

## 【隔月連載記事】

### やさしい超電導のおはなし(その1)

SRL/ISTEC 第1・3研究部長  
村上雅人

本連載の趣旨は、超電導現象をできるだけ分かりやすく解説することにある。しかし、「やさしい」超電導の「おはなし」などできないというのが、いつわらざる本音である。超電導現象を完全に理解するには量子力学という難解な学問に頼らざるを得ない。この入り口の量子力学を理解することさえやっかいなのであるから、超電導など到底理解不能というのが多くの方の実感であろう。

といっても、それであきらめていたのでは、いつまで経っても超電導が一般には普及しない。超電導は、21世紀人類にとって必要不可欠な科学技術と標榜しながら、それを解説しないのでは説明責任を果たしたことはない。そこで、超電導の核心に迫るとはいかないまでも、そのイメージが沸く程度までは、この連載シリーズで「やさしく」をモットーにがんばりたいと思う。

ところで、超電導とはいったいどんな現象なのであろうか。その第一の特徴は、電気抵抗ゼロである。そこで、まずこの話からはじめよう。

#### 1. 電気抵抗ゼロを確かめる

超電導の大きな魅力は電気抵抗がゼロになることである。しかし、ゼロかどうかを証明するのはそれほど簡単ではない。例えば、電気抵抗をテスターなどで測定して、表示がゼロになったからと言って、本当にゼロとは結論できないからである。例えば、測定装置の感度を  $0.0000000001(10^{-10})$

まで上げたとしても、金属の電気抵抗が  $0.00000000001(10^{-11})$  であったとすれば、装置はゼロと表示してしまう。それではと感度を  $10^{-12}$  まで上げたとしても、 $10^{-13}$  以下の測定ができないのである。つまり、測定装置に頼る限り、電気抵抗ゼロを証明することは不可能なのである。

それでは、どうやって電気抵抗ゼロを確かめればよいのであろうか。これには、次のような方法が使われる。まず、超電導物質でリングをつくり、そこに電流を流す。電極をつけて直接電流を流す手法もあるが、電磁誘導によって電流を流す方法もある。

いったん、超電導リングに電流が流れれば、電気抵抗がゼロであれば、電流は永久に流れ続けるはずである。しかし、流れている電流の抵抗を測ったのでは、測定装置の限界が再び問題になる。それでは、どうやって電流が流れていることを確かめるか。それには、磁場を検出するのである。

導体に電流が流れていれば、必ず磁場が発生する。エルステッドが発見した法則である。超電導電流も例外ではない。よって、電気抵抗を測定するかわりに、超電導リングに流れている電流が発生している磁場の大きさを測定すれば、磁場の変化で電流が減衰したかどうかを確認できる。

過去の実験では、なんと2年以上もの間電流(磁場)が減衰しないことが確かめられている。もちろん、これでも実験的に電気抵抗ゼロを完全に確かめたということにはならない。厳密には電気抵抗が  $10^{-23}$  以下ということを実証したに過ぎないからである。しかし、これだけ長い間、電流がまったく減衰しないのであれば、電気抵抗がゼロということをもよといというのが一般的な考えである。

#### 2. 超電導の起源をもとめて

超電導現象は1911年にオランダのカマリン オンネスによって発見された。オンネスは、気鋭の低温物理学者で、最も難しいとされていたヘリウム(He)ガスの液化に1908年に成功する。そし

て、液体ヘリウムを使って、いろいろな低温実験に着手する。

当時、絶対零度まで温度を下げたら、金属の電気抵抗がどうなるかということが論争になっていた。絶対温度の単位名にもなっているケルビン卿は、絶対零度では電子さえも凍って動けなくなるから、電気抵抗は無限大になると予想していた。これに対し、ドルーデやオンネスらは、電子の運動を妨げるものがなくなるので、電気抵抗はゼロに近づいていくと予測していたのである。

そこで、オンネスは液体ヘリウムを利用して、温度を下げながら水銀(Hg)の電気抵抗を測定した。この水銀を測定したという偶然も面白い。オンネスは金や銀などでも実験していたが、これら金属は超電導にはならない。1911年は明治44年である。精錬技術がそれほど発達していなかった時代である。オンネスはしっかりしたデータを得るためには、できるだけ純度の高い金属を使う必要があると考えたのである。そこで、高純度化が比較的容易なHgを選んだのである。

オンネスがHgの電気抵抗の温度変化を測定すると、突然4K付近で電気抵抗が不連続的に低下し、ほぼゼロとなった。優秀な実験家であったオンネスは、何か実験のまちがいであろうと繰り返し実験し、再現性を確認する。ただし、ここでも電気抵抗がゼロとは結論を出さずに、電気抵抗が $10^{-5}$ 以下になったと表記している。その後、Hgの純度を変えるなどして、数多くの実験を行い、この現象がHgが有する基本特性であることを確認する。そして、Hgが超電導状態という電気抵抗がゼロの新しい状態に遷移したと宣言するのである。

この発見は、当時の物理界に新風を巻き起こすものであった。なぜなら、19世紀後半にはニュートン力学ですべての物理現象が説明できると考えられており、新しいテーマなど何もないと思われていたからである。ところが、オンネスの超電導の発見は、従来の古典的な物理では説明できない何か新しい物理が誕生しつつあるという予感を多くのひとに与えたのである。実際に、超電導の機構説明は量子力学という20世紀の新しい物理学によって行われることになる。

超電導において、なぜ電気抵抗がゼロになるのかを理解するためには、そもそも電気抵抗の原因が何なのかを知る必要がある。ご存知のように、電流は、金属内の電子の流れであり、その流れのじゃまをするのが電気抵抗のもととなる。つまり、金属内で電子の運動をさまたげるものが何なのかを探さなければならない。この原因がいったい何なのかをつきとめることも多くの研究者を悩ませた問題であった。

### 3. 奇妙なオームの法則

金属に電流を流すと、その電流の大きさ(I)と、電気抵抗(R)と、電圧(V)の間にはオームの法則と呼ばれる関係が成り立つことが知られている。

$$V = IR$$

この法則は実に単純で美しい。これら諸量が、かくも簡単な式で関係づけられるという事実は、電気を応用する側にとっては、非常にありがたい。何しろ、計算が簡単である。ある金属に100(V)の電圧をかけて、電流が10(A)流れたら、その電気抵抗はたちどころに10( )ということが分かる。

ところが、ニュートンの運動方程式に沿って考えると、この法則はまことに奇妙な法則なのである。電流というのは、電子の流れである。ここで、電圧をかけるという操作は、金属内で電位差を発生させることである。いわば、高低差をつけて水の流れを誘導させる操作と同じものである。つまり、金属に電圧をかけると、電子は常に一定の大きさの力を受けることになる。電子の電荷をeとし、電圧にともなう電位差をEとすると、電子に働く力は

$$F = eE$$

となる。

つまり、電圧を加えると、電子には常に一定の力Fが働くことになる。すると、ニュートン力学に従えば、電子は

$$F = ma = m \frac{dv}{dt}$$

という運動方程式に従って、等加速度運動をすることになる。ここで、 $m$  は電子の質量であり、 $a$  は加速度、 $v$  は速度、 $t$  は時間である。

ところが、オームの法則をみると、電圧を加え続けても、電流は時間に関係なく常に一定である。電流の定義は、ある単位時間に、単位面積あたりどれだけの電荷（つまり電子の数： $n$ ）が通過するかというものであるから

$$I = nev$$

となって電子の速度に比例するはずである。

つまり、オームの法則は、電子は常に力を受けているにも関わらず、等加速度運動ではなく、等速度運動を続けていることを示している。

多くの研究者は、この問題に悩まされた。結論として、金属内では電子の運動を妨げるものが存在し、図1に示すように、電子が電圧で加速されても、それはすぐに何かに衝突して減速させられると考えた。このため、ミクロには電子が加速度運動をしていますが、電子の速度を平均すると、見かけ上は一定に見えるという結論に達したのである。もちろん、電子が衝突する相手こそが電気抵抗のもとである。そして、驚くことに、電気抵抗の原因となるものが、電気抵抗を消す超電導をも支配していたのである。この続きは次回にゆずる。

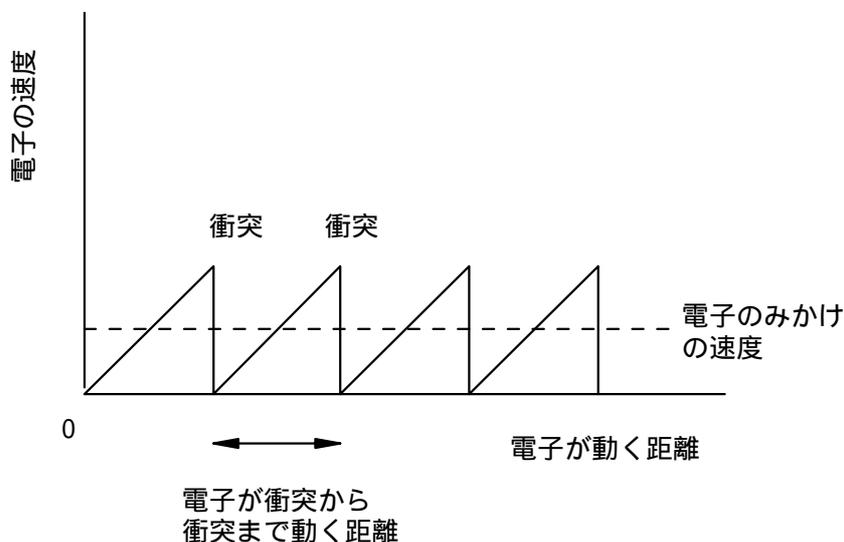


図1 オームの法則の説明。電子は電圧によって加速されるが、すぐに電気抵抗のもとになるものに衝突し減速させられる。ふたたび加速されるが、また衝突して減速する。この過程を繰り返すと、平均すれば電子の速度は一定のように見える。

【隔月連載記事】

やさしい超電導のおはなし (その2)

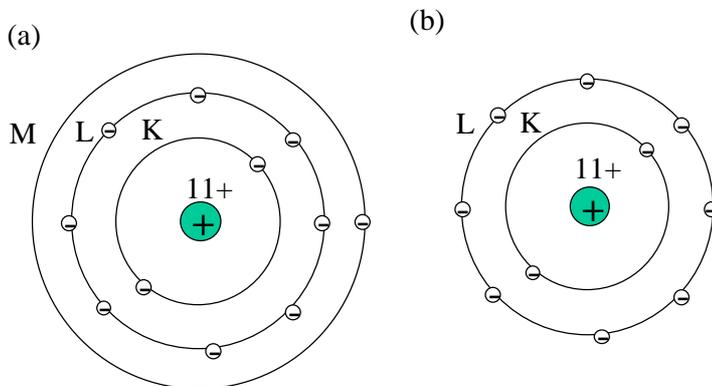
超電導工学研究所  
芝浦工業大学  
村上雅人

前回紹介したように超電導の特徴のひとつは、電気抵抗が完全にゼロになることである。ところで、電気抵抗がゼロということを理解するためには、そもそも電気抵抗の原因がいったい何なのかを知る必要がある。そこで、今回は電気のもととはいったい何であるのか、また電子の運動のじゃまをする電気抵抗の原因は一体何であるのかに迫ってみる。

1 自由電子とは

電気の正体は、導体中の電子の流れ、つまり電流である。導体として有名な銅やアルミニウムなどの金属は正に帯電した格子と呼ばれる骨格と、そのまわりに自由に動ける無数の電子が存在する。この自由に動ける電子を自由電子と呼んでいる。金属には、自由電子が存在するので電圧（電位差つまり自由電子の濃度差）を加えると、電子が動き出すのである。

少し回り道であるが、この自由電子の存在を理解するために、原子の構造を簡単に復習してみよう。例えば金属原子であるナトリウムは図 1(a)のような構造を有している。Na の原子番号は 11 で、原子核に 11 個の中性子と陽子があり、陽子が正に帯電している。そのまわりを 11 個の電子が 3 種の軌道をまわって運動している。ここで、電気特性に関しては、原子殻の +



11 と電子の - 11 が互いに打ち消し合って、電気的に中性の状態が保たれている。

ところで、ナトリウム原子の最外殻 (M 殻) の電子は 8 個で飽和するのであるが、この軌道には、たった 1 個の電子しか居ない。最外殻の電子は、正に帯電した原子核の影響 (クーロン力)

図 1(a) Na の原子構造 ; (b) Na<sup>+</sup>イオンの構造。Na 原子では最外殻の M 殻に電子が 1 個ある。この電子は、原子核からの距離が最も遠く、クーロン力が小さいので、放出されやすい。Na が電子を放出すると、(b)のようにすべての電子軌道が埋まった安定な電子構造となる。この電子構造は原子核の電荷と重量が異なるが、不活性元素の Ne と同じものとなる。

が小さいうえ、すぐ内部の L 殻は飽和状態にあるので、何らかの外乱が働くと、図 1(b)のように、この電子が原子から離れる場合がある。それがイオン化と呼ばれるもので、イオンになると、すべての電子軌道が飽和状態となり、電子構造としては安定となる。しかし、その一方で電荷の均衡がなくなり正に帯電する。これを Na<sup>+</sup>のように表記する。原子番号 12 のマグネシウムは、

M 殻に 2 個の電子があるので、これら電子が遊離して 2+ に帯電した  $Mg^{2+}$  のイオンとなる。

ここで、Na 原子どうしが十分近づいた状態を考えてみよう。すると最外殻の電子は、もともと原子核からの束縛が小さいうえ、原子間の距離が小さくなると、すぐ隣の原子核からの影響も無視できないようになる。この結果、図 2 に示すように、最外殻の電子はひとつの原子核からの束縛を逃れて、自由に運動できるようになる。これを自由電子と呼んでいる。一方、骨格をつくっている格子は、ちょうど  $Na^+$  イオンの構造をもったものとなる。

よって、金属では正に帯電した格子（金属イオンの格子）の中を負に帯電した電子が自由に動き回っているのである。ただし、格子の正電荷と自由電子の負電荷の総和は等しく、電気的な中性が保たれているのである。

自由電子の存在によって、金属は電気や熱をよく伝えることができる。金属に電圧を加えると自由電子の移動が起こる。これが電流であり、これら自由電子を伝導電子と呼んでいる。ただし、金属を構成する原子には伝導には寄与しない束縛電子が多数存在することも忘れてはならない。

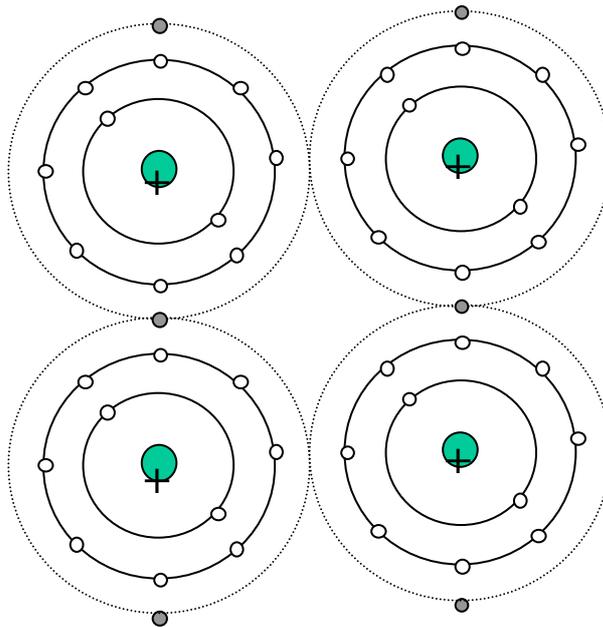


図 2 Na 金属の構造。最外殻電子は個々の原子核からの束縛から逃れ、自由に動くことができる。

## 2. 電気抵抗の正体

前回紹介したように、伝導電子の運動を支配するオームの法則によると、電子はつねに力を受けているにも関わらず、等加速度運動ではなく、等速度運動を続けていることになる。

多くの研究者は、この問題に悩まされた。結論として、金属内では電子の運動を妨げるもの、あるいは直截的には衝突するものが存在し、ミクロには電子が加速度運動をしていても、

ちょうど、もぐらたたきのように衝突のたびに減速させられ、平均すると、見かけ上速度が一定に見えるという結論に達したのである。もちろん、電子が衝突する相手こそが電気抵抗のもとである。

それでは、金属内で電子が衝突する相手とはいったい何であろうか。まず、考えられるのが、金属を構成している格子（金属イオン）である。金属と真空の違いは、金属原子がたまっているかどうかである。

ところが、実験を進めていくうちに、電子は格子間隔、つまり金属イオン間の距離の数 10 倍もの距離を自由に動けるということが分かったのである。専門的には、この距離を電子の平均自由行程（mean free path）と呼んでいる。（前回のオームの法則を説明した図 1 では、衝突から衝突までの距離に相当する。）電子が自由に動ける距離が格子間隔よりもはるかに長いのでは、金属イオンと電子の衝突が電気抵抗の主原因とは考えられない。

そこで、つぎに候補が上がったのが、金属内に存在する不純物であった。どんなに精密につくったとしても純度 100% の金属をつくることは不可能である。そこで、不純物濃度を変えて金属の電気抵抗を測定する実験を行ったところ、確かに不純物量が減ると電気抵抗が減ることが確かめられた。しかし、あるレベルから相関がなくなるのである。これは、不純物では説明できない電気抵抗の本質的な原因が存在することを示している。

結局、物理学者たちが電気抵抗の犯人として特定したのは格子振動であった。電気抵抗の温度依存性を測定すると、あらゆる金属で温度の低下とともに電気抵抗が低下する現象が観察される。それでは、温度の正体は何であろうか。それは、金属原子や分子の運動（あるいは振動）である。この格子振動をフォノンと呼んでいる。フォノン（phonon）は音である phone が語源となったもので音子と訳される場合もある。音が伝わるのも格子や空気を構成している気体分子の振動によるので、格子振動にこのような呼び名がついている。

有限温度では、金属を構成している格子（金属イオンの配列）は常に振動している。その大きさは温度上昇とともに大きくなる。ところで、すでに自由電子の項で説明したように、金属の格子は正つまり、+に帯電している。この+の格子が熱運動で揺れ動くと、負つまり-に帯電している電子はクーロン相互作用により、影響を受ける。つまり、負に帯電した電子が自由に動こうとしても、そのまわりで正に帯電している格子が振動していたのでは、その自由な動きが封じられる。この振動は温度とともに大きくなるから、電気抵抗も温度の上昇とともに大きくなる傾向になる。

それでは、絶対零度ではどうであろうか。この温度では、格子振動が無くなるはずであるから、電気抵抗はゼロとなって超電導になるのであろうか。答えはノーである。なぜなら、図3のように、-の電子が+の電荷の海の中を動こうとすると、必ず影響を受けるからである。この相互作用を専門的には電子格子相互作用（あるいは電子フォノン相互作用）と呼んでいる。言い換えると、格子が振動していなくとも、電子の運動が、格子振動を誘導してしまうのである。つまり、電子がある格子位置に移動すると、-に帯電した電子と+に帯電した格子の間にクーロン力が働くため、わずかではあるが、格子が電子に引き寄せられて歪むのである。電子が、この位置から移動すると格子はもとの位置に戻ろうとするが、慣性で振動が起こる。つまり、電子が格子振動を誘導しているのである。ただし、実際にこの振動を実験で観察することはできないので、virtual phonon（仮想フォノン）と呼ばれている。

結局、絶対零度であっても、電子格子相互作用が存在する限り、電気抵抗が生ずるのである。これでは、超電導現象を説明することができない。つまり、電気抵抗の正体が分かったのに、電気抵抗をゼロにするメカニズムが分からないのである。この超電導問題は数多くの研究者を悩ませることになる。しかし、意外なところに電気抵抗がゼロになる秘密が隠されていた。なんと、電気抵抗の原因となる電子格子相互作用が、電気抵抗をゼロにする鍵を握っていたのである。

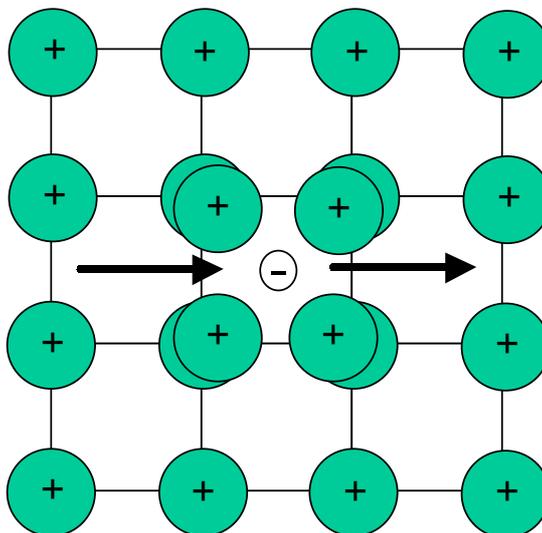


図3 絶対零度で金属格子が振動していない場合でも、負に帯電した電子が運動すると、図のように正に帯電した格子がクーロン力で変形し、振動する。この振動を仮想振動（仮想フォノン）と呼んでいる。このため、電子の運動エネルギーが格子に奪われることになる。つまり、絶対零度でも電気抵抗はゼロにはならないのである。

【隔月連載記事】

やさしい超電導のおはなし(その3)

超電導工学研究所  
芝浦工業大学  
村上雅人

1. 電気抵抗の正体

超電導において電気抵抗が完全にゼロになることを理解するためには、そもそも電気抵抗の原因がいったい何なのかを知る必要がある。前回(「超電導 Web21」2003年4月号)は、その本質が、金属を構成している原子の骨格、すなわち格子の熱振動であることを説明した。このため、金属の電気抵抗は温度上昇とともに大きくなるという共通した特徴を持っている。

それでは、熱振動のない絶対零度では電気抵抗がゼロになるのであろうか。残念ながら、絶対零度でも電気抵抗がゼロになることはない。それは、運動している自由電子が負の電荷を持っており、金属の格子が正の電荷に帯電していることに原因がある。正電荷の格子の中を負電荷の電子が移動すると、両者にクーロン相互作用が働く。これを電子格子相互作用と呼んでいる。つまり、負の電子が移動してくると、クーロン引力によってそのまわりの格子が歪む。この変位(歪み)によって格子が振動する。実際に、この振動を目で見ることはできないので、仮想振動(virtual phonon)と呼ばれている。いずれ、負の電子と正の格子がお互いに影響を及ぼしあうことは自明であろう。このため、図1に示すように、絶対零度であっても、電子の運動は格子にじやまされることになる。つまり、電気抵抗はゼロとはならないのである。

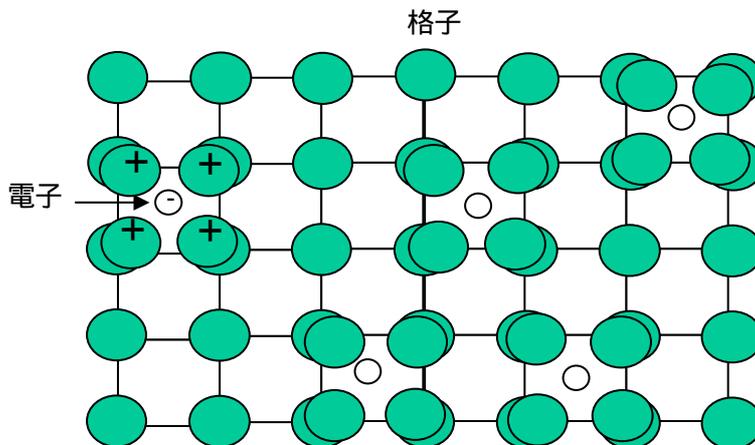


図1 絶対零度において格子振動がない状態においても、負に帯電した電子が正に帯電した格子の中を運動すると、クーロン引力が働くため、電子と格子の間に相互作用が存在する。このため、電子は格子の中を自由に運動することができない。

2. 電気抵抗ゼロ解明への道

金属中での電子の運動をじゃまするものが、格子の振動であるとするれば、電子と格子の間に相互作用が存在する限り電気抵抗をゼロにすることはできない。正電荷と負電荷にクーロン力が働くという事実は、物理の基本法則であるから、その相互作用を無くすることはできない。よって電気抵抗をゼロにすることも不可能ということになる。これでは、根本から電気抵抗ゼロは無理ということになる。これが電気抵抗ゼロを説明しようとする多くの研究者を悩ませた問題である。

それでは、どのように対処したらよいのであろうか。実は、いままでの議論は、電子1個の運動

だけに注目したものである。よって、複数の電子の相互作用を考慮に入れると、結果的に電気抵抗がゼロになる特殊な条件が存在するかもしれない。こう多くのひとが考えるようになった。というよりは、電気抵抗ゼロという状態が実際に存在するのであれば、そう考えない限り矛盾が生じる。

ところが、物理には「3体問題 (three body problem) は解けない」という宿命がある。3個以上の物体間の相互作用を解析的に求めることはできない。よって、複数の電子の運動を数学的に記述することは不可能なのである。これでは、超電導機構の解明はあきらめざるを得ないのであろうか。

### 3. マイスナー効果の発見

超電導状態を考えるうえで、重要なもうひとつの特徴が 1933 年に発見された。それは、超電導状態が本質的に磁場を嫌うという性質の発見である。

まず、超電導状態になった超電導物質に外部磁場を加えると、磁場の超電導体への侵入が阻止される。この現象は、電磁誘導と電気抵抗ゼロによって説明できる。電気を通す物質 ( 導体 ) のまわりの磁場が変化すると電流が誘導される。この現象を電磁誘導と呼んでいる。電磁誘導は非常に重要な物理法則である。われわれの生活に不可欠な電気は、発電所で電磁誘導によってつくられている。また、携帯電話などの、無線通信の信号を受け取るアンテナの機能にも電磁誘導がつかわれている。現代生活の根幹をなす物理法則と言っても過言ではない。

この電磁誘導には面白い性質があり、誘導される電流は外部磁場の変化を妨げる向きに流れる。これをレンツの法則 ( Lenz's law ) と呼んでいる。よって、導体に永久磁石を近づけると、磁石が近づくとを妨げるように電流が誘導される。例えば N 極を近づけようとする、物質の表面に N 極をつくるような向きに電流が誘導されるのである。

それでは、電磁誘導を超電導にあてはめてみよう。超電導体に磁石を近づけると、磁石を近づけまいとする向きに電流が誘導される。この誘導された電流は電気抵抗がゼロであるから常に流れ続ける。よって、超電導体に磁場を印加すると、ちょうどその磁場を打ち消す向きに電流が流れ続けるから、超電導体内に磁場は侵入できないということになる ( 図 2(a)

(b)参照 )。しかし、これでは大発見とは言えない。電磁誘導と「電気抵抗ゼロ」という性質によって説明できるからである。ところが、超電導には別な顔があったのである。

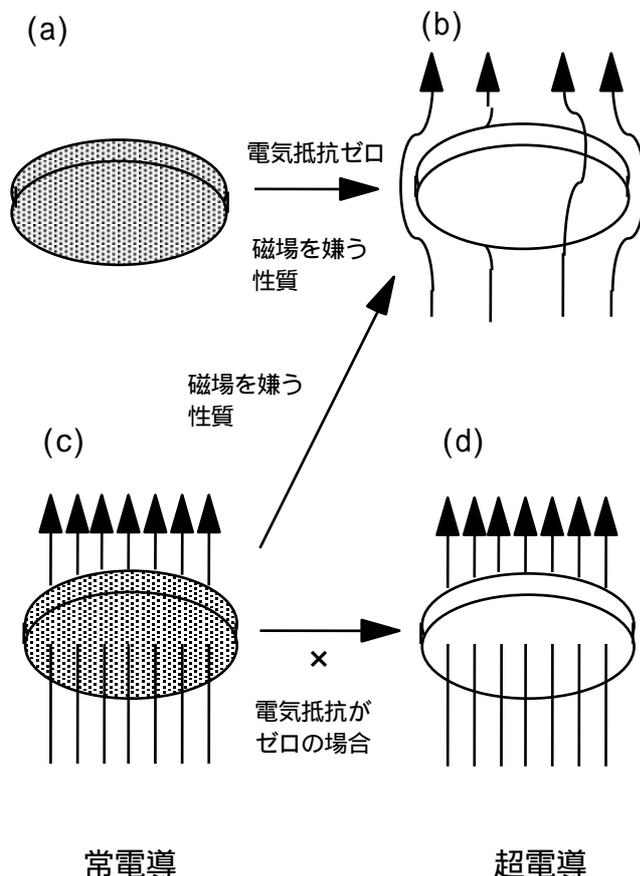


図2 マイスナー効果。常電導状態で磁場を印加した状態で冷却すると、(b)のように超電導体内から磁場が排除される。もし、電磁誘導と電気抵抗ゼロであれば、(d)のように超電導体内に磁場がとどまるはずである。この効果の発見により、超電導は常電導とは異なる、まったく新しい状態であることが明らかとなった。

超電導体に室温で磁石を載せた状態で冷やして、超電導になったらどうなるであろうか。この場合は、磁場の変化はないから、電磁誘導も生じないので、何の変化もないはずである（図 2(c) (d) 参照）。そして、磁石を超電導体の上から離そうとすると、この場合は、磁場が変化するので、それを妨げる向きに電流が誘導されるはずである。

ところが、冷やして超電導状態になっただけで、超電導体内の磁場が外に排除されることが分かったのである（図 2(c) (b)）。この現象は、発見者の名にちなんで、マイスナー-オクセンフェルド効果あるいは、単にマイスナー効果と呼ばれている。マイスナー効果は、その経緯に関係なく、超電導は常にひとつの平衡状態にあるということを示している。

この超電導の特徴の発見は、超電導機構を解明しようとしている人達に大きなヒントを与えた。それは、超電導が、単に電気抵抗がゼロになるという現象ではなく、普通の状態（これを常電導状態と呼んでいる）とは全く異なる新しい熱力学的な平衡状態にあるということを示しているからである。つまり、水が低温で氷に変化するように、超電導状態は一種の相変態によって生じる現象であることが分かったのである。

[超電導 Web21 トップページ](#)

## 【隔月連載記事】

### やさしい超電導のおはなし(その4)

超電導工学研究所  
芝浦工業大学  
村上雅人

#### 1. 超電導は常電導とは違う相

前号では、マイスナー効果の発見によって、超電導状態が常電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、何が常電導状態と異なるのであろうか。

すでに紹介したように、金属の常電導状態とは、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<sup>1</sup>。

それでは、超電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ろうか。

#### 2. 超電導メカニズム

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

<sup>1</sup> 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。

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。

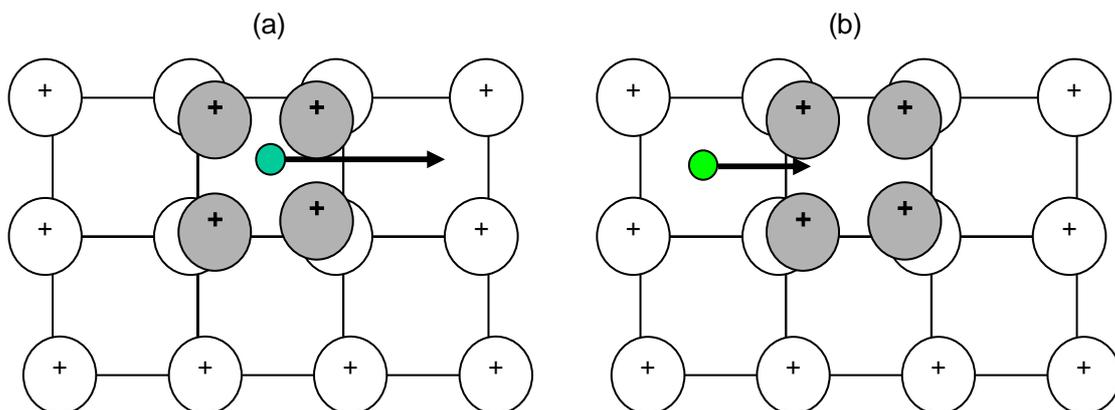


図 1 絶対零度において格子振動がない状態においても、負に帯電した電子が正に帯電した格子の中を運動すると、クーロン引力が働くため、電子と格子の間に相互作用が存在する。このため、電子が移動すると格子が電子に引き寄せられ図(a)のように変形する。これが格子振動を引き起こし、電子のエネルギーが格子に奪われる。また、これが電気抵抗の原因になる。

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。これが超電導機構である。

そんなうまい話があるかと首を傾げたくなるが、実は、超電導状態では、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びひともいる。

### 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電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。

超電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電導現象は起こるのかという点に移った。超電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電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電導にはならない。つまり、電子が格子に与える影響が弱すぎて超電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電導機構が働かなくなること示している。よって、より高温で超電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、超電導になりえない。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、この機構では超電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、高温超電導の発見である。いまでは 130K という高温で超電導が発現している。しかし、高温超電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、超電導は、このような状態であると考えられていたのである。

[超電導 Web21 トップページ](#)

## 【隔月連載記事】

### やさしい超電導のおはなし(その5)

超電導工学研究所  
芝浦工業大学  
教授 村上雅人

#### 1. オンネスの夢

超電導を発見したオンネス教授は、この画期的な物理現象を何とか人類に役立つ技術開発に結びつけようと考えた。電気抵抗がゼロと聞くと、すぐに送電線に使ったらいいのではと考えがちであるが、液体ヘリウムを使って冷やす作業は大変な手間と労力を要する。<sup>1</sup> オンネス教授が考えた応用は、電磁石への応用であった。超電導であれば電気抵抗がないので、小さなコイルに大電流を流すことができるうえ、応用上問題となる発熱もない。今にして思えば、卓越したアイデアであったと感心させられる。

しかし、オンネス教授の夢は、すぐに挫折することになる。それは、超電導がわずかな磁場で壊れてしまうことが分かったからである。超電導が持続できる限界の磁場を臨界磁場(critical field:  $H_c$ )と呼んでいる。当時の超電導体は、数100(G)という弱い磁場で超電導が壊れてしまったのである。これでは、強い電磁石をつくることなど不可能である。

その後の研究の結果、超電導状態は、温度と磁場と電流の限られた範囲内でしか生じないことが明らかとなった。これら臨界値を、臨界温度、臨界磁場、臨界電流と呼んでいる。よって、工業的な応用を進めるためには、これら臨界値をできるだけ高くする必要がある。そのためには、これら臨界値がどのような機構で決まっているかを理解することが重要である。臨界温度については、すでに前号(「超電導 Web21」2003年8月号)で紹介しているので、ここでは、臨界磁場について考えてみよう。

#### 2. 臨界磁場の壁

マイスナー効果の発見によって、超電導状態が常電導状態とは異なる新しい熱力学的状態であることが明らかになったということを説明した。これは、超電導状態では、外部磁場が超電導体内に存在できないことに対応している。

しかし、超電導体内に入ったとたん突然磁場がゼロになるわけではなく、表面に薄いながらも磁場が変化している層がある。この層の厚みを専門的には磁場侵入長( $\lambda$ )と呼んでいる。実は、この領域には、超電導電流が流れていて、外部磁場が侵入するのを防いでいるのである。このしゃへいできる磁場の大きさは、流れる超電導電流の大きさに比例する。よって、外部磁場を大きくしていくと、電流も大きくなる。超電導電流が無限に流れるのであれば問題がないが、残念ながら限界がある。よって、ある磁場以上はしゃへいできないことになる。この限界が臨界磁場である。

しかし、それがたったの数100(G)というのは情けない。超電導ももっとがんばれと言いたくなるが、問題は磁場侵入長である。この厚みが0.1~1 $\mu\text{m}$ 程度しかない。例えば、100(Oe)(磁束密度を磁場に換算した単位で100Gに相当する)は8,000(A/m)という磁場の強さに相当する。この磁場をしゃへいするには、 $\lambda$ が1 $\mu\text{m}$ の厚みとすると、なんと8,000,000,000(A/m<sup>2</sup>)という電流密度に相当する超電導電流が流れる必要がある。あらためて数値をみれば超電導はすごいと実感できる。

<sup>1</sup> 電力需要が加速するのは第二次世界大戦以降であり、さらに電力事情が逼迫したのは最近のことである。

しかし、これだけ弱い磁場で超電導が壊れたのでは、ほとんど使いものにならない。オンネスが超電導マグネットの夢を捨てざるを得なかったのも、これが原因である。残念ながら、オンネスの存命中に彼の夢はかなわなかったが、新しいタイプの超電導体の登場によって、彼の夢は実現することになる。

### 3. ヒーローの登場

1960年代に入って、超電導応用にとって歴史的なできごとが起こる。それは、オンネスが発見した超電導体とは磁場に対する応答が異なる新しい超電導体の出現であった。

さきほど、磁場侵入長の話をした。この薄い層の中を超電導電流が流れていて、そのおかげで、外部磁場がしゃへいされている。この時、磁場分布をみても、超電導体内に入るにしたがって、磁場が小さくなり、 $\lambda$ の深さになったところでゼロになるという分布をとる(図1参照)。実は、この時、超電導電子の密度も変化しているのである。ただし、変化する長さは $\lambda$ とは異なり、コヒーレンス長( $\xi$ )と呼ばれている。

つまり、超電導体と外部との境界では磁場があり、超電導電子の密度はゼロである。これが、超電導体内にいくにしたがって、磁場は弱まり深さ $\lambda$ でゼロになる一方で、超電導電子の密度は上昇し、深さ $\xi$ のところまで本来の値に達する。実は、超電導体がマイスナー状態を示すのは、これら2つの特徴的な長さに関係がある。オンネスが発見した超電導体では、 $\xi$ が $\lambda$ よりも長いのである。

本来は自由エネルギーにもとづいた熱力学的考察が必要であるが、ここでは、おおざっぱに損得という観点で考えてみよう(図1)。コヒーレンス長( $\xi$ )が磁場侵入長( $\lambda$ )よりも長いということは、超電導体が外部磁場と接すると、超電導電子が壊れる体積が大きいにもかかわらず、磁場が入ることのできる体積は小さいということに対応する。つまり、入る磁場のわりには、犠牲になる超電導電子の数が多ということである。実は、マイスナー状態で、磁場をしゃへいするということは、超電導体は余分な仕事をしていることになる。ちょうど、水の中のボールが水圧を受けているような状態である。よって、磁場を超電導体内に取り込めれば、磁場をしゃへいするための仕事が小さくなるので、できれば磁場を中に入れたいのである。

ところが、磁場を入れることで得をする分よりも、超電導電子の犠牲の方がより大きいため、トータルで損をすることになる。よって、超電導体は磁場との接触面積ができるだけ小さくなるような行動をとる。これがマイスナー状態である。

それでは、もし、これら2つのパラメータの大きさが逆であつたらどうだろうか。この場合は、すこし超電導電子を犠牲にするだけで、磁場をごっそり中に取り込むことができる。つまり、磁場との接触面積を増やせば、それだけ得をすることになる。

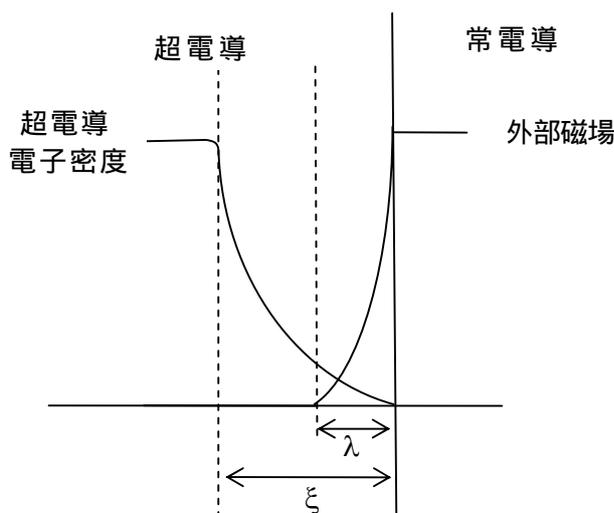


図1 超電導体に外部磁場が加わったときの超電導体表面付近の磁場分布と超電導電子密度の変化の模式図。外部磁場は、超電導体内に入るにしたがって減少し、深さ $\lambda$ のところでゼロとなる。一方、超電導電子の密度は、表面ではゼロとなるが、深さ $\xi$ のところまで本来の値となる。

実は、このような超電導体の存在が 1960 年代になって確認されたのである。ここで、オンネスが発見した超電導体を第 I 種超電導体と呼び、新しいものを第 II 種超電導体と呼んで区別している。図 2 に 2 種類の超電導体の外部磁場に対する応答の違いを模式的に示した。オンネスの時代の超電導体は、磁場が低いときには磁場を完全に排除するマイスナー状態をとるが、臨界磁場以上の磁場がかかると、常電導に転移してしまう。一方、第 II 種超電導体では、低磁場ではマイスナー状態をとるが、ある磁場から超電導体に磁場が侵入する。この磁場を下部臨界磁場 ( $H_{c1}$ ) と呼んでいる。磁場の侵入を許すことで、磁場を排除するためのエネルギーを緩和できるのである。

また、超電導体に侵入した磁場は、その可能な最小単位をとる。これは、量子化磁束と呼ばれる。なぜなら、超電導と常電導の界面を大きくした方がエネルギー的に得をするからである。

この時、磁場が侵入した領域は常電導になっている。つまり、第 II 種超電導体は、自分の身を一部犠牲にしながら、磁場との折り合いをつけることで安定を保っていると考えられる。このため、オンネスの超電導体を純粹型と呼び、新しいタイプの超電導体を妥協型と呼ぶこともある。

つまり、磁場が侵入した状態では、超電導と常電導が共存することになる。このため、この状態を混合状態と呼んでいる。外部磁場が大きくなると、超電導体内に侵入する磁束の本数がどんどん増えていき、やがて、超電導全体が磁束で埋めつくされると常電導に転移することになる。この磁場を上部臨界磁場 ( $H_{c2}$ ) と呼ぶ。この磁場は、種類によっても異なるが、10(T) つまり 100,000(G) をはるかに超えるものもある。つまり、強磁場中でも超電導を使えるのである。このニューヒーローの登場によって、オンネスの夢であった超電導マグネットの実現にわれわれは一步近づくことになる。しかし、世の中はそれほどあまくはなく、もう一波乱待ち受けているのである。

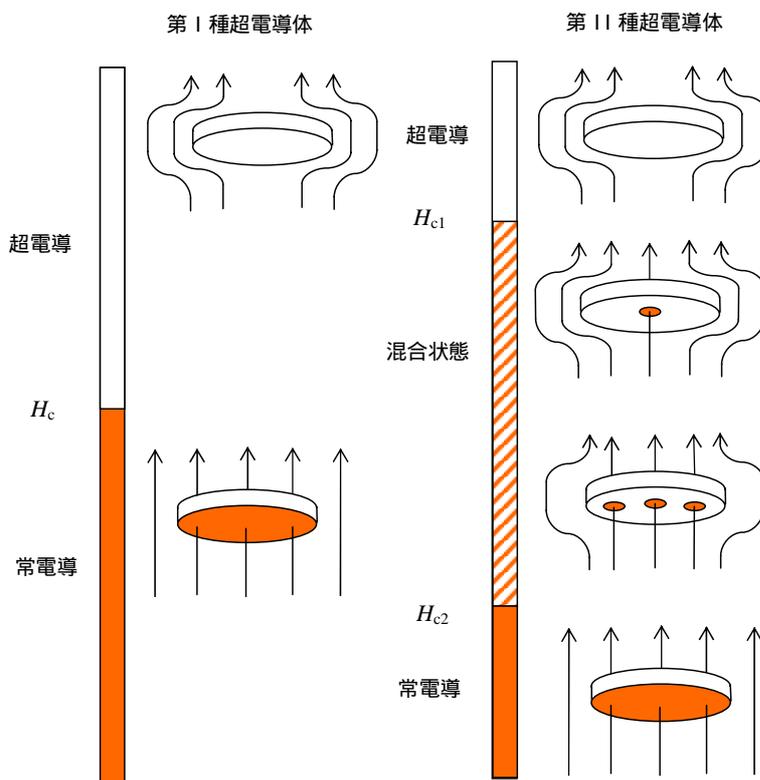


図 2 第 I 種超電導体と第 II 種超電導体の磁場に対する応答の違い

【隔月連載記事】

やさしい超電導のおはなし (その6 最終回)

超電導工学研究所  
芝浦工業大学  
教授 村上雅人

1. 磁束は流れる

1960年代の第二種超電導体の発見によって、それまで低磁場でしか使えないと思われていた超電導に高磁場応用の曙光が差した。オネスの超電導磁石の夢もすぐにかなうと思われたが、ことはそれほど簡単ではなかったのである。

第二種超電導体において、強磁場中で超電導が利用できるのは、混合状態と呼ばれる状態ができるからである。この状態では、外部磁場が超電導体内部に量子化磁束と呼ばれる状態で侵入し、超電導と磁場が共存した状態が得られる。この状態は、かなりの強磁場まで維持されるため、強磁場中でも超電導が生き残る。磁場が侵入した領域では、超電導が壊れて常電導状態となっているので、混合状態と呼ばれている。

さて、第二種超電導体の誕生で、超電導磁石への期待が高まったが、残念なことに、混合状態では電気抵抗ゼロで電流を流せないという皮肉な事実がすぐに明らかになったのである。超電導の領域がありながら、なぜ電気抵抗が発生するのであろうか。

混合状態にある超電導体に電流を流すと、電流は抵抗のない超電導領域を流れる。しかし、電磁誘導と呼ばれる現象によって、常電導の磁束が動いてしまうのである。この現象は、磁場と電流が共存すると、その両者に相互作用が働くという基本的なものである。この相互作用によって図1に示すように、磁束を図の

矢印の方向へ動かそうとする力が働く。この電磁力をローレンツ力と呼んでいる。磁束は常電導になっており、常電導電子がつかまっている。つまり、磁束が動くということは常電導電子が運動することになるので、エネルギーの散逸、つまり電気抵抗が発生することになる。つまり、混合状態では、**磁束の運動にともなう抵抗**が発生することになる。よって、この抵抗を**磁束流抵抗** (flux flow resistance) と呼んでいる。

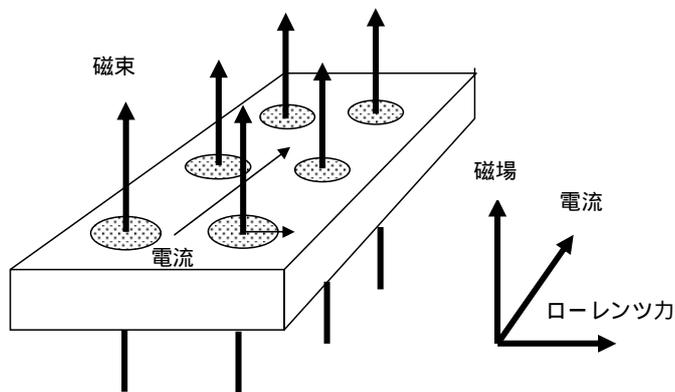


図1 混合状態にある第二種超電導体に電流を流すと、電流は電気抵抗がゼロの超電導部を流れる。しかし、磁場と電流の相互作用により磁束に図の方向に電磁力(ローレンツ力)が働き磁束が動きだす。この磁束の運動により電気抵抗が発生する。

2. 磁束の動きを止める

第二種超電導体では、せっかく強磁場まで超電導が生き残りながら、磁束が動くために、超電導

の魅力である電気抵抗ゼロを活かすことができない。それでは、超電導磁石を実現するというオネスの夢は不可能なのであろうか。

前述したように、混合状態で流れているのは、電気抵抗がゼロの超電導電流である。電気抵抗が発生するのは、電流と磁場の相互作用で磁束が動くことに起因する。よって、なんらかの方法で磁束の運動を止めることができれば、混合状態であっても電気抵抗ゼロを達成することができるはずである。

しかし、磁束の運動を止めることなどできるのであろうか。実は、それが可能であったからこそ、オネスの夢の超電導磁石が誕生したのである。この磁束の運動を阻止する働きをするのが、**磁束ピンニング** (flux pinning) と呼ばれる効果である。実は、超電導の臨界温度以下では、本来超電導の方が常電導よりも安定である。ところが、磁場の存在下では、超電導体はマイスナー効果を示すため、磁場を排除するという余分な仕事を必要とする。このため、超電導の安定度が小さくなる。混合状態では、この磁場を完全に排除するという余分な仕事を緩和するため、自分の体の一部を犠牲にして混合状態をつくり、トータルのエネルギーが低い状態をつくっているのである。

磁束の運動を止めるヒントがここにある。実は、混合状態で磁束が侵入すると、磁場を排除するためのエネルギーを緩和できるかわり、ローカルにはエネルギーの高い状態となっている。これをペナルティエネルギーと呼んでいる。サッカーのペナルティキックと同じ意味である。

図2のように超電導体が純粋な場合と、その中に常電導粒子を含んでいる場合を想定してみよう。図2(a)のように、超電導領域しかない場合、磁束が超電導をこわす体積は一定であるから、どの位置にいようと、払っているペナルティエネルギーも一定である。よって、電流を流したとたんローレンツ力で磁束が運動をはじめるのである。それでは、図2(b)のように、磁束が常電導粒子と交差していたらどうであろうか。この部分は、もともとが常電導であるから、磁束が来ても何の変化もない。一方、この部分から磁束を移動させると、新たに交差している体積分だけ超電導をこわす必要がある。つまりペナルティを払う必要があるのである。したがって、磁束は常電導粒子と交差している方が安定ということになり、磁束を固定することができるのである。これが、ちょうどピンで磁束を止めると言う操作に似ているので磁束ピンニング効果と呼ばれる。

磁束ピンニング効果のおかげで、混合状態においても電気抵抗ゼロで電流を流せるようになった。オネスの夢が実現したのである。もちろん、電流を大きくすると、磁束を動かそうとするローレンツ力も大きくなるので、電気抵抗ゼロで流せる電流には限界がある。これを臨界電流と呼んでいる。

臨界電流は、超電導体の内部にいかにかピン止め効果を発揮する常電導相を分散させるかによって決定される。いわば組織敏感な値である。歴史的には、第二種超電導体の組織をいかに制御して臨界電流を向上させるかということも大きな研究テーマであったが、多くの研究者の努力によって实用レベルに到達したのである。

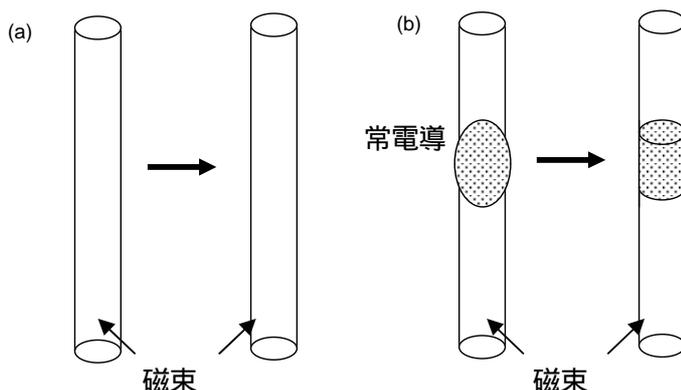


図2 (a) 純粋な超電導体中では、磁束がどの場所に位置しても、エネルギー的に変化がないので、磁束に電磁力が働くと、すぐに磁束は運動する。(b) 超電導体の中に常電導粒子が存在すると事情が異なる。この部分は常電導であるから、磁束と交差してもエネルギーの上昇がない。一方、この位置から、磁束を動かそうとすると、図のように交差していた体積分だけ超電導を壊す必要があり、エネルギー上昇を招く。よって、磁束は常電導粒子の位置に固定されることになる。これを磁束ピンニング効果と呼んでいる。

### 3. 最後に

磁束ピン止め効果の発見によって、オネスの超電導磁石の夢は実現した。ただし、産業応用に結びつけるには、安全性や安定性も重要である。実は、超電導コイルを磁石化するには、流す電流量を上げて励磁する必要がある。このとき、電流の変化にともなって磁束の分布も変化する。つまり、磁束が動いてしまうのである。定常状態になれば電気抵抗がゼロになるので問題ないが、励磁の際に磁束が動くと、電気抵抗が発生し、発熱が生じる。極低温では、比熱が極端に小さいため、この発熱はいきなり超電導体全体に広がり、突然超電導が壊れるクエンチと呼ばれる現象が生じる。クエンチが生じると超電導体はダメージを受ける。場合によっては、超電導線が破壊されコイルとして機能しなくなる。この問題は、超電導線を非常に細くし、そのまわりを熱伝導率の高い銅などで包むという技術で克服することができた。この構造を極細多芯構造と呼んでいる。産業応用という観点では、この極細多芯構造の発明こそが、その端緒を開いたと呼んでも過言ではない。

超電導は物理現象としても特異なものであり、多くの研究者を魅惑して止まないが、その産業応用も大きな魅力がある。ただし、その実用化には、その本質を理解するとともに、その周辺技術の開発も重要であるということを銘記していただきたい。往々にして、重要な技術開発が等閑にされる傾向にあるからである。

最後に、超電導応用としては強磁場応用だけではなく、磁束量子を利用した高感度磁場測定装置や電子デバイス応用開発も活発化している。本稿では、紙面の関係で紹介できなかったが、これらも非常に魅力ある超電導の応用分野であることを付記しておきたい。

[超電導 Web21 トップページ](#)