

序 文

現代の文明社会，特に産業・情報社会は，エレクトロニクスの発展によるところが大きい．エレクトロニクスは，20世紀中葉における半導体トランジスタの発明に端を発し，微細加工技術の進歩と，物質の多様な特性を活用することによって大きく発展してきた．エレクトロニクスは，文字どおり物質中の電子を利用する技術である．近年，電子のもつ特性をさらに活用し，新しい機能を実現させる「スピントロニクス」という分野が確立された．本書では，その「スピントロニクス」について，その基礎から応用までを，初学者を対象としてわかりやすく解説する．

スピントロニクスには半導体を基盤とするものと金属を基盤とするものがある．現在では明確な境界がなくなりつつあるが，本書では，金属を基盤としたスピントロニクスを中心に記述する．スピントロニクスでは，試料やデバイスを構成する物質の性質（物性）が重要となる．金属における物性は，その物質中の電子状態によって決定される．その電子状態がどのようにしてスピントロニクスにおける基礎的性質をもたらすか，という視点にたって本書を執筆した．第1章ではスピントロニクスとはどんな分野か全体を俯瞰し，第2～4章で磁性，電子状態および電気伝導に関する基礎的内容を記述し，第5章でスピントロニクスの本論に入る．理論の詳細の一部は付録に記した．

第1章では「スピンとは何か」から始め，スピントロニクスの発端とその進展について，ナノテクノロジーとの関係を示す．最近開発された具体的素子についても言及する．第2章では，磁性の基礎的なことがらと，局在スピン系の基礎理論について復習する．スピントロニクスにおいては金属磁性が中心となるため，この章の内容は必ずしも必要ではないが，磁性入門として最小限の内容を用意した．詳しくは磁性に関する教科書を学んでいただきたい．第3章で

は、磁性体の電子状態について述べ、いくつかの具体的物質の電子状態と磁性についてふれる。スピントロニクスではさまざまな現象の物質依存性が重要となる。デバイスの作製にどのような物質を用いるかが、そのデバイスの性能を決定することになるからである。第4章では、電気伝導を取り扱うための理論を簡単な例を交えて紹介する。つづいて、多少高度になるが、線型応答理論に基づいた量子論的取り扱いについて説明する。ここではグリーン関数を用いた電気伝導の公式化を取り扱うため、その準備としてグリーン関数の初歩的事項についても簡単に説明する。第5章ではスピントロニクスに関する現象を、第4章までに述べた基礎的な理論に基づいて説明する。まず、微小な磁性体におけるスピンに依存した電気伝導をどのように考えるのか、またそのうえで重要となることについて述べる。すでに述べた磁性体の電子状態の特徴、電気伝導の理論をもとにして、巨大磁気抵抗効果とトンネル磁気抵抗効果がどのように理解されるかを示す。さらに、半導体へのスピン注入、スピン軌道相互作用に起因する電気伝導現象を述べ、つづいてスピン流とスピントルクおよび電流による磁化反転について述べる。最後に、応用には直接かわらないが興味深い現象や、現在進行中の研究にすることがらを簡単に記述した。巻末には、付録Aとして電気伝導度の具体的計算例を載せた。さらに、記号一覧を付録Bに記載した。スピントロニクスに関係する分野は多岐にわたる。ある分野で用いられる記号が他の分野では別の意味をもつ場合がある。記号一覧ではこの点にも注意を払った。また、付録Cには周期律表を記載した。スピントロニクスにおける現象の物質依存性の理解には周期律表が不可欠である。

本書で用いる単位系は、慣習的に用いられるものを使用している。場合によっては、CGS ガウス単位系と MKSA 単位系を併用する場合もある。磁性に関する単位系については、本シリーズの第1巻である『磁気工学入門』を参照していただきたい。なお、単位換算一覧表を付録Dに記載した。また、参考文献の引用には偏りがある。その他の論文については、多数の総説があるのでそれらを参照していただきたい。

本書は実験・理論を問わず、これからスピントロニクスの研究に取りかかろうとする学部4年生から修士1年生を対象としている。本書を学ぶにあたっては、学部レベルの量子力学と統計力学の初歩を学んでいけば十分である。スピ

ントロニクスは、磁性と電気伝導とナノテクノロジーがかかわる研究分野である。そのため、本書は固体物理学のなかの多くの分野と関連する。固体物理学の教科書や専門書を巻末に紹介しているので、必要があればこれらの書物をあわせ読んでいただきたい。

本書を執筆するにあたって、多数の方々のお世話になった。日本磁気学会の出版ワーキンググループには、本書の内容をはじめ、企画全体についてご指導をいただいた。また、本書の内容は、執筆者の1人である井上が以前日本応用磁気学会誌に執筆した解説シリーズの内容をもとに、最近の研究内容とスピントロニクス全般を加えたものである。解説シリーズの執筆の際には、壬生功氏（現・名工大教授）にお世話になった。また、共立出版の方々、特に松本和花子氏には執筆・編集に関してたいへんお世話になった。お礼申し上げたい。最後に、本書は2名の連名の著書にもかかわらず、各項目の具体的内容については井上が自由に執筆させていただいた。感謝申し上げます。

2010年4月

井上順一郎・伊藤博介