

まえがき

この教科書では、プレートテクトニクスをはじめ多くの地球科学現象を理解するのに必須の基礎的物理過程を扱う。これらに対して最適のタイトルが「ジオダイナミクス」(Geodynamics) であると信じる。この教科書の内容は、地質学・地球物理学・数学・化学・工学を学ぶ多様な学生に対して行われた、コーネル大学およびUCLAでの講義を基にしたものである。読者の対象は専門課程の学部学生から大学院学生までであった。

アプローチ

題材の多くは、複雑な数式をなるべく使わずに説明する。原則として、物理的な原理を理解するのに必須ではない数学的定義は導入しない。例えば、弾性論や流体力学の章ではテンソルに関する解説は省略した。テンソル表記法はこれらの地球科学の諸課題には不要であろう。一方、偏微分方程式を解くことはこの分野では欠かせない。熱伝導や固体・流体力学などの地球科学上の問題を解くには、ラプラス方程式とかボアソン方程式、重調和方程式、拡散方程式など、古典的な偏微分方程式を解くことが必須である。これらの方程式はすべて、その背景となる地球科学の第一法則から導かれるものだ。本書ではまた、固体の粘性率、熱膨張率、比熱、浸透率などの物性値の基本的な解説を行う。さらに、熱輸送、ニュートン流体・非ニュートン流体の挙動、弾性薄板の屈曲、重力異常の解釈、を研究する上での基礎概念を詳解する。それにより、読者はとくに弾性体に関するフックの法則、熱伝導に関するフーリエの法則、間隙流体移動に関するダルシー則について、深く理解することができるはずだ。

第1章ではプレートテクトニクスを復習する。物理・化学・工学系の学生に対して、後続の章で扱う項目を理解するための地球科学的な予備知識を提供す

ることが目的である。地球科学系の学生にとっても、地質学、地震学、古地磁気学的な観測結果を概観できるメリットがあるだろう。本章ではまた、地球以外の太陽系惑星や衛星の地質・地球物理的特徴についても概観する。第2章では応力と歪^{ひずみ}の概念を導入し、地殻内での測定方法などを論じる。宇宙からの測地観測により、地殻変動による地表歪の理解が飛躍的に進んだ。人工衛星による全球測位システム(GPS)と干涉合成開口レーダー(InSAR)のデータを紹介する。

第3章では線形弾性論の基礎を学ぶ。薄い弾性板のたわみを取り上げた上で、リソスフィアのたわみの問題に適用する。第4章ではおもに熱伝導理論を扱い、大陸地殻や大陸・海洋リソスフィアの温度構造を推定する。対流による熱輸送理論は、マントルの温度を推定するのに用いられる。表面での熱流量測定値を概観し、理論に照らして解釈を行う。地球表面からの放熱の熱源が何かを解説する。マグマの固化・噴出した溶岩流の問題も扱う。さらに拡散的侵食や堆積作用に関するカーリングモデルも取り上げる。第5章では重力測定データの解釈に必要な基本原理を学ぶ。ジオイド異常から地形を維持する力が直接求められることを示す。

第6章では流体力学を学ぶ。マントル対流や後氷期隆起問題を重点的に扱う。パイプ内の流れをストークス流と関連させ、ブルームヘッドとブルームテイルの構造・強度を計算する。またホットスポットスウェルとブルームの関連を紹介する。定常・境界層モデルのマントル対流構造に加えて、非定常・境界層モデルを導入してリソスフィアの安定性を論じる。

第7章では岩石のレオロジー、すなわち外力に対する変形や流動を扱う。基礎的な過程を微視的な立場で解説する。第8章では断層の力学的挙動をサンアンドreas断層上の変位を例として解説する。第9

章では多孔質媒質中の流体移動を学び、海洋地殻や陸上の地熱地帯の熱水循環に適用する。第10章では地球ダイナミクスの化学を紹介する。地球化学データ、とくに玄武岩の同位体の系統的研究によりマントルの動的挙動を推定する。

本書の内容は通年講義のための一貫した素材を提供する。そのため、地球ダイナミクス上の重要な項目をいくつか割愛せざるを得なかった。とくに、地震学の基礎が盛り込めず、波動方程式と解の導出ができなかった。地震学により、地球ダイナミクス現象に関する多くのデータが得られている。例えば、(1) 地球中心までの地震波速度構造から推定された、地球の半径方向の密度分布、(2) 正確な震源決定からわかった、プレート境界の位置や海溝で沈み込むプレートの形状、(3) 人工震源を用いた反射法地震探査断面からわかった大陸地殻構造である。このような地震学的事象を十分に説明するためには、本書を大幅に拡張しなくてはならない。幸い、地震学関連の教科書は他にたくさんある。

地球磁場の時空的な変動に関する解説も本書の範囲を超える。古地磁気学に関連する地球磁場の簡単な解説を第1章で行ったが、地球磁場生成メカニズムは扱っていない。

本書を著すにあたって、いくつか重要な決断が必要だった。その一つが単位系である。本書では一貫してSI単位系を用いた。その定義を付録Aに掲載した。もう一つは原典の引用である。本書のような基礎的な教科書に大量の引用文献を掲載するのは適切でないと考える。その代わりに、プレートテクトニクスや大陸移動説の確立に主要な貢献をした人々を、第1章でそれらの歴史をたどった際に引用した。また、データの出典も記してある。

第3版への追加

第3版では数値計算法と数値解を追加した。本書で扱う問題の多くは非線形で、使用する方程式は数値的に解かなくてはならない。本書ではMATLABを利用する。これは広く活用され、かつ読者が入手可能なプログラミング言語である。MATLABコードを用いて数値計算を行い、結果を図示する。第11章では数値解析の例を簡単に解説する。第12章では演習問題のMATLABコードを紹介する。ここまで

で解説した問題に加えて、新たな問題を追加した。いくつかの演習問題に対する解法は、本書で一般的に採用したものより洗練した数学的手法を用いたものもある。付録Dにはいくつかの演習問題についてMATLABコードを掲載した。

教育上の特徴

- ・演習問題は本書には不可欠である。読者が本書を勉強する際に、各章の中にある問題を解いて理論を実際に活用することができる。数多くの演習問題を解くことで初めて、基礎となる物理法則を十分に理解することができる。一部の演習問題の解答は付録C, Dおよびオンライン上に掲載し、自習する学生が学習結果をチェックできるようにした。MATLABを用いる演習問題には本文中にMをつけ、それらのMATLABコードは下記のサイトから入手できるようになっている。本文には明瞭な図が添付されており、鍵となる図はカラーとした。
- ・各章は「イントロダクション」から始め、その章の内容や他の章との関連を絞り込むことができるようとした。
- ・各章は「本章のまとめ」で締めくくり、その章の重要な概念を復習できるようにした。
- ・各章末には「参考文献」を掲載した。おもに教科書や参考書だが、総説論文も含む。いずれも各章の背景を提供し、内容を拡張するのが目的である。

オンラインで提供するもの

教員と学生のためのオンライン素材が

www.cambridge.org/9780521186230

から入手できる。その内容は以下の通り：

- ・一部の演習問題のMATLABコード
- ・一部の演習問題の解答
- ・本書中の図のJPEGあるいはPowerPointファイル（教員のみ）

謝辞

多くの方に本書の原稿を読んでいただきました。以下の皆様に謝辞を表します（敬称略）：Claude Allègre, Jack Bird, Muawia Barazangi, Robert Kay, Suzanne Kay, Louise Kellogg, David Kohlstedt, Bruce Malamud, Jay Melosh, Mark

Parmentier, John Rundle, David Sandwell,
Sean Solomon, David Stevenson, Ken Torrance,
David Yuen, とくに大きな貢献をいたいた Ron
Oxburgh に心より感謝いたします。11章, 12章
の素材を提供していただきました, 以下の方に謝
意を表します: David Sandwell の同僚 Gary Ito,
Ross Stein, Volkan Sevilgen, Taras Gerya. 12.6
節は G. Ito が作成した演習問題に基づいて作成し
ました。12.7 節は David Sandwell に担当いただき
ました。Olga Beketova には付録 D の MATLAB
課題の解答を担当いただきました。Paul Tackley,
Fabio Crameri には表紙画像を提供いただきました。
Steven Salyards のプログラミングスキルにより本
書の編集に係る面倒な問題が解決しました。Judith
Hohl のタイピングと編集スキルがなければ、第3版
の出版はかなわなかっただろう。本書の準備にかけ
る彼女の疲れを知らぬ献身は類を見ないものでした。

訳者まえがき

原著は1982年刊行の Donald L. Turcotte and Gerald Schubert 著, “Geodynamics: Application of Continuum Physics to Geological Problems” (John Wiley & Sons, Inc.) で, 2002年に第2版, 2014年には第3版が Cambridge University Press より刊行されている。学部3, 4年生～大学院生を読者対象に, 地球科学のスタンダードな教科書として, 40年近くにわたって世界中の多くの大学で利用され続けている。

地球科学に限らず, 研究者を志す学生にとって, 英語で書かれた論文や専門書を熟読することは必須であるが, 最初は専門用語や暗黙の了解に基づく省略などにより, 読み解くのに相当苦労する。それもあってか, 地球科学全般, あるいは一般地質学に関する教科書は, 翻訳書を含めて多数存在する。しかしながら, 固体地球物理学に関する日本語の教科書となると, 古くは力武常次著『固体地球科学入門』(共立出版) や河野長著『地球科学入門』(岩波書店) などが挙げられるが, 現在は1冊にまとめられた数式を使った入門的な教科書はあまり刊行されていないようである。なお, 『現代地球科学入門シリーズ』(共立出版) や『岩波講座 地球惑星科学』(岩波書店) などは, 分野・テーマごとの分冊として詳細に解説されている。

プレートテクトニクス (地球の冷却問題など) をはじめ, 地殻の変形 (弾性・レオロジー・破壊), マントルの温度・化学構造や対流, 地下流体の移動などの問題は, 古典的ではあるが今でも未解決のことも多く, その「解き方」を学びたいという要望は多いだろう。本書で取り上げたような様々な計算手法を組み合わせて解に迫ることが必要であり, そのようなときは本書一冊があれば事足りるはずだ (地震学など一部カバーされていない領域はある)。

原著のまえがきには「複雑な数式をなるべく使わず地球科学現象を説明する」とあるが, 実際には数式や演習問題が豊富に掲載されている。例えば, 偏微分方程式の解析解が丁寧に導出されている。解析解の導出は, 現在ではあまり顧みられないかもしれない (複雑な地形などの条件に対応できないし, 解析解にしても結局計算機により計算することになるので, 初めから数値解を用いる)。しかしながら, 本書では, 解くべき問題をどのように整理して偏微分問題に落とし込むか, そのステップが丁寧に解説されており, 地球物理学的な問題を実際に解く際に大いに参考になると思われる。

最近では, 計算機や解析技術の進歩により, 複雑な条件をそのまま入力して解を得ることが可能になった。しかもインバージョン手法や統計的手法により, 先入観のない, かつ不確定性込みの結果が提供されるようになった。その一方で, 研究の第一歩においては, 簡単なモデルに様々な法則を複合的に当てはめることを通して現象の仕組みを理解することが重要だが, そういったところを丁寧に説明する本は意外と少ない。本書において, あまり複雑ではない数式に様々な物理法則や境界条件を当てはめる (これが難しい) ことを, 演習問題を含めて深く扱うことで, 地球科学現象を解くための「道具を使いこなす」ことに役立つものと信じる。各章は独立した構成になっているので, 興味のあるところから読み進めることができる。

翻訳は, 各章の内容に詳しい研究者が分担して担当した。地球科学 (地球物理学) の進歩は著しく, 原著第3版 (2014年出版) といえども, 原著執筆時からさらに発展している事項もある。そのような項目については訳注を設けた。また原著の付録には一部の演習問題の略解が掲載されているが, 読者は解答の導出が困難な場合があることも想定される。そこで一部の問

題には訳者による解説を加えた。

翻訳にあたっては、できるだけ地球科学コミュニティに受け入れられている訳語を用いるようにしたが、カタカナ表記も多くなった。このカタカナ表記において、実際の発音とかけ離れたものは是正した。今後「原音に近い」表記が普及することを願う次第である（例えば「リソスフィア」、「アセノスフィア」など）。また、訳者の違いによる訳語の差は基本的になくして読者が混乱しないように配慮したが、分野によっては同じ英単語でも異なる日本語が使用されているケースもあり、そこはコミュニティに受け入れられている用語を優先して採用した。全体のトーンの統一は木下が行ったが、訳語の選定を含めて不十分な点もあり、その責は一重に木下にある。

地球科学を学ぶ皆さん、今後様々な問題に取り組むことになるだろう。その際、解くべき問題を整理して数式に置き換えることができれば、問題の解決に近づいたことになる。本書によって、言語の壁に煩わされることなく純粋に科学的な考察に身を任せられ、さらに地球ダイナミクス理解のための一助となれば、訳者一同望外の喜びである。

2020年10月

木下正高