

1 電気抵抗の正体

超伝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。前号では、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しょうか。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ゃ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。

1 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乗じる。

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、超伝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

超伝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、超伝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、超伝導状態になった超伝導物質に外部磁場を加えると、磁場の超伝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、磁石が近づくの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、電磁誘導を超伝導にあてはめてみよう。超伝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、超伝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、超伝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、超伝導には別な顔があったのである。

超伝導体に室温で磁石を載せた状態で冷やして、超伝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、磁石を超伝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、冷やして超伝導状態になっただけで、超伝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、超伝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。

この超伝導の特徴の発見は、超伝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、超伝導が、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（これを常伝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、超伝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。

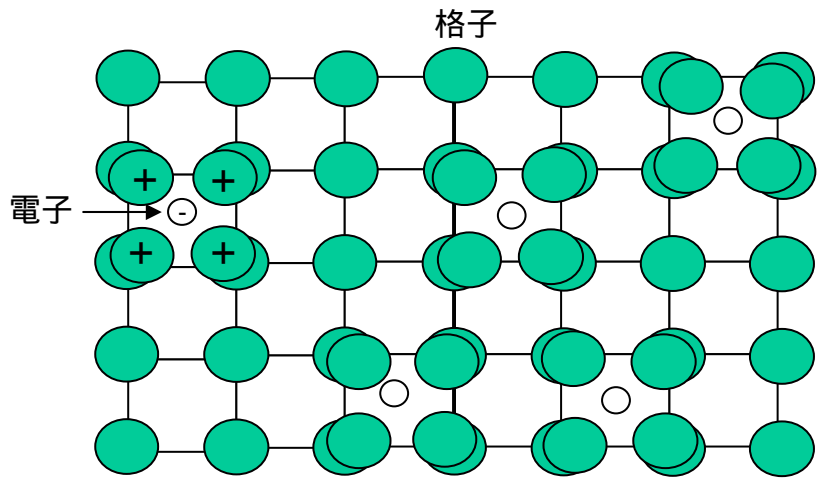


図1 絶対零度において格子振動がない状態においても、負に帯電した電子が正に帯電した格子の中を運動すると、クーロン引力が働くため、電子と格子の間に相互作用が存在する。このため、電子は格子の中を自由に運動することができない。

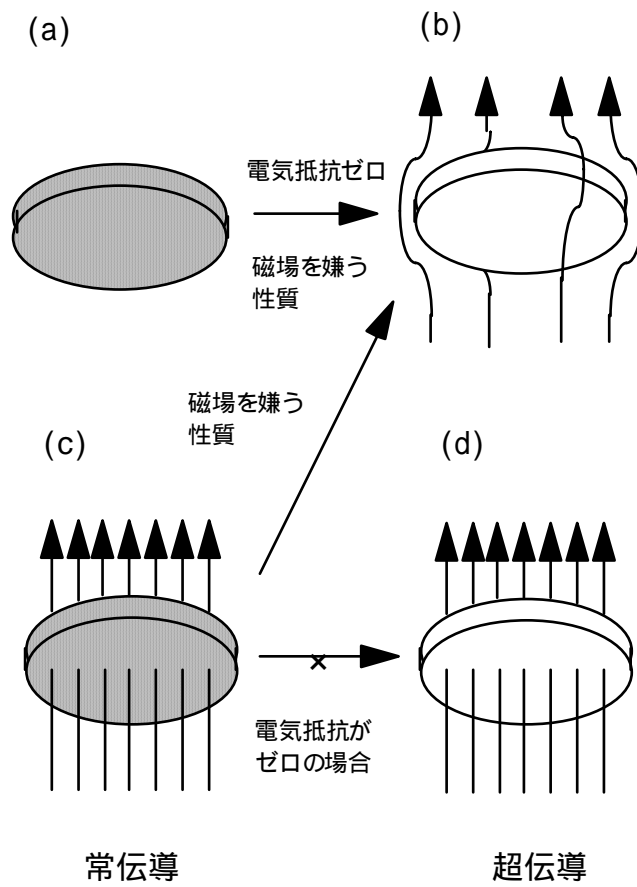


図2 マイスナー効果。常伝導状態で磁場を印加した状態で冷却すると、(b)のように超伝導体内から磁場が排除される。もし、電磁誘導と電気抵抗ゼロであれば、(d)のように超伝導体内に磁場がとどまるはずである。この効果の発見により、超伝導は常伝導とは異なる、まったく新しい状態であることが明らかとなった。

