

まえがき

超伝導は、物質の電気抵抗が低温のある温度を境にしてゼロになるという劇的でかつクリアな物理現象である。しかし、その発現機構を真に理解するためには、量子力学と統計力学、しかも、多電子系における電子間の相互作用を学ぶ必要があり、直観的に理解することは容易ではない。筆者が超伝導の勉強を始めた学部4年生の頃(1970年代)は、 s 波超伝導の発現機構を解明したBCS理論に基づく超伝導現象の理解が一段落した頃であり、超伝導に関する教科書がいくつか出版されていた。筆者もそれらを使って勉強したが、学部4年生には難解な箇所が少なくなく、超伝導を理解するのに大変苦勞した記憶がある。また、1986年の銅酸化物における高温超伝導の発見以降は、高温で発現する超伝導は非 s 波であることが多く、その発現には電子相関とそれに伴う磁性が深く関わっていることが明らかになった。そのため、強相関電子系における物理現象を説明する理論が発展し、それとともに高温超伝導の理解も進展してきた。それゆえ、非 s 波超伝導を理解することは実験研究者にとっては骨の折れることであり、まして初学者にとっては超伝導はかなりハードルが高い研究分野になってしまった。

そこで、これから超伝導の勉強を始めようとする学部4年生や大学院修士課程の学生のために、 s 波超伝導の基礎から非 s 波超伝導を含む最近の研究までを連続的に学ぶことができる教科書が必要であると痛感し、そのような教科書を目指して、超伝導の考え方と超伝導研究のおおよその全体像が掴めるように平易に書き著したのが本書である。昔の教科書にも書かれていた s 波超伝導の基本的知識の上に新しく得られた非 s 波超伝導の知識を加え、超伝導の実験的研究を始めようとする学生や研究者に知ってほしい最低限の知識をまとめた。そして、超伝導に関する様々な物理的概念のみならず、強相関電子系の理論に登場してきた物理的概念も直観的に理解できるように努めた。そのため、詳細や例外を省略したところもあるが、まずは超伝導の考え方(本文のストーリー)を理解してほしいと考えたからである。本書は、筆者が東北大学工学部の応用物理学コースで学部4年生向けに行った講義を基にしているので、学部で学ぶ熱力学、量子力学、統計力学の基本的知識を前提としているが、ストーリーの理解を助けるために脚注を多く入れた。脚注には、熱力学、量子力学、統計力学の復習事項、本文のさらにやさしい説明、本文から少し発展した事項、講義で一休みしながらしゃべった余談等が収められている。

本書は以下のように構成されている。

第1章から第5章までに超伝導の基礎的な事項をまとめた。

第2章と第3章では、超伝導状態に現れる様々な物性を紹介した。

第4章では、磁場に対する振舞いを説明した現象論(GL理論等)を紹介し、さらに、超伝導の応用において重要となる磁束の振舞いについても述べた。

第5章では、等方的電子対によるs波超伝導の微視的理論(フォノンを媒介とする電子対形成に基づく弱結合のBCS理論)を紹介し、さらに、それを発展させた強結合の理論、および、異方的電子対による非s波超伝導の微視的理論(スピンのゆらぎや軌道のゆらぎを媒介とする電子対形成を含む)を紹介し、超伝導の発現機構を直観的に説明した。

第6章では、各種超伝導物質における超伝導現象を紹介し、第5章までに学んだ知識を使って理解することに重点を置いた。したがって、第6章は第5章までの知識の応用問題であり、第6章を理解することによって超伝導の基本的知識が読者に確固たるものとして根付くことを期待している。また、低次元の超伝導体において顕著になる超伝導ゆらぎや異方性、および、空間反転対称性のない化合物における超伝導についてもこの章で述べた。

第7章では、室温超伝導を実現するために現時点で考えられる方策を整理して紹介した。

本書では、CGS ガウス(Gauss)単位系を使用した。超伝導の物理関係の論文のほとんどにおいて、この単位系が用いられているからである。なお、MKSA 単位系を基礎とした国際単位系(SI)に慣れている読者のために、一部の式については網掛けでSIの式を併記した。

参考文献については、以下の方針で引用した。まず、新しい超伝導物質の発見に関する論文はできる限り引用した。さらに、新超伝導物質の探索を目指す方のために、発見者による秘話やメッセージが書かれている解説論文を加えた。また、第6章における各超伝導物質については、学部4年生でも比較的容易に理解できると思われる日本語の解説論文を引用した。それゆえ、各超伝導物質における超伝導発現機構に関わる実験論文は、特別なものを除いては引用していない。必要な場合は、引用した日本語の解説論文で調べていただきたい。

現在、超伝導を応用した強力な磁場の発生装置(超伝導磁石)は、実験室だけでなく、医療用のMRI(磁気共鳴画像法)やリニアモーターカー等、様々な分野において不可欠な機器となっている。また、磁場や磁化を高精度に測定できるSQUID(超伝導量子干渉計)も、物性測定のみならず、医療用の心磁計や食品中の異物金属の検査装置等、様々なところで実用されている。しかし、超伝導のより広い応用のために、より高い温度(究極は室温)で超伝導を示す物質の開発が求められていることは確かであ

る。本書の読者の中から、超伝導に興味を持ち、室温超伝導を目指して研究・開発の道に進む方が出てくれば、筆者の大きな喜びとするところである。また、本書は理論的研究をめざす方にとっては十分ではないので、その方には本書を入門書として活用し、より詳細な計算式を含む他の教科書(本書の末尾にあげた参考書を参照)を併用することを勧めたい。

本書の執筆は、長年共同研究でお世話になっている藤森淳先生に勧めていただき、大学の講義で使ったノートを本にまとめる良い機会であると思って気楽にお引き受けしたが、いざ書き始めると、不確かな点が次々と現れ、また、筆者が理解している直観的な説明が真実を曲解してはいないかと不安になることも稀ではなく、思いのほか大変な作業であることがわかった。しかし、電子メールを利用して研究仲間や学会等でお会いしている先生方に相談すると、ほとんどの問題は瞬時のうちに解決され、筆を進めることができた。お陰様で何とか本書の上梓に漕ぎ着けることができた。しかも、メールの交換を通じて筆者自身が勉強できたことは大変ありがたいことであった。ついでに、以下の方々のご支援とご協力に厚くお礼申し上げます。藤森淳、小形正男、遠山貴巳、横山寿敏、土射津昌久、鈴木正継、小林典男、家泰弘、加藤雅恒、藤原明比古、足立匡、工藤一貴、今井良宗、田邊洋一、柳生穂高の各先生には、原稿に目を通していただき、有益なコメントをいただいた。特に、藤森先生には詳細に至るまで懇切丁寧なチェックしていただいた。小形先生と遠山先生には、理論式も丁寧にチェックしていただき、さらに、随所で相談に乗っていただき、直観的な理解の方法もご教示いただいた。また、明石遼介、淡路智、石田憲二、伊豫彰、岩佐義宏、永崎洋、海老澤丕道、大貫惇陸、倉本義夫、黒木和彦、佐久間昭正、櫻井裕也、清水克哉、世良正文、高田康民、田口康二郎、為ヶ井強、土浦宏紀、西尾豊、野島勉、花栗哲郎、髭本亘、廣井善二、藤代博之、前田京剛、町田一成、松田祐司、水木純一郎、水口佳一、椋田秀和、柳瀬陽一、渡辺孝夫の各先生には、ご自身の専門分野に関して丁寧に教示いただいた。内田老鶴圃の内田学社長には、執筆受諾から上梓にいたるまでの長期にわたり温かい励ましとご助言をいただいた。

本書は筆者の長年の研究・教育活動の集大成であるとも言える。そこで、筆者を研究者の道に導き、育ててくださった恩師の田沼静一先生、壽榮松宏仁先生、深瀬哲郎先生、齋藤好民先生に心からの感謝を込めて本書を捧げます。そして、筆者を長年にわたり支えてくれた両親小池平八郎・静枝と妻典子に深く感謝しつつ筆を擱く。

2022年5月

小池 洋二