

まえがき

現代塑性論としての FTMP 場の理論を一言で表すならば、**材料の賢さを認める理論**と言えるだろう。金属材料は、とくに弾性変形を超えて塑性変形の領域に入ると、破壊現象と絡みながら非常に賢い振る舞いを示す。変形モードによっては、100% を越える変形を許容したり、突然の破壊を避けるために複雑な組織を形成したり、またき裂近傍でもその痕跡が見られることが少なくない。最も重要なのは、金属材料の塑性に対する理解をこのように捉えることで、従来の理論の不足点が浮き彫りになり、理解が格段に深まる点である。

現実世界においては、各種強度評価や成型加工などでその性質を縦横無尽に活用することが求められる。そのため、こうした理論面での不十分さを解消することは非常に重要である。実際、潜在的・顕在的な問題意識は、マルチスケールと称される研究例が無数に存在していることから明らかであるが、残念ながら本来の目標達成にはまだ遠い道りがあると言わざるを得ない。

この「賢さ」の鍵を握るのが、**変形誘起による秩序形成・発展**であり、エネルギーの散逸を伴いながら破壊を避けつつ変形を補完する役割を担っている。とくに、結晶粒内で形成される**転位セル組織**に代表される転位下部組織が最も重要な役割を果たしており、ほぼすべての金属材料・合金において様々な変形条件下で普遍的に観察される。しかし、従来の塑性論ではこの変形誘起による秩序形成をいっさい再現することはできないことが知られている。また、転位セル組織などの秩序形成に関連する観察結果や実験研究は数多く存在するが、それらが計算力学を含む力学研究において具体的に対象となることは非常に少ないのが現状である。逆に言えば、この側面を簡潔に表現し、数値的に再現することができれば、これまで取り組むことが難しかった様々な基礎的・実践的課題に本格的に取り組むことが可能となり、その体系化ができれば、従来の塑性論とは一線を画す新たな塑性論が確立されることになるだろう。

このような進展をほぼ完全に可能にするのが、本書で取り上げる現代塑性論としての FTMP 場の理論であり、そのための最も重要な概念が、本書において材料が感じる「**違和感**」と例えられる**不適合度テンソル**である。極言すればこの概念を、その位置付け、役割、使い方、能力、そして評価法を理解することが本書の究極的な目標である。そのうえ

で改めて塑性論というものを考えてみていただきたい。

塑性論は弾性論に比べ、概念の展開や理解において複雑であり、多くの背景知識や前提知識を必要とする。それにも関わらず、そのための表現や記述が不十分であり、学ぶ者にとっては非常に難解な学問に感じられることが多い。この不十分さを補うためには、マルチスケールのアプローチが不可欠である。しかし、そのアプローチにおいて頼りにすべき転位論は難解であり、転位論を完全にマスターしたとしても、塑性全体を完全に理解したことにはならないという意味でも、単独ではやはり不十分である。これもまた、学問の厳しさを象徴するものと言える。とくに、変形誘起で生じる転位下部組織については現象論を越えてほとんど何も言うことができず、これも大きな課題として残ったままである。一方、変形理論の基盤となる連続体力学は、テンソル解析の言語で表現されており、その習得は決して容易ではない。そのうえ、枠組みを少々拡張した程度ではマイクロ現象の十分な記述はままならず、すぐに限界を迎えてしまう。何よりも、これらを順を追ってすべてを学ぶためには、時間がいくらあっても足りず、たとえ時間をかけて学んだとしても必ずしも正しいゴールにたどり着く保証はない。

これらの理論や概念を学んでおくことはすべて塑性をマルチスケールの観点から議論する上で重要かつ不可欠な要素であるが、あくまでも基礎的な部分に過ぎない。これらをクリアした先にこそ、私たちが真に学ぶべき内容や、新たに考え出し、築いていくべき事項が無数に存在している。そのため、これらを早急に解決し、次のステップに進む必要がある。

こうした過酷な事情に鑑み、本書では、極力目的・ゴールを先に示し、かつ習うより慣れよ式の立場を取ることを心がけた。そのために犠牲にせざるを得なかった部分も少なくないことをご理解いただければと思う。内容は多岐にわたるが、その大部分は学部三年生の「弾性力学」および「塑性力学」で実際に教えている内容であり、アドバンス的な内容は大学院科目「マルチスケール固体力学」で扱っている。より深い部分は研究室のゼミにおいて教授しており、当該分野で研究を進めるために必要な基礎概念も含めている。

また、マルチスケールの理論は実際に適用してこそその本領が発揮され、そのありがたみが理解できるため、実際の応用例をやや詳しく紹介している。場の理論の基盤を成す他の二つの場の理論である、ゲージ理論と場の量子論、については紙面の都合で掲載していない。これらの深い内容は、通常の講義では基本的に触れない部分であり、FTMP 場の理論、その中でも不適合度テンソルがなぜそこまで有効であり得るのかを真に理解するための重要な背景もしくは基盤となる。本書では、まず冒頭で古典・近代・現代という位置

付けで、従来の現象論的塑性論から議論を始め、それ以降の展開へと繋げている。

本書は、近刊の拙書“Field Theory of Multiscale Plasticity”の翻訳版ではなく、最近の知見も含んだ独立した内容となっているが、同書の副読本的な役割も果たしている。

2025年7月

長谷部 忠司

本書の構成

次図に本書で提供する内容についての鳥瞰図を示す。ここでは、想定レベルを★の数で示している。すなわち、

なし：学部3年生～

★：学部中級および大学院

★★：学部上級および大学院中級

★★★：大学院上級および一般の研究者中上級

となっているので、参考にされたい。

参考のために、神戸大学における内容を以下に示しておく。

- ・学部3年生前期「弾性力学」

第2章 2.1(2.1.1, 2.1.2の前半, 2.1.3)

(これに境界値問題の解法として“応力関数法の概要”と“有限要素法の基礎”)

- ・学部3年生後期「塑性力学」

第1章 1.1(1.1.1～1.1.6)1.2(1.2.1～1.2.5) 第3章 3.1～3.4 第4章 4.1

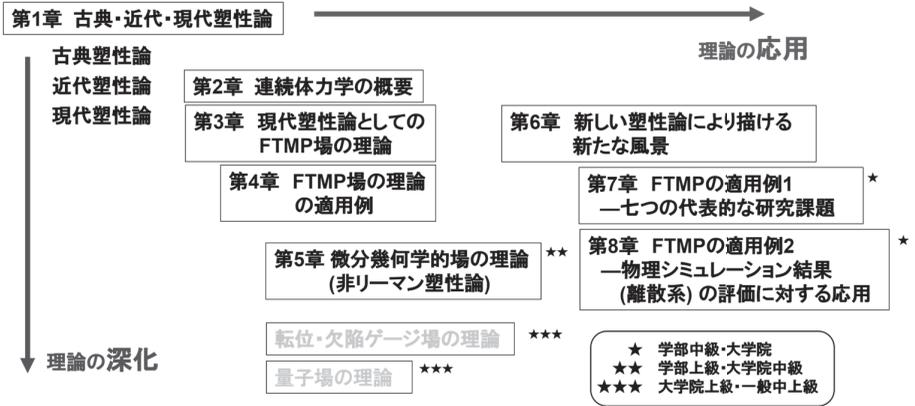
- ・大学院修士課程(博士課程前期)「マルチスケール固体力学」

第3章 3.1～3.4 第4章 4.1～4.5 第5章 5.1～5.4(の抜粋)

第6章 6.4 第7, 8章 数例を抜粋

- ・大学院博士課程(博士課程後期)「材料機能形態論」

転位・欠陥ゲージ場の理論, 量子場の理論(本書では取り扱わない)



本書の鳥瞰図