

三日月型孤立砂丘・バルハンの交互二方向流による変形

— 火星面上の砂丘と水槽実験との比較 —

大阪大学 理学研究科 谷口 圭輔¹

金沢大学 自然科学研究科 遠藤 徳孝²

砂丘は、水や空気などの流体の流れと、粉体である砂との相互作用の結果形成される地形である。今回注目するバルハン砂丘は、孤立砂丘の一種で、通常、上空から見ると三日月型をしており、一般に、移動可能な砂の量が少なく流体流の流向が一定である場所で形成されると考えられている。探査衛星による火星の写真観測が進み、流向変動のある場所で形成されたと思われる特殊な形態を持つ孤立砂丘が発見されてきた。こうした特異な形態を持つ砂丘の形成環境を探るために、我々は水槽実験を行った。水槽中に小型の地形を形成することで、任意の流れ環境における地形の変形過程を観察することができる。水槽中に形成した三日月型地形に対し、流速・流れの継続時間の異なる 2 方向流を作用させ、変形した地形と火星の砂丘との形態の比較を行い、火星の砂丘の形成された流れ環境の推定を試みた。

1 はじめに

砂丘の形態は、風や水流といった流体と、粉体である砂粒子との相互作用の結果形成される地形である。代表的な砂丘の形態は、フィールドにおける移動可能な砂の量と、流れの 1 方向性の強さという 2 つの要素によって決定されることが知られている。本研究で注目するバルハン砂丘は、三日月型の形態を持つ孤立砂丘で、流れの 1 方向性が極めて強く、フィールド内の移動可能な砂の量が少ない場所で形成されるといわれている [1]。下流側に出来る尖った部分はホーンと呼ばれ、その土地の平均流向を示す指標として用いられる。

火星面に、バルハンなどの砂丘が存在することは 1970 年代から知られていたが、1996 年に打ち上げられた米国の探査衛星・マーズグローバルサーベイヤー (以下、MGS) によって、より詳細に火星面の風成地形の観測が可能となり、さまざまな特異な形態を持つ砂丘が観測された。

図 1 (a)³・(b)⁴は、MGS の画像で発見された、涙型砂丘と呼ばれる砂丘で、ホーンを 1 本しか持たない (矢印) 孤立砂丘である。図 1 (a) の左下端に 2 本のホーンの間隔が狭まったバルハンが見られることから、涙型砂丘はバルハンが変形したものではないかと考えられたが、正確な理

¹E-mail:tani-k@astroboy.ess.sci.osaka-u.ac.jp

²E-mail:wisteria@kenroku.kanazawa-u.ac.jp

³E21-00192 *Malin Space Science Systems Mars Orbiter Camera Image Gallery*, 30 September 2003

⁴R03-00347 *Malin Space Science Systems Mars Orbiter Camera Image Gallery*, 20 April 2004

解は得られていない。この砂丘の形成環境を解明することが出来れば、現地の流れ環境に関する新たな情報を得ることができる。

我々は、地球上の砂丘についても衛星画像を調査し、涙型砂丘を探索した。その結果、西サハラに涙型砂丘が存在することを発見した。この涙型砂丘を含む砂丘群には、2本のホーンのうち、一方だけが細長く伸びた非対称な形のバルハンが多数存在する。文献 [2] によると、このような非対称なバルハンは、斜交する2方向の風の影響で、バルハンがセイフ砂丘(直線型砂丘)へと変形する過程で見られる地形である(図1(c)を参照)。

このことから、我々は涙型砂丘は斜交する2方向の流れの下で形成されるのではないかと考え、水槽実験の手法を用いて涙型地形の再現を試みた。風洞でなく水槽で実験を行う利点は、10 cm スケールの小型地形の形成が可能である [3] 点である。

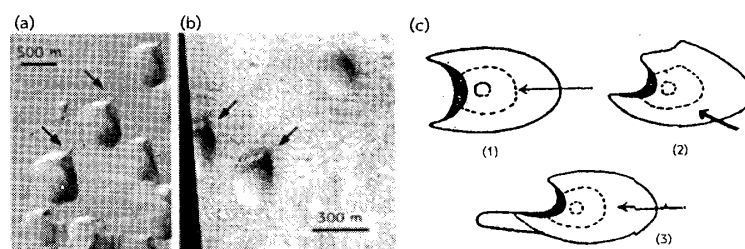


図1: (a): Wirtz クレータの涙型砂丘, (b): Copernicus クレータの涙型砂丘, (c): バルハン砂丘からセイフ砂丘への変形のスケッチ(文献 [2] を一部改変)。図中の矢印が風向で、(1)の対称なバルハンから、(2)の三本角型を経て、非対称なバルハンが出現する。

2 実験

実験は、図2(a)に示す幅20 cm、長さ11 mの循環型水槽で、水深を13.5 cmとして行った。初期地形として、密度 2.6 g/cm^3 の珪砂15 gを円錐形に置砂する。地形は、角度 θ の切り込みをいれた底板の上に形成し、図2(b)及び(c)に示すように底板を回転させながら、交互に水流を与え、成す角 θ の2方向流の作用する環境を再現する。この斜交2方向流サイクルを底板の長さの続く限り継続し、水槽上方から変形を観察する。簡単のため、それぞれの流れの流速と継続時間を等しくする。今回は、流速を 17 cm/s (底面より6 mm上で測定)に固定し、流れの継続時間が $t = 1, 2, 3$ 分、成す角が $\theta = 45^\circ, 60^\circ$ の場合について実験を行った。

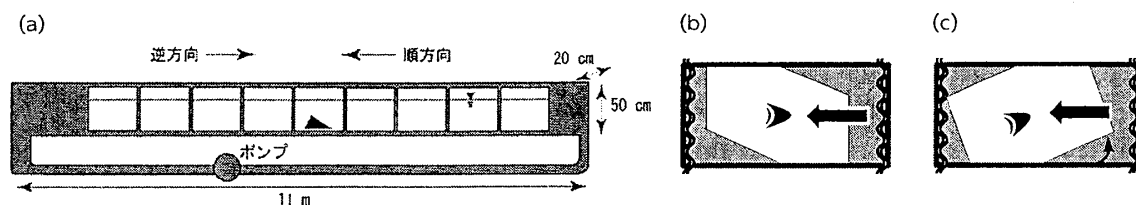


図2: (a): 実験に用いた水槽の模式図, (b)(c): 底板の回転によって斜交2方向流を再現する方法の模式図(水槽を上方から見た図)。

3 結果・考察

$\theta = 60^\circ \cdot t = 2$ 分のケースのみ、2本のホーンが合体し涙型砂丘と似た形態を持つ地形が現れた。図3に、涙型地形の形成過程を示す。水流が地形に作用しはじめると、地形表面の粒子が下流方向に移動し、crest line と呼ばれる峰線 (図3内に、破線で示した) が形成される。この crest line の形態に注目すると、サイクル1では円弧状であったものが、サイクル5でのS字型を経て、サイクル10では直線的な形へと変化している。また、2本のホーンの間隔はサイクル数が増えるにつれて短くなり、サイクル15以降は完全にホーンはひとつになった。また、サイクル1・5・10いずれの画像を見ても、crest line の移動量はひとつ前の流れが作った下流側の地形に漸近するが、以前の地形の痕跡が完全に消されることはない。

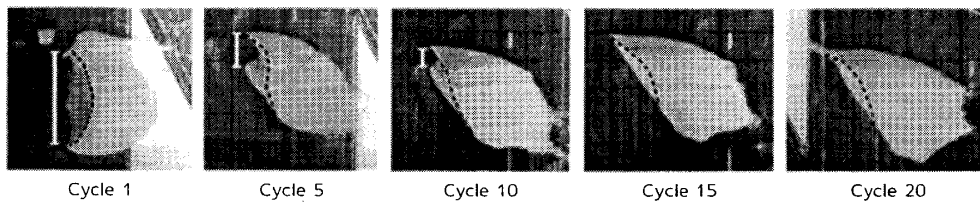


図3: $\theta = 60^\circ \cdot t = 2$ 分のケースにおける涙型地形の発達過程。いずれの画像も、撮影直前の流れの向きは画像の右から左方向。

図5に示したのは、2方向流の成す角と流れの継続時間の違いによる地形の変化の様子である。全てのケースにおいて、図4に示した一方向流下のバルハンよりも、ホーンの間隔が狭くなっている。しかし、2本のホーンが完全に合わさり、涙型地形の特徴を示したのは前に述べたように $\theta = 60^\circ \cdot t = 2$ 分のケースのみであった。

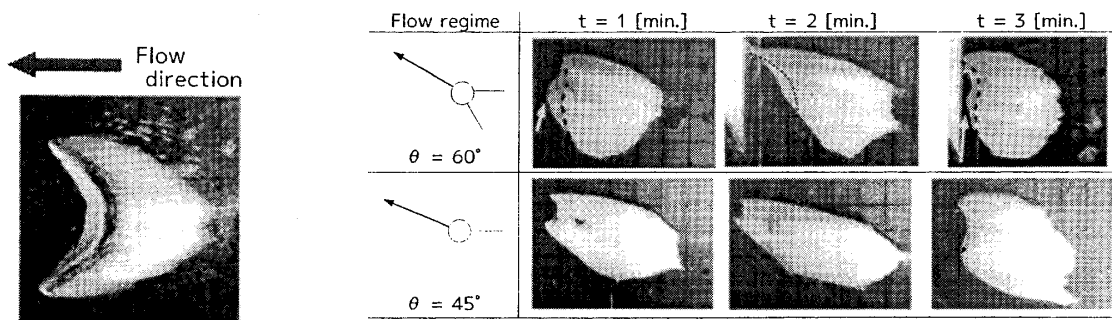


図4: 1方向流下で形成されたバルハン地形の例

図5: 2方向流の成す角・流れの継続時間の違いによる地形の変化 (サイクル15終了時)。右側の Flow regime 中の太字の矢印が平均流向。

涙型地形が発達するためには、流れの継続時間 t に厳しい条件があると考えられる。 t の違いは流向変動によって新たに形成された crest line の移動量を決定する。 $\theta = 60^\circ$ 、 $t = 1 \cdot 3$ 分のケースでの crest line の移動の特徴を、以下に述べる。図5中の破線が、それぞれのケースでの crest line を表す。

$t = 1$ 分のケースは、 t が短すぎて、涙型になる前に地形が安定してしまうと考えられる (図5

左上の画像を参照)。変形の初期においては $t = 2$ 分のケースと同様、円弧状から S 字型への crest line の変化が見られ、同時にホーン間隔は短くなっていく。しかし、下流側のホーン (矢印で示した) と、crest line の距離が離れすぎているため、ホーンの間隔が一定の間隔まで縮小すると、それ以上の変形が起こらなかった (サイク数が 30 を越えても変化しない)。

一方、 $t = 3$ 分のケースでは、crest line の移動量が大きすぎる。図 5 右上の画像を見ると、矢印で示した、下流側のホーンのあった位置まで crest line が達している。流向変動によって、ひとつ前の流れの影響が打ち消されてしまうので、涙型への変化は起こらないと考えられる。

4 まとめ

斜交する 2 方向流下で、涙型地形の再現に成功した。このことから、涙型砂丘の見られる Wirtz クレーター・Copernicus クレーター内部でも、斜交する 2 方向の風が吹いている可能性がある。また、涙型地形が形成されるには、ふたつの流れの継続時間 (ひとつの流れの下での crest line の移動量) が重要であることが分かった。

実験に使用した水槽のサイズの制約により、成す角 90° 程度での実験を行えていない。火星の涙型砂丘に比べ、水槽実験で得られた涙型地形は細長く見える。成す角 60° より大きな角度での実験により、より火星のものに近い形態を持つ涙型地形を形成できるかもしれない。

また、地形のサイズと涙型地形が形成される適切な流れの継続時間の関係も未解明であるので、今回とは違うサイズの初期地形から、涙型砂丘を形成する実験を行いたい。

謝辞

本研究報告では、Malin Space Science Systems によって加工された MGS の画像 2 点を、<http://www.msss.com/moc.gallery/> から入手し、使用させていただきました。

参考文献

- [1] R. J. Wasson and R. Hyde, *Nature* **304** (1983), 337-339
- [2] R. A. Bagnold, *The Physics of Brown Sand and Desert Dunes* (1941)
- [3] P. Hersen and S. Douady and B. Andreotti, *Physical Review Letters* **89** (2002), 26431