

氷上に形成されるステップ地形

THE FORMATION OF THE STEPS ON ICE BED

北海道大学工学部環境社会工学系 ○学生員 内藤健介 (Kensuke NAITO)
北海道大学工学院教授 正会員 泉 典洋 (Norihiro IZUMI)
大阪工業大学情報科学部 正会員 横川美和 (Miwa YOKOKAWA)
北海道大学工学院准教授 正会員 山田朋人 (Tomohito YAMADA)

1. はじめに

流体によって河床や海底の砂や岩石上に形成される地形に関してこれまで多くの研究がなされてきたが、近年では氷河や地球外惑星上の氷の上にも同様の地形が形成されていることが明らかとなっている。

近年の人類の宇宙進出に伴い、宇宙観測技術も大きく発展してきた。それは地球外惑星の詳細地形さらにその内部構造までもを観測可能にしてきた。特に火星北極の氷冠上に見られるらせん状地溝¹⁾は、その歴史を紐解くことで火星の気候変動などの歴史を紐解くことが可能とされていることに加えて、その地表面に河川や海底等で見られるサイクリックステップ²⁾と酷似した特徴を有していることから、宇宙関連分野のみならず理学、工学的分野からも非常に多くの注目を集めている。今後さらに宇宙開発が進むにつれて宇宙環境下での各種構造物の建設や居住環境の整備が必要となることが予想されるが、そのための基礎的知見としても惑星表層の物理環境に関する情報は工学的にも重要である。

サイクリックステップは急勾配の河床や海底に自由表面や密度界面を有する水の流れや乱泥流によって形成される周期的なステップ状の地形である。一つのステップは上下流端に跳水を伴い、上流端の跳水下流では常流、下流端の跳水上流では射流で流れるという特徴を有する。流れと底面に何らかの擾乱が生じると流速の大きな部分と小さな部分が生じ、その結果底面の侵食速度に場所的な差が生じ、それが発達することで連続したステップ状の地形が形成されていく。これまでステップ地形としては、細砂で覆われた河床や海底で見られる *transportational* なもの³⁾と粘性土や岩盤など侵食が卓越する場で形成される *purely erosional* なもの⁴⁾が知られている。

本研究では氷上に形成される地形の基礎的知見を得るため、流体を氷を張った水路に循環させる実験を行った。結果としてステップ地形が氷上に形成され、温度条件によってそのステップの伝播する方向が決定されることを明らかにした。さらに実験に基

づき、氷上に形成されるステップ地形の定式化を行った。

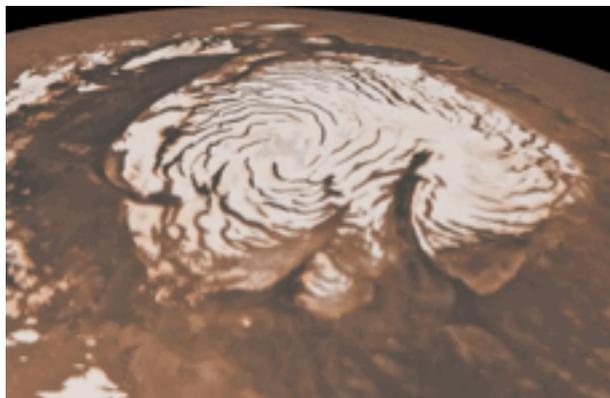


図-1 火星北極冠上に見られるらせん状地溝(©NASA)

2. 実験

火星氷冠上では、カタバ風⁵⁾と関連した密度流がステップとは直行して吹いており、密度流に含まれる水蒸気が河川の土砂の働きをすることで氷上にステップが発達すると考えられる。そこで本実験では不凍液を火星氷冠上の流密層に、水を密度層に含まれる水蒸気に見立て、不凍液と水の混合液を低温下で氷床に流す実験を行った。実験は室温が -50°C から 20°C まで調節可能な低温室ないで行い、十分に液体を冷却すると液体中の水が凝固し、流速の大きな部分に比べて流速の小さな部分ではより多くの氷が堆積することによりステップが発達することを期待した。すなわち、液体中の水が火星密度流中の水蒸気、または河川の土砂の役割を果たすことを期待した。

2.1 実験方法

ポンプを用いて下流タンクから上流タンクへと混合液を循環させ、流量は上流タンクと水路との間に設けたバルブによって調節した。上流タンクにスターラーを設置し、混合液を攪拌するこ

とにより液体の凍結を防いだ。水路はアクリル製で、長さが1.4mもしくは1.6m、幅は2cmとし、端に8cmの堰を設けて水を張ることにより氷床を作製。水路の角度はジャッキによって調節可能とした。フルード数は水路の角度・幅・流量によって調節した。

実験室の温度調節において、約6時間に一度デフロストが働き室温0°C付近まで上昇してしまうため、温度を一定に保つことは不可能であった。

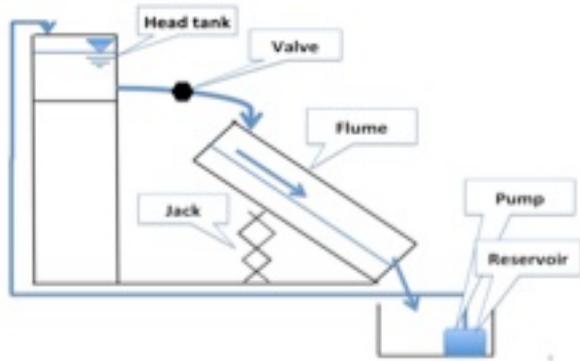


図-2 実験水路

2.2 実験

(1) 実験1

不凍液としてシリコンオイル(SH200, cs20)を用いた。温度条件は室温が7~2°C、液温が1.0~0°Cとした。ステップの形成には長時間の実験が必要であったため、あらかじめ凹みを与えることによりステップ形成の促進を試みた。流体は食紅を用いて赤色に染色した。

(2) 実験2

不凍液は用いず、流体は純粋な水を用いた。温度条件は室温がおおよそ5°C、流体は0.1~0.4°C、さらに今回は水路の底を冷却することにより氷の温度をコントロールした。水路底の温度はおおよそ-10°Cとした。流体は食紅を用いて緑色に染色した。

(3) 結果

実験1の一部のケースにおいて初期擾乱として与えた凹みが下流へ進行する様子が観察された。また実験2の結果として、下流端の影響によって形成されたと推測されるステップが、上流へ伝播していく様子が観察された。

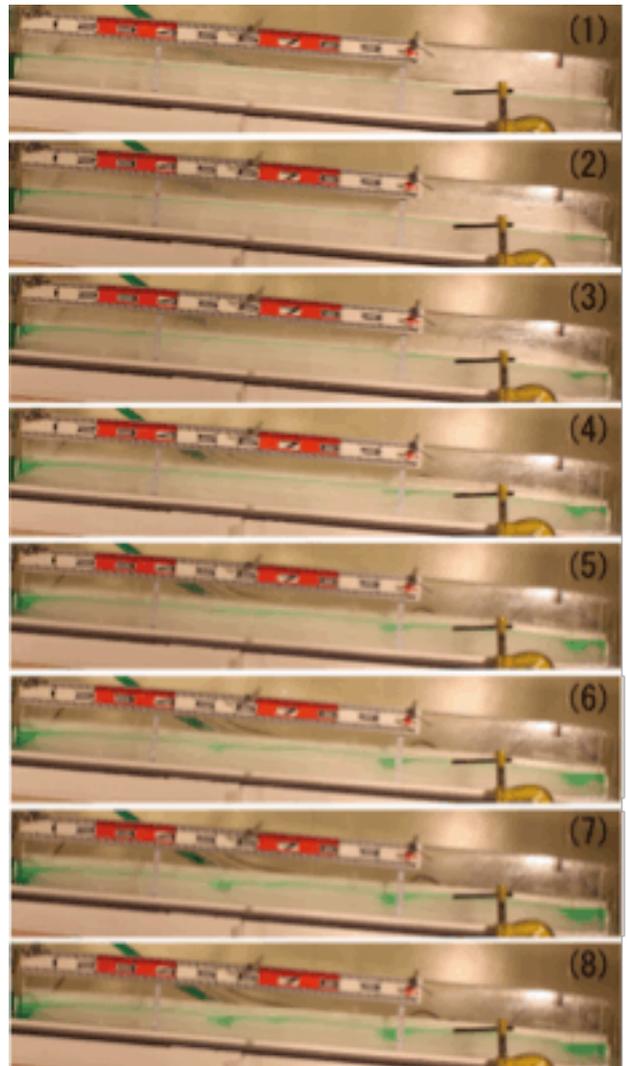
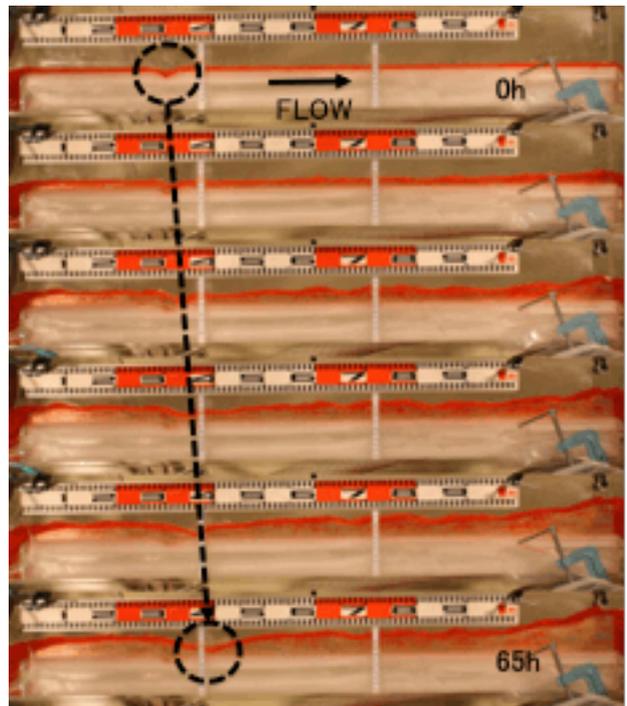


図-3 (上)実験1の結果 実験時間: 約65時間 (下)実験2の結果 実験時間: 約4時間 (Courtesy: Miwa Yokokawa)

2.4 考察

これまで知られているサイクリックステップ、purely erosionalなものもtransportationalなものも全て上流へ伝播する特性を持つことが知られてきたが、氷上に形成されたステップには下流へ進行するものが存在することが実験によって示された。実験1の結果として下流へ進行するステップが観察された。一方温度分布を変えた実験2ではステップが上流へ伝播の様子が観察された。以上の結果からステップの進行方向を決定するパラメータは温度と関連していることが予想される。

3. 理論

3.1 定式化

底面が氷でできた水路上をある流体が流れている状況を考える。流れている流体は水を含む疎水性の液体であり、その融点は水より十分低いとする。氷の厚さの初期値は B であり、その下面で温度が T_a に維持されているとする。一方、流れている流体の層厚は H であり、液面の温度は T_a に維持されているとする。 T_a および T_b の両方、あるいはどちらか一方が十分低温であり水の凝固点を下回っている場合、疎水性液体が含む水は氷の上で凝固し、氷の表面高さを増加させる。一様勾配 S の斜面から測った氷の表面高さを Z とする。すなわち図4のような状況を考える。ここで $F_s(Z)$ および $F_f(Z)$ はそれぞれ氷表面および流体底面の熱フラックスを表し、“ \sim ”を持つパラメータは有次元であることを表す。

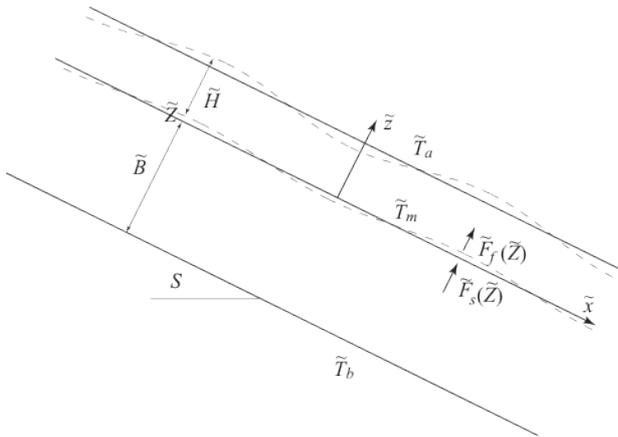


図4 流れの概念図

サイクリックステップは水平方向の長さスケールが鉛直方向の長さスケールに比較して卓越した現象³⁾である。また氷の形状変化の時間スケールは流れや温度の時間変化のスケールと比較して十分に大きいことから流れや温度変化の時間微分項を無視し、氷の形状の時間微分項のみ考慮する準定常の仮定を用いる。そのとき流れは次の浅水流方程式で記述できる。

$$\frac{\partial \tilde{U} \tilde{H}}{\partial \tilde{t}} = 0 \quad (1)$$

$$\tilde{U} \frac{\partial \tilde{U}}{\partial \tilde{t}} = -g \frac{\partial \tilde{H}}{\partial \tilde{x}} - g \frac{\partial \tilde{Z}}{\partial \tilde{x}} + gS - \frac{C_f \tilde{U}^2}{\tilde{H}} \quad (2)$$

ここで U は水深平均流速、 H は水深、 Z は氷表面の高さ、 S は斜面勾配、 C_f は底面摩擦係数、 t は時間、 x は流下方向座標である。

氷と流体の熱伝導方程式はそれぞれ次のようになる⁴⁾。

$$\rho_s c_s \frac{\partial \tilde{T}}{\partial \tilde{t}} = k_s \left(\frac{\partial^2 \tilde{T}}{\partial \tilde{x}^2} + \frac{\partial^2 \tilde{T}}{\partial \tilde{z}^2} \right) \quad (3)$$

$$\rho_f c_f \left(\frac{\partial \tilde{T}}{\partial \tilde{t}} + \tilde{u} \frac{\partial \tilde{T}}{\partial \tilde{x}} + \tilde{w} \frac{\partial \tilde{T}}{\partial \tilde{z}} \right) = k_f \left(\frac{\partial^2 \tilde{T}}{\partial \tilde{x}^2} + \frac{\partial^2 \tilde{T}}{\partial \tilde{z}^2} \right) \quad (4)$$

ここで ρ_s および ρ_f はそれぞれ氷と流体の密度、 c_s および c_f はそれぞれ氷と流体の比熱容量、 k_s および k_f は氷の熱伝導率、 u および w はそれぞれ流下方向と水深方向の流速成分、 T は温度、 z は水深方向の座標である。

氷の高さの変化は次の式で表す⁵⁾。

$$\rho_s h_{th} \frac{\partial \tilde{Z}}{\partial \tilde{t}} = \tilde{F}_s(\tilde{Z}) - \tilde{F}_f(\tilde{Z}) = k_s \frac{\tilde{T}_m - \tilde{T}_b}{\tilde{Z} + \tilde{B}} - k_f \frac{\tilde{T}_a - \tilde{T}_m}{\tilde{H}} \quad (5)$$

ここで ρ_s は氷の密度、 h_{th} は潜熱である。上式は氷表面に下から入ってくる熱フラックス $F_s(Z)$ と上から出て行く熱フラックス $F_f(Z)$ の差によって氷の高さが変動することを意味している。

3.3 考察

式(5)からステップの進行方向を考察する。まず右辺第1項の唯一の変数 Z は B と比較して十分小さいとし無視することにより、右辺第1項は定数とみなす。右辺第2項において、

- $T_a - T_m < 0$ の場合(実験1)
右辺第2項は常に正となる。射流部、すなわち水深 H が小さな部分では Z の増加率は高くなり、反対に常流部、すなわち水深 H が大きな部分では Z の増加率は小さくなる。その結果ステップは下流へと伝播する。
- $T_a - T_m > 0$ の場合(実験2)
右辺第2項は常に負となる。射流部では Z の減少率は高くなり、反対に常流部では Z の減少率は小さくなる。その結果ステップは上流へと伝播する。

3.2 実験値の適用

これらの方程式に準定常の仮定、無次元化、座標変換を導入し、さらに実験値を適用することにより図5に示す結果を得た。スペースの都合上、詳しい導出は割愛する。これは一波長上の氷床と水深の変化を表しており、ステップ状の形状が再現されている。すなわち本理論の正当性を示すものである。

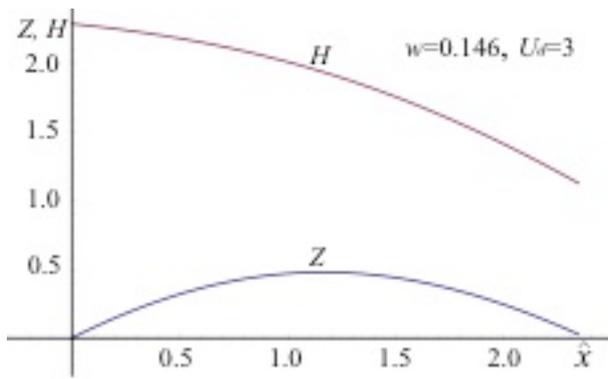


図-5 理論に実験値を適用することにより得たステップ

4. 結論

本研究によって得られた主たる結論は以下のとおりである。

- ・氷上のステップの形成過程を浅水流近似を用いた流れの方程式と熱輸送の方程式を用いて定式化した。それらの方程式を解くことで、上流のみならず下流に進行する氷上のステップ解が存在することが示された。
- ・実験で得られた値を理論に適用したところ、実験結果と良好な一致を示した。これは理論と実現象の整合性を示すものである。
- ・氷上に形成されるステップ地形の場合、その進行方向は外気、流体、氷の温度分布によって決定され、外気温が融点より低い場合、氷上には下流に進行するステップ地が形成され得る。外気温が融点より高い場合、氷上には上流に進行するステップが形成される。
- ・火星北極感においては、ステップ地形は氷冠上を流れる密度流によって形成されるものであり、流速が大きく水深が小さな部分で氷が水蒸気へと昇華し、一方流速が小さく水深が大きな部分では水蒸気が氷へと凝固し氷上に沈殿することによりステップ地形が形成され、かつ上流へ進行していると考えられる。

謝辞

共同研究者である大阪工業大学情報科学部の横川美和教授および学生諸君、筆者の指導教官である北海道大学工学部河川・流域工学研究室の泉典洋教授、山田朋人准教授、および本実験を行うにあたり助力を頂いた同研究室の学生諸君、また実験施設を提供して下さいました北海道大学低温科学研究所に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Smith, I. B. and Holt, J. W.: Onset and migration of spiral troughs on Mars revealed by orbital radar, *Nature*, 465, 450-453, 2010.
- 2) Kostic, S., Sequeiros, O., Spinewine, B. and Parker, G.: Cyclic steps: A phenomenon of supercritical shallow flow from the high mountains to the bottom of the ocean, *Journal of Hydro-environment Research* 3, 167-172, 2010.
- 3) Parker, G. and Izumi, N.: Purely erosional cyclic and solitary steps created by flow over a cohesive bed. *Journal of Fluid Mechanics*, 419, 203-238, 2000.
- 4) Taki, K. and Parker, G.: Transportational cyclic steps created by flow over an erodible bed. Part 1. Experiments. *Journal of Hydraulic Research*, 43 (5), 488-501, 2005.
- 5) Yamaguchi, T.: 南極の接地逆転層とカタバ風. *新潟応用地質学会誌*, 61, 9-11, 2003.
- 6) Faghri, A. and Zhang, Y.: Transport Phenomena in Multiphase Systems (Chapter 6: Menting and Solidification, Chapter 7: Sublimation and vapor deposition), *Elsevier*, 2006.