

まえがき

多数の電子が動き電流を運ぶという電子輸送現象は、最も単純な描像で理解できる固体の物理的性質である。多くの場合、電子を電場あるいは磁場下の古典力学に従う独立した荷電粒子と見なすことができる。しかし、本書の最初に強調するように、電気伝導で代表される固体の電子輸送現象は、本質的に量子力学が支配する現象である。さらに電子輸送現象は、固体中の膨大な数の相互作用する電子によりマクロなスケールで「創発」する現象である。固体は量子力学的波動としての電子の導波路であると考えてよい。光(電磁波)が光ファイバー中を伝播するように、電子も波として固体中を伝播する。実際、ある状況下では、量子力学のプランク定数 h が h/e^2 という形で電流の流れやすさの尺度となる電気伝導度に顔を出す。しかし、電気伝導度は、通常、電子の電荷 ($-e$) と質量、そして電子の数(密度)とで与えられ、その背景にある量子力学は見えてこない。

本書執筆の動機のひとつは、量子力学の原理、例えば、不確定性原理やパウリの原理、がどのように固体中の電子の運動を支配しているのか、そして、量子力学に従い運動している電子が、何故、固体中で古典的な荷電粒子のように振舞うのかという疑問に答えたいということにある。

電気伝導度は固体試料の電気抵抗測定から決定される。電気抵抗測定は固体物性実験の中でも最も基本的な測定法のひとつである。電気伝導度の大きさによって固体は金属、半導体、絶縁体というように分類され、多くの場合、それに対応して材料としての用途が決まる。

それだけではなく、新しい、未知の固体物質が発見・開発されたとき、真っ先に測定すべき物性は電気抵抗率であるといえる。実際、超伝導(1911年)、トランジスタ(1956年)、量子ホール効果(1980年)、高温超伝導(1986年)、グラフェン(2012年)など、固体物理学上の重要な発見の90%以上は電気抵抗測定によりなされたものである。

光はエネルギーと情報をファイバーを通して伝達するのに対して、電子は固体中を伝播してエネルギーと電気を運ぶ(最近では、電子の磁氣的性質を担うスピンの流れ—スピン流も重要な要素と認識されている)。電子がエネルギーと電流をどのように運ぶかは、固体の電子構造と電子間の相互作用、電子と格

子振動などとの相互作用が決めている。相互作用の様子は、電気伝導を調べるだけでわかるものではない。近年は、光電子分光や走査型トンネル顕微分光などの進化した分光手法が、これまで得られなかった詳細な固体中の原子レベルのミクロな電子情報や運動量空間の情報を与えてくれる。これらの進化した分光法を使えば固体のすべてが理解できると錯覚しがちである。最初に述べたように、固体の電気伝導は「創発」現象であり、個々の原子レベルで起こることとはかけ離れたものである。また、電子間の相互作用が非常に強くなると電子はその個別性を失う。高温超伝導銅酸化物の正常状態の電気伝導がその代表的な例である。その電気伝導メカニズムは、高温超伝導メカニズムと同様、発見後 30 年経とうとしている今もわかっていない。若い読者が近い将来この問題に挑戦するとき、多少ともその手助けになるようにすることも本書の狙いのひとつである。

本書の内容の多くは、1991 年から 2002 年の間、東京大学工学部物理工学科、同大学院超伝導工学専攻、その後、東京大学理学部物理学科(2003-2013 年)で、専門課程学生、院生に向けて行った固体物理学関連の講義に基づいたものである。物理学の基礎を学んだ学生にとって固体物理学でわかりにくい事柄、従来の固体物理学の講義や市販の専門書に対して学生が感じる物足りなさなど、学生、院生からの多くのフィードバックが内容に反映されている。そのため、本書では、典型的な項目の選び方と記述を極力避け、読者が当然持つであろう疑問に正面から答えるよう心がけた。

また、米国コロンビア大学とライス大学での大学院生向けの特別講義(2012-2013 年)、日本、中国、韓国の院生たちとのワークショップ(2008-2013 年)での交流から、どの国でも最近の学生たちが半導体物理学の基礎的事柄、例えば、光速に近い速さで運動する電子の質量が増大するという特殊相対論効果を知る機会をほとんどもたないことを知った。本書では、これらのことも随所に盛り込んである。

最後に、本書の執筆を薦めていただき、初期の原稿に対して適切なお批判、ご指摘をいただいた東京大学大学院理学系研究科の藤森淳教授に感謝を申し上げます。

2015 年 11 月

内田 慎一