

超電導工学研究所
芝浦工業大学
村上雅人

1 超伝導は常伝導とは違う相

前号では、マイスナー効果の発見によって、超伝導状態が常伝導状態とは異なる新しい熱力学的状態であるということが明らかになったことを説明した。それでは、何が常伝導状態と異なるのであろうか。

すでに紹介したように、金属の常伝導状態とは、最外殻の電子が金属原子の束縛から解放されて、自由に金属格子の間を動きまわっている状態である。この際、自由電子は、金属格子や他の電子との相互作用はほとんどないので、「自由」という名前がつけられている。しかし、自由と言っても、負に帯電した電子と正に帯電した格子とのクーロン相互作用をゼロにすることはできないので、電気抵抗はゼロにはならないということを説明した¹。

それでは、超伝導状態とはいったいどういう状態なのであろうか。研究者によっては、複数の電子が互いに相互作用することで、結果的に電気抵抗がゼロになる状態ができるのではと考えた。しかし、前号でも紹介したように3体以上の運動方程式を解析的に解くことはできない。金属には、無数の電子（1モルあたり 10^{24} 個程度）が存在するから、その相互作用を計算するなど到底できない。

そこで、とりあえず2個の電子に注目して、その相互作用で電気抵抗ゼロを説明できないかに取り組んだのである（補遺参照）。しかし、このような考えには非難も多かった。なぜなら、電子は負に帯電しているので、互いに反発しあうだけであり、正の相互作用など有り得ないというのが、その骨子である。

確かに、電子どうしは反発しあうだけである。そこで、第三者を介在することで、電子どうしが引力相互作用を持つことができないかというアイデアが浮

¹ 電子と格子の相互作用が弱いほど、電気をよく通す、つまり電気抵抗が低いということになる。金、銀、銅はその典型である。

かんだ。それが、正に帯電した格子の存在である。負の電子と正の格子であれば、互いに引力が働く。しかし、前号で紹介したように、この引力こそが、電気抵抗の本質的原因である。電気抵抗の原因が、電気抵抗を消すことに役立つなどということが起こり得るのであるのか。

2. 超伝導メカニズム

絶対零度であっても、正に帯電した格子の中を負に帯電した電子が運動しようとする、必ず正と負の電荷のあいだに働くクーロン力の影響で、電子の運動は妨げられる。この様子を模式的に示すと、図 1 (a)のように電子が図の位置にくると正に帯電した格子がわずかであっても変形し、その影響で格子振動が生じる。この結果、電子の運動エネルギーが格子振動に奪われてしまう。これが本質的な電気抵抗の原因である。

ここで、この格子振動を誘起した電子と十分近い位置に他の電子が居るものとしよう。最初の電子が格子の引力相互作用によって格子間距離が狭まることになるので、その領域は局所的に正電荷の濃度がまわりより高くなっている。すると第二の電子は、図(b)のように、この正電荷濃度の高い領域から引力を受ける。つまり、加速されることになる。言い換えれば、最初の電子は、格子にエネルギーを奪われるが、第二の電子は逆に格子からエネルギーを奪うことができるのである。

そんなうまい話があるかと首を傾げたくなるが、実は、超伝導状態では、ある電子が格子に奪われたエネルギーを、別の電子が奪い返すことで、これら2つの電子ペアで考えれば、エネルギー損失がない状態ができているのである。この電子対のことを、その提唱者にちなんでクーパー対 (Cooper pair) と呼んでいる。

そうは言っても、第一の電子が奪われたエネルギーをそっくりそのまま次の電子が受け取るなどということが、そう簡単に起こるとは考えにくい。ここで、われわれはミクロの世界を支配する量子力学の世界へ少し足を踏み入れなければならない。

電子の運動を支配するのは、ニュートン力学ではなく量子力学である。量子力学によると、電子のようなミクロ粒子の世界では、エネルギーが連続的に変化するのではなく、飛び飛びの値しかとれないことが分かっている。いわば、0, 1, 2, 3, ...のようにデジタル化、つまり量子化されているのである。

これを、いまの電子対にあてはめてみよう。電子のエネルギーはデジタル化されているから、最初の電子が格子に奪われるエネルギーもある決まった量となる。これを仮に k としよう。すると、第二の電子が格子から奪うことのできるエネルギーも、自由な量ではなく、 k ということになる。つまり、ミクロの世界ではやりとりできるエネルギーは飛び飛びの値しか取れないので、結局、やり取りできるエネルギーも一定となるのである。これを、電子のペアとして $(-k, k)$ のように表記する。あたかも、電子と格子がひとつのボールを投げ合っているような状態なので、電子と格子のキャッチボールと呼ぶひともいる。

3. BCS の壁

電子が格子との相互作用を通して、ふたつの電子がペアをつくり、その結果電気抵抗ゼロの状態ができるということを提唱したのは、Bardeen, Cooper, Schrieffer という3人の研究者である。このため、3人の頭文字をとって、BCS理論と呼ばれている。BCS理論の登場によって、それまでなぞとされていた超伝導の性質がすべて説明できるようになった。まさに奇跡の理論であったのである。

超伝導機構が解明されたことで、興味の対象は、果たしてどれだけ高い温度で超伝導現象は起こるのかという点に移った。超伝導を工業的に利用するためには、できるだけ高い温度で超伝導が発現する方がありがたいからである。

ここで、BCS理論の基本は、電子が格子に及ぼす影響である。これを専門的には電子格子相互作用と呼んでいる。電気をよく通す物質は、この相互作用が弱いことを意味している。事実、金や銀や銅などの良導体は超伝導にはならない。つまり、電子が格子に与える影響が弱すぎて超伝導機構が働かないのである。

一方、温度が高くなると、格子の熱振動がはげしくなるので、電子が引き起こす小さな振動など、その中に埋もれてしまう。つまり、温度が高くなると超伝導機構が働かなくなること示している。よって、より高温で超伝導が発現するためには、熱振動に勝つぐらい、電子が格子に与える影響を大きくする必要がある。

それでは、電子格子相互作用は、どこまでも強くできるのであろうか。実は、あまり強くなり過ぎると、電子が格子に捉えられて動かなくなり、絶縁体になってしまう。電子が動けないのでは、超伝導になりえない。つまり、自由電子

が自由に動ける状態で、強くできる電子格子相互作用には限界がある。これは、この機構では超伝導になる温度に上限があることを示している。これを BCS の壁と呼んでおり、30 – 40 K 程度と考えられている。

1986 年までは、多くのひとが、BCS の壁が限界であろうと考えていた。それが覆されたのが、高温超伝導の発見である。いまでは 130K という高温で超伝導が発現している。しかし、高温超伝導のメカニズムについては、いくつか有力な理論が提出されているものの決着がついていないのが現状である。それだけに挑戦しがいのある分野とも言えるのだが。

補遺 本文では、やっつけ仕事で 2 個の電子の相互作用を考えたような書き方をしてしまったが、もっと本質的な理由がある。少し専門的になるが補足させていただく。電子などのミクロ粒子は、フェルミ粒子とボーズ粒子に分類される。フェルミ粒子は、ひとつのエネルギー準位に 2 個の粒子しか入れない。よって、系のエネルギーは粒子数とともに大きくなる。一方、ボーズ粒子は、最低エネルギー状態にすべての粒子が分布できる。実は、スピンの半奇数の電子が 2 個ペアをつくれれば、ボーズ粒子となり、最低エネルギー状態に凝縮できるのである。これをボーズ凝縮と呼んでおり、超伝導は、このような状態であると考えられていたのである。

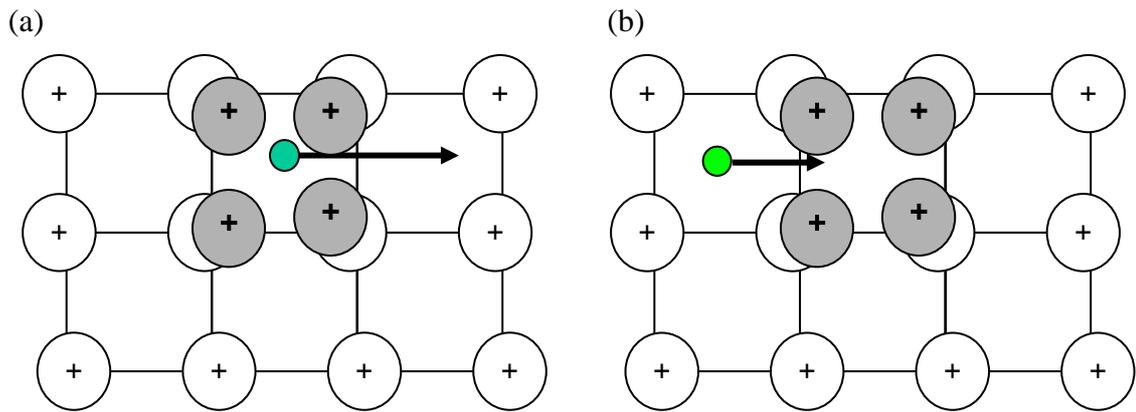


図1 絶対零度において格子振動がない状態においても、負に帯電した電子が正に帯電した格子の中を運動すると、クーロン引力が働くため、電子と格子の間に相互作用が存在する。このため、電子が移動すると格子が電子に引き寄せられ図(a)のように変形する。これが格子振動を引き起こし、電子のエネルギーが格子に奪われる。また、これが電気抵抗の原因になる。

ところが、十分近くに図(b)のように第二の電子が存在すると、この電子は正電荷濃度の高くなった領域から引力を受け、加速されることになる。つまり、最初の電子が奪われたエネルギーを第二の電子が奪い返すことができるのである。この結果、電子のペアで考えれば、エネルギー損失のない状態ができあがる。これが超伝導機構である。