

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 23 日現在

機関番号：32665

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2016

課題番号：24740268

研究課題名(和文) 相互作用する多様な砂地形集団の非線形動力学

研究課題名(英文) Nonlinear dynamics of various interacting sand dunes

研究代表者

勝木 厚成 (KATSUKI, Atsunari)

日本大学・理工学部・助教

研究者番号：40453914

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：地球上にある砂地形の代表的なものに砂丘がある。砂丘は多様な形態をとる事が知られており、その形態は風の複雑さ(方向や強さ)と砂量で大きく分類することができる。そこで、環境条件によって変化する砂丘形態の時間発展や変形過程を明らかにするために数値計算を用いて砂丘形状を定量的に調べた。時々刻々と変化する砂丘地形の動的形状を定量的に議論するために砂丘重心から砂丘表面までの距離を全角度方向にわたって計測した。次に、植生による飛砂抑制効果と植生の成長、枯死を考慮した植生砂丘数理模型を用いて放物線型砂丘、植生を含んだ横列砂丘を再現した。

研究成果の概要(英文)：There is a sand dune in a typical sandy shape on the earth. Dunes are known to take various forms, and their form can be broadly classified by the complexity of the wind and the amount of sand. In order to clarify the temporal evolution and deformation process of sand dune shape which changes according to environmental conditions, numerical calculations were used to quantitatively investigate the sand dune shape. In order to quantitatively discuss time evolution of the sand dune topography, the distance from the sand dune center of gravity to the sand dune surface was measured over all angular directions. Next, using the mathematical model that considers saltation suppression effect by vegetation growth and death, a characteristic sand is called as parabolic dune appeared. As we increased the amount of sand, transverse-like dunes with vegetation developed.

研究分野：非線形動力学

キーワード：植生砂丘 砂丘 計算機シミュレーション

1. 研究開始当初の背景

地形の多くは粉粒体と流れによって形成されており、その代表的なものに砂丘がある。砂丘は物理的興味だけでなく環境問題にも深く関わっており、例えば砂丘の様子は砂漠だけでなく海底や火星、金星、土星の衛星タイタンにもみられており、その形態から砂丘周りの砂の量や風の方向などの環境条件を知ることができる。また、数十m近くある砂丘が街を飲み込むという砂丘災害があり、防災の観点からも注目されている。

砂丘は風向きや砂の量、植生の有無によって大きく5つの形態(三日月型、横列、縦列、星型、放物線型砂丘)にわけられる。三日月型、横状、縦状、星型は植生のないときにも見られるが放物線型砂丘は植生があるときにしか見られない。このことから植生は地形の形態を大きく変えることができることがわかる。

これまでの砂丘形態研究の多くはこれらの孤立した状態でかつ静的な安定状態だけにしか注目してこなかった。だが、砂丘は季節風などの環境変化や周辺の砂丘との相互作用によって常に変化し続けている。この動的で複雑な砂丘地形の変化は過去の研究者によって指摘されていたにも関わらず、これまで数百年という長いタイムスケールによる観測の困難さや刻一刻と変化する複雑な地形表面の変化を広範囲で計算機上で再現することは困難であったために、砂丘間の相互作用まで考慮した複雑な砂丘地形に関する理論的研究は殆ど議論されてこなかった。

本研究開始当初、申請者は一方向流という一定環境条件下で形成される三日月型砂丘の相互作用に注目し、世界初の一方向流での水底三日月型砂丘の衝突実験を実現し、三日月型砂丘衝突過程を再現する二次元数値モデルと一次元衝突をモデル化した3変数力学系を構成し、その理論解析をおこなった。さらに、百個程度の砂丘群を計算機上で再現することに成功しその統計的性質を明らかにしてきた。

2. 研究の目的

砂丘形態は風向きや砂の量によって形態が変化することが知られている。この砂丘周りの環境条件を様々に変化させることによって、複雑な環境条件下での砂丘形態及び砂丘変遷の振る舞いを理解することを目的

とする。また、砂丘同士の相互作用や植生との相互作用など野外観測と同等な環境条件下での砂丘形態を明らかにする。

3. 研究の方法

本研究では計算機シミュレーションを主な研究手法とした。ここで用いた数値モデルは主に“サルテーション(飛砂)”と“アバランチ(雪崩)”という素過程で構成されており、過去に研究されてきた砂丘模型の中でもシンプルながら多様な現象を再現し得るもので、その計算コストの低さから多数の砂丘を扱うことができる数少ない模型である。この模型では空間を格子状に分割し、それぞれの格子には砂量に対応する量を定義する。砂の移動には、砂が風によって運ばれるサルテーションと粒状物質特有のなだれ現象を模倣したアバランチを考慮する。サルテーションの計算では流体計算を直接解くのではなく観測から得られた局所高さ $h(x,y,t)$ に依存した関数

$$L(h(x,y,t))=a+bh \ h(x,y,t)+ch^2 \ (x,y,t)$$

を使用した。ここで x,y は空間座標、 t はタイムステップを表し、 $a=1,b=1,c=-0.01$ を用いた。またアバランチでは、安息角を超えた砂量だけの移動を考え、最も急峻な斜面に砂を再分配することにした。

さらに、風系場の複雑さを定量化するために吹く風の方向と強さをベクトル量 DP_i として表し、1年間を通してベクトルとスカラー量の総和の比を取った量：RDP(the resultant drift potential)/DP(the magnitude of the vector resultant of drift potential)を用いることにした。

$$RDP/DP= \frac{\overrightarrow{DP_i}}{|\overrightarrow{DP_i}|}$$

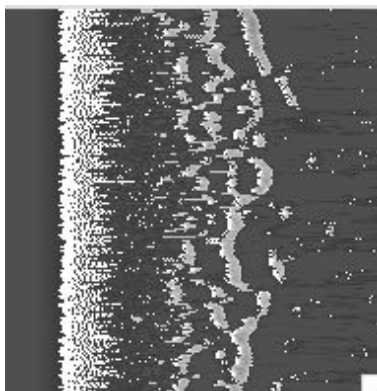
4. 研究成果

環境条件を大きく変化させた(風の複雑性を変化させる)ときの砂丘が変形する過程を詳細に調べ、それらを野外観測で得られた画像と比較した。ここでは、風の吹く方向を45度刻みに限定し、複数の風方向に対してなす角の対称性を利用することで2方向、3方向、4方向の風向の変化に対する砂丘形態を網羅的に調べることができた。ここで、境界条件は開境界条件、周期境界条件を用い、初期地形としてはそれぞれ平坦な砂床とガウシアン型の砂山を用いた。

さらに、時々刻々と変化する砂丘地形の形状を定量的に議論するために砂丘重心から砂丘表面までの距離を全角度方向にわたって計測することで動的形状変化を取り扱う手法を開発した。この手法とシミュレーションフィールドのすべての砂の流量を全方位で調べることで、三日月型砂丘から星

型砂丘の変形過程や浜型砂丘の形態変化を観測、定量化することができた。また、横列砂丘と縦列砂丘の砂の異方性を定量化することに成功し、風向に対して砂がどのように移動するかを明らかにすることに成功した。この関係は風の合力方向に対する砂の流量とそれに垂直な方向の流量の比を理論的に表現した方程式からも導出することができ、計算機シミュレーションの結果と一致することが確かめられた。

次に、砂漠の境界領域での複雑な地形や海岸地形への応用を目指し、砂丘表面上の植生を考慮した数理模型を構築した。野外観測から植生と砂の関係を調べてみると、植生が存在することでその風下側では風の勢いが弱まりサルテーションが抑制されている(植生によるサルテーションの抑制効果)。また、砂の量が多いときには、植物は砂に埋まってしまい枯死していること(植生の成長・枯死)が報告されている。そこで、従来の侵食堆積過程(サルテーションとアバランチ)に"植生によるサルテーションの抑制効果"と"植生の成長・枯死"を考慮することで数理植生砂丘模型を構築した。この砂丘と植生の関係は負のフィードバックの関係になっており、砂が少ないと植物が伸び、砂が多いと植物が枯れる。一方で植物が多いとサルテーションが少なくなり、植物が少ないとサルテーションが多くなる関係になっている。この数理模型を用いたシミュレーションにおいて砂量と植生の成長速度を調節することにより砂の供給量が少ない場合には parabolic dune (放物線型砂丘) とよばれる風下側に角を向けた特徴的な砂丘が出現した(図)。また、砂量を増やしていくと植生とないときと同様に横列砂丘が発達してきた。さらに、砂量を増やした時には大きな分断された砂丘群がところどころに出現した。出現した砂丘群はお互いに相互作用することが少なく、それぞれが孤立した状態で移動していた。これらは植生の成長によるサルテーションの抑制効果によることが推測される。また、特殊



図：計算機シミュレーションによる植生砂丘

な初期条件として孤立した砂丘を準備し、その形態変化の時間発展を調べたところ風と垂直方向に大きく伸びていくことがわかった。最終的に得られた地形は植生の中に扁平な砂丘が孤立している状態であり、野外観測でもしばしばみられる地形であった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 1 件)

勝木 厚成、2 方向流下における砂丘形態：
計算機シミュレーション、日本大学理工学部一般教育教室彙報、査読有、99、2015、11-20.

〔学会発表〕(計 8 件)

勝木 厚成、植生を含んだ砂地形の変形、日本物理学会、2017 年 3 月 20 日、大阪大学(大阪府豊中市).

Atsunari Katsuki、Size distribution of sand dunes using a lattice model、INTERDISCIPLINARY APPLICATIONS OF NONLINEAR SCIENCE、2016 年 11 月 4 日、鹿児島大学(鹿児島県鹿児島市).

Atsunari Katsuki、Size distribution of barchan dunes with a cellular model、The Conferences of the Middle European Cooperation in Statistical Physics、2016 年 2 月 15 日、ウィーン(オーストリア).

Atsunari Katsuki、Size Distribution of Barchan Dunes by Coarse-grained Dune Model、Dynamics Days Europe、2015 年 9 月 9 日、エクスター(英国).

勝木 厚成、数値シミュレーションによる砂丘形態の変形、日本地質学会、2014 年 9 月 15 日、鹿児島大学(鹿児島県鹿児島市).

勝木 厚成、環境条件で変化する砂丘の解析、日本物理学会、2014 年 3 月 30 日、東海大学(神奈川県平塚市).

勝木 厚成、数値実験による砂丘形態の
変形、日本堆積学会、2014年3月16日、
山口大学(山口県山口市)。

勝木 厚成、格子模型を用いた多様な環
境条件での砂丘形態、日本物理学会、2013
年3月27日、広島大学(広島県東広島市)。

〔図書〕(計 1 件)

Gilbert, Thomas, et. al. (Eds), Springer,
Proceedings of the European Conference
on Complex Systems 2012, 2013,
1096(35-38)。

6 . 研究組織

(1)研究代表者

勝木 厚成 (KATSUKI, Atsunari)

日本大学・理工学部・助教

研究者番号：4 0 4 5 3 9 1 4