

■ 解 説

超伝導の理論概説

岩 本 直 樹 (香川大学工学部)

超伝導がどういう仕組みで起こるのかその理論について解説します。超伝導研究の歴史、その背景、理論を作った人々についても触れます。

(1) 金属とは？電気伝導とは？

金属は結晶格子を形作っているイオンと自由に動き回る伝導電子からなっています。金属に外から電場をかけると電子が力を受け電場の正極の方向へ移動します。その際、電子は加速されつづけるのではなく、格子を形作っているイオンや、混じっている不純物などと衝突して方向を曲げられます。したがって与えられた電場の強さに対して電子はある一定の速度に達し、金属中には定電流が流れます。これが電気伝導で、電場の強さと電流の大きさの間の比例関係がオームの法則¹です。これを通常の状態での電気伝導という意味で常伝導と呼びます。つまり伝導電子が電気を伝えます。したがってどのように電子が振舞うかが電気伝導の性質を決めます。これから説明する超伝導は電子の状態の変化から起こる現象です。

(2) フェルミ粒子とボーズ粒子

自然界に存在する基本粒子はスピンという量を持っています。これは粒子自身の持つ角運動量と呼ばれる量で、粒子が自転しているものと考えてください。スピンがある単位で計って整数のものをボーズ粒子、半整数のものをフェルミ粒子と呼びます。電子、陽子、中性子などのスピンはこの単位で $1/2$ なのでこれらはフェルミ粒子です。一方、光子と呼ばれる光の量子はスピン 1 、中間子と呼ばれる粒子はスピン 0 または 1 でこれらはボーズ粒子です。

(3) パウリの排他原理、ボーズ凝縮、超流動

密度が高く温度が低くなった時、フェルミ粒子の集団と、ボーズ粒子の集団とは全く違った振る舞いをします。フェルミ粒子は同じ状態に2個以上の粒子が存在できないという性質を持ち、このことをパウリの排他原理²といいます。一方、ボーズ粒子は同じ状態に何個でも存在できます。し

¹ オームの法則は1827年ドイツの学校の先生ゲオルグ・ジモン・オームが発見しました。彼の時代には電気の精密な実験をするには電源が問題でした。オームの法則を確立するには安定した電源が必要です。しかし、1801年に発明されていたヴォルタ電池は導体を接続すると電圧がどんどん下がり使い物になりませんでした。そこで彼は異種の金属を接触させると電位差ができるという現象を使ってオームの法則を発見します。しかしオームの法則の重要性は当時認識されず、彼の発見の重要性が理解されるのはずっと後になってからのことです。

² 1925年パウリによって提唱され、彼は1945年ノーベル賞を受賞します。

たがって、ボーズ粒子の集団の温度をどんどん下げていくと全ての粒子が一番エネルギーの低い状態に存在するという状態になります。これをボーズ凝縮またはボーズ・アインシュタイン凝縮³といます。ボーズ凝縮したとき、ボーズ粒子の集団は粘性がなく、したがって摩擦なく管の中を流れるという珍奇な超流動⁴という現象を示します。

(4) 電子の縮退

一方、金属中の伝導電子は室温ではフェルミ縮退⁵と呼ばれる状態にあります。電子はフェルミ粒子なので一番低いエネルギー状態から順々に占有可能なエネルギー状態を占めていき金属中の全電子の数に達するところまでエネルギー状態が詰まります。この一番上の状態をフェルミ準位（幾何学的にはフェルミ面）、またそのエネルギーのことをフェルミエネルギーと呼び、このエネルギーに相当する温度のことをフェルミ温度⁶といます。普通の金属のフェルミ温度は数万度になります。このフェルミ温度と金属の実際の温度とを比べ、実際の温度がフェルミ温度よりずっと低いとき金属中の電子は縮退しているといえます。例えば室温では金属中の電子は十分に縮退しています。金属中の縮退している電子の状態は丁度箱の中にボールが順々に下からつめられたものに相当します。ただし伝導電子はボールのようにじっとしていないで動き回っています。縮退した状態ではエネルギーが一番高い状態付近の電子、つまり箱の中のボールの例えでは箱の中の一番上付近のボールしか様々な反応に参加できません。例えば箱の中のボールに外から別のボールをぶつけたとします。箱の上の方にあるボール上が空いているのでは外から飛んできたボールと衝突して飛び上がれます。一方、箱の下のほうにあるボールはずっと上の方まで他のボールがあるためもし外からボールが飛んできたとしても行き場所がないためはじき飛ばされません。⁷

(5) 超伝導

1911年オランダのカマリン・オネスは4 K (−269°C) で水銀の電気抵抗が零になるということ

³ 1924年のボーズの理論をアインシュタインが紹介し発展させました。

⁴ ヘリウムは低温では液体です。1938年ヘリウム4 (⁴He) が2.17K (−271°C) 以下の温度で超流動になることをカピッツァ (1978年ノーベル賞受賞) およびアレンとマイスナー達が独立に発見します。1972年ヘリウム3 (³He) も 3×10^{-3} K (−273°C) 以下の温度で超流動になることがオジェロフ、リチャードソン、リーらによって発見され1996年ノーベル賞を受賞しました。一方、超流動の理論を作ったランダウ (1908–1968) は1962年ノーベル賞を受賞します。ランダウは14歳でレニングラード大学に入学し19歳で卒業した秀才です。超流動と超伝導の理論に貢献したアブリコソフ、ギンズブルグ、レゲットは2003年度のノーベル賞を受賞します。アブリコソフはランダウの弟子です。1995年アルカリ金属の気体を冷やしていくと μ Kつまり 10^{-6} Kという極低温でボーズ・アインシュタイン凝縮を起こすことをコロラド大学のワイマンとコーネルおよびマサチューセッツ工科大学のケタールらのグループが独立に発見し2001年ノーベル賞を受賞しています。

⁵ 1926年にフェルミとディラックが理論を作りました。

⁶ フェルミエネルギーもフェルミ温度も与えられた金属の体積に対する全電子数つまり電子密度のみで決まる量です。フェルミ温度は金属自体の温度とは全く関係ありません。

⁷ ここで下のほうにあるボールにどうやって外から飛んできたボールが当たるのか心配になるかも知りませんが、ここで問題にしているのはボールに例えた粒子の状態、箱の中のボールの例えでは空間の占有になりますが、実際の金属中の電子ではエネルギー状態の占有のことを言っています。

を発見します。⁸ 超伝導と呼ばれるこの現象は多くの金属、合金で見られます。元素の中では30種類以上が超伝導になります。しかし超伝導現象が何故起こるかということは長い間謎でした。超伝導の発見から46年もたつてやっと理論的に解明されます。この間ノーベル賞級学者を始め数多くの研究者が理論を作り不成功に終わっています。例えば、量子力学という理論をつくり上げてノーベル賞をもらったハイゼンベルグ、量子電磁気学という理論を作つてノーベル賞をもらったファインマンなど数多くの世界の最高知性がいろいろ試みましたがうまくいきませんでした。1957年に作られたBCS理論と呼ばれる超伝導の理論は実験で得られた性質にヒントを得て3段階の理論的發展によって完成されます。BCSとはこの理論を作つた3人の研究者の頭文字をとつたものです。

(6) 同位体効果

同位体とは陽子の数が同じで中性子の数の異なつた原子(核)のことです。金属に同位体を混ぜると超伝導の性質が変わることが1950年に実験で分かりました。したがつて超伝導は電子の性質が関わつた現象でありながらそれに格子を構成するイオンも関与していることを示唆しています。一方、電子同士が相互作用しないで動き回ると考える理論は全て不成功に終わっていました。また1953年、超伝導体中の粒子のエネルギーにはとびがあることも分かりました。したがつて、超伝導には電子と電子の相互作用が大切な役割を果たしているようで、しかもその相互作用には格子のイオンも関与しているらしい。さらに超伝導状態の電子のエネルギーは常伝導のときのものとは違つているというのがおよそ1950年代の始め頃までに実験によって分かつていたことでした。

(7) BCS理論の立役者達

ここでジョン・バーディーン(1908-1991)が登場します。BCS理論のBです。バーディーンは電気工学でウィスコンシン大学から1928年に学士、1929年に修士の学位を取つたあと3年間ガルフ研究開発社で地球物理学への応用研究をします。しかし自分の興味は理論物理学にあることに気付く1933年プリンストン大学の大学院へ入学しウィグナー教授の指導のもと1936年数理物理学で博士号を取ります。そのあとミネソタ大学、海軍研究所を経て、戦後1945年-1951年の間ベル電話研究所で研究し1947年ショックレー、ブラッティンの3人でトランジスターを発明して電子工学に革命を起こします。これによつてこの3人は1956年にノーベル賞を受賞します。バーディーンは教育にも関心があつたので研究のみのベル電話研究所から1951年イリノイ大学に移り1975年まで教授でした。イリノイ大学のバーディーン先生はトランジスターというノーベル賞級の発明のあと次は超伝導の理論を作ることを考えます。バーディーン先生は物理学科の学科長だつたザイツ教授と相談して、プリンストン大学で博士号を取りペンシルヴァニア大学にいたパインズを1952年7月ポストドック⁹として雇います。さらに1955年春プリンストン大学高等研究所のヤン博士¹⁰に電話をかけて、

⁸ 彼は低温の研究により1933年にノーベル賞を受賞します。彼は低温を作り出す装置を開発してヘリウムの液化に成功し、そのあと液体ヘリウムを使って低温の実験を行い超伝導現象を発見します。新しい装置の開発はしばしば重要な発見へつながつります。

⁹ 大体2年くらいの任用期限付きの博士取得後研究員のことです。

¹⁰ C.N.ヤンはT.D.リーとともに1956年粒子が崩壊するときに働く弱い相互作用という力の元では右と左の対称性が破れることを理論的に予言し1957年ノーベル賞を受賞します。因みにT.D.リーは大学を卒業していないのにシカゴ大学大学院へ進学した秀才です。

場の理論¹¹ が使えてかつ超伝導研究に取り組む意欲のある優秀な若い研究者を紹介してほしいと頼みます。紹介されたのがレオン・クーパー(1930-)でBCSのCです。クーパーはコロンビア大学で1951年学士号、1953年修士号、1954年博士号を取り、1954年—1955年プリンストン大学の高等研究所のポストドックを勤めていました。バーディーン先生は1955年9月クーパーをイリノイ大学のポストドックとして雇います。BCSのSはロバート・シュリーファー(1931-)です。彼は1949年マサチューセッツ工科大学(MIT)に入学し、2年間電気工学を専攻したあと物理学に専攻を変え、スレーター教授の指導のもとで卒業研究を行い学士号を取ります。さらにMIT在学中に興味を持ちはじめた固体物理学の勉強をするため1953年イリノイ大学大学院へ入学し、バーディーン先生を指導教官として選びます。¹² そこでの1年目は半導体表面での電気伝導の研究を行い、2年目は実験室でこの理論をいくつかの表面で起こる現象に応用します。そして3年目にバーディーン先生とクーパーと一緒に超伝導の研究を始めます。これでBCS理論の役者は全てそろいました。

(8) 電子—格子相互作用

まずバーディーンとパインズは電子と格子の相互作用の研究をはじめます。電子と格子が相互作用すればこれは電子と電子の相互作用にも影響を与えます。例えば、ある電子が格子を横切ったとします。すると電子は負の電荷、格子のイオンは正の電荷を帯びているので電子の接近によって格子のイオンは電子の方向にひきつけられ格子がゆがみます。この時、格子の付近を動いている別の電子はこのゆがめられた格子から力を受けます。つまり格子を介して電子と電子は相互作用をします。¹³ もちろん電子は電荷をもっているので2個の電子間にはクーロンの法則によって反発力が働

¹¹ 電気、磁気が出てくる電場、磁場のなどの場の考え方を拡張して、基本粒子に働く強い力(原子核の力)、崩壊のとき働く弱い力など全ての力を場で記述しようとする理論。相互作用を記述する方法としては現在の主流。電気力線という概念を作ることによって最初に場の考え方を導入したのはファラデーで1821年のことです。

¹² バーディーン先生の回想によるとシュリーファーはやれば誰でもできるような研究テーマを選ばず、大きなことを一発当てようするタイプの学生だったそうです。これには超伝導の理論が最適でした。しかしシュリーファー自身の回想によると超伝導の理論の研究は難しすぎて、このままでは何時になったら博士号が取れるか見込みがつかないので密かに別の研究テーマで研究をしていた時期があったそうです。もちろんバーディーン先生によって元の超伝導のテーマへと引き戻されました。またバーディーン先生の頭の回転の速さにはついていけず、何を言っているか理解できないことがしばしばあったそうです。[1992年3月16日アメリカ物理学会ジョン・バーディーン教授追悼シンポジウムにおける講演] そもそもバーディーン先生はセミナーなどでもぼそぼそと低い声でしゃべられて聞き取りにくかったことは確かです。一方、イリノイ大学のフラウエンフェルガー教授によると、大学院生のシュリーファーは物理について何を質問されても良く答えられたといえます。「聞けば聞くほど彼の理解の深さが分かった。」とおっしゃっていました。そして「自分は何十年に一人出るかでないかのシュリーファーのような学生を教育するため教授をやっている。」と授業で言われていました。私は大学院生として1977—1980年イリノイ大学に在籍していました。

¹³ 電子と電子あるいは一般的に粒子と粒子がある力によって相互作用するときこれらの粒子が力を媒介する別の粒子をやり取りすると考えてこのとき働く力を書き表すことができます。力をこのように記述する方法は1935年湯川秀樹博士によって創始され、彼は原子核の力を媒介する中間子と呼ばれる粒子があるはずだと予言し、1947年に確かにそのような粒子(パイ中間子)が発見されて1949年にノーベル賞を受賞します。一方、電磁気の力を媒介するものは光子(光の波から構成した粒子)です。基本粒子の崩壊に関与する弱い力を媒介する粒子は Z^0 , W^+ , W^- の3種類あって1973年に実験的にその兆候が見出されて、粒子そのものが見つかったのは1983年です。発見の貢献者カルロ・ルビアとヴァン・デア・メーアは1984年にノーベル賞を受賞します。

きます。それにもかかわらず「フェルミ準位の近くにある金属中の電子同士にはクーロン反発力を打ち消して引力が働く」という驚くべき結果をバーディーンとパインズ¹⁴が見つけます。これが超伝導の理論への重要な第一歩となります。

(9) クーパー対

1956年に次にクーパーが重要な発見¹⁵をします。彼の取り組んだ問題は次のようなものです。まず縮退している電子の集団を考えます。その集団の中から2個の特別な電子に注目します。ある方向に動いているスピンの上向きの電子とその逆方向に動いているスピンの下向きの電子です。ただ真空中にこれらの2個の電子があるだけであれば何も面白いことは起こりません。しかし今の場合、これらの2個の電子は縮退した電子の集団の中にあります。さらにこれら2個の電子の間には引力が働くと仮定します。このような条件のもとで彼は次の事を見つけます。“縮退した電子の集団があって、各々反対方向に動き、スピンの逆向きの電子対に引力が働くとこの電子対はエネルギー的に不安定になる。”つまり、電子対はエネルギーの低い別の状態に変わるといなのです。しかもこの不安定性は電子間に働く力が引力であればその力がいかに弱くても必ず起こるといのです。このような2個の電子の束縛状態のことをクーパー対と呼びます。ただし、束縛状態といっても2個の電子が原子のようなものを形作るわけではありません。実際この束縛された電子対の大きさは金属中にある沢山の電子の平均距離に比べてずっと大きいのです。今の場合、特別な2個の電子にのみ注目しています。しかし、このような電子対の組み合わせは金属中の電子の中に数多く存在します。電子が縮退しているということから、一番下からあるエネルギー状態まで電子で詰まっています。つまり、ある限界の速度以下の任意の速度で動くスピン上向きの電子を取ればその反対方向に同じ速度の大きさで動くスピン下向きの電子は必ず存在します。したがって電子対の不安定性ということは2個の電子のみに当てはまるのではなく十分温度が低い金属中の電子全てに当てはまるのです。言い換えると、クーパーの発見は金属中の電子全体がより低いエネルギー状態に移ることを意味します。これがどのような状態かを解明したのがBCS理論です。

¹⁴ J. Bardeen and D. Pines, "Electron-Phonon Interaction in Metals," Phys. Rev. **99**, 1140-1150 (1955). 「金属中の電子-フォノン相互作用」 1955年4月4日に受理され同年8月15日号に掲載されています。フォノンとは結晶格子の振動から成り立つ粒子のこと。フォノンを媒介として電子間に力が働くと考えることができます。私がイリノイ大学で博士号を取ったあと研究員(ポストドック)になった時(1980-1982年)パインズ教授と共同研究をしました。私が大学院のときの指導教授が海外出張している間、よく彼の研究室を使わせてもらいました。その隣の部屋がパインズ教授の研究室、そのまた隣がバーディーン先生の研究室でした。バーディーン先生はもう退職されていましたが毎朝10時頃来られ、午後4時ごろまで静かに研究されていました。

¹⁵ L. N. Cooper, "Bound Electron Pairs in a Degenerate Fermi Gas," Phys. Rev. **104**, 1189-1190 (1956). 「縮退したフェルミ気体中の束縛された電子対」このフィジカルレビュー誌の論文は1956年9月21日に受理、11月15日号に掲載された、1.5ページの短いものです。

(10) BCS理論¹⁶

クーパーの解き明かした問題は2個の電子の問題です。しかしながら、超伝導体中の電子の数は 10^{23} 個ほどもあります。2個の問題から 10^{23} 個の問題へと拡張するのは至難の業です。これを中心になって成し遂げたのがシュリーファーです。シュリーファーの考えたことは金属中の電子の集団をいろいろな速度を持ったクーパー対の組み合わせからなると考え、それらの組み合わせの相互作用のみを考えそれ以外の相互作用を無視するという大胆なものです。¹⁷ この基本的な方針に従ってバーディーン、クーパー、シュリーファーの三人は共同で次々と超伝導の性質を理論的に解き明かしていきました。上向きの $1/2$ のスピンの持つ電子と下向きの $1/2$ のスピンの持つ電子が対になると $1/2+1/2=1$ あるいは $1/2-1/2=0$ で電子対としてのスピンは整数になりフェルミ粒子2個からボーズ(複合)粒子が作られたこととなります。ボーズ粒子は先に述べたように低温で超流動、つまり摩擦なしで流れるという現象を示します。この場合、電子の対は電荷を帯びているので電流が摩擦なしで流れる、あるいは抵抗なしで流れる、つまり超伝導現象を示すというわけです。そもそも摩擦というのは何か動くものがエネルギーを徐々に失うことによって起こります。したがって摩擦現象はどんなに小さい量でもエネルギーを失えるような物体でのみ起こりえます。もし物体のエネルギーにとびがあって、つまり閾値があって、その値以下のエネルギーは物体とやり取りできないような場合を考えます。そうすると摩擦の力ではその閾値のエネルギーを物体から取り去れないとき物体は摩擦を受けることなく運動します。これが超流動です。“電子というフェルミ粒子2個からクーパー対というボーズ粒子を作りこのボーズ粒子の集団がボーズ・アインシュタイン凝縮を起こす”というのが超伝導で起こっていることなのです。そのように作られたBCS理論は電子同士が弱く相互作用している金属¹⁸ に対して様々な実験結果と非常に良く一致することが確かめられました。そのうちいくつか列挙すると——計算された超伝導状態の粒子のエネルギーには確かに実験で示されているようなとびがあること。このエネルギーのとびの温度依存性、超伝導体の比熱の温度依存性、超伝導体に磁場をかけたとき磁場の進入する深さの温度依存性なども実験結果と一致すること。超伝導体が電磁波や超音波を吸収する度合いも実験と一致すること。超伝導対中の結晶格子にある原子核のスピンを揃えたときそれがどのように変化していくかという振る舞いや超伝導体の熱の伝え方が実験と良く合うこと。同位体効果も電子—格子相互作用を通じて取り入れられていて実験結果と良く合うこと。転移温度を電子—電子の相互作用の強さで表すことができることなど多くの事柄を明らかにし、それまでに得られていた様々な実験結果を見事に説明しました。

¹⁶ J. Bardeen, L. N. Cooper and J. R. Schrieffer, “Microscopic Theory of Superconductivity,” Phys. Rev. 106, 162-164 (1957). 「超伝導の微視的理論」というこの論文は2.2ページの“編集者への手紙”の形の速報で1957年2月18日に受理され同年4月1日号に掲載されています。J. Bardeen, L. N. Cooper and J. R. Schrieffer, “Theory of Superconductivity,” Phys. Rev. 108, 1175-1204 (1957). この「超伝導の理論」という論文はフィジカルレビュー誌30ページにわたる大作です。1957年7月8日に受理され同年12月1日号に掲載されています。この論文の内容のいくつかの部分はシュリーファーが1957年にイリノイ大学へ提出した学位論文に基づいています。

¹⁷ このようなものを理論モデルと呼びます。つまり、非常に複雑な現実世界の中で本質的なことだけに注目するというやり方です。

¹⁸ BCS超伝導体と呼ばれます。

1957年時点でバーディーン49歳、クーパー27歳、シュリーファー26歳という組み合わせです。一方、それまでの実験で知られていなかったこと——例えば電子がどのように障壁を越えるかをBCS理論は予言し、後の実験で確認されます。これはトンネル効果と呼ばれます。BCS理論によって基本的な超伝導の仕組みが解明され1972年この3人はノーベル賞を受賞します。¹⁹ バーディーン先生にとっては2回目のノーベル賞受賞です。1956年の一回目の受賞の翌年に既に2回目の受賞をもたらす研究を完成させていることになります。BCS理論は超伝導現象を理解するために基礎となる理論であり、その考え方は現在でも物理学の他の分野へも影響を与え続けています。²⁰ 例えば、先に触れたヘリウム3の超流動も³Heというフェルミ粒子2個がクーパー対を形成して²¹ ボーズ粒子となり、それらがボーズ・アインシュタイン凝縮を起こすと理解できます。

(11) 高温超伝導体

1986年に至るまで超伝導というと絶対零度近くでのみ起こる現象だと思われていました。30種類以上の超伝導になる元素の中で最も転移温度が高いのはニオブウムで9.3Kです。それまでに知ら

¹⁹ 翌年1973年度のノーベル物理学賞も超伝導のトンネル効果という現象の解明に対して江崎玲於奈（1925-）、イヴァー・ギーヴァー（1929-）、ブライアン・ジョセフソン（1940-）の3人に与えられます。特に、ギーヴァーはノルウェー工科大学の機械工学科卒でアメリカのGeneral Electric社に就職し、仕事のかたわら夜間学校で量子力学を勉強します。そこで、トンネル効果という現象について学びます。トンネル効果の説明には、下から上がって、峠を越えてまた下のような坂道を考えます。下から坂道でボールをころがすと、ボールの速度が遅いと峠を越えられず戻ってきます。同じ速度で転がした場合、何回転がしても峠を越えることはありません。これが、日常生活の世界、つまり古典力学と呼ばれる世界でおこることです。しかし、量子力学の世界では、峠に達しないような速度でも何回も何回も転がしているについにボールが峠の向こう側に出てくる、つまり峠を越えてしまうという不思議な現象が起こり、これをトンネル効果と呼びます。これをはじめて習ったとき、ギーヴァーはそんな馬鹿なことがあるはずがない、そんなことは絶対に起こらないということを自分で実験して確かめてやろうと思い、反証実験を考案します。しかし実際にやってみると、確かにトンネル効果は起こり、それがBCS理論でうまく説明できる、つまりBCS理論が正しいということを見事に証明する実験結果を得てしまいます。このことで彼はノーベル賞を受賞します。授業の内容を鵜呑みにしないで、自分の頭で考え、疑ってみることの大切さを示す例です。また、ジョセフソンは20歳でケンブリッジ大学卒、24歳でケンブリッジ大学から博士号取得という秀才で、大学院生だった22歳のとき理論的に予言した、ジョセフソン効果という超伝導のトンネル現象で受賞します。バーディーンは最初この理論を理解できず受け入れませんでした。

²⁰ 例えば超伝導体の示す振舞は「対称性の自発的破れ」という新しい考え方を作り出し、電磁気の力と原子核の崩壊などで働く弱い力とを統一的に理解するのに重要な役割を果たしました。1960年代のことです。また、原子核の内部にあるクォークという粒子同士に働く強い力の振舞を1973年に解き明かした功績によりデイヴィッド・グロス（1941-）、デイヴィッド・ポリツァー（1949-）、フランク・ウィルチェック（1951-）の3人が2004年度ノーベル物理学賞を受賞しました。その受賞理由でもこの「対称性の自発的破れ」という概念の重要性が強調されています。この1973年時点でウィルチェックは22歳のプリンストン大学の大学院生、グロスは32歳で彼の指導教員、ポリツァーは24歳のハーヴァード大学の大学院生でした。ちなみにグロスは25歳でカリフォルニア大学バークレー校から博士号取得、31歳でプリンストン大学正教授；ポリツァーは20歳でミシガン大学卒、25歳でハーヴァード大学から博士号取得、30歳でカリフォルニア工科大学正教授；ウィルチェックは19歳でシカゴ大学卒、23歳でプリンストン大学から博士号取得、29歳でプリンストン大学正教授といった具合で3人とも秀才です。

²¹ ただしこの場合引力の源は格子振動ではなくヘリウム3原子同士の原子間力です。

れていた合金の中で最も高い温度で超伝導になるのは1972年にウェスチングハウス社の研究者によって発見されたニオブウムとゲルマニウムの合金²² (Nb_3Ge) で23.2Kでした。この状態がずっと続いていれば今日の体験授業は多分なかったでしょう。今日の体験授業ができるのはベドノルツとミュラーというスイスにあるIBMチューリッヒ研究所の2人の研究者のおかげです。彼らは1986年35Kの転移温度を持つバリウム、ランタン、銅の酸化化合物を合成して²³、高温超伝導体研究のブーム²⁴ を作り翌年1987年ノーベル賞を受賞します。1987年初めには別の複数のグループによって転移温度92Kの高温超伝導体が報告されます。²⁵ 液体窒素の沸点77K以上の転移温度を持つ高温超伝導体の出現によって、高価な液体ヘリウムを使うことなく超伝導の実験ができるようになりました。しかしながらこの種の超伝導体は陶器と同じ材質であり作り方によって性質のばらつきが大きいこと、大電流を流す実用には適しないことなどの理由で急速に熱が冷め、地道に研究されているのが

²² 超伝導磁石にはニオブウム-チタン合金(Nb-Ti : 転移温度9 K)、ニオブウム-錫合金 (Nb_3Sn : 転移温度18 K) などが使われます。

²³ J. G. Bednorz and K. A. Müller, "Possible High T_c Superconductivity in Ba-La-Cu-O System," *Z. Phys.* **B64**, 189-193 (1986). 彼らの発見した物質はランタン-バリウム-銅の酸化化合物 ($\text{La}_{1.85}\text{Ba}_{0.15}\text{CuO}_4$) です。このツァイトシュリフト・フュア・フィジークというドイツの学術雑誌は今では有名ではなくほとんど読まれません。「バリウム-ランタン-銅-酸素系における高温超伝導の可能性」というタイトルで1986年4月17日に受理され同年9月号に掲載された彼らの論文が注目を浴びるのは11月にマサチューセッツ工科大学で開かれた学会でのことです。ノーベル賞級の発見をしながら何故彼らはあまり読まれない雑誌に結果を投稿したのでしょうか？これは時間稼ぎのためです。「超伝導の可能性」とタイトルにあるように彼らは彼ら自身の得た結果に確信が持てなかったようです。そこで彼らは結果の追試を行って確証を得るために時間を必要としたものと思われます。結果を出版しないままで追試をやっていると他のグループに先を越されるかも知れません。一方、もし有名な雑誌に投稿すれば出版までに前評判が立ってもしかすると他のグループに出し抜かれるかも知れません。これらの理由のため、この雑誌を選んだものと思われます。もし出版した結果が正しければいかに無名の雑誌といえども優先権は確保できます。もし出版した結果が間違っていたとしても、ほとんど誰にも知られることなく実験を改良してよりよい結果を出し、訂正できます

²⁴ 1987年3月18日にニューヨークで開かれたアメリカ物理学会の超伝導のセッションでは19:30に始まった研究発表が翌日の未明(3:15)まで続きました。また、あるカリフォルニアのグループが高温超伝導体に関して重要な結果を得たとき、このグループの一人は東海岸にある学術雑誌の編集部には電話をかけ、同じような結果がまだ他の研究者によって投稿されていないことを確かめた後、自ら飛行機に乗ってこの編集部を訪れ原稿を投稿しました。郵便は遅れたり不着になるかも知れず、そうなると他の研究者に先を越されるかも知れないというわけです。1987年ごろの高温超伝導の研究はこのように熱気を帯びていました。

²⁵ イットリウム-バリウム-銅の酸化化合物 ($\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$)。学術雑誌に投稿されたこの2編の論文の原稿にはミスプリントがありました。化合物の構成元素の一つイットリウム(元素記号Y)がイッテルビウム(元素記号Yb)になっていたのです。(著者達は否定していますが)これは査読の段階で内容が漏れることを避けるねらいがあったのではないかとされています。(出版直前にミスプリントは訂正できます。)タイトル本文ともytterbiumという正式の元素名は全く使われず、(訂正しやすいように?)Ybという元素記号のみが使われていました。両論文ともミスプリントを含んだ原稿が2月6日に受理され、引き続いて修正原稿が2月18日に受理されて、3月2日号に掲載されました。一般に、学術雑誌に投稿された論文原稿は専門家のところへ送られ、査読を受けます。査読では原稿の内容は今まで発表されたことのない新しいものかどうか、中身は正しいか、掲載する価値があるかどうかなどが総合的に判断されます。したがって、査読者は他の研究者が得た今までに知られていない結果を知る立場にあるので、それをもらしたり、自分で使ったりすることは堅く禁じられています。それにもかかわらず、うわさの形で秘密が漏れたりすることが全くないわけではありません。

P. H. Hor et al., "Superconductivity at 93 K in a New Mixed-Phase Y-Ba-Cu-O Compound System at Ambient Pressure," *Phys. Rev. Lett.* **58**, 908 (1987).

P. H. Hor et al., "High Pressure Study of the New Y-Ba-Cu-O Superconducting Compound System," *Phys. Rev. Lett.* **58**, 911 (1987).

現状です。最初に発見されてから20年余り経ちましたが、高温超伝導現象を満足以説明できる理論はまだありません。もちろんそのような理論を作ればノーベル賞がもらえます。

(12) 最後に

1800年頃から1990年頃まで超伝導のBCS理論に関係のある事柄に限って駆け足で見してきました。いろいろ難しい言葉が出てきたのでどのくらい理解できたでしょうか？関係したノーベル賞受賞者は数十人になります。このように自然科学は既に分かっていることを元にして新しい現象を見つけたり、今まで説明の付かなかった現象を理解していくことから成り立つ積み重ねの学問です。その一端の雰囲気を感じられたでしょうか？また、基本的なことをじっくりと理解することの大切さもお分かりいただけでしょうか？日本は工業製品では世界一、二を争う先進国ですが、自然科学分野（物理学賞、化学賞、医学生理学賞）での日本人のノーベル賞受賞者数は1901年—1945年に0人、1946年—2006年に9人でありデンマーク、オーストリアと並んで世界第9位です。一方、アメリカのノーベル賞受賞者数は1901年—1945年に18人、1946年—2006年に209人の合計227人で世界第1位です。したがって自然科学の研究では日本はまだ大国、先進国とは言えません。この原因は日本人の一般的なものの考え方にあるのでしょうか？それとも、日本人の行動様式や社会、組織の仕組みにあるのでしょうか？なぜなのか皆さん各人で良く考えてみてください。それではこれからも日常の勉強を頑張ってください。

あとがき

本稿は香川大学工学部材料創造工学科において夏休み中に行われている大学体験授業「超伝導」の実験の解説として高校生向けに書かれた。また総合学習の時間を利用して香川大学工学部へ見学に来る高校生向けの模擬授業、および材料創造工学科3年後期、材料創造工学実験Ⅲの「超伝導」の補助教材としても使われている。

理科系の学問は大なり小なり体系的に成り立っている。これははじめから体系的に発展してきたということではなく、紆余曲折のある個々の歴史的発展を、あとから再構築し体系化した結果であるということである。それゆえ、理科系のどの分野をとっても、教科書類の内容は基本原理から始まる体系的な順序によって提示されることが多い。これは歴史的順序にしたがった提示に比べて、理路整然とした説明ができ、そのことによって多分に理解しやすいだろうと思われることによる。

しかしながら、教育現場において、このような傾向が必ずしも教育的であるとは限らない。まず、理科系の学問の「教科書的」事項は、すでに出来上がったものとして提示されるので、生徒、学生にとってなぜそのような事項（現象、理論、概念）が出てこなければならなかったかという背景が分かりにくい。したがって中身が無味乾燥になる。次に、学問というものは順序だてて無駄なく発展するものだという間違った印象を与えかねない。実際には、あとから振り返って体系の中で順序が逆の場合、本当の意味が相当の時間がたってはじめて理解される場合、ある概念が全く異なった分野へ応用される場合など様々である。また、学問の発展では、一定の速さでいろいろのものが分かってくるこ

ともあれば、長い間、何事も起こらなかったのが突然目覚しい発展を見る場合もある。そのような発展の速度が分からない。さらに、体系に重みを置いた提示では、得てして発展が非人称化される。つまり、実際には生身の人間が関与しているにもかかわらず、誰が見つけたか、どのように見つけたかということはあまり問題にされない。

このような理由から、教育現場において、生徒、学生に教材への興味を持たせるためには、いわゆる「教科書的知識」に盛り込まれていない、失われた情報を補足する必要がある。本稿では歴史を織り込み、しかもそれぞれの発展の立役者達を前面にだして提示した。幸い、登場人物の何人かは、筆者が以前在籍あるいは在職した大学、研究所において「同時代人」として身近な存在であった。特に、イリノイ大学においては様々な「伝説」、「言い伝え」が残っていた。ちなみに2007年はBCS理論からちょうど50年になる。

登場人物の幾人かについてはごく簡単な学歴を記した。ノーベル賞級の理論物理学者については20歳前後で大学卒、20歳代半ばで博士号取得、30歳前後で一流大学の正教授というパターンが多く見られる。つまり、ノーベル賞級の優秀な人材が30歳前後から30年、40年あるいはそれ以上、正教授として教育、研究に携わるわけである。残念ながら日本の学制では高校までは早期卒業制度はない。また18歳未満での日本の大学への入学は実質的に不可能である。近年になって一応、日本の大学では早期卒業制度が導入されてはいるが、どの程度機能しているのであろうか？大学あるいは大学院のみ早く卒業しても、その後にそれ相応の進路、就職が制度的に保障されていなければ意味がない。教育制度の一つの問題として日本の大学における早期卒業制度について十分考えるべき素材を提供していると思われる。

カリフォルニア工科大学教授のデイヴィッド・ポリツァー（脚注20参照）が2004年度ノーベル物理学賞を受賞したというニュースが入ったとき、カリフォルニア工科大学学長デイヴィッド・ボルティモアは「わが大学のノーベル賞受賞者リストにまた一人加わって嬉しい。」と言った。この学長自身もノーベル賞受賞者である。また、同じ2004年度のノーベル物理学賞を受賞したデイヴィッド・グロス（脚注20参照）は当時カリフォルニア大学サンタバーバラ校カヴリ理論物理学研究所の所長であった。彼は1996年に所長に就任し「所長の職はすばらしい機会であった。仕事のほとんどは科学のリーダーシップを取ることであって管理ではなかったからである。また精力的に研究を続けることができた。所長になったことに後悔をしたことはなかった。研究所の運営をすることと、この研究所のプログラムで行われるすばらしい科学に参加することを楽しんだ。」と言っている。この研究所（1979年発足当時の名称は理論物理学研究所²⁶）の初代所長ウォルター・コーン（1923-；所長在任1979-1984年）も1998年度ノーベル化学賞を受賞している。このようにアメリカの教育研究機関ではノーベル賞級の学者が大学あるいは研究所の長として管理運営を行うということが少なくない。長が優れた研究というものがどのようなものかが分かっているわけで、さらに研究を奨励し、研究のやりやすい環境づくりに腕を振るう。現在の日本の大学組織の様々な長の資質、選出方法に関してなかなか考えさせられる。これらのことは教育研究機関としての大学の管理運営組織の将来を考える上で参考になると思われる。

²⁶ 筆者は1982-1983年の2年間博士取得後研究員（ポストドック）としてこの研究所に在職した。