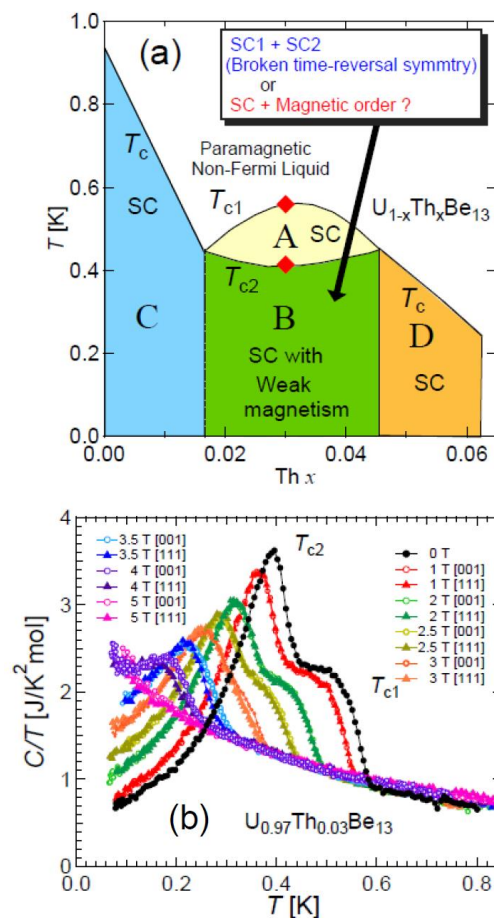


図 1 . (a)  $\text{U}_{1-x}\text{Th}_x\text{Be}_{13}$  の  $T$ - $x$  相図。(b)  $\text{U}_{0.97}\text{Th}_{0.03}\text{Be}_{13}$  純良単結晶における [001], [111] 方向の極低温磁場中比熱の結果。

#### 4. 研究成果

##### (1) $U_{1-x}Th_xBe_{13}$ の超伝導相の研究

$U_{0.97}Th_{0.03}Be_{13}$  純良単結晶に関しては、立方晶軸[001], [111], [110]における異方性をもとに、超伝導特性を磁場中比熱測定から探索した。比熱の磁場・角度依存性から、超伝導準粒子励起の詳細を調べ、その超伝導ギャップ構造を明らかにした。さらに極低温精密磁化測定を行い、 $U_{1-x}Th_xBe_{13}$  の超伝導状態における磁気応答を調べ、未解明の相転移異常  $T_{c2}$  が超伝導秩序変数に関する相転移なのかを探索した。極低温比熱測定からは [図 1 (b)]、高温  $T_{c1} \sim 0.6$  K 転移と低温  $T_{c2} \sim 0.4$  K 転移が異なる磁場中異方性を示すことがわかった [図 2 (a)]。これは  $U_{1-x}Th_xBe_{13}$  において本質的に対称性の異なる秩序状態が  $T_{c1}$  と  $T_{c2}$  で起こることを示唆する。さらに、 $U_{1-x}Th_xBe_{13}$  の超伝導状態における極低温直流磁化測定からは [図 2 (b)]、反強磁性転移を示すような振舞いは  $T_{c2} \sim 0.35$  K (1.5 T、超伝導領域) で観測されず、 $U_{1-x}Th_xBe_{13}$  の二段転移は超伝導対称性に関する相転移である可能性が高いことがわかった。さらに極低温比熱の磁場角度依存性からは超伝導ギャップにラインノードをもつ  $UPd_2Al_3$  のような  $C(H) \propto H^{1/2}$  的な振舞いは見られず、 $U_{1-x}Th_xBe_{13}$  において等方的かつフルギャップ的な準粒子励起が観測された [図 2 (c)]。これらの実験結果から、 $U_{1-x}Th_xBe_{13}$  [図 1 (a) 及び図 2 (a) の B 相] は  $T_{c2}$

以下ではフルギャップのかつ時間反転対称性の破れた超伝導が実現している可能性が高いことが明らかになった。 $E_u$  対称性のフルギャップの対称性  $2z k_z - x k_x - y k_y$  やポイントノードをもつ  $x k_x - y k_y$ 、及びそれらの線形結合  $x k_x + \omega y k_y + \omega^2 z k_z$  ( $\omega = e^{i(2\pi/3)}$ ) ( $\langle 111 \rangle$  にのみポイントノードを持つ) の組み合わせにより  $U_{1-x}Th_xBe_{13}$  における多重相図を説明できることが明らかになった。以下の成果(2)との対応も考慮すると、スピン三重項混合状態  $A_{1u} + iE_u$  などの non-unitary 超伝導状態が実現している可能性もある。

<主要研究成果>

Y. Shimizu *et al.*, Phys. Rev. B **96**, 100505(R) (2017). [Editors' Suggestion]

Y. Shimizu *et al.*, Physica B **536**, 553 (2018).

##### (2) $UBe_{13}$ の超高压・極低温下物性

$UBe_{13}$  に対し極低温 0.1 K・超高压 10 GPa までの極限環境下での超伝導・常伝導の圧力依存性を調べた。その結果、6 GPa で超伝導相が消失し、非フェルミ液

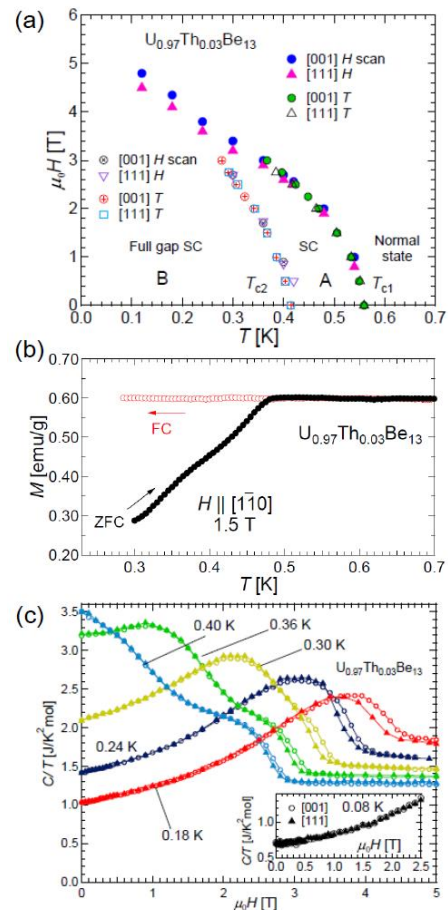


図 2. (a) 二段転移を示す超伝導体  $U_{0.97}Th_{0.03}Be_{13}$  における超伝導温度 - 磁場相図。(b) 二段転移における極低温磁化の温度依存性。(c) 極低温比熱の磁場依存性。

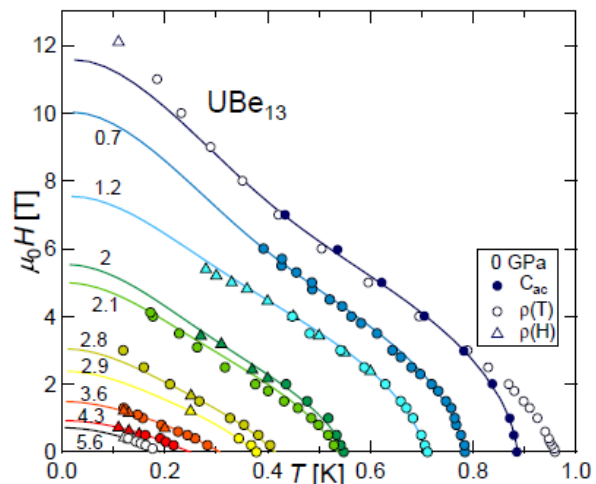


図 3. (a)  $UBe_{13}$  の上部臨界磁場の圧力依存性とスピン三重項  $A_{1u} - E_u$  モデルによる計算。

体 - フェルミ液体クロスオーバーが起こることを明らかにした。特に、上部臨界磁場  $H_{c2}$  は常圧から高圧に向かうにつれ Pauli limit が効くような振舞いから orbital limit 的な振舞いを示すことが明らかになった。 $\text{UBe}_{13}$  の  $H_{c2}$  の全圧力依存性はスピン三重項超伝導  $E_u$  対称性と  $A_{1u}$  対称性との混合状態によって説明できることが明らかになった (図 3)。常圧下ではフルギャップのスピン三重項超伝導  $A_{1u}$  が優性であると考えれば、常圧下における比熱のフルギャップ的な準粒子励起の振舞い[文献④] もうまく説明する。このように  $\text{UBe}_{13}$  では常圧下及び高圧下でスピン三重項超伝導  $A_{1u}$  と  $E_u$  の縮退が起こっており、一方で格子定数が母物質よりも大きく負の圧力に対応する Th 置換系の低温 B 相では  $A_{1u}+iE_u$  などの non-unitary 状態が実現している可能性がある。本研究により、これまで未解明だった非従来型超伝導  $\text{UBe}_{13}$  の常圧・高圧下領域及び置換系  $\text{U}_{1-x}\text{Th}_x\text{Be}_{13}$  の異常な超伝導多重相図を系統的に理解する上での重要な成果が得られた。

<主要研究成果>

Y. Shimizu *et al.*, Phys. Rev. Lett. **122**, 067001 (2019).; プレスリリース『超高压実験で明らかにしたウラン系エキゾチック超伝導と異常金属状態』; 国際プレスリリース『Triplet Superconductivity Demonstrated under High Pressure』; 科学新聞 3721 号 8 面 (2019 年 3 月).

(3)  $\text{UNi}_2\text{Al}_3$  における超伝導相の探索

育成した単結晶  $\text{UNi}_2\text{Al}_3$  試料における極低温物性測定を行った。まず磁場中比熱測定から、超伝導状態における準粒子励起を調べ、さらに極低温磁化測定によって反強磁性と共存する超伝導状態の磁気応答を調べた。良質かつ十分な重量の超伝導試料を得ることが非常に困難だったため、超伝導特性についてはさらなる研究が必要である。現在、この系に対し比熱・磁化測定によって超伝導特性の研究を継続して行っている。

(4)  $\text{U}(\text{Pd}_{1-x}\text{Ni}_x)_2\text{Al}_3$  の遍歴メタ磁性

超伝導特性だけではなく、 $\text{U}(\text{Pd}_{1-x}\text{Ni}_x)_2\text{Al}_3$  の強磁場物性も探索した。 $\text{UNi}_2\text{Al}_3$  における超伝導は試料依存性が大きく不純物などに非常に敏感であり、超伝導特性を明らかにする上で十分な量の純良単結晶を得ることが非常に難しい。一方、常磁性状態・反強磁性状態( $T_N = 4.2$  K)は超伝導状態( $T_{sc} = 1.1$  K)と比べ、比較的試料依存性による影響が少ない。そのため、本研究では十分な重量の単結晶試料を用い、その磁気特性の探索及びパルス強磁場磁化測定を行った。図 4 は

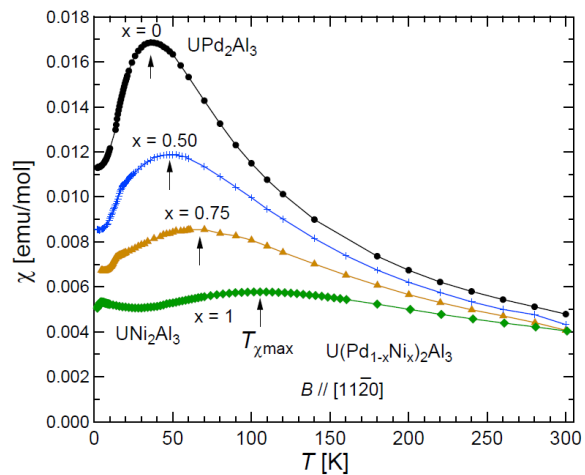


図 4. 単結晶  $\text{U}(\text{Pd}_{1-x}\text{Ni}_x)_2\text{Al}_3$  ( $x = 0, 0.5, 0.75, 1$ ) における磁化率の温度依存性。

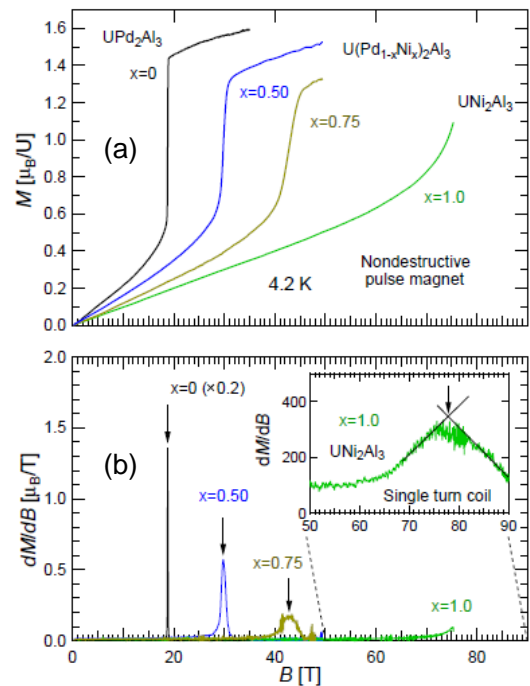


図 5.  $\text{U}(\text{Pd}_{1-x}\text{Ni}_x)_2\text{Al}_3$  の (a) 磁化過程における遍歴メタ磁性転移の観測。 (b) その微分磁化。挿入図：一卷きコイルによるメタ磁性の観測。

U(Pd<sub>1-x</sub>Ni<sub>x</sub>)<sub>2</sub>Al<sub>3</sub> における磁化率の温度依存性であるが、メタ磁性を起こす物質によく見られる磁化率極大現象が観測された。母物質 UPd<sub>2</sub>Al<sub>3</sub> は 18.5 T において一次相転移の遍歴メタ磁性を示すが (図 5)、本研究では、単結晶試料 U(Pd<sub>1-x</sub>Ni<sub>x</sub>)<sub>2</sub>Al<sub>3</sub> において強磁場領域で遍歴メタ磁性転移を系統的に観測することに成功した (図 5、6)。特に母物質 UNi<sub>2</sub>Al<sub>3</sub> は  $T_N = 4.2$  K で反強磁性  $T_{SC} = 1.1$  K で超伝導を示す重い電子系物質であるが、この系においてウラン系化合物としては最高磁場にあたる 78 T で遍歴メタ磁性転移を観測することに成功した。また、図 7 に示すように U(Pd<sub>0.5</sub>Ni<sub>0.5</sub>)<sub>2</sub>Al<sub>3</sub> における詳細な磁場 - 温度相図を得た。この磁場 - 温度相図から、低磁場領域における磁化率極大温度 ( $T_{\chi_{max}}$ ) と反強磁性相が、高磁場領域において現れる強磁性不安定性と競合することで、この系に特徴的な一次のメタ磁性転移及び三重臨界点が起きることが明らかになった。特に、昨年重い電子系化合物 UTe<sub>2</sub> において強磁場 35 T での一次のメタ磁性転移及びリエンタラントスピン三重項超伝導が発見されるなど[文献⑤]、ウラン化合物における強磁場物性と超伝導の関連について強い関心もたれている。本研究によるウラン系超伝導体における遍歴メタ磁性転移の観測は、エキゾチック超伝導体の強磁場物性と超伝導発現機構の関連を知る上で重要な手がかりとなると考えられる。

<主要研究成果>

K. Mochizuki, Y. Shimizu *et al.*, Phys. Rev. B **100**, 165137 (2019).; 東北大学・東京大学共同プレスリリース『ウラン化合物におけるメタ磁性の世界最高記録 90T までの強磁場下で初めて観測した遍歴メタ磁性』; 科学新聞 3753 号 4 面 (2019 年 11 月)。

<引用文献>

- ① H. R. Ott *et al.*, Phys. Rev. Lett. **50**, 1595 (1983).
- ② C. Geibel *et al.*, Z Phys. B Cond. Matter **83**, 305 (1991).
- ③ H. R. Ott *et al.*, Phys. Rev. B **31**, 1651(R) (1985).; R. H. Heffner *et al.*, Phys. Rev. Lett. **65**, 2816 (1990).
- ④ Y. Shimizu *et al.*, Phys. Rev. Lett. **114**, 147002 (2015).
- ⑤ S. Ran *et al.*, Science **365**, 684 (2019).

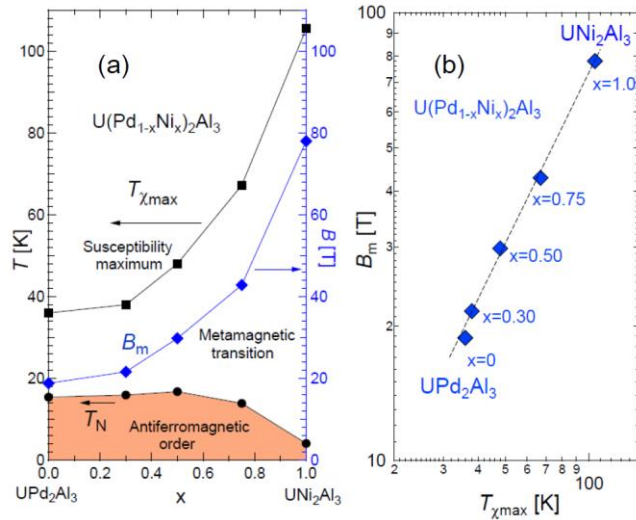


図 6. U(Pd<sub>1-x</sub>Ni<sub>x</sub>)<sub>2</sub>Al<sub>3</sub> の(a) 反強磁性転移温度とメタ磁性転移磁場の Ni 濃度依存性 ( $T$ - $x$  相図)。 (b) U(Pd<sub>1-x</sub>Ni<sub>x</sub>)<sub>2</sub>Al<sub>3</sub> におけるメタ磁性転移磁場と磁化率極大温度  $T_{\chi_{max}}$  の比例関係。

図 7 に示すように U(Pd<sub>0.5</sub>Ni<sub>0.5</sub>)<sub>2</sub>Al<sub>3</sub> における詳細な磁場 - 温度相図を得た。この磁場 - 温度相図から、低磁場領域における磁化率極大温度 ( $T_{\chi_{max}}$ ) と反強磁性相が、高磁場領域において現れる強磁性不安定性と競合することで、この系に特徴的な一次のメタ磁性転移及び三重臨界点が起きることが明らかになった。特に、昨年重い電子系化合物 UTe<sub>2</sub> において強磁場 35 T での一次のメタ磁性転移及びリエンタラントスピン三重項超伝導が発見されるなど[文献⑤]、ウラン化合物における強磁場物性と超伝導の関連について強い関心もたれている。本研究によるウラン系超伝導体における遍歴メタ磁性転移の観測は、エキゾチック超伝導体の強磁場物性と超伝導発現機構の関連を知る上で重要な手がかりとなると考えられる。

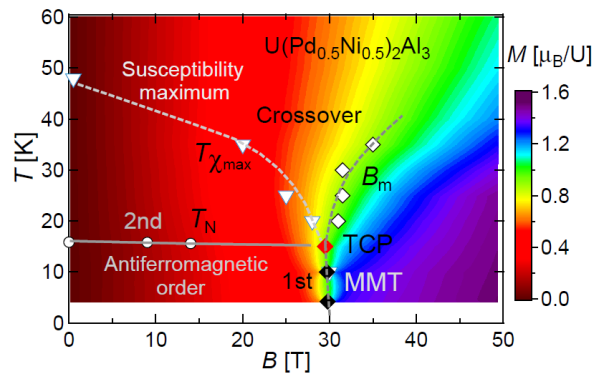


図 7. U(Pd<sub>0.5</sub>Ni<sub>0.5</sub>)<sub>2</sub>Al<sub>3</sub> の磁場 - 温度相図。カラーは磁化の大きさ (紫色部分がメタ磁性によって誘起された磁化) を示す。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計31件（うち査読付論文 31件／うち国際共著 8件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Dai Aoki, Ai Nakamura, Fuminori Honda, DeXin Li, Yoshiya Homma, Yusei Shimizu, Yoshiki J. Sato, Georg Knebel, Jean-Pascal Brison, Alexandre Pourret, Daniel Braithwaite, Gerard Lapertot, Qun Niu, Michal Valiska, Hisatomo Harima, and Jacques Flouquet	4. 巻 88
2. 論文標題 Unconventional Superconductivity in Heavy Fermion UTe2	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 043702 1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.88.043702	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Li D. X., Honda F., Miyake A., Homma Y., Haga Y., Nakamura A., Shimizu Y., Maurya A., Sato Y. J., Tokunaga M., Aoki D.	4. 巻 99
2. 論文標題 Magnetic and electrical properties of the ternary compound U2Ir3Si5 with one-dimensional uranium zigzag chains	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 067001 1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.99.054408	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Shimizu Yusei, Braithwaite Daniel, Aoki Dai, Salce Bernard, Brison Jean-Pascal	4. 巻 122
2. 論文標題 Spin-Triplet p-Wave Superconductivity Revealed under High Pressure in UBe13	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 067001 1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.122.067001	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Shota Nakamura, Toshiro Sakakibara, Yusei Shimizu, Shunichiro Kittaka, Yohei Kono, Yoshinori Haga, Jiri Pospisil, and Etsuji Yamamoto	4. 巻 5
2. 論文標題 Magnetization study on the ising ferromagnet URhGe with high-precision angle-resolved magnetic field near the hard axis	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Progress in Nuclear Science and Technology	6. 最初と最後の頁 123-127
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.15669/pnst.5.123	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Miyake Atsushi, Sandratskii Leonid M., Nakamura Ai, Honda Fuminori, Shimizu Yusei, Li Dexin, Homma Yoshiya, Tokunaga Masashi, Aoki Dai	4. 巻 98
2. 論文標題 Magnetic field effect on the chiral magnetism of noncentrosymmetric UPtGe: Experiment and theory	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 174436 1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.98.174436	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Nakamura Shota, Kittaka Shunichiro, Sakakibara Toshiro, Shimizu Yusei, Kono Yohei, Haga Yoshinori, Pospisil Jiri, Yamamoto Etsuji	4. 巻 8
2. 論文標題 Investigation of the tricritical point of the ising ferromagnet URhGe by angle-resolved measurements	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 AIP Advances	6. 最初と最後の頁 101305 ~ 101305
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5042119	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Y. Tokunaga, A. Nakamura, D. Aoki, Y. Shimizu, Y. Homma, F. Honda, H. Sakai, Hattori T., Kambe S.	4. 巻 98
2. 論文標題 Easy-plane XY spin fluctuations in the cycloidal magnet UPTGe studied via field-orientation-dependent Pt195 NMR	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 014425 1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.98.014425	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yoshiki J. Sato, Yusei Shimizu, Ai Nakamura, Yoshiya Homma, Dexin Li, Arvind Maurya, Fuminori Honda, and Dai Aoki	4. 巻 87
2. 論文標題 Magnetic Properties of Heavy Fermion Compound Ce5Si4 with Chiral Structure	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 074701 1-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.87.074701	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Hidaka Hiroyuki, Nagata Ryoma, Tabata Chihiro, Shimizu Yusei, Miura Naoyuki, Yanagisawa Tatsuya, Amitsuka Hiroshi	4. 巻 2
2. 論文標題 Low-temperature x-ray crystal structure analysis of the cage-structured compounds MBe13(M=La,Sm,and U)	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review Materials	6. 最初と最後の頁 053603 1-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevMaterials.2.053603	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Y. Shimizu, S. Kittaka, S. Nakamura, T. Sakakibara, D. Aoki, Y. Homma, A. Nakamura, and K. Machida.	4. 巻 96
2. 論文標題 Quasiparticle excitations and evidence for superconducting double transitions in monocrystalline U0.97Th0.03Be13 (Editors' suggestion)	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 100505(R) 1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.96.100505	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Y. Shimizu, S. Kittaka, T. Sakakibara, and D. Aoki	4. 巻 536
2. 論文標題 Superconducting symmetries and magnetic responses of uranium heavy-fermion systems UBe13 and UPd2Al3	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physica B	6. 最初と最後の頁 553-557
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.physb.2017.09.036	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 S. Nakamura, T. Sakakibara, Y. Shimizu, S. Kittaka, Y. Kono, Y. Haga, J. Pospisil, and E. Yamamoto.	4. 巻 96
2. 論文標題 Wing structure in the phase diagram of the Ising ferromagnet URhGe close to its tricritical point investigated by angle-resolved magnetization measurements (Editors' suggestion)	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 094411 1-9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.96.094411	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -



1. 著者名 H. Hidaka, S. Yamazaki, Y. Shimizu, N. Miura, C. Tabata, T. Yanagisawa, and H Amitsuka.	4. 巻 86
2. 論文標題 Magnetically ordered state and crystalline-electric-field effects in SmBe13	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 J. Phys. Soc. Jpn.	6. 最初と最後の頁 074703 1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.86.074703	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 M. Yokoyama, H. Mashiko, R. Otaka, Y. Oshima, K. Suzuki, K. Tenya, Y. Shimizu, A. Nakamura, and D. Aoki.	4. 巻 95
2. 論文標題 Observation of a new field-induced phase transition and its concomitant quantum critical fluctuations in CeCo(In <sub>1-x</sub> Zn <sub>x</sub> ) <sub>5</sub>	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 224425 1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.95.224425	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 D. X. Li, Y. Homma, A. Nakamura, Y. Shimizu, F. Honda, T. Yamamura, and D. Aoki	4. 巻 268
2. 論文標題 Ferromagnetic cluster glass behavior and large magnetocaloric effect in Ho <sub>2</sub> PtSi <sub>3</sub>	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Solid State Communications	6. 最初と最後の頁 1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ssc.2017.09.010	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 A. Maurya, H. Harima, A. Nakamura, Y. Shimizu, Y. Homma, D. X. Li, F. Honda, Y. J. Sato, and D. Aoki.	4. 巻 87
2. 論文標題 Splitting Fermi surfaces and heavy electronic states in non-centrosymmetric U <sub>3</sub> Ni <sub>3</sub> Sn <sub>4</sub>	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 J. Phys. Soc. Jpn.	6. 最初と最後の頁 044703 1-8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.87.044703	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 S. Tsutsui, Y. Kobayashi, J. Nakamura, M. K. Kubo, S. Amagasa, Y. Yamada, Y. Yoda, Y. Shimizu, H. Hidaka, T. Yanagisawa, H. Amitsuka, A. Yamada, R. Higashinaka, T. D. Matsuda, and Y. Aoki.	4. 巻 238
2. 論文標題 Sm valence states and magnetic properties in SmBe13 and SmTi2Al20 investigated by Sm synchrotron-radiation-based Mossbauer spectroscopy	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Hyperfine Interaction	6. 最初と最後の頁 100 1-8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10751-017-1473-z	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Y. J. Sato, A. Nakamura, Y. Shimizu, A. Maurya, Y. Homma, D. X. Li, F. Honda, and D. Aoki	4. 巻 87
2. 論文標題 Superconducting properties of CeIr3 single crystal	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 J. Phys. Soc. Jpn.	6. 最初と最後の頁 53704
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.87.053704	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Tokunaga Yo, Sakai Hironori, Kambe Shinsaku, Hattori Taisuke, Higa Nonoka, Nakamine Genki, Kitagawa Shunsaku, Ishida Kenji, Nakamura Ai, Shimizu Yusei, Homma Yoshiya, Li DeXin, Honda Fuminori, Aoki Dai	4. 巻 88
2. 論文標題 125Te-NMR Study on a Single Crystal of Heavy Fermion Superconductor UTe2	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 073701-1-4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.88.073701	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Homma Yoshiya, Kakihana Masashi, Tokunaga Yo, Yogi Mamoru, Nakashima Miho, Nakamura Ai, Shimizu Yusei, Li Dexin, Maurya Arvind, Sato Yoshiki J., Honda Fuminori, Aoki Dai, Amako Yasushi, Hedo Masato, Nakama Takao, Onuki Yoshichika	4. 巻 88
2. 論文標題 Magnetic Fluctuation and First-Order Transition in Trillium Lattice of EuPtSi Observed by 151Eu Mossbauer Spectroscopy	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 094702-1-8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.88.094702	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Mochidzuki Kenji, Shimizu Yusei, Kondo Akihiro, Matsuo Akira, Li Dexin, Aoki Dai, Homma Yoshiya, Honda Fuminori, Flouquet Jacques, Nakamura Daisuke, Takeyama Shojiro, Kindo Koichi	4. 巻 100
2. 論文標題 Observation of a metamagnetic transition in the 5f heavy-fermion compound UNi <sub>2</sub> Al <sub>3</sub> : Magnetization studies up to 90 T for single-crystalline U(Pd <sub>1-x</sub> Nix) <sub>2</sub> Al <sub>3</sub>	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 165137-1-8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.100.165137	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Nakamine Genki, Kitagawa Shunsaku, Ishida Kenji, Tokunaga Yo, Sakai Hironori, Kambe Shinsaku, Nakamura Ai, Shimizu Yusei, Homma Yoshiya, Li Dexin, Honda Fuminori, Aoki Dai	4. 巻 88
2. 論文標題 Superconducting Properties of Heavy Fermion UTe <sub>2</sub> Revealed by <sup>125</sup> Te-nuclear Magnetic Resonance	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 113703-1-4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.88.113703	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Aoki Dai, Nakamura Ai, Honda Fuminori, Li DeXin, Homma Yoshiya, Shimizu Yusei, Sato Yoshiki J., Knebel Georg, Brison Jean-Pascal, Pourret Alexandre, Braithwaite Daniel, Lapertot Gerard, Niu Qun, Valiska Michal, Harima Hisatomo, Flouquet Jacques	4. 巻 30
2. 論文標題 Spin-Triplet Superconductivity in UTe <sub>2</sub> and Ferromagnetic Superconductors	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 JPS Conf. Ser.	6. 最初と最後の頁 011065-1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSCP.30.011065	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Honda Fuminori, Kawamura Naomi, Li Dexin, Hirose Yusuke, Homma Yoshiya, Nakamura Ai, Shimizu Yusei, Maurya Arvind, Sato Yoshiki J., Aoki Dai	4. 巻 29
2. 論文標題 Magnetic and Electronic Properties of the Ternary Compound U <sub>2</sub> T <sub>3</sub> Si <sub>5</sub> (T = Rh, Ir)	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 JPS Conf. Ser.	6. 最初と最後の頁 013002-1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSCP.29.013002	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Tsutsui Satoshi, Shimizu Yusei, Hidaka Hiroyuki, Koriki Akinari, Murata Ryoya, Yoda Yoshitaka, Yanagisawa Tatsuya, Amitsuka Hiroshi	4. 巻 30
2. 論文標題 Rare-Earth Atomic Motion in RBe13 (R: La, Pr, Sm)	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 JPS Conf. Ser.	6. 最初と最後の頁 011115-1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSCP.30.011115	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Sato Yoshiki J., Harima Hisatomo, Nakamura Ai, Maurya Arvind, Shimizu Yusei, Homma Yoshiya, Li Dexin, Honda Fuminori, Aoki Dai	4. 巻 30
2. 論文標題 Single Crystal Growth and de Haas-van Alphen Effect of Non-Centrosymmetric Heavy-Fermion Compound UPt5	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 JPS Conf. Ser.	6. 最初と最後の頁 011171-1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSCP.30.011171	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Sato Yoshiki J., Shimizu Yusei, Honda Fuminori, Nakamura Ai, Homma Yoshiya, Maurya Arvind, Li Dexin, Aoki Dai	4. 巻 29
2. 論文標題 Single Crystal Growth and Anisotropy of the Upper Critical Field of CeIr3	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 JPS Conf. Ser.	6. 最初と最後の頁 011007-1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSCP.29.011007	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Maurya Arvind, Honda Fuminori, Shimizu Yusei, Nakamura Ai, Sato Yoshiki J., Homma Yoshiya, Li Dexin, Aoki Dai	4. 巻 29
2. 論文標題 Electrical Transport under Pressure in Non-centrosymmetric URhSn	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 JPS Conf. Ser.	6. 最初と最後の頁 014003-1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSCP.29.014003	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Aoki Dai, Honda Fuminori, Knebel Georg, Braithwaite Daniel, Nakamura Ai, Li DeXin, Homma Yoshiya, Shimizu Yusei, Sato Yoshiki J., Brison Jean-Pascal, Flouquet Jacques	4. 巻 89
2. 論文標題 Multiple Superconducting Phases and Unusual Enhancement of Upper Critical Field in UTe2	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 053705-1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.89.053705	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Miyake Atsushi, Shimizu Yusei, Sato Yoshiki J., Li Dexin, Nakamura Ai, Homma Yoshiya, Honda Fuminori, Flouquet Jacques, Tokunaga Masashi, Aoki Dai	4. 巻 88
2. 論文標題 Metamagnetic Transition in Heavy Fermion Superconductor UTe2	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 063706-1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.88.063706	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Knebel Georg, Kimata Motoi, Valiska Michal, Honda Fuminori, Li DeXin, Braithwaite Daniel, Lapertot Gerard, Knafo William, Pourret Alexandre, Sato Yoshiki J., Shimizu Yusei, Kihara Takumi, Brison Jean-Pascal, Flouquet Jacques, Aoki Dai	4. 巻 89
2. 論文標題 Anisotropy of the Upper Critical Field in the Heavy-Fermion Superconductor UTe2 under Pressure	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 053707-1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.89.053707	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計13件 (うち招待講演 3件 / うち国際学会 5件)

1. 発表者名 清水悠晴, 木俣基, 佐藤芳樹, Maurya Arvind, 本間佳哉, 李徳新, 仲村愛, 本多史憲, 野尻浩之, 青木大
2. 発表標題 重い電子系メタ磁性体UPd2Al3における強磁場ホール効果・磁気抵抗測定
3. 学会等名 日本物理学会2018年秋季大会 (同志社大学)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 清水悠晴, 中村翔太, 望月健生, 河野洋平, 橋高俊一郎, 榊原俊郎, 池田陽一, 石川義和
2. 発表標題 幾何学フラストレーションを持つ重い電子系反強磁性体CePdAlにおける極低温精密磁化測定
3. 学会等名 日本物理学会2018年秋季大会 (同志社大学)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 清水悠晴, Braithwaite Daniel, Brison Jean-Pascal, 青木大, Salce Bernard
2. 発表標題 重い電子系UBe13の非フェルミ液体状態と超伝導の圧力効果
3. 学会等名 日本物理学会2018年秋季大会 (同志社大学)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yusei Shimizu, Fuminori Honda, Yoshiki J. Sato, Arvind Maurya, Yoshiya Homma, Dexin Li, Ai Nakamura, Dai Aoki, Shunichiro Kittaka, Shota Nakamura, and Toshiro Sakakibara
2. 発表標題 Superconductivity and Non-Fermi-Liquid Behavior in U <sub>1-x</sub> Th <sub>x</sub> Be <sub>13</sub>
3. 学会等名 Summit of Materials Science 2018 (SMS2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 清水悠晴
2. 発表標題 U <sub>1-x</sub> Th <sub>x</sub> Be <sub>13</sub> の超伝導多重相における対称性と磁気応答
3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会 (九州大学) (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 清水悠晴, 中村翔太, 望月健生, 河野洋平, 橘高俊一郎, 榊原俊郎, 池田陽一, 石川義和
2. 発表標題 幾何学フラストレーションを持つ重い電子系反強磁性体CePdAlとその置換系における極低温精密磁化測定
3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会 (九州大学)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Y. Shimizu
2. 発表標題 Superconducting Symmetries and Magnetic Responses of Uranium Heavy-Fermion Systems UBe13 and UPd2Al3
3. 学会等名 Strongly Correlated Electron Systems (SCES) 2017, Prague, Czech republic (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Y. Shimizu
2. 発表標題 Superconductivity and Non-Fermi-Liquid Behaviors in UBe13 and Related Compounds
3. 学会等名 International Workshop on Multipole Physics and Related Phenomena (J-Physics) 2017, Hachimantai, Iwate, Japan (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 清水悠晴, 中村翔太, 橘高俊一郎, 河野洋平, 榊原俊郎, 青木大, 本間佳哉, 仲村愛, 町田一成
2. 発表標題 重い電子系超伝導体U0.97Th0.03Be13における極低温精密磁化測定 (講演番号21aF21-9)
3. 学会等名 日本物理学会秋季大会 (岩手大学)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 清水悠晴、Maurya Arvind, 仲村愛、李徳新、本間佳哉、本多史憲、青木大
2. 発表標題 単結晶URhSnにおける低温磁性 (講演番号22aPS113)
3. 学会等名 日本物理学会秋季大会 (岩手大学)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 清水悠晴、橘高俊一郎、中村翔太、榊原俊郎、青木大、佐藤芳樹、本間佳哉、仲村愛、Maurya Arvind、李徳新、本多史憲
2. 発表標題 重い電子系超伝導体U1-xThxBe13の極低温電気抵抗・比熱における非フェルミ液体の性質 (講演番号23pK504-9)
3. 学会等名 日本物理学会年次大会 (東京理科大学)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Y. Shimizu, S. Kittaka, S. Nakamura, T. Sakakibara, D. Aoki, Y. Homma, A. Nakamura, and K. Machida
2. 発表標題 Superconducting Double Transitions in Heavy-Fermion U1-xThxBe13 (Poster presentation)
3. 学会等名 Physics of Uranium based Unconventional Superconductors, Tokai, Japan (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Yusei Shimizu, Fuminori Honda, Yoshiki J. Sato, Arvind Maurya, Yoshiya Homma, Dexin Li, Ai Nakamura, Dai Aoki, Shunichiro Kittaka, Shota Nakamura, and Toshiro Sakakibara
2. 発表標題 Unconventional superconductivity and non-Fermi-liquid behavior in pure and Th-doped UBe13
3. 学会等名 J-Physics 2019 International Conference & KINKEN-WAKATE 2019 Multipole Physics (国際学会)
4. 発表年 2019年



〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

- 1) プレスリリース「超高压実験で明らかにしたウラン系エキゾチック超伝導と異常金属状態」  
<http://www.imr.tohoku.ac.jp/ja/news/results/detail---id-1088.html>
- 2) 科学新聞 3721号8面：エキゾチック超伝導体の振舞い（2019年3月22日）
- 3) 国際プレスリリース "Triplet Superconductivity Demonstrated Under High Pressure"（2019年4月17日）  
[https://www.eurekalert.org/pub\\_releases/2019-04/tu-tsd041719.php](https://www.eurekalert.org/pub_releases/2019-04/tu-tsd041719.php)
- 4) 東北大学・東京大学プレスリリース『ウラン化合物における「メタ磁性」の世界最高磁場を記録』  
<http://www.imr.tohoku.ac.jp/ja/news/results/detail---id-1164.html>
- 5) 科学新聞 3753号4面：ウラン化合物の「メタ磁性」世界最高磁場を観測（2019年11月15日）

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----