

地質学の学際化プロジェクト
第6巻 地質哲学2

地質哲学方法序説

小出 良幸

地質哲学のための Organon を用いた
普遍的テクトニクスへの Instauration

Geologist
Geological
Philosophy



地質学は露頭の石を題材する。石から過去の地球を垣間見て、現在の地球に至った経緯を考え、まだ来ぬ未来を展望する。そこには千古の時の流れがある。小さな石の由来を考えると、大地、地球深部から太陽系、他の恒星系まで至る。そこには茫漠たる世界が見える。石から地質学を思索していく。



小出 良幸

札幌学院大学人文学部 教授
地質学を科学し、地質学の素材を哲学し、
科学と哲学の成果を教育に活かそうと奮
闘中

ISBN 978-4-904645-12-3
C3044

地質学の学際化プロジェクト
第6巻 地質哲学2

地質哲学方法序説

地質哲学のための Organon を用いた
普遍的テクトニクスへの Instauration

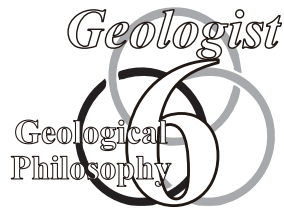
小出 良幸



地質哲学方法序説

地質哲学のための Organon を用いた
普遍的テクニクスへの Instauration

小出 良幸



はじめに

地質学と哲学と数学と

1 解題

解題からはじめるのは恐縮ではあるが、少々説明の必要なタイトルとしたためである。本書のタイトル「地質哲学方法序説」は、デカルト (Rene Descartes, 1596 - 1650) の「方法序説 (Discours de la methode)」を倣ったものである。これにも、少々解説が必要であろう。デカルトの「方法序説」(Descartes, 1637) は、手元の谷川多佳子訳 (1997) によると、フランス語で書かれたもので、正式名称は、



Discours de la methode pour bien conduire sa raison, et chercher la verite dans les sciences. Plus la Dioptrique, les Meteores et la Geometrie, qui sont des essais de cette methode.

「理性を正しく導き、学問において真理を探究するための方法の話 [序説]。加えて、その試みである屈折光学、気象学、幾何学」というものを省略したものである。本書は 500 ページを越える大著だが、「方法序説」は、その最初 78 ページは序文にあたるものになる。本文 (第 1 章 4f) でも再度示すことになるが、デカルトは、「方法序説」の中で示した「発見の方法」が、演繹的方法論として「大陸合理論」と呼ばれるものになる。

それに倣って、開拓しようとしている「地質哲学」で、新しい方法論を提案しようと考えたのが本書である。数学的概念の導入や地質学固有の不可逆な時間とその検証不

能性、過去の時間への仮説演繹的対処など、いろいろと新規の方法論を提示している。まだ、吟味不足の点もあるだろうが、地質哲学の序説として方法論からはじめようという意図である。

副題の「地質哲学のための Organon を用いた普遍的テクニクスへの Instauration」の中では、聞き慣れない Organon と Instauration という単語があるが、いずれもベーコン (Bacon, 1561 - 1626) の著書、「新機関 (Novum Organum ノヴウム・オルガヌム)」と「大革新 (Instauratio Magna インスタウラティオ・マグナ)」から引用したもので、いずれもラテン語であるが、英単語にしたものである。

「大革新」は、ベーコンが帰納法に基づいて構築していこうとした新しい知的体系の試みで、全 6 部で計画されたものであった。Instauration は、「革新」や「復興」などの意味がある。ベーコンが、当時のスコラ哲学にとって替わるために、自身が優れていると考えていた帰納法によって、知識や技術などすべてに関する知的革新を目指そうとした意思の現れであった。

著されたのは、第 2 部の「新機関。または自然の解明についての正しい指標と題される」(Bacon, 1620) で、「自然解明と人間の [自然] 支配についてのアフォリズム 第一巻」と「自然解明ないし人間の [自然] 支配についてのアフォリズム 第二巻」からなる。アフォリズムとは、「警句」、「金言」、「格言」や「箴言」と訳されるもので、簡潔だが、辛辣に皮肉をこめ、諧謔的に、言いやすく覚えやすい形にまとめたものである。第一巻は 130、第二巻は 52 のアフォリズムからなる。新機関は出版されてはいないもの、要約として出版されたものであり、構想のみが残されて、あとは残念ながら未完であった。

本書では、「テクニクス」を地質現象、あるいは自然現象における運動論、史的変化 (変遷史) を考える上で、重要であると位置づけた。さらに「テクニクス」を、大地の営みの説明だけでなく、全地球の全構成要素の「全地球テクニクス」と拡大し、さらに太陽系内の全天体、さらにはすべての系外惑星へも適用可能な「普遍的テクニクス」へと「革新 Instauration」したいという高き目標として掲げたものである。

Organon は、ラテン語の Organum の英語表記である。アリストテレスの論理学に関する著作、「カテゴリー論」、「命題論」、「分析論前書」、「分析論後書」、「トピカ」、「詭弁論駁論」という 6 つの書籍を集めたものが死後編纂され、6 世紀以降、その総称として organon が使われるようになった（山本，1971）。山本（1971）によれば、ラテン語の organon は、「道具」という意味だが、アリストテレスの論理学に関する著作が、論理的に考えるための道具や手段という内容と考えられたためである。そこから、「真理探究のための道具や知識獲得の方法」という意味になり、科学や哲学の研究手法や方法論の原則などに使われるようになってきた。本書でも、地質哲学のための「基本的な方法論 Organon」を考えていこうと意図した。

ベーコンの「新機関」では、「イドラの摘発と打破を主目的とするものであり、（中略）イドラから開放された人間の知性をいっそう正しく活動させる技術、すなわち、新しい帰納法を展示するものである。」（服部，1973）。また、帰納法とは、感覚によって捉えた特定の場合からはじまり、それらの観察から一般的な公理を発見することを目指すもので、帰納法は何も前提としない。一方、演繹法は、帰納法とは方法論的に相反するもので、一般的な原理からはじまり、そこから特定の真実を推定するという、演繹法固有の過程が必要になる。そのため、ベーコンは、帰納法が重要であるとした。

本書では、デカルトの演繹法やベーコンの帰納法も、自然への適用、特に過去の自然現象の解明には限界があることを示し、仮説演繹法が有効であるという方法論 Organum を提案している。方法論の完成は、まだまだ遠く高き頂きのため「序説」とした。しかし、頂きを目指す意気は軒昂である。

2 地質哲学をはじめ

私にとって本巻は、いよいよの感をもったの出版である。本書は「地質学の学際化プロジェクト」の第 6 巻になり、地質哲学としても 2 冊目になる。地質哲学 1 は「地質学における分類体系の研究」（小出，2016b；2020d）で、哲学的アプローチをしたが、「分類」の一般というテーマを考えたもので、地質学固有の問題ではなかった。分類

という領域で、地質学の題材、事例（特に、増補改訂版では）を多数用いて分類体系を整理し、自然分類と人為分類の適用可能性について考察を深めていった。本書は、地質学固有の問題に関する哲学的思索となり「地質哲学方法序説」としたように、本格的な哲学的アプローチを試みることになる。

この大学に赴任した時から、地質哲学をはじめたいと考えていた。その時、地質学固有の特徴として、「地質学的時間」と「地質境界」を漠然と考えていた。これはライフワークの重要な柱となるものでもある。その方法論はこれまで模索してきたが、漠としていて、なかなかアプローチが見つからず、攻略できずにいた。もちろん座していたわけではなく、なんとか突破口、緒（いとぐち）がないかを探りながら、いろいろなアイデアを論文の端々に散りばめてきたつもりである。

ここ数年、地質学における地層に記録された時間をテーマに取り組んできた。これらを整理しながら、本丸ともいべき、地質学的時間に関する問題をテーマにしたのが本書である。正面突破にまでは至っていないが、地質学的時間へのアプローチのために、いくつかの思考方法や方法論の仕方らしきものが見えてきた。

結論からいえば、過去の時間を調べる方法論として、仮説演繹法で地質学的アプローチで繰り返すことで、信頼性を上げていくことになった。さらに、数学的手法からえられた概念を地質学に適用していくことで、仮説の構造や体系の一覧性を高められ、別ルートが発見できることもわかってきた。それらの方法論から、未知のものに対し、これまででない仮説を見いだせれば（本書ではアブダクションを利用することを考えている）、その仮説を演繹することで、信頼性を見いだせるはずだと考えるに至った。

そのケーススタディとして、完成すれば検証可能な「全地球テクトニクス」の仮説の提示、さらに検証は困難だがより抽象化、一般化することで見えてくるであろう「普遍的テクトニクス」を素描していくことにした。

本書の内容や構成は、地質哲学には見えないかもしれない。地質学への変わったアプローチ、あるいは単にテクトニクスをまとめたものに見えるかもしれないが、そうではない。地質学とは、過去の時間を扱っているのが大きな特徴である。過去の時間は

なかなか手強く、通常のアプローチでは科学の素材にならない。なぜなら、地質学における時間は不可逆であり、過去の事象は検証不能だからである。さらに、自然の斉一説のパラドクス、「化石≠過去の生物」などの問題もある。それらを如何に乗り越えるか、どこで妥協するのか、なども考えていかなければならない。それらを試行錯誤をしたものが本書である。

3 巨人の肩の上に立つ

人類が営む知的活動は、先人の知的資産を踏み台することになる。論文検索に便利な Google Scholar (<https://scholar.google.co.jp/schhp?hl=ja>) には、「巨人の肩の上に立つ」という有名な言葉が示されている。この言葉は、ニュートンが 1676 年にロバート・フックに宛てた書簡で、

If I have seen further it is by standing on the shoulders of giants. (英語を現代表記に変更)

(もし私が遠くを見ることができたとしたら、それは巨人の肩の上に立っていたからです。)

という言葉に由来しているようだ。特に科学という行為は、何を素材をするにしても、先人の知恵を学び、その上に自身の知識を付け加えていくことになる。本書も地質学における哲学を目指すものであるため、先哲の大きな肩を借りなければならぬ。

同時代に発信された知は、当人の言葉や講義、講演、議論などを通じて学ぶこともできるだろう。近年では、多様なメディアで記録されることで、故人の知であっても、多様な形で本人の姿や身振り、声など、生に近い状態で吸収することも可能になってきた。だが、知の大半は、文章化された書籍や論文などから読み取ることになる。難解な内容のものは、テキストの解釈からはじまるであろう。

知の習得には、テキストの解釈以上に重要なものとして、背景にある世界観であろう。ヒロ・ヒライはそれを「知のコスモス」と呼び、「ある思想家を理解するためには、テキストを読みこむだけではなく、その背景にある歴史的な文脈（コンテキスト）を把握す

ることが必須である。」(山田, 2017)と述べている。同感である。

知の集積が膨大になってきた現在、多くの原典に当たることは専門家以外は不可能であろう。まして著者のように、これまで哲学の専門教育を受けたことがない門外漢が、新たに哲学や思索をはじめようとするには、通常のテキスト解釈をしていく時間がない。そこで哲学の要点を把握し必要最低限の知を踏まえ、もっとも興味のある地質学固有の特徴を深く思索していくことにした。このようなアプローチは、まだ学問が細分化していなかった時代、自然哲学者もおこなってきた知的営みでもあったろう。

哲学者の思想を概観するが、哲学や思想の巨人の肩に、急ぎ足でよじ登っていくことにする。

4 哲学について

大学の一般教養で「哲学」の講義を受けた時、面白いと思ったのが、哲学に興味をもちはじめたきっかけとなる。哲学を専門的に学んだわけではないが、興味をもち、いろいろな入門書を読んではいしたが、哲学者の原著には、何冊かチャレンジしたが、多くは途中で挫折した。

入門として学ぶ歴史は、古代から入ることが多く、古代ギリシアの自然哲学がスタートとなる。古代ギリシアの哲学は面白い。自然哲学者は、多士済々で、その学説も多様でおおらかなことも多い。しかし、ソクラテスは、プラトンの「ソクラテスの弁明」では自分の信義を命を賭しても主張し、「クリトン」では死刑が決まって友人が逃亡を促しても公式決定に従った姿を、「パイドン」では死刑の直前にも死についての問答をした姿が語られていた。古くから、自分の信念を命を賭しても貫く哲学者もいたことがわかる。深い思索は、人の生死さえも超越できるという、人の精神性の高さを痛感した。

大学生や大学院生、特別研究員として「地質学」を専門とした研究者人生をスタートした。その後、博物館で地質学に関連する教育に関わることで、その重要性を痛感し、「科学教育」を研究テーマに加えた。その時、哲学への必要性も感じており、大学に転職するにあたって、哲学も進めて「地質哲学」としてまとめていきたいと考えた。未だ、

その途上である。

これまで新しい学問にチャレンジするときは、独習でいろいろ教科書や専門書などを読みながらメモをつくり、自分用の冊子を作成していた。これまで「発達心理学」や「統計学」では、そのような冊子を作成し必要に応じて参照してきた。しかし、哲学はなかなか手強く、冊子には至っていなかった。そこで、本書の執筆をきっかけに、哲学史の概要も一緒にまとめていこうと考えた。もちろんメモのすべてを示すことはできないので、本書では必要な箇所だけを要約して示すことになる。だが、なかなかの分量になってしまった。

概要をまとめるにあたって、それぞれの哲学者の思想を著書や専門書から読み解くのは、専門家でも膨大な労力を要するため、短期間では不可能であろう。そのため、手持ちの有力な資料として原典に関しては、「哲学原典資料集」（山本ほか，1993）や「原典による哲学の歴史」（麻生・河谷，2019）を参照した。全体のガイダンスとして「知の歴史」（Magee, 1998）や「哲学用語図鑑」（田中，2015）、「哲学・思想がわかる」（渋谷ほか，1996）を参照したが、全体を鳥瞰するのに、高校の倫理（浜島書店編集部，2015; 2020, 江尻ほか，2014）と世界史の資料集（帝国書院編集部，2012; 2020）などがわかりやすい資料を参照して、哲学者の選択とその思想の概要をまとめることにした。

5 数学と地質学と

毎年、秋から冬にかけて、各種の研究費申請に合わせて、翌年のテーマを決めて、野外調査の地を決めていた。そして新年度には、そのテーマに沿って、野外調査をして、データ収集し、データ解析し、比較検討して考察を進めることにしていた。ところが COVID-19 のために、2020 年度は野外調査（道外や他地域への移動）ができなくなった。そこで、室内での研究テーマでもあった「比較検討」について、重点的に思索をしていくことにした。

その一環で、大学教養レベルの解析手法や統計学を使うのだが、その背景の論理

や数学は、すべて忘れてしまっていたので、学び直してみることにした。計算力を付けたり、問題の解法までは学べないが、数学のいろいろな分野で地質学で使えるような方法論をつまみ食的に学んでみた。ひとつの専門で研究に従事していると、学際的な他分野の基礎的なことや大学の教養科目程度の学びはなかなかできない。しかし、コロナ禍は学ぶための時間を与えてくれた。

「数学的概念」を地質学に適用することで、今までにない地質学的現象への視座が持てるのではないか、というアイデアが生まれた。数学的概念は広いので、いろいろな数学の方法論を探索することになった。地質学へ適用できるようなものが多々ありそうで、発想のトリガーとして利用することも有効だと考えた。

以上のような経緯で、哲学に続き、数学も勉強することになった。学び直しをしたが、その時役立ったのは、数学の公式については、手元にある書籍「数学公式集」(小林ほか, 199)や「物理と化学のための数学 I、II」(Margenau and Murphy, 1943a; 1943b)、「数学公式ハンドブック」(Jeffrey, 2004)、「微分積分・平面曲線(岩波数学公式1)」(森口ほか, 1987a)、「級数・フーリエ解析(岩波数学公式2)」(森口ほか, 1987b)、「朝倉数学ハンドブック基礎編」(飯高ほか, 2010)、「朝倉数学ハンドブック応用編」(飯高ほか, 2010)であった。加えて、インターネットの各種のサイトも参考にさせていただいた。

数学の初歩に関しては、入門書が大いに役に立った。以下に感謝の意味を込めて手元にある文献をリストアップしておく。(順不同)

微積分については、「はじめての解析学」(原岡, 2018)、「マンガでわかる微分方程式」(佐藤・あづま, 2009)、「今度こそわかる微分積分」(佐藤, 2009)、「今日から使える微分方程式」(鮑本, 2006)、「道具としての微分方程式偏微分編」(斎藤, 2019)などを参照した。フーリエ解析については、「マンガでわかるフーリエ解析」(渋谷・晴瀬, 2006)、「高校生からわかるフーリエ解析」(涌井, 2019)、「今日から使えるフーリエ変換」(三谷, 2019)、「図解雑学 フーリエ変換」(佐藤, 2011)、「高校数学でわかるフーリエ変換」(竹内, 2009)、「Excel で学ぶフーリエ変換」(渋谷・渡辺,

2003)などを参照した。テイラー展開は微分の応用となるが、「理系のための 微分・積分復習帳 高校の微積分からテイラー展開まで」(竹内, 2017)、「微分・積分の意味がわかる—数学の風景が見える」(野崎ほか, 2000)などを参照した。

統計に関しては、「よくわかる卒論・修論のための統計処理の選び方」(鍵和田・石村, 2001)、「Excel で学ぶやさしい統計学」(田久, 2004)、「まずはこの一冊から意味がわかる統計学」(石井, 2012)、「実践としての統計学」(佐伯・松原, 2000)、「道具としての統計解析」(一石, 2004)、「すぐわかる統計処理の選び方」(石村・石村, 2010)、「あなたもできるデータの処理と解析」(岩淵ほか, 1997)、「完全独習統計学入門」(小島, 2006)、「高等学校の確率・統計」(黒田ほか, 2011)、「統計学を拓いた異才たち—経験則から科学へ進展した一世紀」(Salsburg, 1992)、「統計学の図鑑」(涌井・涌井, 2015)などが参照になった。

ベイズ統計に関しては、「史上最強図解 これならわかる! ベイズ統計学」(涌井・涌井, 2012)、「身につくベイズ統計学」(涌井・涌井, 2016)、「完全独習 ベイズ統計学入門」(小島, 2015)、「異端の統計学ベイズ」(Migrate, 2011)などを参考にした。

統計に関しては R や、そこから派生した臨床研究に特化したものであるが他の研究でも使いやすくなった EZR というアプリケーションがある。そのソフトに関しては「EZR でやさしく学ぶ統計学～ EBM の実践から臨床研究まで～」(神田, 2015)を参考にした。

数式からグラフを作成するために、手持ちの Microsoft Excel などでもできるのであるが、よくわからなかった。GeoGebra (<https://www.geogebra.org/>) というアプリケーションがわかりやすく使いやすかった。GeoGebra は、関数入力によるグラフ作成、平面幾何や空間図形などの作図もできる。また、WEB 版アプリケーションとインストール版があり、いずれも日本語化されている。今回の関数は、GeoGebra のアプリケーション版で作成した。

これらの書籍の著者、アプリケーションの製作者、サイトの管理者に感謝する。

▼誤字脱字

「地質学の学際化プロジェクト」を謹呈した友人から、誤字脱字が多いとの指摘があった。誤字脱字が多いという自覚はある。毎回、その友人からはいろいろなコメントを頂く。送付状にも、誤字脱字があったというので、見直したら一箇所見つけた。多分、本書にも多々あるだろう。「展開される高邁な哲学を私的には貶めている」とのなかなか手厳しい指摘ではあったが、ありがたいものだった。そこで、自身の誤字脱字の原因を考えてみた。ブラインドタッチが不得手で、ミスタッチによる誤入力が多いことが、第一の原因であろう。それは、思考速度と文字やキー入力による記録速度が、一致していないことから引き起こされるのであろう。思考がはじまると、その速度は入力作業より大きい。手書き文字の場合、書きながら、文字は目に入り、速く書きなぐっても自身の文字だからあとで読み取れる。一方、コンピュータ入力で、ブラインドタッチのできない者には、キーボードをみたり、ディスプレイを見たりしながら入力すると遅くなり、誤字脱字も多くなるようだ。だが、誤字脱字は、推敲をすればなくすることができるはずだ。推敲の能力や推敲の手間、推敲の時間をたっぷりかければ、なくなるであろうか。否。著者は、論文でも、何度も推敲している文章でも、誤字脱字が多い。不思議なことである。英文では何度か推敲を繰り返していくと、誤字脱字はかなり減っていく。そして、修正すべきところもなくなっていく。ところが、日本語では、何度推敲をしても、文章を修正し続けている。よりよい表現に、あるいは加筆をしていることも多い。常に修正を続けていることになる。これは母国語による推敲のためではないかと考えているのだが、どうだろう。母国語の文章の場合、思考も母国なので、文字をみるとそれに関係した連想や思いが沸き起こる。それが修正や加筆につながり、新たな誤字脱字を生むのかもしれない。それとも、単に、著者のいい加減な性格によるものなのであろうか。いずれにしても、著者には、推敲は不完全で、その推敲により新たな誤字脱字が生まれるようである。とはいっても、誤字脱字の多さは、推敲不足であることは否めない。本書をお読みの読者の方、見つかるであろう誤字脱字は事前に深謝し、「貶めている」などといわずに、大目に見ていただくよう懇願する次第である■

目次

はじめに 地質学と哲学と数学と	1
1 解題	1
2 地質哲学をはじめ	3
3 巨人の肩の上に立つ	5
4 哲学について	6
5 数学と地質学と	7
▼誤字脱字	10
第1章 思想の歴史	19
1 西洋史概観	19
a 古代	19
b 中世	21
c 近代	22
d 近代から現代	23
2 古代の哲学	24
a 自然哲学	26
b ピタゴラス学派	28
c ソフィスト	29
d ポリス思想	29
e アリストテレス	30
f 世界市民主義	31
g 新プラトン学派	32
3 古代から中世の宗教と哲学	32
a キリスト教と教父哲学	34
b スコラ哲学	35
c イスラム教	37
d アラビア哲学	38
4 近世前半：ルネサンスと宗教改革	39
a ルネサンスと人文主義	39
b 宗教改革（1517年より16世紀）	42
c 社会哲学	42

d	科学革命	43
e	モラリスト	43
5	近世後半：近代科学と論理的方法論の成立	43
a	イギリス経験論	45
b	大陸合理論	46
c	ドイツ観念論	47
d	フランス啓蒙思想	49
6	近世から近代へ：資本主義と社会主義	49
a	資本主義と功利主義	51
b	社会主義	51
7	近代の哲学	52
a	実証主義	54
b	進化論	54
c	プラグマティズム	55
d	実存主義	55
e	現象学	57
f	精神分析学	57
8	現代の哲学	58
a	生の哲学	58
b	大衆社会分析	58
c	分析哲学	60
d	フランクフルト派	60
e	正義論	61
f	他者の尊重	61
g	構造主義	62
h	ポスト構造主義	63
i	オリエンタリズム	64
j	現代ヒューマニズム	64
9	思想の系譜	65
▼	アノニマス	67
第2章	科学、科学哲学、そして地質学の歴史	69
1	現代の自然科学の歴史	69
a	近世：科学的方法論と近代科学の成立	70

b	近代から現代：多様な自然科学の誕生	74
2	科学哲学の歴史	74
a	18世紀：科学哲学の萌芽	77
b	19世紀：科学哲学の誕生	78
c	20世紀前半：科学哲学の発展	79
d	20世紀後半：新科学哲学	81
e	科学哲学の危機と自然史学的視点	82
f	21世紀の科学哲学	84
3	近代地質学の誕生	86
a	地質学の成立前の地質学的思索	86
b	層序学の萌芽：ステノ	88
c	2つの地質学論争	89
4	地質学の確立	94
a	地質学的手法の確立と学問の細分化	95
b	進化論へ	96
c	年代決定	98
d	大陸移動	100
5	日本への地質学の導入	101
a	お雇い外国人	102
b	近代から現代の日本へ	103
	▼歴史に関わる学問の使命	104
第3章	地質学を考えるために	105
1	地質哲学へのアプローチの方法	105
2	地質学の定義	107
3	地質学の目的	109
a	地球の現在の状態を知る	109
b	地球の現在までの成り立ちを知る	110
c	地質学の再定義	112
4	地質学における時間の扱い	113
a	過去の情報の読み取り	113
b	時間スケールの扱い	116
5	斉一説への警鐘	118
a	斉一説とは	118

b	時間の矢：エントロピー	120
c	斉一説の適用限界1：類比の適用	121
d	斉一説の適用限界2：化石＝過去の生物	123
e	斉一説の適用限界3：自然の斉一性	124
6	考えるための視座	127
a	仮説演繹法（アブダクション）	127
b	類比の拡大と枚挙の蓄積：それでも地質学は進んでいく	130
c	特異性と普遍性	131
d	地球は開放系	133
e	地球の保持エネルギー	134
▼	過去をみるということ	136
第4章	地質学的思索のための数学的概念	139
1	数学的概念の導入のために	139
2	地質現象の関数化：微積分の概念の適用	141
a	地質学的現象	141
b	物理学的現象	143
3	過去の地質現象：テイラー展開の利用	144
4	周期現象の認定と解析：フーリエ解析や存否法の適用	146
a	フーリエ解析	147
b	存否法	149
5	冪乗則（スケーリング則）	150
a	冪乗分布	150
b	自然界の冪乗則	153
6	ベイズ統計：仮説演繹法	154
7	地質学への数学的概念の適用のために	155
▼	数学の裾野	159
第5章	造山運動とテクトニクス	161
1	造山運動とテクトニクス	161
2	地向斜造山運動	163
a	地向斜造山運動の登場	163
b	地向斜造山運動の運動モデル	165
c	ウェグナーの大陸移動：パラダイムの束縛	165
2	プレートテクトニクス	167

a	地相斜造山運動からプレートテクトニクスへ	168
b	プレート境界とウィルソンサイクル	169
3	ブルームテクトニクス	172
a	沈み込む海洋プレートとコールドブルーム	173
b	ブルームテクトニクス	175
4	造山運動からテクトニクスへ	177
a	造山運動の区分	177
b	構造侵食作用への配慮	181
c	時空間の拡大	181
5	造山運動の普遍化の必要性	183
a	発展過程の作業仮説	183
b	斉一説とモダン・アナロジーからの飛躍	185
▼	地質学者の脚下照顧	189
第6章	地質学的作用への数学的概念の導入	191
1	場への数学的概念の導入	191
a	地質場の区分	191
b	数学的概念の導入とは	193
2	海洋プレートの形成：海嶺から海洋底	194
3	沈み込み帯	197
4	島弧	200
5	大陸	204
▼	数学というものは	208
第7章	新しい地質学的仮説へ	209
1	地質学におけるメタ仮説の数学的解釈からの方向論	209
a	地質学と数学を結びつける方法論	209
b	アブダクションと仮説演繹法	211
c	メタ仮説群としての「論」	214
2	海洋プレートの数学的解釈から	215
a	数学的解釈の試案	217
b	数学的解釈からの展開	218
3	島弧形成論へ	220
a	島弧への数学的解釈	220
b	「沈み込み帯での島弧形成」仮説	222

4	大陸形成論へ	224
a	大陸と島弧の関係	224
b	「島弧が形成中の大陸地殻」仮説	225
5	大陸地殻増加論へ	228
a	数学的解釈から大陸地殻増加論へ	228
b	大陸地殻増加論の仮説検証	228
6	さらなる広義のテクトニクスへ	232
a	広義のテクトニクスへ	232
b	危うさの上のテクトニクス	235
	▼論より証拠	237
第8章	全地球テクトニクス	239
1	これからのテクトニクスへ	239
a	全地球テクトニクスへ	240
b	全地球テクトニクスの視座	243
2	相と層の拡大	244
a	相と層	244
b	関係の拡大：力と熱	247
3	術語の整理：定義	250
4	圏	252
a	地球重力圏	252
b	地球磁気圏	253
c	生命圏	253
d	マグマ圏	254
e	沈み込み圏	255
f	D'' 圏	256
5	全地球テクトニクスの視点1：成分再配分	258
a	層と相と圏の複雑な関係	258
b	成分の再配分	259
c	生命圏	261
d	マグマ圏	262
e	沈み込み圏	263
f	D'' 圏	264
6	全地球テクトニクスの視点2：熱放出	264

a 熱エネルギーという視点	264
b 熱源と熱放出	266
c マントル対流	269
7 サイズと時間の効果	270
▼ AI と人智	274
第9章 普遍的テクトニクス	275
1 全地球テクトニクスより先へ	275
a 我々の世界	275
b 時空間の拡張	278
c 検証のための地球外の素材	282
2 衝突集積テクトニクス	284
3 太陽系内天体のテクトニクス各論	287
a 太陽系内の探査	287
b 惑星系における H ₂ O の重要性	289
c スノーライン	290
d ハビタブルゾーン	291
4 系外惑星テクトニクス	293
a 系外惑星の観測法	294
b 系外惑星の区分	297
5 普遍的テクトニクスへ	300
a 汎惑星形成モデルへ	300
b 軌道進化モデル	301
c モデルと多様性	303
d 普遍的テクトニクスへ	306
▼ 自立した人	308
文献	311
さいごに はるかなる地質哲学へ	333
1 過去と変容への対処の困難さ	333
2 普遍性を求める	335
▼ アブダクションを意識的に	338
索引	341



石垣

きっちりと積み上げられた石垣に、人の技術、匠を感じる。北海道函館市五稜郭。著者撮影。

第1章

思想の歴史

最初の章では、哲学思想の歴史の変遷を概観していく。哲学の多くは、先人たちの深い思索から生まれたもので、精魂のこもったもので、中には非常に難解なものもある。難解な書を読み込み、解釈していくことも、哲学の研究方法としてある。一方、あるテーマに関して、新しい思索の深め独自の地平を生み出す哲学もある。新天地を目指す哲学も、無からは生まれない。先人の思索の上に成り立っている。思索を系譜、歴史を知ることは重要である。



1 西洋史概観

本章では、哲学者の思想を概観していくが、時代背景として西洋史を概観しておく。時代を古代、中世、近世、近代、現代に分けてみていくことにする（図 1-1）。

a 古代

古代は、エジプト、メソポタミア、インダス、中国古代の四大文明の誕生後、紀元前 7 世紀には、オリエントでアッシリアが最初の世界帝国を建設し、ギリシアではいくつもの都市国家（ポリス）が誕生した。アッシリアについてアケメネス朝ペルシアが世界帝国として誕生した。紀元前 4 世紀～紀元前 3 世紀になると、各地で帝国の建設が進んだ。アレクサンドロスの帝国が誕生し、ヘレニズム文化が形成された。インドではマ

西洋史概観

区時代	476年	1453年	1830年	20世紀	現代
出来事	50: 古代帝国の分裂、民族大移動と遊牧民国家の成立 4: 民族移動、古代帝国崩壊 3: 古代帝国の衰退、3世紀危機が起ころ 10: 20: 成熟する古代帝国 BC200: BC100: 東西で古代帝国 BC400: BC300: 各地で帝国建設出現 BC200: BC300: 国家形成、帝国出現	1400: 14世紀危機、新時代への胎動 1300: モンゴルによるユーラシア一体化 1200: 群雄割拠 1100: 隣国自立の動き、十字軍のはじまり 1000: 第1次民族移動、大帝国の解体 800: 900: イスラム世界の繁栄 700: 新秩序の成立 600: 混乱の収束、新国家の成立	1900前半: 英、世界の工場 アジアの植民地化、自由主義 1800: 産業革命、アジアへの進出 1700: 17世紀危機、アジアへの進出 1600: フランス、絶対主義 1500: フランス、ルネサンス、航海時代 1400: アジア大交易時代、ヨーロッパ大航海時代へ	1900後半: 2000初頭: 第二次産業革命、帝国主義、アジアの近代化、列強の世界分割	2000末: 2100初頭: グローバル化、地域統合、ICT革命、ポロニウム 2000後半: 東西情報革命 2000前半: 帝国主義、第1次世界大戦、第2次世界大戦
哲学的特徴	理性的探求 哲学のはじまり、世界観の追求、共通認識の模索 神話から宗教へ	信仰の確立 →信仰の時代 絶対神の信仰(神を精神的変えに)	ルネサンス(自由の追求) 宗教改革(神からの開放) 理性の自立 →理性の信頼 近代科学と方法論の成立	科学的思考 社会に仕組みの理解 具体性と実用性の追求 主体性の回復 理性の問い直し	新たな思想の登場 科学哲学の誕生 理性への懐疑 人間性の復興 生命の畏敬
時代の潮流	神話 → 宗教 → 神 → 人間	宗教戦争 → 絶対神に従う	ルネサンス・宗教改革 → 近代自我の自覚	自由貿易 独立運動	グローバリ化 地域統合 ICT革命 ポロニウム 冷戦 第二次世界大戦 アジア主義 第一次世界大戦

ウリヤ朝が、中央アジアでは匈奴の遊牧帝国が、中国では秦が、帝国として誕生した。紀元前 2 世紀～紀元前 1 世紀には、中国では前漢が誕生し、匈奴の遊牧帝国と争った。ヨーロッパではローマが地中海帝国を形成した。前漢とローマが、オアシスの道で交易し、交易ルートのパルティアが中継貿易で栄えた。

紀元 1 世紀～ 2 世紀になると、ローマと後漢の東西の帝国が陸路と海路で結ばれ、両国が繁栄し古代世界が成熟してきた。中継地として陸路ではクシャーナ朝、海路ではサータヴァーハナ朝が栄えた。3 世紀は、ローマと後漢が弱体化し「3 世紀の危機」が起こり混乱が生じた。ローマ帝国では軍人皇帝時代となり、西アジアではササン朝ペルシアが誕生し、ローマ帝国と対立した。中国では魏・呉・蜀の三国の抗争後、西晋が統一した。4 世紀でも東西の混乱は継続し、ローマ帝国では専制君主制がはじまり、キリスト教が公認された。フン人の西進によってゲルマン人の移動して民族大移動が起こった。ササン朝ペルシアの抗争でローマ帝国は東西に分裂し、古代帝国が崩壊した。中国では、遊牧民族の侵入で動乱が起こった。5 世紀は、寒冷化による民族移動が本格化し、古代帝国の分裂で王朝が交代が起こった。中国では南北朝の対立し、西ローマ帝国の滅亡でゲルマン諸国の建国が起こり、中央アジアでは突厥とエフタルの遊牧民国家の成立した。

b 中世

西ローマ帝国滅亡（476 年）が古代と中世の境界の事件とされている。

西ローマ帝国の滅亡でゲルマン諸国が建国されたが、東ローマ帝国は健在であった。6 世紀は、混乱が収束していき、西では東ローマ帝国ユスティニアヌス帝が誕生し、中国は隋が統一した。中央アジアでは突厥とエフタルが滅亡した。西アジアではササ

図 1-1 西洋史概観（左ページ）

古代、中世、近世、近代、現代に区分して、世界史上の主な出来事、哲学的思考の特徴、時代の潮流を示した。

ン朝ペルシアと東ローマ帝国が抗争を続けた。7世紀には混乱が收拾されてきた。中国では、隋から唐に変わり周辺国を支配下に置き大帝国となり、新しい制度や文化の導入した。西アジアのイスラムによるウマイヤ朝が、北アフリカからイベリア半島まで拡大した。8世紀～9世紀では、イスラムのウマイヤ朝からアッバース朝に変わり、中国では唐が弱体化し、ウイグルと吐蕃が台頭してきた。ヨーロッパではローマ教会と連携したフランク王国が領土を拡大してきた。10世紀は、中央アジアでは遊牧民によってトルコ化が西に向かい、イスラム化が東に向かった。中国では唐が滅亡し分裂の時代になる。北方民族の西進により第2次民族移動が起こる。11世紀には大帝国の崩壊で、周縁国で自立し、強大化するものも出現してきた。ヨーロッパでは、教皇を中心とするローマ・カトリックがギリシア正教から分離し、イスラムの侵入に対して十字軍で対抗をはじめた。12世紀には、地方政権が起こり、多極化が進み群雄割拠の時代となる。十字軍にともなう東方貿易が活発化し、海上ネットワークが成立する。西ヨーロッパでは東方植民が起こる。13世紀になると、モンゴル(元)によってユーラシアが一体化され、草原の道、オアシスの道、海の道などで円環交易ネットワークが成立した。十字軍以降、ヨーロッパではイタリアの諸都市が繁栄する。14世紀は、寒冷化による不作や飢饉、そしてペスト(黒死病)で「14世紀の危機」が起こる。東欧ではオスマン帝国が拡大し、中央アジアではモンゴル帝国が解体し、ティムールが大帝国を築き、中国では明が成立し、新時代の胎動が起こる。

c 近代

15世紀には「14世紀の危機」が去り、アジア経済が回復し、海上交易が盛んになる。オスマン帝国がビザンチン帝国(東ローマ帝国)を滅ぼす。このビザンチン帝国滅亡(1453年)が、中世と近代の境界となる大事件となる。ヨーロッパの国々は、アジアとの交易やキリスト教布教で海外進出をして、「大航海時代」となった。16世紀には、アジアでオスマン帝国、サファヴィー朝、ムガル帝国のイスラムや、明が繁栄した。ヨーロッパでは、宗教改革の後、スペインとポルトガルで、新大陸の銀の流入により価

格革命が起こり経済活動が拡大し、アジア交易に参入した。この時期から「ルネサンス」が起こる、17世紀は、寒冷化により飢饉や疫病、戦争の多発で「17世紀の危機」が起こる。ヨーロッパでは、危機を打開するために新大陸の経営と奴隷貿易をおこなう。ドイツは30年戦争、イギリスでは革命で立憲王政が、フランスでは絶対王政となった。そんな中、オランダのみが繁栄し、アジア交易に参入した。18世紀にはイギリスで工業化（産業革命）が起こり、アジアへの進出したが、アメリカがイギリスから独立した。啓蒙専制君主のロシア、プロイセン、オーストリアが台頭した。中国では清が全盛期となった。19世紀前半は、イギリスが工業化により「世界の工場」となり、市場獲得のため諸国に自由貿易を迫った。アジアはヨーロッパによって植民地化されていった。

d 近代から現代

近世と近代の歴史的な大事件としては、絶対王政の終焉となるフランス7月革命（1830年）が境界とされる。

フランス革命後、近代になると自由主義やナショナリズムが起こり、国内改革が進んだ。また、ラテンアメリカでは、独立運動が起こった。ドイツやアメリカなどが第二次産業革命により台頭し列強となり、軍事力を背景に世界を分割し帝国主義を進めた。アジアは、近代化を進めていた列強に従属させられ、第一次世界大戦（1914年～）へとつながっていった。

近代と現代の境界は、アジア史では第一次世界大戦終結（1918年）に、ヨーロッパ史では第二次世界大戦終結（1945年）に、近年では東欧革命（1989年）にすとの考えもあるようだ。本書では、あまり厳密に分けることはなく20世紀以降として扱うことにする。

第一次世界大戦後、ロシアでは社会主義革命（ロシア革命）が起こり、植民地では民族独立運動が起こった。世界大恐慌（1929年）後、世界は対立を深めドイツのファシズムが台頭し、第二次世界大戦（1939年～1945年）が起こる。第二次世界大戦後は、アメリカを中心とする資本主義国とソ連を中心とする社会主義国が対立する冷戦

が起こった。アジア、アフリカでは独立を果たした第三勢力が生まれた。マルタ会談（1989年）で冷戦が終結する。1980年代以降、ICT革命（第3次産業革命）が起こった。冷戦後の資本主義経済で「グローバル化」が進み、地域統合が起こった。先進国と途上国では格差が広がり南北問題が起こる。IoTやAI、ビッグデータの利用などの革命（第4次産業革命）が継続中である。近年、反グローバル化として保護主義やポピュリズムが台頭している。

ここまで西洋史を中心に概観してきた。歴史の解釈は、視点により変わる。現代の変化が、将来に渡って定着するのか、それとも消え去るのか。その変化が、大きな潮流として将来にも影響を与え続けるのか。どれも不明である。

科学技術は社会や生活に定着しているので、今後も進歩し定着していくであろう。やがて技術は時代背景となっていくのであろう。社会の「風潮」は、やがては「潮流」となるのであろうか。例えば、ポピュリズムのような感覚的な「風潮」は、誰もがよいとは思っているわけではないが、これからも継続していくのであろうか。何人かの指導者の交代で終わってしまうのだろうか。政治システムとしての共産主義はうまくいかないようだが、独裁政権や一党独裁などの政治システムが、現代も残っているのは、なぜなのか。経済システムとして共産主義より資本主義が優れているのだろうか。今後の社会の潮流がどうなるかの予想できない。

次から、時代ごとに哲学者とその思想を関連するグループごと、学派ごとにまとめて述べていく。その概要を事前に示しておく（図1-2）。

2 古代の哲学

哲学は、古代ギリシア時代にその萌芽が見られる。東洋にも哲学的源流があった。西洋史で概観してきたが、西洋と東洋の交流は紀元前の前漢やローマの時代からあり、紀元後も何度も文化や技術の交流が起こった。だが、現在の哲学や科学の源流は西洋に辿ることができる。そのため、哲学の歴史を考える時、西洋哲学史を理解する必

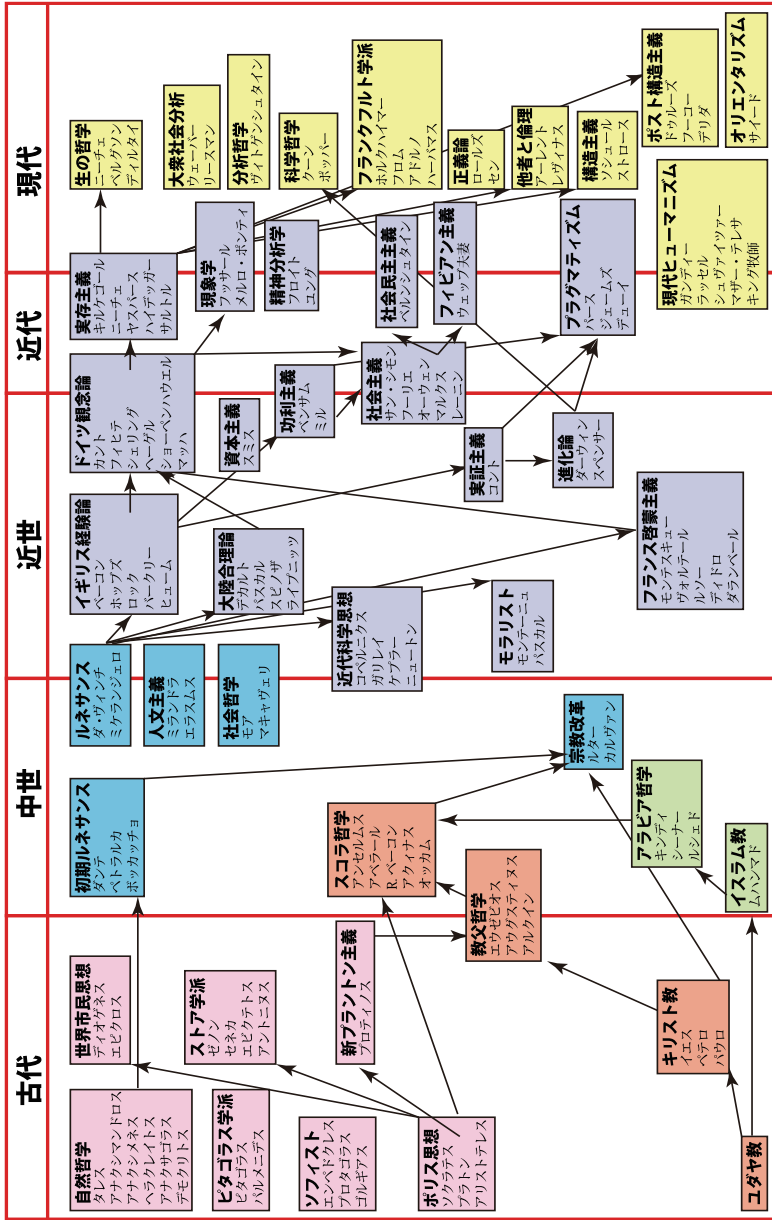


図 1-2 哲学の系譜
本章で紹介する哲学者とその学派を時代ごとに概要とその関係を示した。

要がある。

森羅万象を神々が支配し動かしているという神秘主義的思考からはじまり、古代ギリシアでは、論理や理性を重視して考えられるようになってきた。自然の仕組みや成り立ち、万物の根源などを考え、その一環として宇宙や地球の成立や構造も考えるようになり、哲学のはじまりとなった。以下では、主だった哲学者と思想を見ていく（図1-3）。

a 自然哲学

イオニアに端を発したイオニア派は、自然現象を合理的に解釈することを目指した自然哲学である。イオニア派の中でもミレトス学派は、バビロニアやエジプトとも交流があり、万物の根源（アルケー）を求めた。

イオニア派、そしてミレトス学派の始祖は「哲学の父」と呼ばれるタレス（Thales, B.C. 624年頃（以下「頃」は？と表記し、「年」は省略する）- B.C. 546）である。ギリシャ七賢人の一人ともされている。アルケーを「水」とし、すべてが水から生成し消滅していくと考えた。世界の起源について、神を導入することなく、はじめて合理的説明を試みたことで「最初の哲学者」と呼ばれている。天文学に通じており、日食（紀元前585年5月28日に起こった）を予言したといわれている。測量学にも通じ、自分の身長と影の比率から、ピラミッドの影から高さを測定したともいわれている。数学でも「半円に内接する角は直角になる」という「タレスの定理」を証明した。

タレスの弟子のアナクシマンドロス（Anaximandron, B.C. 615 - 547）は、物質の根源を限られたものではなく、「限りのないもの」として概念化した。地球が空に浮び、下側にも空が広がっていると考えた。アナクシメネス（Anaximenes of Miletus, B.C. 585 - B.C. 525）は、アナクシマンドロス、タレスとともに、ミレトス三哲人と称される。万物の根源は「空気」と「息」とした。命あるものは息をするので、息が生命を作り、空気が世界を作ると考えた。空気は薄くなると熱くなり、最も薄くなると火になり、濃くなると冷たくなり水になり、最も濃くなると土や石になるとした。基本的な物質が存在し、

その濃淡で世界が構成されるとした。

クセノファネス (Xenopanes, B.C. 570 - B.C. 475?) は、詩人として有名であるが、万物の根元は「土」だと唱えた。

ヘラクレイトス (Herakleitos, B.C. 544? - B.C. 480?) は、「暗い哲学者」や「泣く哲学者」と呼ばれる。自然界は絶えず変化し、万物は流転していると考えた。だが、その背後に変化しない「ロゴス (logos)」となる「火」をアルケーとした。変化と流転の象徴が火で、万物は火から「生成」されると考えた。

デモクリトス (Democritus, B.C. 460? - B.C. 370?) は、「笑う人」あるいは「知恵」とも呼ばれた自然哲学者である。不生・不滅・無性質・分割不可能な無数の物質単位を「原子 (アトム atom)」を考えた。原子はたえず運動し、存在と運動の場は空虚 (ケノン kenon) した。また、「いかなることも偶然によって起こりえない」と述べ、因果関係の重要性を考えた。唯物論の祖であり、現在の「原子論」に通じる仮説を唱えた。

アナクサゴラス (Anaxagoras, B.C. 500? - B.C. 428?) は、この世のはじめに究極の要素「スペルマタ (spermata 種子の意)」が存在し、固く結合した混合体とならない、回転をはじめすることで、混沌から物質が分離していったと考えた。原子論や宇宙論といえる思索を提示した。

b ピタゴラス学派

ピタゴラス (Pythagoras, B.C. 582 - B.C. 496) は、「サモスの賢人」と呼ばれ、多くの弟子とともに、秘密主義のピタゴラス学派 (ピタゴラス教団とも呼ばれる) を組織した。ディオニュソス信仰の神秘主義の流れを汲んでいる。和音から惑星の軌道など、多くの事象に数学的関係があることに気づいた。そこからすべての事象には数が内在され、宇宙は数の法則に従い、数字と計算によって解明できる「万物は数なり」、アルケーは「数」であるとした。ピタゴラス学派では、数の研究から宇宙の真理を追究した。教団では多くの数学の定理を発見した。その中にはピタゴラスの定理もあった。

パルメニデス (Parmenides, B.C. 515 - B.C. 445?) は、エレア派の始祖である。エ

レア派は、「あるものはあり、ないものはない」という本質的存在についての論理哲学や、超越的思想で永遠不変の存在を唱えた。パルメニデスらエレア派の考えは、多くの哲学者に影響を与えた。

c ソフィスト

ソフィストは、時と場合に応じて異なる価値判断があることを尊重し、職業として有料の教育（弁論、修辞）をおこなった。

エンペドクレス（Empedocles, B.C. 490? – B.C. 430?）は、物質の根源として火、水、土、空気の四元素説を唱えた。4 つが結合する「ピリア（philia）」と分離させる「ネイコス（neikos）」が、集合離散をくり返すとした。磁力の起源についても言及したとされている。

プロタゴラス（Protagoras, B.C. 490? – B.C. 420?）は、「徳の教師」を名乗り活動した。真実が「何であるか」ということよりも、「何かのように思われる」ということを重視し、「人間は万物の尺度である」という相対主義を唱えた。

ゴルギアス（Gorgias, B.C. 487 – B.C. 376）はエレア派に対抗していた。レトリック（rhetoric 修辞学、弁論術）を用いて、存在の証明が簡単であれば、非存在も証明できると考えた。

d ポリス思想

城壁を備えた中心市と農耕周域部から成る都市国家をポリス（polis）と呼ぶ。ポリスは自由と自治を持ち、市民は共同体の一員であり、政務や軍務に携わった。奴隷など、厳格な身分制度が取り入れていた。このような都市国家でポリス思想が生まれた。

ソクラテス（Socrates, B.C. 469? – B.C. 399）は、ソフィストで、自身は著述をしなかったが、弟子のクセノポンやプラトン、ディオゲネスなどがソクラテスの言動を著したことで、その思想が残された。ソクラテスは、幾何学や天文学など、実学的なものは好まなかった。神々への崇敬として「神のみぞ知る」と人間の知性の限界（不可知論

agnosticism)として「無知の知」を提唱した。抽象概念や曖昧な事柄を、問答法(dialectic 弁証法)にて明確化しようとした。イオニア学派からはじまる自然哲学とは異なり、人間や社会に関する普遍的真理をはじめて探求していった。

プラトン(Platon, B.C. 427 - B.C. 347)は、ソクラテスの弟子で、アリストテレスの師となる。プラトンは、正義・徳・善を追求(愛知者 philosophy)する主知主義をとっていた。感覚を超えた魂の目によってとらえる真実在というイデア論や、哲学者による国家統治構想(哲人政治)などを唱え、アカデメイアの設立して実践した。イデア論を宇宙に適用して万物の根本原因を「知性」とし「万物を貫く共通の善」であるとした。神々と自然や宇宙まで不可分で、背後には善やイデアがあると考えた。

e アリストテレス

アリストテレス(Aristoteles, B.C. 384 - B.C. 322)は、後世に与えた影響も大きく、それまでの哲学的思索を体系化するという作業もおこなった。その範囲は、論理学や倫理学、哲学だけでなく、「形而上学」、「政治学」、「弁論術」、「詩学」、「自然学」など多岐に渡っていた。自然と人間・社会のあり方を、形而上学によって包括的に統合しようとした。そのため、「万学の祖」と呼ばれるようになった。

プラトンのイデアの否定し、火・空気・水・土の「四大元素」という物質観を想定した。個物の本質である「形相(エイダス eidos)」が個物の素材である「質料(ヒューレ hyle)」と結びついて個物(実体)となり、それらを特性づける温と冷、乾と湿の対立する性質の組み合わせにより成り立つと考えた。

人生を善く生きることが幸福である「最高善」と、中庸の徳として「知性的知徳」から「倫理的徳」がえられるとした。正義と友愛を現実社会では尊重すべきと説いた。

アリストテレスは、運動論として、外から押したり引いたりする「強制的な力」と「自然的な力」に分けた。自然的な力は、地上の上下運動と地球を中心とする同心円による天の円運動(天動説)とに分けた。宇宙には球状の層構造(天球)があり、天球層は4元素とは異なる元素(エーテル aether)からなるという宇宙論を展開した。

生命論として、生物は生物以外のものから自然に生まれるという「自然発生説」を唱えた。植物から、つくりの単純な動物へ、さらに複雑な動物へと変化するという、自然の段階説をとった。動物学では、系統的で網羅的な事実の記載と分類法も提示し、記載のために解剖もおこなっていた。

f 世界市民主義

アリストテレスの死後、ギリシアは、ポリスの衰退を背景として興った。アレクサンドロス大王の東征により地中海世界が拡大していき、ギリシアとオリエントの混合した「ヘリニズム文化」の影響が強くなった。そのため、国家や民族を越えた「世界市民主義（コスモポリタニズム cosmopolitanism）」を唱えるストア派が生まれてきた。

ディオゲネス（Diogenes, B.C. 412? - B.C. 325）は、欲望から解放されて動じない心で「徳」を持つことが重要と考え、肉体的・精神的な鍛錬のために犬のような生活を送った。「犬のディオゲネス」と呼ばれ犬儒派（キュニコス派）となる。ポリスの理念を否定し、世界市民思想の概念を示した。

エピクロス（Epikouros, B.C. 341 - B.C. 270）は、「快樂主義」を唱えるエピクロス派の始祖である。幸福を人生の目的とした現実から解放された「快」を追求することや「平静な心」を追求することを唱えた。エピクロスは、それ以上分割できない原子と空虚から、世界が成り立つとする原子論者であった。それらの存在を把握するのが感覚であり信頼できるとした。

ゼノン（Zenon, B.C. 335 - B.C. 263）は、学問を、自然学、論理学、倫理学という哲学の3つに区分した。快や不快に心を奪われなくて、心の平穏が獲得できるという考えから、ストア派の起源と考えられている。

エピクロスによるエピクロス派は、ゼノンによるストア派と対立することになる。エピクロス派は隠れて生き、ストア派は自然に生きる。エピクロス派は社会とは関わらず、ストア派は社会に参加する。エピクロス派は閉鎖的な活動を、ストア派は開放的な活動をした。エピクロス派は魂の平安と快樂主義を、ストア派は情念（パトス pathos）から開

放された禁欲主義を理想とした。両者は、さまざまな点で対立していった。

セネカ (Seneca, B.C. 1? - 65?) は、ローマ皇帝ネロの家庭教師として知られるが、晩年はネロに自殺を命じられた。哲学としては、死に対して人間がとるべき態度として、理性により自己制御する倫理に関心をもった。ストア派の哲学者でもあったが、多数の悲劇を残した文学者でもあった。セネカの作品は、劇作家に大きな影響を与えた。

エピクテトス (Epiktetos, 55? - 135?) は、奴隷出身であるが、ストア哲学を学び、奴隷から開放された。哲学の教師として有名になり、皇帝ハドリアヌスにも謁見した。自由にできるものは自分の意思のみで、自分のものでないものを求めないことが、精神を真に自由にするとした。

アントニヌス (Antoninus, 121 - 180) は、第 16 代ローマ皇帝で、学問を好んだ皇帝五賢帝の一人で「哲人皇帝」とも呼ばれる。ストア哲学などの学問を身につけ、禁欲主義を生涯にわたって守った。自らへの戒めのために「自省録」を著したが、ストア派の思想書として、後に多くの知識人に影響を与えた。

g 新プラトン学派

古代ギリシャ哲学最後の学派として、プロティノス (Plotinus, 205? - 269) は、新プラトン主義の創始した。プラトンの思想を継承し、アリストテレス学派、ストア学派、新ピタゴラス学派なども受け入れ、神秘主義的な学説である。万物は無限の存在 (善のアイデア) である「一者」から流出した理性の働きによるとした。神は、論理では認識できないというような神秘主義的な思想は、アウグスティヌスらにも影響を及ぼし、キリスト教神学に取り入れられた。

3 古代から中世の宗教と哲学

古代には多くの宗教が生まれ、中世において宗教が広がり、宗教を中心とした社会が生まれてきた。西洋ではユダヤ教 (紀元前 6 世紀頃) とそれを母体とするキリスト教 (30 年頃) が、西アジアではイスラム教 (622 年) が、インドから東アジアにかけては

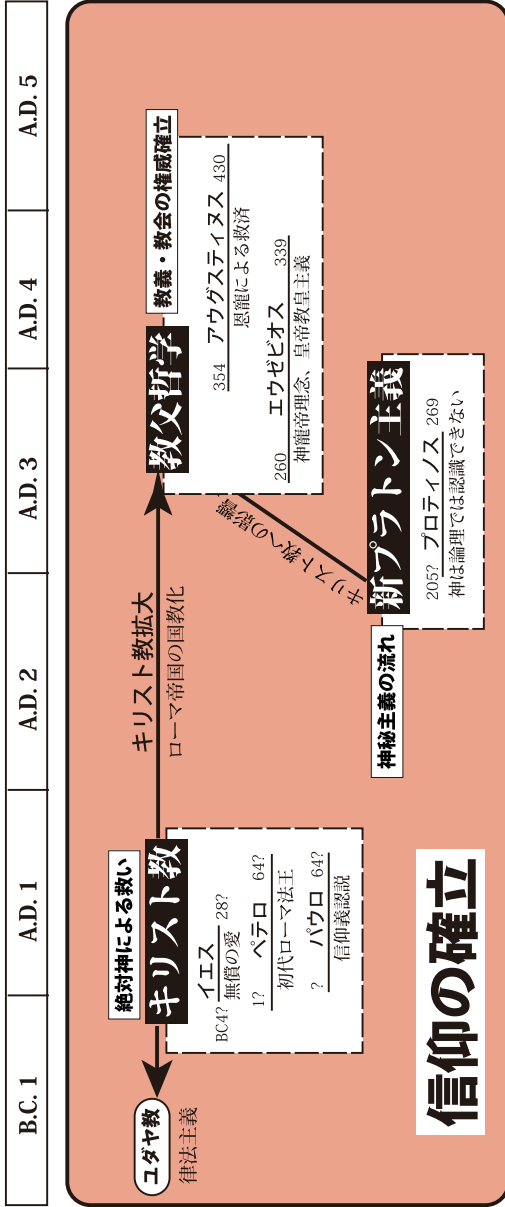


図 1-4 古代の信仰の確立
古代の信仰の確立において、キリスト教を中心とする哲学の概要をまとめた。

仏教（紀元前 6 ～ 5 世紀頃）が生まれてきた。中国では孔子が創始した儒教や老子による道教（5 世紀）など、多様な独自の思想が生まれた。西洋では古代から中世にかけては、キリスト教を中心とする世界観が支配的となった（図 1-4）。

a キリスト教と教父哲学

中世ヨーロッパはキリスト教の影響下にあった。キリスト教は、イエス・キリスト（Jesus Christ, B.C. 4? - 30?）が、神としての属性をもつとして信仰の対象とされた。父（父なる神）、子（神の子なるキリスト）、霊（聖霊）の三つが「一体（唯一神）」であるとする三位一体を教義としていた。時代とともに多くの教派（正教会、東方諸教会、カトリック教会、聖公会、プロテスタント）に分かれていった。

ペトロ（Peter, 1? - 64?）は、12 使徒の一人で、新約聖書に登場する。初代ローマ教皇とされている。カトリック教会においては「使徒の頭」とされ、初期キリスト教の伝道活動において、ユダヤ人キリスト教を代表する存在であった。

パウロ（Paul the Apostle, ? - 64?）は、新約聖書の著者の一人で、立法ではなく信仰あるのみという信仰義認説を唱え、初期キリスト教発展の基礎をつくった。

ローマ帝国が動揺、衰退、分裂する中、キリスト教を国教にしたことで、キリスト教が拡大し、教義の確立、教会の権威ができてきた。神秘主義の流れをもった新プラトン主義を用いて、信仰を理性的に考える「教父哲学（patristic philosophy）」が生まれ、中世になると体系化されていった。

エウセビオス（Eusebios, 260 - 339）は、ギリシア教父の一人で、代表作「教会史」を著したため「教会史の父」と呼ばれている。皇帝位は神の恩寵によるものという神寵帝理念の皇帝教皇主義を唱えた。

アウグスティヌス（Aurelius Augustinus, 354 - 430）は、新プラトン主義とキリスト教思想を統合した。人間の意志を無力で神の恩寵なしには善をなしえないという「恩寵による救済」を考えた。教義や教会の権威を確立した。

アルクイン（Alcuin, 735? - 804）は、長年学校の教師を勤め、後にフランク王国で

の教会制度と教育制度に改革に貢献した。その後、司教として、カロリング朝ルネサンスを代表する人物となった。

b スコラ哲学

11世紀以降に起こったスコラ哲学 (scholasticism) は、哲学的な思索ではなく、キリスト教において、教義を体系化するための方法論や思考法である (図 1-5)。

スコラ哲学とは、課題に対して理性的に答えを出すことであった。聖書や先人の著作を読み比べ、矛盾点や問題点を抽出し、合意に至るような哲学的分析するか、もしくは矛盾自体を主観として解消していく、という方法をとった。中でも重要な思索として「神の存在証明」がある (註)。ここでは、論理的方法論は用いていたが、目指すものが合意形成、あるいは主観に帰着させるため、創造性のないものであった。だが、アリストテレスの著作や聖書、重要文献の課題が整理されてきた。

アンセルムス (Anselmus Cantuariensis, 1033 - 1109) は、聖書に依拠して神の存在を証明するのではなく、理性的、学術的に神を把握しようとした。そのため「スコラ哲学の父」と呼ばれている。背理法的方法を用いた神の存在証明が有名である。

神は、普遍的に実在するか (実在論 philosophical realism)、名目だけのものか (唯名論 nominalism) の論争 (普遍論争) が起こった。アベラール (Pierre Abelard, 1079 - 1142) は、人間 (理性) が信仰に優先するという「唯名論」の創始して知られ、スコラ哲学の基礎を築いた。

ロジャー・ベーコン (Roger Bacon, 1214? - 1294) は、理論だけでなく知識はすべて経験に基づくという経験知と実験観察を重視した。これは現在の科学的手法に通じ、近代科学の先駆者といわれる。拡大鏡の発明、暦の改良、光のスペクトルを観測などもおこなっており、「驚嘆の博士」(Doctor Mirabilis) とよばれた。

「神学大全」を著したアキナス (Thomas Aquinas, 1225? - 1274) は、スコラ哲学を大成した。人間をアリストテレスを中心とした人間中心主義 (唯名論) と、キリスト教における神中心主義 (実在論) と相対立する概念であるが、形而上学的に融和し統合

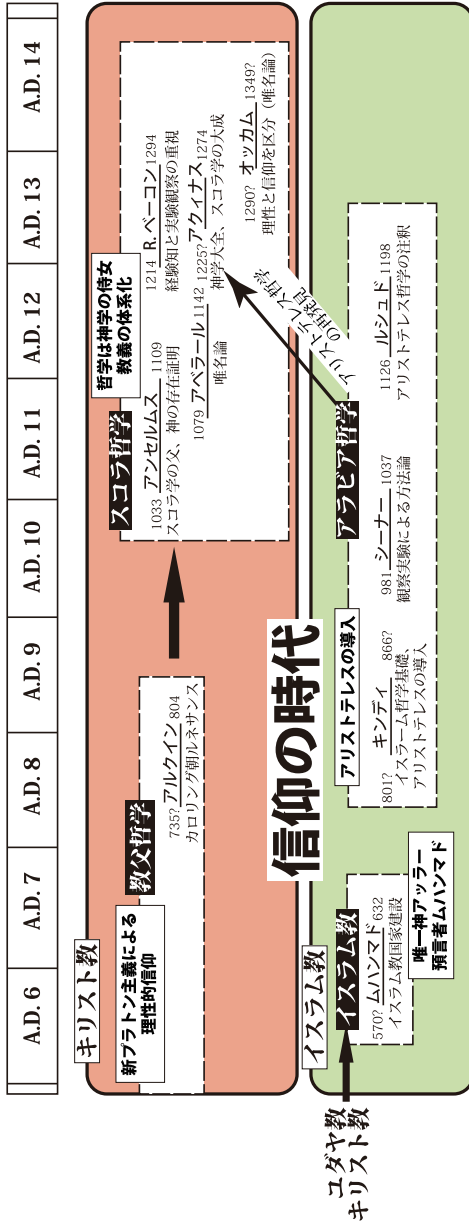


図 1-5 中世の信仰の時代

中世は信仰の時代である。ヨーロッパでは、キリスト教会が大きな権力を持ち、スコラ哲学が生まれた。西アジアでは、イスラム教が生まれ、アラビア哲学が興った。

した。また、神の存在を証明（宇宙論的証明）として、因果律によって原因を遡っていくと根因が存在し、それが神である、という考え方であった。

オッカム（William of Ockham, 1290? - 1349?）は、理性と信仰を区分する唯名論を唱えた後期スコラ哲学を代表する神学者、哲学者である。常に可能な限り最小、簡潔な説明を選ぶべきだと唱えた。後に、哲学や科学で、節約の原理である「オッカムの剃刀」と呼ばれるものである。

スコラ哲学では、神の存在証明が強く望まれ、それに答える形でいくつかの証明が提案されたが、論理的には問題もあった。しかし、証明への取り組みによって信仰を深めることになった。そんな中で、論理的、科学的な方法論が生まれてきた。

【註：神の存在証明】

この神の存在証明は、後にカントによって「純粋理性批判」第三章「純粋理性の理想」で本体論的証明と呼ばれたもので、次のような背理法によるものであった。

「必然的な存在者」（神）とは、「存在しないことは絶対に考えられえない存在者」という前提を置く。一般に何かが存在するなら、人間の理解できる内なる存在より、人間の大きさに比べれば「必然的な存在者」の方が大きな存在となるはずだ。よってもし「必然的な存在者」（神）が人間の理解の内だけに存在し、「必然的な存在者が存在しない」と考えられるのであれば、それは神が「それ以上大きなものがない」という前提とは矛盾する。よって、「必然的な存在者は存在する」ことは不可避となる。

このような背理法によって、神が「存在する」という主張を展開した。しかし、論理的におかしい。前提とした「最大」と、人間の理解の内の大きさが比較できるものか、という疑問がある。また、人間より大きな存在という前提がおけるのであれば、どのようなもの（架空のもの）でも、この論理で存在証明が可能となる。また、神が人間内にも外にも存在しないと、両者を否定しても成り立つ論理である。この論理は、背理法の形式をとっているが、矛盾を含む帰帰構造となっており、論理矛盾がある。

c イスラム教

西アジアでは、6世紀のビザンツ帝国とササン朝の争いによって、メソポタミア経由の

交易路の遮断された。6世紀末には、アラビア半島経由の交易路の活発化が起こり、メッカが繁栄した。貧富の格差が増大し、部族社会としての相互扶助の伝統が崩壊した。アラビア半島では、遊牧のアラブ人は部族・血族絶対主義で、部族ごとの神を信仰をしていたが、そこにユダヤ教とキリスト教の流入してきた。このような背景から、宗教や社会改革の必要性が生じてきていた。

ムハンマド (Muammad, 570? - 632) は、神の啓示を受けて預言者となり、イスラム教を布教した。622年、唯一神アッラーへの絶対的帰依と偶像崇拜の禁止した。部族単位ではなく個人が信仰で結びつく共同体 (ウンマ) が成立し、神の下での平等社会を目指した。

ムハンマドの死後は、カリフと呼ばれる後継者が共同体を指導し、アラビア半島を宗教的、政治的に統一した。歴代のカリフは、イスラム教の布教と領土の拡大に努め、東は中央アジア、西はスペインに至る広大なイスラム帝国ができた。

キリスト教の聖地エルサレムがイスラム勢力に占領されたため、キリスト教徒が聖地奪還のために十字軍として遠征がおこなわれた。こキリスト教とイスラム教の争いが起こったが、十字軍遠征によって東方文化が西洋に流入し、イタリアの諸都市は交易で繁栄し、ルネサンスの下地となった。

d アラビア哲学

アラビア哲学は、イスラム圏を中心に発達したものでイスラム哲学とも呼ばれる。イスラム教と結びつき、神秘主義的傾向の強いものであった。

アリストテレスの体系は、中世のヨーロッパでは忘れ去られていたが、9世紀のアッバース朝の時代にはアリストテレスの著作が収集され、10世紀から12世紀初頭にかけて、アラビア語からラテン語に翻訳され、イスラム圏でのアラビア哲学の隆盛する基礎となっていた。

キンディ (Abu-Yusuf Yaqub ibn Isaq al-Kindi, 801? - 866?) は、イスラム圏でイスラム哲学の基礎を築いた。古代ギリシアの多くの著作をアラビア語に翻訳するとともに、

多数の著作もおこなった。イスラム世界にアリストテレスの哲学を導入し、真理の探究とその普遍性の重要性を説いた。

シーナー（Ibn Sina, 981 - 1037）は、アリストテレスを引用しながら、観察と実験によって理論を構築する方法論を用いた。この方法論は、後のヨーロッパにおいてベーコンなどに大きな影響を与えることになった。

ルシュド（abu al-walid muhammad ibn ahmad ibn rusd, 1126 - 1198）は、アリストテレス哲学に注釈を加えた。著作は、中世ヨーロッパのスコラ哲学者によって、ラテン語に翻訳され検討されていった。

アラビア哲学を経由して、古代ギリシアの哲学がヨーロッパに再びもたらされることになり、ルネサンスへと進んだ。

中世は古代の哲学を集大成したアリストテレスの理論体系と、キリスト教の宗教家を中心とした神学が、哲学的思想を代表していた。その中で地球や宇宙についての思索もあったが、未知なる不思議なことはすべて神に帰着させたので、科学的進展は少なかった。

4 近世前半：ルネサンスと宗教改革

近世は、東ローマ帝国滅亡（1453年）から、フランス7月革命（1830年）までである。ルネサンス（14世紀から16世紀）から、宗教改革（1517年より16世紀）、大航海時代（15世紀 - 16世紀前半）を経て、市民革命（16世紀から18世紀）、産業革命（18世紀後半 - 19世紀初頭）など、多くの歴史的出来事が起こった時代である。市民の視野が広がり、宗教の呪縛から逃れ、自由な思索、科学的思索が営まれるようになってきた。まずは、近世前半のルネサンスと宗教改革を中心とした思索を見ていく（図1-6）。

a ルネサンスと人文主義

中世ヨーロッパは封建制の時代で、キリスト教会が権力を振るっていたが、教会は権

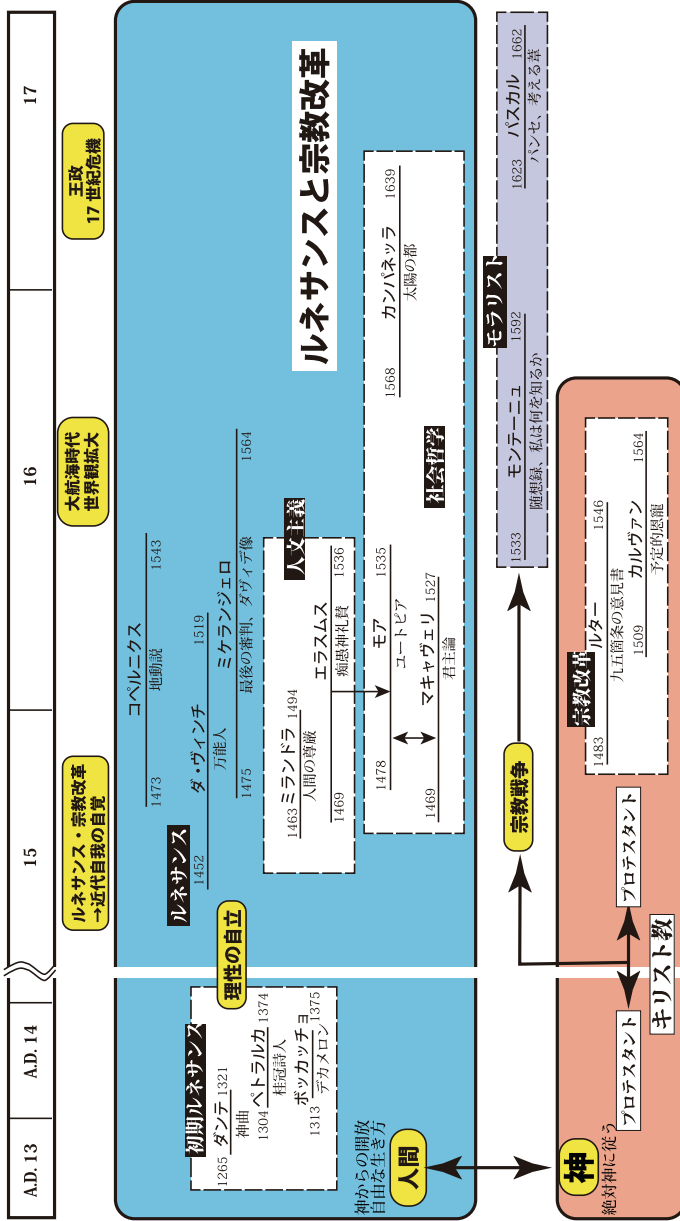


図 1-6 近世前半：ルネサンスと宗教改革

ルネサンスと宗教改革が起こった近世の思想の概要。古代の14世紀以前と近世の15世紀以降は、時代のスケールが異なっているの
で注意。

威を弱めていった。十字軍の遠征のあと、中世後期になると地中海貿易が盛んになることで、イタリアの都市国家が富の蓄積で力を持ちはじめ、自由な市民活動が起こった。さらに、ビザンチン帝国の滅亡とイスラム文化の刺激も加わり、14、15世紀にはイタリアのルネサンスで前期ルネサンスがはじまり、ネーデルランド、ドイツ、スペイン、フランス、イギリスなどに広まっていった。

ルネサンス (Renaissance) は、ギリシアやローマの古典や聖書原典の研究を通して、神や人間の本質を理解しようとする思想から、個人の自由と人間性の尊重の精神が生まれた。

詩人ダンテ (Dante Alighieri, 1265 - 1321) は、ローマの古典文学とキリスト教による救済とを図った叙事詩である「神曲」を著した。ペトラルカ (Francesco Petrarca, 1304 - 1374) は、叙事詩で有名となり桂冠詩人 (poeta laureatus) の榮譽を受けた。フィチーノ (Marsilio Ficino, 1433 - 1499) は、プラトンの著作を翻訳した。ボッカッチョ (Giovanni Boccaccio, 1313 - 1375) は、「デカメロン」や著作や多数の詩作を残した。

ルネサンスにおいて、ダ・ヴィンチ、ミケランジェロ、ラファエロは、三大巨匠と呼ばれている。ダ・ヴィンチ (Leonardo da Vinci, 1452 - 1519) は、多才で非常の多くの分野で業績を残しており、手稿では科学、地質学に関係した記述も残している (Bortolon, 1968)。ミケランジェロ (Michelangelo di Lodovico Buonarroti Simoni, 1475 - 1564) は、彫刻が有名であるが、絵画、建築、詩などで作品を残している。ラファエロ (Raffaello Santi, 1483 - 1520) は、画家で建築家でもあったが、37歳で亡くなったが、大き工房を経営していたため、多数の作品を残した。

ルネサンスでは、個人による内面の信仰を尊重し、聖書への原点回帰が起こった。多方面に才能を発揮する人材も輩出し、芸術の復興や人間中心のあり方を追求する人文主義 (humanism) が生まれた。人文主義は教会の権威への帰依という中世的精神からの離脱によって、新しい文化や思想となり、宗教改革とも連動していく。

ミランドラ (Giovanni Pico della Mirandola, 1463 - 1494) は、人間は自由意志によって何者にも (神のようにも獣のようにも) なれるとして、「人間の尊厳」を主張した。エ

ラスムス (Desiderius Erasmus Roterodamus, 1469 - 1536) は、キリスト教の権威者を自由な精神で風刺をした「痴愚神札賛」などの著作もある。

b 宗教改革 (1517 年より 16 世紀)

16 世紀にはルネサンスの自由な精神によって、腐敗していたキリスト教会を批判していくことから、宗教改革へと進んだ。人間の本性を謙虚に捉える宗教改革によって、プロテスタントとカトリックの対立は激化していき、ヨーロッパ各地で宗教戦争が起こった。

ルター (Martin Luther, 1483 - 1546) は、免罪符発行を批判する「九五箇条の意見書」を発表したことで宗教改革がはじまった。オッカム主義に基づき、意志と能力と能動的経験による個への注目をした。キリスト教信仰に基づく神を中心として「聖書のみ」の原理とした。

カルヴァン (Jean Calvin, 1509 - 1564) は、宗教改革初期の指導者である。禁欲的な信仰生活をすることをカルヴァン主義という。その考えは、教派の違いを超えて、神の絶対的権威と予定的恩寵、聖書の権威などで影響を与えた。

c 社会哲学

人文主義で神から離れ、風刺しながら社会や政治を考えることから、社会哲学が形成されてきた。

モア (Thomas More, 1478 - 1535) は、政治・社会を風刺した「ユートピア」を著した。ユートピア (Utopia) とはモアの造語で「どこにも無い場所」に「善き場所」という意味で「理想郷」と訳されている。カンパネッラ (Tommaso Campanella, 1568 - 1639) は、「太陽の都」は、すべてにわたって規則された共有制の理想社会を描いた。

マキャヴェリ (Niccolo Machiavelli, 1469 - 1527) は、現実主義的な政治理論として「君主論」を書いた。政治を宗教や倫理から独立させ、純粋に力関係としてとらえることで、近代政治学の祖となった。

d 科学革命

コペルニクスの登場から「科学革命 (scientific revolutions)」(第2章1) がはじまり、科学的、論理にもとづいた世界観から「コペルニクスの転回」が起こった。また、火薬、羅針盤、活版印刷というルネサンスの三大発明も、後の社会に大きな影響を与える。宗教改革や大航海時代が起こる。

e モラリスト

隣人愛を説くはずのキリスト教徒同士の戦争が起こったことで、人間を深く観察し、生き方を探究し反省したモラリスト (moralists) が生まれた。モラリストとは、フランス文学に端を発し、人の振舞いについて考察、省察したものを、エッセイ、断章、格言、箴言など、自由で短い独特の文体で表現していった思想家、作家たちである。哲学的な考察の形式にも取らわれず、体系や証明も気にせず書かれたものである。

モンテーニュ (Michel Eyquem de Montaigne, 1533 - 1592) は、人間を洞察し生き方を探求した「随想録」(Essais) を出版した。宗教戦争への悲観から、「私は何を知らぬのか」という懐疑主義から、時代への反省と警告と、高邁な理性への批判をした。独断に陥らない柔軟な心で謙虚に生きることを説いた。

パスカル (Blaise Pascal, 1623 - 1662、後述) の思想は、幾何学的精神と繊細の精神を用いて人間を把握していき、人間は弱さを知っている点で偉大で、「考える葦」として考えることが人間の尊厳性であるとした。モラリストとでもあり、大陸合理論の立場でもあった。主著「パンセ (Penses)」は未完であったが死後 (1670) に出版された。

5 近世後半：近代科学と論理的方法論の成立

目的論的自然観として天動説や、自然現象を神に起因するスコラ哲学があった。だが、ルネサンスや宗教改革を通じて、人間性尊重の精神と宗教からの脱却とが、理性的な思索へとつながった。自然が一定の法則のもとで動くという機械論的自然観から近代科学が生まれてきた。人間の感覚や理性を信頼した合理的精神が確立され、実

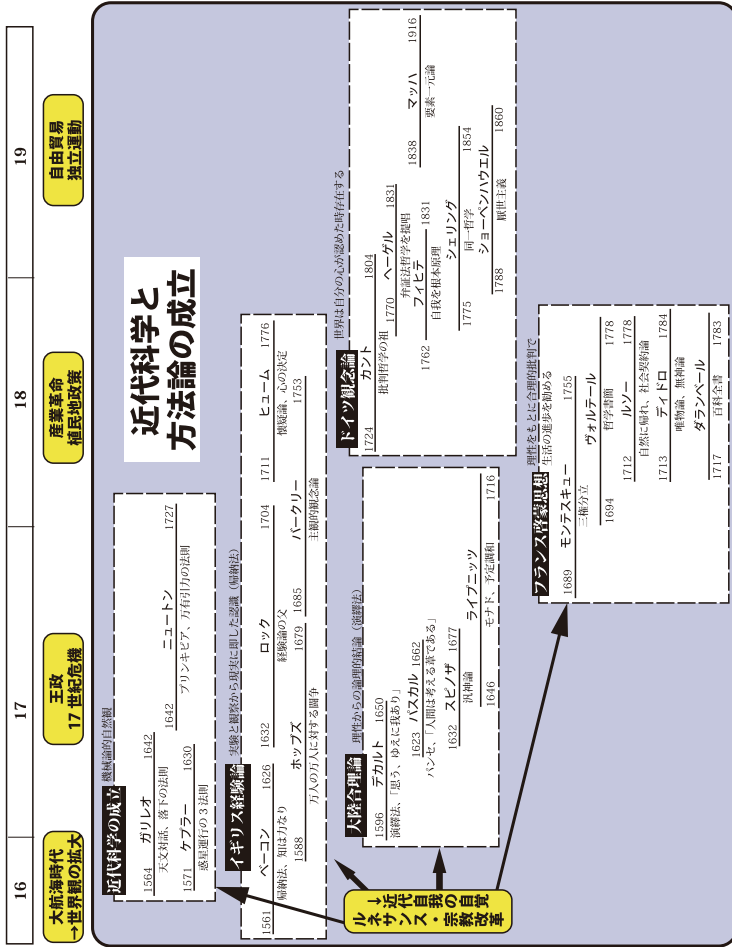


図 1-7 近世後半の近代科学と方法論の成立

近世後半の近代科学と論理的・方法論の成立の概要。主に天文学から物理学において近代科学が生まれ、帰納法（経験論）と演繹法（合理論）という現在も利用されている論理的方法論が成立した。

験や観察を通して法則を解明しようとする論理的方法論が成立してきた（図 1-7）。

近代科学の成立に重要なコペルニクス、ガリレオ、ケプラー、ニュートンは後述（第2章1a）する。

a イギリス経験論

人間の知識は経験に由来するとし、実験と観察を重ねることで現実に即した認識をえられるという考えが生まれた。イギリスで起こったことから、イギリス経験主義（British empiricism）と呼ばれる。この考え方は、個々の事実から一般則を導き出すという帰納法（induction）につながった。

ベーコン（Francis Bacon, 1561 - 1626）は、イギリスの絶対王政の立場をとっていたが、思想、哲学、科学では中世を乗り越えるための「大革新（Instauratio Magna）」を考えていた。学問的批判により「人間の生活を新しい発見と資財によって豊かにすること」を目標とし、新しい学問とは人類の共同作業であるとし、「知は力なり」と考えた。事実、経験、認識を重視し、帰納法にて一般則を導くという方法論によって、科学的知識がえられるとした。

ホッブズ（Thomas Hobbes, 1588 - 1679）は、世界に実在するものは物体のみで、すべての事象は物体とその機械的、必然的運動とするデカルトの機械論的世界観、さらに運動の極限となる潜在的な運動性を考えた。経験論から形而上学的唯物論を展開し、「万人の万人に対する闘争」として、神学から政治を切り離していこうとした。

ロック（John Locke, 1632 - 1704）は、イギリスの「経験論の父」と呼ばれた。外感と内省が知識の材料となり、経験に由来する「単純観念」が複合によって「複雑観念」ができ、その相互の知覚よりすべての知識は生まれる、という経験主義的認識論を展開した。各個人の自然権を守るために、人々の合意により政府は設立されるとし「自由主義の父」とも呼ばれる。

バークリー（George Berkeley, 1685 - 1753）は、ロックの経験論を承継した。物質は感覚の結合で、物質の存在とは知覚にすぎないとし、抽象観念の存在を否定した。

全ての観念と知識は、人間が経験を通じて形成する主観的観念であるとした。

ヒューム (David Hume, 1711 - 1776) は、知識の起源を知覚によってえられる観念だとする経験論を唱えた。因果関係について考察し、必然性とは因果関係に由来する「心の決定」によって成立するにすぎないとした。因果関係や実体などの観念は、習慣による主観的にすぎないと主張しおた。さらに、数学を唯一の論証的に確実な学問と認める懐疑論の立場から、人間の知および経験論の限界を示した。

b 大陸合理論

大陸合理論 (continental rationalism) は、フランスを中心に発展したもので、感性や感情を排除し、認識の根源を人間の理性とする一般的論理から、個々の事実を導いていく演繹法 (deduction) の考え方である。

デカルト (Rene Descartes, 1596 - 1650) は、スコラ哲学ではなく、人間の理性を用いて真理を探求したため「近代哲学の父」とされる。考える主体を自己とし、「我思う、ゆえに我あり (cogito ergo sum)」という有名な言葉を残した。1637年の「方法序説」の中で示した「発見の方法」は、演繹的方法論となる。

発見の方法とは、

明証性の規則：精神に明晰判明なもののみを真と認め、速断や先入見を排除すること

分析の規則：問題をできるだけ多くの小さい部分に分けて、もっとも単純で認識しやすい要素を見いだすこと

総合の規則：もっとも単純なものからもっとも複雑なものへと、思考を順序正しく導くこと

枚挙の規則：見落しがないかどうか十分に再検討すること

という4つの規則を、還元主義的・数学的な考え方を示した。明証、分析、総合、枚挙という規則は、現在にも通じる演繹的方法論といえる。

パスカル (Blaise Pascal, 1623 - 1662) は、人間は自然の中では小な生物にすぎな

いが、考えることを「人間は考える葦である」と表現し、人間の無限の可能性を示した。さらに、人間は弱いが、それを知っていることは偉大で、すべてを知るより、一つの愛の方が偉大であるとし、物体・精神・愛を「秩序の三段階」と呼んだ。デカルトの哲学を認めながらも、神の愛の大きな秩序の元では、デカルトの理性の秩序が空しいと指摘した。人間は、偉大と悲惨の間にただよう「中間者」ととらえ、その救いをキリスト教信仰に求めた。数学でも、パスカルの三角形、パスカルの原理、パスカルの定理などの発見で知られる。

スピノザ (Baruch De Spinoza, 1632 - 1677) は、合理主義者で「倫理学 (Ethica) (1677) で汎神論を唱えた。デカルトの「我思う、ゆえに我あり」を、「我は思惟しつつ存在する (Ego sum cogitans)」と解釈した。神は即ち自然となる非人格的な概念と、伝統的な自由意志の概念をも排除した決定論を唱えた。汎神論は一元論ともなり、唯物論やドイツ観念論へ大きな影響を与えた。

ライプニッツ (Gottfried Wilhelm Leibniz, 1646 - 1716) は、実体とは「モノドロジー (単子論)」で、自然はモノドで説明できると考えた。モノドとは、単一 (部分がない) 実体このとで、物体とはモノドの集合物、広がりも形もなく、分割もできない、神の創造によって発生し終焉し、何もかも通過できない、モノドは必ず異なっている、などとその性質を定義した。モノド同士はコミュニケーションをしないが、神によりあらかじめ調和するようにプログラムされている (予定調和) とした。

c ドイツ観念論

イギリスの経験論と大陸の合理論をもとにして、世界のものごとは、自分の心がそれを認めたとき存在するというドイツ観念論 (German idealism) が登場してきた。

カント (Immanuel Kant, 1724 - 1804) は、「純粹理性批判」、「実践理性批判」、「判断力批判」という有名な著書があり、「批判哲学の祖」、あるいは「ドイツ観念論哲学の祖」とされている。カントは、それまでの経験論と合理論を批判により統合していった。経験論の問題は、経験からは主観的なひとそれぞれの知識しか導くことができないこと、

合理論は理性の認識能力や限界を批判せずに物事を考え、解決できない状態（二律背反）に陥るという点を批判した。人間は身体をもつ感性的存在でもあり、理性をもつ理性的存在でもあるが、本質は理性的存在で理性の能力を吟味することで思想の統合を目指した。カントの思想とは、感性（感覚）で事柄（時間や空間）を捉え、悟性（知性）でカテゴリー（量、質、関係、様相など）を整理して概念形成をおこなうことで認識が成立するとした。対象が認識に従うという点が、従来の対象を心の内に入れるという考えとは全く異なるため、これを「認識のコペルニクス的転回」と呼んだ。

フィヒテ（Johann Gottlieb Fichte, 1762 - 1814）は、カントが理論哲学と実践哲学の総合を実現できていないことを問題として、自我をすべての根本原理だと考えた。自我はすべてを自分の内にもち、自我でないものはすべてを含む無限の存在と考えた。

ヘーゲル（Georg Wilhelm Friedrich Hegel, 1770 - 1831）は、ドイツ観念論哲学の完成させた。カントの道德論を、主観的な道德は自己中心になる危険があるとして批判し、自由は現実の社会の中で保障されるべきだとした。理性と現実の世界を動かしていく究極の原理は自由を本質とするという絶対精神を考えた。客観的自由の法と主観的自由の道德を統合する「弁証法哲学」を提唱し、真の自由である人倫ができるとした。人倫とは、全体性の家族と個別性の市民社会から、最高形態である国家ができていくとした。

シェリング（Friedrich Wilhelm Joseph von Schelling, 1775 - 1854）は、フィヒテが自我を無限の存在としたことに基づき、自我を自然とみなした。すべてを生産する自然を絶対的な同一者とおいたので、「同一哲学」と呼ばれた。しかし、絶対的な同一者から個々の存在がどうして生まれるかが不明であるため、ヘーゲルからは批判された。

ショーペンハウエル（Arthur Schopenhauer, 1788 - 1860）は、人生を苦とし、生きるに値しないという「厭世主義（pessimism）」を唱えた。人間は「衝動的な生への意志」をもち、それがすべての苦しみや争いの原因となるので、あきらめが救いであるとした。

マッハ（Ernst Waldfried Joseph Wenzel Mach, 1838 - 1916）は、哲学者であり物理学者でもあった。直接的経験へと立ち戻り、そこから再度、知識を構築しなおすべき

だとした。世界は、中立的な感覚的諸要素から成り立っており、感覚的要素が安定した関係で現れるもので、物体や自我などは実体ではないとした。因果関係も、感覚的要素の関係として表現できるとした。マッハの認識は、後に「要素一元論」と呼ばれる。

d フランス啓蒙思想

フランス啓蒙思想 (French enlightenment) とは、キリスト教を背景とした伝統的権威や制度に対し、人間の理性をもとにした合理的批判を行い、生活の進歩を考えた。17世紀のイギリスからはじまり、18世紀のフランスやドイツで広まり、後に市民革命の推進力となった。1751年から1772年までかかった「百科全書」は、啓蒙思想を代表する書物で、それに関わった知識人は「百科全書派」と呼ばれた。

モンテスキュー (Charles-Louis de Montesquieu, 1689 - 1755) は、ロックの権力を分ける考え方を発展させ、権力の濫用を防ぐために「三権分立」を考えた。三権分立は、近代民主国家の重要な政治機構となっている。

ヴォルテール (Voltaire 本名 Francois-Marie Arouet, 1694 - 1778) は、イギリスの政治制度や経験論に強い影響を受け、フランスの政治制度や社会を批判した。

ルソー (Jean-Jacques Rousseau, 1712 - 1778) は、自由で平等な社会をめざし人民主権を説いた。自然的自由 (自然権) を回復するため「自然に帰れ」といった。公共の利益を目指す一般意志に各人が服従する「社会契約」を、人民主権で選ばれた統治組織 (政府) が代行するとした。

デイドロ (Denis Diderot, 1713 - 1784) は、百科全書派の中心人物で、徹底した唯物論者であり、無神論を唱えた。ダランベール (Jean Le Rond d'Alembert 1717 - 1783) も「百科全書」の編纂にかかわった。

6 近世から近代へ：資本主義と社会主義

近代は、絶対王政の終焉となるフランス7月革命 (1830年) から始まり、本書では19世紀の終わりまでとした。産業革命以降、経済が発達し社会は大きく変化してき

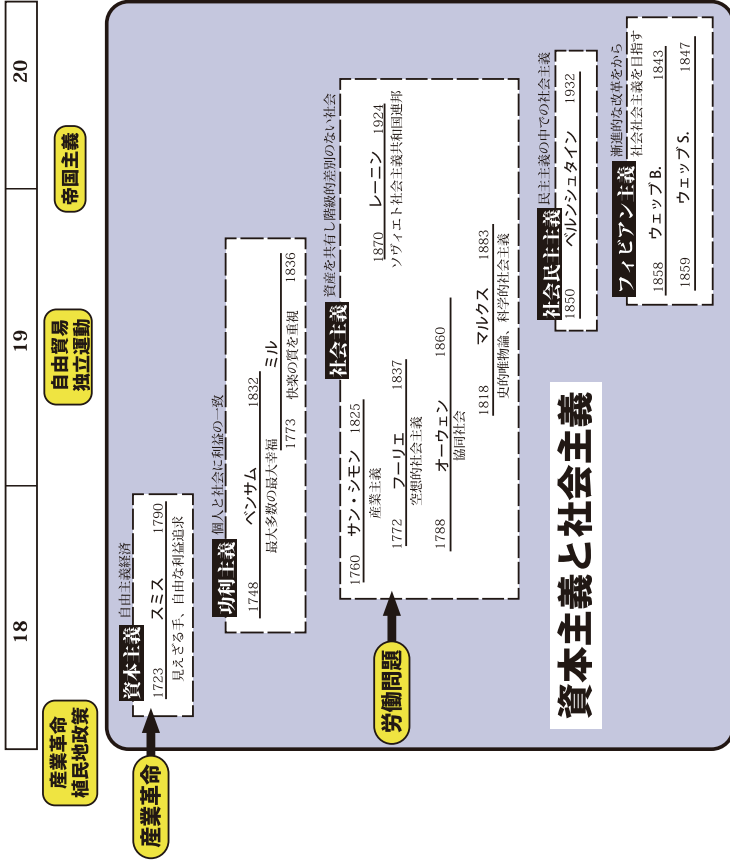


図 1-8 近代の資本主義と社会主義
近世から近代にかけての資本主義と社会主義を中心とした思想の概要。

た。近代社会において、資本主義的思想と社会主義的思想の大きく2つの潮流が生まれた(図1-8)。

a 資本主義と功利主義

産業革命の進展により、資本主義 (capitalism) の体制の確立され、資本家の発言力が増してきた。

スミス (Adam Smith, 1723 - 1790) は、人間の共感を評価し、自由主義経済を説いた。人は、他人の感情を想像する能力があり、他人から共感をえたいと考え、共感してもらえるように、公平な観察者の視点から利己心を追求できる。自由な個人の利益追求が、「見えざる手」として、社会の利益の増進へとつながるとした。そこには、正義の法を守ること (フェア・プレイ) が求められた。

産業革命に成功し発達したイギリスでは、個人と社会の利益との調和を解決するために道徳理論が必要となった。個人と社会の利益を調整するために、功利主義 (utilitarianism) が生まれる。

ベンサム (Jeremy Bentham, 1748 - 1832) は、快楽を求め苦痛を避けるという人間の本性が道徳の基準となるという功利性の原理を示し、快楽の量を計算した。より大きな快楽をえられる行為を選ぶべきで、「最大多数の最大幸福」を実現させる社会を理想と考えた。イギリス功利主義の創始者で実践者ともなった。

ミル (James Mill, 1773 - 1836) は、ベンサムの量的功利主義を、精神的な快楽の質を重視する質的功利主義へと修正した。外的な制裁ではなく、「おのれのごとく隣人を愛せよ」というイエスの黄金律に従った内的制裁と個性の尊重による「社会全体の幸福」を主張した。

b 社会主義

産業革命によって、19世紀から20世紀になると、資本主義の進展によって、労働環境の悪化や労働問題の発生し、貧富の差が拡大した。これらの問題に対して、公

平な富の分配による不平等の解消、人間性の回復などを主張する社会主義 (socialism) 思想が生まれてきた。社会主義的思想の初期には労働条件の改善や、理想の共同体が構想された。

サン・シモン (Claude Henri de Rouvroy, Comte de Saint-Simon, 1760 - 1825) は、「すべては産業によって、すべては産業のために」という標語を掲げ、封建的支配者になり変わり産業者 (資本家、科学者、労働者など) が政権をとる「産業主義」を唱えた。

オーウェン (Robert Owen, 1771 - 1858) は、人間を環境の産物とし、社会環境が人間形成に大きな影響を与えると考えた。富が平等に分配される「協同社会」の理念を説いた。

フーリエ (Francois Marie Charles Fourier, 1772 - 1837) は、産業社会の矛盾を指摘し、自由を維持し、賃金制を廃止した共同体として「空想的社会主義」を唱えた。

マルクス (Karl Marx, 1818 - 1883) は、空想的社会主義を批判し、資本主義の矛盾を科学的分析した唯物史観 (史的唯物論) による「科学的社会主義」を唱え、革命による実現を求めた。

20 世紀になると、マルクスの社会主義を修正したものが登場した。議会活動を通じて漸進的な改革を積み重ねて進めていく社会主義である。

社会保障の充実や主要産業の国有化などを主張するウェット夫妻 (Sidney Webb, 1859 - 1947; Beatrice Webb, 1858 - 1943) のフェビアン主義や、マルクスの武力革命を否定するベルンシュタイン (Eduard Bernstein, 1850 - 1932) の「社会民主主義」が登場した。また、レーニン (ソヴィエト社会主義共和国連邦) や毛沢東 (中華人民共和国) によって社会国家が設立された。

7 近代の哲学

近代の 19 世紀前半は、イギリスが「世界の工場」となり、市場開拓で自由貿易を迫った。ラテンアメリカでは独立運動が起こった。理性をよりどころに迷信・宗教・伝統の否定して、理性による啓蒙をおこなうという啓蒙主義により、近代科学の発展が進展し

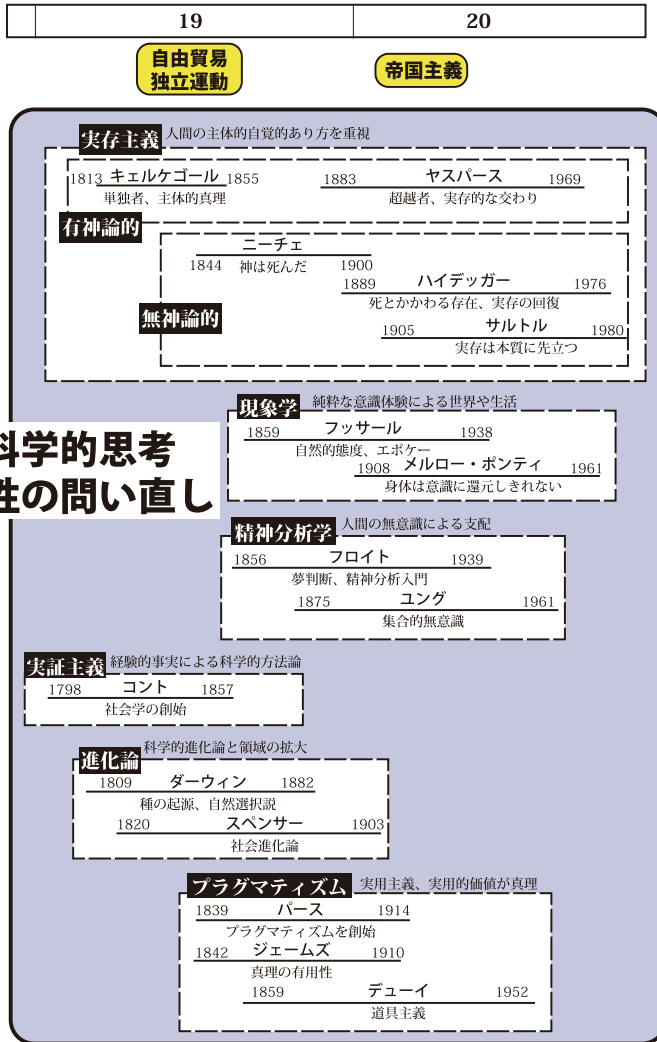


図 1-9 近代の科学的思考と理性の問い直し

近代の科学的思考が進み、近世の理性の信頼から理性の問い直しをするような哲学が出てきました。

てきた。また、19世紀中頃になると、イギリスやドイツ、アメリカなどが列強となり、軍事力を背景に世界を分割していく帝国主義が進んだ。アジアは近代化を進めていたが、列強に従属させられ植民地化されていった。列強の争いが、第一次世界大戦（1914年～）へとつながった。産業革命の進展により、機械化、近代化による人の画一化、平均化による人間疎外が起こってきた（図 1-9）。

a 実証主義

近代科学として自然科学が進歩してきた（第2章1）。19世紀になると、自然科学で使われていた観察により現象の法則を導くための実証という方法論を、人間の社会や生物の進化などにも適用していき法則性を見出そうとする実証主義（positivism）が生まれた。

コント（Auguste Comte, 1798 - 1857）は、社会の説明に実証を適用して、社会学を創設した。知識は「神学的」から「形而上学的（哲学的）」、「実証的」と進化するという三段階の法則を示し、社会学はまだ実証段階に達していないとした。

b 進化論

19世紀は、科学的思考や学問領域の拡大により、それまで宗教が扱っていた領域を、神学的説明ではなく科学的理論として考えられるようになってきた。その典型が進化論である。その背景には地質学など他の学問の進展によって、地球の時間に関する研究があった。

ダーウィン（Charles Robert Darwin, 1809 - 1882）は、全ての生物種が祖先から長い時間をかけて進化したという「進化論」を唱えた（第2章3b）。進化は、環境に適応した種が自然淘汰によって生き残ったという自然選択（適者生存）を原因とした。神による天地創造や生物の種は不変というキリスト教的な世界観とは相容れないものとなった。進化論は、他の分野にも反響を与えた。

スペンサー（Herbert Spencer, 1820 - 1903）は、生物学の進化論を、社会学にも

応用して「社会進化論」を提唱した。社会を有機体としてとらえ、分化、発展していくという社会有機体説を唱えた。適者生存のメカニズムを、軍事型社会から産業型社会へなどの社会発展にも適用した。政府の人為的な介入を否定して、資本主義経済の自由競争を正当化した。

c プラグマティズム

19世紀の産業革命期のアメリカ合衆国では、経験・観察を重んじる経験論や、進歩を信じる進化論、実用的な知識・技術を重視する開拓者精神などの影響を受け、知識の価値と実用性が重視された。人間の行動を通じておこなった結果の有効性によって、実用性と具体的経験を重視するプラグマティズム (pragmatism) が、アメリカを中心に広がった。

パース (Charles Sanders Peirce, 1839 - 1914) は、論理学、数学、記号論などで業績を挙げているが、プラグマティズムの創始者ともなった。観念の持つ意味は、抽象的な思考ではなく、具体的行動によって確かめられるとした。

ジェームズ (William James, 1842 - 1910) は、生活において有用なものが真理であるという「真理の有用性」を説いた。真理とは、主観的にえられる相対的なものとした。

デューイ (John Dewey, 1859 - 1952) は、社会生活の中で生じる問題を解決し、新たな方向性を示していく創造的知性が必要で、知性や観念は問題解決のための道具であるという「道具主義」を唱えた。人々が民主社会において、混乱を引き起こさずに社会変化をもたらさねばならず、そのために教育が重要だとした。

d 実存主義

合理主義や実証主義への反動として、そこから人間の主体性を重視する実存主義 (existentialism) が登場する。実存主義は、有神論と無神論に区分できる。有神論は神とのかかわりの中で実存を確立しようとするもので、無神論は神を前提としないで実存を確立しようとする考えである。

キェルケゴール (Sren Aabye Kierkegaard, 1813 - 1855) は、実存主義の先駆者となり、有神論的立場をとった。ヘーゲル的な客観的真理に対して、主体的真理を求めた。実存的な生き方の深まりを「実存の三段階」として弁証法的発展を考えた。享楽を求めて生きる美的実存をテーゼとして、倫理的義務に生きる倫理実存がアンチテーゼとなり、単独者として神の前に立つ宗教的実存としてアウフヘーベンによって絶望を克服していくというものである。

ヤスパース (Karl Theodor Jaspers, 1883 - 1969) も有神論の立場から、死や苦悩など限界状況で、超越者 (包括者) との出会いと実存的交わり (連帯性) によって実存の成立を目指した。

一方、無神論的立場は、ニーチェ (Friedrich Wilhelm Nietzsche, 1844 - 1900) から始まる。ニーチェは、現代文明では、人間が卑小化し、生の意義を失っていることから、キリスト教的道徳は弱者のルサンチマン (怨恨) から生まれた奴隷道徳で、「神は死んだ」として宗教的価値観が崩壊したと考えた。神なしでも生きられる人間像として超人を考え、超人は永劫回帰する生を能動的に生きる人間として、能動的ニヒリズムが大切であると唱えた。

ハイデッガー (Martin Heidegger, 1889 - 1976) は、存在の意味を問い直していった。平均的で主体性のない現存在のあり方のひと (世人) は、非本来的な自己とされた。人間は死に直面した存在で、現存在を本来的自己へとして呼びさまし、責任を自覚させる「良心の呼び声」によって、本来の自己として行動していくことで、実存を回復するとした。

サルトル (Jean-Paul Charles Aymard Sartre, 1905 - 1980) は、「実存は本質に先立つ」と考えた。自由であるが故に、なすこと一切に責任が生じ、「人間は自由の刑に処せられている」として、自己を積極的に社会参加 (アンガジュマン) の必要性を説いた。

e 現象学

現象学 (phenomenology) は、心理現象としてではなく、確実な基礎を求めて、一切の先入見を排して、意識に直接に現れている現象の本質を記述するものである。

フッサール (Edmund Gustav Albrecht Husserl, 1859-1938) によって、意識に現れる現象をありのままに考察する現象学が創始された。自然なものの見方を自然的態度と呼んだ。存在と確信が同じであることは確かめられないので、外部に存在する事物に関する判断が停止してしまう (エポケー)。そのために、なぜ存在していると確信しているのか、事象をありのままに考え直すことで意識へと還元しようとした。

メルロー・ポンティ (Maurice Merleau-Ponty, 1908 - 1961) は、手足の切断をした人が手足があった場所に痛みやかゆみを感じる幻影肢という症状から、身体は意識に還元しきれないと考えた。

f 精神分析学

もともとは、解離性障害や身体表現性障害などの治療するための方法論が、精神分析学 (psychoanalysis) であった。人間の心の中には理性では意識されない無意識の世界があり、誰もが無意識の欲求に支配されると考えられた。デカルト以来の自我を否定したものであった。意識することが苦痛になるような欲望は、無意識に抑圧するための症状として表れると考えた。人間には無意識の過程によって左右されるので、無意識に抑圧された葛藤を自覚し意識することで治療できると考えた。

フロイト (Sigmund Freud, 1856 - 1939) は、人間の心は、エス (無意識の部分で性欲動を中心とする本能的な欲求)、自我 (エスと超自我のバランスを取りながら現実の環境に適応)、超自我 (親や社会の教育による良心や社会的規範) の 3 層からなると考えた。神経症の治療のために、思いつくままに語らせる自由連想法や、現実の心理的親子関係に着目するエディプス・コンプレックスなどの精神分析の方法を考え、深層心理学を確立した。

ユング (Carl Gustav Jung, 1875 - 1961) は、無意識には、個人的無意識や集合

的無意識があるとした。個人的無意識は体験の抑圧によってつくり、集合的無意識は民族や人類に共通して存在するものと考えた。民話や神話のモチーフに着目した元型（アーキタイプ）を手がかりとした。ユングも夢分析を導入したが、フロイトのように性的なものにこだわらず、理論的な手法を導入し象徴的な解釈をした。

8 現代の哲学

近代の合理主義により、人間は理性的で自由で主体的に考える存在とされた。近代は、科学技術が発達し、人権の獲得、拡大が起こり、生活水準が向上するという利点もあったが、二度の世界大戦が起こり、環境問題や貧富の格差なども生じた。その結果、近代の合理主義や実証主義への反動が起こり、多様な思想が生まれてきた。以下では、主だった思想を概観していく（図 1-10）。

a 生の哲学

ベルクソン（Henri-Louis Bergson, 1859 - 1941）は、人間の生は機械論でも目的論でも捉えきれないとし、「生の哲学（philosophy of life）」を唱えた。生物進化は、機械論でも目的論ではなく、支える推進力は「生命の飛躍（elan vital）」とした。また、人類全体に「開かれた社会」をつくり出すために「愛の飛躍（elan d'amour）」を主張した。

b 大衆社会分析

科学技術の発展、工業化、合理化、情報化などで激しい変化が起こってきた。それに伴い人や社会のあり方も変化してきた。生活が豊かになるにつれて、人々の心も豊かになってるはずだが問題もでてきた。そのような大衆社会を読み解く思想が生まれしてきた。

ウェーバー（Max Weber, 1864 - 1920）は、近代を特徴づける合理性を備えたものが官僚制であり、その特徴を整理した。しかし、同時に官僚制の弊害として社会の閉

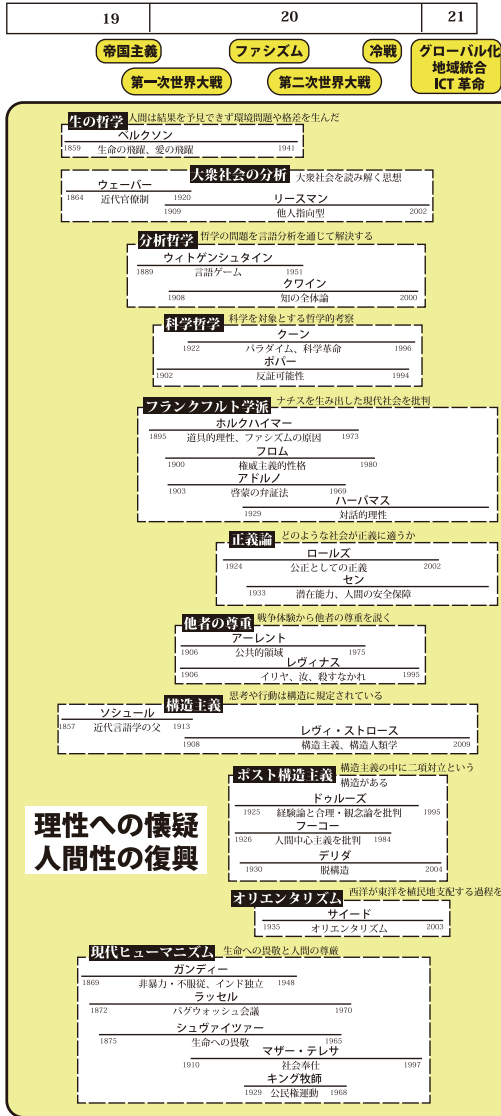


図 1-10 現代の理性の懐疑から人間性の復活へ
現代の多様な思索を概観したもの。

塞化なども起こる可能性も指摘した。

リースマン (David Riesman, 1909 - 2002) は、他人指向の人間の類型化をした。前近代は伝統や権力に服従する血縁集団へ帰属する伝統的指向型であり、近代では自分の両親に従い、主体的、自律的に行動する内部思考型とした。そして 20 世紀では、他人や世間に敏感で同調し、匿名の権威 (世論など) に影響を受けやすい他人指向型になっていると指摘した。

c 分析哲学

哲学は人間の心理にはよらず、客観的に真偽を判断できる論理に基づくべきとして、言語分析を通じて哲学の問題を解決しようとする分析哲学 (analytic philosophy) が登場した。分析哲学は、従来の形而上学が「神」や「善」など、検証できないものを対象にしてきたことへの批判となった。

ウイトゲンシュタイン (Ludwig Josef Johann Wittgenstein, 1889 - 1951) は、哲学上の問題は、言語がどう働くかについての誤解から生じると考えた。語られうることは自然科学に関することであり、伝統的な哲学上の問題は「語りえないことについては沈黙しなければならない」として、誤解を解決すれば哲学的問題は消え去るとした。言語が使用されるあらゆる文脈を含んだ言語活動の全体を「言語ゲーム」と考えた。

クワイン (Willard van Orman Quine, 1908 - 2000) は、ひとつの命題はいくつもの命題の集まりになっており確証や反証が可能になる、したがってその関係は理論的環境に依存する、として知の全体論 (ホーリズム) を唱えた。ただし、言語の翻訳には限界があり、複数の翻訳の仕方がある「翻訳の不確定性」も指摘した。

分析哲学は主に言語学を中心に展開されたが、科学へと適用した科学哲学 (第 2 章 1d) が発展してきた。

d フランクフルト派

ナチスを生み出した現代社会を批判したフランクフルト学派 (Frankfurt School) が登

場した。ナチスの迫害を受けたホルクハイマー（Max Horkheimer 1895 - 1973）やアドルノ（Theodor Wiesengrund Adorno, 1903 - 1969）は、ファシズムを可能にした人間のパーソナリティを分析した。理性は自然を人間の支配下におくため「道具的理性」となり、人間自身を画一的な統制や抑圧的支配下におくことができたと考えた。

フロム（Erich Seligmann Fromm, 1900 - 1980）は、性格を社会の成員に共通した社会的なものと考えた。自由をえても耐えきれず「自由からの逃走」して、権威への服従、画一性への同調として権威主義的性格が形成されるとした。この考えを、ナチスの民衆の支持やアメリカ大衆文化社会に適用した。

戦後の研究では、ハーバマス（Jurgen Habermas, 1929 - ）は、対話によって合意を可能にする理性を主張し、ルールは当事者による話し合いで決めるのが合理的とする対話的理性（コミュニケーションの合理性）を主張した。

e 正義論

どのような社会が正義に適うかということを考える正義論（A Theory of Justice）が出てきた。

ロールズ（John Bordley Rawls, 1921 - 2002）は、功利主義は最大化した集団の幸福を個人にどのように分配するかを問題にしない、として批判し、社会契約説を再構成した。正義に適う財の再分配のルールとして、平等な自由の原理（第一原理）、第二原理として公正な機会均等の原理と格差の原理、を示した。

セン（Amartya Sen, 1933 - ）は、選ぶうる人生の選択肢の幅としての潜在能力（capability）や、生存や尊厳に対する脅威から個人を守り、それぞれの可能性を実現するために人間の安全保障（human security）の必要性を提唱した。

f 他者の尊重

全体主義と大量虐殺の過酷な戦争体験から、「他者の尊重」することの大切さを説く考えた生まれた。

アーレント (Hannah Arendt, 1906 - 1975) は、人間の活動力の形態を、労働 (labor)、仕事 (work)、そして活動 (action) に区分した。労働は、生命を維持していくための営みだが、消費の目的ための生産なので空虚さがある。仕事は、耐久性のあるものを製作する営みで、孤独な作業だが、完成したとき喜びを見出すことができる。活動は、言葉を通して行われる言論や共同の行為で、必ず他者を必要とするものである。政治は活動と考え、活動場所が「公共的領域」と考えたが、近代以降は仕事や労働のみが高く評価されているとした。

レヴィナス (Emmanuel Levinas, 1906 - 1995) は、生きている人間のために生きることの倫理について追究した。意味が奪われた存在 (イリヤ) から脱却を目指した。他者は自我が無限にあふれでる存在で、「汝、殺すなかれ」という倫理的抵抗する超越的存在であると考えた。

g 構造主義

構造主義は、1960年代にフランスで発展したもので、思考や行動は構造に規定されていると考えるものである。構造主義は、人間の自由な主体性が歴史を動かすという実存主義に対して、主体はその背後にある構造の影響を無意識のうちに受けているとした。方法論としては、対象を構成する要素に分解し、要素間の関係を整理することで構造を理解していこうとするものである。

ソシュール (Ferdinand de Saussure, 1857 - 1913) は、「近代言語学の父」といわれ、構造言語学を構築した。名前をつけることで、他から区別され存在が捉えられる。さし示す「名前」とさし示される「もの」と「こと」の関係は、人間によって恣意的に作られたもので、絶対的なものではないとした。言語・文法的な体系 (ラング) が異なると無意識のうちに世界の見え方や思考も影響を受けるとした。

ソシュールの構造言語学は、レヴィ・ストロース (Claude Levi-Strauss, 1908 - 2009) に影響を与えた。文化に優劣は付けられないという文化相対主義で、構造人類学を確立した。レヴィ・ストロースは、ものごとを理解する時、独立したものとして理解する

のではなく、関係に注目し全体（構造）から理解する構造主義（structuralism）を唱えた。

構造主義は、主体的な人間が社会を進歩させたと考える近代西欧思想への根本的な批判となった。もともとは、言語学の研究からスタートしたものだが、他の分野でも多様な現象に潜在する構造に着目するものへと拡張されて使われる方法論となった。

h ポスト構造主義

フランスで盛んになった構造主義から、1960年代後半には批判的に継承するポスト構造主義（post-structuralism）と呼ばれる思想が生まれた。

ドゥルーズ（Gilles Deleuze, 1925 - 1995）は、経験論と合理論、観念論を批判的に解釈していった。フロイトの精神分析は人を父母との「オイディプスの三角形」に固定化している点、マルクス主義はすべての人を階級や組織に登録しているとして批判した。このような枠組みを破り、欲望を全面的に肯定し、無意識の世界は「欲望する機械」からなるとした。

フーコー（Michel Foucault, 1926 - 1984）は、エピステーメ（認識体系 eisteme）として時代区分をした。ルネサンス期までは「類比（アナロジー analogy）」の発想や思考が特徴で、古典主義の時代は「同一性と相違性の比較」していること、近代は「人間」が特徴であったが、人間の概念が人間中心主義であると批判した。現代を「人間の消滅」と考えた。フーコーは、構造主義を批判していたため、現在では、ポスト構造主義者とされている。

デリダ（Jacques Derrida, 1930 - 2004）は、構造主義の中にも、出来事と構造、近代と非近代、狂気と理性などの二項対立という構造があることを批判した、このような二項対立の構造を否定して「脱構造」を提唱したことから、ポスト構造主義と呼ばれた。この思想は、西洋哲学の根底を揺るがし、多くの分野に影響を与えた。

i オリエンタリズム

サイード (Edward Wadie Said, 1935- 2003) は、フーコーとデリダの影響を受けた。東洋人が西洋人よりも劣っているという印象が、植民地支配に利用されていく過程を明らかにした。西洋が東洋を支配する装置を「オリエンタリズム (orientalism)」と呼び批判した。文化は雑種的なもので、自分がどのような立場で見ているかを問い直していくことが重要であるとした。

j 現代ヒューマニズム

科学技術が発達し生活は豊かになった。だが、多数の生物種を絶滅させ、地球環境を変化させ、戦争や貧困を招き、人間の尊厳をも脅かすなどの危機も生じてきた。廃退してきた現代文化に抗して、生命への畏敬や人間の尊厳をいかに取り戻すかが問題となってきた。それらの問題に対して、現代ヒューマニズム (新人文主義 neo humanism) が 20 世紀初頭に生まれた。

ガンディー (Mohandas Karamchand Gandhi, 1869 - 1948) は、唯一絶対の真理を実現させる真理把持 (サティヤグラハ) として、暴力を否定し博愛の精神で行動する非暴力・不殺生 (アヒンサー) を手段とし、自己抑制で身体と精神を浄化し、純潔を保つ自己浄化 (ブラフマチャリヤー) が不可欠であるという思想を提唱した。インドを自治・独立 (スワラージ) の運動を指導したため、インド独立の父と呼ばれている。

ラッセル (Bertrand Russell, 1872 - 1970) は、「ラッセル・アインシュタイン宣言」で核兵器廃絶と戦争廃止を主張し、平和に対する科学者の国際的運動をこなう「パグウォッシュ会議」の開催へと発展した。自由、平等、帆船、反権力を主張し行動した。

シュヴァイツァー (Albert Schweitzer, 1875 - 1965) は、アフリカでの伝道と医療活動をおこなった。すべての生命を神聖なものとして尊重し、その営みを助けるという生命への畏怖が廃退した文化の立て直しに必要なとした。倫理の基本原理として、生命の維持促進をもたらすものが善、生命を傷つけることが悪とした。

マザー・テレサ (Mother Teresa, 1910 - 1997) は、修道女としてインドで奉仕の活

動をした。貧困や病気ではなく、だれからも見捨てられていると感じることが「最大の不幸」で、愛と憐みをもたず無関心でいることが「最大の罪」とした。

キング牧師（Martin Luther King, Jr. 1929 - 1968）は、アメリカで黒人として人種差別の撤廃を訴え、公民権運動を指導した。キリスト教の教えとガンディーの不服従・非暴力の運動を展開し、バス・ボイコット運動やワシントン大行進をおこなうことで公民権を勝ち取った。

9 思想の系譜

本章では、西洋の歴史の概要を示して、次に主だった哲学者の思索を時代順に概観してきた。長い知的活動の集積の結果として、時代とともに、多様な考えが、多くの地域からでてきた。現代になるほど、多様性とともに知的活動の生産量が多くなっている。インターネットの発達により、情報流通や情報発信の仕組みが手軽になり、出版状況も変化してきたことにも関係しているであろう。膨大な生産量により、専門性の分化が進んだ。周辺分野、関連分野ならまだしも、関連性のない分野の成果は、把握しきれなくなってきた。多様性の増加は歓迎すべきだが、全体像を理解し、離れた分野での協同が難しくなってきた。古い思索や成果は、時間の淘汰を受けているため、関連資料や解説資料も充実しているため、効率的に学ぶことができる。本章ができたのは、そのようなあまたの先達の御蔭である。

概観から人は本当にいろいろなことに考えを巡らせてきたことを痛感した。それらの思索の多くは、先人の知的資産を参照し、その上に新たな知見を加えたり、批判的に再構築をしたりすることで組み上げられてきた。その思索は、時代の影響を強く受け、さらに指導者の影響を受けるため、学派や思索のグループが形成されてきたこともわかる。直接の師弟関係による影響は、本人も強く意識するであろうが、古い時代や遠くの先人の影響は間接的になり、本人が意識していないで受けていることもあるだろう。そのような影響を同時代の第三者が判断することは難しいであろうが、後世から見ると、明らかに思想の影響が見て取れることもある。

多様性の維持は重要だが、現代の提唱され多くの人に受け入れられている思想が今後も時代の越えて継承されるかどうかは不明である。だが、近年から現在の潮流をよく見ること、未来への継承性の推測が可能かもしれない。

自然科学の潮流は、西洋に源流があるため、西洋史と西洋哲学史を中心に扱ってきた。その中に自然科学に関するものも少し加えたが、その詳細は次章で述べていくことになる。しかし、これからの時代には、東洋的思想も必要になるであろうという指摘もあった（小出, 2017c; 2000）。その導入の検討は、今後の課題となるであろう。

▼アノニマス

SNS には、個人情報を出しておこなうものや、個人情報を出すことなくおこなうものもある。情報発信の多くは、個人を特定させることなく匿名性を保ちながら、投稿や発言をおこなっていることも多いだろう。匿名性があるため、本音を吐露したり、感情的に発言したりすることもできる。一方、そんな匿名の発言が、トラブルを起こすことも多々あり、事件になることもあった。また、本人は個人情報を隠し、匿名のつもりでいても、それなりの技術を持った人が、細切れの情報から個人情報を読み取ったり、個人を特定したりすることもできる。匿名の情報であったとしても、量が多ければ、ビッグデータとして活用法があることがわかってきた。ビッグデータが、経済的利益を生むようになってきた。ネットワークが発達し、多くの人が利用する社会では、膨大な情報が利益だけでなく、犯罪を生むこともある。現代は、インターネットやコンピュータ、スマートフォンを使う情報化社会となっている。個人情報の保守に関するセキュリティは年々厳しくなっている。それでも、どこかに穴があり、個人情報が漏れたり、盗まれることがある。コンピュータやホームページ、情報に乗っ取ることで、脅迫事件も起こっている。個人情報と匿名性は、現代社会では、重要な課題となってきた。匿名は英語で anonymous (アノニマス) という。アノニマスとして、活動しているグループがある。必ずしも明確な組織や行動指針が決められているわけではないようだ。インターネットを通じて匿名の集団として抗議をしたり、それに共鳴する人たちが抗議デモ行動などを実働したりすることもある。アノニマスの象徴となっているのが、ひげのついた仮面である。仮面をつけてデモや行動をしている(図 1-11)。インターネットやコンピュータに詳しいハッカーやクラッカーもいて、いろいろな行動が取られている。アノニマスには次のような標語がある。

We are Anonymous. 我らは匿名である。

We are Legion. 我らは大軍である。

We do not forgive. 我らは許さない。

We do not forget. 我らは忘れない。

Expect Us. 我らに期待しなさい。■



図 1-11 anonymous

アノニマスは仮面をかぶって活動することがある。その時の仮面。



機能と装飾

雪国では、冬を前に多くの木々に雪囲いをつけられる。そこには機能だけでなく、装飾性も加味されている。北海道函館市五稜郭。著者撮影。

第2章

科学、科学哲学、そして地質学の歴史

前章では、古代ギリシアから現代までの哲学者とその思索の歴史を概観してきた。本章では、科学がどのように生まれ、多様化してきたのか、自然哲学から科学哲学がどのように成立してきたのか、また科学から地質学がどのように分岐してきたのか、を概観していく。さらに、地質学の成立において分岐点となった、2つの論争、進化論の成立、年代決定の技術開発、大陸移動の認識についても見ていくことにする。また、最後に、西洋で確立された地質学が、日本にどのように導入されたのかも見ていこう。



1 現代の自然科学の歴史

古代ギリシアの時代から、元素や宇宙、地球（太陽系）など、現在の自然科学が対象として扱っているものに関する科学的思索はすでにあつた。だが、当初それらは「科学」と呼ばれることはなく「自然哲学」と呼ばれていた。近代まで、哲学（者）と自然科学（者）の区別をされることはなく、同一の人物が科学的研究をおこないながら、哲学的考察も進められていた。その後、科学を専門とする職業的科学家が生まれ、科学の多様化が起り、そして科学の分野での哲学的思索もおこなわれ、科学哲学が生まれてきた。

a 近世：科学的方法論と近代科学の成立

中世からルネサンスや宗教改革などを経て近世になると、哲学的思索の深まりとともに、科学的方法論も確立されていく（図 2-1）。

イギリスのベーコン（第1章5a）は、「新機関（Novum Organum）」（1620）において、論理ばかりで経験を無視したスコラ哲学を批判して、経験を通じてのみ知識がえられるという「経験主義」をとった。自然を観察してえた知が、自然を支配するために「知は力なり」とした。観察や判断を歪める4つのイドラ（idola、種族、洞窟、市場、劇場）を取り除くための方法として、実験と観察のみから一般則を導く「帰納法」の重要性を再定義した。

フランスのデカルト（第1章5b）は、「方法序説」（1637）で、理性を信頼することが重要だが、理性を正しく導く推論の方法として「演繹法」を提案した。明確な原理を探すために方法的懐疑で、「我思う、ゆえに我あり」という第一原理を発見した。そこから、精神世界と物質世界を分離して「物心二元論」を唱え、機械論的自然観を示した。

これらの二人の哲学者によって、経験（観測や実験）を信頼する帰納法と、理性を信頼する演繹法という現在の科学にも通じる科学的方法論が確立されたことになる。だがその時代、西洋はキリスト教の支配が強く、アリストテレスの自然観が採用されていた。例えば、天体の運動には天動説を採用されたり、新プラトン主義的な神秘思想などもあった。

コペルニクス（Nicolaus Copernicus, 1473 - 1543）は、カトリック司祭でありながら、「地球の回転について」（1543）によって天動説を覆す地動説を唱えた。科学的証明を通じて、従来の宗教的な考えに変更を迫るという方法論を示した。それまで認識は対象に依拠すると考えられていたが、対象の認識は主観を構成することによって初めて可能になるという視点を示したが、それをカントは、「コペルニクスの転回」と呼んだ。後にこの言葉は、根本的な発想の転向で物事の新しい局面が開かれることを意味するようになった。

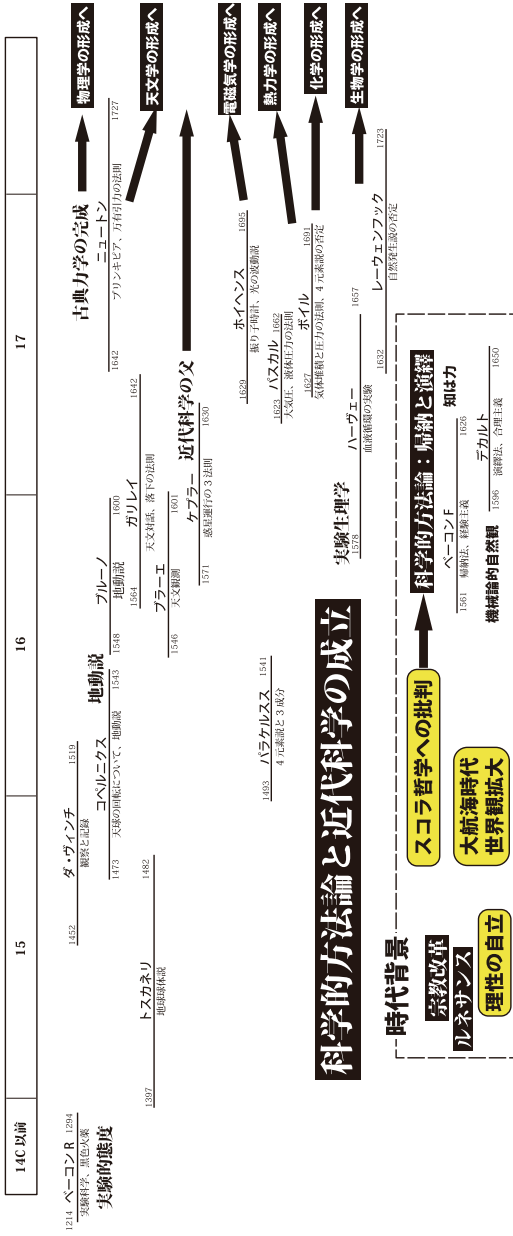


図 2-1 近世の科学的方法論と近代科学の成立
近世の主な科学の芽生えに関わった「科学者（自然哲学者と呼ばれていた）」とその思想、そして時代背景として重要な事項と科学的方法論の成立に関係した哲学者を示した。

ガリレオ (Galileo Galilei, 1564 - 1642) は、1610 年の「星界の報告」で、望遠鏡による「観測」で、月面に凹凸があることや木星の衛星を発見したことで、「地動説」の根拠とした (Cimino, 1968, 豊田編, 1973)。また「実験」によって振り子の等時性 (豊田, 1973) や「慣性の法則」として示した。その法則によって、物体の運動の規則性を落下する距離は時間の 2 乗に比例し、質量には依存しないことになり、アリストテレスの「重いものほど早く落下する」という考えを否定した。総合と分析、あるいは証拠と論理という科学的手法に基づいて示されたものである。

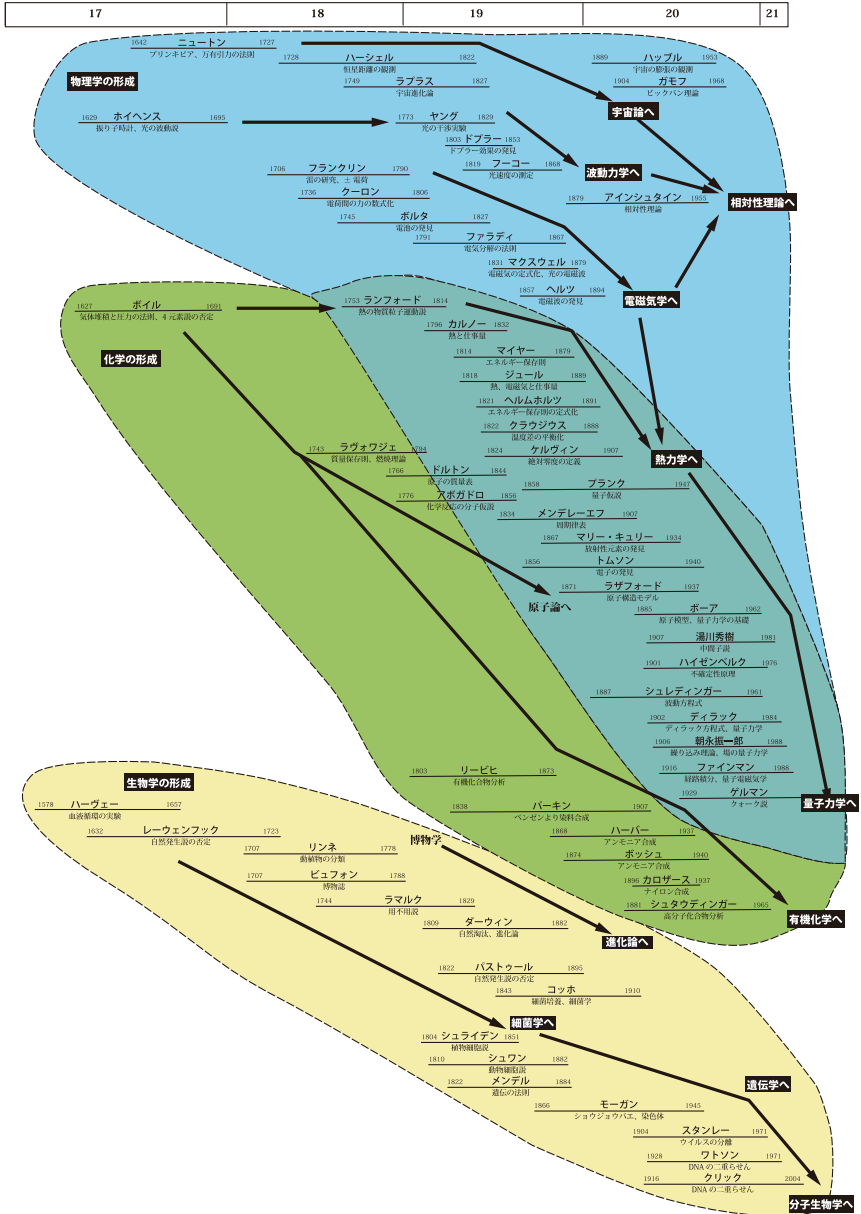
ケプラー (Johannes Kepler, 1571 - 1630) は、ティコ・ブラーエの精密な観測データを用いて 1609 年の「新天文学」で、惑星は太陽を一焦点とする楕円軌道をもつこと (第 1 法則)、動径ベクトルの描く面積速度は一定であること (第 2 法則) を示し、1611 年の「世界の調和」では惑星の公転周期の 2 乗は太陽からの平均距離の 3 乗に比例すること (第 3 法則) を示した。天体運動の観測データの帰納から「ケプラーの法則」が導かれ、そこから天体位置の予測が可能になり、遠洋航海に利用された。

ニュートン (Isaac Newton, 1642 - 1727) は「自然哲学の数学的原理」(1687) で、天文学からさらに抽象化を進めることで、物体の普遍的な運動法則によって記述できることを示し、古典力学と呼ばれる体系として物理学の基礎となった。同書で、「われ仮説を立てず (Hypotheses non fingo)」と述べ、力学における引力が「なぜ」発生するのかという原因に対して仮説を立てることはなく、引力がどのような法則であるのかを数学的に証明することに終止する「実証主義」的な科学的姿勢を示した。

17 世紀の物理学、主に天文学を中心にした科学の進展を、バターフィールド (Herbert Butterfield, 1900 - 1979) は、「近代科学の起源」(1949) の中で、近代科学の成立を「科学革命」と呼んだ。自然科学において、帰納法と演繹法が科学的方法論とし

図 2-2 現在の自然科学の系譜 (右ページ)

17 世紀後半からの自然哲学者と科学者の生存期間と業績を分野ごとに示した。主に物理学と化学、生物学の系譜を示した。地質学については別 (本章3) に示す。



て用いられるようになってきた。天文学や力学を中心にした物理学では、数学を法則の記述手段として利用し、厳密さと客観性、さらには検証性をもつようになった。一方、化学、生物学、地質学においては、数学的定量化、法則化には困難があった。

b 近代から現代：多様な自然科学の誕生

近世では、15世紀から大航海時代によって世界観の拡大がおこってきた。ルネサンスによって自由な生き方ができるようになり、宗教改革によって神から開放されることになり、理性の自立と理性への信頼が置かれてくるようになってきた。哲学思索の延長から、帰納法と演繹法という科学的方法論も確立されて、「科学革命」とつながった。

17世紀の「科学革命」以降、自然科学は物理学や化学、生物学への系譜となる基礎的な概念が成立し、現代科学につながる分野が生まれてきた。現在、自然科学は、多岐に区分されていく一方で、統合化や総合化の動きもある。本書も「地質学の学際化プロジェクト」として、その動きを反映している。

自然に関する知的体系を時系列に概観したのが科学史（history of science）となる。科学史は、科学哲学を考える上でも基礎的な視点を供給することになる。なぜなら、自然科学が歴史的にどのように誕生し、どのように体系化されてきたのか、その体系がどのように変化し変遷してきたのか、どのような転換が起きたのかなどを考察していくことが、科学哲学における重要なテーマとなっているからである。

ただし、個々の科学の成立過程や、科学者の業績については、あまりに膨大になるため、本書では述べる余裕はない。図 2-2 に概要を示すのみとする。

2 科学哲学の歴史

哲学の一分野となる科学哲学（science philosophy）は、厳密な定義はないが、一般に広く科学を対象とする哲学的な思索の総称となる（高橋，2002）。科学哲学の源流（第1章）は、哲学の中にある（図 2-3）。自然哲学から自然科学が別れ、科学の成立した後、科学に関する思索として科学哲学が登場してくることになるが、それらの過程を

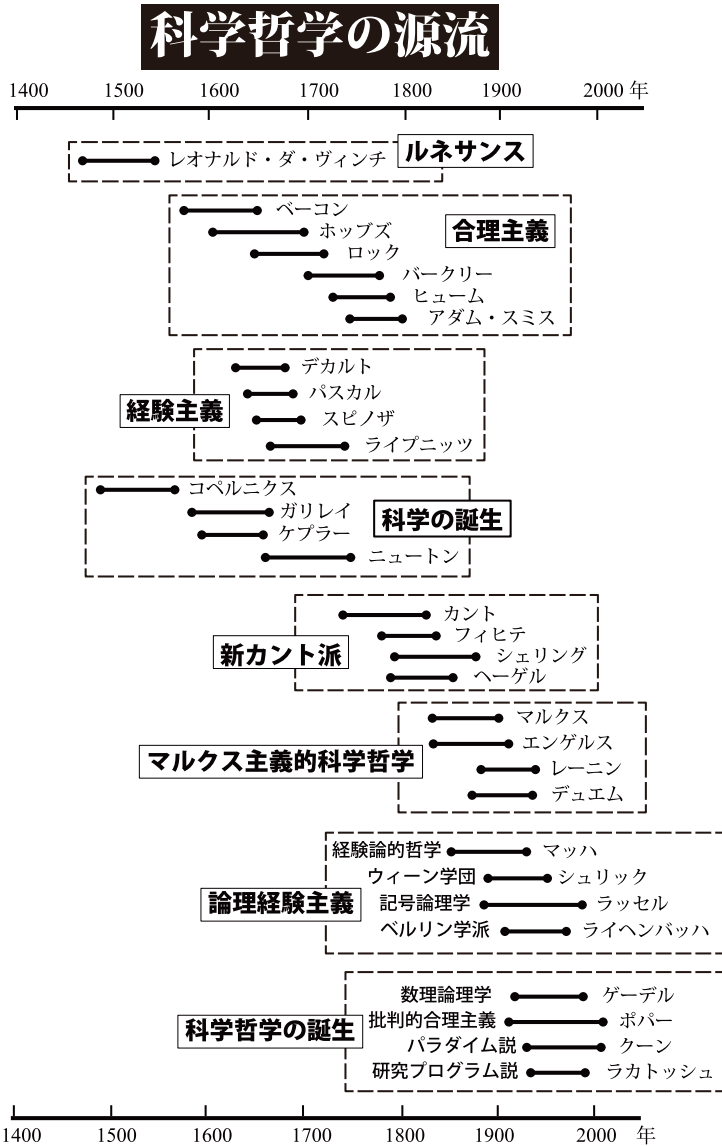
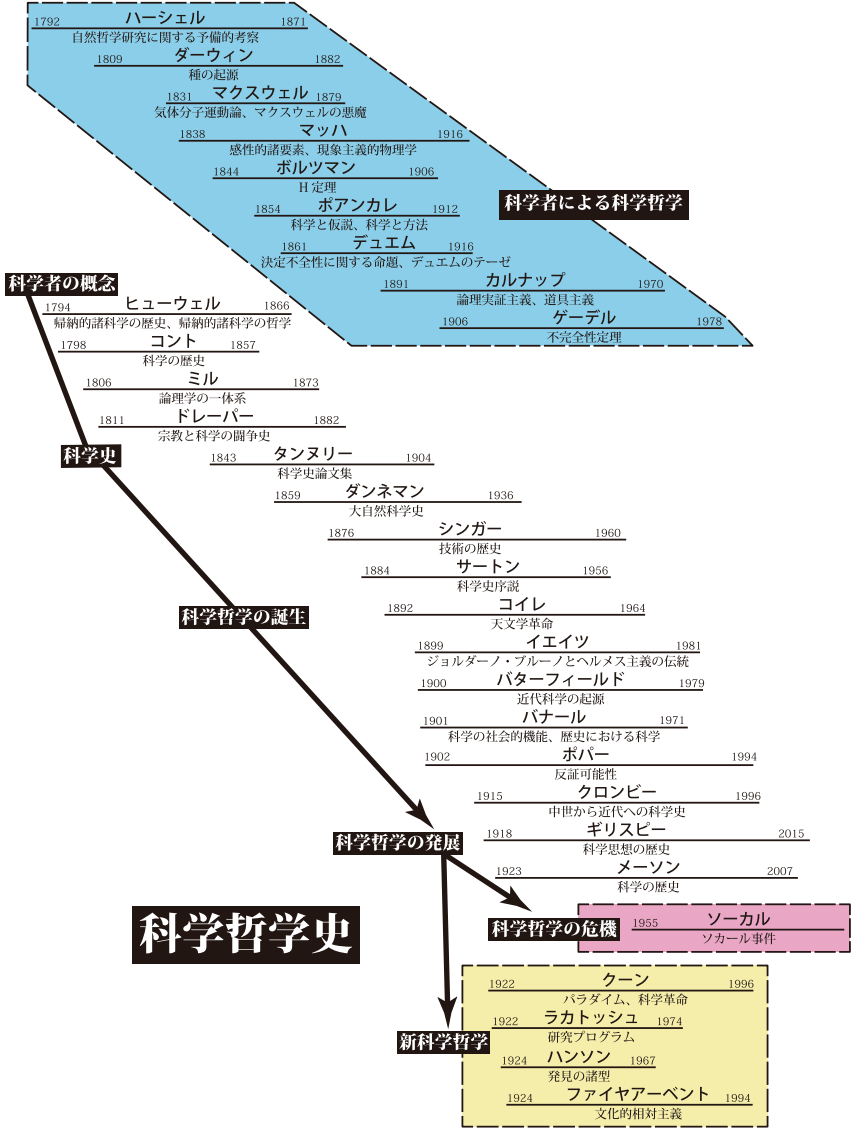


図 2-3 科学哲学の源流

科学哲学の誕生する時代の関連した哲学や自然科学の流れ。小出 (2017c) を改変。

18	19	20	21
----	----	----	----



みていくことにする。主に 18 世紀から現在までの科学哲学の成立過程を概観していく。以下では、中山（2000）や小林（1996）などを参照した。

a 18 世紀：科学哲学の萌芽

18 世紀は、ヨーロッパ列強諸国が海外へと進出し、植民地政策を実施してきた。その背景には、産業革命とそれを支えた科学技術の発展によって、社会が大きく変わってきたこともあった。その時期、哲学でも多様な考えが現れ（第1章5、7）、科学に関する思索として、科学哲学と呼べるものも生まれてきた。だが、哲学者と科学者の境界は非常にあいまいで、科学研究をおこなうかたわらで、哲学的思索もなされたり、哲学者が自然科学的素材に関する考察を進めていた。

それぞれの例として、前者にはライプニッツが、後者にはカントがいる。

ライプニッツ（Gottfried Wilhelm Leibniz, 1646 - 1716）は、幅広い分野で業績を挙げた大陸合理主義を代表する哲学者でもあった。数学ではニュートンと同時に独自に微積分法を発見し、現在ではその記法が用いられている。また、概念はモナド（単子）中心に圧縮されたかたちで展開されているという考えを「モナドロジー（単子論）」（1714～1715 年ごろ作成）にて著した。モナド間にはあらかじめ定めた因果関係があるという「予定調和説」を提唱した。

カント（Immanuel Kant, 1724 - 1804）は、科学に関する基礎的な哲学的考察を進めた。特に初期には自然哲学的内容では、ニュートンの力学における空間や時間、引力と斥力の二つの力に関する考察、太陽系の星雲説、銀河系が恒星が重力により集まった円盤状の構造であること、1755 年のリスボン大地震を受けて地震の発生メカニズムに関する論文など、自然科学的考察も示した。

図 2-4 科学哲学史（左ページ）

19 世紀以降の科学哲学の系譜。科学哲学は、哲学者の科学的事項を扱うことと、科学者が自身の経験を背景とした哲学的思索をしたものから生まれることがある。

b 19 世紀：科学哲学の誕生

19 世紀になると、自然科学は、知的積み上げが多くなるにつれて、専門性と分野固有の方法論をもった専門性の多様化、分業化が起った。職業的に研究を進める人々を、それまでの「自然哲学者」から「科学者」と呼ぶようになった。しかし、科学に関する哲学的思索は、科学者も哲学者も混じって展開されていた（図 2-4）。

ヒューウェル（William Whewell, 1794 - 1866）は、1834 年の雑誌で「科学者」（scientist）という用語を用いた。科学という営みが、一定の方法論に則ったものとなり、それを専門とする人が現れてきたことを示し「現代科学哲学の父」とも呼ばれる。「帰納的諸科学の哲学」（1840）や「帰納的諸科学の歴史」（1847）で帰納法を重視した。だが、知識がえられるのは、発見可能な根源的な様な科学法則があり、これが「神の存在の証拠」になるという神秘主義的思想も持っていた。

コント（Auguste Comte, 1798 - 1857）は、全 6 巻におよぶ「実証哲学講義」（1830～1842）の中で、人類の知識の発展を、神学的・形而上学的・実証的の三段階に分け、実証の段階において真の予見可能な科学的知識を獲得できるとした。

ミル（John Stuart Mill, 1806 - 1873）は、政治哲学者として有名でもあるが、初期の科学哲者としても知られる。「論理学体系」（1843）において、前半は演繹論理学（三段論法の理論を中心）、後半は帰納法を中心とした科学方法論を示した。その中で、「ミルの方法」あるいは「帰納のカノン」と呼ばれる因果関係を解明する 5 つの帰納法として、一致法（method of agreement）、差異法（method of difference）、共変法（method of concomitant variations）、一致差異併用法（joint method of agreement and difference）、そして剰余法（method of residues）を示した。実証主義的な科学方法論の確立を目指したものであった。

科学者も当時の哲学的考え方に則った科学に関する思索をおこなってきた。科学者による哲学は、対象や現象、事象を科学に置かれることが多く、科学哲学と呼ばれるものが生まれてきた。

ハーシェル（John Herschel, 1792 - 1871）は、「自然哲学研究に関する予備的考察」

(1831) で、科学的知識の基礎を経験に置くイギリスの経験論の影響を受けていた。因果関係を発見し立証する規則を示して、科学的方法論の統一を目指した。

マッハ (Ernst Waldfried Joseph Wenzel Mach, 1838 - 1916) は、音速を超える速度の単位である「マッハ数」で名前を残す物理学者であり、論理実証主義の立場をとった哲学者でもあった。ニュートンの絶対時間、絶対空間の概念は、形而上学的な要素が入るとして批判し、物体の慣性力は全宇宙の物質との相互作用によって生じると考えた。認識論としては、直接的経験へと戻り、知識を構築しなおした。世界は中立的な感覚的諸要素 (たとえば、色、音、感触など) から成り立っており、感覚的要素が安定したとき「物体」や「自我」が現れるもので、「実体」などはないとした。因果関係を感覚的諸要素の関数関係として表現することが「科学の目標」だと主張した。

c 20 世紀前半：科学哲学の発展

20 世紀になると科学も多様な範囲を対象とした成果が生まれ、いろいろな分野に分化していった。分野ごとの学会や専門誌も成立し情報交換も盛んになってきた。自然科学では、相対性理論や量子力学の誕生によって、物理学の革命と呼べるものが起こってきた。また、記号論理学が発達して数学的基礎を基にした哲学的思索も進展してきた。

科学技術の発展や技術の産業化に伴って、紛争や戦争も起こり、科学に対する批判や行き過ぎた科学技術を抑制しようとする動きも出てきた。科学的方法論に対しても多様な考え方が生まれたり、科学と哲学も分業化も起こるかたわら、操作主義や論理実証主義の影響を受けた科学者と哲学者との共同研究も展開された。

パース (Charles Sanders Peirce, 1839 - 1914) は、論理学、数学、記号論などで業績を挙げた科学者であり、プラグマティズムを創始者でもある。観念の持つ意味は、抽象的な思考ではなく、具体的行動によって確かめられるとした。

ポアンカレ (Jules-Henri Poincaré, 1854 - 1912) は、位相幾何学の分野でトポロジー概念の発見やポアンカレ予想などの数学の分野や天体力学などで功績を残した。科

学哲学では、マッハの流れを汲む実証主義から科学批判をした。仮説は規約で設定され、規約に基づいて理論体系が構築されるが、そこには普遍的な真理ないという「規約主義 (conventionalism)」を示した「科学と仮説」(1902)、科学とは自然界に内含される連続的な変化として残るもので、科学の理論形成に観測できる事実の必要性を述べた「科学の価値」(1905)、科学者、数学、力学の方法論を教育を意識した形で論じた「科学と方法」(1908)の三部作が有名である。

ダンネマン (Friedrich Dannemann, 1859 - 1936) は、「大自然科学史」(1910 - 1913) という大著を著した。この書は、従来の羅列的な記述ではなく、自然科学の発展過程と社会的背景を基にしてまとめられた科学史となっている。

デュエム (Pierre Duhem, 1861 - 1916) は、熱力学における一般化と厳密化をしたギブズ - デュエムの式でも知られる物理学者である。「物理学理論の目的と構造」(1906) で、経験的データの理論負荷性や決定実験の不可能性など、物理学理論と科学的認識の関係を分析した。また、科学史において、近代科学の源流を 13 世紀以降の中世においたが、それは今日も採用されている考えとなっている。デュエムは、物理学的観察にはさまざまな補助仮説が必要で、物理学理論のみから観察予測が導き出されることはなく、反証できない「決定実験の不可能性」があるという「デュエムのテーゼ」を示した。

クワイン (Willard Van Orman Quine, 1908 - 2000) は、デュエムのテーゼを拡張し、対立する二つの理論があっても、どちらかが否定されることなく保持できるという「クワインのテーゼ (デュエム - クワインのテーゼ)」を示した。両者は知の全体論 (ホーリズム) と呼ばれている。

カルナップ (Rudolf Carnap, 1891 - 1970) は、論理実証主義の立場で道具主義を唱えた。道具主義 (instrumentalism) とは、科学理論を観察可能な現象を組織化・予測するために形式的な道具・装置と見なす考え方である。現象の背後にある観察不可能な実在の真の姿は知りえない、とする現象主義的立場でもある。

ゲーデル (Kurt Godel, 1906 - 1978) は、24 歳のとき完全性定理 (1930) で学位

をえて、25歳で不完全性定理（1931）を証明するという論理学上の重要な業績で有名になった。不完全性定理は、「数学は自己の無矛盾性を証明できない」ことを示した。この定理により、数学には証明できない命題があることが証明された。不完全性定理は「人間の理性の限界を示した」とも評され、大きな衝撃をもって知られたが、意義が後の科学や哲学に活かされることは少なかった。

ライヘンバツハ（Hans Reichenbach, 1891 - 1953）は、論理実証主義を主張してベルリン学をつくった。「科学的哲学の興隆」（1951）では、物理学を基にして、経験主義哲学を打ち出し広範囲への影響を与えた。

ポパー（Karl Raimund Popper, 1902 - 1994）は、「科学的発見の論理」（1934）で科学と非科学（疑似科学）の境界は、「言明が偽であるとされる可能性」となる反証可能性（Falsifiability）を持つかどうかで見極められるとした。科学的理論や仮説には、客観性を保証するために実験や観察によって反証される可能性がなければならないというもので、反証の可能性のない言明は非科学的とした。

d 20世紀後半：新科学哲学

1950年代から1960年代にかけて、ライヘンバツハの論理実証主義やポパーの批判的合理主義と対立することで、「新科学哲学」が生まれた。ハンソンの理論負荷性、クーンのパラダイム論と共約不可能性、ラカトシュの科学的リサーチプログラム、ファイヤアーベントの科学的相対主義などがある。

ハンソン（Norwood Russell Hanson, 1924 - 1967）は、「科学理論はいかにして生まれるか」（1958）において、事実の「理論負荷性（theory-ladenness）」を提案した。ある理論を前提にするとある事実が見えるが、理論が変化したとき同じ事実を見ても違って見え、新しい事実が発見されるとした。

クーン（Thomas Samuel Kuhn, 1922 - 1996）は、「科学革命の構造」（1962）でパラダイム論を展開した。パラダイム（paradigm）とは、「一定の期間研究者の集団にモデルとなる問いや答えを与える一般に認められた科学的業績」と定義した。パラダイム

に基づいて科学が営まれる「通常科学」の時期がある。科学が進歩すると、やがて「変則事例」が見つかるがパラダイムを修正しながら進む。変則的な事例が多くなってくると、パラダイムの修正では解消できないものも見つかって、やがて「危機」が訪れる。そして、多くの新しい理論が登場するが、その中でもっとも支持を受けたものが新たなパラダイムとなっていく。このようなパラダイムの転換を「科学革命」と呼んだ。異なるパラダイム同士では、概念の対応ができない共約不可能性 (incommensurability) があり、激しい論争も生じることになる。

ラカトシュ (Imre Lakatos, 1922 - 1974) は、ポプパーの反証主義とクーンのパラダイム論を総合した「研究プログラム」(1970) の概念を考えた。「理論」を「ハードコア」と呼び、共有されている理論や長期にかけて発展してきた技術の連続体を「研究プログラム」と呼んだ。理論的なコアを反証から守る「補助仮説」の防御帯の適用・発展も含めた研究プログラムで優劣を競われていると主張した。補助仮説を変更することでハードコアが残り、研究プログラムも残すことができると考えた。

ファイヤアーベント (Paul Karl Feyerabend, 1924 - 1994) は、ポプパーのルールを教条主義的に使用する方法論への批判として、相対主義を徹底することを主張した。「方法への挑戦」(1975) では、文化的相対主義を科学に適用し、科学至上主義への批判を行った。

e 科学哲学の危機と自然史的視点

科学と哲学の境界で営まれる科学哲学は、科学の広い分野、また哲学的視点の多様さから、その内容を客観的に評価することが難しくなり、形式的な審査で学界で発表できるようになってきた。そこから疑似科学 (pseudoscience) が生まれてくる。一見根拠なるデータが示されているように見えたり、科学的な表現をしりしていても、方法論や統計処理が間違っていたり、心理学的錯誤を利用していたりするものもある。科学哲学の営みを担うはずの学会や専門雑誌においても、同様の状況が起こっていた。そのような状況に危機感を覚えた一部の科学哲学者から、批判として「ソカール事件」

が起こった。

ソーカル (Alan David Sokal, 1955 -) は、ポストモダニズム (脱近代主義と呼ばれる進歩主義や近代主義、啓蒙主義を批判する立場) の学会誌である「ソーシャル・テクスト」誌に、科学用語と数式をちりばめた「境界の侵犯：量子重力の変換解釈学に向けて (Transgressing the Boundaries: Toward a Transformative Hermeneutics of Quantum Gravity)」を投稿したところ受理され掲載された。掲載後、ソーカルは、この論文が無意味な内容で疑似哲学論文であり、それを見分けることもできない雑誌や学会を批判した。その経緯は、「「知」の欺瞞」(Sokal and Bricmont, 1997) に紹介されている。

「「知」の欺瞞」の共著でもあるブリクモン (Jean Bricmont, 1952 -) は、ポストモダニズムのカルチュラル・スタディーズ (Cultural studies) で自然科学用語が乱用され「簡単なことを難しく言うために比喻を使っている」と批判し、科学的合理性を重視した。

20世紀は科学の時代とも考えられるが、その一方でハイゼンベルグの不確定性原理、ゲーデルの不完全性定理、マンデルブローの複雑系の発見などは、それまでの科学の方法論やあり方が通用しない領域もあることが明らかにされてきた。科学哲学の危機だけでなく、科学における考え方の変革も迫られてきた。変革に向けて先駆的には、竹内均の地球生態学やラブロックのガイア理論、あるいは自然史科学の視点の必要性などが提唱されてきた (小出, 2017c)。

科学技術が進むとともに、世界大戦では兵器にも利用されてきた。科学技術は大量殺戮の道具ともなることが明らかになってきた。科学や科学技術の進歩によって、社会や人類への生活は向上したが、環境汚染、生態系の破壊、気候変動など社会への悪影響も現れてきた。科学的な視点で地球や自然、環境、あるいは人類のあり方を考え直す必要も生まれてきた。

フラー (Richard Buckminster Fuller, 1895 - 1983) は、フラードーム (球面を二十面体で近似し正三角形球面に分割して構成) などを考案した建築家でもあるが、人類の生存や有限性の資源の持続可能を示した「宇宙船地球球」という概念を提唱したこ

とで有名である。

地球生態学（竹内，1978；竹内・長谷川，1984，竹内・島津，1969）、生命潮流（Watson，1979）、ガイア理論（Lovelock，1988）、生命誌（中村，1990）、エコロジー的思考（立花，1990）、宇宙誌（松井，1993）、場の生命論（Goodwin，1994）、人間圏（松井，1996）など、いろいろな試みが提示されてきた。これらは、科学の行き詰まりや、人類発展のために自然や環境を破壊してきたことへの批判となり、21世紀には、このような視点も重要性が指摘された（小出，2017c）。

f 21世紀の科学哲学

中山（2010）は20世紀以降を、パラダイム論の視点で3つの転換点があるとした。1960年代に17世紀から継続する機械論的な科学技術の支配した。1970年代に「エコロジスト流の有機体論」による機械論的科学の批判された。1980年代以降にコンピュータの進歩と普及による情報化社会が訪れ、情報化社会ではデジタル・パラダイムになりポストモダン科学となった。さらに、21世紀は、非線形による数学形式が重視され、地球環境科学の重要性が顧みられ、インターネットに適合した組織が発展していくとした。

これまで自然科学では物理学や化学が科学哲学の素材にされ、科学哲学が形成されてきた。1980年代以降は、生命科学、脳科学、認知科学、心の哲学などの成果も取りられ、生物に固有の問題に関する論考として生物哲学（例えば、Mahner and Bunge，1997，森元・田中，2016、伊勢田，2008 など）も構築されるようになった。しかし、地質学に関する固有の問題に関する哲学的論考は少ない。

科学に関わる社会や情報などの関係に視点を当てることで、科学哲学にも多様化やいくつもの分野が生まれてきた。科学は社会に影響を与えるもので、科学を社会的に研究する科学社会学（sociology of science）ができ、その中には、科学知識の社会学（sociology of scientific knowledge）、自然のもの（アクター）を変化する作用（エージェンシー）のネットワークの結節点として扱うアクター・ネットワーク理論（actor

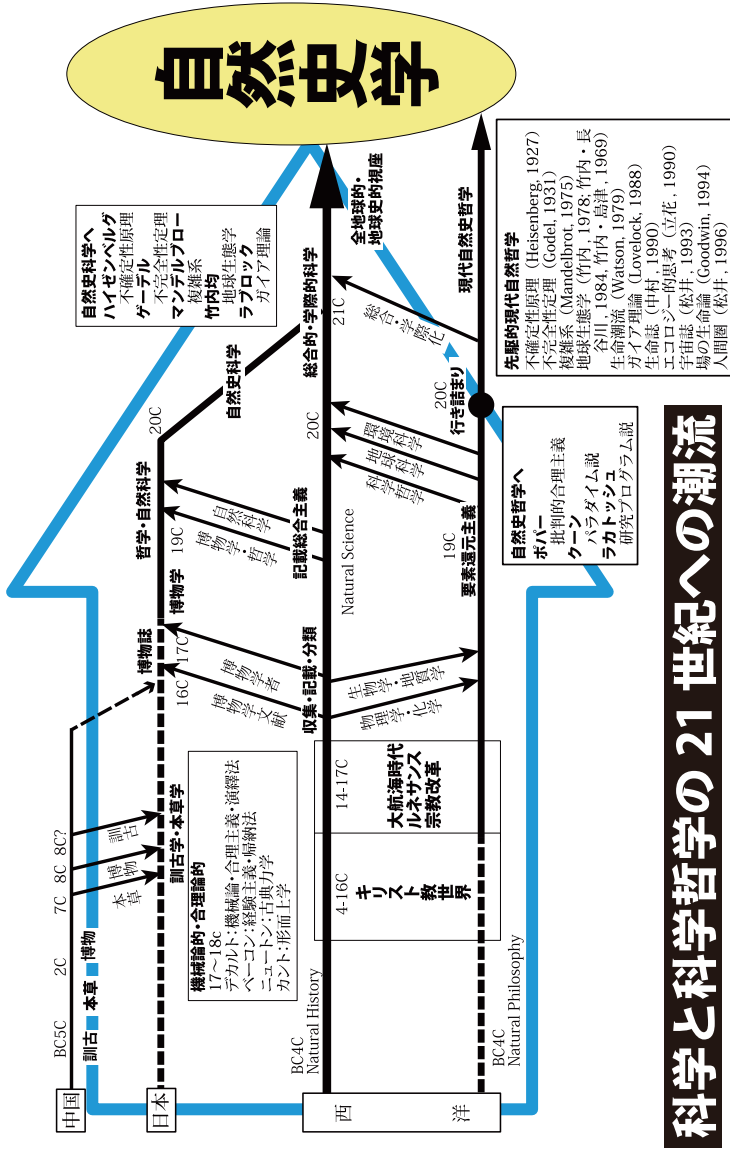


図 2-5 科学と科学哲学の 21 世紀への潮流
 これまでの科学哲学の思想史と東洋思想の歴史も加えた潮流をまとめ、今後の思想の潮流として自然史学の必要性を示した。小出 (2017c) を改変。

network theory)、科学技術を広く社会的にとらえる科学技術社会論 (science, technology and society) などがある。

20 世紀末の課題に対して、廣川 (1997) では、ソクラテス以前の哲学思想は、今日の我々にとっても「とりわけ有意義なものとなるはず」としている。その延長として、小出 (2000) も、古代ギリシア時代よりも自然科学は発展しているの、現代の自然哲学として、地球環境や地球史などの新しい自然科学の考えを導入して「現代自然哲学」を構築していく必要性を指摘した。加えて、新たな知の体系として、「自然史学」というものを重視し、その体系を見直すべきであると考えた (図 2-5)。自然史学のように総合的、学際的に自然を見る視点は、現在社会において非常に重要であるとした (小出, 2017c)。

3 近代地質学の誕生

地質学的記述は古代ギリシアからおこなわれてきたが、地質学として科学的方法論として整ってきたのは、近世後半になってからである。また、他の自然科学と同様に地質学が精密科学、検証性、定量性を備えてくるには、科学技術の進む 20 世紀まで待つ必要もあった (図 2-6)。まず、近代地質学が科学として成立する 18 世紀末までの道筋の概略を見ておこう。地質学史については、Gohau (1990) の「地質学の歴史」、小林 (1988) の「イギリス産業革命と近代地質学の成立」、清水 (1996) の「古典にみる地学の歴史」などを参照した。

a 地質学の成立前の地質学的思索

古代ギリシアの思索で地質学に関する思索だけを概観していこう。

アナクシマンデロス、動物や植物は環境の変化に対応して「進化」するとも考えた。化石は過去の生物の遺骸である、という考えをすでに示していた。クセノファネス (Xenophanes, B.C. 570 - B.C. 475?) は、山の地層から見つかった貝化石を見て、そこがかつて海であったという、アナクシマンデロスより一歩進んだ地質学的な思考をもつ

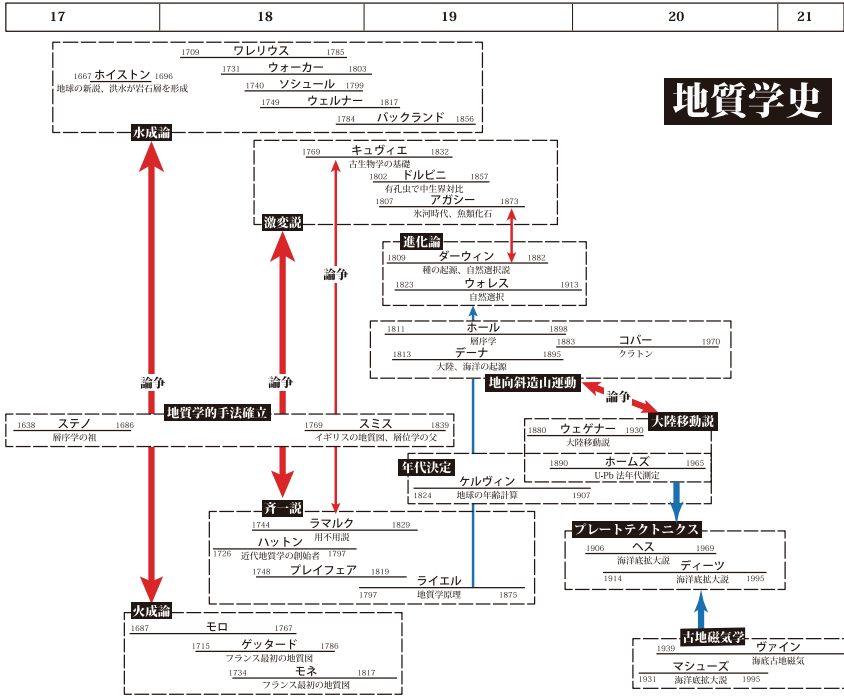


図 2-6 地質学史

7 世紀以降の地質学の誕生から発展を主な論争を中心にまとめたもの。

ていた。

古代ギリシアの「自然哲学」では、自然に関する考察も、原子論から宇宙論、各種の起源論など非常に多岐に渡るものであった。だが、実証性を備えた科学的な考察ではなく、恣意的、思弁的な色彩の強いものであった。ただ、他者との議論、対話によって内容を吟味するという科学的姿勢を持っていた。

ローマ時代では、プリニウス (Gaius Plinius Secundus, 23 - 79) は、37 巻におよぶ「博物誌」を著し、その多くは引用や抄録であったが、天文学や動・植物学、鉱物学など自然科学の内容が含まれていた。自然界を網羅的に記載し体系化しようという壮

大なる試みであったことは評価できる。

古代ギリシアからローマ時代へと受け継がれた科学的思索は、戦乱によりヨーロッパから消えていくことになった。アリストテレスを中心とした思想は、アラビアで温存され受け継がれていった。そして、アリストテレスの思想は、アラビアからヨーロッパに再度もたらされ、キリスト教には取り入れられたが、聖書に反するものはタブー視されていった。

アラビア人は、イスラム教を国教とし、古代ギリシアやローマ時代の科学だけでなく、中国の科学も取り入れたものとなっていた。地質学に関する思索としては、ペルシアのビルニー (Abu Rayhan Muhammad ibn Ahmad al-Biruni al-Khwarizmi, 973 - 1048) は、天文学や「宝石の書」という鉱物事典を著し、インドがかつては海であったという仮説も示した。

中世になると、教皇の権威が衰え王権が強まった。遠隔地との商業と貨幣経済の普及により、イタリア諸都市が繁栄し、貿易によってイスラム文化がヨーロッパへ流れ込むことで、イタリアでルネサンスがはじまった。

イタリアのルネサンスにおいて、ダ・ビンチ (Leonardo da Vinci, 1452 - 1519) は、芸術で業績を上げたが、自然現象の詳細な観察など科学的検証過程を用いていたことが手記から伺われる (Bortolon, 1968)。手記には地質学的記述として、ヨーロッパ大陸の平野にありながら貝の化石が集中していた地域を、古代には海水が来ていたと考えた。現在、山であっても、海の証拠 (貝の化石) があれば、そこがかつて海であったという、科学的論理性をもって判断していた。

b 層序学の萌芽：ステノ

ステノ (Nicolaus Stenonius, 1638 - 1686) は、宗教と科学の間で過ごした人物である。解剖学者でキャリアをスタートさせ、化石との現世生物との類似性から、化石が生物起源であると結論づけた (Cutler, 2003)。

著書の「固体の中に自然に含まれている固体についての論文への序文 (プロドロマス 固体論と略される)」(Stenonius, 1669) の中で、「固体の中の固体」という考えによっ

て、当時の常識とされていた「造形力説」を否定した。「造形力説」とは、海成生物に似たもの（現在では海棲化石）であっても、陸上で神秘的な特殊な力（「自然のいたずら」や「神のたわむれの作品」と考えられた）によってつくられるというものである。

「プロドロムス」の中では、地層は似た岩石が水平に堆積した「初期水平性」と、それが繰り返すことで層状になる「地層累重の法則」があることを示し、地質学の原則となった。地層の幾何学的関係から、地層の上下、連続と不連続、傾斜と水平、包含関係や地層と地形の発達段階を示した。ステノは、固体の包含関係が生成の順序、固体の類似性は現在主義的（斉一説的）に解釈、固体は流体から微粒子が付加して生成などの考えを持っていたことが指摘された（山田, 2004）。

さらに、鉱物の結晶学的原則である「結晶の面角一定の法則」などを記載した。現在の層序学的視点や二度の地殻変動（造山運動）の概念を持っていたが、地層が地下の穴が崩壊して山脈を形成したり、原初の海や大洪水などの主張もした。これらは原初の海や大洪水は、聖書の記述に従ったものであった。

ステノは、科学的な視点で地層を見て成果を上げてきたが、30歳以降は地質学的研究をやめてしまった。30歳以降は、神学への関心を深めてルーテル派からカトリックに改宗し、その後司祭として活動した。

c 2つの地質学論争

17世紀になると、物理学が科学的手法を導入していく中、地層の形成や化石の記載においては、聖書の創生記述や大洪水などを用いて説明がされていた（図 2-7）。だが、実験や観察に基づく科学的方法論による地質学の芽生えもあった。宗教と科学対立として、水成論対火成論と、激変説対斉一説という科学論争が起こった。

水成論対火成論

洪水による岩石層の形成の考えは、「水成論（Neptunism）」と呼ばれた。古くは、聖書の記述にはじまるが、ホイストン（William Whiston, 1667 - 1752）は、「地球の新

2つの地質学論争

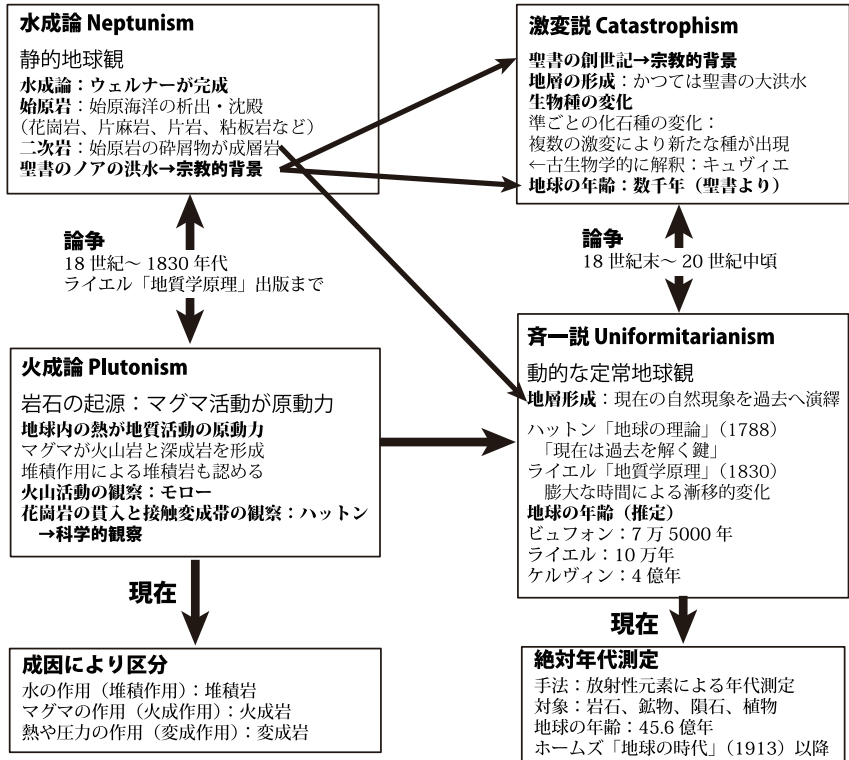


図 2-7 2つの地質学論争

近代地質学に至るまでの18世紀から20世紀の大きな2つの地質学上の論争をまとめた。

説」(1696)の中で、聖書の記述に従って地球の起源を大洪水が起きたこと、および洪水が地球の岩石層を形成したと考えた。水成論は、キリスト教社会では広く受け入れられ。

ワレリウス (Johan Gottschalk Wallerius, 1709 - 1785)、ウォーカー (John Walker, 1731 - 1803)、ソシユール (Horace-Benedict de Saussure, 1740 - 1799)、そしてウェルナー (Abraham Gottlob Werner, 1749 - 1817)へと受け継がれ水成論は完成を見た。

ウェルナーは地球の形成を、始原の海で最初に沈殿した貫入岩と高度の変堆積岩 (Primitive Series)、硬結石灰岩、貫入岩、シル、厚いグレイワッケ (Transition Series)、侵食による碎屑性の化石を含む二次的成層 (Secondary or Stratified Series)、未固結の扇状地や三次的堆積物 (Alluvial or Tertiary Series)、火山から噴出した若い溶岩流 (Volcanic Series) の 5 つに分けた。溶岩流の形成は石炭層の燃焼によるものと考えた。もっとも大もとの岩石の起源は、堆積作用によると考えた。古い火成岩や変成岩も、海の沈殿物が堆積してできたと考えた。

バックランド (William Buckland, 1784 - 1856) は、恐竜の化石を記載し、アガシーの氷河期説を信じ、スコットランドで証拠を見つけている。また、自然的知見と聖書の整合性をとろうと「断絶説」で説明した。断絶説とは、創世記の記述を天地創造と再創造に 2 つに分けることで、地球が古いという地質学的根拠と聖書の記述を調和させる方法である。洞窟で発見された化石をノアの洪水の証拠とした。

一方、火成論 (Plutonism) は、地球内部の熱が地質活動の原動力とするもので、火成岩 (火山岩と深成岩) ができたとした。

モロ (Anton Lazzaro Moro, 1687 - 1764) は、火山によって岩石ができるという火成論を唱えた。モロは、イタリアのモンテ・ヌオーヴォやサントリーニで、実際の火山噴火を観察したことから発想した。ただ、火山による隆起で、山の地層に海生動物の化石が見つかることを説明した。陸地の海棲化石の理解は間違っていなかったが、その形成過程をすべて火成作用に結びつけたが、科学的検証がなされていなかった。

ゲッタード (Jean-Etienne Guettard, 1715 - 1786) とモネ (Antoine-Grimoald Monnet, 1734 - 1817) は、1780 年にフランスで最初の地質図を作成した。ゲッタードは、フランス南部のオーヴェルニュ (Auvergne) の野外調査から、古い火山であること、火山噴出物の下位から化石がでたことから、聖書の記述に疑問を感じ火成説をとった。

19 世紀前半まで続いた水成論と火成論の論争を通じて、地質学の基本となる野外調査による観察からの証拠や根拠から、岩石や地層の正しい成因へと結びつけられるようになってきた。火成岩は火成作用に、堆積岩は堆積作用として統合され、地向斜

造山運動が生まれてくることになる（清水，1996）。

激変説対斉一説

当初、水成論には宗教的背景が色濃くあったが、火成論との論争により、科学的な事実や証拠、論理に基づく論争となってきた。やや遅れて起こった斉一説（uniformitarianism）と激変説（catastrophism 天変地異説とも呼ばれる）では、より広範な視点での論争であったが、やはり宗教と科学的信念との戦いでもあった。激変説は、聖書に示された生物の誕生やノアの洪水などの天変地異を、神の関与により説明しようとするものである。

キュヴィエ（Georges Cuvier, 1769 - 1832）は、比較解剖学を元に化石の研究をおこない古生物学の基礎を築いた。地層の層準の違いによって化石が異なることから、何通りかの生物相があったことを理解していた。だが、これを生物の進化とは考えず、ノアの洪水のような天変地異が何度もあり、その度に新たに生物種が生まれたという激変説を唱えた。激変説は、キリスト教的考えを踏襲するものであった。

ドルビニ（Alcide Dessalines d'Orbigny, 1802 - 1857）は、フランスの中生代の無脊椎動物、特に有孔虫で中生界の対比をおこなった。キュヴィエに師事し天変地異説を擁護し、ラマルクの進化論にも反対した。

アガシー（Jean Louis Agassiz, 1807 - 1873）は、スイス生まれであるが、後にアメリカに渡り教鞭をとった。氷河時代を記述して有名で、魚類化石の研究者としても知られる（清水，1996）。激変説の論者で、海洋拡大や大陸移動はなく、恒久的に存在したと考え、ダーウィンの進化論にも反対していた。

激変説に対して、斉一説があるが、動的な地球観を含んでいるが、定常性を重視している。

ハットン（James Hutton, 1726 - 1797）は、宗教に縛られことなく野外観察を重視する科学的姿勢をもっており、斉一説を提唱したため「近代地質学の創始者」と呼ばれる（Repcheck, 2009）。ただし、火成作用ですべての岩石ができるのではなく、堆積



図 2-8 ハットンの不整合

スコットランドのシッカーポイント (Siccar Point) の「ハットンの不整合 (Hutton's unconformity)」。

垂直な地層を水平な地層が不整合で覆っている。下位：シルル紀の地層は、葉理発達した細粒砂岩から漸移する泥岩と、白色粗粒砂岩との互層。上位：デボン紀の旧赤色砂岩。著者撮影。

岩には水の作用も重要であることも理解していた。不整合を堆積作用に位置づけ、地殻変動の証拠と考えた (図 2-8)。そこから、聖書に示された年代より地球の年齢はるかに古いことを示した。ハットンの提唱した斉一説は、現在起こっている現象、あるいは規則性は、過去にも適用可能であるとするもので、「現在は過去を解く鍵」と表現されることがある。斉一説は、近代地質学において重要な概念となっている。ただし、ハットンの「地球の理論」(1795) は難解であったため、プレイフェア (John Playfair, 1748 - 1819) が著した「ハットンの地球理論の解説」(1802) で広まることになった (小林, 1988)。

斉一説は、ライエル（Charles Lyell, 1797 - 1875）により整理されて広まることになる（小林, 1988）。ライエルは、「地質学原理（Principles of Geology）」（全3巻、計約1200ページ）で、斉一説を証明する多数の地質学的証拠を集めた。第1巻（1830）では地質学の定義から無生物界での変化、第2巻（1832）では生物の変化を、第3巻（1833）では地球の歴史をまとめている（清水, 1996）。地質学的変化は長い時間をかけて起こる現象であることを示し、友人でもあったダーウィンの進化論にも影響を与えた。

フランスでは、ラマルク（Jean-Baptiste Lamarck, 1744 - 1829）が無脊椎動物の研究から「用不用説」や「獲得形質の遺伝」という進化論を唱え、キュヴィエと論争した（清水, 1996）。晩年には進化論を唱えたため、無信論者の非難をうけ貧困と失明という不幸のうちに亡くなった。

激変説と斉一説の論争には、生命の起源や進化、そして人類の誕生への関わり、宗教と科学による論争ともなった。水成論対火成論と共に近世から近代における科学と宗教的呪縛との戦いでもあった。科学的方法論が整えられてきたため、論理での論争で研究者の異なった説であっても、その根拠や論理によって科学的決着を見ようという土壌も育まれてきた。斉一説は、地質学だけでなく、自然科学において重要な概念となる（第3章5）。

4 地質学の確立

物理学などの自然科学が成立した後、地質学も黎明を迎えた。多くの地質学者の調査研究とそれによる論争で、岩石や地層は水の作用（堆積作用）や、マグマの作用（火成作用）でもできることわかり、それぞれの岩石ごとに成因を解明していく必要があることが判明してきた。

時代背景として、産業革命による採炭や水路などの土木工事が盛んにおこなわれた。そこからえられる地質学的知見の重要性から（小林, 1988）、野外で露頭を観察するという科学的方法論を重視する精神が開花した。宗教的信条や經典などに基づく激変

説は、科学的根拠にはならないことも理解されてきた。地質学固有の方法論や概念も生まれてきた。

a 地質学的手法の確立と学問の細分化

スミス (William Smith, 1769 - 1839) は、土木工事に従事してきたことで、地層や化石に興味をもち観察をした。化石の変化による時間経緯 (地層累重の法則) を理解し、同一化石による同時性 (示準化石と地層同定の法則) を発見し (Winchester, 2001)、それらは現在の地質学においても基礎的な概念になっている。また、世界最初の地質図を完成した (清水, 1996) ことから、「層位学の父」と呼ばれている。地質図とは、地層の区分がなされ、その2次的に分布が見えないところでも把握されたものである (小林, 1988)。見えないところの把握は、「地層の側方連続の法則」という概念で推定されていく。化石の形態や地層岩相の一致や変化様式を根拠に、接していない地域との地層の対応関係も推定できるようになってきた。

野外観察によって、実際の地層や岩石の分布の記載をもとに、見えない地層の分布を層序学として論理的 (地質図学) に推定 (帰納) できることになった。推定された地層の分布は、鉱業や土木業で演繹的に確認できた。地質学は、科学的方法論を用いる学術的側面だけでなく、実用性も生まれてきた。

地層の上下の関係は形成順序を示し、時間順に時間経過が記録されていることになる。時間経過を前提にして、化石が時間とともに変化してきたことが理解されてきた。ルネサンス頃から生まれていた「化石=過去の生物」という考えから、時間経過に伴う生物の形態変化が、「進化」という概念に繋がることになった。地層や化石などの「時間経過に伴う変化」という概念は、地質学固有の特徴となり、生物進化とは不可分の関係になっていく。

19世紀後半からは、科学の技術開発も進むことで、地質学の細分化も起こってきた。例えば、1844年、アチミによって偏光顕微鏡 (日本顕微鏡工業会, 2008) の開発された。偏光顕微鏡とは、岩石を薄くして偏光を通すことで鉱物種を同定するための手

軽な装置となった。また、岩石や鉱物の成分を化学的定量分析を導入することで、形成条件（温度、圧力、酸素分圧など）や成因を科学的に考える岩石学、鉱物学が成立した。

20世紀になると、物理学的手法を用いて、地殻の深部や地球の物理量を測定することで地球物理学や、化学的手段で地殻や地球の成分の分布や挙動を調べる地球化学などが発展してきた。これらの新しい技術や概念による研究分野は、広義の地質学ではあるが、従来の地質学より広い概念を含むため総合的な「地球科学」と呼ばれるようになってきた。さらに、20世紀後半には、月や惑星の探査が進んだことで、さらに広義の「惑星科学」として統合されるようになってきた。

b 進化論へ

上述のキュヴィエ（本章3c）は、比較解剖学と古生物学を結びつけ、化石種の違いによって地層が識別でき、化石により地層の層序的位置が確定できることに気づいた。これは、化石による相対的年代の概念となる。

ダーウィン（Charles Robert Darwin, 1809 - 1882）は、生物種が自然選択を繰り返しながら変化して変化が起こったという進化論を提唱した（図 2-9）。ダーウィンが進化論を考えていたとき、ウォレス（Alfred Russel Wallace, 1823 - 1913）も、独自に自然選択による進化を考えていた。

ダーウィンの進化論では、自然選択が重要な位置を占めている。種に起こっている変異で子へ伝わるものの内、生存や繁殖に有利なものが競争によって残されていく。その競争が繰り返されることで、自然選択が起こると考えた。自然選択の中で性差（雄と雌）による選択（性選択）も起こっているとした。だが、変異がどのように生まれ、変異をいかに子孫に伝えるのか、などの課題も残されていた。また、進化論は宗教上の教義に反するため、発表当時は激しい反論があった。

新しい種が生まれ種として定着するためには、自然選択を世代交代で長い時間繰り返される必要があった。ハットンやライエルの斉一説と地質学的時間に採用することで、

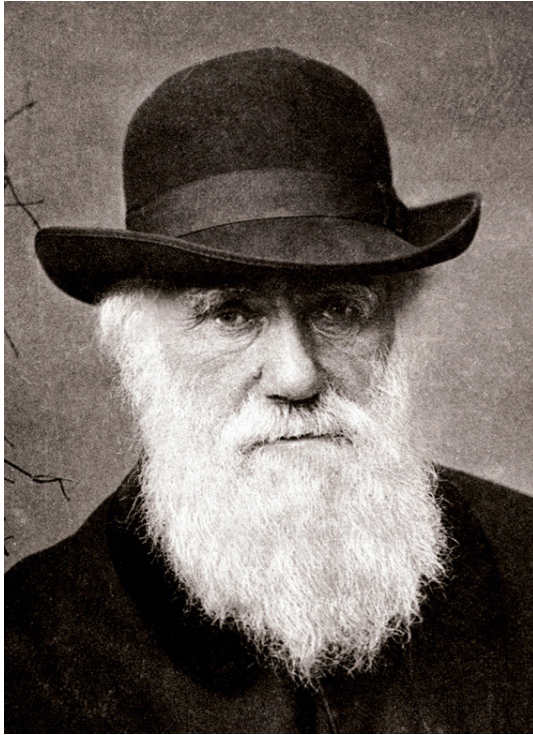


図 2-9 Charles Darwin

Charles Darwin の 1881 年の肖像画。 https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Charles_Darwin_1880.jpg (2020 年 12 月 3 日 閲 覧), Public Domain.

生物の種の誕生に必要な長い時間を確保できるようになったのは、地質学の重要な貢献である。

化石と進化論が結びつくことにより、地質年代の区分が可能となる。ただし、その方法論は、化石を含んだ岩石（堆積岩）のみに可能で、それ以外の火成岩や変成岩は、堆積岩の関係から推定していくことになる。化石や地層との関係で、定性的な地質年代の区分はできるようになったが、定量的な年代決定は 20 世紀半中頃まで待たなけ

ればならない。

c 年代決定

地球はいつできたのかという問いは、地球の誕生した年代と置き換えることができる。キリスト教下あるいは激変説の西洋では、地球の誕生の様子、そして地球の年齢（地球のはじまり）は、聖書を丁寧に読んでいけば計算可能であると考えられた。アッシャー大司教の計算により、世界の始まりは、キリスト誕生から 4004 年前の 10 月 22 日（土曜日）とされた。文献の年代を足し合わせるという数学的な手段を用いていたが、素材が聖書の記述であったため信憑性は持っていなかった。

ビュフォン（Georges-Louis Leclerc Buffon, 1707 - 1788）は、1749 年から 1778 年までに 36 巻、死後 8 巻が加えられた「博物誌」を刊行した。その中で、太陽系の起源や、冷却球を使った実験で地球の年齢 7 万 5000 年であるとした。

ハットン、地球史上、陸地の形成には「期間不定」の 3 つのサイクルがあるとし、定量化できないが長い時間が流れることで、地質学的過程が一様に起こるという斉一説を主張した。

ライエルの地質学的考察として、シシリー島のエトナ火山の年齢だけでも数 10 万年が必要だと見積もった。そこから、「10 万年は地質学的に短く、地球の年齢は果てしなく長いに違いない」と推定した（Lewis, 2000）。しかし定量化は困難であった。

ケルヴィン（William Thomson Kelvin, 1824 - 1907）は、熱力学の分野などで成果を残したが、物理法則を演繹的に用いて地球の年齢を計算で求めた。熱伝導から球の冷却速度を計算して 2000 万年から長くても 4 億年とした。また、太陽の重力収縮から太陽の年齢が 1 億年未満で最大でも 5 億年となった。ケルヴィンは、異なった（独立した）方法でえられた年代が似ていたことから、信憑性があると考えた（Livio, 2013）。

ケルヴィンは自身の考察から短い年代を主張した。一方、地質学的立場から、2000 万年では短すぎ 4 億年が望ましいという指摘や、生物の進化からは 10 億年以上の年



図 2-10 Arthur Holmes

Arthur Holmes in 1912. (http://gsahist.org/gsat/gt02mar17_18.htm 2021 年 4 月 27 日閲覧), Public Domain.

代でなければならないと考えられていた。地球の年齢に関して 50 年にわたって両者で科学論争が継続した (Lewis, 2000)。

この議論に決着をつけるためには、過去の物質 (岩石や地層、化石など) の年代を定量的に決定していく必要があった。それを実現したのは、ホームズ (Arthur Holmes, 1890 - 1965) であった (図 2-10)。放射性元素を用いた U - Pb 法による年代測定の方法を確立した (Lewis, 2000)。1915 年の「将来の望みを託しているのはジルコンである、というのはこの鉱物は時空的に分布が広く、安定で外力対し抵抗力

があるからである」(Holmes, 1915) というホームズの予言は、21 世紀になって実現することになる(中間ほか, 2010a; 2010b, 小出, 2019a, Sawaki et al., 2010)。なお、ホームズは、ウエゲナーの大陸移動説の数少ない支持者であった。大陸移動の原動力を地球内部の熱によるマントル対流であるとした。

d 大陸移動

ベーコンは、1660 年ころに大西洋を挟んで西アフリカと南アメリカの海岸地形が一致することに注目していた(Lewis, 2000)。これは卓見ではなく、大西洋を中心に据えた世界地図さえあれば、誰もがこの事実気づくことになる。しかし、その意味するところ、形成過程を検証するには時間を要した。

ウエゲナー(Alfred Lothar Wegener, 1880 - 1930)は、気象学や雪氷学を専門としていたが、1915 年の「大陸と海洋の起源」で大陸移動の概念を示した(図 2-11)。新生代以降、ひとつであった大陸が分離、移動し、大西洋が形成されたという「大陸移動説」を唱えた。地質学、古生物学、古気候学などのデータを根拠にしたもので、今日でもその主張や根拠は正しいものであったが、当時は認められなかった(Wood, 1985)。ウエゲナーはマントル対流の概念を持っていたが、大陸移動の原動力としてマントル対流を位置づけることはなかった。原動力が不明のままであったため、反論を受けることになった。

地向斜造山運動論(第5章1b)をパラダムとして持っていた当時の多くの地質学者にとって、ウエゲナーの大陸移動は新しいパラダムになるため、対抗、反論するという行為は起こるべきして起こったものである。ウエゲナーの大陸移動説は、プレートテクトニクスの先駆といえるものであったが、パラダム転換には、40 年以上の時間が必要となった。パラダムの呪縛なく、ウエゲナーの示した地質学的根拠をみれば、反論していた当時の地質学者たちの説明より、合理性があったことがわかる。これが、パラダムという束縛であろう。



図 2-11 Alfred Wegener

Alfred Wegener ca.1924-30. Bildarchiv Foto Marburg Aufnahme-Nr. 426.294 (<http://www.bildindex.de/bilder/fm426294a.jpg> 2020 年 12 月 3 日 閲 覧), Public Domain.

5 日本への地質学の導入

日本には、中国に源流をもつ本草学などの博物学的な学問は導入されていたが、主に蒐集や記載が中心で、効能などに関心を持っていたため、必ずしも科学的な視点での学問体系にはなっていなかった（小出，2017c）。

a お雇い外国人

明治になり、西洋から近代科学が導入されてきた。「お雇い外国人」として 1854 年から 1868 年 4 月（徳川幕府から明治新政府）にかけて少なくとも 2000 人が、さらに明治時代（1868 - 1912）を通じてその人数は 4,000 人に達するとされている（石附, 1987）。その中には地質学に造詣をもった外国人も多く含まれていた。お雇い外国人のうち、地質学的貢献がどのようなものがあったのかをまとめておこう。

夕張炭鉱や北海道の地質調査と地質図を作成したライマン（Benjamin Smith Lyman, 1835 - 1920）（金, 2009d）、フォッサ・マグナやナウマンゾウの発見したナウマン（Heinrich Edmund Naumann, 1854 - 1927）（佐藤, 1985）、大森貝塚の発見したモース（Edward Sylvester Morse, 1838 - 1925）（上野, 1979）、その大森貝塚の研究をしたシーボルト（Heinrich von Siebold, 1852 - 1908）、北海道の地質や鉱山調査をし簡易の地質図を作成したパンペリー（Raphael W. Pumpelly, 1837 - 1923）、その助手で北海道の地質調査をしたブレーク（William Phillips Blake, 1826 - 1910）（金, 2008）、生野鉱山の近代化と日本各地の鉱山調査をしたコワニエ（Jean-Francois Coignet, 1837 - 1902）（金, 2009a）、ケプロン（Horace Capron, 1804 - 1885）の助手で道内における鉱山調査をしたアンチセル（Thomas Antisell, 1821? - 1893）（金, 2009b; 2009c）、鉱山冶金技師で東京大学で採鉱冶金を教えたネットー（Curt Adolph Netto, 1847 - 1909）（金, 2010a; 2010b; 2011）、日本の地震学の基礎と濃尾地震の被害調査をしたミルン（John Milne, 1850 - 1913）（金, 2012a; 2012b; 2013; 2014a; 2014b; 2015; 2016）、生野鉱山の技師で耐震設計の建築技術で貢献したレスカス（Jules Lescasse, 1841? - ?）など多数の外国人が来日し、日本の地質学の黎明期を築いていった。

明治政府は自前で人材を育てることに力を注ぎ、お雇い外国人の 3 分の 1 が教師として、各分野で多くの人材を育成していった（Jin, 2009）。中には、研究、教育実績のない外国人もいたが、外国人研究者の多くは、日本で地質学を実践し、日本人の地質学者（地質学の教育者も兼ねる）や鉱山技術者を育成し、明治以降の地質

学を礎を築いていった。時間と共に、西洋の合理性に基づく論理的思考や研究姿勢も根づいてきた。

b 近代から現代の日本へ

明治以降の日本の歴史を概観していこう。

明治からの天皇制と日本の近代化と富国強兵によって、1894年から1895年までの日清戦争と1904年から1905年の日露戦争による勝利したことで、軍国主義が強化されていった。

さまざま背景、要因があったが、1931年の満州事変から、1937年の盧溝橋事件を契機に日中戦争が始まった。1941年のマレー作戦でイギリスと戦闘状態になり、真珠湾攻撃により日米の開戦から、第二次世界大戦のアジア太平洋戦線がはじまった。一方、1939年にドイツがポーランドに侵攻し、イギリスとフランスに宣戦布告してヨーロッパ戦線がはじまった。ドイツとイタリアはアメリカに宣戦布告した。日独伊が世界を巻き込んで戦線を展開し、第二次世界大戦へと突入していく。

アメリカ合衆国のマンハッタン計画で、放射性核種を利用した原子爆弾の開発された。そこでは多くの科学者がかかわっており、科学の軍事利用の最悪の事例となった。戦後、米ソを中心に東西陣営に分かれて冷戦へと進んだ。冷戦により核爆弾や原子力技術の開発、それとともに科学技術も進むという皮肉な現象も起こっていく。1980年代になると冷戦も終わり、1990年代からはグローバル化が起こり、BRICs や中国などの台頭が起こった。また、イスラムやISによる宗教を背景にしたテロにより、新たな世界的混乱も起こってきた。

前章で世界の歴史と哲学史を、本章では自然科学、科学哲学、地質学の歴史を、最後に日本の近・現代史は駆け足ではあったが概観してきた。科学哲学や地質学のたどってきた歴史の概要は把握した。時代背景の整理は終わった。次章からは地質学の話題に移ろう。

▼歴史に関わる学問の使命

科学、科学哲学、地質学などの歴史をみてきた。何においても歴史は重要である。なぜなら、「現在」は過去からの積み上げ（歴史）の上に成立しているからである。現在の営為者が、過去を意識していなくとも、その背景には必ずや歴史がある。ただし、歴史を見る時には、注意が必要である。現在に近づくほど、歴史的な情報や記載量が多くなり、過去ほど少なくなる。昔ほど記録が少なくなるのは、時間経過が記録や情報を消失させていくからである。特に古い時代のことを考えるときには、情報消失が大きな障害となる。また、大きな事件や異変ほど、記録が多くなる。事件や異変を定量化することは困難ではあるが、記録量は異変の大きさと関連してくると考えてしまう。だがここには、バイアスが存在する。記載量を、事物や出来事の規模と評価してしまいがちになる。過去の事物や出来事の記載量が、時代・時間とともに減少していき、インパクトの程度によっても記載量も大きく変わっていく。これらを加味すると、古い時代は異変の記録しか入手できないようになる。古い時代のありふれた日常ほど記録は少なく把握しづらくなっていく。見えない日常に切り込む手段が斉一説で、それは便利な概念となる。だが、さらに問題は潜んでいる。過去の事物や出来事に関する判断や評価は、後の時代の人がおこなう。人は置かれている時代の基準で、判断や評価をする。評価の基準は、時代によって変わってくるはずだ。こうなると歴史の記載は、すべてが恣意的に見えてくる。それらをいかに客観化していくのかが、歴史にかかわる学問では重要な使命となるのであろう。地質学も、歴史や過去の時間に関わる学問である。そのため、過去の記載に関して、どう客観化、できれば定量化していくのかが、問われることになる。地質学は自然科学でもあるので、自然科学的手法や現代技術を利用して定量値を得ることができる。特に過去の時間に関する定量値は重要である。それを手がかりに歴史を読み解いていくことになるが、うまくいっているのだろうか。それが本書のテーマでもある■

第3章

地質学を考えるために

地質学の特徴は、過去をみていることであろう。地質学の素材は、現在の露頭にある岩石や地層である。現在の岩石や地層は、過去に形成されたものである。過去の年代は、今では放射性核種による年代測定と示準化石の組み合わせで、かなり正確に読み取れうようになった。年代付きの過去の出来事から歴史を組み立てることが、地質学の重要な使命である。だが、そこには地質学固有の困難さもある。



1 地質哲学へのアプローチの方法

ここまで哲学の歴史をまとめてきたが、哲学的手法については示してこなかった。哲学的手法を学ぶには、便利な教科書がある。「哲学の道具箱」(Baggini and Fosl, 2002)や「倫理学の道具箱」(Baggini and Fosl, 2007)である。これらを活用させてもらうことにする。

哲学的手法は論理学的手法を用いているため、論理学の素養も必要となる。論理学にはいろいろな教科書があるので詳細はそれに譲るとするが、論理学は数学と親和性が高く、数学と物理学も親和性が強い。例えば、ニュートンの力学的記述は、“*Philosophia Naturalis Principia Mathematica*”(自然哲学の数学的原理)と標されている。科学哲学では、科学の法則や仮説などを吟味するとき、物理学をモデルとして

用いられてきた。そのため物理学的な内容が中心になっていた。

例えば、カルナップ (Rudolf Carnap, 1891 - 1970) 「物理学の哲学的基礎」 (Carnap, 1966) では、法則、説明、および確率、測定と量的言語 (量、時間、長さ)、空間構造 (ユークリッドと非ユークリッド、相対性理論)、因果性と決定論 (因果、因果と必然、決定論と自由意志)、理論の法則と概念 (理論と観察不可能性、理論から経験則へ)、決定論 (統計的法則、量子の非決定論) などが、その内容となっている。50 年以上前の思索だが、時間と空間、因果関係、決定論、現象の統計的解釈 (統計力学)、量子的挙動の解釈 (量子力学) など、現在でも重要テーマを扱っている。これは物理学を題材にした哲学であるが、科学の概念として分類、比較、量的概念が重要としたり、科学全般に関する哲学的思索もある。だが、物理学の特徴を反映したもので、他の自然科学 (化学、生物学、地質学など) の固有性が検討されているわけではない。

自然科学の物理学以外の分野では、化学では原子や分子が基本的な要素で、物理学も共有されている。そのため、化学でも、方法論、化合物や分子構造、化学結合などに関する哲学があってもいいはずであるが、少ない (Scerri and McIntyre, 1997)。

その他の分野の代表的なものとして、1997 年にまとめられた「生物哲学の基礎」 (Mahner and Bunge, 1997) がある。この書は、生物学という分野で哲学を創出するために、網羅的、体系的なアプローチをしているので大いに参考になる。「生物哲学の基礎」は、大きく 2 部に分かれており、前半は哲学的基礎、後半は生物哲学の根本的争点で論じている。

生物哲学を進めるにあたり必要となる哲学的基礎として、存在論 (形而上学、物、構築体、性質、状態、事実、因果連関、偶然と確率)、意味論 (概念、命題、外延、指示、意味)、そして認識論 (認知、知識、知覚、観察、探究、仮説、理論、モデル、理解、テスト、証拠、真理) を概観している。ここで、哲学的手法を広く網羅している。

後半は生物哲学の根本的争点とされているが、生物学という学問固有の特徴を扱っている。内容としては、生命（生命の定義、生命システム、人工生命、生物種、生物個体群、適応）、生態（超有機体的存在者、群集、生態系、生態的ニッチ）、心理生物学（心理学への生物学的アプローチ、心身問題、心的状態、プロセス、心、意識、意図）、体系（分類学、概念論、生物唯名論）、発生（発生、前成論対後成論）、進化（進化、種形成、自然淘汰理論、進化的理論の構造）、目的論（外的目的論、内的目的論、目的律）となっている。生物哲学の各論となる部分である。生物学の特徴を、広く網羅しながら、それぞれを深く思索している。

生物学の対象となる生命や生態、発生、進化などの基礎的な概念について定義を検討している。また、小出（2011; 2020d）で示したような分類や体系学も扱っている。さらに「心理生物学」という新しい学問的内容も取り上げている。人間の脳を心理生物学としてとりあげて、「心の哲学が科学と両立可能であるべきならば、生物学、特に神経科学を考慮しなければならない。そうすると、心の哲学は生物学の哲学の固有に部分となる。」としている。その中に心身問題、心、意識、意図などが含まれていることも重要な点である。

地質学にも固有の題材があるはずで、それを抽出し、検討していく必要がある。地質哲学では、地質学固有となる特徴を明らかにして、その特徴を哲学的視点で掘り下げていくことが重要になるであろう。

2 地質学の定義

第2章では地質学成立の歴史を見てきたが、ここまで地質学というものを定義することなく進めてきた。まずは、地質学の定義を考えていこう。

文部省編（1984）「学術用語集 地学編」によれば、地質学とは「地面より下（生物起源の土壌を除く）の地層・岩石を研究する」学問とされているが、現在の地質学が対象としているものと比べると、その範囲、領域があまりにも狭い定義となっている。では、現在の地質学に即した定義はどうなるであろうか。

そもそも「地質学」とは、英語の“geology”の日本語訳である。英語の“geology”は、古代ギリシア語の“geologia”に由来する言葉で、“geo”とは「大地」や「土地」の意味で、“-logia”は「論理」や「学問」などの意味がある。したがって、「大地を調べる学問」という語源となる。地質学（geology）という用語は、ソシュールが初めて使った。その後、ライエルの「地質学原理（Principles of Geology）」の出版によって、地質学が定着してきたようだ。

日本での地質学という術語の由来については、「地学の語源をさぐる」に詳しい（歌代ほか, 1978）。中でも重要なのは小藤文次郎の指摘で、“geology”は「地学」と訳すべきで、「地質学」は間違いと主張している。その理由は、地質学の意義が、地球の性質（material や quality）だけでなく、「併せて地球創生ノ始メヨリ今日ニ至ル迄地球ヲ構成スル鉱物ノ変遷及び地球生物ノ進化歴史ヲ講スル」として「概言セハ地球ノ進化史学ナリ」としている。「地球創生ノ始メヨリ今日ニ至ル迄」とは、地球に流れてきた全時間を対象している。そして、「地球ヲ構成スル鉱物ノ変遷」とは、地球の構成物（material）である鉱物の変遷と、「地球生物ノ進化歴史」つまり生物の進化史を考えていくこととしている。それが「地球の進化史」となるとしている。この視座は、現在にも通じる達観である。

日本地質学会（2020）によれば、地質学とは「地球を科学する」こととし、「19世紀～20世紀前半にはもっぱら固体地球表層の地殻の岩石や地層そして化石などを対象として地球の歴史や現象を包括的あるいは個別的に研究」してきたが、プレートテクトニクスの登場により「科学的包括的な地球観」を持ち、地球諸科学が融合して「地球を探る」作業をすることとしている。これは、網羅的な定義となっている。

地質学は、「地球の歴史」や「地球の現象」を「探る」学問で、それは地球を広く（包括的に）、鉱物や生物も含めた構成物（material）の「性質」や「特徴」（quality）を探り、加えて構成物あるいは地球の形成から今日に至るまでの「進化史学」（historyあるいは進化 evolution）を探る、というものになるだろう。以上のことから「地質学」の定義は、次のようになるだろう。

【定義：地質学】

地球の現在の状態（構成物の性質や特徴）と、現在までの成り立ち（変遷、進化、歴史）を知ること

だが、地質学の使命として、「地球」を探ることで、本当に「包括的」といえるであろうか。「包括」については、次節（本章3c）で再度検討する。

なぜか、小藤は「地学」に固執はしなかったようだ。そのためであろうか、現在では「地学」という学問領域はなく、「地球科学」や「惑星科学」に置き換えられている。「地学」に関連する「東京地学協会」やその発行雑誌「地学雑誌」、「地学団体研究会」、「日本地学教育学会」などの学会名や高校の教科名として用いられているだけだ。

3 地質学の目的

地質学の目的は、学問の成立過程や定義の変遷から、「地球の現在の状態」を知り、「地球の現在までの成り立ち」を知ること、といえるだろう。以下では、その意味するところを、もう少し掘り下げて考えていく。

a 地球の現在の状態を知る

「状態」とは、よく使う言葉であるが、そもそもの意味を「漢字源」で調べていくと、「状」も「態」も「すがた、かたち」（姿、形）という似た意味をもっている語とされている。「状」は「現在」あるいは「現状」の姿や形を、「態」は「もちまえ」あるいは「本来もっている」となり、「固有」の姿や形という違いもあるようだ。両者を加味すると、「状態」とは、「現状」ならびに「固有」の姿や形を意味していることになるだろうか。

したがって、「現在の地球の状態」とは、「現状と本来持っている固有の地球の姿」と読み解ける。「固有」に「現状」を対比させると、固有は特異性、現状は普遍性と

いえるだろう。両方向性を理解しておく必要があるだろう。

自然科学で「状態」を扱う場合、「状態量 (quantity of state)」と呼ばれる概念が用いられる。理化学辞典 (第 5 版) によると、「状態量」とは、「巨視的状态について測定できる」量で、温度、圧力、組成や、ときには機械的、電氣的、磁氣的、重力などがある。熱力学的に考える時には、状態変数となり、物質性に依存しない示強変数 (intensive variable) と物質性に比例する示量変数 (extensive variable) に分けられる。示強変数は、温度や圧力、化学ポテンシャル、電場または磁場の強さなどがある。示量変数は、体積、質量、内部エネルギー、エントロピー、全磁気モーメントなどがある。熱平衡にある物質で、圧力、体積、温度の関数的関係を規定したものを「状態方程式」と呼ぶ。

地球の物質の状態を「相」としてとらえると、「固体」が最も多く、次いで「液体」と「気体」となる。これらの物質が、現在どのような状態量を持っているのかを調べていくことが、「現在の地球の状態」、つまり「現状」を知ることになる。地球の多くの領域で素材が入手可能なので、多数の観測、実測から状態変数を決めることができ、法則の帰納や法則の演繹に利用できる。また、示強変数を求めれば、素材が本来もっている固有の状態がわかる。

地質学では、地球を構成している物質の現状 (普遍性) と固有 (特異性) の状態を知ることが、一つ目の重要な目的となる。このような視点は、多くの自然科学が持っているものである。特に地球を対象にした地球化学や地球物理学は、現在の地球の状態を詳しく調べている学問である。

ただし、地質学は現在入手できる岩石を調べているが、その岩石の由来は過去へと遡ることになる。地質学の学問的特異性は、次の「成り立ちを探る」ことにつながる。

b 地球の現在までの成り立ちを知る

地質学は、地球の現状 (普遍性) と固有 (特異性) の状態を知ることによって終わることではなく、地球の現在までの成り立ちを知ることこそ、重要な目的となる。「成り立ち」とは、

- (1) 現在の地球の素材の構成や構造、そして素材間の関係を知ること
- (2) 地球が現在の状態になるまでの構成物のそれぞれの経緯を知ること

の2つの方向性があるだろう。

(1) は、前述した地球の現状と固有の状態を知ることを含むが、それだけでなく、広域に包括的に地球を捉え、加えて素材間の「相互作用 (interaction)」を探ることも含んでいる。「相互作用」とは、それぞれの素材が相互にどのように関係し合い、変化していくのかを探っていくことになる。相互作用には、構成物間で物質移動を伴うことがある。そのような相互作用を、最終的には地球規模にまで広げて理解していくことになる。核から D'' へ、D'' からマントルへ、マントルから地殻へ、地殻から海洋へ、海洋から生物へ、生物や海洋から大気へ、などという構成物間の物質移動が、その例となるであろう（詳しくは後述）。構成物内では、外核の対流、マントル対流（千秋ほか, 2010）、マグマ形成と上昇と噴出、海流、大気の対流などが大きな移動となるだろう。それらの移動に伴って、多様な変化や反応が起こることになるので、それらを探っていくことになる。

(2) は、「地球が現在の状態」に至るまでの時間経過に伴う変化を読み取っていくことである。(1) で示したように、「変化」には、相互作用に伴う物質移動という「運動」と伴っている。「変化」と「運動」には、必然的に「時間」の概念が入ってくる。ただし、地質学において時間とは、「不可逆 (irreversible)」な流れとなる（小出, 2020a）。この不可逆な時間とは、一方的に流れているため「時間の矢」とも呼ばれている。時間を不可逆として扱っていることが、地質学の大きな特徴となるであろう。「経緯」は「歴史 (history)」でも同義であるが、地質学の不可逆な時間における変化 (change, transition) や運動 (movement, motion、地質学では dynamics 用いる) のことである。地質学の経緯あるいは歴史は、「変遷史 (development 発達史とも呼ばれる)」という術語が用いられている。不可逆な時間による変遷史を明らかにすることが、もうひとつの地質学の重要な目的となる。ちなみに、上述の小藤の言では「進化史学」と呼んだものである。

変遷史は、その地において不可逆で一度だけの現象となるが、広域かつ長期で考えると、似たような様式で繰り返し起こっていることが知られている。そこには、地域差を越える普遍的様式やモデル化できる大地の運動様式（テクトニクス）があるように見える。地質学の目的のひとつである変遷史は、普遍的様式とされたテクトニクスの仮説構築することと言い換えられるであろう。

c 地質学の再定義

前節では、地質学の定義を「地球の現在の状態（構成物の性質や特徴）と、現在までの成り立ち（変遷、進化、歴史）を知ること」としてきたが、ここまでの検討で、より厳密になってきた。それは、現在の地球の現状（普遍性）と固有（特異性）の状態を知ること、そして現在の状態になるまでの相互作用による変遷史を知ること、であった。

だが、「包括的」に捉えるためには、対象や概念を拡大し、普遍化していく必要がある。対象の「地球」を拡大すると、太陽系の惑星や準惑星、小惑星など、すべての天体に拡大されるだろう。さらに拡大すると、太陽系だけでなく他の恒星系の天体、銀河全体の天体、さらには宇宙全体に存在している天体になるだろう。それを「すべての天体」と呼ぶことにすれば、対象を最大限に拡大したことになるだろう。

次に、「現在」や「現在まで」という時間軸上での限定をしているが、この限定を拡大していくことになる。地球では時間軸が45億年前からはじまるが、拡大すれば宇宙のはじまり（137億年前）から現在までとなる。

ここで、時間軸を「未来」にまで延ばすのは、科学的検証ができないため排除すべきだろうか。後述（本章5）するが、過去への延長も時間の不可逆性により、斉一説の適用限界があるため、この演繹にも適用限界がある。しかし、それらに注意して斉一説を使うのであれば、過去だけでなく「未来」へも演繹可能かもしれない。つまり、上の「すべての天体」に関する普遍的理論（相互作用、変遷史）があれば、「どんな時代にも」おいても、適用できるだろう。

以上のことから、地質学を再定義すると、次のようなるだろう。

【地質学の再定義】

すべての天体における普遍性と特異性の把握と、それぞれの天体内の相互作用による普遍的変遷史を知ること

この内容に関しては、後（第9章）で考察していこう。

4 地質学における時間の扱い

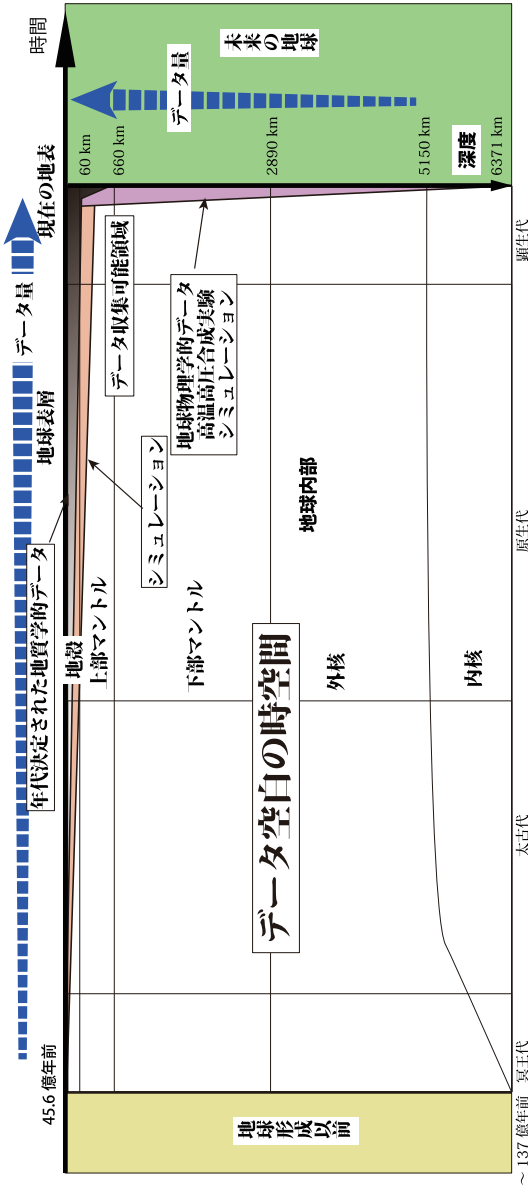
ここまで、地質学の定義や目的を整理してきた。地質学では過去の起こった現象を、過去に形成された素材をもとに、過去から現在にたまるまでの過程や変化（変遷史）に関する研究が進められる。過去の事象を扱うため、時間の不可逆性という制約から、地質学固有の視座や方法論が必要になる。地質学における時間の扱いを整理していく。

a 過去の情報の読み取り

地質学は、実在する物質（岩石や鉱物、地層、化石など）を素材とする。扱える対象は、過去に形成された物質のうち、「現在」の地球上に存在しており、かつ研究者が入手できた素材である（図 3-1）。

地球物理学的手法（例えば、地震波、地磁気、重力など）により、地球深部の情報をえることは可能である。また、高温高压条件で岩石や化合物での合成実験やシミュレーションによる地球内部実態の推定（例えば、地球内部の物性など）、あるいは過去の地球内部の変化履歴（例えば、地磁気の変化、マントル対流の変化など）、過去の大陸配置の推定（例えば、大陸移動、プレート運動など）がおこなわれている。

地表でえられた地質学的情報は、学際的連携による地球深部の情報との比較対照することで、検証がおこなえる。地質学では、表層部の試料での過去から現在の復元



地球からの地質学的データの収集

図 3-1 地球からの地質学的データの収集

地球の時空間における地質学的データが収集できる範囲を示した概念図。横軸：時代(過去から現在までの時間)。縦軸：地球深度(空)。データは現在の地表に存在している試料よりえられる。読み取った情報は、細切れの過去と幾ばくかの地球深部の情報となる。

を試みているが、学際的に取り組むことで、地球のより深部まで、より広い地球の時空間を調べることができる。だが、地球に存在した全時空間と比べると、科学の及ぶ範囲は非常に限られている（小出，2006）。

過去を知るために、地質学の果たしている役割は大きい。知りえない過去の歴史を検証するために、実物を研究対象とする唯一の研究分野である。例えば、化石から過去の生物の存在とその特徴を知ることができる。もしその形成年代（時代）が判明すれば、その時代の生物の形態や生態などを知ることができる。化石は古生物学だけでなく、生物学の系統分析などで重要な素材となっている。地質学は、過去を探求する学問でもある。

例として、堆積岩からできた地層を考える。露頭にある地層（固化して堆積岩になっている状態とする）は、形成時（海底で堆積した）の状態（未固結の堆積物の状態）とは異なっている。現在みられる堆積岩になるためには、堆積後に続成作用などにより固化（未固結の堆積物から固化した堆積岩となる）し、それが地表に持ち上げられ（定置、その間変成・変形作用などを受ける）、さらに浸食・開析・風化作用などにより、現在の位置に露出したものである。現在見えている地層は、形成時の情報は間引かれ、不完全な記録媒体となっている。だが、地質学的素材は、過去（人による記録のない時代）を探るための唯一の素材となる。「過去」の「時間」の記録は、素材に残された情報を読み取っていくしかない。

地層において、地層累重の法則から形成順序が決められるため、新旧関係は明らかである。ただし、定量的に年代を決めることはできない。層準ごとの化石の形態の変化を、時間経過とみなして時間を区分することは可能である。このように化石を利用した年代決定は、「相対年代」と呼ばれる。化石が多産する地層では詳細な区分が可能となる。時代を決めるのに利用できる化石は、「示準化石」と呼ばれる。年代値は決められなくても、時代を区分することは可能である。多数の化石を含んだ深海底の珪質軟泥や層状チャートでは、詳細な時代区分がなされている。

化石は堆積岩からのみ産出する。堆積岩以外の成因の火成岩や変成岩では、岩石

の放射性同位体組成を分析して、年代や時代の決定をおこなっていく。放射性同位体組成でえられたものは「絶対年代」と呼ばれる。絶対年代の精度は、岩質や同位体の種類、分析方法、対象となる年代などによって異なってくる。

火成岩の絶対年代は、形成年代を示すことになる。変成岩の絶対年代は、年代測定した鉱物が変成作用でできた時の年代を意味する。変成岩は原岩がどのような起源の岩石であっても、変成鉱物とその放射性同位体が測定できれば、年代決定が可能になる。変成作用の絶対年代は、岩石が経てきた履歴を記録していることになる。

大型示準化石ならば、野外でも化石同定ができれば時代を決定できる、放射性同位体による年代は、室内での化学分析を経て決められることになる。現在では、絶対年代と相対年代の両者の利点を組み合わせて、地質年代表が作成されている (Cohen et al., 2013; 2020, Gradstein et al., 2004, Harland et al., 1990)。時代決定された素材から、その時代の各種の情報 (堆積場や堆積環境など) が読み取れる。ただし、化石が少ないカンブリア紀以前は絶対年代によって区分されているが、その区分の精度はよくない。

b 時間スケールの扱い

自然現象には、さまざまな次元 (例えば、単位が異なるもの) や、さまざまなスケールのものがある (図 3-2)。

1 年のスケールでは、季節変化から年輪が形成され、火山噴火、二酸化炭素濃度のサイクルなどがある。1,000 年でのスケールは、気候変化やひとつの火山噴火のはじまりから終了までになる。100 万年のスケールでは、大きな気候変動や生物進化が起こり、10 億年のスケールでは大陸移動や海洋プレートの沈み込みや大陸衝突などのプレートテクトニクスや、もう少し大きなスケールのマントル対流まで含めたプレートテクトニクスが起こる。45.6 億年は地球誕生から現在まで、100 億年のスケールでは太陽光度変化や惑星誕生や消滅の現象がある。そして、 137.72 ± 0.59 億年前 (Bennett et al., 2013) の宇宙誕生から、現在に至るまでの変化がもっとも長い時間ス

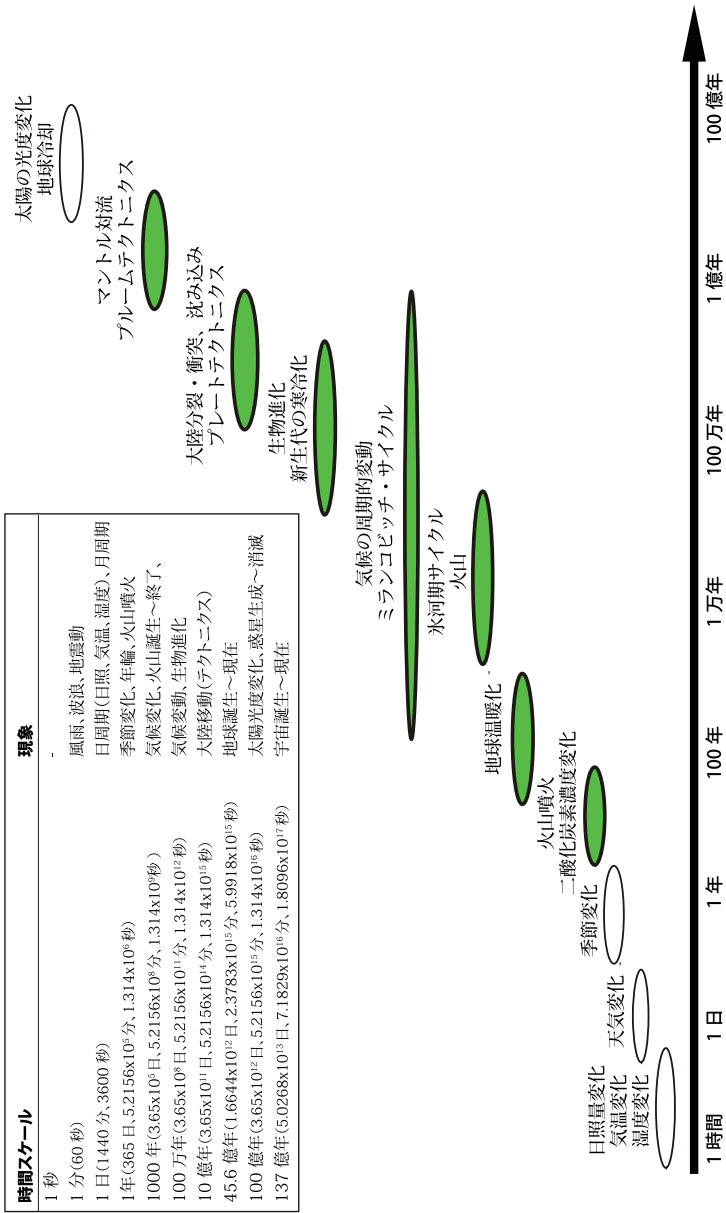


図 3-2 自然現象の時間スケール

各種の自然現象における時間スケールの概要。着色したものは、地質学的素材に記録され可能性のある現象。左上の表：時間スケールをいくつかの単位で表示したもの。

ケールとなる。

自然科学の多くは、現在の現象や現存する物質、生きている生物やその構成物などを素材にして、研究が進められている。研究結果には、現在のデータや事実をもとにした普遍化、法則化が進められていく。時間に依存したものもあるが、多くは時間軸が限定されず不定のものが多い。一方、地質学は、地球に限定されてはいるが、過去に起こった現象や形成された素材を扱っている点が、他の自然科学と比べて異なっている。地質学では過去の物質に記録された現象を読み取ることになり、素材に反映される時間は、数時間から数十億年に及ぶ多様なスケールの現象となる。

また、現象が繰り返されたり（例えば、氷河湖での年縞堆積物など）、変化が蓄積されたり（例えば、深海底の珪質軟泥がチャートになることなど）することで、時間スケールの小さい現象であっても、記録になっていくことがある（例えば、小出, 2015a; 2016a; 2017a; 2018a; 2018c など）。その時間スケールでの解読が困難でも、より大きなスケールでの解析により、変化や傾向を読み取ることが可能な場合もある。

それぞれの時間スケールの現象を、どのように体系的に繋いでいくかが重要である。もし、その現象に周期性、規則性が認められるものがあれば、後述のように数学的概念（フーリエ解析）の導入（第4章5）が役立つであろう。

5 斉一説への警鐘

ここまで、過去を探る地質学において、「斉一説」は非常に重要な役割を果たしていること何度か述べてきた。しかし、斉一説には弱点があることを理解しておく必要がある。以下では、斉一説への警鐘を鳴らしておこう。

a 斉一説とは

斉一説（principle of uniformity, uniformitarianism）は、「自然界で起きる出来事は全くデタラメに生起するわけではなく、何らかの秩序があり、同じような条件のもとでは、同じ現象がくりかえされるはずだ」という仮定（戸田山, 2005）、あるいは自然に關す

る物理学や化学上の法則や原理（実は仮説）は演繹可能であるという仮定である。したがって斉一説は、物理学や化学の原理は過去に適用できる、という前提となる重要な概念である。

斉一説は、もともとは、ヒュームによって導入された概念で（坂本・野本，2002）である。過去に何度も同じことが起こったとしたら、次も同じことが起こるといふ、帰納的推論を斉一説と呼んだ。斉一説を自然に適用したものを、「自然の斉一性原理（principle of the uniformity of nature）」、あるいは「自然の一樣性原理」などともいわれているが、ここでは「自然の斉一性」と呼ぶことにする。

過去を読み解くときに斉一説を用いるという科学的方法論は、ハットンやライエルらが、宗教的呪縛から逃れるために、多大な努力の結果、勝ちえたものであった（第2章3c）。

斉一説は、ハットンが1795年発行の「地球の理論」(The Theory of Earth)にて、「現在は過去を解く鍵」として提唱したことで知られるようになった（Repcheck, 2003）。ライエルは「地質学原理」(1830 - 1833)の中で「斉一説」という方法論で展開したが、ライエル自身は「斉一説」とは呼んでいなかった（Gould, 1987）が、書名が、

Principles of Geology: being an attempt to explain the former changes of the Earth's surface, by reference to causes now in operation

(地質学原理：地球表層の以前の変化を、現在進行中の原因を参照することで説明しようとする試み)

を見れば、その意図するところがよく分かる。

ライエルの斉一説は4つの主張からなっている（Rudwick, 1972）。法則の斉一性、過程の斉一性、速度の斉一性（漸進説）、状態の斉一性（非進歩説）の4つである（Gould, 1987）。

法則の斉一性とは、「自然法則は時空を超えて一定である」ことで、枚挙的帰納法の前提となり、「自然の斉一性原理」となるものである。これは古くから哲学で「観察できない過去にまで帰納的推論を拡張する」ために必要な概念として認識されていた。

過程の斉一性とは、「現時点で作用している原因によって過去を説明」することで、

未知の原因や消滅した原因などで説明はしない。「プロセスの通時的斉一性」とも呼ばれる。これは、神秘主義や宗教的な原因を排除し、科学的理論や独立した普遍的対象が実在するという、実在主義（現実主義）的立場でもある。

速度の斉一性とは、変化は一定、定常的で漸進的である。洪水、地震、隆起などの激変は地域的に限定されたもので、「現時点で起こっている頻度や範囲を超える規模でそういうことが過去に起こったこともないし、将来も起こりえない」というものである。

状態の斉一性とは、「地球は、平衡状態あるいは動的定常状態」にあり、「変化は連続的であるが、どこへも導きはしない」ので進歩などしない。だから、「過去を推測するために現行の<秩序>を利用」できるというものである。

後者の2つの斉一性は、過去の地質を調べれば検証可能であり、反例を挙げることができる。速度の斉一性に対しては、現在の頻度や規模からは想定できない全地球に変化を起こした大規模な寒冷化（氷河期、全球凍結）や、人類が経験したことのないような巨大隕石の衝突などが、過去に起こったことが検証された。これは、過去の地質現象が一定の速度で起こるのではないことを意味する。また、現状が決して平衡状態や定常状態ではなく、大気組成や気温、海水温など、かなり変動していたこともわかってきた。状態の斉一性も適用できないことがわかる。

一方、前者の2つは方法論に関するもので、帰納された法則は時間によらず演繹可能であり、また現在の因果関係は過去にも適用可能だと考えるものである。因果関係には未知のものはない、という現実主義的な原則となる。法則と過程の斉一性という方法論は、現在でも科学的手法として利用されている。だが、「時間の不可逆性」という課題が、斉一説に立ちはだかる。

b 時間の矢：エントロピー

ある岩石が、1億年前の火山で噴火してできた火山岩だとしよう。1億年前というのは定量値として決められたものであり、いくつかの同位体組成や相対年代などの方法を組み合わせることで、検証していけるであろう。

だが、岩石から推定された火山現象の検証はできない。なぜなら、それは「時間の不可逆性」によるためである。自然現象は、常に時間軸に沿って起こる歴史性をもったものとなる。地球の時間軸に沿って、その時代（1億年前）に起こった、現象や過程（この例では、火山で噴火）が調べられることになる。

地球における時間の不可逆性を「時間の矢」と呼ぶことは上述した。「時間の矢」の存在は、エントロピー増大の原理から導かれる。温度 T の物質に外部から熱 (Q) を加えると、エントロピー (S) は、

$$\Delta S = \frac{\Delta Q}{T}$$

と表される。断熱条件の閉鎖系で、状態が A から B へと変化したとき、エントロピー $S(A)$ と $S(B)$ の関係は、

$$S(A) \leq S(B)$$

となる。これは、状態が変化すると、エントロピーが増加するのみで、減少することがないことを示している。系全体のエントロピーは増大する一方で、時間に関する現象は熱力学的には不可逆性をもっていることを意味する。エントロピー増大の原理は、熱力学第二法則ともなっており、物理学の重要な法則でもある。

地質現象はすべて時間軸に沿って起こるので、エントロピー増大の原理が適用されることになる。エントロピーの増大による時間の不可逆性（時間の矢）の存在は、地質学、あるいは自然科学において重要な前提条件、あるいは束縛条件となる。

c 齊一説の適用限界1：類比の適用

化石は、過去のある時代の生物の一部が石化したものである。部分から全体を想像するために用いられる。ひとつの化石から、その生物の生きていた時の姿（全体像）を想像していくことになる。さらに、その姿から、生活していた行動や営み（生態）を推定することもできるだろう。その生態から、他の生物の関係（食料や住処など生態系）や生活の場（海陸空や寒暖などの生息環境）を推定・・・と、つぎつぎと想像を

巡らすことができる。

例えば、歯の化石が一つ発見されたとする。その歯を、現在生きている生物と比べると、肉食動物の歯と似ていたとしよう。化石の歯の大きさから顎の大きさが、顎の大きさから頭部の大きさが、頭部から全身の大きさが推定できるだろう。その歯が肉食獣のものであったから、その体格に見合った、餌となる大きさの草食獣がいたことになる。草食獣の数は肉食獣よりは多かつたであろう。その大きさの草食獣が多数いたということは、それらを支える多くの植物が必要になる。当然、大きさの異なった草食獣もいたはずなので、それらが食べる植物は多様であつたはずである。それぞれの大きさの草食獣を専門に狙う肉食獣もいたはずである。複雑で豊かな生態系が想像されていく。

たったひとつの歯の化石から、次々と類推の連鎖を展開していくことが可能となる。類推の連鎖は、現在の生物、現在の生態系の「類比（アナロジー analogy）」を、斉一説にて展開したものである。

物理学の法則や方程式では、時間の変数があっても、どのような時間軸においても成り立つものが多い。例えば、運動方程式や電磁気に関するマクスウェル方程式など、多くの物理法則には、時間（ T, t などで表記される）が変数として入っている。しかし、それらの時間変数は、時代や時期によって変わるものではない。このような時間に関係した法則は、物理現象において斉一説が利用できるという重要な根拠となる。

化学では化学反応があるが、時間の変数ではないが関与する。化学反応とは変化であり、変化には順序や向きがある。順序や向きとは、時間の流れが背景にある。またその順序や向きは、ある条件が出現した場合に進むものである。もしその条件が変わったり、なくなったりすると、逆向きに反応が進むものもある。些細な条件変化で、可逆的に反応が起こる場合もある。

このような現象に関する物理法則や化学反応の存在は、時間が可逆であることの事例となるだろう。検証された法則の適用（演繹）は問題がないが、形態の類似という生物学的事実への転用には注意が必要である。生物学的類似が斉一的に過去の生物に転用できるという論理的保証がないからである。

d 斉一説の適用限界2：化石＝過去の生物

化石への斉一説も適用には、もうひとつの注意が必要である。「化石＝過去の生物」という命題は、だれもが「正しい」と思っている。だが、科学において「正しさ」とは、検証されなければならない。「化石＝過去の生物」を証明するためには、化石が過去の生物であるという前提が必要になる。

かつて、化石は英語で fossil でラテン語の fossilis が語源となる。Fossilis とは、「掘り出されたもの」という意味である。もともと化石には「過去の生物」という概念はなかった。

古代ギリシアのタレスやその弟子のアナクシマンドロスは、化石が過去の生物の遺骸であるという考え方をしていた。また、クセノファネスは、山の地層から見つかった貝化石を見て、そこがかつて海であったと考えた。だが、アリストテレは、「造形力説」という神秘的な特殊な力によってつくられたと考えた。その他にも、化石は、「自然のいたずら」によるという説や「神のたわむれの作品」とする説などが、中世のヨーロッパでは主流であった。宗教的な背景を持つ造形力説の考え方は、西洋で長く続いた（第2章3）。「鉱物学の父」と呼ばれたアグリコラ（G. Agricola, 1494～1555）も、化石が「掘り出されたもの」ということから、鉱物も化石の一種に入れていた。

中世で化石を正しく理解したのは、ダ・ビンチであった。土木工事に立ち会った経験から、化石が過去の生物であることを認識していた。陸で発見した貝化石を、かつて海にすんでいた生物が、地層に埋まり、地殻変動で陸地が上がったという結論に達していた。その後、産業革命によって、大規模な土木工事が各地でおこなわれ、多くの化石が発見されるようになった。

18～17世紀になると、地層の研究にともなって化石の認識が深まった。地層の違いによって、含まれる化石も違っていることが理解されてきた。斉一説と激変説の論争（第2章3c）をへて、正しい認識へと進んでいった。ダーウィンは、ライエルの斉一説を時間的根拠にして1859年「種の起源」で進化論を提唱した。

現在の科学でも「化石＝過去の生物」という認識が定着している。化石の定義は、「過

去の生物の遺骸（遺体）や生活の痕跡（生痕）が残されたもの」となっている。石化しているかどうかは関係しないし、生物体の一部でなくてもいい。生物が残したものをすべてを化石としている。

だが、「化石」は物質、形態、痕跡などで無生物であり、生物ではない。生物とは、生物学辞典では、「生命現象を営むもの」とある。この生命現象を営む生命とは、生物学辞典では、「生物の本質的屬性」とある。つまり、生命とは、すべての生物がもっている共通の性質のことをいっている。生物を生命という術語を用いて定義し、一方生命は生物という術語を用いて定義している。循環論法に陥っている。つまり、生命ならびに生物の定義が、独立した完全なものではないことを意味している。

化石からは、生物に関係した属性（全体像、生態、生態系、環境）を検証はできないし、「化石＝過去の生物」という前提がないと、現生生物との比較による類推もできない。化石とは「生きていない」生物の痕跡であり「化石≠過去の生物」となる。厳密にみると、「化石＝過去の生物」という前提が成り立たず、化石へ現生生物の類似を適用することは、論理的には間違いを犯していることになる。

e 齊一説の適用限界3：自然の齊一性

法則の齊一性として、現在でも一般的な帰納法の手法として用いている。ただ、これは、「観察できない」過去や未知のものにまで、帰納的推論を拡張していた。

帰納的推論は、数学や論理学では証明可能である。数学という抽象化された概念における証明方法として「数学的帰納法」と呼ばれるものがある。ある式が、 $n = 1, 2, 3, \dots$ の時に正しければ、 $n+1$ の場合も正しい、という証明法である。自然数（ n ）の構造を利用して、 $n = 1$ の証明から $n = 2$ の命題が証明（検証）され、順次 $+1$ の場合へと適用され、任意の自然数 n に対しても命題が成り立つとして証明していくことになる。この数学的帰納法は、論理的には演繹法でなる。

観測された事実から普遍的な法則（あるいは仮説）を見出すためのヒュームの論理的推論を帰納法（induction）と呼んでいる。この法則を未知の事象に適用することが

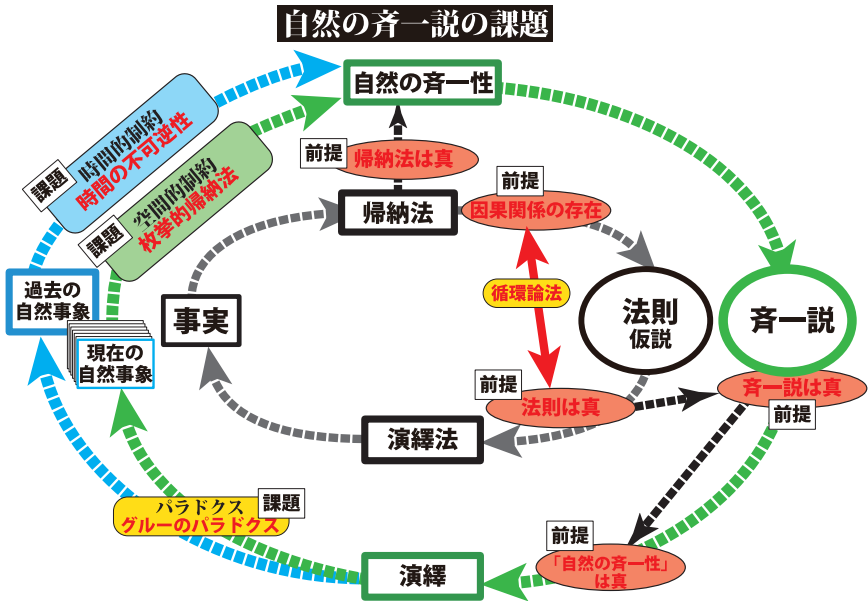


図 3-3 自然の斉一性の課題

自然の斉一説における課題をまとめた概念図。事実から法則への帰納法、法則から事実へ演繹法には、各種の解決が困難な課題や証明の不能の前提がある。詳細は本文を参照。

演繹法 (deduction) である。現在の科学的営みでは、事実から帰納法を用いて法則 (仮説) を抽象していく。その法則を演繹法で用いてで未知の事実で検証を進めていく。このような手順が、現在の一般的な科学の進め方である。

この方法論に論理的問題が各所にある (図 3-3)。まず、帰納法を事実へ適用する場合、「因果関係の存在」という前提を基にしている。しかし、「因果関係の存在」は、保証されるものではなく、暗黙にそうあって欲しいという幻想でもある。次に、法則 (仮説) を事実へ演繹する時、「法則は真」であるという前提を置いている。しかし、法則の抽象は、この帰納で「因果関係の存在」、あるいは「法則は真」であるという命題同士は、いずれも相手の方法が正しければという前提が根拠としているので循環論法になっている。

ヒュームは、帰納的推論である帰納法は、自然界の事物にも「自然の斉一性」が現れるとした。「自然の斉一性」として帰納法と演繹法を自然事象に適用する時、さらなる課題がある。

自然現象には、事物を網羅できないという空間的制約と、時間軸が入ってくることで「時間の不可逆性」という時間的制約が加わることになる。

自然科学では、現在入手可能な事象が枚挙的に集積されていくため、「枚挙的帰納法 (enumerative induction)」と呼ばれている。本来の帰納法ならば、すべての事象をもれなく取り上げて、例外がないことを確認した上で、帰納 (完全帰納法 perfect induction) を適用することで、論理的正当性を確保するはずである。自然現象の場合、それができない。地球の事象においても、すべてのもれなく確認できないし、地球外への適用するためには、調査、検証の及ばない宇宙全体で検証する必要があるが、それは不可能である。したがって、枚挙的帰納法では、自然現象の一部の事実からの帰納 (不完全帰納法 imperfect induction) しているため、検証できた事実の及んでいる範囲だけが正しいに過ぎない。

また、未来への転用は、起こっていない事象に関する事例、証拠を求めることになるが、それは検証不能である。

もし、現時点まで起こっていた事象で完全帰納された法則 A (例えば、ある結晶ではグリーンのみである、という法則) があったとしよう。だが、ある時点 (将来で現時点では未知の時間: 未来) から別の事象が交じるようになったとき (その結晶でブルーも発見された)、自然の斉一性を満たさなくなる。自然の斉一性を成り立たせるために、新たに法則 A' (その結晶のグリーンとブルーを合わせてグルーと呼ぶことにする) を変更すると解決できる。法則 A' は、現時点までは結晶はグリーンで、現時点以降の結晶の色は「グルー」である、というものである。両者に対してさらに例外が出てくる (レッド) ようであれば、グルーの意味を拡大するか、グルード (時間経過に伴って、グリーンのみから+ブルー、さらに+レッドとなる) にすればいいことになる。

このような適用例外が現れるたびに、完全帰納法で証明できるようにその都度、定義

を修正、拡張すれば、時間経過にともなう変化に対応した完全帰納法を満たせる。未来まで法則は検証できないが、現時点では完全な検証がされていることになる。

未来で例外がたととしても、色の概念や言語を変更することで、斉一性の成立させることで対処なのである。しかし、この色という感覚や視覚の概念を示す言語を変えると、この行為は、認識や記載の基礎を破壊していることになる。果たしてこれは、理論の拡張と呼べるだろうか。

時間軸にそって起こる「斉一性の破れ」を、基礎的定義や概念を変化させることで繕うのは、矛盾を孕んだ循環論法でもあり、「グルーのパラドクス」と呼ばれている (Goodman, 1955)。

自然科学では枚挙的帰納法を用いざるえないのだが、論理的に「不完全な法則 (仮説)」を抽出しているため、証明できない推論法という欠陥を抱えていることになる (戸田山, 2005)。これは、「ヒュームの帰納法の難問」や「帰納の正当化問題」などと呼ばれている。

枚挙的帰納法は、たったひとつの反証が発見されることによって、その法則は否定されることになる。自然科学では、すべての事象、現象を調べることは不可能なので、統計的に十分な数の事実をもとに、帰納して法則化しているにすぎない。

6 考えるための視座

帰納と演繹という一般的な科学の手法も正しさが保証されていないこと、さらに過去を探るためには斉一説は必要不可欠の手段であるが、論理的に正当性が保障されるものではないこと、を述べてきた。では、自然科学、特に過去を扱う地質学では、どのように対処していけばいいのかを考えていこう。

a 仮説演繹法 (アブダクション)

岩石から過去の年代値を読み取り、その時どのような事象が起こったのかを読み取られている。地質学では、この手法をさまざまな時代に適用しながら、地球の歴史を編

んでいる。しかし、その推定法の正当性は担保されず、時間の不可逆性による時間的制約と枚挙的帰納法による空間的制約によって、斉一説において適用限界があった。不可逆な時間とは、熱力学的なエントロピー増大の法則によるものであった。斉一説には適用限界があるとなると、地質学ではどのようにして過去の事物をもとに探っていけばいいのだろうか。

まず、科学の方法論から考えていこう。科学の法則は、いくつもの事実から規則性を見出し、そこから法則を抽出するとき帰納法が用いられる。帰納法で見いだされた法則は、検証されなければならない。検証作業が終わるまで、その法則は仮説となる。仮説が正しいかどうかは、演繹をして検証されていく。帰納と演繹が繰り返し利用されながら、科学は進められていく。

上の肉食獣の歯の化石で用いた考え方は斉一説であったが、現在の生物との類似を過去へと演繹したものである。歯から顎、顎から頭部、頭部から全身などは、演繹を繰り返して利用していた。

この方法論は、仮説の確かさを確かめるために有用である。自然科学では限られた事実から仮説を立てて、その仮説から検証可能な命題（予測）を見出し、その予測を演繹的に用いて新たな実験や観測をおこなって検証しようとする方法論になる。この方法は、「仮説演繹法 (hypothetic deductive method)」や「アブダクション (abduction)」とも呼ばれる（図 3-4）。自然科学の法則は演繹の適用限界があり完全な検証ができないため、すべてが仮説となる。科学という営みでは、仮説演繹法が常に使われていることになる。

現在のすべての科学の法則（仮説）は論理的正しさが保証されるものではなく、これまでうまくいっている仮説にすぎない。自然界では帰納された仮説の検証には、常に反証の出る可能性が残る。そのため、ひとつの反証の出現によって、仮説が崩壊し、新たな仮説が必要になる場面も科学史では起こった。

反例を手がかりにして、再度、仮説演繹法（アブダクション）を適用することで、新たな仮説が生まれる契機になる。「グルーのパラドクス」では、論理体系は変更しない

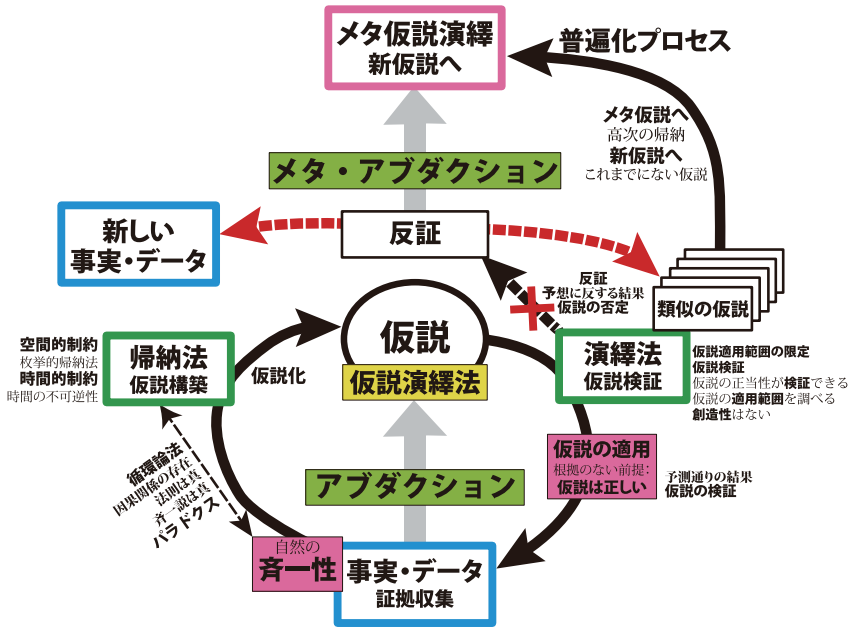


図 3-4 自然科学のための論理構成

自然科学で用いられている各種の論理の関係や構成を示した模式図。事実やデータなどの証拠から帰納法により仮説を形成。仮説を演繹法で検証。帰納法は不完全なので、帰納法と演繹法を繰り返して仮説演繹法というアブダクションをおこなう。反証が出れば仮説は否定される。反証にこれまでの事実を加えて新たな仮説（メタ仮説、新仮説）へとアブダクションすることが普遍のプロセスとなる。小出（2018b）を修正。

で、定義や概念の変更することで対処されたが、仮説演繹法の再度の適用は、メタ的仮説演繹法（メタ・アブダクション）となり、より適用範囲の広い普遍化が進むことになる。仮説演繹法の繰り返しは、論理的には不完全ではあるが、限られた証拠から全く新たな仮説を生み出す（アブダクション）ことができる創造的手法となる。アブダクションは、人の飛躍的発想も含まれているため、少しの証拠やたったひとつ反証から、まったく新たな仮説やメタ的仮説などを生み出すことも可能である。

このよう飛躍的発想による科学革命（パラダイム転換）は何度か起こってきたことは、

多くの科学哲学者が指摘してきた（例えば、Kuhn, 1962 など）。地質学においても、「地
向斜造山運動」仮説から「プレートテクトニクス」仮説へは、パラダイム転換と位置づ
けられる（都城, 1998）。

b 類比の拡大と枚挙の蓄積：それでも地質学は進んでいく

枚挙的帰納法の問題は、自然科学すべてに起こるものである。自然界の法則は、
枚挙的にしか帰納できないため、新事実発見によって反証が出てくる可能性を孕んで
いる。自然科学の法則は常に仮説であり、仮説の確かさの検証のために演繹を続ける
という仮説演繹法を採用するしかない。現在の自然科学は、枚挙的帰納と仮説演繹を
繰り返して進められている。

古生物学は、さらなる困難さを抱えていた。「化石≠生物」であるため、化石は生
物ではない。また、過去の生物は生きていないので、生物であることを証明できない
ため「化石＝過去の生物」も証明不能である。したがって、化石を現生生物と比較
することで、推論を進めることは、危うい砂上の楼閣になっていく。

自然科学では、論理的には証明は不可能だが、方法論として、

- (1) 類似の適用範囲の拡大
- (2) 枚挙的事例の蓄積

という考えを用いている。古生物学を例にみていく。

(1) は、多種の化石で現生生物との各種の観点での比較をおこない、類似点が多
数あることから、昔の生物であった可能性を示した。さらに、時代を拡大して化石を調べ
たり、化石の産出地域や形成環境も拡大したりしても、現生生物との類似性があること
を示して、適用範囲を演繹的に広げている。また、(2) は、類似例を大量に枚挙して
も反例のないことで、正しさを増している。自然科学における枚挙的帰納法とは、類
似事例による拡大、個別事例の蓄積から結論の確かさを増すもので、「確証性の原理」
と呼ばれているものである。これは一種の「大数の法則」の適用であるので、検証精
度を上げるためには、多大な労力が必要になってくる。さらに、いくら労力をかけても

論理的正当性は示せない。

自然科学の方法論には限界がある。さらに地質学では時間の不可逆性による斉一説の適用限界、証明不能の「化石＝過去の生物」という対象を扱う。そんなジレンマに陥りながらも、科学的営為は進めなければならない。なぜなら、地質学的素材は、過去を知るために唯一の素材で、地球や生物の歴史を編むためには必要不可欠なものだからである（小出，2019b）。

c 特異性と普遍性

前節では、類比を拡大していくことで、仮説の適用範囲を広げていくことで現在の自然科学が進められていることを示した。では、類比とはどういうことであろうか考えていく。

タービダイト層を例として考えていこう。タービダイト層は、土石流や海底地すべりなどで生じたタービダイト流（混濁流とも呼ばれます）によって、土砂が運ばれ、海底に堆積したものである。タービダイト流で土砂が堆積するとき、粒径の大きなものから小さいもの、つまり砂岩から泥岩へと粒度変化したものが単層となる。タービダイト流が頻繁に起こる環境の海底があれば、同じような周期で繰り返された地層が形成されることになる。タービダイト層は日本列島の付加体の中によくみられ、馴染みのある地層となる。

タービダイト層は、砂岩から泥岩という似た素材からなる層が繰り返された互層かならる。互層は、「同じ」地層が累々と連なり重なっているように見え、「整合」で一連の地層とされる（図 3-5）。これが、タービダイト層の普遍性となる。

しかし、それぞれの単層は、厚さも、砂岩や泥岩の割合も、中の構造も、二つとして「同じ」ものはない。もちろんできた時期、条件、物質も、地層ごとにまったく異質のものである。これが個々の地層の特異性となる。

タービダイト層の互層は、類似した普遍性をもっているが、単層ごと個性（特異性）があり、似て非なるもので同一のものではない。

さらに上位階層でも普遍性と特異性があり、一連の地層には「○○層」と識別さた

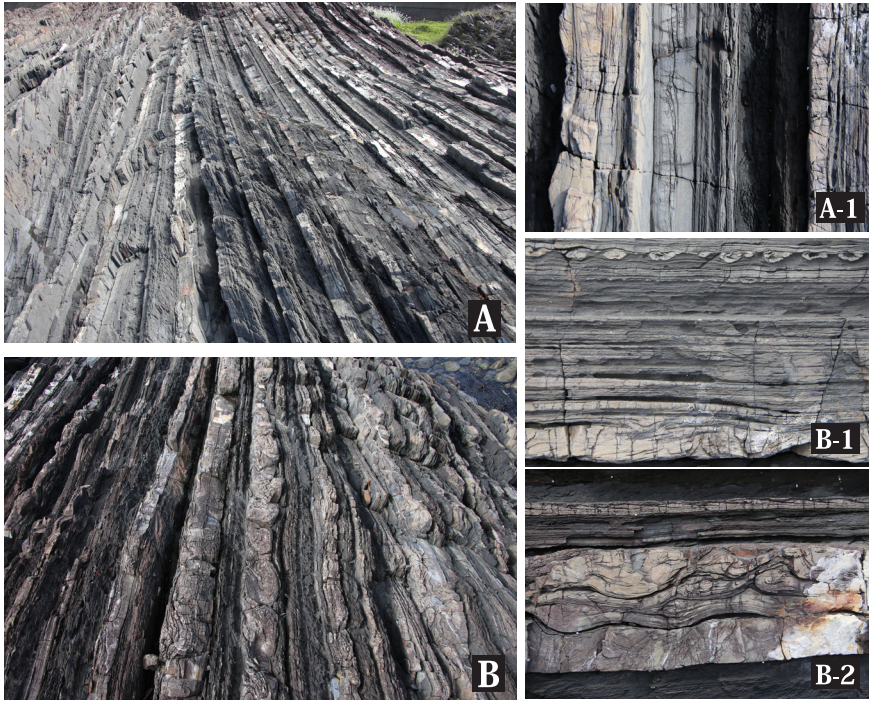


図 3-5 タービダイト層

タービダイト層内の特異性と普遍性。A は B より 5 m ほど上位に位置している一連の地層。いずれも砂泥互層の地層。A: 整然とした互層であるが、層厚は多様である。整然としたラミナが内部構造としてもつが、ラミナの幅は不規則である（接写：A-1）。B: 整然とした互層で、層厚は比較的そろっている。泥岩中のラミナは整然としていが、砂岩のラミナでは乱れた内部構造をもつ（接写：B-1、2）。四万十層群。高知県吉良川町丙の海岸露頭。著者撮影。

固有名称がつけられるほどの共通性がありながらも、他のタービダイト層の「××層」とは何らかの特異性によって区別されることになる。タービダイト層には階層的に何層かの特異性と類似性があることになる。

自然界の「似た」の事物には、「似ている」と抽象される普遍性と、似て非なる特異性とが認められ、記載されていく。人には注目した時の識別能力は高い。類似性の

中に差異をみだし、差異の中に類似性を見出す能力がある。それを活かして記載が進められる。

d 地球は開放系

地球というシステムを考える時、閉鎖系でないという点が重要である。

地球は太陽から常にエネルギーを受けとっている。太陽定数から、最大（太陽が天頂にあるとき）で 1366 W/m^2 ($1174 \text{ kcal/h}\cdot\text{m}^2$)、地球全体として $1.74 \times 10^{17} \text{ W}$ (J/s) のエネルギーが、地球に降り注いでいることになる。毎秒の値ではあるが、長期で見ると非常に大きな熱量が太陽から供給されていることになる。

太陽エネルギーと火山のエネルギーを比べてみる。火山の一連の噴火における総エネルギー量は、伊豆大島の噴火（1950年～1951年）では $1.0 \times 10^{16} \text{ J}$ 、浅間山の噴火（1728年）は $8 \times 10^{17} \text{ J}$ 、桜島の噴火（1914年）は $4 \times 10^{18} \text{ J}$ となる。地球全体の火山噴火で放出される総エネルギー量は $4 \times 10^{17} \text{ J/年}$ 、年間起こっている地震の総エネルギー量は $4 \times 10^{17} \text{ J/年}$ となり、地球内部からの総エネルギー量は $1 \times 10^{21} \text{ J/年}$ 程度である。大きな火山活動1個分に匹敵するエネルギーを、地球は、毎秒、太陽から放射を受け取っていることになる。

太陽エネルギーは、地球では30%が反射され、70%が地球内に吸収される。吸収されたエネルギーは、表層での変化を起し、最終的にはすべてを赤外線として再放射することになる。地球に入射されたエネルギー（可視光）が再放射（赤外線）されるとき、エネルギー劣化が起こることで、エントロピーを稼いでいる。その典型例が、植物の光合成である。

Schrödinger (1974) は、生命は「ネグエントロピー（負のエントロピー）」を取り入れ、エントロピーの増大を相殺することで、定常状態を保持している開放定常系の存在と考えた。現在では、「負のエントロピー」の存在は否定されているが、この生命と太陽エネルギーの関係、また地球が開放系であるという見方は重要な指摘である。生命は、太陽エネルギーから負のエントロピーを受け取っている（エントロピーを稼いでいる）と

考えれば、生命活動が熱力学的に理解できることになる。

他にも、地球外からのエネルギーとして、太陽や月による潮汐作用によるエネルギーとして、 $3 \times 10^{12} \text{ W}$ (0.0059 W/m^2) 程度を受け取っているが、太陽エネルギーと比べると4桁も少ない。また、地球内部からのエネルギーは、 $4.4 \times 10^{13} \text{ W}$ (0.08 W/m^2) となり、これも太陽放射と比べると3桁も少ないものである。

では、地球のエネルギー収支において太陽エネルギーが最も重要かという点、そうではない。なぜなら、太陽のエネルギーの70%は地球の表面に吸収され物質を温めるために使われているが、そのエネルギーの及ぶ範囲が表層部のみで、地質現象を起こすには至らない。太陽放射のエネルギー量は多いが、ほとんど蓄積されることなく再放出されるため、地球の地質学的現象として、風化浸食作用への影響は与えるが、深部物質への影響はない。

一方、地球内部のエネルギーは膨大な量が蓄積されており、火山噴火として一気に放出され地球に大きな変化を与えたり、後述のマンテル対流として固体物質全体の営みを起こすことになる。地球における深部まで考慮した地質現象は、地球内部のエネルギーに依存していることになる。固体地球の運動の原動力は、地球初期に蓄えられた過去の資産を使っていることになる。その量は、今後も地質現象を起こすに十分なものとなっている。

e 地球の保持エネルギー

地質現象は、「現在」だけでなく「過去」にも物理学や化学の法則や原理に従って起こっていたように見えるのは、自然の斉一性に基づいているからである。地質学的証拠から、過去に地質現象が停止したことはないのは明らかなので、エントロピー増大が継続していることになる。

地球内部には、膨大な重力エネルギー（衝突エネルギー）があり、その熱がマンテル、海洋、大気をへて地球外に放出されている。このエネルギーの流れが、地質現象を起し、エントロピーを生み出している。地球内部の熱源となる外核の液体鉄が存在して

いる限り、まだ熱的平衡には達していないことになる。また、地球は少々のエントロピー増大では変化が現れないほどの熱量および熱源があり、エントロピーの許容量も莫大であることになる。

地球の物質循環や熱循環などでは、システムが大きく転換しているという仮説（マンデル対流の変化、地球磁場の変化など）は、エントロピー増大による変化の現れとみなせるであろう。今後も熱放出にともなう地質現象は継続していくだろうが、地球のエントロピーの許容量が不明なので、熱による地質現象がいつまで継続するかは不明である。

▼過去をみるということ

地質学の扱っている過去は一度限りものではあるが、起こった結果の一部は、知ることができる。岩石や地層の年代測定をすれば、その形成時代を知ることができる。また、岩石や地層を各種の分析をすることで、岩石や地層の情報は捉えられる。つまり、過去の事実確認ができることになる。過去の限られた情報ではあるが、斉一説を用いれば、現在の現象から演繹することで不足情報を推定することができる。その情報は、あくまでも推定であり、検証ができないというジレンマがあるが、だが、岩石や地層だけでなく、すべての物質は、何らかの成因、なんらかの環境下で形成された。未知の成因や形成環境を知るために、関連情報から類推することになる。その類推において斉一説は有力な方法論となる。堂々巡りをしているようだが、これが過去の歴史を編むための唯一の方法になるのであろう。物理学や化学の法則（仮説）の多くは、可逆性のもとに成立し、実験や観察で検証できる。現在の可逆的時間の法則（仮説）で、過去の不可逆的時間へ類推をしている。現在では放射性年代によって絶対年代が決められ、時間軸の確定ができるようになった。以前スコットランドに調査にいった。それでは、「ハットンの不整合」と共に、「ハットンの断面 (Hutton's Section)」と呼ばれている露頭へもいった (図 3-6)。エディンバラの裏山のハイキングコースにその露頭はある。ハットンが火成作用としてマグマの貫入という現象を認識し、地質学的意義を示した露頭である。石炭紀後期の砂岩から頁岩層からなるバラガン層 (Ballagan Formation) に花崗岩 (Salisbury Craigs Sill) が貫入している露頭がある。火成論と水成論の論争していた人が住んでいるすぐ近くに、証拠の露頭があった。身近に見られる露頭の地質現象に斉一的に適用することで、長い時間、各種の自然現象が働いていたことが体感できる。露頭で地層と別の岩石の不連続な関係 (貫入) から、時間間隙を持った地質学現象が読み取られる。このように近所の誰もが見ることできる露頭から、過去の出来事を斉一説を駆使して推理していくことが、地質学の醍醐味でもある。その推理を集大成したものが、地質学が構築した地球の歴史となる。■

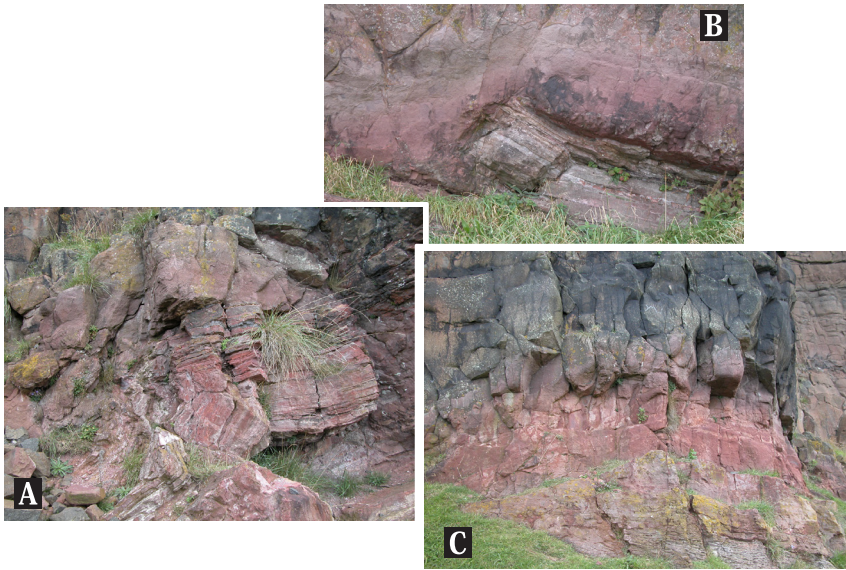


図 3-6 ハットンの断面

ハットンの断面 (Hutton's Section)。石炭紀後期の砂岩から頁岩層からなるインバークライド層群 (Inverclyde Group) のバラガン層 (Ballagan Formation) に、花崗岩 (Salisbury Craigs Sill) が貫入しているところ (A と B)。貫入面の付近では急冷縁 (赤褐色) が見える (C)。A: 下右に地層があり、上部に花崗岩貫入している。B: 下部に四角い地層が見える。C: 下部に地層があり、その上に貫入岩の赤褐色の急冷縁がある。ソールズベリークレイグス、スコットランド (Salisbury Craigs, Holyrood Park, Edinburgh Scotland)。著者撮影。



羊蹄山

薄く雪をかぶった独立峰は羊蹄山である。北海道虻田郡京極町。著者撮影。

第4章

地質学的思索のための数学的概念

本書では、地質学的思索を展開するための新しい方法論として、数学的概念を道具として用いることにした。本章で地質学に適用可能となるような、数学的手法とその概念をまとめることにした。数学の分野は広いが、本章では初歩的な方法論しかまとめていないが、それでも適用の可能性は大きいそうだ。もっとも数学的方法論を導入していくべきかもしれない。



1 数学的概念の導入のために

地質学において、地質現象の解析やモデル化、観測値や分析値の処理など、至るところで数学的手法は用いられている。その時、数学は、計算のために適用や解析分析での応用、つまり道具や手段として用いられているにすぎない。すべての研究分野でも、数学の導入状況は同じであろう。

例えば、分析装置の値の処理、定量値の統計処理などの単純なものから、地層の堆積層の規則性をフーリエ解析で離散的な値を抽出し天体運動の周期性（ミランコヴィッチ・サイクル）で解釈するなど、複雑なものまでさまざまである。このように地質学でも、多数の事例はあるが、その多くは数値的解をえるための数学的手段の適用である。

各種の数学における概念は、もっと広い適用ができるのではないかと考えられる。本章では、数学で用いられている概念（考え方）を、地質学に導入することで、多数の仮説における相互間の関係を読み解き、新しい概念を見出だそうという思考実験をしていくことになる。

例えば、数学の概念は、論理的に構築されているのだが、ある関数から導出された別の関数と関係には、意表をつくもの、驚くべきものが多々ある。その好例がオイラーの等式（Euler's identity）であろう。まず、オイラーの公式がある。

$$e^{i\theta} = \cos \theta + i \sin \theta$$

ここで e はネイピア数（自然対数の底 2.718281828・・・）、 i は虚数単位、 π は円周率（円の直径と円周の比 3.1415926535・・・）となる。 \cos と \sin は余弦関数および正弦関数である。オイラーの等式は、指数関数と三角関数のマクローリン展開や、2階線形微分方程式の2つの独立解などから証明されている。ここで、 $\theta = \pi$ とするとオイラーの公式が導かれる。

$$e^{i\pi} + 1 = 0$$

このような不思議で美しい関係式が、論理的に導き出される（吉田, 2010）。

他にも、相互に関係性をもった数式群（例えば、微分と積分など）があったり、思い切った近似（例えば、テイラー展開など）をしたり、数値やグラフからは見えない特徴を見出す手段（例えば、フーリエ解析など）を使用したりなど、多様な数学的な方法論がある。このような各種の数学的方法論には、それぞれの手法に内在されている概念があり、それらを地質学へ適用することで、新しい視座が生まれてくるのではないかと考えた。もしこのような数学との学問領域横断的な思考方法の導入が有効であれば、数学と地質学間だけでなく、数学と他の学問領域へも適用可能であろう。本書の後半では、そのケーススタディを進めていくことになる。

2 地質現象の関数化：微積分の概念の適用

まず、地質現象の関数化から考えていこう。

a 地質学的現象

地質現象への数学的概念の適用を考えていくのだが、まず地質現象の関数化を考えていこう。地質現象の多くは、基本的に時間（以下 t とする）に依存しているとみなせる。地質現象において、時間に関して規則性が見出せ、それが関数化でき、

$$y = f(t)$$

となったとしよう。

地質学、もしくはすべての自然界の事象、現象、出来事、事物や個物において、検証可能となるのは、時間軸上で「現在」に位置するもののみである。過去の「ある時代 ($t = a$)」に形成された事物、個物であっても、現在に「残存」していなければ検証不能になる。したがって、検証のために用いることのできる時間は、現在から過去にかけてのある期間 (a) の微小の時間の断片に過ぎない。これは数学の概念でいえば、「ある時代での微分」に相当するであろう。一方、「現在 ($t = 0$)」起こっている地質学的「変化」が判明したとすれば、「現在の変化」を読み取ったことになり、数学の概念での「 $t = 0$ での微分」に相当するであろう。

「微小の変化」が関数化できれば、微分方程式となる。地質現象が時間的に継続している時、その現象を総体的（蓄積や減少）に捉えれば、その見方は積分の概念に相当する。地質学的現象の微分方程式を（不定）積分すれば、一般化された関数がえられることになる（図 4-1）。地質学的関数を時間に関して積分すると、変化の総体が推定できるので、ある定まった期間で定積分したものが、地質学的な時代記述、時代の各論となる。

例えば、地球初期（45 億年前、 $t = -45$ 億年）の大気中に酸素がほとんどなかった時代から酸素が急増してきた時代（20 億年前、 $t = -20$ 億年）までの大気変化、ある

微分積分の地質学への導入

(時間の単位はすべて億年)

積分の概念の導入：地質学的関数から

地質現象（時間 t の関数）

$$y = f(t)$$

現在の地質学的微小変化：微分

$$f'(t) = \frac{d}{dt} f(t)$$

過去の地質現象の蓄積：不定積分

$$f(t) + C = \int f'(t) dt$$

ある期間（ a から b ）の現象：定積分

$$f(t) = \int_a^b f'(t) dt = [f(t)]_a^b$$

例：20 億年前までから現在までの現象

$$f(20) = \int_{-45}^{-20} f'(t) dt = [f(t)]_{-45}^{-20}$$

例：創世から現在まで継続している現象

$$f(0) = \int_{-45}^0 f'(t) dt = [f(t)]_{-45}^0$$

微分の概念の導入：物理学的関数から

微分可能な関数（時間 t の関数）

$$y = g(t) \quad g'(t) = \frac{d}{dt} g(t)$$

独立変数が 2 つ（ t, x ）の場合

$$y = g(t, x)$$

1 階偏微分方程式

$$g'(t, x) = g(t, x, \frac{\partial g}{\partial t}, \frac{dg}{dx})$$

あるいは

$$\frac{g'(t, x)}{dt dx} = g(t, x, \frac{\partial g}{\partial t}, \frac{dg}{dx})$$

となるので、

$$g''_{tt} = \frac{\partial^2 g}{\partial t^2} = \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial g}{\partial t} \right) \quad g''_{tx} = \frac{\partial^2 g}{\partial t \partial x} = \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial g}{\partial x} \right)$$

$$g''_{xx} = \frac{\partial^2 g}{\partial x^2} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial g}{\partial x} \right) \quad g''_{xt} = \frac{\partial^2 g}{\partial x \partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial g}{\partial t} \right)$$

全微分形ならば

$$dg(t, x) = \frac{\partial g}{\partial t} dt + \frac{\partial g}{\partial x} dx$$

図 4-1 微積分の地質学への適用

微積分で用いられる数学的概念で、地質学に適用できるようなものを、事例と共にまとめたもの。

いは地球創成期（ $t = -45$ 億年）からはじまった大陸形成が現在（ $t = 0$ 年）まで継続しているとすれば、現在の状態は定積分した値として求められる。

過去に向かって時間で定積分すれば過去のある時点での現象がわかり、未来に向かって定積分すれば未来のある時点での現象がわかることになる。未来の検証は不能ではあるが、根拠をもった過去や未来の予測が可能となる。

対応した時代や、現在まで総体的集積が起きている場合、定積分の時間を設定することで、入手可能な時代の地質的試料から検証できることになる。大きな変化が想定される時代の試料が入手できれば、境界条件を決めることができるだろう。また、精度のいい定積分ができれば、初期条件を決めることも可能となるであろう。地質学的時

間で不定積分したものが、一般化できた地質学的関数（モデル）となり、そして初期条件が積分定数となっていく（註）。

このような数学的視座は、地質学の概念に直結できる。

【註：初期条件と境界条件】

微積分において、初期条件と境界条件は、一般解から積分定数を求めた特殊解となる。そのため数学的には、初期条件か境界条件は解釈の問題となる。積分結果において、現在を $t = 0$ とすると、数学的には積分定数の初期条件になるが、地質現象がある時代からはじまったとすると（例えば、酸素の大量生産が 25 億年前から、生命の誕生が 38 億年前からなど）、「現在」という特殊解は境界条件と考えたほうがいい。一方、地質現象がはじまった時代の特殊解は、初期条件と捉えたほうがいいだろう。

b 物理学的現象

次に、物理学における関数（関数 g ）のうち、時間（ t ）に依存する

$$y = g(t)$$

を考える。

物理学における時間の扱いは、〇時〇分など限定された日時における関数ではなく、「不定の時間」あるいは「可逆の時間」での関数となる。この物理学的関数が微分可能であれば、微分方程式を求めることができる。時間的制限がないのであれば、地質学的証拠のある時代 a や b において微分すれば、物理学的推定による時代ごとの変化を地質学的素材にて検証できることになる。検証作業を経て一般化できた微分方程式は、地質学的に利用できる物理学的関数、つまり斉一説的概念として利用できるはずである。

ただし、時間（ t ）以外に独立変数（例えば x とする）が複数ある時は、

$$\frac{f''(t, x)}{dt dx} = f(t, x, \frac{\partial f}{\partial t}, \frac{df}{dx}) \quad \frac{g'(t, x)}{dt dx} = g(t, x, \frac{\partial g}{\partial t}, \frac{dg}{dx})$$

などの偏微分方程式になる。偏微分方程式は、一般解を求めることは非常に困難になるが、特別な条件であれば解がえられることがある。偏微分方程式を変数分離することで、解が求められることがある。その解が適当かどうかは、例えば、 $t = 0$ を満たす初期条件や、空間的な値に対する境界条件として検討できる。

微分方程式が全微分方程式なら、一般解は、

$$f(t, x)dt + g(t, x)dy = 0$$

として求められる。このように地質学への数学の微分方程式の概念が導入可能である。

3 過去の地質現象：テイラー展開の利用

地質現象で時間に依存し、かつ微分可能な関数 ($f(t)$) があつた時、ある時代の ($t = a$) での値を知りたいが、値が求めることが困難な場合がある。そんな時、テイラー展開 (Taylor series) が利用できる。テイラー展開ができれば、その時代の現象の近似式が求められる。

テイラー展開とは、関数 $f(t)$ のある点で、導関数の無限和の形式にしたものをいう。ある時代 (a) の時間依存の地質現象は、テイラー展開で近似的に求められることになる (図 4-2)。

$$\begin{aligned} f(t+a) &= f(a) + (t-a)f'(a) + \frac{(t-a)^2}{2!} f''(a) + \dots + \frac{(t-a)^n}{n!} f^{(n)}(a) \\ &= \sum_{k=0}^{\infty} \frac{x^k}{k!} f^{(k)}(a) \end{aligned}$$

テイラー展開の特徴から、時間 (期間 $|a|$) が十分に小さければ、次数の大きな項は切り捨てて近似できる。次数を増やせば、 t 近傍の範囲を広げることが可能となる。 $a = 0$ (現在) のときは、マクローリン展開 (Maclaurin expansion) となる。

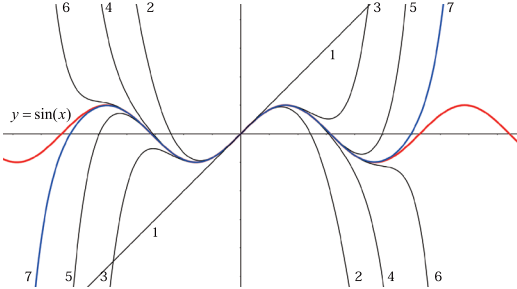
次数を増やせば、図 4-2 のように、離れた値でも関数に近づけることになる。その

Taylor 展開

ある時代 (a) における $f(t)$ のテイラー展開

$$f(t+a) = f(a) + (t-a)f'(a) + \frac{(t-a)^2}{2!}f''(a) + \dots + \frac{(t-a)^n}{n!}f^{(n)}(a)$$

$$= \sum_{k=0}^{\infty} \frac{f^{(k)}(a)}{k!}(t-a)^k$$



テイラー展開の例

元の関数

$$y = \sin(x)$$

1 次近似

$$y = x$$

2 次近似

$$y = x - \frac{1}{3!}x^3$$

3 次近似

$$y = x - \frac{1}{3!}x^3 + \frac{1}{5!}x^5$$

4 次近似

$$y = x - \frac{1}{3!}x^3 + \frac{1}{5!}x^5 - \frac{1}{7!}x^7$$

5 次近似

$$y = x - \frac{1}{3!}x^3 + \frac{1}{5!}x^5 - \frac{1}{7!}x^7 + \frac{1}{9!}x^9$$

6 次近似

$$y = x - \frac{1}{3!}x^3 + \frac{1}{5!}x^5 - \frac{1}{7!}x^7 + \frac{1}{9!}x^9 - \frac{1}{11!}x^{11}$$

7 次近似

$$y = x - \frac{1}{3!}x^3 + \frac{1}{5!}x^5 - \frac{1}{7!}x^7 + \frac{1}{9!}x^9 - \frac{1}{11!}x^{11} + \frac{1}{13!}x^{13}$$

図 4-2 Taylor と Maclaurin 展開

テイラー展開とマクローリン展開の原理。右：元の正弦関数でテイラー展開をしたもの。t = a の時の 1 次近似から 7 次近似までを示した。左グラフ：正弦関数 (太い赤線) と 7 次 (太い青線) までの近似関数。グラフの数字は次数。

ためにはもとの関数が、次数回の微分が可能なものではないとできない。それでも課題はある。次数を増やすほど、近似されているのは、ある範囲に限定され、はずれるとズレが拡大されていく。近似が有効な距離を「収束半径」と呼ぶ。収束半径は、関数のどの値でテイラー展開するかによって異なってくる。

したがって、適度な次数での展開をし、近似されていない範囲の値での適用は危険であることを理解しておく必要がある。

この数学的概念を、過去の地質現象に対して適用すると、定式化、関数化可能なもの (微分可能な地質現象) は、微小な部分であれば、他の関数で近似可能であることを意味する。これは、証拠のある時代 (テイラー展開可能な値) で、微小部分であれば、斉一説の数値的近似が可能になることを保証している。限定された期間であるが、斉一説が近似可能であることは有用である。

Fourier 解析

フーリエ展開 (関数 $f(x)$ が区分的になめらかならばフーリエ級数で表せる)

$$f(x) = \frac{1}{2}a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos nx + b_n \sin nx)$$

フーリエ級数

$$a_0 = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) dx$$

$$a_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \cos nx dx$$

$$b_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \sin nx dx$$

項目微分 (区分的に滑らか、かつ連続ならば項目微分が可能)

$$f'(x) = \sum_{n=1}^{\infty} (-na_n \sin nx + nb_n \cos nx)$$

項目積分 (区分的に連続ならば項目積分が可能)

$$\int_0^x f(t) dt = \frac{1}{2}a_0 x + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{b_n}{n} + \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{a_n}{n} \sin nx - \frac{b_n}{n} \cos nx \right)$$

図 4-3 Fourier 解析

一般的なフーリエ展開の式。区間的になめらかである時、関数の振幅 (a_n, b_n) と周期 (n) の異なった正弦関数と余弦関数の総和で示される。そこから振幅 (a_n, b_n) と角周波数 (n) の離散的値として示される。

4 周期現象の認定と解析：フーリエ解析や存否法の適用

地質現象に周期性がみられるものがよくある。前述 (第3章6c) のタービダイト層や層状チャートで、繰り返される地層はその典型であろう。周期現象の解析法として、連続関数を離散関数に分解して解析する方法や、周期性とともに時代性も同時に解析する方法などがある。以下では、それぞれの代表的な方法をみていく。

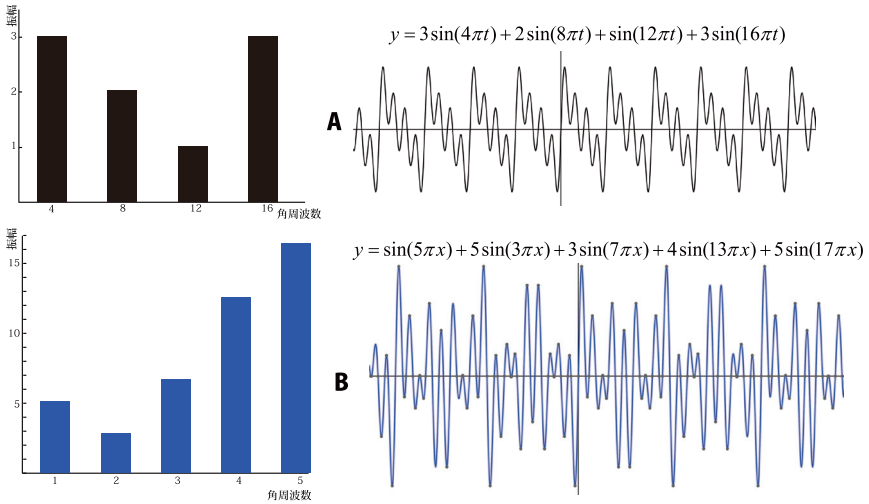


図 4-4 Fourier 変換の例

右：A（黒）と B（青）の 2 つの周期関数（式とグラフ）。左：フーリエ変換したとき、抽出された振幅と各周波数の頻度図。複雑な波形をもったものも、周期性があればフーリエ変換で離散化（スペクトル解析）できる。

a フーリエ解析

周期性の最も一般的な解法として、フーリエ解析（Fourier analysis）がある。

フーリエ解析とは、周期性のある現象をフーリエ変換（Fourier transform）することで、周期性のある関数（周期関数）を振動関数（三角関数）に分解することである。フーリエ変換可能な関数は、区間的になめらかである範囲である（図 4-3）。非周期性の関数であっても、周期関数と見なしてフーリエ解析する方法はよく利用されている。

フーリエ変換できれば、周期性のある連続関数を、離散関数（離散スペクトル）にできる。周期関数は、三角関数の和に変換でき、各三角関数の振幅と周期（角周波数）で表記できることになる（図 4-4）。このような手法をスペクト分析（解析）という。

$$f(x) = \frac{1}{2} a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos nx + b_n \sin nx)$$

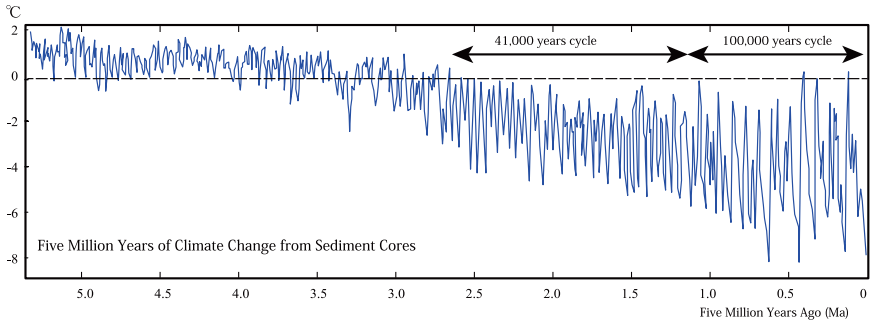


図 4-5 周期性の解析事例

氷床からの過去の温度推定の事例。氷床の同位体組成を用いて温度を推定し、時代ごとに並べると周期性が見える。横軸：時代。百万年前。縦軸：化学的指標から推定した温度。500万年分の堆積物からえられた温度変化を気候変動の見なして周期性を解析することで、10万年と4万1000年の周期が見いだされてきた。データは、Lisiecki and Raymo (2005a; 2005b; 2005c), Petit et al. (1999) による。

深海底堆積物のボーリングコアに含まれる有孔虫の酸素同位体比から、それぞれの時代の温度の定量値が推定された。それらを大量処理することで、温度の変化曲線が描かれるようになった（図 4-5）。横軸としては、精度の良い年代決定がなされているので、周期の年代値が求められる。

示した例では、500万年分ほどの気温データがあり、温度変化を気候変動と見なして、そこから周期性を読み取られている。この事例では、最近の100万年間は10万年周期の変動が、それ以前の260万年前までは4万1000年周期が認められることがわかってきた。同様の試みは各地のアイスコアでもおこなわれており、その有効性があることがわかってきた。

周期的な気候変動はミランコヴィッチ・サイクル (Milankovitch, 1930) で説明されることが多い。地球軌道要素の周期的変化による緯度ごとの太陽放射量の変動を計算して、その周期性が気候変動の原因になるものと考えられた。地球の軌道要素として、地軸の傾き（周期 4.1 万年）、公転軌道の離心率（周期 10 万年）、地軸の歳差運

動（周期 2.3 万年と 1.9 万年）の 4 つの周期が読み取られている。

過去の情報から読み取った周期性の値は、独立した方法によってえられている。この値が、現在のミランコビッチ・サイクルという周期性の値が一致することで、斉一的に原因を推定することが可能になる。どの天体周期が、過去の周期性をもたらしているかの仮説となる。

年代決定の精度の悪い古い地層にも周期性を持ったもの（例えば、層状チャートやタービダイト層など）が多数あるが、その形成機構（例では、堆積機構など）に周期性があると仮定すれば、フーリエ解析が利用できることになる。解析した値から考えられる現象の周期（例では、気候変動、生物絶滅、地震、大洪水など）と比較することで、えられた値の意味が理解できる。

b 存否法

フーリエ解析は、単調に継続する周期現象を解析するのに便利であるが、自然現象には周期性と時代性（時系列変化）が混ざったものがある。そのようなものを解析する方法のひとつとして、存否法（Sompi Method）がある。

時系列変化は、短期の自己相関と傾向変動（トレンド）、周期変動、不規則変動（外因性変動）、そしてホワイトノイズによって構成されていると見なされている。そのような時系列データを、ある時間（ t ）の値を、それより古いデータを用いて回帰する自己回帰過程（AR 過程）と呼ばれる手法があり、それを発展させたものが、存否法である（Kumazawa et al., 1990）。

存否法は、地質学でよくみられる時間（ t ）とともに周期現象が変動していく現象を解析するために開発されたものである（山本, 1986）。周期関数（ \cos ）と指数関数の積になっているため、フーリエ変換より解析は困難であるが、時系列データのスペクトル解析法となっている（Hori et al., 1989, Matsuura, et al., 1990）。現在では、他の分野にも適用されている（例えば、山本ほか, 2013 など）。

存否法は、波形データを波素（なみそ）に分解し、以下のパラメーターで表現して

いく。

$$x(t) = \sum_{v=1}^m A_v e^{(g_v t)} \cos(\omega_v t + \theta_v)$$

と示される。ここで、 A_i は初期振幅 (initial amplitude) で、 g_i は成長率か減衰率 (growing rate)、 ω_i は周波数 (frequency)、 ϕ_i は初期位相 (initial phase) となる。この 4 つの値を求めることで、周期性とともに時間依存性のある成長率 (減衰率) も同時に求める方法である。

他にも周期性を解析する方法は、いろいろとあるだろうが、時代性を抽出できる存否法は、地質学においては有効となるであろう。

地質現象における周期性は、フーリア解析や存否法が適用できる。ただし、周期や変化 (経時変化、成長率、減衰率など) の値は、あくまでも数値処理された結果としてえられたものであり、自然界での因果関係や必然性は、地質学的に検証が必要となる。可能性の一つと考えるべきであるが、周期性を数学的に定量化できる方法として有効である。

5 冪乗則 (スケーリング則)

統計的分布は、平均値の周りに左右対称にベル型の正規分布 (normal distribution, Gaussian distribution) をするものが多い。正規分布は、

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2}}$$

と表せる。しかし、自然界には正規分布に当てはまらない現象も多い。

a 冪乗分布

正規分布しない現象を考えると、冪乗分布 (power law distribution) として考えるとうまくいくことがある。冪乗分布とは、現象の 2 つの観測量 (規模と頻度、あるいは

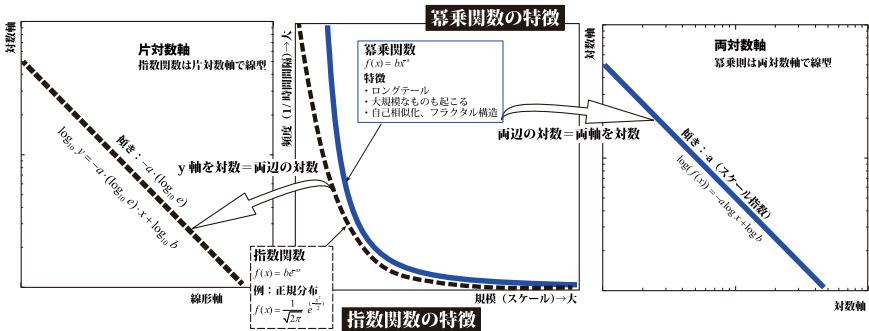


図 4-6 冪乗関数の特徴

中図：通常軸。冪乗関数（青の実線）と指数関数（黒の破線）の特徴を示した。右図：冪乗関数。両対数軸にすると冪乗関数は直線となる。左図：指数関数。片対数軸にすると指数関数は直線となる。

サイズと頻度）が、冪乗に比例するという関係である。このようなものを冪乗則（power law）、あるいはスケーリング則（scaling law）と呼ばれている。

冪乗分布は、冪乗関数として

$$f(x) = bx^{-a}$$

と書け、ここで、 a はスケーリング指数（scaling exponent）と呼ばれる。

冪乗関数は、度数分布や頻度分布が、冪乗で減少する（図 4-6 左）。冪乗関数の両辺の対数をとると、

$$\log(f(x)) = -a \log x + \log b$$

となる。変数 y も x も対数の形になっているため、両対数軸でグラフにすると直線となる（図 4-6 右）。この図で、スケーリング指数（ a ）が直線の傾きなる。

冪乗関数と似た関数として指数関数があり、式は

$$f(x) = be^{-ax}$$

となる。両辺の対数をとると、

$$\log_{10} y = -a \cdot (\log_{10} e) \cdot x + \log_{10} b$$

となる。冪乗関数形は似ているが、変数 y が対数であるのに対して、変数 x が 1 次の形になっているため、 y 軸を対数（片対数軸）にすると、グラフは直線になる。

冪乗関数は、スケーリング指数によっては平均値や分散の値など分布を特徴づける値が存在しないことがある。このような特徴はスケール不変性（scale invariance）と呼ばれる（梅野，2020）。また、確率密度関数を考えると、確率の値に関係なく定数倍すると元の関数に一致するという性質がある。冪乗分布の累積分布もまた冪乗分布になる。これは「部分が全体と比例する」ことになり、対象のスケールを変えてもその特徴が変化しない性質のことで、自己相似性（self-similarity）、あるいはフラクタル構造（fractal structure）もっていることを意味する。

指数関数は一気に減少するが、冪乗関数は規模の大きな現象も頻度は小さくなるが、起こる確率は下がりにくいという特徴がある。このような減少のしかたはロングテール（long tail）とも呼ばれている。稀にとんでもなく大きな値が出現することになる。自然界の現象において、これまで起こらなかったとしても、今後も起こらないとはいえないという、当たり前のことが冪乗則から導き出される。

この冪乗則の数学的概念を考えていくと、経験則だけでなく、数学法則や物理法則の背景に存在する特性が見えてくる。長さを 2 乗すれば面積に、3 乗すれば体積になる。冪乗則は背景の変数の次元が関係していることが理解できる。同様に重力もクーロンの法則も距離の -2 乗に比例する。力（重力、クーロン力）が伝わるのが 2 次元の面状と考えれば減衰の次元も、-2 乗に比例すると理解できる。現象の背景に冪乗関係をもっていることが推定できれば、そこには冪乗則の特徴が隠されていることになる。

さらに、自然現象が冪乗則になっているということは、スケール（図では横軸のエネルギー、規模などのこと）と頻度（縦軸、回数、数など）の関係が冪乗関数に近似

できるというである。ここで、頻度とは、時間間隔に逆比例することを意味し、時間の逆数と見なすことができる。地質学的に考えると、過去に起こった冪数関数の現象は、時間的には不規則で予測困難で、規模に制限はなく、大規模なものもいつでも起こりうることになる。

b 自然界の冪乗則

冪乗関数は、指数関数と関数の形式は似ているが、明らかに異なった特徴をもっていることになる。これが数学の面白いところで、自然界にその特徴が反映されることになる。

規模の小さいものは多く、大きくなるとともに頻度は少なくなるという冪乗則に従っている自然現象が多々認められる。

例えば、地震のマグニチュードの大きさと頻度には冪乗関係があり、Gutenberg-Richter 則として知られている（例えば、泉宮ほか，2013 など）。衝突する隕石のサイズの頻度（諸田・平田，2015）や火山噴火の規模の頻度（中田，2015）、斜面崩壊、雪崩、河川の氾濫などの大規模な自然災害の規模と頻度、砂山の高さと崩壊の規模など、さまざまな現象が知られている。

また、生物の計測された 2 つの指標の間には、冪乗の関係があることが知られている。アロメトリー（allometry）と呼ばれ、身長は体重の $1/3$ 乗、体表面積は体重の $2/3$ 乗、代謝は体重の $3/4$ 乗に比例する（Schmidt-Nielsen, 1984）。生物アロメトリーでは、身長は長さのスケールで、体表面積は長さの 2 乗になり、体重は密度に体積をかけたものとするれば、長さの 3 乗となっているとみなせる。

近年では情報科学の分野でも、冪乗則がよく知られ、使われるようになってきた（例えば、井上，2010，市川・小林，2011 など）。冪乗則と似たものとして、頻度と順位の関係は、ジップの法則（Zipf law）や、経済において全体の大部分は一部の要素が生み出しているパレートの法則（pareto law、80 : 20 の法則、ばらつきの法則、働キアリの法則とも）などと呼ばれ注目されている。

地震や火山などでは、実際、超巨大の規模のものも起こっていることから、この特徴は重要な意味をもっているであろう。想定外、予想外の規模の自然現象は稀ではあるが、起こる可能性を常に意識しておかなければならない。ただそれぞれの自然現象の原因は異なっているはずで、分布の類似性は経験則となる。そのため、個々に因果関係を追求すべきである（伊東，1991）。

6 ベイズ統計：仮説演繹法

前述したように自然科学を進めるには、枚挙的帰納法を用いるしかなく、そこに「自然の帰納法」という論理的な課題があった（第3章5）。また、地質学の特徴として過去を探ることを挙げたが、斉一説という方法論には不可逆な時間（時間の矢）というハンディがあった（第3章5b）。そんな悪条件に中でも、研究を進めるために、自然科学では仮説演繹法（アブダクション）という手法を用いていた（第3章6a）。

仮説演繹法では、とりあえずは自由な発想で作業仮説を設定しておき、演繹することで確かさを示していくことになる。完全な証明や検証は不可能ではあるが、新しい仮説提示と検証性をもった方法となる。

この概念を統計学的に利用する方法論として、ベイズ統計がある。まず、直感的な確率（直観的信頼度とよばれる）を仮定をする。この直感的確率は、関連のない結果や実験、個人的推測など、事前知識に基づいて自由に設定する。このような考えを「ベイズの解釈（Bayesian interpretation of probability）」という。直観的信頼度を事前確率（prior probability）として、ベイズの定理を用いる。事前の事象（A）の起こる確率（ $P(A)$ 事前確率）を用いて、これから起こる事象（B）の確率（ $P(A|B)$ ）を事後確率（posterior probability）として求めることになる。事前確率のもとで結果が生じる確率（ $P(B|A)$ ）という、少々複雑なものを介して、事前確率のもとで起こる確率を計算できるというものである。その関係は

$$P(A|B) = \frac{P(B|A)P(A)}{P(B)}$$

となる。ベイズの定理は、同時確率を条件付き確率で考えた時、統計における乗法定理より導き出せる。

ベイズの解釈とは、現在わかっている情報を原因（仮定）として、これから起こる結果（まだ起こってないない、検証されていないこと）を推論していく方法である。検証でデータがえられれば、そのデータも加えて、さらに計算を繰り返していくことで信頼性を挙げていくものである。

また、既知の集団が正規分布しているときは、分散が未知の母集団に対してもベイズ統計を用いることができる。そのような推定を「尤度（ゆうど）関数（likelihood function）」として、求めることができる。自然現象の内、正規分布 $N(\mu, \sigma^2)$ する現象に関して、互いに独立なデータ、 y_1, y_2, \dots, y_n があれば、尤度は、

$$\prod_{i=1}^n \frac{1}{\sqrt{2\sigma}} e^{-\frac{(y_i-\mu)^2}{2\sigma^2}}$$

となる。ここから、平均 μ や分散 σ^2 が推論できる。

このようなベイズの解釈は、自然科学の一般的に用いられている仮説演繹法を繰り返しながら正しい仮説へと近づくというものと同じである。仮説演繹法を、ベイズの定理より統計学的根拠に基づいて定式化したこととなる。ベイズ統計の手法は、今後自然科学への導入が期待される。

7 地質学への数学的概念の適用のために

ここまで述べてきた数学的概念を、図 4-7 にまとめて示した。ここでは、時間軸において現時点をゼロ (0) として、過去の現象はすべてマイナスの値とする。

まず、地質現象として関数化できるものがあつたとした時、それが微分方程式か、それとも一般関数か、に分けられる。両者は微分と積分とを介して変換できる。関数は、地質現象の一般則であるが、それがどの時代でも通用するものであれば、「普遍的仮説」となる。この「普遍的仮説」の発見が、関数化できる地質現象での目標となる。

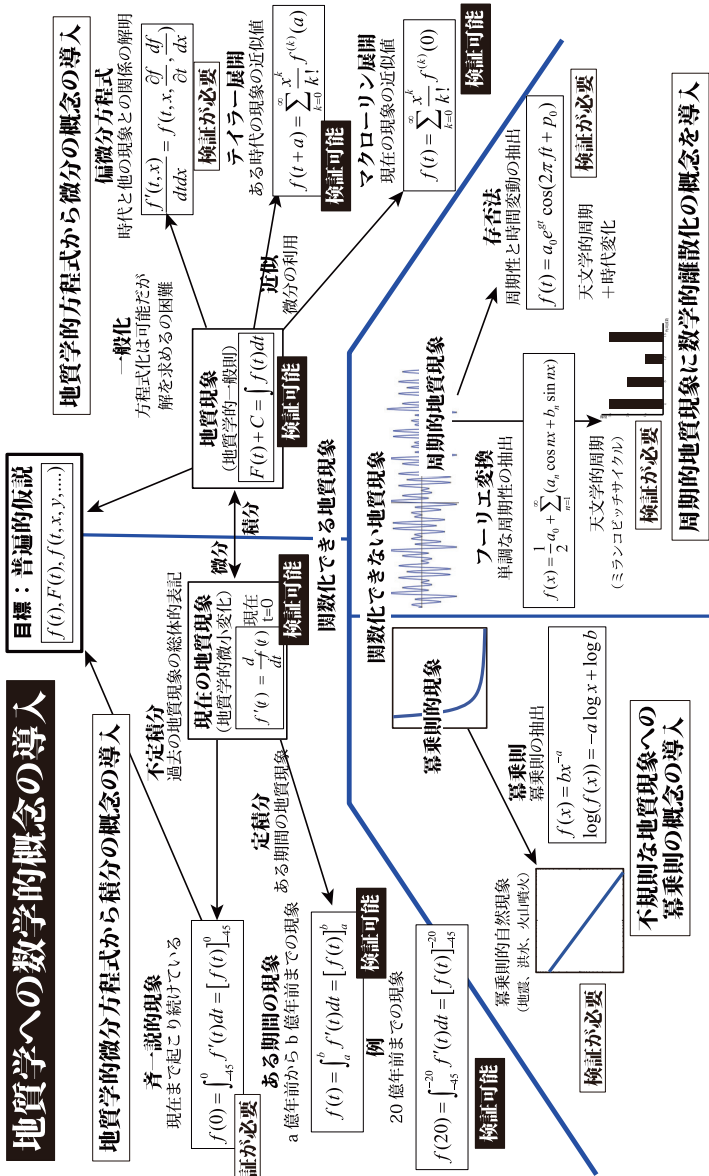


図 4-7 地質学への数学的概念の適用
 各種の数学的概念を地質学へ導入するための概念図。上部：関数化できる地質現象。微分方程式と一般関数に区分。微分と積分で変換可能。地質現象の一般例として普遍的仮説が目標。下部：関数化できない地質現象。下右：周期性地質現象のフーリエ変換や存否法でスペクトル分析可能。下左：周期性不明瞭な幕乗則的現象はスケールリング指数で特徴が記述可能。

物理学や化学の普遍則を、過去に適用するには、斉一説を前提としなければならない。現在入手できる地質素材からは、時間の不可逆性により厳密な検証は不可能である。ある時点での微分方程式から一般則を導き出すために、不定積分することになるが、えられた関数は斉一的地質現象を示していることになる。積分定数を決定するために、どこかの時代の地質学的素材を見つけて検証をしていく必要があるが、時間の不可逆性が存在するため断片的な検証となる。

だが、微分方程式で記述できる現象があるということは、現在の地質現象へも適用可能な仮説の可能性もある。積分の概念を適用していくと、ある時点 ($t = t_a$) から別の時点 (t_b) までの現象は、微分方程式を定積分すれば、その時代まで蓄積された地質現象の集積とみなせる。ある時代 (t_a から t_b までの間) の地質学的素材があれば検証可能となる。もしある時点から現在まで続いている現象があれば、現在 (t_0) の地質学的素材で検証可能である。

時間と他の現象とが関係した関数になる場合、偏微分方程式となり、一般に解をえるのは困難になる。これは斉一説の適用限界に相当するものとなる。だが、特別な場合には偏微分方程式が解け、初期条件や境界条件を求めることができることもある。

微分可能な関数であれば、ある時点 (t_a) での近似はテイラー展開することで、求めることが可能である。これは、ある時点 (t_a) の地質現象で検証でき、その時点 (t_a) という限定はつくが斉一説への証拠が提示できることになる。また現在 ($t = t_0$) では、マクローリン展開をすれば、現在起こっている現象で検証できる。

関数化できない地質現象も多々存在する。その中で周期性があるようにみえる地質現象は、フーリエ変換によって、離散処理によって周期を抽出することができる。時代によって系統的に変化をするものについても、存否法を用いることで時系列変化と周期を同時に求めることが可能となる。ただし、えられた離散的値は、別の根拠（例えば、ミランコヴィッチ・サイクルのような天文学的周期など）で検証していかなければならない。

周期性が不明瞭な現象で、単純な統計処理（正規分布するもの）ができないもの

であっても、冪乗分布しているものは、対数化することで規則性を見出し、特徴をスケーリング指数で記述できる。ただし、スケーリング指数の意味についても、十分な検討、検証が必要になる。

数学の概念の中には、さまざまなものがある。ここで示した数学的概念は、広い数学の分野からみれば、ほんの一部にしか過ぎない。そのような数学的概念には、まだまだ地質学の考え方に導入できるものもあるだろう。

▼数学の裾野

数学の裾野は広い。本章であつかった数学の分野や概念は、これまで使ったことがあるものや、学んだことがあるもの、見かけたもの、などの限られたものである。数学に詳しく地質学者なら、もっといろいろ使えるものがあるのをご存知だろう。本章で示さなかったものでも、化学組成における最適解をものめるとき、線形計画やそれを解くときに行列を用いたこともある。また統計学的手法は、コンピュータ頼りだが、定常的に用いている。限られた時間と限られた能力なので、網羅的に数学を見渡して使えるものを探すことはしなかった。wikipediaなどを参考にすると、数学は、数学基礎論・論理学、代数学、幾何学、解析学、集合論、確率論・統計学などに大きく区分されている。本章でまとめた概念は、解析学では微積分、テイラー展開、フーリエ解析、代数学のうち非線型として冪乗則、統計学としてベイズ統計と限定されたものであった。数学基礎論の論理学は哲学的思索においても非常に重要であるが、まだ学びは不十分である。また、解析学ではベクトル解析や複素解析、代数学では大きな分野になっている体（ガロア理論）や環、群、数学基礎論では整数論や圏論、表現論などが漏れている。さらに、幾何学の分野では多様体や位相幾何学、微分幾何学、リーマン幾何学などは物理学ではよく使われているが、取り上げなかった。このようなことを考えたのは、ひとつの学問分野、例えば地質学で、専門家としての研究は、細分化された分野（岩石学や地球化学）で実績を構築していくことになる。当然、細分化された分野の周辺についての概要は把握している。そうなるとその分野の研究者との連携は、自分の不足している部分を補うために必要になるであろう。同じようなことが、近年ではもっと広く学際的におこなわれている。学際的連携により、共同研究者の知見が広がることになる。新しい分野での知見の拡大は、新しい概念への気づきをもたらすことになるであろう。そのようなことを意識的におこなっているのが、本シリーズでもある。ただし、一人での作業なので、不足しているところ、理解不足などが多々あるのは承知の上である。少なくとも新しい学びから、今までの自身の研究を眺めなおすと、新たな景色がみえてくる。数学でも全く新しい新天地の裾野が見えてきた。もちろん全貌すら知るのが手強いのだが■



鍾乳石

幾何学的規則性を持った鍾乳石の構造。その成因の背景には、どのような数学的規則性があるのだろうか。山口県美祢市秋吉台。著者撮影。

第5章

造山運動とテクトニクス

ここまで、地質学的思索していくために、歴史的、哲学的背景を概観し（第1章）、科学、科学哲学、そして地質学の誕生から現状までを把握し（第2章）、地質学の固有の特徴とその扱いの困難さを整理して考えるための準備をしてきた（第3章）。加えて、これまでにない思索へのアプローチのために、数学の概念を整理し、道具とすべく準備をしてきた（第4章）。テクトニクスを素材に地質哲学的思索を進めていくのだが、本章ではその最後の準備として、造山運動を普遍化することでテクトニクスへと至るまでの歴史を整理していく。



1 造山運動とテクトニクス

地質学の確立において、大陸移動の実態への理解について見てきた（第2章4d）が、大陸移動の地質学的位置づけや仮説（モデル）としての位置づけは検討してこなかった。本書では、地質哲学的思索のケーススタディとして、テクトニクスを題材して考えているので、テクトニクスという仮説（モデル）の変遷をまとめていく。地向斜造山運動、プレートテクトニクス、プルームテクトニクスの順に見ていく。

地質学（自然科学）には、「不可逆な時間」の扱いや「枚挙的帰納法」への課題があった。だが、地質学では、斉一説の適用限界を把握しながら、仮説演繹法（ア

ブダクション) を用いることで、地球の歴史が読み取られ、編纂されてきた。その研究史は、地球の見方がどのように変化してきたのかを示している。その変化を「テクトニクス」という仮説 (モデル) を中心に考えていく。

テクトニクス (tectonics) は、ギリシア語の tectonikos (建造に熟練した) に由来するもので、もともとは建築や築造に関する用語として用いられてきた。歌代ほか (1978) によれば、Boyd and Dawkins が 1894 年に “the tectonic anticlines and synclines” (構造的背斜と向斜) として用いたものが初出だという。形容詞としての使用であったが、地層の構造 (背斜と向斜) を表わしていた。

その後、テクトニクスは、広く「地球の地質学的構造を形成する運動像 (モデル)」を意味するようになり、それを研究する構造地質学 (tectonic geology、あるいは structural geology) などの分野も生まれてきた。ただし、地球の運動像 (モデル) は、地質学の進歩とともに、その適用範囲や概念が変化してきた。

地質学は、陸地の研究を中心にしてきたため、その地質学的特徴を生み出した造構作用 (構造を形成する作用のこと) に対して、「造山運動 (orogeny)」という運動像 (モデル) 名がつけられた。その理由は、陸地の地形を見ると、大陸の各地に山脈があり、その形成過程が重要な地質学的作用となるであろうと考えられるためである。

それぞれの山脈には、個性があり多様性があることがわかるが、そこには共通性、普遍性があることもわかる。山脈とは、幅は広くないが縦には長く伸張していること、構成岩石は多様ではあるが別の地域と共通するものも多いこと、複雑な地質構造であってもその形成機構には共通性があること、などが挙げられる。そのような山脈を作る共通の運動像 (モデル) として「造山運動」が考えられた。

造山運動には、特異性の中に共通性があることが見て取れる (第3章6c)。このような共通性が同じような原因で起こっているという仮説を立てて、仮説演繹していくことで、普遍性を抽象できる。それが「造山運動」モデル (仮説) となる。当初、陸域の事例が中心ではあったが、大地の運動を抽象化して生まれた造山運動という仮説は、テクトニクスの概念をもったものと位置づけられるだろう。

本書で、テクトニクスは、できるだけ広く拡大した運動の変遷史を考えることにする。全地球や天体全体までを対象にし、構成物質が変化していく運動像を、創生から現在まで、できれば未来までの長い軸間軸での変遷史まで拡大したい。

また、造山運動という用語も残す。テクトニクスで変動の激しい部分、特に造山作用が起こっている地域の運動像として「造山運動」を用いることにする。

2 地向斜造山運動

造山運動として最初に登場したのでは、「地向斜造山運動 (geosynclinal orogeny)」である。その登場と運動モデルを見ていこう。

a 地向斜造山運動の登場

Kober (1921) は、大陸の安定した地塊をクラトン (craton 楕状地 shield や卓状地 platform などとも呼ばれる) とし、変化の激しい地域を変動帯 (orogen) と呼んで区分した。

クラトンは、少なくとも数億年間以上は変動のない、古い火成岩類や変成岩類などからなり、大陸地殻深部を構成していたと考えられる岩石 (基盤岩類と呼ばれる) が、露出している地帯であった。変動帯は、数億年前から現在まで、造山運動をしている造山帯 (orogenic belt) で、大きな断層帯や巨大な堆積盆の形成、火成作用や変成作用などが起こっている地帯であった。

Hall (1859) は、変動帯であるアパラチア山脈で厚く堆積した浅海性の古生層に沈降と変形に因果関係を見出し、地層の自重により沈降が起こったとした。Dana (1873) は、造山帯で長く伸びた厚い堆積岩がなす沈降地帯を「地向斜 (geosyncline)」と呼んだ。造山帯には地向斜堆積物を伴うことから、地向斜の形成からはじまり、造山作用の終了までのすべての過程、さらに堆積作用と火成作用、変成作用など地向斜の内部やより深部で起こる一連の運動現象をすべて含んだ「地向斜造山運動」と位置づけた。

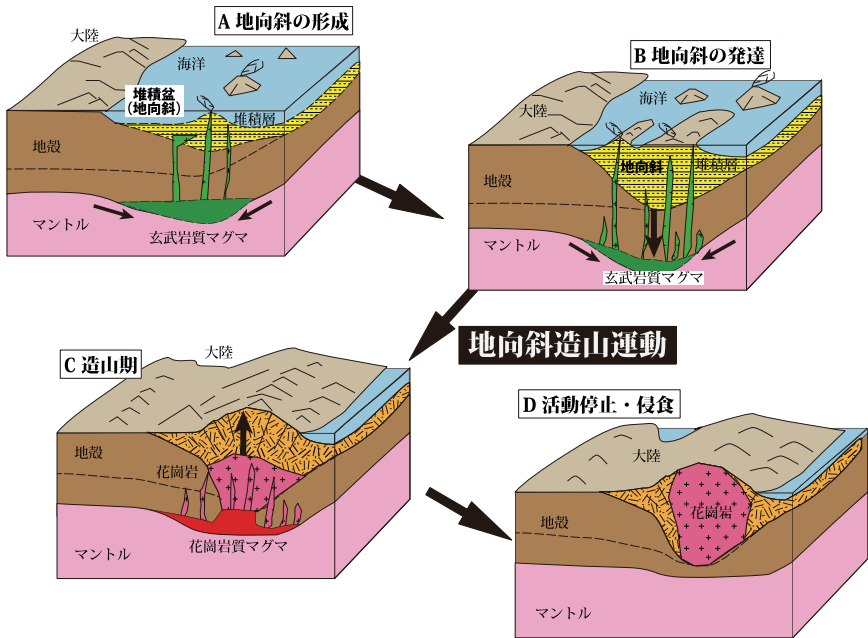


図 5-1 地向前斜造山運動

地向前斜造山運動のモデル。A: 地向前斜の形成。沈降、堆積盆の形成、堆積、海底での玄武岩質マグマによる火山活動も起こる。B: 地向前斜の発達。沈降により堆積物の堆積で地向前斜が発達。深部では玄武岩質マグマの活動が活発化。C: 造山期。沈降から上昇に転じ、花崗岩質マグマの深成活動が起こる。D: 活動停止から侵食へ。上昇が止まり、造山運動が停止する。山脈は激しく侵食が起り、深部にあった花崗岩も露出する。

地質学において実証性をもっていたのは、調査ができた陸域のみであった。そのため、陸域の地質情報をもとに、陸の状況を説明するために「地向前斜造山運動」が提示されることになる。地向前斜造山運動は、陸域における山脈形成について、変化の要因と時系列による変遷を、総合的に解明していくことを目的とした。そのため、テクニクスとしての体裁が整うことになった。

b 地向斜造山運動の運動モデル

地向斜造山運動として、次のような運動モデルが考えられた (図 5-1)。

ある場所で沈降からはじまり、狭い帯状の堆積盆に堆積物が溜まる。堆積とともに沈降を続け地向斜となり、地向斜造山運動のはじまりとなる。堆積物が厚くたまり (1 万 m 以上)、海底での玄武岩質マグマの火山活動が起り、堆積物が複雑に重なるフリッシュ (flysch) が形成される。基盤が不安定になり複雑な断層や褶曲が形成される。

ある時から上昇が起り、隆起によって山脈の形成され、造山作用へと転換していく。地向斜深部では圧力や温度が増加して広域変成作用や変形作用が起り、溶融作用で花崗岩質マグマができ、表層では火山活動、深部では花崗岩マグマの貫入が起る。山脈周辺の浅海や陸域または山間盆地に堆積した厚い浅海～陸成層であるモラッセ (molasse) が形成される。

地向斜の隆起や火成作用が終わるとともに、造山作用も終了し、造山運動も終わる。その後は、浸食作用によって、準クラトンからクラトンへと変化していく。

時代背景もあり、海域のことは十分考慮することができなかった。だが、造山運動の激しかった時期により、古生代のカレドニア造山運動 (6 億～ 4 億年前)、古生代から中生代のバリスカン造山運動 (4 億～ 2 億年前)、中生代から新生代のアルプス造山運動 (1 億～ 2000 万年前) の 3 つの時期が識別された。

地向斜造山運動は、地向斜にはじまって、造山作用をへて、浸食作用までの一連の作用を包括的に説明していた。このような運動像は、変動帯に分布する岩石とその構造から、堆積物から想定される地向斜と、そこから山脈形成に至るまでの変遷を説明していくモデルであった。理論的整合性や検証作業は十分ではなかったが、類似と相違を想定した時間軸に沿って並べられた運動像にはなっていた (図 5-2)。このような時間変遷を持ったモデルはテクトニクスと呼べるものであった。

c ウェゲナーの大陸移動：パラダイムの束縛

ウェゲナーの大陸移動説 (1915) は、両大陸において、海岸線の類似 (地理学的

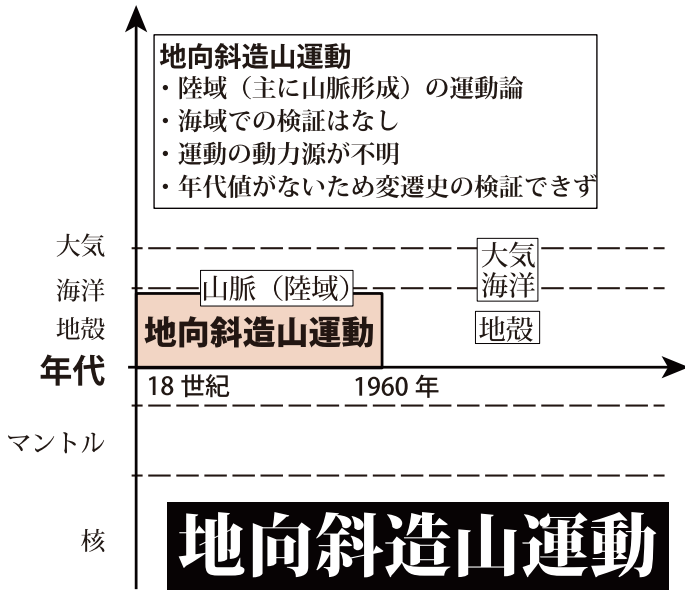


図 5-2 地向斜造山運動の位置づけ

テクトニクスのモデルの変遷の中で、地向斜造山運動の位置づけを示した。縦軸：地球の深度・高度・階層による区分。横軸：モデルが提案された年代。モデルの及んでいる範囲と特徴を示した。

検討）や地層の分布と類似性（層序対比的検討）、氷河の痕跡（雪氷学的検討）、化石の類似性（古生物学的検討）など、学際的な証拠を検討することにより、海洋拡大による大陸移動を提唱した（第2章4d）。大陸移動説は、地球の全表層の「テクトニクス」という概念で捉えられていた。大陸移動説は、地向斜造山運動より事例が広範囲で収集され、適用範囲も広い仮説となっていた。ウエゲナーは気象学者でありながら、時代を先取りした地質学者であったともいえるだろう。

ウエゲナーは、個々の多様性から普遍性を抽象するという帰納的方法論ではなく、海岸地形の類似性という直感的に仮説を立てて（アブダクション）、演繹的に証拠を集めるという典型的な仮説演繹法を用いていた。だが、当時は多くの地質学者から批判

を受けた（第2章4d）。

20世紀前半までの地質学者は、「地向斜造山運動」をパラダイムとし、陸地の地質現象を説明していた。古生物学者は両大陸の化石の類似性を当然知っていたが「陸橋説」（仮説）で説明していた。陸橋の存在は、海域での証拠がないため、検証されていない仮説であった。

地向斜造山運動では地殻での上下運動が中心の運動論で、大陸移動説では水平運動であった。両仮説では運動のベクトルが大きく異なっていた。地向斜造山運動では、地向斜がなぜ沈むのか（沈降の継続の原因）、沈降から上昇に転ずる原因、なぜ火成作用が起こるのか、造山帯深部での上昇の動力源も不明で、必然性のある説明や科学的な検証されたモデルではなかった。さらに、時間経過に伴う変遷史としての側面も重視されてきたが、年代値がないため時間変遷を検証することは困難であった。

ただ、地向斜造山運動は多くの地質学者がパラダイムとしていたので、陸地を主とするが各地の山脈ごとに仮説が適応され個別記載が進んでいった。その結果、仮説演繹が進むことになり、地向斜造山運動の仮説は、検証性をもった「テクトニクス」となった。地域性や時代性などの特異性を越えた普遍性をもち、より広域（地球深部にまで）に、より時代性（すべての時代）を越えたものとして抽象されていった。

欠点、弱点があった地向斜造山運動だが、パラダイムとなっていたため、検証性のあったウェゲナーの大陸移動説を葬り去ることになった。その後、プレートテクトニクスの登場で、ウェゲナーの先見性が明らかにされた。しかし、パラダイムには、多数派という力があり、論理性、検証性、反証可能性など先哲の論理的、哲学的背景では太刀打ちできなかった。

2 プレートテクトニクス

地質学は、それまで地球に対して地向斜造山運動は、検証性をもったはじめての科学的な仮説であり、テクトニクスとも呼べるものであった。次に登場したプレートテクトニ

クスの概要を見ていく。

a 地向斜造山運動からプレートテクトニクスへ

1960年代になると、海域の科学調査が進むようになってきた。海洋調査の技術が進み、海上からのソーナー探査（地層断面の情報）や古地磁気計測（過去の地磁気の情報）、海底のドレッジや掘削（ボーリング）で試料採取（検証可能な試料を入手）など、海洋域の多様な情報が、それも大量にえられるようになってきた。

海洋域には、陸域にはない特有の地形や、構成岩石にも海域固有の特徴があることが判明してきた。陸域だけでなく海域も同時に説明できる新しいテクトニクス（新しいモデル）が必要になってきた。海洋で見られる地質学的特異性が、地向斜造山運動の適用限界が示すことになった。そこに登場してきたのがプレートテクトニクス（plate tectonics）であった（例えば、Le Pichon, 1968; McKenzie and Parker, 1967; Morgan, 1968; Wilson, 1965; 1968a; 1968b; など）。

地向斜造山運動からプレートテクトニクスへの転換は、後述のプレートテクトニクスからプルームテクトニクスへの変換とは、明らかに異なった様相をもっていた。それは、パラダイム転換というべき変化であった（泊, 2008）。

地殻からマンツルの最上部までの数 10 km ~ 100 km の硬い（剛性をもった）板状の岩石が、プレート（plate、リソスフェア lithosphere と呼ばれる）として、可塑性をもったアセノスフェア（岩流圏 asthenosphere）の上を移動するというモデルが、プレートテクトニクスである（図 5-3）。

プレートテクトニクスでは、まずプレートが運動（移動）しているという観測事実が示された（Dewey and Bird, 1970a; 1970b, Dickinson, 1971; 1973）。海底の古地磁気模様の海嶺軸を挟んで対称性を持っていることから始まり、現在では VLBI（Very Long Baseline Interferometry）によってプレート移動速度が実測されている。海洋底堆積物中の微化石の年代、海洋地殻の構成岩石の年代測定などから、年代決定された根拠も加味されたモデルとなった。さらに、地殻から最上部マンツルまで加わった、

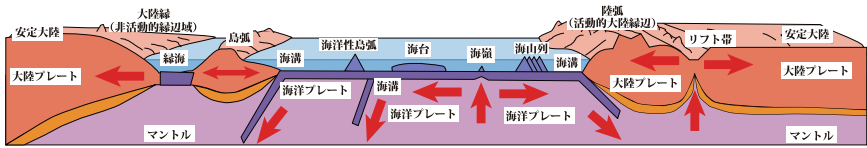


図 5-3 プレートテクトニクス

プレートテクトニクスの概要。海洋プレートと大陸プレートの区分。プレートの運動方向を矢印で示した。プレートテクトニクスで重要視された地質場を示した。

広い範囲の地質現象が説明されていった。

地球内部の探査技術や年代測定技術の向上、また深海底特に海嶺や海洋島弧の潜水艇による調査、海底各地での掘削による試料の分析などで、プレートテクトニクスの検証と精緻化が進んできた。海洋底の拡大やプレートの移動は検証された「事実」となった（山本・島，2005）。そのような「事実」に基づいたモデルがプレートテクトニクスであった。

b プレート境界とウイelsonサイクル

プレートテクトニクスへとモデルが変わった時、地向斜造山運動で用いられてきた証拠も取り込まれながら、書き換えられてきた（例えば、都城，1975，川勝，2002b，磯崎・丸山，1991，磯崎ほか，2010 など）。

プレートは、海洋プレート（oceanic plate）と大陸プレート（continental plate）に区分される。プレートテクトニクスでは、海洋プレート－海洋プレート境界、大陸プレート－海洋プレート境界、大陸プレート－大陸プレート境界の3つのプレート境界に区分できる（図 5-4）。また、プレートの境界には、発散境界（広がる境界 divergent boundary）とトランスフォーム境界（すれ違い境界 transform boundary）、収斂境界（収束境界、あるいは狭まる境界 convergent boundary）の3種がある（Bird, 2003）。プレート境界で形成される地形的特徴として、直線的な地形になっている海嶺（oceanic

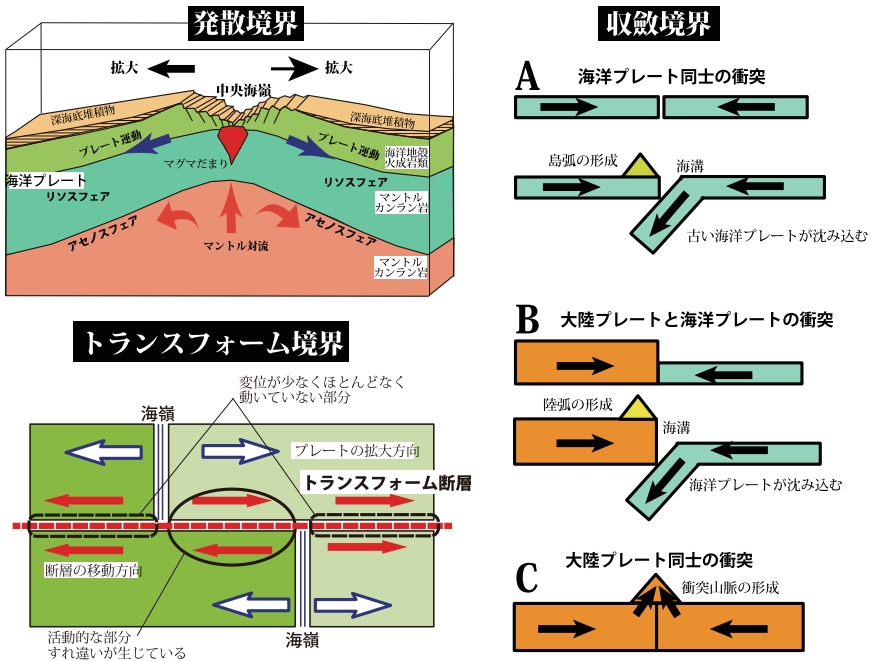


図 5-4 プレート境界の区分

発散境界、トランスフォーム境界、収斂境界の3つのプレート境界の区分。発散境界：海嶺。マントルの上昇部に当たる。トランスフォーム境界：トランスフォーム断層の一般的な構造と運動。海嶺に挟まれた区間（黒実線で囲ったところ）は、通常の断層と同様のすれ違いによるズレが生じる。海嶺から離れたところ（破線で囲ったところ）では、通常の断層とは異なり、断層の両側が同じ方向の動きになる。海嶺から離れるにつれて、変位が小さくなり、やがてなくなる。収斂境界：プレートの種類の組み合わせにより3つに細分できる。A: 海洋プレート-海洋プレート境界。B: 大陸プレート-海洋プレート境界。C: 大陸プレート-大陸プレート境界。

ridge) やトランスフォーム断層 (transform fault)、弧状になっている海溝 (trench) や島弧 (island arc) や衝突山脈 (collision mountain) などがある (Boyer and Eliotte, 1982)。

これらのプレート境界での特徴は、異なった成因によるもので、異なった地質学的意

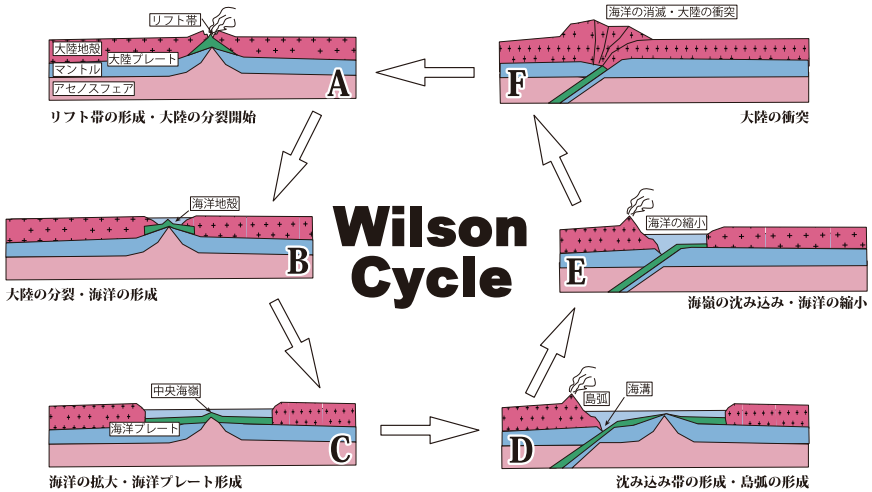


図 5-5 ウィルソンサイクル

ウィルソンサイクルと呼ばれるの変遷の模式図。現実のテクトニクスの変遷では、かならずしもサイクルになるとは限らない。A: リフト帯の形成で大陸地殻の分裂がはじまる。B: リフト帯の拡大により大陸の分裂が進み、海洋が入り込み海洋プレートが形成される。C: 海洋が拡大し海洋プレートが成長する。D: 大陸プレートの縁での海洋プレートの沈み込みが開始し、島弧が形成される。E: 海嶺が沈み込み、海洋が縮小する。F: 海洋が消滅し、大陸が衝突し山脈が形成され、合体した大陸が形成される。

義をもってくる。多くの活動がプレート境界で起こるため、プレート境界の地質現象を解明することが、プレートテクトニクスを体系的に理解する上で重要になってくる。

現在のプレート境界での地質学的特徴は、変化の順序と捉え、順番に並べたものを時系列とみなされた (図 5-5)。これは、ウィルソンサイクルと呼ばれているもので、順番はどこからはじめてもよく、輪廻とも考えられる。

リフト帯 (地溝帯 rift) が形成され、大陸地殻の分裂がおこる (図 5-5A)。リフト帯が拡大していくと、海水が入り込み海洋プレートも形成されていく (図 5-5B)。海嶺では海洋プレートの形成が続き、海洋が拡大する (図 5-5C)。大きな海洋になっていく

と大陸プレートの縁で、海洋プレートが沈み込みを開始し、沈み込みにより島弧や山脈が形成される（図 5-5D）。やがて海嶺が沈み込み、海洋が縮小していく（図 5-5E）。海洋が消滅して大陸同士の衝突によって山脈が形成され、合体して大陸となっていく（図 5-5F）。大陸の衝突合体が終わると、ひとつの大陸プレートとして振る舞うことになる。大陸プレート内で活動することなく長く安定していた地帯がクラトンとなる。

ウィルソンサイクルを明示することで、プレートテクトニクスは運動論でありながら、変遷史ともなり、より拡大された「テクトニクス」となってきた。現在の変動地帯がモデル通りに変遷していくかどうかは、長い時間経過による変化なので検証は難しい。ただし、過去の事例については検証の可能性がある。

地向斜造山運動がパラダイムであった時代に、ウェゲナーは大陸移動（第2章3d）のモデルを提示した。そこで示された証拠は、有効であったのだが、移動の原動力が不明であるという弱点が指摘され、パラダイムとはならなかった。当時の時代背景がそうしたのであろうが、数十年の時を経て、海域のデータを加えて「海洋底拡大」として復活した。海洋プレートの移動とともに、大陸も移動するという「プレートテクトニクス」として登場してきたことになる（図 5-6）。現在では、地向斜造山運動は、過去のものになり忘れ去られている。当時葬り去れたウェゲナーの著書「大陸と海洋の起源」（Wegener, 1929）は、現在もで各国で翻訳され入手可能となっている。

3 プルームテクトニクス

地向斜造山運動では上下動が主たるものであったが、プレートテクトニクスでは、表層のプレート運動に基づいていたため、水平移動が主な運動になっていた。ただし、表層付近でも、沈み込み帯や衝突帯、中央海嶺などでは上下の運動も生じており、地球内部のマントル内では、垂直運動が起こっていることは想定されていた。だが、プレートテクトニクスでは、地球内部の情報が不足していたため、マントルについては検証されていなかった。

地震波観測の技術が進むにつれて、海洋プレートの沈み込み帯（和達ーベニオフ面）

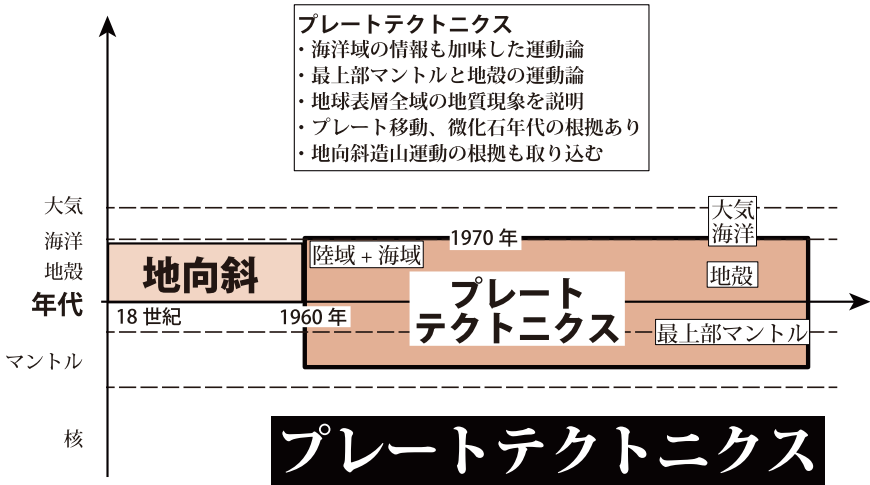


図 5-6 プレートテクトニクスの位置づけ

テクトニクスのモデルの変遷の中でプレートテクトニクスの位置づけを示した。縦軸：地球の深度・高度・階層による区分。横軸：モデルが提案された年代。モデルの及んでいる範囲と特徴を示した。

の発見からはじまり、現在では地震波トモグラフィ (seismic tomography) として、マントル内の詳細な状態が判明してきた (Fukao, 1992; Fukao et al., 1994)。そこから、マントルの動的な実態も理解されるようになってきた (葛原, 2016)。

a 沈み込む海洋プレートとコールドプルーム

地震波トモグラフィでは、冷たいマントル物質と暖かいマントル物質の存在が明らかになり、温度差のあるマントル物質は、密度差となることで、上下運動を起こすというプルームテクトニクスのモデル (図 5-7) が提唱された (Maruyama, 1994; 丸山, 2002a)。

マントル物質への実証的アプローチとして、高温高压実験がある。マントルを構成する鉱物を、高温高压条件にした時、どのような結晶に相転移するのかを調べ、その場観測で形成された結晶の弾性波を調べる。弾性波速度と地震波速度を比べることで、

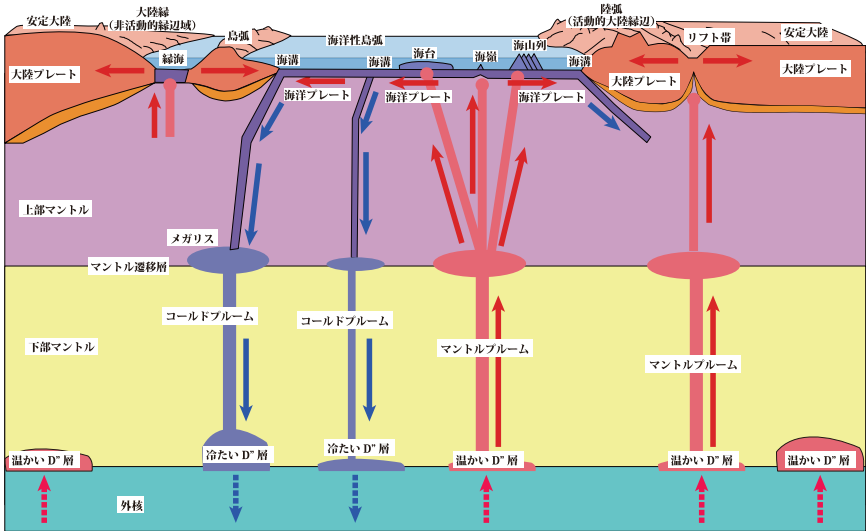


図 5-7 プルームテクトニクス

ブルームテクトニクスの概要。ブルームテクトニクスはプレートテクトニクスを内包する。海洋プレートが海嶺で形成され、海底で冷却され、海溝で沈み込む。マンテル遷移層でメガリスとなり、やがてコールドブルームとなってマンテルの底に落下し、冷たい D'' 層になる。暖かい D'' 層が上昇しマンテルブルームとなる。マンテルブルームが上昇して海嶺、海台やリフト帯などで長期間の火成活動を起す。このようなマンテル全体の運動がマンテル対流となる。

マンテル物質の構成や構造が推定される。

沈み込んだ海洋プレートはスラブ (slab) と呼ばれる。スラブは、沈み込む条件 (速度、温度、角度など) によって、高温高压条件では周辺のマンテルの岩石より密度が小さくなることもあり、浮力が働くこともあることがわかった。マンテルの遷移層で見つかった冷たいマンテル部分は、一時的に滞留しているスラブと考えられ、メガリス (megalth) と呼ばれている。メガリスが長い期間 (数千万年～1 億年程度) マンテルに滞留していると、周囲のマンテルによって温められ、相転移が進んで、より密度の大きな結晶となる。その結果、質量バランスが崩れ、マンテル内を落下しはじめ、「コールドブルーム (cold

plume)」となると考えられた。

マントル最下部（125 万気圧 2200 °C 以上）のマントルー核境界には、D'' 層があることがわかってきた。D'' 層は、200 km 程度の厚さの「超低速度領域」である。D'' 層は、温度（密度）の異なった領域で、温度は物質の違いを表しており、コールドプルームの底にあたることになる。

地震波トモグラフィによって、沈み込んだ海洋プレートがスラブとなり、遷移帯でメガリスが形成され、メガリスはマントル最下部に落下してコールドプルームが形成され、マントルー核境界で D'' 層となるまで追跡ができる。海洋プレートが沈み込むことで、マントル全体に及ぶ、プレートの運動があることがわかってきた。

b プルームテクトニクス

D'' 層は、 $MgSiO_3$ からなる高密度の鉱物、ポストペロブスカイト (post-perovskite) からできていることがわかってきた (Murakami et al., 2004)。ポストペロブスカイトは効率よく熱を伝える性質があり、核の熱をマントルに伝えたり、冷たい D'' 層が核を効率よく冷ます働きがあることになる。

コールドプルームの落下で冷たい D'' 層が形成されることで、マントルー核境界付近での質量バランスがくずれ、密度の小さい D'' 層が、次のマントルプルーム（註）として上昇していくと考えられる。マントルプルームは、周辺より暖かくて密度が小さくなっているか、軽元素の多くて密度の小さくなっているかであると推定される。このマントルプルームの存在は、地震波トモグラフィで確認されている。

マントルプルームは、マントル上部で長期間におよぶ海嶺の形成、海洋島・海山列の形成、巨大海台の火成作用などの原因となっていると考えられた (丸山, 2002a)。

海溝（海洋プレートの沈み込み）→ スラブ → メガリス → コールドプルーム → D'' 層

が、マントル内の下降流となり、

D'' 層 → ホットプルーム → 海嶺（海洋プレートの形成）

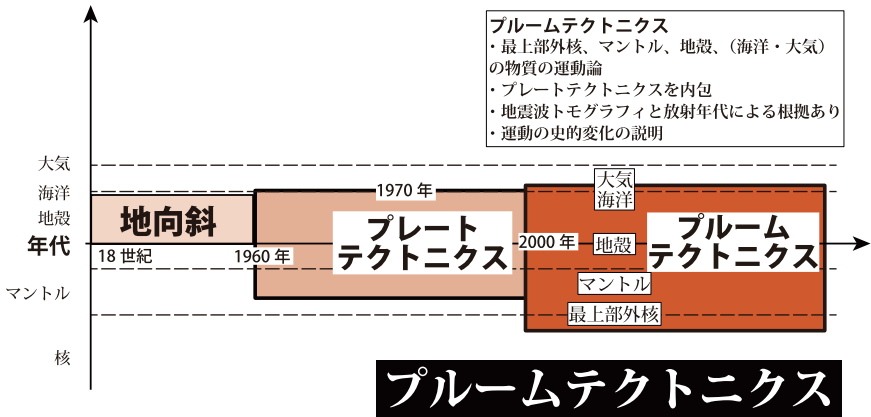


図 5-8 プルームテクトニクスの位置づけ

テクトニクスのモデルの変遷の中でプルームテクトニクスの位置づけを示した。縦軸：地球の深度・高度・階層による区分。横軸：モデルが提案された年代。モデルの及んでいる範囲と特徴を示した。

が上昇流となり、マントル対流が起こっているという仮説が成立することになる（図 5-8）。また、プレートテクトニクスで示されていた、

海嶺（海洋プレートの形成）→ 海洋プレートの海洋底の移動 → 海溝（海洋プレートの沈み込み）

という地球表層部表層の運動論と組み合わせられることで、プレートテクトニクスとプルームテクトニクスが結びつくこととなる。プレートテクトニクスは、プルームテクトニクスの一部として内包される。

2種類のプルームによるマントル物質の流れは、全マントルが対流している、つまり一層対流とみなせる（Maruyama, 1994, 丸山, 1997）。プルームテクトニクスでは、最上部外核からマントル、地殻、(海洋・大気)の物質が、地震波トモグラフィとによる根拠に基づいて放射年代による時間軸をもって組み立てられた運動論となっていた。プルームテクトニクスは全マントルの運動論となる（丸山ほか, 1993; 2002a）。

【註：マントルプルームという名称】

プルームテクトニクスが提唱された当初、「スーパーホットプルーム (super hot plume)」という用語が用いられていた。スーパーホットプルームを、本論文では「マントルプルーム (mantle plume)」と呼ぶことにする。スーパーホットプルームに対する用語は、コールドプルーム (コールドプルーム cold plume) となり「スーパー」が見つからないという、対応関係にアンバランスがあった。ハワイなどの地球深部から上昇してきて火成作用を起こすマントル物質の上昇流を、ホットプルームと呼ばれていたものと区別するためであった。マントルプルームは、それらと比べると、規模も大きく活動期間も長いので、プルームテクトニクスでは「スーパーホットプルーム」と呼ばれることになった (Maruyama, 1994)。現在もスーパーホットプルームという用語を用いられているが、一部では「マントルプルーム」が用いられている (末次, 2018)。本論文では、「マントルプルーム」を使用することにした。

4 造山運動からテクトニクスへ

造山運動は、変動帯における運動像であった。一方、テクトニクスは、変動帯だけでなく、変動していない安定した地塊クラトンや海洋域の変動地帯、非変動地帯をも加わった運動像になっていく。さらに、時系列変化も考えた運動像の変遷史も考えていく必要がある。テクトニクスを考えるために、造山運動の区分と、近年明らかになってきた構造浸食作用への配慮、そしてモデル (パラダム) の変遷にともなって、時空間がどの程度広がってきたのかも考えていく。

a 造山運動の区分

造山運動はプレートの状態により、いくつかに分けることがわかってきた。大陸縁で起こる大西洋型造山運動 (Atlantic-type mountain belts)、陸弧として火成作用がおこるコルディレラ型造山運動 (Cordilleran-type mountain belts)、そして衝突型造山運動 (collision-type mountain belts) に分けられた (Dewey and Bird, 1970a; 1970b)。衝突型造山運動は、さらに「大陸-島弧衝突型」と「大陸-大陸衝突型」の2つがあり、大陸-島弧衝突型は「太平洋型造山運動 (Pacific-type mountain belts)」になり、大陸-大陸の衝突型は「衝突型造山運動」にあたる (丸山ほか,

2011)。それぞれの造山運動を見ていく。

大西洋型造山運動

大西洋型造山運動とは、現在の大西洋のように海洋プレートと大陸プレートが直接、接していて沈み込み帯をもたないところで起こるものである。大陸縁 (continental margin) では、堆積作用以外の地質学的活動がほとんどないところで、非活動的縁辺域 (passive margin) とも呼ばれている。したがって造山運動の用語を適用するのは誤用であるが、これまで区分として用いられてきた。

コルディレラ型造山運動

海洋プレートの沈み込みが、大陸プレートに対して起こると、コルディレラ型造山運動 (cordilleran type) が起こる。活動的大陸縁 (active continental margin) とも呼ばれ、地質学的に活発な作用が各種起こるところになる (磯崎ほか, 2011)。現在の中生代後期以降の北アメリカ西部のコルディレラ山脈を典型とし、南アメリカ大陸のアンデス山脈も同様である。沈み込み帯固有の火成作用を伴う大陸縁で起こるもので、深成岩類や貫入岩類もマグマ量も多く、造山帯の地殻が厚くなり、隆起運動も大規模で、衝上断層帯も発達している。コルディレラ型造山運動では、固有の特徴を持っているが、次に述べる太平洋型造山運動と同様のメカニズムと捉えることができるだろうが、まだ違いの解明は十分にはなされていない。

太平洋型造山運動

海洋プレートが島弧地殻 (大陸プレートの一部、または島弧のマイクロプレート) や海洋地殻 (海洋プレートの一部) に沈み込む場で起こる太平洋型造山運動 (Maruyama, 1997, Matsuda and Uyeda, 1971, Maruyama and Parkinson, 2000, Maruyama et al., 2002, 丸山, 2012) は、「バソリス帯」と「付加体」、「低温高圧型広域変成帯」の存在が特徴となる (Maruyama, 1997)。

「バソリス帯」とは、大陸側の深部では幅 20~300 km の酸性から中性のマグマが活動して、深部でバソリス帯を形成する深成作用のことである。表層では火山作用が起り、新しい造山帯では深成岩体は露出していないので、表層の火山岩類だけが見えていることになる。深成岩は、TTG (tonalite, trondjemite, granodiorite のこと) マグマが主で、火山岩は多様な組成を持ったマグマになるが、平均すると安山岩組成になる。マグマの化学的特徴は、沈み込み帯に特徴的に起こる火成作用となる(小出, 2020c)。

「付加体」は、海洋プレートが沈み込むとき、その最上部にある海洋プレート層序(タービダイト層、層状チャート、海洋底玄武岩)が、剥ぎ取られて陸側に付加される(付加作用)ことで形成される地質体である(Maruyama, 1997)。付加体は付加作用が継続することで、海洋プレート層序が繰り返され、見かけ上厚い地質体が形成されていくことになる。

島弧造山帯の中心部に、上下をほぼ水平な断層で挟まれた薄い板状の「低温高压型広域変成帯」が存在する。変成岩は、藍閃石相に達する低温高压型変成相系列になっている(Maruyama et al., 1996)。その源岩は、化石や付加年代から付加体に由来している堆積物を原岩としていたことが判明した(丸山ほか, 2011; Masago et al., 2004)。広域変成帯は、付加体の沈み込みによって変成作用を受け、後にウェッジ搾り出しにより上昇したと考えられる(丸山, 2012)。また、造山帯深部では、中压高温型の広域変成作用も起こる。

日本列島のような繰り返し太平洋型造山運動が起こっている場(丸山ほか, 2011)では、深部に存在した深成岩類や中压高温型変成帯が内陸側に、海側には低压高温型変成帯が並行して分布しているため、両変成帯の成因関係があると考えられていた。だが、正確な時代決定によって、別の造山運動によるものであることが解明されてきた(丸山, 2012)。

衝突型造山運動

大陸プレート同士の衝突によって起こるのが衝突型造山運動である。現在の例として、ユーラシアプレートとアフリカプレートが衝突したアルプス山脈、ユーラシアプレートとインド大陸（インド・オーストラリアプレートの一部）が衝突したヒマラヤ山脈がある。また過去の衝突型造山運動として、アパラチア造山帯などがある。

衝突が起こる前には、2つの履歴の異なる大陸が近づくことになる。さらにそれ以前には、両大陸の間には海洋プレートがあったことになる。そして、少なくとも一方の大陸プレートでは沈み込みが起こり、他方では沈み込み、もしくは大西洋型大陸縁が存在したことになる。このような類推をまとめたものが、衝突型造山運動の変遷史となる（丸山ほか, 2011）。

衝突型造山運動には、先駆として受動的大陸縁があり、大陸斜面に堆積物がたまる（Kaneko, 1997）。海洋プレートの沈み込みがはじまると、陸弧の火成作用が起こる（コルディレラ型造山運動）。海洋プレートに引きずり込まれて堆積物が沈み込みはじまると、陸弧の火成作用が終わる。

前弧域が引っ張り場となり、海側に地形的窪みが形成され、前弧盆地が発達し、褶曲とスラスト帯が発達する。深部では受動的大陸縁の堆積物や陸弧の火山岩を原岩として超高压～高压型変成作用やミグマタイト化作用まで進む累進変成作用による広域変成岩が形成される。

造山運動後期には、沈み込んでいたスラブが切り離され、多数の衝上断層が形成され、高温高压型変成帯が隆起し大陸地殻の底付けられドーム構造ができる。ドーム状の隆起が進み侵食されると、造山帯の中心部に位置していた広域変成帯が露出しはじめる。造山帯の前面の前弧盆地では堆積相が粗粒化してモラッセ堆積物になる。造山運動が終了しても、小規模な花崗岩の貫入が起こり、背弧での海盆拡大と張力盆地が形成される。

以上の4つうち、大西洋型造山運動は運動をしていないので、実質3つの造山運

動に区分された。それぞれがどのような関係があるのかを検討していくことが、テクトニクスへと繋がるであろう。それは本章の 5a で考えていく。

b 構造侵食作用への配慮

太平洋型造山帯では、沈み込みに伴って構造侵食作用が起こっていることが明らかになった (von Huene and Scholl, 1991, Vannucchi et al, 2004)。沈み込み帯の約 75 % で構造侵食作用が起こっているため、「構造侵食型」とされている (von Huene and Scholl, 1991, Scholl and von Hune, 2007; 2009)。残りの 25 % 程度が「付加型」になる。Clift and Vannucchi (2004) では、侵食型および付加型の違いは、プレート収束速度、前弧域の傾斜角度、海溝に溜まる堆積物の厚さに由来するとされた。

山本 (2010) は、構造侵食型沈み込み帯の特徴は、海溝軸に達した堆積物がそのまま沈み込み、沈み込み角度が変わらない場合は火山フロントの内陸側へ移動するとした。時系列変化としては、構造侵食作用で前弧地殻が侵食され、海溝軸が陸側へ移動、前弧地殻の広域的沈降、上盤プレートが海溝に接近するとした。

付加体を形成している沈み込み帯もあるが、それは全体の一部に過ぎない上に、付加体を形成しているところでも、70 ~ 80 % で構造侵食作用が起こっていると見積もられている (Scholl and von Hune, 2007; 2009, De Franco et al., 2008)。つまり、太平洋型造山運動において、沈み込み帯とは構造侵食作用が普遍的に起こっているところで、構造侵食作用を重視した造山運動、テクトニクスの構築の必要性がでてきたことになる (丸山ほか, 2011, 丸山, 2012, 鈴木ほか, 2010, 植田, 2010, Uyeda and Kanamori, 1979)。これまでの沈み込み帯は、島弧での付加体作用が重視されてきたが、今後は構造侵食作用を主として、付加作用を従の関係で考えていく必要があるだろう (Bilek, 2010, Kawai et al., 2009, 河合ほか, 2010)。

c 時空間の拡大

調査や、測定技術、観測技術などが進むこと、地角斜造山運動からプレートテクト

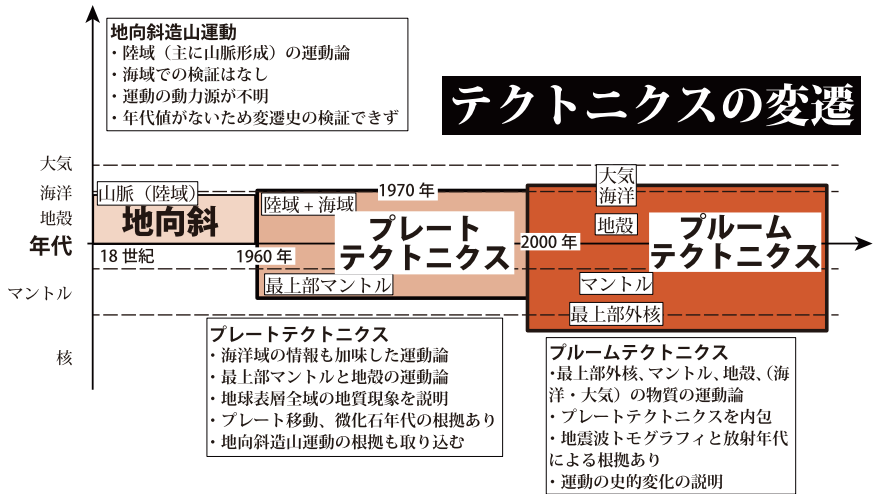


図 5-9 テクトニクスの変遷

これまでの見てきたテクトニクスの各種のモデルの位置づけをまとめたもの。縦軸：地球の深度・高度・階層による区分。横軸：モデルが提案された年代。それぞれのモデルの及んでいる範囲と特徴を示した。

テクトニクス、そしてプルームテクトニクスへと変遷するにつれて、それぞれが対象としていた空間も広がってきた（図 5-9）。

また、造山帯やテクトニクス内の岩石の年代測定により時間軸上に置かれ、岩石の地質学的位置づけにより、テクトニクスの時系列変化として捉えられるものとなってきた。つまり、テクトニクスの変遷は、確定された時間軸での拡大とも位置づけられる。

地向斜造山運動は、陸域での主に山脈形成に関するの運動論であった。その運動の動力源が不明で、年代値がなかったため、変遷が考えられても十分な検証できなかつた。また、海域の情報も少なく、海域への演繹もできなかった。地向斜造山運動は地球上の最も活動的な地質場であるが、それは陸域の変動帯の運動像であった。

プレートテクトニクスは、地球表層部の剛体を中心としたプレート移動による運動像であった。地向斜造山運動と比べると、海洋域の情報も加味され地球表層全域の地質

現象に関する運動論となっていた。地向斜造山運動の根拠も取り込みながら、プレート移動や微化石年代などを根拠として検証もなされてきた。加えて、プレートは、地殻だけでなく最上部マントルをも含む、より深部に及ぶ運動論であった。

ブルームテクトニクスになると、プレートテクトニクスの内容も取り込んでいた。つまり、表層の運動像は、従来のプレートテクトニクスが担うことになる。プレートテクトニクスからブルームテクトニクスへは、パラダイム転換ではなく、発展的パラダイムであった。ただし、精密な放射性年代測定や地震波トモグラフィを根拠に、より精緻なモデルとなってきた。その適用範囲は、最上部外核からマントル、地殻までに拡大され、物質循環や運動論として整えられてきた。また、空間スケールの拡大と共に、過去への時間軸も拡大され、運動像の史的变化も考えられるようになってきた。

テクトニクスの変遷は、単に仮説の置き換えだけでなく、精度や検証性の高い、地球空間や地球時間の適用範囲が拡大されてきた。地質学におけるモデル(パラダイム)の転換は、空間的にも時間的にも広がったものになってきた。

5 造山運動の普遍化の必要性

造山運動には、いくつかのタイプがあった。それぞれの造山運動の中では、時間軸に沿った順序が示されている。変動帯で形成されるものなので、現在見ている造山帯は、やがて変化していくことになる。その変化はどのように進むのか。造山運動ごとの時系列はどう変化していくのか。それを推定するためには、普遍化が必要になる。

a 発展過程の作業仮説

現在の地球の各地に存在する造山帯を並べることで、さまざまな段階の時間変遷とし(アブダクション)、それをテクトニクスの発展過程とみなして作業仮説を作成していく。ウィルソンサイクルは、プレートテクトニクスにおける発展過程の作業仮説であった(本章2b)。そのような作業仮説を、造山運動やブルームテクトニクスで考えていく必要がある。

現在の地球には、大西洋型造山帯、コルディレラ型造山帯、太平洋型造山帯、衝突型造山帯が、各地に存在する。別々の地域での活動であるが、同じ造山運動の型には共通性があるように見える。また、同じ造山型には、古い時代のもも見つかっている。さらに、衝突型造山帯の内部には太平洋型造山帯の構成物があつたことが検証されている。

このようなことから、それぞれの造山運動が時系列に沿って変遷していくように見える。これが、造山運動の時系列変化、あるいは発展過程、変遷の作業仮説となるだろう。それには検証が必要になる。

磯崎（1998）では、日本列島でえられた時間軸付きの地質情報を、現在のプレートテクトニクスやウィルソンサイクルを、斉一的に利用して変遷史をまとめた。6～7億年前に存在した超大陸ロディニア（Rodinia）にリフト帯ができ、海洋プレートが形成され、揚子地塊として分離して受動的大陸縁になる。約5億年前に海洋プレートが沈み込むことで活動的大陸縁に転化する。4億年頃に沈み込みが継続することで成熟した島弧になり、コルディレラ型造山帯となった。そこから、2億年後までアナロジーを延長して、北米とアジアが衝突型造山運動により超大陸アメジシア（Amasia）ができるとした。

磯崎が日本列島で、過去の時系列情報を現在まで並べ、未来まで推測を進めていった。磯崎の用いた方法論は示唆に富むものである。その概念を普遍化していくと、次のようになるだろう（図5-10）。

大陸プレート → リフト帯の形成 → 大陸プレートの分離と受動的大陸縁の形成（大西洋型造山運動） → 海洋プレートの拡大 → 海洋プレートの沈み込み → 活動的大陸縁の形成（コルディレラ型造山運動） → 海洋プレートの縮小、海嶺の沈み込み → 海洋プレートの消滅 → 大陸の衝突（衝突型造山運動）

海洋プレートが、他の海洋プレートに沈み込む時、海洋性島弧 → 成熟した島弧へと
いう太平洋型造山運動の発展過程も起こりうるものが、斉一説からわかる。

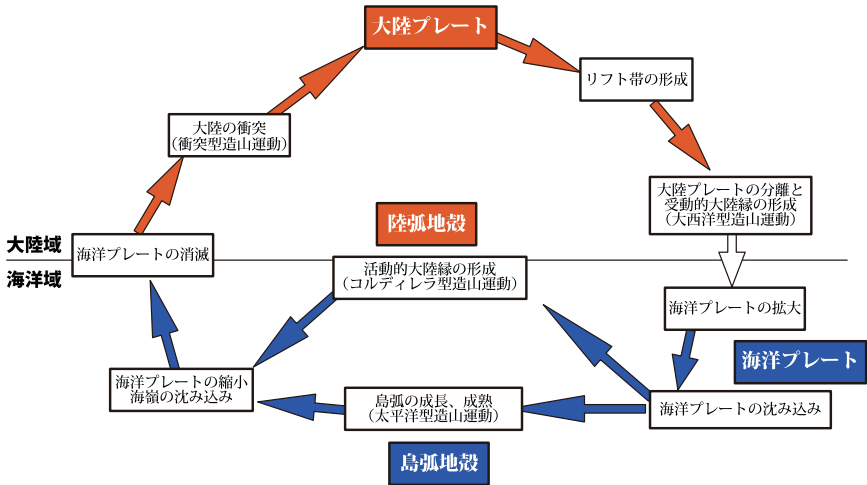


図 5-10 プレート運動の発展過程

日本列島を例にしたプレート運動の発展過程の仮説。海洋域では、海洋プレートの拡大からはじまり、海洋プレートの沈み込み、活動的大陸縁の形成、海洋プレートの縮小となる。海嶺の沈み込みが起り、海洋プレートの消滅し、大陸域だけの活動となる。大陸の衝突（衝突型造山運動）によってひとつの大陸プレートになる。大陸プレート内にリフト帯が形成され、大陸プレートの分離が起こり、受動的大陸縁（大西洋型造山帯）が形成される。磯崎（1998）をもとに作成。

b 斉一説とモダン・アナロジーからの飛躍

磯崎の方法論は、日本列島の変遷史とその普遍化は、過去への斉一説の適用事例となるだろう。現在の規則、法則、仮説からえられた「造山運動モデル」を、ある時代の造山帯へ斉一的に演繹することで、その時代の造山運動を復元していくことができる。その方法論を、いろいろな時代で演繹していった結果を、時系列で並べることで、「造山運動の変遷モデル」が帰納できる。

さらに「造山運動の変遷モデル」を抽象化していけば、「普遍的な造山運動モデル」へとアウフヘーベン（帰納）でき、時系列変化に関する仮説をつくることになるだろう（図 5-11）。

とするもので、一種の仮説演繹法となる。斉一説は現在の規則性を過去に演繹したが、モダン・アナロジーでは過去の仮説を現在に適用しようとする逆の方向性をもった手法である。

過去の変遷モデルを、さらに現在の造山帯を演繹し検証していくことで、プレートテクトニクスの時系列での変遷モデルを普遍化できる。そのための前提として、現在のプレートテクトニクスにおいて、アブダクションされるそれぞれの段階の典型的な地域を設定しておき、それぞれの地域が時系列変化すると並ぶであろう順序をアブダクションして新しいモデルの作業仮説（下に述べるテクトニクスモデルとなるもの）をつくっておくことになる。

プレートテクトニクスでは、ウイilsonサイクルとしてまとめられているが、モダン・アナロジーとして適用することにより、ウイilsonサイクルの検証していくことになる。磯崎は、このウイilsonサイクルのモデルを、過去の時系列情報で検証したことになる。これは、現在の地質場を用いて、時系列をもったテクトニクスへと抽象されたことになる。

現在の造山帯でこのような事例を集め普遍化できれば、「テクトニクスモデル」へとアウフヘーベン（帰納）していけるだろう。現在の造山帯は各種の素材があり、測定や分析ができる。例えば、精密な年代測定ができれば、事象を時系列に並べることで、現在の造山帯から詳細な検証された事例に基づいて並べられた「テクトニクスモデル」ができるだろう（例えば、長谷川ほか, 2019, Isozaki and Itaya, 1990 など）。

斉一説を適用した過去の造山帯からの「普遍的な造山運動モデル」が、「造山運動の変遷モデル」からモダン・アナロジーによって現在の造山帯からの「テクトニクスモデル」がアウフヘーベンでき、両者が同じものになれば、それはベクトルの異なった独立した方法論によってえられたモデルが一致したことになる。これは信頼性の高いモデルになるであろう。

ある地域（日本列島）の地質変遷史から、普遍的な造山運動変遷史（造山運動のメタ的変遷史）を抽象することができれば、このような方法論の実用の可能性が指摘されたことになる。磯崎は、ウイilsonサイクルを未来へ演繹した。そして、「現在」とい

う束縛から逃れ、検証は不能なが、根拠のある未来を推定したことになった。このような試みの意義は大きい。

▼地質学者の脚下照顧

地質学の研究は、野外を歩いて調査を進めることから始まる。まさに地を這うようにして、試料や記載情報を収集していくことになる。一方、海底や地下深部にまで調査範囲を広げるためには、さまざまな機材や大掛かりの装置を用いることになる。例えば、地震学や海洋学、天文学などは、地震計や調査船、天体望遠鏡が、事前に整っており、そのデータが使えるという前提で研究がおこなわれていく。もちろん、大掛かりな調査研究でしか得られない試料やデータ、達成し得ない研究テーマもあるだろう。人跡未踏の地や極地などでも、地を這う調査をすることは可能である。だが、通常の交通手段でたどり着けないところ、例えば、南極、未踏峰、人跡未踏の地などの調査では、それなりの研究費の工面や資材準備をしなければならない。いずれにしても、大掛かりな研究では、複数の研究者チームで、予算や装置、人材を確保し、数年間の計画を立てて研究が進められることになる。研究計画書では、期待される成果も述べられ、研究規模に見合った成果を追求していくことになる。これは、大きな予算や巨大な装置を使うためには、致し方ないことであろう。だが、期待される成果を追求するだけが、研究の醍醐味ではないだろう。もっと、自由にできる、おおらかな研究手法もあっていいのではないだろうか。常に寄り道でき、時には脱線ができ、あるいは路線変更ができる自由度があつていいのではないだろうか。地質調査を中心としたひとりで進める研究には柔軟性がある。だが、ひとりでできる研究は、所詮、ひとりの力なので、そのデータ量も、テーマも、ひとりなりの限界がある。研究費が少なければポケットマネーでおこなうことになり、どうしても身近な地域、あるいは日本列島、せいぜいアプローチのいい海外で、限られた時間で調査することになるだろう。こんなハンディのあるひとりでの研究では、大した成果がでないのではないだろうか。必ずしもそうではないだろう。人手によってしか出せないデータは、大人数でおこなえば短時間で収集できるだろう。だが、ひとりでも、手間をおさず、時間をかければ、驚くほど多くのデータは出せる。大きな装置も機材が使えなくても、個人の揃えられる最小限の装置や手軽な観察道具の活用、あるいは自作で工夫した装置で、だれも出していないデータを取ることもできる。多額の研究費がなくても、工面できたけなしの研究費で、融通できたポケットマネーの範囲で、身近な地域へしょっちゅう出かけることで、詳細な調査をすることができる。研究成果とは、どのような新知見をえて、どのような新たなアイデアが生まれるかが重要である。「期待される成果」とは、「予想された結果」である。予想外の成果は、期待し得ないところから生まれるはずだ。想定外のアイデア、創造的発想、奇抜な着想、新しいパラダイムは、あるひとりの頭から生まれるはずだ。その時、おおらかにひとりで調査をしている、柔軟性をもった研究をしている地質学者が、有利ではないだろうか。地質学では、真理は自分の足元、あるいは自己の内部にあるはずだ。それ

を見逃さないためには、不断の注意をしなければならない。脚下照顧（きゃっかしょうこ）とせねばならないはずだ。そのためには、心の自由が必要ではないだろうか。■



脚下照顧

地質学では、大地を探查する。自分の足元にこそ真実がある。北海道爾志郡乙部町滝瀬 海岸。
著者撮影。

第6章

地質学的作用への数学的概念の導入

数学的概念の地質学への導入を検討していく。数学的概念の他分野へ適用していくために、「地質現象における微分方程式から地質学的な一般則を導き出すために不定積分する」などという数学的でややこしい表現をしている。他にも、隠喩的な言い回しになっていたり、難解な表現になっていたりするところもある。だが、数学的概念の導入は、地質学的現象に新たな視座を与える、重要な試みとなるはずだ。



1 場への数学的概念の導入

本章では地質学への数学的概念の導入を考えていく。プレートテクトニクスは、地球表層部で起こっている運動なので、実証しやすい仮説となる。現在の地質学のパラダイムでもあるプレートテクトニクスにおける地質学的作用へ、数学的概念を適用していく（小出, 2020b）。

a 地質場の区分

地角斜造山運動（第5章2a）で見たように、大陸地域の多くは、現在、ほとんど変動がない安定した地塊となっている。活動的な場は、造山運動を起こしている太平洋型造山帯、コルディレラ型造山帯、および衝突型造山帯となる（第5章2b）。

太平洋型造山運動は、島弧地殻を持つプレート（大陸プレートと海洋プレートの両方の場合がある）に対して、海洋プレートが沈み込むことによって起こる造山運動である。海洋プレート上の海嶺が沈み込んでしまうと、海が狭まっていき、海洋プレートと非活動的大陸縁で接していた大西洋型造山帯（活動していない）をもつ大陸プレートが、島弧地殻に近づいてくことになる。大陸地殻と島弧地殻の衝突も衝突型造山運動となる。

また、海洋プレートが大陸プレートへ沈み込みみんでいるコルディレラ型造山運動では、海洋プレートが沈み込んでいくと、海が狭まり、海洋プレート上の海嶺が沈み込んでしまうと、別の大陸プレートが近づき、大陸地殻と大陸地殻に衝突して、衝突型造山運動に移行することになる。

現在の造山帯の特徴から、時系列をアブダクションすることで、変遷を推定することで作業仮説ができる。地質状況によって多様性を持つことになるが、抽象（アブダクション）されたモデルとしては、ウイルソンサイクルと同じような論理構成となる。ただし、現存する事象、事物からの検証はできるが、未来での検証は不能である。

いずれの造山運動でも、海洋プレートの沈み込みが原動力になっていることになる。造山運動を起こすには、海洋プレートの沈み込みが必然となり、その前提として海洋プレートはプレートテクトニクスのさまざまな場面において重要な存在になる。また、海洋プレートの沈み込みは、プルームテクトニクスにおけるマンテル対流の下降流、そして海洋プレートの形成場である海嶺は上昇流として役割を担っている。海洋プレートあるいは海洋地殻が、プレートテクトニクスにおいて、また大陸プレート内でどのような関連を持っているのかも注目していかなければならないだろう。

プレートテクトニクスにおける地質場として、海洋プレートの形成（海嶺から海洋底）、沈み込み帯、島弧、大陸に区分して、それぞれ場で、どのような数学的概念が導入できるかを検討していくとともに、海洋プレートがそれぞれの場にどのように関与するかも見ていく。

b 数学的概念の導入とは

以下では、数学的概念を導入を試みるが、その方法について事前に整理しておく。

地質学的現象は、研究が進むにつれて、その成因やメカニズムなどが解明されてくる。原因やメカニズムは要素還元的に解明が進められていることが多く、その要素には地質学的概念となるものもあるだろう。地質学的概念に対して、数学的概念を導入できるものもあるだろう。もし概念を置換できたとすれば、数学的概念間で導出過程や処理方法から、概念を関連づけることができるだろう。その関連を地質学的概念へとフィードバックすることで、これまで見えてこなかった関係が見いだせるかもしれない。それが地質哲学として新たな方法論としての提案である。

少々抽象的な方法論であったので、例を示しながら考えていこう。ある火山が繰り返し噴火しているとする。火山の噴火の歴史や規模、マグマの性質などで、正確な記録がえられたとする。記録として、噴火の年代、噴出量の定量値、マグマの化学組成が、数値情報としてえられたとする。まずは時代を横軸に、噴出量や化学組成を縦軸にとって、その関連を調べるであろう。もしなんらかの関連も見いだせなかったら、探求は断念されるであろう。

ここに数学的概念を導入していこう。

噴火の年代のデータのフーリエ解析で、周期と強度の関係、あるいは複数の周期の抽出をおこなえるだろう。周期ごとに噴出量や組成変化との関係を調べるのが可能だろう。また周期の強度と噴出量や組成変化の関係も検討すべきだろう。そこで関連が見いだせたら、火山の噴火の時系列の変化を見出したことになるだろう。

噴出量と化学組成で、相関がある成分がないかを統計処理で調べることができる。カイ二乗検定で独立性を調べることで、相関の程度を知ることができる。周期性と化学組成の関係では、前の噴火だけでなく、それより前の噴火の影響（1回からn回前まで）を受けているなら自己回帰 AR モデル、あるいはいずれかが定まらない非定常の時系列の影響であれば、ARIMA モデルなどを用いて解析すれば、相関関係が見えてくるだろう。この噴火量とマグマ組成の関連から、過去の噴火の影響が見えてくるだ

ろう。

ここで示したのは、数学的処理や手法の導入の例であった。だが、ここで用いた数学的概念の地質学的事象への適用は、未知の事象に対してどのような関係が見いだせるかを示唆している。地質学的事象へのこれまでにない新たな見方、視点が導入されたことになる。

今まで気づくことなかった地質学的関連を、数学的概念の導入からアプローチすることで、新たに見いだせるのではないかというのが、本書での提案である。

以下では、地質場ごとに、地質学的概念がどのような数学的概念に結びつきそうかを探っていく。

2 海洋プレートの形成：海嶺から海洋底

海洋プレートは、下にはカンラン岩からなる上部マントルがある。上部マントルのカンラン岩は、物性の違いによって、挙動が異なってくる。海洋域の上部マントルでは 60 ~ 100 km の深度で地震波が遅くなる「低速度層」が見つかっている。低速度では、温度上昇による粘性の低下、つまりカンラン岩が一部溶融が起こり、マントル物質が可塑性をもつようになる。低速度層は、アセノスフェアと呼ばれている。低速度層より上部は、脆性をもった硬い上部マントル（カンラン岩）と海洋地殻からなるリソスフェアがある。硬いリソスフェアが柔らかいアセノスフェアの上をすべることで、プレートとして移動していくことになる。大陸プレートでも深度は異なるが、同じメカニズムで移動することになる。

プレートテクトニクスにおいて、海洋プレートの挙動が重要になるが、その形成場が海嶺となる（図 6-1）。

マントル対流の一環として、マントルプルームの上昇が起こる。マントル対流は、地球の熱放出に伴う定常的運動によるため（第8章7）、プルームの上昇は周期的な活動となる。マントルプルームが上昇していくと、上部は高温の状態のまま（マントル物質の熱伝導率が小さいため）圧力低下が起こり、岩石（カンラン岩）の溶融条件を満

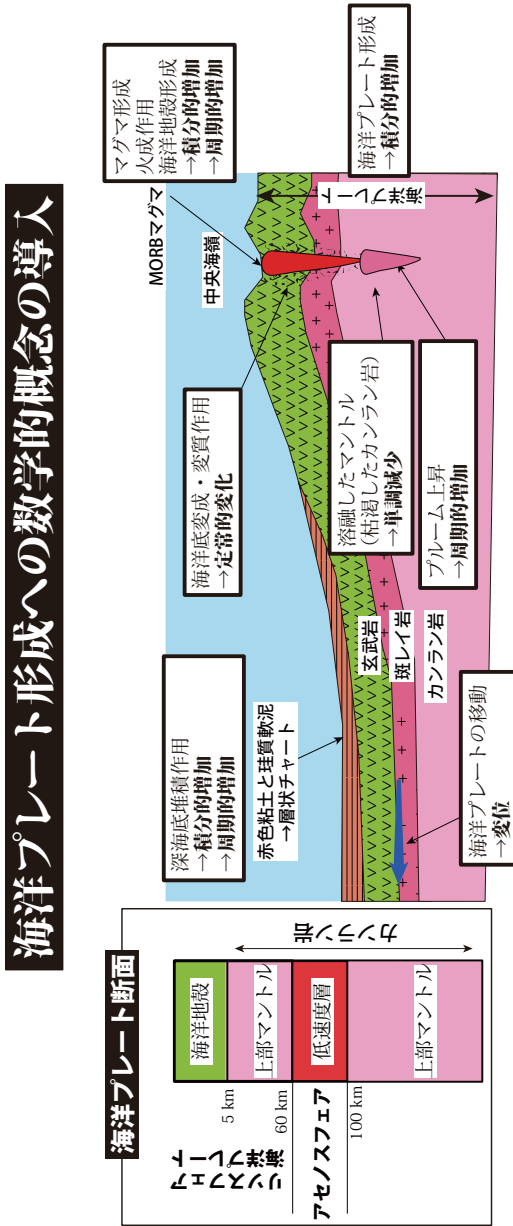


図 6-1 海洋プレート形成への数学的概念の導入
 海洋プレートの形成場（海嶺）から海底を移動して起こる地質学的変化を数学的概念で捉えた模式図。左図：海洋プレートの断面。
 詳細は本文を参照。

たし、マグマが形成される。マントルプルームの周期性から、地球上の海嶺の形成という巨視的運動像は周期的増加の現象となる。

微視的にみると、海嶺でのマグマ形成から火成作用が起こり、各種の作用と共に、新しい海洋地殻が形成されることになる（佐藤ほか，2008）。マグマ形成から海洋地殻形成までは常に新たな生成なので、積分的増加となる。溶融を起こしたマントル物質は、枯渇したカンラン岩（ハルツバージャイト harzburgite）と呼ばれるものになり、マグマ成分の溶出がおこるため、単調減少が起こる。一方、海嶺下のマグマ溜まりでは、鉍物の沈積によって層状のカンラン岩が形成され、層構造はマグマ溜まりの物理状態を反映した周期的増加となる。

海洋地殻と多様な起源のカンラン岩がマントル物質とが海洋プレートとして、海嶺で形成されるので、積分的増加になる。

海嶺ですでに形成されている岩石には、マグマにより高温にさらされることで、海洋底変成作用を受け、質的变化が起こる。ただし、海洋地殻の浅所では、マグマからの熱水循環や海水循環があり、熱水変質や水の関与する変質作用も伴うことになる。海洋地殻形成後は、変成・変質作用が定常的变化として起こる。

海洋プレートは、海嶺で新たな海洋地殻が形成されて拡大し続けていることや、海溝での沈み込みに伴う引張りによって、海底を移動していくことになる。海底の移動とともに、冷却による体積の縮小による深度の増加という変位を起こす。

海洋底は安定した環境で、堆積速度は遅いが深海堆積物が堆積していく。深海底堆積物は、生物由来の珪質軟泥と陸源砕屑物に由来する赤色粘土が堆積する。形質軟泥と赤色粘土は固化すると層状チャートとなる。層状チャートは、海洋地殻の量に比べて、少量の追加にすぎない。だが、海洋プレートは、地球の3分の2を占める海洋域を覆うため広大となり、面積で積分した値、さらに形成から沈み込みまで経過した時間で積分したものとなるため、積分的増加となる。

層状チャートの層構造をつくために、形質軟泥の周期的に欠損ができることになるが、全体として周期的増加となる。これは、定常的堆積作用による増加と繰り返し起こる欠

損により周期性をもった変化を記録することになる。

3 沈み込み帯

海洋プレートが、海溝で沈み込みむ時に起こる地質学的変化を、数学的概念を通して見ていくことにする (図 6-2)。

沈み込み帯は、2つのプレートのぶつかっているところであるため、必然的に圧縮場となる。海洋底を移動している海洋プレートは、水平方向のベクトルをもっているが、沈み込む海洋プレート (スラブと呼ばれる) がマントルへ向かう時には、そのベクトルは下方に傾くことになる。そのため、水平方向のベクトルのうち、下方へ成分を除いたベクトルが、ぶつかられたプレート側 (ここでは島弧地殻を想定する) への圧縮力となる。島弧は、プレートのぶつかりによる圧縮応力場になるが、物性の異なる地質体での隆起や変形、断層などが起こるため複雑な応力場となる。応力場は、海洋プレートの沈み込みによって継続的に起こるため、長期に渡る作用になる。

隆起した陸地では、浸食削剥作用が起こり、微分的減少となる。碎屑物は河川などで海底に運ばれ堆積物となる。時々発生するタービダイト流は周期的に起り、冪乗則的变化であると考えられるが、周期的増加でもある (Bouma, 1962; 1969)。タービダイト流は大陸斜面や海溝付近へと運ばれ、冪乗則的变化が冪乗的增加へ、周期的増加が積分的増加となってタービダイト層に記録される。タービダイト層は、砂岩泥岩の互層なので、繰り返しタービダイト流が発生していることになり (小出, 2014a)、周期的増加ともなる。周期性のある形成機構は、周期と振幅 (頻度) や成長率などによる解析が可能であろう。あるいはスケーリング則での解析も必要になるだろう。浸食削剥とタービダイト層は原因と結果の関係なので、時間差はあるが、物質量的変化としては相殺し合う関係となる。

海洋プレートが海溝に近づくと、陸からの半遠洋性堆積物 (陸源の堆積物と深海底堆積物の混合したもの) が加わることになる。この堆積物の陸源物質の由来は、陸からのタービダイト流によって海溝を越えて届く碎屑性堆積物の細粒部や、島弧の火山

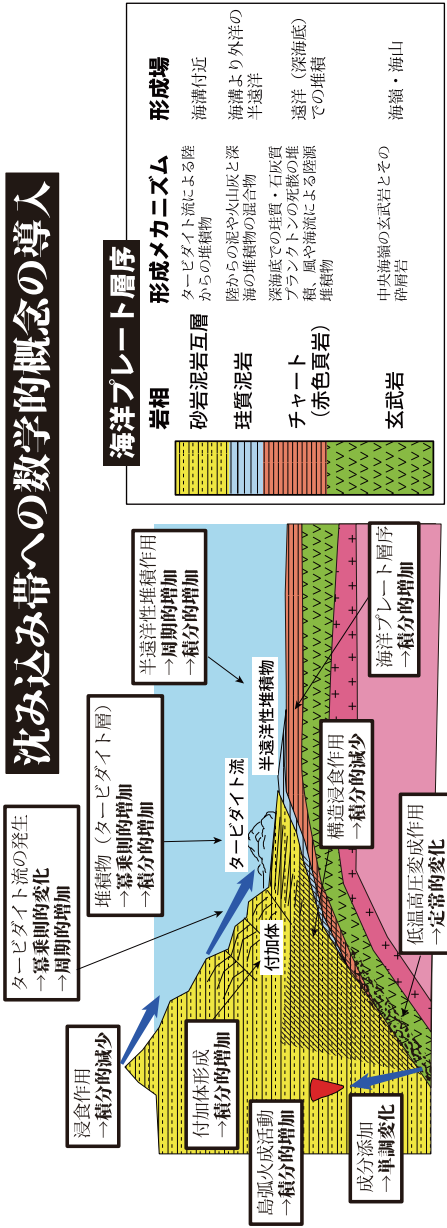


図 6-2 沈み込み帯への数学的概念の導入
沈み込み帯で起こる地質学的変化を数学的概念で捉えた模式図。右図：海洋プレート層序の岩相、形成メカニズム、形成場をまとめたもの。

噴火による火山灰などからなる。深海底堆積物に陸源物質が混在することで、半遠洋性堆積物になるため、タービダイト流や火山噴火の周期的増加が形成要因となっている。この堆積層は、時間経過でみると積分的増加となる。

海洋プレートの大半は、沈み込んでマントルに戻ることになるが、一部が、陸側の地殻に加わることになる。その時、海洋プレートとその上部に堆積している層状チャート、そして半遠洋性堆積物、さらに陸側のタービダイト層が、一連の「海洋プレート層序」(第5章4a)が、積分的に増加する(Matsuda and Isozaki, 1991)。沈み込みに伴う応力によって、海洋プレート層序が陸側に剥ぎ取られて、「付加体」となる(小川・久保, 2005)。付加体形成は継続的な作用となり(小出, 2012; 2013a; 2014a)、島弧が海側へ成長し積分的増加となる。

沈み込んだ海洋プレート(スラブ)内では、低温高压型の変成作用が定常的变化として起こる。低温高压型変成作用は、沈み込み帯を特徴づける広域変成作用であり、変成条件の変化(スラブの深度)に応じて、スラブ内で常に起こっている現象となる。

スラブが沈み込むと、含まれていた流体が圧力増加によって絞り出され、島弧下のマントル(ウェッジマントル)へ供給される。ウェッジマントルでは、成分添加によってカンラン岩が溶融し、島弧マグマが形成されるというメカニズムが継続的に起り積分的増加となる。これらの沈み込みに連鎖して島弧火成活動が、必然性をもって起こることになる。

沈み込み帯では、構造浸食作用が起こっており(第5章2c)、積分的減少となる。地球全体としては、付加作用より構造浸食作用が起こっている沈み込み帯が多いとされている(第5章4b)(小出, 2019b)。現在の沈み込み帯では、付加作用の積分的増加と構造侵食作用の積分的減少を総合すると、減少分が勝り積分的減少となる。

だが、厳密には地域ごとの沈み込み帯で、付加作用と構造侵食作用の値を決定していく必要がある。後述(第7章5)するが、大陸地域には過去の沈み込み帯で形成されたもの(変成岩や海洋プレート層序など)が見つかったため、すべての島弧が構造侵食作用で消滅するわけではなく、地域によって残存することもある。

沈み込み帯ごと、そして時代ごとに、その変化量や特性を抽出できれば、沈み込み帯の総合的作用として普遍化ができるであろう。

4 島弧

島弧は、海洋プレートの沈み込みが起こっている陸側に形成されるので、前述の沈み込みと密接な関係がある。だが、ここでは、沈み込み帯の陸側に起こっている作用を中心にみていくことにする。また、コルディレラ型造山運動として活動的大陸縁辺で起こる「陸弧」もあるが、ここでは大陸地殻とは離れた海洋域に形成された比較的地殻薄い「島弧」を対象とする。それは、大陸地殻をもった場の作用は、厚い地殻の特徴を反映しているはずで、沈み込み以外の効果も配慮しなければならない。ここでは、より要素還元をしやすい島弧を考えることにする。

日本列島は、島弧の典型と考えられる（図 6-3）。日本列島には、地殻の薄い「海洋性島弧」から成長中の島弧、そして成熟した島弧まで、さまざまな成長段階の島弧がある。形成された時代も、古生代から新生代、そして現在形成中のものまである。古いものは、侵食作用により深部が露出しているため、過去に起こった深部での過程を調べる素材となる。また、日本列島には、特異なものとして、異なった時代の島弧地殻同士の衝突帯が 2 箇所あり、さらに 3 つの海溝が会合する世界でも類を見ない三重会合点がある（Takahashi, 2017）。また、付加体が形成されている島弧と、構造侵食作用が起こっている島弧もある。

日本列島におけるこれら多様な島弧の存在は、同じ作用においてもさまざまな段階、条件を検証するには有効であろう。だが、それぞれの素過程を明らかにするには、重複した作用を受けていることも多く、複雑になっていることも否めない。構造侵食作用もかなり激しく起こっており、過去の島弧地殻で消滅しているものも多く（Maruyama et al., 1984, 丸山, 2012, 大森・磯崎, 2011, 大藤ほか, 2010）、島弧の全貌が保存されていないというハンディもある。だが、日本列島は調査も行き届いており、島弧研究では得難い素材となる。

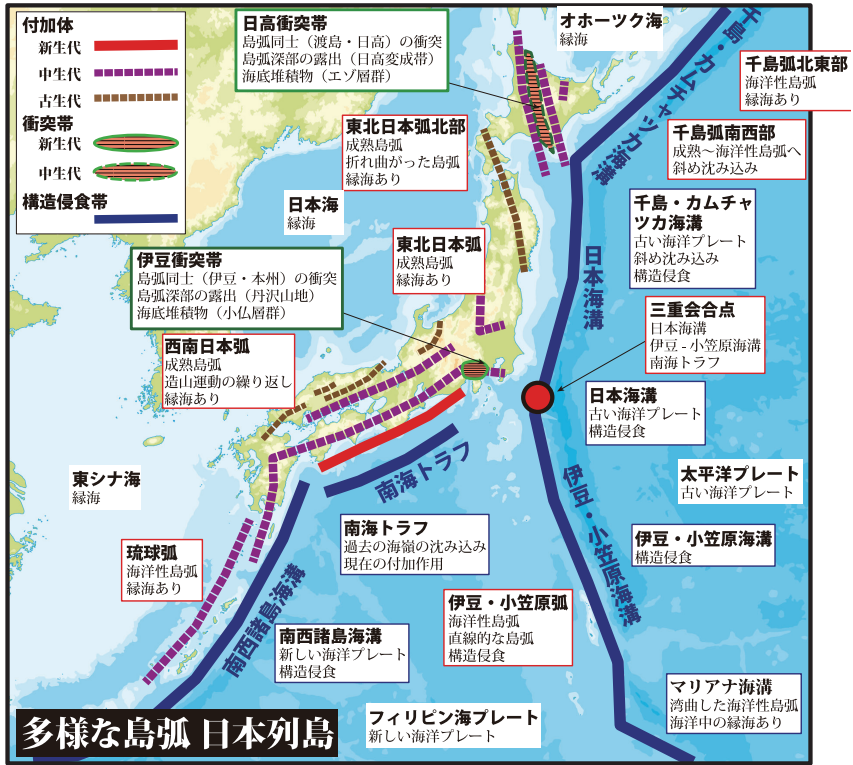


図 6-3 日本列島の多様な沈み込み帯と島弧

現在の日本列島に残された過去の付加体（時代別）、衝突帯（時代別）、現在の構造侵食帯、火山前線を模式的に示したものの。

島弧への数学的概念を導入を考えていこう（図 6-4）。

島弧の火成作用は、海洋プレートの沈み込みによって供給された水分の添加によって起こるため、継続的に起こることになり、積分的増加が起こる場となる。マグマの活動場によって、表層では火山活動が、深部では深成活動となる。火山活動は、噴火規模は冪乗則にそった活動となるが、火山体としては、噴火の度に噴出物を放出するため、冪乗則的に増加していくことになる。深成活動は、深部での現象なので同時代

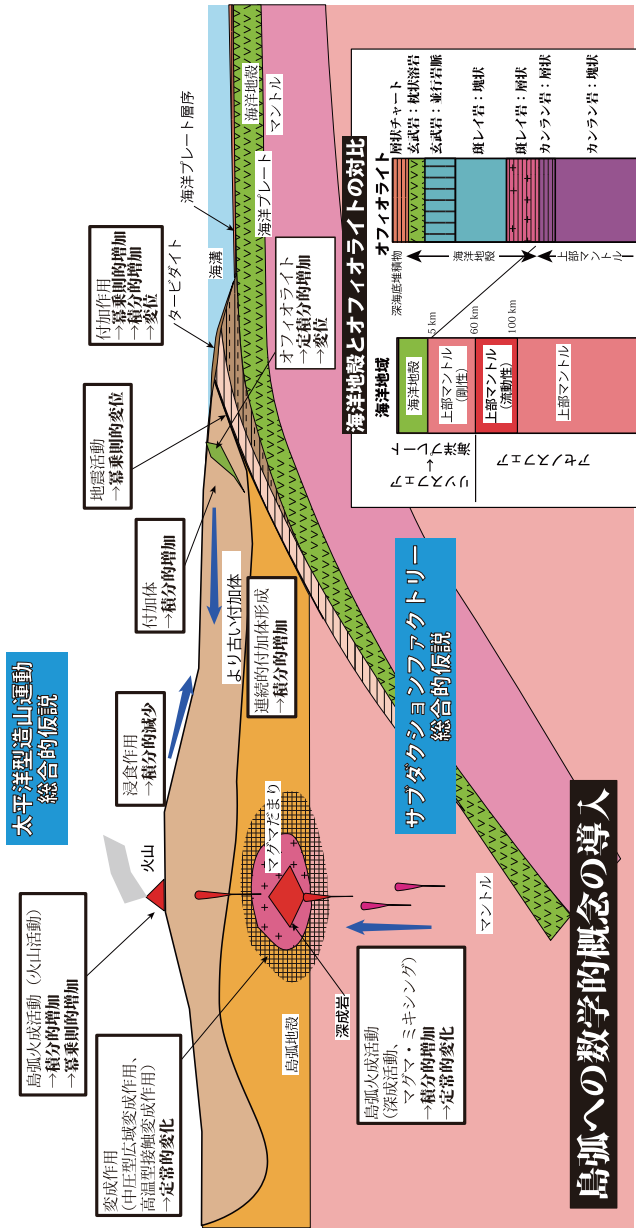


図 6-4 島弧への数学的概念の導入

島弧の陸域で起こる地質学的変化を数学的概念で捉えた模式図。深部での火成作用を中心としたものはサブダクションファンクトリリーと呼ばれる総合的仮説で、島弧地殻では太平洋型造山運動という総合的仮説で説明されている。両者は明確に区分されるものではなく、重複した部分も多い。右下図：海洋地殻とオフィオライトの層序の比較。

の検証は不可能だが、火山作用のマグマだまりに当たることから、マグマが上昇してくる度に、深成岩が積分的に増加していることになるだろう。火成作用のうち、火山活動は同時代に地表で起こるため、火山作用の痕跡が入手できれば、深成岩とともに総合的な火成作用の検証に利用できる。

島弧固有の火成作用として、マグマだまりではマグマ・ミキシングという作用が起こっていることが明らかにされ (Sakuyama and Koyaguchi, 1984, Koide, 1993)、マグマ組成の多様性を形成する定常的变化が起こっていることになる (小出, 2020c)。

沈み込みに伴う一連の作用のうち、火成作用に注目した総合的仮説を、「サクダクシオンファクトリー」と呼ぶ (巽, 2003; 2004)。ただし、深成活動は、浸食削剥されて露出したときに検証の対象となるため、深成岩の浸食量と形成時期のタイムラグには注意が必要である。

島弧火成活動による深成活動も定常的变化として起こっているので、深部の深成岩体周辺では、規模は小さいが高温型接触変成作用も常に起こっている。また、島弧深部の温度圧力条件で、中圧型変成作用が広域に起こっていると考えられ、定常的变化となる (Miyashiro, 1961, 都城, 1965, Miyashiro et al., 1982)。

継続した沈み込みでは、付加作用も継続する場になるので、新しい付加体が次々と形成されることになる。過去の古い付加体が島弧の構成物となっていくので、積分的増加となる。

一方、積分的減少として浸食作用が働くために、島弧の高まりは常に減少し続けることになる。だが、高い山並みを有する島弧がある。このような高い山脈をもった島弧は、沈み込みが継続するため、圧縮による山脈形成と付加体形成、島弧火成活動などで、現在の高まりを維持する活動が起こっていると判断できる。

沈み込みにより取り込まれた海洋プレート層序のうち、海洋地殻の断片は、付加体中でオフィオライトとなる。オフィオライトの岩石で年代決定ができ、さらに海洋プレート層序の層状チャートから、海溝近傍に達した時期が読み取れれば、それらを定積分することで、その時期の海洋域の様子を復元できるかもしれない。また、オフィオライト

の海洋底変成作用と変質作用、変形作用、また沈み込み帯固有の低温高压型の変成作用は、海嶺での形成から島弧へ沈み込み、そして定置までの温度圧力条件の変化を記録していることになる。オフィオライトは、海洋地殻がある時代に付加作用で陸側にもたらされたもので、定積分的な増加となる。また、海から陸への大きな変位が起こる。

島弧では、火成活動と同じく冪乗則的活動に地震があるが、地震は地下の岩石が破壊されて起こっているため、断層や変形作用にも冪乗則が記録されている可能性がある（村田，1988; 2000, Raymond, 1984）。

上述のさまざまな島弧の活動は、すべて沈み込みを駆動力として起こるものとなる。島弧活動は沈み込みに由来する必然性をもっていることになる。さまざまな島弧の活動を時間軸にそって系統的にまとめられた総合的仮説が、「太平洋型造山運動」となる（丸山ほか，2011）。

島弧の火成作用を中心とした「サクダクションファクトリー」総合的仮説と時間軸にそった「太平洋型造山運動」の総合的仮説はお互いに重複する点もあるが、独立に提唱された仮説なので、両者には異なった仮説群が含まれている。そのため、同一とみなして議論することは困難である。しかし、太平洋型造山運動には島弧の火成作用に関する仮説群も含まれているので、以下では、太平洋型造山運動を中心にして考えていくことにする。

5 大陸

ここまで海洋プレートの形成、沈み込み帯、そして島弧と見てきた。最後に大陸を見ていく。大陸とは、大陸地殻が乗っている大陸プレートの領域である。大陸域でも、安定した部分（クラトンあるいは安定地塊）と、変動の激しいところ（変動帯）がある。クラトンでは、侵食作用で積分的減少が起こるが、その程度は小さい。一方、変動帯は、変化が激しくさまざまな作用が起こる場となる。変動帯の中でも、衝突型造山帯がもっとも活発なところである。

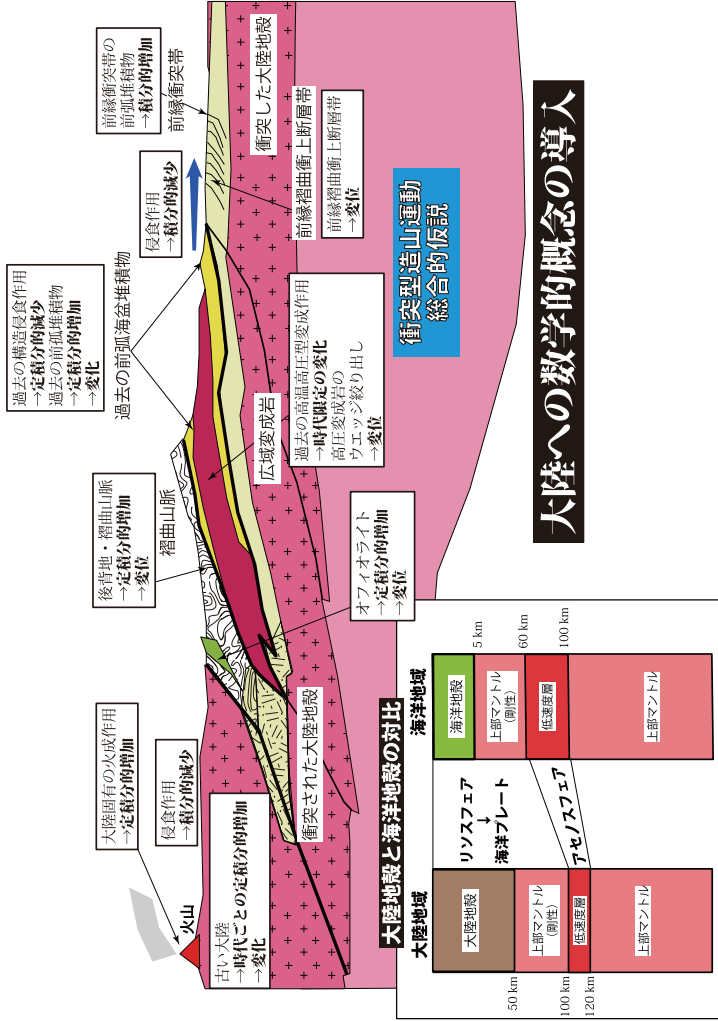


図 6-5 大陸への数学的概念の導入
大陸で起こる地質学的変化を数学的概念で捉えた模式図。大陸地殻では衝突型造山運動という総合的仮説で説明されている。左下図：大陸地殻と海洋地殻の層序の比較。

大陸の変動帯を中心に数学的概念の導入について見ていく（図 6-5）。

大陸の変動帯は、海洋プレートが大陸に沈み込む陸弧（コルディレラ型造山帯）と大陸同士の衝突帯がその舞台となっている。コルディレラ型造山帯で海洋プレートがすべて沈み込んでしまうと、大陸プレート同士がぶつかる衝突帯になっていく。

大陸地殻は海洋地殻に比べてかなり厚くなっているが、下にある上部マントにも低速度層があるので、アセノスフェアが形成され、大陸プレートも動くことになる。大陸プレートの動きも、VLBIなどで海洋プレートとともに実測されている。大陸地殻同士が衝上断層によって乗り上げていき、「衝突された大陸プレート」が上盤となり、海洋プレートに伴って下盤側に「衝突した大陸」という配置になっていく。

大陸間にあった海洋域の堆積物は、過去の前弧堆積物となり、そこでは衝突前に起こった積分的増加がある。また、大陸の間には前縁衝突帯ができ、海洋域への前弧堆積物が積分的増加となる。圧縮が続き、前縁褶曲衝上断層帯ができ、大きな変化が起こる。やがてそれらは、衝突された大陸に衝上していき褶曲山脈になる。褶曲した堆積物の中にはオフィオライトが見られることがあり、時代が限定できれば定積分することで、大陸の間に存在したであろう過去の海洋プレートの情報が読み取れる可能性がある。

衝突した大陸側では、圧縮応力が最も働いている時に、山脈は最も上昇し、浸食作用も激しく積分的減少が起こる。衝突型造山帯の中核部は、非～弱変成の堆積物と広域変成岩が、ウェッジの絞り出しという変位によって持ち上げられてくる（丸山，1990）。非～弱変成の堆積物は過去の前弧堆積物からなり、広域変成岩は前弧堆積物を原岩とした高温高压型変成作用を受けたものである。時代の限定された変化となる。変成岩は大陸の衝突時に深部で形成されたもので、大陸固有の作用となる。

大陸同士の衝突現象を時間軸にそって系統的にまとめたものが、総合的仮説「衝突型造山運動」になる（丸山ほか，2012）。なお衝突型造山運動では、2つの大陸の衝突の時期のみを扱い、それ以前にあったであろう状態のコルディレラ型造山運動あるいは太平洋型造山運動などは加えない。

また、量は少ないが大陸固有の火成作用も起こっている。古い時代にのみ活動した火成岩（コマチアイト、アノーソサイトなど）や、ある特異な時期に起こった火成作用（リフト帯の火山活動、カーボナタイト、キンバーライトなど）には、時代が限定された定積分的変化と考えられる（小出, 2016c; 2017b）。

大陸はさまざまな時代の岩石から構成されている。最古の大陸地殻は、38 億年前（もっとも古い大陸地殻の痕跡は 44 億年前のジルコンが見つかった）から存在している（Bowring and Williams, 1999, Wilde et al., 2001, ）。大陸地殻の岩石の年代とオフィオライトや海底堆積物を考慮すると、過去の海洋域の情報も含まれているという点も重要である。

以上、検証可能であろうプレートテクトニクスにおいて、重要である海洋プレートの形成場、沈み込み帯、島弧（太平洋型造山帯）、そして大陸（衝突型造山帯）での地質学的作用を整理して、そこに導入できそうな数学的概念を整理してきた。地質学と数学の概念の連結のため、抽象的な内容になってきた。次章では具体的に数学的概念の応用を考えていこう。

▼数学というものは

数学という学問は、それを専門としていなくても、自然科学だけでなく、社会科学や人文科学でも、科学に携わるものにとっては、必要不可欠な手段となっている。収集したデータの信頼性を確認したり、データの特徴を見出したり、データから規則性を導き出したり、帰納された法則を検証したりと、あらゆる科学的な手段を用いる時に、なくなってならないスキルとなってきている。最近では、分析装置の進歩、コンピュータやプログラムの向上により、大量のデータが入手できるようになってきた。誰もが使っている平均値や標準偏差ですら、コンピュータを頼りに計算することになる。まして大量のデータ処理はコンピュータなくしては成り立たないだろう。今やデータ処理は方法を選ぶだけで、あとはコンピュータソフトにおまかせで計算結果が得られるようになってきた。当然、その計算方式（アルゴリズム）は、多くの人が確かめ検証したものなので、安心して使えるであろう。しかし、複雑になるほど、プログラム内で用いられている数学は、一部の専門家以外、全く知らないものになっている。COVID-19では、最速のコンピュータ「京」で飛沫のシミュレーションがなされた。そのシミュレーション画像は、実際に実験室でおこなわれた検証の動画より貧弱に見える。また、当たり前だと誰もが思っていることが、シミュレーションで示されたことも多々あった。しかし、それは当たり前と「思っている」ことが、数値計算で「検証」され、背景の「数学的規則性」が見つかったことを意味する。その規則性が唯一の正しい解かどうかは、自然の弁証法的不可知があるのでわからない。だが現実の現象と合っているという結果から、「アブダクション」の過程がスタートする。その後の研究において、その仮説は重要な一歩となるだろう。知れない数学的背景が、先端にいけばいくほど、一部の人のだけのものになり、第三者的検証が難しくなる。STAP細胞が好例となるであろう。研究の範囲内であればいい。しかし、検証が難しい規則性がわかってきたものを、実用する時には注意が必要となる。それは、数学ではなく人智で処理しなければならない段階へと突入するからだ。そこは、科学的正当性だけでなく、政治的運用の問題がある。科学の正当性を優先にするか、政治的判断を優先するか、難しい問題だ。AIなら「誤る」ことは少ないだろうが、AIは失敗しても「謝る」こともない。現在の政治家も同じかもしれないが■

第7章

新しい地質学的仮説へ

前章まで、各地質場での作用や現象への数学的概念が導入を見てきた。次に、地質学的に重要な素材に関して、数学的解釈をおこなっていく。重要な素材の多くは、総合化された仮説群（メタ仮説）となるものである。本章ではメタ仮説を「論」と呼ぶことにする。複雑な論理構成になっているが、地質学の新たな展開も見てくる。



1 地質学におけるメタ仮説の数学的解釈からの方向論

前章では、プレートテクトニクスにおいて、地質学的に重要な場として海洋プレートの形成場である海嶺、沈み込み帯、島弧、大陸を取り上げて、各種の数学的概念を導入して検討してきた。本章でこれらの数学的概念をどう利用するかを、考えていこう。

a 地質学と数学を結びつける方法論

数学的概念の整理（第4章）と造山運動とテクトニクスの整理（第5章）と地質学的作用への数学的概念の導入（第6章）をおこなってきた。道具や素材の準備は整ってきた。いよいよ実際の適用をおこなのだが、その方法論をまとめておこう。

地質学は過去を扱っていることを述べてきた(第3章4)。過去の事象は、過去に起こつ

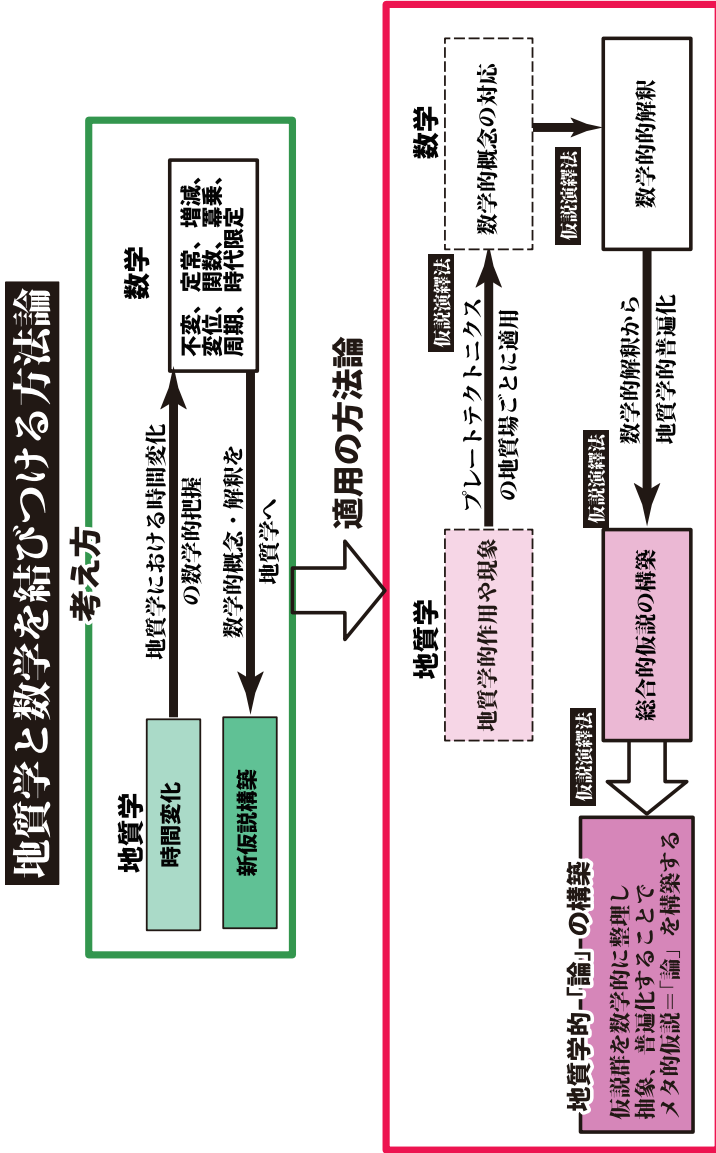


図 7-1 地質学と数学を結びつける方法論
 地質学と数学を結びつける方法論の模式図。上図：本章の考え方を示したもの。下図：考え方を適用するための方法論をまとめたもの。
 詳細は本文を参照。

たもので、そのうち現在まで残っているものが、地質学的証拠（地層や岩石、化石など）として利用される。過去に起こったなんらかの事象で、時間経過に伴って変化した結果が地質学的証拠として記録されることになる。

まず、地質学的に起こる時間変化を数学的概念に変換していく。その数学的概念に対して、数学的解釈を加えて、新たな視点が導入できるものを見出していく。その結果を地質学に適用することで、新しい仮説の構築をめざすという方法論である。

実際に地質学へ適用していくのは、次のような方法論になる（図 7-1）。

プレートテクトニクスにおける重要な地質場（海嶺、沈み込み帯、島弧、大陸）における地質学的作用や現象を整理して、それぞれに数学的概念を導入していく。これは前章でおこなってきた作業である。本章では、その数学的概念を数学的に解釈していくことで、新しい視点を発見していく。その視点を地質学へ適用していく時、従来の総合的仮説の位置づけを確認しながら、総合的仮説（群）を抽象していく。さらに総合的仮説（群）を普遍化することで、より拡大された地質学的「論」（メタ的综合仮説）を構築していくというものである。

b アブダクションと仮説演繹法

地質学における時間変化を数学的に把握していこう（表 7-1）。

地質学的時間変化には、抽象化していくと、大きく定常的変化、変位（移動）、関数的変化、周期的変化、時代限定の変化に区分できる。時間変化しない、不変というものもあるが、証拠には残らないので、ここでは扱わないことにする。関数的変化の中でも、冪乗的变化は自然現象において重要なので区分した。

定常的変化は、増加と減少があるが、それらを単調増加、単調減少と呼ぶ。変位は、物理的移動のことである。関数的変化（積分可能な関数とする）にも増加と減少があり、それらは積分的増加と積分的減少となる。冪乗的变化における増減は、冪乗的增加と冪乗的減少となる。周期的変の増減は、周期的増加と周期的減少になる。また、時代限定の変化は、ある区間の時代での定積分となり、増加と減少がある。

表 7-1 地質学における時間変化の数学的把握

増加	時間変化		減少
定常的变化			
単調増加	← 増加	減少 →	単調減少

変位（移動）			

関数的变化			
積分的増加	← 増加	減少 →	積分的減少

冪乗則的变化			
冪乗則的增加	← 増加	減少 →	冪乗則的減少

周期的变化			
周期的増加	← 増加	減少 →	周期的減少

時代限定变化			
定積分的増加	← 増加	減少 →	定積分的減少

時間変化を区分して、増減などの場合の名称を整理してまとめたもの。本文ではこの名称を用いている。

プレートテクトニクスにおいて重要となるで地質場で、作用や現象を要素還元的に区分し、要素となる作用にどのような数学的概念が導入できるかを考えてきた（表 7-2）。地質学的作用へ適用できそうな数学的概念を示したが、必ずしも関係や規則性が見つかるとは不明である。

だがもし、ある作用で数学的概念の導入したことで、数学で変換、展開などの数学的処理の過程で解釈をすることで、地質学的に未知の仮説が見いだせたとしたら、アブダクションできたことになるだろう。そのアブダクションした仮説を、仮説演繹で検証していくことで、信頼性を確認できるだろう。そのアブダクションが検証できなければ、他の数学的解釈に変更していくことができるだろう。このようなアブダクションと仮説演

表 7-2 プレートテクトニクスの数学的概念のまとめ

地質場	数学的概念	地質学的作用や現象
海洋プレート形成で導入した数学的概念		
	周期的増加 単調減少 積分的増加 積分的増加 周期的増加 変位	プルーム上昇 マントルの枯渇 海洋プレートの形成 (マグマ形成) 海洋底堆積作用 層状チャートの形成 海洋プレートの移動
沈み込み帯で導入した数学的概念		
	周期的変化、積分的増加 積分的増加 積分的減少 定常的变化 積分的減少 周期的増加、 積分的増加 積分的増加 単調変化 積分的増加	半遠洋性堆積作用 海洋プレート層序 構造浸食作用 低温高压変成作用 浸食作用 タービダイト流の発生 タービダイト層 付加体形成 成分添加 島弧火成活動
島弧で導入した数学的概念		
	積分的増加、 積分的増加、 定積分的増加、 積分的増加 積分的増加 積分的増加 積分的増加 定常的变化 定常的变化	付加作用 地震活動 オフィオライト 付加体 連続的付加体形成 島弧火成活動 火山活動 マグマ・ミキシング 変成作用
大陸で導入した数学的概念		
	積分的増加 積分的減少 変位 定積分的増加、 定常的变化 時代限定変化 変位 定積分的増加、 積分的減少 定積分的増加、 定積分的増加 定積分的減少	前縁衝突帯の前弧堆積物 侵食作用 前縁褶曲衝上断層帯 過去の前弧堆積物 高温高压型変成作用 過去の高温高压変成作用 高压変成岩のウエッジ絞り出し オフィオライト 侵食作用 古い大陸 大陸固有の火成作用 過去の構造侵食作用

第6章で整理したプレートテクトニクスで重要な地質場である海洋プレート形成場、沈み込み帯、島弧、大陸で起こっている地質学的作用や現象へ、表 7-1 で整理した数学的把握で示した概念に落とし込んだもの。

釋法を繰り返すことで、新しい仮説を更新しながら精度を上げていくことができるだろう。

数学的概念の導入と数学的解釈という方法論で、未知の地質学的仮説を発見し検証していくための方針となるであろう。そして、より大きな新しい総合的仮説を見出すため、あるいは従来の総合的仮説の統一的理解を導くための手段であろう。

ここで示した方法論は、ある現象を要素還元し、そこに適用可能な数学的概念に変換し、それを仮説発見の指針とするものである。この方法論は、他の分野でも用いることが可能だと考えられる。ただし、仮説演繹法には自然の弁証法的な弱点があることも配慮しておく必要がある。

c. メタ仮説群としての「論」

地質学的作用や現象と数学的概念を 1 : 1 で対応させてきた。検証作業では、このような要素還元的アプローチが重要になる。だが、地球の営みは、もっと大きな視点で見ていくことが必要である。

以下で、プレートテクトニクスを例に、仮説の構造を、その発展してきた方法論と今後の展望を考えていく。

かつては「大陸移動」とされたものが、海域の調査によって「海洋底拡大」（第2章3d）として検証された。海洋底拡大は「海洋プレートの移動」となり、そこから大陸プレートも移動していることが検証された。それらの仮説と検証によって、「プレートテクトニクス」というより総合的な仮説となってきた（第5章2）。

プレートテクトニクスは、多数の仮説が集積し、組み合わせられ、総合化された「メタ的仮説」と考えられる。個々の仮説は、仮説演繹法によってある程度の確かさは保証されている。このような仮説群からなるメタ的仮説を「総合的仮説」と呼ぶことにする。プレートテクトニクスは、総合的仮説として複雑な構造をもっており、全体を検証することは困難ではあるが、重要な総合的仮説になってきた。

プレートテクトニクスを普遍化していくために、空間的拡大をすれば「マントル対流」というメタ的「総合的仮説」になる。「マントル対流」には傍証はいくつかはあるが、

完全に検証されてはいない。対流とは運動形態なので、真の実証は地表部で実測されているプレート運動と同様に、地球内部の運動を実測しなければならない。だが、そのような検証はまだできていない。

複数のメタ的仮説を集めた「メタ的仮説」群からなるメタ的「総合的仮説」の内、数学的解釈ができ、素材が存在し検証可能性を持っているものを、以下では「〇〇論」と呼ぶことにする。少々複雑な構造になるが、高次の階層に位置する仮説を「論」とまとめている。「論」は、時間経過を取り入れた変遷をも考慮に入れることにするので、この点でも階層の上位からの視点を持つことになるだろう。

「海洋プレートの移動」仮説は実測され検証されており、そこから多数の仮説を集めた「プレートテクトニクス」という総合的仮説になっているが、時間経過による変遷も取り入れられているので、「プレートテクトニクス論」と呼ぶべきものとなる。だが、従来から「プレートテクトニクス」と呼ばれているので、本書でも「論」をつけずに呼ぶことにする。

プレートテクトニクスにおいて、「海洋プレートの形成」が、もっとも単純で検証されている仮説である。そこで、海洋プレートの形成場をモデルにして、数学的解釈を取り入れながら、より上位階層の仮説を構築していく方向性を考えていこう。次に、メタ的「総合的仮説」として、「島弧形成論」、「大陸形成論」、「大陸地殻増加論」の3つについて検討を進めていく。

2 海洋プレートの数学的解釈から

ブルームの上昇は周期的増加となり、溶融したマントルは単調減少、海洋プレートの形成（マグマ形成）は積分的増加、海洋底堆積作用は積分的増加、層状チャートの形成は周期的増加、海洋プレートの移動は変位として、各種の数学的概念を導入してきた。

これらの地質学的作用のうち、入手可能な素材として、海洋プレートの最上部を構成している海洋地殻と海洋底堆積物が、多数の地点でのボーリングで入手されている。

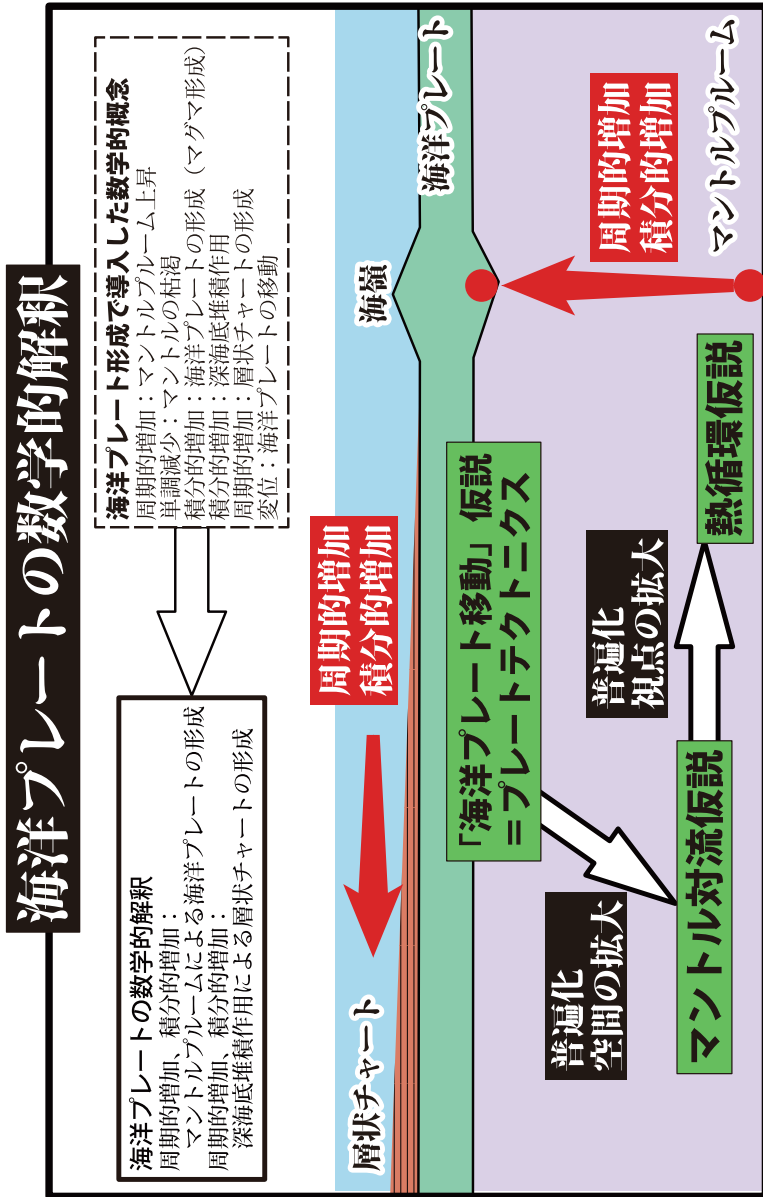


図 7-2 海洋プレートの数学的解釈
海洋プレートでの数学的概念の数学的解釈と、普遍化から導かれる総合的仮説群。

また、現在の海洋底には存在しない古い海洋プレートでも、オフィオライトして陸地に取り込まれ残されているものもあり、検証に利用できる。2つの素材をもとに仮説演繹法が適用できるであろう（図7-2）。

では、これらの数学的概念から、どのような数学的解釈を導けばいいのであろうか。いくつかの試案を提示していこう。

a 数学的解釈の試案

マントルプルームの上昇は、マントル対流の一貫として起こり、1億年から数千万年の周期で起こる活動である。だがプルームの上昇部では、継続的に多くのマグマ供給場が出現することになる。その場が海洋底や大陸地域になり、活動場が点状であれば巨大火成岩岩石区（Large igneous provinces, LIPs）が形成され、線状になれば海洋底ならば海嶺、大陸ならばリフト帯となっていく。全地球的にみれば、プルームの上昇によって海嶺は周期的増加がおこっているとみなせる。また、既存の海嶺がある場では、上昇したプルームによる海洋プレートの形成は継続的に起るため、積分的増加と解釈できる。

一方、海嶺では、中央海嶺玄武岩（Mid-Ocean Ridge Basalt: MORBと略す）マグマの形成が常に起こっているため、単調増加となる。ただし、マグマが形成されたマントルでは、マグマ成分が取り除かれていく（枯渇したマントルと呼ばれる）ことになる。海洋プレートの上部マントルには枯渇したマントル物質が常に伴っていることになる。MORBを形成したマントルでの部分熔融の程度は判明しており、10～30%である。MORBの組成から考えると、マントルの枯渇は一度のことである。もともとのマントル（始原的マントル）から、MORBが海洋プレートの形成として単調増加し、その増分を枯渇したマントルとして単調減少していく。海洋地殻の単調増加は継続的で、時間経過にともなって積分的に増加することになる。

現在の海洋プレートの探査に、オフィオライトを素材にして過去の海洋プレートの地質学的特徴を探ることを連携させれば、過去の海洋プレートの形成過程の変遷をたど

ることが可能となるであろう (Coleman, 1977)。

以上のことから、ブルーム上昇による海洋プレートの形成では、巨視的にみれば周期的増加がおこり、局所的にみれば積分的増加が起こっているとみなせる。これが数学的解釈となっていく。

もうひとつ、試案を提示する。

深海底での堆積作用として、珪質成分は生物の遺骸から形成される珪質粘土と深海底粘土が形成される (小出, 2016a)。珪質粘土は生物の遺骸から形成され、深海底粘土は陸源の砕屑性物質からなる。いずれも定常的に堆積しているはずのものだが、深海底堆積作用では、珪質粘土が圧倒的に多い。層が形成の成因はまた確定していない (小出, 2017a) が、大絶滅により珪質殻の供給が停止することで、深海底粘土のみが堆積することで、層構造ができるという仮説が主流である (小出, 2018a)。

しかし、成因が定まっていないので、見かけ上、珪質粘土の積分的増加と深海底粘土の周期的増加によって層構造が形成され、それが層状チャートになっていくと解釈される。もし海洋底の層状チャートの形成機構が確定され、時間軸がつけられれば、時間記録媒体となってくる。

過去のいろいろな時代の層状チャートが、陸上に断片的ではあるが、付加体として残されている。層状チャートの解析方法が確立されれば、過去の深海底、海洋環境、ひいては地球環境の復元に重要な素材となるであろう。

b 数学的解釈からの展開

ここで示したような地質学的な素材は、数学的解釈ができれば、定式化ができる可能性を持っている。ある地質場の現象が、時間経過とともにどのように変化するかを定式化にできれば、そのモデルを数学的に処理することで、特徴を抽象できる。例えば、時間経過による変化が、時間の方程式や、周期性があったとしたら、その方程式の変化を微分で傾向を探り、積分で集積量を求めたり、周期性をフーリエ解析で離散的の求めることが可能である。

そのような数学的解釈から、地質学的にアブダクションすれば、演繹的に地質現象に適用すれば検証が可能になる。例えば、海洋地殻の形成過程は積分的増加とみなされるが、その増加は海洋プレートの変位に直結している。プレートの変位量は、マントル対流の表層部分の値を示している。これらが定式化できれば検証可能となるだろう。

また、陸上の層状チャートから形成メカニズム（周期性の原因）や堆積速度を求めることができれば、深海底の堆積作用で検証できるだろう。また逆も可能である。時代や地域の異なる層状チャートで仮説演繹を繰り返すことで、信頼性を高めることができるだろう。ただし、いずれも数学的モデルによる処理なので、現実には即した精密な地質学的データによる帰納と、慎重な地質学的演繹による検証が必要になるだろう。

海洋プレートの運動を普遍化して空間の拡大をすることで、もっと巨視的な数学的解釈もできる。マントルプルームの上昇は、上向きのベクトルを持つ。プルームの上昇部が海嶺にあたり、溶融が起こり海洋地殻とともに海洋プレートが形成される。海洋プレートは、海嶺の拡大と沈み込みによる駆動により、海底を水平に移動するベクトルを持つ。沈み込む海洋プレートは、下向きだが斜めの成分をもったベクトルになる。水平成分が後述の沈み込み帯や島弧の応力場を生み出す。沈み込んだスラブは、マントル内の遷移層で一時滞留するが、やがてコールドプルームとなり、下向きのベクトルとなる。その反動でマントルプルームが形成される。これらのベクトルをもったマントル物質の運動像が、「マントル対流」という仮説になる。

「マントル対流」をさらに普遍化し視点を拡大することができる。マントル対流は、地球内部の温かい物質が地球の外に向かって移動し、地球表層で冷された物質が内部に戻るという実態がみえてくる。これは地球内部に蓄えられた熱がマントル対流を通じて、「熱放出」あるいは「熱循環」していると普遍化できる。これが、地球全体での「熱循環」仮説になる。この「熱循環」仮説こそが、プレートテクトニクスの原動力（必然性）となっている。「熱循環」については、あとで検討していく（第8章7）。

3 島弧形成論へ

島弧での数学的概念を数学的解釈をしていく。島弧は、海洋プレートの沈み込みによって駆動される地質現象が起こる場となる。プレートテクトニクスでは、重要な地質場であるが、複雑な作用の集合となるはずである。数学的解釈を通じてどのような総合的な仮説が考えられるかをみていく。

a 島弧への数学的解釈

島弧の作用は、海洋プレートの沈み込みに駆動されて起こっていることは説明してきた（第6章4）。島弧の各種作用は、海洋プレートの沈み込みと必然的な因果関係があることになる。だが、沈み込み帯の特徴と島弧固有の特徴が、複合的に起こる場となり、複雑な因果関係が想定される。

沈み込み帯を特徴づけるものとして、低温高压変成作用がある。これは、海洋プレートの沈み込んだ深度（温度圧力条件）の変化に応じて連続的に変化が進むが、定常的変化となる。

大陸斜面でタービダイト流が発生しタービダイト層が形成される。多くのタービダイト流は、地質学的スケールで見ると周期的に起こる現象となる、ただし、自然現象に由来するので、冪乗則的規模で発生しているはずである。冪乗則的タービダイト流の内、大きなものは海溝を越えて深海底にも達するものもある。タービダイト流による堆積作用は、周期的増加をしながら、その中に冪乗則的増加が加わっていることになる。結果、タービダイト層は積分的増加していくことになる。

海洋プレートの上に堆積した深海底堆積物として層状チャート（前項）、そして島弧に近づくにつれて大きなタービダイト流からもたらされる陸源物質が混じった半遠洋性堆積物が周期的増加として加わり、地質学的時間スケールで見ると積分的増加となっていく。

海洋地殻の上部、層状チャート、そして半遠洋性堆積物の「海洋プレート層序」とタービダイト層が、沈み込みに駆動されて付加体が形成されていく付加作用が起こる。付

加作用は積分的増加となる。

また、沈み込み帯では構造侵食作用が常に起こっており、島弧の活動を考える上で重要な作用となる（第5章4b）。構造侵食作用は継続的に起こっており、積分的減少となる。

付加作用と構造侵食作用が、沈み込み帯での大きな変化となる。両者は積分的増加と積分的減少の相反する関係になる。両者の差が、島弧が成長するか、侵食されていくかを決めていくことになる。構造侵食作用による変化量が関数化できたとした時、その関数の時間ごとの変化、つまり微分した時の係数は「マイナス（減少）」となることを意味している。同様に、付加作用や島弧火成作用の時間ごとの変化の合計は、微分係数が「プラス（増加）」になる。島弧地殻の構造侵食量と島弧地殻形成量における微分係数の合計が、島弧地殻の増減の判定基準となる。合計した微分係数の値がマイナスならば構造侵食作用が優勢となり、島弧地殻形成は抑制されていく。マイナスの値が大きければ、島弧だけでなく過去に形成された島弧地殻や大陸地殻も消滅していくことになる。プラスとなると島弧は成長していくことになる。

島弧地殻形成では、島弧火成作用は沈み込みによる成分添加は微分的変化であるが、成分添加によって起こる火成作用は積分的増加となる。火成作用のうち、観察できる火山活動は、冪乗則的增加も起こる。このような島弧火成作用を中心とした、沈み込みに由来する総合的な仮説として「サブダクションファクトリー」仮説があることが、巽らの一連の研究で明らかになってきた（巽, 1995; 2003; 2004, Tatsumi, 2000; 2005, Tatsumi and Eggins, 1995, Tatsumi and Stern, 2006, Tatsumi and Takahashi, 2006, Tatsumi et al., 1983 など）。沈み込みによってサブダクションファクトリーは駆動されているので、全体として必然的な因果関係が成立している。

また、付加作用と島弧火成作用も沈み込みに関連する作用になるので、時間ごとの変化として両者の間に相関関係が関数化できるとすると、その関係は偏微分方程式になるかもしれない。そうなると、一般解をえるのは難しいかもしれない。条件を限定（地域を限定）して特殊解を求めるか、時間を刻みながらステップごとに逐次計算をするこ

とで解かなければならないだろう。

島弧を特徴づける変成作用として、中圧型広域変成作用があり、活発なマグマの周辺では接触変成作用が、増減には関与しない定常的变化としておこる。また、火成活動や地震活動と関連したタービダイト流の発生は、幕乗則的活動となる。これは前述したタービダイト流の発生へとなる。

b 「沈み込み帯での島弧形成」仮説

島弧での沈み込みに関連する総合的な仮説としてサブダクションファクトリーがあった。サブダクションファクトリー仮説は、現在の島弧の火成作用を説明するものであった。

沈み込みによる圧縮場のため上方向のベクトルが生じることと、島弧の火成作用との両者の効果で、積分的増加の結果として山脈形成が起こる。山脈形成は、造山運動に直結してくる。

火成作用のサブダクションファクトリーに加えて、島弧では、変成作用、堆積作用などが、海洋プレートの沈み込みに連動して起こっている。それらのすべての作用を、時系列で変遷史とした総合的仮説が「太平洋型造山運動」仮説であった。これらすべての作用は、沈み込みに起因して起こっていることになり、さらなる総合的仮説として「沈み込み帯での島弧形成」仮説が出てくる。

「沈み込み帯での島弧形成」仮説を、広い視点で考えていく必要がある。「太平洋型造山運動」仮説では、島弧での造山運動を中心においていた。島弧の各種の作用ごとの時系列での変遷、あるいは造山運動の時系列での変遷も考慮していく必要があるだろう。また、沈み込み帯での海洋プレートの消滅という消失点と、島弧地殻の形成という生成点との両方の性質を併せ持つ特異な場、特異点 (singular point, singularity) となるため、「弧状シンギュラリティ」 (arc singularity) と呼ばれた (小出, 2020c)。運動体、あるいは変化体として、島弧がどのような位置づけになるかの概念として考えたものである。

「沈み込み帯での島弧形成」仮説をより高次の階層で考え、普遍化したものを「島



図 7-3 島弧形成論への数学的解釈
 沈み込み帯と島弧での数学的概念からの数学的解釈、サブダクションファクトリーと太平洋型造山運動の総合的仮説、「沈み込み帯での島弧形成」仮説、それらの普通化から島弧形成論（弧状シンギュラリティ）が導かれる。

弧形成論」と呼ぶことにする（図 7-3）。

島弧形成論の検証として、個々の作用や現象を、関数化することで、計算機シミュレーションをおこなえる。その結果を実際の現象と照らし合わせることで検証できるだろう。また、島弧を構成している岩石の年代測定を多数おこなうことで、地質現象の詳細な時系列変化を追うことができる。これらのいくつかの独立したアプローチでの結果が、一致するかどうかでさらに検証されていくだろう。

4 大陸形成論へ

大陸形成は、複雑な作用によって起り、島弧形成論との関わりも重要になってくる。

a 大陸と島弧の関係

大陸で起こる地質学的作用にもいくつかの数学的概念を導入した（第6章5）。大陸プレートの衝突前から、大陸の侵食作用で積分的減少していく。その堆積物が、衝突前に存在していた海洋に大陸前縁堆積物として形成され、積分的増加をしていく。大陸プレートと島弧プレートとの衝突ならば、前弧堆積物が積分的増加となる。堆積物は、前縁あるいは前縁堆積物（以下、前弧堆積物と呼ぶ）が、褶曲衝上断層帯となり、変化していく。古い時代の前弧堆積物が衝突帯で大陸地殻になっていく時、過去に起こった積分的増加や変化が残存することになる。大陸地殻深部では、高温高圧型の広域変成作用が時代限定の変化として起こる。

これらの数学的概念は、大陸に関する作用を網羅的に羅列したものである。ここから、大陸のプレートテクトニクスにおける位置づけを、数学的解釈を通じて考えていくことになる。

大陸と呼んできたが、プレートテクトニクスでは、大陸プレートに位置づけられる。大陸プレートとは、マントルの上部に大陸地殻を伴ったプレートと定義できる。したがって、大陸プレートの由来は、大陸地殻の形成を伴わなければならない。ところが、大陸地殻の形成は、大陸プレート同士、あるいは大陸プレートと島弧プレートの衝突から、必

然的に導かれるものではない。また、衝突前に起こっていたであろう海洋プレートの沈み込みによる必然性もない。大陸地殻の形成において、なんらかの必然性がある現象や作用、仮説が必要になる。大陸地殻の形成の仮説が提示されて、はじめてプレートテクトニクスが完結することになる。

だがこれはそう単純ではない。なぜなら、大陸地域で、大陸地殻が現在形成されている場がないからである。しかし、前述の島弧形成論に重要なヒントがある。

大陸の火成岩類は、島弧の火成岩類と類似の岩石構成、化学組成をもっていることは、以前から指摘されてきた (Aramaki et al., 1970, Chappell and White, 1974, Takahashi, 1983, 巽, 2003; 2004)。火成岩以外にも島弧地殻と大陸地殻の構成物が比較され、類似性が明らかになってきた (小出, 2020a)。島弧が現在形成されつつある大陸地殻ではないか、というアブダクションが可能であろう。そこから総合的作業仮説として「島弧が形成中の大陸地殻」仮説が考えられる (小出, 2020b)。

島弧と沈み込み帯は、地質学的に因果関係があることが明瞭であった。もし島弧地殻と大陸地殻に、「島弧が形成中の大陸地殻」仮説で因果関係が存在することになると、大陸地殻の形成、あるいは大陸プレートの生成に関しても、必然性があることになってくる。

b 「島弧が形成中の大陸地殻」仮説

大陸にはクラトンと変動帯があった。クラトンは、時代限定の固有の火成作用は起こることはあるが、ほとんど作用は働くことなく、既存の大陸地殻が侵食を受けるだけの場となっている。変動帯は衝突型造山帯として活発な変化が起きているところである。したがって、大陸プレートの特徴を生み出すのは、衝突型造山運動をおこなっている変動帯となる。

衝突型造山運動は前述したように総合的な仮説であった。ふたつの大陸（一方を島弧とする）が衝突するための前提条件として、大陸と島弧の間には海洋域（海洋プレート）が存在したことになる。大陸側では、非活動的大陸縁で接していた大西洋型造山

帯（活動していない）、もしくは海洋プレートが沈み込む陸弧での造山運動（コルディレラ型造山帯）が起こっていたことになる。一方、島弧側では、島弧の形成は沈み込み帯が存在することになるので、太平洋型造山運動が起こっていたはずである。いずれかの側に、海洋プレートを生み出していた海嶺が沈み込むことになると、海嶺が沈み込むと海洋プレートの生成はなくなり、消失だけが進むことになる。海洋プレートの沈み込みが継続すると、海域が狭くなり、やがて大陸地殻と島弧地殻の衝突が起こる。

大陸同士の衝突現象を時間軸にそって系統的にまとめたものが、総合的仮説「衝突型造山運動」になる（丸山ほか，2011）。なお衝突型造山運動では、2つの大陸の衝突の時期のみを扱い、それ以前にあったであろう状態のコルディレラ型造山運動、あるいは太平洋型造山運動などは一緒に扱うことなく、別物として扱われている。

大陸地殻形成の数学的概念を数学的に解釈していこう（図 7-4）。

大陸と大陸（あるいは島弧）の衝突は、時代が限定されているため、定積分的増加となり、高温高压型変成作用は時代限定の変化となる。それらを総合的仮説としてまとめたのが、「衝突型造山運動」となる。衝突型造山運動は、時間経過による運動像になるため、変遷史ともいえるものである。

大陸地殻と島弧地殻の地質学的類似性から、「島弧が形成中の大陸地殻」仮説を、時間で不定積分したものが大陸地殻になるので、それらを普遍化すれば「大陸形成論」となっていく。

プレートテクトニクスからは直接大陸地殻の形成が導き出せないが、衝突型造山運動の過程は、島弧地殻や大陸地殻の存在を前提とすれば（「島弧が形成中の大陸地殻」仮説が正しいという前提）、プレートテクトニクスから必然的に導かれるものになってくる。

島弧地殻の形成過程から、大陸と島弧の衝突へと変遷をしていくとみなしたものが、「衝突型造山運動」となっていく。「衝突型造山運動」も、「大陸形成論」の一部に位置づけられる。

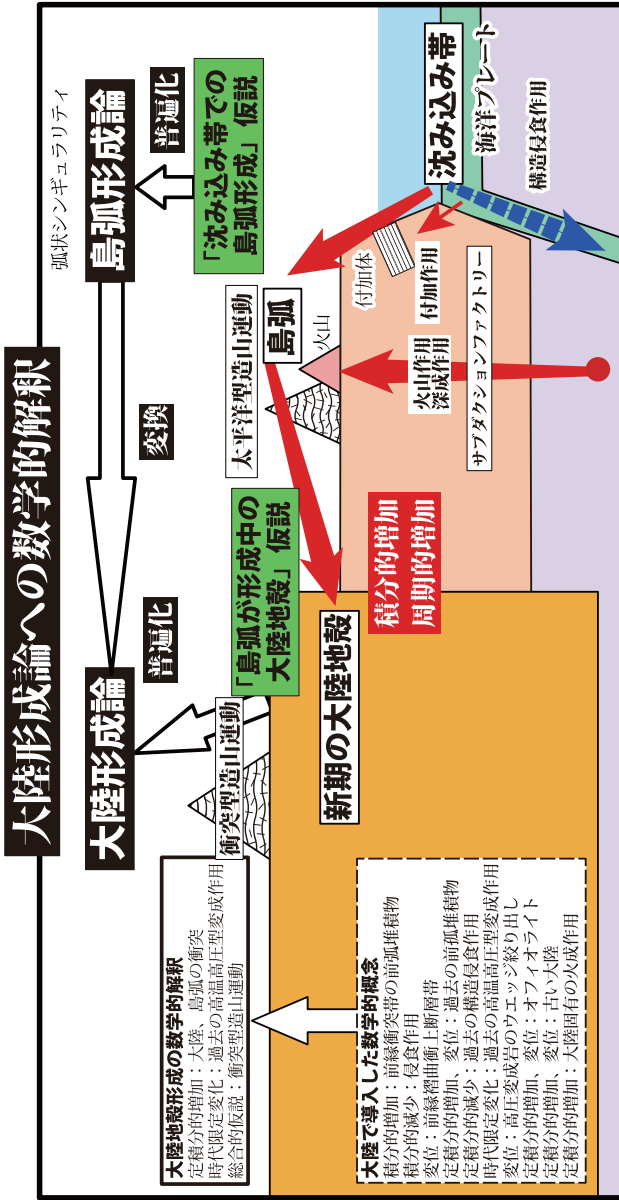


図 7-4 大陸形成論への数学的解釈

大陸の場での数学的概念からの数学的解釈、衝突型総合仮説の総合的仮説、「島弧が形成中の大陸地殻」仮説、それらの普遍化から大陸形成論が導かれる。

5 大陸地殻増加論へ

次に、大陸地殻の形成に関して、時系列の変遷をみていこう。

a 数学的解釈から大陸地殻増加論へ

ここまでの数学的解釈を通じて、総合的な仮説が整理でき、いくつかの論へと展開されてきた。マントル対流が起りプレートテクトニクスが働いている限り、地球のどこかに海洋プレートの沈み込みが起り、島弧が形成される。海洋プレートによる沈み込み帯の形成から「沈み込み帯での島弧形成」仮説が生まれ、それを普遍化した「島弧形成論」には必然性が担保されていた。「島弧形成論」からさらに「島弧が形成中の大陸地殻」仮説がえられ、「大陸形成論」が導出されてきた。そこにも必然性の連鎖が存在していた。

「島弧形成論」から「大陸形成論」までのすべてが、マントル対流から必然的連鎖とみなせた。必然性は、マントル対流が継続する限り、ある時代に「島弧が形成中の大陸地殻」仮説で形成された大陸地殻は、ある時代の衝突型造山運動で定積分的に増加していくと数学的に解釈できる。これらを時系列でみると、メタ的総合的仮説として「大陸地殻増加論」ができる（図 7-5）。

島弧地殻の類似性から、大陸地殻を構成する岩石は島弧火成活動の深成作用で TTG が形成される。TTG は、マントルのカンラン岩より密度が小さく、一旦形成された大陸の岩石は、侵食作用によって積分的減少は起こるが、砕屑物は前縁堆積物として地表に残存することになる。この特徴も、「大陸地殻増加」仮説の傍証となる。大陸形成の仮説群の連環から、島弧での大陸を生成するメカニズムは、最古の大陸地殻の岩石が形成された時代から現在まで、継続的に起こっていることになる。そこから「大陸地殻増加論」がでてくることになる。

b 大陸地殻増加論の仮説検証

「大陸地殻増加論」において、考慮すべきこととして、沈み込み帯での作用の中には、

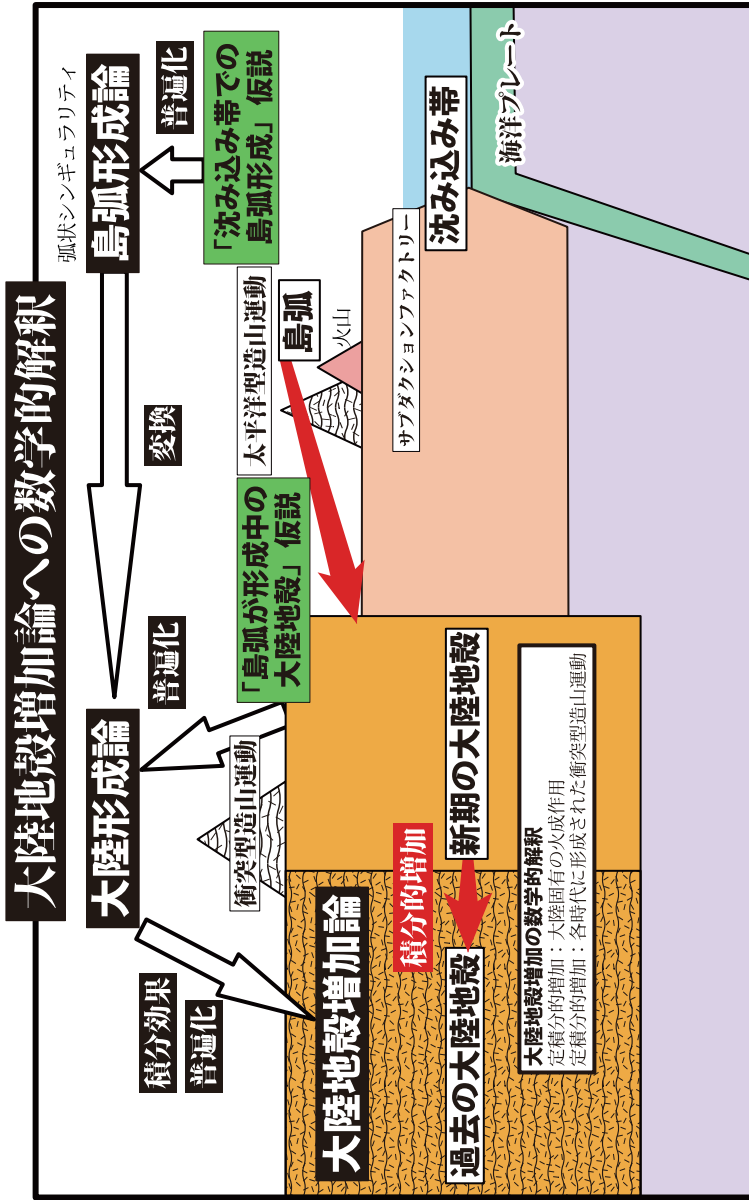


図 7-5 大陸地殻増加論への数学的解釈
大陸での数学的解釈、過去の時系列を考慮した普遍的増加論が導かれる。

積分的減少となる構造浸食作用があった。島弧形成後であっても、減少・消滅の作用が激しく起こることが指摘されている（山本，2010）。「大陸形成論」として、現在の大陸地殻が総体として増加しているのか、それとも減少しているのかの判定が重要になってくる。

構造浸食作用が沈み込み帯で起こることから、弧状シンギュラリティとして島弧形成論を、地域ごと、時代ごとに積分的増加と積分的減少を定量化していくことで重要になってくる。時代ごと、地域ごとに、島弧形成からの大陸の増加の程度と、構造侵食作用による減少の程度を求めて、比較していくことになる。島弧を詳しく調べることで、「現在」の「各地」の係数を決定できるであろう。

「島弧形成論」において、構造侵食作用による変化量の関数を微分した時の係数は「マイナス（減少）」となり、付加作用や島弧火成作用の合計（島弧地殻形成）は微分係数が「プラス（増加）」になる。島弧地殻の構造浸食量と島弧地殻形成量における微分係数の合計が、島弧地殻の増減の判定基準となる。

単純な微分方程式なら解くことができるだろう。もし微分係数がプラスなら島弧地殻が形成され、マイナスならば構造侵食作用が優勢で島弧地殻形成は抑制され、マイナスの値が大きければ、島弧だけでなく過去の大陸地殻も消滅していくことになる。さらに、構造侵食作用と島弧形成の比率（微分係数の合計）の経年変化がわかり、定式化できれば、「大陸形成論」へとつながるであろう。だが付加作用と島弧火成作用も沈み込みに関連することになり、偏微分方程式になる可能性もあるため一般解をえるのは困難かもしれない。

「島弧形成論」から抽象された上記の判定に関する検証は、大陸地殻でおこなうことが可能である。現存する大陸地殻は、これまでの沈み込み帯での構造侵食作用から生き残り、さらに時間経過による積分的減少作用（侵食作用）にも耐えた結果（定積分）である。「島弧が形成中の大陸地殻」仮説が検証できれば、それを時間変化で定積分した値が、時代ごとの大陸量となり、「大陸形成論」となる。そして、不定積分したものが「大陸地殻増加」仮説になるだろう。

表 7-3 テクトニクスの数学的特徴のまとめ

地質場	数学的解釈	地質現象
海洋プレートの数学的解釈		
	周期的増加、積分的増加 周期的増加、積分的増加	マンテルプルームによる海洋プレートの形成 深海底堆積作用による層状チャートの形成
沈み込み帯の数学的解釈		
	定常的变化 周期的増加、冪乗則的增加 積分的減少 積分的増加 積分的増加	低温高压変成作用 タービダイト層 構造浸食作用 付加体形成 島弧火成活動
島弧地殻形成の数学的解釈		
	積分的増加 積分的減少 定常的变化 積分的増加 冪乗則的变化 総合的仮説	島弧マグマの活動 構造侵食作用 変成作用（中圧型広域変成作用、接触変成作用） 付加体 火成活動、地震活動、タービダイト層 太平洋型造山運動、サブダクションファクトリー
大陸地殻形成の数学的解釈		
	定積分的増加 時代限定変化 総合的仮説	大陸、島弧の衝突 過去の高温高压型変成作用 衝突型造山運動
大陸地殻増加の数学的解釈		
	定積分的増加 定積分的増加	大陸固有の火成作用 各時代に形成された衝突型造山運動

プレートテクトニクスにおける沈み込み帯、島弧、大陸の場での数学的概念の導入。

素材の隕石を考えると、もともと地球には大陸地殻は存在せず、地球固有の作用によって形成されたものになる。現在、地球表層の 3 分の 1 に大陸地殻が存在する。42 億年前、あるいは 38 億年前の最古の大陸地殻の形成から現在まで、さまざまな時代の大陸地殻が存在している (Wilde et al., 2001)。大陸の減少か増加を大局的に見ると（二階微分といえるかもしれない）、「増加」していると見なせそうである。大陸地殻が存在することは、島弧地殻の形成量の 45 億年間の積分した値がプラスであったこ

となる。大陸地殻形成の変化量（微分係数）の変動は不明であるが、「大陸地殻増加論」は正しそうに見える。ただこの考え方は「斉一説」に基づくものなので注意が必要だが、このような視点（アブダクション）で仮説演繹していく方法論は可能であろう。

6 さらになる広義のテクトニクスへ

最初に考えた方法論でここまで進めてきたが、最後に総括と今後の展開を示しておこう。まず、テクトニクスの中で重要となったものを地質場ごとに、地質現象と数学的解釈を一覧的にまとめておく（表 7-3）。

a 広義のテクトニクスへ

本章では、検証可能なプレートテクトニクスにおける地質場を中心にみてきた（図 7-6）。そこでは、地質学的作用を数学的概念に対応させ、その概念から数学的解釈を経て、地質学へとフィードバックされてきた。

その結果、プレート運動から必然性をもって「沈み込み帯での島弧地殻形成」仮説、「島弧が形成中の大陸地殻」仮説へと連鎖していった。その過程で「沈み込み帯での島弧地殻形成」仮説は、総合的仮説であるサブダクションファクトリーと太平洋型造山運動を経て、島弧形成論というメタ総合仮説へとなった。「島弧が形成中の大陸地殻」仮説は、総合的仮説である衝突型造山運動を経て、大陸形成論というメタ総合仮説へ、そして大陸地殻増加論と普遍化されていった（図 7-7）。

現在のプレートテクトニクスは、プルームテクトニクスに内在されていたので、プレートテクトニクスの検証はプルームテクトニクスの表層部の検証を担っていた。ここまでの論理体系は、表層現象を中心に組み立てられたものであった。今後、プルームテクトニクスでの深部、そして時系列変化である「変遷」を考慮した体系を考えていかなければならない。

プルームテクトニクスは主流の「パラダイム」になっていたが、さらに視点を広げると、

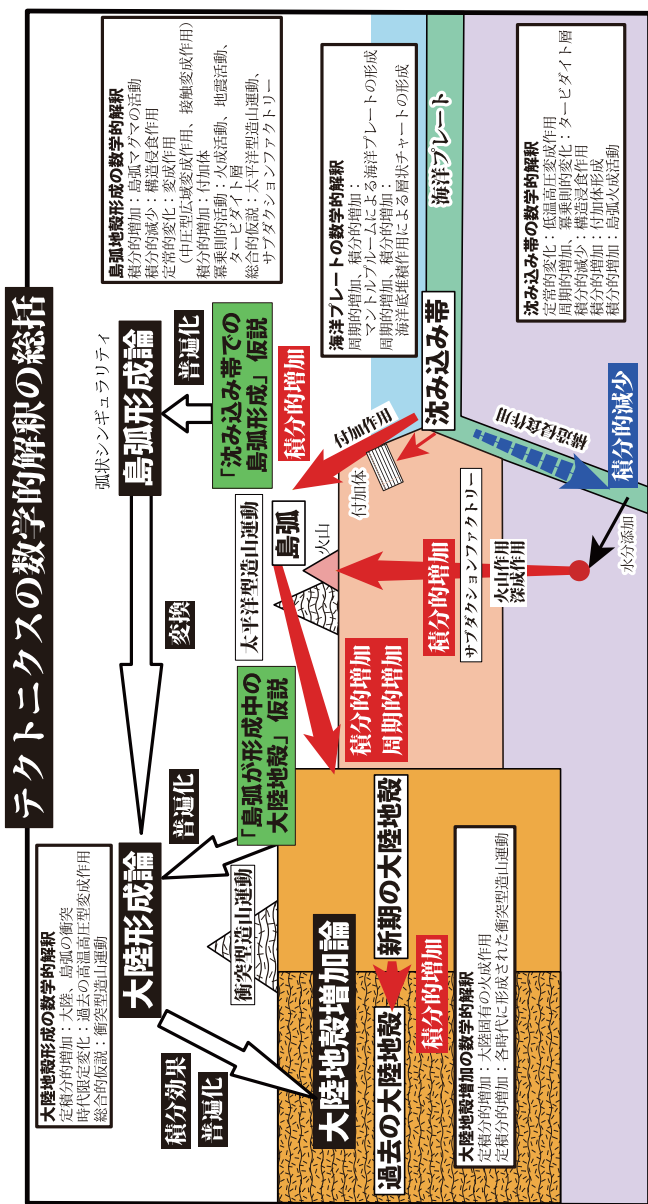


図 7-6 テクトニクスの数学的解釈
 プレートテクトニクスにおける沈み込み帯、島弧、大陸の場での数学的解釈や総合的仮説、「論」をまとめたもの。

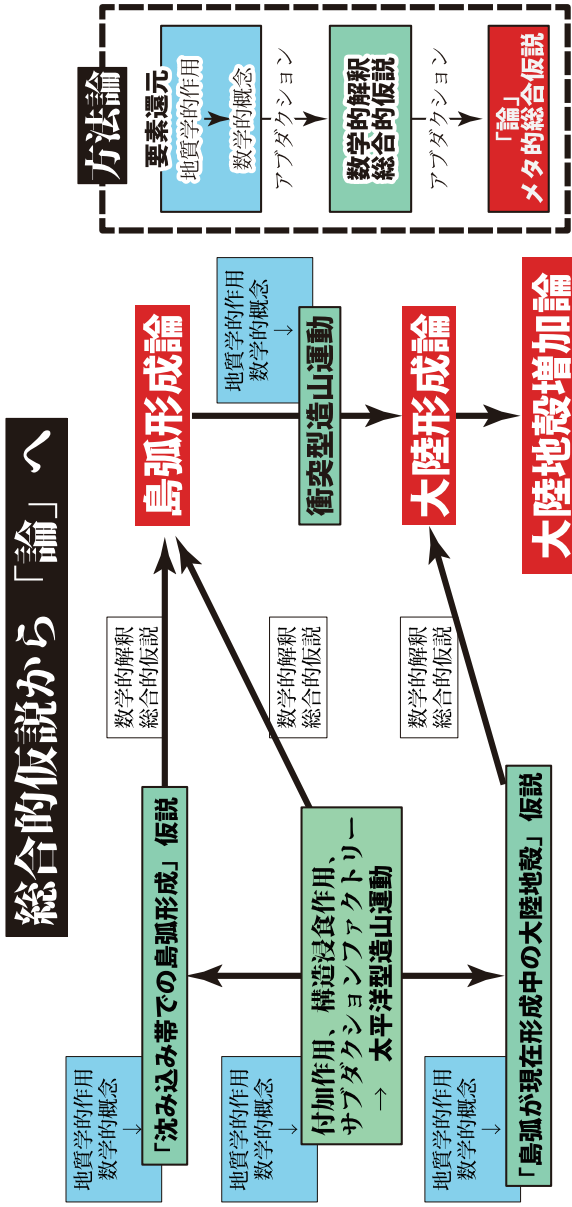


図 7-7 総合的仮説から「論」へ
 本章で展開してきた方法論のまとめ。要素還元主義的手法で地質学のプレートテクトニクスを主とした地質学的作用や数学的概念の抽象からアブダクションとして数学的解釈や総合的仮説を導き、総合的仮説を組み合わせた、さらにアブダクションしたメタ的総合的仮説である「論」に至る論理構成の概要をまとめたもの。

「これまでのテクトニクス」である。これからのテクトニクス、あるいは「広義のテクトニクス」を考えていくには、どうすればいいのであろうか。

これまで示してきた方法論は、利用できるだろう。多数の仮説群や総合的仮説を集積して論を構築するというものである。論は、表層に限定されたものであるが「広義のテクトニクス」の要素となるものであろう。

「広義のテクトニクス」は、表層の論で代表される地球の固体部分の運動論にもどつく総合的モデル（論）と、変遷という時間経過に伴う運動様式の変化も考慮した総合的モデル（論）を併せ持ったものになるであろう。

だが、「広義のテクトニクス」は、固体物質を対象に限定されたものである。この限定を拡大していく必要あるだろう。

地球を構成する物質の相は、固体だけでなく、液体、気体、有機体、また電磁気やプラズマまでである。「さらなる広義のテクトニクス」はそれを考慮すべきであろう。またテクトニクスが営まれる空間（場）は、地球全体（中心核からマントル、地殻、生命、海洋、大気、磁気圏）、あるいは形成場としての惑星空間も含まれるものであろう。また、時間軸は、地球誕生（45億年前）から現在まで、時には地球の形成場として、誕生以前の太陽系（45億年前より以前）から、プレート運動の未来予測などから未来までも伸びるものであろう。

「さらなる広義のテクトニクス」は、地球から生まれた、地球に適用されるものなので、適用範囲が地球（その周辺も含む）の時空間で、多様な物質（物質でないものも含む）が、どう運動し、どう変遷していくのかを総合的に考えていく仮説体系となる。次章以下、もっと拡大したテクトニクスを考えていくことにする。

b 危うさの上のテクトニクス

科学的営為の多くは数学的手法なしには進められないであろう。数学的概念は、抽象化された論理によって構築されているため、他の分野へ容易に適用できる。だが、抽象的概念をどう自然現象へと読み替えるかが重要になってくる。

本章では、数学的概念を地質学へどう導入するかを、テクトニクスを事例にして検討してきた。テクトニクスは多数の仮説から成り立っているため、それぞれの関係や検証方法について、数学的概念の導入が有効であることがわかってきた。だが、それは複雑な仮説群からなる論理構造になっているため、注意も必要であった。

例えば、いくつかの地質現象へ積分の概念を適用したが、その論理的根拠も「斉一説」に基づくことになる。また、過去への適用も論理的根拠はなかった。地質学では過去を扱うために斉一説は必要不可欠の方法論となるが、時間の不可逆性という奸計が潜んでいることに心して利用していく必要があるだろう。この論考自体も虚構かもしれないという危うさを、常に意識しておく必要があるだろう。

斉一説を適用する地質学では、自然現象は熱力学のエントロピー増大の法則による、時間の不可逆性の存在が大きなハンディとなる（第3章5）。だが、地質学は過去の事象の調べる重要な自然科学であり、斉一説の適用は不可欠となる。

地球を熱循環として捉えた（第7章2）が、もし過去に知りえない、なんらかの「相変化」や「状態変化」があれば、そこに斉一説の適用限界が生じていたことになり、誤用の危険性を孕んでいる。例えば、金属核が形成された時期、固体の内核が形成された時期（35億年前から20億年前などさまざま説がある）、マントル対流が2層から現在の1層対流に変化した時期、など地球熱史において大きな相や状態の変化があれば、その時期以前への斉一説の延長は危険である。

以下の章では、斉一説に注意しながらテクトニクスの拡大、普遍化を進めていこう。

▼論より証拠

「論より証拠」とは、「いろはカルタ」の「ろ」の読み札の言葉である。いろいろな論を重ねるよりも、証拠のほうが確かであるという意味だ。世間では、理屈をこねるより、証拠を出すべきだということである。いろはカルタになっているということは、理屈っぽい人への揶揄も込められているのかもしれないだろう。だが、そこには真理もある。「論」を「仮説」とし、「証拠」を「事実」や「データ」などの検証できたり、再現性をもったものだとすれば、科学の世界に当てはまる言葉になるだろう。論・仮説とは、いくつかの証拠からか、アブダクションによって提示される。証拠から帰納した論・仮説は、それなりの説得力をもっているが、演繹的に検証していかなければならない。またアブダクションで出てきた論・仮説は、演繹的に検証することを前提としているため、検証後によりもっともらしさをもった論・仮説となる。論よりも証拠が、やはり重要になるのだろうか。多数の証拠を集めることができれば、正しさを増すことができる。ただし、証拠の中には、たった一つしかないもの、たった一度しか起こらないもの、一瞬しか存在しないものもある。存在の事実を確認できたとしても、それを検証に利用できないことも多々あるだろう。論・仮説を検証するには証拠が必要で、証拠も完全ではない場合もある。また、自然への斉一説の適用には限界があり、論理的には完結できないのである。そんなときは証拠を増やして確かさを増すしかない。その中に一つでも反証が見つかれば、論・仮説は破綻する。このようなハンディを背負っているのが、自然を相手に科学の宿命なのだろうか■



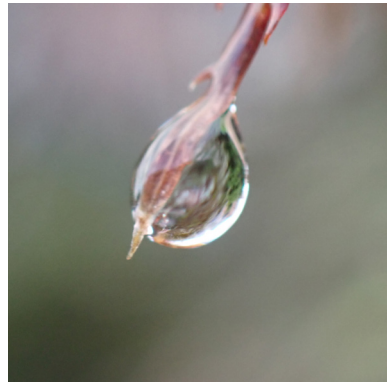
くぐり岩からみた山並み

人工的に開けられた岩の窓から、遠くの山並みが見える。北海道爾志郡乙部町。著者撮影。

第8章

全地球テクトニクス

プレートテクトニクス（一部プルームテクトニクスも含まれていた）というパラダイムに、数学的解釈はアブダクションを導入することで、より普遍化された仮説体系（論とした）が構築できることを示してきた。これはある程度の科学的実証性をもった場で展開されたものであった。だが、地球はもっと大きな存在である。より普遍的なテクトニクスを目指していくために重要な視座を考えていく。



1 これからのテクトニクスへ

地角斜造山運動という陸地でのテクトニクスから、海洋も含むプレートテクトニクスへ、そしてマントルまで含むプルームテクトニクスへと、仮説が更新されるたびに、対象は拡大されてきた。あとから出てきた新しい仮説ほど、より多くの観測事実、より広い対象へ適用できる仮説となってきた。現在のテクトニクスのセントラルドグマ（central dogma）、あるいはパラダイムは、何度か述べてきたように、プレートテクトニクスを内包しているプルームテクトニクスである。ただし、これらの「仮説」は、多数の仮説からなる仮説群を意味し、その中には総合的仮説（例えば、サブダクションファクトリーや、太平洋型造山運動、衝突型造山運動など）もあった。また、前章では数学的概念から数学的解釈を通じてアブダクションすることで、「沈み込み帯での島弧形成」や「島

弧が現在形成中の大陸地殻」などの総合的仮説がアブダクションでき、さらにアブダクションすることでメタ的総合仮説として島弧形成論、大陸形成論、大陸地殻増加論が普遍化されてきた。

だが、これらのプレートテクトニクスから派生した上述の論や、それらを取り込むブルームテクトニクス（論）は、まだ完成したものではない。しかし、もっと広い視野でみていくとどんな世界が見えてくるだろうか。

a 全地球テクトニクスへ

普遍性の大きなテクトニクスとは、プレートテクトニクスやブルームテクトニクスの延長になるのだろうか。どうもそうはなりそうにない。なぜなら、これまでのテクトニクスは固体物質を中心としており、地球全体の多様な物質や相などを網羅しているわけではないからである。すべてを網羅した総体に加えて、それらすべての運動像と変遷史を把握しなければならない(第3章3)。それは、ブルームテクトニクスの延長では考えられず、飛躍的な発想を生み出す視点が必要となるだろう。

その萌芽的モデルとして「全地球ダイナミクス」がある。丸山（1997）は、当時明らかになってきた深部の地震波トモグラフィによるブルームテクトニクスの考えを取り入れ、全地球的視点で「全地球ダイナミクス」を提案した。全地球ダイナミクスは、外核を含むマントルから地殻まで物質の運動像、年代論も組み込んだ変遷史として提示されたものであった。このような考え方は従来のテクトニクスにも存在したが、将来の全地球のテクトニクスを考える上で「全地球ダイナミクス」は参考になる。広域の運動論と、年代論に基づく時系列変化である変遷史という2つの視点は重要となるであろう。

その重要性は、地質学の定義を考えた時（第3章2）、地質学とは「地球の現在の状と、現在までの成り立ちを知ること」から出てきたものである。「地球の現在の状態」とは、構成物の性質や特徴ことで、広く地球科学全体の目標となる。「現在までの成り立ち」とは、変遷、進化、歴史などのことで、地質学の特徴となっていた。

さらに「成り立ち」とは、(1)現在の地球の素材の構成や構造、そして素材間の関

係を知ること、(2) 地球が現在の状態になるまでの構成物のそれぞれの経緯を知ること、の2つの方向性があった。広域に包括的に地球を捉え、素材間の相互作用を探ること、そして地球が現在の状態に至るまでの時間経過に伴う変化としてを探ることであった。相互作用とは、物質の移動を伴うもので、移動を普遍化することで「運動像」となる。時間経過に伴う変化とは、時代ごとに運動像が時系列変化していくことで「変遷史」となる。

「全地球ダイナミクス」では、地球の主構成物、あるいは地質学的素材として、地殻からマントルの岩石を中心にしながらも、外核（液体）も加えられていた。だが、固体物質として岩石を中心にしたテクトニクスであった。地球を総体として見ると、固体物質（固相）以外にも、さまざまな相が存在しているため、多様な相を網羅していく必要がある（小出, 2018b）。

例えば、地球表層には海洋が液相として、大気が気相として存在し、地球表層の環境において重要な役割を果たしている。物質三態（三相とも呼ばれる、固相、液相、気相）以外の相（後述）も存在し、地球では重要な役割を果たしていることがわかってきた。地球は多様な物質の多様な相からなるので、全地球テクトニクスでは、それらを網羅的、総合的に取り込んでいく必要がある。

加えて、地球には物質以外にも地磁気や重力などは、実体がなくても作用を起しており、それらの影響下で物質は運動している。物質が磁気や重力のもとで運動する時には、力やエネルギーが関与している。その結果として、変化や変動が起こる。物質に力やエネルギーが関与すると、物質間で相互作用が起こることもある。

このような物質以外でも、さまざまに関係し合い、作用し合うものも、全地球テクトニクスでは考慮に入れていく必要がある。すべての物質とそれに関与するすべての相互作用での運動像、そして地球史の長い時間での変遷史を、網羅したメタ仮説が「全地球テクトニクス（論は省略する）」となる。

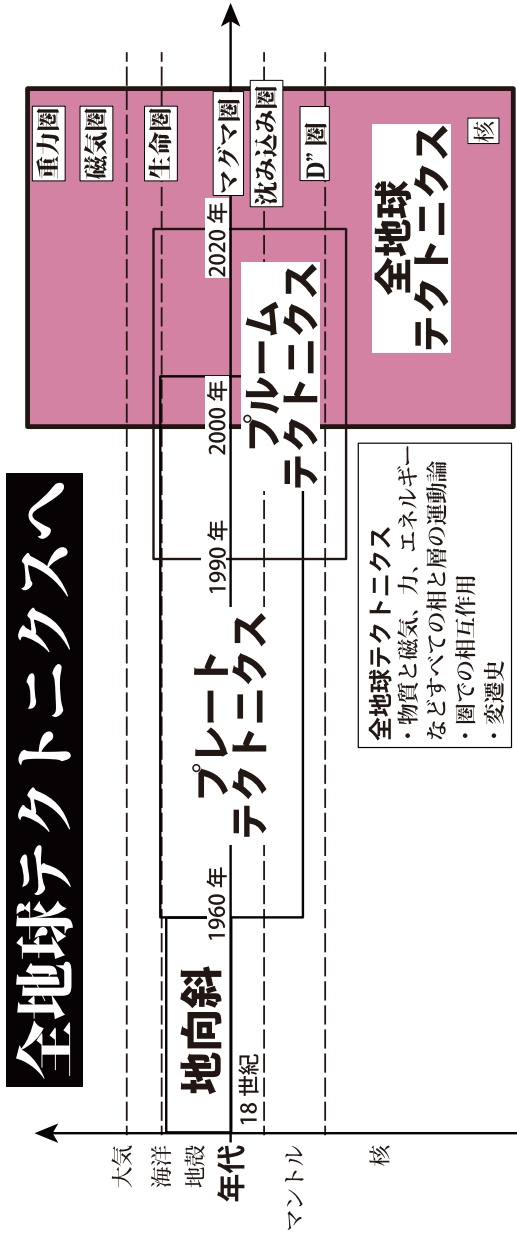


図 8-1 全地球テクトニクスへ

次世代の全地球テクトニクスが目指すべき方向性。モデルのおよんでいる範囲と特徴を示した。縦軸：地球の深度・高度・階層による区分、横軸：モデルが提案された年代。小出（2020a）より。

b 全地球テクトニクスの視座

ブルームテクトニクスは、マントルと地殻の運動像と変遷史を追求しているので、前述したテクトニクスの要件を満たしていた（第5章4）。だが、ブルームテクトニクスが、地球の普遍的なテクトニクスといえないことも述べてきた。以下では、地球全体を対象にするより普遍的な次世代のテクトニクスを「全地球テクトニクス」と呼ぶことにして、考察を進めていく（小出，2020a）。

全地球テクトニクスは、物質だけでなく、熱エネルギーや磁気、重力など地球を構成している非常に多様な「もの」（物質だけではないもの）を含み、なおかつそれらの相互作用、運動像として捉えるものでなければならない（図 8-1）。

では、どのような視点で網羅していくべでであろうか。まず、「全地球ダイナミクス」では固体が中心であったが、全地球テクトニクスでは、すべての物質、ならびに多様な相も網羅していかなければならない。そのため、すべての「相（phase）」を対象にしていくべきであろう。相としては、外側から、プラズマ相、ジェル相、気相、液相、固相に区分できる。

さらに地球の構造として、異なった相の構成物が「層（layer）」をなしていることにも配慮していく必要がある。物質の層は、磁気層、大気層、生命層、海洋層、地殻層、マントル層、外核層、内核層に区分できる。

物質以外の視点（要素）として力や磁力、熱などの相互作用も配慮すべきことも述べた。物質などの境界で相互作用が働く場を、本書では「圏」と呼ぶことにする。圏には、地球重力圏、地球磁気圏、生命圏、マグマ圏、沈み込み圏、D'' 圏があると考えられる（小出，2020a）。

相、層、圏をすべてを取り込んで、運動像や変遷史として把握したものが全地球テクトニクスとなるはずだ。相、層、圏は、それぞれ独立した概念ではあるが、複雑に関係しあっている。

この視座は整理されていないが、網羅的にテクトニクスを考える上で重要になるだろう。

2 相と層の拡大

まず、相と層に分けて見ていくが、その境界や範囲が曖昧だったり、領域が重複していたりするものもあるが、以下で概観していく。

a 相と層

プレートテクトニクスは、主に地殻と上部マントルの固体物質であるプレートの運動もしくは変化で説明されてきた。ブルームテクトニクスは、マントル全体で起こるが、冷たいコールドブルームと温かいマントルブルームという二種の物質による運動像や、運動としての対流が二層から一層への変化という運動像の変遷など、これまでにない視点をもったテクトニクスであった（丸山，1997）。

なお、ブルームテクトニクスは、流動する対流を扱っているが、地殻もマントルもいずれも固体（固相）の状態での運動であった。なお全地球ダイナミクスでは、液相の外核の運動を含めた運動論と変遷史が加えられていた。だがいずれのテクトニクスも、すべての物質状態を網羅してはいなかった。網羅するには、いくつかの視点での拡張が必要になるだろう。

全地球テクトニクスでは、まず物質のこれまでの3つの相、固相（固体）、液相（液体）、気相（気体）に加えて、ジェル相とプラズマ相も新たな相として取り入れた多様な相へと拡大する（図8-2）。

ジェル（gel ゲルとも呼ばれる）相とは、固体と液体の中間の物質状態といえる。均質な物質（分散媒）中に微粒子状の物質（分散質）が均一に分布している状態を分散系（disperse system）といい、混合物をコロイド（colloid）という。コロイドのうち、液体を分散媒とし流動性を失って固化しているものをジェルという。流動性をなくしているので粘性は大きい、液体ほど粘性は小さくない。ジェル相の典型が、生物となる。生物は、ジェル状の有機物を主成分とするジェル相に位置づけられる。

プラズマ（plasma）相は、気体分子がイオンと電子に電離している粒子が運動しているものである。地球では、雷や電離層、オーロラなどの現象がプラズマによるものだ

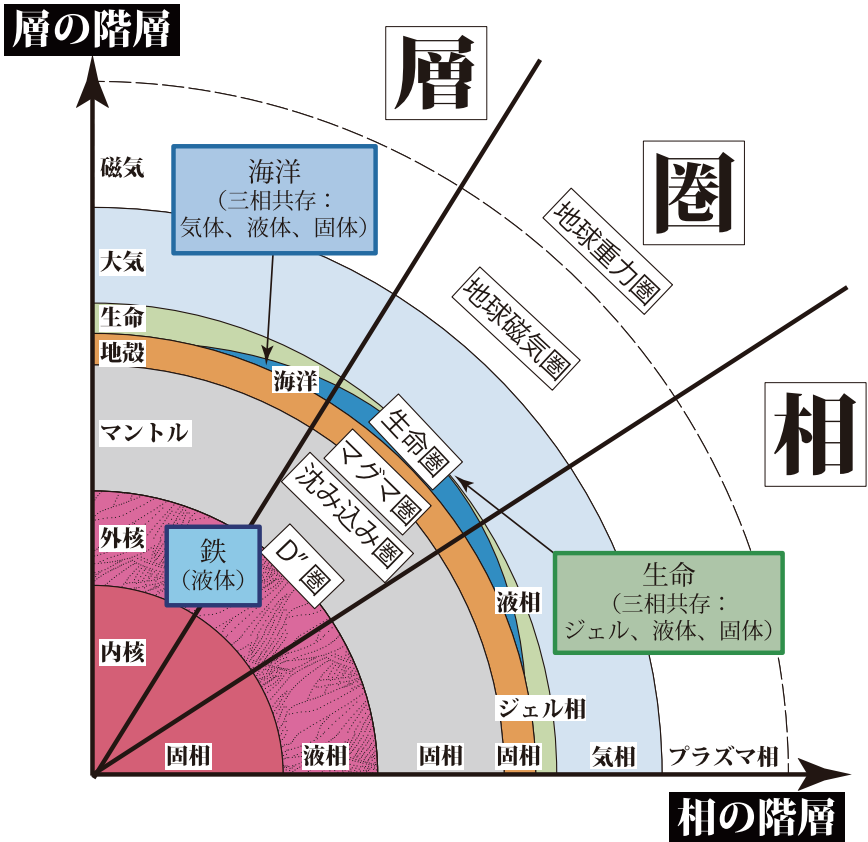


図 8-2 全地球テクトニクスと相と層と圏

全地球テクトニクスに関連する層、相、圏の配列を模式的に示した。地球の層に基づく断面に、相の階層と、関連する圏を示した。小出 (2020a) より。

が、地球の磁場とも関連しており、地球の環境を考える上では重要な役割があるため、プラズマ相として加えることにする。

以上のことから地球を構成する物質の相を網羅すると、

プラズマ相：大気圏からその外側

ジェル相：生物体

気相：大気

液相：外核、マグマ、海洋

固相：内核、マントル、地殻

の5つが存在することになる。

ここで液相としたのは、溶けた金属鉄である外核、 H_2O 液相の主成分とする海洋、さらに特別な条件が出現した地殻やマントルの固相内に珪酸塩溶融体の液相のマグマも加えられる。マグマは、形成される時、移動する時、固化する時に、それぞれ固有の変化が起こる。マグマの変化には、置かれた場所を構成する物質との相互作用も起こり、時間積分の効果により地殻の変化が蓄積されることになる（小出, 2018b）。マグマは液相で、量的には小さいが大きな役割を果たしていることになる。

次にこれらの物質が、地球ではどのような構造をもっているのかを「層」として捉えていく。地球は、内側から内核層、外核層、マントル層、地殻層、海洋層、生命層、大気層という構造（成層構造）をもっている。さらに外側には、物質ではないが、磁気の影響が及んでいる範囲であるので、磁気層とする。磁気は、地球内部の外核の運動に由来し、固体、液体、気体の部分など地球全体に作用し、地球外部にも作用している。

以上のことから、地球の構成物は、外側から、

磁気層：磁気の影響がおよぶプラズマ相から地球内部までのすべての範囲

大気層：気相（空気）が中心となる層

生命層：海洋内または地殻と大気の境界でジェル相が中心となる層

海洋層：液相の H_2O が中心となる層

地殻層：固相の岩石が中心となる層

マントル層：固相の岩石が中心となる層

外核層：液相の金属鉄が中心となる層

内核層：固相の金属鉄が中心となる層

という層構造をなしている。それぞれの層は、細分可能であるが、本論文では言及し

ない。

層は、相にも対応しうるが、異なった概念である。例えば、海洋層は、 H_2O を主成分とする。通常は液相（水）であるが、エネルギー（熱）が加わると気相（水蒸気）になり、エネルギーが奪われると固相（氷）になる。現在の海洋層を見ても、液相だけでなく、熱帯付近では気相を大量に生成しており、極地では凍結して固相になっている。海洋層は、全地球で見ると液相が優勢だが、三相が混在している層とも捉えられる。

外核層や生命層、大気層などにも、同様にいくつもの相が混在している。またマグマの固化する過程でも、三相が混在している（小出，2021）。

地球を大局的に見る場合、相に加えて層の概念の導入も重要となるであろう。

b 関係の拡大：力と熱

物質の相や層の拡大を考えてきたが、それらの関係を拡大すると、何が見えてくるであろうか。まず、層の構造を生み出している成因から、関係の拡大を考えていこう。

地球の層は、密度の大きなものほど重力中心（地球の中心）に位置し、小さいものほど外に位置するという構造になっている。相の違いはあっても、この構造関係は維持されている。構造は、密度の違いに応じて分層しており、重力（引力）によって生じた現象である。それは、物理法則にかなったものになっている。

重力は、物理学では、力（force）と位置づけられ、万物（すべての物質）に普遍的に作用するものである（表 8-1）。力は、古典的な力学の法則で記述されている。

重力に関しては、ニュートン力学として、一般の運動に関して定式化されている。だが、それを媒介するものは、まだ確認されていないが、一般相対性理論から導かれる重力波は確認されており、重力を媒介する粒子として重力子（graviton）が存在すると推定されているが、まだ確認されていない

力には電磁気力も含まれ、電磁気学によって記述される。全地球テクトニクスを考えると、磁気層で示したように磁力も作用を起こすので、検討に加える必要があるだろう。

表 8-1 4つの力の特徴

種類	重力	電磁気力	強い力	弱い力
伝達素粒子	重力子* (graviton)	光子 (photon)	グルーオン (gluon)	ウィークボゾン (W^\pm, Z^0 bozon)
相対的強さ	1	10^{38}	10^{40}	10^{15}
影響範囲 (m)	∞ (距離の2乗に反比例)	∞ (距離の2乗に反比例)	10^{-15}	10^{-18}
作用物質	物質、天体	小さい物質、分子、原子	ハドロン、原子核	中性子、素粒子
事例・現象	公転、銀河形状、 ブラックホール	磁石、モーター、 オーロラ	核融合、 太陽エネルギー	中性子崩壊、原子核崩壊、 ニュートリノ、地熱

*: 想定される素粒子で、2021年現在未発見。

電気と磁気の力の強度は、距離の逆二乗に比例するというクーロンの法則によって定式化されている。その結果、電磁気力として統一的に扱われている。

重力に関しては、ニュートンの古典的力学として、一般の運動であれば、近似的に正しいとされる。電磁気学でもマクスウェル方程式で説明されてきた。だが、研究が進むにつれて、矛盾も見つかってきた。マクスウェル方程式が慣性系によらず成り立つならば、ニュートン力学を修正しなければならず、ニュートン力学が正しいならば電磁気学を修正する必要がでてきた。また、ニュートン力学では、光速に近くなったり、大きな重力下では誤差が生じることもわかった。それらの矛盾を解消するために、相対性理論がアウフヘーベンされたことで、より厳密な解となった。

物理学では、力を相互作用 (interaction) と総称することもあり、そこには原子内で働く強い力 (あるいは強い相互作用、strong interaction) と弱い力 (あるいは弱い相互作用、weak interaction) がある。これら4つが、力として細分されている。

強い力は、クォーク (quark) と呼ばれる素粒子が、陽子や中性子という粒子 (ハドロン粒子と呼ばれる) として閉じ込めるために働いている力のことである。原子核、つまりは万物の基本粒子を成り立たせるために働いている力である。核融合などに関係し太陽エネルギーを発生している。太陽エネルギーは地球へ供給されているため、重要な関係を持つことになる。

弱い力は、放射性核種の崩壊 (核分裂) を起こす働きがある。その作用は、素粒

子などに作用だけであるため、範囲は限定されており、陽子の直径よりも小さい (10^{-18} m) である。ただし、原子核の崩壊は、半減期の長い元素では、長期間エネルギーの供給が起り、地球内部では熱源として重要となっている。

それぞれの力の強さをみていく。重力は質量に比例するため小さいものだが、その及ぶ範囲は距離の 2 乗に反比例して弱くなるが、およぼ範囲は無限である。電磁気力は、重力より 38 桁も強く、そのおよぼ範囲も重力と同様で距離の 2 乗に反比例する。一方、強い力は言葉通りもっとも強いが、およぼ範囲は原子内であるので限定的である。弱い力は、力も弱く、及ぶ範囲も狭い。

4 つの力には、それぞれ特徴があるが、それぞれの力に関係する法則は、明らかにされつつある。電磁力と弱い力は、1967 年にワインバーグ・サラム理論によって統一された。電磁力と弱い力にさらに強い力も加えて統一的に記述しようとする大統一理論 (GUT: grand unification theory) はいくつもの提案はあるが、まだ完成はしていない。

力が物質に作用すると、そこに「仕事」という概念が生じる。「仕事」には「エネルギー」という概念とも深い関わりがある。運動エネルギーや位置エネルギーなどとして力学でも登場しており、それらを統一的に考えるのが、熱力学 (thermodynamics) になる。物質の運動やエネルギーの変化などを考える場合、熱力学は重要な視点である。

ただし、素粒子や原子レベルでの熱力学的記述は困難で、少なくともアボガドロ数 ($6.02214076 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$) 以上の分子で扱うことになる。その時、多数の分子を対象にするので、統計力学的な記述、つまり巨視的にみることになる。そして、平衡状態、もしくは平衡状態間の移行する系を、対象にすることになる。

地球規模で考えると、マントル対流は熱力学的な非平衡状態から平衡状態への移行によると考えられる。海洋プレートによって生じた温度差が重力的不安定を生み出し、コールドプルームが形成される。核とマントル境界で生じた、熱的非平衡状態を解消するために、もっと熱量の多い部分 (高温で密度が小さい) がマントルプルームとして上昇していくことで、平衡状態になろうとする。これがマントル対流で、熱力学的な視点でみた物質運動と捉えられる。

地球において広くテクトニクスを考えるには、相と層の拡大、力やエネルギーなどの関係も拡大していく必要がある。すべてのものに作用して起こる交換や移動して変化や運動とその関係を考えていくことが、全地球テクトニクスになるであろう。

3 術語の整理：定義

ここまで、通常の術語ではあるが、本書で固有の使い方をしてきたものもいくつかでてきた。それらをまず整理しておく。

まず、地質学とテクトニクスの定義をまとめておく。

定義：地質学（再録）

地球の現在の状態（構成物の性質や特徴）と、現在までの成り立ち（変遷、進化、歴史）を知ること

構成要素の層は、異なった相や化学成分をもっており、物理状態も違っている。層境界は、異った物質境界でありながら、相境界、化学的境界、物理的境界ともなる。相境界でも同様のことが起こっている。

境界では、時間が経過すると、物質（成分、元素）やエネルギーが、移動、交換、変化などが起こることになる。境界は異なった物質間で互いに影響を与え合う「相互作用」の場となる。

物理学では、「力」を相互作用と呼ばれることは述べたが、本書で用いる「相互作用」は、力で用いられているものとは異なった概念で用いることにする。

定義：相互作用（interaction）

性質や成分、状態の異なる物質間で、変化や反応が起こすこと

また、相互作用を、地球に適用する時は、次のような意味で用いることにする。

定義：地球における相互作用

属性の異なる物質間で、互いに影響（物質や熱の交換、移動、変化など）を及ぼし合う作用

相互作用によって起こった変化は、当然、時系列で記述されていくことになる。そのようなものを、「変遷史」とする。ここまで、変遷史という術語を用いてきたが、定義しておく。地質学の定義（第3章2）を「地球の現在の状態（構成物の性質や特徴）と、現在までの成り立ち（変遷、進化、歴史）を知ること」とした。また、地質学の目的（第3章3）を、「現在の地球の現状（普遍性）と固有（特異性）の状態を知ること、そして現在の状態になるまでの相互作用による変遷史を知ること」とした。そこから、相互作用による変化を普遍化したものを運動像として、それらが時系列変化していくことを「変遷史」と捉えた。この変遷史がテクトニクスとなる。定義すると、次のようになる。

定義：テクトニクス＝変遷史（tectonic development）

相互作用による運動像（変化の普遍化）の時系列変化

全地球テクトニクスにおいては、さまざまな境界付近で起こる相互作用に着目していくので、「圏（sphere）」という概念を導入した（小出，2018b; 2020a）。「圏」は、「丸く囲み取り巻く」という原意で、対象を取り囲み、対象も含むものとなる。言い換えると、対象とそれを取り巻く周辺領域、あるいは離れていても相互に関係している領域や範囲を意味する。地球科学では、圏という術語は、大気「圏」などとして用いられるが、本書では「層」の意味で用いたものと同等であった。本書では、圏を次のように定義する。

定義：圏（sphere）

対象とその周囲と相互作用を及ぼし合う領域、範囲

4 圏

小出 (2020a) は、圏として、

地球重力圏：物質的実体はないが質量をもった物質間で起こる相互作用

地球磁気圏：外核で発生し地磁気の及ぶ範囲で磁性や電荷をもった物質との相互作用

生命圏：ジェル相からなり海洋、地殻、大気での相互作用

マグマ圏：マントルや地殻の溶融から固化までの相互作用

沈み込み圏：構造侵食や付加作用、大陸形成、マグマ形成での相互作用

D'' 圏：外核とマントルの境界での相互作用

を挙げた。

以下では、それぞれを順に見ていこう。

a 地球重力圏

重力は、地球の全体の物質の影響を受け、互いに影響をおよぼし合う相互作用をしており、「地球重力圏」をつくっている。

地球重力圏は、物質的実体はないが、質量を有するすべての物質に生じ、他の質量をもった物質と相互作用を起こす。重力が長く作用し続けて安定状態に向かうと、密度の大きなものが下（内部）になり、小さなものが上（外部）に並ぶことになる。金属鉄が最も密度が大きく、岩石、水 (H₂O)、大気の順に小さくなり、地球の層構造はその配列をもっている。

なお、生命体（生物）は、水と似た密度を持つ。進化によって水から離れて、陸上や大気中に進出したが、基本的には陸と大気の中に存在している。生命体は、なんらかの形の水が必要で、水の存在する場からは逃れられない。生命体も、重力の働きによって層となっている。

地球重力圏は地球外の天体（太陽や月など）へも影響もおよぼし合っているので、その相互作用の範囲は広い。大きな質量を持つものほど、その影響は大きいですが、距

離が離れるとその影響は急激に小さくなる。地球の重力は、地球の地質現象における重要な要素となる。

b 地球磁気圏

磁気は、地球内部から地球全体、そして地球外にまで広がっている（例えば、行武，1996 など）。磁気の相互作用の及ぶ範囲は、重力と同様に広く「地球磁気圏」と呼ぶ。

磁気は地球の外核で発生し、磁性や電荷をもった物質に影響する。地球磁気圏は、太陽風や銀河風を防ぐ磁気バリアとして働く。磁気バリアが形成されたことにより、生物が海洋から陸上へ進出できるようになってきた。生命圏の変遷に関係していることになる。

また、マグマ中の磁性鉱物は固化時に地球磁気圏の影響下に置かれることで、その時の地磁気（古地磁気）を記録することになる。古い岩石には、古地磁気として過去の地球磁気圏の状態が記録されている。古地磁気を、時系列で読み取ること、地球磁気圏の変化や変遷が復元されている。

地球磁気圏は、物質への相互作用は小さいものだが、地球を特徴づける重要なものとなっている。

c 生命圏

生物は周りの環境の影響を受けながらも、生物活動によって周りの環境に影響を与える。これは、生物が周囲と相互作用していることを意味しており、「生命圏」と呼ぶ。

生命圏は、液相の水（海水や陸水）との相互作用、また気相（大気）の二酸化炭素や酸素を通じて相互作用もしている。生物が形成した大気中の酸素は、上空での光化学反応でオゾン（ O_3 ）ができオゾン層を形成する。オゾン層は紫外線を遮るバリアの働きをしている。オゾン層による紫外線の遮蔽も、磁気バリアの形成とともに、生物の陸上進出に重要な働きを果たしている。生物が陸上へ進出すると、固相の地殻と相互作用をして土壌が形成される。

生命活動による必要な成分の吸収、排泄、組織形成など、生物固有の成分の移動が起こる。個々の生物体が、単体でおこなう成分の再配分はささやかな量ではあるが、生命圏という大きなくりでみると、多くの物質が再配分されていることになる。そのため、地球史的時間の流れでみると、生命圏は生命層形成として地球史上重要な役割を果たしていることになる。

d マグマ圏

マグマ圏は、マグマが形成されてから固化するまでの間に起こる相互作用である。マントルや地殻が溶融してマグマができ、マグマと固体物質の密度差から上昇し、周囲の岩石からの冷却で固化するまでの過程である（藤井、2003）。その間、地殻や海洋、大気へ成分が再配分されていく。

マグマ圏では、起源物質の違いや地質場の違いを反映した溶融過程と、マグマと残留物との間で成分の再配分が起こる。マグマの移動過程、固化して地殻となる時にも、結晶間、結晶とマグマ間で、成分の再配分が起こる。マグマ圏は、マントルや地殻において多様な相互作用が起こり、大きな役割を果たしている（小出，2014b; 2015b; 2016c; 2017b; 2018b）。

マグマ形成場は、溶融する条件を満たした地質場で小規模に存在しているため、定まった領域に、恒常的に存在するものではない。形成されるマグマのサイズと比べると、移動距離は大きい。マグマの移動速度は、プレート運動と比べると数桁速い。

マグマ圏は、空間的、量的にはマントルブルームと比べても数桁小さいが、各地でマグマは繰り返し形成される。量は少ないが一定量のマグマが限定された地域で形成され、一定期間のマグマの活動（火成作用）が起こっている（藤井，2003）。個々のマグマ形成量は少ないが、時間的積分効果が働き、成分の再配分としては大きくなっていく。

造山運動（第7章）では、一定の期間、頻繁に相互作用が起こる。沈み込みが起こっている場では、常に島弧火成作用が起こりマグマ圏が形成される。このマグマ圏は、

沈み込み圏とも関連している。大陸地殻は、地球内部のマグマに入りやすい元素・成分が集積する作用とも捉えられ、地球の時間経過とともに、この効果は蓄積され積分されていく。マグマ圏での化学的な分化は運動論として普遍化され、大陸形成がマグマ圏の積分的効果となるため変遷史としても普遍化されていく必要がある。

e 沈み込み圏

プレートテクトニクス、あるいはブルームテクトニクスにおいて、海洋プレートの沈み込む地域（沈み込み帯）は、激しい地質活動が起こるところである。海洋プレートの沈み込みに伴って、構造侵食作用や付加作用、大陸形成、マグマ形成などの作用が起こる。それらの作用に伴って、各種の相互作用が起こる（小出, 2012; 2013a; 2014b; 2019a; 2019c）。沈み込み帯は、地球表層の重要な相互作用の場で、「沈み込み圏」になる。

沈み込み圏は、火成作用の激しい場であるので、マグマ圏を含んでいる。しかし火成作用は、沈み込み帯以外の場（海嶺、海台、海山・海洋島、リフト帯など）で、さまざまな性質のものが、さまざまな量で、いろいろな時代に起こっているため、沈み込み圏のマグマ圏は、全マグマ圏の一部に過ぎない。

沈み込み圏では、沈み込みに伴って、深海底堆積物や海洋地殻の付加作用が起こり島弧地殻の形成という成分の再配分が起こる（小出, 2020c）。構造侵食作用が起こっていれば、スラブとともに島弧物質も加わったメガリスがマントル内で成長し、成分の再配分が加速される。

海洋プレート由来のスラブを介して、島弧下のマントルへ流体相の添加が起こり、マントルが溶融しマグマが形成される（小出, 2016c）。その時、マグマ圏として成分の再配分が起こる。マグマが上昇し固化するマグマ圏としての過程で、島弧地殻や大気へ成分の再配分が起こる。沈み込み圏で形成されるマグマは、島弧固有の成分を含むことになる。

沈み込むスラブがメガリスを形成し、やがてコールドブルームとして下降流となる。沈

み込み圏はマントル対流による成分再配分において、重要な役割を果たしている。

沈み込み帯では構造侵食作用の重要性を認識されてきた（第5章4b）ので、相互作用の結果の消滅も起こっていることも考慮に入れる必要がある。そのため、沈み込み圏の相互作用を、より広域に普遍化した「太平洋型造山運動」が提唱された。沈み込み圏を、太平洋型造山運動として総合的な運動論、そして変遷史を解明していくことになる。

f D'' 圏

外核と下部マントルの境界に、D'' と呼ばれる層がある。D'' の存在は地震学的に確認されているが、その由来や地球内部での役割は、必ずしも明らかになっているわけではない。しかし、仮説としては、コールドプルーム（スラブあるいはメガリス）が「冷たい D'' 」の由来で、密度が小さく温度の高い「暖かい D'' 」がマントルプルームを形成するのではないかと考えられている（田中，2018）。まだ確定はしていないが、冷たい D'' は核を冷まし、外核の対流の要因になっている、暖かい D'' は核から密度の小さい成分が吐き出されているなど、多様な相互作用をしている可能性がある。

マントルと核との相互作用を仲介している存在（市川・土屋，2018）として「D'' 圏」を考える。D'' 圏は、外核とマントルの境界に存在し、複雑な相互作用をするものである。メガリスが落下してマントル-核境界で冷たい D'' になり、D'' 圏となる。スラブには海洋地殻や海洋底堆積物など、地球表層の成分も含まれており、核や最下部マントルに再配分されることになる（Yoneda et al., 2014）。

また、液体の外核に親和性のない成分（親石元素など）が核から出てきたものが暖かい D'' となり、D'' 圏になっていく。やがて何らかのきっかけで、マントルプルームとして上昇していくことになる（末次，2018）。マントルプルームは、プレート上に海嶺や海山列や巨大海台などをマグマから形成し、成分の再配分をしてマグマ圏となっている。

D'' 圏は由来の異なる 2 種があり、その相互作用も異なったものとなっている。

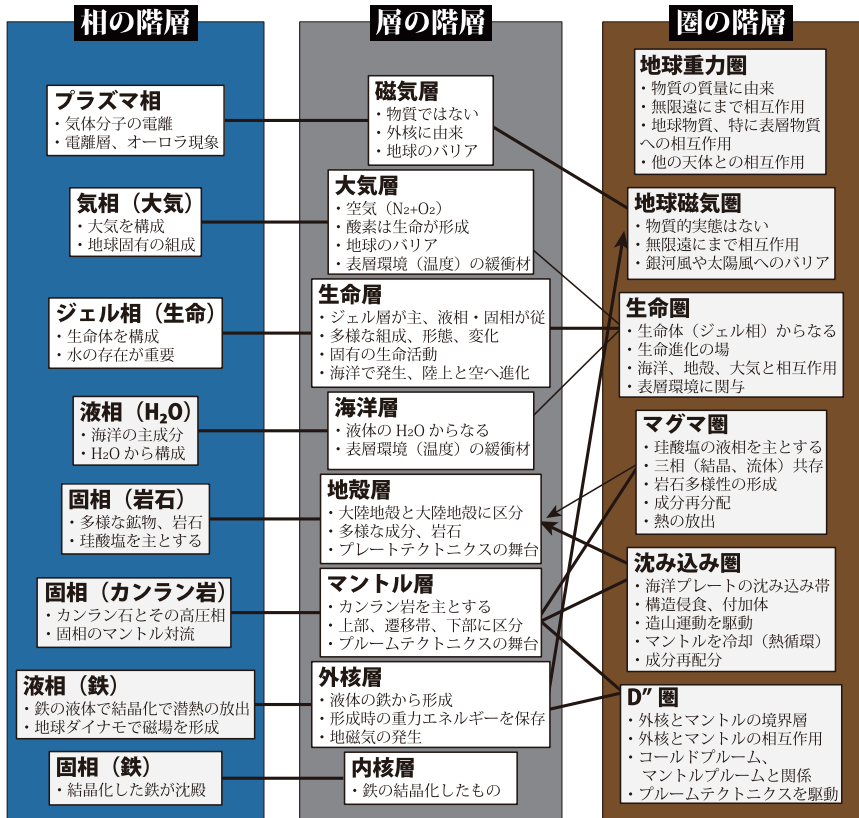


図 8-3 層と相と圏の関係

層と相と圏の階層ごとの特徴と、階層間の相関関係を示したもの。強い相関を太く、弱い相関を細くした。矢印は相関関係の方向を示す。

生命圏、マグマ圏、沈み込み圏、D" 圏では、成分が一方方向への移動や相互の成分交換など、多様な再配分が起こっている。個々の成分のやり取りの量は微量のものも多いが、長い時間経過による積分的効果で、地球において有意な成分の再配分が起こる。このような変遷史も追跡していく必要もあるだろう。

5 全地球テクトニクスの視点1：成分再配分

本章では全地球テクトニクスを考えるにあたり、相、層、そして相互作用をする場として圏を考えた。それらの区分は、地球全体を捉えるために用いたものであった。では、このような相、層、圏という概念から、より普遍的な視座がえられるのか、検討していこう。

a 層と相と圏の複雑な関係

相と層は1:1の対応関係があったが、6つ圏は層や相、他の圏と複雑な相互作用をしているため、対応関係も複雑になる(図8-3)。

例えば、D''圏は、液相の鉄の外核と固相の岩石からなるマンテルの相境界にあたり、金属鉄からなる外核と珪酸化合物の岩石からなるマンテルの化学的違い、物性の異なった層境界となり、両境界で起こる相互作用も固有のものになっているであろう。

ブルームテクトニクスにおいては、沈み込んだ海洋プレートがスラブとなり、マンテル遷移層でメガリスになったものが、下部マンテル中を落下したコールドブルームが起源となる冷たいD''が形成される。冷たいD''によって外核が冷却されることで、外核内での対流の下降流が形成されるであろう。

外核内の液相で下降流で対流が起こると、上昇流もどこかに形成され、そこでは鉄に溶け込みにくい成分が、マンテルに接することで固化し、マンテルの固相の一部になっていこう。マンテルで外核由来の成分が多いところ(暖かいD'')が形成される。そこが次のマンテルブルームの発生候補となる。

地震波でD''の存在は明らかにされ、D''圏の形成機構は、シミュレーションによって推定されているが、D''圏の実態は、実測されていないため、検証はされていない。

未解決の課題を、以下羅列する。冷たいD''は、本当にコールドブルームに由来しているのか。スラブとの質量バランスは合っているのか。どのようなスラブがメガリスになるのか。メガリスの間欠的落下が本当にマンテル対流となりえるのか。冷たいD''が外核におよぼす影響の実態は解明できるのか。コールドブルームは落下後、どのような

変化をするのか。暖かい D'' と冷たい D'' とは、どういう関係があるのか。冷たい D'' はやがて暖かい D'' になるのか。外核から D'' やマントルに本当に成分が移動しているのか。どのようなタイミングで、どの暖かい D'' が上昇するのか。本当に暖かい D'' がマントルプルームになっていくのか。コールドプルームとマントルプルームの形成タイミングが一致するのか。両者の質量バランスはあっているのか。マントルプルームの移動経路や速度、時間変化はどのようなものなのか。このように、いろいろと課題も多い。また、他の圏の相互作用に関しても、全貌はまだ十分解明されておらず、今後も検討を進めていく必要があるだろう。

対象となる構成物の層と相が、どのような関連があるかを、圏の実態として見極め、その関連を普遍的に説明していく必要がある。ここでは、D'' 圏を例に用いてきたが、他の圏でも、解明できていない相互作用も多い。だが、「圏」という視点でみていくことは、全地球テクトニクスにおいては重要となるであろう。

b 成分の再配分

プレートテクトニクスは、表層のプレートの運動が実測されることで検証され、プレートの境界での各種の地質学的事実も説明され、固体地球表層の一般的なモデルになった。プルームテクトニクスでは、地震波トモグラフィによるマントルの温度差の分布から、いち時間断面と見なせば、マントル対流を推定することが可能となった。コールドプルームが落下し冷たい D'' になり、暖かい D'' がマントルプルームとして上昇し、表層では海嶺でプレートが形成され、移動し、海溝で沈み込みスラブとなる。これがマントル対流（総合仮説）となる。

プレートテクトニクスを含むプルームテクトニクスは、マントル対流が温度差のマントル物質が循環しているという運動像（メタ的総合仮説）が生まれ、そこからプレートテクトニクスという地表部分のみでだが検証性のある変遷史（メタ的総合仮説）ができてきた。

プレート運動やマントル対流による物質移動、あるいは物質循環が起こることで、相境界や層境界で相互作用が起こる。圏は、相互作用の起こる場を地質学的を限定し

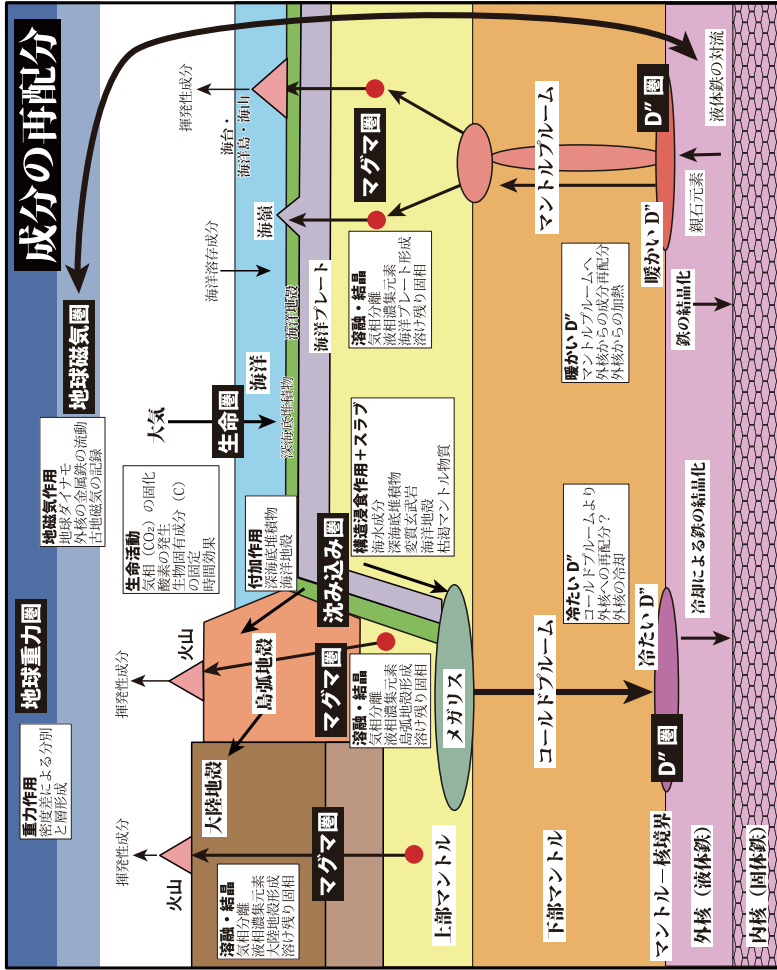


図 8-4 成分の再配分
 全地球テクトニクスにおける成分の再配分を、圏を中心とした地球断面でまとめた模式図。

たもので、境界を移動する物質や成分は、再配分されていくことになる（図 8-4）。相互作用による成分の移動を、全地球的に捉えたとき、相や層における成分の再配分が見えてくる（小出，1992）。

成分とは、元素やイオン、あるいは分子として、物質間を相互作用で移動していくもので、地球化学的に重要なもので、かおかつ検出可能なものに限られる。

地球重力圏と地球磁気圏では、相互作用は起こっているが、大きな成分の再配分は起こさない。

地球重力圏として、質量をもった物質は、すべてに重力の法則に基づいた挙動をすることになる。他の天体との相互作用も重力の相互作用である。地球内でも、物質の密度差による分別が起り、地球の層を形成した原動力になっている。

地球磁気圏は、電荷や磁力をもった粒子は、イオンや分子のレベルでは電磁気力に基づいた挙動をとることになる。小さなサイズで変化だが、古地磁気は、過去のプレート運動を探るために重要な証拠となっていた。また、地磁気は地球のもっとも外側で、銀河風や太陽風などをさえぎるバリアとしての役割もあった（本章4b）。地球の磁気は外核の液体の鉄が、対流にて運動するために起こる「地球ダイナモ」によって駆動されている。地球深部の運動と地球の最外部が連動していることになる。

成分の再配分で強い影響力をもった圏は、生命圏、マグマ圏、沈み込み圏、D'' 圏である。以下で、それぞれを概観していく。

c 生命圏

生命圏では、生命活動によって成分が移動する。呼吸に必要な成分の酸素と排出される二酸化炭素、また光合成に使われる二酸化炭素と水と放出される酸素、光合成の結果として生成される糖類が成分となる。また、生体を構成している部分である有機物を主とするが、他にも炭酸カルシウムやリン酸カルシウムなど固体物質もある。これらは、生物総体として一定の量が存在するが、成分は生命圏を循環している。

だが、生物の体を構成していた有機物や炭素は炭化物（石墨、石炭、石油、天然

ガス)、殻や骨、歯の炭酸カルシウムや二酸化ケイ素は石灰岩やチャートなど生命体に蓄積された成分が堆積することで、循環から外れることになる。個々の生物の固体における再配分量はささやかではあるが、生命圏という大きな領域でみると、生物固有の成分が固体として残存し、再配分されていることになる。堆積した固体成分は付加作用で陸地に保存されてきた。そこに時間の積分効果も加わるので、層の化学的性質を変更することもある。

例えば、大気中の酸素や二酸化炭素の量は時間的に大きく変化し、大気層の成分を変化させてきた。地球の表層環境の変化において、重要な役割を果たしている。

d マグマ圏

マグマ圏は、岩石の熔融条件が生じた地質場であれば、各地で形成される。地質学的場として、沈み込み圏でもある島弧、大陸地域のリフト帯、大陸固有の火成作用の場、海嶺、海洋島・海山（ホットスポットと呼ばれるもの）、また巨大火成岩岩石区（LIPs）と呼ばれるところがある。

LIPs は、大陸地域では洪水玄武岩（エチオピア高原、コロンビア川台地、シベリア台地玄武岩、パラナ玄武岩、デカントラップ、カルー玄武岩、ブラジル・ナミビア、北大西洋 LIP など）や大規模な貫入岩（マッケンジー貫入岩脈、ロングレンジ岩脈群、ミスタシニ岩脈群、マタチェワソ岩脈群など）があり、海洋地域では海台（オントンジャワ海台、シャツキー海台、ケルゲレン海台、カリブ海 LIP など）がある。地質場ごとに、それぞれ特徴的なマグマが形成され、微量成分ではあるが固有の特徴が見いだされている。

海嶺、リフト帯、LIPs、あるいは長期におよぶホットスポット活動（ハワイー天皇海山列など）は、マントルブルームの上昇によって長期間、大規模なマグマ圏が形成される。また、島弧ではプレートテクトニクスによって沈み込みが必然的に起こることになるため、定常的なマグマ圏が形成される。

マグマ圏では、成分の再分配の過程として、マントルか地殻かなどの起源物質の違

い（小出，1992）、島弧か海洋か大陸かなどの地質学的場の違いによってマグマの成分に違いが生じる。また同質のマグマであっても、上昇移動過程やマグマ混合過程、結晶過程の条件の違いによって成分の再配分が起こる（小出，2014b, 2018b）。マグマ圏での成分の再配分の程度は、起源物質とマグマ間、マグマと鉱物間、鉱物と鉱物間、マグマと流体（高温高压での気相と液相の合わせたもの）間、マグマと気相間で、多くの元素で分配係数が実測されてきたので、その定量的扱いが可能になってきた。

マントルプルームによる海嶺や LIPs は、規模も大きく継続時間も長いいため、成分の再配分も多くなる、それらと比べて、ホットスポットや島弧、大陸固有の火成作用は、規模も継続時間も短い。島弧の花崗岩を形成するメカニズムは、大陸地殻の形成に関わっているため重要である（第7章4）。また、海洋島のアルカリ成分に富んだマグマ、大陸地域の炭素成分に富んだマグマなどは、液相に濃集しやすい成分や元素の再配分を起こす。

マグマ圏は、マントルや地殻における成分の再配分において、大きな役割を果たしている（小出，2015b; 2016c; 2017b; 2018b）。

e 沈み込み圏

沈み込み圏では、沈み込みに伴って、深海底堆積物や海洋地殻の海洋プレート層序の付加作用がおこり、島弧地殻の形成（第7章3）によって成分の再配分が起こる（小出，2019c）。また、スラブとともに定常的に起こっている構造浸食作用により島弧物質、海洋プレート層序、また枯渇したマントル物質も加わりメガリスが成長し、マントル内へ表層成分が運ばれ再配分が起こる。メガリスが、やがてコールドプルームとして下降流となり、核とマントル境界で D^g を形成する。沈み込み圏はマントル対流の下降流として成分再配分において、重要な役割を果たしている。

一方、海洋プレートから流体相が絞り出されて、島弧下のマントルへ添加が起こり、融点降下でマグマが形成される（小出，2018b）。その時、マグマ圏が形成され成分の再配分が起こる。また、マグマの上昇し固化するマグマ圏としての過程で、島弧地

殻や大気へ成分の再配分が起こる。沈み込み圏で形成されるマグマは、島弧固有の成分を含むことになる。

f D'' 圏

マントル核境界にメガリスが落ち込むと、冷たい D'' が D'' 圏となる。スラブには海洋地殻や海洋底堆積物など、地球表層の成分も含まれているため、核や最下部マントルに、成分が再配分されていくことになっていく（鈴木ほか，2017, Yoneda et al., 2014）。

また、外核の液体鉄と親和性のない成分として残っているとされる水素やケイ素などの親石元素は、鉄と比べれば軽いので、上部に移動しやすい。対流により上部にもたらされたそれらの成分は、マントル最下部の岩石内で固化することで、D'' 圏が形成される。それは温たかい D'' となる。温たかい D'' は冷たい D'' がより密度が小さいため、なんらかのきっかけ（コールドブルームの落下など）があると、マントルブルームとして上昇していくことになる。マントルブルームは、プレート上に海嶺や海山列や巨大海台などをマグマで形成し成分の再配分をし、別のマグマ圏を形成する。

生命圏、マグマ圏、沈み込み圏、D'' 圏では、一方向への成分移動だけでなく、他の層と相互作用なので成分交換など、多様な再配分が起こっている。今後は、これらの再配分を定量的に推定していくが必要になるであろう。

6 全地球テクトニクスの視点2：熱放出

成分の再配分において、重要となっていたのは、マントル対流であった。マントル対流の原動力は、これまで議論してこなかった。原動力について考えていこう。

a 熱エネルギーという視点

マントル対流は 物質の移動であるので、そこにはエネルギーが関与している。地球

内部のエネルギーがマントル対流によってゆっくりと移動している。物質の運動のエネルギーは、熱から由来している。まずは、熱について把握しておこう。

熱力学の法則

熱は、エネルギーのひとつの形態ではあるが、移動・伝達するという特徴がある。熱は、物質的実体を持たないで、エネルギー量（熱量）に差がある場合のみ、多いところ（高温）から低いところへ移動する。その規則性は熱力学で示され、3つの基本的法則があり、微視的粒子の運動は統計力学によって理論づけられている。

第1法則は、系のエネルギーの総和は不変であるという「エネルギー保存の原理」で、無からエネルギーをつくり出すことはできない（第1種の永久機関が不可能）。第2法則は、熱現象の不可逆性を示すもので、「エントロピー増大の原理」とも呼ばれている。熱源から熱を使い仕事に変え、さらに熱に戻すことはできない（第2種の永久機関は不可能）。その関係をエントロピーによって定量化されている。第3法則は、第1法則と第2法則から導かれる。定量化するためには、温度が絶対零度（0 K）に近づくとき、物体のもつエントロピーは0になる（ネルンストの熱定理）という前提を定めれば成立する。ただし、有限回数では絶対零度に到達することはできない（ネルンスト-プランクの定理）。

第2法則で熱の移動方向は定めたが、移動しない状態を熱平衡状態とする第0法則と呼ばれるものもある。これにより温度（経験的溫度）が定義できる。温度の定義は、少々難解である。例えば、3つの物体が存在した時、関係の既知の2つ同士が平衡ならば、関係の未知の2つも平衡であるというものである。 $A = B$ および $B = C$ ならば $A = C$ という単純な論法である。ここから、Bを温度計とすると、BによってAとCとの熱平衡から温度が測れることになり、温度が定義できる。

熱の移動

熱の移動には3原則があり、対流、伝導、放射の3つである。

伝導は、物質が移動することで、物質に蓄えられた熱が、他の物質に原子や分子の振動の伝播や自由電子の移動により伝えられる。伝導による熱の伝わりやすさは、熱伝導率（ κ と表記され単位は W/mK や J/msK が用いられる）と呼ばれる。値が大きいほど、熱は伝わりやすいことを意味する。一般に気体、液体、固体の順に大きくなる。固体でも金属は大きく、岩石は小さい。20 °C で固体の金属鉄は 73 W/mK で、カンラン岩は 5.5 W/mK 程度になる。

対流は、液体や気体など流動性をもった物質が移動することにより、熱を運搬する現象である。対流は、温度の上昇により、物質の密度変化が起こることで、移動しやすい物質では効率的に起こる。伝導も対流も物質が熱を運搬しているが、伝導は熱エネルギーの移動で物質移動は伴わないのに対して、対流は物質移動が中心になっている。

放射（あるいは輻射ともいう）は、熱が電磁波（電磁放射ともいう）によって運搬されるものである。電磁波なので真空中でも伝わり、電磁波が届かないところには伝わらない。太陽の熱は遠くでも伝わるが、間に物質があり太陽光を遮られれば伝わらない。

金属鉄からな核は、熱伝導率が高いため熱を効率よく伝え、外核は液体であるため、対流により効率よく熱を伝えることができる。核からマントルへは熱伝導率の小さい岩石への伝導なので伝わりにくい。しかし、熱伝導率が小さくても、長い時間（数 1000 万年）をかければ暖かい D'' は形成できる。温まった D'' は、マントル物質（固体）は、高温になると可塑性を持ち、流動することで対流を起こす。マントル対流により伝導よりも効率的に、熱を地球表層に伝えることができる。

b 熱源と熱放出

熱の移動という観点でみると、地球内部から地球外へ一方的に移動しているだけでなく、地球外から太陽からの放射熱が加わっている。太陽からの放射は、地球表層で作用しながら、地球から再度放射されることで、収支バランスが取れていると考えられている。地球表層の作用として、大気や海洋を熱によって物質移動を伴う運動が起こ

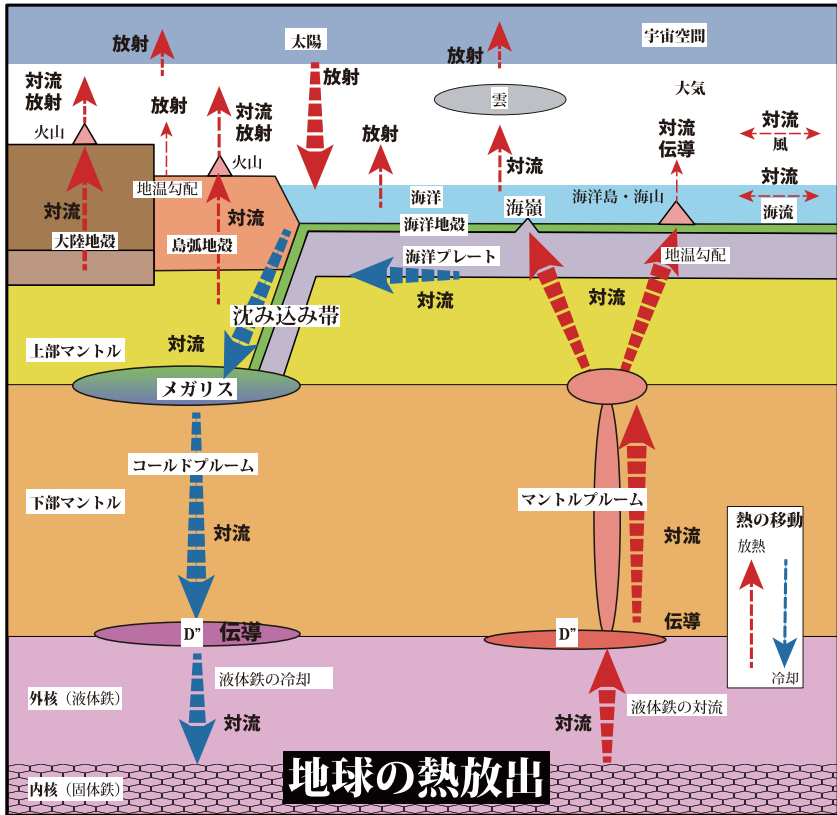


図 8-5 地球の熱放出

全地球テクトニクスにおける熱放出を、内核、外核、下部マントル、上部マントル、地殻、海洋、大気で模式的に示した。

していることになる。また、生物の活動の原動力は、太陽の放射熱に由来することになる。

長期で見ると、太陽からのエネルギーが生物体を形成する原動力になっているが、有機物が地層へ保存（石炭や石油などとして）されることで、過去の太陽エネルギーを保存されていることになる。あるいは、堆積作用も太陽エネルギーが駆動していると

考えると、堆積岩の形成にも太陽エネルギーが重要な役割を果たしていることになる。

しかし、太陽エネルギーは地球表層の変化を駆動するが、テクトニクスと呼ばべるような大きな地質学的変化は起こさない。別のエネルギーによってテクトニクスは起こっている。

地下に向かって温度が上昇していくことは、古くから知られている。その温度上昇の割合を地温勾配という。地球内部の熱が、地殻を通じて内から外に向かって放出される。その量は測定することができ、その値は地殻熱流量として、単位時間当たり単位面積を通過する熱量 (mW/m^2) や熱流量単位 (HFU, $1 \text{ HFU} = 41.87 \text{ mW}/\text{m}^2$) で表記される。地温勾配の存在により、地球内部から熱を放出していることが検証される。

地質場によって熱流量の値は変化する。大きく分けると、大陸地殻と海洋地殻で異なる。大陸の平均地殻熱流量は $65 \text{ mW}/\text{m}^2$ となり、海洋は $101 \text{ mW}/\text{m}^2$ となっている。大陸地域より海洋地域が大きい値になっている。海嶺では新しく海洋地殻が形成されているため、海嶺から離れるにつれて小さくなる。沈み込み帯では海域では最も小さくなる。陸域でも島弧などの火山活動が活発なところでは大きくなる。

地球が年間放出している熱量は、31 TW (テラワット) ~ 44 TW 程度とされる。熱源は、核からの潜熱の放出と放射性核種の崩壊熱が重要なる。外核の鉄が液体であることから、地球形成期に起こった小天体の衝突合体によって集まった重力エネルギーが、現在も内部に保存されていると見なせる (Hanks and Anderson, 1969)。また、鉄の結晶化の時の潜熱と、沈降による重力エネルギー (位置エネルギー) の開放も熱源となっている。これらの核に由来するものが、熱源の半分を占めると考えられている (早川, 1988)。

残りの半分は、地殻やマントルに含まれる放射性核種の崩壊熱とされる (早川, 1988)。地球を形成された素材に含まれていた放射性核種が、現在も崩壊して発熱していることになる。半減期の長い放射性核種は、親石元素や液相濃集元素であることが多く、地球表層へと成分の再配分で移動している。ただし、コールドブルーームとして一部地球内部に戻っていくことも起こるが、定量化はされていない。

このような地球内部に蓄えられた熱エネルギーが、マントル対流を生み出し、ブルームテクトニクスを起こしている。ブルームテクトニクスは、内部の熱を外へ運ぶ作用ともみなせる（千秋ほか, 2010）。

c マントル対流

熱エネルギーは、マントル物質を通じて、外に向かって伝わっていく。マントルは岩石から構成されており、岩石は断熱性が高いので放射や伝導では熱は伝わらない。岩石が固体ではあるが、高温になると粘性が小さくなり、可塑性を持つため、ゆっくりとはあるが流動する。密度が小さい暖かいマントル物質には浮力が発生し、流動性によりマントルブルームとして上昇流ができる（末次, 2018）。

マントル対流の上昇流が表層近くに達すると、圧力低下による岩石の溶融がおこる。マントルブルームによるマグマは、巨大な火成岩体（LIPs）や海嶺などを形成して、長期間、熱を放出し続ける。中でも海嶺はもっとも大量のマグマを定常的に形成しているため、熱放出の場としても重要となる。

海嶺の火成作用で海洋プレートが形成され、マントル対流が水平方向に向きを変えることになる。海洋プレートは、海洋底を移動しながら冷却していく。能動的に移動する海洋プレートと、受動的に移動する大陸プレートによる運動像としてまとめた仮説が、プレートテクトニクスになる（第5章2）。

冷却された海洋プレートは、新しい海洋プレート（古い海洋プレートより密度が小さい）や島弧プレート、大陸プレートなど、より密度が大きいプレートにぶつかると、沈み込んでいく。沈み込んだ場所には、海溝が形成される。海溝で沈み込んだ海洋プレート（スラブ）は、マントルへの下降流となる。

ただし、マントル内で鉱物の密度の逆転する条件があるため（例えば、飯高, 2002 など）、マントル遷移帯（上部マントルと下部マントルの境界）でスラブが留まることが起こりうる（川勝, 2002a）。そこでは、スラブが集合した大きなメガリスが形成される。ある期間たまったメガリスでは、結晶の相転移が進むことで高密度になる。やがてメガ

リス全体が周りより密度が大きくなることで、下部マントル内を落下していく。これが、コールドプルームとなる。マントルの底まで落ちたメガリスは、外核を冷却することになる（冷たい D'' となる）。

冷めたプレートの沈み込みやメガリスの落下は、マントルや外核の温度を下げる冷却作用となる。これも地球内部が冷めていく熱放出の効果の一貫とみなせる。

コールドプルームが核-マントル境界まで落ちていくと、物質収支をとるために、もっと上昇しやすい部分、つまり密度の小さいマントル物質の部分（暖かい D''）が上昇していくことになる。そして、マントルプルームが形成されていく。このマントル内のサイクルが 1 億から 2 億年ほどで起こると考えられている（丸山, 2002b）。

マントル内で上昇するマントルプールと下降するコールドプルームが、マントル全体の対流となる。プルームによる対流は、熱放出という現象が地球全体を通じて起こっていることを意味する。地球内部の熱が外に向かって現在でも移動するという放熱が、テクトニクスを駆動していることになる。熱機関としてマントル対流が起こるという運動像が、プルームテクトニクスとなる（Maruyama, 1994, 丸山, 1993; 1997, 丸山ほか, 1993, 第5章3）。

7 サイズと時間の効果

成分の再配分が起こっているサイズは非常に小さく、移動距離も小さい。だが、地質現象として見れば、観察可能なサイズや距離となっている。

例えば、プレートの移動速度も実測されている。観測されているが、その値は年間数 cm 程度と小さい。個々の圏での相互作用も同様に限定された局所的なものが多かった。プレートの移動速度が、マントル対流の目安となるだろうが、地球の表層では、海嶺や沈み込み帯のサイズ（距離）を考えると、たとえ単位（長さ）当たりの変化、変位は小さくても、地球規模で起こるため、サイズの積分的量は膨大なる。

加えて、年間数 cm という時間スケールでみた値であるが、地球では、人間の時間スケールとは異なり、もっとゆっくりとした時間の流れですべてが営まれている。海嶺か

ら海溝まで達するのに、数 1000 万年時には 1 億年以上の時間が費やされる。その間、海洋プレートは海洋底として、地球表層に存在し続けていることになる。他にも、大気中の酸素の増加、オゾン層の形成と維持、大陸地殻の形成と増加など、上述してきた現象も、時間効果が働く好例となるであろう。

また、熱やエネルギーでも、個々の作用、反応、発生量は微小であるが、地球サイズで考えたとき、その値はマントル対流を起こすほどの大きなものとなっている。また、人の日常的な時間で考えると、太陽の放射熱より桁違い小さいものであるが、地球史的な時間スケールで見えていくと、地殻変動や造山運動、プレート運動など、テクトニクスとして捉えるべきものとなる。これらの地球の時間スケールを変遷史として捉えていく必要もある。

このような地質学的スケール（サイズや体積など）と地質学的時間の蓄積（積分的効果）は、地球の相や層の属性を変化させてきた。圏を通じた成分が再配置していくことを、時系列で追うことが変遷史ともなる。成分の再配分の変遷史を過去の物質からたどり、探っていくことが、「地球の現在までの成り立ちを知ること」（第3章3）という地質学の目的であった。

全地球テクトニクスでは、これまでのテクトニクスのように固体部だけの運動論ではなく、網羅的な層、相、圏における成分の再配分、そして熱放出などの視点で捉える必要あるだろう（図 8-6）。

上述したように、地球の各所で特徴的な相互作用を起こしている場として圏があったが、そこでは成分や元素の移動があった。圏では、成分によっては、移動方向のベクトルが一定しているものもあり、そのような成分は、圏を通じて特定の相や層へ移動して再配分が起こっている。

成分の再配分とは、創成期の地球から、不可逆な変化として物質移動が起こっていることになる。このような再配分は、マントル対流だけでなく、外核の対流、海洋の対流、大気の対流によっても起こっている。全地球テクトニクスは、熱放出に駆動された成分の再配置を、変遷史として捉えていく必要ある。これはまだ作業仮説の段階であり、

検証できていない部分も多いが、重要な視点であろう。



陸繋島

沖島には小さな神社がある。干潮の時のみ道が会わられる。徳島県海部郡牟岐町灘下浜辺。
著者撮影。

▼ AI と人智

近年の AI（人工知能 artificial intelligence）の発展は眼を見張るものがある。携帯電話の位置情報やインターネット上の画像や情報など、膨大なる量のデータ（ビッグデータと呼ばれる）を利用したり、膨大回数の試行錯誤による機械学習など、その応用範囲は未知数である。今やコンピュータが集め、コンピュータしか処理できない量のデータや処理が、活用されるようになってきた。チェスや囲碁、将棋という複雑なゲームですら、AI が人に勝つようになった。ビッグデータの AI による処理は、もはや人智ではアルゴリズムは理解していても、その結果は予測できないものとなっている。今後ますます、人智を越えたものになっていくだろう。AI を装備したコンピュータやデジタル機器がいき渡った世の中では、人がなすべきこととはなんだろうか。人は、「人として何をすべきか」を考えていかなければならない時代になってきているのだろう。AI 開発や先端科学に携わる人は、その社会的影響に関して、AI の応用範囲や適用限界を、どこかに置くべきかについても考えるべきではないだろうか。それとも、科学は手段なので、止まることなく進み続け、人が後追いでその使用方法を考えていくべきなのだろうか。医療のように直接人命に関わるものには注意は喚起されるだろうが、それ以外のものは、AI のなしている成果の影響は、じわじわとゆっくりとだが、着実に広がっていくだろう。気づいた時には、後戻りできない状況になっている可能性もあるだろう。よくよく考えて、倫理的な境界や限界を、決めておくべきではないだろうか。だが残念ながら、その境界は、常に後手に回ることは、歴史が示している。武器開発、核開発、宇宙開発、生体移植、クローン、体外受精などに関する研究は、被害や影響が生じた後に、その利用限界を後追いで考えてきた。ヒト遺伝子や受精卵、ヒトのクローン研究は、現在、倫理的にストップしているが、一部の国では密かに進んでいるのではないだろうか。今後も、AI 研究が進み、その能力は至るところで人智を越えていくであろう。自動運転やロボット、ゲームなどは、人の不足を補ってくれたり、楽しませてくれるであろう。だが、ある時、ネットワーク繋がれた AI が、自我や自意識を持ち出したら、……。このような事態が SF 的だとはいえない時代が、すぐそこにありそうな気がするのだが■

第9章

普遍的テクトニクス

いよいよ最後の章となった。ここまでは地球を素材にして地質哲学として、テクトニクスを考えてきた。最後により広く普遍性を追求していこう。それは、地球を飛び出して鳥瞰していくことになってくる。宇宙から見るので宙瞰というべきだろうか。普遍的テクトニクスへの素材は整いつつある。視点の拡大で普遍的テクトニクスを宙瞰していこう。



1 全地球テクトニクスより先へ

地質学では、地球を構成している物質の現状と固有の状態を知ること、そして変遷史としてテクトニクスを仮説構築することが目標となっていた。変遷史とは、地質学的な大規模な運造論の時間変化（メタ的運動論）である。変遷史を全地球の全地球史に普遍化したもの（メタ的変遷史）が全地球テクトニクスという仮説になった。ここまでは、地球を対象としたものであった。本章では、より普遍性を求めていこう。どんな地平が見えてくるであろうか。

a 我々の世界

物質的に演繹的検証ができる世界は、我々の手の届く範囲（試料が入手可能）で

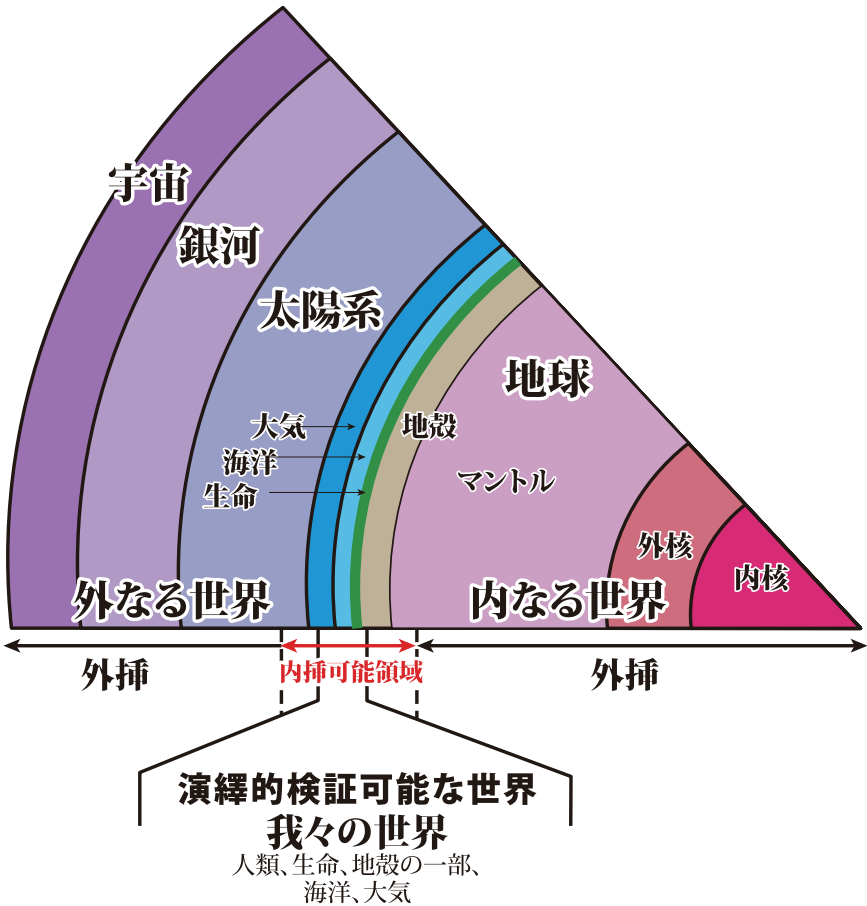


図 9-1 演繹的検証可能な世界

演繹的検証が可能な世界の模式図。現在我々の世界から演繹的検証可能な世界は内挿できる。地球内部は内なる世界だが外挿され、外なる世界では外挿になる。

の身近なところなので「我々の世界」と呼ぼう。我々の世界は、地球の区分でいうと、我々自身（人類）、生命（他の生物種）、海洋、大気、そして掘削可能な地殻の一部である（図 9-1）。

何事にも例外があり、物質的にも身近でないところの物質が入手できることがある。マグマに取り込まれたり造山運動で持ち上げられたり、オフィオライトとして付加したりして、上部マントルを構成していた岩石が入手できる。また、太陽系の材料（始原的隕石 chondrite）、かつて存在した原始惑星の破片（分化した石質隕石 achondrite、石鉄隕石 stony-iron meteorite、鉄隕石 iron meteorite）、また火星と月から来た隕石などがある（小出，1995a; 1995b）。ただし、隕石はその由来が定かでないという不確かさがある。

人類が到着した月からは、地質調査によって入手された岩石資料がある。また人手ではないが、探査機はやぶさ 1 号機、2 号機によるサンプルリターンにより、小惑星イトカワとリュグウの試料が入手された。

このような物質が入手可能な領域では、これまで考えられた仮説を、演繹的に検証できるので、内挿できる「内なる世界」ともいえる。

我々の世界から外になると、そこは内挿できない世界となる。その世界は無限ではないが、光すらまだ届いてない領域もあるので、我々にとっては無限に近い「外なる世界」である。そんな限りない「外なる世界」は、我々の世界で見出した規則性を演繹するには、外挿するしかない。

一方、地球内部は有限の世界であり「内なる世界」であるので、我々に近い内部は、将来、技術が進めば演繹可能になる部分も広がり、内挿できる世界になるだろう。だが、人間の手のおよぶ範囲も、上部マントルまでであろう。下部マントルや核の素材は入手不能であろうであろうことから、「内なる世界」にも「外の世界」と同様外挿するしかない部分も広く存在するだろう。

しかし、上述したように、人が自ら試料を入手しなくても、探査機がそこにいき、装置を用いて調べることができれば、それは検証可能性な世界に組み込めるであろう。例えば、火星には探査機は、1975 年のバイキング (Viking) 1 号から、近年では 2012 年のキュリオシティ (Curiosity)、さらには 2021 年にパーサヴィアランス (Perseverance) まで、何度も着陸して、地表の探査、分析をしてきた。このような探査機による分析は、

人が直接ではないが、演繹的検証をしていることになる。

現在、多数の探査機によって、太陽系の内惑星の水星から外惑星のすべて、また準惑星の冥王星や惑星の衛星まで、観測がおこなわれてきた。これらは、天体に着陸して試料の直接観測をしていないが、周回軌道からの観測、天体へ進入する子機（プローブ probe）によって観測されている。このような観測は、可視光やさまざまな波長の電磁波での観測、あるいはレーダー照射などによる測定もなされている。

現代の非破壊分析の多くは、表面に何らかの電磁波などのエネルギーを照射して、その反射や変化を計測している。その試料の照射装置と計測装置の距離はさまざまである。距離が長くできれば、遠くからも観測可能である。周回軌道の探査機や望遠鏡などはその好例である。

技術の進歩により、物質が入手できなくても、演繹的検証の可能領域は広がっていくだろう。もちろん、試料が入手できた方が、多様で詳細な検証ができるのはいうまでもない。

このような遠隔での検証可能性を視点を導入すれば、物質がえられなくても、電磁波（例えば、光、電波など）や重力（例えば、重力異常、ジオイドなど）、熱（例えば、大気温、海水温、地殻熱流量など）など、様々な観測・観察手段を用いることで、演繹的検証ができることになる。

b 時空間の拡張

第8章では、全地球テクトニクスを考えていくために、これまでになく視座として、物質だけでなくプラズマや力、電磁気などのエネルギーまでを拡大し、相と層の概念で考え、相互作用を起こしている部分を圏という概念を導入して考えてきた。その結果、全地球テクトニクスには、成分の再配分と熱放出の視点で捉えることができた。さらに、サイズと時間の効果を考えていく必要性も述べてきた（第8章7）

そのサイズと時間が、テクトニクスの拡大には重要であることがわかった。そこでさらにテクトニクスを普遍化するために、サイズと時間を拡大していくことにする。

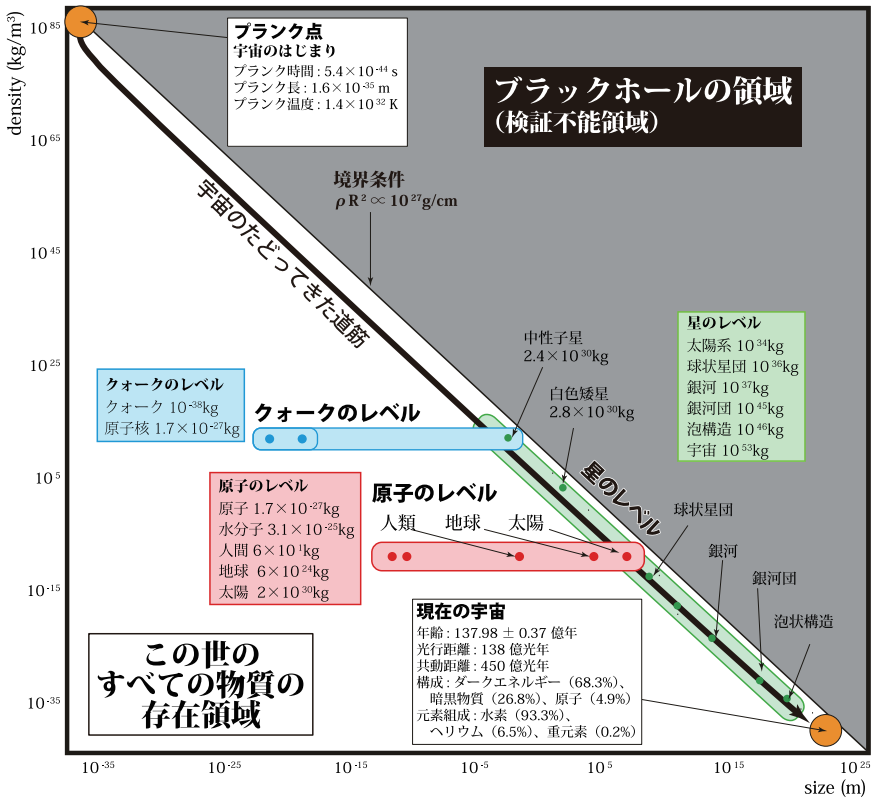


図 9-2 物質の網羅

この世のすべての物質の存在領域をサイズ(横軸:長さ)と密度(縦軸)の示した。物質は、クォークのレベル、原子のレベル、星のレベルの3つに区分でき、それらは作用する力の種類の違いで説明できる。

サイズ(長さ)として、最も小さい物質は素粒子となり、それより小さいものは実体のないエネルギーだけの存在となる。そのサイズは、測定可能な長さとしてプランク長 $1.6 \times 10^{-35} \text{m}$ がもっとも小さいものとなる。プランク長から、プランク時間 ($0 \sim 10^{-43}$ 秒まで) やプランク温度 ($1.4 \times 10^{32} \text{K}$) など最小の物理量が定義できる。これが宇宙のはじまりとしての「プランク点」になる。

一方、最大のものは、現在の宇宙である。その観測可能な範囲は、宇宙の背景放射の正確な観測から 138.98 ± 0.37 億年という年齢が求められ、光行距離として半径 138 光年がえられる。

これら最小と最大の値で示せば、すべての物質がこの範囲に収まることになる。また、物質の特徴を表すものとして質量をとる。ただし、特徴を見るために、質量を体積で規格した密度を用いることとする。体積とはサイズの 3 乗で、サイズと関係している。サイズで規格化した質量とみなせる。

これらに対数軸で示すことで、小さいものから大きなものまで、ひとつの図で示していくことができる (図 9-2)。

この図において、物質は右上の領域には存在できず、検証不能領域が広がる。また、左下の物質の存在できる領域でも、物質がばらばらに存在するわけではなく、一定の領域に存在することがわかる。主に 3 つの領域があり、それぞれの物質の特徴からクォークのレベル、原子のレベル、星のレベルに分けた。

では、この 3 つの領域がなぜ区分されるのかは、前章で述べた力の介在によって説明できる。クォークのレベルでは、強い力あるいは弱い力が支配的となる。原子のレベルではサイズが小さいときは電磁気力、大きくなると重力が支配的になる。星のレベルは重力が働いていることになる。ただし、星のレベルは、さまざまな星があるので、中性子星のような特異な星は、強い力とともに重力も働く。また、原子のレベルもサイズが大きくなると天体のレベルに入る。

この図から物質と力の関係がよく見えてくる。また、宇宙はサイズを広げながら、密度が変化するという変遷を遂げてきたこともわかる。宇宙が時間とともに変遷してきたことから、もし時間変化に伴って作用する力の変化が起こっていれば、宇宙に内在される物質も変化してきたことになり、その概要は宇宙創成論として検討されているが、本書とは関係がないので述べない。

次に、時間を拡大していこう。未来での検証性はないので、過去と現代までが研究対象になる。物質的試料は、材料となった物質である隕石から、約 45 億年前以降の

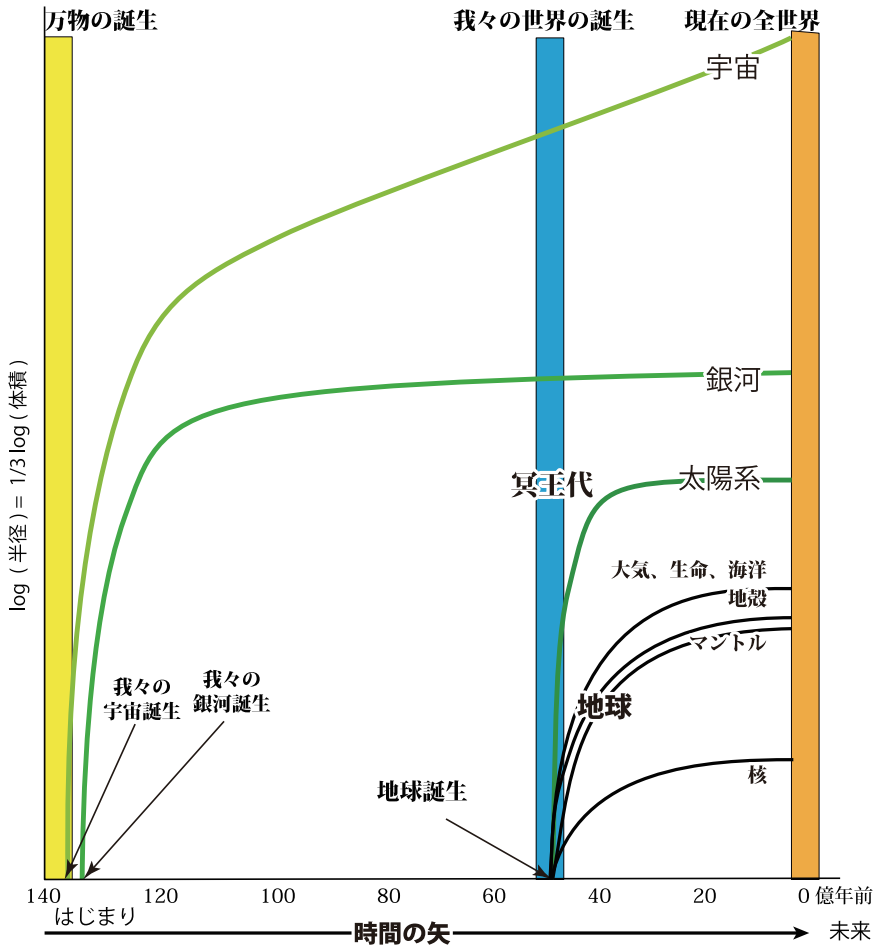


図 9-3 時空間の拡大

時間 (横軸) とサイズ (縦軸) の時空間でみた成長曲線。縦軸は、体積の 1/3 乗でもある半径 (対数) で示した。時空間で宇宙、銀河、太陽系、地球 (核、マントル、地殻、海洋、生命、大気) の成長過程を模式的に示した。

地球内部の試料である。後者がこれまで地質学の対象であった。

しかし、前述したように、過去で何らかの証拠になりうるのは、我々の銀河（天の川銀河ともいう）が中心となるだろう。我々の銀河系内で最古の星が 130 億年程度の年齢であるので、誕生したのそれより前ではあるが、宇宙誕生以降である。宇宙の誕生の 137 億年以降、サイズは 450 億光年になっているかもしれないが、観測可能時間は 137 億年前以降である（図 9-3）。

時空間の拡大から、検証可能なデータがあるのは、137 億年前以降、137 億光年以内となる。では、これらのうち、テクトニクスとして拡大できるのはどこまでであろうか。

c 検証のための地球外の素材

ここまで現実に検証データが入手できるかどうかは別にして、検証可能性のある最大限の時空間を考えてきた。一方、テクトニクスは、天体で生じる相互作用の時系列変化をまとめたものであるのもので、もっと限定されたものになる。

全地球テクトニクスから、現状で素材（データ）が現在入手できているところは、どこまで拡大できるかを考えていく。全地球テクトニクスをより普遍化していくために、地球も含みながらも、より広範な天体（太陽系の惑星や衛星、彗星など）や、もっと広く太陽系外の惑星系にも適用可能なテクトニクスを目指すことになる。それを本書では「普遍的テクトニクス (universal tectonics)」と呼ぶことにする。

定義：普遍的テクトニクス (universal tectonics)

すべての惑星系天体に適用可能なテクトニクス

ただし、普遍的テクトニクスはメタ地球テクトニクスではない。なぜなら、階層も明らかに何段が上位になり、もっと広義のテクトニクスに位置づけられるものである。

普遍的テクトニクスを考えるために、全地球テクトニクスの完成は、メディアオクリティの仮説として、重要な素材である（本章3a）。だが、それだけでは新たな展開が望めない。

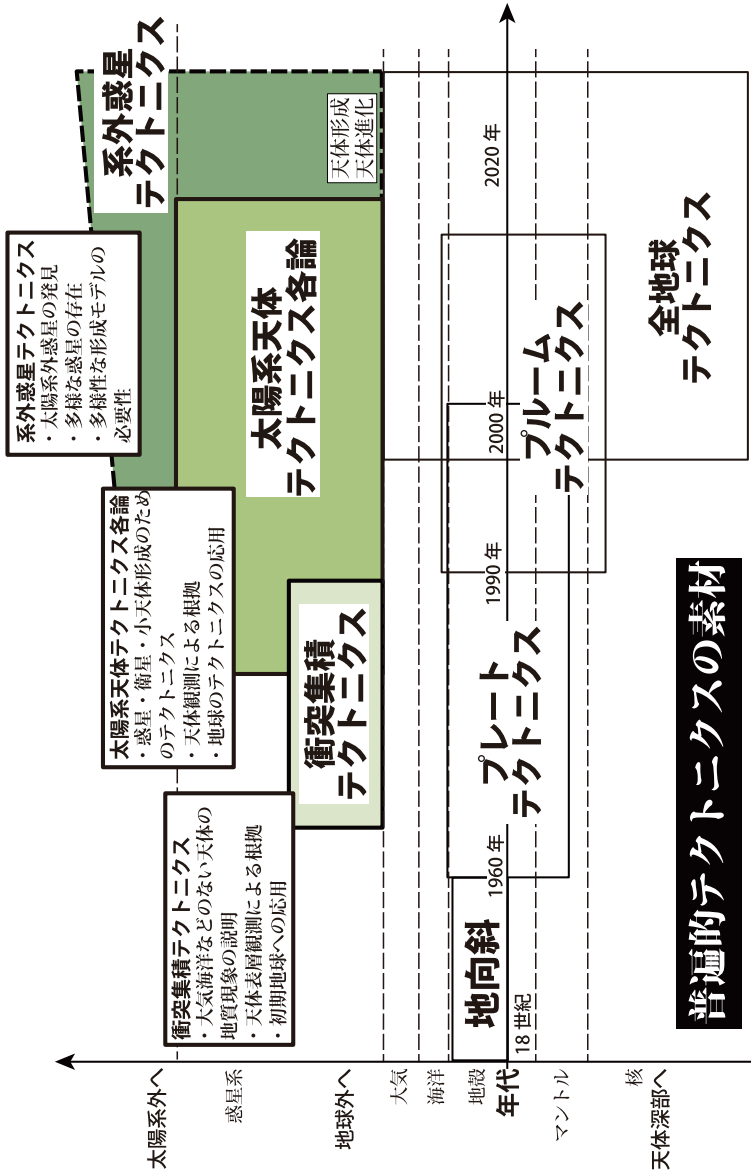


図 9-4 普遍的テクトニクスの素材
より普遍的なテクトニクスのための現在の素材。縦軸：地球の深度・高度・階層による区分、横軸：モデルが提案された年代。モデルの及んでいる範囲と特徴を示した。小出（2021）より。

なぜなら、地球で構築したテクトニクスが、他の天体へ演繹可能かどうかは、地球外の情報によって検証していく必要があるためである。

現在、検証のための地球外の情報として 3 つの素材が整ってきた (図 9-4)。

ひとつは、理論や数値計算による惑星形成モデルで「衝突集積テクトニクス (collision accumulation tectonics)」という仮説がでてきたことである。ふたつ目は、20 世紀後半から現在まで、太陽系の惑星や衛星、小惑星などへの探査が進み、太陽系内の天体の多様性が把握されてきた。多様性の記載から、太陽系の惑星の類比 (analogy) と対比 (contrast) ができ、地球や他の惑星のそれぞれの固有性と普遍性を明らかにすることができるようになってきた。3 つ目は、太陽系外から惑星 (系外惑星 exoplanet と呼ばれる) が多数発見され、それらの多様性、そして特異性が明らかになってきたことである。

これら 3 つの地球外の検証のための素材を用いることで、より適用性の広い普遍的テクトニクスの仮説が構築できる準備が整ってきた。

2 衝突集積テクトニクス

1960 年代には、恒星の形成過程や進化についての数理モデルが検討されてきた。1970 年代以降、恒星形成とともに惑星系の形成モデルも提案されてきた。

恒星形成の場は、恒星の 7 ~ 8 桁も大きな質量の分子雲コア (molecular cloud) と呼ばれるところで、質量に応じた大きさの角運動量をもつことになる。角運動量は、恒星を原点とし、円盤に水平な方向のベクトルは遠心力と釣り合い、垂直方向のベクトルは円盤面に向かう力となる。そのため、物質が円盤面に集積して円盤を形成することになる。

惑星系形成モデルは、この円盤からスタートする「円盤仮説」を前提としている。「円盤仮説」は、太陽系の惑星などの天体がほぼ同一平面に存在するという事実からも、支持されている。

このような分子雲コアからの時系列変化を計算機シミュレーションをおこなうことで、惑

星形成のモデルが確立されてきた（小久保・井田，1997）。円盤内では、固体成分が集積、凝縮、衝突合体して「微惑星（planetesimal）」と成長していき、さらに「原始惑星（protoplanet）」へとなっていく（小出，1994；1995a；1999a；2001）。1990年代になると、他の恒星系の観測から原始惑星系円盤の存在が確認されたことから、惑星形成モデルの初期状態の存在が検証されてきた（小出・山下，1995；1996a；1996b，小出ほか，1997）。

シミュレーションと観測から、以下のような「標準モデル」が考えられてきた（井田，2016）。

- 1 太陽質量の 0.01 倍ほどの物質が原始惑星系円盤を形成
- 2 円盤内で、内側では岩石と鉄から、外側では氷も加わった微粒子（ $< \mu\text{m}$ でダストと呼ばれる）の凝縮
- 3 ダストが円盤の赤道面に集積し微惑星を形成
- 4 微惑星同士が衝突合体して成長し原始惑星を形成
- 5 惑星空間の内側に岩石と鉄の地球型惑星（水星、金星、地球、火星）が、外側に巨大ガス惑星（木星、土星）の形成
- 6 原始惑星系を覆っていたガスが消失
- 7 遠くでは微惑星の集積が遅く氷惑星（天王星、海王星）の形成

このような原始太陽系の惑星形成のモデルでは、初期に集積、凝縮、衝突、合体の現象が必然的に起こるとされ、衝突集積テクトニクスとなってきた。衝突集積テクトニクスは、惑星形成における最初期に重要な運動論として位置づけられた（小久保・井田，1997，小久保，2016）。

衝突集積テクトニクスは、計算機シミュレーションから導き出されたものであるが、各天体の地表における岩石形成の推定年代とクレーター密度の関係（諸田・平田，2015）や形成初期の恒星系の観測から検証されてきた。また、このテクトニクスによって、

月と地球との化学的特徴の違い（酒井ほか，2010）なども説明できるようになり、傍証もえられている。

衝突集積テクトニクスであれば、地球の特徴や固有の性質が、惑星形成初期の地球軌道の素材ですべてをまかなったり、形成後も内部変化だけにこだわることはなく、軌道周辺だけでなく広く恒星系全体に固有性における原因を求めることも可能となる。例えば、地球の海や生命の素材が、氷彗星や特異な微惑星（炭素質コンドライトの母天体）などで、より形成しやすい条件の場合から由来したと考えることもできる。

つまり、地球だけの閉鎖系ではなく、太陽系全体の多様性を利用できる開放系として考えることができる。衝突集積テクトニクスが導入できたことで、天体の特異性を、より大きな普遍性から必然性として導ける可能性がでてきたことになる。ただし、検証や傍証は必要である。

後述の系外惑星の発見もあり、もっと多くの惑星系の多様性を説明するために、標準モデルは修正されてきた。井田（2016）は、次のようなより普遍性をもったモデルを示した（一部修正）。なお、以下で用いられている系外惑星の詳細については後述する（本章4）。

- 1 分子雲コアの収縮と原始太陽系星雲の形成
 - 2 原始惑星系円盤の形成（太陽系最小質量円盤モデルや質量は問わないモデル）
 - 3 円盤内でガスは全領域に広がり、内側に岩石、外側に岩石＋氷のダストが凝縮
 - 4 ダストの付着合体成長（コア集積モデル）か、ダストの自己重力の不安定による成長（自己重力不安定モデル、未解決）で、微惑星へ成長（暴走的成長モデル）
 - 5 微惑星同士の衝突合体（寡占的成長モデル）で原始惑星が形成
- （以下、順不同）
- 6-1 ジャイアント・インパクトによる衛星形成、重力摂動あるいは惑星同士の近接相互作用での軌道遷移によりエキセントリック軌道の惑星やホット・ジュピターの形成
 - 6-2 大型惑星が外側に移動することで生じる重力散乱で、微惑星の軌道が乱れ衝

突合体（月面で約 38 億年前のクレーター形成後期重爆撃と呼ばれる）

6-3 恒星から遠く（太陽系では 40 ~ 50 au）では小さなサイズの微惑星（氷と岩石）の形成（カイパーベルトの惑星）

このモデルでも、ダストが形成後に恒星へ急速に移動する「ダスト落下問題」で微惑星形成が困難になったり（奥住，2016）、惑星軌道の移動をシミュレーションに入れると太陽系形成がうまくいかなかったり（井田，2016）、惑星空間のガスがどの時期に吹き飛ばされるのかにも諸説あり、課題も多々残されている。

惑星形成過程における衝突集積テクトニクスと全地球テクトニクスとは、全く異質な営力による運動論になるため、惑星形成の初期状態で、個々の天体に多様性が生まれる可能性が広がった。特別な作用や条件を設定していないので、太陽系固有のモデルではなく普遍的（標準モデル）だと考えられる。だが今後も、慎重な検討が必要である。

3 太陽系内天体のテクトニクス各論

ある対象を調べたいとき、同一階層に属する他の対象も同時に調べて、類比と対比することで、その対象の有する特徴が、特異なものなのか、それとも他のものにも共通する普遍性があるものなのかを推定できる。多数の同階層の基礎データが集まることで、特異性と普遍性がより明らかになるだろう。やがては、天体ごとのテクトニクス固有性とその中の普遍性を識別した各論ができてくるはずである。

a 太陽系内の探査

太陽系の惑星や準惑星、衛星への探査機や望遠鏡などによる探査・調査は、現在も継続され、新しい情報が年々付け加わっている。太陽系の惑星に関する概要が網羅され、地球の衛星の月、木星の衛星（イオ、エウロパ、ガニメデ、カリストなど）、土星の衛星（タイタン、エンケラドスなど）、あるいは準惑星（冥王星）や小惑星（イ

トカワ、リュウグウなど)の実態がわかってきた。探査・調査が進み、天体ごとの特徴から固有の形成史などの検討もはじまってきた。

地球の衛星でもある月は、地球形成にも深く関わっていることが、巨大衝突説(ジャイアント・インパクト giant impact)の詳細なシミュレーションから明らかになってきた。シミュレーションでは、さまざまなサイズ、角度、速度などでおこなわれた結果、衝突により地球が全球溶融をおこしマグマオーシャンができ、核や地球の層構造、大気や海洋の形成に大きな役割を果たした。また、月と地球の組成差も、ジャイアント・インパクト説で説明可能となった(玄田, 2016)。

他の惑星の衛星では、火山活動が発見されたり(イオ)、間欠泉による水の噴出(エウロパ、エンセラドス)、流水の痕跡(タイタン)などが発見され、地下には海が存在する可能性(エウロパ、エンセラドス)も生まれてきた。

かつて人類が入手していた地球外物質は、隕石と月の岩石だけであった。いくつかの隕石の落下軌道の解析から、その大部分が小惑星帯(一部は火星や月から)から由来していることが判明していた。また、小惑星と隕石とのスペクトル分析の類比と対比から、小惑星の組成や成分が推定され、分類がなされてきか、実際の検証作業はできていなかった。だが、2010年に「はやぶさ」によって小惑星イトカワからサンプルリターンがおこなわれた。このサンプルリターンにより、月以外では、はじめての地球外天体の試料が調べられ、イトカワはLLコンドライト質の天体であることが検証された。CMコンドライトと推定されているリュウグウからも「はやぶさ2」がサンプル採取をおこなわれた(野口, 2016)。試料が入手されたので、月と隕石以外の地球外物質も、検証対象になりつつある。

地球以外の多数の天体の情報がえられつつあるので、天体間の特徴の類比と対比ができ、特異性(個性)と普遍性(共通性)がまとめられていくはずである(渡邊・井田, 1997)。もし、天体ごとにテクトニクスの各論ができれば、地球と他の天体とのテクトニクスにおける類比と対比ができ、プレートテクトニクスとプルームテクトニクス、あるいは全地球テクトニクスが、どこまでが地球の特異性(個性)になり、どこからが普遍性(共

通性)になるかが、検証できるようになるはずである。

いずれにしても、地球のテクトニクスがもっとも詳しく調べられ、情報も多いので、類比と対比の中心素材に用られることになるだろう。そこから、知ることのできない天体であっても、とりあえず典型となるデータとして「メディオクリティの仮説 (mediocrity hypothesis)」適用していくことができる (Rood and Trefil, 1981)。メディオクリティの仮説により、他の天体の不明の部分が補完できる。

他の天体の情報が増えるにつれて、メディオクリティの仮説は不要になっていき、事実に基づく類比と対比によって、特異性と普遍性が明らかになってくるであろう。

b 惑星系における H_2O の重要性

H_2O は、地球において液相の水が河川や湖沼、海洋となり、気相として水蒸気になって大気を構成し、雲から降雨として河川として陸地をめぐりやがて海に戻るという循環をする。この循環は太陽からの熱によるものである

また大気中の雲から降雪して氷床や氷河となり、固体として陸地に保存されることもある。陸域に降雪が広がり長期保存されたり、海面の広域で凍結すると、太陽光の反射率が増える。入射エネルギーと天体表面からの放射エネルギーの比をアルベド (albedo) と呼ぶ。アルベドが大きくなることで、地球表層が温められず、寒冷化や氷河期、全地球凍結など、地球環境に大きな影響を与えることもある。また、氷として陸地に H_2O が堆積すると、海水準にも変化が起こり、海流にも影響を与え、気候変動も起こすことになる。

H_2O は、地球の表層において、生命の誕生から進化、そして生命の営みに大きな影響を与える。さらに、沈み込み圏では、水分の添加によりマグマ形成を起こした。

このように地球では、 H_2O は重要な役割をもっていた。全地球テクトニクスとして、メディオクリティの仮説を適用すると、惑星系表層に H_2O の有無は、表層環境、あるいは生命誕生に大きな影響を与えることになるはずだ。

H_2O は、宇宙空間には比較的多く存在する分子である。 H_2O は、恒星からの距離

に応じて放射エネルギーが変化することで、気体、液体、固体という相変化の起こる領域が決まってくる。 H_2O は、惑星の形成過程において、スノーライン (snow line 雪線とも呼ばれる) が重要な役割をもっている。さらに、表層環境を決定する上でハビタブルゾーン (habitable zone 生命居住可能領域と訳されることがある) が考えられている。それらの領域内に天体が存在すると、形成時や形成後の天体の変遷に大きな違いがあることがわかってきた。

以下で、スノーラインとハビタブルゾーンの 2 つの領域について考えていく。

c スノーライン

スノーラインは、惑星や天体の材料となる氷の有無を決定するものである。スノーラインとは、 H_2O が液体から氷として凝固する位置のことで、スノーラインより外側では氷が、内側では液体もしくは気体として存在する。スノーラインより外側では惑星の材料として氷が加わるため、形成される天体の質量も大きくなり、その天体は大気を保持しやすくなる。

また、氷天体では、珪酸塩物質より H_2O の融点をはるかに低いので、内部や天体運動などによるエネルギー源があれば、スノーラインより外側の低温の条件であっても、 H_2O による火山活動や地形更新など、地球とは素材 (珪酸塩マグマ、 H_2O) や営力 (地球内部の熱放出、潮汐力など) が異なっているが、地質現象と呼べるものが起こることがわかってきた。

スノーラインより外側の惑星としては、木星と土星の巨大ガス惑星と天王星と海王星などの氷惑星が、その代表的なものとなる。

かつての太陽系形成の標準モデルでは、天王星や海王星の形成に要する時間が非常に長くなり、太陽系の年齢 (45 億年) を越えてしまうこと、地球型惑星の離心率が大きくなること、月の巨大衝突 (後述) が起こらないこと、などの課題があった。だが、多数の小天体の衝突集積が短期間にできる暴走成長 (runaway growth) と、ある時期に一定の軌道間隔で原始惑星が整列してひとつの天体だけが成長する寡占成長モ

デルなどの導入によって解消されてきた（小久保，2016）。木星型惑星の形成モデルとしては、円盤不安定モデル（嶺重，1999）などもあったが、現在ではコア集積モデルが有力である。このモデルでは、円盤ガスが消滅するまでの数 100 万年以内に、コアの質量が地球の 10 倍程度になっていることが束縛条件になる（堀，2016）。これらの条件はスノーラインの外側であれな氷が加わるので解消される。

氷惑星は、スノーラインより外側に位置しているため素材として氷が大量に存在するが、惑星の基本材料である岩石や鉄と比べて、氷成分を選択的に多く（岩石の 15 倍程度）集める必要がある（黒崎，2016）などの新たな課題も出てきた。

スノーラインの位置は、固定されたものではなく、恒星の温度変化や惑星空間のガスの有無やその量などの条件によって変化する。そのため、恒星系形成の初期には、現在とは異なった位置にスノーラインがあったと考えられている（中本，2016）。

スノーラインは、惑星系の形成とその過程、また惑星の特徴を決める上で重要な条件となる。惑星が形成されると、表層の大気組成やアルベド、惑星内など条件が影響するため、相変化は複雑になってくる。その全貌は、まだ解明されていない。

d ハビタブルゾーン

生命が発生でき、かつ継続的に生存可能な条件を満たしている軌道領域を、ハビタブルゾーンと呼ぶ。ハビタブルゾーンの条件として、天体の表面に H_2O の液体が存在しているかどうかは、生命の誕生や進化を考える上で重要となる（小出，1998；1999b；1999c）。地球生物を見ると、その元素構成や化学進化において、水の関与は不可欠ではあるという、メディアオクリティの仮説により導かれるものである。だが、海が存在が生命の存在を確定するものでなく（小宮，2016）、生命の誕生と海存在の関係は、まだ不明な点が多い。

ハビタブルゾーンができるかどうかは、放射エネルギー量や放射の特徴（波長）など主恒星の条件が関与するが、惑星の離心率、自転状況（自転軸の傾き、自転速度）、表層環境（海や陸状況）、構成物（陸や氷の成分、海の有無）、サイズ、アルベドな

どの惑星自体の条件、さらに惑星の大気組成、量、状態（雲の有無）、海の広がり、水量、成分などの条件も重要になるであろう。だが、その詳細は解明されていない。

アルベドは、惑星の表層環境や気象条件を決める重要な値となる。同じ惑星であっても、表層に液体の海があるのか、固体の氷になっているのか、などによってアルベドが大きく変化する。例えば、同じ地球であっても、海が存在する条件と全球凍結になる条件のいずれもが、平衡状態として起こりうることが知られている（門屋，2016）。だが、両平衡状態におけるアルベドには大きな違いがある。

ある惑星がハビタブルゾーンに存在したとしても、初期条件として、惑星に H_2O がどの程度取り込めたのか、その H_2O が惑星表層に分布していたのか、 H_2O が表面に長期間留まったのか、 H_2O が表層で最初から液体の水として存在できたのか、などを考慮すべき条件がいろいろある（玄田・阿部，2016）。

そのため、太陽系におけるハビタブルゾーンも、内側境界で 0.76 ~ 0.99 au の範囲が、外側境界で 1.15 ~ 1.9 au までの範囲があり、推定値にもかなりの違いがある（Abe, 1993, 阿部，1996, Abe et al., 2011, Kasting et al., 1993; Kopparapu et al., 2013）。ハビタブルゾーンを厳密に決めることができなくとも、恒星の性質（サイズや光度、温度など）が決まれば、惑星軌道におけるハビタブルゾーンのおおよその位置を決めることができる。原理的にはハビタブルゾーンは、どのような恒星系においても存在しうるものである。そこに惑星が存在していれば、生命誕生の初期条件は満たすことになる。ハビタブルゾーンに、惑星が存在するか否かが重要になってくる。

地球型惑星だけでなく、巨大ガス惑星（木星型惑星）のまわりにもハビタブルゾーンが存在する可能性がでてきた。木星型惑星をめぐる衛星には、氷でできた氷衛星が存在し、その地下には大規模な地下海が存在すると考えられている。母惑星の潮汐加熱（潮汐変形による摩擦熱）や形成時の集積熱（衝突エネルギーあるいは重力エネルギー）、放射性核種の壊変熱などが熱源となり、海の継続や生命の発生の可能性もあることが指摘されてきた（木村，2016）。ハビタブルゾーンとしては、軌道や惑星表層の条件だけでなく、衛星の地下海という局所的な領域も、考慮しなければならない

なってきた。

ハビタブルゾーンだけで考えると、主系列星の恒星より、赤色矮星 (red dwarf) や橙色矮星 (orange dwarf) などの寿命の長い天体が、生命誕生や進化には都合がいいという見解もある (例えば、Pepe et al., 2011, Kaltenegger et al., 2011 など)。矮星は小さいが、長期間、安定にエネルギー放射をおこなえる恒星で、かおかつ古い惑星系は惑星の自転と公転が共鳴し安定した状態 (潮汐ロックと呼ばれる) になることが多い。潮汐ロックされた惑星では、昼と夜の境界に局所的だがハビタブルゾーンができ、生命誕生や維持、進化には都合がいい領域となるとも考えられる。まだ作業仮説であって、証拠もなく検証もされていない。

ここまでスノーラインやハビタブルゾーンの条件について、メディアオクリティの仮説をもとに考えてきた。もし、水 (H_2O) を中心としない生命が存在しうるとすればどうなるのか。水のない惑星 (例えば、金星など)、あるいは氷惑星、巨大ガス惑星のテクトニクスは、どのようなものなのか。果たして、普遍性が抽象できるのだろうか、今後の課題である。

4 系外惑星テクトニクス

1990年代になると太陽系外の情報が加わり、新たな展開を迎えることになった。太陽系との類似性から、他の天体にも惑星系があるとは考えられていたが、実際に観測できたのは、1992年 (Wolszczan and Frail, 1992) のことであった。パルサーの摂動から2つの惑星が存在していることが検証された。太陽系外惑星の最初の発見となった。

1995年には、太陽と似た質量 (1.1倍) の恒星 (ペガサス座51番星) から、惑星が発見された (Mayor and Queloz, 1995)。その惑星は木星に似た質量 (0.47倍以上) をもち、非常に恒星に近い軌道 (水星より内側、0.05天文単位) のところを、高速 (4.2日の公転周期) で回っていることがわかってきた。この惑星は、今まで太陽系の研究からは予想できない特異なものであり、衝撃をもって受け止められた。

系外惑星の発見により、地球以外の惑星や天体の存在とその多様性がわかってきた。そのため、テクトニクスも系外惑星の多様性に対応できるような普遍性が必要になってきた。

そのために、以下では、系外惑星の探査方法と現在までわかっている多様性を整理しておこう。

a 系外惑星の観測法

系外惑星の発見には、いくつかの手法が用いられている。視線速度法(ドップラー法)、アストロメトリ法、トランジット法、マイクロレンズ法、直接撮像法などがある。それらの概要をまとめていく。

視線速度法

視線速度法は、ドップラー法とも呼ばれている(佐藤, 2016)。惑星の公転により恒星も両質量の重心を回ることになる。恒星と惑星の質量差が大きいため、恒星の動きは微小であるが、地球からみてその運動が前後であれば、恒星の発する光の波長が伸び縮みする。その変化を調べることで、系外惑星の存在を検知するものである。この方法では、主星の近傍の重い惑星ほど発見しやすくなる。視線速度の変化周期から惑星の公転周期が、視線速度変化のパターンから惑星の軌道離心率が、視線速度変化の大きさから惑星の質量の下限値が、視線速度変化の周期性の離散的解析から惑星数がわかる。現在では、視線速度法で地球と同程度の質量や同程度に離れた公転半径、10年以上の公転周期をもった系外惑星も発見されている。

アストロメトリ法

アストロメトリ法は、年周視差を利用するものである。年周視差とは、地球の公転直径で生じる恒星の位置変化をいう。年周視差が観測できるのは、太陽系近傍の恒星である。年周視差から恒星の固有運動を除いた運動のずれから、公転周期、軌道、

質量などがわかる（山口，2016）。惑星の公転周期が長く、主星から遠く、質量が大きいほど、主星の位置を変化させる。そのため、視線速度法では見つけにくかった恒星で、系外惑星が発見できる。ただし、地球の公転周期は1年と長いので、長期に渡る精度のよい観測が必要になる。

トランジット法

トランジット法は、恒星の前を惑星が通過（トランジット transit）した時の明るさの変化を検出するものである（福井，2016）。ケプラー衛星はこの方法を用いたもので、後継機の TESS も運用されている。トランジットの周期から惑星の公転周期が、主星の減光度から惑星の半径が、トランジットの継続時間から惑星軌道の視線方向に対する傾きがわかり、その傾きから惑星の質量が求められる。質量と半径がわかれば密度が求められ、ガス惑星か岩石惑星かという惑星の構成も推定できる。視線速度法と組み合わせることで、トランジット時のスペクトル解析から大気組成や表面温度が、スペクトルの偏移から主星の自転に対しての公転の向きがわかる。

マイクロレンズ法

マイクロレンズ法は、後方にある恒星や銀河が、前方にある天体の重力によって曲げられる重力レンズ効果を使った方法である。重力レンズ効果の効果は小さいが、目的的天体の明るさの変化を観測するものである（住，2016）。主星からの惑星の距離や質量が測定でき、スノーライン付近にある惑星が発見しやすい方法となる。

直接撮像法

直接撮像法は、惑星の反射光を観測する方法であるが、いくつかの装置を利用する。大気ゆらぎの可変形鏡を変形させて補正する補償光学と恒星部分と同じ直径の遮光盤を置き弱い光を観測するコロナグラフを用いておこなわれる（松尾，2016）。現状では、若い恒星で、公転周期の大きな巨大惑星が発見されている。直接撮像法では、

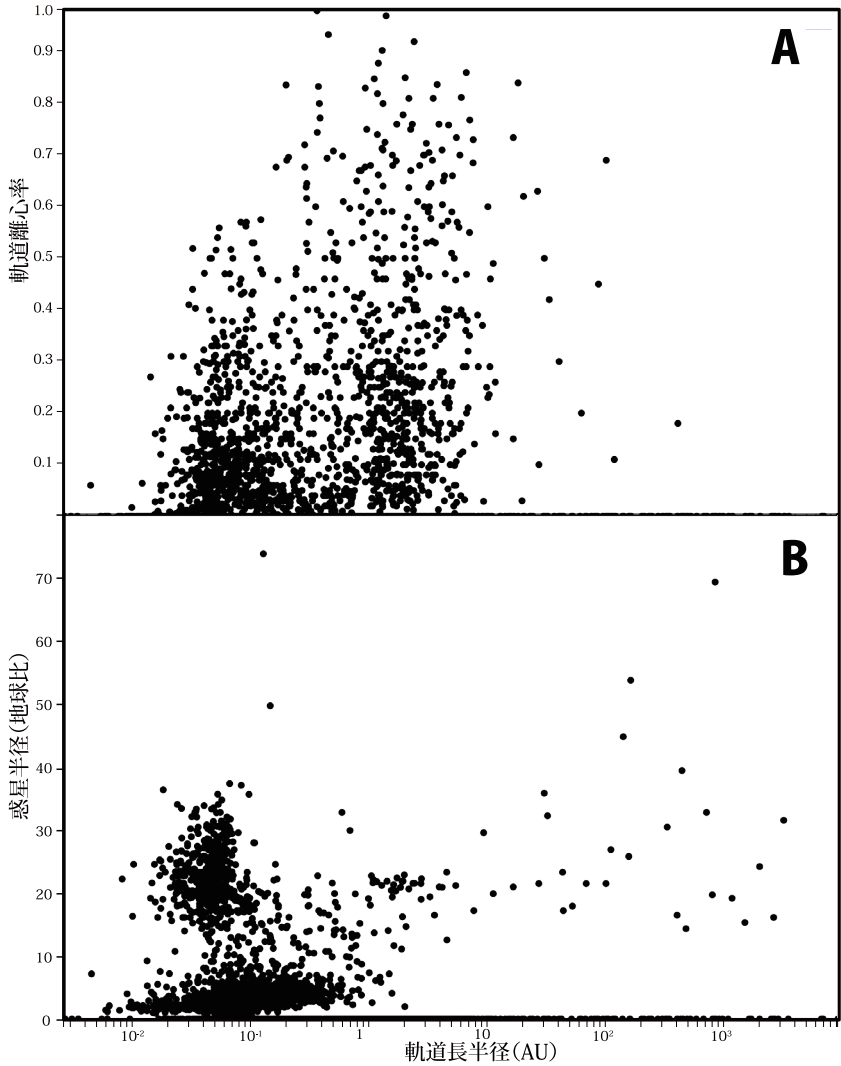


図 9-5 系外惑星の多様性

発見された系外惑星の軌道長半径（天文単位 astronomical unit: au）と離心率（A）と惑星半径（地球を 1 とした時、B）で示したもの。データは 2021 年 4 月 27 日時点現在のもの（Exoplanet Team, 2021）。

惑星の公転周期、表面温度、質量、大気組成の情報もえられることになる。直接撮像法では、惑星の大気や表面の情報を求められる唯一の方法となる。

b 系外惑星の区分

さまざまな方法で系外惑星は発見されてきた。今後も太陽系外の惑星の発見は続いていて、2021年4月27日時点で惑星は4,718個、惑星系が3,489個、複数の惑星をもった系が772個となっており、今後も数は増え続けるであろう（Exoplanet Team, 2021）。

観測から、多数の恒星で惑星系が見つかっており、惑星に多様性があることがわかってきた（図9-5）。多様性が把握されてくると、分類がなされる。いくつかの特徴に基づいて区分されているが、メディアオクリティの仮説で太陽系との類比により、地球に似ているもの「地球型惑星」、ガスを主成分とするであろう「木星型惑星」、氷を主とするであろう「海王星型惑星」に分類されてきた（葛原, 2016）。それらの分類は、軌道長半径と質量で見るとよく区分される（図9-6）。

組成による区分

地球型惑星は質量が地球の10倍以下のもので、主成分が岩石だと考えられている。発見されている系外惑星には、1.5倍以上の質量のものが多く、スーパー・アース（super earth）と呼ばれている。

海王星型惑星は、地球の10～数10倍の質量になるもので、主成分はいくつかの密度測定から、 H_2O の氷と岩石からなると推定されている。また、恒星に近い軌道をもっているものも多数見つかっており、ホット・ネプチューン（hot neptune）と呼ばれている。

木星型惑星は、地球の数10倍以上の質量をもつものである。恒星に近い軌道を回るものを、ホット・ジュピター（hot Jupiter）と呼ぶ。中心星から10 au（astronomical unit 天文単位）以上離れた公転軌道を持つものを、大軌道巨大惑星と呼び、数百～数千 au も離れた軌道をもつものも見つかっている。

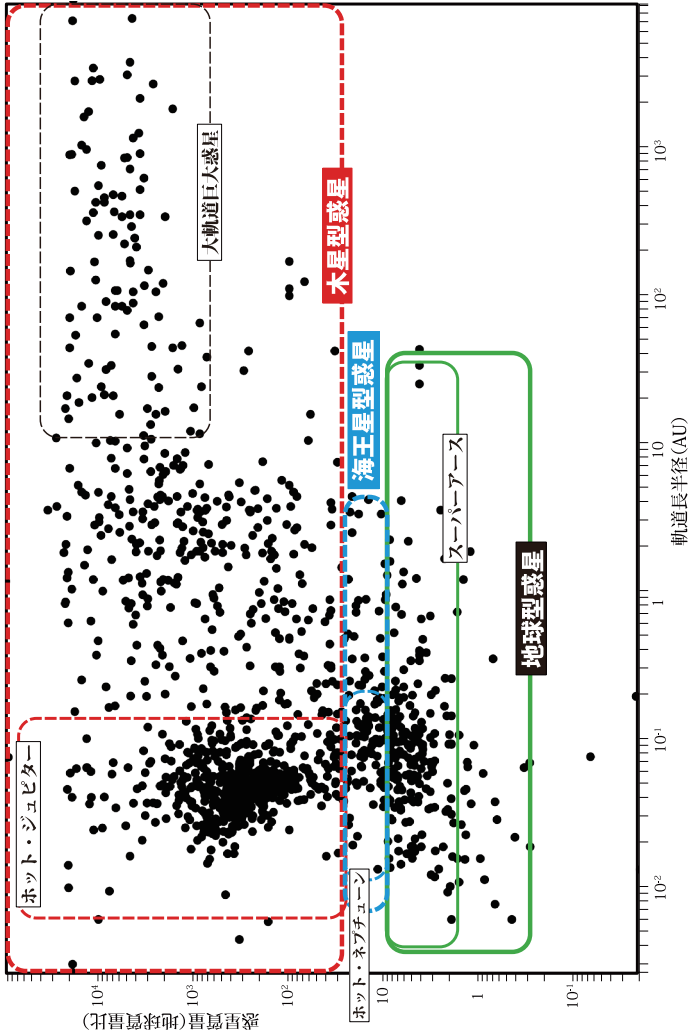


図 9-6 系外惑星の区分

発見された系外惑星の軌道長半径 (天文単位 astronomical unit : au) と惑星質量 (地球質量を 1 とした時) で示したもの。それらの数値によって地球型惑星、木星型惑星、海王星型惑星、木星型惑星に区分される (太い破線)。地球型惑星はスーパーアース、木星型惑星はホット・ジュピターと大軌道巨大惑星に細分される (細い実線)。ただし、惑星の組成すべてが明らかになっていないわけでもない。データは 2021 年 4 月 27 日時点のもの (Exoplanet Team, 2021)。

軌道による区分

軌道の特徴による系外惑星の区分もなされている。離心率の大きなエキセントリック・プラネット (eccentric planet) (原川, 2016) や逆行惑星 (retrograde planet)、連星 (2つ以上の恒星) を回る周連星惑星 (circumbinary planet) (眞山, 2016)、パルサー (中性子星) を回るパルサー惑星 (pulsar planet) (平林, 2016) など、特異な系外惑星も見つかっている。

例えば、赤色矮星を主星とする NGTS-1 (太陽質量の 0.617 倍、半径 0.573 倍) で、はじめて発見された惑星は巨大惑星 (NGTS-1b) であった。小さな恒星の周りを、主星の 23.8% の半径をもった巨大惑星となっている。

ハビタブルゾーンにあり、水が存在しそうなハビタブル惑星 (habitable planet) は、生命の発生の可能性のあることになる。その中でも地球に似た条件をもった惑星 (ゴールドロック惑星 goldilocks planet と呼ばれることもある) としては、岩石でできていること、半径が地球の 1.6 倍以下 (0.5 ~ 1.5 倍)、質量が 6 倍以下 (0.1 ~ 5 倍) であることが条件となり、2020 年 10 月 5 日現在太陽系外惑星として 60 個がリストアップされている。内訳としては、火星サイズの小さいもの (質量 0.1 ~ 0.5、半径 0.4 ~ 0.8) が 1 個、地球サイズ (質量 0.5 ~ 5、半径 0.8 ~ 1.5) が 23 個、地球より大きいサイズ (質量 5 ~ 10、半径 1.5 ~ 2.5) が 36 個となる (Cornell, 2020)。

多数の系外惑星が発見されてきたが、その多様性は大きかった。我々の太陽の惑星系は、大きな多様性の一つに過ぎないことがわかってきた。これまで惑星系形成のシナリオとして、メディアオクリティの仮説から我々の太陽系で構築された「標準モデル」(コア集積モデル) は、もはやそのままでは普遍化は不能となり、「地球モデル」と呼ぶべきものになった。もちろん、多様な系外惑星の発見から、惑星形成における「地球モデル」の拡張もなされており、系外惑星の多様性のいくつかは説明できるようになってきたが、普遍性はない。

今後も系外惑星の多様性は増えていくであろうが、そのタイプごとに形成モデルを考

え、さらに「系外惑星テクトニクス各論」となっていくだろう。タイプの違いの数だけ、系外惑星テクトニクス各論が生まれてくることになるはずである。現実の惑星系は、タイプごとに、置かれた環境や条件に違いが生じ、惑星進化にも多様性が生まれてくるであろう。

普遍的テクトニクスは系外惑星の多様性を取りこんだものでなければならない。またその中で、生命の誕生、進化も考えられていかなければならない。

5 普遍的テクトニクスへ

地球を対象とした全地球テクトニクスが、すべての天体を対象にする普遍的テクトニクスとなっていく道筋を、いくつかの素材から考えてきた。全地球テクトニクスを普遍化するには、太陽系初期の現象（衝突集積テクトニクス）や太陽系内の多様な天体（太陽系内天体のテクトニクス）、加えて多様な系外惑星、などをすべて網羅的に統一的なテクトニクスとしてモデルをつくるのは、すぐにはできそうもない。

地球以外でこのような多様性があることがわかってきたことから、現状では、全地球テクトニクスは、地球固有のモデルに限定されることが明らかになってきた。

しかし、惑星形成モデルは、シミュレーションによって提示されているものなので、初期値や計算モデルの選択によっては、現状の知見や多様性を説明できるかもしれない。惑星系形成モデルでは、初期に集積衝突テクトニクスが起り、その延長線上でなんらかの条件の違いによって、太陽系内の惑星の多様性の萌芽が生まれたことは確かである。そこから惑星ごとの個性を生み出されていくことになる。惑星形成モデルができれば、現在の多様な太陽系内の天体から、ある程度、検証ができるいかもしれない。

以下では、現在の惑星形成モデルで考えられている多様性形成をみていく。

a 汎惑星形成モデルへ

太陽系の惑星形成モデルで、かつて「標準モデル」とされたものは、太陽系の惑星の詳細な情報が明らかになるにつれて、形成過程をうまく説明できなくなってきたが、

現在では修正されて「コア集積モデル」へと発展してきた。

太陽系内の地球外天体から、太陽系形成初期に起こった衝突集積現象による「衝突集積テクトニクス」が重要や役割を果たしていることがわかってきた。形成初期の情報を残した月などの天体を参照して、衝突集積テクトニクスから初期地球の変遷史が編まれてきた。その後の変遷史は、地球の固体部分についてはブルームテクトニクスで説明されるが、もっと広い視点で「全地球テクトニクス」として、普遍性を導く必要があるだろう。

太陽系天体の固有性を重視する「テクトニクス各論」が必要だが、太陽系の各種の天体の類似と対比から、スノーラインとして固体の氷の存在領域、ハビタブルゾーンとして液体の存在領域などに規則性があり、惑星形成において重要な役割があった。また、単に太陽からの距離だけでなく、衛星での地下海の存在などから、生命誕生に関しては、いろいろな可能性もあることがわかってきた。

また、系外惑星の多様性から、従来の標準モデルの修正を迫られている。より普遍的な形成モデルは「汎惑星形成モデル」と呼ばれている。

b 軌道進化モデル

「汎惑星形成モデル」は、まだ完成はしていないが、いくつかの課題の指摘や多様性を説明するための修正案が提案されている。標準モデルでは、ある軌道で形成された惑星は移動（動径方向）しないが、惑星が形成期、あるいは形成後動径方向に移動できるとするものは、「軌道進化モデル」と呼ばれている。軌道進化モデルには、円盤移動モデル、惑星散乱モデル、古在移動モデルが主なものとして提案されている。

円盤移動モデル

円盤移動モデルは、標準モデルを拡張した軌道進化モデルで、原始惑星系円盤で起こる現象となる（武藤，2016）。成長中の惑星の重力により、円盤ガスの密度分布が擾乱されることで、惑星が内側や外側へ移動する。ただし、原始惑星円盤が消失

後は、移動できないモデルとなっている。

円盤移動モデルには、微惑星や岩石惑星が円盤ガス内に間隙なく主星に近づく場合と、巨大惑星が間隙を開けて近づく場合がある。前者の移動速度は速くなるが、いずれも形成された惑星は外側から内側へと移動することになる。

このモデルでは、惑星の多様な軌道分布を説明することができる。だが、離心率が大きな惑星が形成されても、円盤から軌道離心率を小さくするように力が加わるので、ほぼ円軌道の惑星だけができることになる。そのため、エキセントリック・プラネットの軌道を説明することができないという課題がある。

惑星散乱モデル

惑星散乱モデルは、複数の巨大惑星がお互いを弾き飛ばすもので、主にエキセントリック・プラネットの形成を説明するために考えられたものである（野村ほか，2007）。惑星散乱モデルは、スリングショット (slingshot) モデル、あるいはジャンピングジュピター (jumping Jupiter) モデルとも呼ばれている。

このモデルは、原始惑星系円盤の消失後、複数の巨大ガス惑星の重力による相互作用をシミュレーションしたもものから提案された。巨大惑星が 2 つの時は、近いところに存在するとお互いを弾き飛ばし合うことになる。惑星が 3 つ以上の場合、必ず軌道が不安定になり、お互いを弾き飛ばし合い、そのうちの 1 つは惑星系から弾き飛ばれることもある。

惑星散乱の後、さらに軌道が変わることがある。内側の巨大惑星の近星点が、0.1 天文単位以下になった時は、潮汐力によって軌道長半径と軌道離心率が小さくなり、円軌道へと変化したり、惑星同士で古在移動（次に説明）が起こり、多様な公転距離・軌道離心率・軌道の傾きの惑星ができることがある。

惑星散乱モデルでは、巨大惑星が円軌道をとることでホットジュピターの形成や、エキセントリック・プラネット、逆行惑星の形成を説明することができる。ところが、惑星散乱が起きると、主星から離れたところにある円軌道の惑星の形成が説明ができなくな

るという課題もある。

古在移動モデル

軌道面で 40 度以上傾いた連星では、遠方の 3 つ目の天体からの摂動を受けると、惑星の軌道離心率と軌道の傾きが周期的に変動することがある。これは、古在メカニズム (Kozai mechanism)、あるいは古在・リドフメカニズム (Kozai-Lidov mechanism) と呼ばれているものである。

一般に、内側の惑星の軌道離心率が大きくなったとき、近星点が 0.1 天文単位以下になると、主星からの潮汐力を受けて軌道離心率が小さくなる。だが、古在メカニズムが働くと、もともとは円形軌道であっても、大きな離心率の軌道や、傾いた軌道が逆行軌道になる「反転」も起こる。

さらに、古在メカニズムと潮汐力の組み合わせによって、惑星の軌道が円軌道へと変わることができる。このような古在メカニズムを取り入れたものを、「古在移動モデル」という (Kozai, 1962, Lidov, 1962)。

古在移動モデルでは、2 つの惑星でも逆行軌道の惑星ができたり、さまざまな軌道離心率 (極端に大きな軌道離心率も) や傾きのエキセントリック・プラネットも説明できる。ただし、外側の傾いた軌道に伴星や惑星があることが前提になるが、それぞれの必要条件が複雑になり、観測による検証が困難となる。

c モデルと多様性

上では示さなかったが、ホットジュピターも、円盤移動モデル、惑星散乱モデル、古在移動モデルで形成することが可能である。ここで紹介した標準モデルに、軌道進化モデルとして、円盤移動モデル、惑星散乱モデル、古在移動モデルなどを加えることで、かなり多くの惑星系を説明できそうである。

だが、それぞれの惑星系の形成において、どのモデルが都合がいいかは、他の軌道で巨大惑星の有無、伴星 (連星の内の暗い方) の有無、などによって初期条件 (あ

るいは境界条件)が変わるので、観測できればどのモデルで形成されたかの可能性を絞ることができるだろう。

例えば、もし、外側に伴星があり巨大惑星がないければ古在移動モデルの可能性が高く、外側にエキセントリックな巨大惑星があれば惑星散乱モデルの可能性が高い、伴星がなければ古在移動モデルは適用できない、などとモデル選択が可能になる。

直接撮像法によって、恒星から遠方(天王星より外側、20 au 以上)に存在する巨大惑星が発見された。遠方の巨大惑星は公転周期が長く、惑星軌道がまだ決定されていない。だが、このような遠方にある巨大惑星は、標準モデルでも、円盤移動モデルや古在移動モデルでも説明できない。もしエキセントリック軌道ならば、内側で形成された巨大惑星が惑星散乱によって遠方に飛ばされた可能性があるが、円軌道ならばその軌道で形成されるモデルを考える必要がある。

エキセントリック・プラネットや逆行惑星の形成は、円盤移動モデルでは説明できず、惑星散乱モデルか古在移動モデルで説明される。伴星がない恒星まわりでエキセントリック・プラネットや逆行惑星が見つかったので、惑星散乱モデルの可能性が大きいが、まだ情報不足である。

実際の観測でホットジュピターが複数個、伴星が見つかっていても、その恒星系に他のタイプの惑星が存在するかどうかはわからないと検証はできない。

従来の標準モデルでは、低質量の恒星では、原始惑星系円盤の質量も小さく、大型の巨大ガス惑星が形成される確率(1個の赤色矮星につき0.07個)は低いと考えられていた。しかし、発見数は少ないが、赤色矮星を公転している巨大惑星はいくつ(ケプラー45bやWASP-80b)も見つかっている。したがって、多数の天体があると、シミュレーションで稀な現象、結果となっても形成されることもあることがわかってきた。現実の多様性が、低い確率のモデルの必要性も生み出していることになる。

多様な系外惑星の探査は、今後も継続される。そこから、もっと特異な惑星も見つかってくるであろう。その都度、これまでのモデルを修正しながら、より精度の高い、系外惑星の形成各論を作成していく必要である。やがて多様性の範囲が大まかにでも

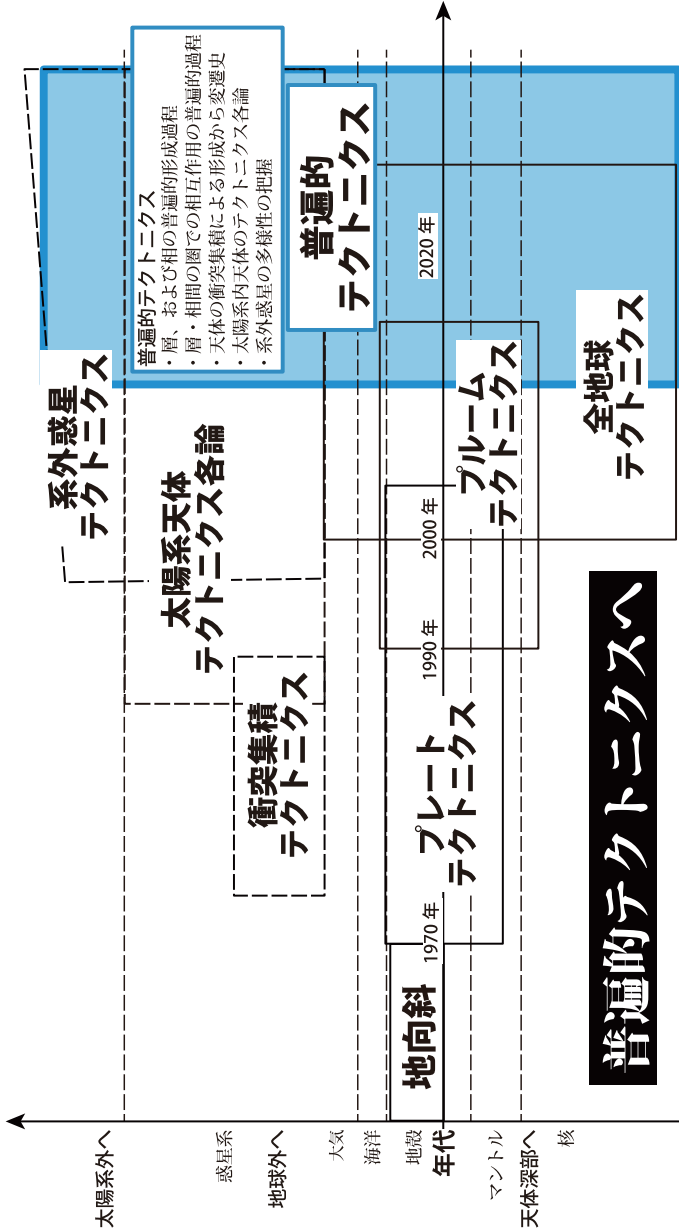


図 9-7 普遍的テクトニクスへ

普遍的テクトニクスは、全地球テクトニクスよりさらに抽象化されたものとなる。太陽系初期に起こった衝突集積テクトニクス、太陽系の天体のテクトニクス各論、そして多様な系外惑星へ適用可能なモデルから抽象化されたテクトニクスを目指す。

おさえられたら、各論の多様性（メタ的多様性）が把握できるであろう。

d 普遍的テクトニクスへ

太陽系外から多様な系外惑星の発見されたことによって、全地球テクトニクスの適用範囲も限定されたものになりつつある。現状の多様性をみると、ひとつのテクトニクスモデルに収斂するのは難しそうである。形成初期には「汎惑星形成モデル」があり、その後、天体の初期条件に違いによって、天体ごとのテクトニクスが進んでいくことになる。それらを普遍的にまとめられたものが「普遍的テクトニクス」になる（図 9-7）。

衛星望遠鏡による系外惑星の探査は今後も計画しているため、さらなる異形の惑星が発見されてくるであろう。普遍的テクトニクスの提唱は、まだ時期尚早だろう。だが、すべての多様性、情報、可能性が出そろうまでは待つことはできない。太陽系や既知の系外惑星の情報を素材にして、より多くの多様性が説明できる暫定的「普遍的テクトニクス」を繰り返し提唱し、修正しながら目指していくことになるだろう。

その過程において、検証できた、あるいは検証可能な太陽系の多様性の把握は重要である。今後も身近な太陽系の探査による多様性の把握、精査が不可欠となる。少ない情報を最大限に活かす方法として、メディアオクリティの仮説を活用してきた（本章3a、3b）。メディアオクリティの仮説は、既知のデータを母集団とする一種のアブダクションによる仮説構築がおこなったものである。メディアオクリティの仮説を、今後入手できるはずの太陽系内の天体からの情報、系外惑星の新しい情報へと演繹していき、検証していくことになる。この方法論は、現存する情報から仮説（モデル）が帰納され、新しい多様性へと演繹していくという、仮説演繹法に他ならない。

メディアオクリティの仮説や惑星形成モデルなど、現状で拠り所になる仮説があることは重要である。多様性の把握が不十分の場合は、モデルの頻繁な修正が必要になるだろうが、帰納、演繹、修正が繰り返されるのは、健全な科学的方法論といえる。

知的営みの歴史を鑑みると、多様性が増えたり、詳細な記載が増えることで、仮説では説明できない例外、適用不能な事例など、仮説の限界がくることになる。現在、

全地球テクニクスは地球以外への適用には限界を迎えた。系外惑星に、説明できない多様性が多く見つけてきた。今後、パラダイム転換が起こるはずだ。それがいつか起こるかは不明だが、どんな状況であっても、科学は停滞することは良しとしない。アブダクション、仮説演繹法を駆使して進んでいくことになるだろう。

▼自立した人

2020年9月18日、連邦最高裁判事（陪席判事）のギンズバーグ（Ruth Bader Ginsburg、RBGと略されることもある、1933 - 2020）女史が亡くなったことが大きく報道された。彼女の存在やその業績の大きさは、ドキュメント番組を見てはじめて知った。聡明で能力があるのに、自身が女性差別を受け、それでも「レディ」的なやり方で性差別の撤廃を進めてきた。アメリカ合衆国ではリベラル派として差別解消の象徴でもあったようだ。裕福でなかった小さい時、RBGに母がいった言葉。

My mother told me two things constantly

One was to be a lady

The other was to be independent

母は私にいつも二つのことを言っていました

一つは、レディでありなさい

もう一つは、自立した人になりなさい

女性の人権を守り、性差別の撤廃を進めた RBG が、母の教えのレディとして自立を守ってきた。その背景にはよき理解者の伴侶もいた。RBG のような人たちが構築してきたアメリカの真の民主主義が、強硬で独善的な指導者によって、危機的状況に陥ってしまった。アメリカの民主主義が衰えると、「非民主主義的」国家の勢力が増してくる。アメリカの指導者が変われば、民主主義は復活するのだろうか。振り返って我が国の民主主義は大丈夫だろうか。日本の民主主義は、どうなっているのだろうか。形式的には民主主義をとっているようだ。形式的には自由と権利は保証されているようだ。形式的には教育、勤労、納税の義務を果たしているはずだ。形式的には生存、教育を受け参政権を持っているはずだ。だが、すべて国民は法の下に平等のはずなのに、なぜか障害者差別解消法があり今も差別が継続している。同一労働同一賃金制度があるのに、なぜか賃金格差が現存する。民主主義政治のjはずなのに、長期の一党独裁政治に見える。だれもが被選挙権をもっているのに、なぜか政治家には世襲が多い。学校では嘘はいけないと教え、メディアで堂々と虚言を操る政治家がいる。嘘をつくら罰せられるのに、なぜか嘘をついた政治家が安穩の暮らしている。国民に辛いルールを押し付けながら、なぜんか影でルール違反する政治家がいる。前時代のことだと思っていたのに、特権的な「上級国民」も未だに存在している。日本の民主主義はどこにいったのだろうか。日本は、自立しているのだろうか■

I don't know a dream that's not been shattered

But it's all right, it's all right

For we've lived so well so long

(snip)

And I'm trying to get some rest

私は、打ち砕かれたことのない夢など知らない

それでも、私は大丈夫、大丈夫だ

私たちは、それなりにうまく長く生きてきた

(中略)

だから少しでも休むとしよう

(American Tune. song: Simon & Garfunkel, songwriter; Simon, P., 1973.)



シラフラ

シラフラは白い傾斜地という意味。北海道爾志郡乙部町滝瀬 滝瀬海岸。著者撮影。

文献

A

Abe, Y., 1993. Physical state of the very early Earth. *Lithos*, 30, 3-4, 223-235.

阿部豊, 1996. 太陽系の起源. 住明正・平朝彦・鳥海光弘・松井孝典編, 地球惑星科学 1. 地球惑星学入門. 岩波書店, 219-280.

Abe, Y., Abe-Ouchi, A., Sleep, N. H. and Zahnle, K. J., 2011. Habitable zone limits for dry planets. *Astrobiology*, 11, 5, 443-460.

Aramaki, S., Hirayama, K. and Nozawa, T., 1970. Chemical composition of Japanese granites Part 1. Variation trends of 400 analyses. *Bulletin of the Earthquake Research Institute, University of Tokyo*, 48, 491-505.

麻生享志・河谷淳, 2019. 原典による哲学の歴史. 公論社, 387 p.

鮑本一裕, 2006. 今日から使える微分方程式 普及版 例題で身につく理系の必須テクニック. 講談社. 254 p.

B

Baggini, J. and Fosl, P. S., 2002. *The Philosopher's Toolkit: A Compendium of Philosophical Concepts and Methods*. Blackwell, 長滝祥司・廣瀬覚訳, 2007. 哲学の道具箱. 共立出版, 230 p.

Baggini, J. and Fosl, P. S., 2007. *The Ethics Toolkit: A Compendium of Ethical Concepts and Methods*, Blackwell, 長滝祥司・廣瀬覚訳, 2012. 倫理学の道具箱. 共立出版, 272 p.

Becon, F., 1620. *Novum Organum*. 服部英次郎代表訳, 1973. 世界の大思想 8 ベーコン. 河出書房新社, 482 p.

Bennett, C. L., Larson, D., Weiland, J. L., Jarosik, N., Hinshaw, G., Odegard, N., Smith, K. M., Hill, R. S., Gold, B., Halpern, M., Komatsu, E., Nolte, M. R., Page, L., Spergel, D. N., Wollack, E., Dunkley, J., Kogut, A., Limon, M., Meyer, S. S., Tucker, G. S. and Wright, E. L., 2013. Nine-year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) observations: final maps and results. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 208, 20, 54 p.

Bilek, S. L., 2010. The role of subduction erosion on seismicity. *Geology*, 38, 479-480.

Bird, P., 2003. An updated digital model of plate boundaries. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 4, 3, 1027, 1-52.

Bortolon, L., 1968. Leonardo. 杉浦明平訳, 1978. 世界を創った人びと 11 レオナルド・ダ・ヴィンチ ルネサンス万能の天才. 平凡社, 78 p.

Bouma, A. H. 1962. *Sedimentology of some Flysch deposits: A graphic approach to facies*

interpretation. Elsevier, 168 p.

Bouma, A. H. 1969. *Methods for the Study of Sedimentary Structures*. Wiley-Interscience, New York, 458 p.

Bowring, S. A. and Williams, I. S., 1999. Priscoan (4.00 - 4.03 Ga) orthogneisses from northwestern Canada. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 134, 3-16.

Boyer, S. E. and Eliotte, D., 1982. Thrust Systems. *Bull. Amer. Assoc. Petrol. Geol.*, 23, 239-267.

C

Carnap, R., 1966. *Philosophical Foundations of Physics*. 沢田允茂・中山浩二郎・持丸悦朗訳, 1968. *物理学の哲学的基礎*. 岩波書店, 319 p.

Chappell, B. W. and White, A. J. R., 1974. Two contrasting granitic types. *Pacific Geology*, 8, 173-174.

千秋博紀・丸山茂徳・李野修士, 2010. マントル熱進化モデルの新展開. *地学雑誌*, 119, 6, 1215-1227.

Cimino, B., 1968. Leonardo. 青木靖三訳, 1978. *世界を創った人びと 17 ガリレオ 近代科学の創設者*. 平凡社, 78 p.

Clift, P. and Vannucchi, P., 2004. Controls on tectonic accretion versus erosion in subduction zones: Implications for the origin and recycling of the continental crust. *Rev. Geophys.*, 42, doi: 10.1029/2003RG000127.

Cohen, K. M., Finney, S. C., Gibbard, P. L. and Fan, J. -X., 2013. Updated. The ICS International Chronostratigraphic Chart. *Episodes*, 36, 199-204.

Cohen, K. M., Harper, D. A. T., Gibbard, P. L., Fan, J. -X. and (c) International Commission on Stratigraphy, 2020. INTERNATIONAL CHRONOSTRATIGRAPHIC CHART. v 2020/01. URL: <http://www.stratigraphy.org/ICSchart/ChronostratChart2020-01.pdf>. (2020年7月6日閲覧)

Coleman, R. G., 1977. *Ophiolites: Ancient Oceanic Lithosphere?* Springer Verlag, 229 p.

Cornnell, J., 2020. *Habitable Exoplanets Catalog*. Planetary Habitability Laboratory @ UPR Arecibo, <http://phl.upr.edu/projects/habitable-exoplanets-catalog>. (2021年1月19日閲覧)

Cutler, A., 2003. *The Seashell on the Mountaintop*. 鈴木豊雄訳, 2005. *なぜ貝の化石が山頂に? 一地球に歴史を与えた男ニコラウス・ステノ*. 清流出版, 254 p.

D

- Dana, J. D., 1873. On some results of the Earth's contraction from cooling, including a discussion of the origin of mountains and the nature of the Earth's interior. *Amer. Jour. Sci.*, 3, 5, 423-443; 6, 6-14, 104-115 and 161-171.
- De Franco, R., Govers, R. and Wortel, R., 2008. Nature of the plate contact and subduction zones diversity. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 271, 245-253.
- Dewey, J. F. and Bird, J. M., 1970a. Mountain belts and the new global tectonics. *Journal of Geophysical Research*, 75, 2625-s2647.
- Dewey, J. F. and Bird, J. M., 1970b. Plate tectonics and geosynclines. *Tectonophysics*, 10, 625-638.
- Descartes, R., 1637. *Discours de la methode*. 谷川多佳子訳, 1997. 方法序説. 岩波書店. 137 p.
- Dickinson, W. R., 1971. Plate tectonic models for orogeny at continental margins. *Nature*, 232, 41-42.
- Dickinson, W. R., 1973. Width of modern arc-trench gaps proportional of past duration of igneous activity in associated magmatic arcs. *Jour. Geophys. Res.*, 78, 3376-3389.

E

- 江尻憲昭・佐藤克宣・高谷康博・横山茂・渡辺祥介, 2014. 新改訂版倫理資料集. 清水書院. 291 p.
- Exoplanet Team, 2021. The Extrasolar Planet Encyclopaedia Catalog. <http://exoplanet.eu/catalog/> (2021年4月20日閲覧)

F

- 藤井敏嗣, 2003. マグマ. 山下輝夫・川勝均・菊地正幸・鍵山恒臣編, マグマダイナミクスと火山噴火. 朝倉書店, 42-68.
- 福井暁彦, 2016. トランジット法の原理. 井田茂・田村元秀・生駒大洋・関根康人編, 系外惑星の事典. 朝倉書店, 42-43.
- Fukao, Y., 1992. Seismic tomogram of the Earth's mantle: Geodynamic implications. *Science*, 258: 625-630.
- Fukao, Y., Maruyama, S., Obayashi, M. and Inoue, H., 1994. Geologic implication of the whole mantle P-wave tomography. *Jour. Geol. Soc. Japan*, 100, 4-23.

G

- 玄田英典, 2016. ジャイアント・インパクト. 井田茂・田村元秀・生駒大洋・関根康人編, 系外

- 惑星の事典．朝倉書店，198-199.
- 玄田英典・阿部豊，2016. 恒星まわりのハビタブルゾーン．井田茂・田村元秀・生駒大洋・関根康人編，系外惑星の事典．朝倉書店，118-121.
- Gohau, G., 1990. A history of geology. 菅谷暁訳，1997. 地質学の歴史．みすず書房，366 p.
- Gradstein, F. M., Ogg, J. G. and Smith, A. G., 2004. A geologic time scale 2004. Cambridge Univ. Press, 589 p.
- Goodman, N., 1955. Fact, Fiction, and Forecast. 戸澤義夫・松永伸司訳，1987. 事実・虚構・予言．勁草書房，352 p.
- Goodwin, B., 1994. How the leopard changed its spots: the evolution of complexity. 中村運訳，1998. DNAだけで生命は解けないー「場」の生命論．シュプリンガー・フェアラーク東京，東京，268 p.
- Gould, S. J., 1987. Time's Arrow, Time's Cycle: Myth and Metaphor in the Discovery of Geological Time. 渡辺政隆訳，1990. 時間の矢・時間の環ー地質学的時間をめぐる神話と隠喩．工作舎，277 p.

H

- Hall, J., 1859. Natural History of New York, Part VI, Paleontology, vol. 3, Albany, New York.
- 浜島書店編集部，2015. 最新図説 倫理．浜島書店，321 p.
- 浜島書店編集部，2020. 最新図説 倫理．浜島書店，345 p.
- Hanks, T. C. and Anderson, D. L., 1969. The early thermal history of the earth. Phys. Earth and Planet. Inter., 2, 1, 9-29.
- 原川紘季，2016. エキセントリックプラネット．井田茂・田村元秀・生駒大洋・関根康人編，系外惑星の事典．朝倉書店，24-25.
- 原岡喜重，2018. はじめての解析学 微分、積分から量子力学まで．講談社，354 p.
- Harland, W. B., R. L. Armstrong, A. L. Cox, L. E. Craig, A. G. Smith and D. G. Smith, 1990. A geologic time scale 1989. Cambridge Univ. Press, 263 p.
- 長谷川遼・磯崎行雄・大友幸子・堤之恭，2019. 中央構造線（MTL）の活動時期一三河大野ー伊平地域の低角度 MTL に隣接する三種類の白亜紀砂岩の砕屑性ジルコン年代からの制限一．地学雑誌．128, 3, 391-417.
- 服部英次郎，1973. 解題 ベーコン「学問の進歩」と「ノヴム・オルガヌム」．服部英次郎代表訳，世界の大思想 8 ベーコン．河出書房新社，447-455.
- 早川正巳，1988. 地球熱学．東海大学出版会，324 p.
- 平林久，2016. パルサー惑星．井田茂・田村元秀・生駒大洋・関根康人編，系外惑星の事典．

- 朝倉書店, 32-33.
- 廣川洋一, 1997. ソクラテス以前の哲学者. 講談社学術文庫, 東京, 393 p.
- Holmes, A., 1915. Contribution to the Discussion on Radio-active Evidence of the Age of the Earth. A rare original article from the British Association for the Advancement of Science report (85th. Meeting, Manchester), Section C-Geology, 432-434.
- Hori, S., Fukao, Y., Kumazawa, M., Furumoto, M. and Yamamoto, A., 1989. A new method of spectral analysis and its application to the Earth's free oscillations: The "Sompi" method. Jour. Geophys. Res., 94, 7535-7553.
- 堀安範, 2016. 木星型惑星の形成. 井田茂・田村元秀・生駒大洋・関根康人編, 系外惑星の事典. 朝倉書店, 200-201.

I

- 市川浩樹・土屋卓久, 2018. 外核の化学組成. 地学雑誌, 127, 5, 631-646.
- 市川裕介・小林透, 2011. ユーザの Web アクセス履歴のべき乗分布傾向に着目した属性推定手法の提案. 情報処理学会論文誌, 52, 3, 1195-1203.
- 井田茂, 2016. 惑星形成論の古典. 井田茂・田村元秀・生駒大洋・関根康人編, 系外惑星の事典. 朝倉書店, 172-173.
- 飯高隆, 2002. 沈み込むスラブの物語. 東京大学地震研究所編, 地球ダイナミクスとトモグラフィ. 朝倉書店, 96-118.
- 飯高茂・室田一雄・楠岡成雄, 2010. 朝倉数学ハンドブック 基礎編. 朝倉書店, 797 p.
- 飯高茂・室田一雄・楠岡成雄, 2011. 朝倉数学ハンドブック 応用編. 朝倉書店, 615 p.
- 井上寛康, 2010. 大規模データに対するべき分布性の確認方法. 大阪産業大学経営論集, 11, 2, 165-176.
- 石井俊全, 2012. まずはこの一冊から 意味がわかる統計学. ベレ出版, 335 p.
- 石村貞夫・石村光資郎, 2010. すぐわかる統計処理の選び方. 東京図書, 254 p.
- 石塚英男・鈴木里子 1995. オフィオライト変成作用と海洋底変成作用. 地学雑誌, 104, 3, 350-360.
- 伊勢田哲治, 2008. 動物からの倫理学入門. 名古屋大学出版会, 370 p.
- 石附実, 1987. お濯い外回人. 思文閣, 3-89.
- Ishizuka, O., Yuasa, M., Sakamoto, I., Kanayama, K., Taylor, R.N., Umino, S., Tani, K. and Ohara, Y. 2008. Earliest Izu-Bonin arc volcanism found on the submarine Bonin Ridge. EOS Transaction AGU, 89, 53, Fall Meeting Supplement, Abstract, V31A-2106.
- 磯崎行雄, 1998. 日本列島のテクトニクス 日本列島の起源と付加型造山帯の成長 -リフト帯での

誕生から都城型造山運動へ - 地質学論集, 50, 89-106.

Isozaki, Y. and Itaya, T., 1990. Chronology of Sanbagawa metamorphism. *Jour. Metamorphic Geology*, 8, 401-411.

磯崎行雄・丸山茂徳 1991. 日本におけるプレート造山論の歴史と日本列島の新しい地体構造区分. *地学雑誌*, 100, 697-761.

磯崎行雄・丸山茂徳・青木一勝・中間隆晃・宮下敦・大藤茂, 2010. 日本列島の地体構造区分再訪—太平洋型(都城型)造山帯構成单元および境界の分類・定義—. *地学雑誌*, 119, 6, 999-1053.

磯崎行雄・丸山茂徳・中間隆晃・山本伸次・柳井修一, 2011. 活動的大陸縁の肥大と縮小の歴史—日本列島形成史アップデート—. *地学雑誌*, 210, 1, 65-99.

伊東敬祐, 1991. 地震現象の新しい見方. *地震*. 2, 44 (Supplement), 381-390.

岩淵千明・石井滋・神山貴弥・浦光博・神田貴弥, 1997. あなたもできるデータの処理と解析. 福村出版, 226 p.

泉宮尊司・内山翔太・尾島洋祐, 2013. 領域区分による Gutenberg-Richter 則に基づいた地震津波発生確率の推定法. *土木学会論文集 B3 (海洋開発)*, 69, 2, 1431-1436.

J

Jeffrey, A., 2004. *Handbook of Mathematical Formulas and Integrals* 3rd ed. 柳谷晃・穴田浩一・内田雅克訳, 2010. *数学公式ハンドブック*. 共立出版, 544 p.

Jin, J., 2009. 日本の近代化におけるお雇い外国人の役割. *九州共立大学経済学部紀要*, 118, 19-35.

K

門屋辰太郎, 2016. アルベド. 井田茂・田村元秀・生駒大洋・関根康人編, *系外惑星の事典*. 朝倉書店, 100-101.

鍵和田京子・石村貞夫, 2001. よくわかる卒論・修論のための統計処理の選び方. 東京図書, 243 p.

Kaltenegger, L., Udry, S. and Pepe, F., 2011. A habitable planet around HD 85512. *arXiv preprint arXiv:1108.3561*.

神田善伸, 2015. *EZR でやさしく学ぶ統計学～EBMの実践から臨床研究まで～* 2版. 中外医学社, 400 p.

Kaneko, Y., 1997. Two-step of exhumation model of the Himalayan metamorphic belt, central Nepal. *Journal of the Geological Society of Japan*, 103, 203-226.

- Kasting, J. F., Whitmire, D. P. and Reynolds, R. T., 1993. Habitable zones around main sequence stars. *Icarus*, 101, 1, 108-128.
- Katayama, I., Maruyama, S., Parkinson, C. D., Terada, K. and Sano, Y., 2001. Ion microprobe U-Pb zircon geochronology of peak and retrograde stages of ultrahigh-pressure metamorphic rocks from the Kokchetav massif, northern Kazakhstan. *Earth and Planetary Science Letters*, 188, 185-198.
- Katayama, I., Zayachkovsky, A. and Maruyama, S., 2000. Progressive P-T records from zircon in Kokchetav UHP-HP rocks, northern Kazakhstan. *The Island Arc*, 9, 417-428.
- Kawai, K., Tsuchiya, T., Tsuchiya, J. and Maruyama, S., 2009. Lost primordial continents. *Gondwana Research*, 16, 581-586.
- 河合研志・土屋卓久・丸山茂徳, 2010. 第2大陸. 地学雑誌, 119, 6, 1197-1214.
- 川勝均, 2002a. マントル遷移層とは何か. 東京大学地震研究所編, 地球科学の新展開1 地球ダイナミクスとトモグラフィ. 朝倉書店, 119-137.
- 川勝均, 2002b. プレートテクトニクスの地球観. 地球科学の新展開1 地球ダイナミクスとトモグラフィ, 朝倉書店, 1-37.
- 一石賢, 2004. 道具としての統計解析. 日本実業出版社, 237 p.
- 木村淳, 2016. 巨大ガス惑星まわりのハビタブルゾーン. 井田茂・田村元秀・生駒大洋・関根康人編, 系外惑星の事典. 朝倉書店, 124-125.
- 金光男, 2008. お雇い外国人地質学者の来日経緯 (1): 米人地質学者ブレークとパンペリー. 地学教育と科学運動, 58.59, 37-42.
- 金光男, 2009a. お雇い外国人地質学者の来日経緯 (2): 仏人鉱山地質学者コワニエ. 地学教育と科学運動, 60, 42-56.
- 金光男, 2009b. お雇い外国人地質学者の来日経緯 (3): 米人博物学者アンチセル - 前編. 地学教育と科学運動, 61, 43-50.
- 金光男, 2009c. お雇い外国人地質学者の来日経緯 (4): 米人博物学者アンチセル - 後編 -. 地学教育と科学運動, 62, 48-62.
- 金光男, 2009d. ハント発ライマン宛書簡: 日本地質学の揺籃期におけるその影響. 地球科学, 63, 2, 63-75.
- 金光男, 2010a. お雇い外国人地質学者の来日経緯 (5): 独人鉱山地質学者ネットー - 前編 -. 地学教育と科学運動, 63, 61-74.
- 金光男, 2010b. お雇い外国人地質学者の来日経緯 (6): 独人鉱山地質学者ネットー - 中編 -. 地学教育と科学運動, 64, 71-79.
- 金光男, 2011. お雇い外国人地質学者の来日経緯 (7): 独人鉱山地質学者ネットー - 後編 -. 地

- 学教育と科学運動, 65, 51-62.
- 金光男, 2012a. お雇い外国人地質学者の来日経緯 (8): 英人地震学者ミルン - 前編 -. 地学教育と科学運動, 67, 51-61.
- 金光男, 2012b. お雇い外国人地質学者の来日経緯 (9): 英人地震学者ミルン - 中編 -. 地学教育と科学運動, 68, 0, 45-54.
- 金光男, 2013. お雇い外国人地質学者の来日経緯 (10): 英人地震学者ミルン - 後編 -. 地学教育と科学運動, 69, 78-88.
- 金光男, 2014a. お雇い外国人地質学者の来日経緯 (11): 英人地震学者ミルン - 最後編 その I. 地学教育と科学運動, 72, 92-99.
- 金光男, 2014b. お雇い外国人地質学者の来日経緯 (12): 英人地震学者ミルン - 最後編 その II. 地学教育と科学運動, 73, 70-78.
- 金光男, 2015. お雇い外国人地質学者の来日経緯 (13): 英人地震学者ミルン - 完結編 その I. 地学教育と科学運動, 74, 71-79.
- 金光男, 2016. お雇い外国人地質学者の来日経緯 (14) 英人地震学者ミルン - 完結編 その 2. 地学教育と科学運動, 76, 102-111.
- 小林道夫, 1996. 科学哲学. 産業図書, 206 p.
- 小林英夫, 1988. イギリス産業革命と近代地質学の成立. 築地書館, 338 p.
- 小林幹夫・福田安蔵・鈴木七緒・安岡善則・黒崎千代子, 1959. 数学公式集. 共立出版, 302+9 p.
- Kober, L., 1921. Der Bau der Erde. Gerbruder Borntrager, Berlin.
- 小出良幸, 1992. マントルの同位体的多様性 - マントル進化へのアプローチ -. 地学雑誌, 101, 159-192.
- 小出良幸, 1994. 総説: 地球形成の場まつわるモデルとその束縛条件. 神奈川県立博物館研究報告 (自然科学), 23, 51-86.
- 小出良幸, 1995a. 地球前史 - 地球形成場の素描 -. 月刊地球, 17, 203-209.
- 小出良幸, 1995b. 総説: 隕石 - 地球の材料物質としての隕石 -. 神奈川県立博物館研究報告 (自然科学), 24, 9-38.
- 小出良幸, 1998. 生命の起源 - 宇宙生物学へのアプローチ -. 神奈川県立博物館研究報告 (自然科学), 27, 1-30.
- 小出良幸, 1999a. 冥王代の地質学的素描. 神奈川県立博物館研究報告 (自然科学), 28, 1-28.
- 小出良幸, 1999b. 生命起源に関する研究動向の把握. 地学雑誌, 108, 314-320.
- 小出良幸, 1999c. 生命起源に関する研究動向. 地学雑誌, 108, 509-536.
- 小出良幸, 2000. 自然史学的重要性と現代自然哲学の必要性. 地学教育, 53, 4, 141-158.

- 小出良幸, 2001. 冥王代の研究動向. 地学雑誌, 110, 3, 393-396.
- 小出良幸, 2006. 物質、時間、空間の視点からみた地質学的境界. 札幌学院大学人文学会紀要, 80, 21-41.
- 小出良幸, 2011. 自然分類と人為分類について—生物種と鉱物種を例にして—. 札幌学院大学人文学会紀要, 90, 23-45.
- 小出良幸, 2012. 島弧—海溝系における付加体の地質学的位置づけと構成について. 札幌学院大学人文学会紀要, 92, 1-23.
- 小出良幸, 2013a. 島弧における付加体の形成と擾乱について. 札幌学院大学人文学会紀要, 93, 37-58.
- 小出良幸, 2014a. 地層に記録されている時間について—タービダイト層の場合—. 札幌学院大学人文学会紀要, 札幌学院大学総合研究所, 95, 25-52.
- 小出良幸, 2014b. 岩石の多様性形成の要因とその弁証法的意義について, 札幌学院大学人文学会紀要, 札幌学院大学総合研究所, 96, 31-55.
- 小出良幸, 2015a. 層状チャートに記録されている時間について. 札幌学院大学人文学会紀要, 札幌学院大学総合研究所, 97, 43-73.
- 小出良幸, 2015b. 火成岩のマグマ生成における化学的多様性の形成について. 札幌学院大学人文学会紀要, 札幌学院大学総合研究所, 98, 1-39.
- 小出良幸, 2016a. 深海底堆積物と層状チャートの成因について. 札幌学院大学人文学会紀要, 札幌学院大学総合研究所, 99, 17-39.
- 小出良幸, 2016b. 地質学の学際化プロジェクト 第1巻 地質哲学1 地質学における分類体系の研究. 札幌学院大学総合研究所, 132+ix p. ISBN978-4-904645-03-1 C3044
- 小出良幸, 2016c. 溶融状態における火成岩の化学的多様性の形成: 多様な本源マグマ. 札幌学院大学人文学会紀要, 札幌学院大学総合研究所, 100, 13-46.
- 小出良幸, 2017a. 層状チャートの多様な成因について. 札幌学院大学人文学会紀要, 札幌学院大学総合研究所, 101, 31-61.
- 小出良幸, 2017b. マグマ固結過程における火成岩の化学的多様性の形成について. 札幌学院大学人文学会紀要, 札幌学院 2008 大学総合研究所, 102, 1-29.
- 小出良幸, 2017c. 地質学の学際化プロジェクト 第2巻 総説 (科学教育1) 自然史学の確立と自然史リテラシーの育成を目指して. 札幌学院大学総合研究所, 232+viii p. ISBN978-4-904645-05-5 C3044
- 小出良幸, 2018a. 層状チャートの成因による時間記録様式の差異に関する研究. 札幌学院大学人文学会紀要, 札幌学院大学総合研究所, 103, 1-27.
- 小出良幸, 2018b. 地質学の学際化プロジェクト 第3巻 地質学1 地球物質の多様性形成機構

- と火成作用の役割．札幌学院大学総合研究所，347 p. ISBN978-4-904645-06-2 C3044
- 小出良幸，2018c. 層状チャートの時間記録の数理モデル．札幌学院大学人文学会紀要，札幌学院大学総合研究所，104，1-17.
- 小出良幸，2019a. 沈み込み帯における付加と構造侵食の地質学的役割について．札幌学院大学人文学会紀要，札幌学院大学総合研究所，105，117-146.
- 小出良幸，2019b. 地質学の学際化プロジェクト 第4巻 地質学2 地層の時間記録 規則性のある時間記録の解説．札幌学院大学総合研究所，258 p. ISBN978-4-904645-08-6 C3044
- 小出良幸，2019c. 造山運動からみた島弧の地質学的位置づけ．札幌学院大学人文学会紀要，札幌学院大学総合研究所，106，27-61.
- 小出良幸，2020a. テクトニクスに関する概念の変遷と今後の方向性．札幌学院大学人文学会紀要，札幌学院大学総合研究所，107，39-61.
- 小出良幸，2020b. 地質学への数学的概念の導入の試み：テクトニクスを例にして．札幌学院大学人文学会紀要，札幌学院大学総合研究所，108，45-78.
- 小出良幸，2020c. 地質学の学際化プロジェクト 第5巻 地質学3 弧状シンギュラリティ：島弧と沈み込み帯の地質学的重要性．札幌学院大学総合研究所，268 p. ISBN 978-4-904645-10-9 C3044
- 小出良幸，2020d. 地質学の学際化プロジェクト 第1巻 地質哲学1 地質学における分類体系の研究（増補改訂版）札幌学院大学総合研究所，288 p. ISBN 978-4-904645-11-6 C3044
- 小出良幸，2021. 全地球テクトニクスから普遍的テクトニクスを目指して．札幌学院大学人文学会紀要，札幌学院大学総合研究所，109，49-76.
- 小出良幸・山下浩之，1995. 地球前史－地球形成場と原料への束縛条件－．地学雑誌，104，167-188.
- 小出良幸・山下浩之，1996a. 地球初期への惑星物理的束縛条件．神奈川県立博物館研究報告（自然科学），25，1-26.
- 小出良幸・山下浩之，1996b. 地球初期への惑星化学的束縛条件．神奈川県立博物館研究報告（自然科学），25，27-55.
- 小出良幸・山下浩之・佐藤武宏，1997. 惑星進化論へのアプローチ：要因と概要．神奈川県立博物館研究報告（自然科学），26，1-24.
- 小島寛之，2006. 完全独習 統計学入門．ダイヤモンド社，205 p.
- 小島寛之，2015. 完全独習 ベイズ統計学入門．ダイヤモンド社，290 p.
- 小久保英一郎，2016. 暴走的成長と寡占的成長．井田茂・田村元秀・生駒大洋・関根康人編，系外惑星の事典．朝倉書店，194-195.
- 小久保英一郎・井田茂，1997. 惑星集積：微惑星から惑星へ．日本物理学会誌，52，2，75-82.

- 小宮剛, 2016. 地球生命の起源. 井田茂・田村元秀・生駒大洋・関根康人編, 系外惑星の事典. 朝倉書店, 136-137.
- Kopparapu, R., Kasting, J. F., Eymet, V., Robinson, T., D. Mahadevan, S., Terrien, R. C., Domagal-Goldman, S., Victoria Meadows, C. and Deshpande, R., 2013. Habitable zones around main-sequence stars: new estimates. *Astrophysical Journal*, 765, 131, 1-16.
- Kozai, Y., 1962. Secular perturbations of asteroids with high inclination and eccentricity. *Astronomical Journal*, 67, 591-598.
- Kuhn, T., 1962. *The Structure of Scientific Revolutions*. 中山茂訳, 1971. 科学革命の構造. みすず書房, 293 p.
- Le Pichon, 1968. Sea-floor spreading and continental drift. *Jour. Geophys. Res.*, 73, 3661-3697.
- Kumazawa, M., Imanishi, Y., Fukao, Y., Furumoto M. and Yamamoto, A., 1990. A theory of spectral analysis based on the characteristic property of a linear dynamic system. *Geophys. Jour. Intet.*, 101, 613-630.
- 黒田孝郎・小島順・野崎昭弘・森毅, 2011. 高等学校の確率・統計. 筑摩書房, 524 p.
- 黒崎健二, 2016. 巨大氷惑星の内部構造. 井田茂・田村元秀・生駒大洋・関根康人編, 系外惑星の事典. 朝倉書店, 244-245.
- 葛原昌幸, 2016. プリウムテクニクス. 井田茂・田村元秀・生駒大洋・関根康人編, 系外惑星の事典. 朝倉書店, 8-9.

L

- Le Pichon, 1968. Sea-floor spreading and continental drift. *Jour. Geophys. Res.*, 73, 3661-3697.
- Lewis, C., 2000. *The Dating Game: One Man's Search for the Age of the Earth*. Cambridge University Press, 216 p. 高柳洋吉訳, 2003. 地質学者アーサー・ホームズ伝—地球の年齢を決めた男. 古今書院, 290 p.
- Lidov, M. L., 1962. The evolution of orbits of artificial satellites of planets under the action of gravitational perturbations of external bodies. *Planetary and Space Science*, 9, 10, 719-759.
- Lisiecki, L. E. and Raymo, M. E., 2005a. A Pliocene-Pleistocene stack of 57 globally distributed benthic $\delta^{18}\text{O}$ records. *Paleoceanography* 20, PA1003. DOI:10.1029/2004PA001071.
- Lisiecki, L. E. and Raymo, M. E., 2005b. Pliocene-Pleistocene stack of globally distributed benthic stable oxygen isotope records. *Pangaea*. DOI:10.1594/PANGAEA.704257.
- Lisiecki, L. E. and Raymo, M. E., 2005c. Correction to "A Pliocene-Pleistocene stack of 57 globally distributed benthic $\delta^{18}\text{O}$ records". *Paleoceanography*, PA2007. DOI:10.1029/2005PA001164.

Livio, M., 2013. Brilliant Blunders: From Darwin to Einstein - Colossal Mistakes by Great Scientists That Changed Our Understanding of Life and the Universe. 千葉敏生訳, 2015. 偉大なる失敗. 早川書房, 413 p.

Lovelock, J., 1988. The Age of Gaia. 星川淳訳, 1989. ガイアの時代. 工作舎, 東京. 388 p.

M

Mahner, M. and Bunge, M., 1997. Foundations of Biophilosophy. 小野山敬一訳, 2012. 生物哲学の基礎. 丸善出版, 556 p.

Magee, B., 1998. The Story of Philosophy. A Dorlign Kindersley, 中川純男監修, 1999. 知の歴史—ビジュアル版哲学入門. BL 出版, 240 p.

Margenau, H. and Murphy, G. M., 1943a. The Mathematics of Physic and Chemistry. 佐藤次彦・国宗真訳, 1958. 物理と化学のための数学 I (改訂版). 共立出版, 324+37 p.

Margenau, H. and Murphy, G. M., 1943b. The Mathematics of Physic and Chemistry. 佐藤次彦・国宗真訳, 1961. 物理と化学のための数学 II (改訂版). 共立出版, 648 p.

丸山茂徳, 1990. 高圧変成帯の上昇機構. 日本地質学会第 97 年学術大会講演要旨, 484.

丸山茂徳, 1993. プリウムテクトニクス. 科学, 63, 373-386.

Maruyama, S., 1994. Plume tectonics. Jour. Geol. Soc. Japan, 100, 24-49.

Maruyama, S., 1997. Pacific-type orogeny revisited: Miyashiro-type orogeny proposed. The Island Arc, 6, 91-120.

丸山茂徳, 1997. 全地球ダイナミクス -- もっと新しい地球観をめざして. 科学, 67, 7, 498-506.

丸山茂徳, 2002a. 地球ダイナミクス. 熊澤峰夫・丸山茂徳編, プリウムテクトニクスと全地球史解説. 岩波書店, 3-11.

丸山茂徳, 2002b. 地球史概説. 熊澤峰夫・伊藤孝士・吉田茂生編, 全地球史解説. 東京大学出版会, 18-54.

丸山茂徳, 2012. 造山帯の分類とその意義: 古造構場復元の束縛条件—「丸山ほか: 太平洋型造山帯 一新しい概念の提唱と地球史における時空分布—」論文 (地学雑誌, 120 巻, 115-223) の追記一. 地学雑誌, 121, 6, 1090-1106.

Maruyama, S., Banno, S., Matsuda, T. and Nakajima, T., 1984. Kurosegawa zone and its bearing on the development of the Japanese Islands. Tectonophysics, 110, 47-60.

丸山茂徳・深尾良夫・大林政行, 1993. プリウムテクトニクス—ポストプレートテクトニクスの新しいパラダイムに向けて. 科学, 63, 6, 373-386.

Maruyama, S., Liou, J.G. and Terabayashi, M., 1996. Blueschists and eclogites of the world and their exhumation. International Geology Review, 38, 485-594.

- 丸山茂徳・大森聡一・千秋博紀・河合研志 and Windley, B. F., 2011. 太平洋型造山帯－新しい概念の提唱と地球史における時空分布. 地学雑誌, 120, 1, 115-223.
- Maruyama, S. and Parkinson, C. D., 2000. Overview of the geology, petrology and tectonic framework of the high-pressure-ultrahigh-pressure metamorphic belt of the Kokchetav Massif, northern Kazakhstan. *The Island Arc*, 9, 439-455.
- Maruyama, S., Parkinson, C. D. and Liou, J. G., 2002. Overview of the tectonic evolution of the Kokchetav Massif and the role of fluid in subduction and exhumation. Parkinson, C. D., Katayama, I., Liou, J.G. and Maruyama, S., eds., *The Diamond-Bearing Kokchetav Massif, Kazakhstan*. Universal Academy Press, Tokyo., 427-442.
- Masago, H., Okamoto, K. and Terabayashi, M., 2004. Exhumation tectonics of the Sanbagawa high-pressure metamorphic belt, SW Japan – Constraints from the upper and lower boundary faults –. *International Geology Review*, 47, 1194-1206.
- Matsuda, T. and Isozaki, Y., 1991. Well-documented travel history of Mesozoic pelagic chert in Japan: from remote ocean to subduction. *Tectonics*, 10, 475-499.
- Matsuda, T. and Uyeda, S., 1971. On the Pacific-type orogeny and its model: Exhumation of the paired metamorphic belts concept and possible origin of marginal seas. *Tectonophysics*, 11, 5-27.
- Matsuura, T., Imanishi, Y., Imanari, M. and Kumazawa, M., 1990. Application of a new method of high-resolution spectral analysis, “Sompi,” for free induction decay of nuclear magnetic resonance. *Applied spectroscopy*, 44, 4, 618-626.
- 松尾太郎, 2016. 直接撮像法. 井田茂・田村元秀・生駒大洋・関根康人編, 系外惑星の事典. 朝倉書店, 67-68.
- 眞山聡, 2016. 連星惑星と連星円盤. 井田茂・田村元秀・生駒大洋・関根康人編, 系外惑星の事典. 朝倉書店, 56-57.
- Mayor, M. and Queloz, D., 1995. A Jupiter-mass companion to a solar-type star. *Nature*, 378, 6555, 355-359.
- McKenzie, D. P. and Parker, R. L., 1967. The North Pacific: an example of tectonics on a sphere. *Nature*, 216, 1276-1280.
- Migrate, S. B., 2011. *The Theory That Would Not Die: How Bayes' Rule Cracked the Enigma Code, Hunted Down Russian Submarines, and Emerg.* 富永星訳, 2013. 異端の統計学 ベイズ. 草思社, 510 p.
- Milankovitch, M., 1930. *Mathematische Klimalehre und Astronomische Theorie der Klimaschwankungen*. Koppen, in *Handbuch der Klimalogie*, Band 1.

- 嶺重慎, 1999. 円盤不安定モデルの 25 年ワークショップ. 天文月報, 92, 2, 112-113.
- 三谷政昭, 2019. 今日から使えるフーリエ変換 普及版 式の意味を理解し、使いこなす. 講談社, 336 p.
- Miyashiro, A., 1961. Evolution of metamorphic belts. *Journal of Petrology*, 2, 277-311.
- 都城秋穂, 1965. 変成岩と変成帯. 岩波書店, 458 p.
- 都城秋穂, 1975. プレート・テクトニクスにもどつづく造山論. 都城秋穂・安芸敬一編, 岩波講座地球科学 12 変動する地球 III. 岩波書店, 35-145.
- 都城秋穂, 1998. 科学革命とは何か. 岩波書店, 331+16 p.
- Miyashiro, A., Aki, K. and Sengor, A. M. C., 1982. *Orogeny*. John Wiley and Sons, 242 p.
- 森口繁一・一松信・宇田川銈久, 1987a. 微分積分・平面曲線 (岩波 数学公式 1). 岩波書店, 318 p.
- 森口繁一・宇田川銈久・一松信, 1987b. 級数・フーリエ解析 (岩波 数学公式 2). 岩波書店, 340 p.
- 文部省編, 1984. 学術用語集 地学編. 日本学術振興会, 429 p.
- 森元良太・田中泉吏, 2016. 生物学の哲学入門. 勁草書房, 222 p.
- Morgan, 1968. Rises, trenches, great faults, and crustal blocks. *Jour. Geophys. Res.*, 73, 1959-1982.
- 諸田智克・平田成, 2015. クレータサイズ頻度分布からさぐる月惑星表面の地質進化. 特集「日本における衝突研究の軌跡」. 日本惑星科学会誌遊星人, 24, 3, 214-224.
- 村田明広, 1988. Balanced cross section と duplex. 地学雑誌, 97, 504-512.
- 村田明広, 2000. デュープレックスとメランジュ. 深田地質研究所, 60 p.
- Murakami, M., Hirose, K., Kawamura, K., Sata, N. and Ohishi, Y., 2004. Post-Perovskite Phase Transition in MgSiO₃. *Science* 304, 5672, 855-858.
- 武藤恭之, 2016. 木星型惑星の溝. 井田茂・田村元秀・生駒大洋・関根康人編, 系外惑星の事典. 朝倉書店, 202-203.

N

- 中本泰史, 2016. スノーライン. 井田茂・田村元秀・生駒大洋・関根康人編, 系外惑星の事典. 朝倉書店, 184-185.
- 中田節也, 2015. 火山爆発指数 (VEI) から見た噴火の規則性. <特集> 火山噴火史解明のための露頭データベース構築の検討 (2). 火山, 60, 2, 143-150.
- 中村桂子, 1990. 生命誌の扉をひらく. 科学に拠って科学を超える. 哲学書房, 東京, 201 p.
- 中間隆晃・平田岳史・大藤茂・丸山茂徳, 2010a. 日本最古の堆積岩年代 472 Ma (オルドビス

- 紀前期末) とその意義. 地学雑誌, 119, 2, 270-278.
- 中間隆晃・平田岳史・大藤茂・青木一勝・柳井修一・丸山茂徳, 2010b. 日本列島の古地理学. 地学雑誌, 119, 6, 1161-1172.
- 中山茂, 2000. 20・21世紀科学史. NTT出版, 280 p.
- 中山康雄, 2010. 科学哲学. 人文書院, 200 p.
- 日本地質学会, 2020. 地質学とは、そして日本地質学会とは. <http://www.geosociety.jp/outline/content0001.html> (2020年2月17日閲覧)
- 日本顕微鏡工業会, 2008. 偏光顕微鏡. <http://www.microscope.jp/history/06-3.html> (2020年11月17日閲覧).
- 野口高明, 2016. はやぶさとはやぶさ2のミッション. 井田茂・田村元秀・生駒大洋・関根康人編, 系外惑星の事典. 朝倉書店, 216-217.
- 野村英子・相川祐理・竹内拓・今枝佑輔・中川義次, 2007. 原始惑星系円盤の理論モデルの構築と観測との比較. 日本惑星科学会誌遊星人, 16, 3, 208-215.
- 野崎昭弘・伊藤潤一・何森仁・小沢健一, 2000. 微分・積分の意味がわかる—数学の風景が見える. ベレ出版, 171 p.

O

- 小川勇二郎・久保健一郎, 2005. 付加体地質学 フィールドジオロジー 5. 共立出版, 160 p.
- 奥住聡, 2016. 微惑星の形成. 井田茂・田村元秀・生駒大洋・関根康人編, 系外惑星の事典. 朝倉書店, 188-189.
- 大森聡一・磯崎行雄, 2011. 古生代日本と南北中国地塊間衝突帯の東方延長. 地学雑誌, 120, 1, 40-51.
- 大藤茂・下條将徳・青木一勝・中間隆晃・丸山茂徳・柳井修一, 2010. 砂質片岩中のジルコンの年代分布に基づく三波川帯再区分の試み. 地学雑誌, 119, 2, 333-346.

P

- Pepe, F., Lovis, C., Segransan, D., Benz, W., Bouchy, F., Dumusque, X., Mayor, M., Queloz, D., Santos, N. C. and Udry, S., 2011. The HARPS search for Earth-like planets in the habitable zone-I. Very low-mass planets around HD 20794, HD 85512, and HD 192310. *Astronomy & Astrophysics*, 534, A58.
- Petit, J. R., Jozel, J., Raynaud, D., Barkov, N. I., Barnola, J. M., Basile, I., Bender, M., Chappellaz, J., Davis, J., Delaygue, G., Delmotte, M., Kotlyakov, V. M., Legrand, M., Lipenkov, V., Lorius, C., Pepin, L., Ritz, C., Saltzman, E. and Stievenard, M., 1999. Climate

and Atmospheric History of the Past 420,000 years from the Vostok Ice Core, Antarctica. *Nature* 399, 429–436. DOI:10.1038/20859.

R

- Raymond, L. A., 1984. Melanges: their nature origin, and significance. *Geol. Soc. Amer. Spec. Pub.*, 198, 7–20.
- Repcheck, J., 2003. The Man Who Found Time: James Hutton and the Discovery of the Earth's Antiquity. 平野和子訳, 2004. ジェイムズ・ハットン — 地球の年齢を発見した科学者 —. 春秋社, 261 P.
- Rood, R. T. and Trefil, J. S., 1981. Are we alone? The possibility of extraterrestrial civilizations. 出口威夫訳, 1983. さびしい宇宙人. 地人書館, 283 p.
- Rudwick, M. J. S., 1972. The Meaning of Fossils. 菅谷暁・風間敏訳, 2013. 化石の意味 — 古生物学史挿話. みすず書房, 384 P.

S

- 佐伯胖・松原望, 2000. 実践としての統計学. 東京大学出版会, 239 p.
- 斎藤恭一, 2019. 道具としての微分方程式 偏微分編 式をつくり、解いて、「使える」ようになる. 講談社, 256 p.
- 酒井理紗・久城育夫・永原裕子・小澤一仁・橘省吾, 2010. 月地殻形成条件を用いたマグマオーシャン化学組成制御への試み. *日本惑星科学会誌遊星人*, 19, 2, 82–88.
- 坂本百大・野本和幸, 2002. 科学哲学—現代哲学の転回. 北樹出版, 258 p.
- Sakuyama, M. and Koyaguchi, T., 1984. Magma mixing in mantle xenolith-bearing calc-alkalic ejecta, Ichinomegata volcano, northeastern Japan. *Jour. Volcanol. Geothermal. Res.*, 22, 3, 199–224.
- Salsburg, D. S., 1992. The Use of Restricted Significance Tests in Clinical Trials (Statistics for Biology and Health). 竹内恵行・熊谷悦生訳, 2006. 統計学を拓いた異才たち—経験則から科学へ進展した一世紀. 日本経済新聞出版, 437 p.
- 佐藤博之, 1985. ライマンとナウマン 百年史の一こま (3). *地質ニュース*, 373, 38–49.
- 佐藤文衛, 2016. 視線速度法の原理. 井田茂・田村元秀・生駒大洋・関根康人編, 系外惑星の事典. 朝倉書店, 10–11.
- 佐藤揚・熊谷英憲・根尾夏紀・中村謙太郎, 2008. 中央海嶺玄武岩の化学組成の多様性とその成因. *地学雑誌*, 117, 1, 124–145.
- 佐藤実・あづま笙子, 2009. マンガでわかる微分方程式. オーム社, 238 p.

- 佐藤敏明, 2009. 図解雑学 今度こそわかる微分積分. ナツメ社, 224 p.
- 佐藤敏明, 2011. 図解雑学 フーリエ変換. ナツメ社, 239 p.
- Sawaki, Y., Shibuya, S., Kawai, T., Komiya, T., Omori, S., Iizuka, T., Hirata, T., Windley, B. F. and Maruyama, S., 2010. Imbricated ocean plate stratigraphy and U-Pb zircon ages from tuff beds in cherts in the Ballantrae Complex, SW Scotland. *Geological Society of America, Bulletin*, 122, 454-464.
- Scerri, E. R. and McIntyre, L., 1997. The case for the philosophy of chemistry. *Synthese*, 111, 213-232. http://philsci-archive.pitt.edu/254/1/p.o.c._JCE.pdf (2020年11月30日閲覧)
- Scholl, D. W. and von Huene, R., 2007. Crustal recycling at modern subduction zone applies to the past—issues of growth and preservation of continental basement, mantle geochemistry, and supercontinent reconstruction. *Geol. Soc. Amer. Mem.*, 200, 9-32.
- Scholl, D. W. and von Huene, R., 2009. Implications of estimated magmatic additions and recycling losses at the subduction zones of accretionary (noncollisional) and collisional (suturing) orogens. *Geol. Soc., London, Spec. Pub.*, 318, 105-125.
- Schmidt-Nielsen K., 1984. Scaling Why is animal size so important? 小田裕昭訳, 1995. スケーリング: 動物設計論スケーリング: 動物設計論. コロナ社, 302 p.
- Schrodinger, E. R. J. A., 1974. *What Is Life? Mind and Matter*. Cambridge University Press, 岡小天・鎮目恭夫訳, 2008. 生命とは何か 物理的にみた生細胞. 岩波書店, 173 p.
- Seetah, K., 2008. Modern analogy, cultural theory and experimental replication: a merging point at the cutting edge of archaeology. *World Archaeology*, 40, 1, 135-150.
- 清水大吉郎, 1996. 古典にみる地学の歴史. 東海大学出版会, 152 p.
- Sokal, A. and Bricmont, J., 1997. *Impostures Intellectuelles*. 田崎晴明・大野克嗣・堀茂樹訳, 2000. 「知」の欺瞞 — ポストモダン思想における科学の濫用. 岩波書店, 368 p.
- Stenonis, N., 1669. *De solido intra solidum naturaliter contento dissertationis prodromus*. 山田俊弘訳, 2004. プロドロムス: 固体論. 東海大学出版会, 220 p.
- 渋谷大輔・山本洋一・三森定史・鱈木周見夫, 1996. 哲学・思想がわかる. 知の探求シリーズ. 日本文芸社, 298 p.
- 渋谷道雄・晴瀬ひろき, 2006. マンガでわかるフーリエ解析. オーム社, 254 p.
- 渋谷道雄・渡辺八一, 2003. Excel で学ぶフーリエ変換. オーム社, 242 p.
- 末次大輔, 2018. マントルブルーム. 鳥海光弘ほか編, 図説 地球科学の事典. 朝倉書店, 180-181.
- 住貴宏, 2016. マイクロレンズ法の原理. 井田茂・田村元秀・生駒大洋・関根康人編, 系外惑星の事典. 朝倉書店, 50-60.

- 鈴木勝彦・賞雅朝子・渡慶次聡, 2017. 地球の初期進化と核-マントル相互作用. 地球化学, 51, 1, 29-44.
- 鈴木和恵・丸山茂徳・山本伸次・大森聡一, 2010. 日本列島の大陸地殻は成長したのか? — 5つの日本が生まれ、4つの日本が沈み込み消失した—. 地学雑誌, 119, 6, 1173-1196.

T

- 田久浩志, 2004. Excel で学ぶやさしい統計学. オーム社, 296p.
- Takahashi, M., 1983. Space-time distribution of the Mesozoic to early Cenozoic magmatism in East Asia and its tectonic implications. In Hashimoto, M. and Uyeda, S., eds. Accretion Tectonics in the Circum-Pacific Regions. Terra Scientific Publishing Company, Tokyo, 69-88.
- Takahashi, M., 2017. The cause of the east-west contraction of Northeast Japan. Bull. Geol. Surv. Japan, 68, 4, 155-161.
- 高橋昌一郎, 2002. 科学哲学のすすめ. 丸善, 190 p.
- 竹内淳, 2009. 高校数学でわかるフーリエ変換. 講談社, 244 p.
- 竹内淳, 2017. 理系のための 微分・積分復習帳 高校の微積分からテイラー展開まで. 講談社, 227 p.
- 竹内均, 1978. 人間・地球・地球学. 文藝春秋, 東京, 281 p.
- 竹内均・長谷川洋作, 1984. 地球生態学. 講談社学術文庫, 東京, 264 p.
- 竹内均・島津康男, 1969. 現代地球科学 自然のシステム工学. 筑摩書房, 東京, 262+5 p.
- 田中正人, 2015. 哲学用語図鑑. プレジデント社, 352 p.
- 田中聡, 2018. 下部マントル、D''、核-マントル境界. 鳥海光弘ほか編, 図説 地球科学の事典. 朝倉書店, 182-183.
- 巽好幸, 1995. 沈み込み帯のマグマ学-全マントルダイナミクスに向けて. 東京大学出版会, 159 p.
- Tatsumi, Y., 2000. Continental crust formation by crustal delamination in subduction zones and complementary accumulation of the enriched mantle: I, Component in the mantle. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 1, doi:10.1029/2000GC000094.
- 巽好幸, 2003. 安山岩と大陸の起源: ローカルからグローバルへ. 東京大学出版会. 213 p.
- 巽好幸, 2004. 総説: 沈み込み帯のマグマ学-島弧進化の包括的理解を目指して-. 地質学雑誌, 110, 4, 244-250.
- Tatsumi, Y., 2005. The subduction factory: How it operates in the evolving Earth. GSA Today, 15, doi: 10.1130/1052-5173.
- Tatsumi, Y. and Stern, R. J., 2006. Manufacturing Continental Crust in Factory. Oceanography,

19, 4, 104-112.

Tatsumi, Y. and Eggins, S., 1995. Subduction Zone Magmatism. Blackwell, Cambridge, 211p.

Tatsumi, Y. and Takahashi, T., 2006. Operation of subduction factory and production of andesite. Jour. Mineral. Petrol. Sci., 101, 145-153 IMA 2006 Issue 1.

Tatsumi, Y., Sakuyama, M., Fukuyama, H. and Kushiro, I., 1983. Generation of arc basalt magmas and their structure of the mantle wedge in subduction zones. Journal of Geophysical Research, 88, 5815-5825.

帝国書院編集部, 2012. 最新世界史図説タペストリー十訂版. 帝国書院, 336 p.

帝国書院編集部, 2020. 最新世界史図説タペストリー十八訂版. 帝国書院, 363+34+14 p.

戸田山和久, 2000. 論理学をつくる. 名古屋大学出版会, 442 p.

戸田山和久, 2002. 知識の哲学 (哲学教科書シリーズ). 産業図書, 272 p.

戸田山和久, 2005. 科学哲学の冒険 サイエンスの目的と方法をさぐる. NHK 出版, 294 p.

戸田山和久, 2011. 「科学的思考」のレッスン 学校では教えてくれないサイエンス. NHK 出版, 304 p.

戸田山和久, 2014. 哲学入門. 筑摩書房, 375 p.

戸田山和久, 2020a. 教養の書. 筑摩書房, 403 p.

戸田山和久, 2020b. 思考の教室. NHK 出版, 429 p.

泊次郎, 2008. プレートテクトニクスの拒絶と受容—戦後日本の地球科学史. 東京大学出版会, 258 p.

豊田利幸編, 1973. 世界の名著 21 ガリレオ. 中央公論社, 574 p.

U

梅野善雄, 2020. 「ベキ分布」の特徴と数理. 日本数学教育学会高専・大学部会論文誌, 26, 1, 73-90.

歌代勤・清水大吉郎・高橋正夫, 1978. 地学の語源をさぐる. 東京書籍, 195 p.

植田勇人, 2010. 付加体の構造侵食による前弧の構造発達. 地学雑誌, 119, 2, 362-377.

Uyeda, S. and Kanamori, H., 1979. Back-opening and mode of subduction. Jour. Geophys. Res. 84, 1049-1061.

上野益三, 1979. 日本最初の動物学教授モース. 人類学雑誌, 87, 3, 279-295.

V

Vannucchi, P., Galeotti, S., Clift, P. D., Ranero, R. C. and von Huene, R., 2004. Long-term subduction-erosion along the Guatemalan margin of the Middle America Trench. Geology, 32,

617-620.

von Huene, R. and Scholl, D. W., 1991. Observations at convergent margins concerning sediment subduction, subduction erosion, and the growth of continental crust. *Reviews of Geophysics*, 29, 279-316.

W

涌井良幸, 2019. 高校生からわかるフーリエ解析. ベレ出版, 310 p.

涌井良幸・涌井貞美, 2012. 史上最強図解 これならわかる! ベイズ統計学. ナツメ社, 248 p.

涌井良幸・涌井貞美, 2015. 統計学の図鑑. 技術評論社, 160 p.

涌井良幸・涌井貞美, 2016. 身につくベイズ統計学. 技術評論社, 240 p.

渡邊誠一郎・井田茂, 1997. 比較惑星学. 岩波書店, 131 p.

Watson, L., 1979. *Lifetide*. 木幡和枝・村田恵子・中野志津子訳, 1981. 生命潮流. 工作舎, 東京, 510 p.

Wegener, A., 1929. *Die Entstehung der Kontinente und Ozeane*. 竹内均訳, 1975. 鎌田浩毅解説, 2020. 大陸と海洋の起源. 講談社, 384 p.

Wilde, S. A., Valley, J. W., Peck, W. H. and Graham, C. M., 2001. Evidence from detrital zircons for the existence of continental crust and oceans on the Earth 4.4 Gyr ago. *Nature*, 409, 175-178.

Wilson, J. T., 1965. A new class of faults and their bearing on Continental drift. *Nature*, 207, 343-347.

Wilson, J. T., 1968a. Static or mobile earth: the current scientific revolution. *Amer., Phil. Soc., Proc.*, 112, 309-320.

Wilson, J. T., 1968b. A revolution in earth science (with replay to V. V. Belousov). *Geo Times*, 13, 10-16, 20-22.

Winchester, S., 2001. *The Map That Changed the World: William Smith and the Birth of Modern Geology*. 野中邦子訳, 2004. 世界を変えた地図 -ウィリアム・スミスと地質学の誕生-. 早川書房, 372 p.

Wolszczan, A. and Frail, D. A., 1992. A planetary system around the millisecond pulsar PSR1257+ 12. *Nature*, 355, 6356, 145-147.

Wood, R. M., 1985. *The Dark Side of the Earth*. 谷本勉訳, 2001. 地球の科学史—地質学と地球科学の戦い—. 朝倉書店, 278 p.

Y

- 山田俊弘, 2004. 解説. 山田俊弘訳, プロドロムス: 固体論. 東海大学出版会, 161-195.
- 山田俊弘, 2017, ジオコスモスの変容: デカルトからライブニッツまでの地球論. 勁草書房, 304 p.
- 山口正輝, 2016. アストロメトリ法の原理. 井田茂・田村元秀・生駒大洋・関根康人編, 系外惑星の事典. 朝倉書店, 26-27.
- 山本明彦, 1986. 存否(そんぴ)法によるスペクトル解析. 名古屋大学大型計算機センターニュース, 17, 293-320.
- 山本巍・宮本久雄・門脇俊介・高橋哲哉・今井知正・藤本隆・野矢茂樹, 1993. 哲学原典資料集. 東京大学出版会, 247 p.
- 山本萌美・山本明彦・大野一郎, 2013. 存否法による球共振スペクトルの解析と弾性・内部摩擦測定. 愛媛大学理学部紀要, 17, 15-31.
- 山本路子・島伸和, 2005. 海洋地磁異常は何を映すか? 地磁異常と古地磁強度化の関連. 地学雑誌, 114,2. 239-249.
- 山本光雄, 1971. 訳者解説「オルガノン」『カテゴリー論』『命題論』について. アリストテレス全集 1. 岩波書店. 141-166.
- 山本慎次, 2010. 構造浸食作用—太平洋型造山運動論と大陸成長モデルへの新視点—. 地学雑誌, 119, 6, 963-998.
- Yoneda, A., Fukui, H., Xu, F., Nakatsuka, A., Yoshiasa, A., Seto, Y., Ono, K., Tsutsui, T., Uchiyama, H. and Baron, A. Q., 2014. Elastic anisotropy of experimental analogues of perovskite and post-perovskite help to interpret D'' diversity. Nature communications, 5, 3453.
- 吉田武, 2010. 新装版 オイラーの贈物—人類の至宝 $e^{i\pi} = -1$ を学ぶ. 東海大学出版会, 516 p.
- 行武毅, 1996. 地球中心核の流体運動と磁場の生成. ながれ, 15, 493-501.



二セコ湯本温泉大湯沼

北海道蘭越町湯里。著者撮影。

さいごに はるかなる地質哲学へ

本書では、地質哲学を構築するため、少々複雑な論理構造をとった。本書の各所で述べてきたことだが、以下で、その構造を再整理しておく。



1 過去と変容への対処の困難さ

哲学的思索とは、網羅的に広範なテーマを論じる（註）ことよりも、ひとつのテーマや課題（例えば、時間とは、過去とは、科学的手法とは、など）を深く掘り下げて考えていくことが多いであろう。本書では、「テクトニクス」という地質学固有の概念を取り上げ、それに関連する思索を進めてきた。

テクトニクスに関する哲学的思索を進めていくにあたり、哲学や思想の歴史（第1章）、科学と科学哲学、そして地質学の歴史（第2章）も概観してきた。歴史という過去の知的資産を指針にして、これまで営まれてきた地質学という学問を、地質学の定義やその目的、特徴などから考えてきた（第3章）。

まず、地質学には「過去の時間」を扱っているという重要な特徴があった。自然界において、過去の時間とは「不可逆な時間」である。「検証不能の過去」に形成さ

れた素材（岩石や地層、化石など）を用いている。素材からえられた時代や地質学的情報から、過去の探求がおこなわれている。しかし、地質学の扱っている「過去」に関しては、必ずしも十分な考察がなされてこなかった。

本書では、地質学の「過去」から地質哲学へと進めてきた。ただし、過去をどう科学的検証に供するのかが難題であった。

その難点として、まず過去の地質学的素材には、必ず変容が起こっていることである。岩石に記録された過去の自然現象に関する情報は、物理的、化学的擾乱という時間経過による変化を受けており、入手した情報は変容した結果である。そこから、読み取られる情報は重要ではあるが、なんの配慮もせず、他の時代や、他の地域と比べるのは危険だ。変容があるため、単純は比較ができないのである。

例えば、別の地域で別の時代にできた「似た」火成岩があったとしよう。ここでいう「似た」とは、試料から直接えられた情報の類似性のことである。それが、全岩の化学組成であったとしよう。両者は、「同一」の属性（化学組成）のマグマからできたと考えていいのだろうか。

情報（化学組成）が一致したとしても、もしその属性（化学組成）をつくる作用が、複数通り（成因やプロセス）あったとすれば、「同一」とは判定できない。また、他の情報で異なった属性（岩石組織や鉱物組み合わせなど）を持っていたとしたら、「同一」とは判定できないだろう。

他の可能性に関する吟味は、多くの自然科学で検討されている方法論である。真実はわからなくても、可能性の程度を検討することで、真実性は評価することは可能である。だが、形成後に変容（変成作用は変質作用）を受けているはずの岩石において、ある属性が一致したとしても、もともとの属性から変容していたのであれば、変容の補正してからでないと「同一」とはいえない。時間経過による変容をも考慮しなければならないことが、地質学の特徴となる。

その変容の解明を困難にしているのは、過去の現象は二度と再現できないという「不可逆な時間」への対処が迫られる点である。その対処として、「斉一説」という方法論

が導入されている。だが、そこにも「枚举的帰納法の限界」が立ちはだかっていた。

地質学とは、四面楚歌の難しい状況にある学問である。

だが、変容を逆手に取って利用していくこともできるだろう。時間ごとの変容（変成相系列など）が読み解ければ、過去のいくつかの時代における変容条件（変成作用の温度圧力など）を読み取ることができる。ささやかではあるが、変容した過去の素材にも福音もあるようだ。

だが、この福音に比べて、困難さは大きい。その困難さは、論理的には対処不能なので、現実的、実用的に対処していくしかない。

【註：網羅的哲学】

ただし、網羅的に科学哲学を考えていくことを目指した取り組みも物理学や生物学ではあった（第3章1）。しかし、それはなかなか困難な作業であり、並々の才では難しい。それらは、多大な労力に基づいた稀有な結晶となるであろう。

2 普遍性を求める

上述のような困難さへの対処として本書で用いたのは、「普遍性」の追求であった。前節の「似た」と「同一」とは違うという指摘と、正反対のアプローチである。類似性から普遍性を追求してきた。

どの時代、どの地域の造山運動には、似た構造（マクロでもマイクロでも）、似た構成物、似たスケール、似た組成などをもっているものも多い。自然における「類似性」は、普遍性への手がかりを与えてくれている。

類似性とは、大雑把（一次近似）にみれば、「時空を越えて、似たものができる仕組みが存在する」のではないかという作業仮説（アブダクション）ができる。変容を超えた類似性を認識するためには、多分に「主観」も混入するだろう。しかし、それでもいいとするのが、アブダクションの便利な点である。仮説選択に主観が入っても、のちの検証作業で確認していくことになる。

一般に法則を抽象するためには、帰納的操作をしていく。しかしそこには、枚举的

帰納法という限界があった。だが、仮説の検証作業として、対象とした素材以外のもの（時代や地域）へ、その作業仮説を適用していき、同様の結果がえられれば、時代性や地域性を越えた規則性（類似性）あることになる。作業仮説の確かさが演繹的に高められた、検証できたことになる。このような方法論は、仮説演繹法と呼ばれるものであった。

このように多数の仮説演繹された規則性（類似性）から抽象を進めれば、一階層上の類似性が現れ、「普遍性」へと繋がるのではなかと考えた。それが、本書の後半で進めてきた議論である。

地質学では、複雑で多数の作業仮説から成り立っている「造山運動」という仮説群がある。造山運動の普遍性を求めて、数学的概念の導入を試みた。造山運動の地質場に数学的概念を適用した。単に数学を手段ではなく、その概念とその解釈を思考の転換に利用していくという、少々変わった方法論を導入してきた。

一般の数学的概念から展開できるはずの数学的解釈を利用して、造山運動からアブダクションして、より階層の上の大きな仮説体系（「論」と呼んだ）として、島弧形成論、大陸形成論、大陸地殻増加論を構築してきた。方法論として独立した数学的概念や数学的解釈を導入することで、新たなアブダクションの可能性を示すことができた。

普遍化からいくつかの「論」が提示されたが、さらに普遍化することで、より高次の階層としてメタ的仮説として「テクトニクス」を位置づけた。地向斜造山運動からプレートテクトニクスへ、プレートテクトニクスからそれを内在したブルームテクトニクスへと、地質学の仮説体系は複雑化しながら階層化されてきた。

この段階まで進むと、演繹的に検証をおこなうのはなかなか困難である。なぜなら、ここまで階層が上がってくると、検証のためには、確かな根拠が必要になるのだが、そのような検証されたものは存在しない。

ブルームテクトニクスをさらに普遍化を進めるために、相と層、そして相互作用による圏という概念を導入して、圏の相互作用における成分の再配置と熱放出という視点で再度、考察を進めた。それが、メタ的テクトニクスとして「全地球テクトニクス」という

階層をアブダクションした。

そこで留まることなく、「全地球テクトニクス」からさらに時空間の拡大した。地球創世モデル（衝突集積テクトニクス）や、地球外の太陽系天体（太陽系内天体のテクトニクス各論）、太陽系外天体（系外惑星のテクトニクス）などの一次情報からアブダクションして、地球を超えてすべての天体に適用可能な「普遍的テクトニクス」へとさらに階層を上がっていくことを提案した。まだ一次情報が不足しているため、多様性の把握が不十分ではあるが、このような視点は重要ではないだろうか。

自然科学の多くは、仮説演繹法によって論理が組み立てられている。これが、現在の自然科学の実体でもある。本書の構成も、複雑で何重にも階層化された仮説演繹法が繰り返されている。

蛇足ながら、あの手この手の道具、視点、情報を加えてアブダクションを進めてきた。いろいろ悩みながら、地質学の「テクトニクス」という限定されたテーマを、地質学の特異性（過去を扱う）と位置づけて、そのハンディを逆用（変容条件の解読）したり、乗り越えるための視座（類似性からの普遍性、数学的解釈、系外の情報など）を利用して、アブダクションと仮説演繹法という方法論（Organon）を示してきた。本書の試案構築の作業が、地質哲学のための序説として、さらに地質学と地質哲学のささやかながらも改革（Instauration）となればと考えているが、どうであったろうか。

▼アブダクションを意識的に

本書の議論では、これまでの哲学や思想、地質学の歴史、数学の概要を利用してきた。哲学も歴史も数学も、専門ではなく借り物の一夜漬けの学びであった。しかし、借り物であっても、道具として利用できればいい。紙を切ることが目的であれば、借り物であろうが、自分専用のものであろうが、ハサミがあれば切れる。自前より借り物のほうが、良い道具があれば、それを利用すべきであろう。数学の概念を適用することで、テクニクスの部分部分の関数的関係として見ることや、時間の微分積分などの考えで地質学的時間効果をみていくことで、重要な視点をえることになった。また、不可逆な地質学的時間への対処法は、アブダクションによる作業仮説の構築と仮説演繹法が重要であった。このような方法論は、間違いないと確信している。地質哲学のために必要な Organon にチャレンジしてきたのだが、なかなか使うのは難しいものだ。四苦八苦しながら、全地球テクニクスや普遍的テクニクスへの道筋を示しそうと試みたものが本書である。なかなか、先哲のような大著や体系には近づき難く、中途半端の誹りを受けるだろう。しかし、山頂は遠くとも、登り続けるべきだろう。本書の執筆中に、「思考の教室」(戸田山, 2020b)に出会った(註)。大学の新入生向けに書かれたものだが、論理的思考として、帰納法と演繹法だけでなく、アブダクションの重要性を強調している部分があった。他にもアブダクションについて書いてある書籍もあるが、「思考の教室」が記憶に残った。アブダクションの重要視している点が、私の考えと共通していたからだ。本書でも示したが、科学の方法論はすべて仮説演繹法である。自然界では枚挙的帰納法には限界があり、完全な帰納ができないので、理論や法則などと呼ばれているものが多数あるが、すべては仮説で、アブダクションされたものと捉えるべきである。また、演繹法においても、完全な帰納法によらない仮説や、物理や数学の法則を利用するために斉一説を用いているので、ブルーのパラドクスがある。これが、科学の現状である。自然科学は、このようなアブダクションや仮説演繹法であることを、認識している研究者はどの程度いるであろうか。だが、この仮説演繹法を逆手にとれば、繰り返しアブダクションをおこなうことで、メタ的アブダクションからメタ的仮説演繹ができるであろう。本書は、あの手この手でアブダクションを意識的に利用したものであった。こんな危険なことをしている研究者はいるだろうか■

【註：戸田山氏の思想】

戸田山氏の教養の重要性を述べた「教養の書」（戸田山，2020a）では、高校生や大学の初学者のために教養の必要性を述べた書である。還暦を過ぎた私でも、この書は面白く、教養の重要性に我が意をえた。戸田山氏は、科学哲学を専門としており、論理学の教科書「論理学をつくる」（戸田山，2000）や「哲学入門」（戸田山，2014）などの書も執筆しておられる。なお、この2書は途中で挫折している。しかし、戸田山氏には以前から興味があったので、「知識の哲学」（戸田山，2002）や「科学哲学の冒険 サイエンスの目的と方法をさぐる」（戸田山，2005）、「科学的思考」のレッスン 学校では教えてくれないサイエンス」（戸田山，2011）などは読んでいた。しかし、興味を惹かれたので、未読のものを再度読みだした。その書きぶりがなかなかユニークな口語調なのでわかりやすい。そこには好き嫌いがありそうだが、私にはとっつきやすい。ただし、内容はなかなかハードではあるが。



索引

アルファベット

A

abduction	129
achondrite	273
active continental margin	176
actor network theory	84
agnosticism	29
AI	24 204 269
albedo	285
allometry	153
Amasia	182
analogy	63 123 184 280 321
analytic philosophy	60
anonymous	66 67
arc singularity	218
ARIMA モデル	189
artificial intelligence	269
AR 過程	149
asthenosphere	166
Atlantic-type mountain belts	175

B

Bayesian interpretation of probability	154
British empiricism	45

C

capitalism	51
catastrophism	92
central dogma	235
chondrite	273
circumbinary planet	293
cogito ergo sum	46
cold plume	172 175
collision accumulation tectonics	280
collision mountain	168
collision - type mountain belts	175
colloid	240
continental margin	176 307
continental rationalism	46
contrast	280 306

convergent boundary	167
Cordilleran-type mountain belts	175
COVID-19	7
craton	161
Curiosity	273

D

deduction	46 125
development	111 247 316
dialectic	30
divergent boundary	167
dynamics	111 245
D" 圏	239 248 252 254 255 260

E

eccentric planet	293
enumerative induction	126
Euler's identity	140
existentialism	56
exoplanet	280 306 307
extensive variable	110

F

Falsifiability	81
flysch	163
force	243
fossil	123
Fourier analysis	146
Fourier transform	146
fractal structure	151
French enlightenment	49

G

Gaussian distribution	150
gel	41 48 240 305
geosynclinal orogeny	161
German idealism	47
giant impact	284
goldilocks planet	295
Google Scholar	5
grand unification theory	245
granodiorite	177
graviton	244

GUT ----- 245
 Gutenberg-Richter ----- 152 310

H

Habitable planet ----- 295
 habitable zone ----- 286 319
 harzburgite ----- 192
 history of science ----- 74
 hot Jupiter ----- 293
 hypothetical deductive method ----- 129

I

imperfect induction ----- 127
 induction ----- 45 125 126 127 317
 Instauratio Magna ----- 45
 Instauratio ----- 2
 instrumentalism ----- 80
 intensive variable ----- 110
 interaction ----- 111 244 246
 iron meteorite ----- 273
 irreversible ----- 111
 island arc ----- 168

J

jumping Jupiter ----- 298

K

Kozai-Lidov mechanism ----- 298
 Kozai mechanism ----- 298

L

Large igneous provinces ----- 213 258
 layer ----- 239
 likelihood function ----- 154
 LIPs ----- 213 258 259 265
 lithosphere ----- 166
 long tail ----- 152

M

Maclaurin expansion ----- 144
 mantle plume ----- 175
 mediocrity hypothesis ----- 285

megalith ----- 172
 Mid-Ocean Ridge Basalt ----- 213
 modern analogy ----- 184
 molasse ----- 163
 molecular cloud ----- 280
 MORB ----- 213

N

Neptunism ----- 89
 normal distribution ----- 150

O

oceanic ridge ----- 167
 orange dwarf ----- 288
 Organon ----- 2 3
 orogen ----- 160 161 307 316 317 321
 orogenic belt ----- 161
 orogeny ----- 160 161 307 316 317

P

Pacific-type mountain belts ----- 175
 paradigm ----- 81
 pareto law ----- 153
 passive margin ----- 176
 Perseverance ----- 273
 phase ----- 149 239
 phenomenology ----- 57
 planetesimal ----- 280
 plasma ----- 240
 plate tectonics ----- 166
 platform ----- 161
 Plutonism ----- 91
 positivism ----- 54
 posterior probability ----- 154
 post-perovskite ----- 173 325
 power law ----- 150
 power law distribution ----- 150
 pragmatism ----- 55
 principle of the uniformity of nature ----- 119
 principle of uniformity ----- 118
 Principles of Geology ----- 94 108 119
 prior probability ----- 154
 probe ----- 274 311

pseudoscience -----82
 psychoanalysis -----57

Q

quark -----244

R

red dwarf -----288
 retrograde planet -----293
 rift -----169 315 324
 Rodinia -----182
 runaway growth -----286

S

scale invariance -----151
 scaling exponent -----150
 scaling law -----150
 science philosophy -----74
 scientific revolutions -----42
 seismic tomography -----171
 self-similarity -----151
 shield -----161
 singularity -----218
 singular point -----218
 slab -----172
 slingshot -----298
 snow line -----285
 socialism -----52
 sociology of science -----84
 sociology of scientific knowledge -----84
 Sompi Method -----149
 sphere -----166 247 306 317
 stony-iron meteorite -----273
 strong interaction -----244
 structural geology -----160
 super earth -----293
 super hot plume -----175

T

Taylor series -----144
 tectonic geology -----160
 tectonics 160 166 278 280 307 316 317
 TESS -----291

thermodynamics -----245
 tonalite -----177
 transform boundary -----167
 transform fault -----167
 transit -----111 290
 trench -----167 307 318
 trondjemite -----177
 TTG -----177 224

U

uniformitarianism -----92
 universal tectonics -----278

V

Very Long Baseline Interferometry -----167
 Viking -----273
 VLBI -----167

W

weak interaction -----244

Z

Zipf law -----153

かな

あ

アーキタイプ -----58
 アーレント -----62
 アイスコア -----147
 アウグスティヌス -----32 34
 アウフヘーベン -----56 184 185
 アガシー -----91 92
 アクイナス -----35
 アクター・ネットワーク理論 -----84
 アグリコラ -----124
 アストロメトリ法 -----290 325
 アセノスフェア -----166 190 202
 暖かいD" ---172 252 254 255 262 266
 アッシュヤー大司教 -----98
 アトム -----28
 アナクサゴラス -----28

アナクシマンドロス	26
アナクシマンドロス	86
アナクシメネス	26
アナロジー	63 123 182 183 184 185
アノーソサイト	202
アノニマス	66 67 68
アフォーリズム	2
アブダクション	4
アベラール	35
アボガドロ数	245
アメイジア	182
アリストテレス	30 31 32 35 38 39
アルクイン	35
アルケー	26 28
アルゴリズム	204 269
アルベド	285 287 288 310
アレクサンドロス	19 31
アロメトリー	153
アンセルムス	35
アンチセル	102 311
安定地塊	200
アントニヌス	32

い

イエス・キリスト	34
イオ	26 30 240 257 283 284
イギリス経験主義	45
位相幾何学	79 158
位置エネルギー	245 264
イトカワ	273 283 284
因果関係	28 46 49 77 78 79 106 120 125 126 150 153 161 216 217 221

う

ワイトゲンシュタイン	60
ウィルソンサイクル	169 181 182
ウェーバー	60
ウェゲナー	99 100 163 164 165 170 171
ウェッジの絞り出し	202
ウェッジマントル	195
ウェップ夫妻	52
ウェルナー	90
ウォーカー	89

ヴォルテール	49
ウォレス	96
内なる世界	272 273
宇宙誌	84
運動エネルギー	245

え

永久機関	261
エウセビオス	34
エウロパ	283 284
エキセントリック・プラネット	293 298 299 300
液相	237 239 240 242 243 249 254 259 264 285
エコロジー的思考	83
エビクテトス	32
エピクロス	31
エラスムス	41
演繹的検証	271 272 273 274
演繹法	3 4 44 46 70 72 74 125 126 128 129 130 131 153 155 159 164 185 207 210 213 302 330 331 332
エンケラドス	283
エントロピー	110 120 121 122 128 134 135 232 261
エントロピー増大の原理	121 122 261
円盤移動モデル	297 299 300
円盤仮説	280
エンペドクレス	29

お

オイラーの公式	140
オイラーの等式	140
オーウェン	52
オゾン	249 266
オゾン層	249 266
オッカム	37 42
オフィオライト	198 199 200 201 202 203 211 213 309
オリエンタリズム	64

か

カーボナタイト	203
---------	-----

- ガイア理論 -----83
 海王星型惑星 ----- 293 294
 外核層 -----239 242 243
 外挿 -----272 273
 カイパーベルト -----283
 海洋性島弧 -----182 196
 海洋層 -----239 242 243
 海洋底拡大 -----171 210
 海洋プレート層序 - 177 194 195 199 216
 259
 科学革命 -----42
 科学技術社会論 -----84
 科学社会学 -----84
 科学知識の社会学 -----84
 自然哲学 -----69 71 72 74 77 78 86
 可逆の時間 -----143
 核分裂 -----244
 火成論 -----89 91 92 94
 仮説演繹法 -3 4 128 129 130 131 153
 155 159 164 185 207 210 213 302
 330 331 332
 仮説群 -200 205 210 212 224 228 231
 235 330
 寡占的成長モデル -----282
 片対数軸 -----151
 活動的大陸縁 176 182 183 188 196 221
 310
 ガニメデ -----283
 カリスト -----283
 ガリレオ -----70
 カルヴァン -----42
 カルナップ -----80 106
 ガロア理論 -----158
 慣性の法則 -----72
 完全帰納法 -----127
 ガンディー -----64 65
 カント -----37 47 48 70 77
 問答法 -----30
 カンパネッラ -----42
 岩流圈 -----166

 き
 キェルケゴール -----56
 疑似科学 -----81 82

 気相 ---237 239 240 241 242 243 249
 259 285
 軌道進化モデル -----297 299
 軌道要素 -----148
 帰納の正当化問題 -----128
 帰納法 --2 3 44 45 70 72 74 78 119
 125 126 127 128 130 131 153 159
 329 330 332
 逆行惑星 -----293 298 300
 キュヴィエ -----92 94 96
 キュリオシティ -----273
 境界条件 -----142 143 157 299
 教父哲学 -----34
 巨大ガス惑星 281 286 288 289 298 300
 311
 巨大火成岩岩石区 -----213 258
 キング牧師 -----65
 キンディ -----38
 キンバーライト -----203

 く
 クーロンの法則 -----152 244
 クーロン力 -----152
 クーン -----81 82
 クォーク -----244 275 276
 クセノファネス -----28 86
 クセノボン -----29
 クラトン -----161 163 170 175 200 221
 グルーのパラドクス -----128 129
 クワイン -----60 80

 け
 系外惑星 -2 280 282 289 290 291 292
 293 294 295 296 297 300 301 302
 307 308 309 310 311 314 315 317
 318 319 320 321 325 331
 系外惑星テクニクス各論 -----295
 珪質軟泥 -----192
 珪質粘土 -----214
 ゲーデル -----80 83
 激変説 -----89 92 94 98
 ゲッタード -----91
 ケノン -----28
 ケプラー -----72

ケプラーの法則	72
ケプロン	102
ケルヴィン	98
研究プログラム	82
現実主義	42 119 120
現象学	57
圏論	158

こ

コア集積モデル	282 286 295 296
高圧型変成作用	178 195 202 222
後期重爆撃	282
構造主義	62 63
構造侵食型	179
構造侵食作用	179 195 196 216 217 226
251	
構造地質学	160
公転軌道	148 293
氷天体	286
コールドブルーム	171 172 173 175 215
240 245 251 252 254 255 259 260	
264 265 266	
古在移動モデル	297 298 299 300
古在メカニズム	298 299
古在・リドフメカニズム	298
弧状シンギュラリティ	218 219 224 314
361	
コスモポリタニズム	31
固相	237 239 240 242 243 249 254
小藤文次郎	108
コペルニクス	42 43 45 48 70
コペルニクスの転回	43 48
コペルニクスの転回	43 48 70
コマチアイト	202
ゴルギアス	29
コルディレラ型造山運動	175 176 178 182
188 196 202 222	
コルディレラ型造山帯	182 187 200 202
221	
ゴルディロックス惑星	295
コロイド	240
コワニエ	102 311
コント	54 78

さ

サイド	64
歳差運動	148
サクダクシオンファクトリー	199 200
サルトル	56
産業革命	23 24 39 51 52 54 55
サン・シモン	52
三重会合点	196
三相	237 243
三態	237
サンプルリターン	273 284
三位一体	34

し

シーナー	39
シーボルト	102
ジェームズ	55
シェリング	48
ジェル相	239 240 241 242 248
時間の矢	111 120 121 122 153 308
磁気層	239 242 244
磁気バリア	249
示強変数	110
始原的隕石	273
自己回帰 AR モデル	189
自己回帰過程	149
事後確率	154
自己重力不安定モデル	282
自己相似性	151
示準化石	95 105 115
地震波トモグラフィ	171 173 174 181 236
255	
指数関数	140 149 151 152
沈み込み圏	239 248 250 251 252 257
258 259 260 285	
事前確率	154
自然史学	82 85 86
視線速度法	289 290 291 320
自然の一様性原理	119
自然の帰納法	153
自然の斉一性	119 125 126 127 135
自然の斉一性原理	119
実在主義	119
実証主義	54 55 58

実存主義 ----- 55 56 62
 ジップの法則 ----- 153
 資本主義 ----- 23 24 50 51 52 55
 社会主義 ----- 23 50 51 52
 ジャンピングジュピター ----- 298
 シュヴァイツァー ----- 64
 周期現象 ----- 145 149
 宗教改革 ----- 22 39 40 41 42 43
 収束境界 ----- 167
 収束半径 ----- 144
 重力エネルギー ----- 135 264 288
 重力子 ----- 244
 重力散乱 ----- 282
 収斂境界 ----- 167 168
 周連星惑星 ----- 293
 種の起源 ----- 86 124
 状態方程式 ----- 110
 状態量 ----- 109 110
 衝突エネルギー ----- 135 288
 衝突型造山運動 - 175 178 182 188 202
 221 222 224 228 235
 衝突型造山帯 182 187 200 202 203 221
 衝突山脈 ----- 168
 衝突集積テクトニクス --- 280 281 282 283
 296 301 330
 ショーペンハウエル ----- 48
 初期条件 --- 142 143 157 288 299 302
 示量変数 ----- 110
 ギルコン ----- 99 203 308 319
 深海底堆積物 147 192 193 216 251 259
 313
 深海底粘土 ----- 214
 新機関 ----- 2 3
 人工知能 ----- 269
 親石元素 ----- 252 260 264
 振動関数 ----- 146
 新プラトン主義 ----- 32 34
 人文主義 ----- 39 41 42
 心理生物学 ----- 107

 す
 水成論 ----- 89 91 92 94
 数学的解釈 - 205 207 210 211 212 213
 214 215 216 219 220 222 223 225

228 229 230 235 330 331
 数学的概念 ----- 1 8
 数学的規則性 ----- 204
 スーパー・アース ----- 293
 スーパーホットプルーム ----- 175
 スケーリング指数 ----- 150 151 156 157
 スケーリング則 ----- 150 193
 スケール不変性 ----- 151
 スコラ哲学 ----- 35 36 37 39 43 46
 ステノ ----- 88 89
 スノーライン - 285 286 287 289 291 297
 318
 スピノザ ----- 47
 スペクトル解析 ----- 147 149 291 325
 スペルマタ ----- 28
 スペンサー ----- 55
 スミス ----- 51 95 324
 スラブ -- 172 173 178 193 195 215 251
 252 254 255 259 260 265 309
 スリングショット ----- 298
 すれ違い境界 ----- 167

せ

斉一性の破れ ----- 127
 斉一説 ----- 89 92 93 94 95 96 104
 正規分布 ----- 150 154 157
 正義論 ----- 61
 整合 ----- 91 92 93 132 137 163
 精神分析学 ----- 57
 成層構造 ----- 242
 成分再配分 ----- 251 254 259
 生命居住可能領域 ----- 286
 生命圏 - 239 248 249 250 252 257 258
 260
 生命誌 ----- 83
 生命層 ----- 239 242 243 250
 生命潮流 ----- 83
 世界市民主義 ----- 31
 石質隕石 ----- 273
 赤色粘土 ----- 192
 赤色矮星 ----- 288 295 300
 石炭 ----- 91 136 137 257 262
 石鉄隕石 ----- 273
 石墨 ----- 257

石油	-----	257	262	ソシユール	-----	62	63	90
石灰岩	-----	90	257	外なる世界	-----	272	273	
雪線	-----	285		存否法	-----	145	149	150 156 157 325
絶対年代	-----	116	137	た				
絶対零度	-----	261		ダーウィン	-----	54		
セネカ	-----	32		タービダイト層	132 133 145 148 177 193			
ゼノン	-----	31		195 216 313				
狭まる境界	-----	167		タービダイト流	--- 132 193 195 216 218			
ゼン	-----	23	61	大革新	-----	45		
前縁褶曲衝上断層帯	-----	202		大気層	-----	239	242	243 258
前縁衝突帯	-----	202		他者の尊重	-----	62		
全球凍結	-----	120	287	大西洋型造山運動	-----	175	176	178
前弧堆積物	-----	202	220	タイトラン	-----	283	284	
全地球ダイナミクス	236 237 239 240 316			大統一理論	-----	245		
全地球テクトニクス	-----	2	4	対比	92 109 164 280 283 284 285 297			
全地球テクトニクス	2 4 235 236 237 238			太平洋型造山運動	175 176 177 179 183			
	239 240 241 244 246 247 254 255			188 198 200 201 202 218 219 221				
	256 260 263 267 268 271 274 278			222 228 235 252 325				
	283 284 285 296 300 301 302 314			太平洋型造山帯	- 179 182 187 203 316			
	330 332			317				
セントラルドグマ	-----	235		太陽系最小質量円盤モデル	-----	282		
そ				大陸移動説	-----	99	100	163 164 165
総合的仮説	- 198 199 200 201 202 207			大陸縁	-175 176 178 182 183 188 196			
	210 211 212 218 219 222 223 224			221 310				
	228 229 230 235 236			大陸形成論	-211 220 222 223 224 226			
相互作用	79 111 112 113 237 239 242			228 236 330				
	244 246 247 248 249 250 251 252			大陸合理論	-----	46		
	254 255 257 260 266 268 274 278			大陸地殻増加論	- 211 222 224 225 227			
	282 298 322 330			228 236 330				
造山運動	-89 91 100 130 159 160 161			対流	---100 111 113 116 135 172 173			
	162 163 164 165 166 167 170 171			174 188 190 210 211 213 215 224				
	175 176 177 178 179 180 181 182			232 240 245 251 252 254 255 257				
	183 184 185 187 188 196 198 200			259 260 261 262 264 265 266 268				
	201 202 205 218 219 221 222 224			ダ・ヴィンチ	-----	41		
	228 235 250 252 268 273 310 314			卓状地	-----	161		
	325 329 330			ダスト落下問題	-----	283		
造山帯	-161 165 176 177 178 179 180			楯状地	-----	161		
	181 182 183 184 185 187 188 200			多様体	-----	158		
	202 203 221 310 316 317			ダランベール	-----	49		
相対年代	-----	115	116	26				
ソーカル	-----	82	83	炭酸カルシウム	-----	257		
ソクラテス	-----	6		ダンテ	-----	41		
ソクラテス	-----	29	30	ダンネマン	-----	80		

ち

地殻層	239 242
地球型惑星	281 286 288 293 294
地球磁気圏	239 248 249 257
地球磁場	135
地球重力圏	239 248 257
地球生態学	83
地向斜造山運動	91 100 130 159 161 162 163 164 165 166 167 170 171 179 180 181 187 235 330
地溝帯	169
地軸の傾き	148
地質学原理	94
地質学的時間	4
地質境界	4
地質年代表	116
地層同定の法則	95
地層の側方連続の法則	95
地層累重の法則	89 95 115
地動説	70 72
チャート	115 118 145 148 177 192 195 199 211 214 215 216 257 313 314
中圧高温型変成帯	177
中央海嶺玄武岩	213 320
潮汐加熱	288
超低速度領域	173
直接撮像法	290 291 299 317

つ

冷たいD''	172 173 252 254 255 260 265
強い相互作用	244
強い力	244 245 276

て

ディオゲネス	29 31
低温高圧型広域変成帯	176 177
低温高圧型変成相系列	177
ティコ・ブラーエ	72
低速度層	190 202
デイドロ	49
テイラー展開	9 140 144 145 157 158 322
デカルト	1 3

アフオリズム	2
デカルト	45 46 47 57
適用限界	112 122 123 125 128 129 131 155 159 166 232 269
テクトニクス	2 4
鉄隕石	273
デモクリトス	28
デューイ	55
デュエム	80
デリダ	63 64
電磁放射	262
伝導	64 98 190 261 262 265
天然ガス	257
天変地異説	92

と

ドイツ観念論	47 48
道具主義	80
島弧	167 168 169 175 176 177 179 182 188 193 195 196 197 198 199 200 201 203 205 207 209 211 215 216 217 218 219 220 221 222 223 224 226 227 228 229 235 236 250 251 258 259 264 265 313 314 322 330 361
島弧形成論	211 215 218 219 220 221 224 226 228 236 330
等時性	72
橙色矮星	288
ドゥルーズ	63
特異性	109 110 112 113 132 133 160 165 166 247 280 282 283 284 285 331
特異点	218
ドブブラー法	289 290
トランジット法	290 307
トランスフォーム境界	121 167 168
トランスフォーム断層	121 167 168
ドルビニ	92

な

内核層	239 242
内挿	272 273
ナウマン	102 320

ナウマンゾウ	-----	102
波素	-----	149
に		
ニーチェ	-----	56
二酸化ケイ素	-----	257
ニュートン	-----	5
ニュートン	-----	72 77 79
ニュートン力学	-----	244
人間圏	-----	84
ね		
ネイピア数	-----	140
熱循環	-----	135 215 232
熱伝導率	-----	190 261 262
ネットー	-----	102 311 312
熱放出	-135 190 215 260 262 263 265 266 267 268 274 330	
熱力学	---80 98 110 122 128 134 232 245 261	
熱力学第二法則	-----	122
ネルンストの熱定理	-----	261
年縞堆積物	-----	118
の		
ノヴウム・オルガヌム	-----	2 70
は		
バークリー	-----	45
パーサヴィアランス	-----	273
ハーシェル	-----	78
パース	-----	55 56 79
ハーバマス	-----	61
バイキング	-----	273
ハイデッガー	-----	56
パウロ	-----	34
バスカル	-----	43 47
バソリス帯	-----	176 177
バターフィールド	-----	72
バックランド	-----	91
発見の方法	-----	46
発散境界	---167 168 174 180 183 184	
発達史	-----	111

ハットン	-----	92 93 96 98
ハットンの断面	-----	136 137
ハットンの不整合	-----	93 137
ハドロロン	-----	244
場の生命論	-----	84
ハビタブルゾーン	- 285 286 287 288 289 295 297 308 311	
ハビタブル惑星	-----	295
はやぶさ	-----	273 284 319
バラダイム	-----	81 82 84 100
パルサー	-----	289 293 309
パルサー惑星	-----	293 309
ハルツバージャイト	-----	192
パルメニデス	-----	28 29
パレートの法則	-----	153
半遠洋性堆積物	-----	193 195 216
反証可能性	-----	81
ハンソン	-----	81
バンペリー	-----	102 311
汎惑星形成モデル	-----	296 297 300

ひ

非活動的縁辺域	-----	176
ピタゴラス	-----	28 32
ビッグデータ	-----	269
微分幾何学	-----	158
微分方程式	---8 140 141 143 144 155 156 157 187 217 226 305 320 321	
ヒューウエル	-----	78
ヒューム	-----	46
ヒュームの帰納法の難問	-----	128
ビュフオン	-----	98
氷河期	-----	91 120 285
標準モデル	-281 282 283 295 296 297 299 300	
ビルニー	-----	88
広がる境界	-----	167
微惑星	-280 281 282 283 297 315 319	
ふ		
フエイヤーベント	-----	81 82
フィチーノ	-----	41
フィヒテ	-----	48
フーコー	-----	63 64

- フーリエ -----52
 フーリエ解析 --- 8 118 139 140 145 146
 148 149 158 189 214 318 321 324
 フーリエ変換 --- 8 146 147 149 156 157
 318 321 322
 フォッサ・マグナ -----102
 不可逆 1 5 111 112 113 120 121 122
 126 128 131 137 153 155 159 232
 261 268 327 328 332
 付加体 -132 176 177 179 195 196 197
 199 214 216 313 319 323
 不可知論 -----29
 不完全帰納法 -----127
 輻射 -----262 285
 複素解析 -----158
 フッサール -----57
 不定の時間 -----143
 負のエントロピー -----134
 普遍性 --39 109 110 112 113 132 133
 160 164 165 236 247 271 280 282
 283 284 285 289 296 329 330 331
 普遍的仮説 -----155 156
 普遍的テクニクス -----2 4
 普遍的テクニクス --1 2 4 271 278 279
 280 295 296 300 301 302 314 331
 332 362
 フラー -----83
 フラクタル構造 -----151
 プラグマティズム -----55
 ブラズマ相 -----239 240 241
 プラトン -----6
 プラトン -----29 30 32 34 41
 ブランク温度 -----275
 ブランク時間 -----274
 ブランク長 -----274
 ブランク点 -----275
 フランクフルト学派 -----61
 フランクフルト派 -----12 61
 フランス啓蒙思想 -----49
 ブリクモン -----83
 フリッシュ -----163
 プリニウス -----87
 ブルームテクニクス ---116 159 166 171
 172 173 174 175 180 181 188 228
 235 236 237 239 240 251 254 255
 264 266 284 296 316 330
 プレイフェア -----93
 ブレーク -----102 311
 プレートテクトニクス 100 108 116 130 159
 165 166 167 169 170 171 172 174
 179 180 181 182 185 187 188 190
 203 205 207 208 209 210 211 215
 220 222 224 227 228 229 230 235
 236 240 251 255 258 265 284 311
 316 323 330
 フロイト -----57 58 63
 プローブ -----274
 プロタゴラス -----29
 プロティノス -----32
 フロム -----61
 分散質 -----240
 分子雲コア -----280 282
 分析哲学 -----60
- へ
- ベイズの解釈 -----154 155
 ベイズの定理 -----154 155
 ヘーゲル -----48
 ベーコン -----2 3
 冪乗則 -150 152 153 156 158 193 197
 200 216 217
 冪乗分布 -----150 151 157
 ベクトル解析 -----158
 ペトラルカ -----41
 ペトロ -----34
 ヘラクレイトス -----28
 ヘリニズム文化 -----31
 ベルクソン -----58
 ベルンシュタイン -----52
 偏光顕微鏡 -----95 319
 ベンサム -----51
 弁証法 -----30 48 56
 変遷史 -----2
 変動帯 -161 163 175 180 181 200 221
 偏微分方程式 --- 143 155 157 217 226
- ほ
- ポアンカレ -----79
 ホイストン -----89

崩壊熱	264
放射	99 103 115 116 134 135 137 148 174 181 244 261 262 264 265 268 275 285 287 288
放射性核種	103 244 264 288
暴走成長	286
暴走的成長モデル	282
方法序説	1 4
ホームズ	99 315
ポスト構造主義	63
ポストペロプスカイト	173
ポッカッチョ	41
ホット・ジュピター	282 293 294
ホットスポット	258 259
ホット・ネプチューン	293
ホップズ	45
ポパー	81 82
ポリス	19 29 31
ホルクハイマー	61
ホワイトノイズ	149
ま	
枚挙の帰納法	119 126 127 128 130 131 153 159 329 332
マイクロレンズ法	290 291 321
マキャヴェリ	42
マクスウェル方程式	123 244
マグニチュード	152
マグマ圏	239 248 250 251 252 257 258 259 260
マグマ・ミキシング	199
マクローリン展開	140 144 145 157
マザー・テレサ	64
マッハ	49 79
マルクス	52 63
マントル層	239 242
マントル対流	100 111 113 116 135 172 173 188 190 210 213 214 215 224 232 245 251 254 255 259 260 262 264 265 266 268
マントルブルーム	172 173 175 190 213 215 240 245 250 252 254 255 258 259 260 265 266 321

み	
ミグマタイト化作用	178
ミケランジェロ	41
ミランコヴィッチ・サイクル	139 148 157
ミランドラ	41
ミル	51 78 102
ミルン	102 312
む	
ムハンマド	38
め	
メガリス	172 173 251 252 254 259 260 265
メタ仮説	130 205 210 237
メタ的運動論	271
メタ的総合仮説	207 229 236
メタ的変遷史	185 271
メディアオクリティの仮説	278 285 287 289 293 295 302
メルロー・ポンティ	57
も	
モア	42
モース	102 323
木星型惑星	286 288 293 294 309 318
モダン・アナロジー	183 184 185
モラッセ	163 178
モラリスト	43
モロ	91
モンテーニュ	43
モンテスキュー	49
や	
ヤスパース	56
ゆ	
尤度	154
ユング	58
よ	
弱い相互作用	244

弱い力 ----- 244 245 276

ら

ライエル ----- 93 94 96 98

ライブニッツ ----- 47 77

ライヘンバッハ ----- 81

ライマン ----- 102 311 320

ラカトシュ ----- 81 82

ラッセル ----- 64

ラファエロ ----- 41

ラマルク ----- 92 94

り

リースマン ----- 60

リーマン幾何学 ----- 158

陸弧 ----- 175 178 196 200 221

離散関数 ----- 145 147

離心率 -148 286 287 290 292 293 297
298 299

リソスフェア ----- 166 190

リフト帯 -169 172 182 183 202 213 251
258 310

リュグウ ----- 273

両対数軸 ----- 150 151

リン酸カルシウム ----- 257

る

累進変成作用 ----- 178

類比 63 122 123 130 132 185 280 283
284 285 293

ルシュド ----- 39

ルソー ----- 49

ルター ----- 42

ルネサンス - 23 35 38 39 40 41 42 43
63

れ

レヴィナス ----- 62

レーニン ----- 52

レスカス ----- 102

レトリック ----- 29

連星 ----- 293 298 299 317

連続関数 ----- 145 147

ろ

ロールズ ----- 61

ロゴス ----- 28

ロジャー・ベーコン ----- 35

ロック ----- 45 49

ロディニア ----- 182

ロングテール ----- 152

わ

ワインバーグ・サラム理論 ----- 245

惑星散乱モデル ----- 297 298 299 300

和達-ベニオフ面 ----- 171

ワレリウス ----- 89

我々の世界 ----- 271 272 273



小出 良幸（こいで よしゆき）

現在 札幌学院大学人文学部こども発達学科 教授

略歴 1987年 北海道大学大学院理学研究科地質学鉱物学修了（理学博士）、1989年 日本学術振興会特別研究員、1991年 神奈川県立博物館主任研究員、1995年 神奈川県立生命の星・地球博物館主任研究員、2002年 札幌学院大学社会情報学部教授を経て、2006年より現職。

専攻 地質学、地質哲学、科学教育

著書 エベレストの頂上はむかし、海だった（1993, PHP 研究所）、新しい地球史（共著、1994, 有隣堂）、石ころから覗く地球誌（1995, NTT 出版）、宇宙からの贈り物（共著、1995, 神奈川県立生命の星・地球博物館）、かながわの自然図鑑（1）岩石・鉱物・地層（共著、2003, 有隣堂）、宇宙から見た地質（共著、2006, 朝倉書店）、大学的北海道ガイド（共著、2012, 昭和堂）、早分かり地球と宇宙（2016, 日本実業出版）、地質学における分類体系の研究（2016, 増補改訂版 2020）、自然史学の確立と自然史リテラシーの育成を目指して（2017）、地球物質の多様性形成の機構と火成作用の役割（2018）、地層の時間記録：規則性のある時間記録の解読（2019）、弧状シンギュラリティ：島弧と沈み込み帯の地質学的重要性（2020）など。

地質学の学際化プロジェクト 第6巻 地質哲学2

地質哲学方法序説

地質哲学のための Organon を用いた普遍的テクトニクスへの
Instauration

Interdisciplinary Project of Geology Vol. 6
Philosophy of Geology 2

Discourse on the Method of Geophilosophy
Instauration to Universal Tectonics Using Organon for Geophilosophy

2021年8月30日 初版発行
(非売品)

著者 小出 良幸 © 2021 Y. Koide
発行者 小出 良幸
発行者 札幌学院大学 総合研究所
〒069-8555 北海道江別市文京台11番地
電話 011-386-8111 (代表)
札幌学院大学 <http://www.sgu.ac.jp/index.html>
総合研究所 <http://www.res.sgu.ac.jp/>

印刷・製本 株式会社 サンコー

NDC455

ISBN 978-4-904645-12-3 C3044

