# 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<sup>1</sup>•三井雄太<sup>2</sup>

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

Shin'ichi Oba<sup>1</sup> and Yuta Mitsui<sup>2</sup>

**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,摩擦溶融,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

<sup>2021</sup>年3月26日受付 2021年5月17日受理.

Received: 26 March 2021 Accepted: 17 May 2021

<sup>1</sup>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

<sup>2</sup>静岡大学理学部地球科学科

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>Graduate School of Science and Technology, Shizuoka University, 836 Ohya, Suruga-ku, Shizuoka, 422-8529 Japan

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup>Department 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 いる.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4×2×2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<sup>γ</sup>, 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.  $I = T_p/T_y$ 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,  $T_y=1/y$ 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ミクロス コピックな間欠的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<sup>7</sup>[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、 $4.2 \times 10^{-4}$ - $6.3 \times 10^{-3}$ 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、  $5.3 \times 10^{-4}$ -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が,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), Stickslip 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 1. 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), Timeresolved 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.