

個別要素法に基づく粉体せん断イベントの数値モデル実験：初期条件と摩擦係数の影響

メタデータ	言語: ja 出版者: 静岡大学地球科学教室 公開日: 2021-09-28 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 大庭, 伸一, 三井, 雄太 メールアドレス: 所属:
URL	https://doi.org/10.14945/00028379

個別要素法に基づく粉体せん断イベントの 数値モデル実験：初期条件と摩擦係数の影響

大庭伸一¹・三井雄太²

Numerical model experiment of grain shear events based on Distinct Element Method: Effects of initial condition and frictional coefficient

SHIN'ICHI OBA¹ and YUTA MITSUI²

Abstract We perform numerical experiments simulating grain shear events in a fault zone based on a three-dimensional Distinct Element Method. We investigate the effects of initial arrangement of grains and intergranular frictional coefficient for the inertial number I around 10^{-3} . We find that a variety of event modes, such as Riedel shear, depends on the initial arrangement. We further clarify that microscopic slip velocity of intermittent events does not simply correlate with the frictional coefficient.

Keywords: Grain shear, Distinct Element Method (DEM), intermittent slip, granular friction, simulation

はじめに

地震発生の物理過程には未だ謎が多いものの、全体としては次のように理解されている(井出, 2017):地震は断層のせん断から生じる高速すべりの伝播である。断層上には、階層構造を持つパッチ(高速すべりの起きやすい箇所)が不均質に広がっている。すべり自体は、断層の真実接触面積変化、摩擦溶解、間隙流体圧など様々な素過程に支配されており、それらの相互作用も働く。

断層では、せん断の進行に伴うエネルギー解放の一部が物質破砕に使用され、粉体(ガウジ)層が徐々に発達すると考えられる(Engelder, 1974)。この粉体層の挙動は、断層すべりを支配する素過程の1つとなり得る。このため、粉体層を挟む岩石すべり実験が数多くなされてきた(例、Scholz, 2002)。さらに、断層物質の化学的影響に左右されない、理想化された粉体層のせん断挙動についての研究も多くなされてきた(Nasuno *et al.*, 1998;

Morgan and Boettcher, 1999; Albert *et al.*, 2001; Aharanov and Sparks, 2004; GDR MiDi, 2004; Abe and Mair, 2005; Jop *et al.*, 2006; Kuwano *et al.*, 2013)。粉体粒子の1つ1つはシンプルな運動方程式に従って動くものの、粉体間の相互作用により、粉体層の変形挙動は多様になる。このような粉体の集団挙動を経験的な仮定に基づいて議論することは一般に困難であり、システムの包括的理解には程遠い状況にある。

とはいえ、理想化された粉体層のせん断挙動が、粉体のパッキング圧・せん断速度など様々な要素の影響を受けることはわかっており、とりわけ、マクロスコピックに定常的な粉体流については、実験・理論両面からの定量的理解が進んでいる(Jop *et al.*, 2006; 御手洗, 2009; Kuwano *et al.*, 2013)。一方で、地震の繰り返し発生を表す固着-高速すべり(スティック・スリップ)のような間欠的挙動(Nasuno *et al.*, 1998; Albert *et al.*, 2001)については、著者らの知る限り、そのパラメータ依存性が

2021年3月26日受付 2021年5月17日受理。

Received: 26 March 2021 Accepted: 17 May 2021

¹静岡大学大学院総合科学技術研究科, 〒422-8529 静岡市駿河区大谷836

²静岡大学理学部地球科学科

¹Graduate School of Science and Technology, Shizuoka University, 836 Ohya, Suruga-ku, Shizuoka, 422-8529 Japan

²Department of Geosciences, Faculty of Science, Shizuoka University

E-mail: mit@shizuoka.ac.jp (Y. M.)

包括的に理解されているわけではない。

本研究では、個々の粉体粒子の動力学および弾性相互作用を並列計算する個別要素法 (Cundall and Strack, 1979) に基づき、理想化された粉体層のせん断に伴う間欠的なイベントについて調べる。

手法

3次元個別要素法ソフトウェアYade (Smilauer *et al.*, 2015) を使用する。個々の粉体要素 (球形) は運動方程式に従って移動し、粉体間に衝突判定が入ると、相互作用として接線方向・法線方向に弾性力がかかるものとして。また、衝突部に一定の摩擦係数が与えられており、それを超える力が加わった場合、粉体間にすべり (回転運動) が生じる。運動方程式の数値計算には2次の有限差分法、衝突判定にはSweep and Pruneアルゴリズムを採用する。数値誤差を抑制するため、局所的な加速に対する速度依存のダンピング (Chareyre and Villard, 2005) をかける。

本研究では、粉体せん断シミュレーションによる数値モデル実験を行う。実験領域の大きさは $4 \times 2 \times 2$ の3次元セルで表す (長さスケールは無次元)。各セルの中に複数の粉体要素が入る。領域端に周期境界条件を設定する。図1に実験領域の概要を示す。実験は、パッキングフェイズとせん断フェイズからなる。パッキングフェイズでは、一定の静水圧に達するまで等方圧縮を行う。その後、せん断フェイズにて、領域端 (x-z平面) をx軸方向に定常せん断する。

数値実験で変更可能なシステムパラメータとして、パッ

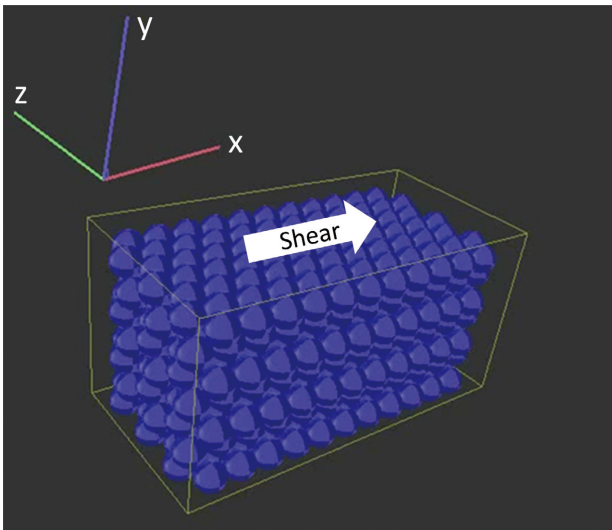


図1 実験領域の概要。x軸方向の大きさがy軸・z軸方向の2倍となっている。領域端には周期境界条件が設定される。x-z平面の領域端に、x軸方向への定常的なせん断が加えられる。

Fig. 1 A view of the experimental domain with the x-axis direction twice as large as the y- and z-axis directions. Periodic conditions are set at the boundaries of the domain. Constant shear in the x-axis direction is applied at the edge of the domain in the x-z plane.

キング圧 P ・せん断歪み速度 $\dot{\gamma}$ 、粉体パラメータとして、粒径 d ・密度 ρ ・摩擦係数・ヤング率・ポアソン比がある。先行研究 (例, GDR MiDi, 2004) において無次元数 (Inertial number)

$$I = \frac{\dot{\gamma}d}{\sqrt{P/\rho}}$$

が導入されており、粉体層のせん断挙動を支配するパラメータと考えられている。 $I = T_p/T_\gamma$ と置き換えると、 $T_p = d/\sqrt{P/\rho}$ は粉体層内部のシステム緩和時間、 $T_\gamma = 1/\dot{\gamma}$ は粉体層のマクロスコピックな変形の特徴的時間に相当する。つまり、 I が大きいほどせん断挙動は粉体層内部の粒子運動の影響が大きい動的なものとなり、 I が小さいほどせん断挙動は準静的なものとなる。本研究では、多くの先行研究に比べて小さい $I \sim 10^{-3}$ の領域でのせん断挙動を調べ、結果の章で述べるようなマクロスコピックな間欠的なイベントの発生を見出した。

また、粉体の初期配置として、六方最密充填構造に相当する「幾何学的配置」と「ランダム配置」の双方が考えられる。図2に、両者の例を示す。

この粉体せん断シミュレーションのシステムは、原理的に粉体粒子の慣性質量 (粒径・密度の関数) へ強く依存する。数値実験でもこのことは容易に確認できる (大庭, 2021MS)。それ以上の非自明な性質として、本稿では、まず粉体初期配置の影響を検証した上で、摩擦係数の影響に焦点を当てる。全体を通して、次のパラメータを固

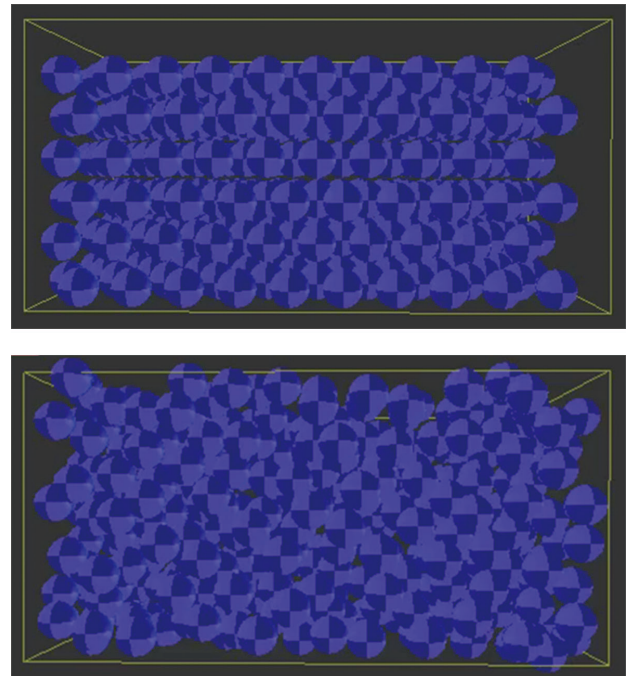


図2 x-y平面側から見た、粉体の初期配置。上図は六方最密充填構造に相当する「幾何学的配置」、下図は「ランダム配置」の例を表す。

Fig. 2 Initial arrangement of the grains as seen from the x-y plane. The upper figure shows an example of “geometric arrangement” like a crystal (hexagonal close-packed), and the lower figure shows an example of “random arrangement”.

定値とする：ヤング率 10^7 [Pa], ポアソン比0.25. 数値計算の高速化のため, ヤング率を一般的な岩石のバルクの値よりも数桁小さく設定している. ヤング率の値は各粉体粒子の弾性変形の度合いを支配するが, 粉体の集団挙動に対しては粒子間の摩擦係数と比べて小さな影響しか与えないと考えられているので (例, Yan *et al.*, 2015), 本稿ではこのような設定を採用する.

結果と議論

まず粉体の初期配置が「幾何学的配置」の場合について, パッキング圧 (100–2000[kPa]) と粒径 (0.12–0.4) を変えながら, 発生するイベントの様式を調べた. 無次元パラメータ I の範囲は, 4.2×10^{-4} – 6.3×10^{-3} である. 摩擦係数は0.6で固定した.

イベントの例を図3(a)–(c)に示す. 定性的な分類ではあるが, 定常せん断方向と平行にせん断面が現れる「間欠的すべり」, 定常せん断方向と斜交したせん断面が雁行上に現れる「リーデルシアー」, 定常せん断方向とほぼ直交した面が複数現れると同時にほぼ全ての粉体が回転する「破壊」の3種イベントが観察された.

一方, 粉体の初期配置を「ランダム配置」として同様の実験を行った場合, 上記3種のイベントのうち「リーデルシアー」や「破壊」が生じたパラメータであっても「間欠的すべり」が生じる傾向にあった. 結果の例を図3(d)に示す. なお, せん断面の発達に伴い, 複数回のせん断応力降下 (高速すべり) イベントが発生している.

粉体の集団挙動が初期条件に対して敏感であることはよく知られているが, 本結果からも, イベントの発生様式自体が初期配置に左右されることが確認できた.

次に, 「ランダム配置」からの「間欠的すべり」に焦点を当て, 粉体間の摩擦係数 (0.03–0.8) が粉体間のミクロスコピックなすべり速度に与える影響を, パッキング圧 (100–8000[kPa]) を変えながら定量的に調べた. 粒径は0.3で固定した. 無次元パラメータ I の範囲は, 5.3×10^{-4} – 4.7×10^{-3} である. 初期条件が「ランダム配置」のため, シミュレーションを100回試行して, 箱ひげ図の形でまとめる.

図4に結果を示す. 試行ごとのばらつきは大きい, 4種類のパッキング圧のいずれの場合でも, 摩擦係数が極端に小さい場合・大きい場合の双方ですべり速度が増大する傾向が見られた. パッキング圧が100–1000[kPa]では摩擦係数0.4の場合に最大すべり速度がもっとも抑制され (図4(a), (b)), パッキング圧が4000–8000[kPa]では摩擦係数0.2の場合に最大すべり速度がもっとも抑制された (図4(c), (d)). このように特徴的な摩擦係数の値が現れるという性質は非自明であり, クーロン摩擦や速度・状態依存摩擦則のようなマクロスコピックな経験的摩擦構成則とは本質的に異なった性質となっている. ミクロスコピックな観察からマクロスコピックな現象を議論するような際には, このような本質的違いが内在し得ることを意識する必要があるだろう.

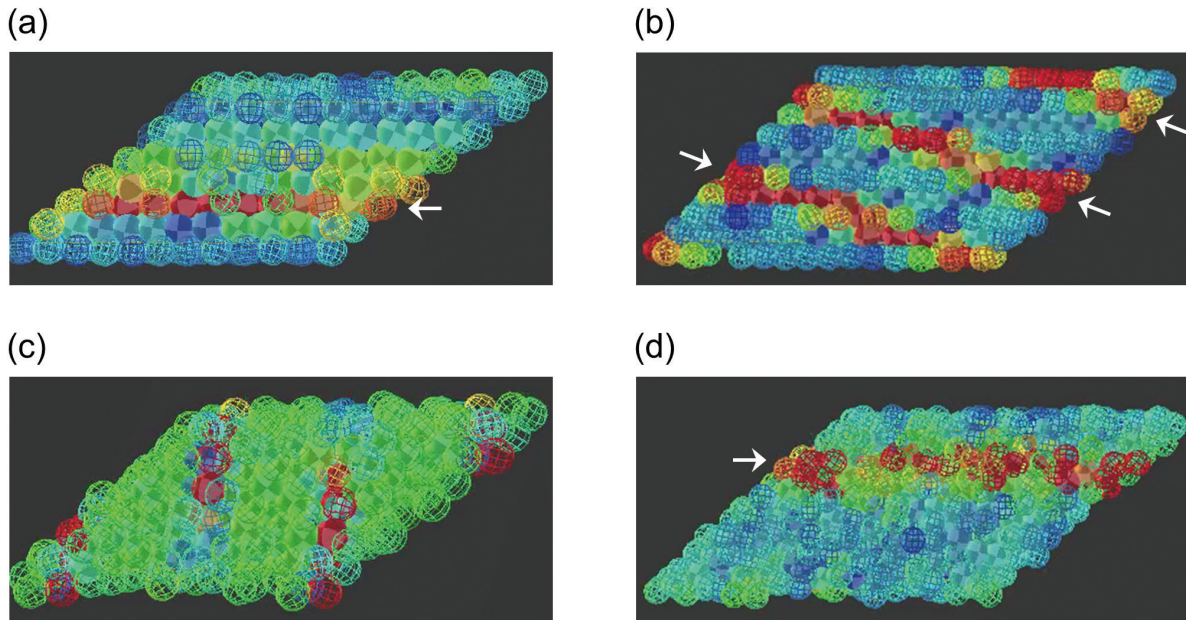


図3 イベント様式の例. 色は各粉体の回転量を表し, 青色→緑色→赤色の順に回転量が大きい. 白矢印は, 各イベント様式で特徴的な領域を表す. (a)「幾何学的配置」における「間欠的すべり」. (b)「幾何学的配置」における「リーデルシアー」. (c)「幾何学的配置」における「破壊」. システム全体として回転している. (d)「ランダム配置」における「間欠的すべり」.

Fig. 3 Examples of event modes. The colors indicate the amount of rotation for each grain: the amount of rotation is greater in the order of blue, green, and red. The white arrows indicate characteristic regions of each event mode. (a) “Intermittent slip” in “geometric arrangement”. (b) “Riedel shear” in “geometric arrangement”. (c) “Fracture” in “geometric arrangement”. The whole system is rotating. (d) “Intermittent slip” in “random arrangement”.

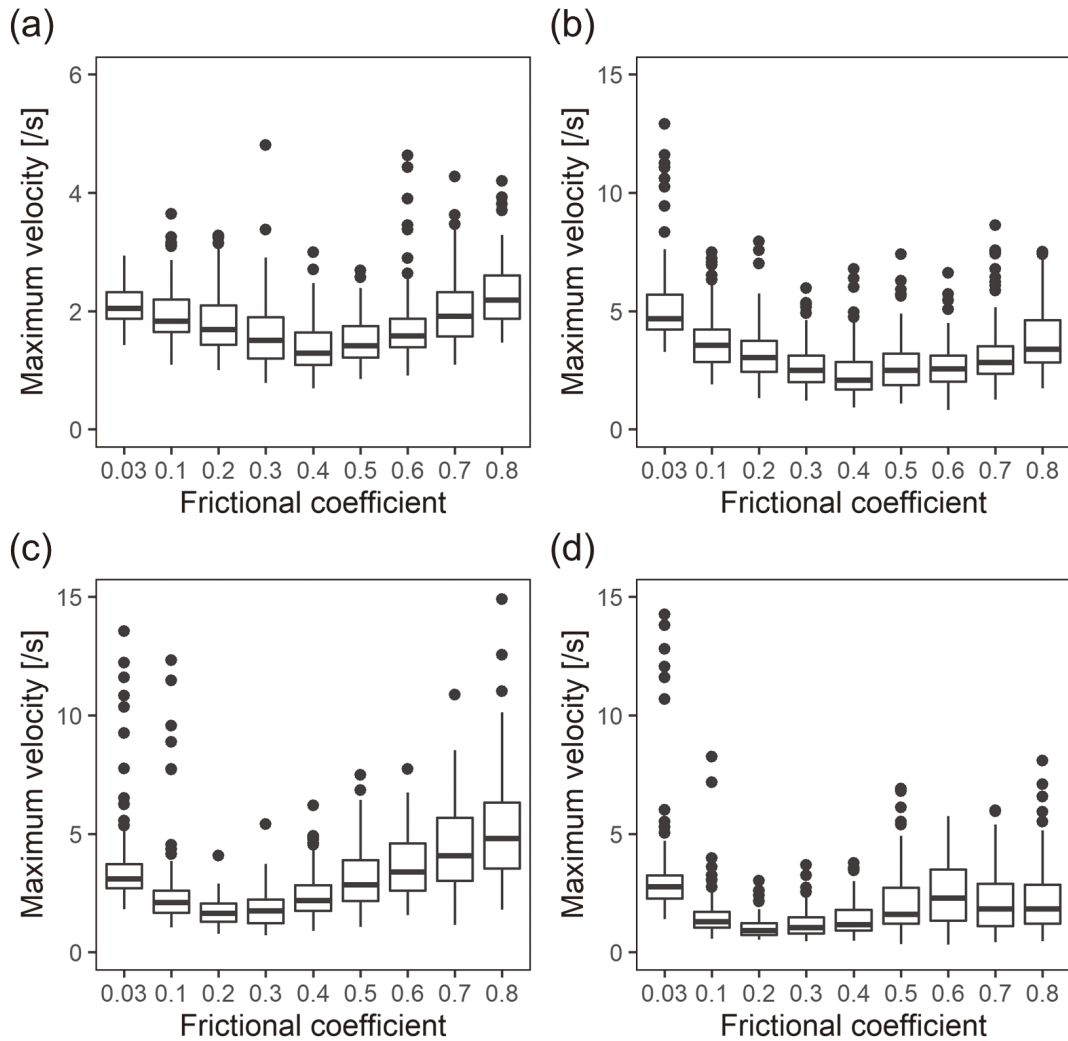


図4 「ランダム配置」の初期条件下で発生する「間欠的すべり」中の最大すべり速度の摩擦係数への依存性。長さスケールが無次元になっていることに注意。100回の試行結果を箱ひげ図で表す。箱ひげ図の黒点は外れ値（[第3四分位数+1.5*IQR]より大きい、もしくは、[第1四分位数-1.5*IQR]より小さい）を表す。(a) パッキング圧が100[kPa]の場合。(b) パッキング圧が1000[kPa]の場合。(c) パッキング圧が4000[kPa]の場合。(d) パッキング圧が8000[kPa]の場合。

Fig. 4 Dependence of maximum slip velocity on frictional coefficient during “intermittent slip” under “random arrangement”. Note that the length scale is dimensionless. Results of 100 trials are shown in the boxplots. The black dots in the boxplots represent outliers (greater than [third quartile + 1.5*IQR] or less than [first quartile - 1.5*IQR]). (a) When the packing pressure is 100 [kPa]. (b) When the packing pressure is 1000 [kPa]. (c) When the packing pressure is 4000 [kPa]. (d) When the packing pressure is 8000 [kPa].

まとめ

3次元個別要素法シミュレーションに基づき、粉体のせん断挙動を模擬した数値実験を行った。発生するイベントの様式が粉体の初期配置に左右されること、および、ミクロスコピックなイベントすべり速度が粉体間の摩擦係数と単純に相関しているわけではなく、すべり速度が極小値を持つ特徴的な摩擦係数が現れることを示した。

謝辞

本論文は、静岡大学総合科学技術研究科に提出した第1著者の修士論文（大庭, 2021MS）の内容の一部を再構成したものです。生田領野氏、田阪美樹氏、北村晃寿氏

（静岡大学）からは、原稿を改善するために有益なコメントをいただきました。英文に関しては、Julien Legrand氏（静岡大学）に校閲いただきました。これらの方に感謝いたします。

引用文献

- Abe S. & Mair K. (2005), Grain fracture in 3D numerical simulations of granular shear. *Geophysical Research Letters*, **32**, L05305.
- Aharonov E. & Sparks D. (2004), Stick-slip motion in simulated granular layers. *Journal of Geophysical Research*, **109**, B09306.

- Albert I., Tegzes P., Albert R., Sample J. G., Barabasi A. L., Vicsek T., Kahng B. & Schiffer P. (2001), Stick-slip fluctuations in granular drag. *Physical Review E*, **64**, 031307.
- Chareyre B. & Villard P. (2005), Dynamic spar elements and discrete element methods in two dimensions for the modeling of soil-inclusion problems. *Journal of Engineering Mechanics*, **131**, 689–698.
- Cundall P. A. & Strack O. D. L. (1979), A distinct element model for granular assemblies. *Geotechnique*, **29**, 47–65.
- Engelder J. T. (1974), Cataclasis and the generation of fault gouge. *Bulletin of the Geological Society of America*, **85**, 1515–1522.
- GDR MiDi (2004), On dense granular flows. *The European Physical Journal E*, **14**, 341–365.
- 井出 哲 (2017), 絵でわかる地震の科学. 講談社, 192p.
- Jop P., Forterre Y. & Pouliquen O. (2006), A constitutive law for dense granular flows. *Nature*, **441**, 727–730.
- Kuwano O., Ando R. & Hatano T. (2013), Crossover from negative to positive shear rate dependence in granular friction. *Geophysical Research Letters*, **40**, 1295–1299.
- 御手洗菜美子 (2009), 流れる粉体. 物性研究, **91**, 371–401.
- Morgan J. K. & Boettcher M. S. (1999), Numerical simulations of granular shear zones using the distinct element method I. Shear zone kinematics and the micromechanics of localization. *Journal of Geophysical Research*, **104**, 2703–2719.
- Nasuno S., Kudrolli A., Bak A. & Gollub J. P. (1998), Time-resolved studies of stick-slip friction in sheared granular layers. *Physical Review E*, **58**, 2161–2170.
- 大庭伸一 (2021MS), 地震素過程としての粉体せん断のスティック・スリップ的挙動. 静岡大学総合科学技術研究科修士論文, 55p.
- Scholz C. H. (2002), The mechanics of earthquakes and faulting. 2nd ed., Cambridge University Press, 471pp.
- Smilauer V., Catalano E., Chareyre B., Dorofeenko S., Duriez J., Dyck N., Elias J., Er B., Eulitz A., Gladky A., Guo N., Jakob C., Kneib F., Kozicki J., Marzougui D., Maurin R., Modenese C., Scholtes L., Sibille L., Stransky J., Sweijen T., Thoeni K. & Yuan C. (2015), Yade documentation. 2nd ed., The Yade Project.
- Yan Z., Wilkinson S. K., Stitt E. H. & Marigo M. (2015), Discrete element modelling (DEM) input parameters: understanding their impact on model predictions using statistical analysis. *Computational Particle Mechanics*, **2**, 283–299.