

特集

# 大陸移動説からプレートテクトニクスへ

『大陸と海洋の起源』100年

- 684 地球科学はヴェーゲナーから……上田誠也
- 687 一地震学者の見た大陸移動説と沈み込み帯  
……金森博雄
- 692 大陸とプレートを動かす力とは何か  
——大陸移動説“完成”から100年目でわかっていること……吉田晶樹
- 705 大局と細部をつなぐ地球科学の眼……小平秀一
- 709 大陸の移動と生物の進化……長谷川政美

635 卷頭エッセイ 学ぶ 創る 遊ぶ

切り捨てられていく原発事故被害……原発規制庁審議ウォッチ・グループ

【科学時評】

638 多数決主義の欠陥を超えて——民主主義にかなう投票の数理とは……坂井豊貴



科学

Science Journal  
KAGAKU  
Vol.85 No.7 Jul.2015

667 口永良部島の噴火……井村隆介

721 「泊原子力発電所の新規制基準適合性に  
関わる審査」の問題点……渡辺満久・鈴木康弘

連載

660 科学エッセイの楽しみ カウントダウン……三浦佳世

672 動く大地に住まう インド・ネパール編③

　　溜まりのBuildinghood カトマンズ盆地にて……中谷礼仁

668 鳥学キッチン⑤真っ赤じゃないけど、モミジだな……川上和人

664 3.11 以後の科学リテラシー⑬……牧野淳一郎

712 原子力発電所の安全審査と再稼働⑩  
　　アキレスを追いかけるカメ——世界水準と日本の原子力の位置……佐藤 晓

662 ちびっこチンパンジーと仲間たち⑯戦争と協力……山本真也

【科学通信】

643 <コラム>ドイツ環境政策通信 ネオニコチノイド系農薬とミツバチ……今泉みね子

648 すばるからTMTへ……柏川伸成

650 2015年5月18日第19回福島県「県民健康調査」検討委員会発表の  
甲状腺がんデータの分析結果……津田敏秀

655 <コラム>東京電力原発事故の情報公開 汚染水のずさんな扱いと認識のズレ……木野龍逸

658 『せいめいのれきし』改訂版に寄せて……真鍋 真

666 75年前には

708 特集執筆者紹介

720 次号予告



# 大陸とプレートを動かす力とは何か

—大陸移動説“完成”から100年目でわかっていること

吉田晶樹 よしだ まさき

所属：国立研究開発法人海洋研究開発機構地球深部ダイナミクス研究分野  
専門：地球惑星内部物理学、地球史学、地震学、数値流体力学

プレートテクトニクス理論は、地球上に存在する大陸プレートや海洋プレートの内部や側面にさまざまな力がかかっていることで説明できる。1970年代以降、地表からマントルの中へ沈み込むプレート(スラブ)が、プレート運動の主要な原動力とされてきた。一方、プレートの下面を引きするマントル(アセノスフェア)の流れがプレート運動の原動力になっているのか抵抗力になっているのかはいまだよく理解されておらず、現在も研究が進んでいる。

大陸移動説  
100年

1912年にドイツの気象学者であったアルフレッド・ヴェーゲナー(1880~1930)が、フランクフルトで開催された地質学会において、当時の地質学、古生物学、古気候学、地球物理学の知識を集約して大陸移動説を発表した。その成果は1915年に『大陸と海洋の起源<sup>1</sup>』という一冊の本にまとめられた。今からちょうど100年前のことである。

彼の大陸移動説は、当時批判が多くかった。特に反対派の急先鋒でイギリスの地球物理学者であったハロルド・ジェフリーズ(1891~1989)は、大陸移動を生じさせる原動力を説明できていないとして大陸移動説を強く否定した。そのような学界の雰囲気の中、一筋の光明が差した。1928年にイギリスの地質学者であったアーサー・ホームズ

(1890~1965)が、グラスゴーで開かれた地質学会において、ヴェーゲナーが提唱した大陸移動の原動力を説明するため、後の「マントル対流説」の原形となる学説を提唱したのである<sup>2</sup>。ただ、この当時はまだマントルという言葉はなく<sup>\*1</sup>、「シマ」と呼ばれる地下の玄武岩質の層が熱対流し、「シアル」と呼ばれる花崗岩質の大陸地塊が氷山のように浮いているイメージであったようだ(図1)。

しかしながら、今度はその地下の岩石の対流を駆動させる原動力が何であるかがわからなかったため、ヴェーゲナーが1930年にグリーンランドで探検中に遭難死した後、約30年間は大陸移動説に関する議論は停滞した。その突破口を開いたのが、第二次世界大戦後、1950年代から60年代の古地磁気学と海洋底観測の発展である。海底の地磁気縞模様の発見により、海底が拡大しながら大陸やプレートが移動していることが受け入れられ、1960年代後半のプレートテクトニクス理論の誕生に大きな役割を果たした。この海洋底拡大説を提唱した一人であるアメリカの地質学者ハリー・ハモンド・ヘス(1906~1969)は、マントルの上昇域が海嶺に相当し、そこで海洋地殻が新しく生まれ、一方、マントルの下降域が海溝に相当し、そこで海底が地球深部に沈み込むという、本格的なマントル対流説を1962年に発表した<sup>3</sup>。

ちょうど100年前に“完成”された大陸移動説

E-mail: myoshida@jamstec.go.jp

URL: <http://yoshida-geophys.jp/>

What forces drive continents and plates?: What we know in the  
100th year of the establishment of the continental drift theory  
Masaki YOSHIDA

\*1—マントル(mantle)という用語が、地球中心核(core)を取り囲む層という意味で学術論文で初めて使われたのは1897年である(Wiechert, E. "Ueber die Massenverteilung im Inneren der Erde." Nachrichten von der Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen, Mathematisch-Physikalische Klasse, 1897, 221-243, 1897)。

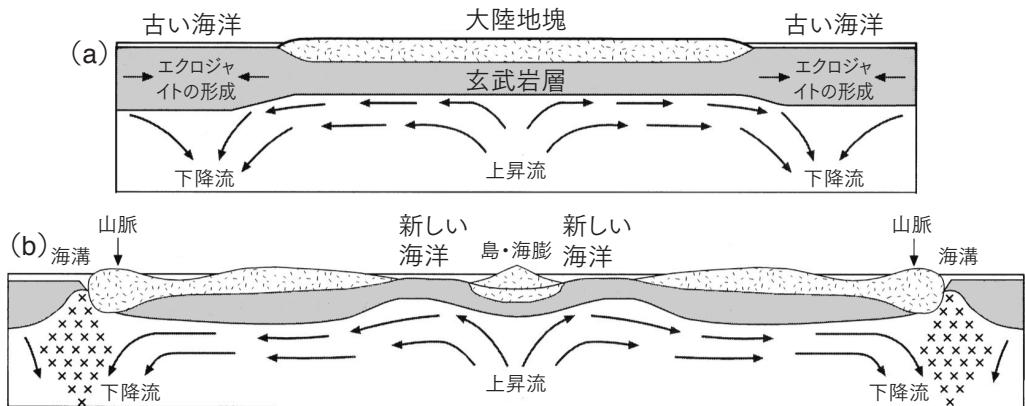


図1—ホームズが発表した「地殻下対流説」の概念図<sup>2</sup>

(a) 地殻の下で上昇流が起き、対流が始まると、流れが下降し始める場所でエクロジャイトと呼ばれる重い岩石が形成される様子を表している。(b) 地殻の下の流れが大陸地塊を分割して引っ張るのに十分なほど活発になり、エクロジャイトが沈降して大陸地塊が前進し、さらに、地殻の下の流れが下降している場所では造山運動が起こり、流れが上昇しているところで新しい海洋底が発達するという一連の運動の様子を表している。

は、現代固体地球科学<sup>\*2</sup>の幕開けを意味すると同時に、大陸移動の原動力が何かという、固体地球科学上、現在もなお第一級の未解決問題が誕生した瞬間であったのだ。

### 地球のマントル 対流パターン

載された「茶わんの湯」の中で、以下のように書いている。「茶わんのお湯がだんだんに冷えるのは、湯の表面の茶わんの周囲から熱が逃げるためだと思っていいのです。(中略)茶わんに接したところでは湯は冷えて重くなり、下のほうへ流れて底のほうへ向かって動きます。その反対に、茶わんのまん中のほうでは逆に上のほうへのぼって、表面からは外側に向かって流れる、だいたいそういうふうな循環が起こります。よく理科の書物などにある、ビーカーの底をアルコール・ランプで熱したときの水の流れと同じようなものになるわけです。」

\*2—地球科学の中で、岩石(固体)層のマントルの熱・物質循環で支配される地球表層から地球中心核までの地球内部の構造やダイナミクス(動力学)を扱う学問分野を特に固体地球科学と呼ぶ。

現在においても、マントルはよく、茶碗やビーカーの中の湯に喩えられる。しかし、それは厳密には正しくない。もちろん、容器表面の冷たい湯が下降し、容器底面の温かい湯が上昇するという熱対流運動の説明としてはそれでよいが、以下に述べるように、実際の地球のマントルで起こっている熱対流運動はそのような単純な現象ではなく、複雑で空間的に不規則である<sup>4</sup>(図2)。

マントル対流のパターンを複雑にする要因として第一に挙げられるのは、マントルを構成する岩石の粘性率が温度に強く依存することである(おおまかには、温度が100°C下がると粘性率が1桁程度上がる)。これによって、大気や海水で冷やされた地球表層に固いリソスフェアができる。このリソスフェアがバラバラになったものがプレートである。固いプレートはマントルの上昇流によって簡単に破壊されないため、太平洋プレートのように海嶺から海溝まで1万km以上もあるような“蓋”を作る。この蓋のスケールはマントルの厚さ(約2900km)よりも何倍も大きい。地球上に存在するプレートの大きさはまちまちで、マントル対流はそのプレートのサイズに規定されるため、さまざまな水平スケールのセルをもつことになる。

もう一つ、マントル対流のパターンを複雑にする大きな要因は、マントルを構成する岩石がもつ

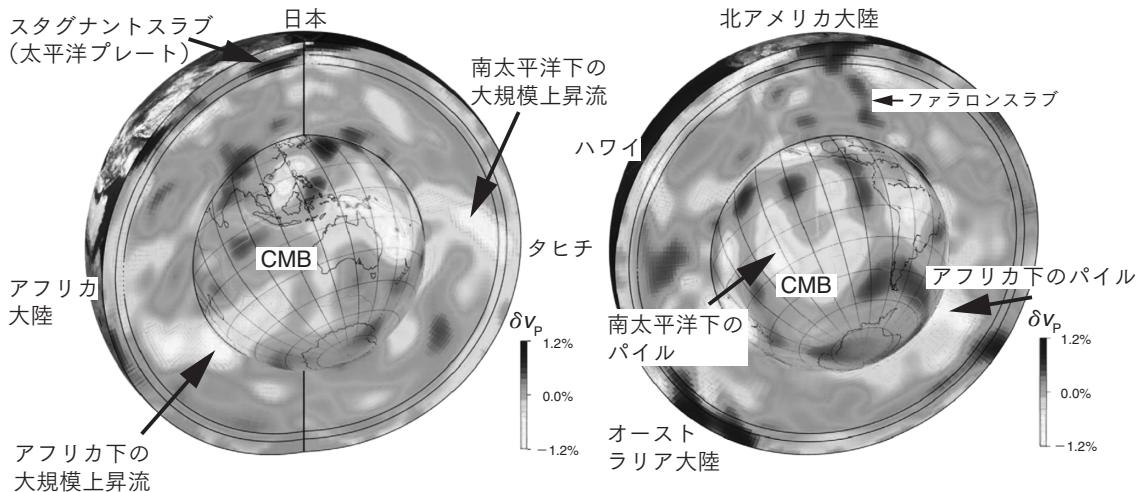


図2—P波を使った地震波トモグラフィーによるマントルの地震波速度構造<sup>4</sup>

南太平洋下とアフリカ大陸下にサーモケミカルパイルがあり(右)，その上部からマントルの流れが上昇している(左)。値は各深さでの標準の地震波速度からのずれ(%)を示す。黒い色ほど地震波速度が大きい。東アジアの下では、沈み込んだ太平洋プレートが深さ660 km付近で一旦滞留して「スタグナントスラブ(停滞スラブ)」を形成している(用語解説2参照)。「ファラロンスラブ」は数千万年前まで地球上に存在していたファラロンプレートが北アメリカ大陸の下に沈み込んだもの。CMB: コア・マントル境界。

放射性元素(ウラン, トリウム, カリウム)の壊変による発熱である<sup>\*3</sup>。これによって、地球表面から放射される全熱量(全地殻熱流量:  $43\sim49\times10^{12}\text{ W}$ )がすべて地球中心核から来るものではないことになる。最近の研究によると、地球中心核からマントルに流入する熱量は、不確かさが大きいが、全地殻熱流量の約10~35%( $5\sim15\times10^{12}\text{ W}$ )とされる。地球の中のほとんどの壊変熱は地球表層の大陸地殻と「サーモケミカルパイル」(以下、パイルと呼ぶ)(用語解説1参照)と呼ばれるマントル深部の密度の大きい領域に濃集されている。高温のパイルはマントルの上昇流を引き起こし、例えば、南太平洋上にタヒチ島を形成している火山(ホットスポット)の起源は、パイルの上部から上昇してくるブルームである。一方、ハワイ島やアイスランド島を形成しているホットスポットはパイルとは独立したマントル深部(おそらくコア・マントル境界)起源である<sup>5</sup>。

このような複雑なマントル対流パターンをもつ

地球の中で、活動的大陸縁と言われるところでは、海洋プレートは大陸プレートの下に潜り込むことによってマントル深部まで沈んでいく。したがって、マントルの熱対流運動の下降流に当たるプレートの沈み込みの分布は、地球上の各大陸のサイズや形、また、その配置と大きな関係がある。一方、地表でプレートが生産される海嶺の下には必ずしもマントルの上昇ブルームがあるわけではなく、一般的には、海嶺は海洋プレートや大陸プレートが左右に引っ張られて“裂け目”ができたところを高温の最上部マントルが埋めると考えてよい。それでは、なぜ海洋プレートや大陸プレートが左右に引っ張られ、プレート運動や大陸移動が起きるのか考えてみたい。

### プレート運動と大陸移動の原動力

地球表層に存在する十数枚<sup>\*4</sup>の主要な海洋プレートや大陸プレートは互いに押し合いでし合いして運動している。その激しい“陣取り合戦”の中でそ

\*3—マントルの熱源には、地球が形成されたときに解放された重力エネルギー由来の“原始熱”もある。この原始熱は、地球が誕生して間もなくマントルと地球中心核という基本的な内部構造ができあがった以降、地表から宇宙空間に放出され続けている。

\*4—現在では、主要なプレートの他に、マイクロプレートと呼ばれる規模の小さいプレートを含め、地球上には合計56枚ものプレートの存在が確認されている<sup>6</sup>。

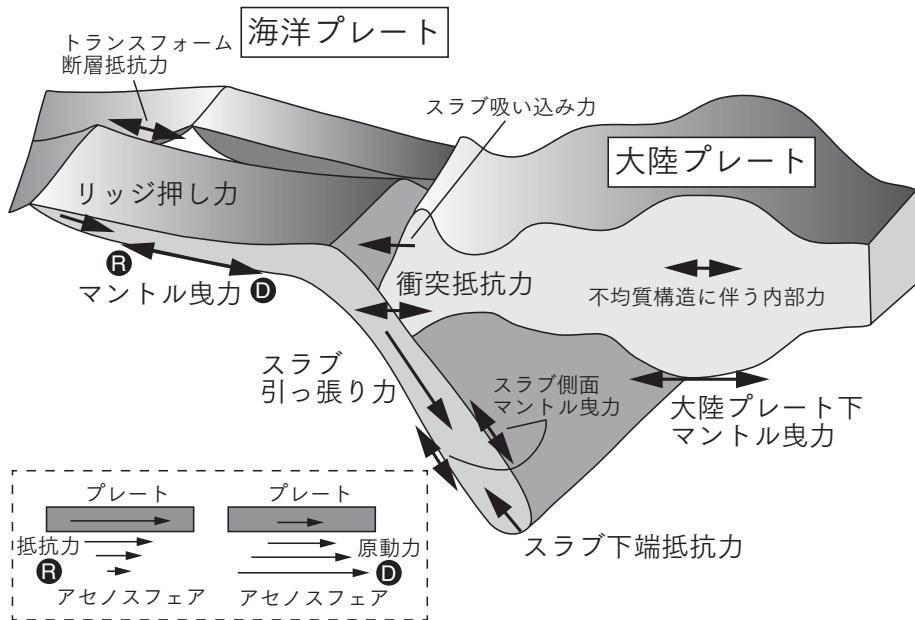


図3—海洋プレートと大陸プレートにかかる力<sup>6,7</sup>

プレートの内部と側面にはさまざまな力が働いている。海洋プレートの底面にはマントル曳力(マントルの流れがプレートの底面を引きずる力)が働き、矢印の向きDは原動力(driving force)、Rは抵抗力(resistance force)となる場合を表す。アセノスフェアの流れがプレート運動より速ければ、アセノスフェアの流れはプレート運動の原動力として働く。逆に、遅ければ、アセノスフェアの流れはプレート運動の抵抗力として働く(左下の点線の枠内の図)。アセノスフェアの速度とプレート運動の速度が同じであれば、アセノスフェアとプレートは力学的に結合していることになり、原動力と抵抗力のどちらの力としても働く。

それぞれのプレートの内部や側面にはさまざまな力が働いている(図3)。その主要な力を挙げると、(1)スラブ引っ張り力(マントル中に沈み込むスラブがプレート全体を引っ張る力)、(2)スラブ下端抵抗力(スラブの先端がマントルから受ける抵抗力)、(3)リッジ押し力(海嶺から遠ざかるにつれて厚くなるプレートの側面をマントルが押す力)、(4)衝突抵抗力(プレート同士が衝突することで互いのプレートに及ぼし合う力)、(5)マントル曳力(マントルの流れが海洋・大陸プレートの底面を引きずる力)である<sup>6</sup>。さらに、大陸プレートには、厚さや密度構造の不均一による内部力、簡単に言えば、重力によって山脈や山地を平らにしようとする力も働いているが、その力はスラブ引っ張り力に比べて1桁以上小さい<sup>7</sup>のでここでは無視してよい。

まず、(1)のスラブ引っ張り力は、必ずプレート運動の原動力となる。それは、沈み込むスラブをもっているプレートの運動速度、つまり、太平洋プレート(6.6 cm/年)やオーストラリアプレート(6.3 cm/年)、ナスカプレート(7.0 cm/年)、ココスプレート

レート(7.5 cm/年)の運動速度が地球上に存在する全プレートの平均速度(4.4 cm/年)よりも有意に速いという観測事実<sup>8</sup>から明らかである。また、(2)のスラブ抵抗力はスラブ引っ張り力を打ち消すほどの力をもっていないこともわかる。次に(3)のリッジ押し力であるが、この大きさは観測事実からはわからない。そこで、二次元の簡単な対流モデルを用いた流体力学的理論にもとづいてその大きさを見積もると、リッジ押し力( $10^{12}$  N/mのオーダー)はスラブ引っ張り力( $10^{13}$  N/mのオーダー)と比較して1桁小さい<sup>9</sup>。

次に、(4)の衝突抵抗力は実際の地球の場合、環太平洋のように大陸プレートと海洋プレートが衝突することで互いのプレートに及ぼし合う力である。そこで地球上で最も典型的な活動的大陸縁であるナスカプレートと南米プレートの関係に注目する。筆者らが、南米プレートの下に沈み込むナスカスラブの応力場をマグニチュード7以上の大地震のメカニズムから解析したところ、ナス

カスラブ浅部(深さ 100 km まで)では、スラブが傾く方向に引き延ばされる力(down-dip tension)が働いていることがわかった<sup>10</sup>。この水平成分の力は、スラブ引っ張り力と同じ  $10^{13}$  N/m のオーダーの力で南米プレートを東向きに押し出す。

最後に、(5)のマントル曳力がプレート運動にとって原動力として働いているのか、抵抗力として働いているのかについては非常に難しく、現在の固体地球科学の知見を総合してもはっきりとした解答は出せない。ここで重要なのは、プレートの運動速度とその下のマントル(アセノスフェア)の流れの相対運動速度である。アセノスフェアの速度がプレート運動速度よりも小さければ、プレートから見ればアセノスフェアにブレーキをかけられているようなものなので、マントル曳力は抵抗力として働き、逆に、アセノスフェアの速度がプレート運動速度よりも大きければ、プレートはアセノスフェアというベルトコンベアに乗っているようなものなので、マントル曳力は原動力として働く(図3)。

南米プレートには、上に述べたナスカプレートから及ぼされる東向きの強い力を打ち消す力が働かなければいけない。その力は、南米プレートの下面を西向きに引きずるマントルの流れであることが考えられる。その引きずる力はまさにマントル曳力で、南米プレートの運動の原動力の役割を果たす。

したがって、プレート運動や大陸移動の原動力にはスラブ引っ張り力に加えて、マントル曳力が寄与している可能性が十分にある。仮にマントル曳力が原動力として働いている場合、スラブ引っ張り力とどちらが大きいのかという新たな問題が出てくる。これを解決するためにはマントルの中で何が起こっているのかを詳しく理解する必要がある。

### マントル対流の数値シミュレーション

1980 年代半ばから地震波トモグラフィー(用語解説 2 参照)によるマントルの三次元地震波速度異常構

造モデルが相次いで発表され<sup>11</sup>、マントル全体が大規模な熱循環をしていることが示された。これによって明らかになったことは、海嶺の下が必ずしもマントル対流の上昇域ではなく、地表の海嶺の分布はマントル深部の高温領域(地震波低速度異常領域)のパターンとは、ほとんどまったく一致しないということだ。つまり、マントル対流のパターンは、ヘスが 1960 年代に考えた単純なものではなく、また、それを二次元的なイメージとして捉えるのは無理があるということだ。

地震波トモグラフィー研究の進展と並行するように、コンピューターの性能向上に伴って、三次元モデルを用いたマントル対流の数値シミュレーション(用語解説 3 参照)が行われるようになった。現在の固体地球科学では、マントル内部のダイナミックな活動を物理的に理解する上で、それは重要な一翼を担っている。特に今世紀に入ると、数値シミュレーション技術の進歩と相まって、岩石の高温高圧実験によってマントルの物性やレオロジーに対する理解が格段に深まり、実際の地球のマントル対流パターンやプレート運動の再現を意識した数値シミュレーションが世界で盛んに行われるようになった。

その一方で、世界の地質学者によって、古地磁気学的・地質学的証拠にもとづいた、過去の地球の大陸配置の復元や超大陸(用語解説 4 参照)の形成・分裂過程(超大陸サイクル)に関する研究も大きく進展し、地球の表層運動の歴史が徐々に解明されつつある<sup>12, 13</sup>。複雑な運動を繰り返す地球表層の下のマントルでどのような長期的変動や熱・物質循環が起こってきたかを知るために、地表で直接採取される岩石の同位体地球化学分析、あるいはマントル対流の数値シミュレーションが有効な手段となる。

現在もなお日進月歩で発展している固体地球科学の中において、筆者らは、実際の地球で起こってきた大陸移動を再現することが可能な三次元のマントル対流モデルを世界に先駆けて開発し、大陸移動とマントル対流との熱的・力学的相互作用や超大陸サイクルのメカニズムについて研究を進

めてきた。次節でそのマントル対流のシミュレーション結果の一例を紹介したい。

### インド亜大陸の高速北進の原動力

パンゲアが分裂し、現在の地球の六大陸が形成される過程で顕著なイベントの一つは、パンゲアの南半分を構成していたゴンドワナ大陸の一部であったインド亜大陸がテーチス海を年間最大 18 cm

という高速で北上し、約 4000 万年前までにユーラシア大陸に衝突したことである。インド亜大陸（インド半島）は現在もなお北上を続けている。この衝突によってかつてはテーチス海の海底であった場所が隆起し、ヒマラヤ山脈とチベット高原が形成され、その付近の地震活動や地殻変動を引き起こしている（2015 年 4 月 25 日に発生したネパールの大地震もインド亜大陸の衝突が原因である）。一方、インド亜大陸の衝突によって生じたヒマラヤ・チベット山塊の隆起は、アジアモンスーン気候の成立に寄与し、新第三紀以降の地球規模の寒冷化をもたらし、ひ

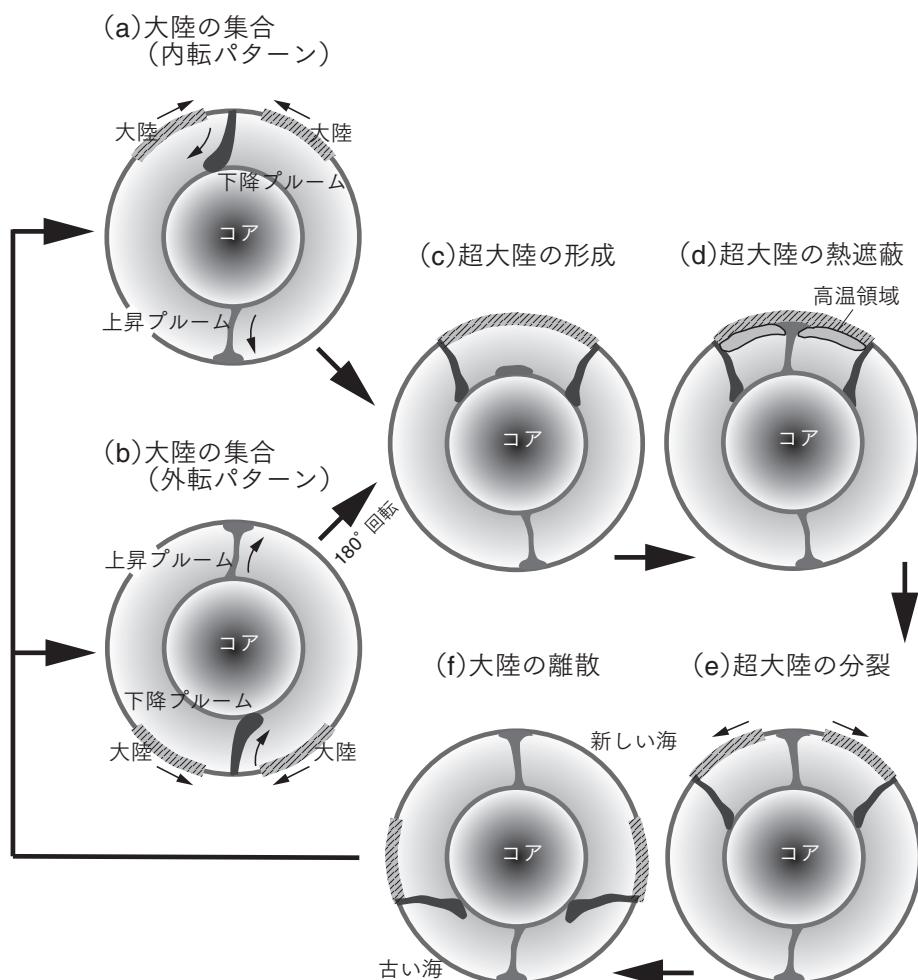


図 4—大陸の離合集散過程(超大陸サイクル)の模式図

超大陸の形成パターンには、(a) 内転パターン（ウィルソンサイクル）と (b) 外転パターンの 2 種類がある。(a) から (c) または (b) から (c) は大陸が下降プルームに引き寄せられて集まり、超大陸が形成される様子を表している。(d) から (e) では、超大陸の熱遮蔽効果による超大陸直下の高温領域の形成、および、マントル深部からの上昇プルームの発生が原因で超大陸が分裂する様子を表している。現在の地球の状態は (f) に近く、古い海は太平洋、新しい海は大西洋に相当する。

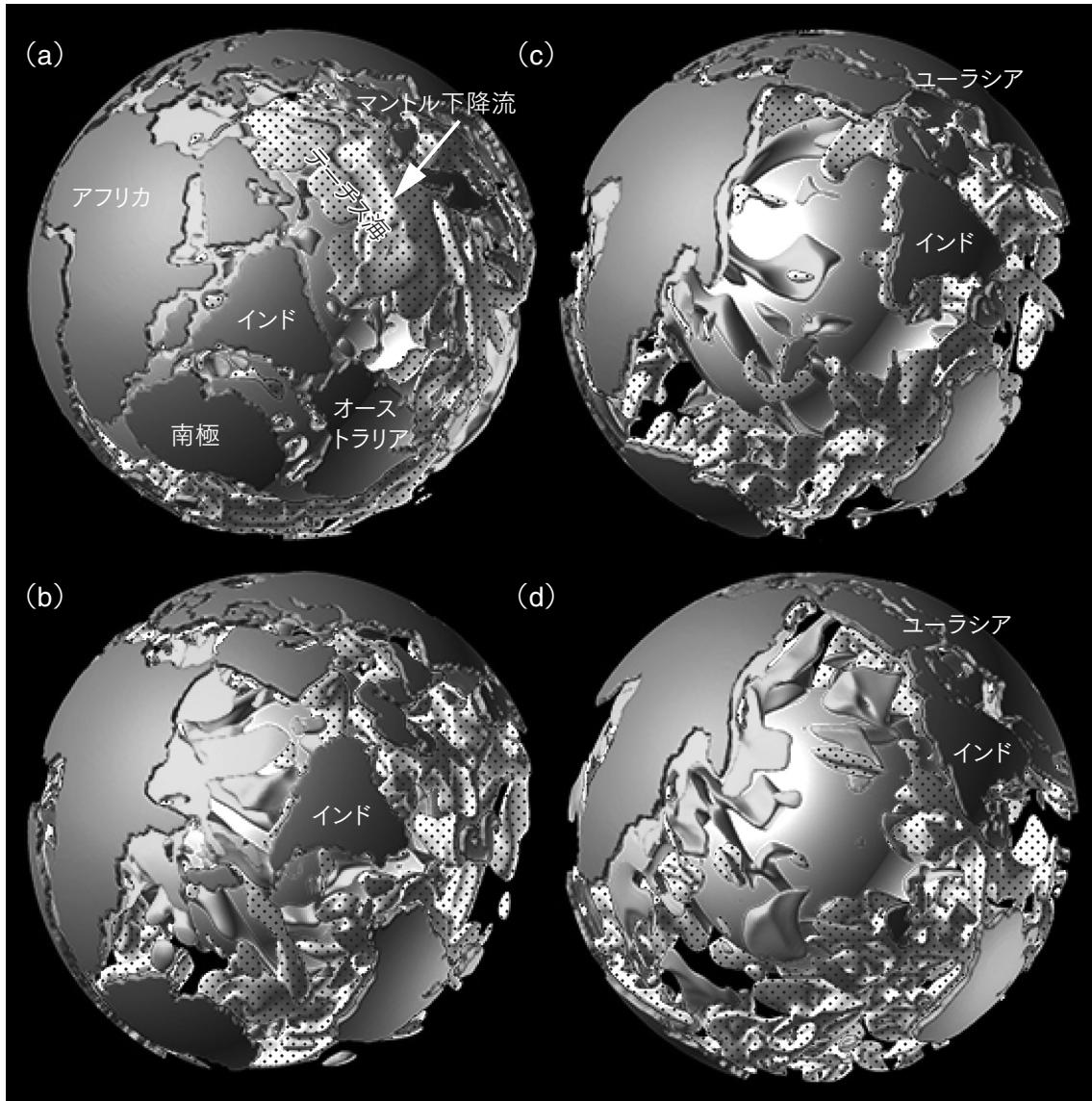


図5—マントル対流の数値シミュレーションで得られたマントル内部の温度構造の時間変化<sup>16</sup>

(a) 1億7500万年前、(b) 1億年前、(c) 5000万年前、(d) 現在に相当する時間。白色の等温面は各深さの平均温度よりも100°C 温度が低く、点を打った等温面は100°C 温度が高い。表層の薄い灰色の領域は大陸の位置。インド亜大陸の高速北進が再現されている。

いては人類の進化にまで影響を及ぼしている<sup>15</sup>。このように現在の地球と生命の活動に多大な影響を及ぼしているインド亜大陸の北上は、地球科学において重大な関心事であるものの、その原因は未だ解明されていなかった。

地球上に超大陸が形成され始めると、それがマントルにとって“毛布”的役割をすることにより、マントルに含まれる放射性元素の壊変に伴う発熱、

またはマントル深部から上昇する温かいマントルの流れによって超大陸直下のマントルが温められる（超大陸の熱遮蔽効果）（図4）。筆者らは、精密な古地磁気学的データ<sup>12</sup>によって復元された2億年前の超大陸パンゲアの形状モデルに加えて、この超大陸の熱遮蔽効果を温度場の初期条件として考慮したマントル対流の数値シミュレーションを行った<sup>16</sup>。その結果、大西洋の拡大や、インド亜大陸

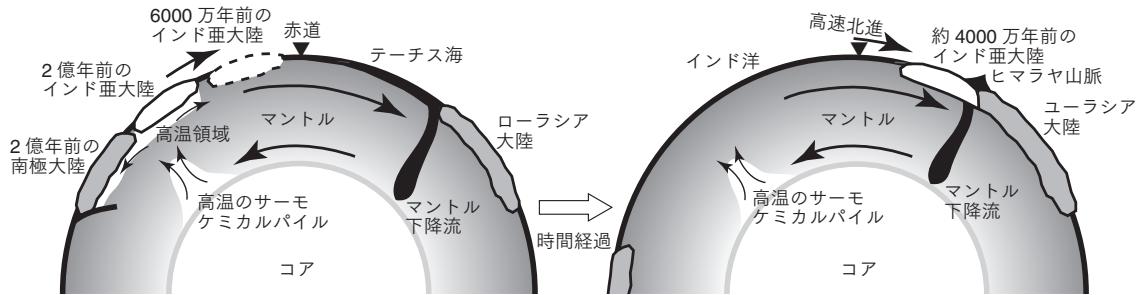
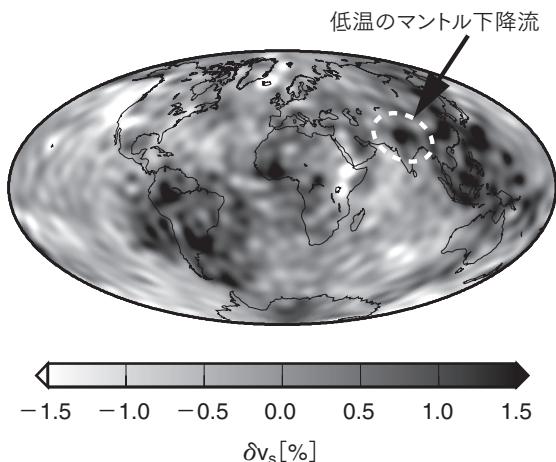


図6—インド亜大陸の高速北進のメカニズムを示した概略図

(a)深さ 500 km



(b)深さ 1600 km

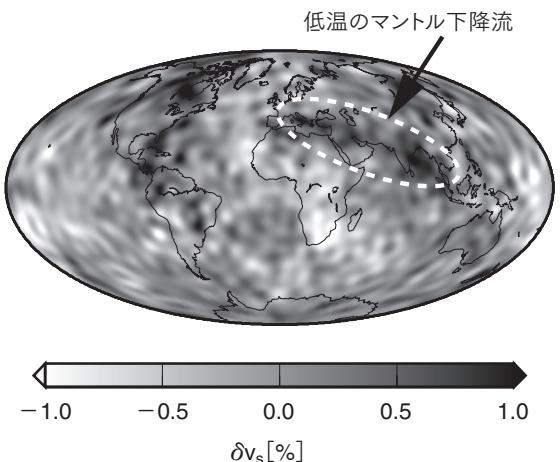


図7—S波を使った地震波トモグラフィー<sup>17</sup>による地中海からインド亜大陸の下のマントル下降流の存在を示す地震波高速度異常領域

(a)と(b)はそれぞれ深さ 500 km と 1600 km の断面図。値は各深さでの標準の地震波速度からのずれ(%)を示す。黒い色ほど地震波速度が大きく、一般的に温度が低い。

の高速北進とユーラシア大陸への衝突など、パンゲア分裂後の地球表層の“大イベント”が再現され、計算開始から 2 億年後に現在の地球に近い大陸配置を再現することに成功した(図5)<sup>\*5</sup>。

この数値シミュレーションによって、パンゲア分裂の主原因は熱遮蔽効果によるパンゲア直下のマントルの高温異常領域の存在であることがわかった。また、パンゲアの一部であったインド亜大陸の高速北進の主要な原動力は、パンゲア分裂直

後<sup>\*6</sup>からテーチス海北部に発達するマントル下降流であることが明らかになった。このマントル下降流は、パンゲア直下のマントルの高温異常、および、パンゲアの下のマントル深部に存在していたパイアルからの上昇流に励起されるマントルの大規模な流れによって、テーチス海北部のローラシア大陸の縁に自発的に形成される(図6)。

最新の高解像度地震波トモグラフィーで画像化されたマントルの三次元地震波速度異常構造<sup>17</sup>から、このとき形成されたマントル下降流に起因すると思われる地震波高速度領域が地中海からインド亜大陸の下付近のマントル深部(少なくとも深さ 2000 km 程度まで)に存在することが確認されている(図7)。ユーラシアプレートに衝突後、沈み込み帯を失ったインドプレートが、現在もなお北上を

\*5—図5のシミュレーション動画は以下のウェブページで見られる。[http://yoshida-geophys.jp/mantle\\_movie.html](http://yoshida-geophys.jp/mantle_movie.html)

\*6—実際の地球では、超大陸パンゲアが約 2 億年前に分裂を開始するまでにテーチス海北部に海洋プレートの沈み込み、およびそれが元となるマントル下降流がすでに形成されていたと推測される。

続けていることは、大陸移動の原動力がこのマントル下降流である何よりの証拠である。そして、最上部マントルの流れがインドプレート全体を駆動している可能性が大きい。過去 8000 万年間のプレート運動の歴史にもとづく地質学的議論<sup>18</sup>によると、これはインドプレートのみならず、ユーラシアプレートに衝突してアルプス山脈とザグロス山脈を形成しているヌビアプレート(アフリカ大陸の大部分を乗せているプレート)とアラビアプレートの下でも同じことが言えそうだ。

### 「総合」に向けて

本稿の結論を述べると、大陸移動とプレート運動の主要な原動力として、1970 年代から知られて

いたスラブ引っ張り力に加えて、マントル曳力も重要な役割を果たしている可能性が大きい。少なくともヌビアプレート、アラビアプレート、そして、筆者らの数値シミュレーションでその高速北進が再現できたインド亜大陸を乗せたインドプレートに限っては、最上部マントルの流れ(すなわちマントル対流)が大陸移動の主要な原動力であると言える。また、現在のアフリカ大陸はグレート・リフト・バレー(大地溝帯)によって東西に引き裂かれ、今まさに新たなプレート境界(東にソマリアプレート、西にヌビアプレート)が誕生しようとしているが、これはマントルの流れが大陸分裂に対して能動的な役割を果たす力があることを意味する。

プレート運動の原動力に関しては、最近の高校「地学」の教科書<sup>19</sup>では、「参考」情報として「プレートは海嶺からずり落ちるように離れていく。これがプレートを動かしている 1 つの力である。一方、地表付近からマントルの中へと沈んでいくプレートは、その後に続いてくるプレートを深いところへひきずり込もうとする。このようなひきずり込みの効果もプレートを動かす力の 1 つになっている」と書かれている。マントル曳力がプレート運動の原動力の一つであることは述べられていない。さらに研究を重ねることによって、「大陸とプレートを動かす力とは何か」という問

題に対する解答をはっきりさせ、大学の入試問題で出題できるような普遍的事実を導くことは、筆者ら地球物理学者に課せられた使命であると言えよう。

最近、プレート運動の原動力の解明にとって大変重要な直接的観測事実も出てきた。海洋研究開発機構(JAMSTEC)は、北海道南東沖の太平洋プレート上において、地下構造探査システムおよび海底地震計を用いて地殻と上部マントルの大規模構造探査を実施した<sup>20</sup>。人工的に起こした地震による地震波を解析した結果、かつての海洋プレートの拡大軸付近の下の下部地殻で、プレートがその下のマントルの流れによって引きずられて移動していることを示唆する断層のような“すじ”があることを発見したのだ<sup>\*7</sup>。前節で紹介した筆者らの数値シミュレーション結果は、この観測事実にもとづくプレート運動の原動力の考え方を裏づけるものであり、プレートが生成される場所だけではなく、プレート全体がマントル対流によって駆動されている可能性を示唆する。

ヴェーゲナーの大陸移動説の“完成”から 100 年が経過した今、筆者らマントル対流の数値シミュレーション研究者には、地下構造探査や地球深部掘削、地震波トモグラフィー、岩石の同位体地球化学分析など、異なる固体地球科学的研究手法を扱っている研究者と情報交換を行い、大陸移動とプレート運動の原動力やメカニズム、そして、それらによってもたらされるさまざまな地学現象(プレートの生成や沈み込み、造山運動、地震・火山噴火活動)のメカニズムをより深く理解するための数値モデルの構築が求められる。本稿の最初に紹介したヴェーゲナーの『大陸と海洋の起源』第 4 版(1929 年発行)の序文にも「地球科学の全分野から提供された情報を総合することによってはじめて、われわれは真実を見出すことを望みうるのである」と書かれている。現在では、長年蓄積された各研究分野からの「情報」があまりに溢れすぎているた

\*7—詳細は、海洋研究開発機構の 2014 年 3 月 31 日付けプレースリリース([http://www.jamstec.go.jp/j/about/press\\_release/20140331/](http://www.jamstec.go.jp/j/about/press_release/20140331/))を参考にしてほしい。

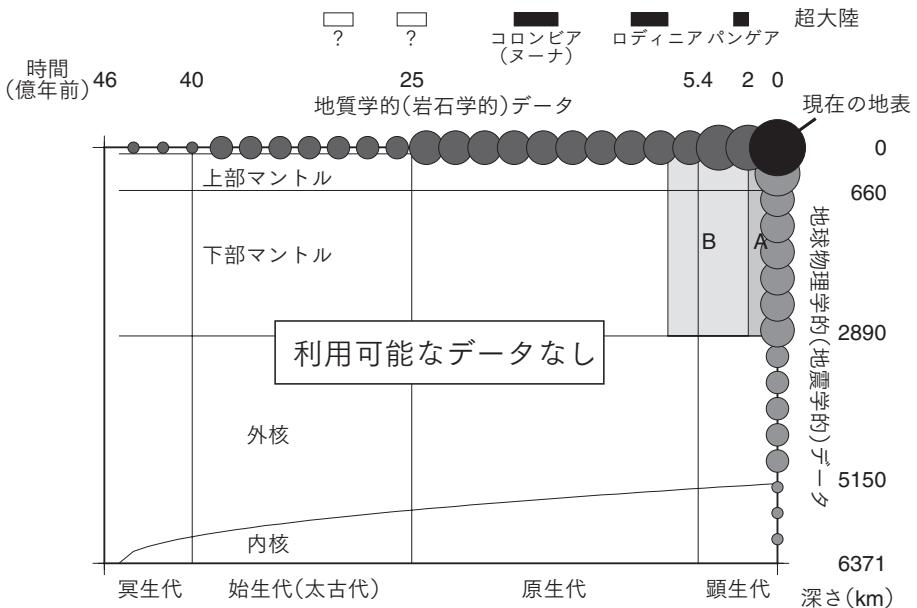


図8—縦軸に地球の深さ(0~6371 km), 横軸に時間(0~46億年前)をとった時空間領域の上に、地球物理的・地質学的数据の量の豊富さや質の信頼性を円の大きさで示した概略図

現在の地球内部と過去の地球表層の情報はそれぞれ地震学的、岩石学的数据から得られるが、それ以外の領域の情報は他の固体地球科学的手法で補完しなければならない。Aで示した濃い灰色領域は、本稿で紹介した筆者らのマントル対流の数値シミュレーション(図5、6)において、超大陸パンゲアが分裂した2億年前から現在までのマントルの内部構造の変化をカバーしていることを意味する。Bの薄い灰色の領域は、もう一つ前の超大陸であるロディニアの分裂(約7.5億年前)以降のマントルを示し、次の段階の数値シミュレーションで解明を目指そうとしている領域を表している。

め、それを「総合」することは容易な作業ではないが、彼の教えは100年が経過しても色褪せない。ただ、「真実」を導くための「情報」となる地球物理学的数据(主に地震学的数据)と地質学的数据(主に岩石学的数据)は、地球表層から地球深部に向かうほど、また、現在から過去に時間を探るほど量が少なくなり、また、その質の信頼性も下がる。図8は、縦軸に深さ、横軸に時間をとり、それらのデータの量の豊富さや質の信頼性を円の大きさで表した概略図であるが、地球の時空間領域のほとんどが利用可能なデータのない空白域である。リソスフェアとマントルは地球の全体積の約84%を占め、そこで起こっている熱対流運動は地球全体の進化に重大な影響を及ぼしてきたと考えられる。したがって、大陸移動とプレート運動の原動力に関する「真実」を得るためにには、まず過去のマントルで何が起きたかを一つ一つ解決していくことが非常に重要だ。筆者らは、

このデータのない空白域の情報を補完するための固体地球科学的研究手法の一つとして、マントル対流の数値シミュレーションを選んだ。今後も、過去の地球内部構造をモデル化して、シミュレーションによって現在の地球内部構造を復元し、成功しなければモデルを改善していく……というような試行錯誤的なアプローチで地道に研究を進めいくことだろう。

固体地球科学には未だ多くの解明すべき謎が残されている。例えば、インド亜大陸とユーラシア大陸の衝突とほぼ同時期の約4300万年前には、太平洋プレートの運動方向が北方向から北西方向に突然向きを変えた。将来的には、このパンゲア分裂以降の地球史最大の“未解決事件”的謎を含めて、マントル対流に起因するさまざまな固体地球科学現象のメカニズムの解明にもつなげたいと考えている。

## 用語解説

### (1) サーモケミカルパイル(thermo-chemical pile)

サーモケミカルパイルは、地球形成時から蓄えられた始原的な重い物質か、地球史を通じて地球表層から沈み込んだ海洋地殻がかき集められてマントル深部に溜まっている領域で、周囲のマントルと化学組成が異なる密度の大きな物質からなり、多くの放射性元素を含んでいると考えられる。地震波トモグラフィーやマントル対流の数値シミュレーションの結果などから、この熱的にも化学的にも周囲のマントルと異なる領域は、コア・マントル境界上に“山”的に積もっているように見えるので、パイル(pile)と呼ばれる。現在の地球では、パイルは南太平洋下とアフリカ下に存在し、少なくとも数億年という時間スケールではダイナミックに安定で、位置をほとんど変えないとされる。高温のサーモケミカルパイルは、コア・マントル境界から発生する複数の上昇プルーム(太さの直径は数百km)が群がるように集まってできている可能性があるが(プルームクラスター説)，現在の全マントル地震波トモグラフィーの解像度(1000km程度)ではそれはまだ明らかにできない。1990年代前半に発表された解像度の粗い地震波トモグラフィー画像では、“巨大”なプルームのようにも見えており、高校の教科書や一般書などでは「スーパー・プルーム」と解説されていることが多い。サーモケミカルパイルの存在は、大規模なマントル上昇流を持続的に地球表層に届けるので、超大陸分裂や大陸移動、ひいては地球の進化に多大な影響を及ぼしてきた可能性がある。

### (2) 地震波トモグラフィー

地球内部を通過するさまざまな種類の地震波の伝搬速度を解析して、マントル内部の速度異常構造を推定し画像化する手法。地震波速度がマントル物質の温度変化のみに依存すると仮定した場合(実際には物質の組成の違いにも依存する)、マントル内

部に低温の領域があると、そこを通過する地震波速度は速くなり、逆に高温の領域があると地震波速度は遅くなる。したがって、地表で観測される地震波の到達時間は、温度と組成の水平不均質がない仮想的なマントルを通過する地震波の到達時間とされることになる。地震波トモグラフィーでは、大量の地震波の観測データをもとにマントル全体の地震波速度異常構造モデルを逆問題的に決定する。これまで多くの研究者が発表した地震波トモグラフィーモデルから、(1)南太平洋とアフリカの下のマントル深部に大規模な地震波低速度異常領域が分布していること、(2)主に環太平洋の下に、コア・マントル境界まで沈み込んだスラブによると思われる大規模な地震波高速度異常領域が広く分布すること、(3)地表から沈み込んだプレート(スラブ)が、マントル物質の結晶構造が変化する深さ660km付近で一旦水平に横たわって「スタグナントスラブ(停滞スラブ)」を形成し、その後下部マントルに落下しているように見えることなど——が明らかになった(図2参照)。現時点では、地震波トモグラフィーはマントル対流パターンの実態を把握するための唯一無二の観測的研究手法と言ってよい。

### (3) マントル対流の数値シミュレーション

岩石で構成されているマントルは、数百万年以上の長い時間スケールでは流体のようにふるまい、その熱対流運動は、粘性率が非常に大きい流体中の熱対流運動と表現される(水飴の粘性率が $10^3\text{ Pa s}$ (パスカル秒)に対し、マントルの標準的な粘性率は $10^{21}\text{ Pa s}$ という巨大な値になる)。マントル対流の数値シミュレーションでは、マントル対流を支配する基礎方程式(質量保存式、運動量保存式、エネルギー保存式の三つの保存式)にもとづいて計算を進めることで、決まった時間間隔ごとの温度場、応力場、流れ場が同時に得られる。シミュレーションの開始時には、初期条件となるマントル内部の温度分布だけを与える。すると、粘性率が非常に大きい

ために慣性力が無視できるので、質量保存式と運動量保存式を解くことにより、与えた温度分布に対応する浮力の分布に釣り合う、その“瞬間”の応力と流れの分布が決まる。大陸地殻や海洋地殻、あるいはサーモケミカルパイルのようなマントルと化学組成の異なる物質の流れ(移流)を解くためには、基礎方程式とは別にその物質ごとの移流方程式が必要となる。さらに、始原的なマントル物質が融解と化学分化によって地殻物質が形成されるといった物質の進化を解くためには、そのプロセスを再現する物理化学法則をシミュレーションに考慮する必要がある。三次元全球マントル対流モデルでは通常、地表面とコア・マントル境界では境界条件として一定の温度を与える。

#### (4) 超大陸

超大陸の言葉の定義はやや曖昧だが、その時代に地球上に存在するほとんどすべての大陸が合体して一つになった巨大な大陸を超大陸と呼ぶ。地球上には、約3億年前に「パンゲア」、約10億年前に「ロディニア」、約18億年前に「コロンビア(あるいは、ヌーナ)」と呼ばれる超大陸が形成されたとされる。したがって、超大陸の形成周期は約7~8億年と言ってよい。地球が約46億年前に誕生して数億年後に現在のプレートテクトニクスに似た表層運動が起こるようになると、遅くとも約40億年前までには、マグマ活動により現在の地球上に存在する大陸の“種”となる小さな大陸が地球上に誕生し始めた。小さな大陸が沈み込み帯でのマグマ活動によってさらに成長し、それらが合体を繰り返しながら徐々に大きくなり、約30~25億年前には“地球史上初”的超大陸が形成されたとされる。超大陸が分裂し、次の新しい超大陸が形成される一連の過程を「超大陸サイクル」と呼ぶ(図4参照)。超大陸サイクルのうち、超大陸が分裂して新しい海ができる、やがてその海が閉じ始めて超大陸が再び形成される過程を、カナダの地球物理学者でプレートテクトニクス理論

の創始者の一人であるジョン・ツゾー・ウィルソン(1908~1993)の名前にちなんで「ウィルソンサイクル」と呼ぶ(図4では内転パターンと説明されている)。一方、新しい海がどんどん拡大ていき、超大陸が分裂する前からあった古い海を消滅させるように大陸が集合して超大陸が形成されるパターンもある(外転パターン)。実際の地球の歴史では、内転パターンと外転パターンの両方が起こってきたと考えられる。

#### (5) パンゲア

ヴェーゲナーは、1922年に出版した『大陸と海洋の起源』の第3版の中で、自らが復元した超大陸を「パンゲア(Pangea)」と命名した。パンゲアとはギリシア語で“すべての大陸”という意味である。パンゲアは南半分のゴンドワナ大陸(現在のアフリカ、南アメリカ、オーストラリア、南極の各大陸とインド亜大陸)と、北半分のローラシア大陸(現在のユーラシア大陸と北アメリカ大陸)から構成される。ヴェーゲナーは、現在の精密な古地磁気学的・地質学的数据を用いて復元されるパンゲアの形を、大陸の海岸線の形、各大陸に存在する地質帶の分布、動植物の化石の分布や氷河の痕跡など断片的な証拠だけを手がかりにほぼ見事に復元した。ただし、彼は、パンゲアが形成されていた時代には、インド亜大陸はユーラシア大陸と陸続つきでつながっていたと考えていた。インド亜大陸が南半球から北上して約4000万年前までにユーラシア大陸に衝突したことがわかったのは、1950年代以降になってインド洋の海底の地磁気縞模様が確認されてからである。パンゲアは約3億年前に形成され、約2億年前に分裂を開始したとされ、パンゲアが形作られていた真っただ中の約2億5000万年前には地球史上最大の生物の大量絶滅が起こった。その原因の一つとしては、パンゲアの下に溜まった高温のマントル、あるいはマントル深部からの上昇プルーム(図4参照)による大規模な火山活動が挙げられる。

## 文献

- 1—A. Wegener: *Die Entstehung der Kontinente und Ozeane (The Origin of Continents and Oceans)*, Friedrich Vieweg & Sohn, Braunschweig(1915). 本書の第4版(1929年出版)の訳本も出版されている。:アルフレッド・ヴェーゲナー著, 都城秋穂・紫藤文子訳: 大陸と海洋の起源——大陸移動説, 岩波書店(1981)
- 2—A. Holmes: *Geol. Soc. Glasgow Trans.*, **18**, 559(1931)
- 3—H. H. Hess: in 'Petrologic Studies: A Volume in Honor of A. F. Buddington', *Geol. Soc. Amer.*(1962)pp. 599~620
- 4—D. Zhao: *Multiscale Seismic Tomography*, Springer(2015)
- 5—R. Montelli et al.: *Geochem. Geophys. Geosyst.*, **7**, Q11007 (2006)
- 6—D. Forsyth & S. Uyeda: *Geophys. J. R. Astron. Soc.*, **43**, 163 (1975)
- 7—瀬野徹三: 続 プレートテクトニクスの基礎, 朝倉書店(2001)
- 8—D. F. Argus et al.: *Geochem. Geophys. Geosyst.*, **12**, Q11001 (2011)
- 9—D. L. Turcotte & G. Schubert: *Geodynamics* 3rd ed., Cambridge Univ. Press.(2014)
- 10—T. Seno & M. Yoshida: *Phys. Earth. Planet. Int.*, **141**, 183 (2004)
- 11—谷本俊郎: *科学*, **67**, 507(1997)
- 12—M. Seton et al.: *Earth-Sci. Rev.*, **113**, 212(2012)
- 13—R. D. Nance: *Gondwana Res.*, **25**, 4(2014)
- 14—B. C. Storey: *Nature*, **377**, 301(1995)
- 15—安成哲三: *ヒマラヤ学誌*, **14**, 19(2013)
- 16—M. Yoshida & Y. Hamano: *Sci. Rep.*, **5**, 8407(2015)
- 17—J. Ritsema et al.: *Geophys. J. Int.*, **184**, 1223(2011)
- 18—W. Alvarez: *Earth Planet. Sci. Lett.*, **296**, 434(2010)
- 19—松田時彦・山崎貞治編: *高等学校地学 II*, 啓林館(2011)
- 20—S. Kodaira et al.: *Nature Geosci.* **7**, 371(2014)