

先端的固体地球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

陰山 聡^{*1}, 大野 暢亮^{*2}, 横井 研介^{*3}, 西浦 泰介^{*4}

^{*1} 神戸大学大学院 システム情報学研究科, ^{*2} 兵庫県立大学 シミュレーション学研究科, ^{*3} Cardiff 大学 工学部, ^{*4} 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。本年度は、粒子法の一つである離散化要素法 (DEM) の世界最大スケールの大規模計算を実現し、実スケール数値砂箱実験の実施と結果の大規模応力鎖解析において大きな進捗があったため、本稿で紹介する。

キーワード : DEM, 付加体, 応力鎖, 粒子法, ジオダイナミクス

1. 緒言

本課題において、粒子法の大規模計算コードの開発を実施している。粒子法には多くの種類が存在するが、その中で粉体挙動を扱うモデルとして離散化要素法 (DEM) がよく知られている。DEM は他の粒子法と異なり、接線方向の接触相互作用を持つため、粒子数ではなく粒子間接触により計算コストが律速され、それにたいする並列化の難易度も高いのが特徴である。我々は DEM の並列化問題の解決に取り組み、MPI 領域分割の変更に伴う計算コストの再分配を非線形問題としてとらえた、反復法型のロードバランサーを開発[1]するなどして、世界最大レベルの粒子数、24 億粒子を用いた数値砂箱実験の実施に成功した。砂箱実験は、付加体形成過程のスケールアナログモデルとしてよく知られており、地質学における研究対象の一つとなっている[2]。しかしながら、実際の実験では砂層内部の挙動を直接観測することが技術的に困難である。それゆえ、既往研究では可視化可能な境界壁の 2 次元断面に議論が集中し、付加体内部の 3 次元的な構造・挙動についての議論が十分ではない。そこで、本プロジェクトで培った技術を活用して、実スケール 3 次元数値砂箱実験を実施、その内部応力変化を調べることで、砂箱ひいては付加体形成の内部応力構造の解釈に 3 次元的な視点と取り入れることを試みた[3]。

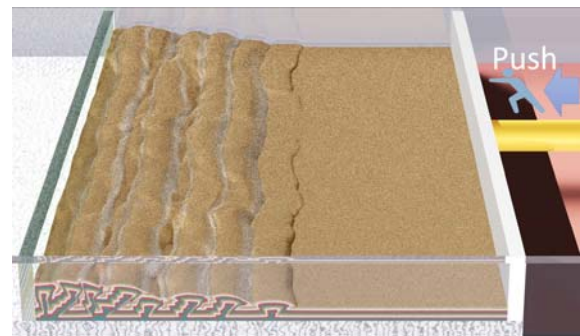


図 1 数値砂箱実験の結果例

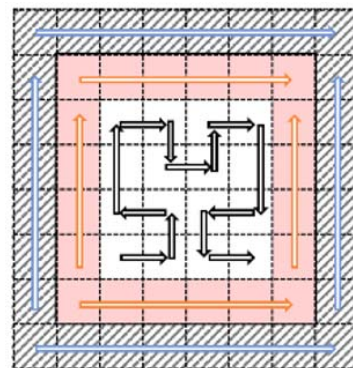


図 2 空間充填曲線による粒子番号の並び替え

2. 数値砂箱実験

地球シミュレータを並列 DEM 計算により、図 1 のように $1.0\text{m} \times 1.0\text{m} \times 0.02\text{m}$ の初期の均質砂層の短縮変形を、再現した。初めに地球シミュレータによるパフォーマンスについて説明する。地球シミュレータでの並列計算では、空間充填曲線による粒子の並び替え (図 2) と MPI 通信の overlap による遮蔽を実装して計算の高速化を図った。これらの性能を示したのが図 3 のスケーリング性能となる。

図 3 に示したように、地球シミュレータのほぼフルノードである 1936 ノードまでのスケーリング性能が出ていること並びに空間充填曲線と MPI 通信の overlap による性能改善も確認できた

このようにして、並列化を実施できたことで、砂の実スケールである平均粒径 $113.75\mu\text{m}$ の粒子を 24 億粒子用いた数値短縮砂層実験 (e. g. 図 1) が実施可能と

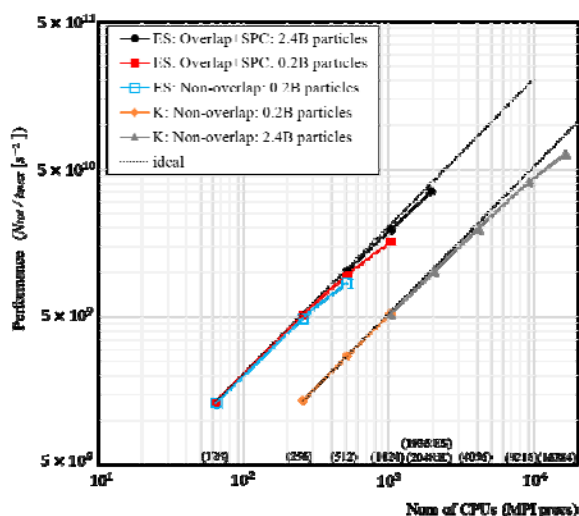


図3 スケーリング測定結果

なった。得られた結果は実際の実験とも類似しており付加体の特徴である断層形成とそれによる上盤の隆起、といったものが再現されている。特に注目したのは壁移動と直行するつまり海溝軸方向に卓越する波模様である。初期状態に粒経以下の不均質性を含まないため、このような波模様は、粒子サイズのミクロな擾乱が、断層形成時に、粒子の集団運動を介して発展しマクロな変形を引き起こしたのと考えられる。このようなスケールをまたぐ現象を数値シミュレーションでは直接解析することが可能である。

3. 応力鎖解析

粒状体の幾何形状・地形が形成される際に、いくつかの粒子に力が集まることで応力鎖を構成し、それが変形において力学的に大きな役割を担う事が知られている。そこで、模倣的な付加体形成プロセスを理解するために

応力鎖解析を実施した[3]。各粒子にかかる応力は、

$$\sigma_{ij} = \frac{1}{V} \sum_{c=1}^{m_c} f_i^c r_j^c$$

を計算することにより求めることが出来る。ここで $1 < c < m_c$ はある粒子がもつすべての接触点であり V は粒子の体積、 f と r は接触点にかかる力と中心から接触点へのベクトルである。このようにして各粒子において求めたストレステンソルから最大圧縮主応力ベクトルを求め、そのベクトルの大きさが平均より大きくかつ隣り合う粒子間で 25° の角度で4つ以上連続している場合に、応力鎖と定義する[4]。最後の4つ以上接続があるか否かを判定するには単純な方法では順番依存性があり10億を超える粒子に適用することが難しかった

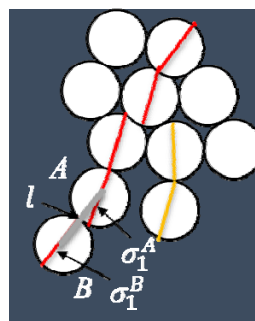


図4 応力鎖の模式図

たが、反復法に基づいた大規模数え上げアルゴリズムを開発することでそれを可能にした [4]。

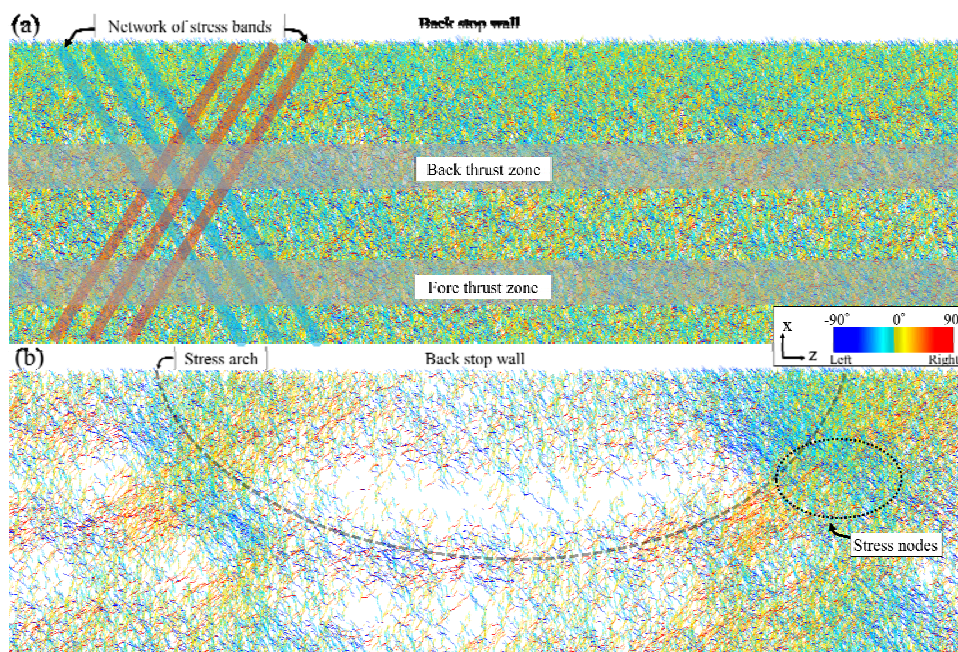


図5 断層が形成される際の応力鎖例、視点は Map View で応力鎖を表示。上部バックストップ壁付近にアーチ状の応力鎖構造が確認される。

4. 解析結果

本研究で注目した海溝軸方向に卓越する波模様は、短縮変形による断層形成と共に現れる。そこで、図5のように、断層形成直前 (a) と形成途中 (b) に観測された、表層付近の薄い層内の応力鎖を観察した。その結果、断層形成時に粉状体内の水平方向に応力鎖が、背後の壁を視点として、断層形成により持ち上げられた上盤内に、アーチ状の応力構造を自発的に形成していることが分かった (図5の補助線)。サイロなどにおいて、粒状体が応力のアーチ構造を示すことは知られているが、短縮変形においても現れることはあまり指摘されていない。

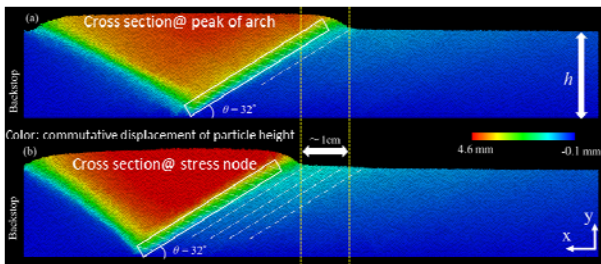


図6 短縮と重力方向における断面図。色は隆起した高さを表す。

そこで上盤内の応力アーチの頂点と、バックストップ付近で作られる節での断面図 (図6) を見たところ、断層が入る位置がずれている事、つまりアーチに沿って波構造が発達することが確認できた。

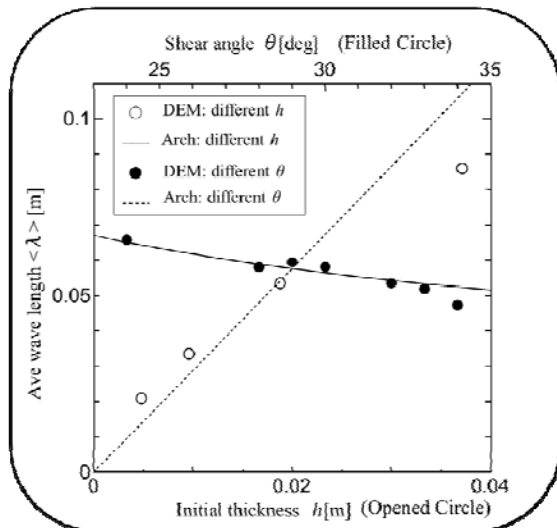


図7 数値計算と理論のアーチ幅比較

この、アーチ構造の形成過程を詳細に調べたところ、微視的な接触相互作用の集団的運動がもたらす巨視的な非線形挙動であることが解明された。つまり、粉体の非線形レオロジーは地殻のレオロジーにも認められる特徴であるが、それらの帰結としての付加体の波模様が存在する可能性を示唆している。

この波模様の大きさが何によって決まるのかは、実際の地形との比較において非常に重要である。そこで、アーチが一般的な短縮方向への負荷により生じると仮定して、bridge-curve モデルを導出した。用いた理論モデルはパラボリックアーチモデルであり、初期の層厚 h と、断層の角度 θ によって記述される。そこで、数値計算と理論モデルを複数の (h, θ) によって調べたものが図7である。結果に高い相関性がみられることから、波模様の大きさが、断層が入る角度と粉体層の厚さ、つまり粉体層のマクロな物性と地形で、およそ記述できることを計算結果は示唆している。地質学的に言えば、沈み込みプレートの厚さと、断層角度を決める破壊基準つまり物性が、波模様の空間スケールを決めている事を意味している。

得られた知見が観測可能であるかを議論するために、数値実験において仮想的なボアホール実験を行い、掘削抗で観測される SH_{max} (最大水平圧縮応力) を用いて、本仮説が検証可能なのかについて調査した (図8)。

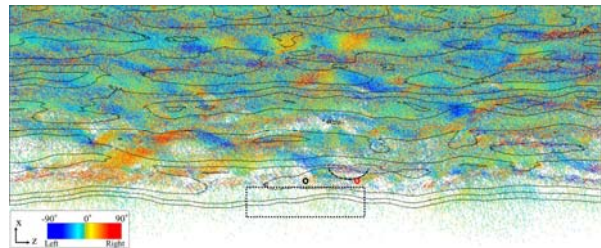


図8 複数の断層が出来たのちの応力鎖と数値ボアホール実験を行った位置

数値実験での応力アーチの直下 (図8の赤丸) では、深さに対して、 SH_{max} の方向が回転していた。これは掘削抗観測でよく議論される主応力方向の回転が応力アーチによって説明が可能である事を示唆している。さらにアーチ直下の応力変位はアーチ外の観測抗 (図8の黒丸) と比較して断層運動に干渉されにくいことも分かった。これは、アーチ状の応力は局所的な力学バランスであり、領域的な運動に影響を受けにくい事に起因する。これらは、長期掘削抗モニタリングによる解明が期待される。

5. まとめ

粒子法 DEM の先端的な並列化技術を開発することで、世界最大スケールの粉体シミュレーションによる実スケール数値砂箱実験を実施した。数値シミュレーションにより、粒状体のミクロスケールの擾乱が、アーチ状の応力構造を伴って成長し、マクロスケールにおいて水平方向の波模様を形成することが分かった。応力鎖解析により、それらが断層形成時の非線形な集団運動に起因することを突き止めた。同様の空間スケールをまたいだ現象は、ミクロな擾乱と非線形なレオロジーをもった地殻

変形、つまり付加体形成においても起こりえる現象である。この発見は、海山等の地質学的スケールでのマクロな擾乱がなくても、付加体で見られる複雑な構造特徴を説明しうる点で新しいといえる。また数値砂箱実験により、これらの発見が掘削観測により裏付けられる可能性があることも示した。

謝辞

本研究は、JSPS 科研費 JP15K17754 と JP18K03815 の助成を受け、文部科学省によるポスト「京」プロジェクト重点課題3 「地震・津波による複合災害の統合的予測システムの構築」の一環として実施されたものです。

文献

- [1] Furuichi, M. & Nishiura, D. Iterative load-balancing method with multigrid level relaxation for particle simulation with short-range interactions. *Comput. Phys. Commun.* 219, 135-148 (2017).
- [2] Yamada, Y., Baba, K., & Matsouka, T. Analogue and numerical modelling of accretionary prism with a decollement sediments in Numerical and Analogue Modelling of Crustal-Scale Processes. *Geological Society (eds. Buiter, S., Schreurs, G.) 253, 169-183 (London, Special Publication, 2006).*
- [3] M. Furuichi, D. Nishiura, O. Kuwano, A. Bauville, T. Hori, H. Sakaguchi, 'Arcuate stress state in accretionary prisms from real-scale numerical sandbox experiments' *Scientific Reports* (2018), 8, 8685, DOI:10.1038/s41598-018-26534-x
- [4] Furuichi, M., Nishiura, D., Asai, M., & Hori, T. Massively parallel stress chain characterization for billion particle DEM simulation of accretionary prism formation. *The International Conference for High Performance Computing, Networking, Storage and Analysis, Denver, CO* https://sc18.supercomputing.org/proceedings/tech_poster/poster_files/post136s2-file3.pdf (2018).

Development of Advanced Simulation Tools for Solid Earth Sciences

Project Representative

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

Authors

Akira Kageyama ^{*1}, Nobuaki Ohno ^{*2}, Kensuke Yokoi ^{*3}, Daisuke Nishiura^{*3}

^{*1} Kobe University ^{*2} University of Hyogo, ^{*3}Cardiff University, ^{*4} Department of Mathematical Science and Advanced Technology, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

We simulate a sandbox experiment with realistic particle sizes by parallel implementation of the Discrete Element Method (DEM) for a large parallel computer system. This numerical sandbox experiment is used to investigate the stress state in the accretionary prisms. Despite the nearly uniform initial conditions, macro-scale undulations of faults, which are similar to those observed in the trenches of an accretionary prism, appear. We reveal that these undulations are caused by the formation of stress arches.

Keywords : Accretionary prism, DEM, Stress chain, Geodynamics

1. Introduction

The Discrete Element Method (DEM) has been widely accepted as an effective numerical approach for granular problems associated with fields, including engineering, geophysics and non-linear physics. For example, our targeted DEM problem is a sandbox experiment that is a scaled analog model of thrust formations in accretionary prisms. 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. 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 [1]. We performed the real-scale numerical simulations of sandbox experiments using the Discrete Element Method (DEM) in which each grain of sand is represented by a discrete particle (Fig. 1). Stress chain analysis suggests that although the initial thickness of the sand layer varies by less than one grain diameter (i.e., micro-scale perturbation), the formation of stress arches leads to the development of macro-scale lateral undulations of faults [2].

2. Numerical sandbox experiment.

We developed new DEM code which shows good strong, and weak parallel scalabilities up to 2.4 billion particles on the Earth Simulator and the K computer [2]. The code development enable us to perform the numerical sandbox experiments with a real-scale sand size which involve the horizontal shortening of a layer of sand as shown in Fig. 1.

The sandbox experiments is known as a scaled physical analog model to understand the formation of accretionary prisms. When pushed against the backstop, the sand layer

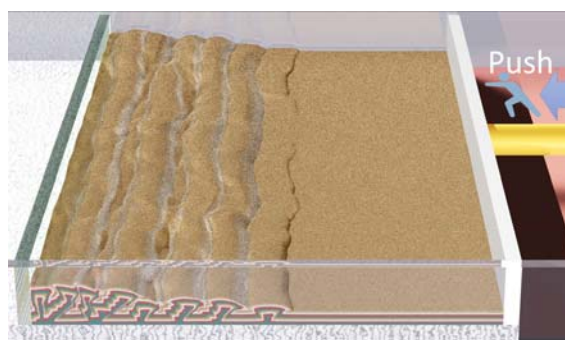


Figure 1: Snapshot of numerical sandbox experiment

deforms into pop-up structures with new frontal thrusts forming sequentially, a behavior of typical taper wedges formed in the sandbox experiments. We observed that the frontal thrust of the first pop-up undulates although initial condition is nearly uniform.

3. Stress chain analysis

To understand the manner in which the initial micro-scale perturbations of granular layer produce macro-scale structures, we performed a stress chain analysis. We performed a stress chain analysis of the first thrust event as shown in Fig. 2. In the figure, the most compressive principal stress directions for particles belonging to the stress chain within the thin layer are represented at before the thrusting (a) and during the thrusting (b) as colored lines for the angle in the horizontal plane.

The stress chain structure in the rearrangement of particle contact with thrusting has the shape of an arch in Fig. 2(b). At the same timing, the horizontal undulations emerge. The undulation of the frontal thrust is consistent with the shape of the arch.

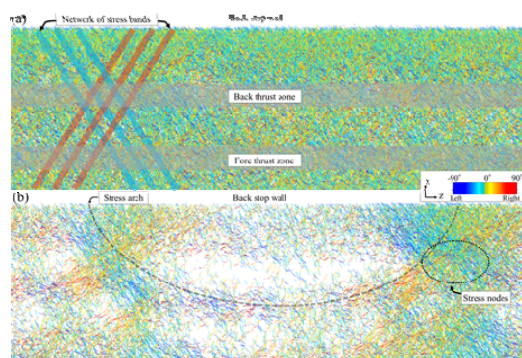


Figure 2: Map view of stress chain at the first thrust event

We found macro-scale arcuate faults emerge from micro-scale perturbations owing to the formation of the stress arch without the initial macro-scale perturbations.

4. Conclusions

Direct numerical simulations of the sandbox experiment suggest that the macro-scale lateral stress structures, such as arcuate structural patterns are due to micro-scale perturbations. Stress chain analysis reveals that the particles collectively form such structures owing to the discontinuous changes in the stress chains at the beginning of the fault motion. Our findings lead to a new feasible mechanism for generating arcuate geological-scale (km-scale or higher) structures from micro-scale perturbations without geological scale perturbations, such as topography, layer property, and erosion

Acknowledgement

This study was supported by Grant-in-Aid for Scientific Research (JP15K17754 and JP18K03815) from the Japan Society for the Promotion of Science (JSPS).

References

- [1] Furuichi, M. & Nishiura, D. Iterative load-balancing method with multigrid level relaxation for particle simulation with short-range interactions. *Comput. Phys. Commun.* 219, 135-148 (2017).
- [2] M. Furuichi, D. Nishiura, O. Kuwano, A. Bauville, T. Hori, H. Sakaguchi, 'Arcuate stress state in accretionary prisms from real-scale numerical sandbox experiments' *Scientific Reports* (2018), 8, 8685, DOI:10.1038/s41598-018-26534-x