

平成 21 年 3 月 31 日現在

研究種目：基盤研究 (C)

研究期間：2007～2008

課題番号：19549004

研究課題名 (和文) 地形進化の非線形動力学とその応用

研究課題名 (英文) Nonlinear dynamics of geomorphic evolution

研究代表者 勝木 厚成 (KATSUKI ATSUNARI)

日本大学・理工学部・助手

研究者番号：40453914

研究成果の概要：

砂と風の相互作用によって形成される地形の代表的なものに砂丘がある。風が一方に吹き砂の量が少ないという単純な環境条件下ではバルハンとよばれる三日月型砂丘が形成される。三日月型砂丘は孤立するよりも集団で存在することが多い。そこで、砂丘群の動力学を明らかにするために、多数の三日月型砂丘群を計算機上で再現し、その統計的性質を明らかにした。時間経過にしたがって砂丘個体数は減り、個々の砂丘は大きくなる。ただしそのとき小さなバルハンも生成され、砂丘群全体としては対数正規分布に従うことが明らかになった。また、2カ所からの砂の流入があることを仮定し、砂丘群が接触したときの集団分布からも対数正規分布になるように組み替えが起こってくるということが明らかになった。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	2,600,000	0	2,600,000
2008年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,400,000	240,000	3,640,000

研究分野：非線形動力学

科研費の分科・細目：物理学・数理物理・物性基礎

キーワード：格子模型、砂丘、計算機シミュレーション

1. 研究開始当初の背景

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。砂丘は流れと粉粒体の相互作用によって形成されており、砂漠上はもちろんのこと、海底や火星、金星、土星の衛星

タイタンにも存在することが知られている。

また砂丘と類似した形状のも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、それ以上に数十メートル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。これら点からも砂丘の動力学を理解することは重要であることがわかる。

砂丘は砂の量や風向きによって様々な形態をとることが知られている。特に地面を覆う砂の量が少なく、風の方向が一方向の時にできるバルハンと呼ばれる三日月型砂丘は移動性が高く、砂丘災害を引き起こすことから、多くの研究がなされてきた。しかし、バルハンが単独で安定に存在すると信じられていたことや、相互作用のタイムスケールが数十年と長く全過程を観測することができないこと、数値計算の際の多大な計算コストの問題から、砂丘間の相互作用の研究は少なかった。

そこで、本研究者は過去に砂丘形成の素過程である飛砂となだれという過程を単純化することによって計算コストを大幅に削減し、バルハン砂丘衝突過程を再現する二次元数値モデルを構成するとともに、一次元衝突をモデル化した3変数力学系を構成した。またこの3変数力学系に関しての理論解析をおこなった。さらに、一方向流での水底バルハン砂丘の衝突実験を実現した。ここでおこなわれた研究の手法によって、これまでの砂丘群研究の問題点としてあげられてきた観測での砂丘ダイナミクスのタイムスケールの長さや大規模観測の困難さ、数値計算での砂丘群を調べるための多大な計算コスト、理論での砂丘の内部ダイナミクスを考慮した相互作用ダイナミクスの欠如は、それぞれ水槽実験と砂丘のミニマムモデルを用いることによって克服することがわかった。そこで、上記手法を用いて砂丘群の動力学を明らかにしていく。

2. 研究の目的

流れと粉粒体によって形成される大規模地形の進化動力学を理解するために、対象として砂丘に注目し、その集団のダイナミクスを明らかにしていく。砂丘は常に角の先から砂を排出しているために、上流からの砂の供給が無いと消滅し、砂の供給が有ると砂丘は成長していく。また、砂の量が多いと徐々に砂は堆積し砂丘が新しく生まれる。従って、できた砂丘群内の砂丘の個数や位置は常に変動することが考えられる。個々の砂丘を粗視化してみると、排出された砂は他の砂丘に供給され、それが複雑なネットワーク構造を組んでいると考えることができる。この砂丘ネットワークの特徴としては、ノードやパスが内部ダイナミクスをもち、状態が時々

刻々と変化しながら生成、消滅をおこなうことにある。つまり、砂丘は砂、砂丘、砂丘集団という階層構造を有し、砂の供給という非平衡条件の下で、自己組織的に生成、成長、移動、進化、消滅する系と考えることができる。この動的な砂丘集団システムを個々の要素と全体とのダイナミックな相互関係として捉えることで、その構造的特徴や普遍的性質を非平衡統計物理的手法により理解することを目的とし、このダイナミクスを理解する手法の開発を行っていく。特に本研究では、砂丘サイズ分布の時間発展や砂丘群同士の相互作用を明らかにしていく。

3. 研究の方法

多数の砂丘を計算機上で再現するために、各素過程を単純化し計算コストを下げる必要がある。砂丘は風と粉粒体の相互作用によって形成されている。強い風によって地面から砂が巻き上げられた砂はある距離運ばれた後、地面と衝突し、いくつかは堆積するがいくつかは他の砂をはじき飛ばして飛散させる。飛散した砂は風にのり、運ばれ、また他の砂を飛散させる。さらに、堆積した砂の表面角がある一定の角度を超えとなだれがおきる。この流体力学的効果を含んだ飛砂と粉粒体特有のなだれという複雑な過程を繰り返すことによって砂丘は形成される。この現象を再現するためには、砂丘上の乱流の流れ場、流れ場による砂粒の輸送、砂粒の反跳、雪崩を考えなければならず計算コストが高くなってしまう。

そこで過去に考案された現象論的に素過程を単純化した二次元数値モデルを用いて砂丘集団分布の振る舞いを調べていく。モデルでは地面空間を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、計算を単純化するために、砂丘を構成するのに最も重要な働きをする2つのプロセスだけ(飛砂となだれ)を考慮する。飛砂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。この関数形は観測で得られた形を現象論的にモデル化している。また、シミュレーション中では増加関数の領域だけを使用することにする。

一方、もう一つのプロセスであるなだれとは、安息角を越えると、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 θ_r は 34 度を使っている。計算方法は以下のようにした。1. 安息角を越えたセル (x, y) の最近傍セル (x', y') を全てマークする。2. マークしたセル (x', y') のなかで最も高度差(砂の量)のあるセルを (x' nn, y' nn) とする。3. 高度差(砂の量)が安息角になるように砂量 q_A を (x' nn, y' nn) に移動させる。

ここで、

$$q_A = 0.5 (h(x, y, t) - h(x' nn, y' nn, t) - \tan \theta_r). \quad (2)$$

実際の数値計算ではまず格子上の砂を一斉に飛ばし、次になだれを起こし、それが落ちて着くまで何度もくり返す。そしてなだれが落ちて着いてからまた砂を飛ばす。この操作を繰り返すことによって砂丘の時間発展をおこなっていく。過去の研究からこのモデルで形成された単独バルハンの形態スケーリングは、野外観測と同じく高さと同幅が比例すること速度が反比例することがわかっている。また、風と砂による砂丘形態の変化も再現することが分かっている。

この砂丘モデルは、その単純さのために、計算コストを大幅に削減することができ、数台のコンピュータで並列計算をおこなうことにより現実の砂漠に匹敵する砂丘の動きを同時に計算できる。また、砂丘集団の生成は容易で、一様な砂床を敷いておき、そこに流れをつくることによって自己組織的に形成される。

4. 研究成果

上記のモデルを用いて、砂丘群の数値計算をおこなった。上流の一定範囲に常に一定の砂密度 ϕ になるように砂を供給する。すると、バルハンが自己組織的に砂床から形成された。個々のバルハンは他のバルハンと合体、分裂、砂の排出、供給を繰り返しながらバルハン群を形成していく。

そして、再現されたバルハン群内の個々のバルハンの横幅 w を測定した。シミュレーションフィールド上には、バルハン以外にも衝突などによって一時的に三日月型から変形された砂丘も存在する。そこでバルハンを特定する条件として、バルハンの横幅が長さの

80%以上もしくは 120%以下になった場合にバルハンと判断する。また、砂丘の中心軸(風方向)にそって、非対称性が 10%以上ある場合も除去した。なぜなら、バルハンの長さと同幅はほぼ同じことが観測からわかっているからである。風方向の空間にそったバルハンの平均サイズと平均数密度を調べると風下方向に進むにつれて、バルハン同士の合体と風上方向からの砂の供給によって、サイズはだんだんと大きくなることがわかった。また、数密度は減っていることがわかった。これから、供給源近くの風上側では小さなバルハンが多くあり、風下側にいくにつれて、砂丘の合体などが起こり砂丘自体の数は減り、それぞれの大きさは大きくなることがわかった。

次に、 $\phi = 0.008$ のときの砂丘のサイズ分布を図 1 に示す。横軸は平均サイズ、縦軸は頻度を表している。この分布関数からサイズにはピークがあり大きいサイズになるにつれて数が少なくなり、テイルをひいていることがわかる。この分布関数は対数正規分布関数の形をしている。

$$P(w) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma w}} \exp\left(-\frac{(\ln w - \mu)^2}{2\sigma^2}\right)$$

ここで、 μ と σ^2 はそれぞれ対数をとったときの正規分布の平均と分散を表している。

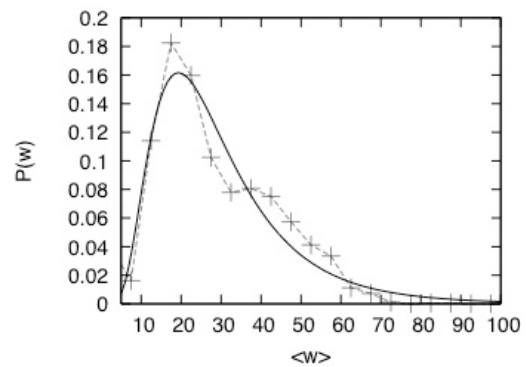


図 1：砂丘のサイズ分布(+が数値計算、直線：対数正規分布)

そこで、数値計算で得られた値に対数正規分布を合わせ、平均幅と分散を求めると、 $\langle w \rangle = 29.8$ 、 $S^2 = 21.2$ となった。供給量を変化させたときの平均砂丘サイズと平均サイズと標準偏差の関係をみると、供給量が増えるにつれて平均砂丘サイズは大きくなるが、その増加の割合は小さくなっていくことがわかった。また、平均サイズが大きくなるにつれて標準偏差も増加していくことが分かった。

砂丘分布が対数正規分布に従うことがわかったので、対数正規分布がどのように作られていくかを調べた。シミュレーションフィールドを風方向に分割し、それぞれの区間での砂丘分布を調べた。ここで、風方向の空間は時間発展の方向とみなせることに注意する必要がある。シミュレーション開始直後、小さいバルハンが大量につくられる。このとき、大きいバルハンはまだほとんどできておらず、ほぼ同じ大きさである。時間がたつと、小さいバルハンの数が少なくなり、大きいバルハンができはじめる。従って、全体としては砂丘の数は少なくなっていく。さらに時間がたつと、大きいバルハンだけになるのではなく、小さいバルハンも残っていた。これはバルハン同士が衝突したとき、常に合体するのではなく、分裂することもあることから理解できる。単一の砂丘群のなかでは、砂丘サイズは対数正規分布にしたがっていることがわかった。

次に、砂丘群同士が接触した場合の境界でのサイズ分布がどうなっているのかを調べた。砂の供給源を並列にならべ、それぞれの供給量を変化させていく。砂の供給量を変化させたときの砂丘のサイズ分布を調べたところ、砂丘群の接触にかかわらず、砂丘分布は対数正規分布に従うことがわかった。次に、風方向と垂直方向のサイズ分布をとることによって、砂丘群の境界の振る舞いを調べた。供給量が多い場合、砂丘のサイズはほぼ等しくなっていた。これから、砂丘同士の衝突によって、砂丘のサイズが均一化されていることがわかった。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 4 件)

- ① Atsunari Katsuki, Size Distribution of Barchan Dunes by a Coarse-grained Dune Model, Theoretical and Applied Mechanics Japan vol.56, 241-246 (2009)、査読有
- ② Hiraku Nishimori, Atsunari Katsuki, Hiromi Sakamoto, Coupled ODEs model for the Collision Process of Barchan Dunes, Theoretical and Applied Mechanics Japan vol. 56, 174-184、(2009)、査読有
- ③ 勝木厚成、衝突時における三日月型砂丘の動力学、日本流体学会誌「ながれ」、vol. 27、5-14、(2008)、査読無

- ④ 勝木厚成、バルハン砂丘のサイズ分布、九州大学応用力学研究所研究集会報告、19ME-S3、37-44、(2008)、査読無

[学会発表] (計 5 件)

- ① Atsunari Katsuki、 Indirect Interaction of Barchan Dunes by Inter-dune Sand Flow、 American Geophysical Union、2008年12月16日、San Francisco, USA
- ② 勝木厚成、環境変動下での砂丘形態、日本物理学会、2008年9月23日、岩手大学
- ③ 勝木厚成、粗視化模型による三日月型砂丘のサイズ分布、第57回理論応用力学講演会、2008年6月10日、日本学術会議
- ④ 勝木厚成、粗視化モデルによる三日月型砂丘のサイズ分布、日本物理学会、2007年9月24日、北海道大学
- ⑤ 勝木厚成、砂丘集団のサイズ分布、日本物理学会、2008年3月25日、近畿大学

6. 研究組織

(1) 研究代表者

勝木 厚成 (KATSUKI ATSNARI)
日本大学・理工学部・助手
研究者番号：40453914

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし