

1. オンネスの夢

超伝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¹。オンネス教授が考えた応用は、電磁石への応用であった。超伝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、超伝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。超伝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。当時の超伝導体は、数 100 (G) という弱い磁場で超伝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、超伝導状態は、温度と磁場と電流の限られた範囲内では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ことが明らかになったということを説明した。これは、超伝導状態では、外部磁場が超伝導体内に存在できないことに対応している。

しかし、超伝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

¹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だしたのは最近のことである。

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 (λ) と呼んでいる。実は、この領域には、超伝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。しゃへいできる磁場の大きさは、流れる超伝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。超伝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。超伝導もつ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 $0.1 \sim 1\mu\text{m}$ 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 $8000(\text{A/m})$ 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、 λ が $1\mu\text{m}$ の厚みとすると、なんと $8000000000(\text{A/m}^2)$ という電流密度に相当する超伝導電流が流れる必要がある。あらためて数値をみれば超伝導はすごいと実感できる。

しかし、これだけ弱い磁場で超伝導が壊れたのでは、ほとんど使いものにならない。オンネスが超伝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、新しいタイプの超伝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、超伝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伝導体とは磁場に対する応答が異なる新しい超伝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伝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、磁場分布をみると、超伝導体内に入るにしたがって、磁場が小さくなり、 λ 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、超伝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 λ とは異なり、コヒーレンス長 (ξ) と呼ばれている。

つまり、超伝導体と外部との境界では磁場があり、超伝導電子の密度はゼロである。これが、超伝導体内にいくにしたがって、磁場は弱まり λ でゼロになる一方で、超伝導電子の密度は上昇し、深さ ξ のところで本来の値に達する。実は、

超伝導体がマイスナー状態を示すのでは、これら 2 つの特徴的な長さとの関係がある。オンネスが発見した超伝導体では、 ξ が λ 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 (ξ) が磁場侵入長 (λ) よりも長いということは、超伝導体が外部磁場と接すると、超伝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、犠牲になる超伝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事は、超伝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、磁場を超伝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、超伝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ようになる。よって、超伝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ったらどうだろうか。この場合は、すこし超伝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。

実は、このような超伝導体の存在が 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伝導体を第 I 種超伝導体と呼び、新しいものを第 II 種超伝導体と呼んで区別している。図 2 に 2 種類の超伝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伝導体は、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、常伝導に転移してしまう。一方、第 II 種超伝導体では、低磁場ではマイスナー状態をとるが、ある磁場から超伝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、超伝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、超伝導と常伝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伝導になっている。つまり、第 II 種超伝導体は、自分の身を一部犠牲にしなが、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、オネスの超伝導体を純粋型と呼び、新しいタイプの超伝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、超伝導と常伝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、超伝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、超伝導全体が磁束で埋めつくされると常伝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 100000(G)をはるかに超えるものもある。つまり、強磁場中でも超伝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、オネスの夢であった超伝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たのである。

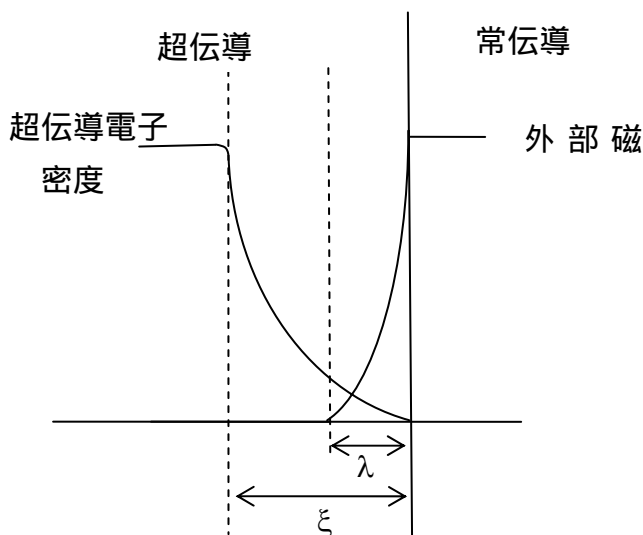


図1 超伝導体に外部磁場が加わったときの超伝導体表面付近の磁場分布と超伝導電子密度の変化の模式図。外部磁場は、超伝導体内に入るにしたがって減少し、深さ λ のところまでゼロとなる。一方、超伝導電子の密度は、表面ではゼロとなるが、深さ ξ のところまで本来の値となる。

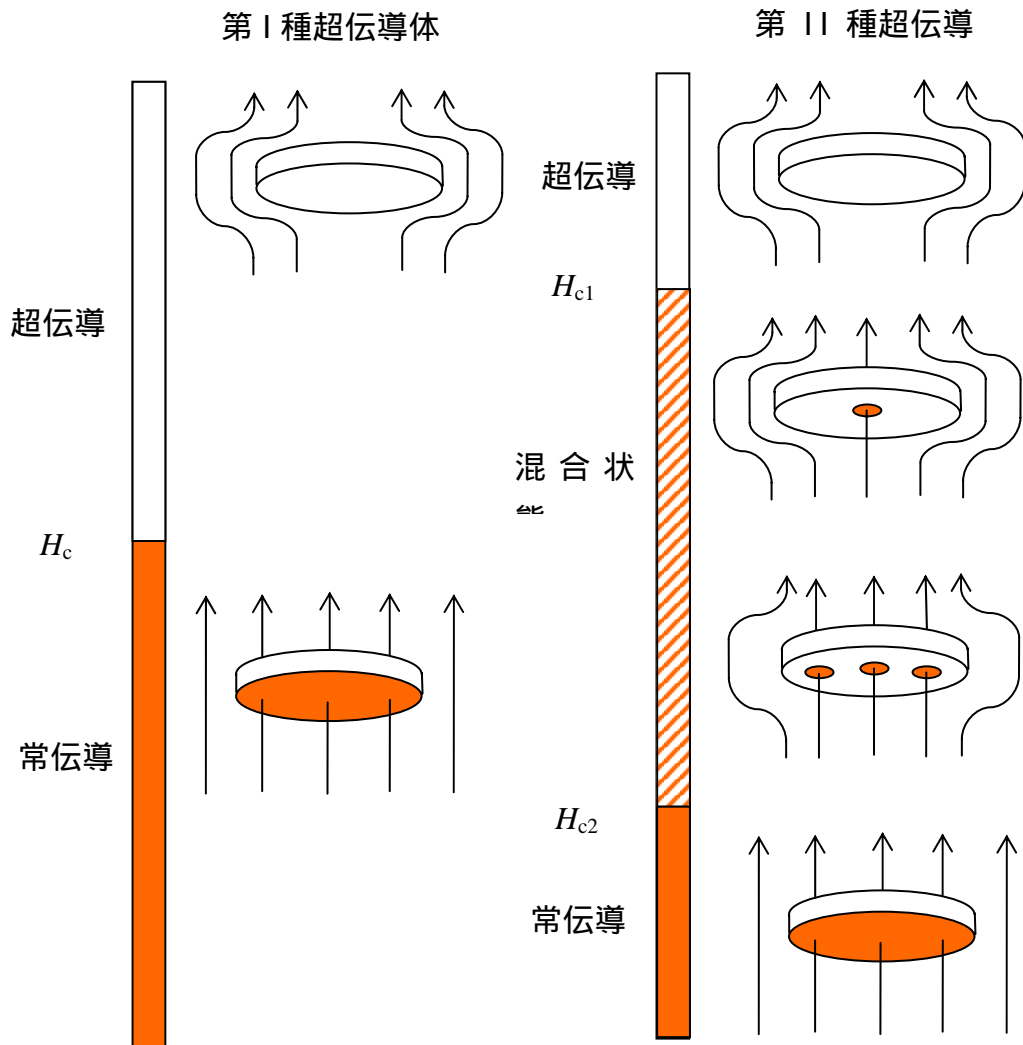


図2 第 I 種超伝導体と第 II 種超伝導体の磁場に対する応答の違い