

## 【隔月連載記事】

## 室温超電導の夢 (その1)

東京大学 新領域創成科学研究科  
産学官連携研究員  
立木 昌

オランダのカメリン オンネスが水銀で 4.2K で電気抵抗が消失するというので、超電導現象を発見したのは 1911 年のことであった。その後、多くの金属、合金で超電導現象が発見され、より高い超電導転移温度  $T_c$  を求める努力がなされてきたが、発見から 4 分の 3 世紀を経た 1985 年までは A15 型化合物である  $Nb_3Ge$  の  $T_c=23.9K$  が最高であった。1986 年に我々は強相関フェルミ粒子系の超電導と題する山田国際会議を準備していた。ちょうどそのときドイツの学会誌で  $La_{2-x}Ba_xCuO_4$  という酸化物で電気抵抗が 30K から急に減少し始め、10K でほぼゼロになるというスイスのベドノルツとミュラーの論文を見た。このような酸化物で高い  $T_c$  が出ることは私には思いもよらないことであった。しかし、重要な結果なので、会議で話してもらうかどうかを決めるため、もっと詳しい情報を知りたかったので、スイスへ電話をしたところ、ベドノルツが出てきて、自分たちは超電導が専門でないのでミュラーが米国から帰ってきたらミュラーから電話するということであった。3 日後ミュラーから電話があり、いろいろとお聞きしたところ超電導の可能性があると判断したので、お二人を招待講演者としておよびすることにした。その後、続々と新しい酸化物高温超電導体が発見された。 $T_c$  が液体窒素の沸点を超える Y-系、Bi-系、Tl-系、Hg-系の銅酸化物高温超電導体が出てきて、世の中に超電導フィバ - を起こし、超電導という言葉は世の中の普通語として認知された。75 年間で約 20 度しか上がらなかった  $T_c$  が、その後の数年間で 100 度以上も上昇したことは、驚異的である。この勢いであると当時は室温超電導体が発見されるのも間近に迫っていると期待された。しかし、1993 年に  $T_c=135K$  の水銀系銅酸化物が見つかって以降、13 年間は、記録の更新は止まったままである。これが高い  $T_c$  をもつ超電導体探索の研究分野に閉塞感をもたらしているであろう。

ここで酸化物超電導体発見の歴史を、もう一度振り返ってみよう。金、銀のような一価金属以外の、多くの金属、合金は超電導になる。酸化物超電導発見以前では  $T_c$  を上げる努力は、この金属、合金、金属間化合物の範疇内で行われたものである。ペロブスカイト型遷移金属化合物はほとんどのものが絶縁体であり、そのようなものから高温超電導体が出現するのは思いもよらないことであった。このような化合物で高温超電導になるものは、すべて  $CuO_2$  という 2 次元層を含んでいる。その層に少量のキャリア（ホールか電子）を入れて伝導性を持たせると高温超電導になったのである。これは思いもよらないことであった。この高温超電導機構の解明には何か新しい機構が必要であるが、この機構解明は実験と理論の密接な協力によりもう一步のところまで来ている。

室温超電導体を探索するにも上記の高温超電導の教訓を生かして、従来の固定観念にとらわれない新しい発想に基づいた超電導機構と物質を想定し、理論とシミュレーションにより、室温超電導を具現するよう努力すること、一方 実験家はそれを参考にして、鋭い直感力と高度な実験技術力により室温超電導体の発見を実現することが重要と思われる。

室温超電導体が発見されると、一大産業革命が起こることは間違いない。現在は家庭、交通機関、大型計算機、MRI などの医療器具などで、大量の電気エネルギーを消費している。それらに使う電気は主として化石燃料による発電でまかなっている。室温ではたらく超電導線ができたならば、太陽電池や風力発電に都合のよい世界の場所で発電した電気を世界の各地にエネルギー損失なしに送電できるので、エネルギー問題や環境問題は一挙に解決できるであろう。またリニアモーターカー、

超電導船、種々の超電導デバイスが、従来のものと取って変わり、より便利で住み心地のよい世界が実現するであろう。

本題の室温超電導は可能か、という本題へ進もう。昨年秋、米国政府の肝いりで、室温超電導の可能性というシンポジウムがインディアナ州のノートルダム大学で開かれた。ノーベル賞受賞者を含む約 50 人の研究者が集まって、主として理論的側面から意見が交わされた。日本から私も出席したが室温超電導の実現にポジティブな意見が多く有益であった。今後は有能な実験家も多く含め具体的な議論を続けていくことが必要だと感じた。

金属の電気抵抗は伝導電子が不純物や格子振動による散乱によっておこり、散乱が弱くなると電気抵抗は小さくなる。超電導で電気抵抗がゼロになった状態は、これとまったく違った状態である。量子力学では電子の状態は複素数の波動関数で表される。超電導状態は波動関数の位相のそろった状態であり、それを最初に現象論的に導入したのはギンズブルグとランダウである。そしてそれを微視的に解明したのは、バーディーン、クーパー、シュリーファーである。超電導の秩序関数の位相と電気伝導にあずかる電子数は共役であり両者は非交換量である。したがって位相のそろった超電導状態では電子数はゆらいでいる。バーディーン、クーパー、シュリーファーは電子間に何らかの引力が働いて電子対ができていれば上記の超電導状態が実現することを示した。そして彼らはフェルミ面近くにある 2 つの電子間には格子振動を媒介して引力が働くことを示し、これで電子対ができ超電導状態が実現すると考えた。この 3 人の名前をとった BCS 理論は金属、合金の超電導の諸性質を半定量的によく説明することができた。BCS 理論では電子状態や結晶格子と、これらの相互作用を単純化してとりあつかっていたが、その後多くの人により、実際に近い電子状態や結晶格子をつかい、電子間のクーロン相互作用も考慮した計算が行われ、金属、合金、金属間化合物の超電導の実験結果を理論的によく説明できるようになった。しかし上述の理論で予言される  $T_c$  の上限は約 30K という結果になり、これで超電導の基礎研究は終焉を迎えたという風潮がただよった。

そこへ 1985-1986 年にかけて  $T_c=30K$  をはるかに超える銅酸化物高温超電導体が出現したのである。この結果をどう考えたらよいかが大問題になった。金属、合金と銅酸化物はどこが違うのだろうか。金属、合金では伝導電子密度が大きくクーロン相互作用のデバイ遮蔽定数が非常に短く (0.2-0.3 オングストローム) 伝導電子は自由電子のように振舞う。一方酸化物高温超電導のキャリアは少なく、クーロン相互作用が十分遮蔽されない。また銅イオンはスピンを持っている。中性子散乱や Spring 8 の測定結果によると、ホールをドープすると格子振動の分散はある波数のところで非常に大きい変化を受けている。これは摂動計算では取り扱えないほど強い相互作用がホールと格子振動の間に働いていることを意味する。これらを考慮すると銅酸化物の高い  $T_c$  は説明できそうである。

ダイヤモンドに数%のボロンをドープするとホールが導入されて約 10K の  $T_c$  を持つ超電導になることがわかった。ダイヤモンドの振動振幅は炭素が軽いせい非常に大きい。ホールの近くのダイヤモンドの  $sp^3$  結合は大きな影響を受け格子振動が影響を受けると同時に、ホールの運動も影響を受ける。このような時には高い  $T_c$  が期待できるので、室温超電導も可能ではないかと考えている。詳しいことは次の回からおはなしする予定である。

[超電導 Web21 トップページ](#)

【隔月連載記事】

室温超電導の夢 (その2)

東京大学 新領域創成科学研究科  
産学官連携研究員  
立木 昌

先回ではフェルミ面近くの2つの電子間に格子振動を媒介にした引力相互作用が働くことにより超電導状態が実現するというBCS理論の拡張では、 $T_c$ の上限は約30Kであることをお話しした。そこへ30Kをはるかに超える銅酸化物超電導体が発見されたのである。より高い $T_c$ をもとめる物質探索と、この高温超電導の発現機構を探索するためのフィーバーが世の中におこった。室温超電導体の探索の指針のための室温超電導発現機構を探るため、銅酸化物超電導の発現機構研究の歴史を振り返って見ることは意味があることと考えられる。

銅酸化物高温超電導体の $CuO_2$ 層に少量のホールを導入した場合を考えてみよう。ホールは銅イオンの $d_{xy}$ -波動関数と酸素イオンの $p$ -波動関数の混成した軌道に入り、イオン間を飛び移り積分で動き回っている。そして2つのホールが同一軌道に、入ったときは非常に強いクーロン斥力が働く。このようなモデルはハバードモデルと呼ばれているが、この一次元モデルの正確な根はC. N. Yangによって与えられている。我々はこの根を用いて、一次元モデルでホール間にはたらく力を計算したが、残念ながら引力はえられなかった。C. N. Yangの根にはホール粒子とスピン粒子をあらわす波数が存在する。現在ではこれらの粒子をそれぞれ、スピノン、ホロン呼んでいる。福山らは、オンサイトのクーロンエネルギーが飛び移り積分より大きいとき、ハバードモデルより導かれる飛び移り積分と反強磁性相互作用からなる2次元系モデル( $t$ - $J$ モデル)のハミルトニアンをスピノン、ホロンで書き換え、平均場近似で温度-ホール濃度相図や色々な物理量の研究を勢力的におこない興味ある結果を得た。この理論は電子系にくらべスピノン、ホロンという自由度が2倍になった系の大きな位相空間に広げて議論したものである。Yangの1次元系のときはスピノン、ホロン位相空間と電子位相空間(physical space)とは一致している。しかし、2次元系を平均場近似で取り扱った場合、スピノン、ホロン系空間でといた解が電子位相空間(physical space)の中に入っているかどうかの危惧はある。

中性子の非弾性散乱により $La_{2-x}Sr_xCuO_3$ や $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ におけるスピン揺らぎの測定が遠藤ら多くの研究者によりなされている。それらによると逆格子空間の $a^*$ - $b^*$ 面の $(\pi/\alpha, \pi/\alpha)$ の周りに強い磁気散乱ピークが観測された。このスピン揺らぎを媒介にした超電導は $d$ 波超電導であることが予想される。 $d$ 波超電導はNMRの実験から朝山等によりずっと以前から示唆されていたことと符合する。守谷ら、山田らはホールの多い側からスピン揺らぎによる超電導機構と物理量の研究を勢力的におこない定量的にも実験と合う結果を得ている。ただこの理論をホールの少ない側に延長すると実験結果とあわないという破綻をおこす。

以上述べてきたように、スピンに関連した機構が、銅酸化物超電導の機構の主流であった。ところが最近、中性子散乱や高輝度角度分解光電子分光の実験で $La_{2-x}Sr_xCuO_3$ や $YBaCu_2O_3$ の縦光学フォノンの振動数が逆格子空間のある領域で異常なソフトニングを起こし、 $T_c$ が最大になるホールドーピング量でこのソフトニングは最大に達することが観測された。実験の一例として江上等によって測定された $YBaCu_2O_3$ の中性子散乱の実験結果を図1に示す。赤点線と青線はそれぞれ酸素イオンの不足した絶縁体状態の縦、横光学フォノンの分散を示す。酸素を超電導の最適まで入れたときの縦、横光学フォノンの分散をそれぞれ黒、白四角で示している。横光学フォノンはホールドーピングによって、ほとんど変化しないが、縦光学フォノンは赤線、点線で示すようにゾーンバウンダリー近

くで強いソフトニングが起きている。このような様相は通常の電子-格子相互作用の摂動では説明することはできない。電子と縦光学フォノン相互作用が異常に強く、分散が異常をおこしている逆格子空間の領域でオーバースクリーニングの現象で動的誘電率が負になっていけば、実験結果を説明できることがわかった。この負の動的誘電率モデルを使って銅酸化物超電導の超電導秩序パラメータを計算すると d 波対称的なものになり、Tc は約 100K になることもわかった。したがって動的誘電率が負になるような物質を探索していけば、室温超電導を発見することが出来るのも夢ではないと思われる。そこで、この機構のことを少し詳しく述べてみたいと思う。

負の誘電率というのは何であろうか。Gauss 単位系を使い、議論を簡単にするために物理量が波数に依存する静的な場合を考えてみよう。charge susceptibility を次の式で定義する。

$$4\pi P(\mathbf{q}) = \chi(\mathbf{q}, 0) D(\mathbf{q}) \quad (1)$$

ここに P(q) は電荷分極、 $\chi(\mathbf{q}, 0)$  は charge susceptibility、D(q) は外部電場である。電磁気の式

$$D(\mathbf{q}) = E(\mathbf{q}) + 4\pi P(\mathbf{q}) = \varepsilon(\mathbf{q}, 0) E(\mathbf{q}) \quad (2)$$

のなかの E(q) は全電場である。(1)式と(2)式を使って

$$1/\varepsilon(\mathbf{q}, 0) = 1 - \chi(\mathbf{q}, 0) \quad (3)$$

を得る。charge susceptibility は必ず正であることが、Kramers-Kroenig relation から証明できるので、(3)式より

$$1/\varepsilon(\mathbf{q}, 0) \leq 1 \quad (4)$$

という不等式(4)式を得る。(4)式の解には、 $\varepsilon(\mathbf{q}, 0) \geq 1$  と  $\varepsilon(\mathbf{q}, 0) < 0$  がある。前者は通常物質の場合に対応し、後者は銅酸化物高温超電導体のように電子間や、電子と結晶格子、スピンとが強い相関を持つ系やナノ粒子の系において実現する。まず誘電率が上記のような挙動を示すとき図1で示したような、ホールを入れたときの縦光学分散の異常な振る舞いを説明することができるであろうか。イオンと伝導電子を含めた縦波電荷密度

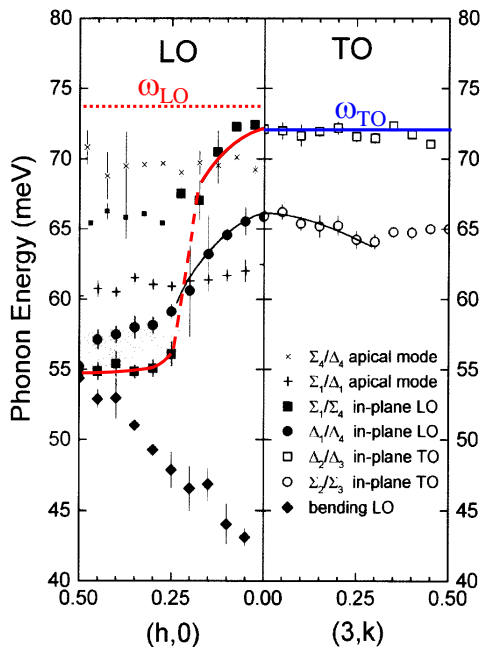


図1 江上等による中性子散乱測定による YBCO のフォノン分散

$$\rho(\mathbf{q}, \omega) = -\frac{1}{\pi} \text{Im} \frac{1}{\varepsilon(\mathbf{q}, \omega)} \quad (5)$$

で表される。ここに $\varepsilon(\mathbf{q}, \omega)$ は次の式で与えられる。

$$\varepsilon(\mathbf{q}, \omega) = \varepsilon_{\text{ion}}(\mathbf{q}, \omega) + \varepsilon_{\text{el}}(\mathbf{q}, \omega) - 1, \quad (6)$$

$$\varepsilon_{\text{ion}}(\mathbf{q}, \omega) = \frac{\omega_{\text{LO}}^2(\mathbf{q}) - \omega^2}{\omega_{\text{TO}}^2(\mathbf{q}) - \omega^2}, \quad (7)$$

$$\varepsilon_{\text{el}}(\mathbf{q}, \omega) = \varepsilon_1(\mathbf{q}, \omega) + i\varepsilon_2(\mathbf{q}, \omega). \quad (8)$$

式(6)において右辺に-1がついているのは、 $\omega$ が無限大になるときすべての誘電率が1になるのを保障するためである。 $\varepsilon_{\text{el}}(\mathbf{q}, \omega)$ は実部と虚部に分けている。 $\omega_{\text{Lo}}^2(q)$ と $\omega_{\text{To}}^2(q)$ は、それぞれ絶縁相における縦、横光学フォノンの振動数である。式(6)、(7)、(8)を式(5)に代入し、 $\rho(\mathbf{q}, \omega)$ が最大になる振動式数 $\omega^{*2}$ を $q$ の関数として求めると、式(9)のようになる。

$$\omega^{*2}(\mathbf{q}) = \omega_{\text{TO}}^2(\mathbf{q}) + \frac{[\omega_{\text{LO}}^2(\mathbf{q}) - \omega_{\text{TO}}^2(\mathbf{q})]}{\varepsilon_1[\mathbf{q}, \omega^{*2}(\mathbf{q})]} \quad (9)$$

この式は中性子やx線の非弾性散乱によって観測される縦光学フォノンの分散を表す。式(9)の右辺の二項目の分子は正の量であるから、分散が異常をおこす領域で分母の誘電率の実部が負で絶対値が小さいと第1図で示されたような縦光学フォノンの振動数の大きなソフトニングを説明することができる。次回では負の動的誘電率領域があると銅酸化物高温超電導体の超電導の秩序パラメーターはd波的であり、超電導転移温度も約100Kになり得ることをお話する。またこの機構でより高い転移温度をもつ超電導体を探索するときの指針についての私見をお話したい。

[超電導 Web21 トップページ](#)

【隔月連載記事】

室温超電導の夢 (その3)

東京大学 新領域創成科学研究科  
産学官連携研究員  
立木 昌

今回は最近の中性子散乱や高輝度角度分光電子分光の観測により、 $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{Cu}_2\text{O}_3$  や  $\text{YBaCu}_2\text{O}_3$  の縦光学フォノンの振動数が、逆格子空間のゾーンバウンダリーの近くで異常なソフトニングを起こしている実験結果は、この領域で動的誘電率 $\epsilon(\mathbf{q}, \omega)$ の実数部が負になっていることで説明出来ることをお話しした。誘電率が負なる原因は何であろうか。この領域では縦光学フォノンに付随したイオンの変位により、イオン間の transfer integral が瞬間的には大きくなり電子が動き易くなる。この動き易くなった電子が絶縁体状態のイオン電荷の縦誘電率に寄与する部分をオーバースクリーンする結果と考えられる。このような現象が起こったとき銅酸化物に高温超電導が起こり得ることを説明し、室温超電導の夢のお話へと続けてみたい。

結晶中で波数  $k$  と  $k'$  をもつ 2 つの電子に働く遮蔽された有効クーロン相互作用は  $V(\mathbf{q})/\epsilon(\mathbf{q}, \omega)$  と書かれる。ここに  $\mathbf{q}$  は  $\mathbf{q}=\mathbf{k}-\mathbf{k}'$  を  $\omega$  は 2 つの電子の角振動数の差をあらわす。  $V(\mathbf{q})$  はクーロン相互作用の波数  $\mathbf{q}$  のフーリエ成分である。先に述べたように原子あたり 1 つ以上の電子を持つ金属、合金ではデバイス遮蔽常数が非常に短くクーロン相互作用はほとんど遮蔽されてしまうので、この有効クーロン相互作用は小さくなってしまい、フェルミ面の近くの 2 つの電子間に働く BCS 型の格子振動を媒介にした引力相互作用が優位をしめる。一方、銅酸化物超電導の  $T_c$  が最高になるのは、 $\text{CuO}_2$  層の銅イオンあたり 10% - 15% のホールをドーブしたときである。このときの、平均距離にある 2 つのホールに働く裸のクーロンポテンシャルは 1eV - 2eV と強い斥力ポテンシャルである。先に述べたように  $\epsilon(\mathbf{q}, \omega)$  の実数部が負の領域では、遮蔽された有効クーロン相互作用  $V(\mathbf{q})/\epsilon(\mathbf{q}, \omega)$  はかなり強い引力相互作用に変わり超電導形成に重要な相互作用になるであろう。この相互作用が引力になる領域は実験結果によると、かなり狭いが次に示すように、この相互作用で、銅酸化物高温超電導体の  $T_c$  の値や超電導秩序パラメータの対称性をかなりよく再現することが出来る。図 1 は波数  $k$  と  $k'$  の電子の間にはたらくこの有効相互作用を示したファイマン ダイアグラムである。

図 1 の相互作用によって誘起される超電導を Eliashberg の積分方程式を用いて求めた。誘電率には縦光学フォノンの振動数の実験値から求めたものを、フェルミ面とバンド構造には角度分解光電子分光から求めた実験値を用いた。どちらも最適にホールをドーブした YBCO の試料から得られたものを用いた。これらの実験値を用い  $T_c$  の値と、 $T_c$  における無限小のギャップ パラメータを

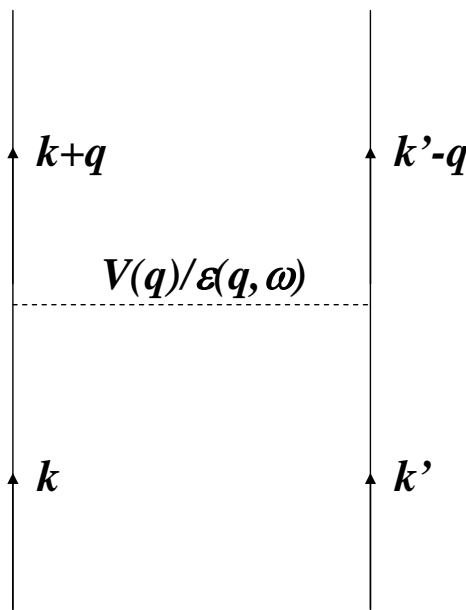


図 1 2 つの電子間に働く有効相互作用  $k$  と  $k'$  は 2 つの電子の波数、 $\mathbf{q}$  と  $\omega$  はそれぞれ 2 つの電子の波数と角振動数の差をあらわす。

求めるために Eliashberg 方程式を線形化した方程式を数値的に解いた超電導パラメーターの計算結果を図 2 に示す。

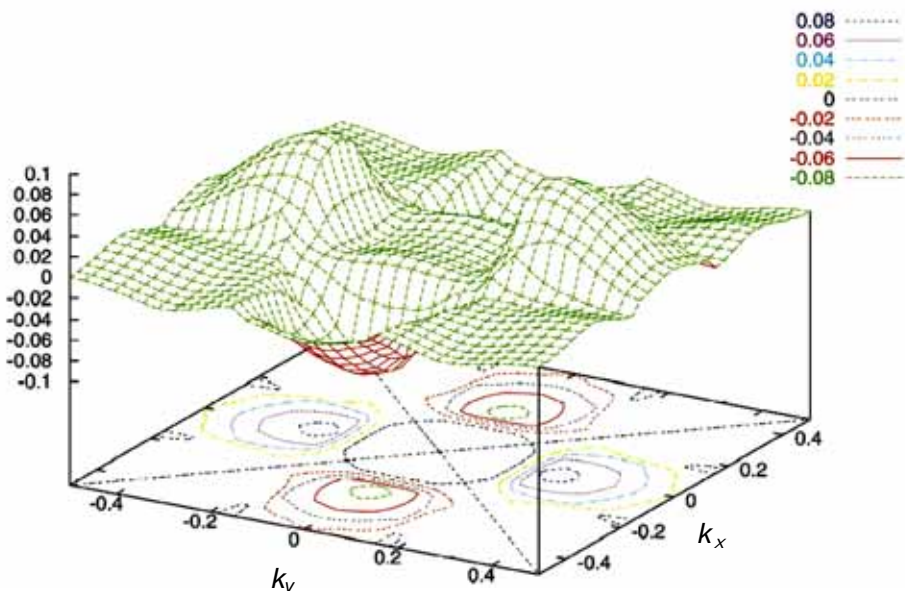


図 2 波数空間における高温超電導ギャップ パラメーターの典型的計算例

図 2 で見られるように超電導ギャップ パラメーターは  $d_{k_x^2-k_y^2}$  対称をもち実験結果と一致している。計算された  $T_c$  の値は 180K となり実験値の 90K より、かなり高い。この  $T_c$  の値が実験値より高すぎるのは、 $T_c$  はパラメーターに敏感な量なので、少しのパラメーターの違いによる計算誤差のせい、あるいは計算は平均場近似で行われたので超電導揺らぎの効果が入ると  $T_c$  は下がるかもしれない。

以上述べてきた銅酸化物の超電導機構は電子あるいはホール間に相互作用が働き、伝導キャリア対が超電導を形成することにより超電導が出現するという点では BCS 理論の範疇に属する。しかし、今までに述べてきた幾つかの対をつくる機構は BCS 理論のものとは異なる機構である。このほかにも多くの対機構が提案されている。

ここで、Schrieffer 氏からお聞きした BCS 理論における電子対の話の一つさせていただこう。十数年前、仙台で Schrieffer 夫妻と夕食を共にする機会に恵まれ、Schrieffer 氏がイリノイ大学の大学院生で Bardeen 先生の指導のもとで BCS 理論を構築していた時代のお話を聞くことも出来た。BCS 理論が出る前のある時期に、電子間につよい引力がはたらいて電子対ができ、これがボーズ粒子となり、低温でボーズ凝縮したものが超電導状態であるという説があった。いまでも解説書のなかにはこのような説明をしているものを時々見かける。Bardeen 先生は、BCS 対はボゾンではなく、BCS 超電導状態はボーズ凝縮状態でないことをいつも強調されていたそうである。BCS 対のオペレーター  $B_k$  の交換関係を計算してみると確かに、ボーズ粒子ものでもフェルミ粒子ものでもない、これらの中間のものになっている。

そして BCS 超電導の基底状態の式は

$$\Phi_{\theta} = \prod_k (u_k + e^{i\theta} v_k B_k^{\dagger}) \Phi_v$$

と書けるということを Bardeen 先生のところへもって行いったところ超電導の機構はこれで解けたと非常にお喜びになったということであった。ここに、 $\theta$ は位相、 $u_k$ 、 $v_k$  はパラメーターである。

酸化物高温超電導や、切望されている室温超電導の電子対の機構は BCS 理論のものとはまったく違ったものであろう。またこれらの超電導の機構は BCS 理論の範疇にはいない、まったく異なった新しいものかもしれない。新しい発想と経験を生かした実験と理論の連携した研究が望まれる。

[超電導 Web21 トップページ](#)



【隔月連載記事】

室温超電導の夢 (その4 最終回)

東京大学 新領域創成科学研究科  
産学官連携研究員  
立木 昌

いよいよ最後の稿になった。将来も人類が永らえて快適な生活を送っていくためには十分なエネルギーの供給源が是非必要である。石油、石炭などの化石燃料は、いずれ枯渇するので将来は太陽エネルギーに頼るほかに手段は無いであろう。その手段としては太陽電池、風力発電で得た電気エネルギーを直接電気エネルギーとして使うか、太陽エネルギーを何らかの触媒を用いて水を水素と酸素に分解して蓄えるか、植物をアルコール類に変えて蓄える等が考えられる。そのとき環境問題やエネルギー輸送問題から考えても電気エネルギーのかたちにして使うのが理想的であろう。そのとき、発電した場所から家庭、交通機関、工場等に電気エネルギーを運ぶのに現在は銅線を用いている。しかし銅線の電気抵抗の発熱によるエネルギー損失はかなり大きい。それを解消するために、先に述べた 1986 年に発見された銅酸化物高温超電導を用い超電導電線を作ることが考えられている。幸いに十数種の銅酸化物高温超電導体の転移温度は窒素の沸点の 77K を超えている。したがって液体窒素により冷却すると電気抵抗ほとんどゼロの超電導電線が出来る。ただいま  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_x$ 、 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$  や  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$  を使った超電導線材の研究が精力的におこなわれ、今は実用のための試験段階にある。物質・材料研究機構の熊倉氏によると  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$  線材の電気抵抗は 77K で銅線材の 5 万分の 1 だそうである。しかし超電導線は銅線に比べコストが高くつくこと、冷却費がかかるという問題点がある。

そこで室温超電導ということになるが、今の段階では表題にあるとおり室温超電導はまだ夢の段階である。最近の数年間に、数多くの新しい超電導体が発見されつつあるが、まだ残念ながら 40K を超えるものは現れていなく、今のところ 1993 年に発見された水銀銅酸化物の 135K、それに圧力をかけたときの 164K が超電導転移温度の最高値である。しかし、後で述べるように、理論的には室温超電導が出て悪い理由はない。1986 年以前には  $\text{Nb}_3\text{Ge}$  の  $T_c=23.9\text{K}$  が最高であったが、1986 年から 1987 年にかけて銅酸化物で  $T_c$  が約 100K の数種の超電導体が発見されたとき世間が熱狂的な興奮状態になったことは、いまでも忘れることは出来ない。新聞やテレビで報道されたおかげで、超電導ということばが普通語になった。今後、再び思いもよらない物質で室温超電導が発見され産業革命が起るのとは夢ではないと信じている。

室温超電導体の物質探索を行うには、ある程度の理論的指針が必要であろう。銅酸化物高温超電導を発見するときにも、発見者の Müller は次のような理論的指針を持っていた。銅のプラス 2 価イオンは Jahn-Teller イオンであって、結晶にはいったとき縮退した電子準位をもっている。銅イオンのまわりの原子に変位が起こることにより点対称性が下がり、銅イオンの縮退していた準位が分裂する。この銅イオン準位分裂により (電子 + 格子) のエネルギーは下がる。これは、銅イオンの電子と結晶格子の間に非常に強い相互作用が働くことを意味する。この強い相互作用が堅固な電子対を形成する役割を果たし高い  $T_c$  を持つ超電導が出現すると考えた。これは面白い考えであるが、残念ながら超電導になる前に、銅イオンの Jahn-Teller 効果はおこり、結晶は変形し銅イオンの縮退電子準位は分裂してしまっているため、この機構は電子 格子相互作用には働かない。しかし、Müller らは、このような考えで高温超電導体として銅酸化物を取り上げ、けがの功名で、すばらしい発見をなしとげた。室温超電導体の物質探索においても室温超電導の機構のいろいろの可能性を考え、物質設計をすることにより室温超電導体にとどり着くことが出来ことを期待している。

酸化物高温超電導発見後直ちに、この超電導体の諸性質を調べ高温超電導という新領域を確立す

ることに貢献した東京大学の田中研、 笹木研の研究者をはじめ日本の多くの研究者の業績、 ビスマス酸化物高温超電導を発見した前田氏の業績等、 高温超電導に対する日本の貢献はすばらしかった。室温超電導の研究においても、 この日本の力を発揮して世界のイニシアチブをとり室温超電導発見に導いていただけよう努力していただけることを、 つよく願っている。

昨年6月に米国のインディアナ州のノートルダム大学で「室温超電導の可能性」という Workshop があり、 約 50 名の研究者が集まり、 主として理論家が講演を行った。日本からは私も参加した。軽い原子である水素を含む化合物で可能性がある等いろいろの意見の発表があり、 この分野に活力を与える助けとなった。この種の意見交換が引き続きおこなわれることが望まれる。

ここで室温超電導体探索に対する私見をお話したい。室温超電導出現機構は BCS 理論の枠内のものであろうか、 それとも全く違ったものであろうか。私は室温超電導も電子対が形成され、 その波がコヒーレントな状態になるという点では、 BCS 理論の枠内であろうと考えている。しかし電子対ができる機構は BCS 理論のものとは違ったものであろう。

Nb などの金属では原子あたりの伝導電子が 1 より多くトーマス・フェルミー遮蔽距離が短く、 電子間のクーロン力も遮蔽され自由電子的に振舞うし、 電子と格子の相互作用の距離も短距離力になる。このときの  $T_c$  の計算は以前に多くの研究者により計算されているように  $T_c$  は 40K 以下になってしまう。銅酸化物超電導が高温超電導になる領域では伝導粒子（電子かホール）の数はかなり少なく、 いわゆる強い相関係である。この系では銅イオンがスピンを持っているので、 スピンの自由度が高温超電導に重要な役割を果たしている可能性について(その2)で述べた。一方、最近 LSCO や YBCO を用いた中性子散乱や高輝度角度分解光電子分光の実験で縦光学フォノンの振動数分散に異常なソフトニングが観測されている。この現象を我々は縦光学フォノンとドーブされたホールとの相互作用が非常に強く、 オーバー・スクリーニング現象が起こり、 それにより縦光学フォノンの格子振動ポテンシャルが遮蔽されるためと考える。このオーバー・スクリーニング現象がおこっているブリルアン帯の  $(\mathbf{q}, \omega)$  領域では、 誘電率の実部  $\varepsilon(\mathbf{q}, \omega)$  は負になることを(その□)で議論した。裸のクーロン相互作用を  $V(\mathbf{q})$  とすると遮蔽された有効クーロン相互作用は  $V(\mathbf{q})/\varepsilon(\mathbf{q}, \omega)$  となり、 オーバー・スクリーニングの領域では、  $\mathbf{q} = \mathbf{k} - \mathbf{k}'$  を満たす電子  $\mathbf{k}$  と電子  $\mathbf{k}'$  の間にはかなり強い引力相互作用が働き、 銅酸化物超電導においては、 この機構でも高い  $T_c$  と超電導秩序の d 対称性を説明することができることを(その3)に示した。

いまの時点で室温超電導体探索に対する指針の一つとしては、 電気伝導キャリアが比較的少なく、 電荷、 スピン、 格子間の相関の強い物質を探すことのように思われる。

その一つとして炭素という軽い原子から出来ているダイヤモンドを考えてみよう。ダイヤモンドでは炭素間の結合力が強いにもかかわらず炭素原子が軽いため、 格子振動の振幅は非常に大きく、 熱伝導率も非常に大きい。大きな振幅を持つ格子振動の縦波モードは炭素間結合の大きな揺らぎを誘起するであろう。このときダイヤモンドに少量のホールをドーブすると大きな電荷の揺らぎが誘起され  $\varepsilon(\mathbf{q}, \omega)$  は大きくなり、  $(\mathbf{q}, \omega)$  のある領域では負になることが期待される。このことは  $1/\varepsilon(\mathbf{q}, \omega)$  が小さくなって、 ゼロを通過して負になると言ったほうが考え易いかもしい。我々はホールの入ったダイヤモンドを、 上に述べたような電子と格子の強相関係と考えると、 地球シミュレーターを使って、  $T_c$  をホール濃度の関数として摂動を使わない方法で計算している。

いずれ室温超電導体は発見されるであろう。そうなると地球にやさしい環境で、 もっと便利な住みよい世界に一変するであろう。電車は超電導リニャーモーター・カーになり、 超電導のモーターやバッテリーもでき、 自動車や船も超電導で動くようになる。医療や通信機器も一変し、 もっと生活し易い世界になるであろう。また超電導を使って地球を飛び立つ手段が開発され、 宇宙旅行を楽しむことの出来る日が来るかもしれない。一日も早く室温超電導体が発見されることを期待しながら、 この稿を終わりたいとおもう。