

平成 30 年 6 月 19 日現在

機関番号：15401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26400456

研究課題名(和文)地球内部水循環におけるマントル遷移層と核マントル境界域の役割

研究課題名(英文) Roles of the mantle transition zone and the core-mantle boundary region on the water circulation in the mantle

研究代表者

中久喜 伴益 (Tomoeki, Nakakuki)

広島大学・理学研究科・助教

研究者番号：10263667

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：地球内部の水循環を長期にわたって継続させるメカニズムを理解するため、水循環を含むマントル対流の数値シミュレーションを行った。研究を実行するため、必要な2つの長時間沈み込みモデルを開発した。開発したモデルを用いて、マントルが持つことができる最大の水の量および含水量の増加速度を決定するには次のようなメカニズムを考慮することが重要であることを明らかにした。(1)片側沈み込み、(2)上部マントルのnominally anhydrous mineralsと下部マントル最上部の最大含水量、(3)マントル対流による混合速度。

研究成果の概要(英文)：Numerical simulation of mantle convection with water transport is performed to reveal mechanism that maintains water circulation during the history more than billions of years. We revealed the following mechanisms are important to control water transport and sea water absorption to the mantle during the Earth's history. (1) On-sided structure of the oceanic plate subduction, (2) water capacities of nominally anhydrous minerals and uppermost layer of the lower mantle, (3) efficiency of water mixing by the mantle convection.

研究分野：地球内部物理学

キーワード：水循環 マントル対流 沈み込み帯 プルーム マントル遷移層 核・マントル境界

1. 研究開始当初の背景

水の存在は地球の最も大きな特徴の一つである。水は、地表における生命活動をもたらすだけでなく、地球内部の活動に対しても大きな影響を与えている。なぜなら、水は岩石の強度や粘性率を低下させたり、融点を下げたりするからである。その結果、プレート運動の発現や日本のような沈み込み帯の火山活動が引き起こされる。つまり、地球内部に水が供給され続けることが、地球の活発な地質現象を引き起こしている。もしも、海洋が枯渇し、水の供給が止まってしまったのなら、地球も金星や火星と同様なプレート活動の停止した惑星となってしまったに違いない。このため、地球内部の水循環を長期にわたって継続させるメカニズムを理解することは、地球惑星科学における重要な課題である。

2. 研究の目的

固体地球の活動が現在も活発なのは、地球内部の水による働きが大きい。このため、地球内部の水循環を長期にわたって継続させるメカニズムを理解することは、地球惑星科学における重要な課題である。この課題を解くため、本申請では水が地表に戻るための動力的メカニズムに注目した研究を提案する。具体的には、水が上昇してくる地点と考えられるマントル遷移層や核・マントル境界の物性や流動則(レオロジー)がマントル上昇流の発生を通して水の帰還に与える影響を数値シミュレーションにより明らかにする。これによって、水がマントル上昇流とともに地表に帰ってくる量を見積もり、太古代から現在まで、地球が水循環を継続させることができるメカニズムを解明するのが本研究の目的である。

本研究は地球全体の水収支や循環における基礎的なメカニズムを理解するため、次のような4点について、マントルのレオロジーや物性がどのような影響を与えるのか研究する。それは、(1) マントル下降流に伴う上下マントル(660km)境界での下降流・上昇流への水の分離 (2) マントル遷移層でのブルームの発生とそれに伴う水輸送、(3) 核・マントル境界域におけるブルーム発生それに伴う水輸送、(4) ブルームの通過に伴う含水したマントル遷移層からの脱水と水の上昇量、である。このとき、レオロジーや物性に対する水の効果を考慮する。これら4つの機構により、マントルが水をどのくらいの時間スケールで循環させるのか調べ、地球全体の水収支の釣り合いを支えているメカニズムとして最も重要な物は何かということを知明することを目的とする。

3. 研究の方法

地球深部への水輸送と、マントル遷移層および核マントル境界域から、マントル上昇流に伴って水が地表に帰還するまでの数値モデルを構築する。数値モデルは、沈み込み帯の構造を再現できるレオロジーを持

つモデルと、グローバルなマントルの循環を計算するためのレオロジーを簡略化したモデルの2通りのものを開発する。沈み込みの構造を持つモデルでは、熱膨張率の深さ依存性の影響が取り入れられるモデルの開発を行った。さらに、マントル粘性率の最適化や核・マントル境界の温度差がブルーム発生に対して与える影響を調べ、数億年程度の水輸送の基本となるモデルを作成した。グローバルモデルについては、曲線座標系の性質を利用した粒子法を開発を行った。これにより水輸送を正確に見積ることができるようになった。さらに、沈み込み帯の構造を簡略化したレオロジーでも再現できるモデルの作成も行った。

4. 研究成果

本研究の成果の大きく分けて次の2つである。1つ目は、水輸送の計算を行うモデルを開発したことである。地球の水収支を計算するためには、数億年から数10億年に渡る計算が必要なことと、水の取り込み口である沈み込み帯の構造をモデルに取り入れることが必要である。このため本研究では、次のような2つのモデルを開発した。

1つ目は、これまで用いてきた水輸送を組み込んだプレート沈み込みモデルを発展させたモデルである。このモデルでは、マントル深部の熱浮力をより正確に扱うため、熱膨張率の深さ依存性をモデルに組み込んだ。さらに、下部マントルの粘性率および、下部マントルに沈み込んだリソスフェアの粘性率がプレート運動速度に与える影響を評価して、水循環シミュレーションに使用する粘性を決定した。このモデルでは計算時間の長さを考慮して、数億年程度の計算を行った。

2つ目は、グローバルマントル対流モデルに水輸送を組み込んだモデルの開発である。このモデルでは、基礎となるモデルとして、海洋研究開発機構の中川貴司氏による2次元 spherical annulus モデルとマントルの曲率による表面積変化を評価した2次元円筒モデルの2つを用いた。後者では、プレート沈み込みモデルに水輸送を組み込む際、Marker-and-Cell 法に基づく粒子法を用いている。この方法をそのまま2次元極座標系に適用できるようにするため、粒子座標 (r, θ) の代わりに半径方向の座標 r を $R = r^2/2$ 、速度を $V_R = rv_r$ 、 $V_\theta = v_\theta/r$ のように変換して (R, θ) 上で扱う方法を考案した。この方法によると、1メッシュあたりの粒子数や粒子とメッシュの間の物理量(スカラー量)の交換の計算を直角座標系と同じように扱うことができ、沈み込みモデルで開発したプログラムがそのまま利用できる。2次元円筒マントル対流の基本となるプログラムは愛媛大学の亀山真典氏の開発したものをを用いた。グローバルモデルでは、粘性率一定のモデルと、粘性チルの温度依存

性と降伏応力を持つモデル，さらに，粘性率を時間に対して固定しつつ沈み込みを再現できるモデルの3通りのモデルを開発した。これらのモデルを用いて数10億年の時間スケールを持つ水循環のシミュレーションを行った。

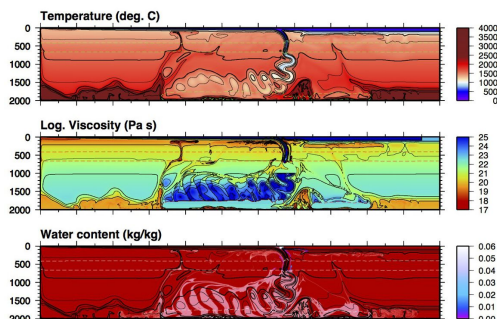


図1 沈み込みモデルによる水輸送の計算例。時間は2.75億年である。上から、温度、粘性率、含水率である。

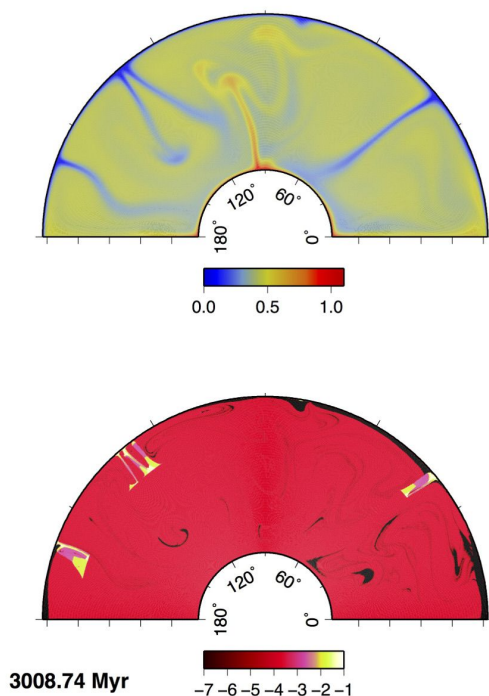


図2 グローバルモデルによる水輸送の計算例。上が温度(無次元スケール)，下が含水率(対数スケール)である。時間は30億年。この例では10億年ではほぼ最大の含水量に達している。

これら2つのモデルグローバルモデルを用いて地球内部の水循環について以下のようなことが分かった。

(1) 沈み込み帯の構造は地球内部に取り込む水の量に大きな影響を与える。このため、

水循環量を評価するには沈み込み帯の非対称構造を再現できるモデルで行うことが重要である。沈み込み帯を再現できるモデルと粘性率一定の両側沈み込みを持つモデルでは、水がマントル内で増大する速度が4倍程度異なった。

(2) 下部マントル最上部(UMLM)において含水率の最大値が上部マントルの nominally unhydrous mineral (NAM)よりも小さい場合には660km境界で脱水が起こる。脱水と下部マントルへの引きずり込みを繰り返すことにより、沈み込むプレート上の含水層の厚さが5倍程度まで増大する(図1)。このため、NAMとUMLMの最大含水率の比の5倍程度までの水を下部マントルに輸送する。

(3) 水はマントルブルームにより上昇し、マグマを発生させ、マントルから放出されるが、マントル対流による混合速度が速い場合はブルームによりアセノスフェアに運ばれるよりも速くマントルへ混合される。すなわち、混合の効率が水が最大量に達するまでの時間をコントロールする。

(4) 地球のマントルが水を最大保持できる量はNAMあるいはUMLMのどちらか小さい方の量により決まる。マントルが保持する水の最大量はその値にマントルの質量をかけたものに最終的に行き着く(図2)。UMLMの含水率の最大値がNAMの1/10(0.02 wt.%)のとき、その量は海洋1.5個分程度に相当する。

(5) このとき、大きな貯水能力を持つマントル遷移層は水で飽和することはない。UMLMの含水率がNAMよりも小さくスラブペネトレーションが起こる場合には、沈み込み帯の近傍の狭い領域にのみマントル遷移層の飽和含水率に達する場所が生成される。

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4件)

(1) A. Nakao, H. Iwamori, T. Nakakuki, Y. J. Suzuki, H. Nakamura, Roles of hydrous lithospheric mantle in deep water transportation and subduction dynamics, *Geophysical Research Letters*, 2018, doi: 2017GL076953RR (査読有・印刷中)。

(2) A. Nakao, H. Iwamori, T. Nakakuki, Effects of water transportation on subduction dynamics: Roles of viscosity and density reduction, *Earth and Planetary Science Letters*, 494, 178-191, doi: 10.1016/j.epsl.2016.08.016 (査読有)。

(3) T. Nakagawa, T. Nakakuki, H. Iwamori, Water circulation and global mantle dynamics: Insight from numerical modeling, *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 16, 1449-1464, 2015, doi:

10.1002/2014GC005701 (査読有).

(4) D. Yamazaki, T. Yoshino, T. Nakakuki, Interconnection of ferro-periclase controls subducted slab morphology at the top of the lower mantle, Earth and Planetary Science Letters, 403, 352-357, 2014, doi:10.1016/j.epsl.2014.07.017 (査読有).

〔学会発表〕(計 13 件)

(1) 金子岳郎, 中久喜伴益, Mechanical coupling of plate motion with the subducted slab penetrating into the lowermost mantle, 日本地球惑星科学連合, 2018 年 5 月, 千葉市.

(2) 中尾篤史, 岩森光, 中久喜伴益, 鈴木雄治郎, 中村仁美, Investigation of inputs to subduction zones: Influence of tectonic processes on the incoming plate, 日本地球惑星科学連合, 2018 年 5 月, 千葉市.

(3) 中尾篤史, 岩森光, 中久喜伴益, Fluid-mediated processes and properties near convergent plate boundaries, 日本地球惑星科学連合, 2017 年 5 月, 千葉市.

(4) 中久喜伴益, 金子岳郎, 山崎大輔, Mechanical coupling between the plate and lowermost mantle controlled by the subducted lithosphere strength, 日本地球惑星科学連合, 2017 年 5 月, 千葉市.

(5) T. Kaneko, T. Nakakuki, Lowermost Mantle Evolution Coupled with the Plate Subduction, Goldschmidt 2016, 2016 年 06 月 27 日, Yokohama, Japan.

(6) H. Iwamori, S. Horiuchi, A. Nakao, T. Nakakuki, Role of water in subduction zone dynamics, Goldschmidt 2016, 2016 年 06 月 30 日, Yokohama, Japan (招待講演).

(7) 金子岳郎, 中久喜伴益, Lowermost mantle dynamics driven by the plate subduction, 日本地球惑星科学連合, 2016 年 05 月 22 日, 千葉市.

(8) 中尾篤史, 岩森光, 中久喜伴益, 沈み込み帯におけるマントル対流と水輸送のダイナミックな相互作用, 日本地球惑星科学連合, 2016 年 05 月 23 日, 千葉市.

(9) 中久喜伴益, 金子岳郎, 中尾篤史, 岩森光, 地球深部への水輸送と大規模不均質構造, 日本地球惑星科学連合, 2015 年 05 月 24 日, 千葉市.

(10) 金子岳郎, 中久喜伴益, 下部マントルに沈み込むスラブの運動と水の輸送, 日本地球惑星科学連合, 2015 年 05 月 26 日, 千葉市.

(11) 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 05 月 26 日, 千葉市.

(12) T. Kaneko, T. Nakakuki, Water migration with a subducting slab and the dynamic effect on whole mantle convection, Asia Oceania Geoscience Society 2014 Meeting, 2014 年 07 月 30 日, Sapporo, Japan.

(13) T. Nakakuki, Water transport to the deep mantle dynamically coupled with a plate-mantle convection system, Study of the Earth's Deep Interior Symposium 2014, 2014 年 08 月 04 日, Hayama, Japan.

〔図書〕(計 1 件)

中久喜伴益・中川貴司著, 全マントル対流シミュレーション マントルの大規模構造, 鳥海光弘・他編 地球科学の事典, 朝倉書店, 258pp, 8.2 項, p190-191, 2018 年.

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
出願年月日:
国内外の別:

取得状況(計 0 件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
取得年月日:
国内外の別:

〔その他〕
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者
中久喜伴益 (NAKAKUKI, Tomoeki)
広島大学・大学院理学研究科・助教
研究者番号: 10263667

(2) 研究分担者 ()

研究者番号:

(3) 連携研究者 ()

研究者番号:

(4)研究協力者

岩森 光 (IWAMORI, Hikaru)

海洋研究開発機構・プログラムディレクター，東京大学・地震研究所・教授

中尾 篤史 (NAKAO, Atsushi)

東京大学・地震研究所・特任研究員

中川 貴司 (NAKAGAWA, Takashi)

海洋研究開発機構・主任研究員

亀山 真典 (KAMEYAMA, Masanori)

愛媛大学・地球ダイナミクス研究センター・教授