

《論文》

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

小 出 良 幸

要 旨

現在の地球は、多様な相の構成物が、層をなし、圏として相互作用をしている。地球が、このような現状に至るまでの変遷史を普遍化したものが、全地球テクトニクスとなる。さらに抽象化した普遍的テクトニクスとして、宇宙のすべての天体に適用可能なものも必要になるだろう。現在えられている素材を集めて検討し、普遍的テクトニクスへの道筋を考えていく。

キーワード：全地球テクトニクス、普遍的テクトニクス、類比と対比、スノーライン、ハビタブルゾーン、系外惑星

I はじめに

地球の営みを探ることは、地質学の重要な目的である。地質学が扱う素材は多岐に渡り、分布範囲は地球全体に渡るが、成分ごとに偏在し、対象となる時間も地球誕生から現在まで約45億年間の長いものとなる。だが実際に研究に用いられるのは、現在露出している小さな露頭から採取した小さな試料（岩石）である。その岩石は、「ある時期」に生成され、変容はしているだろうが「現在」まで存続してきたものである。岩石の生成時期や変容時期がわかれば、生成や変容の過程、あるいは生成や変容に関わった条件や環境を知ることができるはずである（小出, 2018）。つまり、岩石を通じて、地球の過去を知ることができる。

地質学は、多様な岩石を用いて、多様な生成と変化の時期を読み取ってきた（小出, 2019）。それぞれは時間の断片ではあるが、断片を集積していくことで、過去から現在までの地球の営みを読み取ってきた。それらの情報を集大成したものが、地球の変遷史や地質構造発達史と呼ばれるものである。

変遷史や地質構造発達史から、大地の営みの時代を越えた普遍性のみを抽象したものが、テク

トニクスとなる。現在、地球ではプレートテクトニクスがもっとも信頼されている仮説となっている。プレートテクトニクスが対象としているものは、必ずしも地球全体ではない。地球のすべての構成物の生成過程やその変容過程を、すべての時代を通じて抽象した一般論として「全地球テクトニクス」として目指すことが重要であろう (小出, 2020a)。

全地球テクトニクスから、より一般化された普遍的テクトニクス (universal tectonics) までを目指して、その素描を進めていくことにする。普遍的テクトニクスを目指すのには、次のような背景がある。太陽系内の地球以外の天体 (惑星や衛星、小惑星、彗星など) の探査が進むにつれて、地球だけのテクトニクスではなく、他の天体、より多様な天体をも考慮したテクトニクスも必要になってきた。先駆的な研究も現れているがまだ道半ばである。加えて近年、太陽系外で多数の惑星が発見され、その異形の実態も明らかになってきた。系外惑星にもそれぞれのテクトニクスは存在するはずだが、多様性の大きな外惑星系に対して、地球のテクトニクスがどこまで適用可能かの検討も必要になってきた。

そこで、本論文では、テクトニクスの概念の変遷をまとめ、全地球テクトニクスを概観し、目指すべき普遍的テクトニクスの方向性を探っていくことも目的とする。

II 地質学の視座

地質学とは、どのような特徴を持った学問体系なのかを、歴史的に概観し、その目指しているところを整理していく。

1 地質学とは

「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。その後、ライエル (Charles Lyell) の「地質学原理 (Principles of Geology)」の出版によって、現代用いているような意味に定着してきたようだ。

日本での地質学における術語の由来については、歌代ほか (1978) 「地学の語源をさぐる」に詳しい。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ヒ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。現在に通じる視点を示した達観といえる。現在では「地学」という名称は、高校の教科としては残っているが、学問領域としては残っていない。そのような主張にもかかわらず、なぜか小藤は「地学」に固執はしなかったようだ。

地質学は、文部省編 (1984)「学術用語集 地学編」によれば、「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、その範囲も領域があまりにも狭い定義となっている。

日本地質学会 (2020) によれば、現在の地質学とは「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に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。現在では、地質学は網羅的な定義となっている。

地質学の発祥と日本への導入、そして現在の意味から、「地球の歴史」や「地球の現象」を「探る」ことで、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、あるいは地球自体の形成から今日に至るまでの「進化史」(history あるいは進化 evolution) を探ることである。つまり、「地質学」とは、「地球の現在の状態 (構成物の性質や特徴) と成り立ち (変遷, 進化, 歴史) を知ること」となるであろう。

だが、上述したプレートテクトニクスが、最適なモデルであろうか。本当に「包括的」モデルなのだろうか。また「地球を探る」だけが地質学の使命なのだろうか。そのような疑問は、もう少し詳しく目的を読み解いてから考えていくことにする。

2 地質学の目的

地質学の目的は、上記の学問の成立過程や語義の変遷をふまえて、「地球の現在の状態」を知り、「地球の成り立ち」を知ること、としてきた。以下では、それらの意味するところを検討していく。

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」(藤堂ほか, 1993) 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。ただ、「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意味の違いもある。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。したがって、「現在の地球の状態」とは、「本来持っている固有の地球の姿」と読み解ける。

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、ときには機械的な量、電気的な量、磁気的な量、重力など多様なものがある。熱力学的に考える時には、状態変数となり、物質に依存しない示強変数 (intensive variable) と物質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表したものを「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」、「気体」となる。これらの相の物質が、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。地球の表層付近では、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、法則の検証や演繹ができる。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と固有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もある。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、岩石の由来は過去へと遡ることになる。これは、次の「成り立ちを探る」という地質学固有の目的につながる。

b 地球の成り立ちを知る

地質学は、地球の現在の状態（現状）とその固有の状態を知ることからはじまる。だが、それで終わることはなく、地球の成り立ちを知ることこそが、地質学の重要な目的となる。「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みていき、加えて素材間の「相互作用 (interaction)」を探ることも含んでいる。ここでいう「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。そのため、相互作用には、構成物間で物質移動を伴うことも多い。そのような相互作用を、最終的には地球規模で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、大気の大気などが大きな移動となるだろう。それらの物質移動に伴って、多様な変化や反応が起こることになる。

(2) は、「地球が現在の状態」に至るまでの時間経過に伴った「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」を伴っている。「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は、「不可逆 (irreversible)」な方向で流れる（小出、2020a）。この不可逆な時間は、一方向に流れているため「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」とは、「歴史 (history)」でもあるが、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) が、地質学における歴史となる。この地質学の歴史としては、「変遷史 (development 発達史とも呼ばれる)」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、その地において起こる不可逆で一度だけの地質現象となる。だが、広域かつ長期で捉えると、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なモデル化できる大地の運動様式 (テクトニクス) があることになる。地質学の目的のひとつである変遷史は、普遍的な運動様式であるテクトニクスの仮説を構築することと言い換えられるであろう。

c 全地球テクトニクスから、その先へ

小出 (2020a) では、「動的運動像」や「史的変遷」という用語が用いられた。地質学的には、「動的」と「運動」は似た意味で用いられている。そのため、「動的運動像」は、明らかにトートロジー (Tautology 同義反復) となる表現である。また、「史的」と「変遷」は、時間経過ともなう意味合いを含意しているため、やはりトートロジーになっている。あえてこのようなトートロジーを用いたのには、意図があった。

動的運動像 (ここで像とはモデルのこと) という用語を用いたのは、運動像もメタ的に変化していくという意味を込めたものであった。動的運動像は、時系列変化を意味しているので、「史的運動像」と呼べるかもしれない。そのため「史的変遷」とも深い関係をもってくる。「史的変遷」とは、ひとつの場で、ひとつの変動 (それを時系列で記述したものは変遷) が終わり、次の変動が起こると、繰り返し似た変動 (次の変遷となる) が起こっても、その変動の様式を普遍化して捉えていけば、「メタ的変動」となる。このメタ的変動を、小出 (2020a) では「史的変遷」と呼んだ。

このようなメタ的な階層の違いを反映させて名付けたためトートロジーになった。類似性と階層性、固有性と共通性、時代性と普遍性など、混乱しやすい概念が混在しているので、今後、用語は整理していく必要があるだろう。

上述したように、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普遍的様式であるテクトニクスの仮説構築することが目標となっていた。二つ目の目標の変遷史は、地質学的な時間変化をメタ的に普遍化した運造像と変遷史としてテクトニクスを構築することである。

テクトニクスをより普遍化して、地球全体、つまりすべての構成要素を含み、地球が経てきたすべての時間で、どのように変化してきたのかを考えていくことを、小出 (2020a) では「全地球テクトニクス (global tectonics)」と呼ぶことにした。全地球テクトニクスは、プレートテクトニ

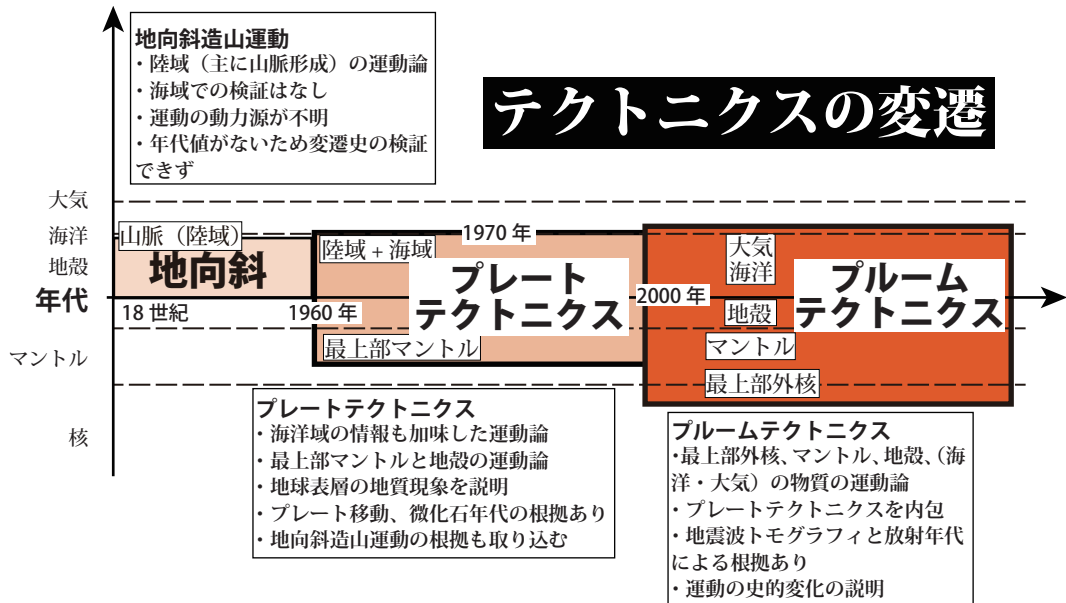


図1 テクトニクスの変遷

テクトニクスのモデルの変遷を示した。縦：おおまかな地球の深度・高度・階層による区分。横軸：モデルが提案された時期。モデルを地相斜造山運動、プレートテクトニクス、プルームテクトニクスに分けて、それぞれの及んでいる範囲と特徴を示した。小出（2020a）より。

クスやプルームテクトニクスを包含し、より広範で普遍的なテクトニクスを目指したものである。本論文はその検討を深めながら、さらにもっと普遍化された、その先の「普遍的テクトニクス (universal tectonics)」(後述) を目指していくことになる。

まずは「全地球テクトニクス」からみていこう。

Ⅲ 全地球テクトニクス

地質学においてテクトニクスは、地球表層の構造や地質学的特徴を形成してきた要因や過程を一般化、普遍化したものであった。現在のテクトニクスに至るまでの変遷を把握していく。そして、次に目指すべき「全地球テクトニクス」を概観し、重要となる視座をまとめていこう。

1 テクトニクスの研究史

テクトニクスとして、かつて「地相斜造山運動 (geosynclinal orogeny)」があったが、やがて「プレートテクトニクス (plate tectonics)」に置き換えられ、現在ではプレートテクトニクスを取り込んだ「プルームテクトニクス (plume tectonics)」へと発展してきた(図1)。まずは、現在までのテクトニクスの研究史をまとめていく。

a 地向斜造山運動

地向斜造山運動は、地向斜（大きな堆積盆のこと）の沈降からはじまり、堆積物が溜まり、地向斜堆積物が厚くなり、ある時から上昇が起り、造山運動へと転換していく。造山運動に伴って、深部では変形作用や変成作用が起り、火成作用として表層では火山活動、深部では花崗岩マグマの貫入が起る。火成作用は初期には塩基性マグマ、後期には酸性マグマが活動していくと考えられた。地向斜の上昇や火成作用が終わるとともに造山運動も終了する。その後は、浸食作用によって準クラントンからクラントへと変化し、大陸地殻へと変っていく。

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地質学的変化を包括的に説明するモデルであった。そのモデルを用いて地球の陸域における山脈形成からその後の変遷や変化の要因を解明していくことが目的となった。テクトニクスとしての体裁は整っていたものの、海域の地質過程は十分には考慮されず、変動のための動力源も不明で、完成されたモデルではなかった。時間経過に伴う変遷史も重要であったが、年代値がないため検証できず時間スケールのない運動像となっていた。

b プレートテクトニクス

地向斜造山運動の適用限界と、海洋底が移動しているという観測事実から、プレートテクトニクスが登場した (Dewey and Bird, 1970a; 1970b, Dickinson, 1971; 1973)。プレートテクトニクスでは、海洋域のプレート移動の証拠や微化石年代の根拠も加わり、地球の最上部マントルから地殻を含む運動論として、地球表層の地質現象を説明していった。プレートテクトニクスに基づいて、地向斜造山運動の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, 2002 など)。

プレートテクトニクスによる造山運動は、大陸縁で起る受動的（大西洋型）造山運動、海洋プレートが沈み込みことで起る太平洋型造山運動、大陸と大陸とが衝突をする衝突型造山運動とに区分される (丸山ほか, 2011)。

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接しているのだが、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。

太平洋型造山運動 (Maruyama, 1997) は、海洋プレートが島弧地殻 (大陸地殻の場合もある) または海洋プレートに沈み込む場で起り、各種の地質学的な作用が活発に起り (磯崎ほか, 2011)、大陸地殻に沈み込む時は活動的大陸縁辺 (active continental margin) とも呼ばれる。火成作用としては、深部では TTG バソリスを形成する深成作用があり、表層には中性マグマの火山作用が起る。海洋プレート層序からなる付加体が形成されていく付加作用が起る (Maruyama, 1997)。島弧造山帯の中心部に、断層で挟まれた薄い低温高压型変成帯がウェッジ搾り出しにより上昇してくる (丸山ほか, 2012)。その変成帯の原岩は、付加体由来の堆積物から

なる (Masago et al., 2004)。また、造山帯深部では、現地性の中圧高温型の広域変成作用も起こる。

太平洋型造山帯では、沈み込みに伴って構造侵食作用が定常的に起こっている (von Huene and Scholl, 1991)。沈み込み帯では、付加体が形成されているのは一部 (25%程度) で、そこでも構造侵食作用は起こっている (Scholl and von Huene, 2007; 2009)。これまで沈み込み帯では、付加体形成が重視されてきたが、定常的に起こっている構造侵食作用を重視した造山運動の構築の必要性がでてきた (丸山ほか, 2011; 2012)。

衝突型造山運動とは、大陸への沈み込みが起こっている場で、陸弧の火成作用が起こることになる。大陸の侵食作用によって大量の堆積物が形成され、それが沈み込みはじめると、陸弧の火成作用が終わり、前弧盆地ができ、褶曲とスラスト帯が発達する。深部では高圧高温型～超高圧高温型の広域変成作用からミグマタイト化作用まで、現地性の累進変成作用が起こる。造山帯では、多数の衝上断層が形成され、高温高圧型変成帯が隆起することでドーム構造ができる。侵食作用が進むことによって造山帯の中心部が露出してくる。前弧盆地にはモラッセ堆積物が形成される。

現在の地球には、大西洋型造山帯、太平洋型造山帯、衝突型造山帯が、各地にそれぞれの造山帯として存在する。別々の地域での活動であるが、造山運動を時系列変化としてとらえると、規則性をもって造山運動が変遷していくように見える。

例えば、受動的大陸縁 (大西洋型造山帯) があり、そこに海洋プレートの沈み込みがはじまると活動的大陸縁辺に変遷し、海洋プレート海嶺が沈み込んでしまうと海洋域が狭まってきて、やがて衝突型造山帯へと変遷すると考えられる。また、海洋域で沈み込みが起これば、太平洋型造山運動が起こり、海嶺が沈み込み、海洋も狭くなってくると、大陸側では受動的大陸縁から活動的大陸縁辺へ、そして衝突型造山帯へと変遷していくであろう。もし、この変遷が検証できれば、テクトニクスとして普遍化の可能性もあるだろう。

c プルームテクトニクス

地震波トモグラフィーによって、冷たいマンテル物質 (コールドプルーム cold plume) と暖かいマンテル物質 (マンテルプルーム mantle plume) の存在が明らかにされ (Fukao, 1992, Fukao et al., 1994)、温度差のあるマンテル物質が上下運動するというプルームテクトニクスのモデルが提唱された (丸山, 1993, Maruyama, 1994)。

沈み込んだ海洋プレート (スラブ) は、マンテル遷移帯で一時的に滞留し、メガリス (megarith) となる。やがて質量バランスが崩れてマンテル内を落下し、コールドプルームとなる。メガリスは、マンテル最下部に落下して「冷たい D' 層」が形成される。コールドプルームの落下によって、質量バランスがくずれ、密度の小さい、「暖かい D' 層」が、マンテルプルームとなって上昇していく。マンテルプルームは、マンテル上部では、長期間におよぶ、海嶺の形成、海洋島・

海山列の形成、巨大海台などの火成作用の原因となっていると考えられた (丸山, 2002a)。

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放射年代による根拠に基づいて組み立てられた運動論となっていた。また、プルームテクトニクスのマントルの最上部から地殻までは、従来のプレートテクトニクスのモデルで説明できる。つまり、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、地球表層部で運動論に対応する。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、つまり一層対流とみなせ、プルームテクトニクスが全マントルの運動論と位置づけられる (丸山, 2002b)。

2 全地球テクトニクスへ

プ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説明できるので、上述したテクトニクスの要件を満たしている。だが、プルームテクトニクスが、地球の普遍的で究極的なテクトニクスといえるだろうか。

例えば、マントルと地殻以外の構成物はあまり重視されていない点、それらを加えた運動像や変遷史がない点、また多数の構成物間での相互作用も十分考慮されていない点など、足りない部分がある。そのため、地球全体を対象にしたより普遍的な「全地球テクトニクス」を模索していく必要があるだろう (小出, 2020a)。全地球テクトニクスは、プルームテクトニクスを組み込み、なおかつ多様な構成物も組み込み、構成物に関する力や相互作用 (物質以外のもの) も加味された新たな視座でのテクトニクスになっていくべきである。

そのような試みとして、全地球的視点で「全地球ダイナミクス (global dynamics)」(丸山, 2002a) が提案されている。全地球ダイナミクスは、物質の運動と変化として捉え、そこに年代データも取り入れた運動論 (ダイナミクス) となっていた。検証性のある動的变化 (運動論あるいはダイナミクス) と年代論に基づく時系列変化 (変遷史) の2つの視点を取り入れられている点は重要である。

全地球ダイナミクスでは、核を考慮に入れられていた (例えば、鈴木ほか, 2017 など) が、地殻からマントルの岩石を中心にした、拡張されたプルームテクトニクスともいえるものであった。地球には固体 (固相) 以外の物質もあるので、全地球テクトニクスではすべてを網羅していく必要がある。

物質を網羅的にとらえるには、プルームテクトニクスのように固相だけでなく物質のすべての「相 (phase)」を対象にし、さらに地球の構造として、異なった相の構成物が「層 (layer)」をなしているのを、それをも配慮していく必要がある。これまでのテクトニクスでは組み込まれていなかった物質を取り入れたり、物質以外の力や相互作用なども考慮されていることが望ましい。このような新たな視座で、全地球テクトニクスを考えていくべきであろう (図2)。

地球を構成するものを物質だけに限定せずに、外側からみていくと、

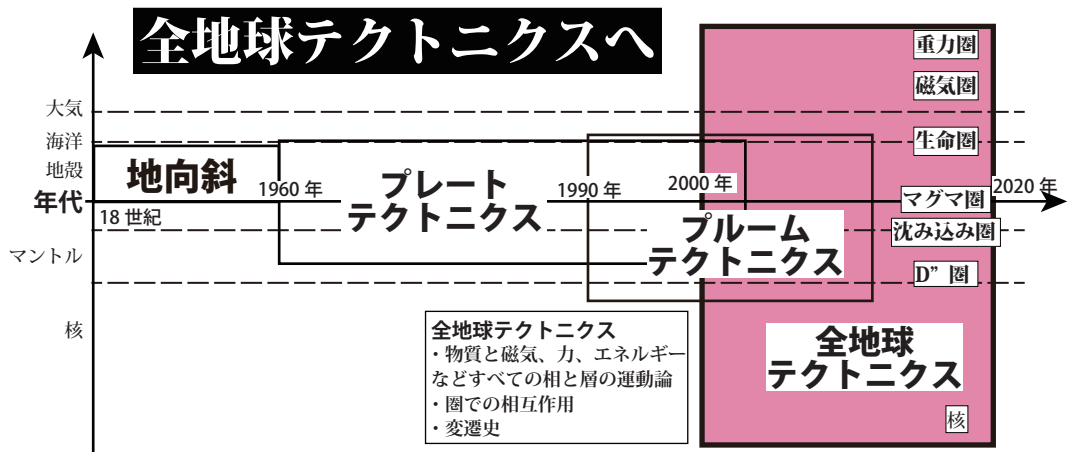


図2 全地球テクトニクスへ

普遍的な「全地球テクトニクス」が目指すべき方向性。軸は図1と同じ。小出（2020a）より。

重力：地球の引力（重力）

磁気：地磁気（電磁気力）

大気：気体（ N_2 , CO_2 ）

海洋：液体（ H_2O ）

生物：ジェル，コロイド

地殻：固体（玄武岩，花崗岩）

マントル：固体（カンラン岩）

D''：岩石（スラブより由来もの，核由来成分を含むものがある）

外核：液体（金属鉄）

内核：固体（金属鉄）

となる。（ ）内は構成物を示した。それぞれを階層的に層に分けて見ていくと，

磁気層：磁気の影響がおよぶすべての範囲

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

となる。次に，それぞれを相に分けて見ていくと，

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

となる。

これらの対象（構成物と層と相）が、どのような関連があるかを見極め、その関連を普遍的に説明していく必要がある。

3 相互作用を起こす圏

全地球テクトニクスを考える上で、地球の構成物と相と層という広い視点で捉える重要性を指摘した。だが、相と層は関連し合うが同質ではない。また、相と層という視点だけでは、地球を静的に捉えているに過ぎない。動的な捉え方をするためには、別の視点を導入していく必要がある。

例えば、重力という視点を導入すると、別の見方ができる。それぞれの相が、密度の大きなものが下位の層に位置していることがわかる。そのような配置を生み出し、安定させている作用が重力となる。当たり前のこと、自然の摂理であるが、それが地球の層を構築し、維持していることになる。ただし、その形成の歴史は、今後、探求しなければならないが。

このように地球では、物質以外の作用（重力や磁気）も働いており、それらの影響下、作用下で物質は運動している。磁気や重力のもとで物質が運動することで、変化や相互作用が起こる。そのため、物質同士の相互作用や、物質以外の作用や変化も、全地球テクトニクスでは考慮に入れていくべきであろう。小出（2018;2020a）では、相の相互作用が起こる場として「圏 (sphere)」という概念を導入した。圏とは、対象（相や層）がその周囲と相互作用を及ぼし合う領域や範囲を意味していた。

小出（2020a）は、圏として、

地球重力圏：質量をもった物質間で相互作用

地球磁気圏：地磁気のおよぶ範囲で電荷をもった物質と相互作用

生命圏：ジェル相からなり、海洋、地殻、大気で相互作用

マグマ圏：マントルや地殻が溶融から固化までで相互作用

沈み込み圏：構造侵食や付加作用、大陸形成、マグマ形成などで相互作用

D^o 圏：外核とマントルの境界で相互作用

を挙げた（図3）。以下で順に見ていこう。

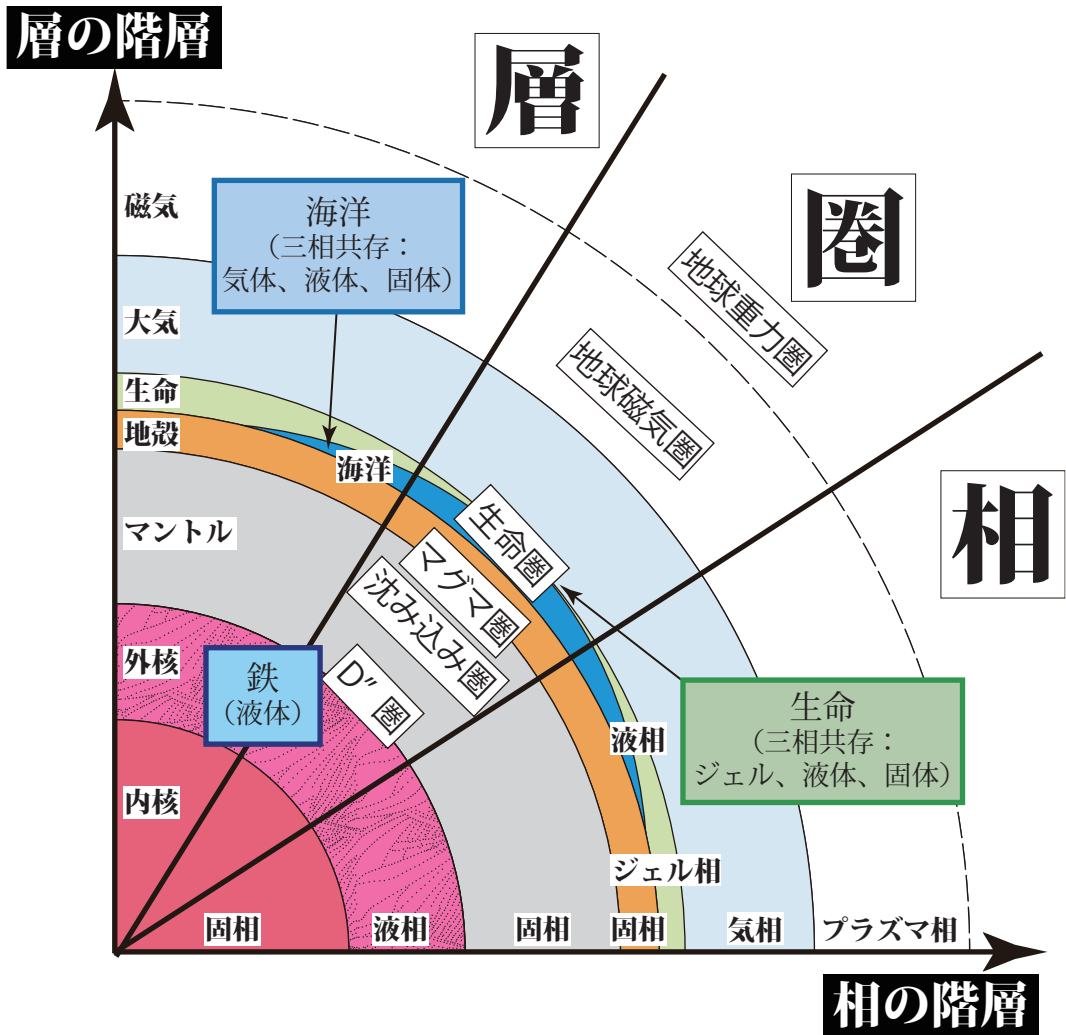


図3 相と層と圏の分布

全地球テクトニクスに関連する層、相、圏の地球断面での分布の模式図。地球の層構造（縦軸）に基づく断面に相の階層（横軸）と、それに関連する圏（斜め軸）を示した。小出（2020a）より。

地球重力圏

地球重力圏は、物質的な実体はないが、質量を有するすべての物質が、他の質量をもった物質と相互作用をすることで、重力が長く作用して安定状態に向かうと、密度の大きなものが下（内部）にあり、小さなものが上（外部）に並ぶことになる。地球の層形成は、密度を反映した重力の働きによるものとなる。金属鉄が最も密度が大きく、液体鉄、岩石（カンラン岩、玄武岩、花崗岩）、水（H₂O）、大気の順に小さくなり、地球の層構造はその配列になっている。なお、生命体（生物）は、水と似た密度を持つものが多い。進化によって水から脱出して陸上に進出し

たが、地表付近で存在する。生命体は、なんらかの形で水が存在する位置からは逃れられないのは、その誕生に由来するのかもしれない。

地球磁気圏

地球磁気圏は、地磁気のおよぶ範囲で、地球内部から大気のない地球外にも及んでいる（例えば、行武，1996，など）。地磁気は、外核で液体金属が流動することで発生し、磁性や電荷をもった物質に作用する。地球磁気圏は、電荷をもった太陽風や銀河風に作用し磁気バリアとして働いている。磁気バリアの存在により、太陽風などが地表まで届かない環境が生まれた。その結果、生物が海洋から陸上へ進出できるようになってきた。地球磁気圏は生命圏の形成にも関係している。また、マグマが固化する時、磁性鉱物はその時の地磁気の状態を記録することになり、マグマ圏とも関係する。その記録が「古地磁気」となり解読され、プレート運動の復元がおこなわれている。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。

生命圏

生命圏は、海洋や陸水など H_2O の液相との相互作用、また二酸化炭素や酸素の利用で大気との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が、生物の陸上進出において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の相互作用をして土壌を形成する。

マグマ圏

マグマ圏は、マントルや地殻が溶融してマグマができ、やがて固化して地殻となるまでの相互作用である（小出，2015；2016；2017；2018）。マグマ圏はマグマ形成場にできるため、各所に小規模に存在する。造山運動では、一定の期間、頻繁に相互作用が起こる。例えば、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、沈み込み圏とも関連している。沈み込み圏では海洋地殻とも相互作用をしながらも、物質の大半はマントルにもどっていく。一方、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、この作用は積分されていくことになる。マグマ圏での化学的な分化は運動論と普遍化し、大陸形成はマグマ圏の積分的効果となるため変遷史として普遍化していく必要がある。

沈み込み圏

沈み込み圏では、海洋プレートの沈み込みに伴う堆積作用、火成作用、変成作用、変形作用、造構作用など、さまざまな作用によって相互作用が起こっている（小出，2012；2020b）。前述の

ように、沈み込み帯では構造侵食作用の重要性が認識されてきたので、相互作用の結果、消滅も起こっていることも考えに入れる必要がある。沈み込み帯の相互作用を、より広域に普遍化した「太平洋型造山運動」が提唱された。沈み込み帯を「太平洋型造山運動」と位置づけて、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。

D'' 圏

D'' 圏は、外核とマンツルの境界に存在し、複雑な相互作用をする。メガリスが落下してマンツル-核境界で「冷たいD'' 層」となり、D'' 圏を形成する。スラブには海洋地殻や海洋底堆積物などの地球表層物質も含まれており、それらの異質な成分が核や最下部マンツルと相互作用することになる (Yoneda et al., 2014, 田中, 2018, 市川・土屋, 2018)。一方、長期間核に接して温められたマンツル物質や液体の外核に親和性のない成分 (親石元素など) が核から最下部マンツルへと放出された部分が「温かいD'' 層」となっていく。その過程は相互作用となるので、こちらもD'' 圏になっていく。「温かいD'' 層」は密度が小さいため、何らかのきっかけで、マンツルプルームとして上昇していくことになる (末次, 2018)。そのきっかけのひとつが、メガリスの落下となるだろう。マンツルプルームは、プレート上に海嶺や海山列や巨大海台などを形成するマグマとなり、地殻へと成分を再配分をするマグマ圏となっていく。D'' 圏には由来の異なる「冷たいD'' 層」と「温かいD'' 層」との2種があり、その相互作用も異なったものとなるが、同一の圏として扱うことにした。

以上、全地球テクトニクス構築のための視座をまとめてきた。全地球テクトニクスは、未完である。相互作用が時系列で変遷していく点も考慮していく必要がある。それらが整った時、全地球テクトニクスが完成するであろう。ただし、本論文で示した視座が、適切かどうかは常に検討していく必要がある。

IV 普遍的テクトニクスへ

全地球テクトニクスが完成すれば、最終目標が達成されたことになるだろうか。さらに普遍的なテクトニクスはないのだろうか。もしあるとすれば、どのようなテクトニクスになるのだろうか。2つの方向が考えられる。ひとつは、地球で進められてきたこれまでのテクトニクスをさらに進展させていく方向である。もうひとつは、地球という対象に限定せずに、もっと多様な対象へも適用できるテクトニクスを目指す方向である。前者は、これまで述べてきたように「全地球テクトニクス」を探求していくこと (小出, 2020a) で、後者の方向を「普遍的テクトニクス (universal tectonics)」と呼ぶことにし、以下では検討していく。

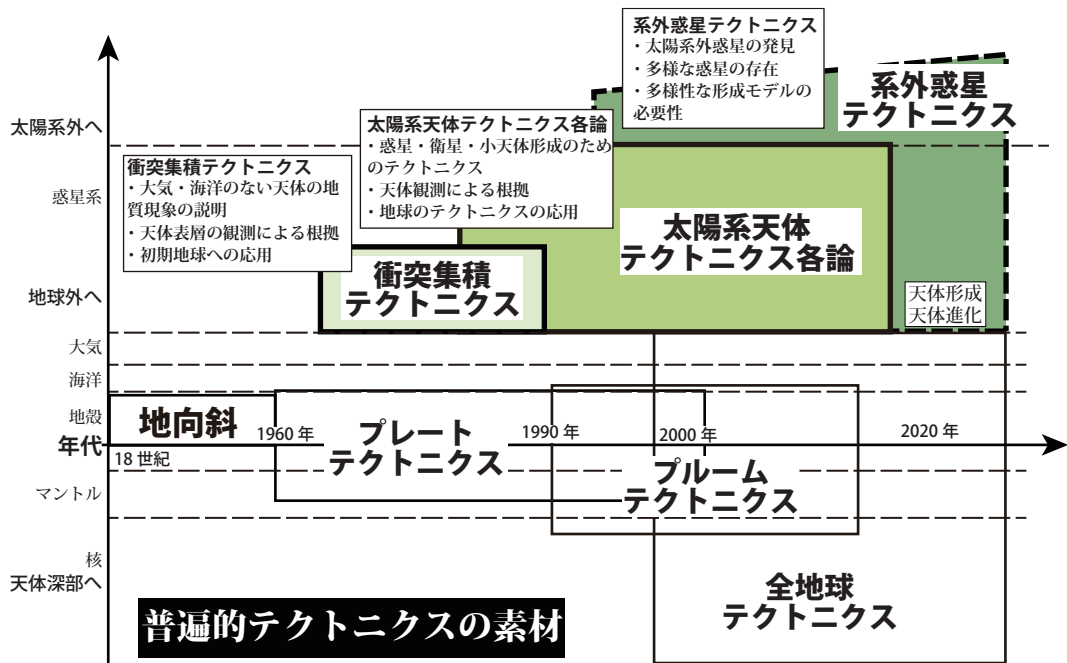


図4 普遍的テクトニクスの素材

普遍的テクトニクスに向けて、現在集まっている素材とその特徴を示した。軸は図1と同じ。

1 普遍的テクトニクスへの素材

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普遍化は必要ではあるが、それだけでは新たな展開が望めない。なぜなら、地球外の情報がないと、地球で見出したテクトニクスが演繹可能かどうかを検証できないからである。検証のためには、地球外の情報が不可欠となる。地球外の情報として3つの素材が整ってきた (図4)。

ひとつ目は、理論や数値計算から導かれた惑星形成モデルからでてきた「集積衝突テクトニクス (impact and accretion tectonics)」という仮説である。2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ことである。多様性の記載から、太陽系の各天体の類比 (アナロジー analogy) と対比 (コントラスト 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) が多数発見されたことで、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。

今後の普遍的テクトニクスのために重要となると考えられるこれら3つの素材を、以下で概観していく。

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。

惑星系形成モデルは「円盤仮説」を前提としている。「円盤仮説」とは、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、円盤状のガス雲から形成されたとするものである。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で、質量に伴って大きな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ので、物質が集積して円盤を形成することになる。円盤内では、固体成分が集積、凝縮、衝突合体して「微惑星」と成長していく。このような分子雲ガスから微惑星形成までの計算機シミュレーションから、惑星形成のモデルが確立されてきた(小久保・井田, 1997)。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。

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 円盤内で微粒子($< \mu\text{m}$ でダストと呼ばれる)が凝縮し、内側では岩石・鉄からなり、外側になると氷も加わる
- 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成長
- 5 惑星空間の内側に岩石と鉄からできた地球型惑星(水星, 金星, 地球, 火星)が、外側に巨大ガス惑星(木星, 土星)が形成
- 6 原始惑星系を覆っていたガスが消失
- 7 恒星から遠くでは微惑星の集積が遅いため氷惑星(天王星, 海王星)が形成

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考えられ、「衝突集積テクトニクス(collision accumulation tectonics)」と呼ばれる。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)。

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、各天体の地表の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でき、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、説得力をもったものになっている。また、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ですべてをまかなったり、内部変化だけにこだわることはなく、地球外で広く恒星系全体に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、より形成しやすい条件の天体由来すると考えることもできる。地球だけの閉鎖系ではなく、太陽系全体の多様性を利用することができ

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。

現在、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)。

- 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) か (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 38 億年前頃のクレーター形成 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」があると微惑星形成が困難になったり (奥住, 2016)、惑星軌道の移動を入れると太陽系形成がうまくいかなかったり (井田, 2016)、あるいは惑星空間のガスがどの時期に吹き飛ばされるのかについても諸説あり、課題も残されている。

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、全く異なる営力による運動論になるため、それが太陽系固有のものなのか、それとも普遍性があるものかは、慎重な検討が必要であろう。

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比較することで、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判別できる。多数の同階層の基礎データが集まることで、より明らかにできることになる。やがては、天体ごとのテクトニクス固有性を説明できる各論ができるはずである。

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（冥王星など）や小惑星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や変遷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。

これまで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。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比較から、小惑星の組成や成分が推定され、分類もされていた。最近まで小惑星に関する検証作業はできていなかったが、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い、現在、帰還し、サンプルリターンに成功した。分析の暁にはこれまでの推定の真偽が検証されるであろう（野口, 2016）。隕石だけでなく、地球外の天体の物質も、検証対象になりつつある。

地球以外のいくつもの天体の情報がえられたことで、天体間の類比と対比ができ、特異性（個性）と普遍性（共通性）がまとめられつつある。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ているので、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も、とりあえず典型となるデータとして適用していくことができる。このような方法を、「メディアオクリティの仮説（mediocrity hypothesis）」と呼ぶ（Rood and Trefil, 1981）。メディア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、メディア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 H₂Oの重要性

類比と対比から、惑星における表層環境の形成にはH₂Oが大きな役割を果たしていることがわかってきた。H₂Oは宇宙空間には比較多く存在する成分で、恒星からの距離に応じて輻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。H₂Oは、惑星の形成過程でスノーライン (snow line 雪線とも呼ばれる) と、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) が重要となる。それらの領域に天体が存在すると、形成時や形成後の変遷に大きな違いがあることがわかってきた。以下では、その2つの領域について考えていく。

c スノーライン

スノーラインとは、H₂O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、内側では液体が形成される。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量などの条件によって変化する。そのため、恒星系形成初期には、スノーラインは現在とは異なった位置にあったと考えられている (中本, 2016)。

スノーラインは、惑星や天体の形成において主要材料の量を決定するため、重要な条件となる。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、天体の質量も大きくなり、形成された天体は大気を保持しやすくなる。また、氷天体では、H₂Oの融点が比較的低いので、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でも、H₂Oによる火山活動や地形更新など、地球とは素材が異なっても、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や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、太陽系の年齢 (約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) や、ある時期に一定の軌道間隔で原始惑星が整列し、ひとつの天体だけが成長する寡占成長モデルなど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ることで解消される。

氷惑星は、スノーラインより外側に位置しているので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と鉄と比べて、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、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とメディオクリティの仮定により重要となる。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。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だけでなく、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 (albedo) 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。

アルベドとは、入射エネルギーと天体表面からの放射エネルギーの比のことで、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か、固体の氷になっているのかに、よってアルベドが急激に変化する。アルベドが同じ天体（例えば地球）であっても、海が存在する条件と全球凍結になる条件の両者のいずれもが平衡状態として起こりうることになる（門屋, 2016）。

その惑星にハビタブルゾーンが存在したとしても、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天体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、氷でできた衛星、「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可能性がある。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)。そうすると、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くなってきた。

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、惑星の自転と公転が共鳴し安定した状態になることが多い。共鳴状態の惑星では、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。だが、まだ作業仮説であって、証拠は皆無である。

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、メディオクリティの仮定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。水の無い惑星 (例えば、金星など)、あるいは水の惑星、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、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考えられていたが、実際に観測できたのは、1992年 (Wolszczan and Frail, 1992) 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判明し、太陽系外惑星 (exoplanet, extrasolar planet) 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 (ペガスス座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) で、水星より内側の軌道 (0.05 AU) のところを、4.2日という周期で公転していた。この惑星は、今まで太陽系の研究からは想像できない特異なものであり、メディオクリティの仮定が適用できず、衝撃をもって受け止められた。

その後も、太陽系外の惑星の発見は続いていて、2020年8月18日時点で惑星は4,313個、惑星系が3,188個、複数の惑星をもった系が703個となっており (Exoplanet Team, 2020)、今後も数は増え続けるであろう。

観測から、多数の恒星で惑星系があり、多様であることがわかってきた (図5)。系外惑星はその質量と太陽系の惑星との類型から、地球型惑星、海王星型惑星、木星型惑星に大別されている (葛原, 2016)。

地球型惑星は質量が地球の10倍以下のものをさし、主成分が岩石だと考えられている。ただし、1.5倍以上のものが多く、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。その主成分は、いくつかの密度測定から、 H_2O の氷と岩石であると推定されている。また、恒星に近接した軌道をもっているものも多数見つかっており、ホッ

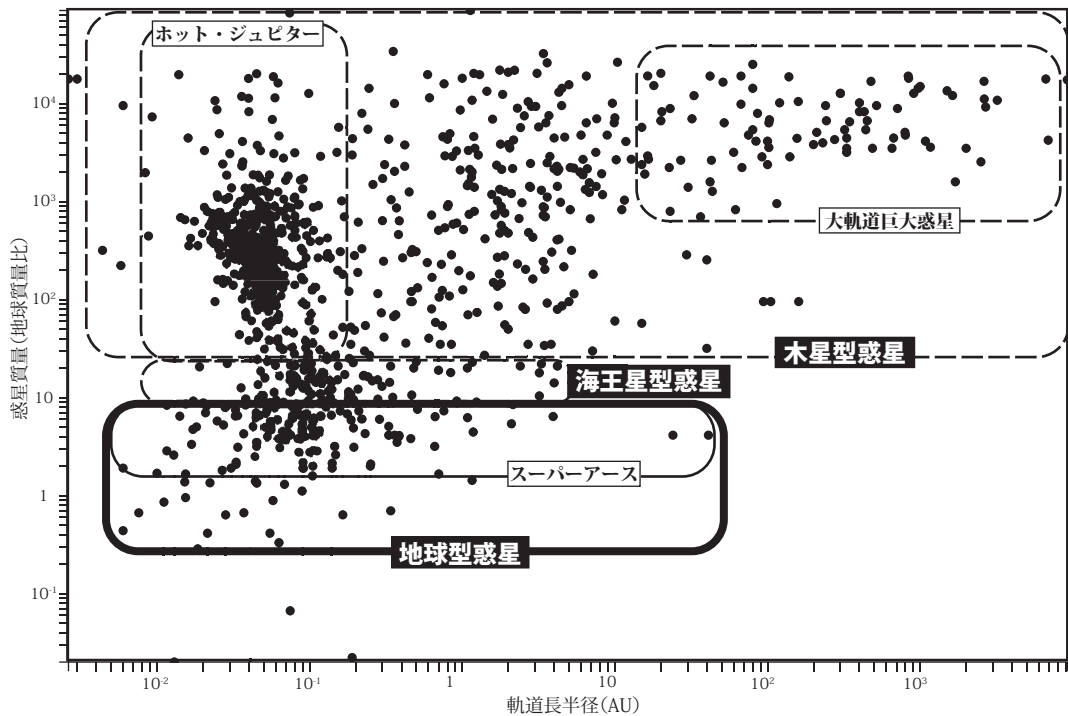


図5 系外惑星の区分

発見された系外惑星の軌道長半径 (AU: 天文単位) と惑星質量 (地球質量との比) の軸で示したものの。図の領域によって地球型惑星, 木星型惑星, 海王星型惑星に区分される。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。ただし, 惑星の組成がすべて明らかになっているわけではない。データは2019年11月1日現在のもの (Exoplanet Team, 2019)。

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。

系外惑星の軌道の特徴による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。

系外惑星の中で水が存在し生命の発生の可能性のあるハビタブル惑星 (Habitable planet) と呼び, さらにその中でも地球に似た条件をもったゴールドロック惑星 (Goldilocks planet) と呼ばれるものも見つかっており, 注目を集めている。だが, その詳細はわかっていない。

ここまで見てきたように, 予想以上に系外惑星の多様性は大きく, 私たち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、メダイオクリティの仮定から私たちの太陽系から構築された「標準モデル」は普遍化不能となり、「太陽系モデル」と呼ぶべきものになった。多様な系外惑星の発見によって、惑星系形成における「太陽系モデル」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たが、まだ不十分である。

今後、多様な系外惑星のタイプごとに形成過程や変遷史を考え、系外惑星ごとにテクトニクス各論を目指していくことになるだろう。タイプの違いによって、多様な系外惑星のテクトニクス各論が必要になるだろう。さらに惑星系は、置かれた環境や条件に違いがあれば、惑星進化にも多様性が生まれるだろう。生命の存在の確認はまだまだ先のことになるであろう。

V まとめ：普遍的テクトニクスを目指して

現在のテクトニクスのセントラルドグマ (central dogma) となっているプレートテクトニクスやプルームテクトニクスから、普遍化をしていくと「全地球テクトニクス」になると考えて議論を進めてきた。全地球テクトニクスでは、地球の構成物を「層」と「相」という視点でとらえ、それらが「圏」で相互作用を及ぼし合うという見方が重要だと考えた。そして、全地球テクトニクスは、層や相の形成過程と圏での相互作用を明らかにし、普遍化していくことで構築できると考えた。

太陽系の惑星の詳細な情報が明らかになるにつれて、太陽系のかつての惑星形成モデルではそれぞれの形成過程をうまく説明できなくなってきた。また、太陽系形成初期に起こった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。これらの修正が、惑星形成モデルに加えられてきた。惑星形成モデルの修正にともなって、全地球テクトニクスの修正も必要になった。初期には衝突集積テクトニクスが働き、その後はプルームテクトニクス (プレートテクトニクスを含む) が働くテクトニクスで、地球の変遷史が説明されてきた。

加えて、太陽系の各種の天体の類比と対比から、スノーラインとして固体の氷の存在領域が重要であることがわかってきた。惑星空間での液体の H_2O の存在領域 (ハビタブルゾーン) も重要だが、太陽からの距離だけでなく天体内部での地下海が存在など、他の条件でも存在しうるハビタブルゾーンも生命誕生、存在に関わってくるのがわかってきた。今後も、太陽系天体の固有性を探査して、詳細なテクトニクス各論を構築していくことも必要であることが明らかになってきた。

全地球テクトニクスをすべての天体に適用できるような「普遍的テクトニクス」を目指していくことが最終的な目的になる。そのための素材もいくつか見つかってきたので、普遍的テクトニクスの方向性も考えらるようになってきた。

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が限

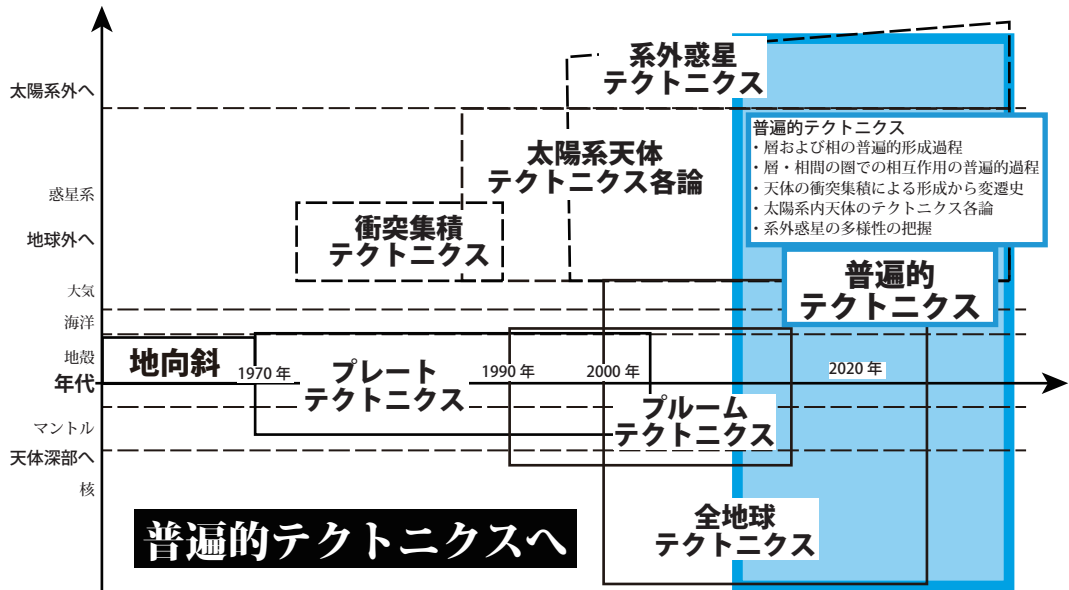


図6 普遍的テクトニクスへ

全地球テクトニクスから、さらに抽象化された「普遍的テクトニクス」へ。素材は、太陽系初期に起こった衝突集積テクトニクス、太陽系天体のテクトニクス各論、多様な系外惑星のテクトニクスで、それらから抽象されたすべての天体へ適用可能な普遍的テクトニクスを目指す。

定されたものになることが判明してきた。系外惑星の多様性を考えると、普遍的テクトニクスも現状ではひとつのモデルに収斂しそうにない。今後も系外惑星として、さらなる異形の惑星が発見されてくるのであろうから、より多くのモデルが必要になるはずである。

ハビタブルゾーンについても、太陽系内の衛星内や赤色巨星の惑星の局所的ハビタブルゾーンなど、現状のデータからでも、多様な生命誕生の場を考える必要がある。だが、すべての多様性がそろそろまで待つことはできない。太陽系や既知の系外惑星を素材にして、より多くの多様性が説明できる普遍的テクトニクスのモデルを考えていくことになるだろう (図6)。

最後に、今後の科学の進め方について少しだけ考えておこう。

ここまで既知のデータを母集団として考えてきたので、メディアオクリティの仮説の適用とみなせる。その仮説を、新規のデータ (系外惑星) への適用し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。当然、多様性の把握が弱い場合は、モデルの修正が必要になるであろう。帰納、演繹、修正が繰り返されるというのは、科学的方法論でもある。科学の仮説は、弁証法的発展ともみなせる (小出, 2014)。

知的資産の歴史を鑑みると、多様性が増えたり、それらの詳細が明らかになったりすることで、これまでの仮説に限界をきたしたり、かなり適用範囲が限定しなければならなくなることも多々

生じてきた。だが、科学は停滞することは良しとしないので、仮説演繹法で進みながら、どこかで飛躍のモデル更新 (科学革命やパラダイム転換と呼ばれるもの) が起こることを、期待しながら進めていくことになるだろう。普遍的テクトニクスがそのような可能性を秘めているように見える。

文 献

- 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.
- 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.
- Dewey, J. F. and Bird, J. M., 1970a. Mountain belts and the new global tectonics. *Journal of Geophysical Research*, 75, 2625-2647.
- Dewey, J. F. and Bird, J. M., 1970b. Plate tectonics and geosynclines. *Tectonophysics*, 10, 625-638.
- 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.
- Exoplanet Team, 2020. The Extrasolar Planet Encyclopaedia Catalog. <http://exoplanet.eu/catalog/> (2020年8月19日閲覧)
- 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.
- 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.
- 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.
- 平林久, 2016. 「バルサー惑星」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.
- 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.
- 市川浩樹・土屋卓久, 2018. 「外核の化学組成」『地学雑誌』127, 5, 631-646.
- 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.
- 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.
- 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.
- Kaltenegger, L., Udry, S. and Pepe, F., 2011. A habitable planet around HD 85512?. arXiv preprint arXiv:1108.3561.
- Kasting, J. F., Whitmire, D. P. and Reynolds, R. T., 1993. Habitable zones around main sequence stars. *Icarus*, 101, 1, 108-128.
- 川勝均, 2002. 「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.
- 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.
- 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, 2014. 「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』96, 31-55.
- 小出良幸, 2015. 「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』98, 1-39.
- 小出良幸, 2016. 「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』100, 13-46.
- 小出良幸, 2017. 「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』102, 1-29.
- 小出良幸, 2018. 『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, 347p.
- 小出良幸, 2019. 『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, 258p.
- 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』107, 39-61.
- 小出良幸, 2020b. 『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: 高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, 268p.
- 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, Ramirez, 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, 2, 131.
- 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. 「プリュームテクトニクス」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.
- 丸山茂徳, 1993. 「プリュームテクトニクス」『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, 2002a. 「地球ダイナミクス」熊澤峰夫・丸山茂徳編, 『プルー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—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—」『地学雑誌』121, 6, 1090-1106.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 都城秋穂, 1975. 「プレート・テクトニクスにもどつて造山論」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.
- 文部省編, 1984. 『学術用語集 地学編』日本学術振興会, 429p.
- 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.

- 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.
- 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)
- 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.
- 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.
- 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.
- Rood, R. T. and Trefil, J. S., 1981. Are we alone? The possibility of extraterrestrial civilizations. Charles Scribner's Sons, New York. 出口威夫訳, 1983. 『さびしい宇宙人』地人書館, 283p.
- 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.
- Scholl, D. 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.
- 末次大輔, 2018. 「マントルプルーム」鳥海光弘ほか編, 『図説 地球科学の事典』朝倉書店, 180-181.
- 鈴木勝彦・賞雅朝子・渡慶次聡, 2017. *地球化学*, 51, 1, 29-44.
- 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.
- 藤堂明保・松本昭・竹田晃編, 1993. 漢字源 EPWING 版. 学習研究社.
- 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, 195p.
- 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.
- 渡邊誠一郎・井田茂, 1997. 『比較惑星学』岩波書店, 131p.
- Wolszczan, A. and Frail, D. A., 1992. A planetary system around the millisecond pulsar PSR1257 + 12. *Nature*, 355, 6356, 145-147.
- 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.
- 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.

Aiming for Universal Tectonics from Global Tectonics

KOIDE Yoshiyuki

Abstract

The present Earth layers the phases of various constituents and interacted with them, which is called “sphere” in this paper. The “global tectonics of the Earth” is the abstracted model of its geological history from the creation until the present. Furthermore, abstracted model, called “universal tectonics”, should be applied to all celestial bodies of the Universe. In this paper, the basic data for the universal tectonics are probed and a road to the universal tectonics is represented.

Keywords: global tectonics, universal tectonics, analogy and contrast, snow line, habitable zone, exoplanets

(こいで よしゆき 札幌学院大学人文学部教授 こども発達学科)