

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 30 日現在

機関番号：82706

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23340132

研究課題名(和文) 数値モデルを用いた超大陸サイクルとマントル対流の熱的・力学的相互作用の解明

研究課題名(英文) Studies on the thermal and mechanical interaction between the supercontinent cycle and mantle convection using numerical 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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,500,000円、(間接経費) 4,050,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、大陸リソスフェアを考慮した三次元球殻マントル対流の数値シミュレーションを行った。その結果、予めマントルの表層に設定した高粘性の超大陸が分裂した後、それぞれの大陸が移動し、やがて計算開始から約6億年後に、それらの大陸が再び一つに集まって新しい超大陸が形成された。この結果は、実際の地球に近い大陸移動の様子(つまり、超大陸サイクル)を計算機の中で再現できたことを意味する。また、超大陸サイクルの原動力が、マントルの熱対流運動のみならず、大陸プレート周辺の海洋プレートを含む地球上の全プレートが複雑に相互運動することによって生まれるプレート境界力であることも分かった。

研究成果の概要(英文)：In this study, I performed numerical simulations of mantle convection with the continental lithosphere in a three-dimensional spherical-shell. Results reveal that a highly viscous supercontinent previously located at the top surface of the mantle breaks up, and the continental blocks drift, and finally they newly gather in one place to form a new supercontinent after about six hundred million years from the beginning of simulation. This result indicates that I could reproduce the actual behavior of the supercontinent cycle (i.e., supercontinent cycle) in the computer. I found that the driving force of the supercontinental cycle is not only the thermally convective motion in the mantle, but also plate boundary forces resulting from a complex kinematic interaction among all the plates, i.e., continental plates and the surrounding oceanic plates on the earth.

研究分野：数物系科学

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 超大陸 大陸リソスフェア パンゲア プルーム 超大陸サイクル 大陸移動

1. 研究開始当初の背景

地球マントルの内部構造の進化に多大な影響を及ぼしてきたと考えられる地球表層運動(大陸移動とプレート運動)のメカニズム、及び、地球表層運動とマントル対流との熱的・力学的相互作用の歴史の解明には、マントル対流の数値シミュレーションが非常に有効な手段であると言える。

1990年代以降、地震学的解析手法(主に地震波トモグラフィ)でイメージされるマントル対流パターンの様子(例えば、沈み込むプレートの挙動や地球深部起源の大規模上昇流の存在など)は、数値シミュレーションにより再現され、地球内部ダイナミクスの理解が進んできた。

しかしながら、地球史における地球表層運動とマントル対流との熱的・力学的相互作用についてはいまだ完全に解明されておらず、また、マントルの進化における地球表層運動の役割は、これまでほとんど明らかにされていなかった。

本研究の研究代表者である吉田のこれまでの数値シミュレーション研究、また、独立した地質学的研究から、大陸の存在はマントル対流、ひいては地球内部構造の進化に多大な影響を及ぼしてきたことが確実視されており、マントル対流シミュレーションが世界中で行われるようになった1990年代以来、大陸をマントル対流モデルに組み込むことは悲願の仕事であったが、2010年に吉田が発表したシミュレーション手法により、それがようやく実現可能になった。

2. 研究の目的

地球史において、地球表層運動(大陸移動やプレート運動)とマントル対流は互いに複雑な相互作用を及ぼしてきたと考えられる。

本研究では、大陸移動とプレート運動を考慮した三次元マントル対流の数値シミュレーションにより、マントルダイナミクスにおける大陸の役割、及び、超大陸サイクル(大陸の離合集散過程)とマントル対流との熱的・力学的相互作用を解明することが大きな目的である。

特に、アルフレッド・ウェゲナーの「大陸移動説」からほぼ100年が経過した現在、計算機の中でウィルソンサイクルや超大陸サイクルを再現し、そのメカニズムを解明することができれば、地球科学的に非常に意義のある研究となる。

また、過去の地球史の問題のみならず、数億年後に形成されるであろう未来の超大陸の形状を数値シミュレーションで予測することも試みる。

3. 研究の方法

大陸移動を考慮したマントル対流の数値シミュレーションを行うために、これまで研究代表者である吉田が独自に開発してきた三次元部分球殻モデル、および、三次元全球殻モデルのマントル対流数値シミュレーションプログラム(ConvRS、及び、ConvGS)の改良を行う。

三次元部分球殻モデルでは、シミュレーションの初期状態として、「超大陸」を四つの大陸片の集合体とし、それぞれの大陸片の周辺は低粘性帯で囲まれていると仮定する(実際の地球で

は太古代クラトン縁辺の原生代造山帯、あるいは変動帯に相当する)。大陸の粘性率と低粘性帯の粘性率は自由パラメーターとしてさまざまに変化させる。

三次元全球殻モデルでは、部分球殻モデルと同様に、シミュレーションの初期状態として、「超大陸」を四つの大陸片の集合体とし、その周囲に低粘性帯を設置するが、超大陸の周辺領域の粘性率と、四つの大陸片がそれぞれ接する領域(つまり、最初に設置した超大陸が分裂するきっかけとなる領域)の粘性率を区別して、それぞれを自由パラメーターとして与える。

4. 研究成果

(1) 平成23年度では、前年度までに開発してきた大陸移動を実現する三次元部分球殻マントル対流モデルを高度化させて、シミュレーションを行った。本研究では、大陸縁辺での低粘性帯(WCM; 実際の地球では太古代クラトン縁辺の原生代造山帯に相当)の存在が大陸の時間的安定性に及ぼす影響について調べた。本研究のモデルでは、超大陸は単純化された形で、その粘性率は海洋プレートより100倍から1000倍大きいと設定し、超大陸の周囲及び内部に予めWCMを設定した。

マントル対流の時間発展を計算した結果、大陸と海洋リソスフェアの粘性率比が100倍で、かつ、WCMの粘性率がマントルの粘性率と同程度である場合、大陸は地質学的時間スケール(本モデルでは、10億年以上)にわたってマントル対流によって大きく攪拌されることなく安定に移動することが分かった(図1)。さらに、大陸と海洋リソスフェアの粘性率比をさらに大きくした場合(1000倍)には、大陸はより長い時間(20~30億年以上)にわたって安定であることが分かった。また、本研究によって、大陸の時間的安定性には、WCMの存在そのものが一次的に寄与し、大陸と海洋プレートの粘性率比の寄与は二次的であることが示唆された。

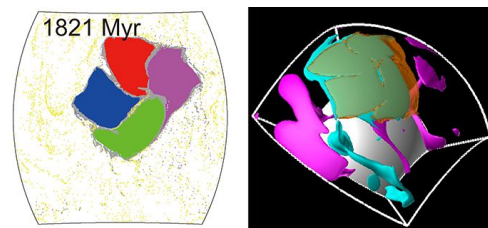


図1. 三次元部分球殻モデルによる大陸移動を考慮したマントル対流の数値シミュレーション結果の一例。左の図は、大陸の分布。右の図は、マントル対流の温度場の三次元プロット(青色は低温領域、紫色は高温領域、透明の茶色は大陸の位置)。一旦分裂した大陸片が再集合した様子を示している。

(2) さらに、平成23年度では、大陸移動を考慮した三次元全球殻マントル対流プログラムの開発を完了した。大陸の移動は、これまで開発し

た追跡粒子アルゴリズムを発展させて解いた。本研究では、現在の大陸配置を考慮し、約 2 億 5000 万年間のマンテル対流を解いて、未来の大陸配置の分布と超大陸の形状の予測を試みた。入力するマンテル内部の水平密度異常モデルは、地震波トモグラフィモデルと「上部マンテルスラブモデル」を用いた。また、地表面の速度境界条件として現在のプレート運動をシミュレーションの開始後 500 万年間のみ考慮し、それ以降の期間は自由滑り条件とした。

その結果、南極大陸と南米大陸を除く現在の各大陸は数億年後に北半球に集まり、北半球に新しい超大陸が形成される可能性があることが分かった(図 2)。

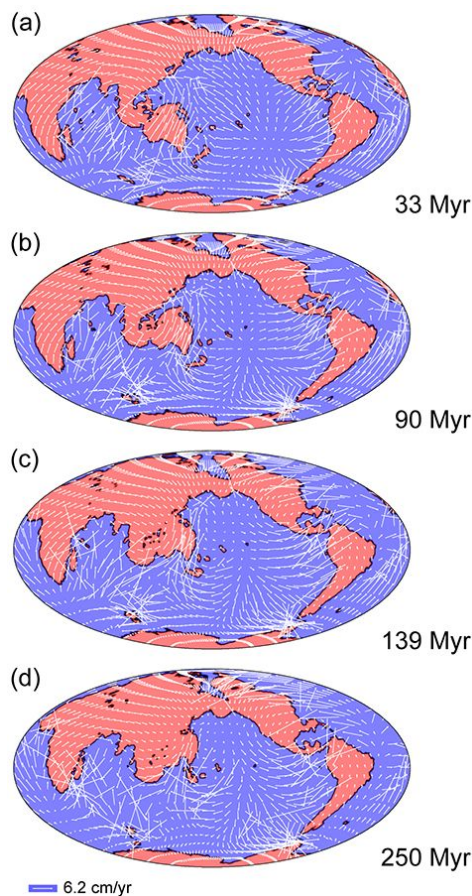


図 2. 数値シミュレーションから得られた現在から 2 億 5000 万年間の大陸分布。上から、3300 万年後、9000 万年後、1 億 3900 万年後、2 億 5000 万年後。

(3) 平成 24 年度では、前年度で開発した三次元全球殻マンテル対流モデルを改良し、大陸リソスフェアを考慮した数値シミュレーションを実施した。シミュレーションでは、大陸の粘性率、大陸縁辺の変動帯、及び超大陸内の縫合帯(スーチャーゾーン)の粘性率、海洋リソスフェアの降伏応力などのパラメーターを系統的に変化させた。

その結果、限定されたパラメーターの条件下

において、予めマンテルの表層に設置した超大陸が分裂し、分裂したそれぞれの大陸片が、数億年に再び集合して次の超大陸を形成するという超大陸サイクルを再現することができた(図 3)。このとき、超大陸の形成には、超大陸の外海が閉じる「外向」と、大陸が分裂して一旦開いた海が再び閉じる「内向」の二つのパターンが複雑に絡み合うことが分かった。また、超大陸サイクルが実現される条件下での大陸下マンテルの平均温度異常(マンテルの各深さにおける水平平均温度との差)を見積もった結果、移動する大陸下の深部マンテルの平均温度異常はたかだか ± 10 であることが分かった。これは、移動する大陸の下のマンテルと海洋下のマンテルでは、温度差がほとんどないことを意味する。

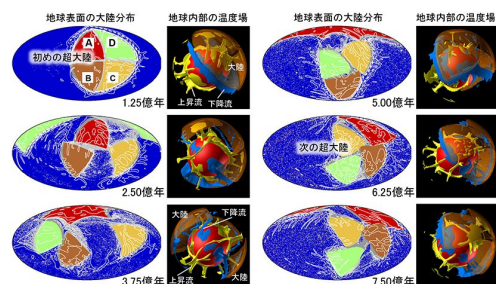


図 3. 三次元全球殻モデルによる大陸移動を考慮したマンテル対流数値シミュレーションの結果の一例。左の図は、大陸の分布。右の図は、マンテル対流の温度場の三次元プロット(青色は低温領域、黄色は高温領域、透明の茶色は大陸の位置)。経過時間は左上から右下に進む。約 6 億年後に、一旦分裂した大陸が再集合して新しい超大陸を形成する様子が見える。

(4) 平成 25 年度は、実際のパンゲア超大陸の形状を考慮した三次元全球殻マンテル対流数値シミュレーションを行った。まず、シドニー大学の研究者らが中心となって開発されている「プレート復元ソフトウェア:GPlates」から、2 億年前におけるパンゲア超大陸の海岸線のデジタルデータを抽出した。抽出したデータを ConvGS に直接入力できるデータフォーマットにコンパイルした。この作業と同時に、大陸を考慮しない状態でのマンテル対流の数値シミュレーションを実施した。本研究では、コアからの加熱がある場合(Case Q1)とない場合(Case Q2)の二つのパターンに加え、最も重要なパラメーターである海洋リソスフェアの降伏応力の値を 80 MPa から 200 MPa の範囲でさまざまに変えた。

次に、パンゲア超大陸をマンテルの表層に設置した。このとき、パンゲア超大陸の粘性率は海洋プレートの粘性率よりも 100 倍大きくした。まず、大陸を移動させず空間的に固定したまま、海洋プレートのプレート境界の分布が時間的にほぼ安定になるまで計算し、その後、大陸を移動させて 2 億年間計算した(図 4)。

その結果、Case Q1、Case Q2 のいずれの場

合でも、限られた降伏応力の値(本研究のモデルでは、120 MPa 程度)で、パンゲア超大陸の分裂とその後の大陸の移動が確認された。これは、コア・マントル境界から積極的な上昇ブルームがない場合でも超大陸の分裂と大陸移動が実現されることを意味する。つまり、大陸プレート周辺の海洋プレートを含む地球上の全プレートが複雑に相互運動することによって生まれる「プレート境界力」が超大陸の分裂とその後の大陸移動に重要な影響を及ぼすことを示唆する。

本研究で得られた知見は、今後、パンゲア超大陸時代から現在までの地球の大陸配置を再現し、2 億年前から現在までのマントル対流の変動(例えば、温度構造の時間変化)や現在の地球の温度構造パターン(次数2パターン)の成因を解明する上で重要となるであろう。

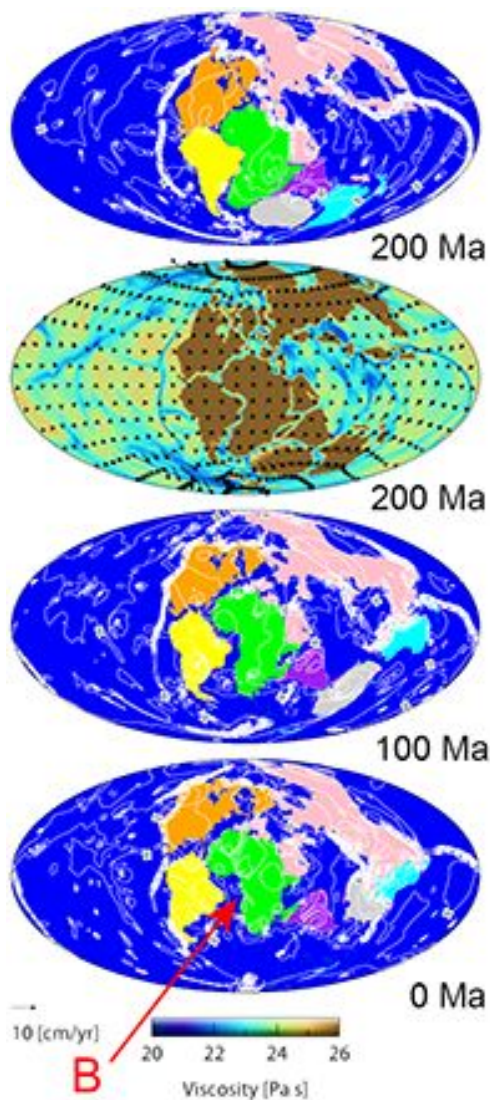


図 4. 数値シミュレーションで得られた 2 億年前から現在までの大陸移動の様子。4 つの図は、上から、2 億年前の大陸配置、2 億年前の表層の粘性率分布(青色は低粘性率、茶色は高粘性率。カラーバーを参照)、1 億年前の大陸配置、現在の大陸配置。

(5) 平成 23 年度から平成 25 年度に実施された一連の研究により、アルフレッド・ウェゲナーの「大陸移動説」からほぼ 100 年が経過して、計算機の中で超大陸サイクルを再現できたことは、今後のマントルダイナミクス研究の進展のみならず、地球深部の運動と地球表層運動との相互作用の理解に多大な貢献をすることが期待できる。

また、地球惑星科学のさまざまな学問分野(特に、地質学やプレートテクトニクス、地球化学など)へ今後の研究指針を与える上で、また、地球深部探査船「ちきゅう」による地球深部掘削計画等、地球深部物質の獲得方法にも指針を与える上で重要であると考え。さらに、超大陸サイクルは、地球環境変動(特に、海水準変動など)や生命進化にも多大な影響を及ぼしてきたことが知られているため、今後、環境学、化学、生物学などの学問分野との分野横断的研究の足掛かりにもなり得る。

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 14 件)

Fumiko Tajima, Masaki Yoshida, and Eiji Ohtani, Conjecture with water and rheological control for subducting slab in the mantle transition zone, *Geoscience Frontiers*, doi:10.1016/j.gsf.2013.12.005, 2014, in press. (査読あり)

Masaki Yoshida, Effects of various lithospheric yield stress and different mantle-heating mode in the breakup of the Pangea supercontinent, *Geophysical Research Letters*, doi:10.1002/2014GL060023, 2014, in press. (査読あり)

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. (査読あり)

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. (査読あり)

Masaki Yoshida and M. Santosh, Mantle convection modeling of the supercontinent cycle: Introversion, extroversion, or a combination?, *Geoscience Frontiers*, 5(1), 77-81, doi:10.1016/j.gsf.2013.06.002, 2014. (査読あり)

Masaki Yoshida, The role of harzburgite layers in the morphology of subducting plates and the behavior of oceanic crustal layers, *Geophysical Research Letters*, 40(20), 5387-5392,

doi:10.1002/2013GL057578, 2013. (査読あり)

Masaki Yoshida and Fumiko Tajima, On the possibility of a folded crustal layer stored in the hydrous mantle transition zone, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 219, 34-48, doi:10.1016/j.pepi.2013.03.004, 2013. (査読あり)

Masaki Yoshida, Three-dimensional visualization of numerically simulated, present-day global mantle flow, *Journal of Visualization*, 16(2), 163-171, doi:10.1007/s12650-013-0160-7, 2013. (査読あり)

Masaki Yoshida, Mantle temperature under drifting deformable continents during the supercontinent cycle, *Geophysical Research Letters*, 40(4), 681-686, doi:10.1002/grl.50151, 2013. (査読あり)

Claudia Adam, Pedro Madureira, Jorge M. Miranda, Nuno Lourenço, Masaki Yoshida, and Delphine Fitzenz, Mantle dynamics and characteristics of the Azores plateau, *Earth and Planetary Science Letters*, 362, 258-271, doi:10.1016/j.epsl.2012.11.014, 2013. (査読あり)

Masaki Yoshida, Plume's buoyancy and heat fluxes from the deep mantle estimated by an instantaneous mantle flow simulation based on the S40RTS global seismic tomography model, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 210-211, 63-74, doi:10.1016/j.pepi.2012.08.006, 2012. (査読あり)

Masaki Yoshida, Fumiko Tajima, Satoru Honda, and Manabu Morishige, The 3D numerical modeling of subduction dynamics: Plate stagnation and segmentation, and crustal advection in the wet mantle transition zone, *Journal of Geophysical Research - Solid Earth*, 117(B4), B04104, doi:10.1029/2011JB008989, 2012. (査読あり)

Masaki Yoshida, Dynamic role of the rheological contrast between cratonic and oceanic lithospheres in the longevity of cratonic lithosphere: A three-dimensional numerical study, *Tectonophysics*, 532-535, 156-166, doi:10.1016/j.tecto.2012.01.029, 2012. (査読あり)

Masaki Yoshida and M. Santosh, Future supercontinent assembled in the northern hemisphere, *Terra Nova*, 23(5), 333-338, doi:10.1111/j.1365-3121.2011.01018.x, 2011. (査読あり)

[学会発表](計 2 3 件)

Claudia Adam, Valérie Vidal, Scott D. King, André Jalobeanu, Masaki Yoshida, Michel

Rabinowicz, and Anne Briaies, Mantle dynamics and seafloor subsidence, AGU 2013 Fall Meeting, Moscone Convention Center, San Francisco, CA, Dec. 11, 2013. 吉田 晶樹, ハルツバーナイト層が沈み込むプレートの形態と海洋地殻層の挙動に及ぼす影響, 日本地震学会 2013 年秋季大会, 神奈川県民ホール・産業貿易センター, 横浜, 2013 年 10 月 8 日.

Masaki Yoshida, Thermal heterogeneity of the mantle under drifting deformable continents during the supercontinent cycle, IAHS-IAPSO-IASPEI Joint Assembly, Svenska Mässan (The Swedish Exhibition & Congress Centre), Gothenburg, Sweden, Jul. 24, 2013.

吉田 晶樹, マントル対流の三次元数値シミュレーションによる大陸移動メカニズムの解明, 平成 24 年度業績表彰講演会, JAMSTEC 横須賀本部, 2013 年 7 月 19 日.

吉田 晶樹, 三次元球殻モデルを用いた超大陸サイクルを伴うマントル対流の数値シミュレーション (Numerical simulations of mantle convection with the supercontinent cycle using a 3D spherical-shell model), 日本地球惑星科学連合 2013 年大会, 幕張メッセ国際会議場, 千葉, 2013 年 5 月 24 日.

吉田 晶樹, Numerical simulations of mantle convection with continental drift and plate motion, 平成 24 年度地球内部ダイナミクス領域研究報告会, JAMSTEC 横須賀本部, 2013 年 4 月 25 日.

Masaki Yoshida, Mantle temperature under drifting deformable continents during the supercontinent cycle, European Geosciences Union General Assembly 2013, Austria Center Vienna, Wein, Austria, Apr. 9, 2013. Claudia Adam, Pedro Madureira, Jorge M. Miranda, Nuno Lourenço, Masaki Yoshida, and Delphine D. Fitzenz, Mantle dynamics and characteristics of the Azores plateau, AGU 2012 Fall Meeting, Moscone Convention Center, San Francisco, CA, Dec. 7, 2012.

Meysam Shahraki, Harro Schmeling, and Masaki Yoshida, and Herbert Wallner, Exploring effects of lateral viscosity variations on the geoid undulation and dynamic topography at different wavelengths, AGU 2012 Fall Meeting, Moscone Convention Center, San Francisco, CA, Dec. 4, 2012.

Fumiko Tajima, and Masaki Yoshida, Conjecture with water and slab dynamics simulation, AGU 2012 Fall Meeting, Moscone Convention Center, San Francisco, CA, Dec. 4, 2012.

吉田 晶樹, 大陸リソスフェアの安定性における低粘性大陸縁辺域の動力学的役割

—三次元マントル対流モデル— (Dynamic role of the weak continental margin on the stability of continental lithosphere: A 3D mantle convection model), 日本地球惑星科学連合 2012 年大会, 幕張メッセ国際会議場, 千葉, 2012 年 5 月 23 日.
Masaki Yoshida and Fumiko Tajima, 3D numerical modeling of subduction dynamics: plate stagnation and segmentation, and crustal advection in the mantle transition zone, European Geosciences Union General Assembly 2012, Austria Center Vienna, Wein, Austria, Apr. 27, 2012.
Claudia Adam, Nuno Lourenço, Pedro Madureira, Jorge M. Miranda, and Masaki Yoshida, Mantle dynamics and volcanism emplacement in the Azores, European Geosciences Union General Assembly 2012, Austria Center Vienna, Wein, Austria, Apr. 23, 2012.
吉田 晶樹, 田島 文子, 本多 了, 森重学, マントル遷移層における海洋地殻の三次元的挙動: 新しい数値計算モデルによる予備的研究 (H23 客員教員成果報告), 第 900 回地震研究所談話会, 東京大学地震研究所, 2011 年 12 月 16 日.
Fumiko Tajima, Simon C. Stahler, Eiji Ohtani, Masaki Yoshida, Karin Sigloch, Variation of seismic velocity structure around the mantle transition zone and conjecture of deep water transport by subducted slabs, AGU 2011 Fall Meeting, Moscone Convention Center, San Francisco, CA, Dec. 7, 2011.
Meysam Shahraki, Harro Schmeling, and Masaki Yoshida, Geoid and dynamic topographic anomalies: A three-dimensional model with strongly variable viscosity, AGU 2011 Fall Meeting, Moscone Convention Center, San Francisco, CA, Dec. 5, 2011.
吉田 晶樹, 田島 文子, 本多 了, 森重学, マントル遷移層における海洋プレートと海洋地殻の三次元的挙動, 日本地震学会 2011 年秋季大会, 静岡県コンベンションアーツセンター・グランシップ, 静岡, 2011 年 10 月 12 日.
Claudia Adam, Masaki Yoshida, Daisuke Suetsugu, Yoshio Fukao, Origin of the South Pacific superswell constrained by tomographic models, Institute on the Lithosphere Asthenosphere Boundary, Portland, OR., Sep. 19, 2011.
吉田 晶樹, マントル対流と超大陸サイクルの相互作用を解明するための新しい三次元球殻数値シミュレーションモデルの開発とシミュレーション結果, 平成 23 年度上半期中堅・若手職員講演会, JAMSTEC 横須賀本部, 2011 年 9 月 2 日.

Masaki Yoshida, A numerical model of three-dimensional mantle convection with long-lived continental lithosphere, XXV IUGG General Assembly, JS05/JV04-140, Melbourne Convention & Exhibition Centre, Melbourne, Australia, Jul. 1, 2011.

- ②① 吉田 晶樹, 時間的に安定な大陸リソ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.
- ②② 吉田 晶樹, Numerical simulation of mantle convection with continental lithosphere, 平成 22 年度地球内部ダイナミクス領域研究報告会, JAMSTEC 横浜研究所, 2011 年 4 月 20 日.
- ②③ Masaki Yoshida, Future supercontinent assembled in the northern hemisphere: Insight from a numerical model of mantle convection, European Geosciences Union General Assembly 2011, Austria Center Vienna, Wein, Austria, Apr. 8, 2011.

〔その他〕 ウェブ記事

New Scientist (Reed Business Information Ltd.), 17 September 2011, Issue number 2830, p16, The next Pangaea will have pieces missing.

刊行物

『53rd Science & Technology Week』, 『地球のマントル, 地下深くの流れ』, 2012 年 3 月, 文部科学省 科学技術団体連合発行.
JAMSTEC オリジナルカレンダー, 2013 年度版, 海洋研究開発機構発行.

テレビ番組監修

フジテレビ, 土曜プレミアム『池上彰スペシャル 世界が変わった日～あの震災から 1 年～』, 2012 年 3 月 10 日(土)放送.

テレビ番組・書籍への素材提供

NHK E テレ, NHK 高校講座『地学基礎 第 20 回 地球内部の動き』, 2013 年 9 月 25 日(水)放送.
佐藤勝彦著, 『気が遠くなる未来の宇宙のはなし』, 宝島社, 2013 年刊行.

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