

平成 21 年 5 月 22 日現在

研究種目：特定領域研究
 研究期間：2004 ～ 2008
 課題番号：16075207
 研究課題名（和文） マントル下降流に伴う滞留スラブの形成・崩落過程の数値モデリング
 研究課題名（英文） Modeling of stagnation/falling processes by downward flow
 研究代表者
 吉岡 祥一（SHOICHI YOSHIOKA）
 九州大学・大学院理学研究院・准教授
 研究者番号：20222391

研究成果の概要：

本研究では、主として、3次元箱型、2次元箱型の熱対流を用いたスラブ沈み込みモデルを構築した。3次元箱型モデルでは、高速な数値解法アルゴリズムの開発を進め、海洋プレートの沈み込みを実現し、410km、660kmでの相転移、660kmでの粘性ジャンプ、粘性率の温度・圧力依存性、海溝の後退などをモデルに取り入れた。数値シミュレーションの結果、滞留スラブの形成には海溝の後退が重要であることを示した。2次元モデルでは、プレートに強制的な沈み込み速度を与えるモデルと、自発的にプレートが沈み込むモデルを構築した。前者では、海溝の後退がある場合、660kmでの相転移によってスラブを浮かせるモードと下部マントルの高粘性によってスラブを支えるモードがあることを示した。また、海溝後退によって生成された滞留スラブが、下部マントルへと崩落するメカニズムとして、海溝後退の停止や前進が重要であることを示した。後者のモデルでは、マントル遷移層でのスラブの振る舞いと地表のテクトニクスの相互作用を扱うことを可能にし、様々な構造を持つ滞留スラブを再現した。また、滞留スラブの形成には、海溝の後退が非常に重要であり、滞留・崩落の過程には、2つの様式があることを明らかにした。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2004年度	8,600,000	0	8,600,000
2005年度	21,700,000	0	21,700,000
2006年度	13,000,000	0	13,000,000
2007年度	8,600,000	0	8,600,000
2008年度	8,600,000	0	8,600,000
総計	60,500,000	0	60,500,000

研究分野：固体地球物理学

科研費の分科・細目：435

キーワード：滞留スラブ・数値シミュレーション・3次元スラブ・地球シミュレータ・マントル対流

1. 研究開始当初の背景

地震波トモグラフィにより、北西太平洋地域下の深さ 660km 付近で横たわるスラブ（滞留スラブ）が、また、同地域の CMB 付近にも地震波の高速度域が見出されていた。これらから、スラブが一旦 660km 付近に滞留し、

その後、下部マントルへ崩落するというシナリオが描かれたが、推測の域を出なかった。また、高温高圧実験による 660km での $R_w \rightarrow P_v + M_w$ の相転移に伴うクラペイロン勾配の値についても混沌としていた。

以下、3次元箱型・球殻、2次元箱型モデルに関して、研究開始当初の背景を述べる。

これまでの沈み込み過程や滞留スラブの数値シミュレーション研究により、沈み込んだプレートの挙動に影響を与えている様々な素過程が指摘されてきた。しかしながら、スラブの沈み込みのシミュレーション研究では3次元箱型モデルを用いた研究はほとんどなかった。また、自発的なプレート運動をモデル化することについては、3次元直方体内でのシミュレーションで再現できていたが、その物理的なメカニズムや地球内部における沈み込むプレートの振る舞いについては、よく理解されていなかった。

3次元球殻モデルでは、ブシネスク近似を用いた支配方程式をデカルト座標系で記述し、有限要素計算コードを開発していた。このコードは全球殻領域を四面体に分割し、要素内で一次多項式近似を行うことで計算量を削減していた。また安定化手法により臨界レイリー数の10~50倍程度のレイリー数でも計算可能であった。

2次元モデルにおいては、滞留スラブの形成と崩落の数値シミュレーションが行われてきた。これらの研究では既に、海溝の後退を取り入れ、スラブを660km相転移と相互作用させることで滞留スラブが再現されることが示されていた。しかし、数値計算結果を記載するのみで、そのメカニズムについてはほとんど考察されておらず、系統的なパラメータ依存性の研究も行われていなかった。また、プレート運動や海溝の後退はモデルの境界条件として取り入れられているか、上盤プレートのない沈み込みモデルで計算されており、滞留スラブの形成や崩落が地表のテクトニクスに与える影響を調べることができなかった。

2. 研究の目的

なぜ、重くて硬いスラブがマントル遷移層で折れ曲がって水平に滞留するのか、その後、下部マントルへ崩落するのかどうか、崩落する場合、どのようなメカニズムで崩落するのかが主たる研究目的となった。そのような問題の解決のため、熱流体の数値シミュレーションにより、物理メカニズムを支配するパラメータを特定することを主眼とした。

3次元モデルでは、箱型と球殻の2種類のモデルを構築することを目的とした。3次元箱型モデルの目標は、高い演算性能を持ち、地球に近い粘性率の条件で計算が可能なマントル対流プログラムを開発し、数値シミュレーションにより、660km相転移面でスラブの滞留・崩落が起こるメカニズムを明らかに

することであった。地球のマントル物質に特有な種々の性質や、滞留スラブの形成に重要な素過程を取り込んだモデルへと改良することを目的とした。さらに、スラブの走向方向の形状の違いや、スラブの物性の影響、スラブの進化に着目したスラブの挙動の数値シミュレーションを行うことを目的とした。

3次元球殻モデルでは、深さ660km付近での沈み込んだスラブの振る舞いをシミュレーションできるように有限要素計算コードを拡張することが目的であった。①相転移の効果を取り込むモデルを作成すること②相転移境界付近の計算解像度を高くすること③移流拡散方程式の離散化手法を高いレイリー数においても安定した計算が可能であるスキームに変更すること④スラブの沈み込みを与えるモデルを3次元球殻領域で実現すること、の4点が具体的な目的であった。

2次元箱型モデルで、強制的沈み込みモデルと自発的沈み込みモデル、すなわち地表のプレート運動を境界条件で拘束しないモデル、の2種類のモデルを基本として、スラブとマントル遷移層との相互作用を調べた。クラペイロン勾配の値もパラメータの値を変化させることで、その影響を見積もることにした。相転移に関するパラメータだけでなく、マントルの粘性層構造や、スラブの相転移に伴うレオロジー変化が、滞留スラブの構造や、崩落の様式に与える影響を明らかにすることを目的とした。

3. 研究の方法

本研究では、コンピュータを用いた熱対流の数値シミュレーションを行い、各パラメータが結果に及ぼす影響を詳しく調べた。

3次元箱型モデルでは、2つの段階に分けて研究を実施した。第1段階では、スラブ沈み込みを可能にするための技術と基礎プログラムを開発した。数値解法アルゴリズムやコードの最適化を行った。モデルには、深さ410km、660km付近での相転移や660kmでの粘性ジャンプなどの効果を取り入れた。第2段階では、スラブの沈み込みの数値シミュレーションを実施した。プレート境界では降伏を起す薄い層を設け、CIP法でトレースした。このモデルを用いて、3次元箱型モデルでのスラブの沈み込みの基本的な様式を調べた。

3次元球殻モデルでは、上記③の移流拡散方程式のスキームの変更は物資微分項に特性曲線を用いて近似することにより解決し、上記②に関して、必要な解像度を得るためには、非常に大きな自由度を扱う必要があった。

部分構造反復法の計算コードを拡張し、新規のアルゴリズムを開発した。スラブの沈み込みの数値シミュレーションでは、境界条件の設定など検討すべき項目が多かった。そのため、まず 2 次元円環モデルにおいて計算モデルを構築した。

2 次元箱型モデルでは、強制的沈み込みモデルと自発的沈み込みモデルの 2 種類のモデルを構築した。前者のモデルでは、スラブの沈み込みを実現するため、ガイドを設け、その中に流線をし込み、任意形状のスラブに対する温度・流れの計算を可能にした。また、海溝の後退・前進を扱えるようにした。スラブの沈み込み角、海溝の後退速度、660km 相転移に伴うクラペイロン勾配の値、660km での粘性ジャンプ量などを変数として、スラブの滞留・崩落のメカニズムを支配するパラメータの特定を行った。

後者では、自発的沈み込みモデルを開発した。さらに、表面プレートのレオロジーがプレートの沈み込みに与える影響について調べた。また、表面プレートの伸張強度と圧縮強度の違いを考慮したモデルで、背弧側プレートの伸張テクトニクスを再現し、海溝の移動及びスラブ内部で起こる細粒化に伴う粘性の低下が滞留スラブの形成に与える影響を調べた。

4. 研究成果

3 次元箱型モデルでは、数値シミュレーションに必要な基盤技術として、2 つの数値解法を開発した。1 つは流れ場の反復解法であり大規模 3 次元マントル対流シミュレーション実現の可能性を示した。もう 1 つは物質の移流を高精度に追跡する数値解法である。プレートの沈み込みと海溝後退を計算領域の境界に沿って強制的に与えた数値シミュレーションモデルを構築した。シミュレーションの結果、滞留スラブの形成には海溝後退の影響が大きく、海溝後退速度が十分大きい場合には 660km 不連続面での粘性ジャンプ・密度ジャンプの値に関わらず滞留スラブが形成されることが示された (図 1)。また、海溝後退の効果が小さい場合、相転移による浮力の効果が 660km 付近で横たわるスラブの形成に効果的であることもわかった。

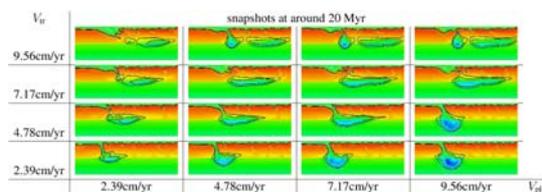


図 1：沈み込むプレートの速度 V_{pl} と海溝後退速度 V_{tr} を変えた場合の沈み込むスラブの形状の変化。高さ 1320km、横幅 7920km の 2 次元の箱型領域 (ただし描画は右半分の 3960km 分のみ) で、左上面沿いの海洋プレートが右上面沿いの大陸プレート下に沈み込んでいる。図の色は粘性率を示し、青色が高粘性を意味する。実線は無次元温度が 0.8 (1280°C) 及び 0.9 (1440°C) の等値線。

3 次元球殻モデルでは、移流拡散方程式の物質微分項を特性曲線で近似する手法に変更し、上流要素の評価方法を取り入れた計算コードを作成した。また、部分構造反復法をストークス方程式に拡張した。また、マントル対流数値シミュレーションを行った結果、地球で想定されているパラメータではスラブの滞留は起こらないことが確認された。また、2 次元円環モデルを構築した。スラブの沈み込みの向きのみを設定するモデルを構築した。スリットを導入し、海洋プレートはスリットに沿って沈み込み、相転移面の上下での粘性比とクラペイロン勾配の効果で滞留し、相転移面での不安定性により崩落するという結果が得られた (図 2)。

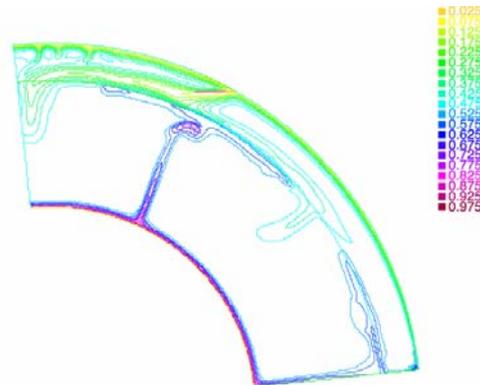


図 2：扇形領域でのスラブの沈み込みのシミュレーション結果。沈み込み角 30° 、スラブは深さ約 435km まで設定。海洋プレートは左向きに 8.16cm/yr の速度を設定。 $Ra=5 \times 10^6$ とし、660km に相転移境界を設定。上下マントル境界に 20 倍の粘性ジャンプを導入。クラペイロン勾配は -2.04 MPa/K、初期温度は無次元温度で地表面を 0、CMB を 1 とし、その他の領域は 0.5。

2 次元箱型モデルでは、強制的にスラブの沈み込みを与えるモデルで、660km 付近でのスラブの滞留には、海溝の後退が重要であり、クラペイロン勾配による正の浮力で、スラブを浮かせるモードと、下部マントルの高粘性でスラブを下から支えるモードがあること

を示した。また、スラブの滞留には、スラブが660kmに達する直前のスラブの角度が小さいことが重要であることを示した。また、海溝の後退が停止したり、海溝が前進する場合、新たに沈み込んでくるスラブが滞留しているスラブを巻き込んだり、上から押し込んだりするため、下部マントルへとスラブが崩落するというメカニズムを示した(図3)。

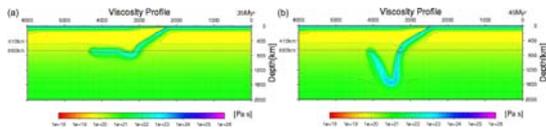


図3：水平距離3000kmから海溝を3cm/yrの速度で後退させ、その後3000万年後以降、2cm/yrの速度で海溝を前進させた場合の計算結果。クラペイロン勾配が -3 MPa/K、深さ660kmでの粘性ジャンプがなく、海洋プレートの沈み込み速度が8cm/yrの場合。カラーは粘性率分布を表す。赤線は $R_w \rightarrow P_v + M_w$ の相転移境界面の深さを表す。(a)3500万年後。(b)4500万年後。

自発的にスラブが沈み込むモデルでは、数値計算プログラムを開発し、マントルの大局的構造とプレート境界の微細構造を同時に持つシミュレーションの実行を可能にした。海溝の移動やマントルの粘性構造、沈み込むスラブのレオロジーを考慮した数値シミュレーションを行い、様々な構造を持つ滞留スラブを再現した。滞留スラブを形成するには、海溝の後退が非常に重要であること、滞留・崩落の様式は、スラブの粘性に依存することが明らかになった(図4)。また、滞留から崩落へ至る過程のプレート運動速度変化を調べ、沈み込むスラブの変形とエネルギーの流れの関係を明らかにした。

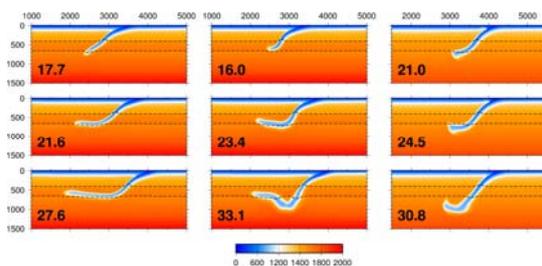


図4：自発的沈み込みモデルを用いた滞留スラブの形成・崩落のシミュレーション。図は温度と2つの相境界を表す。3つのコラムは3つの典型的なスラブの様式とその時間変化を表す。数字は時間で、単位は100万年(My)。左：滞留スラブが形成され、スラブが硬いため、崩落が起こらないモデル。中：滞留スラブが形成されるが、スラブの粘性率が低く、重力不安定が成長

し崩落するモデル。右：クラペイロン勾配が緩いが、水平なスラブが形成され、下部マントルへ崩落するモデル。

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12件)

- ① 吉岡祥一, 滞留スラブの数値シミュレーション研究の現状と今後の展望, (「地震」第2輯60周年記念特集号)(執筆依頼論文), 地震, 査読有, 61, 2009. (印刷中)
- ② Fukao, Y., Obayashi, M., Nakakuki, T. and Deep Slab Project Group, Stagnant slab: A review, Ann. Rev. Earth and planetary science letters, 査読有, 37, 19-46, 2009.
- ③ Suzuki, A., An iterative substructuring method for the discretized Stokes equations by a stabilized finite element method, to appear in Proceedings of ALGORITHM 2009, , 査読有, 18, 41-50, 2009.
- ④ Suzuki, A., An iterative substructuring solver for the Stokes equations, to appear in Proceedings of the First International Conference on Parallel, Distributed and Grid Computing for Engineering, B.H.V. Topping and P. Ivanyi, (eds.), Civil-Comp Press, 査読有, 90, P37/1-P37/11, 2009.
- ⑤ Nakakuki, T., Hamada C. and Tagawa, M., Generation and driving forces of plate-like motion and asymmetric subduction in dynamical models of an integrated mantle-lithosphere system, Physics of Earth and Planetary Interiors, 査読有, 166, 128-146, 2008.
- ⑥ Kameyama, M., Kageyama, A. and Sato, T., Multigrid-based simulation code for mantle convection in spherical shell using Yin-Yang grid, Physics of Earth and Planetary Interiors, 査読有, 171, 19-32, 2008.
- ⑦ Torii, Y. and Yoshioka, S., Physical conditions producing slab stagnation: Constraints of the Clapeyron slope, mantle viscosity, trench retreat, and dip angles, Tectonophysics, 査読有, 445, 200-209, 2007.

- ⑧ Tagawa, M., Nakakuki, T., Kameyama, M. and Tajima, F., Role of history-dependent rheology in plate boundary lubrication of generating one-sided subduction, *Pure and applied geophysics*, 査読有, 164, 5, 879-907, DOI 10.1007/s00024-007-0197-4, 2007b.
- ⑨ Tagawa, M., Nakakuki, T. and Tajima, F., Dynamical modeling of trench retreat driven by the slab interaction with the mantle transition zone, *Earth, planets, and space*, 査読有, 59, 65-74, 2007a.
- ⑩ 田島文子・中久喜伴益・吉岡祥一, スタグナントスラブに伴うマントル構造の地震学的解析と数値シミュレーション, *地震*, 査読有, 58, 121-141, 2005.
- ⑪ Kameyama, M., Kageyama, A. and Sato, T., Multigrid iterative algorithm using pseudo-compressibility for three-dimensional mantle convection with strongly variable viscosity, *Journal of Computational Physics*, 査読有, 206, 162-181, 2005.
- ⑫ Kameyama, M., ACuTEMan: A multigrid-based mantle convection simulation code and its optimization to the Earth Simulator, *Journal of the Earth Simulator*, 査読有, 4, 2-10, 2005.

[学会発表] (計 25 件)

1. Nakakuki, T., Rheological mechanisms for the formation and avalanche of the stagnant slabs, Final SSP International Symposium on "DEEP SLAB and MANTLE DYNAMICS", 2009年2月26日, 京都.
2. Kameyama, M., Numerical simulations on dynamic behaviors of subducting slabs: Toward three-dimensional modelling, Final SSP International Symposium on "DEEP SLAB and MANTLE DYNAMICS", 2009年2月26日, 京都.
3. Yoshioka, S., 2D temperature model in deep slabs incorporating kinetics of the 410-km and 660-km phase transformations, Final SSP International Symposium on "DEEP SLAB and MANTLE DYNAMICS", 2009年2月25日, 京都.
4. Suzuki, A., Preconditioned conjugate gradient solver for the Stokes equations, Necas Seminar on Continuum Mechanics, Charles University in Prague, Charles University in Prague, 2009年1月5日, Czech Republic.
5. Yoshioka, S., 2D temperature model in deep slabs incorporating kinetics of the 410-km and 660-km phase transformations -application to the Mariana slab-, The 7th General Assembly of Asian Seismological Commission and the 2008 fall meeting of Seismological Society of Japan, D22-08, 2008年11月25日, つくば.
6. Suzuki, A., Finite element computation of subducting plate near trench, Czech-Japanese Seminar in Applied Mathematics 2008, 2008年9月5日, 宮崎.
7. 橋本達樹, マントル遷移層における海洋地殻とスラブの挙動の数値シミュレーション, 日本地球惑星科学連合2008年大会, I212-009, 2008年5月27日, 千葉.
8. 中久喜伴益, スタグナントスラブのレオロジーとプレート運動速度, 日本地球惑星科学連合2008年大会, 2008年5月27日, 千葉.
9. 亀山真典, スラブ沈み込みの3次元性に関する数値シミュレーション, 日本地球惑星科学連合2008年大会, I212-P008, 2008年5月27日, 千葉.
10. Nakakuki, T., Mechanisms of the slab stagnation in the mantle transition zone, Misasa-III, The 3rd COE-21 International Symposium, 2008年3月22日, 三朝.
11. Suzuki, A., An iterative substructuring solver for the Stokes equations, Seminar on Numerical Mathematics, 2008年3月6日, Charles University in Prague.
12. 吉岡祥一, 660km付近におけるマントル下降流の数値シミュレーション-2次元、3次元モデルによる取り組み-, 特定領域研究「地球深部スラブ」第3回研究シンポジウム「深部スラブの物質科学とダイナミクス」, 2007年11月3日, 松山.
13. 橋本達樹, マントル遷移層に沈み込むスラブと海洋地殻の挙動, 特定領域研究「地球深部スラブ」第3回研究シンポジウム「深部スラブの物質科学とダイナミクス」, 2007年11月3日, 松山.
14. 亀山真典, 3次元スラブ沈み込みモデルの構築に向けて -シミュレーションモデル開発の進捗状況-, 特定領域研究「地球深部スラブ」第3回研究シンポジウム「深部ス

- ラブの物質科学とダイナミクス」, 2007年11月3日, 松山.
15. Yoshioka, S., Preliminary study on formulation of a slab stagnation model unifying thermal convection and kinetics, IUGG XXIV 2007, 2007年7月6日, Perugia, Italia.
 16. 多川道雄, スタグナントスラブ形成と崩落に関するレオロジーの役割, 日本地球惑星科学連合2007年大会, 2007年5月24日, 千葉.
 17. 吉岡祥一, 温度・流れ・カイネティクスを統合したスラブ滞留モデルの定式化に関する予備的考察, 日本地球惑星科学連合2007年大会, I214-P017, 2007年5月23日, 千葉.
 18. 中久喜伴益, プレート・マントル対流結合系の数値シミュレーション:沈み込みの開始からスタグナントスラブの形成まで, 日本地球惑星科学連合2007年大会, 2007年5月20日, 千葉.
 19. 橋本達樹, マントル遷移層に沈み込むスラブと海洋地殻の挙動, 第一回地球深部科学研究交流会, 2007年3月7日, 松山.
 20. 吉岡祥一, 流れ・熱・カイネティクスを統合したスラブ沈み込みの2次元数値モデルの定式化に関する予備的考察, 第一回地球深部科学研究交流会, 2007年3月6日, 松山.
 21. 鳥井翼, スタグナントスラブの形成メカニズムー海溝の後退、マントル粘性、クラペイロン勾配からの制約ー, 第一回地球深部科学研究交流会, 2007年3月6日, 松山.
 22. 亀山真典, 滞留・崩落するスラブの再現に向けたマントル対流シミュレーションのこれまでとこれから, 科研費特定領域研究「地球深部スラブ」第2回研究シンポジウム, 2005年11月10日, 福岡.
 23. 吉岡祥一, 660km相転移境界でのクラペイロン勾配の温度依存性がマントル対流の様式に及ぼす影響, 2005年三鈹シンポジウム「地球物質科学のニューフロンティア」プログラム, S-03, 2005年9月23日, 松山.
 24. 多川道雄, Numerical Simulation of Trench Retreat and Slab Stagnation Related to Lithospheric Tensional Strength, 地球惑星科学関連学会2005年合同大会, 2005年5月26日, 千葉.
 25. 吉岡祥一, マントル下降流に伴う滞留スラブの形成・崩落過程の数値モデリング,

特定領域研究Kick-offワークショップ,
2005年1月20日, 東京.

[その他]
ホームページ等
スタグナントスラブに関する一般向け解説
<http://www.geol.sci.hiroshima-u.ac.jp/~nakakuki/megalith/megalith%201.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

吉岡 祥一 (SHOICHI YOSHIOKA)
九州大学・大学院理学研究院・准教授
研究者番号: 20222391

(2) 研究分担者

中久喜 伴益 (TOMOEKI NAKAKUKI)
広島大学・大学院理学研究科・助教
研究者番号: 10263667
鈴木 厚 (ATSUSHI SUZUKI)
九州大学・大学院数理学研究院・助教
研究者番号: 60284155
亀山 真典 (MASANORI KAMEYAMA)
愛媛大学・地球深部ダイナミクス研究センター・准教授
研究者番号: 70344299
田端 正久 (MASAHISA TABATA)
(平成16年度～平成17年度)
九州大学・大学院数理学研究院・教授
研究者番号: 30093272
中川 貴司 (TAKASHI NAKAGAWA)
(平成18年度～平成19年度)
スイス連邦工科大学チューリッヒ校・地球物理学研究所・上級博士研究員
研究者番号: 50396941

(3) 連携研究者

(4) 研究協力者

岩瀬 康行 (YASUYUKI IWASE)
防衛大学校・応用科学群・助教