

## マントル下降流による熱・物質輸送と地球進化過程の数値モデリング ——これまでの成果のまとめ——

浜野洋三（海洋研究開発機構地球内部変動研究センター） 本多 了（東大地震研究所）

小河正基（東大大学院総合文化研究科） 岩森 光（東大大学院理学系研究科）

柳澤孝寿（海洋研究開発機構地球内部変動研究センター） 吉田晶樹（海洋研究開発機構地球内部変動研究センター）

我々のグループでは、マントル対流の数値シミュレーションを実施することによって、沈み込むスラブの挙動が、地球内部の熱・物質輸送と地球進化過程に与えてきた影響を解明することを目指している。数値モデリングの対象は、(1) プレート沈み込み帯に焦点を当てた領域モデル、(2) 2次元及び3次元のグローバル・マントル対流モデリング、の二つに分けられる。(1) では、昨年度から地球深部に沈み込んだ水およびそれに伴う元素の挙動を追うために、マントルに由来する玄武岩質マグマの同位体組成解析を進めている。また沈み込むスラブによって地球深部に沈み込んだ水によって引き起こされるマントルウエッジの活動について、数値モデリングに基づく考察を行っている。(2) の研究では、マントルの進化過程について、本年度は海洋地殻のリサイクリングとマントルの進化の関わりを調べている。3次元球殻マントル対流のシミュレーションでは、今年度は球殻マントルでの対流パターンとスタグナントスラブの形成条件についてのこれまでのシミュレーション結果のまとめを行った。また本研究プロジェクトで開発した新しい3次元マントル対流コードによるシミュレーションによって、粘性の温度変化がある範囲にある場合、最も超波長の次数1のマントル対流パターンが卓越するという結果が示された。

### (1) プレート沈み込みに伴う水輸送とそれにともなう元素の挙動の研究

#### (1-A) 深部に沈み込んだ水とそれに伴う元素の挙動

この研究課題では深部に沈み込んだ水およびそれに伴う元素の挙動を追うために、マントル物質およびマントルに由来する玄武岩質マグマに記録された物質科学的証拠からの地球規模物質循環について制約条件を得るための研究を行っている。本年度は、昨年度までの研究に引き続き、地球深部に沈み込んだ水およびそれに伴う元素の挙動を追うために、マントルに由来する玄武岩質マグマの同位体組成解析を進めた。物質循環の「出口」である海嶺の玄武岩や海洋島玄武岩に、「入り口」としての沈み込み帯からの水およびそれに伴う成分のインプットが現れていないかを調べるために、まず全地球規模の地球化学データベースの構築を進めた。海洋玄武岩につい

て、5つないしは6つの同位体比 ( $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ ,  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ ,  $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ ,  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ,  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  [および $^{177}\text{Hf}/^{176}\text{Hf}$ ]) が同時に測定されているデータセットを、GEOROCデータベース (<http://georoc.mpcg-gwdg.mainz.de/georoc/>)、PetDBデータベース (<http://www.petdb.org>) および最近の文献に基づき収集・吟味した。これらのデータベースの中には、明らかなタイプミス、変質によると考えられる異常値、年代効果による radiogenic ingrowth、Nd同位体比を算出する際の基準値に依存する見かけのバリエーションを示すデータなどが含まれていることが分かった。これらのデータは、文献を参照しながらできる限り排除した。また、海洋島玄武岩については、 $\text{SiO}_2$ と相関を示すトレンド、おそらくは地殻でのAFCプロセス (assimilation-fractional crystallization processes) に対応すると考えられるトレンドを示すものがあるため、 $\text{SiO}_2$ を35から53重量%のものに限ってデータセットに取り入れた。その結果、現在までに、海嶺玄武岩について2794データセット、海洋島玄武岩について1520データセット（いずれも5同位体データセット）が得られた。このデータベースにより、大西洋、インド洋、太平洋の広範囲がカバーされる。対象を現在活動中の海嶺に限ると西太平洋にデータが殆どなかったため、フィリピン海プレート内の活動については、およそ20Ma程度までさかのほる過去のspreading ridgeからのデータも取り入れてある。また、最近発見されたチスピット (Hirano et al., 2006, Science; Machida et al., 2009 (in revision)) のデータも含まれている。図1にデータセットの分布を示す。

この全地球規模のデータセットを、近年、情報科学分野で発達しつつある「独立成分分析」の概念と手法を用いて解析した。大西洋およびインド洋に広がる海嶺玄武岩 (MORB) と海洋島玄武岩 (OIB) の同位体組成空間からは、昨年度報告を行ったとおり、従来の手法では見出せていない新たな構造と2つの独立成分 (IC1とIC2) が見い出された (Iwamori and Albarede, 2008, G-cubed)。今回の全地球規模のデータベースについても、同様の2つの独立成分が見出され、この2つの成分が張る空間は、母集団分散の90%以上をカバーする (図2, Iwamori et al., 準備中)。この独立成分空間においては、

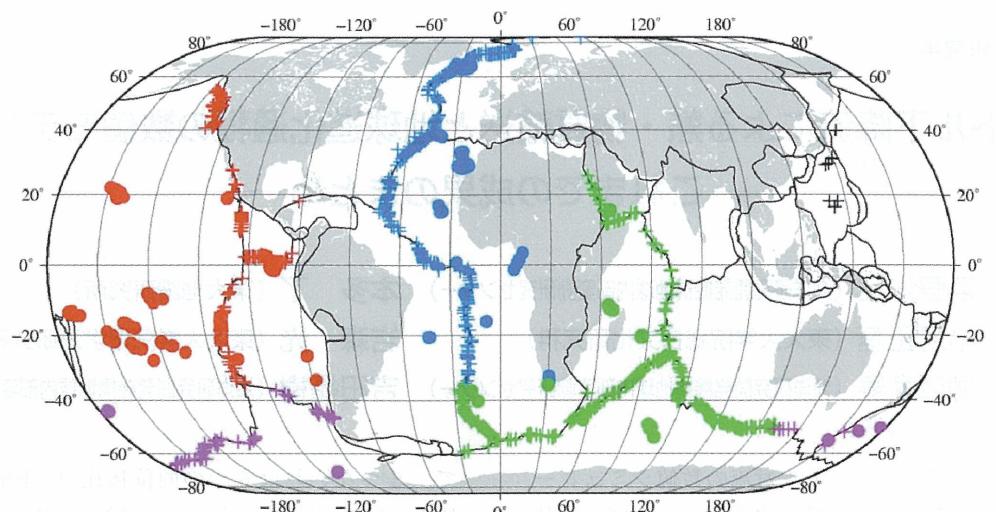


図1 海洋玄武岩（十印が海嶺玄武岩（及びその他）、●印が海洋島玄武岩）の同位体データの分布。地域ごとに色分けされている。

データ分布がhomogeneous joint distributionに近い構造をもち、マントルの同位体不均質が、数多くの「端成分」(DMM, EMI, EMII, FOZO, C, HIMUなど)の相互作用によって形成されているのではなく、2つの元素分別プロセスが相互にプロセッシングしあうことによって形成されていると解釈される。これらの2つのプロセスの実体は、独立成分の化学的性質を考慮した結果、溶融に伴う元素分別と、水溶液-岩石反応に伴う元素分別であることが推測される (Iwamori and Albarede, 2008)。前者はMORBとOIBを分ける主要な要素となっており、対流系の底部にメルトに富む成分が沈積し、しかし放射性元素に富むゆえに温度上昇し、プリュームとなって上昇、OIBをもたらすと解釈される。後者は、かつての沈み込みに伴う水溶液成分に汚染されたマントルに対応すると考えられ、地理的に大規模なドメインを形成すること、またコア-マントル境界付近あるいは下部マントルの地震波速度構造と対応関係があることがわかった。これらの解析結果に基づき、今後、マントルにおける物質循環様式の制約を試みる。「スタグナントスラブ」の5カ年間に、その原理から出発し、データベースの構築、解析へと進んだ本研究は、いわば「地球化学トモグラフィー」として新たな展開が期待される。(岩森)

#### (1-B) 沈みこむスラブから脱水された水の効果

トモグラフィーの結果は地球内部のダイナミクスについていろいろな推測や制限を与える。我々は、これまで東北日本の沈み込み帯のマントルウエッジで見られる低速度層のパターンを、沈み込むスラブから脱水された水によってマントルウエッジが低粘性となり、その結果生じた小規模対流を原因とすると言う仮説により検討してきた。

これまで行って来た沈み込み帯のモデルは、ほとんどがスラブをキネマティックに動かすというモデルであった。この点を改良すべく、本年度はスラブ上面および、プレ

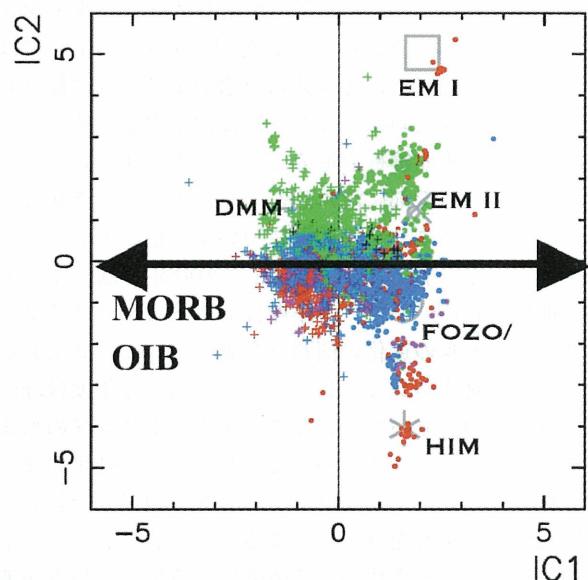


図2 地球規模の海洋玄武岩同位体データベースに見出された2つの独立成分 (IC1とIC2) 空間と、そこでのデータ分布図 (Iwamori et al., 準備中)。IC1は、OIBとMORBを明瞭に分け、IC2は地理的分布（色で区分：図1参照）を分ける。灰色な大きなシンボルはconventionalなマントル端成分を表す。

ート境界の近傍に速度を与え、その他の部分の流れはダイナミックに計算するというモデルを構築した（セミ・ダイナミックモデル）。このモデルでは観測からわかる、プレート速度（海溝の移動も含む）、および、スラブの大体の形状をモデルに組み込む事ができ、また、スラブのスタグナーションも再現できる。また、簡単な三次元モデルの計算も行え、スラブの周りの三次元流れ場の推定に使える。

上記のモデルを使い、これまで研究を行ってきた、マ

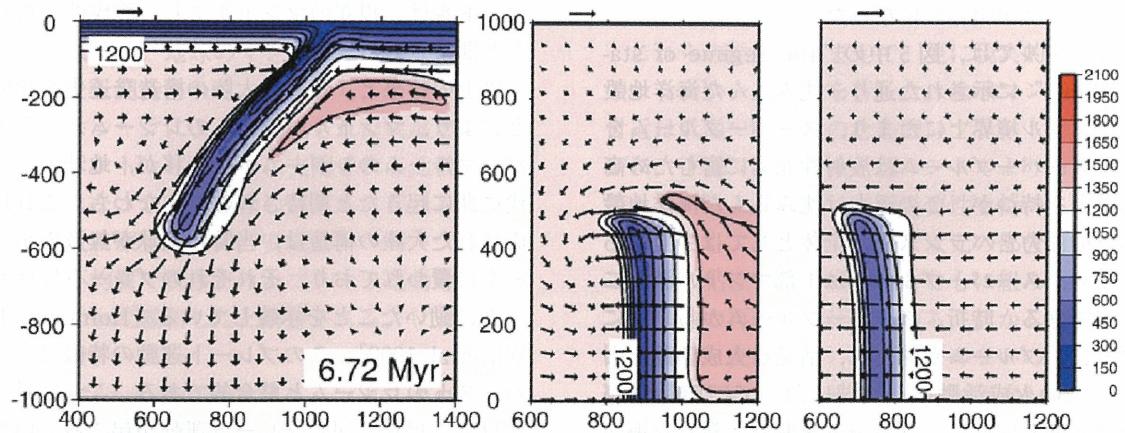


図3 上図は温度場と速度場を示す。スラブは領域の半分だけを占めている。左図は $y=250\text{km}$ の断面図を示しており、真ん中は $z=-200\text{km}$ （深さ $200\text{km}$ ）、右図は $z=-400\text{km}$ （深さ $400\text{km}$ ）の断面図を示している。

ントルウェッジ内に期待される小規模対流に海溝の移動が、どのような影響を与えるかを2次元モデルのシミュレーションで調べ、海溝の移動が、結果にほとんど影響を与えない事を明らかにした（Honda, 2008）。

一方、セミ・ダイナミックモデルを使用して、スラブエッジにおける流れ場を計算したところ、地震波異方性の研究から推定されている海溝に沿った流れは、海溝移動によって相対運動が、ほとんどまかわるような状態でないと実現されない事がわかった。また、海側のプレートの下に前年度考えたような熱い物（軽くて低粘性）がある場合は海溝に沿った流れが生じやすい事を示した（Honda, 2009：図3）。

二次元のセミ・ダイナミックなモデルを用いて、スラブのスタグネーションが、この高温異常に与える影響（高温異常が $410\text{km}$ 異常に停滞している時間）を調べたが、ほとんど影響はなさそうである事がわかった。これは、現象の時間スケールとスタグネーションしている時間との比によって決まっていると思われるが、トモグラフィーから推定されるスタグネーションの時間（～ $10\text{Myr}$ と推定）がスーパープルームが生じた時間（～ $100\text{Myr}$ ）に比較して小さいという考えに基づく。

上述の結果を含んで、図4に、本研究期間の5年間で得られた成果を簡単にまとめると。

基本的には日本周辺における沈み込み帯の様相を観測事実と照らし合わせながら一つのモデル（作業仮説）を築いた事であると考えている。本プロジェクトの前半においては、スラブが持ち込む水によってマントルウェッジの粘性が下がり、小規模対流が生じるというモデルを提案した。そのモデルによる温度異常と東北地方におけるトモグラフィーのパターンに類似関係がある事を示し、また、モデルの高温異常の時空間変化が東北地方に於ける火山分布のそれと似ている事も示した。つぎに斜め沈み込みをモデルに組み込む事により、伊豆-小笠原弧の雁行海山列の成因を議論し、それらが形成後の左横ずれ運動によって雁行配列になった事を示唆した。

プロジェクトの後半においては、沈み込みモデルの改

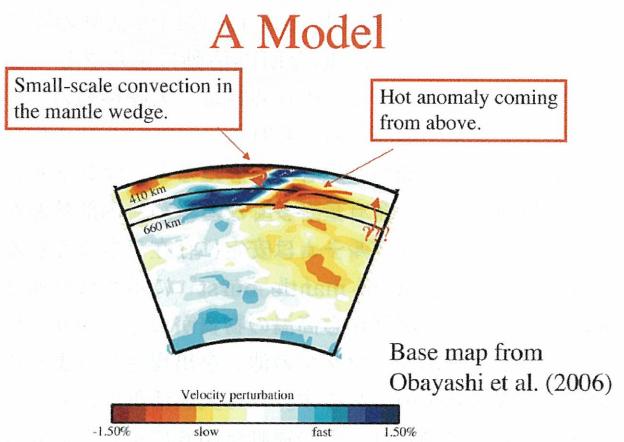


図4 本研究課題の成果に基づく日本周辺の沈み込み帯のモデル

良を行うとともに、海溝側プレートの下に見られる低速度層に着目した研究を行った。その結果、もし、低速度層の成因が温度によって支配されているとするなら、その高温異常は直接、下からきたのではなく水平方向から持ち込まれた高温異常が $410\text{km}$ の相変化面でトラップされているというモデルを提案した。その後、改良した沈み込み帯の三次元モデルを用いて、三次元的流れを推定し、海溝方向の地震波異方性と高温異常に何らかの関係がある可能性を示唆した。

このようなモデルを築く事により、将来の沈み込み帯の研究を発展させる上での一指針となる事が（本多）

## (2) グローバルマントル対流モデリングによる地 球大変動の起源の解明

### (2-A) 海洋地殻リサイクリングとマントルの進化

マントルの進化過程について、本年度は海洋地殻のリサイクリングとマントルの進化の関わりを調べている。プレート運動と火成活動を含むマントル対流の数値モデリングを行い、図5、6に示したように、マントルにリサイクルした海洋地殻が、マントルの内部構造のやその進化、プレートテクトニクスの進化に本質的に重要な役

割を果たしたことが明らかになった。

現在のマントルでは、図5中の“the regime of stable superplume”に示された通り、沈み込んだ海洋地殻はコア・マントル境界上にたまり、スーパープルームを形成する。スーパープルームは放射性元素に富むため高温で熱的浮力を持つが、この浮力は沈み込んだ海洋地殻の持つ組成的浮力をバランスし、全体としては中立である。このため、スーパープルームは下部マントル深部に安定に存在できる。時折、スーパープルームから、図に示したように、プルームが発生し、活発な火成活動を引き起こす。この火成活動は、地球においてLIPs活動が超大陸を割るのと同様に、プレートを割り、新たな海嶺を形成する。プレート運動は、図6に示したように、数十億年にわたって連続的に起こる。ただし、図5や図6(a)に示した間欠的な火成活動による海嶺形成のため、プレートのコンフィギュレーションはLIPs活動の際に大きく変わる。この間欠的なLIPs活動によるプレートのコンフィギュレーションの揺らぎは、大陸移動のウイルソンサイクルの起源と考えられる。

これに対し、地球の歴史をさかのぼると、マントルにおける放射性元素の含有量が多くなるため、内部熱源が強くなり、スーパープルームは安定に存在できなくなる。図5の“the regime of mantle burst”に示された通り、頻繁に、マントル深部から高温の物質がわき上がり（以下バーストと呼ぶ）、「マグマの池」を出現させるような激しい火成活動を引き起こす。この火成活動のため、プレートは頻繁に割られ、その運動は図6に示した通りカオティックになる。また、このカオティックなプレート運動とバーストによるマントルの攪拌と、スーパープルームそのものの不安定性のため、このレジームにおける

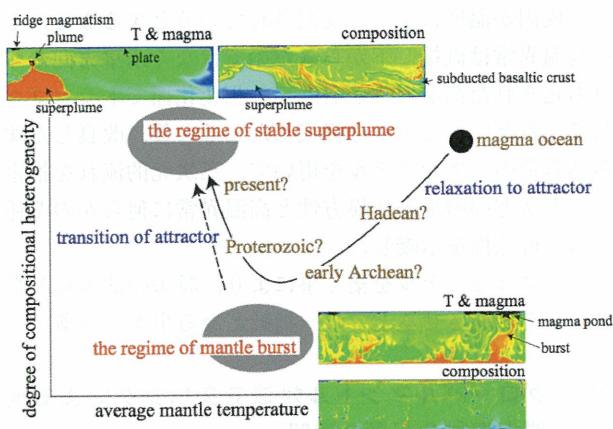


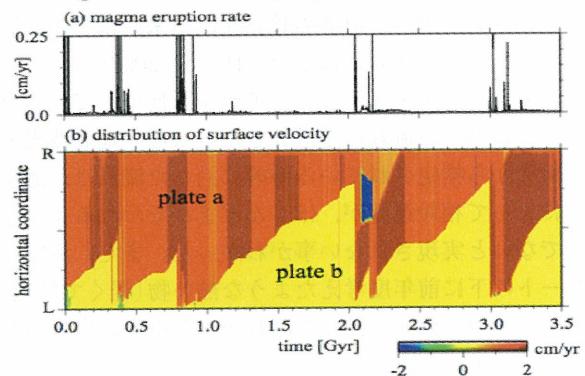
図5 地球のマントル進化の概念図。地球の熱化学的状態は、マントルバーストのレジームから安定なスーパープルームのレジームへのアトラクターの相転移と、マグマオーシャンによって形成される高温で化学分化した状態からのアトラクターへの緩和という二つのメカニズムによって起こったと考えられる。

マントルは、現在のマントルより、組成的に均質であったと期待される。

以上の結果と、地球の大陸の構造発達史を比較することにより、マントルバーストのレジームから安定なスーパープルームのレジームへの転移が、地球の中で、太古代後期に起きたと期待される。すなわち、これ以前に形成された大陸の構造は、当時の地球が無数の小さなプレートに覆われており、それぞれのプレート片はカオティックに動いたことを示唆している [Hofmann, 1989; de Wit et al, 1992]。このプレート運動の特徴は、マントルバーストのレジームと整合的である。これに対し、原生代以降、現在と同じプレート運動が起こっていたことが推測されており [Hofmann, 1988]、この時期、地球は

### Plate tectonics:

#### on the regime of stable superplume



#### on the regime of mantle burst

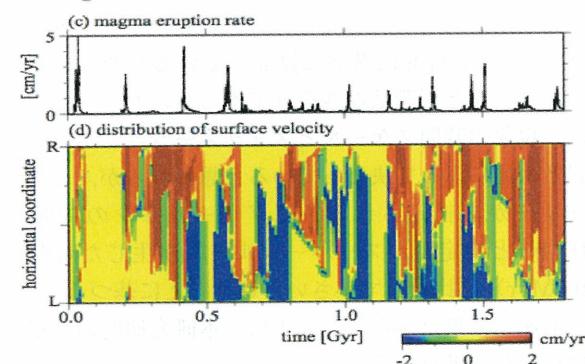


図6 図5に示したそれぞれのレジームにおけるプレートテクトニクスの特徴。色は、プレート速度を表す。図(b), (d)中、各時刻における垂直な線分は、図5のスナップショットに示した矩形領域の上辺に対応し、R, Lはそれぞれ、矩形領域の右上の角、左上の角に対応する。赤い領域では、プレートは角Rの方向に右向きに、青い領域では、プレートは角Lの方向に左向きに動いたことを意味する。(a), (b)で示したスーパープルームが安定なレジームではプレート運動は秩序だっているが、(c), (d)で示したように、マントルバーストが起きるとプレート運動はカオティックになることがわかる。

安定なスーパープルームのレジームに入ったと考えられる。以上の結果から、地球のマントルは、図5に示したように進化したと期待される。すなわち、まず、マントルはマグマオーシャンによって形成された高温で不均質な状態から、マントルバーストに支配される比較的均質でカオティックなプレート運動の起こるレジームに向かって緩和し、次に原生代以降、安定なスーパープルームに支配される不均質で秩序だったプレート運動の起こるレジームに向かって緩和したと期待される。(小河)

#### (2-B) 球殻マントルでの対流パターンとスタグナントスラブの形成

沈み込んだスラブが滞留するため重要な要因は、マントルの660kmの深さに相当するスピネルからペロブスカイトへの相転移であろうと考えられてきた。この相転移のクラウジウス・クラペイロン勾配は負であり、垂直方向の熱対流運動を妨げる働きを持つ。しかし、近年の高圧実験の結果から、この負の勾配は従来考えられていたほど急なものでないことが確立された。ドライな条件では $-0.5 \sim -2 \text{ MPa/K}$ 程度とされている。また、水を含んだ状態の実験では $-2 \text{ MPa/K}$ より急な勾配となる。一方、地震波の解析から $-2 \sim -3.5 \text{ MPa/K}$ という値が出されていて、これはマントル遷移層がある程度の水を含むことを示唆すると思われる。このようなクラペイロン勾配の値がマントルの全球的な流れにどのような影響を持つか、ということを我々は地球シミュレータの能力を活用して広いパラメータ範囲において系統的に調査した。従来の想定よりも緩い勾配がスタグナントスラブの形成に寄与するか、というのが着目点である。

シミュレーションの結果から、マントルの粘性を表すレイリー数を横軸に、クラペイロン勾配の値を縦軸にとって、実現されたパターンを3つに分類したプロットが図7である。ここに示した結果はいずれも、三次元球殻、内部加熱と下部加熱、マントルの粘性一様、660km以外の相転移なし、の場合である。ゼロに近い緩やかな勾配では、相転移は流れを妨げる効果を示さず全層の対流が実現するのに対して、急な勾配では上下マントルの物質交換が完全に妨げられて二層対流となる。この中間のIntermittentとした領域では中途半端に妨げの効果があり、下降流や上昇流が上下マントル境界で一時的に滞留するのが見られる。レイリー数が高い(つまり粘性が低い)ほど、この形態遷移が起こるクラペイロン勾配の値は緩やかとなる。図の縦軸には高圧実験および地震波解析から決められたクラペイロン勾配の範囲を、また、横軸にはマントルの粘性から想定される地球のレイリー数の範囲を示してある。これらの比較から、 $-0.5 \sim -1 \text{ MPa/K}$ 程度のクラペイロン勾配では滞留は起こせないが、 $-2 \sim -3 \text{ MPa/K}$ ではある程度の妨げ効果があることが分かる。ただし、この範囲でも全層対流の領域からそれほど離れていない、滞留は局所的であり実際のトモグラフィーで見られるような大規模なスタグナント

構造を形成するのは困難である。

これらの結果を踏まえて、更に現実的なマントル対流のシミュレーションを行った。地球マントルでは、表面付近は低温で高粘性のため固いプレートとなること、並びに、下部マントルは上部マントルよりも大きな粘性を持っていること、の二点が重要性を持つ。本プロジェクトの中でも二次元モデルや三次元の部分領域モデルでは、これらの粘性変化を相転移とともに組み込んでスタグナント構造の再現に成功している。しかし側面の境界条件が流れ場を支配している面が否めないので、側面のない球殻形状でのシミュレーションが望ましい。ここではグローバルな振る舞いに寄与の大きいと考えられる粘性の層構造を導入し、相転移との相乗効果について調べた。層構造として、リソスフェアに相当する表面の高粘性部分、低粘性の上部マントル、そして40倍大きな粘性を持つ下部マントル、を設定し、粘性の温度依存性も組み込む。さらに、降伏応力を設定して変形しやすい領域が自発的に生成されるようにした。これにより表面が複数の変形しにくい領域に分割され、その境界部分から沈み込むというプレート的な挙動が実現される。基本となる粘性層構造と降伏応力の値を同じにして、相転移の有無によりどのような違いが出るかを調べた。相転移ありの場合にはクラペイロン勾配として410kmに $+2.5 \text{ MPa/K}$ 、660kmに $-2.5 \text{ MPa/K}$ という地震波解析の結果と調和的な値を用いた。図8にその有無の比較を温度のパターンで示す。表面でのパターンの特徴的な大きさには差が見られないが、時間変化や垂直断面には顕著な違いが見られる。相転移なしの場合は、上下マントルは基本的に連結したパターンをとり、滞留はあまり見られない。全球的なパターンの時間変化は粘性が高くて流れの遅い下部

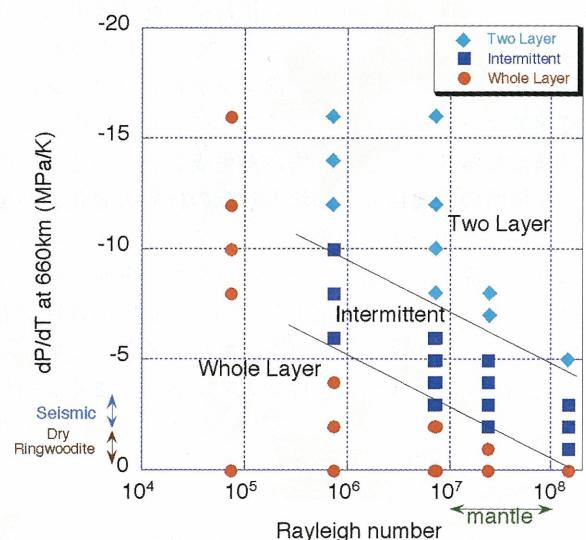


図7 一様な粘性を持つ球殻マントルでの、660km相転移のクラペイロン勾配と対流パターンとの関係。高圧実験あるいは地震波解析によるクラペイロン勾配の値は、現実のスタグナントスラブを相転移のみで説明するのは困難であることを示している。

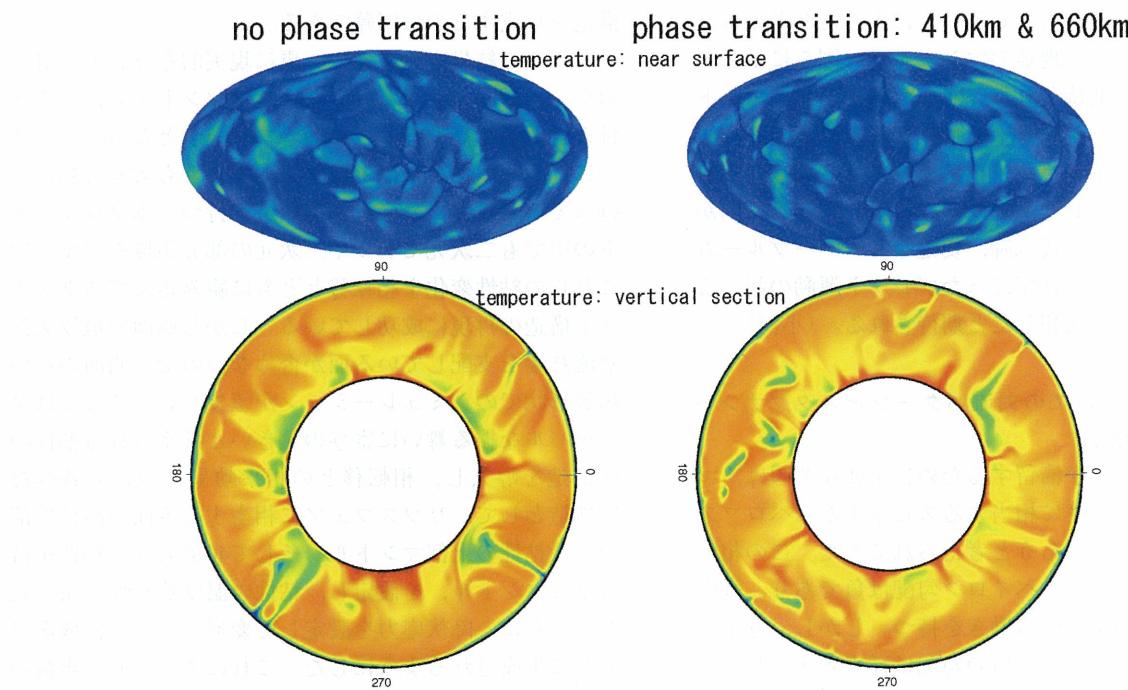


図8：表面でのプレート的な挙動と粘性の層構造を組み込んだマントルでの相転移の有無の比較。(左) 相転移なし。(右) 相転移あり：クラペイロン勾配が、410kmは+2.5MPa/K, 660kmは-2.5MPa/K。三次元球殻での計算の、(上) 表面付近、(下) 子午線断面、で温度場をカラースケールで表したもの。表面のパターンの特徴的な大きさにはあまり差がないが、子午線断面では大きな差が見られる。相転移なしの場合、上下マントルのパターンは連結性が強く、スタグナント構造はほとんど存在しない。相転移ありの場合、上下マントルの流れの連結性が弱く、海溝後退に伴って大規模なスタグナント構造が形成されている。

マントルの時間スケールに対応したものである。一方、相転移ありの場合は、上下マントルの境において大規模な滞留が見られ、上下のパターンの連結性は弱い。これは上下マントルがそれぞれの時間スケールで運動するためである。そして、660kmでの相転移の妨げ効果により滞ったスラブが下部マントルのゆっくりとした流れのため位置を変えないうちに、上部マントルのパターンが短い時間スケールで変化していくことにより、場所によっては横たわるスラブという構造が生成されている。このような場所の表面付近では沈み込みの位置の変化、つまり海溝後退に相当する現象が起こっている。図に見られるように、滞留した部分はその後下部マントルのゆっくりとした時間スケールで落下していく。実際の地球でもこのように、負のクラペイロン勾配による若干の妨げ効果と、下部マントルでの粘性増大の両者がうまく調和して、スタグナントスラブが出来ては崩落していく、と考えられる。(柳澤)

#### (2-C) 三次元球殻内マントル対流の次数1・次数2パターン

ほとんどのグローバルトモグラフィーモデルで示されているように、現在の地球のマントル対流は660km相転移面で流れが一時的に遮られているものの、その温度構造は南太平洋下とアフリカ下の大規模上昇流に特徴付け

られる次数2パターンが卓越している。しかしながら、過去に遡ったマントルにおいても次数2パターンが卓越していたかどうか、あるいはさらに長波長の次数1が卓越する対流パターンが存在していたかどうかは明らかになっていない。

これまでの三次元球殻モデルを用いたマントル対流シミュレーションから、現実のレイリー数 ( $O(10^6) \sim O(10^7)$ ) の条件下で一様粘性率を仮定した場合、現在のマントル対流パターンに近い次数2パターン（二つの円筒状の上昇流とそれらを囲むシート上の下降流）が発生しやすいことが知られているが、相転移や上部・下部マントルの粘性率比など複雑なマントルの物性を考慮しても、次数1が卓越する対流パターンが発生しないことも分かっている。しかし最近の研究で、ブジネスク近似の条件下で粘性率の温度依存性の程度がある範囲内では、マントルの内部熱源を考慮しない場合 (Yoshida and Kageyama, 2006, JGR), 考慮した場合 (例えば, McNamara and Zhong, 2005, GRL) に関わらず、次数1パターン（つまり、マントル対流が一つの円筒状の下降流に支配され、その対蹠点付近で上昇流が集中的に発達するパターン）が発生することが分かった。この次数1パターンは、ゆっくりとした動きの高粘性の下降流によって支配されるために時間的に非常に安定で、自発的に他のパターンに遷移することはない。つまり、次数1

パターンは三次元球殻内対流の基本構造の一つであると考えられる。

そこで本年度は、より詳細に三次元球殻内対流の基本構造を調べるために、レイリー数が $10^7$ の条件下で、より現実的なアレニウス型のレオロジーの式を用いて粘性率比を系統的に変化させた計算を行った。内部熱源は、下部加熱のみの場合と、下部加熱と内部熱源の両方を考慮した場合の計算を行った。エネルギー方程式には、粘性散逸と断熱圧縮による発熱を考慮した（いわゆる拡張ブジネスク近似）。いずれの計算も平均温度、熱流量、RMS速度が平衡になるまで計算した。計算には有限体積法に基づく三次元球殻内マントル対流数値計算コードConvGS (Yoshida, 2008, G-cubed) を用いた。

図9は、ブジネスク近似下での対流パターンの結果 (Yoshida, 2008, GRL) である。内部熱源の有無に関わらず共通して言えることは、(1) マントルの上面と下面の粘性率比が $10^3\sim10^4$ 程度のときに次数1パターンが発生する（図9a），(2) 一様粘性率パターンと次数1パターンの間の限られた粘性率比（内部熱源なしの場合、 $10^2$ 程度）において、“逆”次数2パターン（つまり、現在のマントルとは逆で二つの円筒状の高粘性下降流に支配されるパターン）が現れる（図1b）ことである。拡張ブジネスク近似下においては、粘性散逸による発熱が低温・高粘性の熱境界層の下部を不安定にさせるために対流パターンを短波長構造にさせるが、熱源が下部加熱のみ、あるいは下部加熱の程度が強い場合には、やはり次数1パターンと“逆”次数2パターンが発生するようである。

それでは、現在の次数2のマントル対流パターンを再現させる要因は何か？Zhong et al. (2007, PEPI) は、内部加熱を考慮した次数1パターンモデルで、円筒状の下降流の真上に円形の「超大陸」（高粘性のリッド）を置いた場合に、超大陸縁辺に設定した低粘性帯から沈み込みが発生し、マントル対流が次数2パターンに変化すると主張した。過去の研究 (Yoshida et al., 1999, GRL; Phillips and Bunge, 2005, EPSL) で行われた低粘性帯を持たない超大陸モデルの計算と比較すると、超大陸縁辺の低粘性帯は新しい沈み込み帯の発生とそれに伴うマントル対流パターンの変化に重要ならしい。

一方、本研究 (Yoshida, 2008, GRL) では、次数1パターンモデルに「降伏応力」を模したレオロジーを考慮した計算を行った。こ

こでは内部熱源は考慮していない。降伏応力が比較的高い100MPaと設定した場合では、上昇・下降流の直上付近でのリソスフェアの破壊に止まって、マントル対流は次数1パターンが維持される。しかし降伏応力を50MPaとした場合ではリソスフェアの破壊が進行し、実際の環太平洋のような地球を横断する「沈み込み帯」とそれに伴うシート状の下降流が発生することが分かった（図9c, d）。この「環太平洋型沈み込み帯」の位置は地質学的時間スケールにわたって非常に安定で、同様の対流パターンは内部熱源や410km・660km相転移を考慮したモデルでも発生する。

これらの数値計算結果から、現在の次数2のマントル対流パターンはマントル対流が持つ本来の基本構造ではなく、マントル表面を長期間漂う超大陸の存在によるものか、もしくは、継続的なプレートの運動・沈み込みによって生成されていると推定できる。本研究で得られた「環太平洋型沈み込み帯」の時間的安定性は、少なくとも過去4億年間で環太平洋の沈み込み帯の位置がほとんど変化していないという地質学的結果（例えば、Collins, 2003, EPSL）と調和的である。大陸やプレート運動がない場合の三次元球殻内対流の基本構造と推定される次数1パターンと“逆”次数2パターンが、大陸が最も離散した時代でのマントル対流パターンであるかどうかを解明するためには、今後さらなる詳細なパラメータ・スタディと併せて、大陸の離合集散を考慮したモデル計算を実行する必要がある。（吉田）

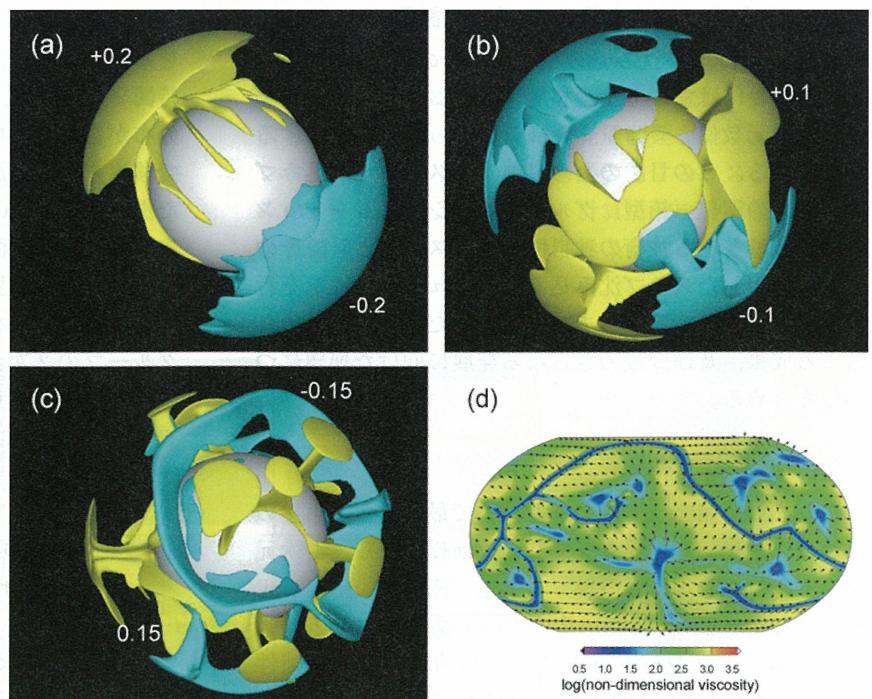


図9 (a) 次数1パターンと (b) “逆”次数2パターンの温度場。(c, d) マントルの上面に降伏応力を考慮した場合（温度依存性による粘性率比は $10^3$ ）の温度場と地表面の粘性率分布。温度場の黄色の等値面は周囲のマントルより高温の領域、青色の等値面は低温の領域を表す。

## マントル下降流に伴う滞留スラブの形成・崩落過程の数値モデリング — 今年度の成果とこれまで5年間の成果 —

吉岡 祥一（九州大学大学院理学研究院）  
鈴木 厚（九州大学大学院数理学研究院）

中久喜伴益（広島大学大学院理学研究科）  
亀山 真典（愛媛大学地球深部ダイナミクス研究センター）

本計画研究では、深さ660kmの相転移境界付近でのスラブの形成・崩壊過程の物理メカニズムを数値シミュレーションによって解明することを目指した研究を行ってきた。3次元モデルでは、3次元スラブ沈み込みモデルの開発グループにより、マントル遷移層付近におけるスラブの振る舞いを支配する普遍的な要因を3次元数値シミュレーションによって明らかにすることを目的とし、沈み込んだスラブの挙動や滞留スラブの3次元的な特徴を理解し、再現することを第一の研究目標に設定して研究を進めてきた。一方、2次元モデルの数値シミュレーションでは、スラブ滞留の物理メカニズムの描像が定量的に描けるようになり、崩落過程の物理メカニズムの解明やレオロジーを反映したより現実的なモデルの構築を行える段階に達しつつある。以下、各研究グループの今年度の成果とこれまで5年間の成果について具体的に述べる。

### 1. 3次元スラブ沈み込みモデルの開発

#### 1-1. 3次元スラブ沈み込みプログラムの開発（箱型）

我々の目的はマントル遷移層付近における下降流の挙動を3次元数値シミュレーションによって明らかにすることである。この目的のために3次元スラブ沈み込みプログラムの開発（箱型）グループは、シミュレーション研究の基盤となる技術の独自開発からスタートし、その成果を活用したスラブ沈み込みのシミュレーションを行ってきた。本稿ではこれまでに開発した基盤技術とそれによる成果、及び今後のさらなる発展に向けた展望についてまとめる。

##### 1-1-1. 基盤技術開発

これまでに開発してきた基盤技術で最も重要なものの1つは、シミュレーション研究の大前提となる、3次元マントル対流シミュレーション手法（Kameyama et al., 2005; Kameyama, 2005）そのものである。マントル対流の数値シミュレーションでは、高粘性かつ非圧縮性（あるいは非弾性）の流体の定常流れ場を各時間ステップで求める部分が計算時間の9割以上を占めている。加えて、マントル物質の粘性率は温度・圧力・鉱物の結晶粒径などによって空間的に大きく変化することから、その定常流れ場を解くための方程式は大変性質の悪いもの

となってしまう。そこで我々は、マントル対流の流れ場を高速かつ精度よく計算する頑健な数値解法を新しく考案することでこの問題を克服した。新しい数値解法は、多重格子法に擬似圧縮性法と局所時間刻み法を組み合わせた反復解法であり、運動量と質量の保存則を同時に満たす速度場と圧力場を逐次的に求めしていく。さらにこの方法をクリロフ部分空間法と併用することにより、粘性率の空間変化がある場合の反復計算の頑健さや収束速度をある程度向上できることも示した。なおこの手法は本研究のモデルの他に、ポストペロブスカイト相転移を考慮した大規模3次元箱型マントル対流シミュレーション（Kameyama and Yuen, 2006）や3次元球殻内対流モデル（Kameyama et al., 2008）にも既に適用されている。

我々の開発したもう1つの重要な基盤技術は、物質の移流を高精度に追跡する数値解法（Furuichi et al., 2008）である。スラブの沈み込み現象をモデル化するにあたり、物質の違いによる性質の違い（例えば鉱物種・降伏する「海洋地殻」と降伏しない「海洋プレート内部」など）を考慮することは極めて重要である。加えて沈み込みの時間発展を扱う上では、流れの時間発展に伴って物質の分布が変化する様子を正確に追跡する必要がある。そこで移流方程式の高精度な数値解法を設計・構築した。新たな方法はCIP-CSLR法（Nakamura et al., 2001）を基本とし、その特徴の1つである完全な保存性に加え、シャープな物質界面の形状もより正確に移流できるように改良を加えたものである。この優れた特徴により、本グループの2次元モデル研究で用いられているCIP(0)法と比べて、より粗い空間解像度でも十分な精度での物質輸送が可能であることが確認できた（Furuichi et al., 2009）。

##### 1-1-2. 滞留スラブを再現する3次元数値シミュレーションに向けて

3次元数値シミュレーションの基盤技術の熟成を受けて、滞留スラブの再現に有効と期待される様々なメカニズムを取り込んだ3次元数値シミュレーションの構築を進めてきた。以下では特に今年度実施したシミュレーション研究の成果についてまとめる。

ここで考える数値モデルの特徴は、プレートの沈み込みと海溝後退を計算領域の境界に沿って強制的に与えて

いることである。多重格子法を用いる都合上、計算領域内部に特異な構造（例えば2次元沈み込みモデルで用いられてきた、スラブをマントル遷移層まで誘導する「流路」など）を人為的に導入することが困難であるが、その反面、3次元計算が高速に実施できるという利点を最大限活かすことができる。数値シミュレーションモデルとして、深さ1320km、縦横比6:1の矩形領域をとり、ブシネスク近似のもとでの熱対流を考える。マントル遷移層を特徴づける2つの相転移として、上面境界から深さ410km及び660kmの位置にそれぞれオリビンスピネル及びポストスピネル相転移を模した相転移を導入する。ただし相転移に伴う潜熱の出入りの効果は無視している。マントル物質の粘性は温度と深さに依存するものとし、加えて深さ660km境界における粘性率ジャンプも考慮している。計算領域のほぼ左半分を海側、残りを陸側とし、この両者の上面境界に異なった速度を与えることでプレートの沈み込みを駆動する。海側での温度の初期条件は、右方向に一定速度で動く半無限体の冷却モデルにより与える。また海洋プレートの上面には降伏可能な「潤滑剤」の薄い層を設け、プレート境界でのすべりの食い違いがスムーズに起こるようにしてある。この物質は海洋性地殻を模したもので、海洋プレートの沈み込みに伴って移流するものとした。海溝後退の効果は、van Hunen et al. (2000) の手法を3次元に拡張することによりモデル化した。この方法の要点は、静止しているマントル深部（下面境界）に対して大陸プレートが海溝後退に対応する速度で左側（海向き）に動いていると考えることにある。これに伴って大陸下の右側壁上に非零な水平方向速度が発生するが、その分布は十分発達した1次元チャネル流の仮定により求めることが可能である。これにより求まった右側壁での水平方向速度分布は、領域全体の流れ場を解く際の速度境界条件の役割も果たす。

ここでは海洋プレートの沈み込み速度に加え、(a) 海溝後退速度、及び660km不連続面での上部マントルと下部マントルとの間の (b) 粘性ジャンプと (c) 相転移

による密度ジャンプ量、の値を変化させて計算を行った。計算結果を図1に示す。(a)～(c)の効果はいずれもスラブをマントル遷移層に滞留させる傾向を持つものの、その中でも(a)の効果がとりわけ大きいことがわかった。具体的には、海溝後退速度が十分大きい場合には、660km不連続面での粘性ジャンプ・密度ジャンプの値に関わらず滞留スラブが形成される。また海溝後退の効果が小さい場合には、(c)相転移による浮力の効果が660km付近で横たわるスラブの形成に重要であることもわかった。これらの結果は本グループの2次元モデル研究で得られた結果と概ね調和的である。

ここで示した研究は、3次元シミュレーションプログラムを2次元モデルに縮小して行ったものであるが、過去に行われた2次元モデルによる研究の単なる焼き直しではないことを最後に強調しておきたい。その理由は、同様の2次元モデルと比べて、3次元モデルへの拡張が可能な数値手法を使っているという決定的な違いがあるからである。本研究で2次元モデルによる成果と調和的な結果が得られたということは、3次元モデルがスラブ沈み込みに関する重要なメカニズムを十分取り入れることができた証であろう。それゆえこの成果を、スラブダイナミクスの高度3次元数値シミュレーションに向けての重要な足掛かりとなるものと考える。

## 1-2. 3次元問題へ拡張可能な2次元スラブ沈み込みモデルの構築

マントル対流は球殻領域の中で起きているものであり、数値シミュレーションモデルも球殻形状を扱えるものであることが望ましい。これまで、デカルト座標系で3次元の任意の形状の領域を取り扱うことのできる有限要素法計算コードの開発を行ってきた。3次元計算は膨大な演算を必要とするため、時間発展問題をシミュレーションするためには相当の時間を必要とする。スラブ沈み込みのシミュレーションでは、計算モデルの構築のために、計算領域を制限するための境界条件や沈み込みの境界条件

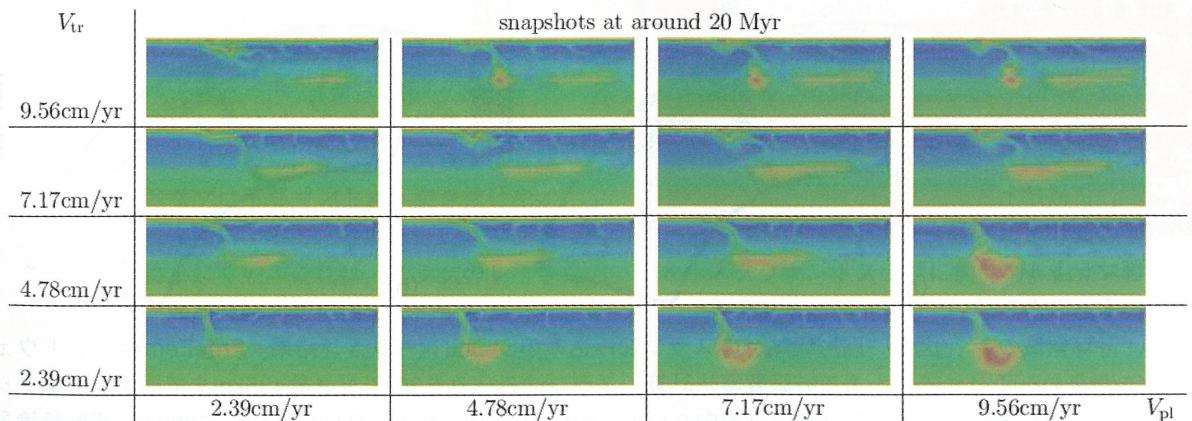


図1 海溝後退の効果を取り入れたシミュレーションの結果の一例。沈み込みプレートの速度 $V_{pl}$ と海溝後退の速度 $V_{tr}$ を変えた計算で得られた、沈み込み開始から約2千万年後の流れ場のスナップショット。図は粘性率の分布を示し、赤に近いほど粘性が高く、青に近いほど粘性が低いことを表す。図は加藤悠祐氏による。

件の設定など検討すべき項目が多い。そのため、まず2次元モデルにおいて計算モデルを構築することを目的とした。2次元での計算においても流体の非圧縮性は流速と圧力の未知変数を直接取り扱う混合法による計算手法を採用した。

スラブの沈み込みを人為的に与えるモデルを採用し、スラブ先端の660km相転移相境界付近での運動をシミュレーションした。3次元モデルへの拡張のしやすさを考慮して、スラブの沈み込みの形状のみを人工的に設定するモデルを構築した。スラブ上面での速度は海洋プレートの動きに整合し、大陸側のプレートは移動しないと仮定するため、海溝付近で特異性が生じてしまう。このため、海溝付近である深さまでスラブ部分と大陸部分の間にスリットを入れ、粘性流体を分離することで、特異性を回避することにした。スリットの終端からスラブ先端にかけては、流体がスラブに沿ってのみ移動するという滑り境界条件を与えており（図2）。スラブのスリット部分では、その上部と下部は二重に未知変数を保持しており、それぞれの流れがスリットをまたがないように滑り境界条件を与えている。また熱輸送に関しては断熱境界条件を設定している。スリットは滑り境界条件の取り扱いを簡単にするため直線的な形状を採用したが、曲線形状に拡張することもできる。計算領域を設定するための左右の壁面の境界条件は流速に関しては応力フリー、温度に関しては断熱条件を設定した。スリットは沈み込み角30°とし、深さ660kmに相転移境界を設定している。

扇型の領域でのテスト計算をおこなった。スラブの滞留とその後の崩落での温度分布を図3に示す。海洋プレートの人工的な沈み込みによりスラブはスリットに沿って流れ、相転移面の上下での粘性ジャンプとクラペイロン勾配の効果により滞留する。この際下部マントル部分ではスラブ直下からのブルームが相転移面の下部で左右に分かれる対流が観察される。上部マントルでのスラブはこの対流との力学的結合の効果も加わって滞留しているとみられる。時間が進むと相転移面での不安定性により、下部マントルでの対流パターンに沿って崩落しCMBへ落下していく。

下部マントルでの上昇ブルームの位置は上部マントルの流れとは独立に下部マントルの対流セルの大きさから決定され、計算領域のほぼ中央に生成する可能性がある。計算領域での海洋プレートと大陸プレートの構成比を変更し、スラブ沈み込

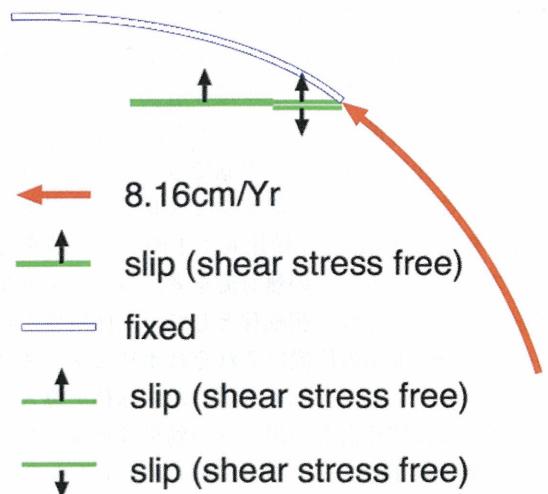


図2 扇形領域でのスラブ沈み込みのシミュレーションのための、スラブ付近の境界条件の設定。

みの位置を計算領域の中心からずらしたモデルで同様の計算を行った（図4, 5）。いずれの場合も上昇ブルームはスラブ沈み込みの直下に現れている。スラブの滞留と崩落過程にはクラペイロン勾配と粘性ジャンプに加えて上部と下部マントルの対流の相互作用が影響を与えているように考えられる。

海溝の後退も滞留を引き起こす要因と考えられる。後退する海溝に沿った座標系から見ることによるシミュレーションを実施しているが、流れ成分から座標変換に伴う剛体運動成分を調整するのみでは、人工的に設定したスリットに生じる応力を解消することができない。座標系を固定して、海溝の後退を実現するためには、海溝後退に伴うスリットの移動を追いかけるためにメッシュを再構成する必要があるが、現実的ではない。移動するスリット部分での流れ場を表現する境界条件を正確に設定する必要がある。

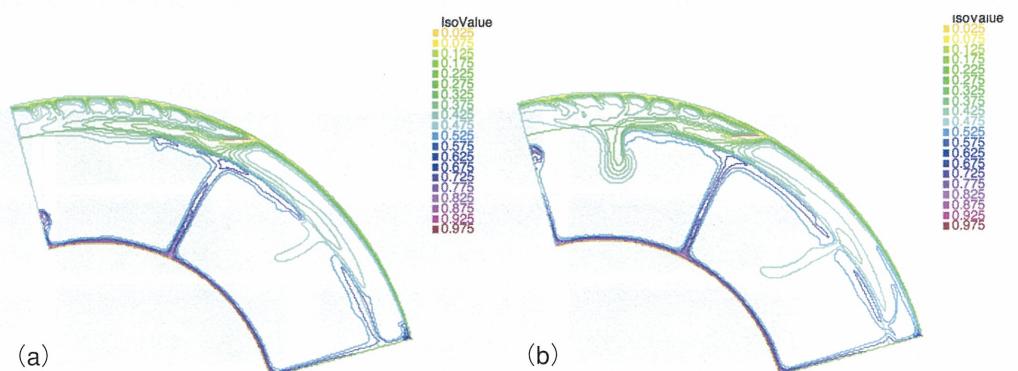


図3 扇形領域でのスラブ沈み込みのシミュレーション結果。FreeFem++ソフトウェアによる有限要素法計算。スラブ沈み込みを30°、深さ約435kmまで設定。海洋プレートとスラブは左向きに8.16cm/yrの速度を設定。 $\text{Ra}=5\times 10^6$ 、660kmに相転移境界を設定。相転移境界の厚さを29kmとし、上部マントルと下部マントルに20倍の粘性ジャンプを導入。クラペイロン勾配は-2.0395MPa/Kに設定。初期温度は無次元温度で地表面を0にCMBを1に、その他の領域を0.5と与えた。

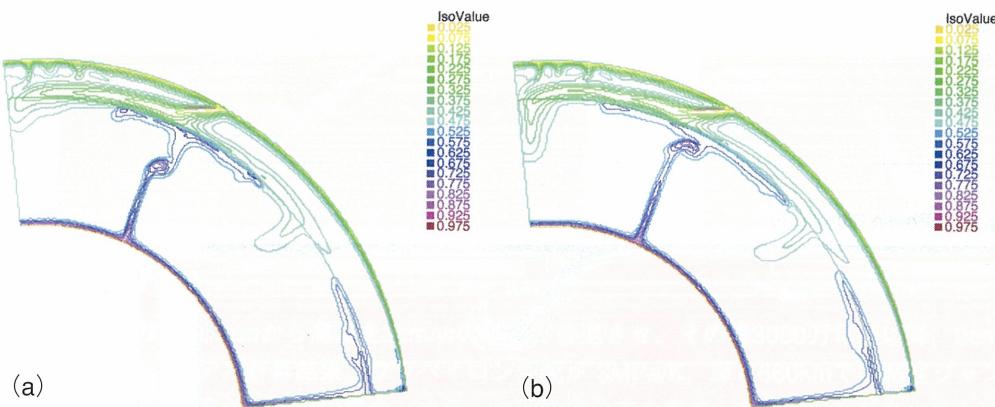


図4 スリットの設定位置の下部マントル対流に与える影響を確認するために、海洋プレートと大陸プレートの構成比を変更し、スラブ沈み込み位置を計算領域の左寄りに設定した数値計算。沈み込み位置以外の計算パラメターは図3, 5と共に。

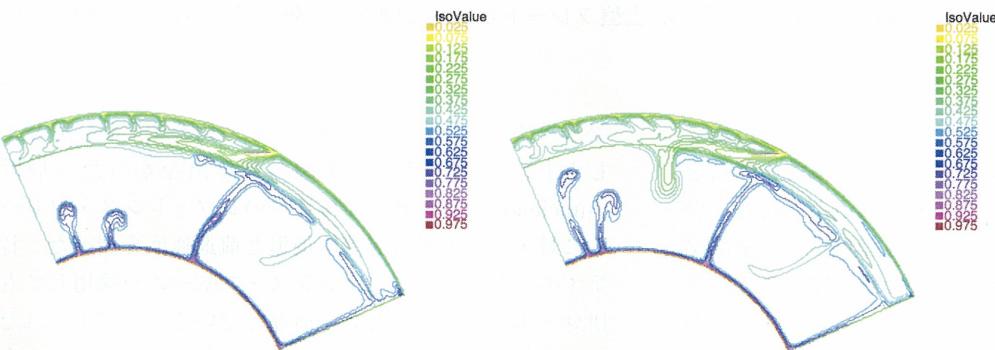


図5 スラブ沈み込み位置を計算領域の右寄りに設定した数値計算。沈み込み位置以外の計算パラメターは図3, 4と共に。

## 2. 2次元高度スラブ沈み込みモデルの構築

### 2-1. スタグナントスラブ形成と崩落のメカニズム

自発的沈み込みモデル (Nakakuki et al., 2008) を用いてスラブの滞留と崩落のメカニズムを明らかにすることを目指して研究を行ってきた。昨年まで広いパラメーター空間で行ったシミュレーションから、様々な構造を持つスラブが形成される可能性を示した。これらは、図6のような力がスラブに働いているとすると説明可能である。まず、高い粘性を持つスラブの滞留には、スラブの負の浮力を打ち消す効果が重要であり、海溝が自由に移動できること、または、下部マントルの高い粘性が必要である。同時に、スラブのレオロジーも滞留と崩落を制御していると考えられる。すなわち、軟らかいスラブほど滞留しやすく、硬いスラブは下部マントルへ突き抜けやすい。反対に、いったん滞留すると、今度は硬いスラブほど下部マントルへ崩落しにくい。これは、スラブのレイリー・ティラー不安定の成長時間が粘性に比例するためである。スラブが硬いにもかかわらず下部マントルへ崩落するのはクラペイロンスロープが0に近く、スラブが水平になり、その硬さのために変形できず、ゆっくり落下する場合である。

スタグナントスラブが形成され、崩落するメカニズムを明らかにすることが出来たが、これまで使用してきた

モデルには次のような欠点があった。それは、海溝の移動速度が速すぎること、下部マントルにスラブが突入すると沈み込むプレートの運動速度が遅くなりすぎること、プレート境界の形状が硬いリソスフェアに固定されてプレートが自由に沈み込み角を変えられないこと、の3点である。本年度は、より定量的な理解を目指して、これらの点についてモデルの改良を行った。主な改良点は、プレート境界の扱いの改良、プレート下にアセノスフェアの導入、沈み込み帯に低粘性ウェッジおよび低強度リソスフェアの導入、物質の組成を100%オリビンから60%オリビンとした点、である。このようなモデルを用いて、スラブ

の粘性率がスタグナントスラブの様式やプレート運動速度に与える影響を定量的に調べた。計算例を図7に示す。

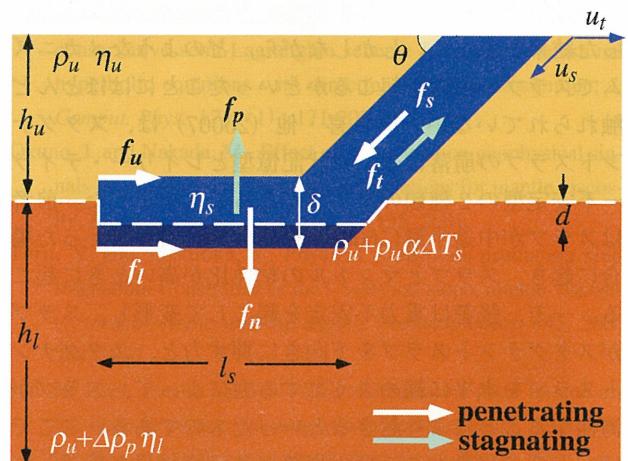


図6 スタグナントスラブに働く力。白がスタグナントスラブを崩落させようとする力 ( $f_s$ : 沈み込むスラブが下向きに押す力,  $f_n$ : スタグナントスラブの負の浮力,  $f_u$ : 上部マントルの粘性抵抗,  $f_l$ : 下部マントルの粘性抵抗) で、薄緑が滞留させようとする力 ( $f_t$ : 海溝の後退によりスラブが伸びようとするので沈み込むスラブが引き上げられる力,  $f_p$ : 相境界による正の浮力) である。

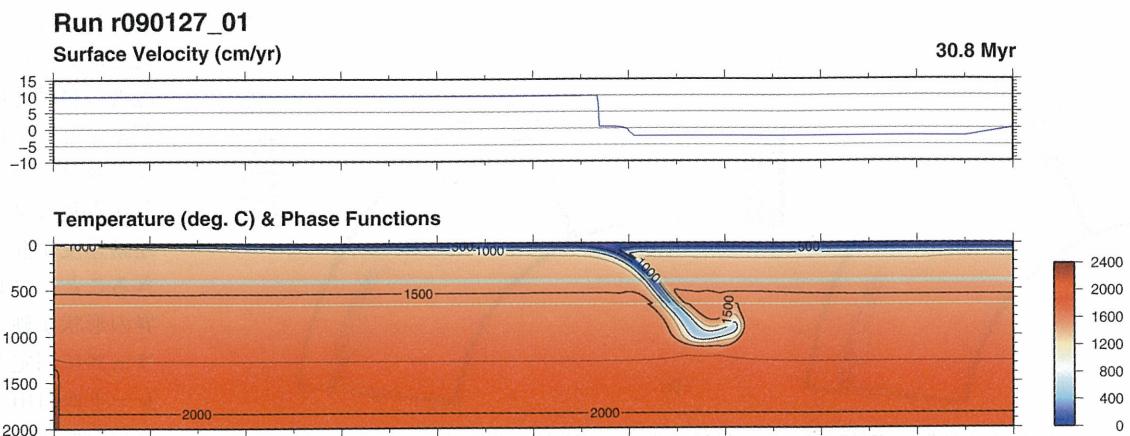


図7 新しく作成したスタグナントスラブのモデル。このモデルの粘性率は、深さ平均をとると後氷期変動から得られたマントルの粘性率（Okuno and Nakada, 2001）と大体一致するよう設定されている。また、下部マントルへ落下したスラブは強度を失い、その粘性率は周囲のマントルとほぼ等しいと仮定している。スラブは形状記憶型の滞留をした後、下部マントルに崩落する。この時、上盤プレートが海側に向かって動いているにもかかわらず、海溝は後退から前進に転ずる。

このモデルでは、これまでのモデルでは定量的に再現できていなかった沈み込むプレートの運動や海溝の移動を観測と合うような速度で起こるようになった。現在このモデルを用いて、スタグナントスラブの粘性率が下部マントルへの崩落に与える影響について調べている。

## 2-2. 海溝の移動がスラブの滞留・崩落に及ぼす効果

スタグナントスラブがなぜ深さ660km直上に滞留し、その後、どのように振る舞うのかを明らかにすることは本プロジェクトの最重要課題である。これまでの研究を振り返ってみると、Christensen (1996) が2次元箱型の熱対流モデルを用いて、スラブが660km相転移面直上に一旦横たわり、その後下部マントルへと崩落するといった結果を示した。しかしながら、どのようなメカニズムでスラブの崩落が起こるかといったことにはほとんど触れられていない。中久喜・他 (2007) は、スタグナントスラブの崩落には、形状記憶型とレイリー・ティラー不安定型の2種類のタイプがあることを示した。前者はスラブが中途半端に660km相転移面に引っ掛けた場合に起き、スラブとマントルの粘性比が高いときに起こる。一方、後者は重力不安定を起こして変形し、スラブがスタグナントスラブを下向きに押す力と、スタグナントスラブを水平に縮めようとする力によって、スラブが湾曲することにより起きるといったものである。ここでは、海溝の移動がスラブの崩落に及ぼす効果を検討してみた。

van der Hilst and Seno (1993) は、隣接している伊豆-小笠原スラブとマリアナスラブで、前者のスラブが深さ660kmで横たわっているのに対し、後者のスラブは下部マントルへ直接貫入している理由として、スタグナントスラブの進化過程を考え、両地域での過去の海溝後退速度の違いに着目し、海溝が前進することで、将来、伊豆-小笠原スラブが下部マントルへと崩落し、現在の

マリアナスラブのようになるといったモデルを示した。しかし、このモデルは想像の域を出なかった。最近、Funiciello et al. (2008) は4つのレファレンス・フレームに対する全世界の海溝の後退と前進速度を調べた。特筆すべきは、どのレファレンス・フレームを採用しても、伊豆-小笠原では、海溝が前進していることが示されたことである。すなわち、海溝が前進しているという事実が確認され、このことがスラブ崩落に関連している可能性が出てきたということになる。

本研究の計算には、Yoshioka and Sanshakokoro (2002) による2次元箱型の熱対流モデルを用いた。深さ400kmまで海洋プレートに相当するガイドを導入し、スラブの斜め沈み込みを与え、ガイドに沿ってスラブは沈み込んでいくものとした。ガイド内では流れの速度を一定とし、深さ400kmを超えるとスラブは自由に振る舞うように設定した。Torii and Yoshioka (2007) はこのモデルに断熱圧縮、粘性散逸の効果を取り入れ、リングウッドダイヤトからペロブスカイト+マグネショウスタイトへの相転移に伴うクラペイロン勾配、660kmでの粘性ジャンプ量、プレートの沈み込み角、海溝の後退速度に対してパラメーター・サーチを行い、スタグナントスラブの形成に及ぼす影響を調査した。その結果、負のクラペイロン勾配に伴う浮力によってスラブが滞留する場合と、下部マントルの高粘性によってスラブが支えられる場合の両極のモードによってスタグナントスラブが生成されるることを示した。

上記のような先行研究を踏まえ、今年度は、Torii and Yoshioka (2007) のモデルに改良を加え、スラブの前進が扱えるようにした。図8は、クラペイロン勾配が-3MPa/K、深さ660kmでの粘性ジャンプがなく、海洋プレートの沈み込み速度が8cm/yrの場合の数値シミュレーションの結果を粘性率で示したものである。まず、水平距離3000kmのところから海溝を3cm/yrの速度で後

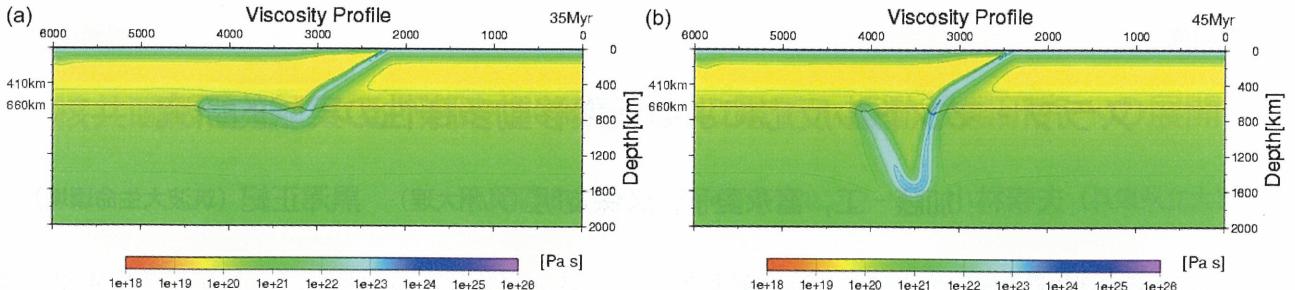


図8 水平距離3000kmから海溝を3cm/yrの速度で後退させ、その後3000万年後以降、2cm/yrの速度で海溝を前進させた場合のモデル計算結果。クラペイロン勾配が-3MPa/K、深さ660kmでの粘性ジャンプがなく、海洋プレートの沈み込み速度が8cm/yrの場合。カラーは粘性率分布を表す。赤線はリングウッタイトからペロブスカイト＋マグネショウスタイトへの相転移境界面の深さを表す。(a) 3500万年後。(b) 4500万年後。図は永野田彩氏による。

退させ、スタグナントスラブを形成させた(図8(a))。海溝後退の開始後、3000万年で海溝後退をストップさせ、その後ただちに2cm/yrの速度で海溝を前進させたところ、スラブが下部マントルへと崩落した(図8(b))。これは、海溝が前進することにより、海洋プレートが滞留したスラブを下へ押し込む力が効率よく増大するためと考えられる。これは中久喜・他(2007)によるレイリー・ティラー不安定型のタイプに近いモデルかもしれないが、その一因として海溝の前進が挙げられることを示したことになる。このモデルはTorii and Yoshioka(2007)の負のクラペイロン勾配によってスラブを滞留させる場合に対して計算されたものであるが、対局の下部マントルの高粘性によってスラブが支えられることによって生じるスタグナントスラブに対しても、崩落速度の違いがあるものの、同様な結果が得られた。さらに詳細なパラメーター・サーチが必要であるが、このように海溝の後退と前進が、それぞれ、スラブの滞留と崩落に密接に関係していることが明らかになった。

#### 参考文献

- Christensen, U.R., The influence of trench migration on slab penetration into the lower mantle, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 140, 27-39, 1996.
- Funiciello, F., Faccenna, C., Heuret, A., Lallemand, S., Giuseppe, E. Di, Becker, T.W., Trench migration, net rotation and slab-mantle coupling, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 271, 233-240, 2008.
- Furuichi, M., Kameyama, M. and Kageyama, A., Three-Dimensional Eulerian method for large deformation of viscoelastic fluid: Toward plate-mantle simulation, *J. Comput. Phys.*, 227 (10), 4977-4997, 2008.
- Furuichi, M., Kameyama, M. and A. Kageyama, Validity test of a Stokes flow solver by fluid rope coiling: toward plate-mantle simulation, *Phys. Earth Planet. Inter.*, in revision, 2009.
- Kameyama, M., ACuTEMan: A multigrid-based mantle convection simulation code and its optimization to the Earth Simulator, *J. Earth Simulator*, 4, 2-10, 2005.
- Kameyama, M., Kageyama, A. and Sato, T., Multigrid iterative algorithm using pseudo-compressibility for three-dimensional mantle convection with strongly variable viscosity, *J. Comput. Phys.*, 206 (1), 162-181, 2005.
- Kameyama, M., Kageyama, A. and Sato, T., Multigrid-based simulation code for mantle convection in spherical shell using Yin-Yang Grid, *Phys. Earth Planet. Inter.*, 171 (1-4), 19-32, 2008.
- Kameyama, M. and Yuen, D.A., 3-D convection studies on the thermal state in the lower mantle with post-perovskite phase transition, *Geophys. Res. Lett.*, 33, L12S10, doi: 10.1029/2006GL025744, 2006.
- Nakakuki, T., Hamada, C. and Tagawa, M., Generation and driving forces of plate-like motion and asymmetric subduction in dynamical models of an integrated mantle-lithosphere system, *Phys. Earth Planet. Inter.*, 166, 128-146, doi: 10.1016/j.pepi.2007.12.004, 2008.
- 中久喜伴益・多川道雄・岩瀬康行, スタグナントスラブの形成と崩落に対するレオロジーの役割, 地球惑星科学2007年連合大会, I214-004, 2007.
- Nakamura, T., Tanaka, R., Yabe, T. and Takizawa, K., Exactly conservative semi-Lagrangian scheme for multi-dimensional hyperbolic equations with directional splitting technique, *J. Comput. Phys.*, 174 (1) :171-207, 2001.
- Okuno, J. and Nakada, M., Effect of water load on geophysical signals due to glacial rebound and implications for mantle viscosity, *Earth Planet Space*, 53, 1121-1135, 2001.
- Torii, Y. and Yoshioka, S., Physical conditions producing slab stagnation: Constraints of the Clapeyron slope, mantle viscosity, trench retreat, and dip angles, *Tectonophysics*, 445, 200-209, 2007.
- van der Hilst, R. and Seno, T., Effects of relative plate motion on the deep structure and penetration depth of slabs below the Izu-Bonin and Mariana island arcs, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 120, 395-407, 1993.
- van Hunen, J., van den Berg, A. and Vlaar, N.J., A thermo-mechanical model of horizontal subduction below an overriding plate, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 182 (2), 157-169, 2000.
- Yoshioka, S. and Sanshadokoro, H., Numerical simulations of deformation and dynamics of horizontally lying slabs, *Geophys. J. Int.*, 151, 69-82, 2002.