

前号で紹介したように超伝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、電氣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郭（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）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  $\text{Na}^+$  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。

## 2. 電気抵抗の正体

前号で紹介したように、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、金属原子がつ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。（前号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、つぎに候補に上がったのが、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き、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伝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、超伝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。この超伝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。

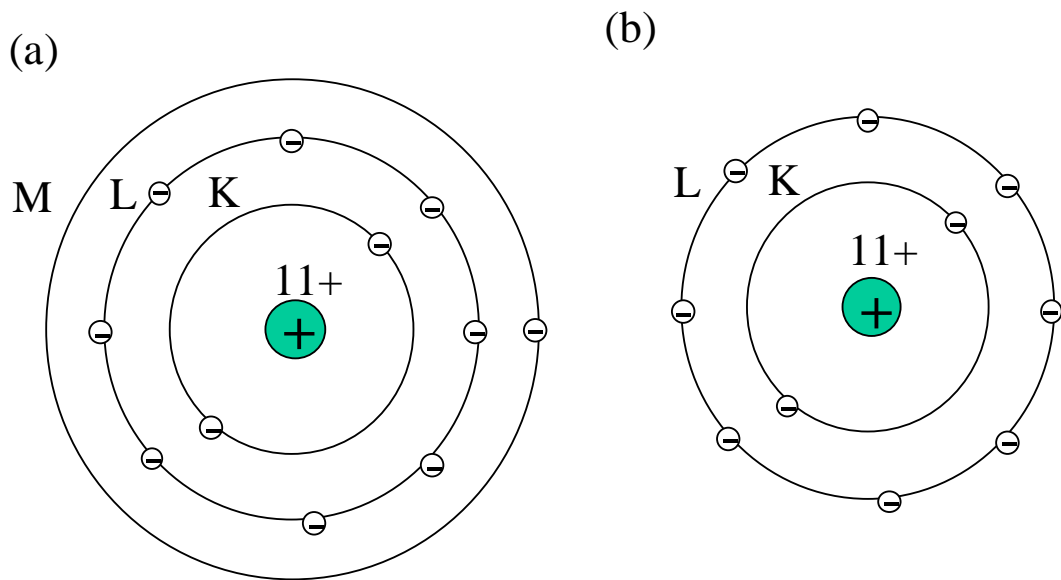


図 1(a) Na の原子構造 ; (b)  $\text{Na}^+$  イオンの構造。Na 原子では最外殻の M 殻に電子が 1 個ある。この電子は、原子核からの距離が最も遠く、クーロン力が小さいので、放出されやすい。Na が電子を放出すると、(b) のようにすべての電子軌道が埋まった安定な電子構造となる。この電子構造は原子核の電荷と重量が異なるが、不活性元素の Ne と同じものとなる。

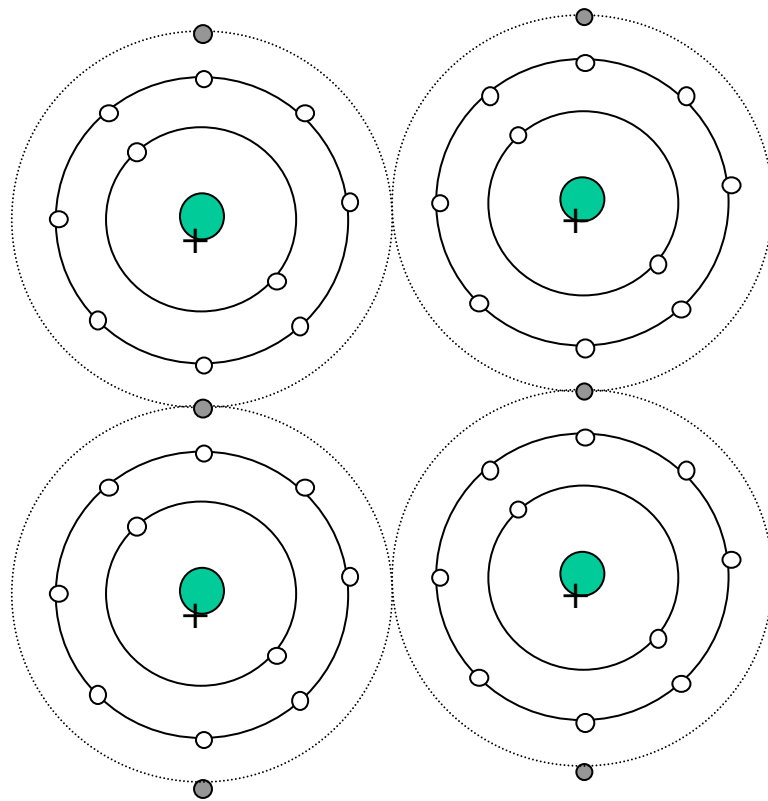


図 2 Na 金属の構造。最外殻電子は個々の原子核からの束縛から逃れ、自由に動くことができる。

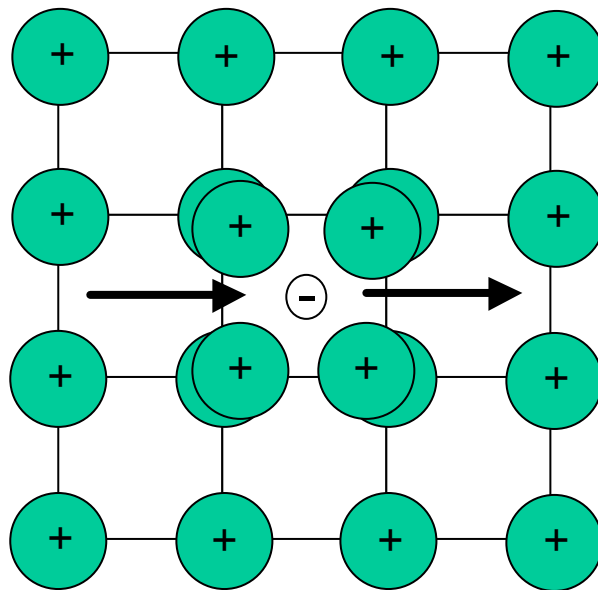


図3 絶対零度で金属格子が振動していない場合でも、負に帯電した電子が運動すると、図のように正に帯電した格子がクーロン力で変形し、振動する。この振動を仮想振動（仮想フォノン）と呼んでいる。このため、電子の運動エネルギーが格子に奪われることになる。つまり、絶対零度でも電気抵抗はゼロにはならないのである。