

大陸とマントル対流との相互作用

東京大学 理学部 地球惑星物理 柳沢孝寿 (Takatoshi Yanagisawa)

浜野洋三 (Yozo Hamano)

E-mail : yanagi@gpsun01.geoph.s.u-tokyo.ac.jp

1 はじめに

地球は中心から内核、外核、マントル、地殻という層構造を持っている。このうちマントル部分は地球半径の半分近くを占めている。マントルは岩石からできていて固体であるが、地質学的な時間スケールでは流体のように振る舞い、流動現象が起こっていると考えられている。マントルの運動は基本的には熱対流である。しかし、その形状・スケールなどのため上下の温度を固定した箱の中の流体の単純な熱対流とは以下のような点で異なっている。球殻内の対流であること、 Pr 数が高いこと、粘性が温度によって大きく変化すること、相転移があること、内部熱源があること、表面にプレートあるいは大陸が存在すること、境界条件が時間とともに変化すること、などである。これらの効果を全て同時に考えることは困難であるし、複雑すぎて現象の本質を理解することにはつながらない。そこで、それぞれの効果を加えた系での熱対流は単純な熱対流とはどのように異なるか、という観点から様々な研究が行われている。ここでは我々の研究結果から、境界条件の空間的・時間的な変化がある系での熱対流について述べる。

最近では、マントルの地震波速度構造を詳細に調べ、場所による地震波速度の差を温度の差ととらえることで、マントル対流の具体的なイメージが得られるようになってきた。地震波による結果と本研究の結果との関係についても述べる。

2 系の設定

地球表面には大陸と海洋という構造が存在するが、地震学が明らかにしたことによれば、大陸はその下部 200~400 km の深さを含めて海洋部分とは異なる物質で構成されている[1]。そして大陸はそのような「根」と一体化しマントル対流に浮いていると考えられている。マントル対流の熱境界層の厚さは典型的には海洋プレートの厚さである 100 km 程度である。しかし、大陸部分ではこの「根」の存在のためマントル対流にとって余分の熱伝導層があることになる。よって大陸部分では海洋部分に比べて内部の熱を逃がしにくいと考えられる。このような大陸の存在が熱的にマントル対流にどう影響するかということを考察するため、地球を単純化し物理的に言えば「境界に熱の逃がしやすさの不均質がある場合の対流現象」を室内実験によって調べた。同様な考えに基づく研究として Gurnisら[2,3]による数値計算、Guillou and Jaupart[4]による室内実験がある。本研究ではそれらで十分に調べられていなかった現象の Ra 数依存性や対流パターンの時間変化に着目した。

3 実験方法

横200mm・奥行き25mm・高さ0~60mmの亚克力製の容器の上下の温度をそれぞれ一定に保つ。さらに上側の境界の一部には薄い断熱材を貼り付け、水平方向に熱の逃げやすさの不均質を作る。断熱材は地球では大陸に相当する。十分に時間が経過した状況で、対流セルのアスペクト比を測定した。また、断熱材の位置を瞬間的に移動し、その後の対流パターンの変移を観察した。対流を調べる手法として、感温液晶による温度場の可視化方法を用いた(たとえば[5])。この方法では、対流パターンを温度と速度の両方で見る事が可能である。

4 実験結果

4-1 平衡状態・対流セルの形

まず、断熱材のない様な境界条件では、 Ra 数が高いほど縦長の対流セルになる。

上側の境界に断熱材による不均質があると、断熱材の水平スケールが対流の熱境界層の厚さ以上であれば、その場所が対流の上昇域になる。つまり断熱材は対流パターンを規定する働きがある。

さらに、断熱材のサイズを長くしていくときの対流セルのアスペクト比の変化を測定し、次のような結果を得た(図1)。

- ・断熱材が存在するとその下の対流セルは断熱材の長さに応じて横長になる。
- ・どの程度横長になるかは Ra 数に依存し、高い Ra 数の場合の方が横長の対流セルになりやすい。そして対流層の厚さの4倍程度まで長くなる。

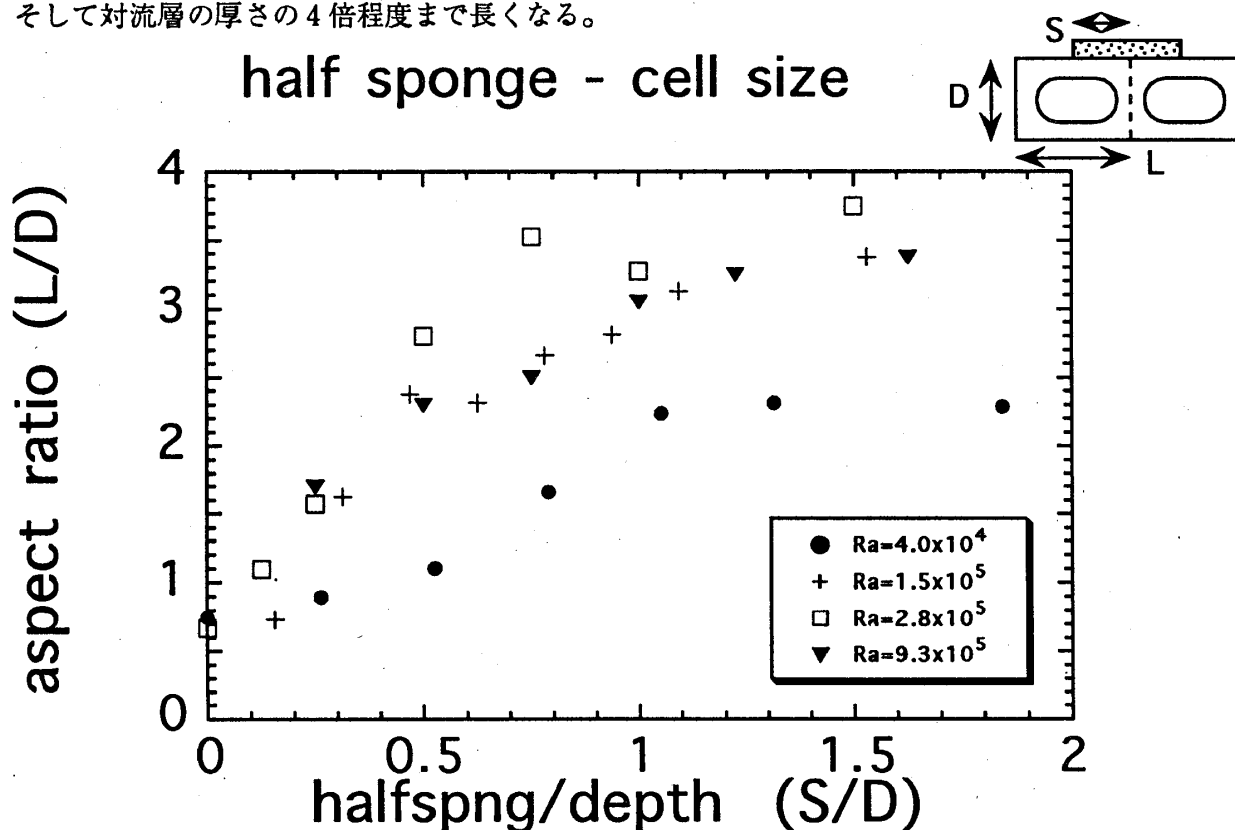


図1 断熱材の長さ対対流セルのアスペクト比の関係

4-2 遷移状態・パターン変化の時間

断熱材の位置を変えると対流パターンはそれに対応するように変化し、最終的にはその新しい位置に上昇域がくる。これは固定された断熱材に対する熱的な平衡状態の達成である。しかし、断熱材が対流運動に乗って動くような状況を考えると、断熱材は流体層の表面を対流に乗って下降域に運ばれていく。そして下降域に落ちて力学的な平衡状態を達成する。ここでわかるように熱的な平衡状態と力学的な平衡状態では断熱材と対流パターンの位置的な関係が全く逆である（図2）。そこで、これら二種類の平衡状態が達成されるまでの時間をそれぞれ実験的に測定し、両者の関係を調べた。

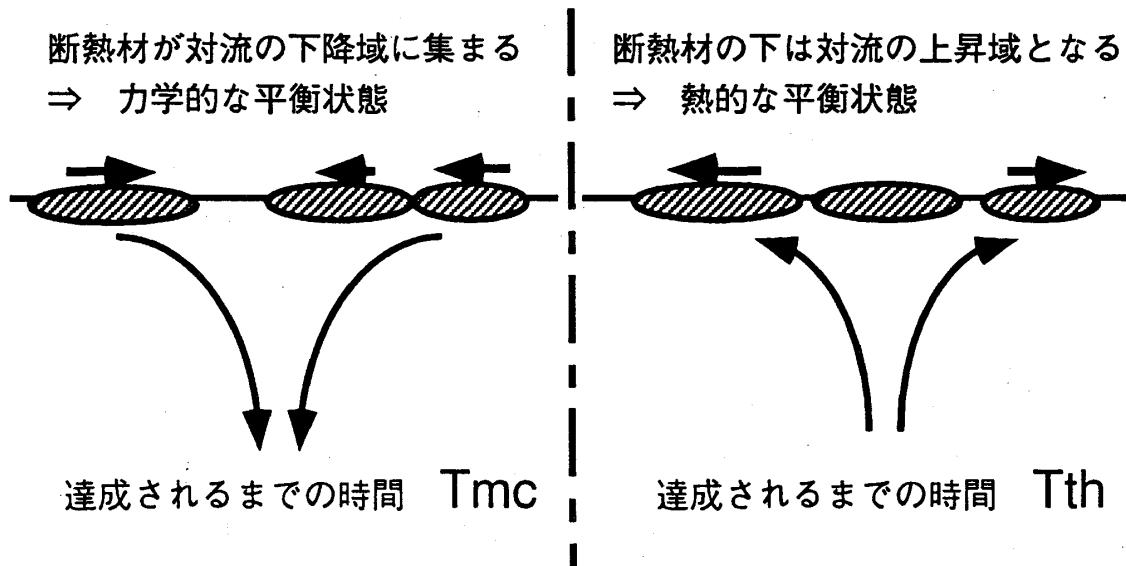


図2 対流パターンと断熱材の関係。

(左) 力学的平衡状態、(右) 熱的平衡状態。

力学的な平衡状態の達成時間については、対流流速を測定し対流層の厚さを移動するのに要する時間に換算した。その時間は Ra 数の -0.5 乗に比例する。熱的な平衡状態の達成時間については、断熱材の位置を対流層の厚さ程度水平方向に瞬間的に動かしたあと上昇域がその位置にくるまでの時間とした。その変化に要する時間は Ra 数の -1 乗に比例する（図3）。

ここで重要なことはそれぞれの平衡状態までの時間の Ra 数依存性が異なるということ、これはこの研究で初めて明らかになった。この結果、 Ra 数が変化するという事は単に時間の進み方が変わるということではなく、2つの平衡状態の関係が異なってくるということであるといえる。

この結果から、断熱材が対流に乗って動くような状況を考えてみる。まず、 Ra 数が低い領域では、熱的平衡までの時間が十分に長いので、断熱材の位置が移動しても対流の上昇・下降の位置は元のままである時期がある。よって断熱材は対流の下降域に移動していき、力学的平衡状態になる。その後で熱的平衡状態へと対流パターンが変化すると、断熱材は再び対流の下降域へと移動していく。次に、 Ra 数が高い領域では、熱的平衡までの時間が短いため断熱材の動きに対流の上昇域がほぼ完全に追いつき、熱的および力学的平衡状態はどちらも完全には達成されないと考えられる。

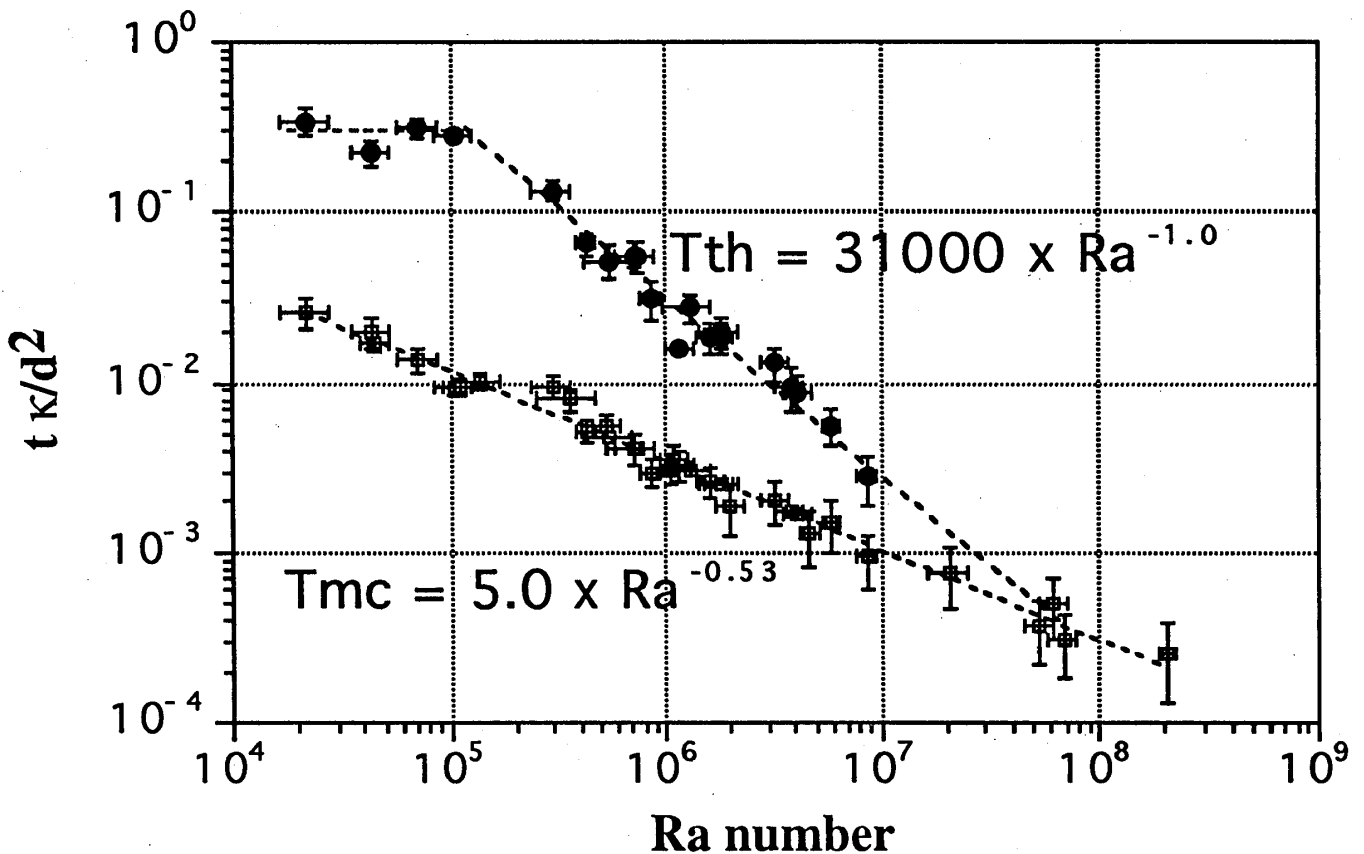


図3 平衡状態の達成までに要する時間の測定結果。

横軸はRa数、縦軸は対流層の厚さと流体の熱拡散率で無次元化した時間。

Tmc : 力学的平衡状態の達成までの時間。

Tth : 熱的平衡状態の達成までの時間。

5 地球への適用

現在のマントル対流を1層の対流、そのRa数を一般に言われている 10^7 として、平衡状態までの時間の測定結果を地球スケールに換算する。すると力学的な平衡状態までは1.5億年、熱的な平衡状態までは4億年となる。力学的な時間の方が十分に短いので2つの平衡状態は交互に達成されるとしてよい。よって現在の地球では、まず大陸が集まってきて超大陸を形成し力学的平衡状態になり、その後で熱的な平衡状態が達成されてそれにより超大陸はまた分裂する、という状況にあると考えられる。このように大陸とマントル対流との相互作用を考えることにより、大陸同士が集まってきて1つになり超大陸を形成し、しばらくするとまた分裂する、という大陸と海洋の分布に関する周期的現象(ウィルソンサイクルと呼ばれている)を説明できる。そして地質学的な証拠から言われているその4億年という周期は、マントルの対流パターンの変化に要する時間であると考えられる。

大陸がマントル対流に対して静止していると、大陸が小さいものであってもその下はマントル対流

の上昇域になる。また大陸の大きさに対応してその部分の対流セルは横長になる。実験結果によれば、1万kmスケールの超大陸がマントル対流に対して静止していれば、その下に地球の半周以上を占める非常に横長の対流セルの組ができることになる。するとその残りの部分では対流セルの組を1つしか作ることができず、超大陸のちょうど反対側に上昇域ができる（図4）。地震波から知られているマントルの構造は波数2という長波長が卓越していて[6]、縦横比が1対1という普通の対流セルとはかけ離れたものである。これは大陸の存在がマントル対流に影響を与えて対流セルを横長にすると考えるとうまく説明できる。また、約2億年前に分裂を開始した超大陸パンゲアは今のアフリカ大陸を中心として存在していたことが知られている（たとえば[7]）。地震波で見えているマントル対流の上昇域はアフリカ大陸とその正反対の太平洋にあり、スーパープルームと呼ばれる。その位置については、次のように考えることができる。パンゲアにより今のアフリカのスーパープルームができ、さらに横長の対流セルができた余りの部分に太平洋のスーパープルームができた。そして、現在は超大陸の分裂からまだ2億年弱しか経過していないので、パンゲアの影響を受けた対流パターンが基本的にはまだ存在しているのである。

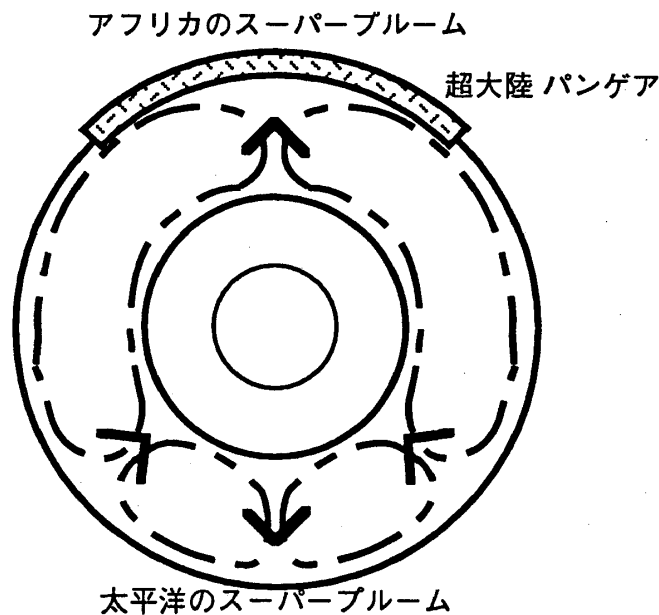


図4 地球の断面図。超大陸の分裂直前のマントル対流のパターン。

このように、 Ra 数が低い方の領域では、大陸が対流に乗って下降域に運ばれ、そこで超大陸を形成するということが可能である。しかし、 Ra 数が高くなる領域では、対流パターンが短時間で変化するので大陸は集まることができず、超大陸は形成されない。地質学的な証拠から、初めての超大陸はおよそ20億年前に形成され、それ以前には小規模な大陸しか存在しなかったと言われている[8]。地球史を通してのマントルの冷却にともないマントル対流の Ra 数は低下してきたと考えられるが、それによって地球は20億年前に、小規模な大陸が動き回るステージから、超大陸の形成・分裂が起こるウィルソンサイクルのステージに進化したと考えることができる。

6 まとめ

物理的には、上側の境界条件に熱の逃がしやすさの不均質が存在する系での熱対流、について調べた。熱的不均質は対流パターンを規定し、対流セルを横長にするはたらきがある。対流運動自体がその境界条件を変化させる場合には、力学的な平衡状態と熱的な平衡状態が存在する。それらは独自のタイムスケールを持つので2つの平衡状態の関係はRa数によって異なってくる。ここで調べたような系は様々な現象に応用できると考えられる。

これらの結果を地球のマントルに適用すると、地震波で見えている現在のマントル対流の姿と、地質学から知られている過去の大陸の分布について一貫した説明を与えることができる。

参考文献

- [1] T.H.Jordan, Continent as a chemical boundary layer, *Philosophical transactions of the Royal Society of London, A* 301, 359-373, 1981.
- [2] M.Gurnis, Large-scale mantle convection and the aggregation and dispersal of supercontinents, *Nature*, 332, 695-699, 1988.
- [3] S.Zhong, and M.Gurnis, Dynamic feedback between a continentlike raft and thermal convection, *Journal of Geophysical Research*, 98, 12219-12232, 1993.
- [4] L.Guillou and C.Jaupart, On the effect of continents on mantle convection, *Journal of Geophysical Research*, 100, 24217-24238, 1995.
- [5] M.Dabiri, and M.Gharib, Digital particle image thermometry: The method and implementation, *Experiments in Fluids*, 11, 77-86, 1991.
- [6] W.J.Su, R.L.Woodward and A.M.Dziewonski, Degree 12 model of shear velocity heterogeneity in the mantle, *Journal of Geophysical Research*, 99, 6945-6980, 1994.
- [7] D.L.Anderson, Superplumes or supercontinents?, *Geology*, 22, 39-42, 1994.
- [8] P.F.Hoffman, United plates of America, the birth of a craton: Early Proterozoic assembly and growth of Laurentia, *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 16, 543-603, 1988.