

バルハン砂丘帯の形成ダイナミクス

大阪大学大学院理学研究科・大阪大学サイバーメディアセンター 勝木 厚成

(Atsunari Katsuki)

Cybermedia Center・Graduate School of Science, Osaka University

大阪大学サイバーメディアセンター 菊池 誠 (Macoto Kikuchi)

Cybermedia Center, Osaka University

大阪大学大学院理学研究科 遠藤 徳孝 (Noritaka Endo)

Graduate School of Science, Osaka University

1 はじめに

自然界では、構成要素が単純でも、集団で運動すると思いがけない程複雑な振る舞いをする事が多くある。そのひとつの例が粉粒体(砂や砂糖など)である。粉粒体は静止しているときには固体のように振る舞うが、一旦動きだすと流体のように振る舞うことが知られている。すなわち、固体と流体の2つの性質をもっているため、従来のそれぞれの個別の方程式では扱うことが不可能である。その粉粒体の集まりとして地球上でもっともスケールの大きいものが砂丘である。砂丘は砂漠上はもちろんのこと、海底や火星にも存在することが知られている。また砂丘とよく似た形のは雪や火山灰でもつくられており、砂丘の形態は粉粒体と流れがあれば普遍的にみられる形であると考えることができる。砂丘は地球規模の砂漠化問題にも深い関わりがあることはもちろんだが、それ以上に数十m近くある砂丘自身が移動することで、道路やパイプライン、さらには一つの街ですら飲み込んでしまうという直接的かつ緊急的に解決すべき課題がある。この点からも砂丘のダイナミクスを研究することは重要であることがわかる。

また、砂丘というものは砂の量や風向きによって様々な形態パターンをとることが知られている。地面を覆う砂の量が少なく、風の方向が一方の時には、バルハン (barchan) と呼ばれる三日月型砂丘が形成される。砂の量が多く、風の方向が一方の時には風と垂直方向に峰が並ぶ横列砂丘 (transverse dune) が形成される。他にも、砂の量が少なく、一年を通して風の吹く方向が2方向の時には縦列砂丘 (linear dune)、砂の量が多く風の方向が多方向のときには星型砂丘 (star dune)、植生があるときには放物線型砂丘 (parabolic dune) が形成される。いままで、単独の砂丘に注目した研究は多く行われてきた [1, 2, 3, 4]。しかし、解決されていない問題も数多くある。例えば、どのように流体と粉粒体が相互作用して砂丘を形作るのか? 砂丘の形は移動するとき、どのように維持されているのか? などがあつた。特に、数多くの砂丘同士の相互作用まで考慮したダイナミクス (以下、dune field dynamics) の研究は、ほとんどされてこなかつた [5, 6, 7, 8, 9]。その原因の一つに、ダイナミクスのタイムスケールの遅さがあげられる。そのタイムスケールは、数年から数百年かかり、全過程を観測などでおうことは甚だ困難である。

その解決方法の一つが実験である。いままで、風と砂を使った実験では、砂丘を形成することに成功していなかつたが、水と砂を使った実験 (水槽実験) では成功例が報告されている [10, 11, 12]。その水槽実験でのタイムスケールは、砂漠上の1/100以下になり、

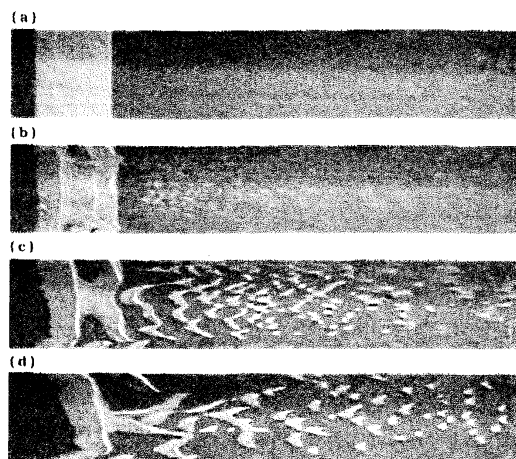


図 1: 図1 水槽中での Dune field の時間発展。(a) 0 秒、(b) 180 秒後、(c) 480 秒後、(d) 1140 秒後

砂丘のダイナミクスの全過程を観測することが可能になる。そこで、この水槽実験を用いて Dune field のダイナミクスを研究することにする。

2 実験

実験装置として、長さが10m、幅0.2m、深さ0.5mの水槽を用いた。水の深さは13.5cmで、流速は23cm/s（底から1cmの高さの場所）を保っている。使う砂の粒径は80–100 μm である。初期条件として、長さ15cm、幅20cmの砂床を長方形になるように敷いた。

水流を流し、実験を始めると2段階の形態的変化がみられた(図1)。まず、砂床表面上で不安定が成長し、横列砂丘があらわれた。その後、横列砂丘の一部が崩れ、バルハン砂丘が現れた。このような風上側に横列砂丘があり、風下側にバルハン砂丘がある Dune field は、実際の砂漠や振動流下での水槽実験でも観測されており、このタイプのバルハン出現は砂漠上でも起こっていると考えることができる。

3 数値モデル

なぜこのような砂丘パターンの変化がおきるのかを調べるのに、数値シミュレーションは有用である。だが、従来からある数値モデルでは計算コストがかかりすぎるために Dune field のような大規模な系を計算することができなかった。そこで今回、計算コストを大幅に減らすのに成功したモデル [13] を使い、Dune field のシミュレーションを行った。まず、地面空間を2次元格子 (x, y) で組み、それぞれの格子には高さという連続変数 $h(x, y, t)$ を定義した。ここで、 x 、 y 、 t は離散変数である。それぞれの格子のサイズは砂粒より十分に大きく、砂粒が飛ぶというより、砂の塊が飛ぶというイメージになる。この考えによ

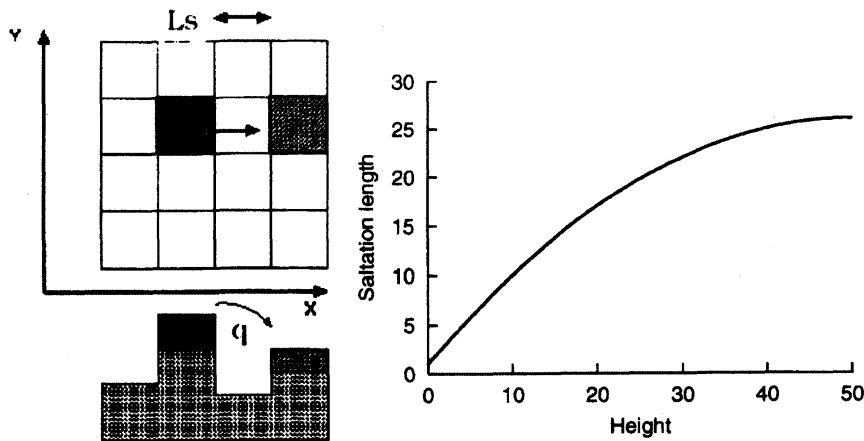


図 2: 図 2 左図 : Saltation の概念図、右図 : Saltation 距離と砂丘高さの関係

り、砂粒一つ一つを計算するより格段に計算スピードを上げることができる。現実的な砂の移動は様々な要素（砂の粒径や形、飛砂、砂の転がり、雪崩、流れの強さ、境界層の剥離、渦、湿度、植生など）によって決まってくるが、今回使用するモデルでは、計算を簡単化するために、砂丘を構成するのに最も重要な働きをする2つのプロセス (Saltation[飛砂]と Avalanche[雪崩]) だけを考慮する。Saltation は流れによって砂が運ばれるプロセス (図 2 左図) で、砂の飛ぶ距離 L_S は、今回のモデルでは以下のように定義する。

$$L_S = a + bh(x, y, t) - ch^2(x, y, t). \quad (1)$$

ここで、 a, b, c は現象論的パラメータで $a=1.0$ 、 $b=1.0$ 、 $c=0.01$ とした。Equation (1) は高さが高くなるほど遠くまで飛ぶが、飛ぶ距離には限界があるという意味である (図 2 右図)。また、シミュレーション中で、Equation (1) は増加関数の領域だけを使用することにする。さらに、砂丘の風下斜面では流れの剥離のために渦ができ Saltation が起きないという観測事実を考慮して、Saltation は砂丘の風上部分だけで起きるとする。毎タイムステップで、Saltation 量 q (このモデルでは $q = 0.1$ と固定) は格子 (x, y) から格子 $(x + L_S, y)$ に飛ぶ。それぞれの格子での高さは、飛んでいく格子での砂量が $h(x, y) \rightarrow h(x, y) - q$ となり、砂の着地点では、 $h(x + L_S, y) \rightarrow h(x + L_S, y) + q$ となる。一方、もう一つのプロセス Avalanche (雪崩) とは、安息角 (the angle of repose) を越えると、安息角以下になるまで最も急峻な方向に砂が移動するプロセスである。ここで、砂の安息角は 34° を使っている。高さのスケールと格子の長さスケールは安息角を通してだけ対応関係がつかうことがすぐにわかる。実際の simulation ではまず Saltation で砂を飛ばし、次に Avalanche を起こし、それが落ち着くまで何度も繰り返す。そして落ち着いてからまた Saltation で砂を飛ばす。ここで注意しないといけないのは、実験では Avalanche が落ち着く前に Saltation が起きているかもしれないということである。しかし、Saltation と Avalanche の起こるタイムスケールは現時点では、よく分からないので、今回は上記のようにする。今後この調査は必要である。

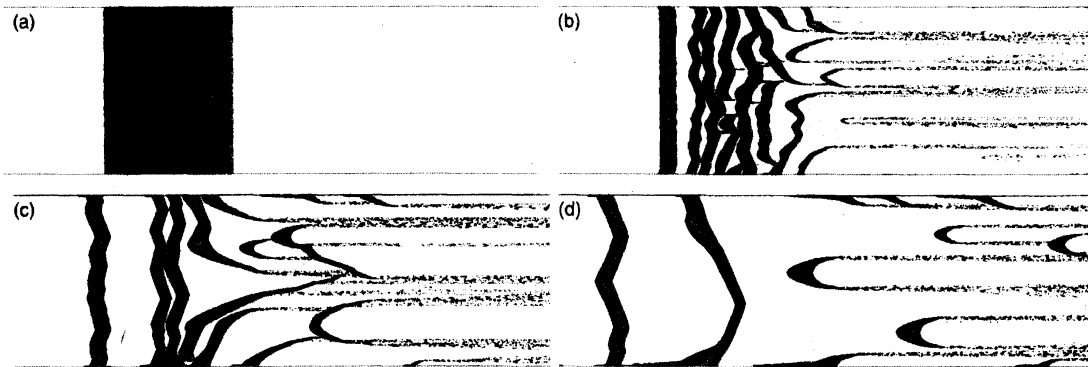


図3: 値シミュレーションでの Dune field の時間発展。重心座標は固定してある。(a) 0 タイムステップ、(b) 4000 タイムステップ後、(c) 15000 タイムステップ後、(d) 45000 タイムステップ後。シミュレーションフィールドの大きさとしては 1400 (流れ方向) × 400 (流れと垂直方向) 格子を用いた。

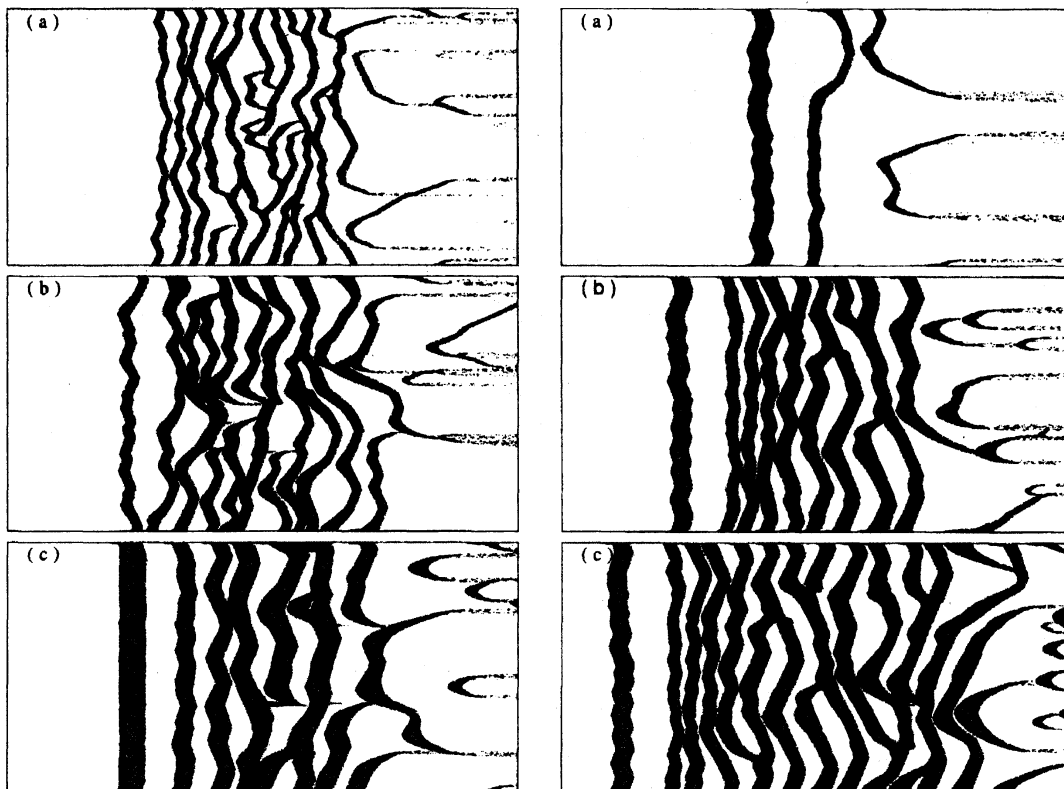


図5 横列砂丘のサイズへの砂床深さ D_0 の依存性。縦幅 $L_0 = 512$ とタイムステップ $t = 10000$ は固定。(a) $D_0 = 1.0$ 、(b) $D_0 = 2.0$ 、(c) $D_0 = 4.0$

図6 横列砂丘のサイズへの砂床縦幅 L_0 の依存性。縦幅 $D_0 = 3.0$ とタイムステップ $t = 10000$ は固定。(a) $L_0 = 128$ 、(b) $L_0 = 512$ 、(c) $L_0 = 768$

4 数値シミュレーション結果

シミュレーションフィールドの境界条件は流れ方向には自由境界条件、流れ方向と垂直方向には実験と同じセットアップにするために固定境界条件を使った。また、上流からの砂の流入は無しとした。シミュレーションフィールドの大きさとしては1400（流れ方向）×400（流れと垂直方向）格子を用いた。

初期条件として、砂床の深さ $h(x, y, 0) = D_0 = 4$ 、縦幅（流れ方向） $L_0 = 200$ 、横幅（流れと垂直方向） $W_0 = 400$ にした。この条件のもとで、シミュレーションを始めると、砂床で不安定性が成長し、横列砂丘が現れた。しばらくすると、横列砂丘の一部が崩れ、そこからバルハンが生まれた。この振る舞いは、実験と非常に良く似ており、マクロな Dune field のダイナミクスは Saltation と Avalanche だけで再現できることがわかった（図4）。

次に、初期条件の砂床の深さ D_0 と縦幅 L_0 を変えてみた。以下、シミュレーションフィールドの大きさとして、1024（流れ方向）×512（流れと垂直方向）格子を用いた。すると、 D_0 が浅くなると、横列砂丘は細くなり（図5）、 L_0 を大きくすると横列砂丘の縦幅は大きく変化せずに、砂丘の数だけが増えることがわかった（図6）。このことから、横列砂丘は砂床の初期深さに依存する特徴的長さが存在することがわかる。

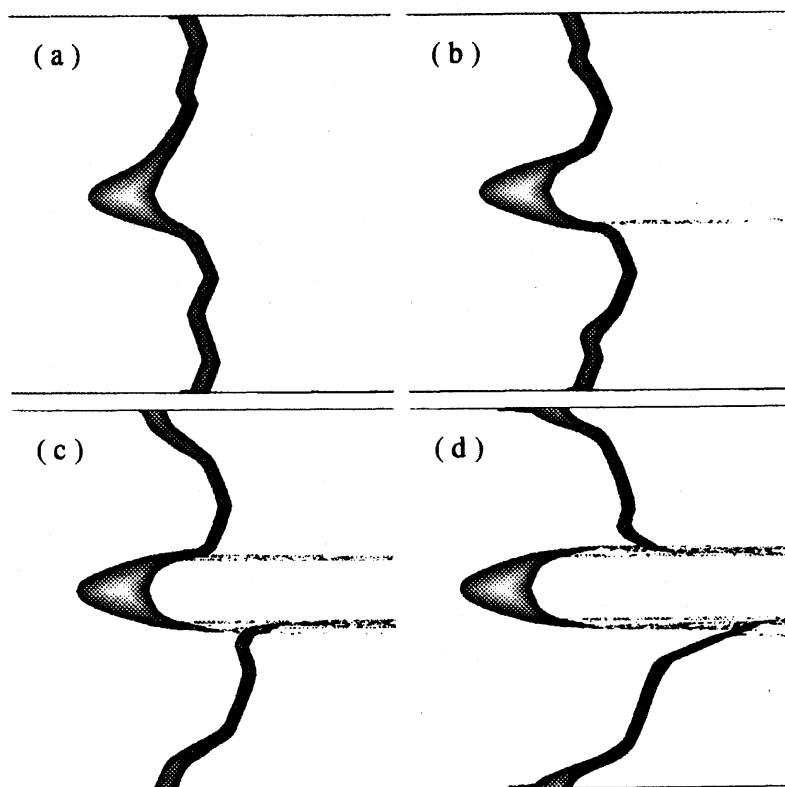


図7 バルハンが横列砂丘から出現する前に、砂の一部が横列砂丘からにげだす。

さらに、バルハンがどのように生成するかを理解するために、砂の輸送を詳細に見た。すると、バルハンが出現する前には、砂の一部が横列砂丘から逃げていくのがわかった（図7）。ただ、砂が逃げたからといって、いつもバルハンができるわけではないが（砂の逃げ

が起こって横列砂丘が崩れそうになるが、結局は安定してしまう場合もある)、砂の逃げは砂漠でバルハンの出現の前兆とみなすことができ、そのダイナミクスを観測したい研究者にとっては有益だと考えられる。

5 結論

われわれは一方向流の水槽実験で Dune field のダイナミクスを調べ、その振る舞いを計算機シミュレーションを用いて再現することに成功した。そのモデルは複雑な流体効果を含まない Saltaion と Avalanch という 2 つだけのプロセスから構成されている。言い換えると、Dune field のマクロなダイナミクスは Saltaion と Avalanch が重要なプロセスであるといえる。また、実験とシミュレーションから、一方向流のもとで、砂床から横列砂丘が出現し、その横列砂丘が崩れてバルハンが生成することがわかった。

参考文献

- [1] R. A. Bagnold : *The Physics of Blown Sand and Desert Dunes* (Methuen, London, 1941).
- [2] K. Pye and H. Tsoar: *Aeolian Sand and Sand Dunes* (Unwin Hyman, London, 1990).
- [3] R. Cooke, A. Warren and A. Goudie : *Desert geomorphology* (UCL Press , London, 1993)
- [4] N. Lancaster : *Geomorphology of Desert Dunes* (Routledge, London, 1995)
- [5] B. T. Werner : *Geology* **23** (1995) 1107.
- [6] H. Nishimori, M. Yamasaki and K. H. Andersen : *J. Mod. Phys. B* **12** (1998) 256.
- [7] A. R. Lima, G. Sauermann, H. J. Herrmann and K. Kroy : *Physica A* **310** (2002) 487.
- [8] V. Schwämmle and H. J. Herrmann : *Nature* **426** (2003) 619.
- [9] P. Hersen, K. H. Andersen, H. Elbelrhiti, B. Andreotti, P. Claudin and S. Douady : *Phys. Rev. E* **69** (2004) 011304.
- [10] Y. Niño and M. Barahona : *Proc. Int. Assoc. Hydraul. Res.* **27B** (1997) 1037.
- [11] P. Hersen, S. Douady and B. Andreotti : *Phys. Rev. Lett.* **89** (2002) 264301.
- [12] N. Endo, H. Kubo and T. Sunamura: *Earth Surf. Processes Landforms* **29** (2004) 31.
- [13] A. Katsuki, H. Nishimori, N. Endo and K. Taniguchi: preprint (cond-mat/0403312)