

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 12 日現在

機関番号：34406

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2013

課題番号：24654165

研究課題名(和文)火星気候史解明に向けてのサイクリックステップの実験的研究

研究課題名(英文) An experimental study on cyclic steps aiming for elucidation of the Mars' climate history

研究代表者

横川 美和 (YOKOKAWA, Miwa)

大阪工業大学・情報科学部・教授

研究者番号：30240188

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円、(間接経費) 900,000円

研究成果の概要(和文)：火星北極冠の上部には周期的なステップ地形が形成されており、これらの形成条件は北極冠の形成史ひいては火星の気候史と深く関連していると考えられる。そこでこれらの形成機構を探る為に、氷を用いたアナログ実験や、それと酷似した内部構造を持つ海底のステップ地形のアナログ実験を行った。また氷と流体の間にできる界面波形成の理論モデルを作成した。アナログ実験では、氷と流体との界面に発達する界面波を流速が大きい流れで形成する事に成功し、これらのステップの挙動は理論モデルによって予測されるそれと一致した。

研究成果の概要(英文)："Spiral troughs" (cyclic step topography) observed at the upper part of Mars' north polar ice cap is considered to be closely related to the formation history of the npc and thus the climate history of Mars. In order to explore the formation mechanism of this step topography, we operated analog experiments using ice. We also did the other experiment of cyclic steps by the gravity flows analogue to the sediment waves in the deep sea environments whose internal structures are resemble to those of spiral troughs on Mars. A theoretical model of interfacial wave formation between the fluid and ice is also created. In the analog experiments, we have succeeded in forming a interfacial waves that develop at the interface between the fluid and the ice by the flow in upper flow-regime. Behavior of these steps was consistent with that predicted by the theoretical model.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学・惑星地質学

キーワード：惑星地質学 サイクリックステップ 火星北極冠 スパイラルトラフ アナログ実験 界面波 混濁流
安定解析

1. 研究開始当初の背景

サイクリックステップ (以下, CS; 図1) は両端を「跳水」で区切られた周期的なベッドフォームで, 流れの高領域で形成される. CS は岩盤・砂床河川から深海海底谷の自然堤防上に至るまで, 様々な環境で見られる. また, CS は, 砂のような非粘着性の堆積物粒子が自由に動く砂床面に形成される (transportational CS: 輸送的 CS) だけでなく, 岩盤または粘着性のある堆積物 (レゴリスなど) 上に形成されるもの (erosional CS: 侵食的 CS) ももある. このように CS は自然界に普遍的に存在することが認識され, 理論的研究や数値・アナログ実験も行われているが, その堆積構造についての研究は少なく, 申請者らによる輸送的 CS の累重構造に関する研究のみであった.

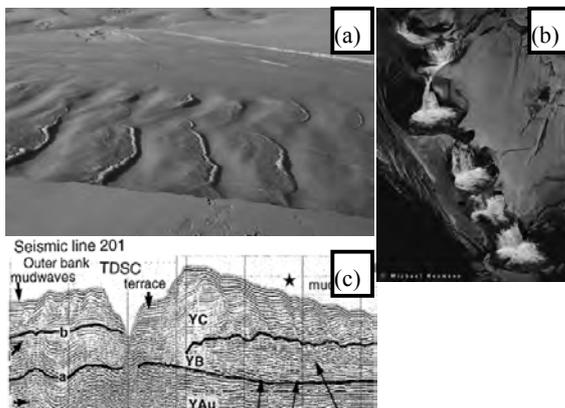


図1 (a)砂床上の輸送的CS, (b)岩盤上の非輸送的CS, (c)海底谷自然堤防上のCS.

一方, 火星の北極冠には特徴的な螺旋状のステップ地形が見られる (図2). これらのステップは北極冠上を吹く風に対してステップと凹みが周期的に配列する地形である. またレーダーの反射面により明らかにされた内部構造は, これらのステップが“上流側”に移動しながら累重している事を示す (図2). この堆積構造は, 海底谷の自然堤防上に発達するCSのそれと酷似する. アナログ実験によってこの堆積構造を復元し, それに必要な水理条件が限定されれば, それを用いて火星北極冠の形成機構を復元し, 火星の気候史の解明に貢献できる可能性がある.

2. 研究の目的

本研究は, 両者の形成に関するアナログ実験を行い, それを基に従来のCS形成の理論モデルを拡張し, 火星北極冠の形成機構の解明に資することを目的とする.

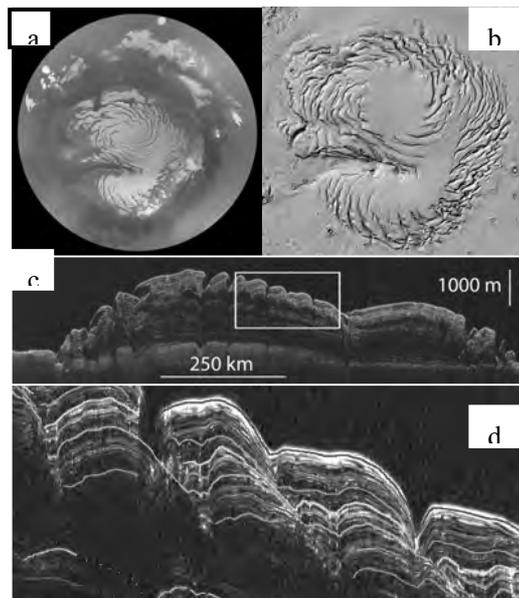


図2 (a)北極側の火星のイメージ, 中央の白い部分が氷冠. (b)北極冠上に発達するステップ地形. 風系を反映して螺旋状に分布する. (c)ステップ地形の断面. レーダーの反射面が内部構造を示す. (d)ステップ地形の断面. 拡大図. 同時代の地表面と推定される面をつないでいる. 図はすべて Smith による.

3. 研究の方法

本研究では, 以下の4つの方法で行った.

- (1) 石英粒子・プラスチック粒子およびカオリナイトを用いた海底谷でのCS形成のアナログ実験 (実験1).
 - (2) 氷を用いた, 火星北極冠のステップ地形のアナログ実験 (実験2および3).
 - (3) 理論解析 (氷-流体間の界面波形成に関する理論モデル作成).
 - (4) 混濁流によるCS形成の現地観測.
- 以下にその成果を述べる.

4. 研究成果

(1) 平成24年度の成果

平成24年度の成果は以下の通りであった.

- ①海底谷上のCS形成のアナログ実験 (実験1) として3種類の実験, (a)混濁流による侵食過程, (b)軽量粒子を用いたCSの累重, (c)勾配変化を伴う堆積過程でのベッドフォーム形成, を行った. 侵食型CSを塩水密度流 (混濁流のアナログ) で形成させることは出来なかった (a) が, 塩水密度流による輸送型CSの形成には成功し (b, c), 背景堆積のアナログとしてカオリナイトが有効な実験材料であること (b), CSのみならず様々なベッドフォームを砂床勾配の変化によって

再現できる (c) ことがわかった。

②火星北極冠のアナログとして、実験 2 では、周囲気体 > 流体 > 氷という温度分布で、氷上を流れる流体によるステップ地形の形成実験を行った。実験装置は、アクリル製の水路と水路冷却装置および流体を循環させるタンクとポンプ、流体用のヒーター・冷却装置からなる。水路はアクリル製で、長さ 180cm、幅 4cm、深さ 20cm である。上流端から 30cm の地点と下流端に高さ 8cm の堰があり、この間に水を張って凍らせる事によって、厚さ 8cm、長さ 150cm の氷床を作ることができる。この水を張る部分にアクリル板を入れて、水路幅を調節する事が可能である。本実験では厚さ 1cm のアクリル板を 2 枚入れ、残り 2cm の部分で氷を作って実験に使用した。

水路底を氷点以下に保つ為に、水路の下に冷却装置を設置した。これは、長さ 184cm、高さ 8cm、幅 16cm の塩化ビニール樹脂製のタンクで、この中に恒温循環装置から -17°C 程度に冷やしたエチルアルコールを循環させた。これによりタンク表面は -10°C 程度に冷やされる。水路をこの上に設置した。

氷の上を流す流体 (水) はヘッドタンクから水路に導かれる。この途中のノズルで流量を調節する。液温を目標温度 (本実験では 0.1 ~ 0.4°C) に保つために、ヘッドタンク内に投げ込み式冷却器とサーモスタット付のヒーターを設置した。氷と識別しやすくするため、流体を食紅 (本実験ではメロングリーン) で着色した。

実験の結果、侵食卓越型のステップが形成され、(i)フルード数が 1 より大きい場合にステップ地形が形成される、(ii)ステップの代表波長は初期平坦床水深が深いほど長い (図 3)、(iii) 一般にステップは下流端から形成されて上流へ発達していく (図 4)、事がわかった。

③理論解析は、下面から冷却される氷の上に上面から暖められる水が流れている状況 (氷 < 流体 < 周囲気体) という温度分布で、水の流れを表す Navie-Stokes 方程式、流れと氷の中の熱の移動を表す熱伝導方程式、流れ-氷界面の移動を表す熱フラックスバランスの方程式を用いて線形安定解析を行い、界面の安定性を明らかにした。その結果、不安定領域が存在し、その領域では界面波が上流へ進行する事が明らかになった。これは、実験 2 の実験結果と調和的である。



図 3 実験 2 で形成された氷上のステップの例. (a)CSIM-120908A, 代表波長 40cm, (b) CSIM120910B, 代表波長 60cm, (c) CSIM120911B, 代表波長 125cm.

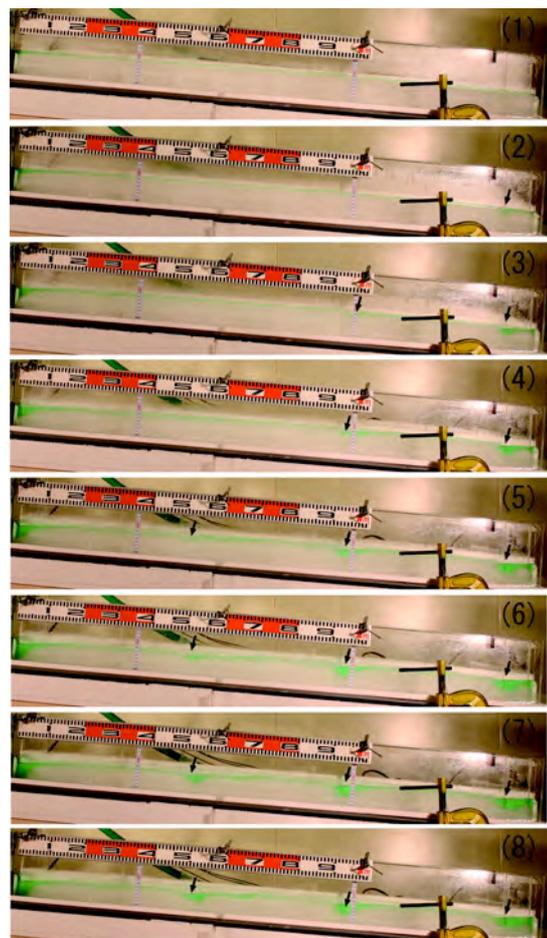


図 4 ステップの発達過程 (実験番号 CSIM120908A). (1)から(7)まで 30 分毎の画像. (1)は通水開始から 30 分後, (8)は実験最終画像で, (7)と(8)の間は 24 分. 流れは左から右. 矢印がステップの位置を示す. 下流端をきっかけとしてステップが発達し始め, 徐々に上流側でもステップが発達する.

(2)平成 25 年度の成果

平成 25 年度の成果は以下の通りである。

①深海海底谷でのみ観測されていた混濁流によるサイクリックステップの形成と同じ現象が、カナダ・ブリティッシュコロンビアのスコーミッシュ河口のデルタ上で観測

された。実際にデルタ面状を流れ下る混濁流によってステップが上流へ移動している様子を現地で観測した。海底地形データからこれらのステップ地形の形態を解析し、デルタ面の傾斜の違いに応じて形態が変化する事、また深海のサイクリックステップに比べて波形勾配が大きい事がわかった。

②(a)氷面上の界面波の実験を、平成 25 年度はより火星北極冠に近い状況を再現するような新たな実験装置を作成し北海道大学で行った。装置はアルミニウム製のタンク(長さ 100cm または 200cm, 幅 10cm, 高さ 10cm)で、恒温循環装置から約-15°C (または-34°C)に冷却したアルコールをタンク内に循環させ、タンク上面を冷却した。室温との温度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。この条件では、タンクの上面に氷が凝結しステップらしき凹凸が観察されたケースもあったが、ステップは下流に進行した(図 5)。今後さらに実験材料や温度分布を変えて、火星北極冠と同じく上流側へ累重する構造を作る事を試みたい。

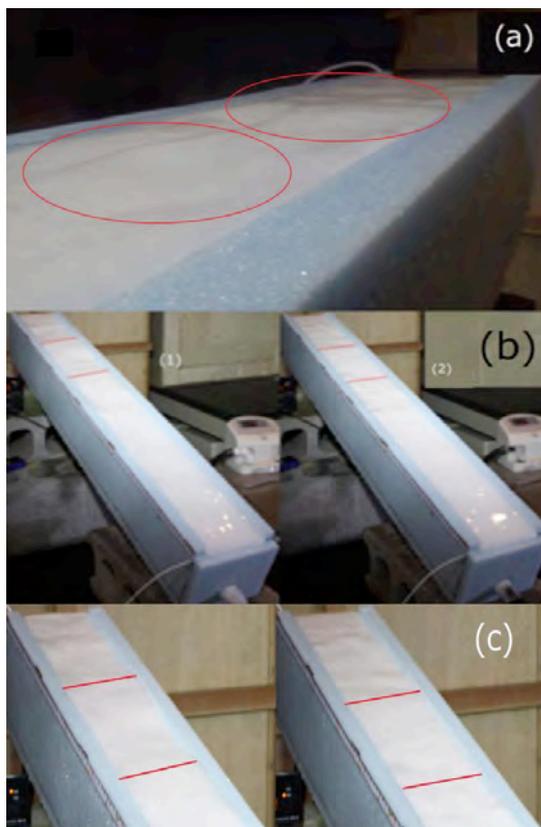


図 5 実験 3 で形成されたステップ。(a)タンク上面の中央部に形成された 2 つのステップ。(b)(a)のステップが下流へ伝播する様子。左は実験開始後 7 日目、右は 10 日目。(c)(b)の拡大。

(b)一方、昨年度までの実験でできた氷上の界面波の形状について解析した結果、温度条件が周囲気体>流体>氷でできた上流進行の界面波の波形は、砂で形成されるサイクリックステップの形状に非常に近い事がわかった。また、温度条件が周囲気体~氷<流体の時に形成された下流進行のそれは、サイクリックステップよりはむしろアンティデューンに近いことがわかった(図 6)。

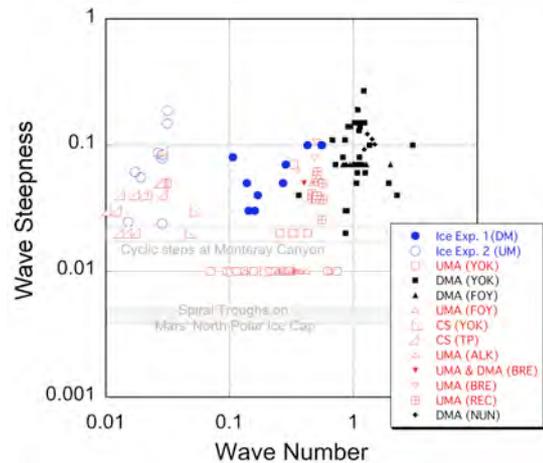


図 6 流れの高領域で砂床に形成されるアンティデューンおよびサイクリックステップと、氷床に形成されるステップの形態の比較。横軸は無次元波数、縦軸は波形勾配。

③平成 24 年度に作成した理論モデルをさらに発展させて、氷上を流れる流体が乱流状態である場合のモデルを作成した。この場合も不安定解が存在し、界面波が形成される領域がある事がわかった。

(3) 成果のまとめと今後の課題

本研究の成果と今後の課題をまとめると以下の 5 点になる。

①氷を用いて、氷と流体との界面に発達する界面波を実験的に形成する事に成功した。流れの高領域(速い流れ)での氷上の界面波の実験例は、現在我々の知るところでは世界でも初めてのものであり、本課題の目的のみならず、地球の氷床上や結氷河川に形成される界面波の形成機構の理解に貢献するだろう。今後、火星北極冠のステップ地形により近づける為には、ステップを上流へ進行させつつ氷床を累重させる条件の解明が必要である。

②氷-流体界面に界面波が形成される現象について、理論モデルを作成した。この理論は、熱の移動を砂の移動に見立てると、砂床上に

形成されるサイクリックステップのモデルとほぼ同等である。理論解析によって、氷と流体、さらにその上に存在する周囲気体、それぞれの温度分布により、ステップの移動方向が異なる事が明らかになった。すなわち、氷<流体<周囲気体の分布では、ステップは上流へ進行し、氷~周囲気体<流体の温度分布では、ステップが下流へ進行する解が存在する。さらにこれらは、実験の結果と良好な一致を示す。今後、流体が乱流状態で流れる場合の界面波の存在条件をさらに詳細に明らかにする事が課題である。

③海底で混濁流によって形成されるサイクリックステップについては、輸送型(transportational)のサイクリックステップの累重が実験的に可能である事が明らかになった。今後さらに実験装置・材料を検討し、詳細な形成条件を明らかにしたい。

④カナダ・ブリティッシュコロンビア州スコームッシュ・デルタにおいて、現地ですべてに混濁流によってサイクリックステップが形成されている現象を観測する事ができた。これらのステップの形状を解析し、深海海底谷に形成されている波状地形との比較を行った。今後、これらの流れの条件とステップの形状の関係を明らかにしていきたい。

⑤氷床上に流れの高領域で形成される界面波の形態と砂床上に形成されるそれとの比較を試みた。これは、これまで氷床上の界面波に関する記載が少なく、名称も与えられていないからである。これまでに比較したデータでは、氷床上の界面波の中でも、砂床のサイクリックステップの形態に非常に近いもの、どちらかといえばアンティデューンに近いものがある事がわかり、氷床上の界面波の記載に形態の比較が有用である可能性が示された。今後さらに比較データを増やし、火星のように直接流体の条件を測定できない場所においても、界面波の形状から流体条件を類推できるような指標の作成につなげていきたい。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 4 件)

(1) 角田堯史・内藤健介・泉 典洋・横川美

和・山田朋人, 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. 平成 25 年度土木学会北海道支部論文報告集, 70 号, B-38 (査読無し), 2014.

(2) 横川美和・泉 典洋・内藤健介・山田朋人・Greve Ralf, 氷上のステップ地形に関する実験的研究, 土木学会論文集B1(水工学), Vol.69, I_1129-I_1134, 2013 (査読有り).

(3) 泉 典洋・横川美和・内藤健介, 流れ-氷界面に発生する境界不安定現象, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.69, I_1117-I_1122, 2013 (査読有り).

(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, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.69, I_1123-I_1128, 2013 (査読有り).

[学会発表] (計 14 件)

(1) Yokokawa, M., Takahashi, Y., Yamamura, H., Kishima, Y., Parker, G., Izumi, N., Antidunes and cyclic steps in open channels: their formative conditions and the geometrical features. European Geoscience Union, 2014 General Assembly, 2014 年 4 月 28 日, オーストリア, ウィーン.

(2) Izumi, N., Yokokawa, M., Naito, K., Cyclic steps on ice and a sediment-covered bed: their analogies and differences. European Geoscience Union, 2014 General Assembly, 2014 年 4 月 28 日, オーストリア, ウィーン. (招待講演)

(3) 横川美和, アンティデューンとサイクリックステップの形態比較. 日本堆積学会 2014 年山口大会, 2014 年 3 月 16 日, 山口大学.

(4) 山本真也・横川美和・Hughes Clarke, J.E.・泉 典洋, カナダ・ブリティッシュコロンビア州の河口デルタに見られるサイクリックステップの形態. 日本堆積学会 2014 年山口大会, 2014 年 3 月 16 日, 山口大学.

(5) 角田堯史・内藤健介・泉 典洋・横川美和・山田朋人, 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. 平成 25 年度土木学会北海道支部大会, 2014 年 2 月 1 日, 札幌市.

(6) Naito, K., Izumi, N., Yokokawa, M., Yamada, T., Boundary waves on the ice surface created by currents. American Geophysical Union, 2013 Fall Meeting, 2013 年 12 月 11 日, アメリカ合衆国, サンフランシスコ.

(7) Yokokawa, M., Izumi, N., Naito, K., Yamada, T., Greve, R., Experiments of “cyclic steps” on the ice surface. 8th International Symposium on River, Coastal and Estuarine Morphodynamics (RECM2013), 2013年6月12日, スペイン, カンタブリア大学.

(8) Izumi, N., Yokokawa, M., Naito, K., Instability of the flow-ice interface. 8th International Symposium on River, Coastal and Estuarine Morphodynamics (RECM2013), 2013年6月12日, スペイン, カンタブリア大学.

(9) Naito, K., Izumi, N., Yokokawa, M., Yamada, T., Downstream migration of steps on ice. 8th International Symposium on River, Coastal and Estuarine Morphodynamics (RECM2013), 2013年6月12日, スペイン, カンタブリア大学.

(10) 横川美和・泉 典洋・内藤健介, 氷上を流れる流体によるステップ地形の発達. 日本堆積学会2013年千葉大会, 2013年4月13日, 千葉大学.

(11) 横川美和・泉 典洋・内藤健介・山田朋人・Greve Ralf, 氷上のステップ地形に関する実験的研究, 第57回水工学講演会, 2013年3月7日, 名城大学.

(12) 泉 典洋・横川美和・内藤健介, 流れ-氷界面に発生する境界不安定現象, 第57回水工学講演会, 2013年3月7日, 名城大学.

(13) 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, 第57回水工学講演会, 2013年3月7日, 名城大学.

(14) Yokokawa, M., Izumi, N., Naito, K., Shimizu, H., Yamada, T., Greve, R., Analog experiments on the formation of spiral troughs on the North Polar Ice cap of Mars: Layered deposits emplaced by cyclic steps on Ice. American Geophysical Union, 2012 Fall Meeting, 2012年12月3日, アメリカ合衆国, サンフランシスコ.

[その他]

ホームページ (泉 典洋)

<http://earth-fe.eng.hokudai.ac.jp/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

横川 美和 (YOKOKAWA, Miwa)

大阪工業大学・情報科学部・教授

研究者番号 : 30240188

(2) 研究分担者

泉 典洋 (IZUMI, Norihiro)

北海道大学・工学研究院・教授

研究者番号 : 10260530

(3) 研究協力者

HUGHES CLARKE, John E.

ニューブランズウィック大学

・測地工学部・教授

研究者番号 :

GREVE, Ralf

北海道大学・低温科学研究所・教授

研究者番号 :

山田朋人 (YAMADA, Tomohito)

北海道大学・工学研究院・准教授

研究者番号 : 10554959

内藤健介 (NAITO, Kensuke)

北海道大学・工学研究院・院生

研究者番号 :

角田堯史 (SUMIDA, Takashi)

北海道大学・工学研究院・院生

研究者番号 :