

# 回転水槽における砂面に表面流がもたらす地形形成

The Geographical Formation of Sandy Slope Affected by Free Surface Flow in a Rotating Tank

北海道大学工学部環境社会工学系	○学生員	有雅 正修(Masanobu Ariga)
北海道大学大学院工学研究院准教授	正員	山田 朋人(Tomohito Yamada)
北海道大学大学院工学研究院教授	正員	泉 典洋(Norihiro Izumi)
大阪工業大学情報科学部教授	正員	横川 美和(Miwa Yokokawa)

## 1. はじめに

近年惑星探査機によるリモートセンシングや気候モデルの発達に伴い、地球のみならず太陽系の惑星における流体の挙動及びそれに起因する地形形成メカニズムが少しずつ解明されてきた。例えば、惑星の自転に伴って発生するコリオリ力を原因とし、地球や火星の極域において極点を中心とした外向きかつ渦巻き状の風速分布が観測されており、極冠付近の地形形成も影響を受けているものと考えられている<sup>1)</sup>。

図-1 はアメリカ航空宇宙局(NASA)所有の火星惑星探査機マーズ・グローバル・サーバイヤー (Mars Global Surveyor) が撮影した火星北極冠の画像である<sup>2)</sup>。図-1中の白色で示される部分はドライアイスで形成されており反時計回りの渦巻き模様が複数刻まれている事が見てとれる。図-2<sup>3)</sup>は観測された火星北極冠の地形の縦断面図の写真であり、図-1に示す渦巻き模様はステップ地形であることが確認できる<sup>4),5),6)</sup>。これは、氷床の上に堆積したドライアイスが一般的にカタバ風と呼ばれる重力流の一種によって斜面を流下する際に表面に堆積及び浸食されることによって形成される。この重力流は斜面流下に伴って地表面の氷に冷やされ重くなり、氷と接する時間と距離が長くなるためドライアイスの流下速度が加速していくという特徴を有する。カタバ風の風向きは、進行方向右向きに作用するコリオリ力の影響で北極から低緯度方向に吹く際に時計回りとなる。斜面上に、カタバ風と直角の方向に涵養域と消耗域が形成され、らせん構造を描いたステップ地形が形成されることが指摘されている<sup>7)</sup>。ここで1つのステップは上下流端に跳水現象が発生し、連続的な発達を伴う水理学的現象である。また、Isaac et al.は火星北極冠の縦断面図より同地形がサイクリックステップであることを推測した<sup>7)</sup>。なお、サイクリックステップとはステップが上流に伝播する現象のことである<sup>8)</sup>。

またコリオリ力が地形形成に影響を与える別の事例として、アフリカ南部ナミビア西部のナミブ砂漠で発生する砂丘列も挙げられる。大西洋沿岸に沿って平行に発生するこの砂丘列は大西洋からの沿岸流により形成される。沿岸から内陸に向かうに従い、コリオリ力の影響を受け、東西方向の沿岸流が徐々に左向きに曲げられることにより形成されたものだと考えられている。

Kostic et al.は室内実験によりサイクリックステップの再現を可能としたが<sup>8)</sup>、サイクリックステップを含む表面流や水面下における地形形成に伴うコリオリ力を考慮した実験は数少ない。そこで本研究は回転水槽内の砂の斜面上に砂と水を一定流量流下させ表面流を作り、それ

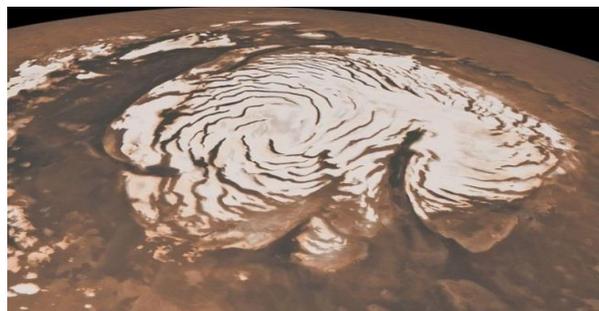


図-1 火星北極冠の写真<sup>2)</sup>

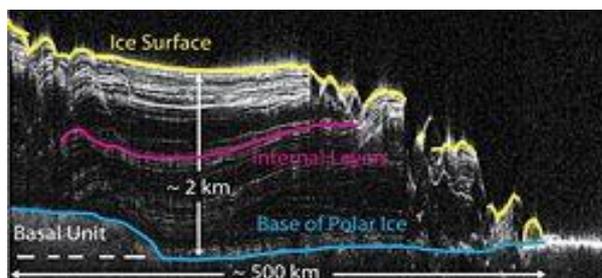


図-2 火星の北極冠の一部の断面図<sup>3)</sup>

による地形形成とコリオリ力との関係を議論する。2章において実験装置及び実験方法の説明を行い、3章及び4章では実験結果の議論を行い、最後にまとめを5章に記す。

## 2. 実験装置及び実験方法

### 2.1 実験装置

コリオリ力を再現するために電動の回転台(時計回り)の上にタンクを設置し、タンク(直径約1m、深さ約0.7m)の底面付近に、端に切りかけを有する円盤を固定したものを実験装置として使用する。円盤(直径0.9m)の中心に一定流量の砂及び水を落下させ、円盤状に砂を堆積させる。落下させる砂と水は次第に堆積した砂の表面上を円盤の中心から外向きに回転の影響を受けつつ流下する。落下する砂は図-3に示す給砂タンクから供給され、一方水は図-3右部に示す貯水タンクから供給される。砂と水はろうとの中で攪拌され、円盤の中心に流下される。

### 2.2 砂の粒径と流量

本実験では表-1に記す珪砂7号を使用する。給砂の流量は約 $3.36\text{cm}^3/\text{s}$ である。給砂タンクから50分連続して砂の流量を計測したところ、49分間は一定量を維持す

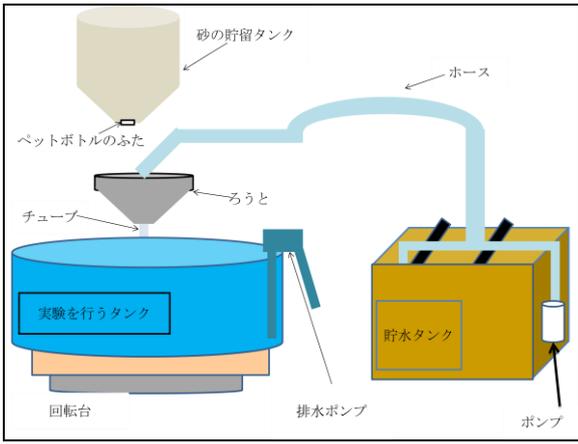


図-3 実験装置の概要図

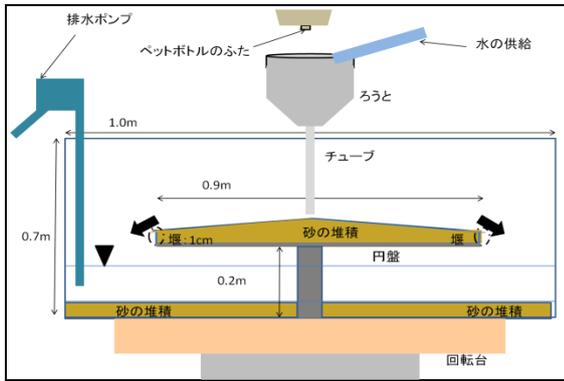


図-4 実験を行うタンクの縦断面図

るといふ精度が確認された。

### 2.3 回転台の回転速度

本実験で使用した回転台は約 800kg までの耐荷重を有するが、回転台上の重量と回転速度の変化の関係を以下のように調べ、得られた結果を図-5 に示す。この図から回転台上の重量が 20kg から 850kg の範囲に変化させると回転速度の差は約 0.28rpm であることが確認された。

### 2.4 供給される水の流量

本研究では水の流量を変化させることによって回転に伴う表面流がもたらす地形形成の特徴を分析するものである。実験対象とした水の流量を計測した結果を表-2 に示す。表-2 が示すように計測回数によらず、流量はおよそ 21.39 cm<sup>3</sup>/s を維持する。

## 3. 常に表面流を維持させる実験

本実験は水路の有無、排水の有無および水面の高さなどの条件を変えて 3 回行った。図-4 に示すように、落下した珪砂は堆積板上で水平になるようにしかれた珪砂上へ堆積していく。

### 3.1 円の中心から全方向に流下する場合

図-6(a)に示すように、珪砂を堆積板の中央部に継続的に堆積させると、緩い傾斜の砂山が形成され、その後落下してくる水の影響により頂部において約 3cm の凹部

表-1 珪砂 7 号の粒度分布

粒径(mm)	0.300	0.212	0.150	0.106	0.075	0.053	0.045
分布(%)	0.4	28.6	49.1	17.1	3.9	0.8	0.1

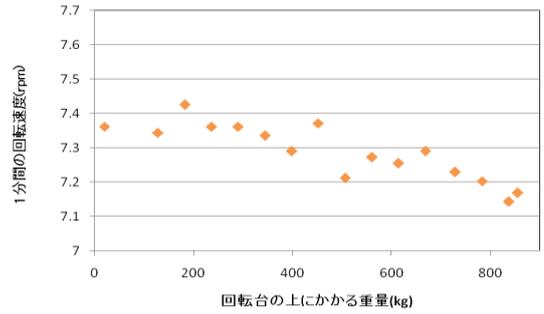


図-5 回転台の重量と回転速度との関係

表-2 水の流量を測定し平均化したグラフ

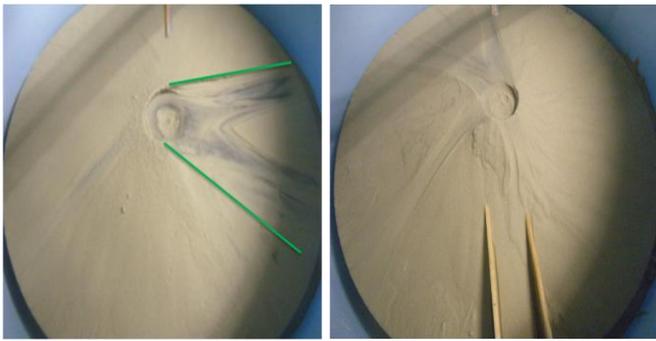
計測回数(回目)	1	2	3	4	5	平均
流量(cm <sup>3</sup> /s)	21.44	21.40	21.44	21.29	21.38	21.39

が形成された。時間変化に伴い、砂山の高さが増加するように砂は堆積するが、一定の高さに達すると図-6(a)の緑線に示すように一方向に頂部の砂の凹部が決壊し、それ以降決壊した箇所に砂と水が流れていく結果となる。図-7 は砂山の斜面の一部の時間変化を示したもので、それぞれ実験開始から(a)198 分後(b)210 分後である。図-7(a)および(b)中の黄線は珪砂および水の流下方向を示している。赤線は時間ごとの砂の挙動を示しており、図-7(a)及び(b)を比較すると、斜面下部に向けて徐々に左向きに曲げられていることがわかる。さらに流下方向左向きの曲線を維持したまま推移しており、これはタンクの回転に伴い発生したコリオリ力に起因するものであろう。ステップは形成されなかったがコリオリ力の効果を確認した。

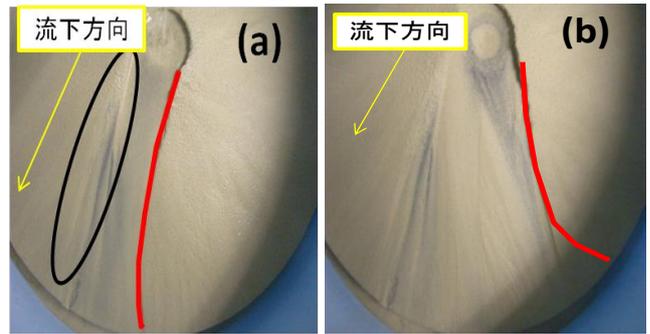
### 3.2 一部に堰を設け水平方向の影響を除いた場合

図-6(b)からわかるように、3 章 1 節と同様に頂部は約 3cm の凹部が形成された。その後、設置した堰内および堰外を問わず砂山の高さが増加するよう砂は堆積した。図-8 は砂山に水路を設置した場合の時間変化を示したもので、それぞれ実験開始から(a)126 分後(b)178 分後(c)実験終了後 (208 分) である。実験開始から徐々に砂が堆積し、図-8(a)において砂山の斜面がなめらかに形成されること、図-8(b)において図内の黒い印で挟まれた部分に観察される砂面の凹みがコリオリ力で右方向に曲げられ、図-8(c)において赤線で囲まれた範囲で示す堰周辺の堆積砂が削られていることが観察される。

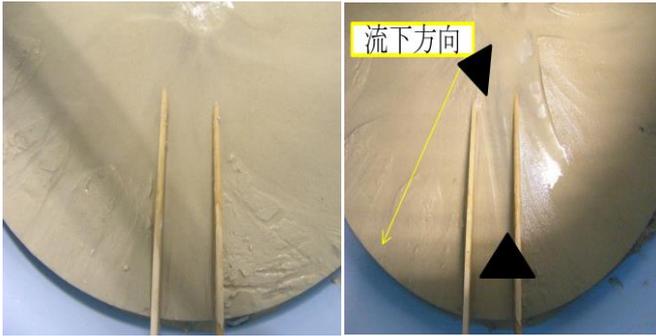
この堰は左右からの斜面上の堆積砂の影響を排除し、コリオリ力の影響が過度に作用することを防ぐために設置した。しかし、図-8(c)のように水路が堰の端に寄せられるという結果を得た。図-9 中の赤線内部に示すように、堆積した砂山が大きくなる実験終了直前において凹部に水と砂が蓄積した。この蓄積物が斜面上に流下する



(a)条件 3.1 (b)条件 3.2  
 図-6 条件 3.1 および 3.2 における実験後の写真



(a)198 分後 (b)210 分後  
 図-7 条件 3.1 における砂山斜面の一部の時間変化



(a)126 分後 (b)178 分後  
 図-8 条件 3.2 における設置した水路内部の時間変化

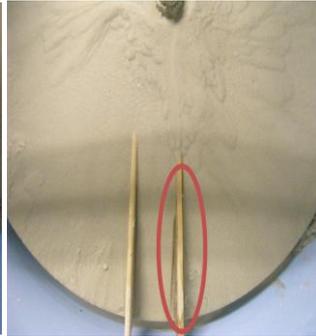


図-9 実験終了後の写真

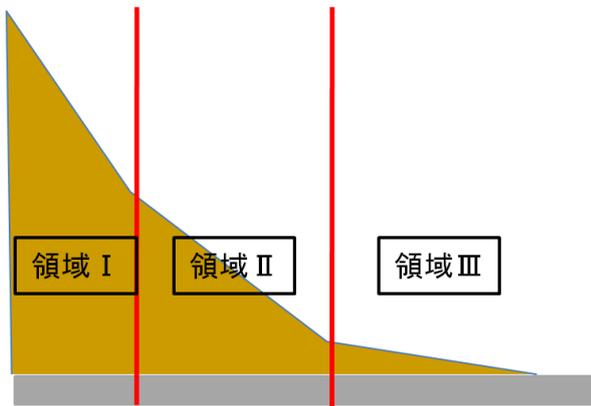


図-10 4章実験における領域区分

ことで発生する流下横断方向の層が発生した。

#### 4. 水位上昇を伴う実験

3章の条件同様に頂部に深さが約3cmの凹部が形成された。本実験では実験中に約 $30\text{ cm}^3/\text{s}$ の水の流量に変化させて行った。その際頂部から下部に向けた水路が8本だったものが3本へと変化するという現象も発生した。図-10は斜面に形成された砂山の縦断面であり、図-11は実験終了後の図である。この実験ではそれぞれ図-11(a)水位上昇終了後の全体の写真、(b)水位上昇終了後の斜面横断方向の層の拡大写真、(c)水位上昇終了後の斜面縦断方向の層の拡大写真、(d)水位上昇終了後一日経過した後に凹部に水と砂を落とした後形成された層の詳細写真であり、4章では図-11(a), (b),(c)について議論を行い、5章で図-11(d)について議論を進める。

#### 4.1 領域Iにおいて形成された地形

図-11(a)内の黄線で示す範囲に領域IIIと比較したときと明らかに急である斜面が形成されている。これは水面が砂山を完全に覆った後、水面下における珪砂の安息角が形成されたことで発生したと考えられる。

#### 4.2 領域IIにおいて形成された地形

図-11(a)内の赤線で示す範囲を拡大したものが図-11(b)である。この砂山の斜面横断方向に形成された層は堆積板の上端の縁から中央に向けて約5cmのところに、堆積板端部において回転方向に、長さ約10cm、高さ約1cmという大きさに形成された。これは、非連続的に形成された。この斜面に垂直方向の層は、堆積板の上端を水面を超えると水面の上昇に伴い水の抵抗力を受け流砂が水面付近で止められ堆積し、その後水面が上昇しさらに堆積し流砂が水面より下には流下しないという過程を繰り返して形成された。

#### 4.3 領域IIIにおいて形成された地形

図-11(a)内の黒丸で示した部分を拡大したものが図-11(c)である。この砂山の斜面縦断方向に形成された層は幅約15cm、層間隔約5cm、高さ約1cmという大きさに形成された。この層は水面が上昇し砂が水面で止められ堆積するという過程を繰り返した後、回転している流体のせん断応力の影響を受け堆積物が水平方向に曲げられ形成されたと推察する。しかし、4章1節の状況では斜面縦断方向の縞模様が形成されなかったことから上記の縞模様についての考察が必要である。



(a) 水位上昇終了後の全体の写真



(b) 水位上昇終了後の斜面横断方向の層の拡大写真



(c) 水位上昇終了後の斜面縦断方向の層の拡大写真



(d) 実験後の砂山を壊した後の断面図

図-11 4章水位上昇を伴う実験終了後写真

## 5. まとめ

本研究は回転水槽を用い、砂で形成された斜面に水と砂で表面流を流し、コリオリ力の影響を考慮した地形形成に向けての実験を行い考察した。そしてステップ及びサイクリックステップの発生を目指した。排水条件の有無、水路の有無という条件を変化させることで3つの実験を行った。本実験では再現を目指した地形の形成は見られなかったが、斜面縦断方向へ連続的に層が形成されるなど今後検討を要する現象が生じた。図-11(d)は凹部決壊後に見られた層であるがこれが堆積した層の蓄積によるものか単に水を流した時の水の流線によって形成されたものかは定かではないが前者であるのならば今後の実験結果測定に非常に有効である。

## 参考文献

1) Howard, A. D. The Role of Eolian Processes in Forming Surface Features of the Martian Polar Layered Deposits. *Icarus*, 144,267-288,2000.

- 2) NASA\_HP([http://www.nasa.gov/mission\\_pages/MROmultimedia/pia13163.html](http://www.nasa.gov/mission_pages/MROmultimedia/pia13163.html))
- 3) NASAHP([http://www.nasa.gov/mission\\_pages/MRO/news/mro20100526.html](http://www.nasa.gov/mission_pages/MRO/news/mro20100526.html))
- 4) Fisher, D, A. If Martian ice caps flow: ablation mechanisms and appearance. *Icarus* 105 , 501-511, 1993
- 5) Fisher, D, A. Internal Layers in an "Accretion" Ice Cap : A Test for Flow. *Icarus* 144, 289-294,2000
- 6) K.H. Kieffer, S.C. Chase, T.Z. Martian, E.D. Miner and F.D. Palluconi, Martian North Pole summer temperatures : dirty water ice, *Science* 194, 1341-1343,1976.
- 7) Isaac B . Smith and John W . Holt . Onset and migration of spiral troughs on Mars revealed by orbital radar. *NATURE* Vol 465, 2010
- 8) Svetlana Kostic et al. Cyclic steps: A phenomenon of supercritical shallow flow from the high mountains to the bottom of the ocean. *Journal of Hydro-environment Reserch* 3 , 167-172,2010