

交互二方向流れの方位変化量に規制される孤立砂丘形態：水槽モデル実験

Morphology and evolution of an isolated sand dune affected by the intersection angle of alternating bidirectional flows: results of flume experiments

Abstract

谷口圭輔^{*†} 遠藤徳孝^{**}
関口秀雄^{***}

Keisuke Taniguchi^{*†} Noritaka Endo^{**}
and Hideo Sekiguchi^{***}

2008年7月17日受付.

2011年2月6日受理.

^{*} 大阪大学大学院理学研究科宇宙地球科学専攻
Department of Earth and Space Science,
Graduate School of Science, Osaka University,
Japan

^{**} 金沢大学理工研究域自然システム学系
Graduate School of Natural Science and
Technology, Kanazawa University, Japan

^{***} 京都大学防災研究所
Disaster Prevention Research Institute, Kyoto
University, Japan

[†] 現所属：同志社大学工学研究科数理環境科学専攻
Present address; Department of Environmental
Systems Science, Faculty of Science and
Engineering, Doshisha University, Japan

Corresponding author; K. Taniguchi,
ketanigu@mail.doshisha.ac.jp

We used a hydraulic flume to conduct analog model experiments to elucidate the effects of alternating orientations of bidirectional flows (intersection angle θ) on the morphology and evolution of isolated sand dunes. An initial cone of fine-grained quartz sand was exposed to bidirectional water flows with a range of intersection angles (45° , 90° , 135° , and 180°) for 20 cycles of flow alternation, with a cycle duration of 2 min. Experimental trials showed two types of deformation of the crest line: (1) “independence type”, in which a new crest line formed at a different location from the existing one; and (2) “reverse type”, in which an existing crest line reversed its migration direction and a new slip face was generated on the new stoss side of the existing crest. The independence type was observed at $\theta = 45^\circ$ and the reverse type was observed at $\theta = 180^\circ$. At intermediate values of θ , the two types occurred contemporaneously. Due to the cumulative effect of deformation of the crest line, three types of topographies developed, with features characteristic of dome, longitudinal (seif), and reversing dunes. These results yield insights into the processes and conditions required for the formation of sand dune types.

Keywords: barchan dune, dune, flume experiment, isolated dune, longitudinal dune

はじめに

風成砂丘の形態は多様で (McKee, 1979), 成因論が未だ確立されていないものも少なくない。砂丘の形態は何によって決まるのか, また, どのような環境因子がどのようなかたちで反映されるのか, これらの問いに対するよく知られたモデルのひとつは, Wasson and Hyde (1983) の相図である (Fig. 1a)。すなわち, 砂丘形態の代表的4種は, 移動可能な砂の量と風向変動量というふたつの要素の組み合わせを反映するという考え方である。移動可能な砂の量が多く, 地表が広い範囲にわたり十分な砂に覆われた砂漠の場合, 風系の一方向性が強ければ横列砂丘 (transverse dune) が, 風向が季節変動等により変動する場合は星状砂丘 (star dune) が形成される。一方, 移動可能な砂が少なく, 部分的に固定床が露出する状況 (貧砂状況) においては, 風系の一方向性が強い場ではバルハン砂丘 (barchan dune) が, 弱い場では縦列 (セイフ) 砂丘 (longitudinal dune, seif dune) が形成される。すなわち, それぞれの砂丘の形態は, 特定の風

系を反映するという理解である (Fig. 1b)。

バルハン砂丘と縦列砂丘は, ともに代表的な孤立砂丘であるが, 両者の形状は異なる。一方向流のもとでできるバルハン砂丘は, 三日月型の平面形態を持つ。バルハン砂丘を特徴づける風下側へ突出する突部はホーンと呼ばれる (Fig. 2a)。風上側の丸みのある部分はボディと呼ばれ, 風上からもたらされた砂粒子がその緩やかな登り斜面を掃流で運ばれる。峰線を越えると, 砂がなだれ落ちる急斜面 (スリップフェイス) となる。ボディ上の砂がスリップフェイスへ移動することで, バルハン砂丘はその形を維持しつつ風下方向へ前進する (Bagnold, 1941)。一方, 縦列砂丘は平均風向と平行する, 流下方向に細長く伸びる形状をもつ。峰線も直線的である (Fig. 2b)。その形成には, 二方向の風が斜交する風況が必要と考えられている。峰線の両側の斜面傾斜は, バルハン砂丘の場合と異なり左右いずれも同程度の傾斜となる。地形全体の伸長方向は平均の風下方向であるが, 風向の変化に伴い, 峰線が側方移動を繰り返すという (Tsoar, 1983; Tsoar and Yaalon, 1983; Tsoar et al., 2004)。

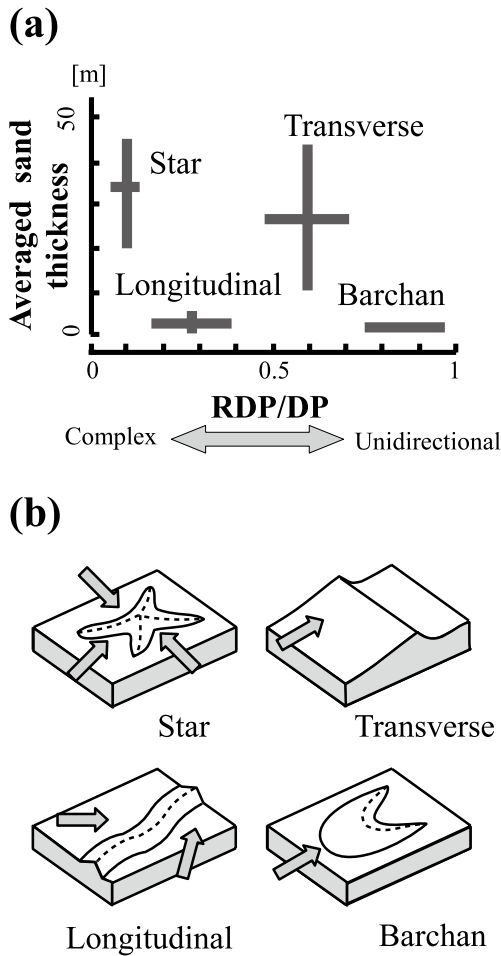


Fig. 1. (a) Phase diagram of the shapes of sand dunes, reflecting variations in wind complexity (RDP/DP) and sand supply (average sand thickness). Modified from Wasson and Hyde (1983). (b) Schematic diagrams showing typical dune shapes and corresponding wind directions.

バルハン砂丘と縦列砂丘の形態の違いは、風況の違いを反映すると考えられるが、理解はまだ十分ではない。とりわけ、これらの砂丘の形成過程についてはよく分かっていない。著者らは、風向変動に際して一時的に生じる形状変化と、ふたつの方向の流れが交互に長時間作用したのちに現れる累積的形状の両方に着目して、孤立砂丘の発達過程を水槽モデル実験で調べた。この実験で得られた新知見を天然の砂丘形態と対応させながら、ふたつの流れのなす角の違いが砂丘地形の形成に与える影響について議論する。

孤立砂丘地形を生成した過去の実験

非常にゆっくり進行する天然砂丘の変形過程の全容を観測から把握することは困難である。このため、小型地形を実験室系に造るアナログ実験と、現象を計算機上で再現する数値実験とが試みられている。前者については、本節で詳しく述べる。後者については、単独のバルハン砂丘の再現に成功し、バルハン砂丘同士の相互作用等への応用も進められている (Schwämmle and Herrmann, 2003; Katsuki et al.,

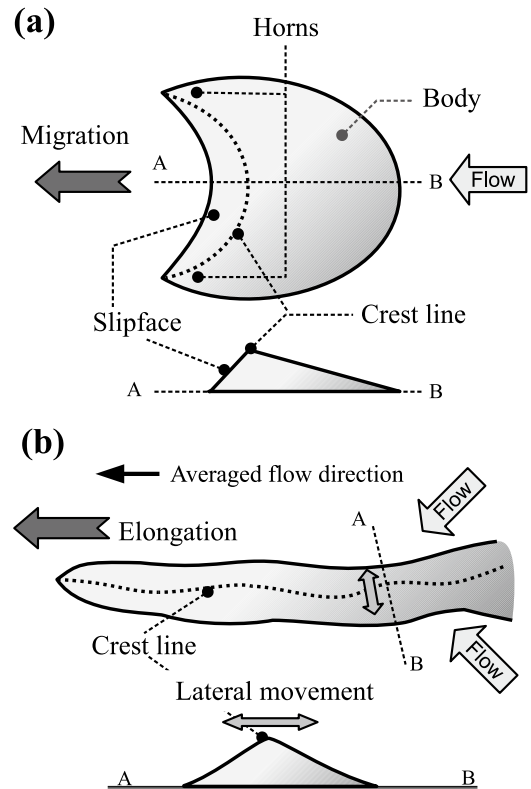


Fig. 2. Sketches showing typical isolated dunes: (a) a barchan dune, and (b) a longitudinal dune.

2005). いずれにせよ、天然では10~100年スケールで起こる地形変遷の全容を、高々数時間程度に縮めて観察することができる。

アナログ実験には、風洞実験 (Andreotti et al., 2002; Dauchot et al., 2002) と水槽実験 (Niño and Barahona, 1997; Hersen et al., 2002; Endo et al., 2004) とがある。水槽実験では、周囲流体として風のかわりに水の流れを用いる。周囲流体が空気の場合と水の場合とを比べると、後者には、小さい (数cm) 孤立砂丘地形をより長時間持続させることができるというメリットがある。風成砂丘とは異なる流体を扱うため、両者の比較の妥当性への疑問が生じるかもしれない。孤立砂丘の場合、流れとの相互作用に加え、集積した砂の量が砂丘のサイズに影響する。そのため、全く同じ風況のもとでも、孤立砂丘のサイズは大きな多様性を示す。このことから、孤立砂丘と水槽中の小地形とを1対1で対応させるようなスケーリング則は、そもそも存在しないと考えられる。しかし、ある流体条件に対して、形成されうる砂丘の最小サイズには、現在広く受け入れられているスケーリング則が存在する。すなわち、ある流体中において、持続可能な (大きさと形状を保って移動可能な) 孤立砂丘の最小サイズは、掃流様式で移動する砂粒子の跳躍距離と同スケールである (Sauermaun et al., 2001; Hersen et al., 2002)。このことは、砂漠では幅10m程度のバルハンが最小サイズであるのに対して、水流中では数cm以下のものが形成可能であることと対応している。したがって、水槽実験で生じる小

型バルハンは、単に形が似ているだけでなく、力学的にも砂漠の風成バルハンの相当物であるといえる。

孤立砂丘の実験的研究の多くが、バルハン砂丘を対象としてきた。これは、バルハンの生成条件である一方向流を実験で実現することが容易なためである。流向が変化する条件下での孤立砂丘の形成実験もなされているが、これまで数値実験に限られていた (Parteli and Herrmann, 2007a, b)。著者はこれまで、流向や流速が変化する条件下での孤立砂丘形態を解明するため、水槽実験を実施してきた。特に注目しているのは、二方向の流れが交互に作用する条件下での孤立砂丘の成長様式である。これは、こうした条件設定が、変動する季節風の下での天然砂丘の動態を理解するのに役立つと考えられるためである。二流向の方位差を 180° に固定し、流速と継続時間を変化させた Taniguchi and Endo (2007) の実験では、実施した全ての試行に共通して、流向変化に際して既存の峰線に沿う逆向きのスリップフェイスが形成された。同様の地形は、天然の孤立砂丘でも観察されており (Bishop, 2001)、“rear slipface” と呼ばれている。また、交互二方向流を繰り返し作用させると、二方向それぞれの流れの継続時間比と流速とに依存する 4 種類の地形が発達した。そのうちのひとつは、火星表面に見られる“カモメ型バルハン”と類似する。しかし、方位差 180° の実験では、平均流向と平行する直線状の峰を持つセーフ地形や Bagnold (1941) が予測したようなドーム地形の再現には至らなかった。これらの実験でいまだ再現できていない孤立砂丘形態の生成を試みることも本研究の目的のひとつである。

二流向の方位差を変えておこなった水槽実験

方位差 θ ($0^\circ < \theta \leq 180^\circ$) をなして交互に作用する二方向流 (流速・流れの継続時間は一致させる) を孤立地形に繰り返し作用させる水槽実験をおこなった。特に注目したのは、地形の形態の短期的変遷と、交互二方向流の累積的な効果により長期的に現れる地形形状である。

実験には、京都大学防災研究所宇治川オープンラボラトリーに設置されている実験水槽を用いた。本実験の水槽系は、水平に設置された水路部 (幅 50 cm, 高さ 50 cm, 長さ 5.6 m) と、水路部に水を供給する上流側水槽および下部貯水槽とからなる (Fig. 3a)。実験領域は水路部である。下部貯水槽から上流側水槽へと揚水し、三角堰を経て水路部に給水する。水路部下流端の水門から流出する水は下部水槽へ循環する。給水開始後 20 秒程度で、水路部内の流れは定常状態となる。水路部への流入流量はポンプのバルブにより調節できる。一方、水路部下流端の水門の開きを調節することで、既定的水深 (13.5 cm) が得られる。流速は、水路内に設置された超音波ドップラー流速計 (ADV) によって、底面から 0.6 cm の高さで測定された。水槽底面にプラスチック製の板を敷設して、底面粗度を一様にした。プラスチック板の一部にはめ込んだ、直径 48.5 cm の円盤を回転させることにより、所定の方位差を持つ二方向流を実現した。

平均粒径 80 μm 、分級度 0.48 の石英砂 15 g からなる円錐形の砂山 (高さ 1.2~1.5 cm, 直径 6~7 cm) ひとつを円

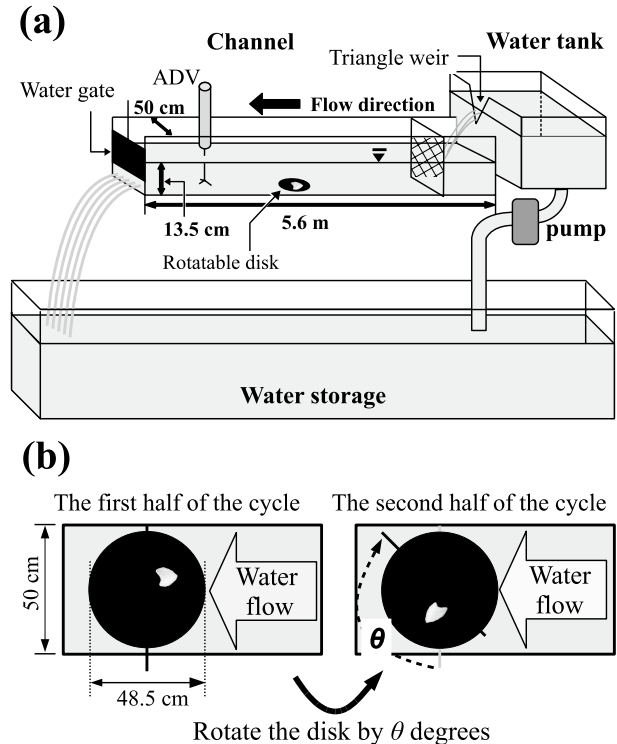


Fig. 3. Experimental design for creating bidirectional water flows with angular variations. (a) Sketch of the water flume. (b) Schematic diagram showing the generation of variable flow orientations using a rotating disk.

Table 1. Experimental conditions.

Run No.	Flow velocity [cm/s]	Duration [min.]	θ
a	21	2	45°
b	21	2	90°
c	21	2	135°
d	21	2	180°

盤上に盛り、これを初期地形とした。天然孤立砂丘では外部から多少なりとも砂の供給があると思われるが、本研究では実験操作と条件コントロールを簡単にするため、実験中に新たに給砂することはしなかった。初期地形に対し、流速 21 cm/s の水流を 2.0 分間作用させた (Fig. 3b 左) あと、地形に影響を与えないようゆっくりと流れを止めた。円盤を角度 θ だけ回転させ、再び同じ流速と継続時間の流れを作用させた (Fig. 3b 右)。この一連の操作を 1 周期とし、20 周期の試行を 4 回おこなった。 θ は任意に設定できるが、本実験では 45° , 90° , 135° , 180° の 4 通りに限定した。個々の試行では、 θ は一定とした (Table 1)。なお、20 周期を終えた時点で地形が回転板の外側へはみ出ることにはなかった。

結果と考察

1. 流向変化時の峰線の挙動

流向が変わると個々の砂粒子の移動方向が変わる。これにより、峰線は位置と移動方向を変える。峰線は試行ごとに特

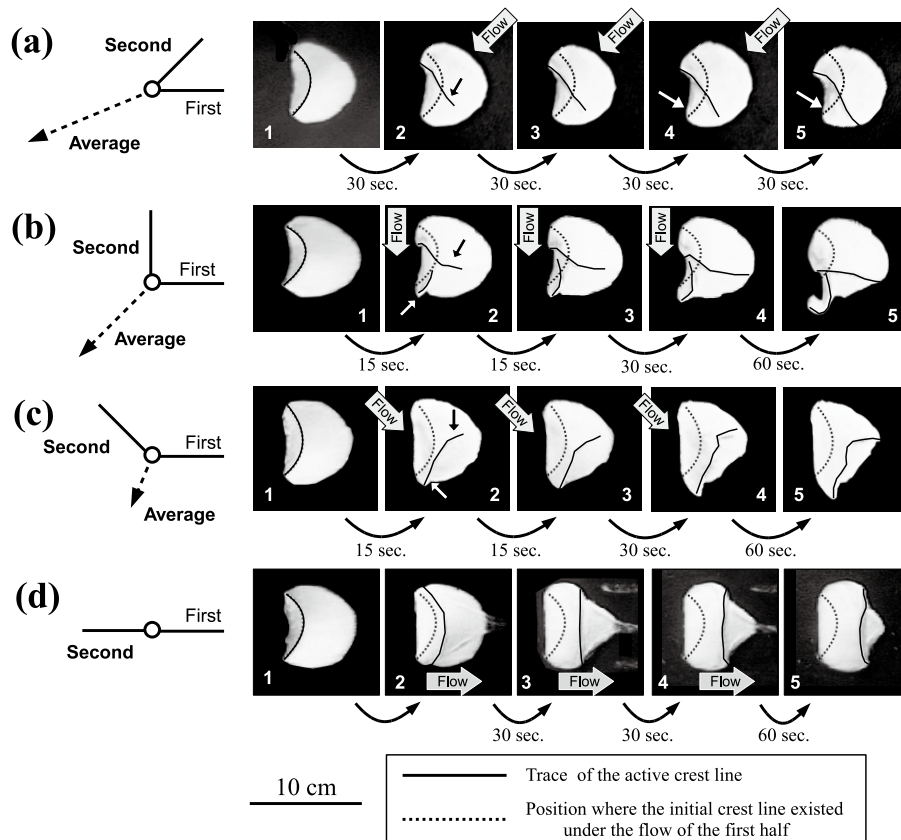


Fig. 4. Photographs showing the deformation processes occurring in the second half of the first cycle. The solid line in each photo indicates the actively forming or migrating crest line. The dotted line shows the position of the initial crest line that developed in the flow during the first half of the first cycle. Note that the initial crest line has blown out or migrated to another location, except in Run (a). The rose diagrams to the left of the photographs indicate the flow directions for each trial. The lengths and directions of the bars labeled “First” and “Second” represent the velocities and source directions of the alternating flows, respectively. The arrow labeled “Average” indicates the averaged vector of the two flows. (a) Run a ($\theta=45^\circ$). (b) Run b ($\theta=90^\circ$). (c) Run c ($\theta=135^\circ$). (d) Run d ($\theta=180^\circ$).

微的な挙動を示した。第1周期前半の水流が終了した時点で、全ての試行において地形の下流側に凹の三日月型の峰線が現われた (Figs. 4a-d の各写真 1)。このときの峰線 (写真 1 中の実線) を初期峰線と呼ぶ。これは、一方向流下で発達するバルハン地形に他ならない。周期後半に入ると、各試行で異なる地形変化が進行した (Figs. 4a-d の写真 2-5)。試行 a を除き、いずれの場合も周期後半の流向変化と同時に初期峰線は移動するか新しい峰線に取ってかわられるかして、初期の位置からは消失する。以下にそれぞれの試行毎に、流向変化による地形変化を詳しく述べる。

試行 a ($\theta = 45^\circ$, Fig. 4a) では、それ以前に峰線が存在しなかった場所で新しく峰線 (Fig. 4a 写真 2 の黒い矢印) が生じた。これは上流側 (周期後半の流向に対して、以下本節中絶りのない限り同様) に位置するホーン上から伸び、やや S 字型に屈曲しながら下流方向へ移動した。一方、初期峰線のうち、上流側 (写真上部側) は新たな峰線がその上を通過することによって消え、下流側 (写真下部側) のホーン上に位置する部分のみが移動や変形をせず残存した (Fig. 4a 写真 4, 5 の白い矢印)。

試行 b ($\theta=90^\circ$, Fig. 4b) では、上流側のホーンに沿ってゆるい円弧状の峰線が新たに生じた (Fig. 4b 写真 2, 黒い矢印)。下流側のホーン上では、初期峰線に沿って逆向き新たなスリップフェイスが形成された (同白い矢印)。これらふたつの峰線はいずれも下流方向へ前進した (Fig. 4b 写真 2-5)。第2周期以降には、上流側の新たな峰線が下流側

のものに追いついて連結し、両者がひとつの峰線として下流方向へ移動するようになった。初期峰線の上流側部分では、下流側で見られたような新たなスリップフェイスの形成は起こらず、峰線は消滅した。

試行 c ($\theta=135^\circ$, Fig. 4c) では、ボディ上の初期峰線が存在しない場所に新たな峰線が現われた (Fig. 4c 写真 2, 黒い矢印)。下流側のホーンでは、初期峰線沿いに逆向きのスリップフェイスが形成された (同白い矢印)。これら2種類の峰線は連続しており、ともに下流方向へと前進した (Fig. 4c 写真 3-5)。試行 b の場合と同様に、初期峰線の上流側部分は消滅した。

試行 d ($\theta=180^\circ$, Fig. 4d) では、流向変化後直ちに初期峰線全体に沿って逆向きのスリップフェイスが形成され、これらは下流方向へ移動した。流れが定常状態に達する前に地形変遷が始まっているため、Fig. 4d の写真 2 で既に峰線の移動が確認できる。

以上の観察より、流向変化後に起きる峰線の位置と移動方向の変化の過程には、以下の2種類の過程が認定できる。それぞれを独立型と反転型と呼ぶ。独立型では、初期峰線とは異なる位置に新しい峰線およびスリップフェイスが形成される。この新しい峰線は、流向変化前とは異なる方向に移動する。反転型では、初期峰線に沿って逆向きのスリップフェイスが形成され、流向変化前とは反対の方向へと峰線の移動方向が変化する。峰線の進行方向とスリップフェイスの位置が変化するとはいえ、流向変化前の峰線が流向変化後も峰線

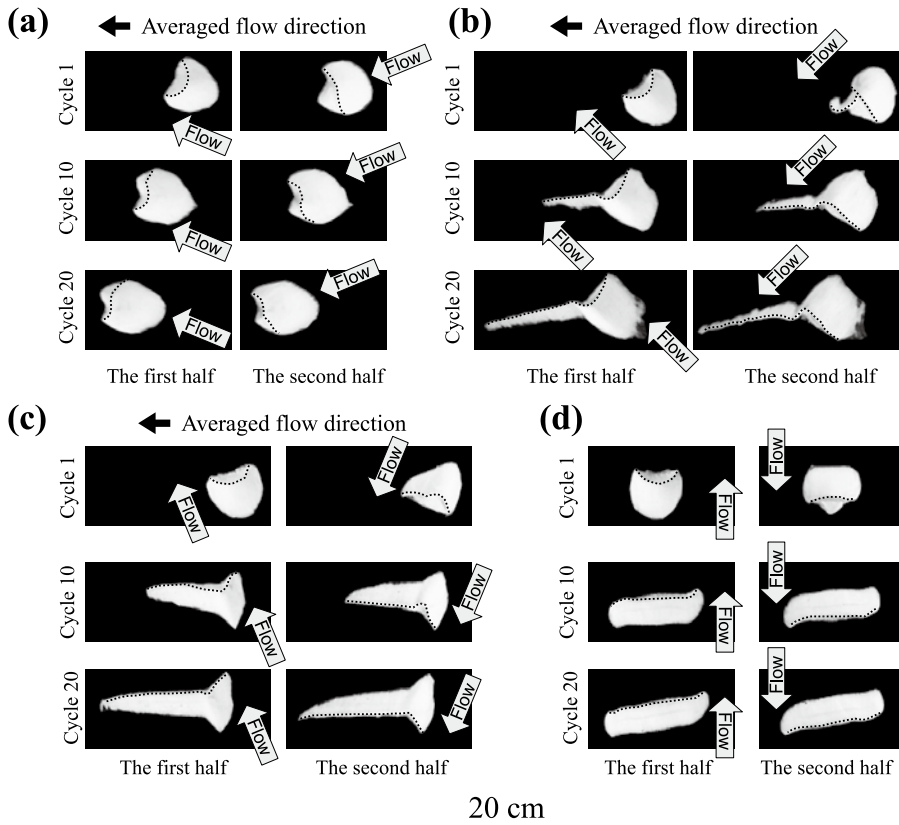


Fig. 5. Photographs showing the topography developed after 20 cycles. Dotted lines show the crest line. (a) Run a ($\theta=45^\circ$). (b) Run b ($\theta=90^\circ$). (c) Run c ($\theta=135^\circ$). (d) Run d ($\theta=180^\circ$).

として活動する。試行aでは独立型、試行dでは反転型の峰線変化がみられ、試行bとcでは両者が同時に進行した。これらのパターンは、各試行の全20周期を通じそれぞれ持続した。

2. 交互二方向流の20周期の繰り返しで生じた地形

交互二方向流を20周期にわたって繰り返し作用させ続けたところ、一方向流下では見られない形態の地形が発達した (Fig. 5)。これらの地形は、それぞれ天然のドーム砂丘、縦列 (セイフ) 砂丘、リバーシング砂丘 (McKee, 1979) と共通する特徴を示した。本論文では、これらをそれぞれドーム型地形、縦列型地形、リバーシング型地形と呼ぶこととする。

試行aで形成されたドーム型地形の特徴は、天然のドーム砂丘に近い楕円形の平面形態を持つボディと、ボディの下流端付近に見られるふたつの短い突部である (Fig. 5a)。地形の移動方向は、平均の下流方向とはほぼ一致した。地形上にはややS字型に屈曲した峰線があり、流向変化の度にそれまでとは異なる位置に新たな峰線が繰り返し形成される (独立型の峰線変化)。本地形の2本の突部は、形態上バルハン砂丘のホーンに似ている。しかし、バルハン砂丘のホーンが単一峰線の両端に沿って伸びるのに対し、本地形の突部は峰線の伸びと一致しない。ふたつの突部は、それぞれ異なる流向下でのみ存在する、異なる峰線に対応する。また、バルハン砂丘に比べ突部同士の間隔が狭い。

試行b (Fig. 5b) では、平均流向に対して上流側に位置す

る、扇型の平面形態を持つ地形 (写真右側) と、下流側に位置する棒状地形 (写真左側) とからなる複合地形が形成された。両者の峰線はいずれも直線状であった。扇型地形の上では、流向変化の度に既存の峰線とは異なる位置に新たに峰線が形成された (独立型の峰線変化)。一方、棒状地形上の峰線では、流向変化の度に既存の峰線に沿って逆向きのスリップフェイスが形成され、峰線の移動方向が反転した (反転型の峰線変化)。新たな峰線の形成が繰り返される扇型地形上の峰線と異なり、棒状地形上の峰線は一貫して平均流向の方向に伸びた。扇型地形と棒状地形は、常に乖離することなく連結しており、扇型地形から棒状地形への砂の移動はこの連結部を経由した。扇型地形は全体として平均流向と同じ方向に移動しつつ、少しずつ縮小した。扇型地形からの砂の供給を受けた棒状地形は、平均流向に沿って長くなっていった。

試行c (Fig. 5c) では、試行bと同じく扇型地形と棒状地形の複合地形が現れた。ただし、試行bと比較すると、棒状地形の幅が広く、扇型地形の大きさは小さい。すなわち、試行bの場合よりも多くの砂が棒状地形に集積した。

試行b, cで見られた棒状地形は、平均流向に沿う方向に細長い平面形態、平均流向の方向へと伸びていくという成長様式、流向変化の度に平均流向に直交する方向で峰線が側方移動する点において、天然の縦列砂丘と共通する。棒状地形は、縦列砂丘への発達途上であると考えられる。一方、棒状地形に砂を供給する扇型地形は、交互二方向流の周期を経るたびに縮小したことから、より多数回の周期を経験すれば扇

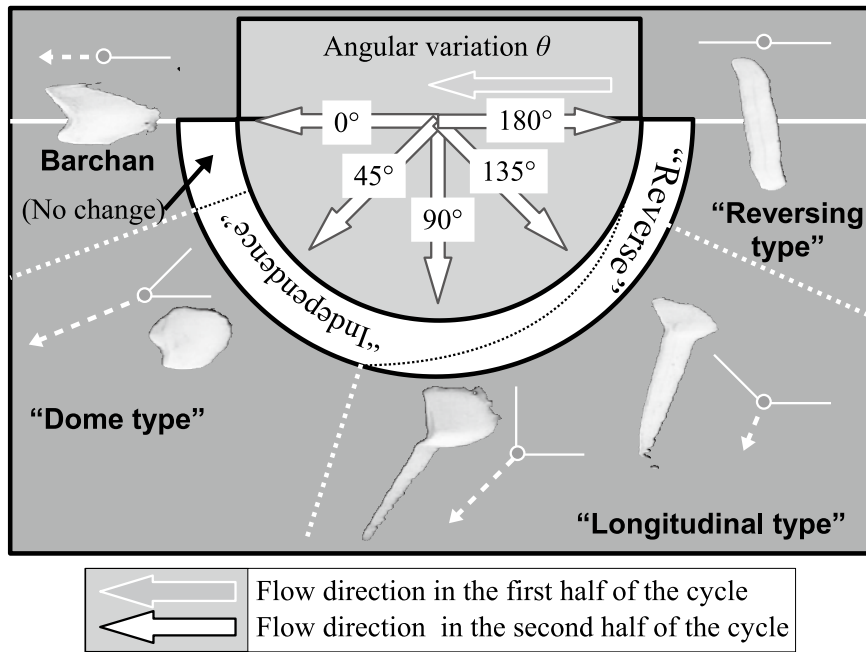


Fig. 6. Summary of the development of dune topographies characteristic of bidirectional water flows with periodic angular variations. The intersection angle of the flows, θ , affects the deformation of the crest line and the shape of resultant topographies. The topography at $\theta=0^\circ$ represents a unidirectional flow with the same flow velocity as that in the other runs.

型地形は消失すると考えられ、より縦列砂丘に似た形状になると推測される。

試行d (Fig. 5d) では、流向にほぼ直交する方向に長軸を持つ棒状の地形(リバーシング型地形)が形成された。峰線の伸長方向も流向に直交した。流向が反転するたびに逆向きのスリップフェイスが形成され、峰線の移動方向が反転し、その時点の流向と一致した。この地形は流向方向には殆ど移動せず、流れに直交する方向 (Fig. 5d 中の左右方向) に長くなっていった。しかし、10 周期以降はほとんど伸びなくなった。流向に直交する伸長方向を持つ峰線が反転する流向に応じて移動するという特徴のみに注目すると、この試行で得られた地形の挙動は横列砂丘が逆方向の風を受けて変形するリバーシング砂丘に類似する。

3. 流向変化量と砂丘形態の関係

試行a~d で観察された単一周期での峰線変化と多周期経過後の砂丘形態の関係をまとめると次のようになる。ドーム型地形(試行a)と扇型地形(試行b, c)が、独立型の峰線変化の累積を反映した。一方、棒状地形(試行b, c)とリバーシング型地形(試行d)は、反転型の峰線変化の累積を反映した。

流向変化時の峰線の挙動は、 θ によって異なる (Fig. 6)。 θ が小さい ($\sim 0^\circ$) と、一方向流下と同様にバルハン地形が形成されると推定される。独立型の峰線変化を生じる θ の閾値は $0^\circ < \theta < 45^\circ$ の範囲にある。また、反転型の峰線変化を生じる θ の閾値は $45^\circ < \theta < 90^\circ$ の範囲にある。独立型と反転型のふたつの峰線変化が同時に現われる場合 ($90^\circ \leq \theta \leq 135^\circ$ を含む)、 θ 値がより大きいと反転型を示す部分の比率も大きい。

ま と め

交互二方向流のもとでの孤立砂丘形態を調べる水槽実験をおこなったところ、流向方位差 θ の大きさにより、峰線の短期的挙動と長期的な砂丘形状にバリエーションが存在していることがわかった。

流向が変わる際の峰線の挙動には、既存の峰線と異なる位置に新しい峰線が現われる独立型と、既存の峰線に逆向きのスリップフェイスが形成されそれまでの移動方向と逆方向へ移動する反転型の2種類が認められた。小さな θ ($\sim 45^\circ$) のもとでは独立型、大きな θ ($\sim 180^\circ$) のもとでは反転型が起きやすい。これらの中間の大きさの θ のもとでは両者が共存する。

2分おきに流向を交互させる操作を20周期に渡っておこなった試行では、異なる θ 値のもとで、それぞれドーム砂丘、縦列砂丘、リバーシング砂丘と共通する特徴を持つ地形が形成された。このことから、これら自然界の砂丘は、風向方位差の大きさに依存した峰線挙動様式の違いが、累積的に反映された結果であると考えられる。今後、水理条件等をより精緻且つ多様なものにした水槽実験をおこなうことで、様々な砂丘の形成要因に対する理解が増すものと思われる。

謝 辞

実験遂行に当たり、山口直文氏の補助を仰いだ。土山明氏、増田富士雄氏からの助言は、非常に有用であった。編集委員の横川美和氏、武藤鉄司氏、査読者の池原研氏、関口智寛氏からのコメントは、原稿の改良に役立った。以上の方々に、謹んで御礼申し上げる。

参 考 文 献

- Andreotti, B., Claudin, P. and Douady, S., 2002, Selection of dune shapes and velocities Part 1: Dynamics of sand, wind and barchans. *Euro. Phys. Jour. B*, **28**, 321–339.
- Bagnold, R. A., 1941, *The Physics of Blown Sand and Desert Dunes*. Methuen, London, 320p.
- Bishop, M. A., 2001, Seasonal variation of crescentic dune morphology and morphometry, Strzelecki-Simpson desert, Australia. *Earth Surface Process and Landforms*, **26**, 783–791.
- Dauchot, O., Lechenault, F., Gasquet, C. and Daviaud, F., 2002, “Barchan” dunes in the lab. *Comptes Rendus de l'Academie des Sciences Serie IIb/Mecanique*, **330**, 185–191.
- Endo, N., Kubo, H. and Sunamura, T., 2004, Barchan-shaped ripple marks in a wave flume. *Earth Surface Processes and Landforms*, **29**, 31–42.
- Hersen, P., Douady, S. and Andreotti, B., 2002, Relevant length scale of barchan dunes. *Phys. Rev. Lett.*, **89**, 264301.
- Katsuki, A., Nishimori, H., Endo, N. and Taniguchi, K., 2005, Collision dynamics of two barchan dunes simulated using a simple model. *Jour. Phys. Soc. Japan*, **74**, 538–541.
- McKee, E. D., 1979, Introduction of a study of global sand seas. In McKee, E. D. ed., *A Study of Global Sand Seas*, USGS Prof. Pap., **1052**, 3–19.
- Niño, Y. and Barahona, M., 1997, Barchan-ripples : emergence, evolution and flow-sediment interactions. *Environmental and Coastal Hydraulics B*, **2**, 1037–1042.
- Parteli, E. J. R. and Herrmann, H. J., 2007a, Dune formation on the present Mars. *Phys. Rev. E*, **76**, 041307.
- Parteli, E. J. R. and Herrmann, H. J., 2007b, Saltation transport on Mars. *Phys. Rev. Lett.*, **98**, 198001.
- Sauermann, G., Kroy, K. and Herrmann, H. J., 2001, Continuum saltation model for sand dunes. *Phys. Rev. E*, **64**, 031305.
- Schwämmle, V. and Herrmann, H. J., 2003, Solitary wave behavior of sand dunes. *Nature*, **426**, 619–620.
- Taniguchi, K. and Endo, N., 2007, Deformed barchans under alternating flows: Flume experiments and comparison with barchan dunes within proctor crater, Mars. *Geomorphology*, **90**, 91–100.
- Tsoar, H., 1983, Dynamic processes acting on a longitudinal (seif) sand dune. *Sedimentology*, **30**, 567–578.
- Tsoar, H., Blumberg, D. G. and Stoler, Y., 2004, Elongation and migration of sand dunes. *Geomorphology*, **57**, 293–302.
- Tsoar, H. and Yaalon, D. H., 1983, Deflection of sand movement on a sinuous longitudinal (seif) dune-use of fluorescent dye as tracer. *Sediment. Geol.*, **36**, 25–39.
- Wasson, R. J. and Hyde, R., 1983, Factors determining desert dune type. *Nature*, **304**, 337–339.

(要 旨)

谷口圭輔・遠藤徳孝・関口秀雄, 2011, 交互二方向流れの方位変化量に規制される孤立砂丘形態: 水槽モデル実験. *地質雑*, **117**, 148–154. (Taniguchi, K., Endo, N. and Sekiguchi, H., 2011, Morphology and evolution of an isolated sand dune affected by the intersection angle of alternating bidirectional flows: results of flume experiments. *Jour. Geol. Soc. Japan*, **117**, 148–154.)

移動碎屑物量が少ない場で発達する孤立砂丘地形と流れ環境との関係を調べる水中モデル実験をおこなった. 初期の孤立地形に作用させる流れを交互二方向流としたところ, 峰線の挙動にふたつの類型があることが分かった. 既存の峰線とは異なる位置に新たな峰線が形成される独立型と, 既存の峰線に沿って逆方向のスリップフェイスが形成され, 峰線の移動方向が逆転する反転型である. 両者は二方向流の方位差 θ に対応し, $\theta=45^\circ$ の場合は独立型のみが, $\theta=180^\circ$ の場合は反転型のみが生じた. $\theta=90^\circ$ と $\theta=135^\circ$ の場合, 独立型と反転型とが地形上の異なる部位で同時に進行した. これらの峰線の挙動が長い時間に渡って繰り返されると, その累積的な影響の結果として, 3種類の地形が発達した. これらの地形は, それぞれ天然のドーム砂丘, 縦列(セイフ)砂丘, リバーシング砂丘と共通する形態を持っていた. この成果は, 天然の各種孤立砂丘の形成要因解明に寄与するものである.