

令和 3 年 6 月 10 日現在

機関番号：17104

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18K03542

研究課題名（和文）結晶の幾何学的構造と局所相関による創発電子物性の開拓

研究課題名（英文）Development of emergent electronic properties originated from geometric structures of crystals and local correlation effects

研究代表者

渡辺 真仁（Watanabe, Shinji）

九州工業大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号：40334346

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：価数転移の量子臨界点で発散する臨界価数ゆらぎによる比熱、熱膨張係数、グリュナイゼン係数を理論的に計算する枠組みを構築した。この枠組みを量子臨界準結晶Yb15Al34Au51に適用して、実験による比熱、熱膨張係数、グリュナイゼン係数の温度依存性を説明することに成功した。量子臨界物質にも関わらず降温につれて発散しない は、圧力に対してrobustな量子臨界性の反映であることを明らかにした。また、-YbAlB4のYbサイトでの局所反転対称性の破れによる奇パリティ結晶場のもとで奇パリティ多極子のゆらぎが軌道間斥力の効果により発散的に増大することを示した。磁気量子臨界体積効果の理論の定式化も行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

量子臨界点ではグリュナイゼン係数は絶対零度で必ず発散するとこれまで信じられてきたが、圧力に対してrobustな量子臨界性を示す物質では、一般にグリュナイゼン係数は絶対零度で発散しないことを理論的に示した。これは既存概念を覆す新しい概念であり、その学術的意義は大きい。圧力に対してrobustな量子臨界性を示す準結晶Yb15Al34Au51と、特定の圧力でのみそれと共通の量子臨界性を示す近似結晶Yb14Al35Au51でグリュナイゼン係数の振る舞いに違いが出ることを明らかにした本研究の成果は、電子間の局所相互作用によって結晶の幾何学的構造特有の量子現象が生じることを示した学術的意義がある。

研究成果の概要（英文）：The theoretical framework to calculate the specific heat, the thermal-expansion coefficient, and the Gruneisen parameter due to critical valence fluctuations diverging at the quantum critical point of the valence transition is constructed. By applying this method to the quasicrystal Yb15Al34Au51, the measured temperature dependences of the specific heat, the thermal-expansion coefficient, and the Gruneisen parameter are shown to be well explained. Non-divergent Gruneisen parameter in the quantum-critical quasicrystal Yb15Al34Au51 is shown to be ascribed to the robust criticality against pressure in this material. In the odd-parity crystalline-electric-field arising from the lack of the local inversion symmetry at the Yb site in -YbAlB4, fluctuations of the odd-parity multipole are shown to be enhanced divergently by the inter-orbital Coulomb repulsion. The theory of the magneto-volume effect is formulated.

研究分野：強相関電子系

キーワード：グリュナイゼン係数 比熱 熱膨張係数 臨界体積効果 磁気体積効果 価数量子臨界現象 準結晶 近似結晶

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

## 1. 研究開始当初の背景

強く相互作用する電子系は強相関電子系とよばれ、新しい物理現象が発現する研究の舞台として注目を集めている。希土類を含む金属間化合物では、電子の有効質量が通常金属の数倍から千倍程度増大する重い電子系とよばれる強相関電子状態が出現する。物質の温度を下げていくと磁気秩序などの連続相転移が生じる場合があるが、相転移温度を絶対零度まで抑制した点を量子臨界点とよび、その近傍では電気抵抗率や電子比熱などの物理量が特異な振る舞いを示す。これらの現象を量臨界現象とよぶ。遍歴電子系における磁気量子臨界点近傍で発現する磁気的量子臨界現象は、スピンゆらぎの理論 (Self-Consistent Renormalization (SCR)理論) によってよく説明されてきた。近年、磁気量子臨界現象とは異なる、非従来型の量子臨界現象が Yb を含む重い電子系化合物で観測され、大きな問題となっている。

重い電子系金属の $\beta$ -YbAlB<sub>4</sub>は Yb 系初の超伝導物質としてのみならず、常磁性相で非従来型の量子臨界現象を示す物質として注目を集めている。また、低温・弱磁場領域で磁化率が温度  $T$  と磁場  $B$  の比の一つのスケーリング関数で表される  $TB$  スケーリングを示すことが観測されている。 $\beta$ -YbAlB<sub>4</sub>の量子臨界性、すなわち低温の磁化率 $\chi$ や電子比熱係数  $CT$ 、電気抵抗率 $\rho$ の温度依存性、および磁化率の  $TB$  スケーリングの振る舞いは、Yb の臨界価数ゆらぎの効果により統一的に説明されることが理論的に示されている (S. Watanabe and K. Miyake, Phys. Rev. Lett. **105**, 186403 (2010); J. Phys. Soc. Jpn. **83**, 103708 (2014))。これらの実験・理論研究により、 $\beta$ -YbAlB<sub>4</sub>における物理量の特異な振る舞いは、この物質が Yb の価数転移の量子臨界点近傍に位置していることを示唆している。最近、 $\beta$ -YbAlB<sub>4</sub>の姉妹物質 $\alpha$ -YbAlB<sub>4</sub>の Al に Fe を 1.4% ドープした $\alpha$ -YbAl<sub>1-x</sub>Fe<sub>x</sub>B<sub>4</sub> ( $x=0.014$ )において、価数量子臨界点および価数量子臨界性の直接的証拠が実験により観測された。 $\beta$ -YbAlB<sub>4</sub>の Yb サイトでは局所的に空間反転対称性が破れているので、奇パリティの結晶場が発生することが期待されるが、そこでの電荷移動の効果がどのような新規量子現象をもたらすかについてはよくわかっていない状況であった。

準結晶 Yb<sub>15</sub>Al<sub>34</sub>Au<sub>51</sub>は常圧・零磁場で非従来型の量子臨界現象を示し、圧力を  $P=1.6$  GPa 印加しても臨界性がそのまま保たれる物質として注目を集めている。この驚くべき現象も、Yb の臨界価数ゆらぎの理論によって説明されることが示されている (S. Watanabe and K. Miyake, J. Phys. Soc. Jpn. **82**, 083704 (2013); J. Phys. Soc. Jpn. **85**, 063703 (2016))。最近この物質のグリユナイゼンパラメータ $\Gamma(T)$ が観測され、驚くべきことに降温につれて $|\Gamma(T)|$ は減少し、最低温  $T=70$  mK で有限値をとることが発見された。一方、フェルミ液体的振る舞いを示す近似結晶 Yb<sub>14</sub>Al<sub>35</sub>Au<sub>51</sub>のグリユナイゼンパラメータ $\Gamma(T)$ も観測され、最低温  $T=70$  mK での絶対値 $|\Gamma|$ は準結晶の値よりも大きいことが観測された。これまで、「いかなる量子臨界点でもグリユナイゼンパラメータが発散する」ことが繰り込み群の理論により提唱されており、この実験事実をいかに理解するかは重要かつ概念的に本質的な問題である。

このように、重い電子系金属 $\beta$ -YbAlB<sub>4</sub>と Yb<sub>15</sub>Al<sub>34</sub>Au<sub>51</sub>は共通の量子臨界現象を発現し、Yb の価数ゆらぎの理論により各物理量の量子臨界性はよく説明されるが、前者は周期結晶、後者は周期性をもたない準結晶という結晶構造の違いがある。この結晶の幾何学的構造特有の量子現象についてはさらに研究を行う必要がある。

また一般に、物質が磁気相転移を起こす際に体積が変化するが、この現象を磁気体積効果とよぶ。これまで、スピンゆらぎの SCR 理論に基づいて熱力学的にコンシステントな比熱、熱膨張率、グリユナイゼンパラメータを定式化する理論研究に本課題採択前から取り組んできた。この定式化を完成させ、Ce<sub>7</sub>Ni<sub>3</sub>などの重い電子系物質で観測されているグリユナイゼンパラメータや近藤温度などの物理量の温度・圧力依存性を定性的・定量的に説明できるようにすることが必要である。

## 2. 研究の目的

強相関電子系の価数ゆらぎの量子臨界現象における結晶の幾何学的構造特有の新しい量子現象を開拓することが本研究の目的である。具体的には、共通の価数量子臨界性を発現する周期結晶 $\beta$ -YbAlB<sub>4</sub>と準結晶 Yb<sub>15</sub>Al<sub>34</sub>Au<sub>51</sub>の新規物性を理論的に探究・解明するため以下を目的とする。

(1) 価数量子臨界点近傍での臨界体積効果の理論的枠組みを定式化するためには、従来型の量子臨界現象を示す磁気量子臨界点近傍での磁気体積効果の理論的枠組みの定式化を完成させておくことが必要である。そこで、磁気体積効果の理論的枠組みの定式化を完成させる。

(2) 価数量子臨界点近傍での臨界体積効果の理論的枠組みを定式化する。さらに、準結晶 Yb<sub>15</sub>Al<sub>34</sub>Au<sub>51</sub>の比熱、熱膨張係数、グリユナイゼンパラメータを計算する枠組みを臨界価数ゆらぎの理論において統一的に定式化し、実験で観測されたグリユナイゼンパラメータの特異な振る舞いの出現機構を解明する。

(3) 価数ゆらぎは Yb の 4f 電子とその周りの伝導電子の間での電荷移動のゆらぎであり、価数転移の臨界点では価数ゆらぎは臨界的に発散する。量子臨界物質 $\beta$ -YbAlB<sub>4</sub>の Yb サイトでの奇パリティの結晶場における電荷移動の効果を解明する。

### 3. 研究の方法

(1) スピンゆらぎの SCR 理論の枠組みに基づいて、零点スピンゆらぎ、および SCR の停留値条件を正しく考慮して、比熱、熱膨張係数、およびグリユナイゼンパラメータの定式化を行う。得られた結果を、 $\text{Ce}_7\text{Ni}_3$  などの重い電子系物質における実験結果と比較し、定性的・定量的な説明ができるか、解析を行う。

(2) (1)の枠組みを踏まえて、準結晶  $\text{Yb}_{15}\text{Al}_{34}\text{Au}_{51}$  における価数量子臨界点近傍での臨界体積効果の理論の構築に以下のように取り組む。

①この枠組みを基に価数転移の量子臨界点近傍における比熱、熱膨張係数、グリユナイゼンパラメータを臨界価数ゆらぎの SCR 理論により計算する枠組みを構築する。

②次に、近似結晶の Yb の 4f 電子と Al の 3p 電子からなる周期アンダーソン模型から出発して、圧力下の価数転移の量子臨界点における価数ゆらぎの SCR 方程式を解いて、①で構築した枠組みを用いて  $c(T)$ 、 $\alpha(T)$ 、 $\Gamma(T)$  を計算する。

これにより、磁化率の零磁場極限での臨界性  $\chi(T) \sim T^{-0.5}$  および有限磁場下での  $T/B$  スケーリングとこれらの物理量を統一的に計算することが可能となる。

③近似結晶の単位胞のサイズを無限大にした極限が準結晶なので、この枠組みに基づいて準結晶の性質を解析する。

(3) 量子臨界物質  $\beta\text{-YbAlB}_4$  の強相関電子状態の性質を結晶構造の対称性を正確に反映した有効模型を構築し、基底状態の性質をスレーブボゾン平均場近似法と乱雑位相近似 (RPA) 法を適用して解析する。特に奇パリティの結晶場のもとで活性となる奇パリティ多極子の秩序変数と相関関数を計算し、その性質を明らかにする。

### 4. 研究成果

本研究課題実施により得られた成果のうち、主な成果を以下に報告する。

(1) スピンゆらぎの SCR 理論に基づいて、磁気量子臨界点近傍における磁気体積効果の理論的枠組みの構築に取り組んだ。SCR 理論の自由エネルギーからエントロピーを導出し、エントロピーから熱力学関係式を用いて比熱、熱膨張係数、グリユナイゼンパラメータの完全な表式を導出することに成功した (S. Watanabe and K. Miyake, Phys. Rev. B **99**, 035108 (2019))。この表式は従来自由エネルギーから導出されていた熱膨張係数、グリユナイゼンパラメータの表式よりはるかに簡潔であり、物理的描像を明確に得ることが可能となった。これにより、空間次元 3 次元系と 2 次元系において、強磁性および反強磁性の量子臨界点における比熱、熱膨張係数、グリユナイゼンパラメータの温度依存性が、低温の量子臨界領域から高温のキュリー-ワイス領域までの全領域ではじめて明らかとなった。今回、熱膨張係数とグリユナイゼンパラメータの臨界項に、温度に依存する係数が存在していることをはじめて明らかにした。その結果、過去の繰り込み群の理論では報告されていた、2 次元反強磁性の量子臨界点における熱膨張係数の発散は生じないこと、および温度依存する係数が中間温度領域からキュリー-ワイス領域にかけての熱膨張係数とグリユナイゼンパラメータの温度依存性に寄与していることが明らかとなった。また、スピンゆらぎの特徴的溫度と Ce 系や Yb 系重い電子系の有効フェルミ温度 (近藤温度) との関係を描微視的に明らかにすることにも成功した。これにより、 $\text{Ce}_7\text{Ni}_3$  で観測された、スピンゆらぎの特徴的溫度と近藤温度の圧力依存性を定性的・定量的に説明できることがわかった。

(2) 熱力学的にコンシステントな枠組みで、価数量子臨界点での比熱、熱膨張係数、グリユナイゼンパラメータの解析的な表式を初めて導出した。この枠組みを準結晶  $\text{Yb}_{15}\text{Al}_{34}\text{Au}_{51}$  に適用し、低温における比熱、熱膨張係数、グリユナイゼンパラメータの温度依存性を、臨界価数ゆらぎの理論に基づいて明らかにした (S. Watanabe and K. Miyake, Solid State Commun. **306**, 113774 (2020))。その結果、実験で観測された比熱の温度依存性をよく説明できることがわかった。さらに、グリユナイゼンパラメータ  $|\Gamma(T)|$  は降温につれて減少するという驚くべき結果が得られた。この  $\Gamma(T)$  の温度依存性も実験をよく再現することがわかった。解析の結果、準結晶における降温につれて発散しないグリユナイゼンパラメータ  $\Gamma(T)$  は圧力に対して robust な量子臨界性の自然な帰結であることがわかった。また、常圧の近似結晶  $\text{Yb}_{14}\text{Al}_{35}\text{Au}_{51}$  は低温で温度依存性を示さないフェルミ液体的振る舞いを示し、その絶対値  $|\Gamma(T \rightarrow 0)|$  は、重い電子系を反映して通常金属より 100 倍程度増大することを理論的に示した。この常圧における準結晶と近似結晶の最低温度での  $|\Gamma(T)|$  の大きさの違いは、臨界価数ゆらぎの特徴的溫度  $T_0$  と近藤溫度  $T_K$  の圧力微分の大きさの違いを反映していることがわかった。また、近似結晶  $\text{Yb}_{14}\text{Al}_{35}\text{Au}_{51}$  では、圧力  $P=1.96$  GP において、準結晶  $\text{Yb}_{15}\text{Al}_{34}\text{Au}_{51}$  と共通のべき発散が磁化率において価数ゆらぎにより生じるが、グリユナイゼンパラメータ  $\Gamma(T)$  は、準結晶と異なり、降温につれて絶対零度に向かって発散することを理論的に予言した。今後の実験により、この理論的予言が検証されることを期待する。

(3) 量子臨界物質  $\beta\text{-YbAlB}_4$  において、奇パリティ結晶場における電荷移動の効果を理論的に明らかにした (S. Watanabe and K. Miyake, J. Phys. Soc. Jpn. **88**, 033701 (2019))。  $\beta\text{-YbAlB}_4$  では Yb 原子位置で局所的に反転対称性が破れているので、奇パリティの結晶場が存在することが示される。その結果、Yb サイトで 4f 電子の波動関数が 5d 電子の波動関数と混成する。これにより、Yb サイトで電気双極子と磁気トロイダル双極子の自由度が活性となる。次に、 $\beta\text{-YbAlB}_4$  について Yb の 4f 軌道と 5d 軌道、B の 2p 軌道からなる有効模型を構築して、スレーブボゾン平均場理論を適用して基底状態の性質を調べた。その結果、軌道間斥力が  $U_{fd}=1.40(\text{pp}\sigma)$  のとき

[(pp $\sigma$ )は最近接 B 原子間の 2p 軌道の Slater-Koster パラメーター]価数量子臨界点の実現し、そこでの Yb の価数は Yb<sup>+2.71</sup>であることが同定された。(pp $\sigma$ )が約 1 eV のオーダーであるとするこの  $U_{fd}$  は現実的な値であり、Yb の価数も  $\beta$ -YbAlB<sub>4</sub> や  $\alpha$ -YbAl<sub>1-x</sub>Fe<sub>x</sub>B<sub>4</sub> ( $x=0.014$ ) で観測されている低温における Yb の中間価数と整合する。興味深いことに、オンサイトの 4f-5d 電子間の斥力  $U_{fd}$  により、Yb サイトで 4f 電子と 5d 電子の電荷移動のゆらぎの効果が増大し、価数転移の量子臨界点において、価数ゆらぎが発散すると同時に電気双極子ゆらぎと磁気トロイダル双極子ゆらぎも発散的な増大を示すことがわかった。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計11件（うち査読付論文 11件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Watanabe Shinji	4. 巻 90
2. 論文標題 Interplay of Valence and Semimetal-to-Insulator Transitions in SmS	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 023706-1-5
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.7566/JPSJ.90.023706	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. Watanabe and K. Miyake	4. 巻 306
2. 論文標題 Non-Divergent Gruneisen Parameter in Quantum Critical Quasicrystal Yb15Al34Au51: Reflection of Robustness of Quantum Criticality under Pressure	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Solid State Commun.	6. 最初と最後の頁 113774-1-6
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.ssc.2019.113774	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 Watanabe Shinji, Miyake Kazumasa	4. 巻 88
2. 論文標題 Charge Transfer Effect under Odd-Parity Crystalline Electric Field: Divergence of Magnetic Toroidal Fluctuation in $-YbAlB_4$	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 033701-1-6
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.7566/JPSJ.88.033701	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 Watanabe Shinji, Miyake Kazumasa	4. 巻 29
2. 論文標題 Charge Transfer Effect under Odd-Parity Crystalline Electric Field	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 JPS Conf. Proc.	6. 最初と最後の頁 014001-1-10
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.7566/JPSJP.29.014001	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 Kazumasa, Watanabe Shinji	4. 巻 30
2. 論文標題 Theory for Non-Fermi Liquid Temperature Dependence in Resistivity of $Ce_xLa_{1-x}Cu_{5.62}Au_{0.38}$ ( $x = 0.02 - 0.10$ ) on the Local Quantum Valence Criticality of Ce Impurities	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 JPS Conf. Proc.	6. 最初と最後の頁 011027-1-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSCP.30.011027	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 Watanabe Shinji, Miyake Kazumasa	4. 巻 30
2. 論文標題 Quantum Valence Criticality in Heavy Fermions on Periodic and Aperiodic Crystals	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 JPS Conf. Proc.	6. 最初と最後の頁 011023-1-12
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSCP.30.011023	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 Shinji Watanabe, Kazumasa Miyake	4. 巻 88
2. 論文標題 Charge Transfer Effect under Odd-Parity Crystalline Electric Field: Divergence of Magnetic Toroidal Fluctuation in $-YbAlB_4$	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 033701-1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.88.033701	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 Shinji Watanabe, Kazumasa Miyake	4. 巻 99
2. 論文標題 Gruneisen Parameter and Thermal Expansion near Magnetic Quantum Critical Points in Itinerant Electron Systems	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 035108-1-25
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.99.035108	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 Gernot W. Scheerer, Zhi Ren, Shinji Watanabe, Gerard Lapertot, Dai Aoki, Didier Jaccard, Kazumasa Miyake	4. 巻 3
2. 論文標題 The Dominant Role of Critical Valence Fluctuations on High Tc Superconductivity in Heavy Fermions	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 npj Quantum Materials	6. 最初と最後の頁 41-1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41535-018-0111-6	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 Kazumasa Miyake, Shinji Watanabe	4. 巻 98
2. 論文標題 Anomalous temperature dependence of the relaxation rate measured by muon spin rotation in $\alpha$ -YbAlO <sub>2</sub>	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 075125-1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.98.075125	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 Shinji Watanabe, Kazumasa Miyake	4. 巻 30
2. 論文標題 Effects of Crystalline Electronic Field and Onsite Interorbital Interaction in Yb-based Quasicrystal and Approximant Crystal	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 J. Phys.: Condens. Matter	6. 最初と最後の頁 184001-1-11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-648X/aab817	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 -

〔学会発表〕 計9件 (うち招待講演 4件 / うち国際学会 5件)

1. 発表者名 渡辺真仁
2. 発表標題 量子臨界物質 b-YbAlB <sub>4</sub> における超音波応答
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 渡辺真仁
2. 発表標題 奇バリティ結晶場における電荷移動効果： b-YbAlB4における磁気トロイダルゆらぎの発散
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 S. Watanabe
2. 発表標題 Quantum Valence Criticality in Heavy Fermions on Periodic and Aperiodic Crystals
3. 学会等名 International Conference on Strongly Correlated Electron Systems (SCES2019) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 S. Watanabe
2. 発表標題 Charge Transfer Effect under Odd-Parity Crystalline Electric Field: Divergence of Magnetic Toroidal Fluctuation in $\alpha$ -YbAlB4
3. 学会等名 International Workshop on Multipole Physics and Related Phenomena (J-Physics 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 S. Watanabe
2. 発表標題 Non-Divergent Gruneisen Parameter in Quantum-Valence-Critical Quasicrystal
3. 学会等名 Interdisciplinary Symposium for Quasicrystals and Strongly Correlated Electron System (QSC2019) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年



1. 発表者名 Shinji Watanabe
2. 発表標題 Gruneisen Parameter in Quantum Critical Metals on Periodic and Aperiodic Crystals
3. 学会等名 International Workshop on "Emergent Phenomena in Strongly Correlated Quantum Matter" (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Shinji Watanabe
2. 発表標題 Gruneisen Parameter in Quantum Critical Yb-Based Quasicrystal
3. 学会等名 The 18th International Conference on High Pressure in Semiconductor Physics (HPSP-18) & The Workshop on High pressure Study on Superconducting (WHS) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 渡辺真仁
2. 発表標題 準結晶Yb <sub>15</sub> (Al <sub>1-x</sub> Ga <sub>x</sub> ) <sub>34</sub> (Au <sub>1-y</sub> Cu <sub>y</sub> ) <sub>51</sub> のYb価数の格子定数依存性
3. 学会等名 日本物理学会秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 渡辺真仁
2. 発表標題 量子臨界準結晶Yb <sub>15</sub> Al <sub>34</sub> Au <sub>51</sub> の比熱、熱膨張係数とグリユナイゼンパラメータ
3. 学会等名 日本物理学会秋季大会
4. 発表年 2018年

## 〔図書〕 計2件

1. 著者名 渡辺真仁、三宅和正	4. 発行年 2020年
2. 出版社 アグネ技術センター	5. 総ページ数 16
3. 書名 固体物理「誌上セミナー 量子臨界現象の新展開 (その2) 量子臨界磁気体積効果」	

1. 著者名 渡辺真仁、三宅和正	4. 発行年 2020年
2. 出版社 アグネ技術センター	5. 総ページ数 12
3. 書名 固体物理「誌上セミナー 量子臨界現象の新展開 (その1) スピンゆらぎのSCR理論」	

## 〔産業財産権〕

## 〔その他〕

<p>研究内容の紹介  <a href="https://www.mns.kyutech.ac.jp/~swata/topics.html">https://www.mns.kyutech.ac.jp/~swata/topics.html</a>          九州工業大学の研究者 渡辺真仁  <a href="https://research02.jimu.kyutech.ac.jp/html/100000341_ja.html">https://research02.jimu.kyutech.ac.jp/html/100000341_ja.html</a>          九州工業大学 基礎科学研究系 渡辺研究室  <a href="https://www.mns.kyutech.ac.jp/~swata/index.html">https://www.mns.kyutech.ac.jp/~swata/index.html</a></p>
--

## 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
---------------------------	-----------------------	----

## 7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

## 8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------

スイス	University of Geneva			
中国	Institute of Natural Sciences			
フランス	CEA-INAC/UJF-Grenoble			