

本連載の趣旨は、超伝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」超伝導の「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。超伝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、超伝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伝導が一般には普及しない。超伝導は、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、超伝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、超伝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

超伝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、超伝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、超伝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。超伝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、超伝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} 以下ということを証明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認めてもよいというのが一般的な考えである。

2. 超伝導の起源をもとめて

超伝導現象は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、これら金属は超伝導にはならない。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 $10^{-5}\Omega$ 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 が超伝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、オンネスの超伝導の発見は、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、超伝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。

超伝導において、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す必要がある。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

$$I = nev$$

となつ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、電気抵抗を消す超伝導をも支配していたのである。この続きは次号にゆずる。

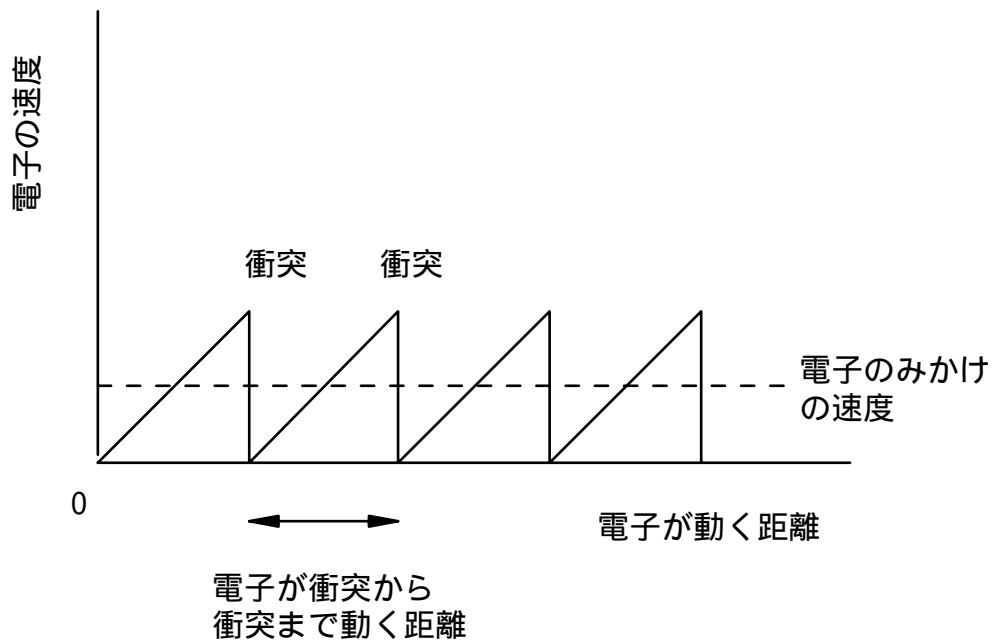


図 1 オームの法則の説明。電子は電圧によって加速されるが、すぐに電気抵抗のもとになるものに衝突し減速させられる。ふたたび加速されるが、また衝突して減速する。この過程を繰り返すと、平均すれば電子の速度は一定のように見える。