

粉体層における断層のシミュレーション

京都大学大学院人間環境学研究科 矢島 尚登¹

1 はじめに

粉体はそのさまざまな興味深い振舞いから古くから研究されてきた。ファラデーやレイノルズが粉体に興味をもって研究していたことは文献からうかがいしれる [1][2]。粉体のさまざまな現象は近年実験やシミュレーションであきらかにされてきたがその背後にある物理法則はまだ抽出できていない。粉体は場合によって固体的であったり流体的であったりする。理論的なアプローチとしてはいまのところ固体的な振舞いをするときの静力学と、流体的な振舞いをするときの動力学をわけて、それぞれを個別に考えていくというのが主流である (静力学 [3], 動力学 [4])。静力学のほうでは最近砂山の中の応力分布が問題になっている。砂山の中の応力は一般に砂山の積み方によってかわってくるが、面白いのは一点から砂を降らせてつくった砂山の下の圧力は頂点下で極小になるのである。静力学のほうはこの砂山問題が決起になって研究が進み問題点が整理されてきた [3]。一方動力学のほうはいまだ現象論の域をでていない。いまのところ粉体らしい現象を個々に調べていき、将来それぞれの現象に共通する『何か』をみつける第一歩とするのがよいように思われる。

この研究報告は奈良女の手谷、狐崎の粉体の実験 [5] に対応する現象にに対してコンピュータシミュレーションを行い粉体内部の様子を調べたものである。実験の状況を簡単に説明する (図 1)。粉体を底がすばまった V の字型の容器にいれ、V の字の角度を大きくするように壁を開いていくと粉体の表面に縞模様ができる。粉体内部の動きがわかるように粉体に色を付けておこなった実験結果 [5] をみると、壁を開いていくにつれほぼ壁にそって断層ができ、その断層が表面に縞模様としてあらわれていることがわかる。この実験の現象は動力学の観点から興味深い。というのもこの実験の現象が粉体特有の断層ができる現象であり、将来粉体の動力学を考える上で (静力学の方の砂山の様に) 一つの材料になりうる現象であるからである。

以下では実験に対応するシミュレーション結果をしょうかいする。

2 シミュレーション法

粉体をシミュレーションする標準的な方法として DEM がある。ここではそれにならって DEM をもちいる [6]。シミュレーションで使ったパラメータの値は、バネ定数が法線方向、

¹E-mail: naoto@yuragi.jinkan.kyoto-u.ac.jp

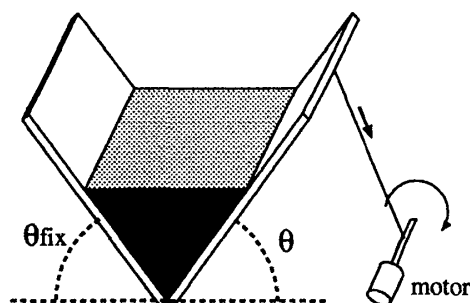


図 1: 実験の模式図 [5]

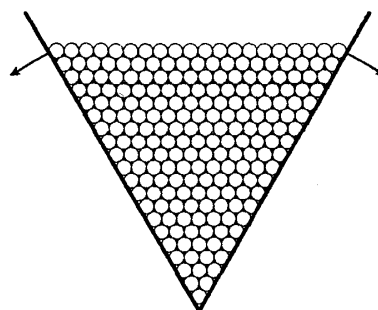


図 2: 初期状態。図では表面に 20 個の粒子が並んでいる。以下のシミュレーションではこの 10 倍の大きさのものをあつかう。

接線方向それぞれ $k_n = 1 \times 10^5 mgd^{-1}$ 、 $k_t = 1 \times 10^4 mgd^{-1}$ 、粘性係数が法線方向、接線方向それぞれ $\mu_n = 1 \times 10^3 (mg/d)^{1/2}$ 、 $\mu_t = 1 \times 10^2 (mg/d)^{1/2}$ 。 m 、 d 、 g はそれぞれ粒子の質量、粒径、重力加速度である。摩擦係数は 0.5。1 タイムステップは $1 \times 10^{-4} (d/g)^{1/2}$ 。粒子と壁の相互作用は粒子同士と同じにしてある。

シミュレーションの状況を説明する。シミュレーションは 2 次元でおこなう。初期状態として 60 度ひらいた V の字型の壁の間に粒径一定の粒子を最密につめてある (図 2)。その状態である程度時間をおき平均の速度が $10^{-8} (dg)^{1/2}$ 程度になるまで緩和させる。その後、両方の壁を一定の速度で開いていく。実験では片方の壁しか動かしていないがシミュレーションでは左右対称に壁を動かす。全体の大きさは粉体表面に 200 個の粒子が並ぶ大きさにしてある。粒径 0.2mm の粉体をシミュレーションしているとするとき表面の幅は 4cm に対応する。壁の速さは 12.5 度/秒である。

3 シミュレーション結果

シミュレーション結果を図 3～6 にしめす。図 3～6 はそれぞれ両側の壁を 1° 、 2° 、 4° 、 8° 傾けたときの様子である。 1° 傾けたときにはすでに両壁にそって滑べ線が何本か形成されており、その後それらの滑べ線が成長していつている様子がみてとれる。滑べり線の間隔は中心にいくほど密になっている傾向があり、実験と対応する。

図 7 は粒子の回転の様子を表したものである。図 7 をみると滑べり線上で粒子の回転が大きくなっているのがわかる。回転の方向まで考慮にいれると、滑べり線上で大きく回転している粒子はベアリングの役割をしていることがわかる。滑べり線上の粒子が大きく回転してベアリングのような役割をすることは粉体圧縮の断層のシミュレーション [7, 8] でも確認されている。

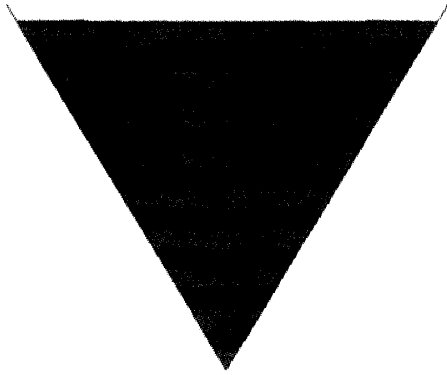


図 3: 1 度傾けたときの様子。

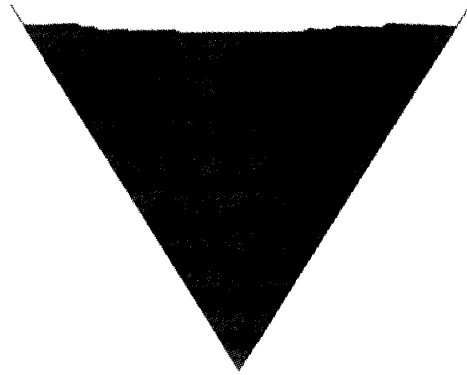


図 4: 2 度傾けたときの様子。

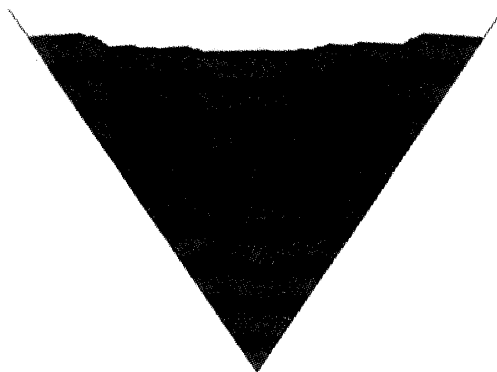


図 5: 4 度傾けたときの様子。

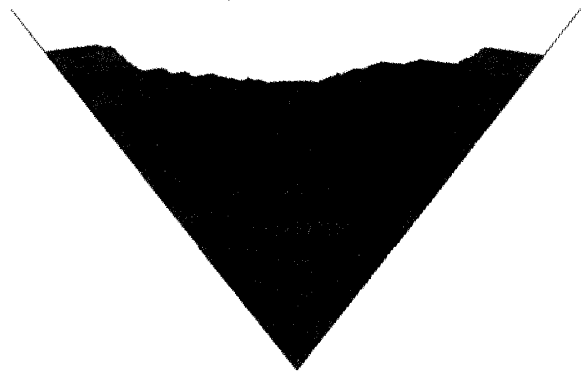


図 6: 8 度傾けたときの様子。

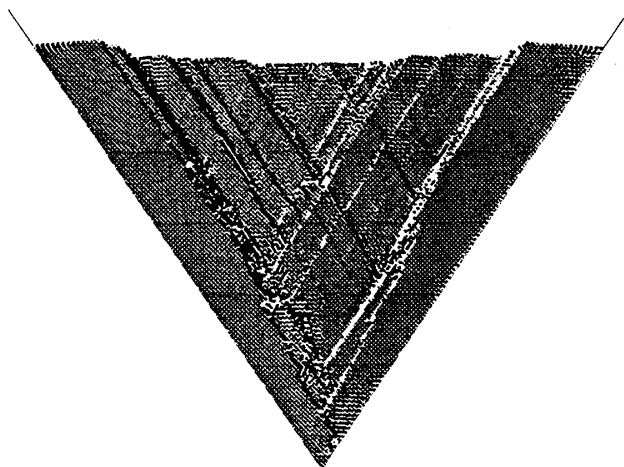


図 7: 粒子の回転の様子. 時計回りに 30 度以上回転した粒子は白。反時計回りに 30 度以上回転した粒子は黒。その間はグレイスケールで表してある。壁を 4 度傾けたときの様子。

4 まとめと展望

粉体層における断層の実験に対応するシミュレーションをおこなった。シミュレーションは 2 次元で粒径を一定にしている特殊な状況であるが実験の様子と似たものを再現できている。これからの展望としては粉体内部の応力の様子を調べ、壁を傾けていったときにどのように粉体内の応力が変化していくか調べることである。そこから粉体の動力学に関する知見がいくらかでも得られたらよいと思っている。

参考文献

- [1] M.Faraday,Phil.Trans.R.Soc.London.**52** (1831), 299.
- [2] O.Reynolds,Phil.Mag.S.5.**20** (1885), 469.
- [3] P.G.de Gennes,Physica A.**261** (1998), 267.
- [4] Leo P.Kadanoff,Rev.Mod.Phys.**71**(1999), 435.
- [5] S.Kitsune,A.Kurumatani,*to be published*.
- [6] 粉体工学会編, 粉体シミュレーション入門 第 3 章 (産業図書 1998).
- [7] K.Iwashita,M.Oda,J.Eng.Mech.**124**(1998), 285.
- [8] J.A.Åström,H.J.Herrmann,J.Timonen, Phys.Rev.Lett.**84**(2000),638.