

流向の変動する流れによる縦列砂床形の形成

Flume Experiment on the Formation of Longitudinal Dunes in Directionally Varying Flows

池田 宏*・飯島 英夫*・David M. RUBIN**

Hiroshi IKEDA, Hideo IJIMA and David M. RUBIN

I はじめに

砂丘には、その峰が風向に直行する横列砂丘 (transverse dunes)ばかりでなく、平行する縦列砂丘 (longitudinal dunes), あるいは斜行するものなどが知られている。本報告はこのような砂床形の峰の配列が何によって決まっているかを大型水路で調べた結果である^{*)}。

縦列砂丘に代表されるような流向に平行する峰をもつ砂床形の成因としては、1) 2つ以上の異なる方向からの流れによるとする説 (Bagnold, 1941; Fryberger, 1979; Tsoar, 1983), 2) 砂の不足によるとする説 (Mainguet and Chemin, 1983; Wasson and Hyde, 1983), 3) 障害物の後流域への堆積説 (Melton, 1940), 4) 並列する縦渦によるとする説 (Hanna, 1969; Cooke and Warren, 1973; Tseo, 1986), あるいは縦渦を発達させることの多い強風によるとする説 (Glennie, 1970; Folk, 1976) などがある。これらの諸説についてはRubin and Hunter (1985) による討議がある。

堆積学者は堆積物中の構造から古流向を復元することに大変関心を持っているにもかかわらず、水路や風洞を用いた実験で流れの方向が変動することの効果はあまり調べられてこなかった。流向を180°変化させて堆積構造の形成を調べた実験がわずかにあ

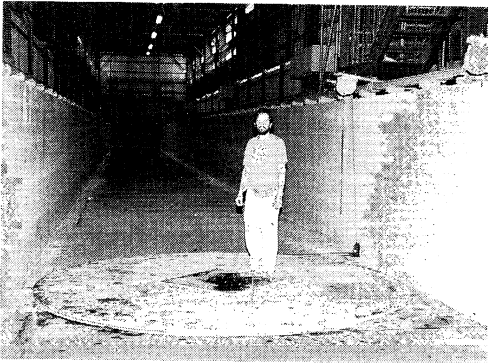
るが、矩形断面の水路を用いている限り、流向を180°以外に変化させることは容易ではなかったためである。

ところが、野外では流向は180°ばかりではなく、様々に変動する。砂漠を吹く風や浅海底の潮流の流向はもちろんのこと、河道内の大規模な渦による河岸近傍での流れの向きも流量変化に対応して変動する。様々な角度に変動する流れを実験的に作り出す方法として、流れの向きを変化させるかわりに、一様な方向の流れの中で、砂を載せた円盤の方を回転させるという方法が考えられる。すでにRubin and Hunter (1987) は風紋の研究でこの方法を用いて良い結果を得たので、水流による砂堆を対象とした本研究でもこの方法を用いることとした。

II 実験の概要

実験に用いた水路は、幅4m、長さ160mの大型水路で、その水路床に、円盤(回転盤)を設置して、それを流水中で時計回り、反時計回りに回転させて、砂床面に対して流向が時間的に変動したのと同様な効果を与えることにした(第1図)。回転盤としては、1) 盤の往復回転が容易にできること、つまり実験では1分や2分毎といった短い時間間隔で盤を回転させることが望まれ、しかも砂床形が安定するまでに要する時間はかなり長いから、最小限の労力

*筑波大学水理実験センター **U. S. Geological Survey, Menlo Park, California



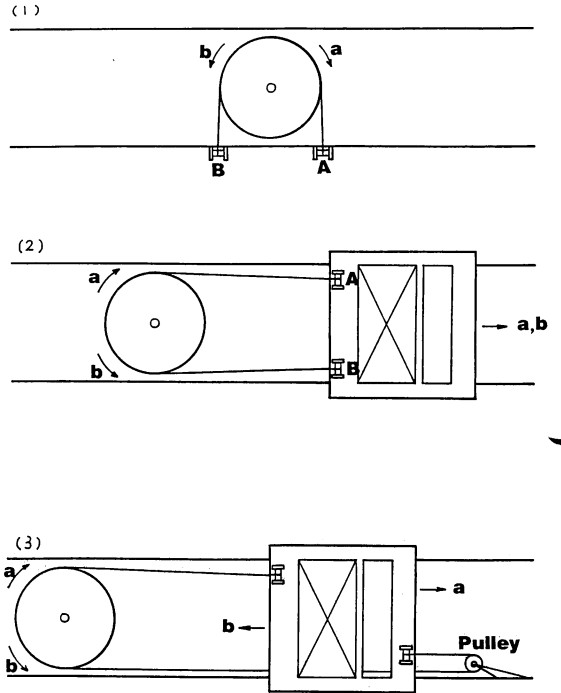
第1図 大型水路に設置した回転盤 (直径3.6m)

で簡単に回転できること、また、2) なるべく大きいことが望ましい。つまり、盤が広いほど、形成される砂床形の数が多くなり、観察・測定精度も向上する。

回転盤の材料は作業し易いことや、切断等が容易であることから木製の防水合板とし、回転盤の大きさは合板の寸法 (規格: 1.82m×0.91m) から直径3.64mの円盤とした。円盤の中心に穴を開け、水路中央の床に溶接した回転軸に盤をセットした。円盤の厚みは6cmである。

回転盤を時計回り、反時計回りに回転させるために、円盤の周囲に直径8mmのワイヤーを2本、互いに逆方向に巻き付けた。ワイヤーの一端を円盤の下流側の台車に固定し、他の一端は台車よりさらに下流側に固定した動滑車を通してから、台車に取り付けた(第2図)。回転盤はこれにより、台車を円盤に近づければ矢印bの方向に、遠ざければ矢印aの方向に、きわめてスムーズに容易に回転することになった。この方法を採用するまでにはかなり苦労した。これについては、飯島(1989)に詳しく述べられている。ともかく、回転盤の回転は監視室から遠隔操作できることになった。なお、回転盤の外周に金属棒を22.5°毎に立て、その先端に目印を付けて、回転角度を読んだ。

実験では、回転盤が砂で10~20cmほど埋まるようにほぼ均一に、水路全体に中央粒径0.6mmの粗砂を敷き均し、一定の流量の水と一定量の砂を供給し続けた。砂堆が形成されるように、給水量は毎秒0.6m³と



第2図 回転盤の操作方法

(1) 手動ウインチ2台で操作——AウインチをフリーにしてBウインチで一方のワイヤーを巻取って回転させ、反対にBウインチをフリーにしてAウインチで他のワイヤーを巻取って逆回転させる。2, 3度回転させただけで疲労してしまった。

(2) 手動ウインチ2台と測定台車で操作——ワイヤーの一端を電動の台車で牽引する。この際、他のワイヤーは送り出す。逆回転のためには、2本のワイヤーを巻取りつつ台車を再び回転盤に接近させてから、もう一方のワイヤーを牽引する。常にワイヤーを巻取ったり、送りだしたりという手間がかかるため、実用的でなかった。

(3) 動滑車と測定台車による操作——ワイヤーを図のように張った状態でその端を台車に固定し、台車の前後移動だけで回転させる。これで成功。

し、下流端の堰高を調整して平均水深30cm、平均流速毎秒45cmとなるようにした。回転盤の回転角度は、45°, 67.5°, 90°, 112.5°, 135°の5通りとした。盤の向きを変化させるために要する時間は回転角度が大きくなるほど増すが、20~40秒であった。流れの方向を変える時間間隔は、2分:2分というように同じ配分を変えた。ただし、流向を135°に変えたひとつのケースでは、1分:2分というように流れが作用す

る時間の比率を流向によって変えて、その影響を調べた。

なお、水流は4mの水路幅内で横断的に一様ではなく、流速が一方の岸寄りで速いということがあったが、このことは砂堆の上・下流の連続などからみて実験結果にはさほど重要な影響を与えていないと思われた。

Rubin and Hunter (1987) による風紋を対象とした実験では、用いた回転盤の直径は1.2mと小さかったが、風紋の波長が小さいこと、しかも風紋の峰が直線的であったために、峰の向きを正確に測定できた。風紋を対象とした実験では、流れの角度を変化させるだけでなく、流れを当てる時間を向きによって変えることによって、その影響を調べたのはこのためである。

ところが、水流によって形成される砂堆は風紋と比較して大きく、直径3.6mの大きな回転盤を用いても盤の上に形成される峰の数は少ない。しかも、生ずる砂堆は三次元的である。そこで、本実験では流れの方向を変える角度の大きさのみを変えて、その影響を調べることとした。つまり、結果として形成される砂堆の峰が流れに平行しているか、直行しているかのみを注目した。

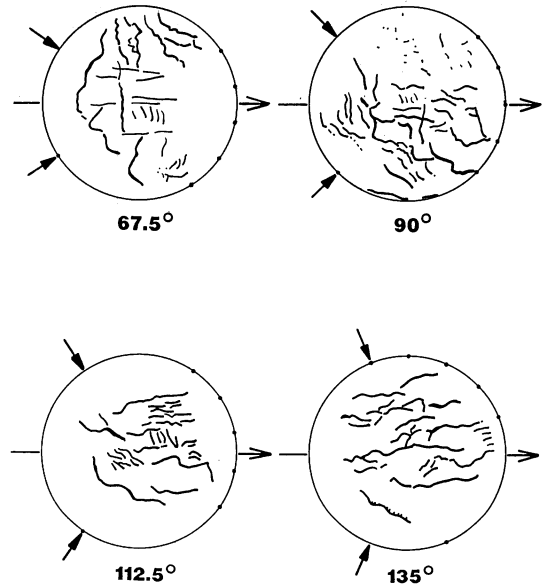
各Runを開始する前に、回転盤の上・下流に形成されている砂堆はそのままにして、回転盤上のみを人力で平滑にしきならした。その後、通水初期の急勾配の流れの影響を除くために水路下流端から給水して、回転盤上に水が湛水している状態で通水を開始した。通水開始後、2分毎に台車を前進・後退させて回転盤を所定の角度に回転させた。通水継続時間は各Run共、7~18サイクル、通水時間は30~75分間であった。たとえば、流向の変化角度90°の実験では、102秒最初の向きにとどめ、ついで18秒を要して回転盤の向きを90°変え、102秒間流れを当てる後、18秒をかけて再び元の方向に戻した。これを繰り返した。通水時間は、この実験条件下で砂堆が安定化するのに十分な時間 (Iseya, 1984) とした。各実験の終わりには、通水中の河床形を保存するために、湛水した後に停水し、徐々に排水した。

III 実験結果と考察

各Run毎に、回転盤上に形成された砂堆の平面形状、とくに砂堆の配列と回転盤の向きおよび回転角度との関係を調べた(第3図)。その結果、回転盤の回転角度(流向を異にする角度)が45°と67.5°の場合には横列砂堆が形成されたが、これが135°では縦列砂堆が形成された。その間の角度では、両者が共存したが、90°の場合には横列砂堆が、112.5°の場合には縦列砂堆が優勢であった。

なお、流向によって流砂量が違う場合を想定して、流れをあてる時間を向きによって1:2に変えた実験(回転角度135°)では、流砂の合成方向に斜行する峰をもつ砂堆が形成された(第4図)。

以上、大型水路を用いた水流による砂堆の形成実験によって、小型の回転盤による風成砂床形(砂漣)の実験結果(Rubin and Hunter, 1987)と極めて類似した結果が得られた。これら2組の実験とも、



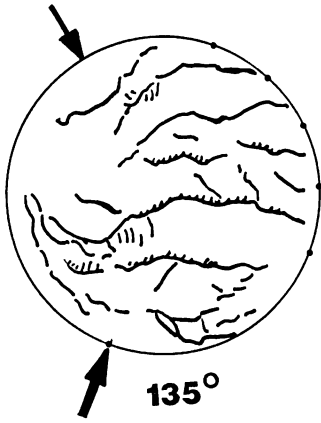
第3図 回転盤の回転角度(すなわち流向の変化角度)によって異なる砂床形

流向の変化角度67.5°では横列砂床形が、135°では縦列砂床形が形成される。その間では両者が共存するが、90°では横列砂床形が、112.5°では縦列砂床形が卓越する。

類の形成にとって本質的なものではないということになる。

IV おわりに

大型水路に回転盤を設置して、砂堆が形成される条件下で行なった実験によって、1) 砂床形の峰は、流れによる総体としての砂礫の移動方向に直行するように形成されること、そのため、2) 流向の変化角度 90° 以下なら横列砂床形が生ずるが、 90° より大きな場合にはいわゆる縦列砂床形が形成されることが明らかになった。つまり、縦列砂床形と横列砂床形とは単に流向の変動角度の大小によって生ずるものであって、力学的には違いがないというのが本実験の結果である。



第4図 流れを当てる時間を流向によって1:2に変えた場合の砂床形
砂堆の峰が長時間流れを当てる方向(矢印の大きな方向)に直行する方向へシフトしている。

砂床形が総体的な流砂の方向に横列の砂床形として発達することを示している。つまり、向きの異なる流れによって形成される砂床形は2つの方向の流砂のベクトルの合成方向に直行する峰をもつ横列砂床形となるのである。

いいかえれば、砂床形は2つの異なる流れに可能な限り横向きになるように形成されるといえる。流向を異にする角度が 90° 以上で両方向からの流砂強度が等しい場合には、2つの異なる流れに共に横列であるようになるためには、2つの流れのベクトルの合成方向に平行することである。その砂床形は、定義の上からは縦列砂床形ということになるが、本質的には横列砂床形と同じ種類の砂床形なのである。

風成の縦列砂丘は風紋や水流による砂堆の配列と同様な仕組みで形成されると考えられるから、縦列砂丘、横列砂丘および斜行砂丘という違いは、単に風向の変動幅の違いに起因していると考えられる。輸送される砂の多少とか塩の集積による凝集性などは砂丘の形状に影響すると考えられるが、本実験の結果からは、それらは縦列、横列といった砂丘の種

注) 本実験を行った経緯を簡単に述べておきたい。Rubinは、この10年間、砂床形と堆積構造との関係を調べる研究を野外調査を中心として進めてきた。近年、流向の変動する場での砂床形と堆積構造の形成に関心を持ち、前述したように、手始めに小型の回転盤を用いて風紋の形成をカリフォルニアの海岸で観察した(Rubin and Hunter, 1987)。その結果に力を得て、Rubinは、規模の大きな水中での砂堆を対象とした実験を考えた。風紋の場合には、ごく簡単な装置で実験ができたが、砂堆となると容易ではない。大きな砂堆をいくつも回転盤の上に作り出すためには大きな装置が必要である。筑波大学水理実験センターの大型水路を用いればこれが可能であることをわれわれと1987年の春に共同実験をしたカリフォルニア大学パークレー校のWilliam E. Dietrichから教えられたRubinは、1987年1月に共同実験を希望してきた。

大型水路は水が濁っているため砂堆が見えないという欠点があるが、もし研究費が取れば共同実験をしようということにした。Rubinは研究費をUSGS, G. K. Gilbert Fellowship Programに申請し、1987年11月はじめて研究費が通った。そこで、1987年12月にわれわれがアメリカ地球物理学連合大会に参加した機会に、サンフランシスコでRubinと会って、実験条件などについての詳細を打ち合せた。

Rubinは1988年7月10日に米国をたって中国に行き、縦列砂丘の堆積構造を調べてから、8月9日に成田へやってきた。それから9月8日に離日するまでの1ヶ月間に、実験を実施した。回転盤の製作は容易であったが、

砂の載った重量3トンの回転盤を台車を利用して回転させることに行き着くまでに日数がかかり、実験を行ったのは9月1—6日であった。実験期間が限られていたため、流向によって流れを当てる時間を変えた実験は1 Runのみにとどまった。野外における縦列砂床形の形成を理解するためには、流向によって流砂強度を変えた実験が今後必要であろう。

謝辞

回転盤の製作および実験にあたって地球科学系の伊勢屋ふじこ助手(水理実験センター)と大学院(地球科学研究科)の小玉芳敬さんにご協力いただいた、ここに記して感謝の意を表します。

文 献

- 飯島英夫(1989):大型水路における回転盤の製作と測定
台車を利用した操作法の考案—縦列砂床形の研究の
ために—, 筑波大学技術報告, 9, 91—95.
- Bagnold, R. A. (1941): *The Physics of Blown Sand
and Desert Dunes*. Methuen, London, 265 p.
- Cooke, R. V. and Warren, A. (1973): *Geomorphology
in Deserts*. California University Press, Los An-
geles, 374 p.
- Folk, R. L. (1976): Rollers and ripples in sand,
streams, and sky—rhythmic alteration of trans-
verse and longitudinal vortices in three orders.
Sedimentology, 23, 649-669.
- Fryberger, S. G. (1979): Dune forms and wind regime.
In Mckee, E. D. (ed.): *A study of Global Sand
Seas. U. S. Geological Survey Professional Paper,*
1052, 137-170.
- Glennie, K. W. (1970): Desert Sedimentary Environ-

- ments. Elsevier, Amsterdam, 222p.
- Hanna, S. R. (1969): The formation of longitudinal
sand dunes by large helical eddies in the atmos-
phere. *Journal of Applied Meteorology*, 8, 874-883.
- Iseya, F. (1984): An experimental study of dune devel-
opment and its effect on sediment suspension.
*Environmental Research Center Papers, University
of Tsukuba*, 5, 56 p.
- Mainguet, M. and Chemin, M. C. (1983): Sand seas of
the Sahara and Sahel—an explanation of their
thickness and sand dune type by the sand budget
principle. In Brookfield, M. E. and Ahlbrandt, T.
S. (eds.): *Aeolian Sediments and Processes*. El-
sevier, Amsterdam, 353-363.
- Melton, F. A. (1940): An alternative classification of
sand dunes—its application to dune history in the
southern high plains. *Journal of Geology*, 48,
113-174.
- Rubin, D. M. and Hunter, R. E. (1985): Why deposits
of longitudinal dunes are rarely recognized in the
geologic record. *Sedimentology*, 32, 147-157.
- Rubin, D. M. and Hunter, R. E. (1987): Bedform
alignment in directionally varying flows. *Science*,
237, 276-278.
- Tseo, G. K. Y. (1986): Longitudinal dunes—their
genesis and ordering. Unpublished Ph. D. thesis.
University of Adelaide, Adelaide, Australia.
- Tsoar, H. (1983): Dynamic processes operating on a
longitudinal (seif) sand dune. *Sedimentology*, 30,
567-578.
- Wasson, R. J. and Hyde, R. (1983): Factors determin-
ing desert dune type. *Nature*, 304, 337-339.