

超伝導と強磁場物性

門脇 和男

1994年12月26日、2000年7月16日加筆

1 概観

超伝導研究には強磁場が必要不可欠である。それは、超伝導現象そのものがその基本において磁場と極めて密接に関連しているからであるが、そのような物理的詳細は抜きにして、より実用的な見地から見てもこれは明らかであろう。応用を目的とした超伝導の実用研究では高い臨界温度、 T_c 、高い臨界電流密度、 J_c 、高い臨界磁場（この場合、上部臨界磁場を指す¹）、 H_{c2} 、がもっとも重要な物理パラメーターであり、それらのパラメーターを如何に改善するかが研究の中心課題であるが、臨界磁場は臨界電流密度と相まって、3つの重要パラメーターのうちの2つと直接関連しているからである。臨界温度は他の2つの重要パラメーターとは違った要因で決まるが、臨界温度が高いことは冷却の問題を軽減することから別の意味で重要である。これら3つの物理パラメーターが潜在的に極めて高い高温超伝導体が応用上重要な意味を持つのはこのためである。

超伝導体の物性研究は、超伝導機構を解明する純粋物理学的研究以外は、多かれ少なかれ、扱っている対象の応用を念頭に置いた、いわゆる応用的物性研究が主流となる。即ち、上記したパラメーターを調べ、それらの決定要因を明らかにし、さらに高い臨界電流密度、高い上部臨界磁場を如何にして達成するかという研究である。もちろん、これに付随して、たとえば、線材開発では機械的加工性、力学的強度などの超伝導以外の様々な物理量も重要なパラメーターになる。このような研究においては、これまで、従来の金属系超伝導体でもそうであった

¹以下の文中で詳しく説明する。

ように、基本的な研究の基盤は、超伝導がなぜ起こるかという問いを忘れ、現象論として超伝導を取り扱うことで十分である。このような現象論は既に1940年代後半から1950年代初頭における、ピppard (Pippard)、ロンドン (London) の考え方や、新しい考え方として登場したギンズブルグ-ランダウ (Ginzburg-Landau) 理論²であり、これは超伝導におけるBCS (Bardeen-Cooper-Schrieffer) 理論以前³に確立されていたものである。ギンズブルグ-ランダウ理論が、BCS理論において温度が臨界温度に近く、且つ、磁場進入長、 λ 、が超伝導のコヒーレンス長、 ξ 、より十分長い場合のよい近似になっていることがゴルコフ (Gor'kov) によって示されたのはBCS理論が発表されてわずか2年後のことである⁴。BCS理論の成功を景気として、その後、1960年代の高磁場超伝導体の開発、そのための高温超伝導体の開発、その結果としての合金系におけるNb-Ti系、Nb-Zr系の材料や、金属間化合物ではNb₃Sn、V₃Ga、Nb₃Alなどの実用線材の開発に至るという超伝導材料開発の輝かしい歴史的背景の中で、ギンズブルグ-ランダウ理論は現象をより直感的に記述することから、超伝導の基本式として極めて重要な役割を果たしてきた。銅酸化物高温超伝導体が1986年に発見され、超伝導転移温度が飛躍的に上昇し、それに伴い、上部臨界磁場も飛躍的に高くなったが、ギンズブルグ-ランダウ理論の普遍的な重要性は依然として変わりがない。

²V. L. Ginzburg and L. D. Landau, Zh. exper. teor. Fiz. **20** (1959) 1064.

³1957年に提唱された。J. Bardeen, L. N. Cooper and J. R. Schrieffer, Phys. Rev. **106** (1957) 162, *ibid.* **108** (1957) 1175.

⁴L. P. Gor'kov, Soviet Phys. JETP **9** (1959) 1364.

このように、超伝導体の研究は多くの場合、物理特性の把握、その改善に研究主体があることはある程度避けられない。現象を把握し、理解し、それをもとに特性改善を図ることは、極めて幅広い研究分野にわたっており、固体物性物理学の範疇を越えている。このことは、従来材における超伝導線材の研究を振り返れば一目瞭然である。即ち、特性改善のための金属学、冶金学、構造材料力学等、様々な研究分野にわたり、しかも、これらは極めて特殊な金相学的、工学的要素を含んでいる。このような分野を記述する事は、物性としての超伝導の範疇から逸脱するため他の解説書に譲ることとする。

第2節においては、まず、超伝導の発見を振り返り、自然科学の発展過程で超伝導の位置付けを試みる。超伝導の研究、その発展過程を振り返ることにより、成熟した科学研究のあり方を考察してみたい。時は遙か19世紀末期から20世紀初頭にまでさかのぼり、今日の科学情勢から無縁の時代にあるかに思えるが、当時の歴史的状況を正確に把握することは今日のわが国の自然科学の方向性を考える上で極めて貴重であるとの認識からあえてここで述べたい。超伝導発見から戦後低温技術が初めて輸入されるまで、わが国には超伝導物性研究は存在しなかった⁵。この歴史的事実の重要性はこれまで重要視されたことはなかったし、また、筆者はこのことに驚きを禁じ得ない。このあまりにも長い時間的空白は、今日のわが国の超伝導をはじめとする低温研究全般に大きな影響を与えたことは間違いない。このようなことがなぜ起こったのかを考えてみる必要があると思われるのでこのことを中心に書き進めることにする。第3節においては、強磁場と超伝導との関連を述べ、第4節では強磁場下で期待される新しい現象について述べる。

⁵より正しくは、理論的研究はなされていたので実験的研究とすべきである。我が国に初めてヘリウム液化機が東北大学金属材料研究所に導入されたのが1952年。当時の文部省予算としては破格の莫大な資金額で、アメリカから導入。ヘリウムがKamerlingh Onnesによって初めて液化されてから44年後のことである。

2 歴史的背景

2.1 20世紀初頭におけるヨーロッパの低温科学

超伝導の研究において、その物性研究の側面から発展の様子を、多少、歴史的に振り返ってみよう。超伝導研究の飛躍的展開は、20世紀の初等、物理学が古典物理学から量子力学に根ざした量子論への転換期の、いわば激動期に時を同じくしている。当時、物質観が古典的物質観から近代的物質観への転換期にあり、物質の最小構成単位としての原子像が確立しつつあった時代である。原子構造模型が提案され、原子の構成単位としての電子、原子核などの存在が確立されてきてきた。また、気体分子は、原子の特殊な集合単位として、また液体や固体は原子の凝集状態としての概念が確立されてきていた。金属においては、特徴的な電気伝導を説明するための自由電子論（ドルーデの自由電子論）が提唱されており、これに基づいて様々な現象が予言されていた。電気抵抗の温度依存性もその一例であった。このような概念を、実験的に検証するためには、極低温作製技術が必要不可欠であった。

このような極低温作製技術は、産業革命を皮切りに、工業的に有用な様々な気体の液化という社会的要請が強くあったことも忘れてはならない。気体の状態方程式を確立することは、工業上極めて重要であったからである。空気を断熱膨張させ、冷却し、液化する事で窒素、酸素、アルゴン、水素などに分離することに成功していた。この分野での最先端の研究は、オランダ王国、アムステルダム大学教授のファン・デア・ワールス（van der Waals）と、ライデン大学教授のカマリン・オンネス（Kamerlingh Onnes）であり、彼らの最も偉大な業績の一つはヘリウムガスの液化の成功にある。ヘリウムガスは、当時、最後に残された気体であって、理想気体（ideal gas）の状態方程式に極めてよく従うことから、強い関心を持って研究されていたのである。1908年のことである。（これより10年も前の1998年に、水素ガスが英国のデュワーによって既に液化されて

いた。当時、残された気体は、唯一、ヘリウムしか
なかった。)このヘリウムガスの液化は、カマリン・
オンネスが強力な液化能力を持つヘリウム液化機
の開発に成功した事による。ファン・デア・ワールス
は1910年に、「気体及び液体の状態方程式の研究⁶」
で、一方、カマリン・オンネスは、1913年に「液
体ヘリウムの生成と低温物理の研究」でそれぞれ独
立にノーベル賞を受賞した。

このような状況にあって、当時、ライデン大学は
低温、特にヘリウム温度領域の極低温物理学にお
ける世界で唯一の研究所であった。その後長い間
のわたり、ライデン大学の極低温を用いた物性研
究は、今日の低温物性に計り知れない影響を与え
たのみならず、その基礎を築いたといっても過言
ではない。

一方、わが国においては、このような西欧にお
ける低温物理学の展開に対して、その重要性を認
識していなかった。わが国にヘリウム液化機が導
入されたのが1950年代の前半である。重要な事
は、ライデン大学でヘリウムガスが液化された後
、約40数年間にもわたり、わが国においては極
低温物性物理学の実験は存在しなかったことであ
る。西洋文明の導入に力を入れてきた当時のわが
国の国情から判断すると、不可思議であると言わ
ざるを得ない。理論的な取り組みが重要視され、
実験的手法を軽視した当時の学術政策の偏重、か
つ後進性が手に取る様に見えてくると同時に、そ
の根底において現在においても当時と大きな隔
たりのないことを強く感じるのは筆者だけであ
らうか。極低温物理学は、既に出発時点で40
数年にわたる後進性を持っていた。そして、当
時のわが国の極低温物理学の後進性は実体とし
て未だにその尾を引いていると言わざるを得
ない⁷。超伝導の研究もその例外ではない。

⁶これは、ファン・デア・ワールスが1873年にライ
デン大学に提出した博士論文(dissertation)に
基づく。

⁷超伝導分野では我が国の高温超伝導の研究が最
も盛んであることから、すでにこのような後進
性は改善され、むしろ先導的であると言言動
が政府関係機関や大学関係者からも頻りに
聞かれる。これは、実は我が国では科学研究
の何たるかを自ら正しく評価できないこと
に由来しており、結局、関係する研究者が
作り上げた虚像に過ぎないのであって、欧
米から見た真の我が国に対する評価とは余
りにも対照的であるのはこの時代に滑稽
とも思えるほどである。

2.2 超伝導の発見

話をヨーロッパ事情に戻そう。ここでまず特筆す
べき事は、当時、低温実験家であったカマリン・
オンネス教授は、絶大な影響力を持っていたライ
デン大学教授の理論家ローレンツ⁸とともに、ド
ルーデ(Drude)によって提唱されていた金属電
子論(ドルーデの理論)が予言する電気抵抗の温
度依存性についての検証を液体ヘリウム温度領
域で行っていた。それまで、多くの純粋な金属は
低温になるにつれ抵抗が小さくなり、低温の極
限ではほぼ一定になる(残留抵抗)現象が観測
され、これは、金属中に含まれる不純物のため
と考えれば、ドルーデの電子論で説明ができた。
従って、低温での電気抵抗は、金属の純度を上
げれば上げるほど小さくなると考えられていた。
しかしながら、当時の金属純化技術はそれほど
高くなかったから、この仮説を立証することは
極めて困難であった。

このような理由で、当時、最も純化が容易な物
質であった水銀が候補として選ばれたのである。
水銀は、沸点が低く、蒸留する事で容易に純度
を上げられたのである。水銀の純化は比較的容
易ではあったが、純化を進めても常温での抵
抗は他の金属と比較し高かった(ちなみに20
°Cで9.58 $\mu\Omega\text{cm}$ 、銅は1.72 $\mu\Omega\text{cm}$ である)
ため、実のところ低温での電気抵抗もあまり
期待されていなかった。実際測定すると、低温
になると電気抵抗が小さくなるが、ある一定
の値にとどまる傾向が見られ、他の金属とほ
ぼ同様の残留抵抗を示す振舞いを示すのみで
あるかに見えた。液体ヘリウムの常圧(1気
圧)での沸点は4.2Kであるが、丁度その沸
点を過ぎたとき、突然抵抗がゼロになった。カ
マリン・オンネスは、この最初の実験事実を信
用せず、測定上の問題、たとえば、電極に問
題があるのではないかと疑い、実験の再検討
が繰り返行なわれた。水銀は常温では液体
であるため、電極の取り方に工夫が必要であ
ったからである。何度か実験を繰り返し、つ
いにカマリン・オンネスは、水銀の電気抵抗
が4.2 Kで突

⁸1902年、ゼーマンとともにゼーマン効果に
関する研究でノーベル賞受賞

然、測定不可能なレベルまで小さくなることを確信した。これが超伝導の発見である。1911年のことである⁹。

その後、ライデン大学においては、カマリン・オンネスを中心として低温物理、特に液体ヘリウム、超伝導、磁性等の研究で世界的な主導的地位を保つことになる。わが国においても、戦後、多くの研究者がライデン大学を訪れ、極低温技術、そのうゑに構築されていた低温物理学を学び、国内に持ち帰ったのである。魔法瓶の構造、作製法、クライオスタットの構築法、低温実験室の作り方、ヘリウムガスの回収方法、等々、ありとあらゆる点に関してそのままライデン方式が輸入されたのである¹⁰。40余年の後進性をカバーするためには仕方のないことであったかもしれない。しかしながら、この後進性は、それ以降、わが国の低温物理学の根底に根付いたままであり、未だ持って本質的には打開されていないという点を再認識すべきであろう。わが国の低温技術は、ハイテク技術がもてはやされている現在

⁹H. Kamerlingh Onnes, *Commun. Phys. Lab., Univ. of Leiden*, No. 124c 20-25. 論文の題名は、"Further Experiments with Liquid Helium. G. On the Electrical Resistance of Pure Metals, etc., VI. On the Sudden Change in the Rate at which the Resistance of Mercury Disappears." 水銀が超伝導を示すことの確証に至った論文。測定精度の問題としながらも同年の4月頃から同様の結果は得られていた (H. Kamerlingh Onnes, *Commun. Phys. Lab., Univ. of Leiden*, No.120b (1911) 16-19.)。実際に水銀の電気抵抗測定の実験に携わったのは、技術助手としてのコルネリス・ドルスマン (Cornelis Dorsmann) とスイスのETHに博士論文を提出する目的で一時的にカマリン・オンネスのもとで実験を始めたギレス・フォン・ホルスト (Gilles von Holst) であった。ホルストがホイット・ストーンブリッジを用いて実際に水銀の抵抗測定を行い、超伝導を見いだした最初の人物であったが、カマリン・オンネスは一時的な若年の共同研究者は慣習として共著者とはしなかった (ノーベル賞もカマリン・オンネス単独である)。ホルストはカマリン・オンネスとの仕事をもとに1914年にETHで博士号を取得したあと、ライデン大学に戻りカマリン・オンネスの助手となった。このポストはアインシュタインがカマリン・オンネスのもとに滞在を望んだが受け入れられなかったポストであったと言われている。ホルストは後にフィリップス研究所の初代所長となった。

¹⁰筆者がライデン大学 (正確にはアムステルダム大学との兼任) で仕事を始めた頃、なにからなにまで日本で経験した低温技術と同じであることに親しみを覚えたが、反面、あまりにもそっくりなので驚いた。それはライデン大学へ移る前に北米での低温実験の研究を経験していたから、特に強い印象として映ったのかもしれない。北米では低温技術がMITやオックスフォード大学 (Oxford University) のクラレンドン研究所 (Clarendon Laboratory) から得られた技術を基に独自の発展を遂げたので、ライデンの方式とは様々な点で異なっている。

に至っても依然として先天的後進性を引きずっているといわざるを得ない。これは、低温機器一つとってみてもわが国で開発されたものがほとんどないことから明らかである。クライオスタット、超伝導マグネット、大型デュワー等低温実験で使う基本的な実験装置を見れば一目瞭然である。すべてが外国製品の輸入品である。このような後進性が、戦後30年以上たった現在でもなぜ打開できないのかを、極めて深刻に考える必要があるにも関わらず、低温実験に携わっている関係者の中ですらもこの点に関する重要性の認識が希薄であるといわざるを得ない。これは、低温物理のみが例外ではなく、わが国の科学技術の基本を考え直す上で極めて重要であると考えられる。

2.3 社会的背景と研究体制

既に100年近い歴史を持つ極低温研究のメッカ、ライデン大学の状況をもう少し述べよう。ライデン大学においては、カマリン・オンネスのヘリウムガス液化以来、液体ヘリウム、超伝導、磁性などあらゆる極低温物性分野で幅広く研究がなされてきた。超伝導に関しても、1911年の発見以来、極めて多くの実験がなされ、ほとんどすべての基礎的に重要な実験結果はライデン大学から出尽くしていた。これが、その後40年以上も後の1957年に提唱されたBCS理論を構築する上で重要な基礎データとなったのである。この様な長期にわたるたゆまぬ学問的探求はこの国の伝統であるといえるかもしれない。また、この伝統が、80余年経過した今日においても延々と継続している事は、昨今の科学行政が極めて短期間にわたる成果を強いている事とあまりにも際だった対比をなしているといわざるを得ない。ライデン大学におけるこのような状況は、オランダのある一地方都市の特質と言うよりはむしろ、ヨーロッパ諸国に共通に見られる現象とみるのがむしろ正しいであろう。このような科学に対する継続性は、ヨーロッパ社会の科学に対する国民レベルでの深い理解に根ざしていることによると考えられる。ライ

デン大学、カマリン・オンネス研究所は決して大きな組織ではない。むしろ、規模的にはどこにでも見られるような小さい組織体制である。このような中で、長期にわたる極低温の研究が継続的になされてきた点を正しく理解することは極めて重要であると考えられる。

この点をもう少し論じてみよう。オランダでの経験からまず第一に上げられることは、科学全般に関する理解が国民の隅々にまで浸透しており、国民と科学者の間に極めて強い信頼感があることである。また、国民のみではなく、研究体制の中でもそうであって、ちなみに例を挙げれば、カマリン・オンネスのような偉大な大学教授は当時、100名を越すスタッフを抱えていたと言われ、内部における共同研究者間の信頼関係が極めて厚かったことが容易に推測される。また、逆にそのような有能な人材が存在し、その人材が研究に際しての能力を十分発揮できる様な環境が自ら形成できることにある。これは、一見極めて封建的、独裁的に見えるが、その有能な人材を100%信頼しきっていることの裏返しに過ぎないともいえるだろう。この点は、わが国の大学行政、国立研究所における研究体制とは基本的姿勢からして比較の対象外であることは明白である。研究施設にその研究所で重要な貢献をした人の人名を付ける慣習が欧米ではあるが、このことからその理由もきわめて明確であるし、逆に、我が国ではそれが無いことも実に対照的であり、象徴的であるといえよう¹¹。

最も重要な点は、以下のようなことでは無かろうか。日本的組織重視の研究体制はその研究内容の遂行において効率的であることは否めない。研究目標を設定し、それを重点的に実行する。きわめて画一

¹¹ 国立機関や大学においては人名を冠することはそもそも許されていないのである。我が国で初のノーベル賞を受賞（1949年）された湯川秀樹博士にちなんで京都大学に基礎物理学研究所が作られたが、湯川研究所ではない。二人目のノーベル賞受賞者である朝永振一郎博士の場合は、研究所はおろか彼の業績にちなむものはなにも残されていない。筑波大学に朝永記念館と称して彼の遺品がわずかに展示されているのみである。それ以降、ノーベル賞受賞された方々についても同じである。学術的な偉業を成し遂げた偉人に対して国民的理解が余りにも少なすぎるのではないだろうか。なんとお粗末なことではないか。残念でならない

化された研究である。逆に言えばこのような路線に沿わない研究はやりにくい。これは、研究テーマのみならず、研究者の行動様式、基本的な研究姿勢にも強く影響する。いわゆる、マスプロ的、量産的研究が重視される研究であり、その様な環境下では、じっくり時間をかけ、既存の物理概念の変革に迫るような革新的研究（これがノーベル賞の対象となるような研究である）は難しい。一方、頂点的階級構造にみえる研究体制では、数少ない有能な研究者のアイデアのみが重要視される傾向にある。これは、一見すると極めて不合理に見えるが、この階級構造がある程度自然発生的におこる階級構造であるから、予想以上に不合理性は無い¹²。独創的なアイデアは必ずしも万人に平等ではないからである。むしろ、そのような能力に関しては、極めて偏っていることが普通である。ずば抜けた優秀な人材の能力を100%引き出そうとするシステムである。このような考え方が自然科学の研究には向いているのである。ノーベル賞の対象となるような独創的、且つ革新的なアイデアへの到達は、天才的な研究者の生涯においても2度あることはまれであろう。

上述したように、研究体制として極めて対比的な2つのシステムを上げた。わが国の場合、戦後、アメリカ合衆国の影響を強く受けたため、大学、国の研究機関の組織体制はアメリカ合衆国のそれに近く、大体において前者に属する。しかしながら、内実においてはアメリカ型でもヨーロッパ型からも大きく異なっていて、純日本的なのである。これをもって我が国の独自の研究体制が確立されたなどとする一部の研究者や政治家がいるが、これは以下に示すとおり、残念ながら両者と比較できるレベルではないのである。少なくとも自然科学の基礎研究には全く不適當であると言わざるを得ない。

もちろん、両システムには欠点、長所それぞれあることも明白である。超伝導研究を例としよう。多くの場合、応用的な研究はある種の特性を改善する事が主眼となる。従って、この場合、独創性とは、その改善をいかにして行うかに限定される。これ

¹² これはその頂点に立つ人の人間性（強いて言えば、科学倫理観と高潔な人格）に強く依存することも明らかである。

は、ある種のガイディング・プリンシプルがある場合もあろうし無い場合もあろう。いずれにしる、多くの場合トライ・アンド・エラーを繰り返し、最適条件等を探す、ある程度ルーチン化された研究である。この場合は、前者の様な規格化された組織を十分に活用する事によって極めて能率良く研究が遂行できるものと期待される。日本の場合の研究の多くはこのようなカテゴリーにあることから、この種の分野の研究は大いに成功しているともいえる。しばしば、我が国の工学的技術力が評価されるのはこの点を指している。

一方、独創性が極めて重要な位置を占める基礎物性的研究ではどうであろうか。多くの固定的枠の中でルーチン化された研究は、その場では極めて比重が軽い。なぜなら、既成の概念の範疇を越えたものでなければ意味がないからである。平たく言えば、ある物質の特性が10%向上したからと言って、同じカテゴリーに属するものであればほとんど物理的に意味がないからである。新しい現象の予測、新しい概念の構築には独自のアイデアをもって、個性ある観点から実験と理論を構築し、出てくる実験結果を理解し、それを既存のアイデアの範疇で理解可能かどうかを一つ一つ確かめる必要がある。この様な場合には、既存の枠組みをはずし、あらゆる角度から十分な検討が可能である組織が適当である。すなわち、大量生産的研究は極めて効率が悪く、意味がない。そこでは、独創性のみが評価の対象である。この場合、上述した後者の体制が明らかに有効である。なぜなら、独創性は個人的に極めて偏っていて、必ずしも研究者に平等では無いからである。これがいわゆる欧米人の言う科学に相当するものである。

このような後者の考えに基づいた組織は、現存のわが国の組織の中では希であろう。数は多く必要ないが、このような考えにもとづいた研究組織を併用することは将来の研究体制のあり方において重要な意味を持つであろう。既存の研究体制でもみられるように、学歴中心とか、能力の不平等性を無視した研究の画一的な平等主義は排除すべきである。こ

の点については、研究所がトップダウンで行うよりも、第三者の評価システムを導入し、研究の業績を率直に、かつ正確に評価し、研究所内である程度コンセンサスをとるべきである。その場合、評価をどうするかという重要な問題に直面するが、研究の評価の絶対値は測定が極めて難しいことは明らかである。それは、研究の科学的価値観や倫理観に強く依存するからである。しかしながら、上述したように、科学的な価値観が独創的、創造的アイデア、そしてその実行にあるとすれば、その具体的評価基準はある程度、自明であるはずであるが、残念ながら我が国の研究者の実状から判断すると憂慮すべき事態が予想される。昨今、様々な形で評価が叫ばれているが、大型科学研究や、大学や国立研究所が行っている自己評価を見たら一目瞭然で、自画自賛型の相互もたれあいの様相を呈していることから評価の正当性が問題である。これを打破するためには一つの評価機関に頼ることは大変危険で、複数の評価機関を活用し、問題があればそれを聞き入れ、正当性をチェックする機関が同時に必要である。そうしなければいくら評価機関を設けてもそれが操作されれば全く意味を失ってしまうどころか、逆にそれを肯定するためのきわめて強力な機関に変貌してしまうからである。元来、筆者は性善説を信じているが、どうしてもこのような懸念が払拭できないでいる。その根拠は、わが国においては自然科学哲学が殆ど存在しなかった事により、教育課程に西洋哲学をそのまま導入したが、実際、教育レベルでのそれは極めて不十分で、結局、いわば哲学不在の科学者が蔓延している憂うべき状況であると考えられることにある。最後は結局のところ、自己を如何に厳格に評価できるかにかかっているのである。いずれにしる、このような認識は正しい認識をもとに、自然淘汰を原則とした研究方針を取ることで、ある程度改善可能であると思われるが果たしてどの程度時間がかかるのであろうか¹³。すなわち、能力に応じた適材適所の人事の移動、研究能率に合った組織構造の改革、かつ内外を問わない人事の流動性をとる

¹³ 公に論議することに罪悪感を持つ国民性からすると残念なことに世代が変わるほどの時間が必要であろう。

ことが重要であろう。具体的には、研究者の研究に対する価値観を充実させ、上記評価基準によりできる限り多くの機関からオープンに評価していただくようにすべきである。これらの問題は、単に一国立研究所の問題ではなく広く教育や社会体制を含めた国レベルでの長期的課題であろう。

3 超伝導研究における強磁場の重要性

超伝導と磁場は、その強弱を問わずその両者において極めて密接な関連があることは超伝導の基本的現象をみれば、高度な数学を駆使したギンズブルグランダウ理論やBCS理論の詳細を議論せずとも直感的に明らかである。その典型的な現象例を上げるならば、量子化磁束、マイスナー効果、ジョセフソン効果、等がそれである。

超伝導研究に強磁場が重要な役割を果たすようになってきたのは、第二種超伝導体、特に高い上部臨界磁場¹⁴を持つ高磁界超伝導体が開発され、それを用いた超伝導電磁石の開発が急速に行われた戦後のことである。現在、超伝導材料として実用化されているほとんどの線材は1950年代後半から1960年代にわたり、主にアメリカ合衆国を中心として発見され、開発研究された材料である。すなわち、NbTi合金、NbZr合金¹⁵、A15型と呼ばれる一連の化合物超伝導体であるNb₃Sn、V₃Ga、Nb₃Alなどである。これらの材料は、臨界温度、臨界電流密度が高く、磁場依存性も適当なピン止め力を導入することによって高磁場領域での特性を向上できることから、高磁場用超伝導線材として極めて有用であり、現在でもより優れた特性を求め、多くの研究がなさ

¹⁴後でもう一度述べるが(4.1参照)、超伝導体は磁場中で完全マイスナー状態から臨界磁場 H_c (これは通常数十ガウスから数百ガウス程度である)で突然超伝導が壊れる第一種超伝導体と、完全マイスナー状態から磁場と超伝導状態が共存する混合状態(単に磁束状態とも言われる)をへて、さらに高い上部臨界磁場(通常臨界磁場に比べ高く、あるものは20 Tを越す超伝導体もある)で正常状態へ移行する第二種超伝導体の二種類に分類される。

¹⁵現在ではほとんど使われていない。

れている。

このような、超伝導電磁石の高磁場化に伴う材料開発は、その研究過程の中で高磁場超伝導体自身の物性を片輪として担っている。すなわち、新しい材料の開発に伴い、その材料の基本的な物理的性質を見極め、正確に評価する必要があるからである。また、高磁場用材料の場合、物理的特性の測定のためにも高磁場が必要となることは必然的である。このために、安定した質の高い高磁場測定空間が要求される。このような経緯の一例は、1970年代前半に発見された一連のシェブレル相化合物超伝導体¹⁶の物性研究、材料開発研究に見られる。この物質は、超伝導転移温度が約16 Kと比較的高く、あるものは低温での上部臨界磁場が60 T以上にも達し、高磁場超伝導体として極めて有望であった。しかしながら、硫化物であるため、その線材化は困難を極め、十分な臨界電流密度が得られなかった事から応用研究はその後あまり活発に行われていない。この一連の物質の研究には、通常、超伝導電磁石で得られる最高磁場である約20 Tをもってしても到底、上部臨界磁場に到達することは不可能であり、パルス磁場を用いて多くの研究が行われたが、現在でも60 T近傍でパルス磁場を用いて超伝導体の精密な物性実験を行うことは容易ではない。このような状況から、様々な物理量は低磁場での測定を高磁場側に外挿することで得られているが、直接高磁場までの測定が望まれている。

このように、超伝導体の物性研究には、超伝導材料の物性測定と言う観点から眺めただけでも強磁場が必要不可欠であり、しかも、質の高い磁場を必要とする。また、NMR等の物性測定手段においては、極めて高い磁場の均一度(10^{-6})が要求される。従って、物性研究では測定手段により極めて特殊な磁場を作製する必要性が生じる場合がある。また、材料開発的な物性測定には、操作性、機能性の高い、簡便に使うことのできる磁場が研究効率を高くする。このような観点から、以下に一般的な物性測定に必要な強磁場と特殊用途に用いられる強磁場

¹⁶以下の4.2で説明する。

分けて、どのような磁場が必要かを述べる。

3.1 物性測定用強磁場

3.1.1 中磁場領域汎用マグネット

中磁場領域 (20 T~30 T) で安定度 10^{-3} (磁場空間 1 cm^3)、52 mm ボアを持つものがこの場合の標準であろう。この領域の磁場は、現在、中型のハイブリッドマグネット、または、常伝導マグネット (ピッター型、ポリヘリックスなど) で比較的容易に実現可能な磁場領域である。この領域で定常的に磁場が確保されるなら、これまで稀少価値が高く、かつ利用が極めて特殊な測定に限られていた、30 T 級ハイブリッドマグネットでの実験を、このシステムで簡便に、しかも、極めて多くの物性測定に用いることが可能となる。汎用性からくるユーザーの利用価値は高く、また、この磁場領域における研究課題数も多く、実験結果の効率が極めて高い、ドル箱的存在となろう。また、このような磁場領域の施設は、いくつかの構想はあっても未だ実現していないため、近い将来これが実現すれば、特徴のある施設として極めて重要な位置を独占することが期待される。可能な物性実験としては、電気抵抗、磁気抵抗、ホール効果、ゼーベック効果、臨界電流密度等の電気、磁気特性輸送現象、比熱、熱膨率、磁歪、などの熱力学諸物理量、NMR、ESR、ENDOR 等の磁気共鳴、遠赤外、赤外、可視領域分光、磁化、帯磁率等の磁気測定、などほとんどあらゆる精密測定があげられる。温度領域も、1.5 K までは各種測定が問題なく行える。1.5 K 以下の温度領域も ^3He - ^4He 希釈冷凍機を用いることで可能である。このような磁場領域は、超伝導研究のみならず極めて幅広い物性一般の測定に用いることができるため、数台 (3~4 台) を平行して使える構成が望ましい。極低温領域でのヘリウムの研究も重要であろう。

超伝導の研究に関しては、電気抵抗、磁気抵抗、臨界磁場、臨界電流密度の測定、比熱の測定、磁化測定や光学測定が主な測定手段となる。この領域では、これまで、開発されてきている高磁場超伝導

体である A-15 型超伝導体の多くは上部臨界磁場に達すると考えられ、これまで測定不可能であった高磁場領域を完全にカバーできることになる。また、その他、シェブレル相化合物、高温超伝導体などの臨界磁場、臨界電流密度の測定も可能で、これらの物質の理解に極めて重要な情報を提供することになる。また、高温超伝導体の $\text{Ln}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ 系や $\text{Nd}_{2-x}\text{Ce}_x\text{CuO}_4$ などの臨界磁場がこの領域にあり、これまでパルス磁場等でしか測定できなかった領域の物性が明らかになると期待される。

3.1.2 40 T クラスハイブリッドマグネット

このマグネットは、40 T までで、静磁界としては最高の到達磁場が得られるシステムであり、上記中磁場用汎用マグネットとほぼ同様の目的に用いられる。しかしながら、装置が大型であり、実験者が単独で運転できず、年間運転計画が規定されていて頻繁に実験できないため、汎用マグネットとは区別して扱う。汎用マグネットで磁場が不足した場合にのみ、運転計画に盛り込み測定する。可能な測定としては、ほぼ中磁場領域汎用マグネットと同じである。

3.1.3 高磁場特殊マグネット

中磁場領域 (30 T) 以上の磁場は、近い将来においても発生が技術的に簡単ではなく、長時間安定度、磁場空間の制限等からまだ稀少価値の高い磁場領域であろう。従って、この領域では、短時間に有効に測定が可能な測定に限定すべきであろう。磁場形式としては、現在のところパルス法以外は無い。超伝導の研究においては、残念ながらこのパルス法は不適當であると言わざるを得ない。なぜなら、超伝導体においては測定結果が磁場の変化率に強く依存するからである。従って、磁場としてパルス法を用いるこの領域での超伝導研究は限られたものとなる。たとえば、上部臨界磁場の測定 (超伝導が消える磁場の測定) である。パルス幅はこの場合

長ければ長い程良い。経験的には、少なくとも 100 msec. 程度のパルス幅が必要である。

測定には 1.2 K から常温付近までが対象となり、磁場の有効径も約 20 mm あれば大抵の場合十分である。他の物性測定用マグネットと共用できるシステムがよい。たとえば、磁化測定用など。パルスマグネットは実験時間は極めて短く、高磁場が比較的容易に作製できることからシステムをできる限りコンパクトに作る事が重要である。パルス磁場に関しては、これまでわが国が高い水準を維持してきた歴史的背景もあり、技術的蓄積も十分であると考えられることからこの領域での物性測定システムが確立すれば、一つの特徴ある強磁場施設となるであろう。超伝導の研究としては、これ以上の高速パルス磁場は、得られる実験結果の信頼性を考えると殆ど使用不可能である。

4 強磁場中における新現象

4.1 擬 2 次元超伝導

磁場中におかれた超伝導体は、量子化された磁束が超伝導状態と共存できるかどうかで 2 種類に分類されることが知られている。すなわち、超伝導体内部に磁場が入り込むことができない超伝導体（第一種超伝導体）と、磁場が磁束量子という形で超伝導状態と共存できる超伝導体（第二種超伝導体）である。前者は、現象が比較的簡単であることから超伝導機構などの議論には有用であるが、磁場中で超伝導が消失する臨界磁場が低いことから、実用的には後者の第二種超伝導体をもつばら重要であり、これ以降では超伝導体とは第二種超伝導体を指すことにする。

第二種超伝導体の様々な物理量は、これまでギンツブルグ-ランダウ流の現象論で極めて良く理解されると考えられてきた。磁場中での振る舞いもその例外ではなく、たとえば、臨界磁場 H_{c2} の温度依存性は、温度下降とともに単調に増加すると信じられてきた。事実、通常の超伝導体での $H_{c2}(T)$ 曲線

は、ギンツブルグ-ランダウ理論で予言される温度依存性と極めて良い一致を示し、実験的にもほぼ確立されていた。ただし、ギンツブルグ-ランダウ理論は、 T_c 近傍では近似がよいが、絶対零度付近の振る舞いは予言することができない事に注意する必要がある。絶対零度付近でも有効な BCS 理論においても様々な近似のもとで、実験結果を支持するような単調な温度の関数としての上部臨界磁場を与え、疑いをもたれなかったのである。

高温超伝導体の発見がきっかけとなって、最近、2 次元性の強い系での超伝導状態が従来の超伝導状態と比較し、極めて異常であることが明らかになり、特に磁場中での相図が再び議論の対象となっている。すなわち、強磁場極限において、擬 2 次元系の超伝導状態は消失するかどうかという点である。この問題を最初に取り上げたのはテサノビッチ (Tesanović) 等 (1989 年) である。彼らは、強磁場下の第二種超伝導体は、磁場によって電子状態が強く縮退したランダウレベルに分離することを考慮し、磁束状態の安定性の問題を BCS 理論の枠内で計算した。その結果、意外な事実が判明した。第一に、超伝導状態はどんな強磁場になっても消失せず、一度、絶対零度近傍で上部臨界磁場に達する領域、 H_{c2} を経て、むしろ高磁場になるにつれ再び安定化される方向に開いていく。第二に、このような高磁場領域では、もはや通常の意味でのマイスナー効果（この場合、超伝導による反磁性を指す）は存在せず、超伝導電流も磁場方向の電流のみに対し超伝導性を示す。第三に、強磁場での極限では、系はランダウレベルの基底状態にあり、2 次元系の量子ホール効果と極めて良い類似の性質を示す。しかし量子ホール効果とは異なり、系の弱い乱れ (weak disorder) は超伝導転移点に大きな影響を及ぼさない。

これらの特異な超伝導状態はその後興味を持たれ、主に理論的側面から研究されてきているが、実験的検証はほとんどなされていない。通常の超伝導体でこのような領域に入るには、温度で数 mK、磁場で数 10 T の領域であると考えられている。高温

超伝導体の場合には、 T_c が高いことからこのような特異な現象は約 1 K 付近で可能であろうと予想される。しかしながら、高温超伝導体では、それ自身の上部臨界磁場が極めて高いことから、磁場領域は 100 T を越えるものと考えられ、現実問題として実験が極めて困難であろう。この現象の検証には適当な物質の選択が鍵となるであろう。いずれにしても、この問題は、超伝導の理論が確立し 37 年以上経た現在において、それが予言し得なかった領域が未だに残されていたという意味において、その現象の検証を行うことは大変意義深いことと考えられる。

4.2 強磁場下の磁性と超伝導（ジャッカーリーノ-ペーターの機構）

これは、1962 年、当時アメリカ合衆国、ベル電話研究所のジャッカーリーノ (V. Jaccarino) とペーター (M. Peter) によって提唱された超強磁場下での超伝導の可能性に端を発する¹⁷。彼らは、超伝導体では通常、強い外部磁場をかけると伝導電子がスピンの状態によってアップバンドとダウンバンドに分離し、超伝導電子対が破壊されてしまう¹⁸状況が出現するが、ある特殊な磁性体では、低磁場領域ではむしろ磁性体の内部磁場、 H_{eff} 、で超伝導が破壊される傾向があるものの、強磁場領域では、もし内部磁場が外部磁場、 H 、と逆方向でそれを打ち消すように作用するなら、 $H \sim H_{eff}$ 付近の高磁場中ではむしろ低磁場領域よりより安定な超伝導状態が発現しうることを指摘した。通常、 H_{eff} は極めて高い磁場で、稀土類金属などでは数 100 T ある。

その後、長い間この問題は忘れ去られていた。その理由は、第一に、磁性体で超伝導となるような化合物は知られていなかった事と、そのような強磁場を発生できる研究施設が無かった事による。しかしながら、この問題が再び脚光を浴びる事になったの

は、1971 年、稀土類元素を含む 3 元モリブデンカルコゲナイド¹⁹がシェブレル (Chevrel) によって発見されてからである²⁰。その直後の 1972 年、同様の稀土類元素を含む 3 元系のボロン化合物、 $RERh_4B_4$ 系もマテアス (Matthias) 等によって発見された²¹。これらの一連の稀土類元素を含む 3 元化合物は、比較的高い超伝導転移温度を持つとともに、稀土類元素を単位胞内に含むことから、稀土類原子の持つ磁気モーメントが低温で磁氣的秩序状態に転移し、かつ、磁性と超伝導が共存する事が明らかにされ、磁性と超伝導状態の相互作用に関連して、1970 年代後半から 1980 年代前半にわたり多くの研究がなされた。このような一連の研究の中で、ジャッカーリーノ-ペーター機構の検証も試みられた。これらの 3 元稀土類化合物は、稀土類元素と伝導電子の結合が極めて弱く、そのためジャッカーリーノ-ペーター機構を検証することも現実的に実現可能な磁場領域にあったからである。このような観点から、様々な系で超伝導電子とその対破壊機構を調べた結果、 $Sr_{1.2(1-x)}Eu_xMo_{6.35}S_8$ における上部臨界磁場の温度依存性が、磁場とともに一度は減少するが高磁場領域で再び増加するという極めて異常な振る舞いを示すことが指摘され、この異常はジャッカーリーノ-ペーター機構によるものとして解釈されている。このような振る舞いは他の稀土類元素でも期待されるが、現実問題として必要な磁場が 50 T~100 T の領域にあることから、必ずしも実験的検証が容易ではなく、この問題が完結した訳ではない。本研究所の強磁場施設を用いればこれらの問題に関して最終的な結論を出すことができるであろう。

4.3 高温超伝導

1986 年に発見された高温超伝導体を景気として、超伝導体の理解が急速に深まったといえる。それまで、従来の超伝導体においては非常に困難であった

¹⁷V. Jaccarino and M. Peter, Phys. Rev. Lett. **9**, 290 (1962)

¹⁸これは、常磁性極限 (paramagnetic limit) とか、クロングストンの限界 (Clongston limit) と呼ばれる。

¹⁹ $REMo_6S_8$ 、 $REMo_6Se_8$ 、RE は稀土類元素) 系の超伝導体。

²⁰R. Chevrel, *et al.*, J. Solid State Chem. **3**, 515 (1971)

²¹B. T. Matthias, *et al.*, Science **175**, 1465 (1972)

実験領域が高温超伝導体を用いることで比較的容易に実現できるようになったからである。その第一点は、超伝導揺らぎに関する問題である。高温超伝導体の中には、極めて2次元性の強い系があり、その超伝導状態は、従来の超伝導体のそれと大きく異なっていることがわかってきた。好例の一つがBi系超伝導体であり、このような研究は、大型の単結晶が比較的容易に得られる $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ 系で詳細に調べられてきた。2次元性の極めて強い系では、その磁場中での超伝導状態は強い超伝導揺らぎのために超伝導状態が容易に壊されてしまう。これは、元来2次元性の強い系に磁場をかけることで電子状態がランダウレベルに分離し、さらに強磁場領域ではランダウレベルが局在化する事により、系の次元が擬2次元からゼロ次元へとクロスオーバーすることによる。次元性の解析から、ゼロ次元系ではあらゆる相転移は存在しないことが厳密に証明されている事から、 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ 系のばあいにも超伝導の相転移は高磁場中では起こらない事が予想される。超伝導は、平均場近似での転移点付近の回りで強い揺らぎを示すことになる。この効果が単結晶 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ 系における詳細な研究で明確に示されてきた。しかしながら、これまでの研究は、低磁場領域（主に20 T以下）であった。高温超伝導体の磁場スケールがより高磁場領域（ ~ 100 T）にあることからさらに強磁場領域での超伝導揺らぎに関する研究は新しい結果をもたらす可能性が十分にある。

第二点は、極低温領域における電気抵抗の異常に端を発する。最初の指摘は、1993年、マッケンジー等によって報告された $\text{Tl}_2\text{Ba}_2\text{CuO}_2$ 系において、強磁場中、mK領域までの電気抵抗が極めて強い温度依存性、磁場依存性を示す事実である²²。その後、同様の実験結果がオソフスキー等によって $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CuO}_{6+\delta}$ 系において報告され²³、従来の超伝導体の H_{c2} の取り扱いからは説明不可能であることが指摘されている。この原因は現在でも明らかで

²²A. P. Machenzie *et al.*, Phys. Rev. Lett. **71**, 1238 (1993)

²³M. S. Osofsky *et al.*, Phys. Rev. Lett. **71**, 2315 (1993)

なく、実験結果が不備である問題を含め、様々な議論、憶測を呼んでいる。一つの説明の可能性としてバイポーラロン (bi-polarons) を基にした超伝導機構が議論されている。何れにしても、高温超伝導体のような物質で、予測できなかったmk温度領域、強磁場下での異常現象は高温超伝導の機構解明と関連して、重要な実験課題であり、早急に取り上げる必要がある。

第三に、超伝導人工多層薄膜の研究が上げられよう。これは、高温超伝導のみでなく、従来超伝導体の人工多層薄膜をも含む。既に知られているように、人工多層薄膜技術を用いると、擬2次元超伝導を比較的容易に実現できることが知られている。異方性の強い高温超伝導体等で実在していると考えられている弱結合層状超伝導状態を、バルクでは制御不可能なパラメーター、たとえば層間の間隔や電気的、磁氣的結合力を自由に制御することで実現しようとする試みである。これに関する一連の実験結果は高温超伝導体における超伝導特性の理解に重要な情報を提供するものと考えられる。特に、強磁場下での磁束状態の研究にはバルクの測定を補足するのみでなく、多層薄膜固有の現象が期待されることから、重要な研究課題の一つとして取り上げねばならない課題であろう。一方、バルク単結晶においてもそうであるが、試料として良質の多層薄膜の作製技術の確立がこの研究課題の成果を左右する鍵となであろう。

そのほかの研究課題としては、高温超伝導体の強磁場領域における様々な物性測定が上げられる。これは、他の分野での研究と同様に強磁場領域に測定領域を拡張する試みである。測定としては、正常状態、超伝導状態での磁気異方性の測定のための磁気帯磁率、磁気トルク、比熱、熱膨張係数、熱伝導率、超伝導揺らぎのモデルを確立するため、正常状態を含めた磁気抵抗の測定、強磁場下での光励起、吸収の測定、また磁束状態及び強磁場下での超伝導ギャップを調べるためのSTMなど様々な実験課題がある。

4.4 有機超伝導

有機物の中には、電荷移動錯体と呼ばれる一群の化合物が存在し、分子間の結合が生じる際、部分的に電荷の移動がおこり、それが金属電子として振る舞い、ある場合には超伝導を示すことが知られている。有機超伝導体は、1980年に、ジェローム (D. Jerome) 等によって発見されて以来、現在まで約40種類知られているが、最近、急速に超伝導転移温度が上昇しており注目されている。現在のところ、最も高い超伝導転移温度は、圧力下での κ -(BEDT-TTF)₂Cu(N(CN)₂)Cl における 12.8 K である。有機超伝導体の特徴は、有機物分子が大きいため単位胞が通常の化合物などと比較し 10~100 倍以上も大きいことにあり、電子密度が比較的少ない特徴がある。また、有機物であることから物質合成という見地からすれば極めて多くの可能性が存在し、今後、大きく発展する可能性を内包している。

有機超伝導体の正常状態での電子状態は、ヒュッケル法を拡張したバンド計算によって精度よく計算でき、また、実験的にもド・ハース-ファン・アルフェン効果、シュブニコフド・ハース効果等の測定からそれが確認されてきた。超伝導状態では、正常状態での電子状態の次元性を強く反映し、擬1次元、あるいは擬2次元の振る舞いを示す。これまでの研究から、超伝導は強結合を考慮した通常のBCS理論的であるとされている。しかしながら、超伝導相が絶縁体(SDW相)と隣接していたり、わずかな圧力で金属-絶縁体転移を起こしたり、高温超伝導体の相図を連想させるような振る舞いや、核磁気共鳴の緩和時間の温度依存性がBCS的でない事などから、BCS超伝導ではないという議論も一方では盛んである。また、超伝導状態は、不純物に極めて敏感で、微量の不純物、放射線照射等で消失してしまう事が知られている。このような状況から判断すると、有機超伝導体の研究は、単にその超伝導状態の研究のみならず、常伝導状態を含め、幅広く電子状態全般にわたる総合的な研究課題として設定することが望まれる。また、有機伝導体一般に共通であるが、これらの化合物は圧力に敏感であるため、高

圧下の実験が必要不可欠であろう。高温超伝導体の場合もそうであるが、有機伝導体も例外ではなく、物性研究には良質の単結晶の存在が決定的であり、物質開発を含めた単結晶の育成に力を注ぐ必要がある。

4.5 重い電子系の超伝導

希土類元素やアクチノイド系の元素、特にトリウムやウランを含む金属間化合物の中には、伝導電子と磁性原子のもつ磁気モーメントとの相互作用の結果、通常の伝導電子の質量の数千倍にも達する重い電子状態が出現する場合がある。このような化合物のうち、あるものは極低温領域まで常伝導状態を保つが、あるものは低温で磁気秩序状態や超伝導状態に転移するものが知られている。このような特異な電子状態は、過去20年以上にわたり多くの研究がなされてきたが、未解決の部分が多く残されている。その中で極めて重要な研究課題として、超伝導状態の解明が上げられる。即ち、第一に、重い電子系の超伝導状態の対称性が、*s*-波か*d*-波かという問題であり(*p*-波や*f*-波を唱える人もいる)、第二に、その様な対称性が実現される超伝導機構である。理論的には*s*-波は極めて可能性が低いことが予想されている。実験的には現在のところ*s*-波的側面、*d*-波的側面(*p*-波的側面もある)があり明確な決着が付いていない。もし、この問題で多くの理論が予言するように*d*-波超伝導が実現していることが明らかになれば、超伝導の歴史上初めて*s*-波超伝導以外の超伝導状態を確認したことになり、極めて重要な意味を持っていると考えられる²⁴。

重い電子系で超伝導を示す物質の数は多くない。CeCu₂Si₂ をのぞきすべてウラン系物質に限られている。典型的な化合物としては、UPt₃、UBe₁₃、URu₂Si₂、UPd₂Al₃ のみである²⁵。これらの物質の

²⁴最近になって重い電子系の典型物質である UPt_3 の超伝導がスピン三重項状態にあるとする実験結果がある (H. Tou, *et al.*, Phys. Rev. Lett. **80**, (1998) 3129)。また、高温超伝導体はほとんどの場合、*d*-波であるとされている (たとえば、C. C. Tsuei, *et al.*, Phys. Rev. Lett. **73**, (1994) 593)。

²⁵ごく最近、高圧下で奇妙な超伝導を示す物質が知られてい

上部臨界磁場は最も高い UBe_{13} での約 12 T である事から、超伝導の磁場領域としては強磁場領域には入らないが、精密測定が要求されることから安定度の高い、精密磁場が必要不可欠である。また、関連した様々な物性を調べる上で強磁場は極めて有効である。なぜならば、重い電子状態は、そのエネルギースケールが主に 10 K 以下にあり、強磁場をかけることによってそれを破壊し、重い電子状態が生じる元の状態を実現することが可能であるからである。このためには、磁場としてエネルギースケールの少なくとも 10~100 倍の磁場、即ち 10 T~100 T の磁場が必要となる。この磁場領域は、この研究施設で現在入手できる磁場領域にあるから、重い電子系の強磁場における研究は超伝導状態の解明を含めて、最も重要な研究課題の一つとしてとらえねばならない。

追記

この小文は、1995年「強磁場を利用した研究の現状と課題」として科学技術庁、金属材料技術研究所が発行した冊子のため的一部として執筆されたものである。従って、タイトルは原文とは多少異なっている。また、今回の公開のために原文に含まれていた間違いを訂正するとともに、説明不足のため紛らわしい部分等を加筆修正したことを付記する。(2000年7月16日)

る。たとえば、 UGe_2 は強磁性と超伝導が共存していると言われている。