

まえがき

グラフェンは 21 世紀以降の物質科学でもっとも盛んに研究された物質の 1 つである。物理学の観点から見たグラフェンの大きな特徴は、その電子が「質量のない Dirac 方程式」に従うことであり、これが通常の金属と異なる様々な特異な性質の原因となる。近年になり Dirac 粒子やそれに類する非従来型の電子構造を持つ物質が数多く発見され、重要な分野の 1 つとなったが、グラフェンはその中でも最も基本的な物質に位置づけられる。また高い電気伝導性、熱伝導性を持つ究極の薄膜として幅広い応用可能性が期待されており、次世代技術を担う基幹物質の 1 つとして精力的に研究されている。

グラフェンの研究の歴史は古く、その起源はグラフェンの積層系であるグラファイトに遡る。グラフェンの電子が Dirac 粒子の性質を持つことは、1940 年代 Wallace によってグラファイトのバンド計算の過程で発見された。1970 年代以降はグラファイト層間化合物の研究が盛んになり、現在のグラフェンの研究につながる重要な仕事となされている。1990 年代グラフェンを丸めたカーボンナノチューブが飯島によって発見され、その流れで当時まだ存在しなかった平面グラフェンの詳しい物性が理論研究者によって少しずつ調べられるようになった。この時期に行われた日本の安藤や藤田、若林らによる先駆的な仕事は、その後の研究に多大な影響を与えた。グラフェンの研究が世界中で爆発的に広がるのは、2000 年代に入って Novoselov と Geim、また Philip Kim らによって単層グラフェンの革新的な実験が行われて以降である。筆者がこの分野に参入したのはちょうどその頃で、なにか新しい流れが始まることが予感されたが、その後の 2 次元物質分野の隆盛、またグラフェンから端を発した Kane と Mele によるトポロジカル絶縁体の発見を経て、物性物理学の勢力図が大きく変わっていくことまでは想像できなかった。グラフェンの研究が一段落したと思われた 2018 年、Jarillo-Herrero らによってねじれ 2 層グラフェンの超伝導が発見され、世界中の研究者を巻き込んでモアレ物質が盛んに研究されるようになったのも、新たな驚きであった。

本書は、ここ 20 年で大きく発展を遂げたグラフェンの物理学を主に理論的側面から解説する教科書である。グラフェンの物理学は、Dirac 粒子、Berry 位相、エッジ状態、バンドトポロジーといった現代の物性物理に頻出する概念と密接に関わる。これらの多くは 20 世紀に書かれた標準的な固体物理の教科書にはほとんど載っていないものであり、大学院生が新しい研究をするためには、トピックごとに解説記事や原著論

文を漁って身につける必要があった。本書はグラフェンだけでなく、こうした新しい内容の基本的な部分も習得できるように書かれている。また同時に、グラフェンの物理を理解するには、電気伝導、Boltzmann の輸送理論、Landau 準位、量子 Hall 効果といった従来からある固体物理学の基礎知識の習得も必要となる。最近の学生は学ぶべき新しい内容が増えた分、こうした基礎をじっくり勉強することに時間が割けなくなっていると感じる。この教科書では、グラフェンに限定せずにできるだけ一般的なところから解説して、基本的内容を一冊の中である程度学べるように心がけた。もちろん収録できる内容には限界があるので、定番の教科書と合わせて読んでほしい。本書がグラフェンを通して古典的な物性物理と最新の物性物理の間の橋渡しになることを期待している。

本書が想定している読者は、主に大学院修士課程以降の学生から物理の職業研究者(理論、実験問わず)である。標準的な学部の量子力学と統計力学、Bloch の定理などの基本的な物性物理学を習得していれば、それほど難なく読み進められるように書いたつもりである。物理の教科書では、途中の式変形を追うことができず、1箇所ですぐ終わる時間や、また読むことを挫折してしまうことがしばしばある。本書では、読者が実際に手を動かして全ての式が導出できるように、脚注を使いながら、なるべくロジックを省略せずに書くことを心がけた。見たことはあるが証明がよくわからない式など、自分自身で導出することで物理のより深い理解につながり、また新しい問題への応用にも役立つはずである。

本書の構成は以下の通りである。第1章ではグラフェン研究の歴史を概観し、またグラフェン以外の2次元物質を簡単に紹介する。第2章では固体物理の基本を復習したのち、本書の核となるグラフェン電子の Dirac 方程式を導出する。またグラフェン電子における乱れの効果や、不純物に対する特異な散乱効果を紹介する。第3章で電気伝導と光学特性を取り上げる。一般的な Boltzmann の輸送理論および線形応答理論を出発点として、通常の電子系とグラフェン電子両方について計算を行い比較しながら、グラフェンの特異性を議論する。第4章では磁場中のグラフェン電子の性質を詳しく解説する。磁場中の電子の半古典論、および量子力学による Landau 準位の導出を行い、量子 Hall 効果、軌道反磁性を議論する。第5章ではグラフェンからいったん離れ、Berry 位相の概念を導入する。Bloch 系に適用して、異常 Hall 伝導度や Wannier 軌道とのつながりを見る。第6章では、グラフェンから派生した理論モデルである「質量のある Dirac 模型」を導入する。これは異常 Hall 効果、トポロジカル絶縁体に対する最も基本的なモデルである。第7章ではグラフェンナノリボンを取り上げ、端に局在したエッジ状態とそのトポロジカルな起源を解説する。第8章ではグラファイト積層構造を持つ2層および多層グラフェン、3次元グラファイトの電子の性

質を取り上げる。第9章では、ここ最近で著しく発展したねじれ2層グラフェンの性質を詳細に解説する。最後に汎用性のある一般的なモアレハミルトニアン の導出法を収録した。

この教科書は、主としてグラフェンの Dirac 電子の性質とそのトポロジカルな側面に重点を置いたが、グラフェンの研究分野はすでにあまりにも広範に渡っており、それらを網羅するのは著者の力量からも不可能である。本書では扱わなかったが重要な内容として、グラフェンのフォノンの性質、熱的性質、機械的性質、原子や分子の吸着、また種々の応用研究があげられる。これらは数多くある文献を参考されたい。

本書の執筆にあたっては多くの方にご協力を賜った。大阪大学の浅野建一氏は原稿を通読頂き、数々の有益なアドバイスを頂いた。東京大学の森本高裕氏には集中講義の内容の一部を参考にさせて頂いた。大阪大学の川上拓人氏、藤本大仁氏、中辻直斗氏、人見将氏、玉置弦氏、谷天太氏、山本和輝氏、城谷宇映氏、五十嵐勇治氏、河岡巧真氏、本間真理氏には文章と計算の綿密なチェックおよび図の作成を手伝って頂いた。これら全ての方々に深く感謝申し上げたい。最後に、執筆の機会を与えて頂き、また原稿を入念に読んで頂いた藤森淳先生、またなかなか執筆の進まない中最後まで激励して下さった内田老鶴圃の内田学氏に心から感謝申し上げたい。

2023年1月

越野 幹人