

バルハン型の砂床形態に関する実験

Experiments on barchan shaped morphologies

大阪大学・理学研究科宇宙地球科学 遠藤 徳孝 (Noritaka ENDO)

久保 秀仁 (Hidehito Kubo)

砂村 継夫 (Tsuguo Sunamura)

Department of Earth and Space Science, Osaka University

緒言：

地形学は、自然界に見られるあらゆる地表面形態を研究対象としている。地形は、成因以外に、パターンおよびパターンのスケールなどでも特徴づけられる。リップル（砂漣）は、砂粒子に空気や水の流れが作用して生じる、数センチから数十センチ程度の波長を持つ周期性を持った微地形である。風の流れて生じる砂漣は風紋とも呼ばれる。デューン（砂丘）は、同様に砂粒子で構成され、空気や水の流れて生じるが、規模がリップルより大きいものを指す。デューンの表面上にリップルができることはごく見慣れた景色である。

デューンの形のパターンには様々なものがある。本稿では、バルハン・デューン（図1）と呼ばれるものに的を絞って議論する。バルハン・デューンは上から見ると三日月型をしていることから、三日月型砂丘という日本語名が付いている。

バルハン・デューンは、集団で発生する場合であっても一つ一つは孤立しており、砂の量が限られる岩石沙漠の岩盤上などで発生する。バルハンは風を受けて、三日月の先端が指す方向へ大きさと形をほぼ保って移動する。内側の弧の部分は他のタイプのデューンと同様に安息角（なだれ限界傾斜）を有するスリップフェイスとなっていて、反対側の斜面より急勾配になっている。



図1

類似の地形が水中でも見いだされており総称してバルハンと呼ぶが、明確な方向性があることから、バルハンは流れの向きが一定な場所で発生すると考えられてきた。考えうる単純な流れの系としては、空気の一方向流（一般

にバルハン・デューンができると考えられている沙漠での風)、水の一方向流(河川や海流など)、空気の振動流、水の振動流(沿岸や湖岸などでの波浪)の4つがあるが、あとの2つ、つまり空気でも水でも振動流ではバルハンは発生しないとこれまで考えられてきた。しかし、バルハンが発生している沙漠でも、概ねある特定の風向きが卓越するものの、常に一定の方向に風が吹いているわけではなく、季節によって風向きが逆転する場所もある。

#### 実験：

我々は、バルハン発生に一方向流が必要条件であるかを検証するため、振動流による水成バルハン発生の可能性について実験的に調べた。実験水槽(長さ12 m、幅25 cm、深さ50 cm)に水深25 cmで水を満たし、表面波により底面で振動流を起こして、地形変化を見た。初期条件として、25 cm×25 cmの領域に厚さ3 mmで粒径0.1 mmの砂を敷いた。実験は波の周期(1.5 s~3.0 s)と波高(6 cm~9 cm)の組み合わせを変え、9つのrunを行った。

#### 結果および考察：

いずれのrunでも、バルハン特有の三日月型をした地形が発生した(図2)。

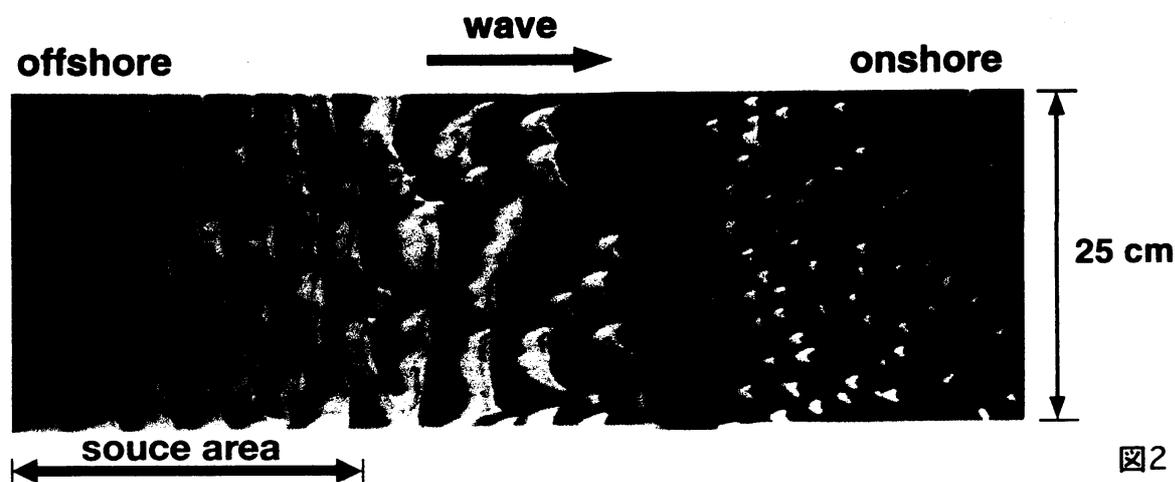


図2

ただし、実験できたバルハンのサイズはリップル程度であるので、バルハン・リップルと呼ぶことにする。実験で生じたバルハン・リップルは、野外で観察されているように、三日月の先端が指す方へ形・大きさを保ちつつ移動する。振動流であるので、表面の砂粒子は交互に向きを変えて動くが、時間平均を取ると輸送速度[1]により波の進行方向に移動する。表面波による底面振動流は完

全には対称的でないため、時間平均を取ると質量輸送が起きる。この向きがバルハン・リップルの移動方向である。一般に流速は、波の進行方向に対して順方向の方が逆方向より速く、9つの run のうち最も対称性の悪いものは、順方向の流速が逆方向に対して約2倍、最も対称性の良いものは1.1倍程度であった。1周期内の流れの向きと継続時間の関係は、順方向に流れる時間が短く、逆方向に流れる時間は長くなる。通常、周期が短いほうが、波の対称性はよい。

実験でできたバルハン・リップルのサイズとおおまかな形を見るために、図3に定義される長さ  $L_t (= L_h + L_b)$  に対する幅  $W_h$  をプロットした(図4)。グラフには野外での観測データ(沙漠及び海底)も含まれている。いくつか例外もあるが、ほとんどの点がおよそ  $45^\circ$  の直線にのる。大きさがオーダーにして4も異なるわりには、かなり統一的な関係にあると言える。リップルとデューンが同じメカニズムでできているかどうかについて、まだはっきりとした説明はないが、バルハン状のものに限って言うと、でき上がった地形の概観は図4が示すように共通している。

より詳しくバルハンの形を見るために、バルハンの弧の丸みに注目した。振動流で発生するバルハン・リップルの形には振動流の周期に対する依存性が見られた。周期が短

い場合はバルハンの外側の弧の部分の直線的になり、周期が長いと外側の弧は

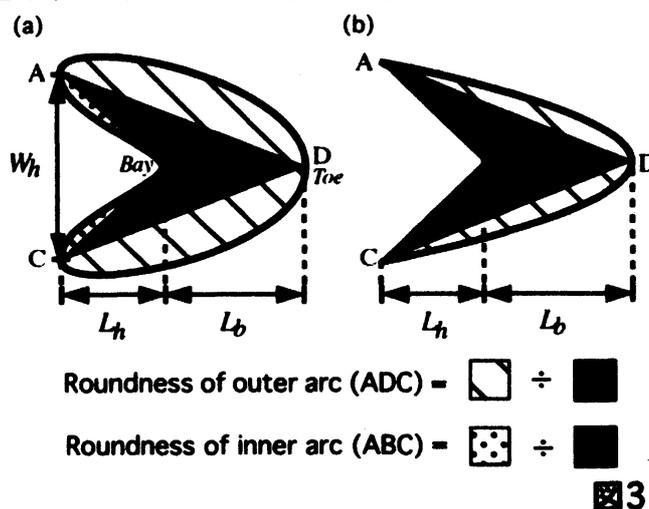


図3

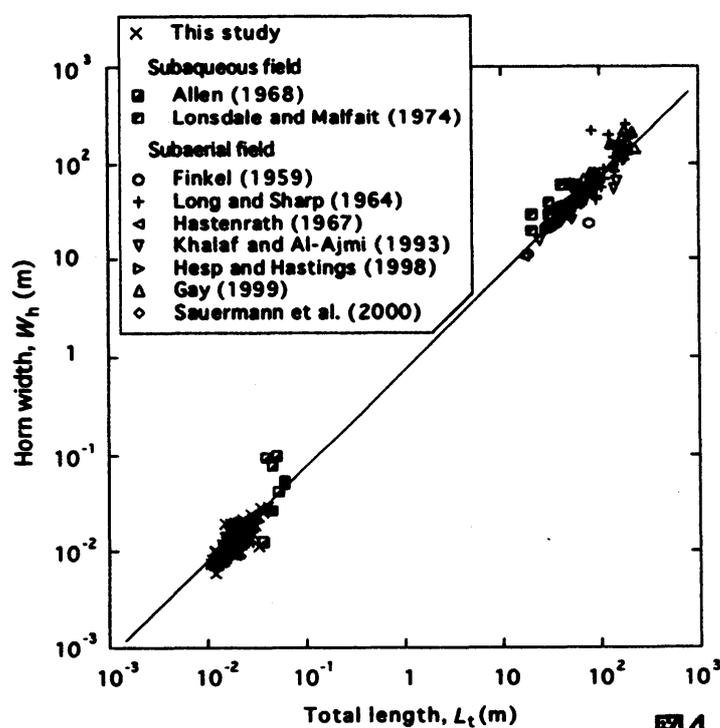


図4

丸みを帯びることがわかった (図5)。弧の丸みを定量化するために、roundness of outer arc ( $R_{out}$ ) と roundness of inner arc ( $R_{in}$ ) を定義する (図3)。パ

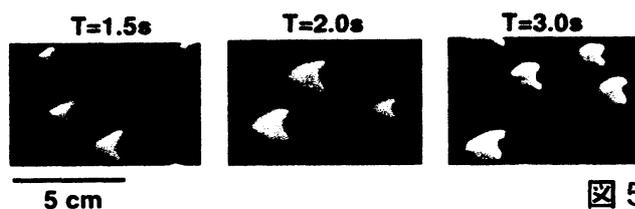


図5

ルハンの先端 (点 A と C) と、内側 (bay 側) 及び外側 (toe 側) の弧の最奥点 (点 B 及び D) を結んでできる四角形 (ABCD) でバルハンを分割する。残された外側の弧を含む部分 (斜線部) の面積を四角形 ABCD の面積で割ったものを  $R_{out}$  と定義する。残された内側の弧を含む部分 (斑点部分) の面積を四角形の面積で割ったものを  $R_{in}$  と定義する。内側の弧が内向きに凸の形状をしているときは (図3b)、斑点部分の面積にマイナスの符号をつけて扱う。外側の弧が直線的なものから丸みを帯びたものになると、四角形に対する斜線部の面積は大きくなるので、 $R_{out}$  の値は大きくなる。

$R_{out}$  対  $R_{in}$  のグラフを図6に示す。グラフには、実験のバルハン・リップル以外に、野外でのデータも含まれている。図6において、水成バルハン (subaqueous field 及び本研究) のうち、一方向流によるとされる自然のバルハンと振動流実験で生じたバルハンとの違いは顕著でない。図6の白抜きの記号で示された風成 (subaerial field) のバルハンと水成バルハンとは、図に示された直線を境におよそ分かれる。まだ水の一方向流の実験や空気流の実験を行っていないので断定はできないが、風成と水成とで形に違いが出るようである。図4のグラフで、長さ  $L_r$  に対する幅  $W_h$  の関係に風成と水成の違いは見られなかったが、輪郭の形にはその違いが現れることはありうる。

一方、バルハンの形状はサイズに依存すると主張する研究者がいる。Sauermann *et al.* は、モロッコでのバルハン・デューンの観測から、サイズの小さいものはスリップフェイスの頂点 (brink point) がデューン自体の頂上 (crest) から離れる傾向にある、つまり、スリップフェイスの頂点より後ろがより高くなる、と指摘している[2]。しかし、同一フィールド内の、同程度のサイズを持つバルハンで一方は brink point と crest が分離し、他方は一致するということがあり[3]、サンプリング方法などにより異なる結果が出るという指摘もある[4]。ちなみに、我々の実験でできたバルハン・リップルは、沙漠の小さめのバルハンよりもさらに数オーダー小さいわけであるが、brink point と crest がはっきり分離しているというものはなかった。

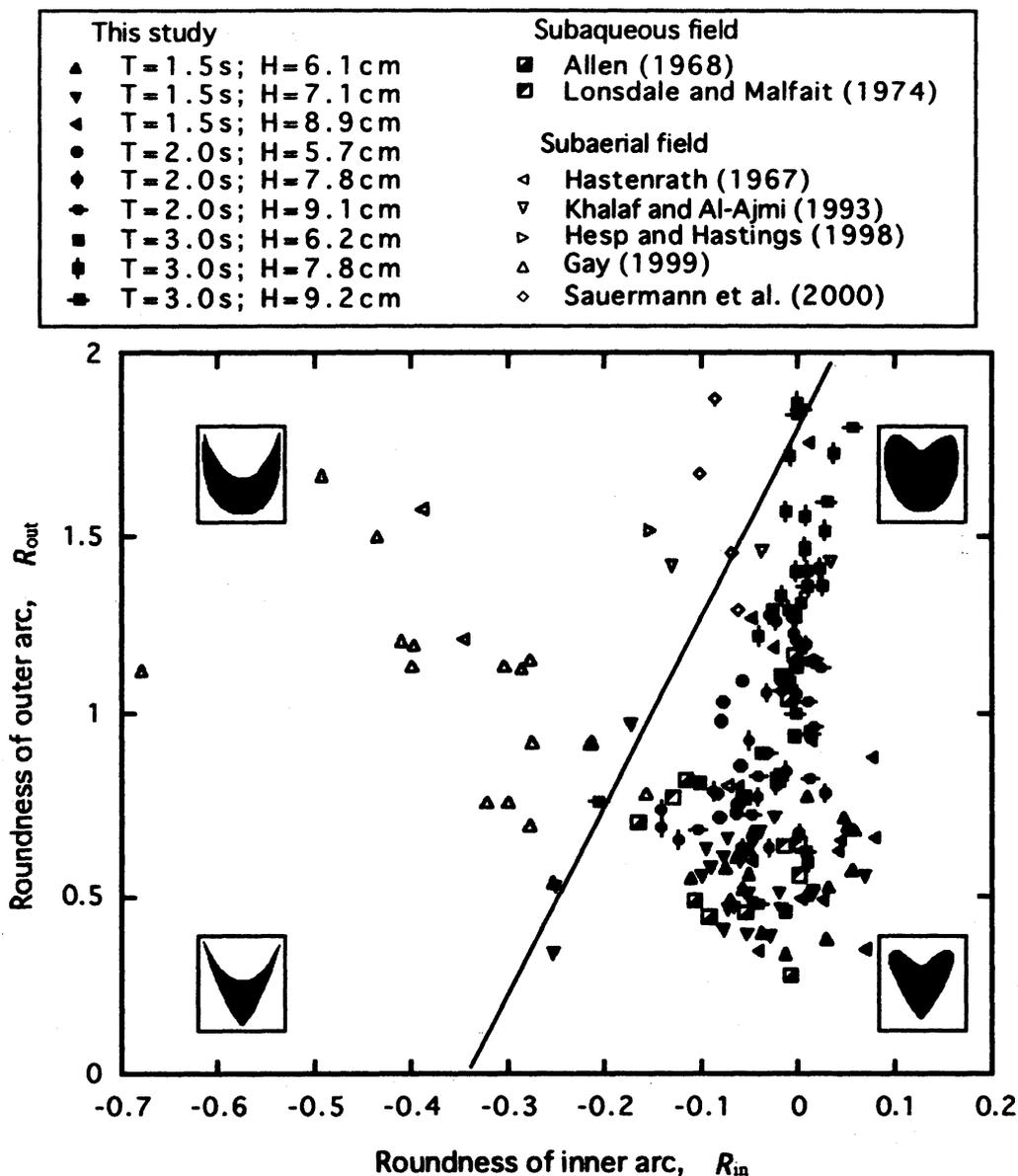


図6

バルハンには存在できる有限の最小サイズがあると指摘する研究者がいる。Andreotti *et al.* はバルハンの高さ  $H$  対ボディ長  $L_b$  (図3参照) のグラフで、直線近似したときに  $L_b$  軸と 10.8 m の点で交わることから、バルハンの最小サイズは  $L_b=10.8$  m であるとしている[4]。このとき、 $H=0$  の薄く平べったいバルハンができることになるが、実際にそのようなバルハンが発見されているわけではなく、あくまで外挿して導かれる結論である。それ以前にも、 $H$  に対する  $L_b$  や  $W_h$  などの関係を直線近似すると、原点を通らないことが指摘されていた[2,5,6,7]。ちなみに、 $H$  対ホーン長  $L_h$  のグラフはほぼ原点を通る[4,5]。10.8 m

以下のボディ長  $L_b$  を持つバルハンは存在しないという、Andreotti *et al.* による沙漠のデータからの予想に反し、我々の実験でできたバルハン・リップルは数センチ程度の大きさである。実験は水中の話だが、同じ水中である海底で100メートル級のバルハンが存在し（図4）、サイズにして4オーダーくらい変化しても依然バルハンは存在することが、今回の実験によって確かめられたことになる。

結言：

振動水流下でのバルハン地形発生の可能性を実験的に調べた。以下の結論が得られた。

- 1) 振動水流下においてリップルサイズのバルハン型地形が発生した。
- 2) 発生したバルハン・リップルの長さ  $L_r$  対幅  $W_h$  の関係は、既往のフィールド調査によるデータと調和的であった。
- 3) 振動水流下のバルハン・リップルの形には周期依存性があり、短周期では外側の弧が直線的で、長周期では丸みを帯びる。

参考文献

1. Longuet-Higgins MS. 1953. Mass transport in water waves. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series A*, **245**: 535-581.
2. Sauermann G, Rognon P, Poliakov A, Herrmann HJ. 2000. The shape of the barchan dunes of Southern Morocco. *Geomorphology* **36**: 47-62.
3. Cooke R, Warren A, Goudie A. 1993. *Desert Geomorphology*, UCL Press, London.
4. Andreotti B, Claudin P, Douady S, 2002. Selection of dune shapes and velocities. Part 1: Dynamics of sand, wind and barchans. *The European Physical Journal B*, **28**: 321-339.
5. Finkel HJ. 1959. The barchans of Southern Peru. *Journal of Geology* **67**: 614-647.
6. Hastenrath SL. 1967. The barchans of the Arequipa region, Southern Peru. *Zeitschrift für Geomorphologie* **11**: 300-331
7. Hesp PA, Hastings K. 1998. Width, height and slope relationships and aerodynamic maintenance of barchans. *Geomorphology* **22**: 193-204.