

Sand flux による砂丘移動の操作

ERATO 複雑系生命プロジェクト 勝木 厚成 (Atsunari Katsuki)

ERATO (JST)

大阪大学サイバーメディアセンター、大阪大学大学院理学研究科 菊池 誠

(Macoto Kikuchi)

Cybermedia Center, 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、風の方向が一方向の時には、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、風の方向が一方向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。

これから、砂丘の中でも最もシンプルなものと考えられているバルハンに注目して議論をしていく。バルハンは風下方向に角を向けた三日月型の砂丘で、その形態を保ちながら風下方向に移動していく。そして、その移動速度は高さに反比例することが観測から示されている。つまり、小さいバルハンほど速く移動することを意味している。いままで、単独のバルハンに注目した研究は多く行われてきたが [1, 2, 3, 4]、実際の砂漠上では、単独ではなく集団で存在していることが知られている。近年になり、バルハン集団のダイナミクスに注目が集まり、いくつかの研究がなされてきた [5, 6, 7, 8]。特に、バルハンの衝突現象 (直接相互作用) は、砂漠上で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ったが、計算機の発達や実験技術の向上により、研究が飛躍的に進んだ。Schwämmle *et al.* は、バルハンが衝突したとき、質量比によっては、バルハンがソリトンのような振る舞うことがあることを計算機シミュレーションによって示した [9]。また、Katsuki *et al.* [10] と Endo *et al.* [11] は衝突現象を計算機シミュレーションと水槽実験によって調べ、砂丘衝突の現象論方程式を導いた。これらの研究は主に砂丘の直接相互作用としての衝突現象をみてきた。一方で、バルハン間の相互作用として、間接相互作用とい

うものが考えられる。バルハンはホーンの先から砂を排出することが知られている。その砂は量としては少ないかもしれないが、風下側に別のバルハンがあれば、そこにはなんらかの相互作用があると考えられる。そこで、今回我々は砂丘間の間接的相互作用によってどのようなことが起こるかを調べていく。

2 数値モデル

砂丘は、風と粉粒体の相互作用によって形成される。それぞれのダイナミクスを数値シミュレーションで詳細に扱うことは、計算コストがかかりすぎるために容易ではない。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 [10, 12] を使い、数値シミュレーションをおこなった。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。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く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 が起こっ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。

3 数値シミュレーション結果

これから、数値シミュレーションを用いてバルハン間の間接相互作用を議論していく。バルハンは角の先から砂を排出して、その砂によって風下のバルハンに影響をあたえる。バルハンの形状プロファイルは、周りの環境に合わせて刻一刻と変化していく。例えば、風上からの砂の供給がなければ、バルハンは小さくなり、角の位置や排出する砂の量も変わってくる。そのため、バルハン間の間接相互作用によって起こることを明確に示すためには、環境を固定する必要がある。そこで、今回の研究では、風上のバルハンの大きさは一定と仮定することで、そのホーンの先端の位置を固定し、さらに、その場所を点状の砂の供給源とみなして議論をしていく。ここで、シミュレーションフィールドの風方向の座標を x 、垂直方向の座標を y とする。また、供給源からでてくる砂の供給量を $\phi(y)$ とする

3.1 バルハンの生成

風下のバルハンがない場合に、供給源から排出する砂の量を変えてみた。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) $\times$ 128 (流れと垂直方向) 格子を用いた。砂の量が少ない場合 ($\phi = 1.0$)、砂は風に飛ばされてなにも起きない。砂の量が多い場合 ($\phi = 6.0$)、いくつかの場所で砂は堆積をし始め、そこを起点にしてバルハンが形成される。バルハンは風上からくる砂の供給を受けながら、だんだんと成長していく。つまり、バルハンのホーンの先端から自然に子バルハンが生成されることがわかった。このように、バルハンのホーンの先端に小さなバルハンの存在は実際の砂漠上でもみることができており、今回の結果はそのようなバルハンの形成過程の解釈につながるものと考えられる。ただし、バルハン同士が衝突した際にも、ホーンの先端から子バルハンがでてくることがあり、その現象との区別をどうつけるかは今のところはっきりしていない。いままで、わずかな凸凹がある砂床や横列砂丘から、バルハンが形成される報告はあったが、バルハンのホーンの先端から、自然にバルハンができていくのは報告されていない。

(a)

(b)

図1 (a) 供給源からの砂の量が少ないとき、バルハンはできない (b) 供給源からの砂が多いとき、バルハンが生成される

3.2 砂丘の大きさの増減

点状の供給源（風上バルハンのホーンの先端）からの砂の供給量を変えたときの風下バルハンの変化をみる（図2）。シミュレーションフィールドの大きさとして200（流れ方向）×200（流れと垂直方向）格子を用いた。砂の供給量が排出量より少ない場合、バルハンは小さくなり、なくなっていく（実線）。砂の供給量が排出量と同じ場合、バルハンの大きさは変化しなかった（破線）。供給量が排出量より多い場合にはバルハンの大きさはだんだんと大きくなっていった（点線）。これは風上のバルハンにより、風下のバルハンの大きさが変化させられることを示している。

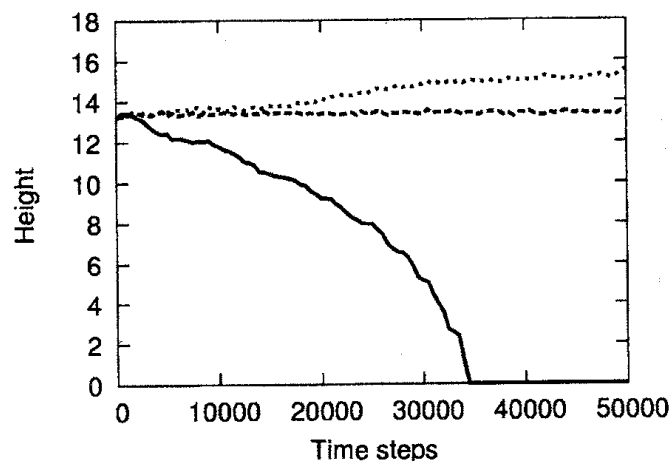


図2 供給源からの砂の量を変化させたときのバルハンの高さの時間発展：供給源からの砂の供給量が排出量より少ないとき、バルハンはだんだんと小さくなり消えてしまう（実線）。供給量と排出量が等しいとき、バルハンの大きさは変わらない（破線）。供給量より排出量が多いとき、バルハンはだんだんと大きくなる（点線）。

3.3 バルハンの横移動

砂の点源をバルハンの（風と平行方向の）中心線からずらして置いて、砂の排出をおこなう。シミュレーションフィールドの大きさとして200（流れ方向）×200（流れと垂直方向）格子を用いた。供給量はシミュレーションフィールドからでた量と同じにする。この条件にすることによって、バルハンの大きさや形状はほとんど変化しないので、上流からの砂の影響によって起こることを明確に捉えることができる。初期条件でのバルハンの横幅を $2L_l$ とし、砂の供給源とバルハンの中心線の距離を δx_l とし、その時間発展を図3に示した。また、初期位置をかえたときの時間発展の図を図4（左図）に示した。すると、バルハンは、初期位置が $\delta x_l = 0.6$ 離れていても、供給源の真下に移動していくことがわかった。このことは、砂漠上でよくみられる、バルハンのホーンの真下に下流のバルハンの先端がくる砂丘パターンが自然にできることを示している。また、供給源の位置を変えていくことで、バルハンの動きを制御できる可能性を示唆している。

ここで、点状の供給源ではなく、バルハンを置いたときにも同じことが起きるかを確かめた。風上バルハンの角の先端の位置から、風下バルハンの中心線をずらししものを初期条件として、シミュレーションをおこなったところ、確かに、風上バルハンのホーンの真下に、風下バルハンの先端がくることがわかった。

次に、この移動のメカニズムを見るために、バルハンの角の先からでてくる砂の排出量を測定した。ただし、簡単のため、以下の解析は点状の供給源の場合でおこなった。左(右)の角から出てくる砂の量を Q_{left} (Q_{right}) とし、その比を

$$Q_{ratio} = \frac{Q_{left}}{Q_{left} + Q_{right}} \quad (2)$$

とした。その結果を図5に示す。左右の角からの排出量はほぼ等しかった。このことは、バルハンが移動するときに、供給源側にある砂丘斜面(シミュレーションでは右側)で砂が堆積し、反対の斜面で砂丘が自然崩壊することで、三日月型を維持しているのではなく、入ってきた砂が砂丘全体に広がることで三日月型を維持していることを示唆する。このとき、供給源のない斜面からの砂はバルハン後方の雪崩面を使って、移動していることが考えられる。また、この砂丘形状の維持は横移動時にもバルハンの中での砂のプロファイルがほとんど変わっていないと考えられる。そこで、バルハンの形状プロファイルは一定とし、供給される砂の量と位置だけでバルハンの横移動の移動速度を評価する。

バルハンの風方向と垂直方向の重心位置を y 、幅を W 、バルハン全体の砂量を V 、幅方向の砂量分布を $f(y)$ 、砂の供給量を $\phi(y)$ とする。横移動の速度は

$$\dot{y} = \frac{V \cdot y + \int_{y-w/2}^{y+w/2} y' \phi(y') f(y') dy'}{V + \int_{y-w/2}^{y+w/2} \phi(y') f(y') dy'} \quad (3)$$

と表すことができる。ここで、 $f(y)$ はシミュレーションで得られた砂分布を使った。初期条件のバルハン位置をシミュレーションで使ったのと同じ値にし、上記の図3(左図)と重ね合わせたところ、よく一致することがわかった(図3(右図))。つまり、バルハンの横方向の移動速度は重心移動の式で表せることがわかった。

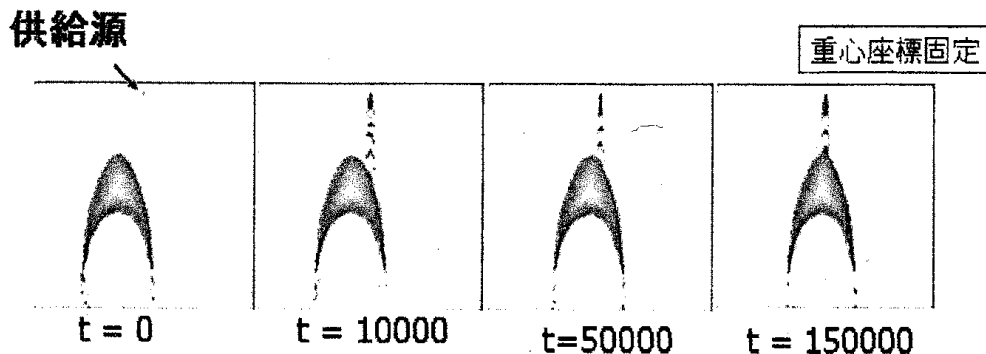


図3 バルハンの横移動の時間発展 ($\delta x_l = 0.6L_l$)

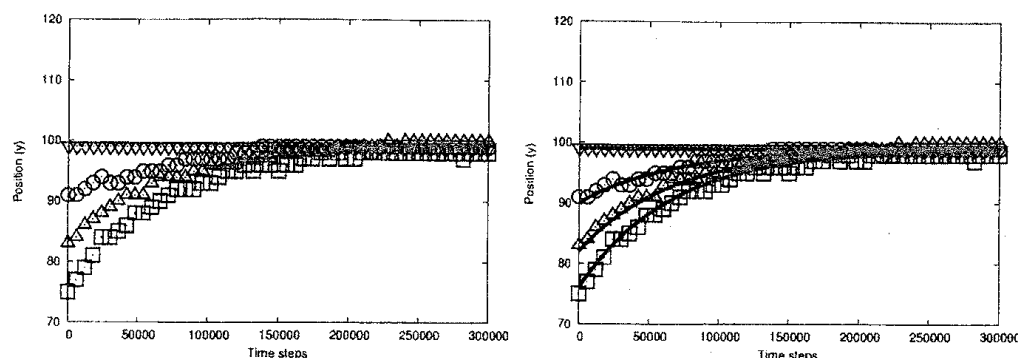


図4 (左図) 初期位置を変えたときのバルハンの(風と垂直方向の)重心座標。 $y=100$ が供給源の位置: $\delta x_l = 0.0$ (∇), $\delta x_l = 0.2L_l$ ($\circ$), $\delta x_l = 0.4L_l$ ($\triangle$), $\delta x_l = 0.6L_l$ ($\square$), バルハンの供給源の真下にくることがわかる。(右図) Equation (3) で計算されたバルハンの(風と垂直方向の)重心座標。数値シミュレーションとよく一致している

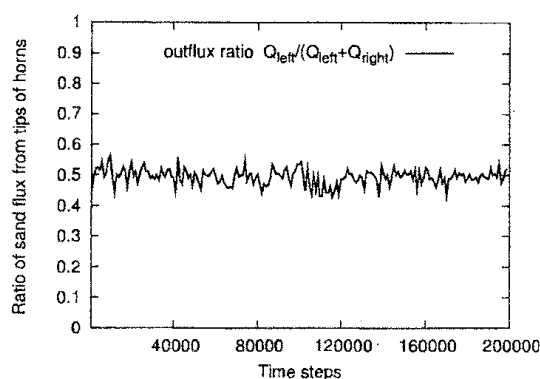


図5 左(右)の角から出てくる砂の量の比 ($\delta x_l = 0.3L_l$): Equation (2)。ほぼ0.5を示していることから左右からでてくる砂の量は等しいことがわかる。

4 結論

バルハン(三日月型砂丘)間の間接相互作用によって3タイプの現象がみられることがわかった。(1) バルハンのホーンの先から出る砂によって、子バルハンができる。(2) 風上の砂の状況によって、バルハンの大きさは変わる。(3) バルハンを経上と垂直な方向に移動させることができる。特に、(3)の現象は防災の観点から重要になる。砂漠では、道路や街が砂丘によってのみこまれる砂丘災害がある。もし、その砂丘の位置をずらすことができれば、砂丘災害を回避できるかもしれない。

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] P. Hersen, K. H. Andersen, H. Elbelrhiti, B. Andreotti, P. Claudin and S. Douady :Phys. Rev. E **69** (2004) 011304.
- [9] V. Schwämmle and H. J. Herrmann :Nature **426** (2003) 619.
- [10] A. Katsuki, H. Nishimori, N. Endo and K. Taniguchi :Journal of the Physical Society of Japan **74** (2005) 538.
- [11] N. Endo, K. Taniguchi and A. Katsuki :Geophysical Research Letters **31** (2004) L12503.
- [12] A. Katsuki, M. Kikuchi and N. Endo :Journal of the Physical Society of Japan **74** (2005) 878.