７．マントル対流とプレート運動

7.1 プレート運動：

プレートとは：(NS72 - 73)
　マントル対流とプレート運動は一体（図 47～50）
プレート境界　(NS74-75)
　３種類の境界　発散境界（海嶺)、収束境界（海溝)、すれ違い境界（トランスフォーム断層)
海洋プレート：中央海嶺で生成され，大陸プレート下に沈み込む．海洋地殻（玄武岩）はエクロジャイト化（カンラン岩より重い）その重みでさらに沈む.
海嶺では受動的にマントル上昇

「プレート」とは力学的（硬さによる）区分
　　リソスフェアとアセノスフェア
　　境界は７０−１５０ｋｍ
　　アセノスフェアの温度は融点に近く、流れやすい。
　　→　プレートテクトニクス

ほとんど変形しない（剛体近似ができる）プレートが地球表面を動き，その相互作用によって地殻の形成が説明できる。　＞＞　ウィルソンサイクル（NS74）

7.2 マントル対流

マントルは固体だが，長時間では流体のように振舞う：
マントル対流と熱境界層＝熱境界層では熱伝導で伝わる
　熱境界層があることによるマントル内の大まかな温度分布を示す。
マントルは基本的には１層対流：ただし，深さ 670km でスラブが滞留
　上部マントルと下部マントルとの境界を横切るときに相転移をする。
マントル対流の様子が地震波による３次元トモグラフィーで見えてきた（図 40 NS78)
マントルプリューム：南太平洋とアフリカの下に上昇域：
環太平洋下降流：太平洋プレートなどのスラブが下部マントルまで下降：図 41

7.2.1 対流とは：浮力 $f = -g\Delta\rho$ で生ずる流れ

　熱対流　温度差による膨張収縮が起き、密度差が生じることによる対流
　　　　　マントルの流れは熱対流

組成対流　組成の違いによる密度差による対流

海流や外核中の流れ、火山の下のマグマの流れ

7.2.2 対流による熱輸送　（資料数図 39）：

伝導，対流，放射：地球内部では対流が最も重要

断熱変化：　物体が外界と熱のやりとりをせずに状態を変化させること

断熱温度勾配：　物体が上昇すると圧力が下がり膨張して温度が下がる。外界と熱のやりとりをせずに上昇した場合の温度勾配。

7.2.3　対流による熱輸送

粘性

流体の流れにくさ　μ [Pa 秒]と書くことが多い

流体の微小部分を考えたとき、微小部分にかかるせん断応力 τ [Pa]と流速 $\boldsymbol{v}$ [m/s]との間には次の関係がある.

$$\tau_{xy} = \mu \frac{\partial v}{\partial y}$$

つまり、粘性が大きいと同じ変形速度をもたらすために大きな力が必要となり、同じ応力でも変形するために多くの時間がかかる

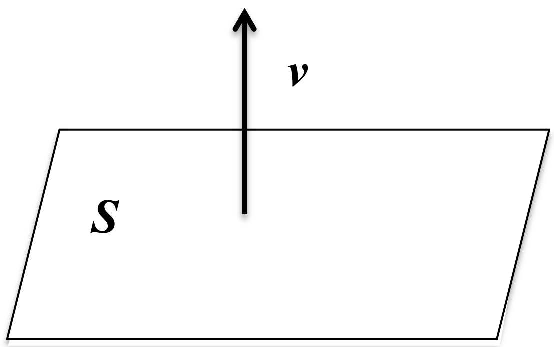
厚さ L の流体層を考え, 下面の温度が $T+\Delta T$, 上面の温度が $T-\Delta T$ に保たれているとする. 熱膨張による浮力 $\boldsymbol{f}$ は、熱膨張率 α [K^{-1}]を用いて、$f = \rho\alpha g\Delta T$ と書け、これが上昇の駆動力となる。(式の展開は以下の通り)

$$\begin{aligned}
f &= -g\Delta\rho \\
&= -gm\Delta\left(\frac{1}{V}\right) \\
&= gm\frac{\Delta V}{V^2} \\
&= gm\frac{\alpha V\Delta T}{V^2} \\
&= g\left(\frac{m}{V}\right)\alpha\Delta T \\
&= \rho\alpha g\Delta T
\end{aligned}$$

上昇部分の体積が L のオーダーとすると、上昇力（浮力）は体積にかかるので $\boldsymbol{fL^3}$,粘性抵抗は表面にかかるので $\tau \boldsymbol{L^2}$ 程度となる。両者が釣り合いの状態になっていると見なせることから、

$$\rho\alpha g\Delta TL^3 = \mu\frac{v}{L}L^2$$
$$v = \frac{\rho\alpha g\Delta TL^2}{\mu}$$

熱対流によって運ばれる単位面積当たりの熱量（熱流束 : heat flux [W/m2]）は定圧熱容量（単位質量あたり）を $\boldsymbol{Cp}$ [J/kgK]として $F = \rho C_p \Delta T v$ となる。



$$F = \frac{C_p \rho v S \Delta T}{S} = C_p v \rho \Delta T$$

7.2.4 レーリー数

レーリー数(Rayleigh 数)は、対流によって運ばれる熱エネルギー F と伝導によって運ばれる熱エネルギーJ の比となる。つまりレーリー数が大きくなると対流が起きやすくなる.

$$\begin{aligned}\mathrm{Re} &= F / J \\ &= \frac{\rho^2 \alpha g C_p \Delta T^2 L^2 / \mu}{k\Delta T / L} \\ &= \frac{\rho^2 C_p \alpha \Delta T L^3}{\mu k}\end{aligned}$$

また動粘性係数 $\nu = \mu/\rho$ と熱拡散係数 $\kappa = k/\rho C_p$ で置き換えると

$$\mathrm{Re} = \frac{\alpha \Delta T L^3 g}{\nu\kappa}$$

となる。おおむねレーリー数が 1000 を超えると対流を起こすとされている。

7.2.5　マントル対流の速度

Fを代入して、$\rho\Delta T$を消去して

$$v = \left(\frac{\alpha g L^2}{\mu C_p}F\right)^{1/2}$$

となる。マントルの諸量（下記）を代入して速度を見積もると

v=7x10^{-9}ms^{-1} = 0.2myr^{-1}

となる。（１年は3.2x10^{7}秒）

（確認）

$$v = \left(\frac{3 \times 10^{-5} \times 10 \times (2.9 \times 10^{6})^{2} \times 8 \times 10^{-2}}{4 \times 10^{21} \times 10^{3}}\right)^{1/2} = (54 \times 10^{-18})^{\frac{1}{2}} = 7.3 \times 10^{-9}$$

　マントルの諸量

L=2900km,　α ＝3x10^{-5}K^{-1},　粘性係数 μ =4x10^{21}Pas,　定圧熱容量 Cp=1x10^{3}Jkg^{-1}K^{-1},　熱流束 F=8x10^{-2}Wm^{-2}