

《論 文》

テクトニクスに関する概念の変遷と今後の方向性

小 出 良 幸

要 旨

現在の固体地球の運動像は、プレートテクトニクスとプルームテクトニクスで説明されている。将来のテクトニクスでは、固体や物質だけにとどまらず、すべて層と相で、相互作用をおよぼし合う「圏」という概念で捉えた「全地球テクトニクス」となるであろう。全地球テクトニクスへの展望を示した。

キーワード：テクトニクス，層，相，圏，相互作用，全地球テクトニクス

I はじめに

テクトニクスは、古代ギリシア語の  $\tau \epsilon \kappa \tau \omicron \nu \iota \kappa \omicron \phi$  (tektonikos) から、古代ラテン語になった tectonicus に由来するもので、「建築」または「建造の構造的な方法について」という意味の用語とされている。それを転用して、地球科学や地質学では、地球の運動モデルを「テクトニクス (tectonics)」と呼ぶようになった。

これまでの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原因や過程を一般化、普遍化したものであった。その過程を考えるにあたっては、時系列での変化、つまり変遷も考慮することになる。地球の変動の原因究明とその変遷史をも考えなければならない。

現在の「テクトニクス」では、その実態、機構、原動力、変遷史などが詳細に解明されてきた。今後、テクトニクスでは、より広い概念で、全地球的運動像を、地球史的变化（変遷史）として捉えられる観点も重要視されるようになってくるであろう（小出，2019b）。

より広い観点で将来のテクトニクス像を考えていくには、地質学で扱っている固体物質だけに基づいたものではなく、もっと多様な構成要素を網羅している必要があるだろう。ただし、従来の層構造や物質の状態（3つの相）なども配慮しながら、新たな相として「ジェル」や「プラズマ」なども取り込み、物質ではないが力や磁気、熱などのテクトニクスに関与があるものも取

り込まなければならない。それらが相互作用をし合う場として「圏」という考えを導入し、成分再配分、熱循環が起こっていることを示していく必要があるだろう。本論文では、次世代の「全地球テクトニクス」への方向性を考えることを目的とする。

## II テクトニクスの変遷

まずは、地質学におけるテクトニクスの認識と、その変遷、そして現状に至る過程を概観し、現在用いられているプレートテクトニクスと、それを内包するプルームテクトニクスをみていく。

### 1 地質学の成立

地質学は、遡れば古代ギリシア時代にその萌芽が見られる。例えば、タレス (Thales, B.C.640～546頃) やその弟子のアナクシマンドロス (Anaximandron, B.C.615～547年) は、化石が過去の生物の遺骸であるという考えをもっていた。クセノファネス (Xenophanes, B.C.570～475頃) 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。しかし、当時の考察は、必ずしも実証性を備えた科学的なものではなかった。したがって地質学として、科学的実証をもつためには、さらに時間が必要であった。

ルネサンス (14世紀～16世紀) になると、ケプラーによるケプラーの法則、ガリレオの地動説や慣性の法則などは、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くものとして示された。デカルトは「方法序説」(1637年) によって、合理主義に基づく機械論的自然観として精神世界と物質世界を分離することに成功し、「演繹法」を示した。ベーコンは、経験主義として、いろいろな事実から一つの原理を導く「帰納法」を示した。演繹法と帰納法によって、科学的方法論が確立されたといえる。ニュートンは「自然哲学の数学的原理」(1687年) にて、物質の運動体系は普遍的な法則によって記述できることを示し、科学的方法論の集大成となった。その科学的精神は、産業革命 (18世紀半ば～19世紀) で開花した。

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ることになる。

### 2 地向斜造山運動

19世紀まで、地質学で実証 (調査) 性をもっていたのは、陸域のみであった。陸の地質状況を説明するための仮説が提示されることになる。

Kober (1921) は、大陸の安定した地塊をクラトン (craton) 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 (楕状地 shield や卓状地 platform などとも呼ばれる) は少なくとも数億年程度は変動のない、古い火成岩類や変成岩類などからなる大陸地殻深部の岩石 (基盤岩類) が露出している地帯である。変動帯は、数億年前以内から現在まで、造山運動 (orogeny) をしている造山帯 (orogenic belt) で、大きな断層帯や巨大な堆積盆など、変動

している地帯となった。

Hall (1859) は、アパラチア山脈の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。造山帯で長く伸びた厚い堆積岩がなす沈降地帯を、Dana (1873) は「地向斜 (geosyncline)」と呼んだ。造山帯に地向斜が伴うことから、地向斜の形成から造山作用の終了までのすべての過程を扱い、加えて堆積作用と火成作用、変成作用も地向斜内部で起こるので、一連の運動現象を「地向斜造山運動 (geosynclinal orogeny)」と位置づけられた。

地向斜造山運動は、次のような運動モデルが考えられた。地向斜は、沈降からはじまり、堆積盆に堆積物が溜まる。地向斜堆積物が厚くなることで、造山運動へと転換する。造山運動に伴って深部では変形作用が起こり、火成作用は表層では火山活動、深部では花崗岩マグマの貫入が起こる。火成作用は初期には塩基性マグマが、後期には酸性マグマの活動が主となると考えられた。上昇や火成作用が終わると造山運動も終了する。その後、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。

地向斜造山運動は、地向斜からはじまる一連の作用を総合的に説明するものであった。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、時間変遷を検証することは困難で、時間断面を連ねて運動像とする「静的運動像」といえる。地向斜造山運動には、地球の変動帯における山脈形成について変化の成因と変遷を解明していくことが目的となっていたので、テクトニクスとしての体裁は整っていた。

### 3 プレートテクトニクス

地向斜造山運動は、なぜ沈むのか、なぜ沈むと火成作用が起こるのか、なぜ上昇に転換するのかなど、必然性のある原因が不明で、必ずしも科学的な検証が十分なされていなかった。1960年代には、ソーナー探査、海上からの古地磁気計測、海底の試料採取のドレッジや掘削（ボーリング）などの海洋調査の技術が進み、海洋域の情報が大量に得られてきた。海洋域には、特有の地形や地質学的特徴があることが判明し、地向斜造山運動の適用限界が示されてきた。そのため、海陸を網羅する全く新しいテクトニクス（新しいモデル）、パラダイム転換が必要になってきた。

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など)。プレートテクトニクスでは、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。海底の古地磁気模様（海嶺軸）を挟んでの対称性からはじまり、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たことで検証された (山本・島, 2005)。

プレートテクトニクスでは、プレートの水平移動が主な運動になるが、表層付近の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、地球内部のマントルでは垂直運動が主となると想定された。プレートテクトニクスに基づいて、それまでの地向斜造山運動像が書き換えられて

きた (都城, 1975)。

1970年代からプレートテクトニクスによる造山運動として、大陸縁で起こる大西洋型 (Atlantic-type mountain belts), 陸弧として火成作用がおこるコルディレラ型 (cordilleran type), そして衝突型 (collision-type mountain belt) に分けられた (Dewey and Bird, 1970a; 1970b)。衝突型は、「大陸-大陸衝突型」と「大陸-島弧衝突型」の2つがあり、大陸-大陸衝突型は「衝突型造山運動」になり、大陸-島弧の衝突型は「太平洋型造山運動」にあたる。

衝突型造山運動の変遷史を丸山ほか (2011) は、次のようにまとめた。受動的大陸縁からはじまり、大陸斜面に堆積物がたまる (Kaneko, 1997)。沈み込みがはじまると、陸弧の火成作用が起こる。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めると、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。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の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さ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。

一方、大陸-島弧の衝突型は太平洋型造山帯で、海洋プレートの沈み込みを伴い、沈み込み帯の約75%で構造侵食作用が起こっている「構造侵食型」になっており (von Huene and Scholl, 1991; Scholl and von Huene, 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む、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ことだとした。時系列変化としては、構造侵食作用で前弧地殻が削剥、海溝軸の陸側へ移動、前弧地殻の広域的沈降、上盤プレートの海溝への接近とした。付加型と構造侵食型の両方の沈み込み帯で構造侵食作用は起こっており、普遍的な作用となる。付加体を形成しているところでも、地質体の70～80%が構造侵食作用により沈み込んでいると見積もられている (Scholl and von Huene, 2009; De Franco et al., 2008)。太平洋型造山運動において、これまでの付加体形成を重視されてきたが、構造侵食作用を重視した運動像を考えていく必要がでてきたことになる。

沈み込みによる大規模な太平洋型造山運動 (Maruyama and Parkinson, 2000; Maruyama et al., 2002; 丸山, 2012) は、「バソリス帯」と「低温高压型広域変成帯」, 「付加体」の存在が特徴となる (Maruyama, 1997)。大陸側に幅20～300kmのTTGバソリス帯があるが、表層を酸性火山岩が覆っている。新しい造山帯では花崗岩体の深部は露出していないので、表層の酸性

火山岩類だけが見えていることになる。造山帯の中心には、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変成帯が存在する。低温高压型変成岩は、付加体由来の堆積物を原岩とし、藍閃石相に達する変成相系列になっている (Maruyama et al., 1996)。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。その源岩は、化石や付加年代から付加体に由来していることが判明した (丸山ほか, 2011; Masago et al., 2004)。

これらのプレートテクトニクスに基づく造山運動は、1990年代にはほぼ完成された。プレートテクトニクスは、陸域だけでなく海域を含めた地球表層のすべての観測事実や地質現象を、「動的運動像」と「史的変遷」として説明できるモデルとなってきた。

#### 4 プルームテクトニクス

プレートテクトニクスは、地表付近の現象を説明できたが、地球内部については必ずしも検証されていなかった。それは、地球内部の情報が不足していたためであるが、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-ベニオフ面) の発見からはじまり、現在では地震波トモグラフィ (seismic tomography) を用い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。

地震波トモグラフィで冷たいマントル物質 (コールドプルームと呼ばれる) と暖かいマントル物質 (スーパーホットプルーム) の存在が明らかになり、温度差のあるマントル物質が密度差となり、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 (Maruyama, 1994; 丸山, 2002)。

提唱された当初、スーパーホットプルームという用語であったが、本論文では「マントルプルーム」を用いることにする。スーパーホットプルームに対する用語は、コールドプルームで「スーパー」がつかないというアンバランスがある。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ぶ。それらと比べると規模も大きく、活動期間も長いので、区別するために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ているが、一部では「マントルプルーム」も用いられている (末次, 2018)。本論文では、「マントルプルーム」を使用することにする。

マントル物質への検証アプローチとして、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、マントル物質の構成や構造が推定できる。そこから、沈み込んだ海洋プレートの岩石は、マントル内では浮力が働き、途中で沈み込めずに滞留し、メガリス (megalith) として存在することがわかってきた。メガリスが長い期間 (数千万年~1億年程度)、マントルに存在していると、周囲の岩石によって温められ、相転移が進んでいく。より密度の大きな結晶となるため、質量バランスが崩れてマントル内を落下しはじめ、



コールドプルームとなると考えられた。

マントル最下部 (125万気圧2200℃以上) のマントル-核境界には、D"層があることがわかってきた。D"層は、コールドプルームとして落ちていったスラブや、次のマントルプルームとなる暖かい領域、もしくは軽元素に富んだ領域がある。200km程度の厚さの「超低速度領域」はMgSiO<sub>3</sub>ポストペロプスカイトからなることがわかってきた (Murakami et al., 2004)。

スラブやメガリスによるコールドプルームの下降流が生じると、質量バランスをとるため、マントル-核境界付近から密度の小さい領域から、マントルプルームが形成されることになる。マントルプルームは、周辺より暖かい部分か、軽元素の多い部分であると推定される。マントルプルームは、地表での長期に及ぶ大規模な火成作用を引き起こす。例えば、海嶺や長期間継続するの海山列、巨大海台の火成活動などはマントルプルームに由来するのではないかと考えられている (丸山, 2002)。

プルームテクトニクスは、プレートテクトニクスの成果と、上記のさまざまな観測や実験結果などから、総合的に構築されたモデルとなる (図1)。その概要は以下になる。

海嶺の拡大で形成された海洋プレートが、海底で冷却されながら海底を移動する。海底で冷えた海洋プレートが、海溝で地球内部にもどることになる。ここまでの地球表層の運動論は、プレートテクトニクスのモデルを踏襲している。スラブは、いったん遷移帯で滞留することがあるが、

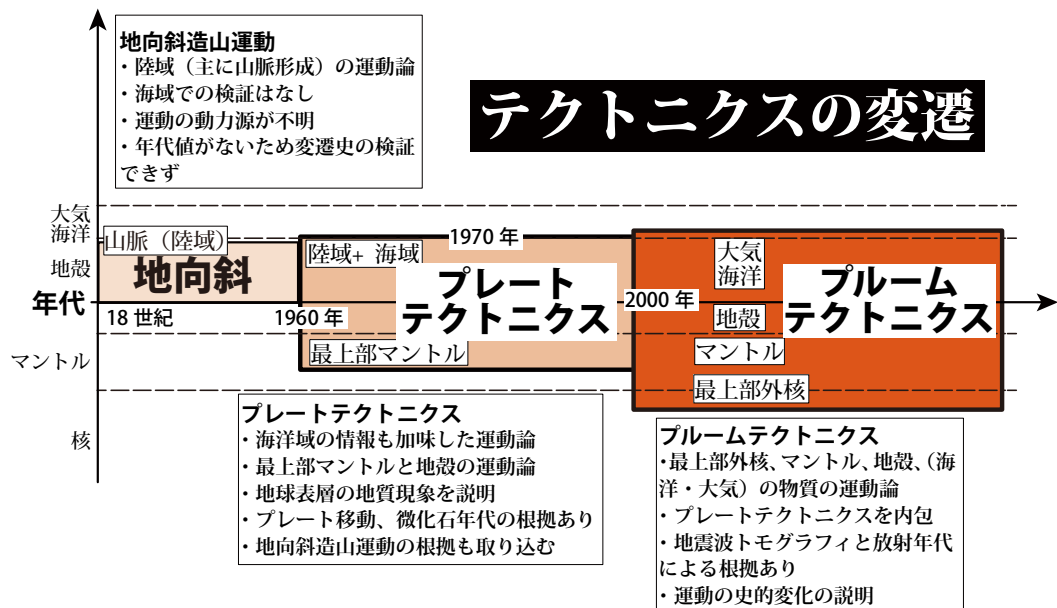


図1 テクトニクスの変遷

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。モデルを地向斜造山運動, プレートテクトニクス, プルームテクトニクスに分けて, それぞれの及んでいる範囲と特徴を示した。

いずれ落下が起こり、コールドプルームとなる。落下したコールドプルームに呼応して、D"層の暖かい領域が、マントルプルームとして上昇流となる。

プレートテクトニクスは、地球表層部の運動論に対応し、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とみなせ、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, 2002)。

コールドプルームとマントルプルームによるマントル対流は、マントル全体の「物質循環」と捉えられ、加えてD"層と核との物質の移動、マグマ形成や火山活動を通じてマントルと地殻、海洋、大気との特定の成分の「物質移動」ともみなせる。しかし、単に物質が循環、移動するだけでなく、ある層や相の特定の物質が、別の層や相へ再配分される「再配分作用」でもある。このような物質循環、物質移動や再配分作用は、層や相における相互作用ともいえ、後述するようにテクトニクスを考える上で重要になってくる。

### Ⅲ 全地球テクトニクスへの視座

以下では、普遍化されたテクトニクスを目指して整理していく。それは地球全体を視座に入れたテクトニクスである。広く網羅的に、なおかつ普遍的なモデルを目指していくもので、「全地球テクトニクス」と呼ぶことにする。本項では、全地球テクトニクスを考えていく方向性として「相」と「層」の重要性を提示し、これまでになかった物質を取り入れ、物質以外の力や相互作用も含んだ新たな視座で考えていく。

#### 1 動的運動像と史的変遷

全地球テクトニクスに向けて先駆的なモデルも提唱されてきた。丸山 (2002) は地震波トモグラフィによるプルームテクトニクスの考えを取り入れ、全地球的視点でテクトニクスを「全地球ダイナミクス」として提案した。全地球ダイナミクスは、現状のテクトニクスを、物質が移動し変化する運動と捉え、年代論も組み込んだ動的運動像であった。そのような視点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で示されたような実態のある動的変化 (あるいは動的運動像) と年代論に基づく時系列変化 (あるいは史的変遷) の2つの視点は重要となる。

ところが、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、核も加えられてはいるが、固体物質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、多様な相も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は、重要な役割を果たしている。あるいは物質三態 (三相とも呼ばれる) として固体 (固相)、液体

(液相), 気体 (気相) があるが, それらの以外のいくつかの相も存在し, 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網羅的に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, 地磁気や重力など実体のない作用もあり, 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には, 力やエネルギーの関与がある。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。そのような物質以外の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。すべての物質とそれに関与するすべての作用の動的運動像, そして地球史の長い時間での史的変遷を, すべて網羅したモデルが「全地球テクトニクス」となる。

## 2 相と層

全地球テクトニクスを考える上で, 地球の物質をどう区分し, 物質以外ものをどのように捉えるかが重要である。「相」(phase)と「層」(layer)と「圏」(sphere)という概念を導入して, 地球を区分していくことにする(図2)。以下では, それらの概念を説明していく。

### (a) 相

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の運動, もしくは動的変化のモデルであった。プルームテクトニクスでは, マントル全体で起こる複雑な対流(コールドとホットの二種とその由来)や, 対流の史的变化(二層対流から一層対流への変化)など, これまでにない視点に着目したテクトニクスであった。プルームテクトニクスは, 地殻もマントルもいずれも固体の岩石からできているので, 固体物質(固相)によるテクトニクスともいえる。ただし, 液相や流体(気相と液相)なども関与しているので, 固相だけのテクトニクスではないが, 全地球ダイナミクスとしては固相の運動論と捉えられた。

全地球テクトニクスでは, 物質の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。

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。生物は, ジェル状態の有機物を主成分とするので, ジェル相に位置づけられる。

プラズマ(plasma)と呼ばれる相も存在する。プラズマとは, 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が, 地球の磁気との関連しており, 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。



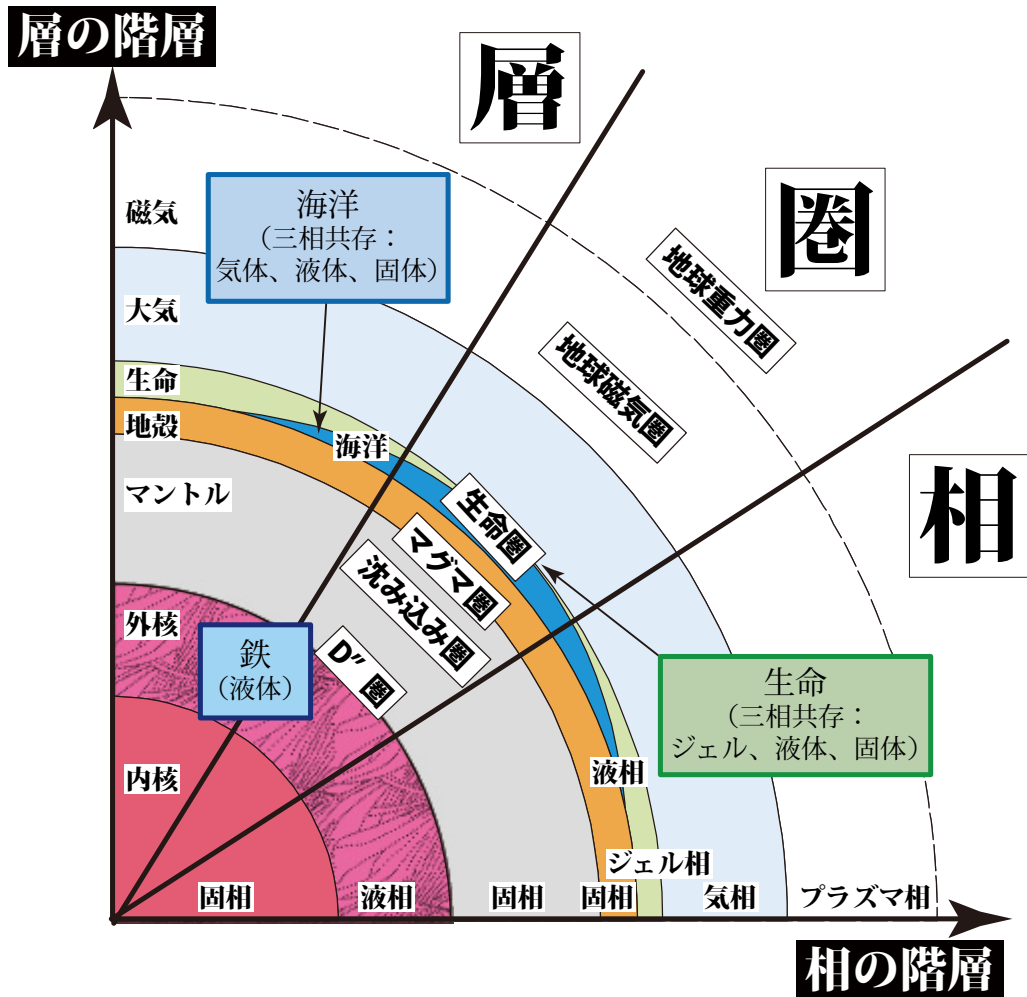


図2 全地球テクトニクスと相と層と圏

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。

以上のことから地球を構成する物質の相としては、

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，特別な条件

ができたときに地殻やマントルに珪酸塩溶融体のマグマも加わる。マグマは、形成される時、移動する時、固化する時に、それぞれ固有の動的変化が起こる。マグマの動的変化には、置かれた場所を構成する物質との相互作用も起こり、時間的積分効果により地殻の史的变化が起こることになる(小出, 2018)。マグマは液相として、量的には小さいものだが、大きな役割を果たしていることになる。

## (b) 層

上述してきたさまざまな物質の相は、地球では層構造(成層構造)をもっている。地球のもっとも外側は物質ではないが、磁気の影響が及んでいる範囲である。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、外部にも作用している。そのような層を磁気層とする。

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

という層をなしている。それぞれの層は、もっと細分可能であるが、本論文で重要ではないので言及しない。層は、相にも対応するが、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、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なる。その三相の量や分布は、太陽エネルギーの周期的変化(昼夜、四季、ミランコビッチ・サイクルなど)、周期性の明瞭でない寒冷化や温暖化などの変化も起こっていることが知られている。

地球を大局的に見る場合、相に加えて層の概念の導入も必要となる。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, 2019)。

## 3 力と磁力, 熱

層構造は、密度の大きなものが重力中心(地球の中心)に近づき、小さいものが外に位置する

という構成になっている。この構造は、「重力 (引力)」によって、物性の違いに応じて分層して構成されていることになる。重力は物理学では、「力」(force)と位置づけられ、物質に普遍的に作用するものである。力は古典的な力学で記述される。

他にも、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。力には電磁気力も含まれ、電磁気学によって記述される。力学 (運動エネルギー、位置エネルギーなど) も電磁気学 (電気エネルギー、磁気エネルギーなど) も、エネルギーとして総括的に考えられる。エネルギーには熱エネルギーもある。例えば、マントル対流は温度差によって生じる現象ともいえる。この温度差とは熱エネルギーの差のことで、熱力学で記述される。

これらの内、地球のテクトニクスを考える上では、重力と磁力と熱が重要になる。全地球テクトニクスを考える上で、力や磁力、熱が、物質へ作用、交換や移動して質的变化や運動が起こることになる。これらのすべての関係を考えていくことが全地球テクトニクスとなるであろう。

#### 4 相互作用と圏

層は物質が異っているため、境界 (層境界) が形成される。それぞれの層の構成物は、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、物質境界であり、さらに相境界、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、多くの場合、物質 (成分、元素) や熱が、移動、交換、変化などが起こることになる。したがって、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」がおこなっている注目すべき場となる。

物理学では、「力」を相互作用 (interaction) と総称することもあるが、本論文で用いる「相互作用」とは、物理学の力とは異なった概念で、「性質や成分、状態の異なる物質間で、変化や反応が起こること」とする。テクトニクスの観点からは、「相や層の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」を意味するものとする。

相互作用とは、変化を動的視点でみることで、変化が時系列で進行すれば史の変遷としてみることにもなる。全地球テクトニクスにおいては、さまざまな境界における相互作用にも着目していく必要があるだろう。その時、「圏 (sphere)」という概念を導入する。

「圏 (sphere)」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、本論文の「層」の意味となっている。本論文で「圏」は、「対象とその周囲と相互作用を及ぼし合う領域、範囲」を意味することにする。ではどのようなものが圏の候補なるかを考えていこう。

## 生物圏

生物は、周りの環境の影響を受け、生物活動が周りの環境に影響を与える。これは、生物全体が周囲と関連し相互作用していることになる。それを「生物圏」と呼ぶことにする。

## マグマ圏

マグマは、マントルや地殻での相互作用では大きな役割を果たしている（小出, 2015, 2016, 2018）。定まった領域に、恒常的に存在するものではないが、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）。マグマの形成や火成作用の探求は、固体地球の表層での相互作用の解明において重要となるので「マグマ圏」と呼ぶことにする。

## 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, 2013, 2019a, 2019c）。沈み込み帯は地球表層の重要な相互作用の場なので、「沈み込み圏」と呼ぶことにする。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。

## D"圏

深部では、外核と下部マントルの境界に、D"と呼ばれる層があることは、何度か上述した。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、コールドブルーム（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D"がマントルブ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、温かい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。

## 地球磁気圏

磁気は、地球の外核で発生したもので、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（行武, 1996）。磁気の相互作用は広いが、「地球磁気圏」と呼ぶことにする。例えば、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、その時代の地磁気を記録することにもなる。古い岩石には古地磁気として過去の地球磁気圏が記録され、それを連続的に解読することで動的变化や史的变化が復元されている。

### 地球重力圏

重力も、地球の全体の物質の影響を受け、互いに影響を及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。地球重力圏は地球外の天体（太陽や月など）へも影響も及ぼし合っ

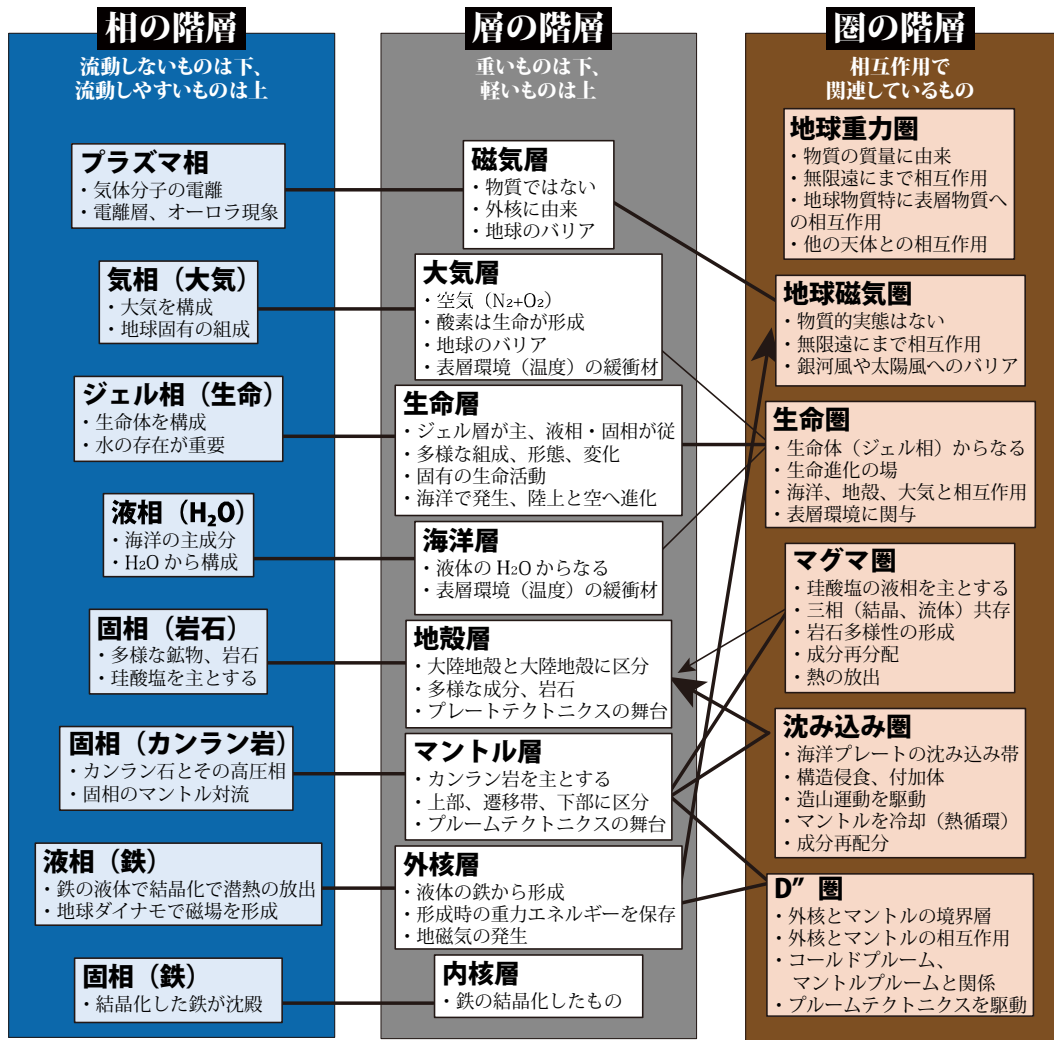


図3 層と相と圏の関係

層と相と圏の階層の特徴と、階層間の相関関係を示したものを。関係のあるものを実線で示し、強いものを太く、弱いものを細くした。矢印や相関関係の方向を示す。



ているので、その範囲は広い。質量を持つものはすべて影響を受けることになる。ただし、大きな質量を持つものほどその影響は大きい、距離が離れるとその影響は急激に小さくなる。

以上のことから、各種の相互作用を担う圏には、

地球重力圏:物質的実体はないが、質量をもった物質間に働く力で相互作用をする

地球磁気圏:地磁気のおよぶ範囲、外核で発生し、磁性鉱物や電荷をもった物質に影響する

生命圏:ジェル相からなり、海洋、地殻、大気に分布して相互作用をする

マグマ圏:マントルや地殻が溶融し固化して地殻になるときに相互作用をする

沈み込み圏:構造侵食や付加作用、大陸形成、マグマ形成などの相互作用をする

D''圏:外核とマントルの境界で相互作用をする

の6つが識別できる(図3)。これらの圏は、他の層や相、圏と複雑な相互作用をしていることになる。だがその全貌はまだ十分解明されていないところもあり、今後も検討を進めていく必要がある。

例えば、D''圏としてのD''の存在は、明らかにされている。しかし、D''の実態は、必ずしも解明されていない。冷たいD''は、本当にコールドプ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トル対流となりえるのか、冷たいD''が外核にどのような影響を及ぼしているのか、コールドプルームは落下後どう変化するのか。また、暖かいD''は、冷たいD''と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)、外核から本当に成分が由来しているのか、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。さらに、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本当に一致するのか、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、など不確定のものが多い。

相互作用を起こす重要な領域として、「圏」という視点でみていくことは、重要となるであろう。

## 5 成分再配分

プレートテクトニクスは、表層のプレートの運動の実測で検証され、運動の原動力なるマントル対流も地球物理的検証により実体が明らかにされ、運動メカニズムも明らかになってきた。プレートの境界での各種の地質学的事象も説明できるような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、マントル対流の実態がわかってきた。温度差による温かいD''が上昇してマントルプルームになり、対流を形成し、表層(海底)で海洋プレートを形成、移動、沈み込む。沈み込んだスラブがメガリスとなり、コールドプルームとして落下し、冷たいD''になる。マントル対流は、すべてが温度差のあるD''に由来するという動的運動像が生まれ、そこからプレートテクトニクスという地

表部分で検証性のある史的変遷が編まれた。このようにプレートテクトニクスとプルームテクトニクスは完成度の高いものとなってきた。

プルームテクトニクスにおいて、各種の相互作用が起こっているが、成分の再配分と熱の循環として重要な側面があることもすでに述べた。プレート運動やマントル対流は、物質が運動することで、移動あるいは循環することになるが、相互作用を通じてみると、それぞれの圏でさまざまな成分が再配分されることになる (図4)。

### 生命圏

生命圏では、生命活動によって必要な成分の吸収、排泄など、生物固有の成分の移動が起こる。個々の生物単体で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。

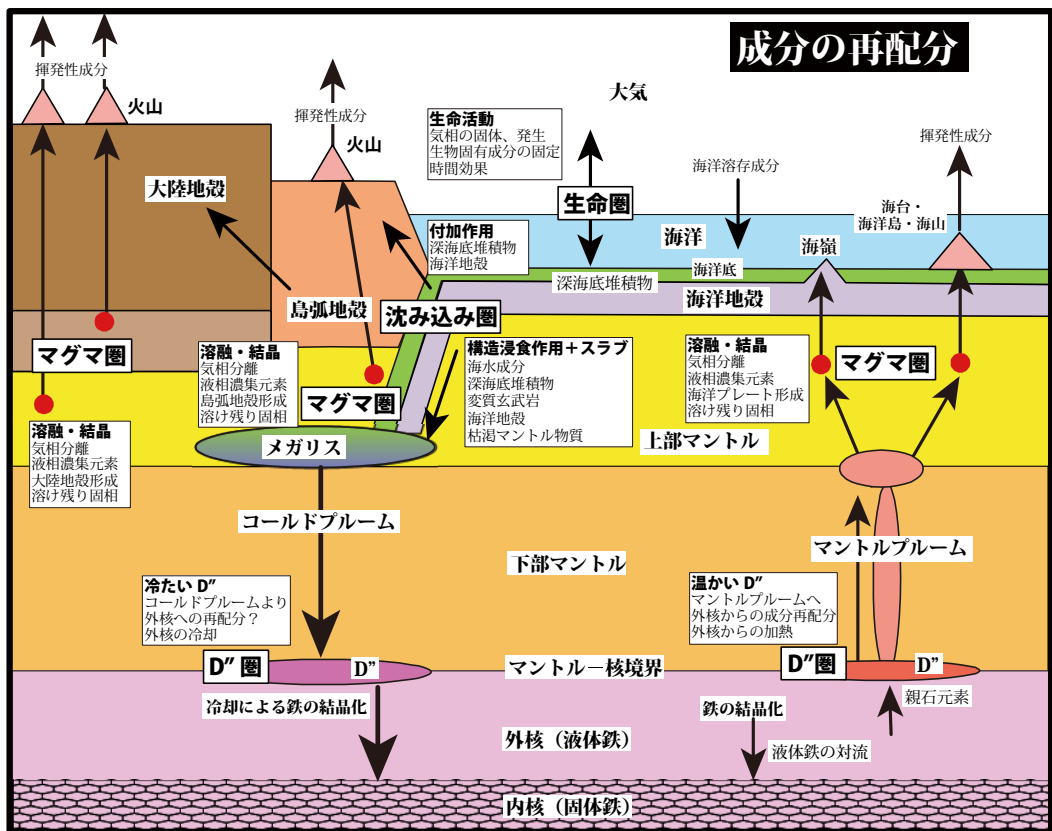


図4 成分の再配分

全地球テクトニクスにおける成分の再配分の模式図。核、マントル、地殻、海洋、大気で重要な圏を中心に物質における成分の再配分の概要をまとめたもの。

### マグマ圏

マグマ圏では、マントル（一部は地殻）が溶融するときに、マグマと残留物との間で成分の再配分が起こる。マグマになった成分は上昇し、固化するまでの過程で、地殻や海洋、大気へ成分が再配分される。マグマ圏は、起源物質の違い（マントルか地殻か；小出，1992）、地質学的場の違い（島弧か海洋か大陸か）、その溶融過程、マグマの移動過程、結晶化過程の違いにより、多様な相互作用、成分の再配分が起こる（小出，2014，2018）。マグマの移動量は、プレート運動などと比べると、数桁速くなる。また、量的にはマントルブルームと比べても数桁小さいが、繰り返し各地でマグマは形成される。形成されるマグマのサイズと比べると、その移動距離は大きなものになり、個々の形成量は少ないが積分的効果が働き、成分の再配分としては大きな効果になっていると考えられる。

### 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付加作用がおこり島弧地殻の形成という成分の再配分が起こる（小出，2019c）。構造浸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りメガリスの成長を促進し、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，2019a）。その時、マグマ圏として成分の再配分が起こる。また、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ことになる。

### 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そのような成分が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D''圏の温たかいD''に加わり、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、マグマ圏となる。

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交換など、多様な再配分という動的変化が起こっている。加えて、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。このような史的変遷も追跡していく必要もあるだろう。

地球重力圏と地球磁気圏では、成分の再配分はなく、相互作用が及んでいる場となる。

## 6 熱循環

相互作用を、熱の移動、あるいは熱放出などの熱循環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、太陽からの加熱も考えられる。太陽からの放射と地球からの放射は、収支バランスが取れていると考えられている。ただし、長期で見ると太陽からのエネルギーによって形成された有機体が地層へ保存（石炭や石油などとして）されたり、地球自体から発熱されていて、放熱が勝っていることになる。

地球の熱循環として、プルームテクトニクスによるマントル対流やマグマ形成を介して、内部の熱を外へ運ぶ放熱作用が大きなものとなる（千秋ほか, 2010）。一方、冷めたプレートの沈み込みは、マントルや外核の温度を下げる冷却作用となる。これも熱循環として地球内部が冷めていくという効果の一貫ともみなせる（図5）。

地球からの放熱の量は、地温勾配として見るができる。地球では内部に向かって温度が上昇していくことが知られている。その温度上昇の割合を地温勾配といい、実測されている。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として $\text{mW}/\text{m}^2$ が用いられるが、熱流量単位（HFU,  $1 \text{ HFU} = 41.87 \text{ mW}/\text{m}^2$ ）で表記されることもある。

地質環境によって地温勾配は変化する。大きく分けると、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のは海嶺で新しく形成された地殻であるためで、海嶺から離れた海洋地殻では小さくなる。沈み込み帯では小さくなり、火山地帯では大きくなる。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わかる。言い換えると、地球は冷め続けていることになる。その作用も熱循環の一環となる。

地球が年間放出している熱量は、 $31 \text{ TW}$ （テラワット）～ $44 \text{ TW}$ 程度とされる。その熱源として、核からの潜熱の放出と放射性核種の崩壊熱が重要なる。外核の鉄が溶けているような条件は、地球形成期の小天体の衝突合体による重力エネルギーが、現在も内部に保存されていると見なせる。また、鉄の結晶の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。

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。もともと地球が形成されたとき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、コールドプルームとして一部地球内部に戻っていくことも起こるが、その量は定かでない。

これらの多様な起源の熱は、マントルの「対流」やマグマや火山から「放射」され、地表から大気へ、地殻から海洋への「伝導」によって、地表から地球外へと放出される。表層では、伝導や放射など放熱メカニズムが働くが、地球内部からの熱循環（熱放出）の過程は、外核の液体の「対

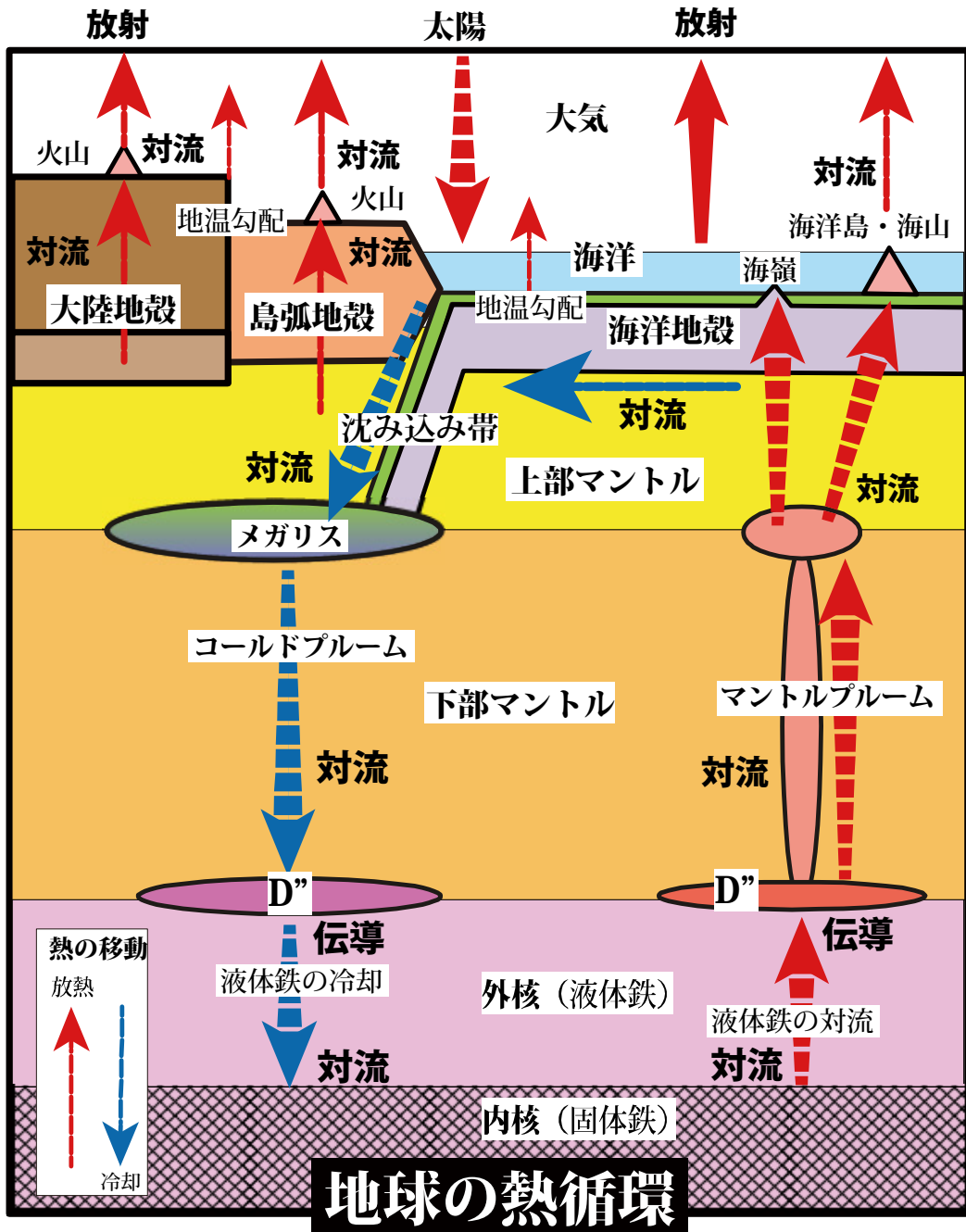


図5 地球の熱循環

全地球テクトニクスにおける熱循環を、内核、外核、下部マントル、上部マントル、地殻、海洋、大気間で示した。



流」やマントル物質の固体の「対流」など、物質移動を伴う過程となる。このような物質循環に結びついていることが、地球の熱循環の重要な過程となる。

#### IV まとめ：全地球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、あるいはパラダイムは、プレートテクトニクスを内包しているブルームテクトニクスである。その前のパラダイムとして地向斜造山運動というテクトニクスがあり、そこからプレートテクトニクス、そしてブルームテクトニクスの成立に至った。このようなテクトニクスの変遷によって、より観測事実に即し、検証性の高いモデルへととなってきた。だが、まだ決して完成したものではなく、今後も修正が必要であろう。

だが、将来のテクトニクスは、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さそうである。固体物質を中心としたテクトニクスでは、地球全体の物質から作用を網羅し、その動的運動像や史の変遷を把握したものでないからである。そこには飛躍的な視点が必要であろう。その萌芽的研究として「全地球ダイナミクス」も紹介したが、それでもまだ構成要素を網羅していなかった。

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として捉えるテクトニクスでなければならぬ。そのために、地球を層と相という視点で考え、それらが相互作用を及ぼし合うものとして圏という概念を導入した(図6)。

次世代のテクトニクスを「全地球テクトニクス」と呼び、物質として層(磁気層、大気層、生

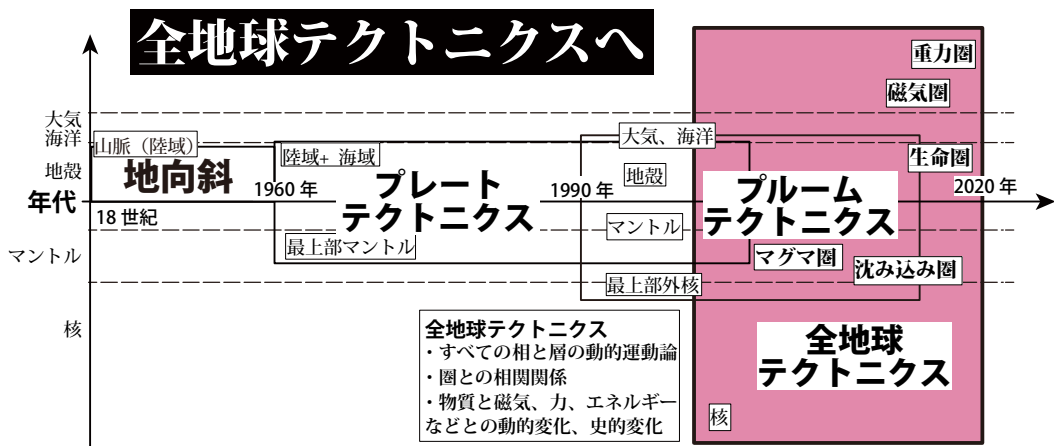


図6 全地球テクトニクスへ

次世代の全地球テクトニクスが目指すべき方向性。軸は図1と同じ。

命層, 海洋層, 地殻層, マントル層, 外核層, 内核層)と相(プラズマ相, ジェル相, 気相, 液相, 固相)に区分し, 物質以外の視点(要素)として力や磁力, 熱などが関与することを示した。また物質などの境界が相互作用の働く場として圏(地球重力圏, 地球磁気圏, 生命圏, マグマ圏, 沈み込み圏, D'圏)という視点も重要であることを示した。それらの視点で, テクトニクスを動的運動像や史の変遷として把握すべきであろう。ただし, それぞれが反映しているもの, 意味しているもの, 概念などが, 必ずしも整理されておらず, 重複していたり, 境界や範囲が曖昧だったりするものもあるが, 重要な視座になるはずである。詳細の検討は, 今後の課題であろう。

## 文献

- 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.
- 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.
- 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., ser.*, 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.
- 藤井敏嗣, 2003. 「マグマ」『マグマダイナミクスと火山噴火』朝倉書店, 42-68.
- 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.
- Hall, J., 1859. *Natural History of New York, Part VI, Paleontology*, vol. 3, Albany, New York.
- 市川浩樹・土屋卓久, 2018. 「外核の化学組成」『地学雑誌』127, 5, 631-646.
- 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.
- 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, 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, 2013. 「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, 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』札幌学院大学総合研究所, 96, 31-55.
- 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, 2016b. 「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, 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』札幌学院大学総合研究所, 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, 347 p.

- 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.
- 小出良幸, 2019c. 「造山運動からみた鳥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.
- Le Pichon, 1968. Sea-floor spreading and continental drift. *Jour. Geophys. Res.*, 73, 3661-3697.
- 丸山茂徳, 1993. 「プレ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, 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, 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.
- 丸山茂徳・深尾良夫・大林政行, 1993. 「プレュームテクトニクス—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.
- 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. in *The Diamond-Bearing Kokchetav Massif, Kazakhstan* edited by Parkinson, C.D., Katayama, I., Liou, J.G. and Maruyama, S., 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.
- 都城秋穂, 1975. 「プレート・テクトニクスにもとづく造山論」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.
- Morgan, 1968. Rises, trenches, great faults, and crustal blocks. *Jour. Geophys. Res.*, 73, 1959-1982.
- Murakami, M., Hirose, K., Kawamura, K., Sata, N. and Ohishi, Y., 2004. Post-Perovskite Phase Transition in MgSiO<sub>3</sub>. *Science* 304, 5672, 855-858.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.

- Wilson, J. Tuzo, 1965. A new class of faults and their bearing on Continental drift. *Nature*, 207, 343-347.
- Wilson, J. Tuzo, 1968a. Static or mobile earth: the current scientific revolution. *Amer., Phil. Soc., Proc.*, 112, 309-320.
- 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.
- 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.
- 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.

## History of Concept for Tectonics and the Vision for Future Tectonics

KOIDE Yoshiyuki

### Abstract

The present dynamics of the solid Earth is interpreted by plate tectonics and plume tectonics. The feature tectonics should be "whole Earth tectonics", which includes not only solid matter but also concepts of all layers and phases, and "spheres" of their interaction. In this paper, the vision for "whole Earth tectonics" is presented.

Keywords: Tectonics, Layer, Phase, Sphere, Interaction, Whole Earth Tectonics

(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)



