

論文の内容の要旨

論文題目

Numerical Studies on the Dynamics of the Earth's Mantle Convection with Moving Plates

(プレート運動を伴う地球マントル対流のダイナミクスに関する
数値シミュレーションによる研究)

氏名 吉田 晶樹

はじめに (1章)

地球のマントル対流はプレート運動に支配される流れのモードを持つことが特徴である。本論文では、プレート運動の振る舞いを自発的に再現させるレオロジーを考慮したマントル対流の数値計算モデルを用いて、マントルダイナミクスに関する幾つかの問題について考察する。

I. プレート運動を伴うマントル対流パターンとレジームダイグラム (2, 3章)

本研究では、マントル物質のレオロジーを決定する粘性率を温度、圧力、“破壊の程度” (ω) に非線形に依存させる。 ω は、対流運動による粘性散逸が大きい領域で増大し、温度に依存する代表的な時間で回復するものとする。このとき、 ω に対して応力の関係が履歴を持つことにより、流体は ω が十分に小さい場合における高粘性率・低応力の状態と、 ω が十分に大きい場合における低粘性率・高応力の状態に分岐する。

マントル対流層のモデルは、アスペクト比 5、側面反射境界、下面一定加熱の二次元矩形を仮定する。アセノスフェアの粘性率で定義されるレイリー数は 2.52×10^8 とする。粘性率の温度依存性の程度 (E) とマントルの内部発熱量 (H_R) を系統的に変化させると、 E と H_R の関係によって対流パターンが三つのレジームに分類されることが判った。 H_R の大きさに関わらず E が十分に小さい範囲では、低温の上面熱境界層 (リッド) がマントルの上面・下面熱境界層から発生するプルームによって頻繁に破壊される “weak plate regime”, E と H_R が十分に大きい範囲では、リッドがプルームによっても破壊されない “stagnant lid regime” の対流パターンが発生する。一方、 E が中程度で H_R がある値を超えない範囲では、リッドが低粘性率の“プレート境界”領域と、それに囲まれた高粘性率の“プレート”領域に自発的に分離し、地球のマントル対流パターンに似た “plate-like regime” が発生する (図 1)。

II. マントル対流におけるプルームが運ぶ熱流量と熱収支モデル (4章)

マントルの上昇プルームによってマントル深部から地表に運ばれる熱流量を知ることが、マントルの熱収支モデルへの重要な制約条件となる。これまで、プルームが運ぶ熱流量は、観測されるホットスポットスウェルの規模から推定される熱量(約 2TW) [例えば, Sleep, 1990], 及び CMB での熱流量と同程度であるという前提から、プルームは CMB 上の熱的境界層から発生するとされてきた。つまり、マントル対流層の下面熱流量は内部発熱量と比較して遥かに小さい、いわゆる“全マントル対流モデル”が現在まで広く受け入れられている [例えば, Davies, 1999]。しかし、最近の地震学的観測から、マントル深部において化学的に異なる安定な層が存在するモデル(“enriched layer モデル”)が指摘されており、その層は多くの放射性熱源を有する始原的物質からなることが予想されている [Kellogg et al., 1999]。本研究では、これら二つの熱収支モデルについてプルームが運ぶ熱流量の観点から考察する。

プルームが運ぶ熱流量は I の計算結果を用いて対流層中央の深さにおけるプルームテイルの熱輸送量の時間的平均から見積もる。plate-like regime の対流パターンが発生する H_R の範囲で解析を行った結果、プルームが運ぶ熱流量と対流層下面境界での熱流量との比は、せいぜい 1/3 程度以下であることが判った。これは、プルームが運ぶ熱流量はマントル対流の下面熱流量に比べて遥かに小さいことを意味する。本結果を地球マントルに適用すると、対流層の下面熱流量は内部発熱量と同程度かそれ以上(>20TW)であることから、地球のマントル対流は enriched layer モデルの熱収支モデルと調和的であることを示唆する(図 2)。さらに、ホットスポットスウェルから見積もられるプルームの熱流量は、実際にプルームが運ぶ熱流量よりかなり小さいことが判った。これは、リッド下に水平方向に拡がるプルームの熱が考慮されていないためであると推測される。

III. 相転移がプレート運動を伴うマントル対流パターンに及ぼす影響 (5章)

マントルの相転移はマントルプルームの振る舞いに影響を与える。これまでの数値計算は、相転移の効果はマントルの粘性率変化の程度が非常に小さい場合で研究されてきたが、永続的なプレートの沈み込みが存在する対流パターンに及ぼす影響については調べられていない。本研究では、代表的な相転移の効果として、深さ 410km と 660km にそれぞれ α -オリビン $\rightarrow\beta$ -スピネル、 γ -スピネル \rightarrow ペロブスカイト+マグネシオウスタイト相転移による密度の増加による効果とエントロピーの変化による潜熱の発生・吸収の効果を検討する。

高温高圧実験で見積もられている 660km 相境界面のクラペイロン勾配 χ_{660} の範囲において、対流パターンの違いによる効果を調べるため系統的な計算を行った結果、 χ_{660} の程度が plate-like regime に与える影響は weak plate regime に比べて大きいことが判った。このとき、上部マントル中に発生する上昇プルームは、(1)マントル深部からの能動的なプルームが潜熱を獲得して相境界面を突破したプルーム、(2)沈み込むスラブの受動的な補償流によって、下部マントル最上部から潜熱を獲得して相境界面を突破したプルーム、(3)リッド下の二次的下降プルームに起因する上部マントル内の小規模な対流セルの発達に伴って相境界面から上昇する二次的プルーム、の三タイプに分類されることが判った。このうち、(1)と(2)のプルームは始原的同位体成分からなる OIB を地表にもたらすホットスポットプルームの候補と考えられる。(1)のプルームは 410km 相転移面の吸熱反応による負の浮力により相転移層で水平方向に大きく拡がる。これは、II でホットスポットスウェルから見積もられるマントル深部からのプルームの熱流量が実際より小さく見積もられる原因の一つとして考えられる。

IV. プレート運動による水平粘性不均質がジオイドパターンに及ぼす影響 (6章)

マンツルの粘性率構造を決定する手段の一つとして、マンツルの適当な密度異常モデルを仮定し、解析的に得られたマンツルの流れ場から計算されるジオイドと観測ジオイドが整合するような粘性率構造を求める研究が行われてきた [例えば, Hager and Clayton, 1989]. しかし、この研究手法を用いた結果の解釈の問題点として、マンツル全体に現実的な密度異常モデルを仮定すると、沈み込み帯付近における観測ジオイドの正の異常を説明するためにはマンツル深部の粘性率は少なくともアセノスフェアの $10^3 \sim 10^4$ 倍程度必要である。これは後氷期隆起運動から独立に推定されるマンツルの平均粘性率に比べて非常に大きい。また、計算手法の制約上、決定される粘性率モデルは球対称構造にほぼ限定され、粘性率の水平不均質 (LVV) がジオイドに及ぼす影響についてはこれまで明らかにされていない。

本研究では、I で得られた計算結果から得られるジオイドと、温度 (密度) 場は共通だが、LVV を除去するために粘性率を水平方向に調和平均したモデルを用いて再計算した流れ場から得られるジオイドとを比較した。その結果、plate-like regime では本来粘性率が高く速度が小さい沈み込んだプレートが、LVV を除去することにより粘性率が低く速度が大きくなる。このとき、地表面の地形が沈み込み帯付近で押し下げられ、長波長ジオイドの振幅を大きく下降させることが判った。これは従来の球対称粘性構造モデルにおいて推定されるマンツルの深さ方向の粘性率変化を大きく見積もり過ぎていることを説明する。一方、下降プルームと周囲のマンツルとの粘性率変化が小さい weak plate regime では、LVV を除去するとジオイドの振幅は小さくなるものの、正負に影響するほどの変化は見られない。つまり、地球のマンツル対流において観測ジオイドからマンツルの粘性率構造を推定する際、対流モデルにプレート運動に起因する LVV を考慮することが不可欠であることを強く示唆する。

V. プレート運動を伴うマンツル対流パターンの三次元モデル (7章)

マンツル対流の数値モデリングにおける最終目的は、三次元空間において実際の対流パターンやプレート運動を自発的に再現することである。本研究では、応力の履歴に依存するレオロジーを持つアスペクト比 3 の三次元箱型モデルを用いて、plate-like regime の対流パターンが三次元空間においても存在するかどうかを調べる。

まず、対流層を下面断熱とし内部発熱のみで対流を駆動させる。統計的平衡に達した解を初期状態として、次に、能動的な上昇プルームの元となる“プルームの種”を対流層下面中央に与える。その後の時間発展を追うと、初期状態のレジームに関わらず円筒状の上昇プルームによってリッドに“プレート境界”に相当する局所的な低粘性率領域が発生し、高粘性率の“プレート”部分が剛体的に運動する。その結果、統計的に非常に安定な plate-like regime の対流パターンが三次元空間においても存在することが判った。マンツル対流層内部ではプレートの沈み込みにより、実際の沈み込みスラブと調和的なシート状の下降流が観察される (図 3)。

本論文の結論 (8章)

本論文の結果から、plate-like regime の対流パターンでは、熱収支モデルの決定やマンツルプルームの振る舞い、及び地表面観測量の解釈に対して、従来の weak plate regime の対流パターンとは異なる重要な制約を与えることが明らかになった。

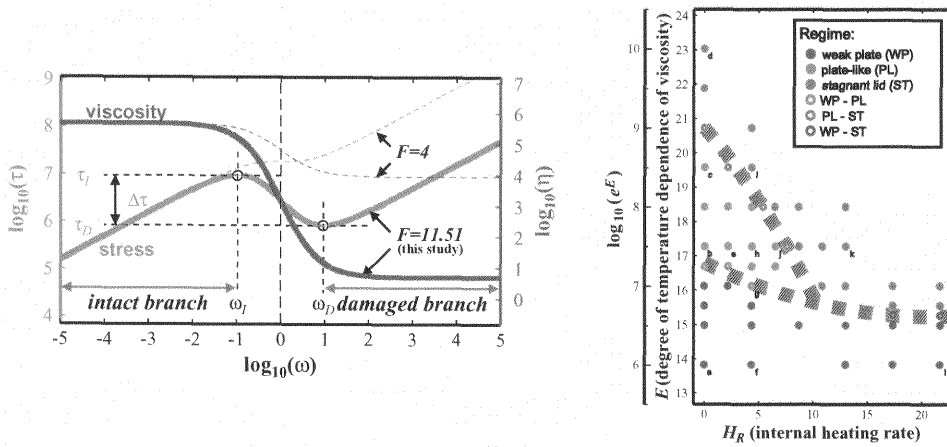


図 1: (左) 破壊の程度 “ ω ” に対する応力 (赤線), 粘性率 (青線) の関係. “応力の履歴” は, “intact branch” ($\omega < \omega_I$) と “damaged branch” ($\omega > \omega_D$) の二つの branch の間で発生する. (右) E と H_R を変化させた場合の対流パターンのレジームダイアグラム; weak plate (青丸), plate-like (赤丸), stagnant lid (緑丸) regime.

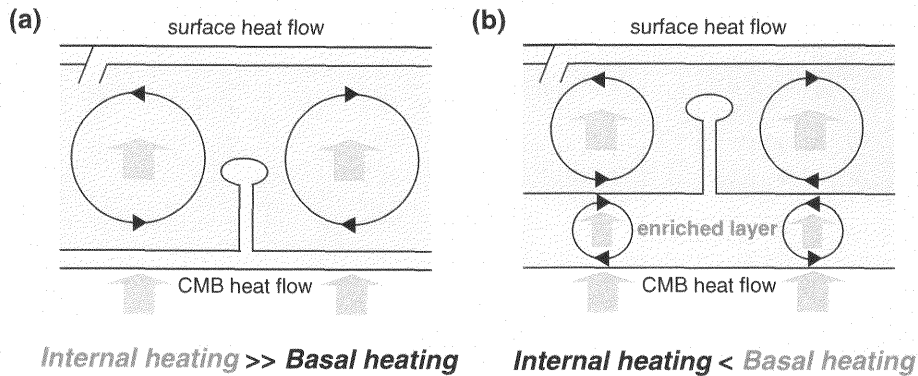


図 2: マントル対流の二つの熱収支モデル. (a) “whole mantle convection” モデル [例えば, *Davies, 1999*]. 下面加熱の寄与は内部発熱に比べて遥かに小さい. (b) 本結果で支持される, “enriched layer” を下部マントル深部に持つマントル対流モデル [例えば, *Kellogg et al., 1999*]. 下面加熱の寄与は内部発熱と同程度かそれ以上.

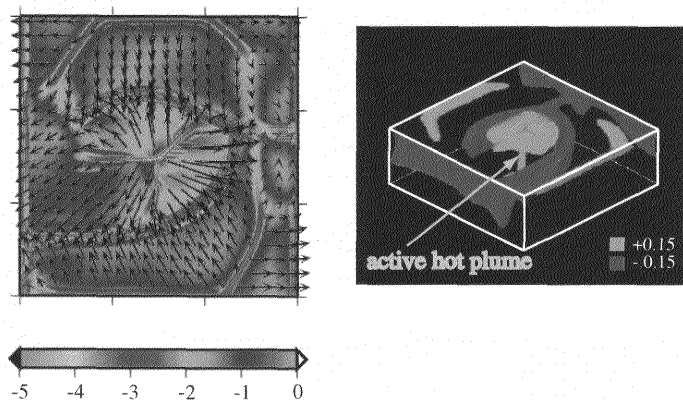


図 3: 三次元箱形対流計算で, plate-like regime に属する対流パターンの一例. (左) 対流層上面における粘性率 (カラーコンター) と速度場 (矢印) の分布. 高粘性率の “プレート” 領域 (紫色) と低粘性率の “プレート境界” 領域 (黄色). (右) 対流層内部の各深さにおける水平平均からの等温度異常面 (紫色は高温, 緑色は低温).