

先端的固体地球科学シミュレーションコードの開発

課題責任者

古市 幹人 海洋研究開発機構 数理科学・先端技術研究分野

著者

古市 幹人 海洋研究開発機構 数理科学・先端技術研究分野

陰山 聡 神戸大学 大学院システム情報学研究科

宮腰 剛広 海洋研究開発機構 地球深部ダイナミクス研究分野

亀山 真典 愛媛大学 地球深部ダイナミクス研究センター

西浦 泰介 海洋研究開発機構 数理科学・先端技術研究分野

本課題では数値手法開発に明るい研究者が集まり、独自のアプリケーション並びに数値手法開発により、付加体形成やマントル・ダイナモ・マグマの諸課題において、既存のアプローチでは扱いが困難な時空間解像度や物性に起因する数値的悪条件といった問題の解決に取り組んでいる。そして、個々の問題解決を目指すとともに、それらを統一的な数値モデルの下で記述する数値惑星シミュレーションの実現をグランドチャレンジとする。

本年度は、粒子法における実スケール数値砂箱実験と結果の大規模応力鎖解析、ならびにマントルシミュレーションにおいて、大きな進捗があったため、本稿で紹介する。また現在取り組んでいるアプリケーションについても紹介する。

キーワード：粒子法, 動的負荷分散, 付加体, マントル対流, スーパーアース, プレート運動

1. 実スケール数値砂箱実験と応力鎖解析

(古市&西浦)

粒状体としての砂層は地殻の変形にみられる多くの特徴を有するため、その短縮変形実験は付加体形成のアナログモデルになると考えられる(図1)。しかし、室内実験では粒状体内部の応力状態を詳細に測定することが技術的に困難である。そこで本年度、付加体内部の応力状態を理解することを目的とした個別要素法(DEM)による大規模数値砂箱実験を実施し、その結果の応力鎖解析を行った。地球シミュレータ上で1000ノード以上を用いて並列化したDEMシミュレーションを実施するために、前年度までに開発した粒子法の動的負荷分散モジュールをDEMコードに実装した。その結果24億粒子を用いた数値砂箱実験においても良好な強弱スケールを測定する事に成功した(図2)[1, 2, 3, 4]。図1に示したシミュレーションにおいて、ノード間の計算負荷の不均質は、費やした平均経過時間に対して約7.4%にまで抑える事が出来た。

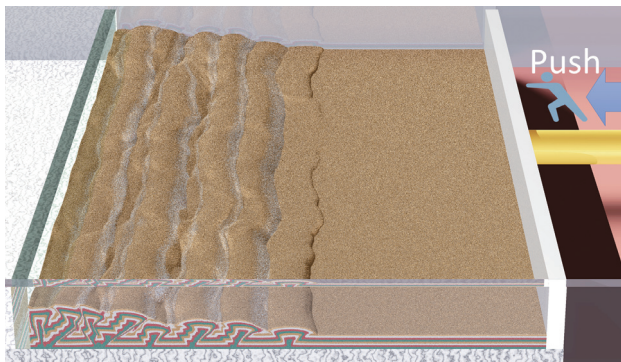


図1 数値砂箱実験の結果。短縮変形により付加体に類似した地形が再現される。

このようにして実現した、実際の砂に近いサイズ(～100 μ m)の粒子を最大で19億個用いた数値砂箱実験により粒状体内部の応力状態を調べた。本シミュレーションで用いた粒子数は、DEMを使った研究としては世界最大レベルとなる。シミュレーションでは室内実験度同様に、均質な初期状態から粒状体を短縮変形させることで、付加体と同様の断層を伴う地質構造を再現した。そこで、このような地形を形成するにあたり内部応力がどのように変化するかを調査するために、粒状体の応力状態を応力鎖計算により解析した。多数の粒子群から応力鎖を構成する粒子を抽出するには、強い圧力を受けてつながった粒子数を、応鎖の長さとして数えなくてはならない。そのため、

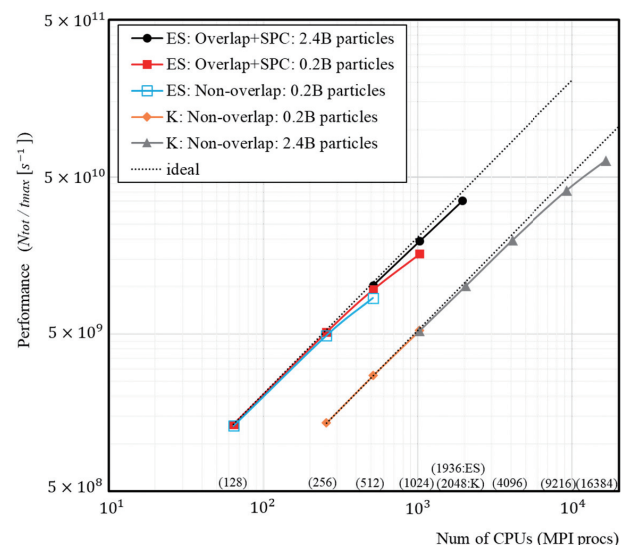


図2 開発したDEMシミュレーションで測定した強弱スケール

既往のアルゴリズムは順番依存性があり、並列化に不向きであった。そこで、反復的に長さを数え上げるアルゴリズムを独自に考案して並列計算を可能にした。

このようにして開発したシミュレーションコードと応力鎖解析によって、応力鎖解析により明らかとなった砂層内の応力状態（図3）では、付加体の解析においてこれまで重要視されてきた沈み込み方向と重力方向の2次元断面だけでなく、海溝軸方向にも巨視的な応力の不均質構造を持つ事が分かった。本実験では初期条件として、均質な初期状態を設定していることから、このような応力の水平構造は、粒状体に含まれている微視的な擾乱が、粒子の集団運動を介して非線形な挙動を示すことで、巨視的な不均質性に成長したものの結果である。このようなスケールをまたいだ不均質構造の発達過程は、3次元での粒子の集団性を再現するシミュレーションによってはじめて詳細に解析する事が可能になった。

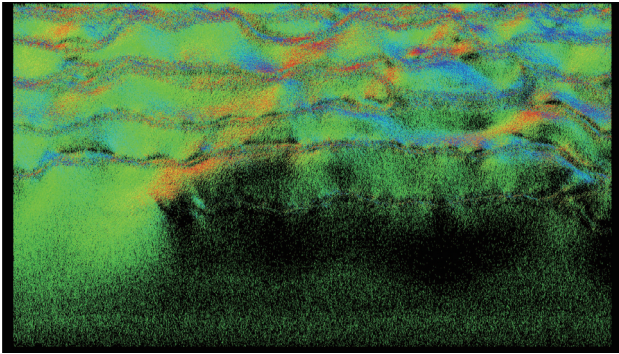


図3 図1を上部から見て可視化した応力鎖 (Map View)。色は応力鎖の垂直方向からの傾きを表す。

2. マントルダイナミクスの数値シミュレーション (宮腰、亀山)

2.1 応力履歴依存粘性を考慮したマントル対流の数値シミュレーション

地球上のプレートでは、ほぼ同じ強さの応力が掛かっているにもかかわらず、割れているところとそうでないところがある。割れる原因となった応力が取り除かれても、プレートはすぐに元の強さには復帰しない。すなわち、その状態はプレートが受けてきた応力の履歴に依存する。形成されたプレート境界は応力が緩和されても直ちに固着することはない、その事が現在の地球上で見られる安定で剛体的なプレート運動を生じさせていると考えられる。プレート境界が形成されたかどうかは応力履歴に依存しない（破壊の原因となった応力が少しでも緩和されると直ちに元の強さに復帰する）モデルの場合、不安定なプレート境界が形成されたり、また対流によるマントル内部の攪拌の効果を過大に見積もってしまう場合があり、その結果現在の地球内部で見られている LLSVP（巨大地震波低速領域）のような大規模な構造が形成されにくいといった影響がある。

我々は、より現実的な状況でプレートの挙動を調べるため、本プロジェクトで開発されたマントル対流計算コード ACuTE 法 [5] に応力履歴依存粘性を導入したコード開

発を行っている。昨年度まででコードの骨格となる部分は完成しており、昨年度も結果を報告したがそれは、プレートがそれほど堅くない（マントル下部と上部の粘性率コントラストが小さい）計算が比較的容易なパラメータ域の結果であった。この場合、応力によってプレート境界が形成されそこで沈み込みが起こるが、プレートが相対的に柔らかいため剛体的な運動とはならない。本年度はよりプレートを堅くした（実際の地球の）パラメータ域での計算を実施した。このようなパラメータ域では計算に困難な点が生じたが本年度中にそれも解決し、計算を進めている。図4が計算結果の一例である。応力履歴の他に、温度および圧力に対する粘性率の依存性も考慮されている。対流ブルームの上昇に伴い、強い応力が掛かった事によって形成されたプレート境界に沿って低温のプレートが沈み込む様子が見えている。（図には示していないが）プレート片が剛体的に運動しつつある様子も見られている。プレート境界が生じた場合、水平面内で局所的に大きな粘性率コントラストが生じる場所が形成されることになるため、収束に時間がかかるようになり計算時間が長くなり、この例の計算もまだ計算途中ではあるが、計算自体は順調に進んでいる。またこの例は下部加熱のみによる対流であるが、内部熱源を考慮した計算なども進んでいる。次年度も続けて計算を続行する予定である。

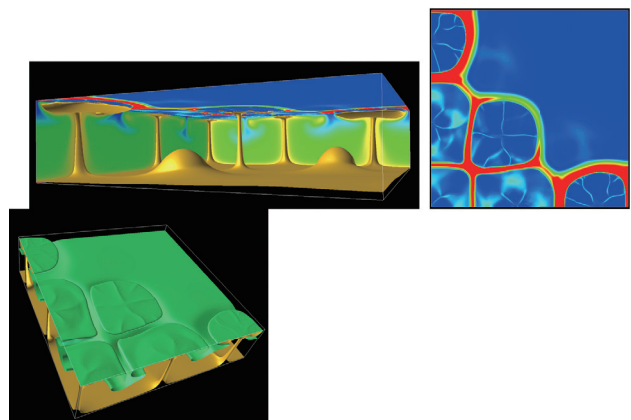


図4 [上段左] 熱いブルーム等値面 (黄)、温度分布 (側面) [上段右] 惑星表面を真上から見た図で、色は赤や緑の部分がプレートが強い応力を受け、プレート境界が形成されている部分を示す。[下段] 低温度(プレート)部分の等値面 (緑)

2.2 系外惑星スーパー・アースのマントル対流シミュレーション

マントル対流はその惑星の熱進化やプレート運動、表層環境、コア対流ひいては惑星磁場と深く関わっている。我々は現在続々と発見されている系外惑星スーパーアースのマントル対流について、地球と比較してどのような違いがあるかを調べるため、ACuTE 法 [5] を用いて計算を行い調べている。

本研究テーマにおいては、昨年度までにすでに三編の査読論文 [6-8] を出版しているが、それらは巨大スーパーアース（地球の10倍質量）の場合について、対流の特徴

や対流構造の進化について調べたものであった。そこで得られた重要な結果は、コア-マントル境界から上昇するホットブルームの活動性が表層から下降するコールドブルームと比べて非常に弱くなること、対流の熱輸送効率が（惑星半径増大によるレイリー数上昇にも関わらず）それほど高くない事、プレートの厚さがかなり厚くなる事、等であった。本年度は、これらの特徴がどの段階から顕著になってくるのかを調べるため、惑星質量を地球程度からその10倍に至るまで段階的に変化させて計算を行った。その結果、上記のような特徴が顕著になるのはどの程度の惑星質量からかの境界値がおおよそ明らかになった。（今後、さらに諸条件を考慮することでこの境界値が前後する可能性はあるけれども、）地球のようなプレート運動や火山活動を持つ系外惑星を期待する場合、それはこの境界値以下の質量の惑星が可能性が高いのではないかという事を示唆し、系外惑星探査などに対しても示唆を与えうる結果となるのではないかと考えている。本成果は本稿執筆時点で、論文投稿中である。

文献

- [1] D. Nishiura, H. Sakaguchi, *J. Comput. Phys.*, 230, 5, 1923-1938, (2011).
- [2] D. Nishiura, M. Furuichi, H. Sakaguchi, *Compt. Phys. Comm.*, 194, 18-32 (2015).
- [3] M. Furuichi and D. Nishiura, *Comput. Phys. Comm.* 219, 135-148 (2017).
- [4] M. Furuichi, D. Nishiura, M. Asai, & T. Hori, *The International Conference for High Performance Computing, Networking, Storage and Analysis*, Denver, CO http://sc17.supercomputing.org/SC17%20Archive/tech_poster/tech_poster_pages/post113.html (2017).
- [5] Kameyama M, Kageyama A, Sato T (2005), *J Comput Phys* 206:162–181.
- [6] Takehiro Miyagoshi, Chihiro Tachinami, Masanori Kameyama, & Masaki Ogawa, *Astrophys. J. Lett.*, 780, L8 (2014).
- [7] Takehiro Miyagoshi, Masanori Kameyama, & Masaki Ogawa, *J. Geophys. Res.*, 120, 1267-1278 (2015).
- [8] Takehiro Miyagoshi, Masanori Kameyama, & Masaki Ogawa, *Earth, Planets and Space*, 69, 46 (2017).

Development of Advanced Simulation Methods for Solid Earth Simulations

Project Representative

Mikito Furuichi Department of Mathematical Science and Advanced Technology, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

Authors

Mikito Furuichi Department of Mathematical Science and Advanced Technology, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

Akira Kageyama Graduate School of System Informatics, Kobe University

Takehiro Miyagoshi Department of Deep Earth Structure and Dynamics Research, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

Masanori Kameyama Geodynamics Research Center, Ehime University

Daisuke Nishiura Department of Mathematical Science and Advanced Technology, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

Large-scale particle simulation: To understand the stress state in the accretionary prism, a numerical sandbox experiment was performed with realistic particle sizes. We developed the simulation code of Discrete Element method (DEM) based on the new types of load balancing algorithms proposed last FY. The parallel scaling test shows good strong, and weak scalabilities up to 2.4 billion particles on the Earth Simulator. To analyze the stress state inside the granular media, we had performed stress-chain analysis. The result indicates that essential structure of stress state inside the accretionary prism is three-dimensions rather than two dimensions, which is assumed by classical geological views. **Mantle convection:** We have developed stress-history dependent viscosity model in ACuTEMAN. In the last FY, we showed the case of small viscosity contrast between bottom and top of the mantle thus plate is relatively soft. In this FY, we calculate the case of hard plate (large viscosity contrast, plate like regime) in which parameters are Earth-like one. In addition, we performed numerical simulations by changing the planet mass step by step from the Earth class to ten times the Earth's mass to study the mantle convection in super-Earths.

Keywords: Particle simulation, Dynamic load balancing, Accretionary prism, Mantle Convection, super-Earths, Plate motion

1. The real-scale numerical sandbox experiment (Furuichi & Nishiura)

Understanding the stress state in accretionary prisms that generate great earthquakes and tsunami is one of the grand challenges in scientific exploration projects, such as the Integrated Ocean Drilling Program (IODP). Analog sandbox experiments can be the effective approach to deduce the stress state combined with the data from boreholes. However, laboratory experiments cannot fully explore the 3D stress states inside granular media. To overcome this, we performed direct 3D numerical simulations with the Discrete Element Method (DEM) (Fig. 1).

The DEM has been widely accepted as an effective numerical approach for granular problems such as a sandbox experiment. For such a problem, it is essential to have many particles for a qualitative and quantitative understanding of granular dynamics. However, the efficient parallel implementation of DEM is still a challenge [1, 2]. Thus, we developed new DEM codes designed for HPC systems to overcome the degradation of parallel

performance due to the load imbalance and communication costs by utilizing an iterative dynamic load balancer [3]. The scaling test is shown in Fig. 2. We observe good, weak and strong scaling behavior upto 2B particles and 1,936 CPUs in the Earth Simulator (the maximum was 2,048 CPUs). With the developed DEM code, a real-size-scale sandbox simulation with 2.4B particles (100 μm particle size and $1\text{ m} \times 1\text{ m} \times 0.02\text{ m}$ domain size) was performed using Earth Simulator. The load imbalance $(t_{\text{max}} - t_{\text{min}})/t_{\text{ave}}$ observed around at the time step in Fig. 1 was about 7.4% [4].

Stress chain analysis suggests that the complex lateral stress structure is formed after the multiple thrust events (Fig. 3). This lateral stress structure could be the natural outcome of the thrust formations in the accretionary prism. We argue such stress state improves the interpretation of the in-situ stress state from the boreholes. The 2D cross-section view of the sandbox experiment has been used to interpret the borehole data, but the 3D view is not yet considered well.

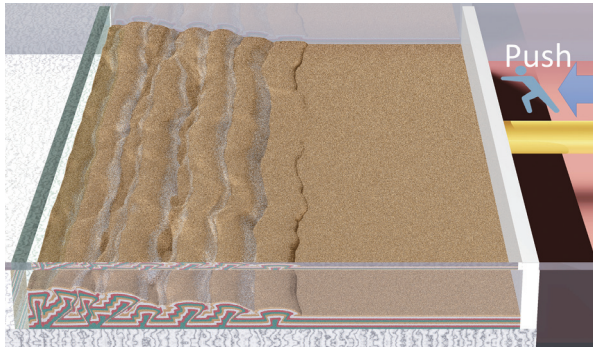


Fig. 1 Snapshot of sandbox simulation with 1.9B particles.

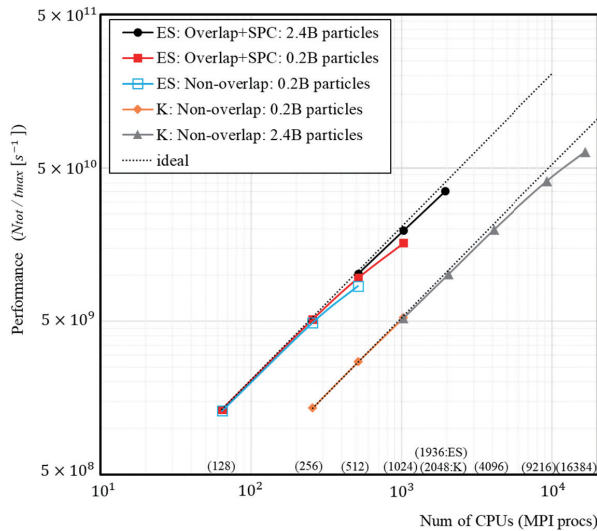


Fig. 2 Strong and weak scaling of the parallel performance on the Earth simulator

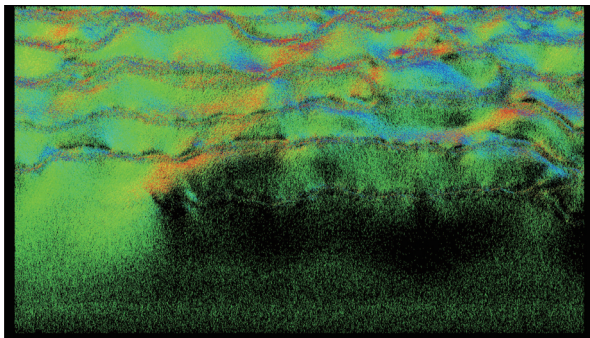


Fig. 3 Map view of the stress chain distribution at 40% shortening. The most compressive principal stress vectors in the stress chains are denoted by the colored lines. The color shows the angle of vector against vertical axis.

2. Mantle dynamics (Miyagoshi & Kameyama)

2.1 Mantle convection with stress history, temperature, and pressure dependent viscosity

On the plate on the Earth, there are places where they are ruptured or not, even if stress of almost the same strength is applied. To treat this feature correctly, we have developed stress-history dependent viscosity model in ACuTEMAN [1].

In the last FY we showed the case of small viscosity contrast between bottom and top of the mantle. In that case, plate is relatively soft, and it does not move rigidly (weak plate regime). In this fiscal year, we calculate the case of hard plate (large viscosity contrast, plate like regime) in which parameters are Earth-like one. Fig. 4 shows an example of numerical simulation results. In addition to the stress history, the viscosity depends on temperature and pressure. The lithosphere descends along the plate boundary formed by strong stress. The plate pieces begin to be moving rigidly. As plate boundaries are formed, places with a large viscosity contrast locally arises in the horizontal plane. It causes the long iteration time and the calculation time becomes long. This calculation is still on the way, and we continue the calculation in next fiscal year.

2.2 Mantle convection in super-Earths

We have studied thermal convection in the mantle of super-Earths by ACuTEman [5]. In this research theme, we already published three peer-reviewed papers [6-8] by last year in which the case of massive super-Earths (ten times the Earth's mass) is studied. The important results obtained are that the vigor of hot plumes ascending from the core-mantle boundary becomes very low, the efficiency of heat transport by thermal convection becomes low despite of the large Rayleigh number due to the increase in the planetary radius, and the thickness of the lithosphere becomes large.

In this fiscal year, in order to investigate the threshold where these characteristics become prominent, we performed numerical simulations by changing the planet mass step by step from the Earth class to ten times. From numerical simulation results, we found the threshold where the above characteristics are remarkable. Our results suggest that the Earth-like plate motion or volcanic activities are expected in the lower mass planets than the threshold in super-Earths. The paper of the results is submitted now.

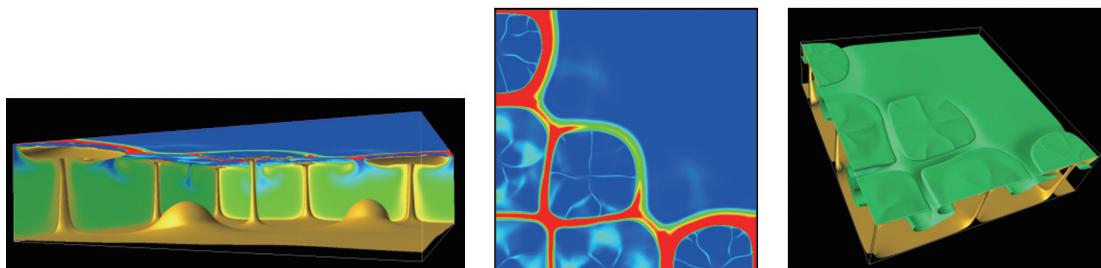


Fig. 4 [Left] Hot plume isosurface (yellow), temperature distribution (side wall) [Center] The view from the top. The red and green parts show plate boundaries caused by strong stress. [Right] Isosurface of low temperature which shows the lithosphere (green).

References

- [1] D. Nishiura, H. Sakaguchi, *J. Comput. Phys.*, 230, 5, 1923-1938, (2011).
- [2] D. Nishiura, M. Furuichi, H. Sakaguchi, *Compt. Phys. Comm.*, 194, 18-32 (2015).
- [3] M. Furuichi and D. Nishiura, *Comput. Phys. Comm.* 219, 135-148 (2017).
- [4] M. Furuichi, D. Nishiura, M. Asai, & T. Hori, *The International Conference for High Performance Computing, Networking, Storage and Analysis*, Denver, CO http://sc17.supercomputing.org/SC17%20Archive/tech_poster/tech_poster_pages/post113.html (2017).
- [5] Kameyama M, Kageyama A, Sato T (2005), *J Comput Phys* 206:162–181.
- [6] Takehiro Miyagoshi, Chihiro Tachinami, Masanori Kameyama, & Masaki Ogawa, *Astrophys. J. Lett.*, 780, L8 (2014).
- [7] Takehiro Miyagoshi, Masanori Kameyama, & Masaki Ogawa, *J. Geophys. Res.*, 120, 1267-1278 (2015).
- [8] Takehiro Miyagoshi, Masanori Kameyama, & Masaki Ogawa, *Earth, Planets and Space*, 69, 46 (2017).