

令和元年6月11日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2015～2018

課題番号：15H02111

研究課題名(和文) 準周期性と電子相関の協奏によって形成される新しい量子状態の研究

研究課題名(英文) Study on a novel quantum state driven by strongly correlated effect in quasicrystals

研究代表者

佐藤 憲昭 (Sato, Noriaki)

名古屋大学・理学研究科・教授

研究者番号：30170773

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 32,100,000円

研究成果の概要(和文)：準結晶は、周期性とは異なる規則性を持つ物質であり、周期結晶には許されない回転対称性を有する不思議な物質である。物理学において対称性は極めて重要な概念であり、通常結晶とは質的に異なる対称性を有する準結晶は、固体物理学者の興味を集めてきた。本研究では、極低温で生じる「量子臨界現象」と呼ばれる不思議な現象(物性)が生じるメカニズムの解明に成功を収めた。また、これまで超伝導を示す準結晶は1つも発見されてこなかったが、本研究では、世界に先駆けて超伝導の発見に成功を収めた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究課題は、準結晶と強相関電子系という2つの研究領域にまたがる学際領域の開拓を目指したものである。量子臨界現象の起源の解明や、準結晶で初めての超伝導の発見という成果を通して、この目標に到達したと考える。この学術的意義は大きい。さらに、準結晶超伝導の発見は、英国物理学会誌Physics Worldにおいて、「2018年10大ブレイクスルー」の1つに選ばれた。これは大きな社会的意義を有するものである。

研究成果の概要(英文)：Quasicrystal is distinguished from a conventional, periodic crystal. Here, periodicity is a mathematical concept and plays an important role in condensed matter physics. In this project, we have revealed a novel mechanism of the quantum critical phenomenon observed in a rare-earth-based quasicrystal. We have also succeeded in, for the first time, discovering superconductivity in quasicrystals.

研究分野：物性物理学

キーワード：準結晶 量子臨界現象 近似結晶 重い電子系

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

通常の結晶(すなわち周期性を有する物質)の物性研究は大きく進み、弱相関の系における電気抵抗や比熱、あるいは磁化率の温度依存性などはよく理解されている。また、磁気秩序や超伝導といった相転移あるいは長距離秩序状態に関しても理解が進んでいる。これに対し、周期性とは異なる並進対称性(準周期性)を有する準結晶に関しては、構造に関しては理解が進んだものの、物性は殆ど未解明であった。「準結晶の電気抵抗の温度依存性は如何なるものか」といった基本的な問題から、「準結晶は超伝導になりえるか」といった難しい問題まで解答は得られていなかった。また、数年前に(我々によって)発見された量子臨界現象(準結晶特有の物性と考えられている)の起源・メカニズムも未解明のままである。

2. 研究の目的

このような状況にあつて、準結晶の基本的物性を解明する(見出す)こと、超伝導や磁気秩序などの長距離秩序が準結晶中で発現可能か否かを明らかにすること、量子臨界現象のメカニズムを解明すること、新しい強相関系準結晶・近似結晶(特にセリウムを含む準結晶・近似結晶)の探索が本研究課題の目的である。

3. 研究の方法

まず第1に、既存の準結晶・近似結晶を出発点として元素置換法を用い、新しい(価数揺動性を示す)準結晶・近似結晶を探索する。得られた(合成された)物質が準結晶・近似結晶であるかを調べるためX線構造解析を行う。次に、それらの物性(特に価数揺動性)を磁気測定や共鳴X線発光分光実験を用いて調べる。さらに試料を極低温あるいは高圧下の極限環境下に置き、種々の物性計測を行うことにより、超伝導等の発現を調べる。また、イッテルビウムを含む準結晶・近似結晶の量子臨界現象の起源として、価数揺動の可能性が理論的に指摘されている。そこで、イッテルビウム・イオンの価数を共鳴X線発光分光実験により直接的に測定し、価数の不安定性などを調べる。

4. 研究成果

(1)セリウムを含む新しい近似結晶(近藤物質)の合成に成功した。その磁化率や比熱を測定し、その結果を詳細に調べた結果、スピングラス転移を起こしていることを突き止めた。また、光電子分光実験を併せて行うことにより、セリウムが価数揺動状態(近藤状態)にあることを見出した。さらに、高圧下で磁化率や比熱を測定し、スピングラス転移温度が加圧とともに増大することを明らかにした。

(2)(1)の新規の重い電子系近似結晶のセリウム元素を非磁性のイットリウム元素で置換した試料を合成し、セリウム濃度を種々に変えながら、それらの物性(磁化率、比熱、電気抵抗)を測定した。その結果を解析した結果、セリウム濃度に関係なく、単サイトの磁気揺らぎが存在することを見出した。特に、スピングラス転移温度が消失するセリウム濃度近傍では、磁化率が非通常の指数で特徴づけられる「べき乗則の発散現象」を示すこと、電子比熱が対数的な発散を示すことを見出した。これは、イッテルビウム系準結晶・近似結晶で見いだされていた量子臨界現象と類似のものである。これにより、量子臨界現象の起源がf電子の(何らかの)不安定性にあることが明らかとなった。

(3)イッテルビウム系準結晶・近似結晶に対し、元素置換法により新しい準結晶・近似結晶の作成を試みた。その結果、いずれも蔡型クラスターを有する準結晶・近似結晶であることを確認するとともに、それらがすべて価数揺動物質であることも突き止めた。また、共鳴X線発光分光スペクトルを詳細に調べ、準結晶・近似結晶の格子定数とイッテルビウム元素の平均価数との間に強い相関のあることを見出した。特に、「臨界格子定数」が存在し、そこで価数が不安定になることを突き止めた。この結果を(渡辺 三宅による)理論計算と比較し、量子臨界現象が量子価数揺らぎによって引き起こされていることを明らかにした。

(4)Zn-Al-Mg合金において構成元素の組成費を変えながら試料を合成し、それらが準結晶あるいは近似結晶であることを確認した。それらの電気抵抗・磁化率・比熱の測定を行い、全てが超伝導に転移することを見出した。特に、準結晶組成の試料も、0.05Kという超低温でバルク超伝導を示すことを世界に先駆けて発見した。これは、英国物理学会誌 Physics World において「2018年10大ブレイクスルー」の1つに選ばれた。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 10 件)

Tsutomu Ishimasa, Marek Mihalkovič, Kazuhiko Deguchi, Noriaki K. Sato & Marc de Boissieu

“Interpretation of some Yb-based valence-fluctuating crystals as approximants to a dodecagonal quasicrystal”

Philosophical Magazine, Volume 98, 2018 - Issue 22, Pages 2018-2034. (査読あり)

<https://doi.org/10.1080/14786435.2018.1470339>

K. Kamiya, T. Takeuchi, N. Kabeya, N. Wada, T. Ishimasa, A. Ochiai, K. Deguchi, K. Imura & N. K. Sato

“Discovery of superconductivity in quasicrystal”

Nature Communications **9**, Article number: 154 (2018). (査読あり)

doi:10.1038/s41467-017-02667-x

T. Sawano, Y. Shinagawa, T. Shiino, K. Imura, K. Deguchi, N.K. Sato

“Pressure effects on Ce-based Kondo approximant crystal”,

AIP Advances **8**, 101306-1-4 (2018). (査読あり)

Doi: 10. 1063/1.5042745

K. Imura, K. Nobe, K. Deguchi, M. Matsunami, H. Miyazaki, A. Yasui, E. Ikenaga, and

N. K. Sato

“First Observation of Heavy Fermion Behavior in Ce-based Icosahedral Approximant”

J. Phys. Soc. Jpn., **86**, 093702-1-4 (2017). (査読あり)

<https://doi.org/10.7566/JPSJ.86.093702>

M. Matsunami, M. Oura, Tamasaku, T. Ishikawa, S. Ideta, Tanaka, T. Takeuchi, T. Yamada, A. P. Tsai, K. Imura, Deguchi, N. K. Sato, and T. Ishimasa

“Direct observation of heterogeneous valence state in Yb-based quasicrystalline Approximants”

Phys. Rev. B **96**, 241102(R) (2017). (査読あり)

DOI: 10.1103/PhysRevB.96.241102

M. Hayashi, K. Deguchi, S. Matsukawa, K. Imura, N. K. Sato,

“Observation of systematic variation in Yb ion valence as a function of interatomic spacing in icosahedral approximant crystals”

J. Phys. Soc. Jpn. **86**, 043702 -1-4 (2017). (査読あり)

<https://doi.org/10.7566/JPSJ.86.043702>

Shuya Matsukawa, Kazuhiko Deguchi, Keiichiro Imura, Tsutomu Ishimasa, and Noriaki K. Sato

“Magnetic Properties of the Au-Al-Yb Approximant under Hydrostatic Pressure”

J. Phys.: Conf. Ser. **809**, 012013 (2017). (査読あり)

N.K. Sato, S. Matsukawa, K. Nobe, K. Imura, K. Deguchi, T. Ishimasa,

“Quantum critical behavior in magnetic quasicrystals and approximant crystals”,

IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series **868** (2017) 012005. (査読あり)

doi :10.1088/1742-6596/868/1/012005

S. Matsukawa, K. Deguchi, K. Imura, T. Ishimasa, and Noriaki K. Sato,

“Pressure-Driven Quantum Criticality and T/H Scaling in the Icosahedral Au–Al–Yb Approximant”

J. Phys. Soc. Jpn. **85**, 063706-1-4 (2016). (査読あり)

<http://doi.org/10.7566/JPSJ.85.063706>

佐藤憲昭、神谷京佑、酒井志朗、竹森那由多、

“準結晶の超伝導 フラクタル超伝導研究の黎明 ”
固体物理、Vol. 53, No. 10, 221 (2018). (査読あり)

[学会発表](計 41 件)

平野由真, 岡本稔彦, 米山祐樹, 井村敬一郎, 出口和彦, 佐藤憲昭

Au-Al-Yb準結晶における組成制御と磁性

日本物理学会第74回年次大会、九州大学、2019年3月

池尾優輝, 坂本和司, 井村敬一郎, 出口和彦, 佐藤憲昭

極低温下における熱電能測定装置の開発と準結晶への適用

日本物理学会第74回年次大会、九州大学、2019年3月

岡本稔彦, 平野由真, 米山祐樹, 廣川慎之介, 井村敬一郎, 出口和彦, 佐藤憲昭

Au-Al-Yb準結晶・近似結晶のYb希釈系の作製と物性研究

日本物理学会第74回年次大会、九州大学、2019年3月

井村敬一郎, 坂本和司, 横田晋次郎, 廣川慎之介, 出口和彦, 山岡人志, 川井拓真, 山本義哉, 水木純一郎, 平岡望, 石井啓文, 佐藤憲昭

日本物理学会2018年秋季大会、同志社大学、2018年9月

Au-Ga-Yb準結晶・近似結晶における共鳴X線発光分光

佐藤卓, 米山祐樹, 廣川慎之介, 出口和彦, 佐藤憲昭, 益田隆嗣, 松浦直人, 柴田薫
中性子散乱による Al-Al-Yb の量子臨界磁気揺動観測

日本物理学会2018年秋季大会、同志社大学、2018年9月

石田憲二, 北川俊作, 服部泰佑, 山中隆義, 幸田章宏, 髭本亘, 門野良典, 米山祐樹, 廣川慎之介, 出口和彦, 佐藤憲昭

準結晶Au-Al-Ybのミュオンスピン回転/緩和

日本物理学会2018年秋季大会、同志社大学、2018年9月

出口和彦, 米山祐樹, 廣川慎之介, 井村敬一郎, 佐藤憲昭

Au-Al-Yb近似結晶におけるYbの価数制御とf電子の磁性

日本物理学会2018年秋季大会、同志社大学、2018年9月

林裕人, 石政勉, 蔡安邦, 山田庸公, 井村敬一郎, 出口和彦, 佐藤憲昭

Zn-T-Sc (T=Ag, Mg) 及びCd-Mg-Yb準結晶の極低温電気抵抗測定

日本物理学会2018年秋季大会、同志社大学、2018年9月

Takuya Sawano, Yuta Shinagawa, Takayuki Shiino, Keiichiro Imura, Kazuhiko Deguchi, and Noriaki K. Sato

Pressure effects on Ce-based Kondo approximant crystal

International Conference on Magnetism 2018, Moscone Center, San Francisco, USA, 2018年7月

N. K. Sato, K. Kamiya, T. Takeuchi, N. Kabeya, N. Wada, T. Ishimasa, A. Ochiai, K. Deguchi, K. Imura

“Superconductivity in Al-Zn-Mg quasicrystal”

9th Conference on Aperiodic Crystals (Aperiodic 2018), Ames, USA, July 8-13, 2018

林裕人, 本山岳, 石政勉, 井村敬一郎, 出口和彦, 佐藤憲昭

Zn-Ag-Sc 準結晶・近似結晶の極低温電気抵抗及びトンネル効果測定

日本物理学会 第73回年次大会、東京理科大、2018年3月

米山祐樹, 出口和彦, 廣川慎之介, 井村敬一郎, 佐藤憲昭

組成変化から探るAu-Al-Yb準結晶・近似結晶の量子臨界現象

日本物理学会 第73回年次大会、東京理科大、2018年3月

石政勉, 出口和彦, 佐藤憲昭

Yb系価数揺動近似結晶の構造解釈：正12角形準結晶の観点から

日本物理学会2017年秋季大会、岩手大学、2017年9月

米山祐樹, 出口和彦, 廣川慎之介, 井村敬一郎, 佐藤憲昭

Au-Al-Yb 準結晶における置換可能な元素の探索と低温物性

日本物理学会2017年秋季大会、岩手大学、2017年9月

澤野拓哉, 野部晃平, 松川周矢, 井村敬一郎, 出口和彦, 佐藤憲昭

Tsai 型クラスター構造をもつ重い電子系 Ce 近似結晶の磁性とその圧力効果

日本物理学会2017年秋季大会、岩手大学、2017年9月

川慎之介, 出口和彦, 米山祐樹, 横田晋次郎, 井村敬一郎, 佐藤憲昭, 豊永詞, 石政勉, 山本義哉, 山岡人志, 平岡望, 石井啓文

Tsai 型クラスターをもつ Yb 系準結晶・近似結晶の磁性

日本物理学会2017年秋季大会、岩手大学、2017年9月

林裕人, 石政勉, 林実奈美, 井村敬一郎, 出口和彦, 佐藤憲昭

Zn-Ag-Sc準結晶の極低温電気抵抗率測定

日本物理学会2017年秋季大会、岩手大学、2017年9月

難波慶介, 出口和彦, 松川周矢, 廣川慎之介, 米山祐樹, 井村敬一郎, 石政勉, 佐藤憲昭

“ Tsai 型クラスター構造をもつ Au-Al-Yb 準結晶の置換効果 ”

日本物理学会 第72回年次大会、2017年3月

神谷京佑, 山本晃生, 壁谷典幸, 出口和彦, 井村敬一郎, 和田信雄, 竹内恒博, 落合明, 佐藤憲昭

“ Al-Mg-Zn 準結晶・近似結晶における超伝導 ”

日本物理学会 第72回年次大会、2017年3月

楠直紘, 伊藤孝寛, 井村敬一郎, 林実奈美, 佐藤憲昭

“ Zn-Ag-Sc 系準結晶および近似結晶における光電子分光 ”

日本物理学会 第72回年次大会、2017年3月

⑲ 品川勇太, 澤野拓哉, 井村敬一郎, 出口和彦, 佐藤憲昭

“ Ag-In-Ce 近似結晶の圧力下比熱測定 ”

日本物理学会 第72回年次大会、2017年3月

⑳ K. Deguchi, S. Matsukawa, K. Imura, N.K. Sato, T. Ishimasa

“Magnetism and superconductivity in icosahedral quasicrystals and approximants with Tsai-type clusters”

13th International conference on quasicrystals, Sep. 18-23, 2016, Kathmandu, Nepal

㉑ N. K. Sato

“Physics hidden in open space between heavy fermions and quasicrystals”

13th International conference on quasicrystals, Sep. 18-23, 2016, Kathmandu, Nepal

㉒ 澤野拓哉, 野部晃平, 松川周矢, 井村敬一郎, 出口和彦, 佐藤憲昭, 石政勉

Tsai 型クラスター構造をもつ Ce 系近似結晶の磁性と量子臨界現象

日本物理学会(2016年)秋季大会、金沢大学、2016年9月

㉓ 神谷京佑, 山本晃生, 出口和彦, 井村敬一郎, 佐藤憲昭, 竹内恒博

Al-Mg-Zn 系準結晶・近似結晶における超伝導

日本物理学会秋季大会、金沢大学、2016年9月

㉔ 松波雅治, 大浦正樹, 玉作賢治, 石川哲也, 出田真一郎, 田中清尚, 竹内恒博, 山田庸公, 蔡安邦, 出口和彦, 佐藤憲昭, 石政勉

2種類の蔡型クラスターにおける電子状態の違い: Yb 系近似結晶の光電子分光

日本物理学会秋季大会、金沢大学、2016年9月

⑳ 松川周矢, 出口和彦, 井村敬一郎, 石政勉, 佐藤憲昭

Au-Al-Yb近似結晶における量子臨界現象の研究

日本物理学会秋季大会、金沢大学、2016年9月

㉑ 廣川慎之介, 出口和彦, 豊永詞, 石政勉, 松川周矢, 井村敬一郎, 佐藤憲昭

Tsai型クラスターをもつSm系近似結晶の磁性

日本物理学会秋季大会、金沢大学、2016年9月

㉒ 林実奈美, 出口和彦, 石政勉, 豊永詞, 松川周矢, 井村敬一郎, 佐藤憲昭

Tsai型クラスターをもつYb系磁気近似結晶の低温物性

日本物理学会秋季大会、金沢大学、2016年9月

㉓ K. Deguchi, S. Matsukawa, K. Imura, N. K. Sato, T. Ishimasa

“Quantum Criticality and Superconductivity in Icosahedral Quasicrystals and Approximants with Tsai-type Clusters”

The International Conference on Strongly Correlated Electron Systems (SCES2016), Hangzhou, China, May 8-13, 2016.

㉔ 難波慶介, 松川周矢, 井村敬一郎, 出口和彦, 田中克彦, 石政勉, 中村洋子, 山田庸公, 蔡安邦, 佐藤憲昭

蔡型クラスター構造を持つAu-Sn-R (R:希土類元素)系の近似結晶と準結晶の物性研究

日本物理学会第71回年次大会、東北学院大学、2016年3月

㉕ 神谷京佑, 井村敬一郎, 出口和彦, 山本晃生, 竹内恒博, 佐藤憲昭

Al-Mg-Zn系準結晶・近似結晶における超伝導

日本物理学会第71回年次大会、東北学院大学、2016年3月

〔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

<https://emuken.jimdo.com/>

6. 研究組織

(1)研究分担者

(2)研究協力者

研究協力者氏名：出口和彦

ローマ字氏名：Deguchi Kazuhiko

研究協力者氏名：井村敬一郎

ローマ字氏名：Imura Keiichiro

研究協力者氏名：石政勉

ローマ字氏名：Ishimasa Tsutomu

研究協力者氏名：高倉洋礼

ローマ字氏名：Takakura Hiroyuki

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、研究者個人に帰属されます。