

令和 5 年 6 月 10 日現在

機関番号：15401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04109

研究課題名(和文)地球内部のグローバル水循環：水の再分配と貯蔵における下部マンツルの役割

研究課題名(英文)Global water circulation in the Earth's interior: roles of the lower mantle on water storage and distribution

研究代表者

中久喜 伴益 (Nakakuki, Tomoeki)

広島大学・先進理工系科学研究科(理)・助教

研究者番号：10263667

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：地球史の長時間にわたる地球内部と海洋の間での水循環を理解することは、地球惑星科学における最重要課題の1つである。本研究では、地球内部への水輸送量および脱水量、水の混合が正しく評価できる数値モデルの構築を行った。2次元円筒モデルを用いて含水率分布を計算した結果、現在の地球の含水率の深さ分布や海水量の変動は、下部マンツルの最大含水率が上部マンツルスラブの含水率より小さく、かつ、水輸送量が小さいモデルのほうが調和的であることが分かった。また、プレート沈み込みによる水輸送量をより正確に推定するため、沈み込み速度が安定して計算できる2次元矩形モデルを構築した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

地球表面の環境が安定し、生物が繁栄することができたのは、海が常に存在してきたからである。実際海水量の変動は太古より現在まで大変小さい。地球のマンツルを構成する岩石は大量の水を保持することができることが分かってきたが、一方でマンツルはまだ満水状態とは程遠いことが知られている。なぜ、海水はマンツルに吸収されてしまわないのだろうか？この問いに答えるため、水圏とマンツルの間の水循環を計算できるモデルの構築を試みた。その結果、マンツル対流による水の混合が重要なことや沈み込み帯から吸収される水がこれまでの予想よりも小さい方が整合的であることが分かった。

研究成果の概要(英文)：Understanding the water circulation between the Earth's interior and the hydrosphere over long periods of Earth history is one of the most important issues in geoscience. In this study, we developed a numerical model that can correctly evaluate water transport to the Earth's interior including dehydration and mixing processes. The depth distribution of the water content is calculated using a two-dimensional cylindrical model. The results suggest that maximum water content of the lower mantle less than that of the upper mantle slab and amount of water transported by the subducted slab is smaller than that simulated in the model. In order to more precisely estimate the water transport by the plate subduction, we constructed a two-dimensional numerical model of an integrated plate-mantle convection system in a rectangular box in which stable subduction rate is realized.

研究分野：固体地球物理学

キーワード：マンツル対流 水圏・固体地球相互作用 水輸送 沈み込み帯 含水率 下部マンツル マンツル遷移層

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

地球は生命に溢れる惑星である。これは、大量に存在する液体の水が、地球表層の環境を安定化しているからであると考えられる。その水のほとんどは海水であり、地球上には海が長期にわたって安定して存在してきたと考えられる。実際、地質学的な証拠から太古代より海は存在し、しかも大陸地殻が完全に水没したことがないことも分かっている。このことは海にある海水の量がほぼ一定であったことを意味している。一方、水は地球内部の活動にも強い影響を与える。というのは、水は岩石の摩擦強度や粘性率を低下させたり、融点を降下させたりするため、プレートテクトニクスや火成活動を引き起こす原因となっている。すなわち、地球内部に水が供給され続けていることが地球の地質学的な特徴を作り出しているということが出来る。従って、地球史の長時間にわたる地球内部と海洋の間での水循環を理解することは、地球惑星科学における最重要課題の1つである。

ここ20年にわたる高圧物性実験による地球内物質の研究から、岩石を構成する鉱物に水が取り込まれるメカニズムが分かってきた (Iwamori and Nakakuki, 2013)。最近の研究からはマントル遷移層(深さ約 410~660km)や下部マントル(深さ約 660~2900km)には dense hydrous magnesium silicate (DHMS) とよばれる含水鉱物が存在し、これまで考えられてきたよりも多くの水がマントル中に取り込まれ得ることが分かってきた。その量はマントル遷移層だけで海水質量の4~5倍 (Inoue et al., 1995)、下部マントルの DHMS を含めると10倍以上にも達する。しかしながら、現在のマントルが水に飽和した「満水」の状態にあるとは考えにくい。なぜなら、満水状態のマントル遷移層や下部マントルの DHMS が上昇すれば大規模な脱水が起こり、火成活動に多大な影響を与えると予測されるが、実際にそのような火成活動は起きていないように見えるからである。つまり、マントルの含水可能量は非常に大きいにもかかわらず、マントル内部はまだあまり多くの水を持っていない可能性が高い。このことから、大きな含水可能量と矛盾せずに、どのような機構で現在のマントル内部の含水量が決定されるのかという疑問が浮かび上がってくる。

一方、マントル対流の数値シミュレーションにおいても水輸送と水による物性への影響を取り入れたモデルが作られるようになってきた (Iwamori, 1998; 2004)。最近では、下部マントルも含めた沈み込み帯深部への水輸送のシミュレーション (Nakao et al, 2016) や、全地球規模の水輸送 (Nagagawa et al., 2015; Nakagawa et al. 2018; Price et al., 2019) や沈み込むプレート (Kaneko et al., 2019) のシミュレーションも行われるようになってきた。水輸送を含む全地球規模のマントル対流数値シミュレーションは、応募者や共同研究者によってまだ始まったばかりである。それにもかかわらず、いくつかの注目すべき成果が得られつつある。例えば、現在のマントルが水を海洋から取り込む量にはプレート沈み込みの非対称構造が大きく関わっていること、マントル遷移層や下部マントル上部の DHMS が水で飽和するか否かについては、下部マントル深部などの含水しにくい層との混合効率が重大な影響を与えること、などである。これらの成果から、地球がどれだけ多くの水を持つことができるのかという問いは、水がマントル中でどのように分配・混合されるかという問いと同義であり、この問いに正しく答えるには脱水・吸水過程を含めた地球内部での水輸送量を定量的に正しく評価することが不可欠であることが理解できる。

2. 研究の目的

本研究では、上記の問題を解決するため、地球内部への水輸送量および脱水量、水の混合が正しく評価できる数値モデルの構築を試みる。具体的には、プレート沈み込み構造や下部マントルにおける含水物性、さらに対流の構造を決定する要因である熱膨張率や粘性の深さ依存性に注目して、数値モデルの構築と数値計算を行う。すなわち、円筒座標系による全地球規模のマントル対流モデルや、非対称沈み込みが再現できるマントル対流モデルを用いて、水が下部マントルからマントル全体へ混合していく過程を再現する。これによって、マントル遷移層や下部マントルの吸水量と吸水速度を見積もることが本研究の目的である。

3. 研究の方法

本研究では、2次元の円筒および矩形のマントル対流モデルを用いて、実際の地球の沈み込み帯構造を再現する。そのモデルに含水鉱物の相図と固相による水輸送、および脱水過程を結合し、沈み込みによるマントル深部への水輸送およびマントル全体への混合を可能な限り長時間計算する。それによって、マントルへの水の貯蔵過程を明らかにする。本研究では特に、下部マントルの持つ役割について注目し、下部マントルの含水率や含水鉱物の浮力の効果について注目する。

4. 研究成果

(1) 長時間の水輸送と水圏・固体地球間の水収支変動

2次元円筒の形状を持つマントル対流モデルを用いて、地球内部への水輸送および水圏・固体地球間の水収支の変動を研究した。円筒モデルでは、長時間計算を行うため、粘性率を一定としたモデルと、粘性率変化を空間内の変動のみに与えて、片側沈み込みを実現できるモデルの2通り

を開発した。ただし、後者のモデルがうまく動作したのはマンツルの粘性率が現在に近い場合など、限られた条件下のみだけであった。当初、地球の冷却史を考慮した水輸送の計算を行う予定であったが、これについては計画通り研究を行うことができなかった。従って、粘性率一定を仮定したモデルを用いて計算結果を解析し、地球内部への水輸送の様式や水圏・固体地球間の水収支の変動のメカニズムについて研究を行なった。この計算では、水のマンツルダイナミクスへの影響は無視している。このため、含水鉱物の分布のみが結果に影響する。対流速度を制御しているレイリー数や下部マンツルの最大含水率をパラメータとして計算を行なった。

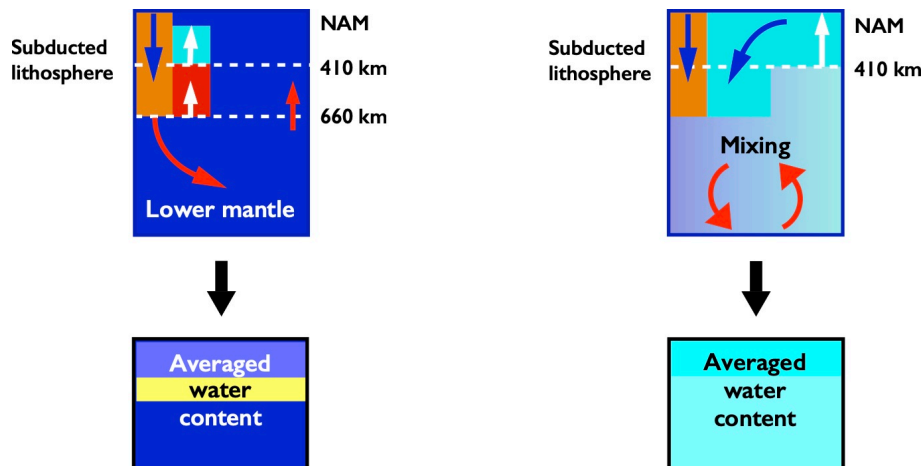


図1. マンツル内部の水輸送と含水率分布の様式. 下部マンツル含水率が小さい場合(左), 大きい場合(右). 含水率は赤・橙・黄・水・薄青・青の順で小さくなる. 下は水平平均含水率.

その結果、以下のような結論が得られた。まず、マンツル内部における水輸送について、含水鉱物が存在すると含水鉱物が水に飽和した状態まで水を吸収できると考えてしまいがちであるが、含水可能量だけでなく、マンツル対流による混合の効果が非常に重要であることが分かった。図1はマンツル内部の水輸送の様式をまとめた模式図である。下部マンツルの最大含水率がNAMのそれよりも小さい場合は、下降流が下部マンツルに沈降する際に脱水を起こし、マンツル遷移層中に含水率の高い領域ができる。これは、電気伝導度の観測(Yoshino et al., 2013)と調和的である。特に脱水箇所の直上では含水率は最大含水率となる。このモデルで取り入れることのなかったDHMSを考慮した場合は、この高含水領域が下部マンツル最上部まで広がる可能性がある。そのような予測は、地震学的手法によって下部マンツル最上部に高含水領域が発見されていること(Schmandt et al., 2014)を説明可能である。十分に時間が経過すると、下降流周辺の含水率が高い領域を除いて、ほとんどの領域が最小の最大含水率を持つ下部マンツルと同じ含水率となっている(図1左)。このとき、マンツルは海洋1つ分よりも少し多い程度の水を吸収して、マンツルが水圏から吸収する水量が放出する水量にほぼ釣り合った状態になった。このときでも、上部マンツルやマンツル遷移層は満水ではないので、貯水量に変動が起きる。この変動量は海水量の2割程度であった。地球ではこれほど海水量が変動したことはないと考えられている(Korenaga et al., 2017)。これを小さくするには、沈み込み帯から深部に運ばれる輸送量を小さくする必要があると考えられる。一方、下部マンツルがNAMと同等か、それ以上大きい最大含水率を持つ場合には、下降流は上部下部マンツル境界で脱水を起こさず、そのまま下部マンツルに沈み込む。すなわち、マンツル遷移層の含水率が大きくなるためには、下降流が下部マンツルの最大含水率よりも高い含水率を持つことが必要である。下部マンツルの最大含水率はこれ以上大きくしても地球のマンツルが吸収する水の量はほとんど増加しない。これは次のような理由による。下部マンツルに輸送される水の量は上部マンツルから輸送される水の量で決まる。ところで、上部マンツルから輸送される水の量は沈み込むプレートが運ぶ水の量と沈み込むプレートに引きずられるアセノスフェアが運ぶ水の混合によって決まる(図1右)。したがって、上部マンツル浅部の非含水鉱物(NAM)の持つ含水率は、その体積が大きいことにより混合後の含水率に強く影響する。異なる下部マンツルの最大含水率を持つ2つのモデルのどちらにおいても、マンツルが貯水できる量を決めているのは、最大の含水率を持つ層ではなく、最小の含水率をもつ層である。このとき、マンツルは深さ方向にほぼ一様な含水率分布を持つと推定される。これらのことから、観測から推定されるマンツルの現在の含水率分布は下部マンツルの最大含水率がより小さいモデルの方が調和的であることが分かった。また、地球深部への水輸送量は過去の研究で推定されていたように(Korenaga et al., 2017; Kurosawa et al., 2018; van Keken et al, 2011), かなりゆっくりとしたものであるのかもしれない。

(2) 片側沈み込みを持つ長時間水輸送モデルの開発

前項の水循環シミュレーションでは、筆者らによるものも含めて実際の沈み込み帯のように

非対称的な片側沈み込みが再現できていない。再現された下降流は、対称的な両側沈み込み構造を持ち、海洋地殻の下のマントルに当たる部分が含まれている。このため、1つ1つの下降流が実際の沈み込みよりも多くの水を運んでいる可能性がある。筆者らは、主に沈み込み帯の構造や水輸送の研究に用いてきたモデルを基礎として、数億年程度の長時間水輸送の計算が可能なモデルを開発した(図2)。この際、マントルの体積と海洋地殻の沈み込み速度との比を現在の地球におおよそ合わせてある。このため、このモデルでは、熱膨張率の深さ依存性や下部マントル最上部でのスラブの粘性率の低下を考慮している。さらに、このモデルでは水による岩石の密度低下の効果を考慮した。この水輸送シミュレーションからは、以下のようなことが分かった。図3は異なる深さにおける水輸送量の時間変化である。プレートがマントル深部に沈降して行くにつれて脱水を生じ、より深部に輸送される水量が少なくなっている。マントル全体の吸水速度は、下部マントルへ輸送される速さとほぼ一致する。これは、沈み込みによる水の注入があるにもかかわらず、マントル遷移層やそれ以浅の領域に含まれる水の量が増えていないことを意味している。その原因は遷移層の含水した岩石がプルームとなって上昇することで、遷移層の水が地表まで戻されていることによる。つまり、含水によって密度が低下すると、含水率が平均的に高い遷移層が形成されない可能性がある。また、モデルの下部には大規模剪断波低速領域(LLSVP)を模した高密度領域が設定されている。含水により浮力をもつ岩石が高温領域と接することでプルームが生成されている様子が再現されている。従って、含水鉱物による密度の低下は今後の研究において重要な物理パラメータであることが分かった。さらに、このモデルでは火成活動により水が放出される効果は考慮していない。この効果は、水の増加速度に影響する可能性がある。また、図2から、LLSVP内の対流により、沈み込んだ水がLLSVPへも混合されていく

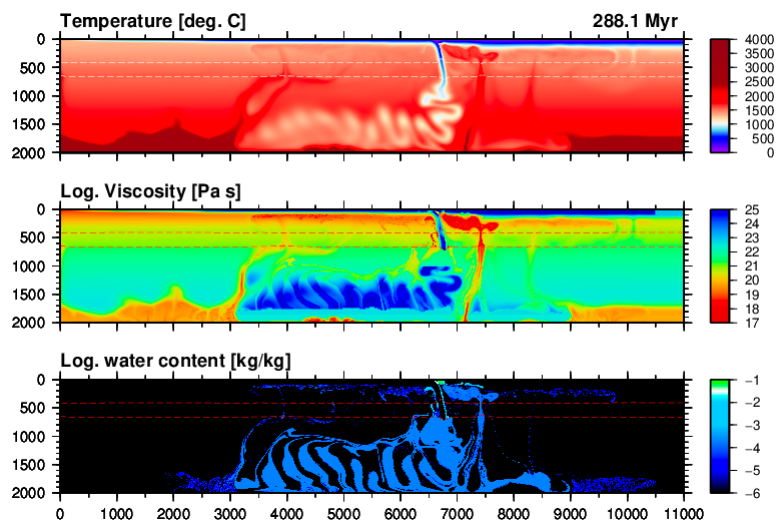


図2. 片側沈み込みを持つマントル対流モデルによる水輸送シミュレーション.

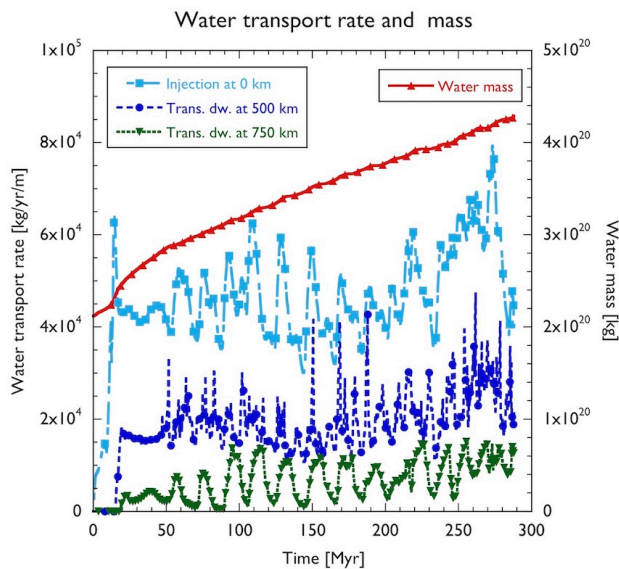


図3. 地球深部への水輸送. 点線: 深さ0, 500, 750 kmにおける海溝長さ1 mあたりの下方への水輸送量. 赤実線: マントル内部へ吸収された水の量

ことが分かる。この物質境界における混合の作用によって、下部マントルの最大含水率は一定と仮定しているにも関わらず、LLSVP とそれ以外のマントルの間に含水率のコントラストを生じていることは注目に値する結果である。なぜなら、岩石学的に推定される深部マントルの含水率は幅広い値を示しているからである(Dixon et al., 2002)。

しかし、この計算では次のような問題点があることが分かった。1つは計算に膨大な時間がかかり、45億年分計算するのが難しいことである。もう1つは沈み込むプレートの速度の変動が大きいことである。これは、モデルが2次元であるために、沈み込んだプレートがモデルの底部に達すると、マントルがプレートを挟んで左右の領域に分かれて、物質がそれぞれの領域から出入りできなくなってしまうことが原因であると考えられる。沈み込んだプレートは同じ場所に積み上がり、間欠的に倒壊を起こす。このとき、プレートの沈み込み速度は大きく増加する。この沈み込み速度の変動は、図3において水輸送量の変動として観察される。このため、次のような解決策をとることとした。それは、マントル最深部を完全に受動的な流れの場として計算することである。すなわち、マントル最深部500 km程度を一定のポテンシャル温度を持つ層とする。このようなモデルによる水輸送の計算例を図4に表す。このようにすることで、プレートの沈み込み運動を安定化させることができる。さらに、このモデルではマントルの曲率を考慮したスケールリングなしにマントル内部の温度を制御することができる。したがって、必ずしも円筒モデルや球柱モデルは必要ではなくなる。2次元矩形モデルを利用すると、沈み込み量に対するマントル体積の比からモデルの深さが2000 kmで良く、また、運動方程式の係数行列が対称性を持つ。このため曲線座標系のモデルと比較して、1桁程度高速に計算できる。このため、矩形モデルは長時間計算する目的に向いている。現在、最大含水量の相図の改定や沈み込み速度を実際の地球に合わせる作業まで終了し、そのモデルを用いた水輸送の計算を開始したところである。今後は円筒の粘性一定モデルやパラメータ化対流モデルによる冷却の計算結果と組み合わせて、地球の冷却史の効果を考慮した水輸送シミュレーションを行なう予定である。

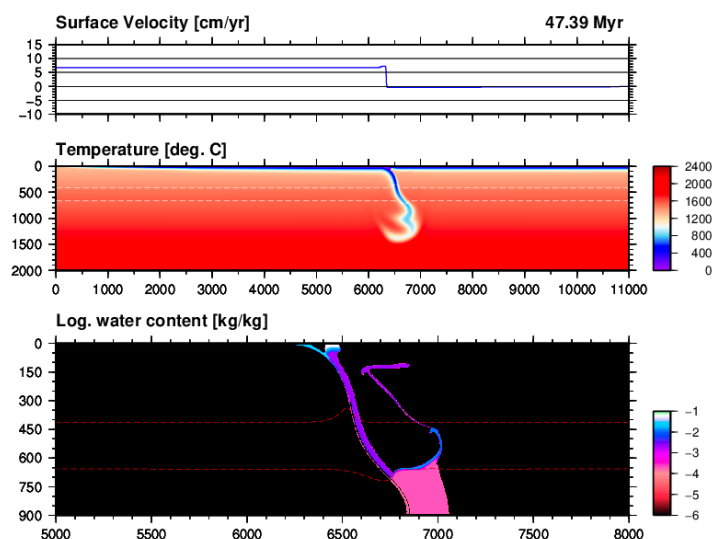


図4. 沈み込み速度変動が少ない水輸送シミュレーション。含水率は沈み込み帯付近を拡大表示。

<引用文献>

- J.E. Dixon, L. Leist, J. Langmuir, J.G. Schilling: *Nature* **420**:385–389, 2002.
T. Inoue, H. Yurimoto, Y. Kudoh: *Geophys. Res. Lett.*, **22**, 117–120, 1995.
H. Iwamori: *Earth Planet. Sci. Lett.*, **160**, 65–80, 1998.
H. Iwamori: *Earth Planet. Sci. Lett.*, **227**, 57–71, 2004.
H. Iwamori, T. Nakakuki: in *Physics and Chemistry of the Deep Earth*, ed. by Karato, S., pp372–392, 2013.
T. Kaneko, T. Nakakuki, H. Iwamori: *Phys. Earth Planet Inter.*, **294**, 106274, 2019.
J. Korenaga, N.J. Planavsky, D.A.D. Evans: *Phil. Trans. R. Soc. A*, **375**, 20150393, 2017.
H. Kurosawa, J. Foriel, M. Laneuville, C. Houser, T. Usui: *Earth Planet. Sci. Lett.*, **497**, 149–160, 2018.
T. Nakagawa, T. Nakakuki, H. Iwamori: *Geochem. Geophys. Geosyst.*, **16**, 1449–1464, 2015.
T. Nakagawa, H. Iwamori, R. Yanagi, A. Nakao: *Progr. Earth Planet. Sci.*, **5**, 51, 2018.
A. Nakao, H. Iwamori, T. Nakakuki: *Earth Planet. Sci. Lett.*, **454**, 178–191, 2016.
M.G. Price, J.H. Davies, J. Panton: *Geochem., Geophys. Geosyst.*, **20**, 2199–2213, 2019.
B. Schmandt, S.D. Jacobsen, T.W. Becker, Z. Liu, K.G. Dueker: *Science*, **344**, 1265–1268, 2014.
T.H. Torsvik, B. Steinberger, L.R.M. Cocks, K. Burke: *Earth Planet. Sci. Lett.*, **276**, 273–282, 2008.
P.E. van Keken, B.R. Haker, E.B. Syracuse, G.A. Abers: *J. Geophys. Res.*, **116**, B01401, 2011
T. Yoshino, T. Katsura: *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.*, **41**, 605–628, 2013.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 中久喜伴益・亀山真典	4. 巻 -
2. 論文標題 マントル対流系における水の循環とその役割	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 高圧力の科学と技術	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計0件

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------