

機関番号：82706

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2008～2010

課題番号：20740260

研究課題名（和文） 三次元マントル対流モデルによるプルームモードとプレートモードの発生機構の解明

研究課題名（英文） Numerical studies on generation mechanism of plume-mode and plate-mode by three-dimensional mantle convection models

研究代表者

吉田 晶樹（YOSHIDA MASAKI）

独立行政法人海洋研究開発機構・地球内部ダイナミクス領域・主任研究員

研究者番号：00371716

研究成果の概要（和文）：

インヤン格子を用いた有限体積法ベースの三次元球殻内マントル対流数値計算プログラムを開発し、粘性率の温度・圧力依存性の影響に対して安定した数値計算が可能になった。このプログラムを用いて計算を行った結果、次数1や2が卓越するマントル対流パターンが地球型惑星のマントル対流の基本構造であることを明らかにした。また、大陸リソスフェアの自発的な変形と移動を考慮したマントル対流モデルを構築し、超大陸サイクルを実現するシミュレーション結果が得られた。

研究成果の概要（英文）：

I developed a finite-volume based three-dimensional mantle convection simulation code using the Yin-Yang grid, which enables me to successfully simulate convection with the temperature- and pressure-dependent viscosity. Using this code, I clarified that the degree-one and degree-two dominant convection is basic structures of mantle convection in the terrestrial planets. Then, I developed the mantle convection model with the deformable, mobile continental lithosphere to obtain the numerical results realizing the supercontinental cycle.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	700,000	210,000	910,000
2009年度	500,000	150,000	650,000
2010年度	400,000	120,000	520,000
年度			
年度			
総計	1,600,000	480,000	2,080,000

研究分野：地球惑星内部物理学

科研費の分科・細目：地球惑星科学・固体地球惑星物理学

キーワード：マントル対流、数値シミュレーション、三次元、プルーム、プレート、超大陸、レオロジー、地震波トモグラフィー

## 1. 研究開始当初の背景

マントル対流システムにおける「プルームモード」と「プレートモード」は、マントル対流の進化の過程でそれぞれ独自の時間・空間スケールでマントル内の熱・物質輸送に重要な役割を果たしてきたと考えられる。しかしながら、その発生メカニズムは十分に明ら

かになっていなかった。

## 2. 研究の目的

マントル対流の大規模上昇流の発生メカニズムやプレート運動に支配されるマントル対流独自の流れのモードを解明することは、マントルの進化を理解

する上で重要である。本研究では、新しい数値計算手法に基づく三次元球殻マントル対流数値シミュレーションにより、ブルームモードとプレートモードの発生メカニズムについて解明する。

### 3. 研究の方法

以下の独立したアプローチで研究を行った。(1) マントル対流の時間発展シミュレーション、及び、(2) 全球地震波トモグラフィモデルを考慮した瞬間速度場シミュレーションの二つである。

これらの計算を実行するため、2008年度の前半では、これまでに開発してきたインヤン格子・有限差分法に基づく三次元球殻内マントル対流シミュレーションコードを、マントル物質の水平粘性率変化に対して安定な有限体積法を用いたコードに改良した。

### 4. 研究成果

#### 2008年度の成果

(1) マントルの放射性熱源による内部発熱、粘性率の温度依存性、圧縮性など様々な条件を考慮した系統的なパラメータ計算により、マントル対流の基本的な大規模構造が、次数1モード（一つの上昇流（図1）と一つの下降流を持つパターン）、及び“逆次数2”モード（現在の地球マントルとは逆で二つの円筒状下降流を持つパターン）の二つであることを発見した。さらに、降伏応力を用いたレオロジーを考慮した計算を行い、実際の環太平洋の沈み込み帯に似た、全球規模に連なる一本の細長い収束境界を含んだマントル対流パターンを実現した。この結果は、現在の地球の次数2

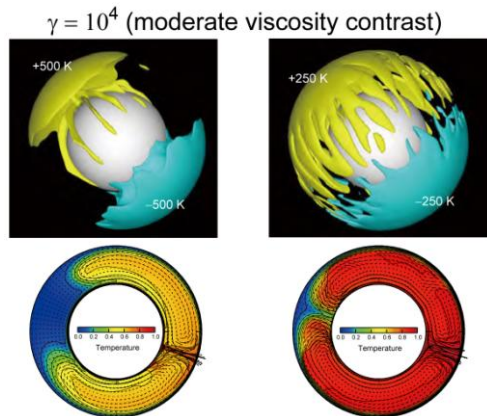


図1. 次数1パターンのマントル対流。(左) 内部加熱がない場合。(右) 内部加熱がある場合。

パターンは地球表層のレオロジカルな不均質によって再現されていることが示唆される。

(2) 全球トモグラフィモデルを用いることにより、コア・マントル境界の地形を数値シミュレーションの手法を用いて世界で初めて見積もった（図2）。これにより、近年の地震学的観測で得られつつある結果との比較・議論が可能になる足がかりが得られた。この成果は未だよく分かっていないコア・マントル近傍のダイナミクスの解明に重要である。

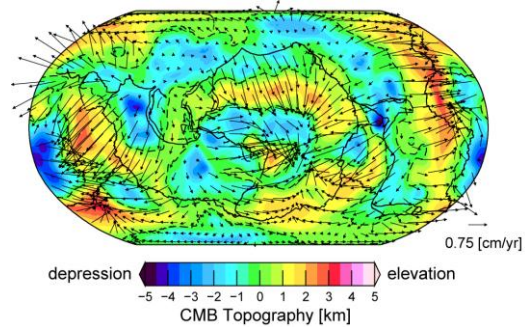


図2. 数値シミュレーションモデルで得られたコア・マントル境界の地形。

(3) 環太平洋の沈み込み帯における正の長波長ジオイドを説明するためには、

(a) 上部マントルと下部マントルの粘性率比が2～3桁必要であること、(b) 近年の鉱物物理学で示唆されているように下部マントルに沈み込むスラブの粘性率は上部マントルスラブの粘性率よりも有意に小さい必要があることが分かった。

#### 2009年度の成果

(1) 地球史におけるマントルの大規模上昇ブルーム、及び、大規模上昇ブルームに起因するマントル内の特徴的な流れのモード（ブルームモード）の発生メカニズムを解明するため、大陸リソスフェアを考慮した三次元球殻内マントル対流の数値シミュレーションを行った。まず、マントルに対して空間的・時間的に固定された高粘性の大陸を設置したモデルを用いて数値シミュレーションを行った。その結果、大陸の存在によってマントル内に流れの再編が起きた（図3）。CMBから大陸下に発生する上昇するブルームによって、大陸内に最大で90MPa（この値はモデルに依存する）の伸張応力場が発生することが分かった。これは上昇ブルームによって大陸が分裂するための十分な応力状態である。大陸とマントルとの熱的相互作用だけではなく、大陸内の応力状態に注目した研究は

これまでに世界で例がない。

(2)大陸の移動を自己矛盾なく実現するマン  
トル対流基礎モデルの構築を開始した。まず、  
大陸の移動を数値拡散なく正確に解くため  
の粒子法ベースの並列計算アルゴリズムの  
開発を行った。マントルと大陸のレオロジー  
や物性に関して現実的なパラメータを用い  
て予備的な計算を行ったところ、超大陸の自  
発的な分裂、超大陸下の温度上昇、大陸縁辺  
での海洋プレートの沈み込み、約5億年後の  
大陸同士の衝突、大陸の衝突帯の形成など、  
超大陸サイクルの特徴を再現する計算結果  
が得られた(図4)。変形と移動が可能な大  
陸が考慮された三次元マントル対流モデル  
の開発は世界で初めてである。

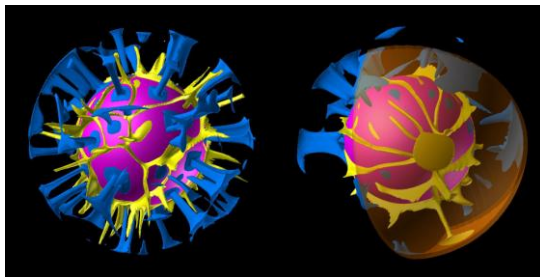


図3. (左) 超大陸がない場合のマントル対  
流。(右) 超大陸を設置した場合のマントル  
対流。

#### 2010年度の成果

(1) 2009年度までに開発した大陸移動を実現  
するマントル対流計算アルゴリズムを「完  
全」三次元球殻モデルに拡張した。将来、こ  
の数値シミュレーションプログラムを用い  
ることにより、地球史における大陸リソス  
フェアとマントル対流との熱的・力学的相互  
作用の歴史や、地球表層運動に起因する大  
規模上昇ブルームの発生メカニズムなど、  
地球内部ダイナミクスにおける重要な未  
解決問題が解明されることが期待される。

(2) この数値シミュレーションプログラム  
を用いて、現在から未来への大陸移動の様  
子を推定した。温度場の初期条件には、地  
震波速度異常モデル(トモグラフィーモデ  
ル)を用いた。速度異常から温度異常へ  
の変換比は、鉱物物理学で得られている深  
さプロファイルを用いた。計算の結果、現  
在の大陸は、約2億年後までに、二つの  
大規模上昇流から遠ざかるように、北半  
球に集まる傾向にあることが分かった。  
ただし、南アメリカ大陸と南極大陸はほ  
んど移動しない。

(3) 三次元部分球殻モデルを用いて、大  
陸クラトン(以下、「大陸」とする)の時  
間的安定性を実現する数値モデルを構築  
した。このモデルでは大陸の周囲に低粘  
性境界領域(weak boundary zone: WBZ)  
を設置し、大

陸本体とWBZの粘性率比を自由に変えて  
計算を行うことが出来る。計算を行った  
結果、大陸とWBZの粘性比が $10^5$ (大陸  
の粘性率は $10^{26}$  Pa s)のとき、約10億  
年経過した後も、大陸はあまり変形せず  
、初期の形を保つことが分かった。さら  
に大陸の粘性率を $10^{27}$  Pa sにした場  
合、約20億年経過した後も大陸の形は  
ほぼ安定であった。これらの結果は、大  
陸クラトンの地質学的時間における安  
定性には、大陸とその周囲のプレートと  
の力学的コントラスト、及び、大陸自体  
の大きな粘性率が重要であることが示  
唆される。

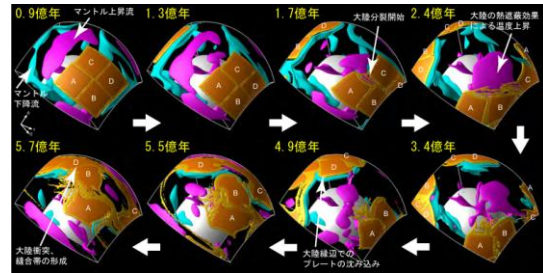


図4. 大陸移動が考慮されたマントル対流シ  
ミュレーションの一例。

#### まとめ

2008~2010年度の成果から以下のことが  
明らかになった。(1)現在の地球のマン  
トル対流システムにおけるブルームモード  
は、マントル物質の温度依存性や過去の  
超大陸の存在による大規模上昇流に支配  
される流れによって発生する。(2)一方  
、プレートモードは、ブルームモードと  
は独立に地球表層のレオロジカルな不均  
質によって支配される流れによって発生  
する。

これらの知見は、今後、数値シミュレ  
ーションモデルで、現在や過去のマン  
トル対流パターンを再現する上で重要  
な役割を果たすと考える。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者  
には下線)

[雑誌論文](計8件)

- ① Masaki Yoshida and M. Santosh, Supercontinents, mantle dynamics and plate tectonics: A perspective based on conceptual vs. numerical models, *Earth-Science Reviews*, 105(1-2), 1-24, doi:10.1016/j.earscirev.2010.12.002, 2011. (査読有)
- ② Manabu Morishige, Satoru Honda, and Masaki Yoshida, Possibility of hot anomaly in the sub-slab mantle as an origin of low

seismic velocity anomaly under the subducting Pacific plate, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 183(1-2), 353-365, doi:10.1016/j.pepi.2010.04.002, 2010. (査読有)

- ③ Masaki Yoshida, Preliminary three-dimensional model of mantle convection with deformable, mobile continental lithosphere, *Earth and Planetary Science Letters*, 295(1-2), 205-218, doi:10.1016/j.epsl.2010.04.001, 2010. (査読有)
- ④ Claudia Adam, Masaki Yoshida, Takehi Isse, Daisuke Suetsugu, Yoshio Fukao, and Guilhem Barruol, South Pacific hotspot swells dynamically supported by mantle flows, *Geophysical Research Letters*, 37, L08302, doi:10.1029/2010GL042534, 2010. (査読有)
- ⑤ Masaki Yoshida, Temporal evolution of the stress state in a supercontinent during mantle reorganization, *Geophysical Journal International*, 180(1), 1-22, doi:10.1111/j.1365-246X.2009.04399.x, 2010. (査読有)
- ⑥ Masaki Yoshida and Tomoeaki Nakakuki, Effects on the long-wavelength geoid anomaly of lateral viscosity variations caused by stiff subducting slabs, weak plate margins and lower mantle rheology, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 172(3-4), 278-288, doi:10.1016/j.pepi.2008.10.018, 2009. (査読有)
- ⑦ Masaki Yoshida, Mantle convection with longest-wavelength thermal heterogeneity in a 3-D spherical model: Degree one or two?, *Geophysical Research Letters*, 35, L23302, doi:10.1029/2008GL036059, 2008. (査読有)
- ⑧ Masaki Yoshida, Core-mantle boundary topography estimated from numerical simulations of instantaneous mantle flow, *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 9(7), Q07002, doi:10.1029/2008GC002008, 2008. (査読有)

[学会発表] (計 20 件)

- ① Masaki Yoshida, 時間的に安定な大陸リソスフェアが考慮された三次元マントル対流の数値シミュレーションモデル (A numerical model of three-dimensional mantle convection with long-lived cratonic lithosphere), 日本地球惑星科学連合 2011 年大会, 幕張メッセ国際会議場, 千葉, 2011 年 5 月 23 日.
- ② Masaki Yoshida, Future supercontinent

assembled in the northern hemisphere: Insight from a numerical model of mantle convection, European Geosciences Union General Assembly 2011, EGU2011-2828, Vienna, Austria, Apr. 7, 2011.

- ③ Masaki Yoshida, A numerical model of mantle convection with deformable, mobile continental lithosphere within three-dimensional spherical geometry, AGU 2010 Fall meeting, Moscone Convention Center, San Francisco, CA, Dec. 13, 2010.
- ④ 吉田晶樹, マントル対流と地球表層運動の相互作用, 第 128 回 地球電磁気・地球惑星圏学会 (SGEPSS) 総会および講演会, 沖縄県市町村自治会館, 那覇, 2010 年 11 月 3 日.
- ⑤ Manabu Morishige, Possibility of hotter sub-slab mantle and its implications, 2010 Western Pacific Geophysics Meeting, Taipei International Convention Center, Taipei, Taiwan, Jun. 22, 2010.
- ⑥ Claudia Adam, Origin of the South Pacific Superswell constrained by tomographic models, 日本地球惑星科学連合 2010 年大会, 幕張メッセ国際会議場, 千葉, 2010 年 5 月 23 日.
- ⑦ Masaki Yoshida, 自発的な大陸移動を伴うマントル対流の新しい三次元球殻モデル (A new three-dimensional spherical shell model of mantle convection with spontaneous continental drift), 日本地球惑星科学連合 2010 年大会, 幕張メッセ国際会議場, 千葉, 2010 年 5 月 23 日.
- ⑧ Claudia Adam, South Pacific hotspot swells dynamically supported by mantle flows, European Geosciences Union General Assembly 2010, EGU2010-2735, Vienna, Austria, May 2, 2010.
- ⑨ 吉田晶樹, マントル対流と大陸リソスフェアの熱的・力学的相互作用, JAMSTEC システム地球ラボ「宇宙・地球表層・地球内部の相関モデリングラボユニット」第 1 回シンポジウム「地球と宇宙と環境変動」, 海洋研究開発機構横浜研究所, 2010 年 3 月 5 日.
- ⑩ Masaki Yoshida, South Pacific hotspot swells dynamically supported by mantle flows, AGU 2009 Fall meeting, Moscone Convention Center, San Francisco, CA, Dec. 14, 2009.
- ⑪ Masaki Yoshida, Potential effects of surface plate-like motion and supercontinents on long-wavelength mantle convection, AOGS 2009 6th Annual General Meeting, SUNTEC, Singapore, Aug. 11, 2009.
- ⑫ Masaki Yoshida, 次数 1 と 2 が卓越する温度構造を持つマントル対流 (Mantle

- convection with degree-one and -two dominant thermal structures), 日本地球惑星科学連合 2009 年大会, 幕張メッセ国際会議場, 千葉, 2009 年 5 月 16 日.
- ⑬ Manabu Morishige, サブスラブマントル内に高温異常が存在する可能性について (Possibility of hot anomaly in the sub-slab mantle as an origin of low seismic velocity anomaly under the subducting Pacific plate), 日本地球惑星科学連合 2009 年大会, 幕張メッセ国際会議場, 千葉, 2009 年 5 月 16 日.
- ⑭ Manabu Morishige, Possibility of hot anomaly in the sub-slab mantle at northeast Japan subduction zone, ERI/IPGP Joint Workshop on Subduction Process, ERI, Tokyo, Japan, Apr. 15, 2009.
- ⑮ Masaki Yoshida, Spherical mantle convection with degree-one and -two dominant thermal structures, Stagnant Slab Project International Symposium: Deep Slab and Mantle Dynamics, Kyoto Garden Palace, Kyoto, Japan, Feb. 25, 2009.
- ⑯ Manabu Morishige, Possibility of hot anomaly in the sub-slab mantle as an origin of low seismic velocity anomaly under the subducting Pacific plate, Stagnant Slab Project International Symposium: Deep Slab and Mantle Dynamics, Kyoto Garden Palace, Kyoto, Japan, Feb. 25, 2009.
- ⑰ Masaki Yoshida, Mantle Convection with Longest-wavelength Thermal Heterogeneity in 3-D Spherical Shell: Degree One or Two?, 7th General Assembly of Asian Seismological Commission and Seismological Society of Japan, 2008 Fall meeting, EPOCHAL TSUKUBA, Tsukuba, Japan, Nov. 24, 2008.
- ⑱ Masaki Yoshida, Topography and Geoid from Instantaneous Mantle Flow Calculations in 3-D Spherical Shell Using Numerical Simulation Technique: Effects of Lateral Viscosity Variation in the Mantle, AOGS 2008 5th Annual General Meeting, BEXCO, Pusan, Korea, Jun. 16, 2008.
- ⑲ Masaki Yoshida, Topography and geoid from instantaneous flow calculations in spherical shell: Effects of lateral viscosity variation in the mantle, 日本地球惑星科学連合 2008 年大会, 幕張メッセ国際会議場, 千葉, 2008 年 5 月 25 日.
- ⑳ Manabu Morishige, Interaction of hot anomaly and subducting cold slab, 日本地球惑星科学連合 2008 年大会, 幕張メッセ国際会議場, 千葉, 2008 年 5 月 25 日.

[その他]

- ① ホームページ  
<http://www.jamstec.go.jp/res/ress/myoshida/>
- ② アウトリーチ  
第 52 回科学技術週間 科学技術の「美」パネル展出展
- ③ 雑誌掲載  
海洋研究開発機構、『Blue Earth』、111 号、理科からつながる研究最前線 「大陸移動→マントル対流→地球の歴史」

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

吉田 晶樹 (YOSHIDA MASAKI)  
独立行政法人海洋研究開発機構・地球内部  
ダイナミクス領域・主任研究員  
研究者番号 : 00371716