

# 我が国の超伝導研究 —科研費によって基礎研究が大輪の花へ—

## 1. 日本発の新超伝導物質の発見

「超伝導」は「物性の華」である。金属における電気抵抗の消滅というドラマチックな現象のために一般的にも広く興味をもたれ、超伝導出現温度（臨界温度と呼ばれる）が少しでも高い物質の探索が世界中で「ひそかに」かつ「着実」に進められている。最近、秋光純氏と『超伝導ハンドブック』をまとめたが、過去30年間に発見された「物質科学」上インパクトの大きい新超伝導物質の多く（ほとんどすべて！）が日本発であることを改めて確認した。概略は以下のとおりである。「銅酸化物における高温超伝導の確認と構造決定（1986）」（田中昭二、北澤宏一、内田慎一、高木英典）を筆頭に、「ビスマス系銅酸化物（1988）」（前田弘）、「電子型銅酸化物（1989）」（十倉好紀、内田慎一、高木英典）、「 $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$ （1994）」（前野悦輝）、「梯子型銅酸化物（1996）」（秋光純、毛利信男）、「 $\text{MgB}_2$ （2001）」（秋光純）、「コバルト酸化物（2003）」（室町英治）、「鉄ニクタイト（2006,2008）」（細野秀雄）の発見等と圧倒的である。

これらは当然国際的に重要な賞を受賞している（個人的には、田中昭二氏らがノーベル賞の対象にならなかったのは残念）。

なぜこのように超伝導について数多くの重要な研究成果が生まれているのか？ このことを考える際のキーポイントは、超伝導の出現には固体中の電子状態の詳細が関与しているため総合的な研究が必要であり、従って基礎研究が極めて重要な役割を果たす、ということである。地道な研究の積み重ねと極めて低い確率の「幸運」によって初めて興味ある「新超伝導物質」発見となり、発見者はたちまち科学界のスターとなる。

## 2. 高温超伝導研究の勃興

我が国における系統的超伝導研究事始めは、中嶋貞雄東京大学物性研究所教授（1981-1984所長）をはじめ理論家13名のグループによる昭和56年度（1981年度）科研費総合研究（B）「新しいタイプの超伝導」である。1980年前後に「重い電子系」「有機（分子性）結晶」「 $^3\text{He}$ 」等においてその後の物性研究に大きな影響を与えた超伝導・超流動の発見が相次いだ。上記総合研究（B）はそのような多様な超伝導についての系統的理解を目指したものであった。その結果、超伝導研究の機運が盛り上がり昭和57年度（1982年度）に総合研究（B）さらに昭和59年度（1984年度）に特定研究「新超伝導物質」（3年間）が中嶋貞雄教授を中心に

活動を開始した。この研究グループ発足に向けての中嶋貞雄・田中昭二・安河内昂3先輩の意見交換は私の狭い研究室で行われたが、その意気ごみは大変なものであった。グループ構成については、従来の理論家主体を基本的に変更し、多数の実験家、とりわけそれまではあまり注目されていなかった物質合成の研究者を含め32名のメンバーで発足した。この研究グループの誕生は超伝導研究のみならずその後の物質科学研究に世界的な観点からも極めて大きな意味を持つことになる。この研究グループの目標について中嶋貞雄教授は1983年第6回谷口国際シンポジウムで紹介し、さらにノーベル賞受賞者3名を含む10数名の国際的に著名な研究者に手紙を送った。それに対して、多くの「激励」はもちろん、それとは反対に「研究費獲得を狙った根拠のない提案」という激しいコメントもあった。John Bardeen（「トランジスターの発明」と「超伝導理論」でノーベル物理学賞を2度受賞）からは暖かく丁寧なはげましの言葉があった。Bardeen、中嶋両先生はその風貌と研究への思い入れ・話し方が大変よく似ていた（図1）。最近では見ることのない「大学者」然としておられたご両人は今では故人である。「銅酸化物高温超伝導」という大発見はこの特定研究の活動期間中に起こったのである。1986年11月伊豆網代での研究会で当初のプログラムを変更して行われた田中昭二グループによる「銅酸化物における高温超伝導確認」は参加者全員を興奮のつぼに引き入れた。たまたま、その発表のあった晩に研究会の会場から三原山噴火が赤々と見えたのは印象に残っている。



図1 中嶋貞雄・John Bardeen両先生（1986年5月 東京大学物性研究所）。

**著者:福山秀敏** 東京理科大学総合研究機構長、東京大学名誉教授

略歴:元東京大学物性研究所所長。高温超伝導において理論と実験の両面で指導的役割を果たす。平成15年紫綬褒章受章。

### 3.日本起原の世紀の大発見

その後、田中グループではのちに「4人組」と呼ばれた田中昭二・北澤宏一・内田慎一・高木英典の4氏(図2)が昼夜を問わない集中実験を重ね超伝導出現の舞台となっている結晶構造を確定し、その結果を持って北澤氏が12月初めの米国ボストンであったMRSという会議で発表、これで世界中に「火が付いた」。この世紀の大発見に対応して特定研究「新超伝導物質」に加えて昭和62年度(1987年度)に急遽特定研究「酸化物高温超伝導体の研究」が設定された。



図2 銅酸化物高温超伝導フィーバーの火付け役4人組(左から、北澤・田中・内田・高木の各氏)(1986年)。

図3にあるように、銅酸化物の発見によりそれまでの臨界温度最高値23Kであったものが当初の約30Kから1987年春にかけて瞬間に100K近くまで上昇した。液体窒素沸点77K(摂氏-196度)を越えたため「超伝導の実用化」への期待から大きな社会的な関心を引き起こし、世界中で「臨界温度競争」が繰り広げられた。“高温超伝導フィーバー”である(図3にはその後の高温超伝導物質、MgB<sub>2</sub>および鉄系についても記載した)。全国紙が朝刊1面に研究活動をシリーズで紹介したり、さらに何冊かの漫画本の出版もあった。その一例が図4である。普段顔を合わせる同僚が漫画本の主役や脇役になって登場することには大変新鮮かつ不思議な印象を持った。これらメディア報道には研究活動の内容ばかりでなく、「XX一門」という研究者の人脈紹介まであった。この頃、「どこで何度

になった」「Xさんが何度を出した」という電話が世界中を飛び廻ったが、我が家にも毎晩多くかかってきた。当時小学低学年だった息子から「今日は何度になったの?」と尋ねられることもしばしばであった。

このような激動期における研究結果の発表形態には少なからず問題もあった。電気抵抗の測定という基本的な作業においてもしばしば初歩的なミス(たとえば、ありえない“マイナスの抵抗”)とそれに基づく「驚異的結果」が報道されることもあり、科学界の信用問題に関わるというので中嶋先生による「研究者はモラルが大切」というメッセージや田中先生による「超伝導を確認する3原則」の表明等が新聞に掲載された。

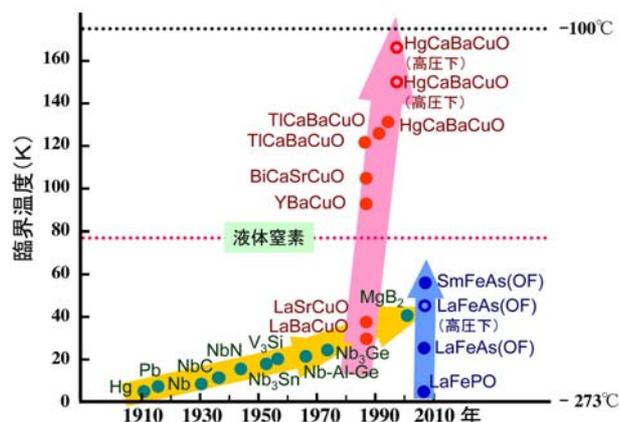


図3 超伝導臨界温度の時代変化。



図4 『石ノ森章太郎の「超電導講座」』(講談社、1988年)の表紙とその1ページに中嶋先生登場。「特定研究」の文言がある。

©石森プロ

### 3. 科研費から生まれたもの

1987年3月ニューヨークで開催されたアメリカ物理学会特別シンポジウムは立錐の余地もない会場で(参加者は2000人を超えたとされている)、午後7時半に始まった報告が終了したのは翌朝午前3時過ぎ。このシンポジウム直後に国際電信電話株式会社の企画でニューヨークのスタジオの田中先生・スタンフォード大学ピーズレイ教授らと東京大手町の中嶋先生らとの間のテレビ討論が衛星で結ばれ、このことも新聞で紹介された。この集会は参加者の多さから後日「物理学のWoodstock」と呼ばれた(この会議出席のためケネディ空港から乗ったタクシー運転手が、マンハッタン島直前のイーストリバー手前で急に脇道にそれて廃墟の前で停車、そこで法外な料金の請求。北澤さんが「それはおかしい、警察に行こう」と元気。脇の田中先生が気をもんで「北澤君、しょうがないよ」と大人の分別を示され無事ホテルに到着)。その直後にあった名古屋工業大学での日本物理学会でも800人収容の会場に2000人が午前9時半から午後11時過ぎまで熱い議論を交わした。また5月米国アナハイムでのMRS会議では、欧米による「基礎科学日本ただ乗り論」をこの際払拭するという田中先生の方針のもと、北澤さんが大奮闘して急遽用意された日本の研究論文を別冊特集したJJAP Letters1000部が会場で配布された。さらにその年の8月には3年毎に開催され第18回を迎えた低温物理学国際会議がたまたま京都で開催されたが、ここでも多数の事前登録に加えて予想をはるかに超える当日受付があり「大混乱」(図5はこの会議の様子)。このような大きな会議の準備で最大の悩みは必要経費の確保であり、企業からの寄付金が頼り。当初渋かった企業が1987年初頭から「超伝導」というキーワードに強く反応するようになり目標額を超えることが確実になり、募金担当者は「せっかくお願いしておきながら、もうわけございませんが」と一部減額を申し出るとい



図5 「第18回低温物理学国際会議」。満員の京都国際会議場、前方に多くの報道陣が見える。

う、同じ寄付の件で2度頭を下げる前代未聞の状況に遭遇した。

この頃の情報伝達手段は電話とファックスであり、それらが世界中を行き交った。当時六本木にあった東京大学物性研究所の私の研究室に届いた論文ファックス資料は短期間に8cmの厚さのファイル200冊に及んだ。これを理論研究室サロンで公開し、並行して毎週物性研究所で「報告会」を開催した。毎回超満員だった。結果的にその後の我が国の「物質科学研究」が世界をリードする状況になることに大きく貢献した「全国共同利用研究所」としての役目でもある、この「情報公開」をはじめ様々な研究活動は研究者ばかりでなくそれを支える多くの方々の協力で可能となった。とりわけ我が国はおろか世界各地との連絡・連携には当時研究室秘書の丸山志津枝さんの力に負うところが大きい(彼女に世話にならなかった人はほとんど皆無。四半世紀後の本稿の準備に際しても彼女から協力を頂いた)。また、アメリカ物理学会誌Physics Todayと提携している月刊科学誌が毎月「トピックス:高温超伝導の新展開」(図6)として怪情報が飛び交う混乱状況の中で最新かつ信頼がおける研究結果を選んで特集したことも、「物質科学」研究者コミュニティの健全さを保つ上では重要な役割を果たした。この特集の冒頭は北澤氏による「姿を現したU.S.O.—高温超伝導体」である(U.S.O.は「ウソ」ではなくUnidentified Superconducting Object(未確認超伝導物質)の略、もちろんUFO(未確認飛行物体)を意識している)。

#### 4. 「革命的状況」と「深刻な対立」

「銅酸化物高温超伝導発現機構の究明とさらなる発展」を目指した研究活動は、その後、重点領域研究「超伝導発現機構の解

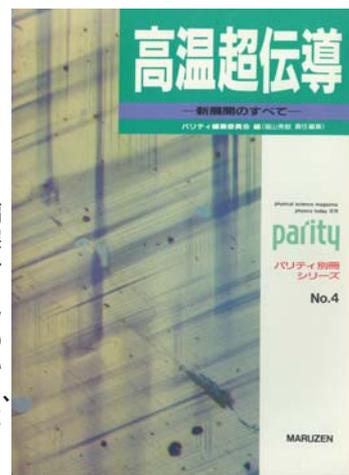


図6 パリティ編集委員会編(1988)『高温超伝導—新展開のすべて—』(パリティ別冊シリーズNo.4)(丸善株式会社)パリティ誌で連載した「トピックス:高温超伝導の新展開」の記事とPhysics Today誌から翻訳された記事にあわせて、それまでの1年半余の展開についての総説記事を加えて1冊にまとめたもの。

明」(昭和63—平成2、領域代表者:武藤芳雄)「高温超伝導の科学」(平成4-6、領域代表者:立木昌)、「モット転移近傍の異常金属相」(平成7-9、領域代表者:福山秀敏)で展開された。

この間に研究者間に深刻な対立が徐々に生まれ、それは現在でも多少影を落としている。「銅酸化物」は物質の性質(「物性」)究明をめざす基礎科学である物性物理学の根本にかかわる問題を提起したのであった。それは物性のうちで基本中の基本である「電気が流れる」かどうか、すなわち「金属」と「絶縁体」の違い、の起源に係っている。物質は気の遠くなるような膨大な数の原子・分子の集団である(普通の物質 $1\text{cm}^3$ 中の原子を仮にテニスボールで置き換えると一辺が3000kmの箱となる)。このため物質は凝縮系と呼ばれるが、これほどの多数の原子の集団の性質は個々の原子のそれとはまったく異なる。その象徴が「金属と絶縁体」なのである。その起源はもともと原子に束縛されていた量子力学的素粒子である電子が物質中で自由に動くようになるかどうかで決まる。絶縁体の起源には大きく分けて量子力学の基本である「パウリ原理」に由来する場合、マイナス電荷をもつ電子間の強いクーロン斥力相互作用(「強相関効果」と呼ばれる)に起因する場合があります、それぞれ「バンド絶縁体」、「モット絶縁体」とよばれる。バンド絶縁体に微量の電子が付け加わり、わずかに電気が流れる状況になったのが現代の高度科学技術の根幹を支える「半導体」であるが、銅酸化物高温超伝導は「モット絶縁体」にわずかな数のキャリアが加わった状況で出現する。モット絶縁体は「磁性」を持つので「銅酸化物高温超伝導」は「磁性」に隣接して出現しており、このことはそれまでの常識にはなかった。このような「従来の考え方」を覆す「革命的状況」は必ず社会に深刻な対立をもたらす。それまで「斯界の大家」と言われていた研究者がこの混乱状況では自明と思われることに異を唱えたり、一方、理解不能な提案をしたりして学界を混乱させることが世界中で起こった。残念ながら我が国もその一つであり、かつ深刻であった。科学の基本である「真実か否か」ではなく「多くの人がそう言っている」という「多数決」的判断も横行した(「真理探究」をめざす自然科学の世界に起こったこのような異常現象は「社会科学的分析」の対象となる資格が十分にある。状況が落ち着いてきた現在どなたか興味を持っていただけないだろうか?)。

### 5. 科研費によって基礎研究が大輪の花へ

その後、特定領域研究「遷移金属酸化物における新しい量子現

象—スピン・電荷・軌道結合系—」(平成11-15、領域代表者:前川禎通)について特定領域研究「異常量子物質の創製—新しい物理を生む新物質」(平成16-20、領域代表者:秋光純)と続き、上に紹介したように我が国の物性物理学研究の活動は世界の注目的的となっている。とりわけ「強相関電子系」の奥深さと拡がりを明確に世界に発信し続けている。その典型がマルチフェロイックを中心とした十倉好紀氏の活躍であり、理化学研究所に物性科学では初めての戦略研究センターが2013年春に発足するまでになっている。一方、元来化学者で酸化物半導体の材料化を実現した細野秀雄氏は鉄系超伝導を発見した。細野氏はさらにエレクトライト(イオン結晶と同様な原子配置を持つが電子が陰イオンの代わりにする結晶)において超伝導の発見に加えてアンモニア合成の触媒としての可能性を提示し、基礎物質科学と材料工学の橋渡しをしている。これら国際的スターとその後に続く多くの若い世代が今後ますます活躍する状況が整っている。図7は高校生のための公開講座の一場面である。

このような物性物理学、より広くは物質科学において現在世界をリードする研究活動の状況は、ひとえに長期に亘る基礎研究への財政的支援の結果であり、ボトムアップ研究活動を支える科研費の重要性はいくら強調しても尽くせない。



図7 「高校生のための超電導公開講座」(2011年3月 日本科学未来館)。左から、黒川(日本経済新聞社)、北澤、筆者、細野、秋光の各氏。(JST古川雅士氏提供)

### 6. 謝辞

本稿の執筆に当たり、東京都市大学学長、独立行政法人科学技術振興機構顧問、東京大学名誉教授 北澤宏一氏ならびに元東京大学物性研究所物性理論研究部門技術専門官 丸山志津枝氏にご協力いただいた。ここに謝意を表する。