

プルーム*1 テクトニクスの紹介

熊大・教育 田中 均

1. はじめに

プレートテクトニクスの登場によって、それまでの地質学の体系が大幅に書き換えられ、1980年代中頃にはそれもほぼ一段落した感があった。しかしながら、1980年代に入ると人体の内部を撮影するX線CTと同じ原理で地球の深部を透視して内部構造を解き明かす「地震波トモグラフィ*2」という手法が実用化された。それによる新しい地球観が「プルームテクトニクス」である。

本稿は、主に丸山・磯崎(1998)、丸山(1993)および浜田(1996)等の書籍を参考および引用しながら、プレートテクトニクスの限界を記述し、それに関連させながらプルームテクトニクスの概要を取りまとめたものである。

さて、本題に入る前に地球の構造を簡単に解説する。

2. 地球の構造とプレートの性質

上部マントルのなかには、地震波の伝搬速度がある程度遅い低速層が存在することが知られていた。とくにS波の速さが、上下の層に比べて若干遅い傾向が認められ、これは部分的に、この低速層のなかではマグマが溶融した状態になっていると推定されていた。この低速層は、海洋底の下では60~150km、大陸の下では100kmから200~300kmの範囲であることが判明していた。

1967から1968年にかけて、フランスのXavier Le PichonやカナダのJ.Tuzo Wilsonなどの研究者がこの層に着目し、この低速層より上をリソスフェア(lithosphere)すなわち岩石圏とした。これがプレートとよばれる部分である。

プレートは中央海嶺系で新生し、年間数

cmないし10数cmの速さで移動拡大するというのである。プレートの動きによって引き起こされる様々な地質現象を統一的に説明した地球表層構造論をプレートテクトニクスという。

これによればマントル内に熱対流が存在し、これが地球表層の硬い部分を動かすとすれば、この熱対流は地殻のすぐ下のマントル部分までおよんでいるのではなくて、リソスフェアの下の低速層のなかまでおよんでそれより上へはおよんでいない、というのである。

低速層はアセノスフェア(asthenosphere)とよばれるものとほとんど同一のものであると考えられ、岩流圏とも訳されている。

リソスフェアやアセノスフェアと並んだ概念としてメソスフェアがあり、これは約670kmより深い下部マントルを指し、地表付近の構造運動に関与しない部分として命名された。

図-1および図-2に、プレートの概念の提唱前と提唱後の地球表層付近の固い部分と地球

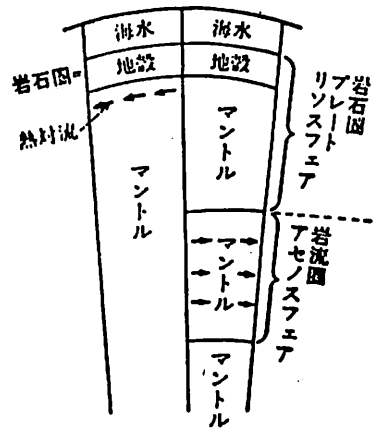


図-1 プレートテクトニクス提唱前(左)と提唱後(右)の地球表層付近の解釈の相違
「浜田(1996)から引用」

内部構造に関する概念の変化を示している。地殻とマントルが花崗岩（大陸地殻）・玄武岩（海洋地殻）とかんらん岩（マントル）という岩石の質の違いによって分けられるのに対して、プレート（リソスフェア）とアセノスフェアは、剛体であるか、ないかという力学的な違いによって分けられている。

地下約2900kmの深さを境にして、マントルの下には液体状態の外核がある。さらに地下約5100~6400kmの間は個体中心核でできている。核は鉄とニッケルを主体とする金属でできている。なお、図-2に示すように外核と内核の間に転移層を考える区分も提唱されている。

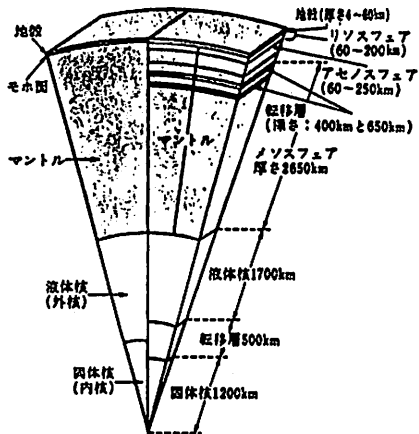


図-2 プレートテクトニクス提唱前(左)と提唱後(右)の地球内部構造の解釈の相違
「浜田(1996)から引用」

プレートの移動の原動力はマントル対流ではなく、最近では海嶺系中軸部から離れるに従って冷え固まるプレートの密度の増大、すなわちプレートの自重による沈み込みに伴う横方向に引きずるような力を移動の原動力として考える傾向にある。

3. プルームテクトニクスの概要

プレートテクトニクスの学問体系はほぼ確率されたかに見えたが、どの理論もそうであるように、説明が困難な新しいデータが次第に増え、蓄積されてくる。地球深部の観測デー

タが増えることや技術革新(例えば地震波のコンピュータ解析法「地震トモグラフィー」の確立)によって、プレートテクトニクス自体を体系の一部に含む新しい理論体系が生まれてきた。これがプルームテクトニクスである。

ここでは、プレートテクトニクスの限界および問題点を整理し、それらとプルームテクトニクスの関わりを説明するとともにその概要について述べる。

(1) プレートテクトニクスの限界とプルームテクトニクスによる説明

プレートテクトニクスでは説明が困難な地質事象を以下に整理するとともにプルームテクトニクスによる解釈を述べる。

1) プレートは海溝で自らの重さのためにマントルの中に沈み込むが、プレートはどこまで深く沈み込むのだろうか。従来の地震波の観測によれば、海洋プレートは約670kmの深さまでは間違いなく沈み込んでいる。しかし、それより深いところでは地震が起きないためにプレートが一体どこまで沈み込むのか推測の域を出なかった。

一：プルームテクトニクスによる解説：一

沈み込んだプレート(スラブ)の行方という大変素朴な疑問に答えられるようになったのはごく最近である。それは「地震トモグラフィー」という方法で地球の内部の様子を見ることができるようになったからである。これは、地震波の縦波(P波)の伝搬する速度が異常な地域を解析したもので、高速度異常帯はそこに、周りより密度の大きい物質(冷えた硬い物質)、つまりスラブや下降流があることを示している。また、低速度異常帯は、そこに、周りより密度の小さい物質(温かい柔らかい物質)、つまり上昇流があることを示していることになる。地震波は冷えた硬い物ほど早く伝わり、温かく軟らかい物ほど遅

く伝わるためである。

この方法を使って研究したオーストラリア国立大学のリングウッド博士と入船博士は超高压実験結果を踏まえて、沈み込んだスラブはざくろ石を主体とした玄武岩地殻の残骸と残りのマントルに分離し、プレートの主体は670kmの境界面に滞留してしまうと推測した(図-3)。

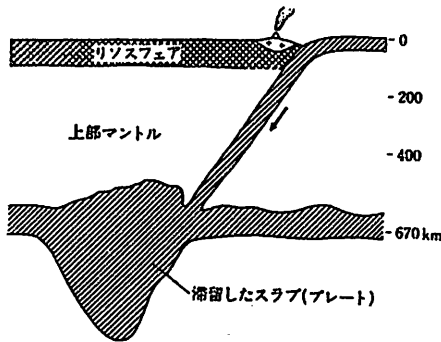


図-3 リングウッド博士と入船博士(1987)によるスラブ滞留説

「丸山(1993)から引用」

一方、名古屋大学の深尾良夫博士の研究グループは地震トモグラフィーの方法を改良してさらに精度よく、しかも地球のマントル全域を三次元的に透視することを試みていた。その研究成果のなかには、海溝でマントルに沈み込んだプレートの形・大きさ・位置を明瞭に読みとることができたことが上げられる。

世界各地をこのような方法で検討した結果、約670mの深さにある上部マントルと下部マントルの境界面の上部に滞留するスラブの形態は図-4のように4つのタイプに模式的分けられています。これらのデータは次のことを意味していると考えられています。①沈み込むスラブはそのままの形では670km深境界面を突き抜けることはできない。②スラブは670km境界面上に一定期間滞留する。③滞留量が増加するにつれて形は薄い板状から塊状あるいは平状へと変化する。④滞留量がある値を超えると滞留スラブは下部マントルへ落下する。

すなわち海溝で沈み込んだスラブは一旦670km付近に滞留した後、その滞留スラブは下部マントル内に落下し最終的にはマントルと核の境界面上に滞留することになる。

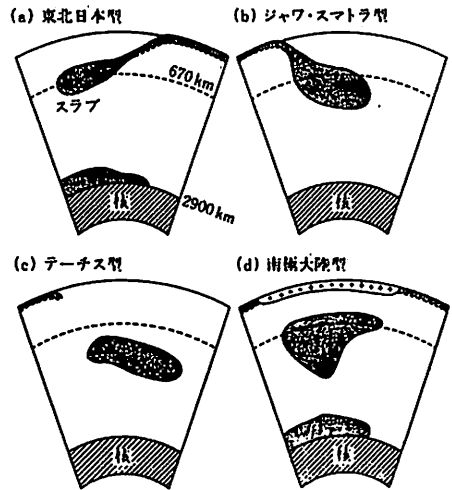


図-4 沈み込んだプレートの行方。四つのタイプが認められる。「浜田(1996)から引用」

2) ユーラシア大陸のまん中は2億年ほど前ごろからずっと地形的な窪地であり続けてきた。たとえばタクラマカン砂漠の北方には海水準より低いタリム盆地がある。そのタリム盆地は石油を産することで有名であるが、貯油層まで6000mも掘削しなければならない。ユーラシア大陸の内部の広大な堆積盆地の発達は、従来のプレートテクトニクスでは説明が難しい。

一：ブルームテクトニクスによる解説：一

名古屋大学地震トモグラフィーは、沈み込んだプレート(スラブ)の行方を明らかにするだけでなく、地球のマントル構造やブルームの形状を明らかにしている。

それによれば、地球には二つの巨大なホットブルームと一つの巨大なコールドブルームがあることがわかった(図-5)。物質はそれら二つのホットブルームからわき上がり、一つのコールドブルームに吸い込まれる。上

昇するブルームは、マントル構成物質が同じであるならば周囲より高温でなければならぬ。高温であれば周囲より密度が小さくなって上昇できるからである。一方、下降するには、周囲よりも低温でなくてはならない。そこで、それらのブルームをホットブルームとコールドブルームと呼ぶのである。これが地球の物質対流の基本パターンである。

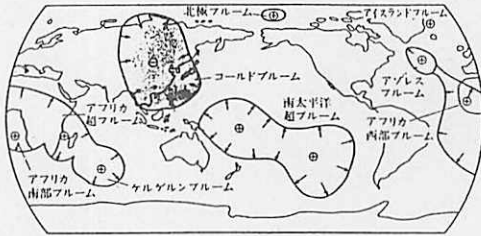


図-5 地球の物質の流れは二つの超ブルームと一つのコールドブルームが支配する。超ブルームは底面(2900~2600km深度)の形を示す。(Fukao, 1992) 「丸山(1993)より引用」

それでは、なぜユーラシア大陸内部に広大な堆積盆が発達するのかは、そこがコールドブルームの直上に位置しており、滞留したスラブが下部マントルに落下するにつれて、地表が引きずり込まれると考えると理解しやすい(図-6)。

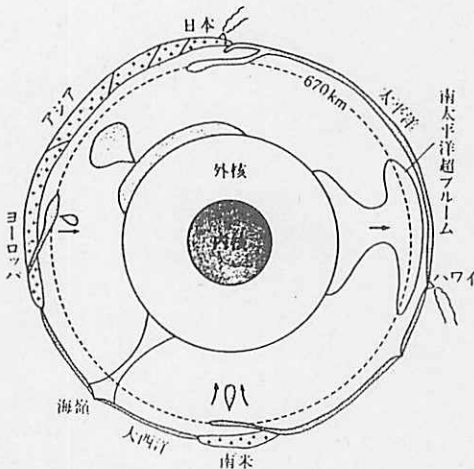


図-6 南太平洋超ブルームとアジアの下のコールドブルーム。「丸山(1993)から引用」

3) インド大陸がユーラシア大陸に衝突してヒマラヤ山脈ができたことはよく知られているが、インド大陸は衝突した後もユーラシア大陸をかき分けて、なぜ内陸部に2000kmも進入したのかということはプレートテクトニクスでは説明が困難であった。

— プルームテクトニクスによる解説：—

地球体積の2/3はマントルで占められている。そのマントル表層にはテクトスフェアと呼ばれる厚さ400km程度の軽いマントルがある。これはその周りにあるマントルに沈み込まず、地球表層を分裂・移動して、衝突・合体を繰り返している。そのようなマントルは19億年前以前に形成された大陸の下には発達するが、それより若い造山帯の下側には発達していない。その原因については次のように考えられている。

太古代の地球の平均的な温度は、現在よりも高く、そのために沈み込んだプレートは海溝深部で常に部分溶融して花崗岩マグマを生じていたと考えられる。これは現在のプレートテクトニクスとは異なっていて、現在は沈み込むプレートの一部の例外を除いて、溶融することなくマントル深部まで沈み込んでいる。

19億年前以前の地球が温かい時代に、110kmよりも浅いところで、もしプレート表層の玄武岩が溶融して花崗岩マグマを放出してしまったら、残りのプレートはどうなるのであろうか?。花崗岩の主成分はナトリウム長石と石英であるが、高圧下ではナトリウム長石は分解してヒスイ輝石(密度3.3g/cm³)と石英(あるいはコーズ石あるいはスティショフ石)になる。したがって、スラブが溶融してしまうと670km深度にスラブを落下させる主要な原動力を失うことになる。こうして、酸化マグネシウム(MgO)に富んだマントル物質は大陸の下に浮き上がって張り付いてテクトスフェアをつくったと考えられている(図-7)。

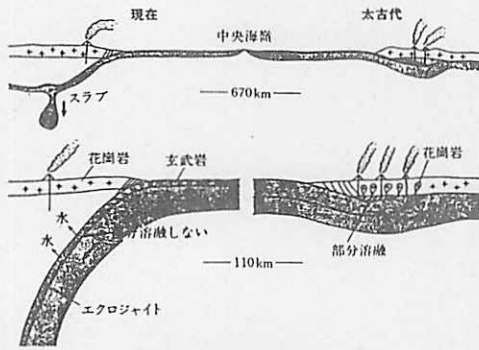


図-7 テクトスフェアの成因
 「丸山 (1993) から引用」

一方、現代の地球では沈み込んだプレート表層の玄武岩は110km深度付近ではエクロジャイトという、おもに「ザクロ石+オンファス輝石+コース石」の三種類の鉱物でできた変成岩に変化している(図-8)。周囲のマントルを構成しているのはほとんどがカンラン石という密度 $3.3\text{g}/\text{cm}^3$ 程度の岩石である。オンファス輝石もコース石も密度 $3.3\text{g}/\text{cm}^3$ ないしそれ以下であるが、ザクロ石が密度 $4.1\text{g}/\text{cm}^3$ 程度もあるために、結局スラブはマントル深部へと落下する。さらに深度が300km近くになるとコース石はスティショフ石に変化して密度は $4.2\text{g}/\text{cm}^3$ と突然大きくなる。また、オンファス輝石もざくろ石に変化する。これらの密度変化は、670km深度にプレートが落下する主要な原動力になっている。

本題に入ると、ユーラシア大陸はインド大陸が衝突する前に、すでに9個の大陸が3~

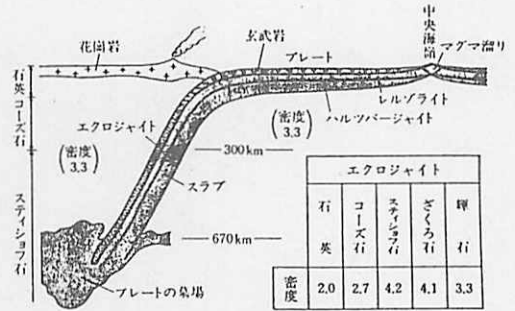


図-8 沈み込んだプレート表層の密度変化。エクロジャイトの密度は300km以深では周囲のマントルよりも大きくなる。
 「丸山 (1993) から引用」

2億年前に次々に衝突・融合合体してできた複合大陸である。そして、融合部分には3~2億年前にできた若い造山帯が幅広く形成されている。これらの若い造山帯の下には当然ながら19億年前に形成されたテクトスフェアは存在しない。そのために、これらの若い造山帯はインド大陸の下の大きなテクトスフェアに衝突されると、容易に変形して、その進入を許してしまうことになる。ヒマラヤから北極海に至る地域の造山帯のほとんどが最近6億年間にできた新しいものであるために、その下にはテクトスフェアがない。そこで、インド大陸はユーラシア大陸をかき分けて北上することができると考えられている(図-9)。もし、インド大陸がアメリカ大陸のような巨大なテクトスフェアをもつ大陸に衝突したならば、現在のような衝突・進入は起きなかったと考えられている。

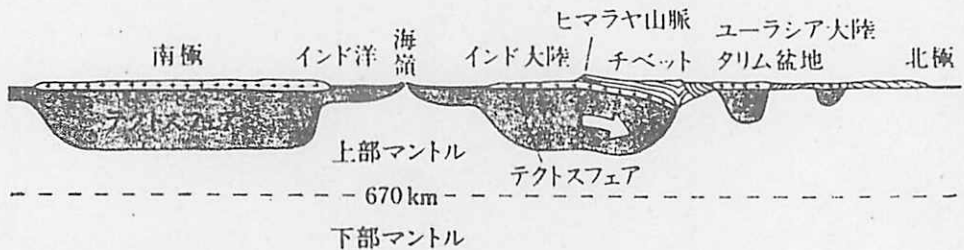


図-9 インド大陸はなぜアジアに衝突した後も大陸内部に貫入するのか、それはユーラシア大陸の下にはテクトスフェアが存在しないからである。若い造山帯の下のマントルは、やわらかい。(高橋栄一博士による。)
 「丸山 (1993) から引用」

4) ハワイ諸島を形成するホットスポットの成因がプレートテクトニクスでは説明が難しい。

ー：ブルームテクトニクスによる解説：ー

ホットブルームはそれが発生する深さによって、① 2900km 深度（核とマントルの境界面）に起源を持つものと、② 400～350km 深度に起源を持つものの2種類に分類される。前者はさらに規模に基づいて、基底の直径が4000km 規模のもの（超ブルームと呼ぶ）（1A型）と、500km 規模のもの（1B型）の2種類に分類される。

全マントルの物質対流に大きな影響力を持っているのは「2900km 深度に起源をもつ1A型超ブルーム」であって、それは現在の地球には2つある。1つは「南太平洋超ブルーム」で、南太平洋、南緯30°付近に中心をもち、2900km 深度の底面の形は北西－南東方向に伸びた楕円形（3000×5000km）をしている。底面から上のブルームはキノコのような形をしていて、途中（2000km 深度）の最も絞られた径は直径が1500km のほぼ円柱に近くなる。茎の上でブルームは上部マントルと下部マントルの境界面（670km 深度）に向かって再び広がるが、その方向は南北方向に長い楕円形の断面を示す。この南太平洋超ブルームの北方に伸びたブルームがハワイのホットブルームにつながっていると考えられている。一方、南方に伸びたブルームは南極大陸のエレバス火山のホットスポットへと連続すると考えられている（図-12）。すなわちホットスポットが地表に表れている地域では、ブルームが地表に直接表れているからプレートは存在しないということになる。南太平洋超ブルームに匹敵するもう一つの大規模ホットブルームは「アフリカ超ブルーム」であるが、ここでは省略する。

なお、参考までに300～400km 深度に起源を持つブルームについて簡単に述べておく。このブルームはプレートが沈み込む場所の近

縁地域にまれに存在し、例えば、北米西海岸、中米、アリューシャン、日本を含む西太平洋地域、フィジー地域などがある。これらの地域がプレートが沈み込む場所の近縁地域に限られる理由は厳密には良く判っていないが、日本海や東シナ海の形成がプレートが沈み込む運動と関係して発生するブルームであるとすれば日本列島を含む弧状列島の形態がよく説明できる。

(2) 上昇ブルームの発生のメカニズム

それでは、深所でのホットブルームはどのようにして発生すると考えられているのだろうか。すでに述べたように、周りのマントルより重くて冷たい大洋底プレート（スラブ）がマントル内をゆっくり沈降する下降ブルームを形成する。また、安定した大きな大陸の下部では、プレートは冷えきってしまい、それに隣接する上部マントルは全体として大規模な下降ブルームをつくると考えられる。

下降ブルームがマントル下底に近づくと、それによって押しのけられる下部マントルの部分が生まれ、それは核に接してすでに暖められているので、交代するように上昇ブルームとなってゆっくりと上部マントル方向へ移動することになる（図-10）。つまり、ホットブルームの誕生である。

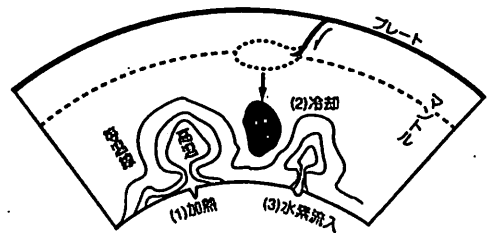


図-10 地球変動の原動力
「丸山・磯崎（1998）より引用」

また、上昇ブルームの発生については、地球がしだいに冷却していくと必然的に起きると考えられている。つまり、地球の冷却は、冷たいプレートが海溝からマントルへ沈み込んで行くことによっておきる。冷たいプレ

トは、地球内部が高温のときは、上部マントルと下部マントルとの境界（670km 深度）まで到達する前に、まわりの温度に同化してしまう。しかし、地球内部が冷却すると、その境界深度まで到達してもプレートの芯の温度は低温のまま、そこで長時間かけて少しずつ同化していく。ところが、次々に落下してくる滞留した低温のスラブが、まとまって下部マントルへとなだれのように崩落して外核表面に集積すると、異常低温部（2000℃）が外核表層（4000℃）に局在化ようになる。すると、その直下の液体核は冷却されて地球の中心部へと移動し、かわってもっと高温の液体鉄が対流してきて低温のマントルを暖める。すなわち、液体核の上昇流の部位に位置する下部マントルが周囲の外核表層の温度より高温になり、ここにマントルの上昇ブルームが発生することになる（図-11）。

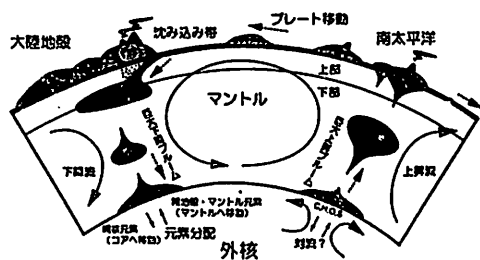


図-11 地球内部物質大循環システム
「丸山・磯崎 (1998) より引用」

(3) プレートテクトニクスとブルームテクトニクスの関係

マントル内部のほとんどの領域では、周囲よりも高温のホットブルームと低温のコールドブルームによって物質は対流・移動しているのであって、決して板状に対流しているわけではない。

超ブルームが上昇している大陸地域では、地表のみが、中央海嶺の下では地表から深さ約 100~150km まで、海溝深部では深さ約 670km までがプレートテクトニクスが支配する領域である。そしてそれは地球の半径の 10 分の 1 以下である。残りの領域はブルーム

ムが支配するブルームテクトニクスの領域であり、地球の主体を占めている。

それではブルームテクトニクスとプレートテクトニクスとはどのような関係にあるのか考えてみよう。

大西洋地域ではマントル深部からまっすぐに上昇するブルームが地表に表れる場所に中央海嶺が見られる。ここではブルームの位置とプレートが生まれる位置はほぼ一致している。しかしながら、太平洋地域ではこの対応関係が全く見られない。太平洋中央部では世界最大のブルームである南太平洋超ブルームがあるが、その中心部が地表に交差する位置に海嶺はない。

それはなぜだろうか。太平洋と大西洋のテクトニクスとの間の大きな違いは、海溝が存在するかしないかということである。太平洋の周りにほぼ全域に海溝が発達するが、大西洋の両岸にはほとんど海溝は見られない。そのため、太平洋の地域のプレートの拡大速度（最大約 18.3cm/年）は、大西洋のそれ（最大 4.0cm/年）に比べて約 4~5 倍も速い。これは、冷却した重いプレートが海溝でマントル深部に沈み込むために、プレートを引っ張る力が生じているかどうかに関係している。大西洋側には海溝がないので、プレート引っ張り力がなく、中央海嶺の位置がマントル深部に対して 2 億年間、ほとんど不変であったと考えられている。それに対して、太平洋の中央海嶺は沈み込むプレートの引っ張り力によって、簡単に東側に移動してしまったのである。

マントル深部からブルームが大陸に向かって上昇すると大陸は分裂を開始して、大陸の間に海洋プレートが生まれる、海洋は拡大を続け中央海嶺が形成される。この時期が、現在の大西洋の状態と考えられ、地球表層近くまでブルームテクトニクスによって完全に支配されている。またこの時期、中央海嶺の下では約 100km より浅い部分でマントルに板状のゆっくりした対流が生じると考えられて

いる。

海洋地域がさらに拡大して、太平洋のように縁に海溝が発達すると、その時点でスラブ(沈み込むプレートの残骸)の引っ張り力が突然機能し始め、プレートの運動はブルームから完全に独立することになる。中央海嶺の形成はブルームの位置とは無関係に、沈み込んだスラブの引っ張り力に強く影響されたプレートの運動によって決まり、中央海嶺はその結果として作られるにすぎないことになる(図-12)。すなわち、海溝が発達することによって、プレートテクトニクスはブルームテクトニクスから完全に独立することになる。

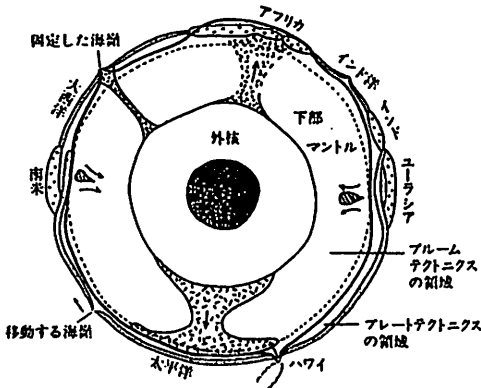


図-12 ブルームテクトニクスとプレートテクトニクスの境界(太い線)
「丸山(1993)から引用」

4. おわりに

ブルームテクトニクスによる地球史説明が急速に進歩しつつある。その内容を判りやすく解説したものが、丸山(1993)および丸山・磯崎(1998)の書籍である。それら書籍には、ここで取り上げた内容のほかに、① プレートテクトニクスの開始、大陸地殻の形成の始まり(40億年前) ② 強い地球磁場の誕生(27億年前) ③ はじめての超大陸の形成 ④ 海水のマントルへの注入開始、太平洋スーパーブルームの誕生(7.5~5.5億年前)

⑤ 古生代と中生代の境界での生物大量絶滅(2.5億年前)等の全地球変動システムについての興味ある内容が取り上げられているので一読をお勧めする。

用語説明

* 1 ブルーム

ブルーム(またはプリューム)という用語は、本来、鳥の羽毛の一片のような形をした物を指す。地学現象では、一般に風が原動力となって広がる火山灰分布のパターンをあげることができる。ブルームの形は、二次元平面に限らず、いわば雨滴状あるいは涙滴状(下向きの場合)、またはきのこ状、ドーム状(上向きの場合)といった形状をも指すことがある。 「浜田(1996)より引用」

* 2 地震トモグラフィ

X線断層写真(X線トモグラフィ)にちなんで呼ばれるもので、地震波の速度構造を求める手法またはそれによって得られた速度分布図のこと。地球内部をくまなく通るような大量のP波・S波・PKP波などの走時データを用い、それらの経路の速度構造をコンピューター処理で求める。地震トモグラフィは、古いプレートの塊がマントル中に沈み込んでいるようすやブルームの通り道を明らかにするなど、最近の地球科学の発展に重要な貢献をしつつある。

「新版地学事典(平凡社)より引用」

引用文献

- 浜田隆士(1996): 固体地球、財団法人放送大学教育振興会。
丸山茂徳(1993): 46億年地球は何をしてきたか? 岩波書店
丸山茂徳・磯崎行雄(1998): 生命と地球の歴史、岩波新書