

## まえがき

インターネットの普及とともに、情報化社会が驚異的に進展している。近年、クラウドコンピューティングという言葉が良く聞かれる。これは、従来は手元のコンピュータで管理・利用していたようなソフトウェアやデータなどを、インターネットなどのネットワークを通し必要に応じて利用する方式のことである。これによりすべてのものがインターネットに繋がる、IoT(Internet of Things)時代が到来する。このような時代には、自動車や医療機器、電気・水道・ガスなどのライフライン、交通インフラといった、生きるために欠かせないシステムがインターネット経由で管理・制御される。それに伴い、IoTを通じて集まる膨大なデータを管理・処理することが求められる。

情報化社会は、半導体と磁性体で支えられている。例えば、パソコンの中核部は、情報を処理する半導体を用いたプロセッサと、情報を蓄える磁性体(磁石)を用いたハードディスクドライブ(HDD)からなる。半導体では電子の電荷(電子が電気を帯びている性質)を利用し、磁性体では電子のスピン(電子が小さな磁石である性質)を利用して情報を蓄えるので、同じ電子の異なる性質を別々に利用していることになる。同じ電子なのになぜ半導体と磁性体に分けて使用しなければならないのか、と疑問に思われるかもしれない。実は、電荷は長期に渡って情報を蓄積することができず、また、スピンを情報処理に利用するためには、電子のもつ2種類のスピン(通常、上向き(↑)スピンと下向き(↓)スピンの表示)を区別して検出・制御する必要があり、最近までその手法を見出せなかったからである。なぜなら、バルク材料では、電子が伝導する間に↑スピン(↓スピン)が↓スピン(↑スピン)に緩和してしまい、↑スピンと↓スピンのチャンネルを区別して制御できないからである。しかし、ナノテクノロジーの発達によりそれを制御できるようになった。電子のもつ電荷とスピンを同時に利用することで実現されるエレクトロニクスを、スピントロニクス(あるいはスピエレレクトロニクス)と呼んでいる。

スピントロニクス誕生の発端は1988年に発見された、強磁性金属のFeと非磁性金属のCrのそれぞれナノメートルの厚さからなる、超薄膜積層構造(人工格子)における巨大磁気抵抗(giant magnetoresistance, GMR)効果であった。GMRの発見はHDD用高感度読み出しヘッドの開発をもたらした。HDDの超高密度化への道を大きく拓いた。この功績により、GMR効果の発見者であるP. GrunbergとA. Fertに2007年、ノーベル物理学賞が授与された。スピントロニクスは現在、各種磁気センサ、HDD用読み出しヘッド、不揮発性の磁気抵抗効果型ランダムアクセスメモリ(MRAM)などに実用化されている。これらは金属をベースにしているが、スピントロニクスは今日、半導体系やカーボンナノチューブなどの分子系にまで広がりを見せており、新しい物理現象・材料・デバイスの創製に関する研究が世界的規模で展開されている。スピントロニクスの研究には従来の磁性材料技術に加え、ナノテクノロジーが必須になる。ナノサイズの制御は1次元的には人工格子などの薄膜作製技術で、2次元、3次元になると超微細加工技術や自己組織化技術が必要になる。スピントロニクスの登場により、磁性体の微細加工技術が大きく革新された。

教科書は、すでに確立された内容を読者になるべく理解しやすいように説明することに重点がおかれることから、本書は主として、評価が確立している金属系スピントロニクスを中心に、物理現象から材料、デバイスまでを記述している。第1章ではスピントロニクスの概要を予め知るため、学問として誕生するまでの経緯を歴史的に概説する。第2章では磁性に馴染みのない読者がスピントロニクスを理解しやすいように、磁性の入門として金属磁性を中心に基本的な事象を解説する。第3章では第4章以降を理解するために必要な、スピントロニクスに関わる基礎的なスピン伝導現象を説明する。第4章ではスピントロニクスの基盤であるGMRとトンネル磁気抵抗(TMR)について、第5章ではスピントロニクスのキー材料であるハーフメタルについて、それぞれ詳しく説明する。第6章では、スピントロニクスデバイスを実現するための必須の技術である、磁化反転法について解説する。第7章ではスピントロニクスデバイスについて記述する。スピントロニクスにおける物理現象がどのようにデバイスに結びつくかを理解するため、まず、実用化されているHDDとMRAMについて、動作原理、開発の現状、並びに今後の動向について解説し、その後、

将来に向けたデバイスとして、スピントロニクス、スピン共鳴トンネル効果素子および半導体スピントロニクスを取り上げ、それぞれ基本的な事柄と課題を中心に概説する。第8章では、スピントロニクスの新しい展開として期待される、熱とスピン流について概説する。

筆者は過去いろいろな磁性材料・デバイスの開発に関わり、最近の20年間は高感度GMR材料の開発を皮切りに、金属系スピントロニクスの研究に広く携わってきた。本書はその経験を元に執筆したものである。スピントロニクスは若い学問であるとともに領域のすそ野が広く、いまだ十分に確立されていない。また、必ずしも重要性が共有されていない事象やデバイスが存在するとともに、今後の展開が期待される未開拓の領域も多く存在する。そのような新しい学問の全容を体系的に教科書として記述することは筆者の能力を超えており、また現時点での体系化の意義も疑わしい。本書は、ある程度確立された内容を物理現象、材料、デバイスに渡って整理・体系化し、スピントロニクスの入門書としてまとめたものであり、量子力学と電磁気学を学んだ学部学生が理解できることを念頭に、わかりやすく解説することに努めた。新しい学問では当時の研究状況を知ることも貴重であることを鑑み、所々で筆者の体験を交えて記述している。本書がきっかけとなって若い読者がスピントロニクスに関心をもち、さらにはすでにスピントロニクスの研究に携わっている若手研究者が一旦立ち止まり、今後の展開を考える一助になれば望外の喜びである。

本書の刊行にあたり、堂山昌男先生、小川恵一先生、北田正弘先生に執筆の機会を与えていただいた。また北田正弘先生には、執筆の過程で適切なコメントを頂いた。内田老鶴圃の内田学氏には、出版の全般に渡って大変お世話になった。本書を書き上げることができたのは、これらの方々のご厚意とご支援によるものであり、ここに深謝致します。

平成29年1月

猪俣 浩一郎