

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 18 日現在

機関番号：82706

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24740310

研究課題名(和文) 惑星衝突を伴う3次元コア形成シミュレーション

研究課題名(英文) 3-D numerical simulations of a growing planet with the core formation

研究代表者

古市 幹人 (Furuichi, Mikito)

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：50415981

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)：本研究では、地球型惑星の中心核(コア)形成時における物質分化の様子を明らかにするために、自己重力下での自由境界表面をともなうストークス流の計算により3次元コア形成シミュレーションを行い、問題解決の糸口を探るものである。特に惑星衝突によりマグマポンドとして溶融し分化されるプロセスに注目し、それらが惑星内部構造を岩石塑性流動の時間スケールでどのように変化させるのかを調査した。その結果、マグマポンドの形成を逃れた領域が火星サイズの初期惑星に起因する物質的異常領域を初期地球の深部に持ち込みうる可能性を見出した。さらにコア形成に伴う熱進化計算を実現可能にするための移流陰解法の開発に成功した。

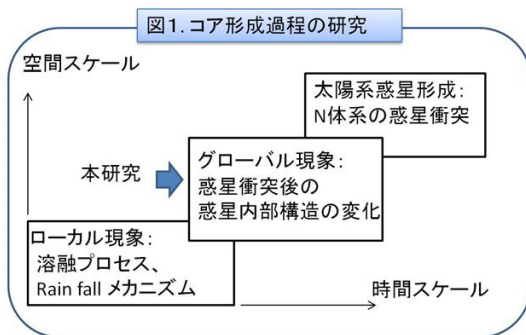
研究成果の概要(英文)：I have conducted the 3-D Stokes flow simulation under a self-gravitating field with a free-surface to investigate the material differentiation process during core formation stage. A target of my work is the internal change of the planet grown by the impact induced magma ponds in a time scale of the deformation of a mantle rock. Results of numerical simulation indicate that the initial Mars-sized proto planet might not be completely differentiated with the magma pond because thick differentiated mantle layer are produced with the core formation. Thus, I propose a new scenario for creating the compositional heterogeneity with remaining dense material originate from the proto planet. In addition in order to incorporate the thermal differentiation to our model, a new implicit advection time stepping method is proposed which can efficiently solve thermal convection surrounded by deformable free surface boundaries.

研究分野：計算地球科学

キーワード：惑星形成 始源物質リザーバー 初期地球 ストークス流れ 移流陰解法 JNFK

1. 研究開始当初の背景

惑星の中心核(コア)は、集積プロセスの中で、惑星衝突の際の熔融状態を経て分化した鉄を多く含んだ層(金属層)が、重力の中心へと沈み込むことで形成されたと考えられている。このようなグローバルスケールでの物質分化並びに内部構造変化は、初期地球での熱進化の初期条件形成に強く寄与したと考えられる。このように地球史において重要なイベントであるにもかかわらず、コア形成メカニズムの詳細は明らかでないため、多岐にわたる時空間スケールでのテーマにおいて盛んに研究されてきた(図1)。しかしながら既往研究では微惑星衝突加熱による熔融状態での金属・岩石層の局所的な分化プロセスの後、それらが地球の中心に向かって落ち込む1 Ma程度の時間スケールでのグローバルな内部ダイナミクスの変化はあまり議論されてこなかった。



2. 研究の目的

本研究では、岩石変形の時間スケールでのコアの形成過程を3次元連続体計算により再現し、グローバル領域のダイナミクスからコア形成モデルに新しい制約条件を与える事を試みる。このような先行研究として、2次元での研究が報告されていたが Golabek et al., (2009)、3次元上に分布した金属層が周囲の物質をおしのけて中央に落ち込む様子や、隕石衝突による惑星の体積成長並びにその波及効果といった、コア形成にとって本質的なダイナミクス要因を考慮に入れるには、3次元空間での数値モデル研究が不可欠である。

特に注目した研究テーマは、コア形成時に地球深部の不均質領域が形成されるのかを調べることにある。地球深部の異常領域については、地震波的な特徴は組成的な異常を示し、またいくつかの地球化学モデルはそれが始源物質に富む領域ではないかと考えている。さらにマントルダイナミクスモデルにより、そのような領域が初期地球に存在し、1%程度の密度異常を持てば46億年間のマントル対流による混合を経て現在の地球深部に留まる事が出来ることを示している。しかしながらその成因は明らかではなく、コア形成に伴う地球内部の構造変化はその有力説であるにもかかわらず、それらを定量的に検証した研究事例はない。そこで、本研究で

は数値シミュレーションを用いて、コア形成時の隕石衝突によるマグマポンドの形成とその後の内部構造変化を再現し、コア形成時の深部不均質領域形成仮説を定量的に検証することを研究目的とする。

一方で従来の計算コードでは、岩石変形の時間スケールでのコア形成時の内部構造変化を3次元計算するのは技術的に難しい。そこで、自己重力下で自由境界表面を持つ3次元ストークス流れのシミュレーションに対しての手法研究と並列化コード実装を行う必要がある。これらの開発も本研究目的の一つとなる。

3. 研究の方法

3次元コア形成シミュレーションの実施は独自に開発したコードによって行った。本シミュレーションコードでは、Spherical Cartesian法とSticky air法を採用し、重力ポテンシャル問題を解くことで、自己重力下で自由境界条件を伴う計算を可能にし、隕石衝突に伴い成長する惑星内部のコア形成プロセスを再現した。特に技術的核心的なソルバーでは、粘性差により悪条件となるストークス問題に対して、混合4倍精度演算と特殊な前処理行列を組み合わせることでロバスト性を高める技術(Furuichi et al., 2011a)を実装しており、大規模計算機において効率的に並列化されたものである(Furuichi, 2011)。さらにベンチマークとして自由境界表面問題であるfluid rope coiling問題を解き、大変形問題に対しての定量的な計算結果の検証を実施している(Furuichi et al., 2009)。

本計算では、3次元コア形成機構に影響を与える様々な内外的要因を、物理モデルとして取り入れることが出来る。内的要因とは岩石のレオロジーや物質・エネルギーの初期分布であり、外的要因としては惑星衝突による物質の付加や熔融による平衡分化作用等が挙げられ、惑星の成長速度などでモデル化される。本研究期間内では特に後者の外的要因の影響を調べるためのシミュレーションを行った。

計算手順としてはまず、初期惑星として火星サイズのプロトプラネット(PP)を準備する。本研究ではPPは始源物質に富んでいると仮定する。そして、時間積分計算の中でランダムな方向から、惑星サイズの倍の惑星が衝突することで惑星が成長する過程をシミュレーションする。ここで関心があるのは、ジャイアントインパクトより小規模で、かつ半径700 km以上の中規模惑星の集積過程前期の衝突である。注目するサイズの惑星が火星サイズ以上の惑星に衝突すると、衝突点から一定の領域が衝撃波によって熔融し、岩石・金属層へ分化・平衡化が起こる。この際、熔融した領域に存在するPPも分化し、始源物質としての特徴を失うと仮定する。また表層からはマグマが噴出し0.01~1 Ma程度を

かけて冷え固まる。これらのプロセスを、近年 Reese et al., (2010)らによって提案された Tonks et al., (1993)の計算に基づく惑星衝突モデルを採用してモデル化した。

数値計算では惑星衝突に伴う物質分化・付加プロセス後に引き起こされる、惑星内部の岩石塑性変形による内部構造変化を再現する。このような条件で、惑星サイズや粘性さらには惑星衝突の時間間隔を変化させたプロダクトランを行った。

さらに、惑星内部の熱進化といった内部的要因における分化プロセスを再現するための計算コード開発も行った。本開発では自由境界条件に囲まれた物質内の熱対流問題を効率的に解くために、移流項を陰的に解くことで安定的に時間積分が可能な時間幅の制限を緩和させた。そして提案した新しい数値手法による、問題点の改善効果を数値実験によって検証した。

4. 研究成果

(1) コア形成時の始源物質的不均質層形成についての検証

3次元における計算を実施したところ、図2 (a - d)のような結果が得られた。隕石衝突により形成され、固化したマグマポンドの底には、金属に富む層が形成される(図2 (a))。金属に富む層はPPや周りの岩石物質よりも密度が高いため中心に沈み込み中心核を形成する(図2 (b))。一方でマグマポンドからあふれ出た岩石層は、惑星の体積を増加させ、重力平衡になるために重力に対して、水平に広がり球形を構築する。繰り返される惑星衝突イベントにおいて、PPは中心核の形成により衝突の影響を受けやすい外側に押し出されることで分化され減少する(図2 (c))一方で、岩石層の厚さが成長する事で、マグマポンドの形成から深部のPP領域を逃れさせることが分かった。これらの影響が互いに寄与した結果、現在の地球に近いサイズにおいて、深部領域にPP層が形成された(図2 (d))。様々なパラメータに対して本シミュレーションを実施した結果、PPの粘性が高いもしくは、惑星衝突間隔が短い場合には惑星衝突方向のランダムネスが強く表れるという特徴を見出した。それらを考慮したうえで、惑星衝突N体計算から予想されている自身の体積の10%のサイズを持つ惑星(惑星サイズパラメータ = 0.1)が次に衝突する場合には、初期サイズのおよそ10%程度の領域が惑星成長後に残ることが定量的に明らかになった。この結果は、火星サイズの初期惑星が持つ化学的特性が、惑星衝突によるマグマポンド形成だけでは、完全には熔融・分化により消失しないことを示唆している。このようにして再現された過程により、既往研究にはない新しい深部不均質領域の形成仮説を提案した。一度、コア集積時の直接的な分化熔融を逃れたPPの屑が、厚く覆われた岩石層の下に形成されれば、その後に惑星深部

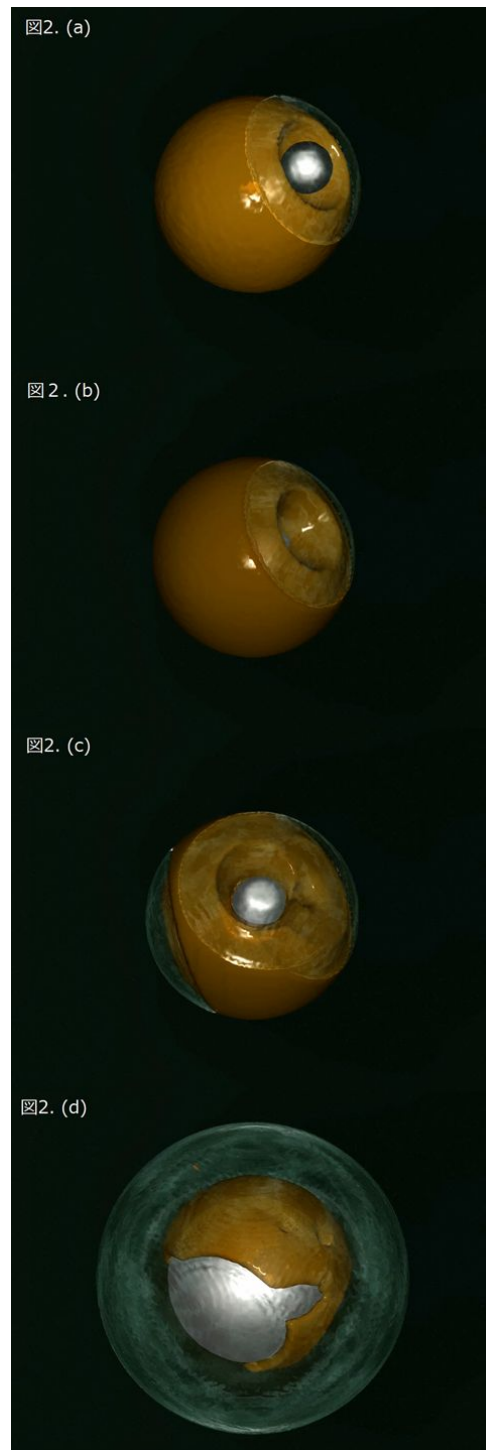


図2. 3次元コア形成シミュレーションの結果。茶色い領域はPP、半透明色は分化した岩石層そして金属色は金属に富む層を示す。粘性・密度はPP、岩石、金属層に対して、 10^{20} [Pa s]・3900 [kg/m³], 10^{20} [Pa s]・3000 [kg/m³], 10^{19} [Pa s]・7000 [kg/m³], 惑星衝突間の時間は0.01Maである。時間変化の順序で(a - d)を示した。

での溶融が月形成の巨大隕石衝突などにより引き起こされたとしても、始源的物質の素として深部マグマオーシャンの形成に寄与する事が出来る。このように、提案した仮説は他の不均質層形成仮説とも調和的な現象である事も示した。

また、コア形成時の内部要因による分化プロセスを調査するための、熱進化を伴うコア形成シミュレーションにも取り組んだ。しかしながら、当初採用していた時間1次精度の陽解法では、表面形状変化に伴う動的圧力変化の数値的な振動問題が深刻になり、時間幅の制約が厳しくなりすぎるため、計算を行うことが出来ないという問題に直面した。そこで当初の研究計画を変更し非線形ソルバとして Newton Krylov 型の解法を実装した移流陰解法の開発に取り組んだ。また、時間ステップ法として、TR-BDF2 法という2ステップで時間2次精度の方法を導入して計算精度の改善にも取り組んだ。このことにより陽解法に比べて大きな時間幅で時間2次精度の計算が可能になった(図3)。

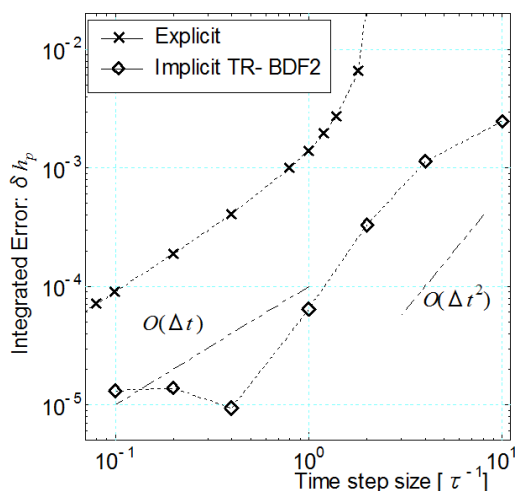


図3 .凸面の粘性緩和計算において行った計算結果の精度評価。TR-BDF2法を採用した陰解法では陽解法より大きな時間幅が採用でき、2次精度を達成している。

さらに対流問題における物質的進化の取り扱いが容易な Marker in cell (MIC) の手法に本フレームワークを適応するための工夫として、非線形ソルバ内の移流項の評価に部分的にオイラー法を用いる Semi-Implicit 法を考案した。従来の MIC 法の陰解法では反復計算毎にマーカー粒子の更新が必要であるため計算コストが多くなり、結果として陽解法との CPU 時間における差はあまり見られなかったが、新しく考案した手法はそれらと計算コストを 20% 程度に圧縮する事が可能

になった(図4)。

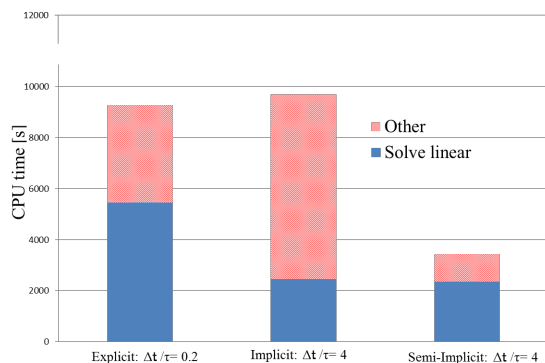


図4 . MIC を用いた自由境界表面を伴うコア形成シミュレーションにおける熱対流計算の実行に必要な CPU 時間の比較。

以上のことから、本研究では、コア形成時の惑星分化プロセスの最も大きな外部要因である惑星衝突に伴うマグマポンドの形成による直接溶融・分化プロセスの数値シミュレーションを実施し、それらが火星サイズの初期惑星に起因する物質的異常領域を初期地球の深部に持ち込みうる可能性を見出した。このような仮説は既往研究では提案されておらず、本研究において定量的な評価を伴って提唱したことの意義は大きいと考える。また内部的な惑星分化プロセスを考慮するための計算にも挑戦した。その際に計算の実施にとって大きな障害となる厳しい時間幅の制約を、新しく提案した移流陰解法を用いて改善することに成功した。このことは、提唱した不均質領域の成因仮説のさらなる検証に繋がると共に、計算科学の発展にも寄与する成果となった。

<引用文献>

G. J. Golabek, T. V. Gerya, B. J. P. Kaus, R. Ziethe, P. J. Tackley, Rheological controls on the terrestrial core formation mechanism, *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* 10 (2009) Q11007.

M. Furuichi, D. A. May, P. J. Tackley, Development of a stokes flow solver robust to large viscosity jumps using a schur complement approach with mixed precision arithmetic, *Journal of Computational Physics*. 230 (2011a) 8835-8851.

M. Furuichi, Numerical modeling of three dimensional self-gravitating stokes flow problem with free surface, *Procedia Computer Science* 4 (0) (2011b) 1506-1515.

M. Furuichi, M. Kameyama, A. Kageyama, Validity test of a Stokes flow solver by fluid rope coiling: Toward plate-mantle simulation, *Phys. Earth Planet. Inter.* 176 (1-2) (2009) 44-53.

C. Reese, V. Solomatov, Fluid dynamics of local martian magma oceans, *Icarus* 184 (1) (2006) 102-120.

W. B. Tonks, H. J. Melosh, Core formation by giant impacts, *Icarus* 100 (2) (1992) 326-346.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 4 件)

M. Furuichi, D. May, 'Implicit solution of the material transport in Stokes flow simulation: toward thermal convection simulation surrounded by free surface' *Computer Physics Communications*, Vol 192, 1-11, (2015), 査読有
doi:10.1016/j.cpc.2015.02.011

M. Furuichi, D. Nishiura, 'Robust coupled fluid-particle simulation scheme in Stokes-flow regime: toward the geodynamic simulation including granular media' *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* Vol 15, Issue 7, 2865-2882, 2014, 査読有
DOI: 10.1002/2014GC005281

M. Furuichi, T. Nakagawa, 'Development of a Stokes flow simulation code for core formation', *Proceeding of JSST2012*, 285-288 (2012), 査読有

〔学会発表〕(計 18 件)

M. Furuichi, D. May, 'Robust computational techniques for studying Stokes flow within deformable domains: Applications to global scale planetary formation processes' *AGU fall meeting, San Francisco, USA* (2014.12.15) (招待講演)

M. Furuichi, D. Nishiura, 'Development of coupled Stokes-DEM simulation scheme for geodynamical magmatic studies', *日本地球惑星科学連合 2014 年大会, パシフィコ横浜, 神奈川県横浜市* (2014.04.28) (招待講演)

古市 幹人, "Dynamical generation of compositional heterogeneity in a growing

planet with core formation", *国立天文台理論研究部セミナー, 国立天文台, 東京都三鷹市* (2014.3.5)

M. Furuichi, D. Nishiura, 'Computational performance of a smoothed particle hydrodynamics simulation for shared-memory parallel computing', *GPU and MIC solutions for Multiscale Coupling and Multi physics Approaches in Computational Sciences, The University of Western Australia, Crawley, Australia*, (2013.11.11) (招待講演)

古市 幹人, 'ストークス流れに基づくジオダイナミクスシミュレーションの手法開発について' *一般社団法人日本機械学会格子ボルツマン法の基礎と応用に関する研究会, 独立行政法人海洋研究開発機構横浜研究所, 神奈川県横浜市*, (2013.06.07) (招待講演)

M. Furuichi, D. Nishiura, 'Development of fluid-particle coupled simulation method in the Stokes flow regime: toward 3-D geodynamic simulation including granular media', *Numerical modelling seminar, Cardiff University, Cardiff, United Kingdom* (2013.03.12) (招待講演)

M. Furuichi, D. Nishiura, 'Development of fluid-particle coupled simulation method in the Stokes flow regime: toward 3-D geodynamic simulation including granular media' *ETH Geophysical Fluid Dynamics & Numerical Modelling Seminar, Zurich, Switzerland* (2013.03.1) (招待講演)

M. Furuichi, 'Tutorial: Ray-tracing visualization of geoscientific simulation with POV-Ray.', *ETH Geophysical Fluid Dynamics & Numerical Modelling Seminar, Zurich Switzerland* (2013.02.27) (招待講演)

M. Furuichi, T. Nakagawa, 'Development of a simulation code for a growing planet with core formation in 3D', *International Conference on Frontiers in Computational Physics: Modeling the Earth System, Boulder, CO, USA* (2012.12.20) (招待講演)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

古市 幹人 (Furuichi, Mikito)
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: 50415981

(2)研究協力者

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

西浦 泰介 (Nishiura, Daisuke)
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・技術研究員
研究者番号：60509719