

論文の内容の要旨

論文題目

Numerical Modeling of Mantle Convection with a Complex Heterogeneity: Towards an Integrated Physical and Chemical Theory

複雑な不均質が伴ったマントル対流の数値モデリング：
物理・化学モデルの構築へ向けて

氏名

中川貴司

はじめに

本論文において、地震波トモグラフィーによる地球内部構造と地球化学的分析によって得られている地球内部構造を同時に満たすことができるマントルダイナミクスモデルを提唱し、その熱化学進化への影響について議論を行う。

地震波速度構造と物質循環構造を同時に満たすマントルダイナミクスモデル

ここでは、観測による地震波速度構造と地球化学的分析による物質循環構造を同時に満たすマントルダイナミクスモデルについて議論を行うため、マントル対流中における組成成層の安定性とその地震波速度構造への影響について研究を行った。さらに、D''層が地震波速度構造と物質循環構造に与える影響についても研究を行った。

マントル対流中における組成成層の安定性と地震波速度構造への影響

ここでは、初期に組成成層している状態の安定性について考えるために、初期組成成層している高密度物質と通常物質の密度差を表す無次元数である化学浮力パラメータと高密度物質に存在している放射性熱源の濃集度の2つのパラメータについて、初期組成成層が安定である領域を2次元極座標熱化学対流数値実験モデルを用いて調べた。また、その結果得られる2つのモード（初期成層安定と不安定）が作り出す地震波速度構造について、温度異常と組成異常の関数として定式化された地震波速度構造を調べた。

まず、初期組成成層の安定性について述べる。初期成層をしている高密度物質に含まれる熱源の影響については、熱源の濃集度が通常物質と同じである場合には、化学浮力パラメータ $B(= \Delta\rho_c/\rho_0\alpha_0\Delta T)$ が0.3(密度差2.7%)から0.5(密度差4.5%)の間に初期成層の安定状態と不安定状態の境界があると考えられる。初期組成成層をしている高密度物質に通常物質の10倍の放射性熱源が濃集しているときには、初期組成成層の安定・不安定の境界が化学浮力パラメータが0.9以上であることが分かった。このことが

ら、高密度物質に含まれる放射性熱源の濃集度が初期組成成層に対する安定・不安定の境界に大きくなっていることが考えられる。

次に、この数値実験で得られた結果が地震波速度構造に与える影響について調べた。観測されている地震波速度構造の要請では、強い不均質構造が現われる領域は表面とコア・マントル境界付近であることが知られている。ここでは、地震波速度構造の計算に2つの定式化を用いた。1つは、速度を温度と組成の線形結合で近似する場合、もう一つは、詳細な高圧実験に基づき地震波速度構造の温度・組成に関する高次項を含む場合である。その結果、不安定成層の場合には地震波トモグラフィーモデルの要請について、コア・マントル境界における強い不均質構造を除いて、満たしていると考えられる。それに対して、安定成層の場合には、組成境界面を反映した強い不均質構造が下部マントルに現われるため、トモグラフィーモデルの結果を説明することができない。また、下部マントルの組成については、観測された地震波速度構造の比較の結果と高圧実験による制約によって、パイロライト組成であることが考えられる。

以上の結果をまとめると、従来から提唱されていた下部マントルの深さ 1600km 付近における組成成層がマントル対流に存在している可能性は低いと考えられる。したがって、地震波トモグラフィーで観測された下部マントルの組成異常起源の不均質は、マントル中に浮かんでいる局所化された組成異常の一部を解像したに過ぎないと考えられる。

D”層の影響と海洋島玄武岩の起源

前章では、化学組成が2成分であり、初期成層している場合についての熱化学対流の振舞とその地震波速度構造への影響を調べたが、ここではコア・マントル境界付近において地震波速度構造の不均質が強い領域を考えられている D”層を加えた3成分系における熱化学対流の数値実験を行う。

コア・マントル境界に存在していると考えられている地震波速度が超低速度異常を示している D”層とその上に存在している始原マントル物質のマントル対流中における振舞とその地震波速度構造への影響について前節と同じ方法で調べた。また、地球化学分析におけるマントルダイナミクスモデルで重要な鍵と考えられている海洋島玄武岩 (OIB) の起源についても議論を行う。

D”層はコア・マントル境界で確認されている強い地震波速度構造を実現していると確認できた。そのとき、D”層は全層にわたる成層構造ではなく、上昇流域に局所化された砂山状構造をしていることが分かった。また、D”層が作る砂山状構造の頂点から、長波長構造を持つ上昇流が、また 660km 相境界付近から、短波長構造を持つ上昇流がそれぞれ存在していることが分かった。

地球化学的解析で知られている異なる時間スケールの対流場が存在していることと本研究で得られた結果を比較すると、コア・マントル境界付近から上昇して来るプリュームと遷移層付近から上昇するプリュームの2種類が同時に存在することは地球化学の結果とは矛盾しないことが分かった。また、滞留時間の比較的長い HIMU OIB については、コア・マントル境界起源である可能性を示唆することができた。

これらの結果から、観測された地震波速度構造と地球化学的分析結果の両方を満たすマントルダイナミクスモデルは、D”層が上昇流域に局所化した成層構造を持ち、始原マントル物質によって生じる組成異常については、マントル対流中を風船状構造をしながら存在しているイメージであることが分かった。

地球内部熱化学進化への影響

これまでの議論で得られた地球化学的マントルダイナミクスモデルに従った場合の地球内部の熱化学進化について、コア冷却を含む熱化学対流数値実験モデルを用いて調べた。

組成異常がない場合における熱進化の動力学モデルで提唱されているマントル対流のフラッシングが組成異常を考えた動力学モデルにおいても確認ができた。これは熱対流による場合と同様に相転移面の部分

崩壊によって生じていることが考えられる。この相転移面の部分崩壊による下降流が D'' 層における不均質構造とコア-マントル境界における熱流量不均質を生み出す一つの可能性を示している。これは、コアのダイナミクス構造 (内核の不均質成長や地球磁場の非双極子成分の生成) に大きな影響を与えることが示唆される。さらに、相転移面の部分崩壊によるマントル対流の層構造の変化は地球化学的な構造 (脱ガス量の大きな時間変化など) にも大きな影響を与えていると考えられる。このモデルから計算できるマントルの現在の冷却率の範囲は表面熱流量から推定される地球内部からの熱放出量によって見積もられる現在の冷却率と調和的であることが分かった。これは下部マントルに存在している始原的物質が上部マントルと比べて大量の放射性熱源をもっていることが必要とされることが示唆される。コアの冷却率については、D'' 層に放射性熱源の濃集が小さな場合でないと、ダイナモモデリング等から得られているコア-マントル境界の冷却率をうまく説明することができないことが分かった。

まとめ

本論文で得られたマントルダイナミクスモデルを図 1 に示す。このモデルの特徴は、異なった深さからの上昇流が存在するところである。一つはコア-マントル境界から D'' 層物質を取り込みながら上昇するものであり、もう一つは相境界から始原マントル物質を取り込みながら上昇する流れである。D'' 層物質は孤立パイルという形態で厚さの不均質を作りながら、コア-マントル境界付近に長時間存在することができる。始原マントル物質については、局所的に存在している風船状構造をしており、この構造は相境界に一旦トラップされている。これらを従来から提唱されているマントルダイナミクスモデル (図 2) と比較すると、ブロップモデル (図 2 c) と孤立パイルモデル (図 2 e) が混在していると考えられる。つまり、これはマントル内部に少なくとも 3 つの特徴的な密度差をもつ物質が存在しないと、観測されている地震波速度構造や地球化学的制約条件をうまく説明することができないことを表している。

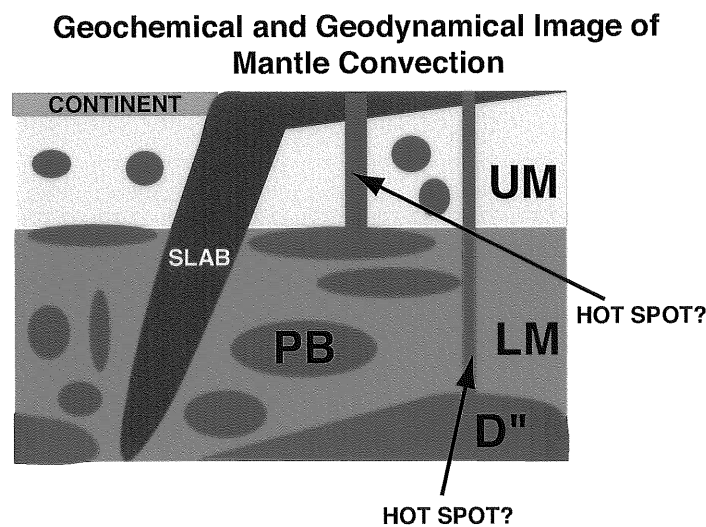
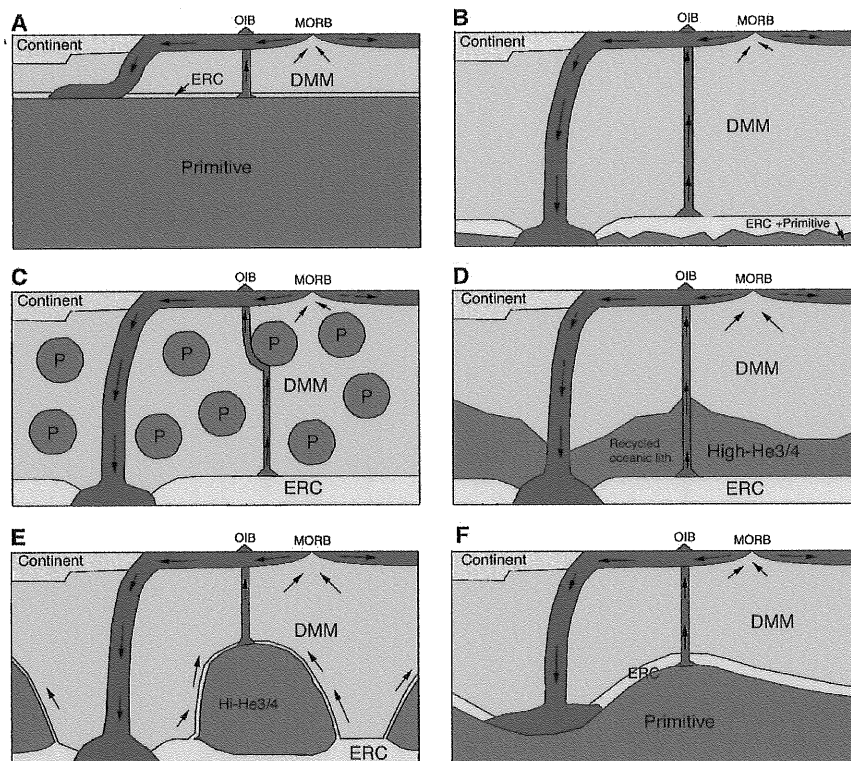


図 1: Geochemical structure of mantle convection. PB: Blob structure of primitive mantle. D'': D'' layer. UM: Upper mantle. LM: Lower mantle. SLAB: Subducting slab. CONTINENT: Continental lithosphere.



☒ 2: Mantle convection model proposed by [Tackley,2000]. a: Traditional geodynamical model. b: Traditional geochemical model. c: Primitive blob mode. d: Complete recycling model. e: Isolated pile model. f: Global layering model.