

まえがき

人はなぜ研究をするのであろうか？ 面白いからである。それが材料の開発につながればなおさらである。マテリアルズサイエンスの一分科に相変態という興味深い分科がある。相変態については本文の1章で詳しく述べるが、温度や応力のような熱力学的変数を変えていったとき、ある臨界の温度や応力で結晶構造や結晶の状態が変化することを相変態といい、これに絡んで種々な面白い現象が現れる。特に無拡散で、相互に連携した原子の変位によって引き起こされるマルテンサイト変態においては、この本のテーマである形状記憶効果や超弾性等も現れ、いわば機能性材料開発の宝庫といってもよい。これらの興味深い現象はマルテンサイト変態の特性によって引き起こされるものであるから、これらを理解するためには、マルテンサイト変態そのものを基礎から深く理解することが必要になる。

このような観点から本書は大学院生並びに若い研究者を対象に、マルテンサイト変態の基本的な考え方、並びにそれに基づいて形状記憶効果や超弾性のような特異な現象をできるだけわかりやすく説明しようとしたものである。マルテンサイト変態は固相中で原子の拡散を伴うことなく起こる協力現象であるので、この問題に対するアプローチも結晶学的、(統計)熱力学的、固体物理的(弾性論、電子論、フォノン)、材料力学的等等種々なものがあり、それぞれ有用であるが、協力現象としてのマルテンサイト変態の特徴は結晶学的な面に現れやすく、この方向からの理解が最も進んでいる。このため本書でもこの方向からのアプローチを中心に据えている。協力現象であるために独特の考え方があり、学問としては割と敷居の高い学問ともいえると思うが、基本の考え方についてはできるだけ丁寧に説明するように心がけたので、最初の敷居を乗り越えていただければ後は他の学問同様スムーズに理解を広げていただけると思う。この変態に対しては線型代数を駆使した「マルテンサイト変態の現象論」と呼ばれる優れた理論がある。この理論はマルテンサイト変態に伴う有限の歪を厳密に解く理論であるから、簡単とはいえないが、この理論抜きにマルテンサイト変態を語ることはできないので詳しく述べた。この部分を辛抱強くフォローしていただければ、後の理解が深まると思う。実際この理論を用いれば、マルテンサイト変態の際の母相-マルテンサイト相の界面の指数、変態に伴うシアー量、母相とマルテンサイト相の結

晶方位関係等が定量的に求められる画期的な理論なのである。材料学分野広しといえどもこれほど高度に、定量的に扱える理論はそう多くはないであろう。というわけで結晶学的アプローチを中心に据えてはいるが、もちろんそれ以外の見方（例えばマルテンサイト変態の起源、熱力学やマルテンサイト変態の前駆現象等）も取り入れ、マルテンサイト変態の特徴全体を見渡せるよう配慮したことは目次からも理解していただけたと思う。このような理解の上に立って形状記憶効果や超弾性の問題を詳しく述べた。これらはいわばマルテンサイト変態の応用といってもよい問題だからである。なおマルテンサイト変態の問題にしても形状記憶効果や超弾性の問題にしても、マルテンサイト中の双晶が密接に絡んで重要な働きをしている。このため Bilby-Crocker の理論を用いて双晶の問題を詳しく論じているのも本書の特徴といってよいかもしれない。もう一つ注目すべき点は、12.5 節で述べる「マルテンサイト変態と点欠陥の相互作用」である。マルテンサイト変態は無拡散で起こる現象であるから時効とは関係なさそうに見えるが、実は一部の合金で時効効果が見られており、その結果現れるゴム弾性的挙動は長年未解決の難問であったが、これも「マルテンサイト変態と点欠陥の相互作用」として理解できるようになったというわけである。つまりマルテンサイト変態に絡む多くの問題が、物理冶金学の枠の中で理解できることを示すのも本書の特徴といってよいであろうか。ただし記述は本書の性格上網羅的ではないことをお断りしておく。

ここで本書の表題について一言触れておきたい。形状記憶効果については 12 章で詳しく述べるように、マルテンサイト状態にある試料を変形しても、 A_1 温度という母相が安定な温度域まで加熱したとき逆変態によって形状が回復する現象を指しており、超弾性やゴム弾性的挙動とは区別している。しかし現象だけ見れば超弾性やゴム弾性的挙動でも応力除荷で形状は回復するわけだから広い意味ではこれらも含めて形状記憶効果と言ってもおかしくない。そういうわけで表題につけた「形状記憶効果」は後者も含めた広い意味での言葉であることをお断りしておく。

本書を読むに当たっては以下のことを考慮されると有益と思われる。(1) 大学の教養部で習った線型代数の復習。これは以上からおのずと理解されよう。ただし本書ではその復習も兼ねた形で書いているので、この本だけでもほぼ理解できる書き方になっている。(2) 逆格子の理解。結晶学的な解析に当たっては結晶の面や方向が頻繁に出てくるが、面を数学的に扱うには逆格子が便利であり、電子回折図形の解析には逆格子の理解が不可欠である。(3) ステレオ投影の理解。ステレオ投影というのは、3次元の関係を2次元に投影してグラフィカルに扱う手法である。昨今ではパー

ソナルコンピュータが身近な存在になっていて、数値解析が容易にできるのでグラフィカルな方法など不要と思われるかもしれないが、一般に結晶学的な計算は煩雑で誤りを犯しやすいので、グラフィカルな方法で正しいことを確認しながら計算を進めるのが賢明である。その上実験結果や計算結果はステレオ投影を使って表示することが多いので、ステレオ投影を身につけることをぜひお勧めしたい。詳しくは8章で再度述べる予定である。

この本の執筆に当たって（この分野の理解も含めて）多くの方々のお世話になった。そもそも筆者がこの分野に分け入ることになったのも阪大産研の清水謙一先生の助手になったからであるし、最初はマルテンサイトのマの字から、電子顕微鏡の操作も手ずから教えていただき、良いスタートを切ることができた。同様にイリノイ大学の故 Wayman 先生にも、院生時の指導教官として、またその後同大学の客員 faculty staff として研究三昧の日々を送らせていただいた。例えば Wayman-Shimizu がリードした形状記憶合金研究の勃興期にこの分野で研究できたのは幸運であったと思う。当然のことながら二つの研究室で若い同僚や院生諸君と一緒に研究し、議論したことが本書の元になっている。同様のことは筑波大学に移って自分の研究室を立ち上げ、若い仲間や院生、学生諸君と一体になって熱心に研究に明け暮れた頃のことを懐かしく思い出される。この他学外の研究者との共同研究並びに企業の研究者との共同研究も数多くあり、多くのことを教えていただいた。本書で述べたマルテンサイト変態に対する理解もこのような共同研究を通して身につけたものである。自分が学生だったころ、数学や物理で美しい定理を習い、わかったつもりでもいざ試験をしてみると意外にできなかつたりして、実はよくわかっていなかったのだという苦い経験を持っているのは筆者だけであろうか？ やはり学問は自分の身近な問題の解明を通して学んでいくものであると常々感じている。そういう意味で以上の方々には心からお礼申し上げる次第である。

実は本書執筆のお誘いをいただいたのは筆者がまだ筑波大学で教鞭をとっていた頃である。気軽に執筆を引き受けたものの、当時は極めて多忙でとても手を付けられる状況ではなかった。定年後になれば時間も取れようと思ったが、その後も研究に絡み、ついつい先延ばしにして打ち過ぎてしまった。それが数年前に監修者の一人である北田先生から原稿はもうできましたかとの賀状をいただいた。もうこの話は半ばなくなったと思っていたのであるが、それならと思い直して本気で書き始めた。今度は日本語だし、その気になればすぐ書けるだろうと思ったのであるが、意外に時間がかかってしまった。論文と違って本の場合は全体の整合性を取るのに時間がかかるから

である。執筆を始めてからは（独）物質・材料研究機構の任曉兵教授と鈴木哲朗先生（筑波大学名誉教授）、並びにいわき明星大学の中田芳幸教授に時に応じて議論の相手をしていただいた。また本書の図表の整備には任研究室の Messrs. Jinghui Gao, Zhen Zhang, Drs. Kang Yan, Jian Zhang のご協力をいただいた。深くお礼申し上げます。次第である。また内容については監修者の北田正弘先生並びに堂山昌男先生に眼を通していただき、種々貴重なご意見をいただいた。できるだけ監修者の意向に沿うようにしたつもりであるが、一部ご海容いただいた部分もある。深く感謝する次第である。この他唯木次男先生（大阪女子大学名誉教授）並びに村上恭和准教授（東北大学多元研）にも全体の通読をお願いし、種々貴重なコメントをいただいた。お陰で元の原稿にあった誤りもかなり回避できたことと思う。これらの方々に心からお礼申し上げます。次第である。

2012年8月

大塚 和弘