

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 30 日現在

機関番号：14501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26400359

研究課題名(和文)非クラマース二重項結晶場基底状態をもつPr系化合物の量子多電子状態の微視的研究

研究課題名(英文)NMR studies of exotic electronic states in Pr based compounds with non Kramers doublet crystal electric field ground state

研究代表者

藤 秀樹 (TOU, Hideki)

神戸大学・理学研究科・教授

研究者番号：60295467

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：低温で超伝導、四極子秩序、非フェルミ流体などの特異な振る舞いを示すPrT<sub>2</sub>Al<sub>20</sub>の物性を微視的な観点から明らかにするために核磁気共鳴実験を行った。これらの化合物ではPr-4f電子の結晶場基底状態が非磁性二重項基底状態、第一励起状態が磁気的三重項であることを明らかにした。PrNb<sub>2</sub>Al<sub>20</sub>の核磁気緩和率の温度依存性の測定から、伝導電子と4f電子の混成(cf混成)を表す特性温度が80ケルビン程度であると評価された。他のPrT<sub>2</sub>Al<sub>20</sub>でも同程度と見積もられ、PrT<sub>2</sub>Al<sub>20</sub>の多彩な基底状態はcf混成効果と非磁性二重項結晶場状態との拮抗による擬五重項により生じることを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：We have carried out nuclear magnetic resonance measurements on PrT<sub>2</sub>Al<sub>20</sub> that exhibits various ground states, such as, superconductivity, quadrupole order, and non-Fermi liquid state, etc. The present studies evidence that the crystal electric field (CEF) state is composed of the non-magnetic doublet CEF ground and the magnetic triplet CEF 1st excited states. Temperature dependence of the NMR relaxation rate of PrNb<sub>2</sub>Al<sub>20</sub> clearly shows that the characteristic temperature for the cf mixing between conduction electron and f-electron states is estimated to be 80 Kelvin. Systematic analyses for other PrT<sub>2</sub>Al<sub>20</sub> strongly suggest that the various ground state properties come from the quasi-quintet CEF state owing to the competition between the cf-mixing and the nonmagnetic doublet CEF ground state.

研究分野：強相関電子物性実験

キーワード：多極子 結晶場 核磁気共鳴 強相関電子 非フェルミ流体 混成効果

## 1. 研究開始当初の背景

通常の金属では、低温で電子はフェルミ流体として扱えることがよく知られている。フェルミ流体状態では、電気抵抗は低温で温度  $T$  の2乗に従い ( $\rho = \rho_0 + AT^2$ )、磁化率は温度に依存しないパウリ磁化率 ( $\chi = \chi_0$ )、また、電子比熱は温度に比例 ( $C = \gamma T$ ) する振る舞いを示す。また、 $A$  や  $\chi_0$  には相関関係があることがよく知られている。ところが、これらに従わない物質が最近多数見つかっており、凝縮系物理学における解明すべき課題となっている。

近年、立方晶構造を持ち  $RT_2X_{20}$  ( $R$ =希土類,  $T$ =遷移金属,  $X = Al, Zn$ ) 型の組成比を持つ物質が様々な基底状態を示し、単純なフェルミ流体状態を示さないことが報告され注目を集めている。たとえば  $YbCo_2Zn_{20}$  では例外的に重い電子状態が実現され[1]、 $PrV_2Al_{20}$  では反強四極子秩序状態[2]、 $PrIr_2Zn_{20}$ [3]や  $PrTi_2Al_{20}$ [4]では四重極秩序と超伝導の共存相、 $PrNb_2Al_{20}$  では非フェルミ流体(NFL)状態[5]、など多様な基底状態が報告されている。

特に、 $PrNb_2Al_{20}$  はバルク測定から 0.6K まで相転移が見られないが、通常の金属が示すフェルミ流体的振る舞いとは異なり電気抵抗は温度に比例 ( $\rho \propto T$ ) し、磁化率は  $T^{0.5}$ 、比熱は  $C/T \propto \log T$  に従うなど、NFL 的な振る舞いを示す[5]。この振る舞いの起源は、Cox らが提唱している  $\Gamma_3$  のもつ四極子と伝導電子の結合、すなわち四極子近藤効果[6]により生じているのではないかと指摘され興味を持たれている。

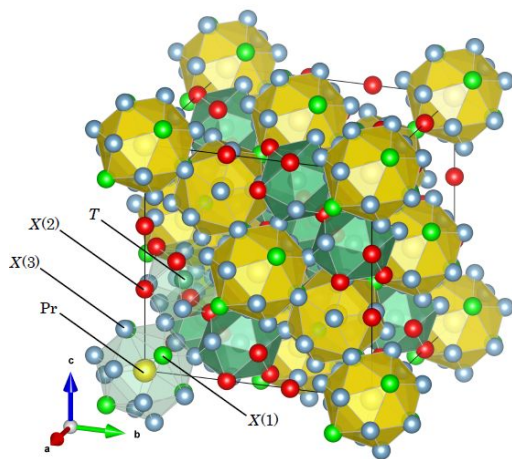


図1:  $PrT_2X_{20}$  の結晶構造。

$PrT_2X_{20}$  はこれまでの精力的な研究から結晶場状態が特異な物性と密接に関係しているとされている。これらの物質に共通している特長は、図1に示すように  $R$  原子が Frank-Kasper カゴと呼ばれる極めて対称性の良い多面体  $X_{16}$  カゴに内包されていることである[7]。  $R$  原子位置の局所対称性は  $T_d$  対称となり高対称位置にあり、それ故、 $4f$  電子の結晶場分裂が小さいことのみならず、 $R$  原子が多量の  $X$  イオンに囲まれているため、 $R$  イオンの持つ  $f$  電子と伝導電子の強い混成が期待され

る

また、この系の結晶場基底状態は、磁化や中性子散乱実験などから、非磁性  $\Gamma_3$  二重項が基底状態、磁氣的  $\Gamma_4$  (もしくは  $\Gamma_5$ ) 三重項が約 30K ~ 60K はなれた第一励起状態を形成していることがわかっている[8]。特に、 $\Gamma_3$  基底状態は、磁気双極子モーメントを持たず、電気四極子自由度、ならびに、磁氣的八極子自由度を持つことから、 $\Gamma_3$  の持つ多極子自由度と伝導電子の混成効果が異常低温物性を引き起こしていると考えられている。

<参考文献>

- [1] M. S. Torikachvili, *et al.*, Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A. **104**, 9960 (2007).
- [2] A. Sakai and S. Nakatsuji, J. Phys. Soc. Jpn. **80**, 063701 (2011).
- [3] T. Onimaru, *et al.*, Phys. Rev. Lett. **106**, 177001 (2011).
- [4] M. Tsujimoto, *et al.*, Phys. Rev. Lett. **113**, 267001 (2014).
- [5] R. Higashinaka, *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **80**, SA048 (2011).
- [6] D. L. Cox, Phys. Rev. Lett. **87**, 1240 (1987).
- [7] F. C. Frank and J. S. Kasper, Acta Crystallogr. **11**, 184 (1958).
- [8] K. Iwasa, *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **82**, 043707 (2013).

## 2. 研究の目的

本研究では、 $PrT_2X_{20}$  系の低温での異常物性の起源を明らかにするため伝導電子と  $f^2$  電子との相互作用を微視的な観点から系統的に評価し、多様な領した電子状態を支配するキー・パラメーターを明らかにすることである。

## 3. 研究の方法

本研究では、対象物質として非フェルミ流体的挙動を示す  $PrNb_2Al_{20}$  と低温で相転移を示す  $PrTa_2Al_{20}$  を中心に関連物質について核磁気共鳴により調べた。  $PrNb_2Al_{20}$  単結晶と  $PrTa_2Al_{20}$  単結晶試料は首都大学東京の東中隆二氏、青木勇二氏等によって作製されたものである。サンプルはアルミフラックス法で作成された。磁化測定は首都大学東京で行った。磁場 12T までの核磁気共鳴(NMR)および核四重極共鳴(NQR)測定はパルス法 NMR 分光器と 9T および 12T 超電導磁石を利用し神戸大学にて実験をおこなった。また、それ以上の強磁場下における実験は東北大・金研・強磁場センターの 20 T-CSM を利用して実験を行った。

また、関連物質として  $Ce 4f^1$  系、 $Yb 4f^{13}$ ,  $U 5f^2$  などについても混成効果や基底状態を比較するために調べた。

## 4. 研究成果

### (1) $PrNb_2Al_{20}$ の基礎パラメータ評価

$Pr-1-2-20$  化合物は、図1のように非常に複雑な結晶構造をとり、従来の NMR 実験のように容易に NMR パラメータや NQR パラメータを評価することが出来ない。そこで、粉末試料における

NMR/NQR パラメータ評価, 単結晶試料の NMR/NQR パラメータ評価, 角度分解 NMR 法によるサイト選択的 NMR によるパラメータ評価と 3 段階に分けて研究を遂行した。

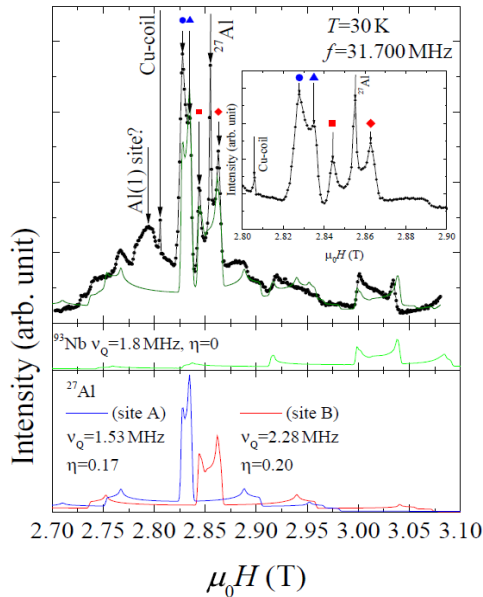


図 2: 単結晶粉末試料の  $^{27}\text{Al}$ ,  $^{93}\text{Nb}$  NMR スペクトル. 粉末試料により NMR/NQR パラメータの概略をつかんだ. しかし, すべてのサイトがランダムに分布するために, 正確なパラメータは決定できなかった[論文 3]

まず, 単結晶を粉末化した試料において NMR 実験を行い Nb 核ならびに Al 核の NMR 信号を検出することに成功し, これらから 1 種類の Nb, 少なくとも 2 種類の Al サイトの分離に成功し NQR パラメータを決定した. これにより Al-NQR 信号をゼロ磁場下で見つけることに成功した[論文 3].

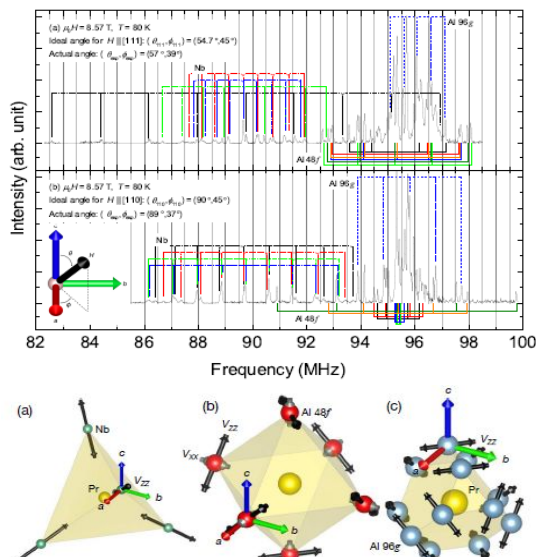


図 3: 単結晶  $^{27}\text{Al}$ ,  $^{93}\text{Nb}$  NMR スペクトル. 角度分解 NMR から各サイトの四極子テンソルが決定される[論文 6,11].

さらに, 粉末試料の結果を基に単結晶を用いた NMR 実験から, Al 核ならびに Nb 核の NMR 信号の検出に成功し, 角度回転 NMR 実験から, はじめて遷移金属サイトでの核四重極テンソルを決定することに成功した. この実験から Nb NQR 周波数と非対称性パラメータがそれぞれ  $\nu_Q \sim 1.82\text{MHz}$ ,  $\eta = 0$  を決定した. また, Al(3)サイトの NQR パラメータは  $\nu_Q \sim 1\text{MHz}$ ,  $\eta \sim 0.4$  と決定した[論文 6]. これらの結果を踏まえて, 角度分解 NMR によるサイト選択したスペクトル解析から, この物質での本質的な NMR, NQR パラメータを決定し, Nb サイト, Al 48f サイト, Al 96g サイトの核四重極テンソルを決定することに成功した[論文 11].

## (2) 結晶場解析と非磁性結晶場基底状態

磁化率と磁化測定の結果から, 結晶場ハミルトニアンを解析することで基底状態が  $\Gamma_3$ , 第一励起状態が  $\Gamma_4$  もしくは  $\Gamma_5$  (17.8K), 第 2 励起状態が  $\Gamma_5$  もしくは  $\Gamma_4$  (42.8K), 第 3 励起状態が  $\Gamma_1$  (52.6K) となるような結晶場状態によって実験結果を最も良く再現できることを明らかにした. このことにより,  $\text{PrNb}_2\text{Al}_{20}$  の基底状態が非磁性 2 重項状態であり, 電気四極子と磁気八極子自由度を持つことをはじめて明らかにした[論文 5].

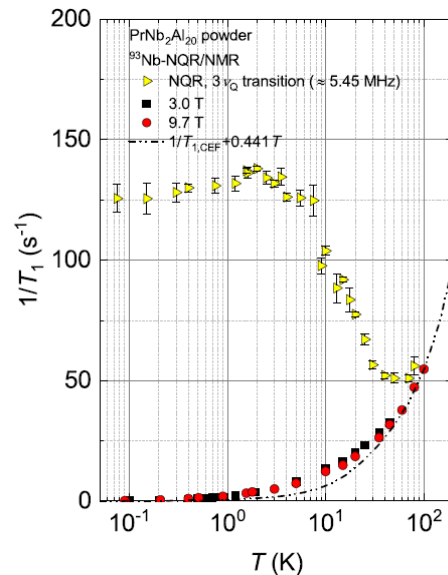


図 4:  $^{93}\text{Nb}$  NMR 緩和率の温度依存性. NQR ではキュリーワイス的な振る舞いを示すが, NMR ではその振る舞いが抑制[論文 5].

さらに, このことを確かめるために, Nb-NQR によるスピン格子緩和率の温度依存性を測定した. 図 4 に核スピン格子緩和率  $1/T_1 T$  の温度依存性を示す. 図から明らかなようにゼロ磁場下での Nb-NQR 緩和率  $1/T_1 T$  は温度を下げると 30 K 以下でキュリーワイス的な増大を示す. その後 1 K 以下で極低温 0.1 K まで相転移を示す明瞭な異常を示さない. また, NQR スペクトルの温度依存性からも極低温で磁気秩序などによる線幅の増大やスペクトルの分裂は観測されなかった. このことから, この系の基底状態は非磁気的な状態

であることがわかった。一方、磁場を印加しても磁気的秩序に特有の振る舞いは見られない。加えて、3 テスラ以上では  $1/T_1T$  が急激に抑制される。NQR 実験では  $1/T_1T$  が周波数を上げるとともに抑制されることから、弱磁場では  $^{141}\text{Pr}$  核の増強核磁性が観測されていることが明らかとなった。つまり、これはヴァンブレック磁化率を通じた緩和率の増強効果によるもので、非磁気的結晶場基底状態を持つ証拠でもある。[論文 5]

また、極低温で Nb-NQR によるスピンスピン緩和率  $1/T_2$  の温度依存性を測定したところ、500mK 以下で  $1/T_2$  が増強されることが明らかとなった。この結果は、極低温で何らかの相関長が発達していることを意味する。多極子自由度の解析から、この物質の低温では結晶場  $\Gamma_3$  に起因する八極子相互作用が発達している可能性か、あるいは四極子秩序がランダムネスの効果により四極子ガラス的になっていることを示す結果である。このことは、 $\text{PrNb}_2\text{Al}_{20}$  の基底状態が  $\Gamma_3$  結晶場状態に支配された多極子自由度をもつ状態であることを示唆する。[論文 5]

### (3) $\text{PrTa}_2\text{Al}_{20}$ の相転移に関する研究

$\text{PrNb}_2\text{Al}_{20}$  と比較するために同じ結晶構造を持ち遷移金属サイトが Ta である  $\text{PrTa}_2\text{Al}_{20}$  の粉末試料に対し、Al(96g) サイトの緩和率の種々の磁場、温度での Al-NMR 実験を行った。2 K 以下の温度領域において、核スピン-格子緩和率  $1/T_1T$  がある温度  $T_0$  において急激に減少することが確認され、この  $T_0$  が強磁場中では高温側にシフトすることを見いだした。図 5 に  $1/T_1T$  の磁場・温度依存性から見積もられた  $T_0(H)$  を、温度を横軸、磁場を縦軸としてプロットした。

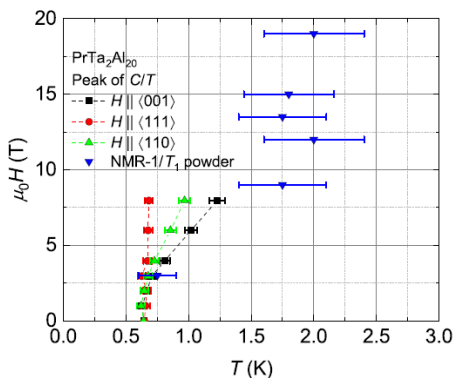


図 5:  $\text{PrTa}_2\text{Al}_{20}$  における緩和率より得られた温度磁場相図。単純な磁気相転移では説明できない。

低磁場では、比熱の磁場依存性とも良く一致し、同じ  $\Gamma_3$  基底状態をとり四極子秩序を示す  $\text{PrPb}_3$  と類似した振る舞いを示すことがわかった。このような磁場に対する転移温度の変化は、四極子秩序に磁気的な第一励起状態  $\Gamma_5$  のもつ磁気双極子が磁場下で活性となったために生じる磁場誘起双極子、あるいは、 $\Gamma_3$  によるが持つ磁気八極子が磁場下で電気四極子

秩序のゆらぎに付随して磁気八極子が揺らぐことによって生じたものであると考えられる[学会発表 3,6,8,9,12]

### (4) c-f 混成に関する考察

$\text{PrNb}_2\text{Al}_{20}$  では Nb-NMR 緩和率から通常の重い電子などで見られるフェルミ流体状態の緩和率  $T_1TK^2=\text{constant}$  と異なり、 $1/T_1 \propto T^{2/3}$  に比例し、磁場に対して依存性を持たない奇妙な振る舞いを示す。このことは、 $\text{PrNb}_2\text{Al}_{20}$  の基底状態が通常の近藤効果による重い電子描像とは異なっていることを意味する[学会発表 13]。結晶場基底状態が  $\Gamma_3$  である事を考えると、低エネルギー励起が非フェルミ流体状態を反映している可能性を示唆する。また、非フェルミ流体的振る舞いは、cf 混成効果と何らかの自由度との競合により起きるものと考えられる。この異常な振る舞いの起源を明らかにするために、NMR シフトおよび核磁気緩和率の温度依存性から近藤効果が関与する  $J_{cf\rho}$  を評価した。 $J_{cf}$  は伝導電子と f 電子との交換相互作用定数であり  $\rho$  は伝導バンドの状態密度である。

まず、Pr  $4f^2$  化合物対に対する比較物質として、典型的な近藤効果を示す  $f^1$  系化合物  $\text{CeRu}_2\text{Al}_2\text{B}$  を選び、近藤効果が緩和率に及ぼす影響をしらべ Ce  $4f$  スピン揺らぎ (T) を評価した。図 6 にスピン揺らぎ (T) の温度依存性を示す。高温における (T) T の振る舞いは近藤効果が重要であることを意味し、スピン揺らぎに異方性があることを示す。このことから  $\text{CeRu}_2\text{Al}_2\text{B}$  は結晶場基底状態に関係した異方的な cf 混成が重要であることが明らかとなった。[論文 1]

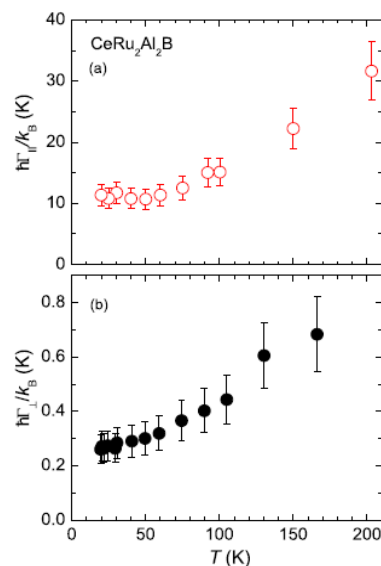


図 6: 比較物質  $\text{CeRu}_2\text{Al}_2\text{B}$  の混成効果に関する温度依存性。

この方法を、Ce, Pr, U 系に適用し、同様の議論を行ったところ、Pr 系と U 系では f 電子状態を反映し Ce 系とは異なる振る舞いを得た[学会発表 1,3,10]。  $\text{PrT}_2\text{Al}_{20}$  について、基底状態は非磁

性<sub>3</sub> 結晶場状態であるが、第一励起状態は磁氣的 3 重項が約 50 K であることから、高温の NMR 緩和率はシングルサイトにおける近藤効果を反映した振る舞いが観測された。その温度依存性から cf 混成の尺度である近藤温度を見積ったところ、結晶場第一励起状態が  $\Gamma_4$  である PrTi<sub>2</sub>Al<sub>20</sub> では混成効果の指標である  $T_K \sim 18\text{K}$  と比較的低い、第一励起状態が  $\Gamma_5$  である PrNb<sub>2</sub>Al<sub>20</sub>, PrTa<sub>2</sub>Al<sub>20</sub>, PrV<sub>2</sub>Al<sub>20</sub> では  $T_K$  はそれぞれ 85K, 100 K, 100K となった。この傾向は Pr と 16c サイトとの距離と相関があることが明らかとなった[学会発表 13]。加えて、混成を特徴付ける温度が第一励起状態の温度と同程度もしくは大きいことから、基底状態は  $\Gamma_3$  のみの自由度では決まらず、混成効果により第一励起状態も含めた擬 5 重項状態と cf 混成の拮抗が多彩な低温物性を引き起こしていることが明らかとなった[学会発表 10,13]。

#### (5) 関連物質の NMR による研究

基底状態と混成効果や磁氣的效果についての知見を得るために、関連する Ce 化合物[論文 10], U 化合物[論文 2,4,9], Sm 化合物[学会発表 11], La 化合物[論文 7], Yb 化合物[論文 8]の NMR 実験を行い、f 電子状態と伝導電子との混成効果が、系によって異なることが明らかとなった。

### 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 14 件)

- [1] H. Matsuno, H. Kotegawa, E. Matsuoka, Y. Tomiyama, H. Sugawara, H. Tou, “Ising-Type Ferromagnetic Ground State Driven by Anisotropic *c-f* Hybridization in CeRu<sub>2</sub>Al<sub>2</sub>B”, J. Phys. Soc. Jpn **83**, 103709/1-4 (2014). 【査読有】
  - [2] H. Matsuno, K. Morita, H. Kotegawa, H. Tou, Y. Haga, E. Yamamoto, Y. Onuki, “Anomalous superconducting phase diagram in UBe<sub>13</sub>”, J. Phys.: Conf. Ser. **592**, 012067/1-4 (2015). 【査読有】
  - [3] T. Kubo, H. Kotegawa, H. Tou, R. Higashinaka, A. Nakama, Y. Aoki, and H. Sato, “<sup>93</sup>Nb- and <sup>27</sup>Al-NMR/NQR studies of the praseodymium based PrNb<sub>2</sub>Al<sub>20</sub>”, J. Phys.: Conf. Ser. **592**, 012093/1-5, (2015). 【査読有】
  - [4] H. Kotegawa, K. Fukumoto, T. Toyama, H. Tou, H. Harima, A. Harada, Y. Kitaoka, Y. Haga, E. Yamamoto, Y. Onuki, K. M. Itoh, E. E. Haller, “<sup>73</sup>Ge-Nuclear Magnetic Resonance/Nuclear Quadrupole Resonance Investigation of Magnetic Properties of URhGe”, J. Phys. Soc. Jpn. **84** (2015), 054710-1-7, 【査読有】
  - [5] T. Kubo, H. Kotegawa, H. Tou, R. Higashinaka, A. Nakama, Y. Aoki, H. Sato, “Absence of Magnetic Dipolar Phase Transition and Evolution of Low-Energy Excitations in PrNb<sub>2</sub>Al<sub>20</sub> with Crystal Electric Field  $\Gamma_3$  Ground State: Evidence from <sup>93</sup>Nb-NQR Studies”, J. Phys. Soc. Jpn. **84**, 074701/1-8, (2015). 【査読有】
  - [6] T. Kubo, H. Kotegawa, H. Tou, R. Higashinaka, A. Nakama, Y. Aoki, and H. Sato, “Analysis of <sup>27</sup>Al- and <sup>93</sup>Nb-NMR spectra of PrNb<sub>2</sub>Al<sub>20</sub> single crystal”, J. Phys.: Conf. Ser. **683**, 012015/1-6 (2016). 【査読有】
  - [7] T. Aoyama, T. Kubo, H Matsuno, H. Kotegawa, H. Tou, A. Mitsuda, Y. Nagano, N Araoka, Y. Wada and Y. Yamada, “NMR studies of coexistence of superconductivity and CDW in LaPt<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>” Journal of Physics: Conf. Ser. **807**, 062002-1-5, (2017). 【査読有】
  - [8] Y. Kishimoto, Y. Awai, H. Kotegawa, H. Tou, Y. Muro, K. Nakamura, M. Sera, and T. Takabatake “Sb-NMR/NQR studies of heavy fermion system YbRhSb” J. Phys.: Conf. Ser. **807**, 012014-1-6, (2017). 【査読有】
  - [9] H. Matsuno, K. Morita, H. Kotegawa, H. Tou, Y. Haga, E. Yamamoto, Y. Onuki, “<sup>9</sup>Be-NMR studies on anomalous superconducting phase diagram in UBe<sub>13</sub>”, J. of Phys.: Conf. Ser. **807**, 052015-1-6, (2017) 【査読有】
  - [10] Y. Kishimoto, H. Kotegawa, E. Matsuoka, H. Sugawara, and H. Tou, “Growth and NMR evaluation of a single crystal CePd<sub>2</sub>Ga” J. Phys.: Conf. Ser. **807**, 012005-1-5 (2017) 【査読有】
  - [11] T. Kubo, H. Kotegawa, H. Tou, H. Harima, R. Higashinaka, A. Nakama, Y. Aoki, and H. Sato “Site-selective NMR measurements in single crystal PrNb<sub>2</sub>Al<sub>20</sub>”, J. Phys.: Conf. Ser. **807**, 032006-1-6 (2017). 【査読有】
- (他 3 件)  
[学会発表](計 65 件)
- [1] 久保徹郎, 小手川恒, 藤秀樹, 東中隆二, 中間章浩, 青木勇二, 佐藤英行, “PrNb<sub>2</sub>Al<sub>20</sub> の結晶場基底状態と低温における磁気揺らぎの発達の解析”(ポスター), 日本物理学会第 70 回年次大会 2015 年 3 月 21 日 ~ 24 日 早稲田大学早稲田キャンパス(東京)
  - [2] 藤秀樹, 松野治貴, 久保徹郎, 黒田啓介, 小手川恒, “Ce, Pr, U 系重い電子化合物の常伝導状態における NMR 緩和率”(口頭), 日本物理学会第 70 回年次大会 2015 年 3 月 21 日 ~ 24 日 早稲田大学早稲田キャンパス(東京)
  - [3] 久保徹郎, 小手川恒, 藤秀樹, 東中隆二, 中間章浩, 青木勇二, 佐藤英行

- “ $^{27}\text{Al}$ -NMR/NQR による  $\text{PrT}_2\text{Al}_{20}$  の研究” (口頭) 日本物理学会 2014 年秋季大会 2014 年 9 月 7 日-10 日 中部大学(愛知県)
- [4] Tetsuro Kubo, Hisashi Kotegawa, Hideki Tou, Ryuji Higashinaka, Akihiro Nakama, Yuji Aoki, Hideyuki Aoki, “ $^{93}\text{Nb}$ -NMR/NQR studies of non-Fermi liquid like behaviors in the Pr-based  $\text{PrNb}_2\text{Al}_{20}$ ”, (ポスター) SCES 2014 - International Conference on Strongly Correlated Electron Systems, July 7-11 2014, Campus Saint Martin d’Heres, Grenoble, France
- [5] 久保徹郎, 小手川恒, 藤秀樹, 東中隆二, 中間章浩, 青木勇二, 佐藤英行, 井原慶彦, 後藤貴行, 佐々木孝彦“ $\Gamma_3$  二重項結晶場基底状態を持つ  $\text{PrNb}_2\text{Al}_{20}$  の強磁場  $^{93}\text{Nb}$ -NMR による研究(口頭)” 日本物理学会 2015 年秋季大会 2015 年 9 月 16 日 ~ 19 日 関西大学(大阪府)
- [6] 三宅遼磨, 久保徹郎, 小手川恒, 藤秀樹, 東中隆二, 中間章浩, 青木勇二, 佐藤英行, “カゴ状物質  $\text{PrTa}_2\text{Al}_{20}$  の  $^{27}\text{Al}$ -NMR による研究” (ポスター) 日本物理学会 2015 年秋季大会 2015 年 9 月 16 日 ~ 19 日 関西大学(大阪府)
- [7] Tetsuro Kubo, Hisashi Kotegawa, Hideki Tou, Ryuji Higashinaka, Akihiro Nakama, Yuji Aoki, Hideyuki Sato, Yoshihiko Ihara, Takayuki Goto, Takahiko Sasaki, “High field  $^{93}\text{Nb}$ -NMR studies of the  $\Gamma_3$  CEF doublet ground state system  $\text{PrNb}_2\text{Al}_{20}$ ”, (ポスター)TMU International Symposium on “New Quantum Phases Emerging from Novel Crystal Structure”, Minami-Osawa Campus, Tokyo Metropolitan University, Tokyo, Japan, September 24–25 2015.
- [8] 久保徹郎, 三宅遼磨, 松野治貴, 小手川恒, 藤秀樹, 播磨尚朝, 東中隆二, 中間章浩, 青木勇二, 佐藤英行, 井原慶彦, 後藤貴行, 佐々木孝彦, “単結晶  $\text{PrT}_2\text{Al}_{20}$  の NMR 測定”, (口頭)日本物理学会第71回年次大会(2016) 2016年3月19日 ~ 22日東北学院大学(仙台)
- [9] T. Kubo, R. Miyake, H. Kotegawa, H. Tou, H. Harima, R. Higashinaka, A. Nakama, Y. Aoki, H. Sato, Y. Ihara, T. Goto, T. Sasaki, “Single Crystal NMR Studies of  $\text{PrT}_2\text{Al}_{20}$  Systems (T = Nb, Ta)”, (ポスター) International Conference on Strongly Correlated Electron Systems (Hangzhou, China) May8-13,2016
- [10] 藤秀樹, “ $\text{PrT}_2\text{Al}_{20}$  における低エネルギー励起に関するNMRによる研究”, (ポスター) J-Physics:多極子伝導系の物理 平成28年度領域全体会議 2016年5月26日 ~ 28日 (北海道・海道大学大学院理学研究院)
- [11] 中瀬迅, 三宅遼磨, 久保徹郎, 小手川恒, 藤秀樹, 山田瑛, 東中隆二, 松田達磨, 青木勇二, “ $\text{SmTa}_2\text{Al}_{20}$  の  $\text{Al}$ -NQR による研究”, (ポスター) 日本物理学会 2016年秋季大会 2016年9月13日 ~ 16日 (石川県・金沢大・角間キャンパス)
- [12] 久保徹郎, 三宅遼磨, 松野治貴, 小手川恒, 藤秀樹, 播磨尚朝, 東中隆二, 中間章浩, 青木勇二, 佐藤英行, 井原慶彦, 後藤貴行, 佐々木孝彦, “単結晶  $\text{PrT}_2\text{Al}_{20}$  (T = Nb, Ta) の NMR による研究”, (ポスター) 日本物理学会 2016年秋季大会 2016年9月13日 ~ 16日 (石川県・金沢大学角間キャンパス)
- [13] 久保徹郎, 藤秀樹, 三宅遼磨, 松野治貴, 小手川恒, 播磨尚朝, 東中隆二, 中間章浩, 青木勇二, 佐藤英行, 井原慶彦, 後藤貴行, 佐々木孝彦, “NMR/NQR による  $\text{PrT}_2\text{Al}_{20}$  (T=Nb, Ta) の磁気揺らぎの研究”, (ポスター) 日本物理学会 第72回年次大会 2017年3月17日 (大阪府・大阪大豊中キャンパス)
- [14] H. Tou, “Low energy excitations of Pr and U based  $f^2$  systems probed by NMR”, (招待講演) J-Physics: Mini International Workshop: Physics of Strongly Correlated Electron Systems under Extreme Condition, Kobe University( Kobe), April 13~14, 2016 (他 51件、うち招待講演3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.lab.kobe-u.ac.jp/sci-It/index>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

藤秀樹 (TOU, Hideki)  
 神戸大学大学院理学研究科・教授  
 研究者番号: 60295467

### (2) 研究分担者

小手川恒 (KOTEGAWA, Hisashi)  
 神戸大学大学院理学研究科・准教授  
 研究者番号: 30372684

### (4) 研究協力者

久保徹郎 (KUBO, Tetsuro) 神戸大・院生  
 松野治貴 (MATSUNO, Haruki) 神戸大・院生  
 岸本恭来 (KISHIMOTO, Yasuki) 神戸大・院生  
 青山泰介 (AOYAMA, Taisuke) 神戸大・院生  
 三宅遼磨 (MIYAKE, Ryoma) 神戸大・院生  
 中瀬迅 (NAKASE, Jin) 神戸大・院生  
 東中隆二 (HIGASHINAKA, Ryuji) 首都大東京  
 青木勇二 (AOKI Yuji) 首都大東京  
 佐々木孝彦 (SASAKI, Takahiko) 東北大金研  
 播磨尚朝 (HARIMA, Hisatomo) 神戸大