

重力風による氷床上でのステップ地形の形成に関する実験的研究

An experimental study of steps on ice bed by the gravity wind

北海道大学工学部環境社会工学系	○学生員	角田 堯史	(Takashi SUMIDA)
北海道大学大学院工学院	学生員	内藤 健介	(Kensuke NAITO)
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)
北海道大学大学院工学研究院准教授	正 員	山田 朋人	(Tomohito YAMADA)

1. はじめに

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地形である¹⁾。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空間的な差が生じ、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る。

氷河や火星の北極冠上など氷の上にもステップ地形と酷似した地形が存在する。火星の北極点から螺旋状に広がった地溝(スパイラルトラフ)は極点から外方向に吹く風(滑降風、カタバ風)に対して直交して発達しており、その内部構造は、流れ方向に対して直交した波峰線を持つ界面波の一種であると推測される。また、スパイラルトラフの内部構造は高解像度のレーダー反射画像を用いて解析されており、界面波が上流方向に伝播しながら堆積していることが示されている²⁾。したがって火星北極冠のスパイラルトラフがサイクリックステップであるとすれば、地球上に形成されるサイクリックステップのアナログとして形成機構を推定することが可能である。

氷床上の界面波について、これまで横川らによって実験が行われてきた³⁾。それは水路に水を入れたものを凍らせて氷床を作り、その上に流体を流すものであった。流体を火星北極冠におけるカタバ風に見立て、凝固する水をカタバ風中の水蒸気と見立ててステップの形成を試みたもの。そこでは、水深が深いほど波長の長いステッ

プが形成され、フルード数が大きいほど形成されるステップの数が多くなることがわかった。さらに氷、流体、周囲気体間の温度分布によってステップが発達する方向が異なることも明らかにされており、氷<流体<周囲気体の場合には上流へ、氷<周囲気体<流体の場合は下流へ発達することが示された。さらには内藤らによって理論解析が行われており、温度分布によるステップの伝播方向の変化、氷表面の高さ、氷上を流れる流体の流速などの実験によって得られた値は、解析によって得られた理論値との良好な整合性が示された⁴⁾。

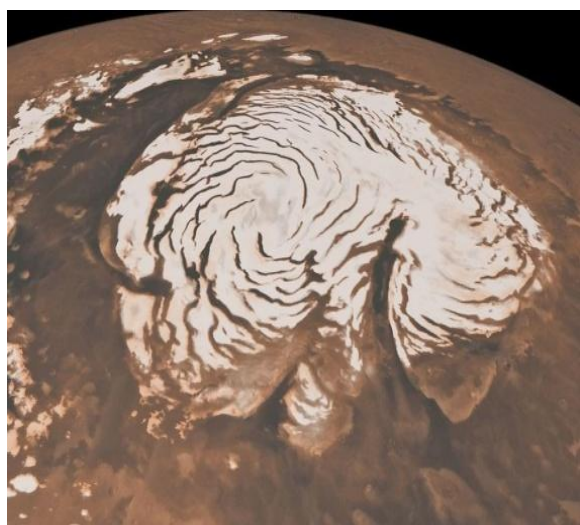
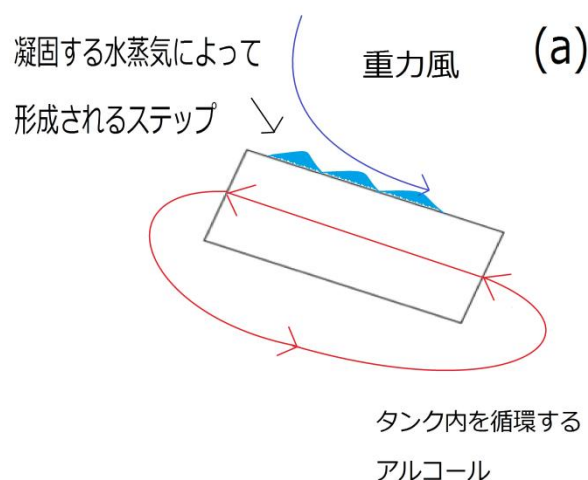


図 1 火星北極冠のスパイラルトラフ (NASA
<http://www.nasa.gov>)

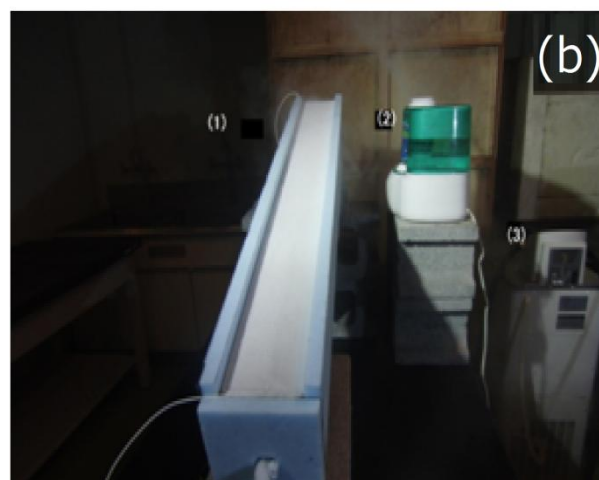


図 2 実験の概略図 室温とタンク上面の温度差によって重力風が発生し、凝固する水蒸気によってステップが形成される。
(b)実験装置全景(1)アルミニウム製タンク(2)加湿器(3)恒温循環装置

これまでの実験は水路に張った氷とその上を流れる流体という代替物を用いたものであるが、今回筆者らが行った実験は冷却されたアルミニウム製タンクの上面に、室温とタンク上面の表面温度との差によって生じる重力風におけるステップの形成を試みたものである。これは、火星の北極冠においてカタバ風が吹く環境により近づけた実験を行うためである。2章では実験方法を、3章では結果と考察、4章では今後の予定を記す。

2. 実験方法

(1) 実験装置

本実験は北海道大学低温科学研究所の低温実験室にて2013年8月19日～2013年9月1日の14日間行われた。図2(a)に実験の概略図を、図2(b)に実験装置の全景を示す。実験装置は、アルミニウム製のタンク(長さ100cm、幅10cm、高さ10cm)を用い、氷床を模すために、恒温循環装置から約-15℃に冷却したアルコールをタンク内に循環させて、タンク上面を冷却させた。そこに室温とタンク上面の温度との差によって重力風が生じ、水蒸気が凝固してタンク上面に堆積する。また、空気中の水分量をできるだけ多くするために加湿器を使用し、タンクの側面、底面は断熱材で覆っている。

(2) 温度条件

火星や南極等の寒冷地域の環境を再現するために、-20℃まで室温をコントロールできる冷凍室で実験を行った。しかし、室温をコントロールするためには冷凍室内で冷凍機を作動する必要がある、そこから発生する冷氣によって重力風の風向等に影響を及ぼす懸念があった。そこで、冷凍機は作動させずに室温は自然に変化させるものとし、重力風に影響を及ぼす要因となるものを排除した。

(3) 測定方法

温度の推移、室温とタンク上面の温度との関係を確認

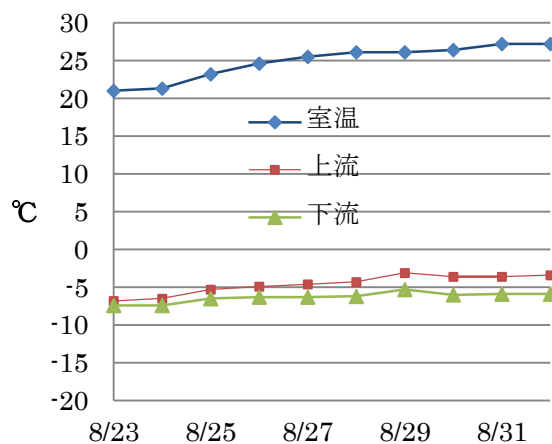


図3 データロガーで収集した室温、タンク上面の温度(上流端と下流端)の8/23～9/1の一日ごとの変化

室温とタンク上面の温度(上流端と下流端)の温度差はほぼ一定だった。

するために室温とタンク上面(上流端と下流端)の温度を測定した。タンク上面の温度は、上流端と下流端に温度測定装置を設置して計測した。また、同じ装置をタンクから離して設置し、室温を計測した。それらの温度をデータロガーで15分ごとに測定した。一方で、タンク内を流れるアルコールの温度の記録も行った。さらに、タンク上面に形成される地形の変化や伝播方向等を確認するためにカメラで20分ごとに撮影した。

3. 結果と考察

(1) 温度変化

図3に示すグラフは、8月23日～9月1日の室温、タンク上面(上流端と下流端)の一日ごとの温度変化である。実験を通じて、恒温循環装置の排気によると思われる室温の上昇が生じ、それに伴ってタンク上面の温度も上昇した。室温とタンク上面の温度はほぼ一定の温度差で推移し、特に室温とアルコールの温度差が一定だった。

(2) ステップの形状と発達過程

図4(a)はタンク上面の中央付近から上流方向へ撮影したものであり、図4(a)の中央部と左下の赤線で囲んだ部

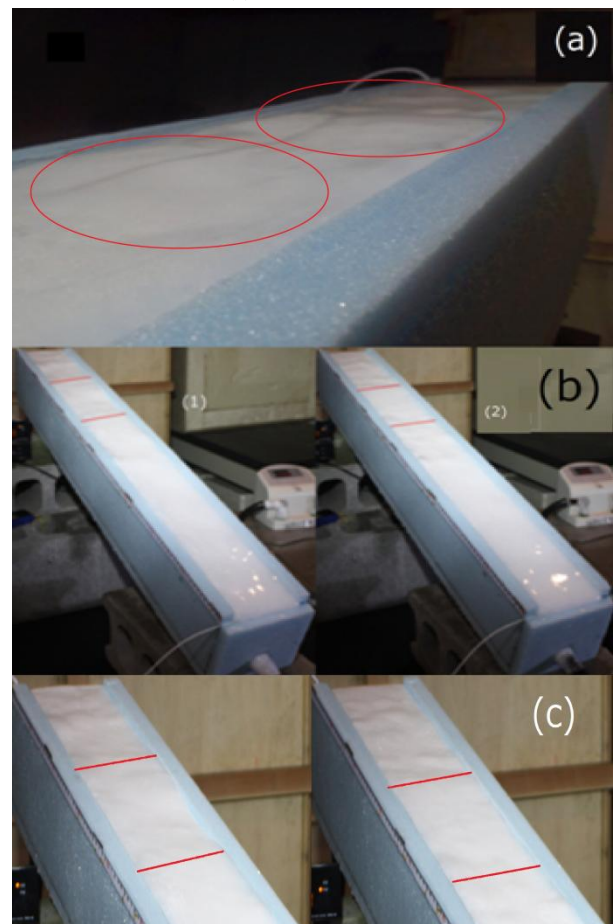


図4 (a)タンク上面の中央部に形成された2つの大きなステップ

(b)図4(a)のステップが下流へ伝播する様子(1)7日目の写真(2)10日目の写真

(c)図4(b)のステップの伝播部分の拡大図

分に2つの大きなステップが確認できる。また図4(b)は実験7日目の写真と10日目の写真を比較したもので、図4(a)の2つのステップが下流に伝播することを示したものである。図4(b)の赤線はそれぞれの写真のステップの最も氷が高い位置を示しており、図4(c)に拡大図を示す。

実験開始時の氷表面が平坦な状態から、中流部に生じた凹凸が発達していき、のちに図4(a)の大きな2つのステップとなり、双方とも波長は20~25cmだった。また、図4(b)、4(c)のように下流に2~5cm伝播した。そして室温が26℃を超えると図5のように氷の形状変化、伝播は見られなくなり、タンク上面に張る氷に凹凸が見られなくなった。

サイクリックステップは、堆積量がステップの下流側より上流側のほうが大きいために上流へ伝播するのだが、今回は図4(b)のように下流へ伝播した。写真を拡大して分析すると、ステップの斜面が上流側より下流側のほうが急であり、下流側へ多く堆積していることが示されている。以前の実験や理論解析では温度分布の違いによって伝播方向が変わることが示されているので、今後は室温やタンク表面等の間の温度分布を変えた実験が必要になってくる。

4. 今後の予定

今回の実験ではタンク上面の各地点における氷表面の高さを計測しなかったため、今後の実験では氷表面の高さを計測できるようにカメラの位置などを考慮して行う。その氷の高さの計測を踏まえて、ステップの波長や伝播方向、氷高さの変化などを分析する。それを実現するために、タンク上面に氷を張る幅を狭くした実験をする予定である。

さらには過去の実験や理論との整合性を確認し、タンク上面に吹く重力風の流動特性水蒸気の熱保存等を考慮して重力風によるステップ地形の形成を定式化していく。

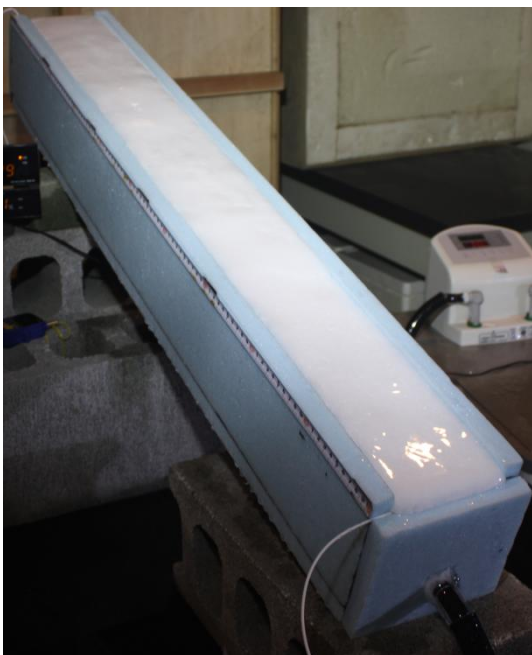


図5 形状変化が見られなくなった後の氷表面

謝辞

本実験を行うにあたり助力を頂いた北海道大学工学部河川流域工学研究室の学生の皆様、また実験施設を提供して下さっ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) 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.
- 2) Smith, I.B. and Holt, J.W.: Onset and migration of spiral troughs on Mars revealed by orbital radar, *Nature*, 465, 450-453, 2010.
- 3) 横川美和, 泉典洋, 内藤健介, 山田朋人, Ralf GREVE: 氷上のステップ地形に関する実験的研究, 水工学論文集 Vol. 69, No. 4, I_1129-I_1134, 2013
- 4) 内藤健介, 泉典洋, 横川美和, 山田朋人: 下流進行する氷上のステップ地形, 水工学論文集 Vol. 69, No. 4, I_1123-I_1128, 2013.