

令和 3 年 6 月 3 日現在

機関番号：13901

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2019～2020

課題番号：19K21847

研究課題名（和文）フラクタル超伝導への挑戦

研究課題名（英文）A challenging study on fractal superconductivity

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） 4,900,000円

研究成果の概要（和文）：本研究課題の目標は、準結晶超伝導、即ち“フラクタル超伝導”の特性解明である。研究対象は、現時点で唯一の超伝導準結晶Al-Zn-Mgである。超伝導発現機構に関しては、同位体効果等の直接的な証拠はないが、近似結晶も準結晶と類似の超伝導を示すことから、周期結晶と同じようにフォノン媒介超伝導の可能性が高いと考えられる。ただ、フェイゾン機構等の準結晶特有の可能性を完全に排除できるかについては、更なる研究が必要である。Al-Zn-Mg準結晶より転移温度の高い超伝導準結晶の探索は成功には至らなかったものの、新型の超伝導近似結晶を発見した。準周期性と超伝導転移温度の相関の解明は今後の課題である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

周期結晶やアモルファスにおいては、超伝導を示す物質が数多く発見されてきている。しかし、準結晶においては、これまで1つの例も見いだされていなかった。2018年、本研究代表者らは準結晶初となる超伝導体を発見した。このフラクタル超伝導が従来の超伝導と何処が異なるのかを明らかにすることが本研究課題の目標である。理論が予想するように、フラクタル超伝導が従来の超伝導と質的に異なることが実証されたならば、超伝導研究に大きな変革がなされると期待される。これまでのところ、準結晶特有の超伝導性は見いだされていないが、フラクタル超伝導の解明は学術的意義が高いため、更なる探求が必要である。

研究成果の概要（英文）：We aim at resolving fractal superconductivity that emerges in quasicrystal. First, we tried to make a study on isotope effect of the Al-Zn-Mg quasicrystal, that is the only quasicrystal showing superconductivity. Unfortunately, we could not conduct such a study due to the budget problem, however, we speculate that phonon-mediated superconductivity is the most promising mechanism of superconductivity because approximant crystals show similar superconductivity to the quasicrystal. Second, we tried to search for a new quasicrystal that shows superconductivity. We failed to find a new superconductor up to now, however, we found a new approximant superconductor; our next target is to clarify superconducting properties of the approximant.

研究分野：強相関電子物性

キーワード：フラクタル超伝導 準結晶 近似結晶

1. 研究開始当初の背景

準結晶は、発見された 1980 年代当時、結晶とアモルファスに次ぐ「第 3 の固体」と呼ばれた。しかし、国際結晶学連合による現代的定義によれば準結晶は結晶の仲間であり、“広義の結晶”に属する。(多くの教科書の(あるいは大学の講義での)定義は未だに古いままである。本成果報告書では、「周期性を持つ固体(旧来の定義での結晶)」を周期結晶と書き表し、準結晶と区別する。)準結晶とは、大雑把に言えば、ブラッグ反射を引き起こす“周期性とは異なる対称性・秩序(準周期性)”を有する物質である。

物理学において対称性は極めて重要な役割を果たす。液体から周期結晶への転移を考えると、連続的並進対称性が消失した結果、電子の運動量は保存されなくなるが、残った不連続並進対称性のため結晶運動量は保存される。これは、固体の電気抵抗の起因を理解するうえで重要な概念となっている。このような保存則やブロッホの定理、あるいは Bardeen-Cooper-Schrieffer (BCS) 超伝導の引力を媒介するフォノンのような素励起・準粒子などの概念は、周期結晶の物性を理解する上で重要である。周期性を持たないランダム系に対しては、適当な平均操作を施すことにより周期性を回復できるかもしれない。しかし、決定論的格子である準周期系に対しては、周期結晶やアモルファスに用いられてきた手法をそのまま適用することはできそうにない。この根源的な困難が準結晶中の電子状態の研究をチャレンジングで面白いものにしていく。

超伝導は数多くの周期結晶やアモルファスで発見され、今や珍しい現象ではない。理論的にも、超伝導発現に必要な引力の機構等を別にすれば、BCS 理論は実験の多くを説明する。とはいえ、高圧下硫化水素における高温超伝導の発見や、犬猿の仲と言われる強磁性秩序(磁石)と同居する重い電子系超伝導の発見に見られるように、今でも超伝導は多くの研究者を魅了している。一方、準結晶では、ごく最近まで超伝導を示すものが 1 つも発見されていなかった。本研究では、本研究代表者のグループが初めて発見した準結晶超伝導体 Al-Zn-Mg に焦点を当て(図 1 参照)[1]、その超伝導特性の解明を目指す。

準結晶において原子配列は自己相似(フラクタル)な構造を示し、電子波動関数はブロッホ状態とも局在状態とも異なる臨界状態となっていると期待される。文献[1]では、このようなフラクタル構造中で発現する超伝導が弱結合領域にあることを示した。このフラクタル超伝導において形成されるクーパー対は、理論によれば、BCS 理論のものとは質的に異なる[2,3]。これらの理論予想が実証されれば、超伝導の理解が各段に深まるに違いない。本研究は、これまでの超伝導研究の方向を大きく変革・転換させる可能性を秘めている。

2. 研究の目的

Al-Zn-Mg 準結晶で見いだされた超伝導は(理論研究[2]で議論されたように)BCS 超伝導と異なる性質(例えば超伝導発現機構やトンネル分光実験などで観測される性質)を見せるのだろうか?この素朴な問いに答えようとするのが本研究の目的である。また、フラクタル超伝導の普遍性を調べるためには、第 2 の準結晶超伝導を探索する必要がある。これを行うことも本研究の目的である。

3. 研究の方法

上記目的を達成するため、以下の 3 つの方法を用いる。

- (1) 文献[2]の著者らの計算によれば、フラクタル超伝導と常伝導物質との接合における電流・電圧特性が、BCS 超伝導とは異なる可能性がある[4]。そこで本研究では、Al-Zn-Mg 準結晶と白金とのトンネル接合を形成し、電流・電圧特性の測定を行う。
- (2) 超伝導発現機構の解明を目指して、同位体効果の実験を行う。高価な Al, Zn, Mg の同位体を用いてどの程度の量の試料を作れるかはやってみないとわからないが、予算が許す限り多くの試料を合成し、それらの転移温度を電気抵抗、磁化率、および比熱測定により決定する。
- (3) Al-Zn-Mg 準結晶より高い超伝導転移温度を持つ準結晶を探索する。具体的には、Al-Zn-

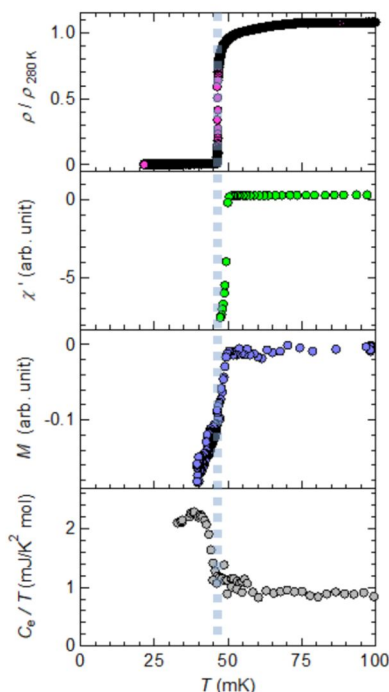


図 1. Al-Zn-Mg 準結晶の超伝導転移に伴う物性の異常(文献[1]より引用転載)。上から順に、電気抵抗、交流磁化率、直流磁化、比熱の温度依存が示されている。0.05 K 付近でバルクの超伝導が発現している。

Mg 準結晶を見つけた時と同じ手法(即ち超伝導となる近似結晶を出発点として、準結晶超伝導を探索する)を用いる。ここで近似結晶とは、準結晶と同じ局所クラスター構造を持ち、そのクラスターが周期的に配列した結晶を指す。また、新しい超伝導近似結晶の探索を行い、近似度と超伝導性との相関を調べる。

- (4) 超伝導状態の理解のためには、常伝導状態の理解も重要である。例えば、電気抵抗におけるフォノン散乱と準周期性との関係は、超伝導発現機構の解明にも役立つであろう。そこで本研究では、電気抵抗の温度依存性と準周期性あるいは近似結晶の近似度の相関を調べる。

4. 研究成果

上記研究方法(1)に基づいた研究に関しては、ポイントコンタクトによるトンネル接合をうまく形成できなかったため、成果を得るには至っていない。適当な接合を得るための条件探索を今後も継続して行う必要がある。(2)については、本研究予算内ではごく微小な試料しか作れないことが明らかとなったため、同位体を用いた試料の作成は断念した。(3)については、幾つかの候補物質の電気抵抗を測定し、抵抗減少を示す準結晶を見つけ出したが、ゼロ抵抗を観測するには至らなかった。この超伝導は、おそらくは、不純物相に起因すると考えられる。一方、従来とは異なる近似度を持つ近似結晶が低温で(バルクと思われる)超伝導転移を示すことを見出した。本研究により新しく見出した近似結晶は、これまでに本研究代表者らが見い出してきた近似結晶と同じように、準結晶と類似の超伝導特性を示す。これより、準結晶の超伝導発現機構として、従来型のフォノン媒介超伝導が(現時点では)有力と考えられる。とはいえ、フェイゾン媒介超伝導のような新奇メカニズムの可能性を完全に排除するには、更なる研究が必要である。(4)に関しては大きな進展が見られた。これまで、準結晶の電気抵抗の温度依存性については、金属的あるいは半導体的温度依存性のいずれが本質的温度依存性か、議論が分かれていた。多種の準結晶の電気抵抗を(超伝導探索に伴い)低温領域まで測定した結果、金属的な温度依存も半導体的な温度依存も準結晶の本質であり、電気抵抗の温度依存性の相違はフェルミ準位における状態密度の大小に関係していることを突き止めた。さらに、新規近似結晶の常伝導状態における電気抵抗は、1/1 および 2/1 近似結晶の中間に位置することも見出した。これにより、「電気抵抗の温度依存性は、近似度が上がるにつれ準結晶に近づいていく」ことが明確となった。

文献

- [1] K. Kamiya, N. Sato 他, "Discovery of superconductivity in quasicrystal", *Nat. Commun.* **9** (2018) 154.
- [2] S. Sakai, N. Takemori, A. Koga, R. Arita, "Superconductivity on a quasiperiodic lattice: Extended-to-localized crossover of Cooper pairs", *Phys. Rev. B* **95** (2017) 024509.
- [3] 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 (アグネ)* No.10 (2018) 21.
- [4] N. Takemori, R. Arita, S. Sakai, "Physical properties of weak-coupling quasiperiodic superconductors", *Phys. Rev. B* **102** (2020) 115108.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 2件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 平野由真, 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
2. 発表標題 Zn系準結晶及びCd-Mg-Yb準結晶の電気抵抗率の温度依存性の研究
3. 学会等名 日本物理学会2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 N.K. Sato
2. 発表標題 Superconductivity and quantum criticality in quasicrystals
3. 学会等名 APPC 2019, 14th Asia-Pacific Physics Conference (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 平野由真, 林裕人, 豊永詞, 石政勉, 蔡安邦, 山田庸公, 井村敬一郎, 出口和彦, 佐藤憲昭
2. 発表標題 準結晶の電気抵抗と比熱の研究
3. 学会等名 日本物理学会第75回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 N. K. Sato, K. Kamiya, T. Takeuchi, N. Kabeya, N. Wada, T. Ishimasa, A. Ochiai, K. Deguchi, K. Imura
2. 発表標題 Discovery of superconductivity in quasicrystal
3. 学会等名 33rd International Symposium on Superconductivity (ISS2020) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 壁谷典幸, 平野由真, 佐藤憲昭, 高倉洋礼
2. 発表標題 Al-Mg-Zn系2/1-1/1-1/1近似結晶の超伝導
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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
研究分担者	壁谷 典幸 (Kabeya Niriyuki) (70633642)	東北大学・理学研究科・助教 (11301)	

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
---------	---------