

マントル対流, プレートテクトニクス, 大陸集合／分裂

地球深部ダイナミクス研究分野 吉田晶樹

1960年代後半に確立されたプレートテクトニクス理論は地球表層で起こる地震、火山噴火、大陸移動、造山運動など、固体地球上で起こるほとんどの地質現象のメカニズムを理解する上で欠かせない。しかし一方で、プレート運動や大陸移動を引き起こす原動力については、半世紀経った現在でも解決されていない。

1910年代にアルフレッド・ウェーゲナーが「大陸移動説」を提唱した直後から、マントルの熱対流運動（マントル対流）が大陸移動の原動力であろうという考えはあったが、地球内部の運動が直接的に観測できないため、マントルに対流運動があること自体が疑問視されていた。プレートの下の地球内部の活動が依然としてほとんど何も分からなかった1970年代には、表層で観測できるプレート運動の情報だけを頼りにその原動力を推定する方法が考案され、マントルに沈み込むプレートの引っ張り力（スラブ引っ張り力）がプレート運動の主要な原動力であることが示された。

その後、1980年代半ばに全マントル地震波トモグラフィーの技術が登場してマントル全体の地震波速度構造がマッピングされ、マントル対流のパターンが推定できるようになった。また、それとほぼ同時期にコンピュータの性能の進歩により、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が行えるようになった。しかしながら、これらの進展によっても、プレートが自らにかかるスラブ引っ張り力によって能動的に運動するという考えが現在でも主流である。

そもそもプレートとは熱対流運動するマントルが地球表層の大気や海水で冷却されて固くなった層（リソスフェア）がバラバラになったもので、現在の地球上には20枚程度の主要なプレートと、さらに30枚程度の小さなプレートが存在することが知られている。したがって、マントル対流の数値シミュレーションでプレート運動を実現する鍵は、まずリソスフェアをつくり、次にそのリソスフェアをバラバラに“破壊”するメカニズムを考慮することである。

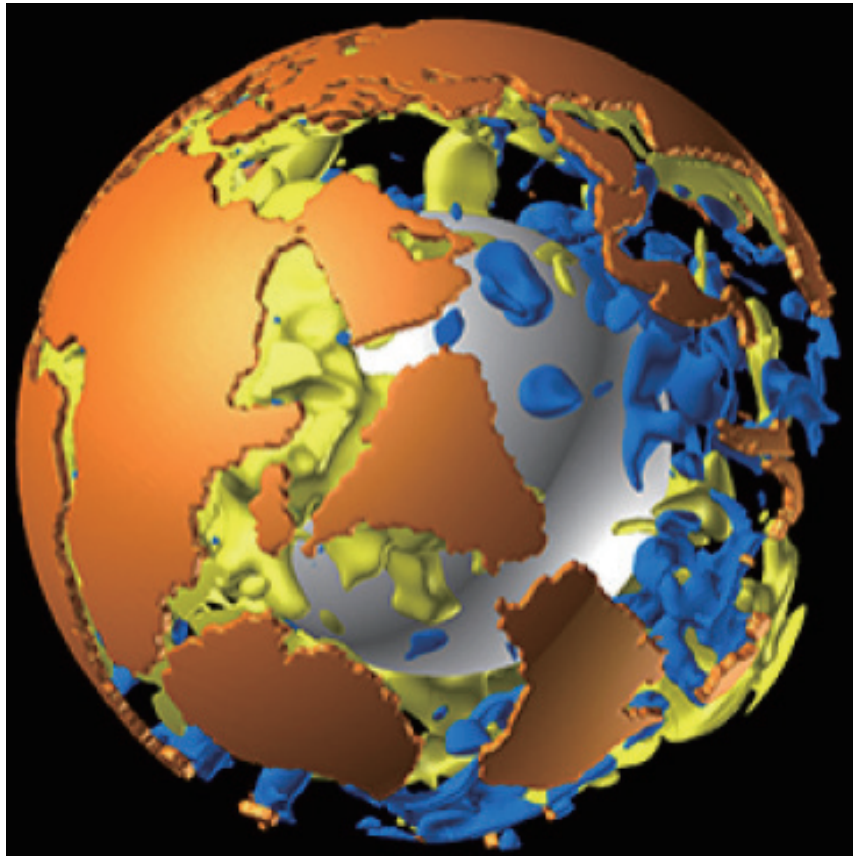
マントルを構成する岩石の粘性率（変形のしにくさとなる指標）は、温度や圧力、歪速度、鉱物の結晶構造や結晶粒径、化学組成など多くの要素に依存する。これらの要素のうち最も強く依存するのは温度であり、大雑把にいえば、温度が100°C下がると粘性率は1桁程度大きくなる。1990年代後半になると、コンピュータの性能と数値計算技術の向上に伴い、粘性率の温度依存性を考慮したマントル対流のシミュレーション研究が加速し、地球のプレート運動に似た表層運動が再現できる地球物理学的条件がかなり絞られた。

まず、粘性率の温度依存性を考慮すると、マントル最上部に形成される低温の熱境界層の粘性率が桁で大きくなり、実際のリソスフェアに似た“殻”のような層が自発的にできる。次に、そのリソスフェアをバラバラにさせるには、リソスフェアに“降伏応力”（ある応力を超えた局所的な場所の粘性を下げる効果）を考慮すればよい。適度な降伏応力を与えると、線状の“ひび”（プレート境界に相当）に囲まれた大小さまざまなスケールを持つ“破片”（プレートに相当）が形成され、それらが別々に水平運動をし、マントルへの沈み込みも起きる（図1）。ただし、本来の目的であるプレートテクトニクスの原動力を知るためには、マントルと化学組成が大きく異なり、海洋プレートよりも厚い大陸プレート（以下では単に大陸という）も考慮しなければならない。なぜなら、現在の地球（あるいは過去の地球も）の海洋プレートの沈み込み帯の配置は明らかに大陸の配置の影響を受けているからである。

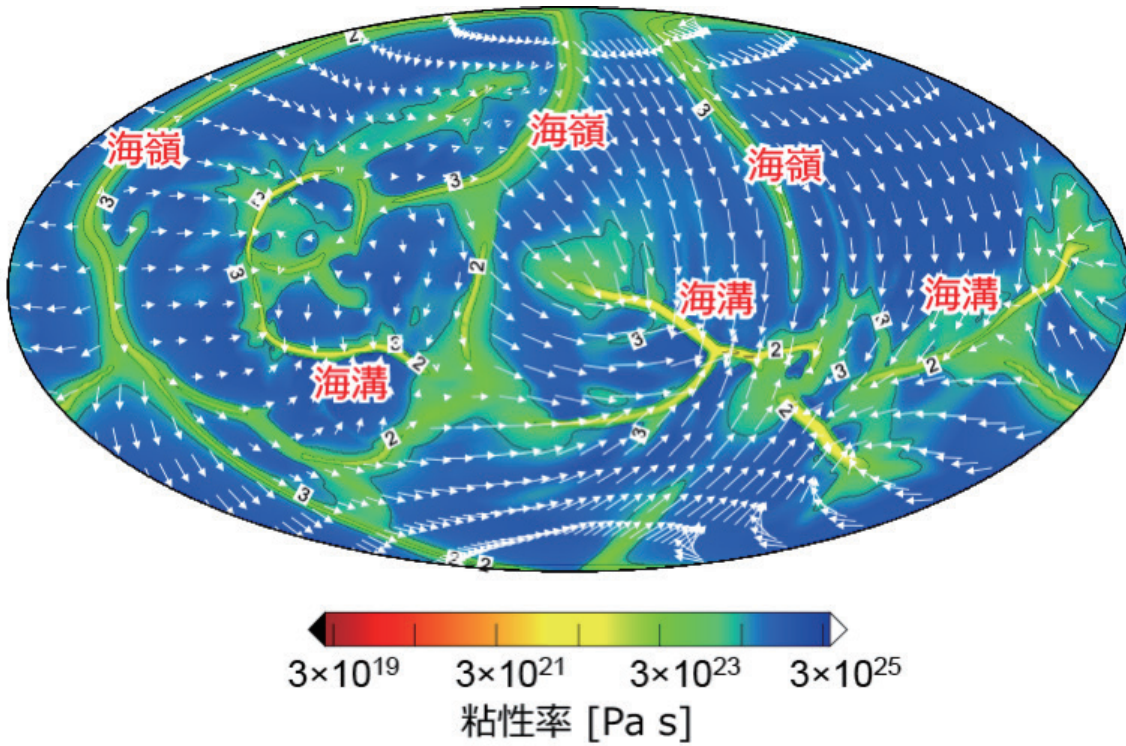
地球史において大陸は離合集散を繰り返し、5～8億年周期で超大陸が形成されてきた。最近私たちは、精密な地質学的・古地磁気学データから復元された2億年前の超大陸パンゲアを考慮したマントル対流の数値シミュレーションを行い、過去2億年間の大陸移動の歴史を再現した（図2）。そして、

パンゲアの分裂から現在の大陸分布に至る大陸移動の過程で最も大きな出来事であるインド亜大陸の高速北進とユーラシア大陸への衝突も再現され、プレート運動や大陸移動の原動力として従来まで考えられていたスラブ引っ張り力だけではなく、表層のプレートの配置や水平サイズに規定される大規模なマンツルの流れが大陸プレートの底面を引きずる「マンツル曳力」も重要であることが明らかになった。また、超大陸の分裂は、超大陸直下のマンツルに溜まった高温の熱がきっかけとなることもわかった。

地球史を通じて、マンツル対流は地球中心核（コア）の熱対流運動とも相互作用し、さらに地球環境変動や生命進化にも影響を与える地球磁場の変動がマンツル対流の変動とも相関があることが知られている。マンツルと外核の構成物質である岩石と流体鉄の粘性率とそれらの流れの時間スケールが大きく異なるシステムでの熱対流運動を一つのシステムでシミュレートするには多くの困難があるが、最近私たちは、地球のマンツルと外核を想定した二層間の熱対流運動が相互作用し合う様子を再現することに成功した（図3）。今後、このようなシミュレーションは、先に述べたプレート運動や大陸移動など現実的な要素を系統的に考慮していくことによって、地球の表層活動と内部ダイナミクスとの相互作用への理解がさらに進むものと考えられる。

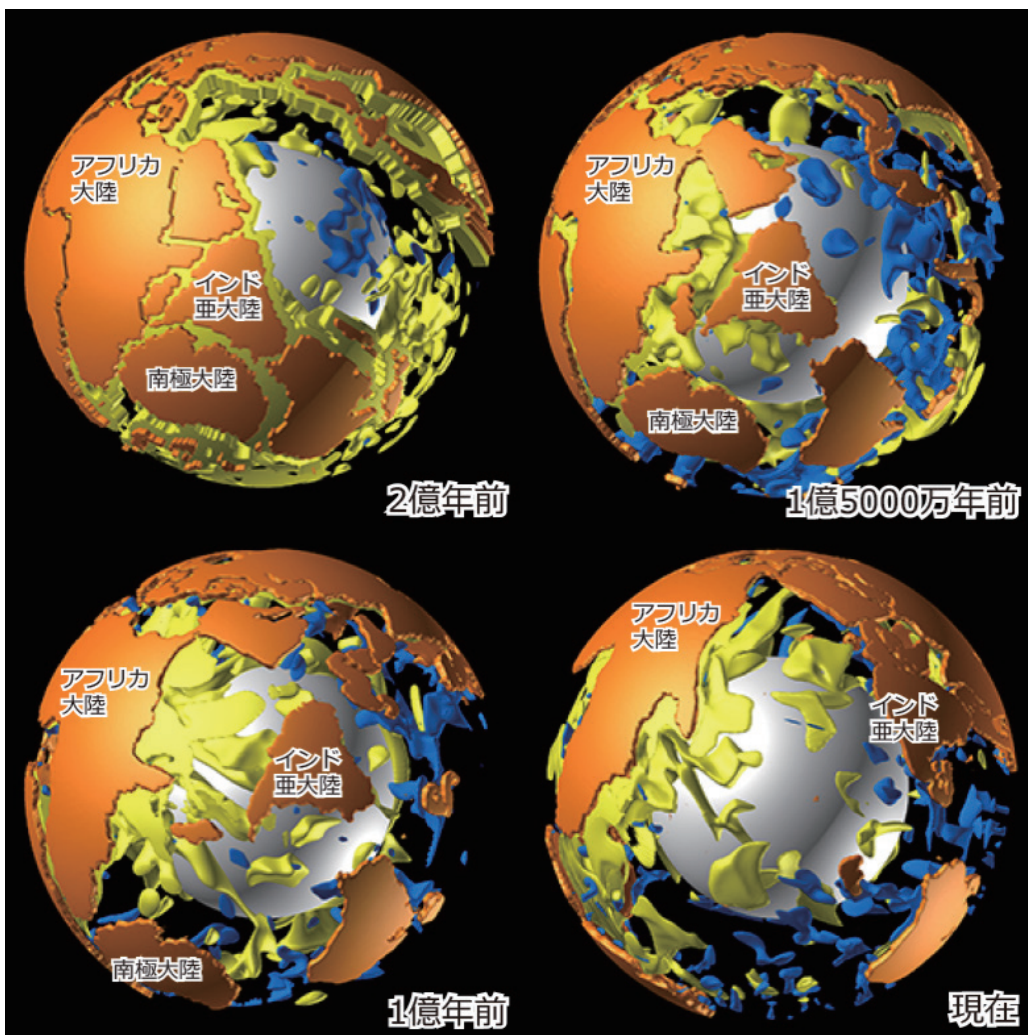


Abstractの図 プレート運動を考慮したマンツル対流の数値シミュレーション



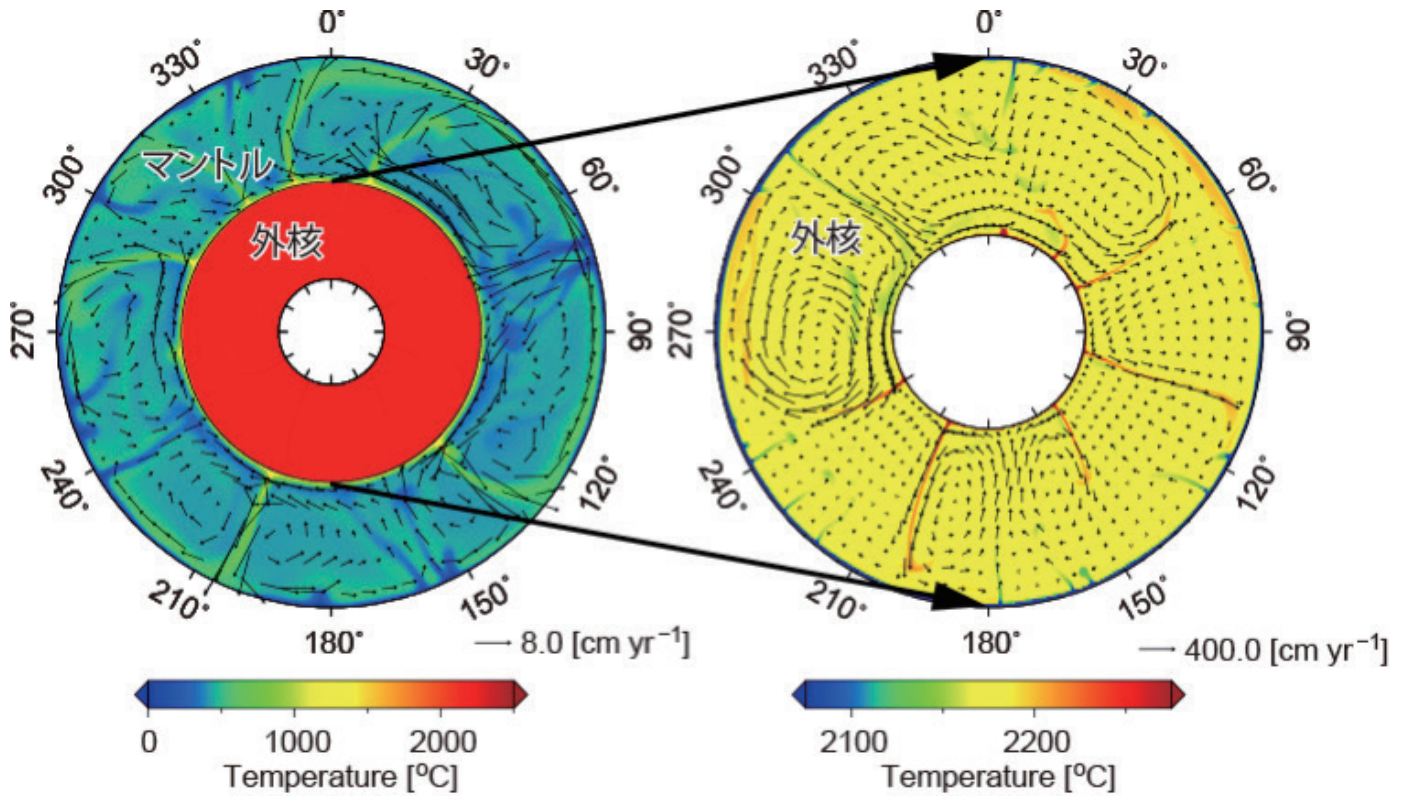
Yoshida & Santosh (2011) Earth-Rev. Sci.

図1 海洋プレートの運動を再現するマントル対流の数値シミュレーション結果の一例 (Yoshida and Santosh, 2011, Earth-Sci. Rev.). 地球の表層の粘性率の分布を示し, 青色は粘性率が高いプレートに相当する領域, 緑色から黄色は粘性率が低いプレート境界, つまり, 海嶺に相当する発散境界, 海溝に相当する収束境界, 及び横ずれ境界に相当する領域を示す. 大陸プレートは考慮されていない.



Yoshida & Hamano (2015) Sci. Rep.

図2 過去 2億年間の大陸移動の歴史が再現されたマントル対流の数値シミュレーション結果の一例 (Yoshida and Hamano, 2015, Sci. Rep.). 2億年前, 1億5000万年前, 1億年前, 現在の時間に相当するスナップショットを示す. 表層の茶色の領域は大陸分布, 中心の白い球面はコアの位置を示し, マントル内部の青色と黄色の等値面はそれぞれ周囲のマントルよりも低温, 高温であることを示す.



Yoshida & Hamano (2016) Phys. Fluids

図3 高粘性層(マントル)と低粘性層(外核)の熱対流運動を一つのシステムでシミュレーションした結果の一例 (Yoshida and Hamano, 2016, Phys. Fluid). 左の図はマントルと外核の温度場を示し, 右の図は外核のみを拡大したもの. 青色が低温, 赤色が高温を示し, 矢印は対流速度の向きと大きさを示す.