

## 低温科学からの贈り物

—高温超伝導—

理学部 藤田 敏 三

## 低温現象としての高温超伝導

“高温超伝導”という呼び名は、いささかまぎらわしい。50才を過ぎた若手議員というようなものである。いま高温超伝導体として研究されている銅酸化物は、確かに従来の金属系超伝導体に比べ高い臨界温度をもち、液体窒素の沸点（摂氏温度で $-196^{\circ}\text{C}$ 、絶対温度で $77\text{K}$ ）より高い温度で超伝導を示すものもあるが、それでもまだ日常生活からかけ離れた低温の出来事である。学問的に言っても、超伝導とは本質的に“低温現象”であり、決して温度を上げていって現われる現象ではない。

## 秩序ある低温の世界

物理学で低温とは、秩序の形成に深く関わっている。気体が液体になり固体となって、構成原子が規則正しく格子状に整列した結晶を形成するように、温度を下げていくと、ミクロな粒子の集合に何らかの秩序が生じる。これが自然界における低温状態の本質であって、熱力学の言葉を借りれば、エントロピー（乱雑さの尺度）が小さくなるという。低温を語るとき用いる絶対温度とは、熱平衡にあるすべての系のエントロピーがゼロになる極限温度を原点（絶対零度）と決めている。

金属には、ほぼ自由に動きまわられる電子があって、電気伝導はこの自由電子によって運ばれる電荷の流れである。上記の一般原理から考えると、温度が下っていったとき、この自由電子の集合も、自由すなわち制限のない乱雑な状態を保つことができなくなるはずである。実は、今世紀の始め（1911年）に超伝導が水銀で初めて発見されるまでは、電子も位置を変える自由度を失って、固体のように

凍結してしまう、したがって、低温ではすべての物質が導電性を失って絶縁体になってしまう……という説があった。超伝導の発見は、この説を完全に否定することになったのである。

## 高温超伝導体は寒がり屋

低温極限で電子系が形成する秩序にはいくつかの形態があることが、その後の研究から明らかになってきた。具体的にどのような形態をとるかは物質によって決まるが、電気抵抗がゼロとなる超伝導状態はその1つである。これが「超伝導とは低温現象である」と言う物理学的意味である。では、高温超伝導という呼び名は、どう理解すればよいか。低温領域が高温にむかって拡大したことに対する喜びであり、それを可能にした新物質群への大きな期待の表現とでも考えればよかろう。この意味で、高温超伝導体とは、低温状態を頑固に維持しようとする系、いわば冬装束をいつまでも脱ごうとしないどっぴきりの“寒がり屋”と言える。

## 電子の集団運動

超伝導状態は、電子の位置が固定されるような秩序ではなく、電子の運動に関する秩序である。通常の金属では、各電子はばらばらに動きまわっているが、超伝導状態では、電子はある種の集団運動をしている。常伝導状態における金属のマクロな性質は、ばらばらに運動する電子のふるまいの平均値として生じるもので、統計的性格が強い。しかし、超伝導状態における秩序だった集団運動には、ミクロな粒子の運動状態が直接反映されるので、ミクロの世界を支配する量子力学の法則が、マクロな現象にも姿を現す。超伝導の特

異なるふるまいはすべて、この伝導電子の秩序形成によって露(あらわ)になったマクロな量子性の結果である。

### 応用につながる特異な電磁特性

電気抵抗の消失は、超伝導の第一の特性であり、無損失の送電や超伝導磁石技術の基礎となっている。個々の電子の運動は、小さな障害物によっても容易に妨げられるが、秩序だった集団運動を妨げるのは容易ではない。もちろん大電流を流そうとすると、もはや集団運動状態を保てなくなる。お話として、抵抗ゼロと臨界電流の存在は、このように説明できる。しかし、この簡単な説明も、膨大な理論的・実験的研究によって裏付けられたものであって、世界の英知を集めても約半世紀の歳月を要した知的財産である。

超伝導体は磁気的にも特異なふるまいを見せる。超伝導体は磁場を排除しようとする性質、電磁気学的に言えば、交流的にも直流的にも誘導的性格をもっている。これを完全反磁性あるいはマイスナー効果と呼び、新しいインダクタンス素子や完全磁気シールドへの応用が可能である。磁場排除には磁気エネルギーの犠牲が伴う。それによる不利よりも超伝導状態を保つ方がエネルギーの利得があるからマイスナー状態が実現される。この利得を超伝導の凝縮エネルギーというが、磁場を高くすると、やがて磁気エネルギーが凝縮エネルギーを上まわって、超伝導状態が破れる。すなわち、超伝導には臨界磁場が存在する。

超伝導体を示すマクロな量子性の他の帰結として、超伝導体に囲まれた空間を貫く磁束はとびとびの値しかとれないという磁束の量子化や、超伝導体間で作った接合には、量子論的波動の性質を反映した特異な特性(ジョセフソン効果)などがあり、それを基礎とした新しいエレクトロニクスも育ちつつある。

### より高い臨界温度

上記のように、超伝導には臨界温度、臨界磁場、臨界電流の3つのパラメータが存在する。その値は、いずれも超伝導性の強さを表すものであり、互いに完全には独立ではない。

物性論的には、臨界温度は最も純粋な物質パラメータであり、臨界電流は技術的側面を含む材料パラメータである。いずれにしても、超伝導性の強化は、応用を進める上で望ましいばかりではなく、臨界値の壁を打破する新しい物理的機構をめぐる興味深い基礎問題でもある。この科学的・技術的指向の象徴として、従来から“より高い臨界温度”がスローガンになっていた。

一般に、純金属の超伝導性は弱く、特殊な弱電応用以外には実用性が小さい。合金になると、臨界パラメータの値は大きくなる。現在、超伝導磁石などに使われている材料は、ほとんど合金系の超伝導体であり、その主力は、ニオブ・チタン合金である。超伝導性だけから言えば、化合物が最も大きな臨界値をもつ。欠点は、概して脆く加工性がよくないなど実用材料化がむずかしいことである。しかし、困難は不可能とは別物で、臨界パラメータの大幅な改善ができれば、多少の困難も問題ではなくなってしまう。

### 銅酸化物でなぜ

酸化物やセラミックスといえ、一般に絶縁体と考えられがちであるが、中には導電性を持つものもあり、さらには超伝導を示すものさえ従来から知られていた。1986年にIBM チューリヒ研究所のベドノルツとミュラーの発見に端を発する一連の高温超伝導体も銅の酸化物である。この発見から4年余りの研究で、現在までに30種以上の高温超伝導体の仲間がみつまっているが、すべて銅と酸素が並んだ面をもつ層状構造の酸化物である。

これらの酸化物は、導電性があるとはいえ、絶縁体との境界近くに位置しており、通常の金属とは性質が大きく異なっている。この絶縁体と導電体の境界領域で、なぜ高温超伝導が可能なのかは、今のところ全く解っていない。それどころか、この境界領域における常伝導状態も、実は十分には把握されていないことが、高温超伝導の研究から逆に解ってきたのである。銅酸化物における電子状態の把握、そして超伝導発見機構の解明、これがい

## 開かれた学問

ま固体物理学における最重要課題となっている。前掲の著者が未開領域（未マーカー）

臨界温度はどこまで上るか。理論的には、銅酸化物における電子の集団運動状態に導びく機構が解らない現段階では予想もできない。一方、実験的には、絶対温度125K（摂氏-148℃）は達成されたが、その後この記録を更新できずにいるのが現状である。\* 東広島大学における高温超伝導研究

現在知られている高温超伝導体では、銅と酸素が形成する2次元的な平面が超伝導の場を提供している。これは、すでに広く認められている事実であるが、実験データから最初に積極的な指摘をしたのは、われわれのグループである。また、その銅と酸素の原子面で、超伝導と反強磁性秩序が競合関係にあることを物性相図を描くことによって示したのも、われわれの成果であった。

物理学科のわれわれの研究は、理学部内の物性学科、化学科、地学科、さらには、総合科学部などの多くのグループから協力を受け、あるいは共同研究として実施された。その後、工学部の研究グループも加わって、広島大学における高温超伝導の研究の輪は拡がり、今も、緊密な連絡をとりつつ、続けられている。すみやかな情報交換、討論会、互の実験技術の共用、共同研究など種々の形で実施されたこの協力関係は、大きな成果を産み、他大学からも模範とされている。

### 高温超伝導の波紋

銅酸化物における高温超伝導の研究は、発見から4年余りを経て、期待と模索の熱気に満ちた第1期を終え、いよいよ本格的な研究段階としての第2期に入ろうとしている。この間の研究がもたらした意義の1つは、未知の学問領域を多方面に開いたことである。すでに触れたように、超伝導の機構の研究は、

絶縁体と導電体の中間領域を把握する新しい固体電子論の展開を必要としている。また、材料科学的にも、多成分で組成比が微妙な酸化物の制御という未開の領域に直面し、結晶化学や物性制御さらには格子欠陥の分野においても新しい基礎的課題を投げかけている。このような学問の新しいフロンティアの出現は、学問の活性化に大きな効果をもたらしてきた。高温超伝導はまた、応用への期待に誘発されて、産業界に研究開発のフィーバーを巻き起こした。この社会的波紋の大きさは、一時的ではあるが、株式市場にまで影響が及んだことから伺える。現在もなお、エネルギー、運輸、エレクトロニクス、医療と多方面に亘る応用をめざした開発プロジェクトが進められている。

一方、小学校から大学に至る教育の各段階で、高温超伝導は身近かで興味深い教材となっていることも見のがせない。若者の科学に対する興味を育てることは、わが国の将来に重要な布石にもなるであろう。

再び低温から冒頭でも述べたように、高温超伝導は低温科学からの贈り物である。銅の酸化物をしのぐ「より高い臨界温度」の探求は今後も続く。現在、有望視されている候補の1つは、有機超伝導体であるが、ブレイク・スルーはどこにみつかるか予断を許さない。銅酸化物における高温超伝導の発見も、地道な基礎研究の成果であった。次の大きな飛躍を期待するならば、やはり初心に戻って、地道な基礎研究を重視すべきであろう。幸い東広島の新キャンパスに低温センターも建設された。このセンターを利用した基礎研究に大きな期待を寄せつつ、「再び低温から」を夢見たい。