

平成21年6月30日現在

研究種目：特定領域研究（計画研究）

研究期間：2004 ～ 2008

課題番号：16075205

研究課題名（和文） 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

研究課題名（英文） Numerical modeling of earth evolution based on heat and mass transport focusing on downwelling mantle flows.

研究代表者

浜野 洋三 (HAMANO YOZO)

独立行政法人海洋研究開発機構・地球内部変動研究センター・プログラムディレクター

研究者番号：90011709

研究成果の概要：

本研究では、マントル下降流の振る舞いが、全マントル規模の熱輸送過程、地球熱進化過程に与える影響、及び沈み込み帯における火成活動、熱輸送や物質循環（特に水分布）に与える影響を、数値シミュレーションによって明らかにした。プレート沈み込みに伴って大量の水が遷移層まで取り込まれることが示されたこと、及び3次元球殻マントルのシミュレーションによって遷移層付近に横たわるスラブが再現できたことは、特に重要な成果である。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2004年度	7,000,000	0	7,000,000
2005年度	15,900,000	0	15,900,000
2006年度	13,200,000	0	13,200,000
2007年度	13,200,000	0	13,200,000
2008年度	10,600,000	0	10,600,000
総計	59,900,000	0	59,900,000

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、数値モデリング、滞留スラブ、地球進化、地球変動、マントル下降流

1. 研究開始当初の背景

地震・火山現象を引き起こすプレート運動は、マントル全体で起きている対流の表層の動きに他ならない。地球活動の全体像を理解する上でマントル対流の解明は必須である。マントル対流の最大の特徴は、対流の湧き出し口がプレートの生産域（中央海嶺）と一致せず、一方、沈み込み口はプレートの消滅域（海溝）と一致する点にある。マントル上昇流が厚いプレートに覆われてよく見えない

のに対して、下降流はプレートの沈み込みとして地表でも観察可能なのである。従ってマントル対流の実体解明には、沈み込むスラブに着目して下降流の側からマントル対流の全体像に迫るアプローチが有効と考えられる。本研究開始当初、沈み込むスラブに関して、日本はリージョナルスケール・グローバルスケールの地震波トモグラフィ、あるいはスラブ物質の相転移・脱水反応に関する高温高圧実験において世界をリードする成果を得ていた。またマントル深く沈み込んだス

ラブの鮮明なイメージングには海底地球物理観測が欠かせないが、その技術開発において日本は世界をリードしていた。また準備的な研究としては、平成 8-13 年度の新プログラム「海半球ネットワーク計画—地球内部を覗く新しい目—」により、世界最大のプレート沈み込み帯である西太平洋域に、世界に類のない「海底観測点を含む海域総合地球物理ネットワーク」が完成した。併せて固定観測網を補完し、より高分解能なイメージングを可能にする海底長期地震・電磁気観測システムが開発実用化された。一方で同計画によりプレート沈み込みの実態解明が進み、マントル遷移層に横たわるいわゆる「スタグナントスラブ」の一般的存在が明らかになった。またスタグナントスラブが、マントル対流の非定常性と表層プレート運動の歴史とを統一的に理解する 1 つの鍵であるとの認識が生まれた。一方、平成 12-14 年度特定領域研究「超高压地球科学：プレート・マントル相互作用の超高压物質科学」により、下部マントル・コアに相当する圧力発生技術や放射光利用のその場観察技術の開発が格段に進み、その結果、マントル物質・コア物質の超高压下における相転移・熔融・脱水反応などに関して大きな成果が得られた。また平成 10-14 年度振興調整費「高精度の地球変動予測のための並列ソフトウェア開発に関する研究」により、世界最速コンピューター「地球シミュレータ」を用いた計算機固体地球科学の展開が始まり、その一環として地球シミュレータの能力を最大限生かしたマントル対流シミュレーションの準備が本領域参加者の間で進みつつあった。海半球計画の成果にこれら 2 つのプロジェクト研究の成果を持ち込むことにより、観測・実験・計算機科学を結集した新たな研究展開が可能となりつつあった。

2. 研究の目的

マントル対流を根源とする現在の地球のグローバルな活動は、マントル下降流の沈み込み、滞留、崩落等のプロセスによって大きく影響されている。沈み込むスラブの滞留と崩壊の過程は、一方向に冷却する地球の活動の歴史において、突発的な事件や変動のリズムを作り出すと考えられる。本計画研究では、これらの地球史上の出来事の原因である地球内部の熱/物質輸送に焦点をあて、マントル下降流の振る舞いが (1) プレート運動や対流モードの変動を通して地球の熱進化過程に与える影響、(2) 沈み込み帯における火成活動、熱輸送や物質循環 (特に水分布) 等に与える影響、(3) 全マントル規模の熱輸送過程に与える影響、について数値シミュレーションを実施し、その結果を、観測グループにより得られる沈み込み帯の詳細な力

学構造や温度構造、高压物性グループによる物性測定の結果等と結合させることにより、現在の地球深部の物性と状態を特定する。また、実際の地球深部の物性、熱輸送や物質循環をパラメータ化して (3) のグローバルモデルに組み込み、時間と共に変動する地球進化過程を復元することにより、マントル下降流の振る舞いが地球の熱的・物質的進化過程に与えてきた影響を解明することを目的とする。

3. 研究の方法

本研究では、マントル対流の数値モデリングによって、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、プレート沈み込み帯で特に重要と考える水の循環に注目し、プレート沈み込みに伴う地球深部への水輸送のモデリングと、地球深部での水の存在に伴って引き起こされる広義の島弧活動のモデリングを行なっている。(2) については、マントル遷移層、マントル最下部近傍の相転移、大陸地殻、プレート運動等とマントル対流との相互作用を明らかにするためのシミュレーション研究を行なっている。

4. 研究成果

(1) プレート沈み込みに伴う水輸送とそれにもなう元素の挙動の研究

① 深部に沈み込んだ水とそれに伴う元素の挙動

数値モデルおよび岩石学的研究により、プレートの沈み込みに伴い、多量の水がマントルに沈み込みうる事が結論できた。沈み込みの際、水を含んだ海洋地殻は比較的浅所 (200km 以浅) で脱水するが、その水がスラブ直上に含水層を形成し、より深部にまで持ち込まれる。このスラブ直上の含水層の存在は、近年の地震波解析からも支持され、地球規模水循環の入り口の様子が解明されつつある。また、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、マントル物質に記録された物質科学的証拠から地球規模物質循環について制約をあたえる研究を実施した。大西洋およびインド洋に広がる海嶺玄武岩と海洋島玄武岩の同位体組成空間の解析を行った結果、新たな構造と 2 つの独立成分 (IC1 と IC2) が見い出された。この

結果はマンタルの同位体不均質が、溶融に伴う元素分別と、水溶液-岩石反応に伴う元素分別の2つのプロセスで形成されていることを示している。以上の解析結果は、マンタルにおける物質循環様式に重要な制約を与えると考えられる。

②沈み込むスラブから脱水された水の効果

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を築くことができた。スラブが持ち込む水によってマンタ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、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。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。また、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、その高温異常は水平方向から持ち込まれた高温異常が410km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。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進展させる上での一指針となる事が期待される。

(2) グローバルマンタル対流モデリングによる地球大変動の起源の解明

①海洋地殻リサイクリングとマンタルの進化

プレート運動と火成活動を含むマンタル対流の数値モデリングを行い、マンタルにリサイクルした海洋地殻が、マンタルの内部構造やその進化、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。

現在のマンタルでは、沈み込んだ海洋地殻はコア・マンタル境界上にたまり、スーパーブルームを形成する。スーパーブ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とバランスし、全体としては中立であるため、スーパーブルームは下部マンタル深部に安定に存在できる。これに対し、地球の歴史をさかのぼると、マンタルにおける放射性元素の含有量が多く内部熱源が強くなり、スーパーブルームは安定に存在できなくなる。そして頻繁にマンタル深部から高温の物質がわき上がり「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、その運動はカオティックになる。また、このレジームにおけるマンタルは、カオティックなプレート運動とバーストによるマンタルの攪拌と、スーパーブルームそのものの不安定性のため、現在のマンタ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、マンタルバーストのレジームから安定なスーパーブ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ことが結論される。地球のマンタルは、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、マンタ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、安定なスーパーブ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ことが推測される。

② 球殻マンタルでの対流パターンとスタグナントスラブの形成

マンタルの660 km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と考えられている。このクラペイロン勾配の値がマンタルの全球的な流れにどのような影響を持つかについて、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。実現された対流のパターンは、マンタ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表示すると、3つの領域に分類できる。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タルの物質交換が完全に妨げられて二層対流となる。この中間の領域では中途半端な妨げの効果により、下降流や上昇流が上下マンタル境界で一時的に滞留するのが見られる。レイリー数が高いほど、遷移が起こるクラペイロン勾配の値は緩やかとなる。ただし、滞留は局所的であり、実際のトモグラフィ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。更に現実的な地球モデルとして、リソスフェアに相当する表面の高粘性部分、低粘性の上部マンタル、そして40倍大きな粘性を持つ下部マンタル、という粘性構造を設定し、さらに粘性の温度依存性、プレート物質の降伏応力を設定してシミュレーションを行った結果は、3次元球殻マンタル対流モデルでは世界で初めて、実際の地球に近い滞留運動の様相を実現することができた。シミュレーション結果では、660 km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、横たわるスラブという構造が実現され、表面付近では海溝後退に相当する現象が起こっている。また、滞留したスラブ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。

③三次元球殻内マントル対流の次数1・次数2パターン

現在の地球のマントル対流の温度構造は、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。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も、この次数2パターンが発生しやすいことが示されている。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も考慮した場合も、次数1パターンが発生することが分かってきた。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く、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。本研究では、より詳細に三次元球殻内対流の基本構造を調べるため、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。内部熱源の有無に関わらず共通して言えることは、マントルの上面と下面の粘性率比が $10^3 \sim 10^4$ 程度のときに次数1パターンが発生する、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パターンが現れることである。本研究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。

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 20 件)

- ① Yoshida, M. and Nakakuki, T., Effects on the long-wavelength geoid anomaly of lateral viscosity variations caused by stiff subducting slabs, weak plate

margins and lower mantle rheology, *Phys. Earth Planet. Int.*, 172(3-4), 278-288, doi:10.1016/j.pepi.2008.10.018, 2009. (査読有)

- ② Honda, S., Numerical simulations of mantle flow around slab edges, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 277, 112-122, 2009. (査読有)
- ③ Honda, S., A simple semi-dynamic model of the subduction zone: effects of a moving plate boundary on the small-scale convection under the island arc, *Geophys. J. Int.*, 173, 1095-1105, 2008. (査読有)
- ④ Ogawa, M., Mantle convection; a review, *Fluid Dyn. Res.*, 40, 379-398, 2008. (査読有)
- ⑤ Iwamori, H., and Albareda, F., The decoupled isotopic record of ridge and subduction zone processes in oceanic basalts by Independent Component Analysis, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 9, Q04033, doi:10.1029/2007GC001753, 2008. (査読有)
- ⑥ Nakamura, H., Iwamori, H., and Kimura, J.-I., Geochemical evidence for enhanced fluid flux due to overlapping subducting plates, *Nature Geoscience*, 1, doi:10.1038/ngeo200, 2008. (査読有)
- ⑦ Tonegawa, T., Hirahara, K., Shibutani, T., Iwamori, H., Kanamori, H., and Shiomi, K., Water flow to the mantle transition zone inferred from a receiver function image of the Pacific slab, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 274, 346-354, 2008. (査読有)
- ⑧ Yoshida, M., Core-mantle boundary topography estimated from numerical simulations of instantaneous mantle flow, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 9(7), Q07002, doi:10.1029/2008GC002008, 2008. (査読有)
- ⑨ Yoshida, M., Mantle convection with longest-wavelength thermal heterogeneity in a 3-D spherical model: Degree one or two?, *Geophys. Res. Lett.*, 35, L23302, doi:10.1029/2008GL036059, 2008. (査読有)
- ⑩ Honda S. et al., Spatial and temporal evolution of arc volcanism, *Island Arc*, 16, 214-223, 2007. (査読有)
- ⑪ Honda S. et al., Sinking hot anomaly trapped at the 410 km discontinuity, *Earth and Planetary Science Letters*, 261, 565-577, 2007. (査読有)
- ⑫ Ogawa, M., Superplumes, Plates, and mantle magmatism in two-dimensional

- numerical models, *J. Geophys. Res.*, 112, B06404, 10. 1029/2006JB004533 2007. (査読有)
- ⑬ Iwamori, H., Richardson, C., and Maruyama, S., Numerical modeling of thermal structure, circulation of H₂O, and magmatism-metamorphism in subduction zones: implications for evolution of arcs, *Gondwana Research*, 11, 109-111, 2007. (査読有)
- ⑭ Iwamori, H., Transportation of H₂O beneath the Japan arcs and its implications for global water circulation, *Chemical Geology*, 239, 182-198, 2007. (査読有)
- ⑮ Honda, S., Y. Orihashi, K Mibe, A. Motoki, H. Sumino and M. J. Haller, Mantle wedge deformation by subducting and rotating slab and its possible implication, *Earth Planets Space*, 58, 1987-1992, 2006. (査読有)
- ⑯ Yoshida, M., and A. Kageyama, Low-degree mantle convection with strongly temperature- and depth-dependent viscosity in a three-dimensional spherical shell, *J. Geophys. Res.*, 111(B3), B03412, doi:10. 1029/2005JB003905, 2006. (査読有)
- ⑰ Ichikawa, H., K. Kurita, Y. Yamagishi, and T. Yanagisawa, Cell pattern of thermal convection induced by internal heating, *Physics of Fluids*, 18, 038101, 2006. (査読有)
- ⑱ Honda, S., and T. Yoshida, Application of the model of small-scale convection under the island arc to the NE Honshu subduction zone, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 6, Q01002, doi:10. 1029 /2004GC000785, 2005. (査読有)
- ⑲ Honda, S., and T. Yoshida, Effects of oblique subduction on the 3-D pattern of small-scale convection within the mantle wedge, *Geophys. Res. Lett.*, 32, L13307, doi:10. 1029/2005GL023106, 2005. (査読有)
- ⑳ Yoshida, M. and M. Ogawa, Plume heat flow in a numerical model of mantle convection with moving plates, *Earth and Planetary Science Letters*, 239(3-4), 276-285, 2005. (査読有)
- [学会発表] (計 13 件)
- ① Yanagisawa, T. The effect of phase transition and viscosity layering on the slab stagnation, Final SSP International Symposium (2009. 2. 26, Kyoto, Japan)
- ② Honda, S. Modeling of front and back sides of subduction zones around the Japanese Islands, Final SSP International Symposium (2009. 2. 26, Kyoto, Japan)
- ③ Honda, S. Mantle flow around slab edges: Numerical simulations and their implications for the flow in the sub-slab mantle, Final SSP International Symposium (2009. 2. 26, Kyoto, Japan)
- ④ Morishige, M. Possibility of hot anomaly in the sub-slab mantle at northeast Japan subduction zone, Final SSP International Symposium (2009. 2. 26, Kyoto, Japan)
- ⑤ Ogawa, M. The fate of subducted oceanic crusts and variety of plumes, Final SSP International Symposium (2009. 2. 26, Kyoto, Japan)
- ⑥ Yoshida, M. Spherical mantle convection with degree-one and -two dominant thermal structures, Final SSP International Symposium (2009. 2. 26, Kyoto, Japan)
- ⑦ Yanagisawa, T. Fluctuation of Convection Pattern in Liquid Metal Under Uniform Magnetic Field, American Geophysical Union 2008 Fall Meeting (2008. 12. 18, San Francisco, USA)
- ⑧ Honda, S. Mantle flow around the slab edge: Numerical simulations and their implications for the trench-parallel flow in the sub-slab mantle, Fall meeting of American Geophysical Union (2008. 12. 15, San Francisco, USA)
- ⑨ Iwamori, H. Global Structure of Isotopic Compositional Space of Oceanic Basalts by Independent Component Analysis and its Implications for Mantle Dynamics, Fall meeting of American Geophysical Union (2008. 12. 15, San Francisco, USA)
- ⑩ Ismail-Zadeh. Evolution of the subducting lithosphere beneath the Japanese Islands: An insight from the past, 7th General Assembly of Asian Seismological Commission and Seismological Society of Japan, 2008 Fall Meeting (2008. 11. 25, Tsukuba, Japan)
- ⑪ Yoshida, M. 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 (2008.11.25, Tsukuba,
Japan)

- ⑫ Yanagisawa, T. Measurement of
turbulent thermal convection in liquid
metal under uniform magnetic field,
Symposium on Ultrasonic Doppler Method
for Fluid Mechanics and Fluid
Engineering (2008.9.10, Prague, Czech
Republic)
- ⑬ Yoshida, M. 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 (2008.6.18, Pusan,
Korea)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

浜野 洋三 (HAMANO YOZO)
独立行政法人海洋研究開発機構・地球内部
変動研究センター・プログラムディレクター
研究者番号：90011709

(2) 研究分担者

本多 了 (HONDA SATORU)
東京大学・地震研究所・教授
研究者番号：00219239

小河 正基 (OGAWA MASAKI)
東京大学・大学院総合文化研究科・准教授
研究者番号：30194450

岩森 光 (IWAMORI HIKARU)
東京大学・大学院理学系研究科・准教授
研究者番号：80221795

柳澤 孝寿 (YANAGISAWA TAKATOSHI)
独立行政法人海洋研究開発機構・地球内部
変動研究センター・研究員
研究者番号：20359186

吉田 晶樹 (YOSHIDA MASAKI)
独立行政法人海洋研究開発機構・地球内部
変動研究センター・研究員
研究者番号：00371716

(3) 連携研究者

なし