

## 超伝導電子対の「形」を捉える



研究ノート

井澤 公一\*

Identifying the “shape” of the Cooper pair

Key Words : Unconventional superconductivity, Pairing symmetry, Pairing mechanism

## はじめに

超伝導は、リニア新幹線やMRI、超伝導素子、超伝導ケーブルなど、交通・輸送、医療、エレクトロニクス、エネルギーといった幅広い分野にわたる応用が期待される現象として広く知られている。これらのうち、すでに実用化され、使われているものはいくつもあるが、その多くは希少で高価な液体ヘリウム（絶対温度4.2ケルビン、つまり摂氏マイナス269℃）を用いて極低温に冷却する必要がある、技術面やコスト面において手軽には使えないという欠点がある。これは超伝導が、今のところ、（現実的な環境下では）低温でのみ発現する現象であることに起因している。それにもかかわらず、すでに超伝導が医療や研究の場において広く使われていることを考えると、その有用性は、冷やさなければならないという欠点を補って余りあるものであることがよくわかる。したがって、もし常温・常圧で超伝導を起こす物質が見つければ、世の中を大きく変えるような革新的な発展がもたらされるといっても過言ではないだろう。それゆえ、室温で起こる超伝導の実現を目指し、より高い転移温度をもつ物質が追い求められてきた。

一方、超伝導という驚くべき現象そのものを理解しようという基礎研究も、（当然ながら）発見当初

から精力的に行われてきた。その結果、電気抵抗がゼロという性質以外にも、量子状態が巨視的に現れた現象である超伝導ならではの驚くべき性質がこれまでいくつも見出されてきた。それらは学術的に重要な意味をもつだけでなく、超伝導でしか実現し得ないような応用を生み出す源にもなっている。このように基礎研究は応用の礎としても重要な役割を担ってきた。近年、ゴールが具体的でわかりやすい応用研究にばかり目が向きがちであるが、本稿では、超伝導のトピックのなかでも従来の超伝導にはない特異な現象や新奇物性、メカニズムといった最も基礎的な側面にスポットを当て、最先端の超伝導研究の一端を紹介したい。

## 超伝導といえば高温超伝導が有名だが、..

超伝導は1911年にカマリング・オネスにより発見されたが、そのメカニズムが理解されるまでには、1957年のBCS理論の発表までの約半世紀待たなければならなかった。BCS理論によれば、超伝導は格子振動を媒介として2つの電子の間に引力がはたらき、クーパー対とよばれる電子の対を作ることにより生じる。このような考えに基づくBCS理論は、超伝導で見られるほとんどの現象を見事に記述することができた。そのため、当時、超伝導はほぼ理解されたと考えられていた。

ところが1979年に発見された希土類化合物における重い電子系超伝導を皮切りに、有機化合物、銅酸化物、ルテニウム酸化物など、多くの物質群で従来のBCS理論では説明困難な超伝導が次々と発見されたことにより、超伝導研究は新しい展開を迎えることになる。そのような超伝導を、従来の超伝導に対して「非従来型超伝導」と呼ぶ。なかでも銅酸化物において、BCS理論で予想される転移温度の限界をはるかに超え、液体窒素温度（絶対温度77



\* Koichi IZAWA

1970年7月生まれ  
 広島大学大学院 理学研究科 物理学専攻  
 攻博士後期課程 (1998年)  
 現在、大阪大学大学院 基礎工学研究科  
 物質創成専攻 教授 博士(理学)  
 専門/低温物理学  
 TEL : 06-6850-6435  
 FAX : 06-6850-6435  
 E-mail : izawa@mp.es.osaka-u.ac.jp

ケルビン、摂氏マイナス 196℃) よりも高い温度で超伝導になるものが見つかったことで、超伝導研究に再び熱い視線が送られることになる。これが高温超伝導フィーバーである。この高温超伝導の発見(1986年)以降、多くの研究者が熱狂し、研究に参加した。そのような背景もあってか、超伝導という、どうしても高温超伝導が注目されがちである。しかし、ここで強調したいのは、非従来型超伝導には、他にもっと多彩で興味深い性質を示すものはいくつもあるということである<sup>1)</sup>。そのようなエキゾチックな物理の宝庫である非従来型超伝導の特徴とそれをどのように捉え、その本質をどのように紐解くかが本稿の主題である。以下、その詳細を紹介する。

### 多彩でエキゾチックな非従来型超伝導

通常、超伝導は磁場を強くすると壊れてしまう。つまり超伝導と磁場(磁性)は相容れない関係にある。ところが非従来型超伝導の中には、従来の超伝導におけるそのような“常識”から大きく逸脱するものがある。例えば、磁場により一旦壊れた超伝導が、あろうことか、より強い磁場中で復活する「リエントラント超伝導」がその1つである<sup>2)</sup>。それだけではない。超伝導とは対極にある強磁性を示す物質、つまり磁石が超伝導になる「強磁性超伝導」<sup>2)</sup>や、外部磁場がないのに超伝導になると同時に自発的に物質内部に磁場を発生させる「カイラル超伝導」<sup>1)</sup>、さらには温度や磁場を変化させることで、ある超伝導状態から別の超伝導状態に変化する(つまり同一の物質において超伝導が何種類もみられる!)「多重超伝導」<sup>1)</sup>という驚くべきものも見つかっている。紙面の都合上、詳細には触れないが、その他、トポロジカル超伝導<sup>3)</sup>やネマティック超伝導<sup>4)</sup>など、従来の超伝導では考えられない多彩で不思議な超伝導がいくつも存在することが近年明らかになっている。

このような非従来型超伝導の特徴として、多くの場合、超伝導電子であるクーパー対が物質固有の“異方的な形”をもつことが挙げられる。その様子を図1に示す。この特徴は、図1(a)に示すように、従来の超伝導におけるクーパー対が、等方的で丸い形をしていることとは対照的である。特に興味深いのは、多重超伝導では、クーパー対が異方的な形をしているだけでなく、温度や磁場を変化させただけ

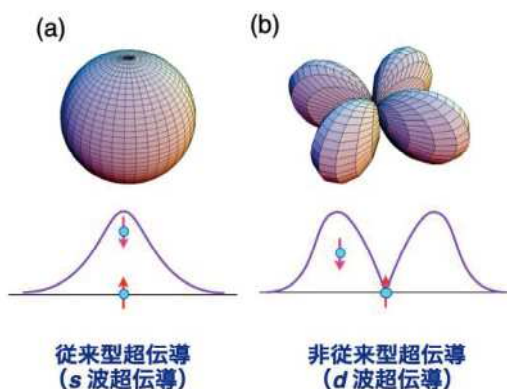


図1 (a) 従来型超伝導 (s波超伝導) および (b) 非従来型超伝導 (d波超伝導) の場合の波動関数の形。従来型超伝導では、対を形成する一方の電子から見て、相手の電子が等方的に拡がり、同じ位置に来る確率が最も高いのに対し、非従来型超伝導 (d波超伝導) では、2つの電子が同じ位置に来る確率はなく、相手の電子が存在する方向と存在しない方向がある。

で、その形を次々と変化させることである。通常、同一の物質であれば、温度や磁場の変化によって、クーパー対の大きさは変化することはあっても、その形が変化することはない。このことは、多重超伝導が極めて特殊な超伝導であることを物語っている。

さて、ここでようやく本稿のタイトルにある「超伝導電子対(クーパー対)の形」が出てきた。では一体、その形は何を表しているのだろうか? また、それにどのような意味や重要性があるのだろうか? 次にこのことについて述べたい。

### クーパー対の形

クーパー対の形は、対を形成している一方の電子から見たもう一方の電子の広がり方を表している。上で述べたとおり、従来の超伝導のクーパー対は丸い形をしている(図1(a))。これは一方の電子の周りに相手の電子が等方的に存在する、つまりどの方向にも一様に対を作っていることを示している。対を作るかどうかは、電子間に引力がはたらくかどうかで決まっているので、丸い形が意味するところは、電子間に等方的に引力がはたらくということである。それに対し、非従来型超伝導では、図1(b)からわかるように、相手の電子が存在する方向と存在しない方向がある。これは、大雑把に言えば、対を作っている方向と作っていない方向があるということ、言い換えると、引力がはたらく方向とはたら

かない方向があることを示している。このように、非従来型超伝導では、電子間にはたらく引力に異方性(波数依存性)があり、その引力のはたらき方(波数依存性)に対応してクーパー対の形が決まっているというわけである。したがって、逆に、クーパー対の形を知ることができれば、通常目で見ることのできない引力がどのようなにはたらいているかという超伝導メカニズムに直結する極めて重要な情報を手に入れることができる。さらに、その関数形(対関数)がわかれば、その超伝導がどのような性質をもつ超伝導なのか明らかとなり、そこからまだ見出されていない性質なども推測することが可能となる。このようにクーパー対の形は、メカニズムを含め、その超伝導の本質を理解する上で最も基本的で必要不可欠な情報を含んでいる。では、実際にどのようにすればその形を知ることができるのか、またそこからどのように理解が深まるのか、次にその方法と得られる理解について述べる。

### 超伝導メカニズムを探る

一般にクーパー対の形を明らかにすることは言うほど簡単なことではない。それゆえクーパー対の形の重要性は認識されつつも、長い間、その詳細は明らかにはなっていなかった。そんななか、我々は、非従来型超伝導特有の性質を利用してクーパー対の形を調べてきた<sup>5-8)</sup>。以下、その詳細を述べる。

上述の通り超伝導が磁場によって壊れることは、よく知られていることであるが、クーパー対の形が異方的な場合、図2(a)に示すように、対を形成する相手の電子が存在する方向に磁場を印加したときと存在しない方向に印加したときとで、その壊れ方が異なるという特徴的な性質がある。この性質を利用し、試料の結晶軸に対して、磁場方向を変化させながら熱伝導率を測定することにより、クーパー対の形を調べることができる。一般に、クーパー対は熱を運ばないが、対が壊れると熱を運べるようになる。そのため、磁場の向きによる対の壊れ方の違いは、熱伝導率の大きさの違いとして観測することができる。例えば、図2(a)のようなクーパー対の場合、水平面に沿って磁場方向を変化させると、クーパー対の4回対称性を反映して、熱伝導率に4回対称性をもつ振動が現れることが期待される。従って、逆に磁場の向きを様々な方向に変化させて熱伝導率の

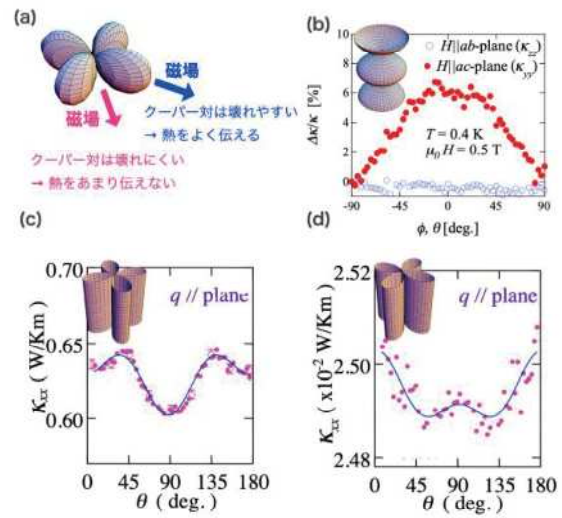


図2 クーパー対の形の検出方法と実験結果。(a) 磁場の向きによってクーパー対の壊れ方が異なる。(b)–(d) 熱伝導率の磁場方向依存性<sup>5,6)</sup>。クーパー対の形を反映して、クーパー対の壊れ方が異なり、熱伝導率に特徴的な磁場方向依存性がみられる。

変化(振動)の様子を調べれば、その磁場方向依存性からクーパー対の形を知ることができるというわけである<sup>9)</sup>。図2(b)–(d)に熱伝導率の実際の測定例とその結果から推測されるクーパー対の形を示す。これらの図から、物質ごとに特徴的な磁場方向依存性が現れることがみてとれる。そして、この手法を使った実験により実際に決定したクーパー対の形を図3に示す。これだけみてもクーパー対には実に多様な形があることがわかる。

最後に、クーパー対の形が判明することで何がどのように理解が深まるかを述べたい。多くの場合、超伝導が発見され、その研究が進むと、メカニズムに関して様々な理論的提案がなされるようになる。一般に、メカニズムが異なればクーパー対の形は異なり、メカニズムが決まればそれに応じてクーパー対の形が決まる。そのため、実験的にクーパー対の形を言及できれば、メカニズムに関する議論に対して強い制約を課することが可能となる。これにより数ある理論提案の中からメカニズムの有力候補を絞り込むことができる。また、得られたクーパー対の形(対関数)とそれに基づく理論的考察から、それまでの未解決問題の解決やそれまで予想されていなかった物性に関する議論も可能となる。実際、本研究手法によりクーパー対の形が明らかになったことにより、30年来の謎がほぼ解決したものや、それ以

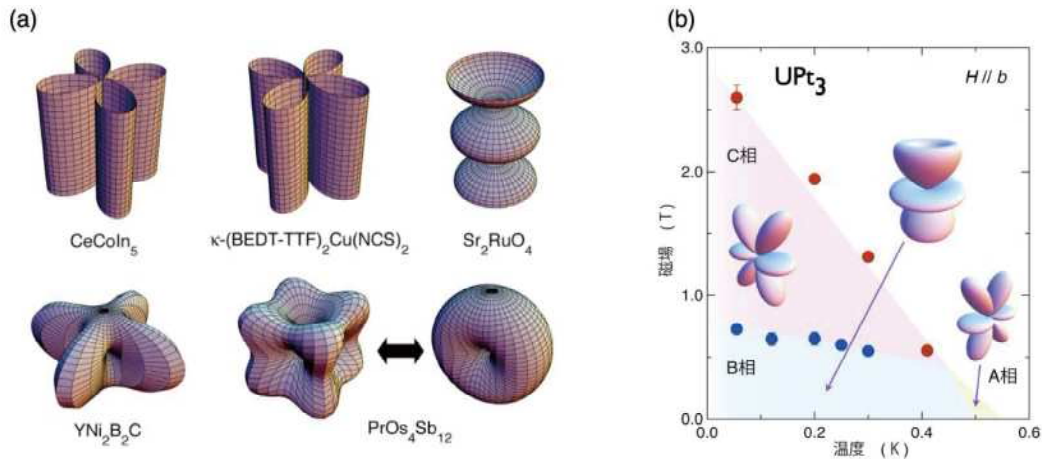


図3 本研究手法により決定したクーパー対の形の例<sup>5-8)</sup>. 多重超伝導を示すUPt<sub>3</sub>では、温度と磁場によりクーパー対の形が変化していることがわかる。

前には議論されていなかったトポジカル超伝導やワイル超伝導の可能性が判明したものもある<sup>8,10)</sup>. このように、本稿で紹介した研究手法は、基礎的な理解の進展に重要な役割を果たしてきたが、さらに長期的には、新たな応用の創出へのヒントや高い転移温度を得るためのヒントといった応用研究の進展にも貢献できると期待される。

おわりに

冒頭でも述べたように、超伝導特有の性質を利用した応用が、幅広い分野で数多く提案されており、その実用化に向けて盛んに研究がなされている。もちろん、それらはとても素晴らしいことであるが、最も素晴らしいことは、純粋な知の探求の中から人類が超伝導というそれ以前にはなかった概念を見出し、手にしたということであろう。というのも、そもそも超伝導という概念がなければ、上述のいかなる応用も考案されるはずはなかったからである。そう考えると、それまでにない新たな応用を生み出すような新しい概念を創出することは重要であり、その源としての基礎研究の役割は大きいと言える。ここで紹介した超伝導研究の成果は、直ちに応用・実用化につながるものではないかもしれない。しかし、得られた結果は、明らかに従来の常識からは逸脱した特徴的なものばかりで、超伝導、さらには物性物理の奥深さを我々に教えてくれる。短期的でゴールのわかりやすい応用研究も良いが、もっと長期的な

視点に立ち、これらの成果が、この先どのように展開してゆくのか、その進展に期待したい。

参考文献

- 1) 例えば, M. Sigrist and K. Ueda, Rev. Mod. Phys. **63**, 239 (1991).
- 2) 例えば, D. Aoki *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **88**, 022001 (2019).
- 3) 佐藤昌利, 物性研究 **94**, 311 (2010).
- 4) S. Yonezawa, Condensed Matter **4**, 2 (2018).
- 5) Y. Matsuda, K. Izawa, and I. Vekhter, J. Phys. Condens. Matter **18**, R705 (2006).
- 6) 井澤公一, 松田祐司, 固体物理 **37**, 235 (2002).
- 7) 井澤公一, 鎌田このみ, 松田祐司, 日本物理学会誌 **59**, 92 (2004).
- 8) 井澤公一, 町田洋, 固体物理 **49**, 345 (2014).
- 9) このように書くとも実験を行えば簡単に結果が得られるように感じるかもしれない。しかし、ここで注目している熱伝導率の変化は大きくても全体の数%程度であり、それを観測するためには、1ケルビン以下の極低温において磁場方向を精密に制御した上で、1/100000ケルビン~1/10000ケルビンという極めて小さな温度変化を検出しなければならないため、実験はそう容易ではない。
- 10) Y. Tsutsumi, *et al.*: J. Phys. Soc. Jpn. **82**, 113707 (2013).