

火星北極冠におけるサイクリックステップに関する実験的研究

An experimental study on cyclic steps on Mars north polar cap

北海道大学工学部環境社会工学系 ○学生員 内藤健介 (Kensuke Naito)

大阪工業大学情報科学部 清水裕貴 (Hiroki Shimizu)

北海道大学工学院教授 正会員 泉 典洋 (Norihito Izumi)

大阪工業大学情報科学部 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

近年のリモートセンシングテクノロジーの発達に伴い、惑星の地表面上に様々な特徴的地形が観測されてきた。特にマルチビームによる火星の北極冠に見られる氷冠¹⁾の観測からその内部の堆積構造が徐々に明らかになり、多くの関心を集めている。

氷冠上には地球の南極等で見られるカタバ風に関連した密度層が流れていると考えられており、トラフの表面ではその流れと直角方向にステップ状の地形が見られる(図-1)。ステップのスケールは長さ約50km、高さ100~200mで、さらにトラフ内部の氷層はこれらのステップの上流への移動の痕跡を示している¹⁾。これらの特徴から、トラフにおけるステップは密度流によって形成されたサイクリックステップ²⁾であると予想される。

本研究ではこの仮説をモデル化した2回にわたる実験を北海道大学低温科学研究所にて行い、火星の氷冠上におけるステップ発達のメカニズム解明を目指した。

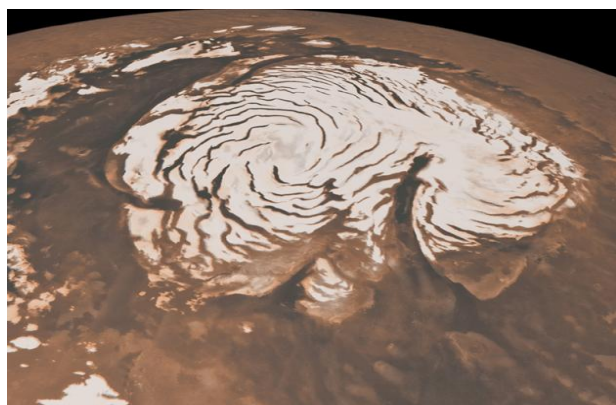


図-1 火星の北極冠のイメージ³⁾

火星極冠の氷層上に何らかのきっかけで凸凹が生じると、その上の流れに流速の大きい部分と小さい部分が生じる。高速部では氷床の氷が昇華によって侵食され、逆に低速部では大気中の水分が昇華して氷床に堆積する。このプロセスが進行し、凸凹が発達することで連続したステップが発生するものと考えられている。

このプロセスを再現するため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。

2.2 実験第一回目

(1)装置と条件

不凍液としてエチレングリコールを用い、17~83%の濃度の水と混合させ食紅を用いて青色に着色した。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することによって、混合液を攪拌し続けた。

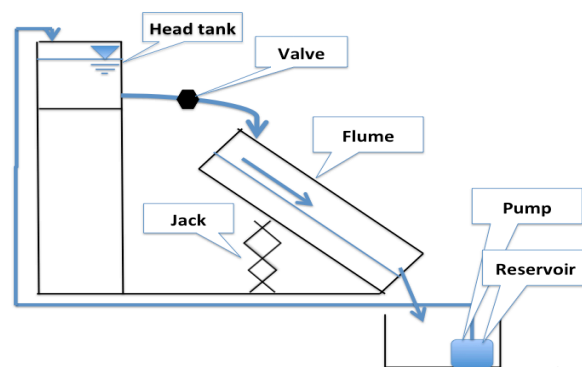


図-2 実験セッティングのイメージ

2. 実験

2.1 概要

水路はアクリル製で、長さが1.4m、幅は2cm(もしくは4cm)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 $5\sim 10^{\circ}$ の間で調節可能。

温度は室温のみ調節可能、液温は室温によって調節された。実験第一回目では主に以下の2つの温度条件を用いた。

(a) 侵食卓越条件(室温: $-7.6\sim -7.0^{\circ}\text{C}$ 、液温: $-6.4\sim -6.1^{\circ}\text{C}$)

(b) 堆積卓越条件(室温: $-8.3\sim -8.2^{\circ}\text{C}$ 、液温: -6.6°C)

ここで注意したいのが、実験室において3~4時間に一度デフロストが働いてしまうために室温 0°C 付近まで上昇し、一定に保つことは不可能であった。また、フルード数は水路の角度・幅・流量によって調節した。

(2) 結果

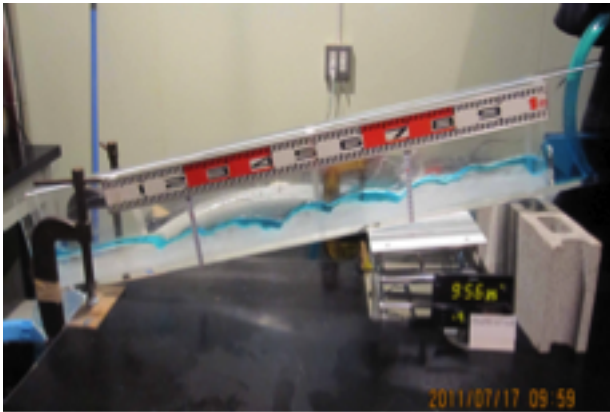


図-3 温度条件(a), Fr: 1.60, 継続時間: 13h

図-3に示すとおり、温度条件(a)において氷床にサイクリックステップが形成された。しかしこのステップの形成過程は侵食のみによるものであり氷の堆積を観察することはできず、またステップの上流への遷移も見られなかった。

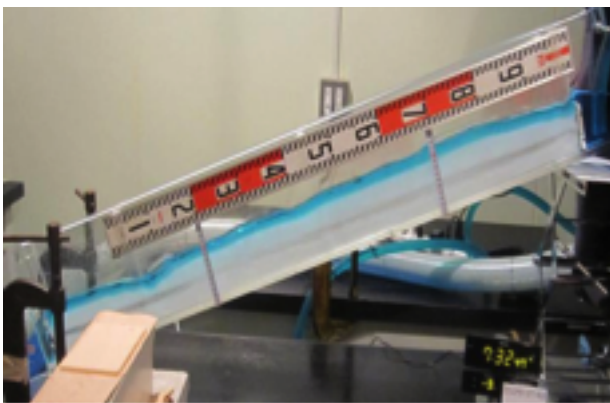


図-4a 温度条件(b), Fr: N/A 継続時間: 11h

温度条件(b)においては明らかなステップは見られなかったが(図-4a)、液中の水分が凝固し針状の氷となって氷床に一様に付着しているのが見られた(図-4b)。これらの氷はデフロスト時に容易に消失し、堆積することはなかったため、ステップの発達には

繋がらなかった。

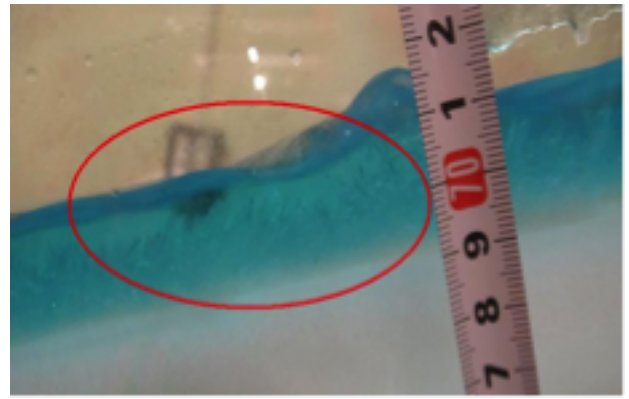


図-4b 針状の氷が一様に氷床に付着

(3) 考察

低温条件下で液中に見られた針状の氷が氷床に堆積しなかった理由として、エチレングリコールは親水性が高すぎるために液中にできた氷と完全に分離せず、結果氷床に付着こそしたものの堆積はしなかったと考えられる。

2.3 実験第二回目

(1) 装置と条件

第二回目の実験では疎水性の高いシリコンオイルを不凍液として用い、5~10%の濃度の水と混合し、食紅によって赤色に着色した。それに応じて以下の温度条件を用いた。

(a) 比較的高温条件(室温: $-4\sim -2^{\circ}\text{C}$ 、液温: $-1.0\sim -0.8^{\circ}\text{C}$)

(b) 比較的低音条件(室温: $-7\sim -6^{\circ}\text{C}$ 、液温: $0\sim 2^{\circ}\text{C}$)

(c) 中間温度条件(室温: $-5.0\sim -4.5^{\circ}\text{C}$ 、液温: $-0.7\sim -0.1^{\circ}\text{C}$)

実験第二回目では温度条件(c)として中間温度条件を設け、侵食と堆積プロセスの同時進行を予想した。

その他の装置は実験第一回目と同様である。

(2) 結果

実験第一回目と同様に、温度条件(a)においてはサイクリックステップを形成することができた(図-5)。しかしステップの形成には時間がかかり、波長、波高ともに小さいものであった。また、このケースにおいても堆積とステップの遷移は見られなかった。

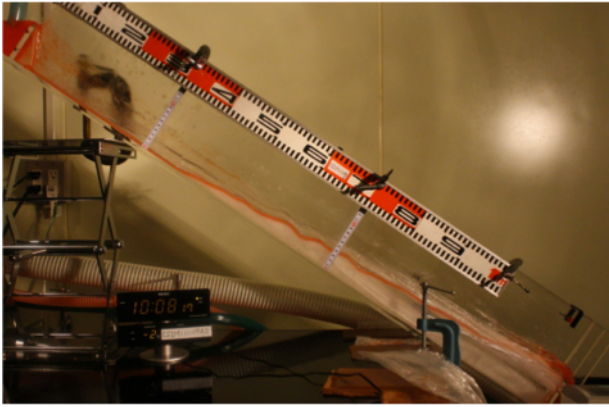


図-5 温度条件(a), Fr: 2.65, 継続時間: 40h

一方で温度条件(b)において、今回堆積性のステップを形成することに成功した(図-6)。これは十分に冷やされた液中の水分が凝固し氷床に堆積するプロセスによるものである。しかし氷床の侵食は見られず、ステップが遷移することもなかった。

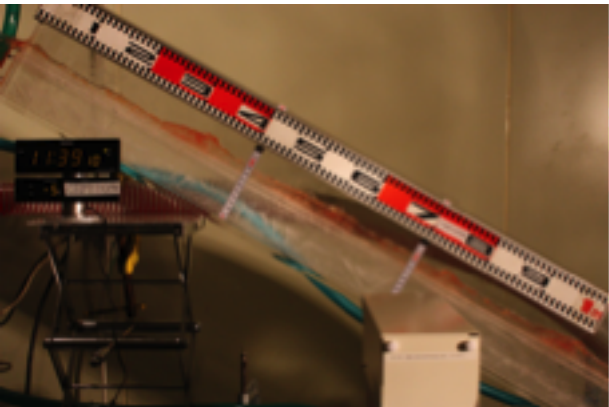


図-6 温度条件(b), Fr: 1.26, 継続時間: 12h

温度条件(c)においては、水路の上流では氷床の侵食が、反対に下流では堆積が見られたが、ステップの発達にはつながらず、さらに長時間継続したにもかかわらず明らかなステップの形成は見られなかった(図-7)。

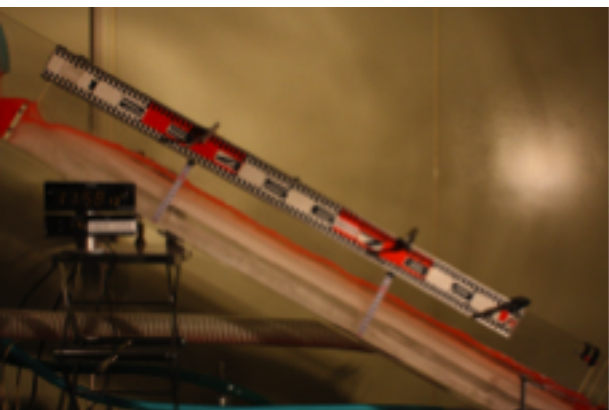


図-7 温度条件(c), Fr: 2.09, 継続時間: 45h

(3) 考察

高温条件下でステップの形成に時間がかかった理由として、シリコンオイルの疎水性が高すぎるためと考えられる。氷と液の間には融解層が存在し、シリコンオイルはその融解層のために氷床に対してせん断力が働かなかったためにステップの形成が難しかったと考えられる。図-5において氷床全体が侵食されているのは氷床の融解のためである。

3. 考察

今回の二回にわたる実験から、それぞれ違った条件下であるが侵食性、堆積性のサイクリックステップを氷床上に形成することができた。しかしそれらが同一の実験内で起こることはなく、したがってステップの上流への遷移も見られなかった。ステップを上流へ遷移させるには、侵食と堆積が同時に起こる必要がある。

実験第一回目では不凍液として用いたエチレングリコールの親水性が高すぎたために堆積が見られず、反対に実験第二回目では不凍液として用いたシリコンオイルの親水性が低すぎたために反対に侵食が起こりにくかった。これらの不凍液の間の親水性を持つ液体を不凍液として同様の実験に用いた場合、氷床の侵食と堆積の同時進行によりステップが発達し、ステップの上流への遷移が予想される。

ステップの形成とその上流への遷移を観察するためには実験継続時間もひとつの要素といえる可能性がある。今回の2度の実験では最長実験継続時間が約3日であった。しかし火星における氷冠の形成にはおよそ400万年もかかっているとも言われている。図7のケースでは明らかなステップは見られなかったが、これは平衡状態、つまり侵食と堆積が同時にほぼ同じバランスで起きていると言えるのではないだろうか。もしこの状態でさらに1~2週間継続できたならば、ステップの発達が見られた可能性がある。しかしデフロストを考慮すると一定温度を保ったまま長時間実験を継続することは困難であるため、対策が必要になる。

温度も同様に重要な要素であろう。今回の実験では室温のみ調節可能で、室温により液温・氷床温度をコントロールするという関係性上、室温が最も低くその上を流れる液が最も高い温度を持っていた。一方火星の氷冠上では大気が最も温度が高く、氷床が最も温度が低い。この違いが上流への遷移を伴うサイクリックステップの形成を困難にしていた可能性がある。

親水性と疎水性を併せ持つ液体を用いることと、1~2週間という長時間の実験の継続、そして室温が最も高く氷床温度が最も低いという状況を作ること。以上の条件で今回と同様の実験を行った場合、上流への遷移を伴うサイクリックステップを氷床上に形成できると、今回の二回の実験から考えられる。

4. 理論的アプローチと今後の展望

本研究における目的は火星の北極冠に見られる氷感の形成メカニズムの解明である。したがって実験で上流への遷移を伴うサイクリックステップを形成できた場合、どのように実験と火星での現象の解明につなげるかというのも重要な課題である。実験には密度層として液体を使用した³⁾が、火星において液体は存在せず、密度層はすべて気体で構成されている。したがって液体と固体の融解と凝固について、さらに気体と固体の昇華についてそれぞれの過程の違いやメカニズム、条件等を詳しく知る必要がある。その上で密度、流速、重力、温度などのパラメータを用いた解明の手法を講じる必要がある。

また、数値計算を用いたシミュレーションも火星の氷冠の形成メカニズム解明のための有効な手段である。既存の混濁流などによるサイクリックステップ発達の数値計算モデルを火星での空気の密度流によるサイクリックステップ発達のモデル化に応用することができるであろう。しかしその場合、コリオリ力の考慮や跳水の際の密度層の上に存在する比較的暖かい空気の連行度合いなども考慮する必要がある。さらに密度層内において、射流部と常流部での水蒸気の濃度差も昇華には重要なパラメータである。

火星がより身近になった今でもその環境の解明は容易ではない。近年では流体が存在した痕跡も確認⁴⁾されており、その解明は地質学的見地からのみでは難しくなりつつある。したがって我々土木技術者にとっても今後重要な使命となり、本研究が火星環境の解明への貢献につながるだろう。

参考文献

- 1) National Institute of Sciences of the Universe
- 2) Smith, I. B. and Holt, J. W. (2010) Nature, 465, 450-453
- 3) Kostic, S. et al. (2010) Journal of Hydro-environment Research 3, 167-172
- 4) NASA/Jet Propulsion Laboratory (<http://www.jpl.nasa.gov/>)