

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 26 日現在

機関番号：82706

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2015

課題番号：26610144

研究課題名(和文) 対流するマントルと外核を一つの系として扱う新しい数値シミュレーションモデルの開発

研究課題名(英文) Development of a new numerical simulation model of an integrated system for the convecting mantle and outer-core

研究代表者

吉田 晶樹 (Yoshida, Masaki)

国立研究開発法人海洋研究開発機構・地球深部ダイナミクス研究分野・主任研究員

研究者番号：00371716

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,400,000円

研究成果の概要(和文)：粘性率が桁で異なる二層を持つ二次元球殻内の熱対流の数値シミュレーションを実施した。球殻外側の高粘性率層(HVL)と球殻内側の低粘性率層(LVL)の粘性率比は最大で1000とした。その結果、HVLとLVLとの粘性率比が桁で増加すると、LVLの対流速度は有効レイリー数の増加にしたがって増加するが、HVLのヌッセルト数と対流速度は一定値に漸近することがわかった。このことは二層の境界の熱流量がHVLとLVLのカップリングによって制限されていることを意味する。本研究の結論を実際の地球に当てはめると、マントルの対流が外核からマントルへの熱流量、ひいては地球の熱輸送効率を規定していることになる。

研究成果の概要(英文)：A series of high-resolution numerical simulations of Rayleigh-Bénard convection with a highly viscous outer layer (HVL) and a low-viscosity inner layer (LVL) in 2-D spherical-shell geometry were performed to investigate the dynamics of convection between two layers with large viscosity contrasts up to 10^3 . Results show that the mechanical coupling (MC) mode is dominant in two-layer convection when the viscosity contrast between the two layers is sufficiently small, and it weakens, becoming closer to the thermal coupling (TC) mode, as the LVL viscosity decreases. This transition from MC to TC modes results in a stabilizing of the convection speed and the heat transport efficiency of the HVL. Our numerical results imply that thermal convection in the mantle controls the heat transport efficiency of the two-layer solid-earth system and controls the convective style in the outer core.

研究分野：地球惑星内部物理学，地球進化史，地震テクトニクス，数値流体力学

キーワード：マントル コア 外核 熱対流 二層対流 数値シミュレーション 粘性率 熱膨張係数

1. 研究開始当初の背景

現在の地球のマントル対流は、いくつかの独立した流れのモードからなり、これらは、マントル対流のパターンを複雑なものにさせている。さらに、コア・マントル境界を介して地球中心核の対流パターンに大きな影響を及ぼしている可能性がある。

しかしながら、これまでは、外核の対流の数値シミュレーションや地球ダイナモの数値シミュレーションは、マントル対流の数値シミュレーションとは独立して研究が進められてきた。その最も大きな理由は、岩石からなるマントルと流体鉄からなる外核の粘性率が非常に大きく異なり、流れの時間スケールも非常に大きく異なるからである。したがって、数千万から数億年にわたる時間スケールの地質学的現象の根源となるマントルの熱対流運動を外核の熱対流運動と“結合”させて解くことは事実上不可能だからであった。

一方で、例えば、地球の歴史を通じて地球表面環境変動の生命進化に影響を及ぼしてきたとされる地球磁場の変動は、マントルの活動と相関があることが知られており、地球システム全体の現象を理解する上で、粘性率と流れの時間スケールが桁で異なるマントル対流と外核対流を同時に解くための革新的な数値シミュレーションプログラムの開発が必須となる。

2. 研究の目的

本研究では、コア・マントル境界に人為的な境界条件を与えることなく、高粘性層(マントルに相当)と低粘性層(外核に相当)の熱対流運動システムを粘性率の異なる二層対流システムとして扱うことが可能な新しい数値シミュレーションプログラムを開発する。さらに、外核とマントルとの粘性率比を系統的に変化させた数値シミュレーションを実施する。得られた結果を実際の地球システムに当てはめ、マントル対流が非定常な場合の外核内の対流の振る舞いや、地表面とコア・マントル境界の各境界における熱流量の時間変化の相関関係、コア・マントル境界での二層間のカップリング様式とそのメカニズムを議論する。

3. 研究の方法

平成 26 年度では、粘性率が桁で異なる二層対流システムを扱うことが可能な新しい数値シミュレーションプログラムの開発を実施した。ベースとなるプログラムは、これまで独自に開発してきた有限体積・スタッガード格子法に基づくマントル対流数値シミュレーションプログラム(ConvGS)を用いた。

数値モデルは、二次元極座標モデルとし、厚さ 2891 km の高粘性層(HVL、以下、「マントル」とする)と厚さ 2259 km の低粘性層(LVL、以下「外核」とする)に分けた。外核の計算解像度(格子間隔)はマントルよりも細かくした。球殻の上面(地表面に相当)と下面(コア・マントル境界に相

当)の境界条件は、力学的には不透過、自由滑りとし、熱的には固定温度とした。

マントルと外核の密度差は、実際の地球での密度差を与えた。マントルの基準粘性率は実際の地球のマントルの粘性率を固定して与え、外核の粘性率と、外核とマントルとの粘性率比($\Delta\eta_c$)を自由パラメータとして扱った。

本研究のモデルでは、熱的・力学的に連続したコア・マントル境界を実現するため、運動方程式の浮力項にマントルの相変化の計算で用いられる有効熱膨張係数(コア・マントル境界近傍でピーク値をもつ熱膨張係数)を考慮した。

プログラムの開発の終了後、予備シミュレーションを行った。このとき、 $\Delta\eta_c$ を 1(つまり、マントルと外核の粘性率が同じ)のモデルから、 $\Delta\eta_c$ を一桁ずつ下げたモデルを計算し、現実的な計算時間内のもとで、数値安定性が維持できる $\Delta\eta_c$ の下限値を調査した。

平成 27 年度では、前年度の予備シミュレーションの結果を踏まえて、本格シミュレーションを実施した。 $\Delta\eta_c$ が 1、 10^{-1} 、 10^{-2} 、 10^{-3} の場合について、初期状態からシステムが熱的平衡状態に到達するまで計算した。その後、マントル対流の地質学的時間スケールを考慮して、少なくとも数 10 億年間シミュレーションをした。

一つのモデルの計算が終了する度に、計算結果の解析と動画作成を行った。その際、(1)マントル対流が非定常な場合における外核内の対流の振る舞い、(2)コア・マントル境界でのカップリング様式、(3)地表面とコア・マントル境界における熱流量の時間変化、(4)コア・マントル境界近傍の温度の時間変化、(5)マントルと外核それぞれの平均温度、有効レイリー数、ヌッセルト数、速度の二乗平均平方根の時間変化 - などを調査した。

4. 研究成果

平成 26 年度に、東京大学地震研究所のスーパーコンピューターシステム(最大 432CPU)を用いて実施した予備シミュレーションの結果、現実的な計算の時間内では、 $\Delta\eta_c$ の下限値は 10^{-3} まで与えられることが分かった。

平成 27 年度では、 $\Delta\eta_c$ が 1、 10^{-1} 、 10^{-2} 、 10^{-3} の場合について本格シミュレーションを実施した(図 1)。シミュレーションデータを解析した結果、マントルと外核との粘性比が桁で増加すると、外核の対流速度はその有効レイリー数の増加にしたがって増加するが、マントルのヌッセルト数と対流速度は一定値に漸近することがわかった。このことは、二層の境界の熱流量がマントルと外核のカップリングによって制限されていることを意味する。この原因は、マントルと外核との粘性比が桁で増加しても、二層の境界の外核側の熱境界層の厚さが境界層理論から期待される厚さよりも厚く、また、マントル側の熱境界層の厚さが $\Delta\eta_c$ に依存しないことによる。

以上の結論を実際の地球に当てはめると、マントルの対流がコア・マントル境界での外核からマントルへの熱流量を規定し、その結果として、

マントル対流が地球の熱輸送効率を規定していることになる。

また本研究で、粘性率の異なる二層対流系の結合様式がマントルと外核の粘性率比を大きくするにつれて、力学的結合(粘性結合)から熱的結合に遷移する様子がコア・マントル境界近傍の温度場と応力場の直接的な解析によって確認された。

これまでの地球の熱収支モデルに基づく理論的計算から、地球の熱史はマントルと外核の対流運動によって担われて、固体地球の外側にある粘性率が極めて大きなマントルの対流運動が、主体的に外核の対流運動を支配していると一般的に考えられていたが、この考えを定量的に実証した研究はなく、その物理メカニズムもよく分かっていなかった。本研究で得られたシミュレーション結果により、これらの理解が進んだと考える。

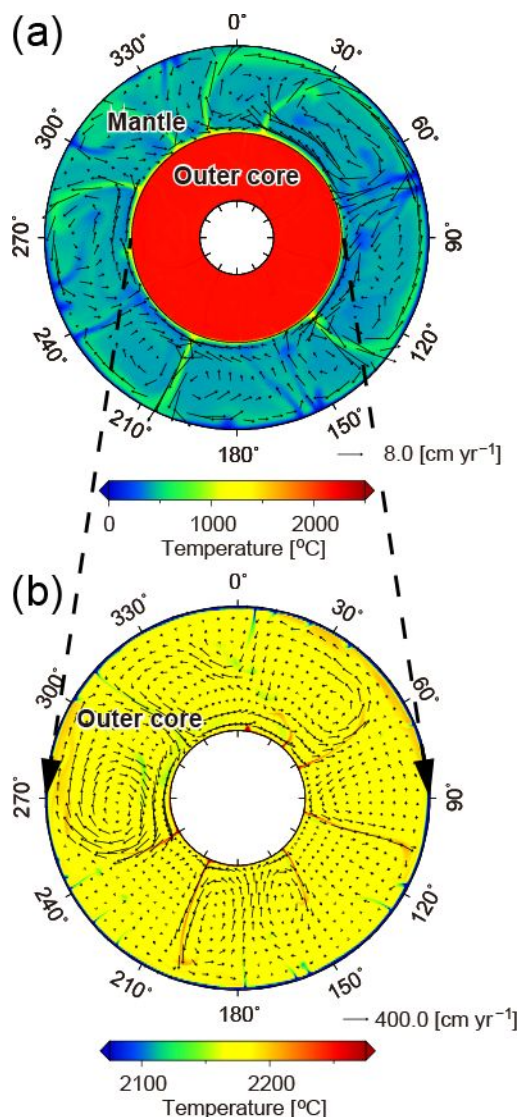


図1. マントルと外核の粘性率比が 10^3 ($\Delta\eta_c = 10^{-3}$) の場合の温度場と速度場の様子。(a) はマントルと外核の図、(b) は外核を拡大した図。

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) 吉田 晶樹, プレート運動と大陸移動の原動力—再考, 『地質学雑誌』, 121(12), 429–445, doi:10.5575/geosoc.2015.0031, 2015.
- (2) Claudia Adam, Scott D. King, Valérie Vidal, Michel Rabinowicz, André Jalobeanu, Masaki Yoshida, Variation of the subsidence parameters, effective thermal conductivity, and mantle dynamics, *Earth and Planetary Science Letters*, 426, 130–142, doi:10.1016/j.epsl.2015.06.025, 2015.
- (3) Masaki Yoshida and Yozo Hamano, Pangea breakup and northward drift of the Indian subcontinent reproduced by a numerical model of mantle convection, *Scientific Reports*, 5, 8407, doi:10.1038/srep08407, 2015.
- (4) Fumiko Tajima, Masaki Yoshida, and Eiji Ohtani, Conjecture with water and rheological control for subducting slab in the mantle transition zone, *Geoscience Frontiers*, 6(1), 79–93, doi:10.1016/j.gsf.2013.12.005, 2015.
- (5) 吉田 晶樹, 大陸とプレートを動かす力とは何か—大陸移動説“完成”から 100 年目で分かっていること, 『科学』, 85(7), 692–704, 2015.
- (6) Masaki Yoshida, A new conceptual model for whole mantle convection and the origin of hotspot plumes, *Journal of Geodynamics*, 78, 32–41, doi:10.1016/j.jog.2014.04.004, 2014.
- (7) Masaki Yoshida, Effects of various lithospheric yield stresses and different mantle-heating modes on the breakup of the Pangea supercontinent, *Geophysical Research Letters*, 41(9), 3060–3067, doi:10.1002/2014GL060023, 2014.
- (8) Claudia Adam, Masaki Yoshida, Daisuke Suetsugu, Yoshio Fukao, and Cecilia Cadio, Geodynamic modeling of the South Pacific superswell, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 229, 24–39, doi:10.1016/j.pepi.2013.12.014, 2014.

[学会発表](計 14 件)

- (1) Masaki Yoshida, Recent advances in the 3-D numerical simulation of the Earth's mantle convection, *Geoscience Frontiers Annual Convention & Editorial Board Meeting, Beijing, China, October 14, 2016.* (基調講演)

- (2) Hikaru Iwamori, Akihiko Ikemoto, Hitomi Nakamura, Masaki Yoshida, and Ryunosuke Yanagi, Subduction factory and its impact on global mantle heterogeneity, The 26th Goldschmidt Conference, Pacifico Yokohama, Yokohama, Japan, June 29, 2016. (基調講演)
- (3) Ryunosuke Yanagi and Masaki Yoshida, Three-dimensional mantle convection and material cycling with continental dispersal and coalescence, 日本地球惑星科学連合 2016 年大会, 幕張メッセ国際会議場, 千葉県千葉市, 2016 年 5 月 23 日.
- (4) 岩森 光, 中村 仁美, 吉田 晶樹, 柳 竜之介, マントル組成の東西半球構造と全地球ダイナミクス, 2015 年度日本地球化学会第 62 回年会, 横浜国立大学, 神奈川県横浜市, 2015 年 9 月 16 日.
- (5) 吉田 晶樹, 大陸移動の原動力と大陸内応力場の起源, 日本地質学会第 122 年学術大会, 信州大学, 長野県長野市, 2015 年 9 月 11 日.
- (6) Hikaru Iwamori, Hitomi Nakamura, and Masaki Yoshida, East-west mantle geochemical hemispheres and its implications for a coupled supercontinent-mantle-core dynamics, 26th General Assembly of the International Union of Geodesy and Geophysics (IUGG), Prague Congress Centre, Prague, Czech Republic, June 28, 2015.
- (7) 吉田 晶樹, 大陸移動と沈み込み帯, 地震研究所共同利用研究集会:「沈み込み帯」, 東京大学地震研究所, 東京都文京区, 2015 年 5 月 30 日. (招待講演)
- (8) 岩森 光, 中村 仁美, 吉田 晶樹, 田中 聡, 中川 貴司, 中久喜 伴益, 地球内部の東西半球構造とグローバルダイナミクス, 日本地球惑星科学連合 2015 年大会, 幕張メッセ国際会議場, 千葉県千葉市, 2015 年 5 月 26 日.
- (9) Masaki Yoshida and Yozo Hamano, On the driving forces of the Pangea breakup and northward drift of the Indian subcontinent, European Geosciences Union General Assembly 2015, Austria Center Vienna, Wien, Austria, April 14, 2015.
- (10) Claudia Adam, Scott D. King, Michel Rabinowicz, Valérie Vidal, André Jalobeanu, and Masaki Yoshida, Seafloor subsidence, effective thermal conductivity, and mantle dynamics, AGU 2014 Fall Meeting, Moscone Convention Center, San Francisco, CA, December 17, 2014.
- (11) 吉田 晶樹, 地球の内部で起こっているマントル対流の数値シミュレーション, 日本学術会議 第 4 回計算力学シンポジウム, 日本学術会議講堂, 東京都港区, 2014 年 12 月 1 日. (招待講演)
- (12) 吉田 晶樹, 計算機シミュレーションで再現

されたマントル対流の可視化の問題点, 第 64 回 CG・可視化研究会(CAVE 研究会), 海洋研究開発機構横浜研究所, 神奈川県横浜市, 2014 年 8 月 22 日. (招待講演)

- (13) Masaki Yoshida, The role of harzburgite layers in the morphology of subducting plates and the behavior of oceanic crustal layers, European Geosciences Union General Assembly 2014, Austria Center Vienna, Wien, Austria, April 30, 2014.
- (14) Hikaru Iwamori, Hitomi Nakamura, Takeshi Hanyu, Jun-ichi Kimura, Tomoeiki Nakakuki, Takashi Nakagawa, Masaki Yoshida, Satoru Tanaka, Daisuke Suetsugu, Masayuki Obayashi, Subduction processes and a new hypothesis for “top-down hemispherical dynamics” of the Earth, 日本地球惑星科学連合 2014 年大会, パシフィコ横浜, 神奈川県横浜市, 2014 年 4 月 28 日.

〔その他〕

- (1) 研究成果を紹介したウェブページ
日本語版: <http://yoshida-geophys.jp/>
英語版: <http://yoshida-geophys.jp/e/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

吉田 晶樹 (Yoshida, Masaki)
国立研究開発法人海洋研究開発機構・地球深部ダイナミクス研究分野・主任研究員
研究者番号: 00371716