

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 16 日現在

機関番号：82706

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2014

課題番号：25800254

研究課題名(和文) マルチタイムスケール地球内部変動モデリング

研究課題名(英文) Multi time-scale modeling on geodynamics

研究代表者

中川 貴司 (Nakagawa, Takashi)

独立行政法人海洋研究開発機構・数理科学・先端技術研究分野・主任研究員

研究者番号：50396941

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：マントルダイナミクスに基づく長時間スケールとコアダイナミクスに基づく短時間スケールの現象を統合的に理解することを試みた。その結果、コアマントルの長時間進化について、初期地球分化によって形成された始原的な物質の存在が無視できないことが判明した。また、長時間スケールのダイナミクスでは、外核最上部に厚さ100kmから1000km程度の安定成層構造が示唆されるが、その安定成層の成因はコアマントル間の化学物質交換過程によって生成されることが短時間スケールの現象を解析することによって強く示唆された。

研究成果の概要(英文)：We attempt to reveal both long-term and short-term dynamics of Earth's deep interior, which are based on mantle convection simulation as the long-term and geodynamo simulations as the short-term. On the long-term evolution, the primordial material generated from early Earth differentiation would be important for reconciling core-mantle evolution such as the size of inner core and magnetic field generation over the geologic time-scale. With suggestions from long-term evolution that the stably stratified region at the top of outer core, we hereby focus on the origin of such a region at the top of outermost core with 100 to 1000 km thickness. As a result, the origin of such a region might be a compositional interaction between metallic iron of core material and silicate material of mantle rock at the core-mantle boundary, which was strongly suggested from numerical geodynamo simulations.

研究分野：地球惑星流体力学

キーワード：マントルダイナミクス コアダイナミクス 熱化学進化 安定成層

1. 研究開始当初の背景

地球が現在持っている内部構造は初期地球の状態には依存しないことが熱進化計算などから示唆されている。しかし、地球化学データから得られている内部構造進化イメージなどを十分に説明するために初期地球における深部構造が重要な鍵となっている。また、初期地球から現在の地球への進化過程において、コアダイナミクスによって生成される長時間安定的なダイポール磁場の存在は地球コアマンテル進化を理解するために必要不可欠な条件である。初期地球から現在の地球への進化過程はマンテルダイナミクスに代表されるような長時間スケールの現象に支配されるが、ダイポール磁場の維持機構については、地球ダイナモという比較的短時間スケールの現象を物理的に理解しないと行けない。しかし、コアマンテル結合系のダイナミクスは時間スケールが異なる現象を統一的に取り扱わないといけませんが、各々が独立した現象として理解されているだけで、真の意味における統一的理解はまだ進んではいない。従って、マンテルダイナミクスとコアダイナミクスと統一的に理解するような「マルチ時間スケール」ダイナミクスの概念を導入することは地球内部ダイナミクスをより定量的に理解するためにも重要なアプローチである。

2. 研究の目的

現在の地球内部構造が説明できるような初期地球内部構造仮説が提唱されているが、この仮説を十分に検証したコアマンテルダイナミクス研究はほとんどない。また、最近の高温高圧実験ならびに地震波波形解析の成果と初期地球内部仮説を結合することによって、外核最上部に比較的安定な成層構造があることが示唆されている。ここで議論されている外核最上部の安定成層の成因として熱的な成因と組成的な成因が考えられている。本研究では、マンテルダイナミクスに基づくコアマンテル熱化学進化モデルを用いた初期地球内部仮説の妥当性を検証するだけでなく、導き出された外核内部構造がコアダイナミクスに与える影響とその構造の成因について、外核最上部における成層構造を考慮した地球ダイナモシミュレーションを用いて調べることで、長時間スケールで得られた知見が短時間スケールの現象へ適応可能か、また、その成因が熱的なものなのか組成的なものなのかについて議論することが目的である。

3. 研究の方法

コア熱化学対流に関する熱力学的定式化を用いることで、コアマンテル境界における温度を計算し、その温度を境界条件とし

た3成分系熱化学マンテル対流シミュレーションを行うようなコアマンテル結合系熱化学進化モデルを開発し、長時間スケールダイナミクスの研究を行う。また、長時間スケールの研究によって、得られた知見の詳細から外核最上部の地震波速度異常の成因として、外核最上部の熱的な成層である仮説を立て、その仮説の検証を行うために、熱的な成層を考慮した地球ダイナモシミュレーションモデルを構築した。その際に、磁気プラントル数と熱的な成層の厚さを計算パラメータにした広パラメータ数値実験を行った。熱的な成層仮説の検証のほかに、地震学的な外核最上部の速度異常の成因仮説として、組成的成層仮説も考えられることから、その仮説の検証のために、回転系二重拡散対流に基づく熱化学地球ダイナモシミュレーションを行った。その中において、3つの組成的な外核最上部の構造の成因仮説（月形成時などの初期地球分化；始原的な組成成層、内核の成長に伴う軽元素放出による組成成層の形成ならびにコアマンテル化学結合によるマンテル最下部側からの組成成層の成長）を議論した。そこから、外核最上部の地震波速度異常構造を説明できるような仮説の抽出を試みた。さらに、これら2つの時間スケールが大きく異なる現象を結びつけ、コアマンテルを一つのシステムとして理解するモデルの創出を行った。

4. 研究成果

以下に、各時間スケールにおける研究成果について述べる。

1 長時間スケールダイナミクス：地球マンテル最深部に初期地球分化によって形成された始原的な物質の存在は内核成長などの長時間にわたるコア熱進化過程を十分に理解するために必要であることが判明した。また、初期地球分化仮説がある程度妥当な仮説であることがモデル計算から示唆されている。また、高温高圧実験で得られたコア構成物質の熱伝導度から計算されるコア内における断熱熱流量とマンテルダイナミクスから推定されるコアマンテル境界の熱流量を比較すると数100kmから1000kmの熱的な安定成層が外核上部に期待できることを示唆している。しかし、熱的な成層について地球ダイナモのエネルギー論から議論した結果、十分に現在のダイポール磁場の強さを説明することが可能であることも示唆された。この成果に関しては、投稿論文として発表した。また、ここで得られた成果で幾つかの招待講演を国内ならびに国際学会で行った。

2 短時間スケールダイナミクス：長時間スケールダイナミクスから得られた100kmから1000kmにわたって存在していると考えられている外核最上部の成層構造の成因について、地球ダイナモシミュレーションを用いて議論すると、成層の厚さと磁気プラントル数

の間で3つのダイナモ解(強磁場解、不安定弱磁場解ならびに失敗解)が存在することが判明した。その中で、不安定弱磁場解には、解の2分性が存在し、初期に与える磁場の強さによって、不安定弱磁場解が強磁場解の2つの解が許されるパラメータが存在することがわかった。ここで、コア物質の高熱伝導度から示唆される1000km程度の熱的な成層を考慮した場合において、地球コアで期待される磁気プラントル数を適用すると、不安定弱磁場解および失敗解の領域になることが判明した。これによって、1000km程度の熱的な成層では、現在の地球で期待されている安定なダイポール磁場を地球ダイナモによって維持することができないことがわかった。従って、もう一つの成因として考えられている組成的な安定成層の影響を調べることで、組成的な成因が外核最上部安定成層を説明できるかどうかを調べるが必要になった。この成果に関しては、論文発表を行った。そのモデルシミュレーションの結果から組成的な成因について、検証を加えると、月形成時に生成された組成成層や内核の成長に伴う軽元素放出によって組成的な成層構造ができるのではなくコア-マントル間の物質交換によって、成層構造が形成される可能性が強いことが判明した。これは、コア主要物質である金属鉄とマントル主要物質であるケイ酸塩との化学的相互作用が外核最上部の成層構造の形成に大きな影響を与えていることを示唆している。この成果については、国際学会で発表を行った。

3 これらの知見を統合すると以下のようなコア-マントルを一つのシステムと捉えた熱化学進化モデルの提唱を行うことができる。それは、コアとマントルが熱的だけでなく化学的にも結合しているさらに複雑な進化過程を初期地球から現在の地球になるまでに経験していることが表現できるようなモデルである。しかし、そのような複雑な進化過程の定式化は煩雑であるため、今後の展開として以下に述べる。

4 今後の展開として、鉄-ケイ酸塩の化学反応熱力学を取り入れたコア-マントル化学結合作用を取り入れた長時間スケール熱進化モデルを構築することである。これによって、自己調節可能なコア-マントル熱化学進化モデリングの議論が行える。その結果を用いて、組成成層の生成の影響を十分に考慮した地球ダイナモモデリングに代表される短時間スケールダイナミクスで得られた知見と融合することで、さらなる「マルチ時間スケール」地球内部ダイナミクス像を構築することが可能になる。

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 3 件)

1 Nakagawa, T., An implication for the origin of stratification below the core-mantle boundary in numerical dynamo simulations in a rotating spherical shell, *Phys. Earth Planet. Int.*, 10.1016/j.pepi.2015.02.007, 2015 (査読あり)。

2 Nakagawa, T., and P. J. Tackley, Influence of combined primordial layering and recycled MORB on the coupled thermal evolution of Earth's mantle and core, *G-cubed*, 15, 619-633, doi:10.1002/2013GC005128, 2014 (査読あり)。

3 Nakagawa, T., and P. J. Tackley, Implications of high core thermal conductivity on Earth's coupled mantle and core evolution, *Geophys. Res. Lett.*, 40, doi:10.1002/grl.50574, 2013 (査読あり)。

[学会発表](計 11 件)

Nakagawa, T., On the compositional stratification below the core-mantle boundary in geodynamo simulations, EGU General Assembly, Vienna Austria, Apr. 2015.

Nakagawa, T., On a coupled evolution of Earth's mantle and core: Implications for magnetic evolution over the geologic time-scale, EGU General Assembly, Vienna Austria, Apr. 2015.

Nakagawa, T., and H. Iwamori, Effect of Hydrous Mantle on a Coupled Core-Mantle Evolution, AGU Fall Meeting, San Francisco, Dec. 2014.

中川貴司, コア-マントル結合モデルによる磁場進化史, 地球電磁気・地球惑星圏学会第136回総会および講演会, 2014年10月31日, キッセイ文化ホール(長野県松本市)

中川貴司, 素粒子で拓く地球ダイナミクス, 日本物理学会2014年春季大会, 2014年3月28日, 東海大学(神奈川県平塚市, invited)。

Nakagawa, T., and J. Aubert, Dynamical behavior caused by numerical dynamo simulations in a rotating spherical shell with the heterogeneous outer boundary, AGU Fall Meeting, San Francisco, USA, Dec. 2013.

Nakagawa, T., Implications of high thermal conductivity on Earth's coupled mantle and core evolution and dynamics of Earth's core, AGU Fall Meeting, San Francisco, USA, Dec. 2013 (Invited)。

Nakagawa, T., Influence of magmatism on mantle cooling, surface heat flow and Urey ratio, Workshop on Particle Geophysics, Tohoku Univ., Sendai, Miyagi, Oct. 2013 (invited)。

Nakagawa, T., and J. Aubert, Implications for Earth's core dynamics with a stably stratified region below the CMB, Workshop on Transport properties on Earth's core, 2013年10月17日, 若草の宿丸栄, 富士河口湖町(山梨県; invited).

¹⁰ Nakagawa, T., and P. J. Tackley, A coupled thermo-chemical evolution of Earth's mantle and core: Effects of a three-component mantle dynamics, 13th International workshop for mantle and lithospheric dynamics, Hoenefoss, Norway, Sep. 2013.

¹¹ Nakagawa, T., Effects of thermal conductivity on thermal evolution of Earth's core, 日本地球惑星科学連合 2013年大会, 2013年5月21日, 幕張メッセ(千葉県千葉市).

6. 研究組織

(1) 研究代表者

中川 貴司 (Nakagawa, Takashi)

独立行政法人海洋研究開発機構・数理科学・先端技術研究分野・主任研究員

研究者番号: 50396941