

修士論文の要旨

吉田 晶樹 (MASAKI YOSHIDA)

広島大学大学院理学研究科地球惑星システム学専攻・地球惑星内部物理学講座

平成 12(2000) 年 2 月 10 日

題目

Numerical Modeling of Mantle Convection and Surface Tectonics
(マントル対流と表層テクトニクスの数値モデリング)

要旨

本論は、(1)「3次元球殻内対流における固いリッド下のブルームの発生」、(2)「3次元球殻内対流コードの並列化」、(3)「リソスフェア内の水平粘性不均質がプレート運動、ジオイド、プレート内応力に与える影響」、の3部で構成されている。

(1)「3次元球殻内対流における固いリッド下のブルームの発生」

巨大大陸下では地球内部の熱の放出が妨げられ、そこに蓄積された熱は大陸分裂・移動の要因となり得る。本研究では、固い大陸リソスフェアによる熱遮蔽効果がマントル対流に及ぼす影響について、3次元球殻モデルを用いたマントル対流数値シミュレーションにより考察した。

マントルはプラントル数無限大で非圧縮の粘性流体を仮定し、それを支配する基礎方程式は、質量保存式、運動量保存式、エネルギー保存式、構成方程式である。上下面の境界条件は、定温・不透過・自由滑べりとする。マントルの粘性率は一様、又は、上部マントルの粘性率が下部マントルのその1/30倍とする。対流は核から放出される熱、及びマントル中に一様に分布していると仮定した放射性元素の壊変による発熱(コンドライト隕石のそれと同程度)によって駆動されるものとする。下部マントルの粘性率を用いて定義されるレイリー数を 10^6 とする。大陸リソスフェアは、巨大大陸(パンゲア)を簡単にした形状を持ち、地表面の30%を覆う、厚さ200kmの周囲より10倍高い粘性率を持つ固い蓋(HVL; High Viscosity Lid)とする。HVLに覆われていない表面を以後“海洋”領域と呼ぶことにする。HVLの位置は時間に依らず空間的に固定する。計算では、統計的に平衡な状態に達するまで長時間対流計算を行った後に、マントル表層部にHVLを設置し、その後の時間発展を追う。

統計的に平衡に達した対流は、粘性一様の場合は短波長の温度構造が卓越する。これを初期条件とし、マントル表層部にHVLを設置すると、その下の温度は熱遮蔽効果のた

めに上昇し、HVL 下から海洋領域へ水平方向のマントルの流れが発生する。この流れを補償するために生じた反流によってマントル内に大規模な対流セルが形成され、大陸下の核 - マントル境界付近に上昇流が集中し、やがて巨大なマントルプルームとなり HVL 下に到達する。HVL 下のマントルの体積平均温度と海洋下のその差 (ΔT_{CO}) は 10 ~ 20 億年でほぼ一定となり、このときの温度場は球面調和関数の次数 (l) が 1 の成分が卓越する。この状態に到達したとき、プルームが形成されたと考えることにする。これは、発熱的 (深さ 400km) - 吸熱的 (670km) 相転移の効果を取り入れた場合も同様であるが、 ΔT_{CO} には長時間にわたり上昇する成分が存在する。上部マントルの粘性が下部マントルのその 1/30 倍の場合の初期温度では、上部マントルから表面へ輸送される熱量が粘性一様の場合と比べて多くなるため対流層の温度は全体的に低くなる。また、この場合においては、長波長 ($l = 2$) 成分を有する温度場が形成される。粘性率が一様な場合と同様の解析を行うと、プルームの形成時間は粘性率一様の場合と比較してやや遅くなる。これは初期条件に長波長成分が存在するためと推定される。

我々の結果は、一つの巨大大陸の存在がマントルに次数 1 の温度構造を発生させることを示している。我々が設定したマントルのレイリー数が実際の地球の値よりやや低めであることを考慮して、簡単な境界層理論を適用してスケーリングを行うと、プルームの形成時間は、数億年程度に見積もられる。この時間スケールはウィルソンサイクルのそれと同程度となり、このメカニズムは地質学的に重要な影響を与える可能性がある。

(2) 「三次元球殻内対流コードの並列化」

従来、我々が行ってきた 3 次元球殻内におけるマントル対流数値計算は、最も解像度の高い計算 (有限体積数で数 100 万) においても、ベクトル型スーパーコンピュータを用いて行われた。しかし、地球・惑星のマントル内の複雑かつ局所的な諸現象を 3 次元で扱うためには、より高い解像度での計算が望まれる。また、マントルはレオロジー (特に粘性率の水平変化) は非常に複雑であるため、単一の計算機での計算は多大な時間とメモリを費すことになる。この点を克服するために、従来のコードを修正・改良することによって、並列計算機を利用できるよう並列アルゴリズムの開発を行う。

並列計算においては、計算領域を分割した小領域を各 CPU に分配する“領域分割法”が広く用いられている。本コードでは、計算領域である球殻内を深さ方向に分割し、これを小領域とし、各 CPU に割り当てる。隣接する小領域間のデータを CPU 間の通信を行うことによって方程式を解く。この際、各 CPU 間のメッセージ交換ライブラリは汎用性のある MPI を使用する。マントル対流を支配する基礎方程式は、(1) 質量保存式、(2) 運動量保存式、(3) エネルギー保存式である。これらの方程式は、*Iwase* [1996] に従って有限体積法で離散化する。速度・圧力場は SIMPLE 法 (*Patankar*, 1980) を用いて (1) と (2) を同時に満たすように解き、温度場は (3) により時間変化を計算する。(3) は陽解法を用いれば行列を解く必要がなく単純な計算で済むため並列化は容易である。しかし、速度・圧力場の解法で使用している緩和法はそのままでは並列化できない。このため最

も簡単な“レッド・ブラック緩和法”アルゴリズムを適用することで並列化を可能にする。

我々は、開発した並列プログラムのパフォーマンスの評価を行うため、科学技術庁防災科学研究所の T3E (分散メモリ型超並列スーパーコンピュータ、168CPU) を用いてベンチマークテストを行った。ベンチマークテストに用いた計算例は、有限体積数を $101 \times 100 \times 200$ (深さ \times 緯度 \times 経度方向) で、レイリー数は 10^6 、粘性率は一様で、時間ステップにして 10 ステップを解いた。その結果、使用した CPU が 50CPU までの計算効率は 90% 以上、100CPU では約 70% となり、パフォーマンスの向上を図ることが出来た。この開発したコードにより、今後はさらに解像度の高いマントル対流数値計算が期待出来る。

(3) 「リソスフェア内の水平粘性不均質がプレート運動、ジオイド、プレート内応力に与える影響」

地球マントルの粘性率は水平方向に複雑に変化するが、最も激しく変化する場所はプレート境界であろう。しかし、マントル内部の密度分布からマントルの流れを求めるとき、応答関数などを用いる解析的手法では、その数学的困難さから粘性は球対称構造に制約されている。本研究では、リソスフェアの水平粘性変化が、表層テクトニクスを特徴づける観測量である、プレート運動、地形、ジオイド、プレート内応力場などに与える影響について比較・考察するため、3次元球殻モデルによる数値計算の手法を用いて、幾つかの沈み込むスラブのモデルによって推定された負の浮力によるマントルの“瞬間流れ”を求める。

マントルはプラントル数無限大で非圧縮の粘性流体を仮定する。その流れを支配する基礎方程式は、質量保存式、運動量保存式、構成方程式である。簡単のため、運動量保存式に含まれるべき自己重力の項は考慮しない。地表面と核-マントル境界 (CMB) の境界条件は不透過・自由滑べりとする。我々が用いた密度モデルは、(1) 地震の分布に基づくスラブモデル、及び (2) スラブの沈み込みの歴史 [Ricard *et al.*, 1993] に基づくモデルと、(3) 上部マントルに (1)、下部マントルに (2) を組み込んだモデルを採用する。粘性モデルは、“固い”リソスフェア (0km-100km)、上部マントル (100km-670km)、下部マントル (670km-2900km) の3層モデルとし、それらの相対粘性率はそれぞれ、1000 : 1 : 70 とする。実際のプレート境界の位置に組み込まれた“軟らかい”プレート境界の粘性率は、代表的な 12 枚の‘硬い’プレート (リソスフェア) の 1 倍 (つまりプレート境界なし) から 0.0001 倍まで 1/10 倍おきに変化させる。基準モデルとして、上部マントルの粘性を 1.0×10^{20} Pa·s としたものを採用する。

軟らかいプレート境界を組み込むことにより、個々のプレートは“動く”ようになる。我々の計算から求められた表面運動と no-net-rotation 基準系に基づく観測によるプレート運動を比較すると、プレート境界の粘性を低くするにつれて、(1) の密度モデルでは、高速のプレート (太平洋、オーストラリア、南米プレート) と低速のプレート (北アメリカ、南極プレート) の相対速度はよく再現できるが、運動方向は再現できない。一方、(2)

又は(3)のモデルでは、面積の大きい代表的なプレートの運動方向はよく再現できるが、プレートの絶対速度は太平洋プレートに対して大きくなる。これらの結果は、上部マントルのスラブによる引っ張り力 (slab pull) のみで観測と整合的な相対速度が得られ、また、下部マントルのスラブによる密度荷重がプレートの運動方向の決定に大きな影響を与えることを示唆する。我々が用いた粘性率の基準モデルを用いて、プレート運動の平均二乗和を観測のそれ (約 4.5 cm/yr) と比較すると、プレート境界の粘性率は、リソスフェアの 1/1000 程度 (上部マントルの粘性) と見積もられる。しかし、この値は仮定した上部マントルの粘性率やリソスフェアの相対粘性に依存するため、正確な見積もりは今後の課題である。プレート内応力 (主応力軸の水平成分) はプレートの運動方向に対して、概ね伸長の応力場となる。プレート境界の粘性率を上部マントルのそれと一致させた場合では、プレートの縁の応力値 (deviatoric stress) は、概ね 100 MPa 以上のオーダーとなる。実際のプレート内は圧縮の応力場が卓越しているが、これは、プレート運動の原動力としてスラブの負の浮力のみならず、海嶺の押し (リソスフェアの重力滑べり) などの力を考える必要があることを意味する。