

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 5 月 1 日現在

機関番号：32665

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2009～2011

課題番号：21740292

研究課題名（和文） 環境変動による砂地形の非線形動力学

研究課題名（英文） Nonlinear dynamics of sand bed formed by environmental change

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（和文）：

砂地形の代表である砂丘は火星などの他惑星でも観測されており、風向きや砂量によって様々な形態をとることが知られている。そこで、環境と砂丘形態の関係を明らかにするために、砂丘の数値格子模型を用いて風系場の向きの数や砂量を変化させて、多様な環境条件下での砂丘形態（三日月型、横列、縦状、星型、涙型、ネットワーク砂丘）を計算機上に再現した。さらに、得られた形状を異なる環境条件におくことで、変形途中に現れる砂丘形態を定量的に調べた。

研究成果の概要（英文）：

Sand dunes are found in many places such as deserts and the surface of Mars. The morphology depends on the wind directions and the amount of sand. Then we investigated morphology of sand dunes under the various environmental conditions in numerical simulation. We reproduced barchan, linear dune, seif dune, star dune, drop dune and network dune. In addition, we studied time evolution of the shape deformation qualitatively.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,600,000	480,000	2,080,000
2010年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2011年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・数物物性・物性基礎

キーワード：環境変動,砂丘,非線形動力学

## 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、砂丘の模様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、風向きや砂の量によって、大きく4つの形態（三日月型、横状、縦状、星型）にわけられる。それらの形態研究の多くは孤立砂丘での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、これまで知られていたにも関わらず、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。

これまで、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模型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。また一次元衝突の3変数力学系に関しての理論解析をおこなった。

この数値模型は飛砂と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モデルの中でシンプルでかつ多様な現象を再現し得る砂丘のミニマムモデルと呼べるもので、砂丘集団を研究できる数少ないモデルの一つである。

そこで、本研究では、計算機上で再現可能となった砂丘の環境条件を様々に変化させることによって、複雑な環境条件での砂丘形態及び砂丘変遷の振る舞いを理解していくことにする。

これまでの砂丘群研究の問題点として、観測では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、計算機実験では砂丘集団を調べるための多大な計算コスト、理論では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があげられる。

これらの困難さは、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できることがこれまでの研究からわかってきた。さらに近年、惑星探査衛星や観測技術の目覚ましい進歩により、地球だけでなく火星や土星の衛星タイタンの地表面の衛星写真が容易に入手可能になり、その写真を研究室で行った結果と比較できるようになっている。従って現在、観測—水槽実験—計算機実験—理論を並行して砂丘群の研究を行える環境が整ったといえる。

## 2. 研究の目的

砂丘形態の変遷過程を理解するために、外部環境変化による砂丘形態の変形過程を調べ、砂丘形態の安定性を明らかにする。また、変形過程を定量的に議論することができる手法を開発する。

## 3. 研究の方法

本研究では砂丘の数値格子模型を用いて研究をおこなった。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

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

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。

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

また、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。

## 4. 研究成果

この砂丘模型を使って、風の方向と砂の量を変えたときの相図を作ったところ、三日月型砂丘（風下に角を向けた三日月型の砂丘：風が1方向で砂の量が少ない場合）、横列砂丘（風の方向に対して峰が垂直方向に並ぶ砂丘：風の方向が1方向で砂の量が多い場合）、縦列砂丘（風の合力方向に峰が並ぶ砂丘：風の方向が2方向で砂の量が多い場合）、星形砂丘（星の様に腕が多少伸びた形状をした砂

丘：風の方向が3方向以上で砂の量が多い場合）、涙型砂丘（風上が丸く大きく、風下側の角が1本の砂丘：風の方向が2方向で砂の量が少ない場合）、ネットワーク砂丘（星形砂丘がつながった砂丘：風の方向が2方向以上で砂の量が星形砂丘より少ない場合）を再現することに成功した。

風の向きが2方向のときに形成される横列砂丘と縦列砂丘は、風のなす角が90°を境にして形状が切り替わるが、その様子は砂の全移動量を各場所、各時刻毎に詳細に調べることによって、砂列の伸びる方向が変わることが原因であることがわかり、その時の砂の流量は特定の関数でかけることがわかった。また、ネットワーク砂丘は砂量が多くても少なくても形成されないことが知られているが、その理由は上記の砂列の伸び方と周りの砂丘との位置関係によることが明らかになった。

次に、安定してできた砂丘形態に環境変動を加える事によって、出現する砂丘形態を調べた。ここでは、相図から代表的な砂丘形態だけ（三日月型砂丘、横列砂丘、縦列砂丘、星形砂丘）を選び、その変形過程を調べた。それぞれの変形過程を定量化するために、重心から砂丘の外縁部までの距離の変化を全方向について調べた。この手法で、これまで観測されているが未分類とされていた砂丘地形を分類することができるようになった。これらの成果は今後発見される他惑星での新規の砂丘形状の分類及び過去・現在・未来の推測に役立つものと考えられる。

#### 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8件）

1. “Simulation of barchan dynamics with inter-dune sand stream”, Atsunari Katsuki, Macoto Kikuchi, New Journal of Physics, 査読有, 13 (2011) 063049 (8 ページ)
2. “Cellular model for sand dunes with saltation, avalanche and strong erosion: collisional simulation of barchans”, Atsunari Katsuki, Hiraku Nishimori, Macoto Kikuchi, Noritaka Endo, Keisuke Taniguchi, Earth Surface Processes and Landforms, 査読有, vol. 36, (2011), p372-382
3. “数値実験と水槽実験で解くバルハン

集団のダイナミクス” 勝木厚成, 西森拓, 遠藤徳孝, 谷口圭輔, 地質学学会誌, 査読有, vol. 117, (2011), p155-162

4. “砂丘のダイナミクス”, 勝木厚成, 西森拓, 日本物理学学会誌, 査読有, vol. 65, (2011), p953-960
5. “三日月型砂丘の衝突ダイナミクス”, 勝木厚成, 西森拓, 遠藤徳孝, 谷口圭輔, 菊池誠, 形の科学会誌, 査読無, vol. 26, (2011), p99-100
6. “砂丘のダイナミクス”, 勝木厚成, 科学フォーラム, 査読無, vol. 27, no. 4, (2010), 46-51
7. “Size Distribution of Barchan Dunes by a Coarse-grained Dune Model”, Atsunari Katsuki, Theoretical and Applied Mechanics Japan, 査読有, vol. 57, (2009), p241-246
8. “Coupled ODEs model for the Collision Process of Barchan Dunes”, Hiraku Nishimori, Atsunari Katsuki, Horomi, Sakamoto, Theoretical and Applied Mechanics Japan, 査読有, vol. 57, (2009), p179-184

〔学会発表〕（計6件）

1. 勝木厚成, “多方向流下での砂丘形状の変形”, 日本物理学会, 2012年3月15日, 関西学院大学
2. 勝木厚成, “離散化学反応系での最適な増殖機構”, 定量性物理の会, 2012年1月8日, 名古屋大学
3. 勝木厚成, “環境変化による砂丘形状の変形”, 日本堆積学会, 2011年12月23日, 長崎大学
4. 勝木厚成, “環境変化による砂丘形状の変形” 日本物理学会, 2011年9月24日, 富山大学
5. 勝木厚成, 西森拓, 遠藤徳孝, 谷口圭輔, 菊池誠, “三日月型砂丘の衝突ダイナミクス” 第71回形の科学シンポジウム, 2011年6月19日, 千葉大学

6. 勝木厚成, ” 砂丘の相互作用ダイナミクス”, 日本堆積学会堆積学スクール, 2010年7月21日, 北海道県立厚岸少年自然の家

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・助手  
研究者番号 : 40453914

(2) 研究分担者

( )

研究者番号 :

(3) 連携研究者

( )

研究者番号 :