

バルハン砂丘の衝突実験

(流体による固体粒子の移動で生じる自己組織化—砂の地形学—)

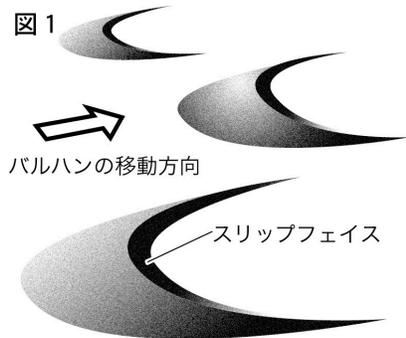
遠藤徳孝 大阪大学理学研究科宇宙地球科学専攻

はじめに

砂浜で見られる砂の模様、風紋は、風に吹かれた砂が移動することでできる。空気の流れだけでなく水の流れによっても、また、粒子の材料も砂だけでなく、有孔虫などの小さな生き物の殻やパウダースノーなどの場合でも、同様に、数センチ程度の周期性を持つ微地形が生じ、総称して砂漣、英語では sand ripple や ripple mark、あるいは単に ripple と呼ばれる。砂漣より大きい砂地形は砂丘と呼ばれる。砂丘は形のパターンにより分類がなされており、砂丘のタイプは砂の量と風の吹き方によっておよそ決まることが、沙漠での現地観測から知られている。砂は、流体に動かされることで、数センチから数十メートル以上の広い範囲にわたって自己組織化を起こし、様々な様相を見せる。

砂丘の分類の中に、バルハン砂丘 (barchan dune) と呼ばれるものがあり、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もある (図 1)。バルハン砂丘は世界中に数多く存在し、火星にも見つかっているが、砂の量があまり多くない岩石沙漠の岩盤上などで砂が集積し形成される。沙漠で典型的に見られるバルハンのサイズは、三日月の先端の間隔が小さいものでも 10 メートル程度で、大きいものは 300 メートルに達する。

高さは、小さいもので 1 メートル程度、大きいものは 30 メートル以上になる。バルハンも砂漣同様、水中 (海底など) でも見いだされている。バルハ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存在し、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。砂丘としては移動が活発であるために、バルハンが押し寄せ化石燃料などのパイプラインを破壊してしまったり、道路や灌漑農地を占拠してしまったりといった被害が起きている。内側の弧の部分には安息角 (なだれ限界傾斜) を有するスリップフェイス (なだれ斜面) になっていて、風上側の斜面に比べ急勾配になっている。バルハンの移動速度は同じ沙漠内で比較すると、サイズが小さいものほど速く、場所によっては年数十メートル位移動するものもある。

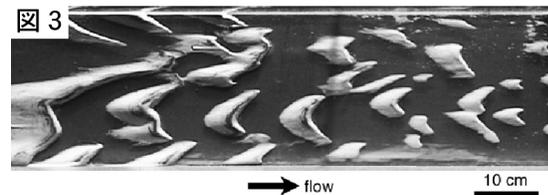
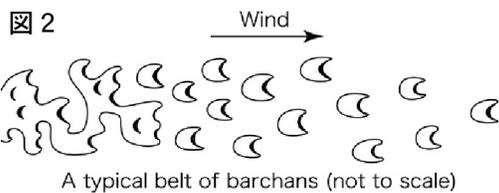


これまでの実験的研究

沙漠におけるバルハンの研究は 50 年以上の歴史があるが、実験によるアプローチがされるよう

になったのは最近のことである[1, 2, 3]。自然界では非常に大きなサイズを持ちうるバルハン砂丘であるが、著者はこのバルハンを、幅数十センチ程度の実験水槽の中で、形成プロセスのレベルから再現することを行なってきた。粒子を動かす媒体を空気ではなく水を用いる理由は、砂粒子の移動速度を小さく制限するのに都合が良いからである。

これまでに、一方向流および振動流の実験を行なった。どちらの流れにおいてもバルハンは形成され、実際の沙漠で見られる belt of barchans[4] (図2) に似た、砂の供給源からバルハンの行進が続くパターンが観察された (図3 に一方向流実験の様子を示す)。実験でできたバルハンの形状を自然のバルハンと比較すると、いくつか例外もあったが、バルハンの高さ h と2つの角の間隔 λ がほぼ $h:\lambda = 1:10$ と相似関係がなりたっていた。



本研究の目的

先に書いた通り、バルハンの移動速度はサイズに依存する。小さく速いバルハンの風下に、大きく遅いバルハンがあれば必然的に衝突する。2つのバルハンが衝突するとどうなるだろうか？衝突する際の振る舞いは、一つの沙漠におけるバルハンのサイズ分布を考える際にも、理解しておくべき問題である。

実験

衝突実験は、一方向流でのみ行なった。実験水槽 (長さ 11 m, 幅 20 cm, 深さ 50 cm) に設置したポンプにより水を循環させ一方向流を発生させる。初期地形として、所定の量の砂を円錐状に、水槽内の2カ所にある距離をおいて盛る。これに流れを作用させ、自然とバルハンが形成された後、それぞれが前進し衝突する様子を観察する。水深 13cm で平均流速は 35cm/s。

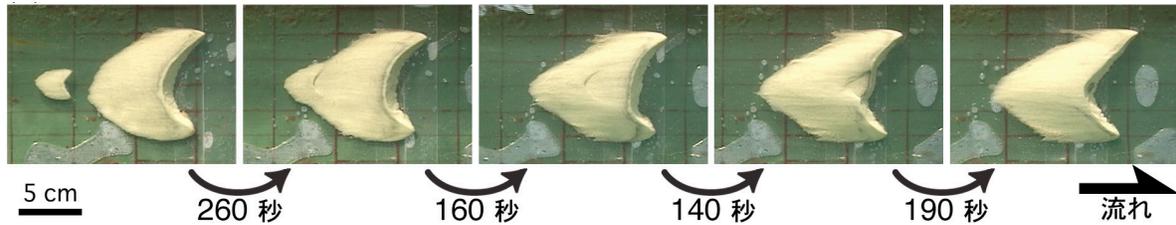
結果

バルハン同士の相互作用には、衝突するバルハンの大きさに依存して、3つのパターンが生じることがわかった。

吸収タイプ (合体)

2つのバルハンが癒着し1つのバルハンになるタイプの相互作用である(図4)。このタイプは、これまで地形学者により漠然と、最もあり得ることとして考えられてきた。実験では、このパターンは2つのバルハンの大きさの違いが大きいときに生じた。

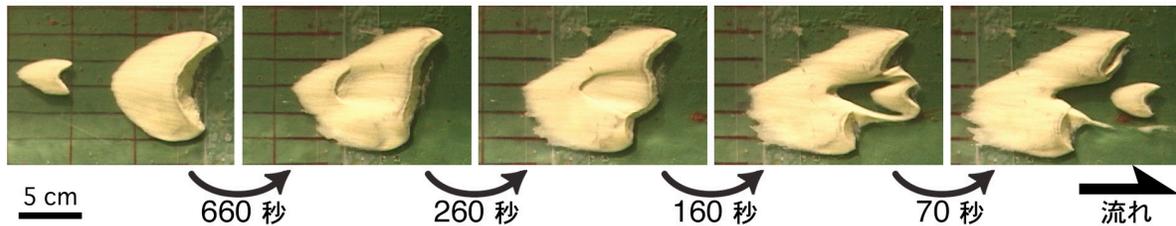
図4



擬似貫通タイプ (突入および放出)

このタイプの衝突の結果生じたと思われるような配置をとるバルハンがペルーの沙漠にあり、Schwämmle 等がコンピューター・シミュレーションによってこのタイプを予想していた [5]。実際の過程を最初から最後まで観察したのは、今回の実験が初めてである(図5)。この擬似貫通タイプは、2つのバルハンの大きさの違いが前記の吸収タイプの場合より小さいときに生じた。

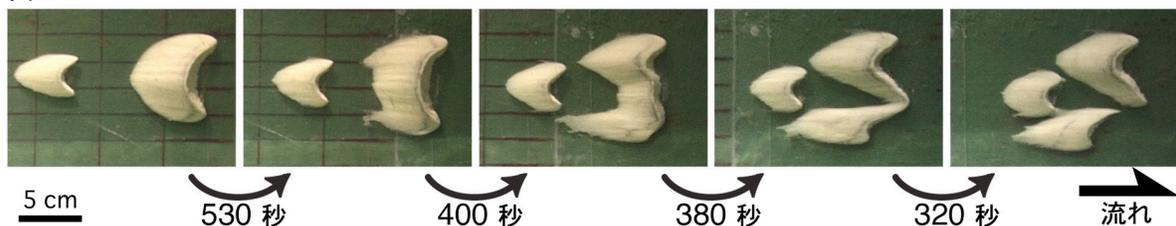
図5



分裂タイプ

このタイプは厳密には衝突はしない。2つのバルハンが接触する前に、下流側のバルハンが分裂する(図6)。このタイプの相互作用の可能性はこれまで考えられていなかった。この分裂タイプは、2つのバルハンの大きさの違いが前記の擬似貫通タイプの場合よりもさらに小さいときに生じた。

図6



考察

ここで見た2つのバルハン間の相互作用は、周囲の流れを通して、浸食・堆積により引き起こされている。バルハンが大群をなして移動する場をバルハン・フィールドと呼ぶが、バルハン・フィールド内のバルハンのサイズ分布や空間分布を予測するには、こうしたバルハン同士の相互作用も考慮しなければならない。衝突の前後で、バルハンの大きさや数が増えるからである。2つのバルハンの相互作用としては上の3つのパターン以外はないと思われるが、衝突のパターンは2者の大きさの関係だけでなく、2つのバルハンの相対的な位置にも依存する[6]。その他種々の理由で、バルハンのサイズ分布や空間分布を厳密に予測することは容易ではないが、バルハンの相対関係と衝突パターンの関係がさらに詳しくわかれば、統計的な概念に基づく予想は可能かもしれない。

謝辞

本稿で述べた実験は、大阪大学理学研究科物理学専攻（サイバーメディア）の勝木厚成氏、並びに、著者と同じ研究室に所属する谷口圭輔氏と共に行なったものであり、二人の協力に対しここに感謝の意を表す。尚、実験の詳細は彼らとの共著論文[7]に書かれている。

- [1] Ninō, Y. and Barahona, M., 1997, Barchan-ripples: emergence, evolution and flow-sediment interactions. In *Environmental and Coastal Hydraulics: Protecting the Aquatic Habitat Vol. B(2)*. IAHR, 1037-1042.
- [2] Hersen, P., Douady, S., Andreotti, B., 2002, Relevant length scale of barchan dunes. *Physical Review Letters* **89**(26): 264301.
- [3] Endo, N., Kubo, H. and Sunamura, T., 2004, Barchan ripples under wave flume. *Earth Surface Processes and Landforms*, **29**, 31-42.
- [4] Bagnold, R.A., 1941, *The Physics of Blown Sand and Desert Dunes*. Methuen: London.
- [5] Schwämmle, V. and Hermann, H.J., 2003, Solitary wave behaviour of sand dunes. *Nature*, **426**, 619-620.
- [6] Katsuki, A., Nishimori, H., Endo, N. and Taniguchi, K., 2005, Collision dynamics of two barchans simulated by a simple model. *Journal of the Physical Society of Japan*, **74**(2) <in press>.
- [7] Endo, N., Taniguchi, K. and Katsuki, A., 2004, Observation of the whole process of interaction between barchans by flume experiments. *Geophysical Research Letters*, **31**, L12503.