氷上を流れる流体による界面波の形成実験

Experiments of the formation of boundary waves by a flowing fluid on ice

北海道大学工学部環境社会工学系	○学生会員	石黒友紀	(Tomoki ISHIGURO)
北海道大学大学院環境フィールド専攻	学生会員	角田尭史	(Takashi SUMIDA)
北海道大学工学研究院	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)
北海道大学工学研究院	正会員	山田朋人	(Tomohito YAMADA)

1. はじめに

地球上の河川や海底ではサイクリックステップ,デュ ーン,アンチデューンなどの河床波と呼ばれる周期的な 波状の地形が形成されている.これらは,液相や固相の 間の平坦な界面が不安定となり,波状の形状に移行する 界面不安定現象の一種である.

これらの波状地形は氷上でも確認されている.氷河上 では温度の変化に伴い、氷の一部が融けて水となり氷上 を流れる時に氷と水の界面にステップ状の地形を形成す る.一方,火星の北極冠状には極点から螺旋状に広がる 地溝が形成されていることが知られている. これはスパ イラルトラフ(図-1(a))と呼ばれ、北極冠状を極点から 外方向に吹く風(カタバ風)に対して, 直交方向に伸び ており、流れに対して直角方向に波峰線を持つ界面波の 一種であると推測される.近年,リモートセンシング技 術の進歩により、スパイラルトラフの内部構造(図-1(b)) は高解像度のレーダー反射画像を用いて解析され、ステ ップが上流側に移動しながら累乗していることを示して おり¹⁾,地球上でよく見られるサイクリックステップ の特徴に酷似していることが分かってきた. これは氷表 面から蒸発や昇華した水がカタバ風に取り込まれること や、カタバ風に含まれる水が氷となることにより、水流 と氷との間に発生する界面波と似た形状が形成される.

そこで今回,著者らはスパイラルトラフの内部構造が サイクリックステップに酷似しているということから河 川工学の観点よりアプローチを行い,氷上に形成される ステップ地形の形成実験を行う.

氷上のステップ地形の形成実験はこれまでも横川らに よって行われている²⁾.彼らの研究では氷<流体<周 囲気体の温度環境の下で流体として水を流し,氷の融 解・凍結に伴う界面波の形成実験を行った.その結果と して,ステップが上流に向かって発達することが確認さ れた.また,内藤らにより行われた理論解析³⁾から温 度分布がステップの進行方向を決める要因であることが 示された.

本研究では火星の温度分布の下で,流体としてシリコ ンオイルと水との混合液を用いて実験を行う.ここで氷 を安定状態にするために底面を一定に冷却し,その上か ら流体を流す.そして周囲気体の熱を上部から与えるこ とにより氷を融解・凍結させ,その時に形成されるステ ップ地形の形成過程を観察する.本研究の目的として, 氷上のステップ地形の形成機構を明らかにすることで,



図-1(a) スパイラルトラフ (NASA)⁴⁾



図-1(b) スパイラルトラフの断面図¹⁾

火星北極冠状の界面の発達過程の解明を目指す.

2. 実験概要

(1) 実験装置

北海道大学低温科学研究所の低温実験室において実験 を行った.この実験室では空冷式の冷凍機により-20℃ まで室温をコントロールをすることが出来る.

本実験で用いた実験装置の概念図および写真をそれぞ れ図-2(a)および(b)に示す.水路は長さ 200cm,高さ 5cm のアクリル壁を幅 2cm でアルミ製の水路冷却装置 の上に取り付けたものである.底面はアルミ板で氷床に 見立てる.アルミ板のポンプによって下部タンクからへ ッドタンクに流体を循環させる.また,流体の温度を コントロールするために、ヘッドタンクと下部タンクに ヒーター、ならびにクールディップ(投げ込み式型冷却 器).そして、ヘッドタンク中の混合液を攪拌するスタ ーラーを設置した(図-2). 水路底を氷点以下に保つ ため、水路の下に冷却装置を設置した.この冷却装置は エチルアルコールを冷却し循環させることによって、水 路底を冷却している.水路に流す流体は疎水性を持つシ リコンオイル(SH200,cs20)と水とをおよそ9:1の割 合で混ぜた混合液である.火星のカタバ風と流体中の水 蒸気を、それぞれシリコンオイルと水によってモデル化 している.この混合液を図-2(a)中のヘッドタンクに 設置したスターラーにより攪拌しながら水路に流し、下 部タンクに設置したポンプにより、ヘッドタンクへと循 環させている.流量は水路上端にあるバルブの開閉によ り調節することが出来る.

氷の温度は循環装置で水路底面を一定に冷却すること により管理し,流体はクールディップとヒーターを併用 することで液温をコントロールした. 室温については空 冷式の冷凍機によりにより一定に温度をコントロールし た.

(2) 測定及び算出方法

温度の測定は、ヘッドタンク内の流体、下部タンク内 の流体、室温、水路上流端の底面の温度、水路下流端の 底面の温度の5地点における10分間ごとの温度をデー タロガーにより連続的に測定した.混合液および底面の 温度は上流端と下流端の温度を平均したものである.各 測点における温度変化を図-3に示す.ここで本来は、 低温室として用いる部屋であるため、本実験のような 14℃程度の室温では室温が安定せず3℃ぐらいの揺れ幅 で温度が推移した.また、アルコールの温度が安定する まで時間を要し、タンク上流端(約-18℃)と下流端(約 -21℃)で約3℃ほどの温度差が発生していることが確 認された.

流体の流量は、水路下流端から流れる流体をビーカー で受けて、時間と容積を測定することにより算出した. 水深は流出口における損失と下流端の影響を考慮して、 比較的水深が安定している下流端から 20cm~180cm の 区間の水深を 10cm ごとに定規でそれぞれ測定し、それ らの平均値を算出した.

氷の高さの変化を測定する為に、レーザー変位計を 2 台用いた.これらをそれぞれ図-4 の様に滑車に取り付 け、下流端から滑車を走らせることにより水路中央を 2 次元的に測定した.200~1000mm の範囲を測定するこ とができる IL600 で滑車から氷までの距離を、また 1500~3500mm の範囲を測定することができる IL2000 を用いて、基点(下流端)からの移動距離を測定してい る.また、レーザー変位計による測定は通水を中断しな ければならない為一日に一回とし、細かい界面の変化を 確認できるように、水路の全体像が映る水路側面にカメ ラを設置し10分間ごとに連続撮影した.



図-2 実験装置(a)概念図,(b)写真



図-3 実験装置各測点における温度変化.赤線はヘッ ドタンク内の流体,黄線は下部タンク内の流体,緑線 は室温,紫線は水路上流端の底面温度,青線は水路下 流端の底面温度を表している.室温は3℃程度揺れ幅が あった.水路底面の温度は上流端と下流端で3℃程度温 度差があった.

表-1 本実験条件 ※混合液の温度は上部と下部を平均したものである.水路底面の温度は温度が安定した実験開始 30時間後の水路上流端と下流端の温度を平均したもの.

水败左嗣	温度(℃)			法导	水沙型	フルード粉	继续时期
小哈马配	会泪	泪入远	水败皮玉	加里	小休		州 公形 [11]
(°)	主価	施合攸	小哈広田	(cm^3/s)	(cm)		(hr)
11	14	12.6	-19.3	46.0	0.77	1.06	112



図-4 滑車に取り付けた2つの変位計. IL600 と IL2000 により,氷の高さと基点からの距離をそれぞれ 測定する.

(3) 実験条件

本実験では水路勾配と流量を調節することによって, フルード数を変化させている.水路勾配は 11°に設定 し,フルード数が 1.06 と流れが射流条件の下で実験を 行うこととした.流量は 46.0cm³/s で行った.温度につ いては火星の温度分布を模擬するために水路底面で最も 低い-19.3℃,流体が水路底面より高い 12.6℃,室温が 最も高い 14.0℃で行った.以上の本実験条件を表-1 に 示す.

3. 実験結果及び考察

(1) 実験結果

変位計によって測定した下流端からの距離における氷 の高さを図-5(a)に示す.また,界面波が形成された下流 端から 200mm の地点の実験開始 46 時間後から 70 時間 後における 12 時間間隔の写真を図-5(b)に示す.図-5 よ り,下流端から 200mm 地点に波長 25cm,波高 5mm ほど の界面波が形成され,実験開始 46 時間(図-5(a)緑線)と 70 時間(図-5(a)赤線)の間で波長が約 10cm,波高が約 2mm の界面波が 10cm ほど下流へ進行していることが 確認できた.氷床の勾配が急勾配であり射流状態である ことから,形成された界面波はアンチデューンであると 考えられる.



図-5(a) レーザー変位計による測定結果.実験継続時間 112(hr) 実験開始 46 時間後から 70 時間後の間で波 長が約 10cm,波高が約 2mm の界面波が下流に 10cm ほど移動した.



図-5(b) 実験開始 46 時間後から 70 時間後の間の界面 波の変化(a)46 時間後,(b)58 時間後,(c) 70 時間後 ※写真は 12 時間毎に撮影したもの.波長約 10cm 界面 波が下流へ移動した.

(2) 考察

本実験は火星の温度分布を模した条件の下で実験を行った.横川ら²⁾の水を用いた実験ではこの温度分布で 実験を行った場合,ステップが上流に向かって発達した ことが確認されている.しかし,本実験結果から界面波 の進行方向は必ずしも上流方向と限らず,下流方向に進 行するものが存在した.下流方向に進行した要因として フルード数が限界流に近い流速であったことが考えられ る.これは一般的な河床波にもみられる現象で,河川の 場合,ある条件下で下流に進行するアンチデューンが形 成される.氷床上に形成される界面波においても下流に 進行するアンチデューンが存在するものと考えられる.

4. まとめ

本実験では氷<流体<周囲気体の温度分布の下で,氷 上に流体としてシリコンオイルと水との混合液を流し, ステップ地形の形成を試みた.本実験結果をまとめると 以下のようになる.

- フルード数が 1.06 という条件では界面波は下流側 に 10cm ほど移動した.
- 下流に進行するにつれて波長が 10cm ほど大きくなり、波高は 2mm ほど小さくなった。
- 氷上に形成される界面波の進行方向については温度 分布だけではなくフルード数も関係していると考えられる。

5. 今後の展望

本実験では、形成されるステップの形状も波長、波高 共に小さく目視で確認できるステップが少なかった.そ こで本研究の今後の展望としては、 流量や勾配といっ たステップ地形の形成に関わると考えられるパラメータ ーを変化させながら引き続き実験を行っていき界面波の 進行方向を決める要因を探っていきたい.

謝辞

本研究を行うにあたり実験室を利用させて頂いた北海 道大学低温科学研究所の方々,また,実験について助力 を頂いた北海道大学大学院工学研究院環境フィールド工 学専攻河川・流域工学研究室の学生諸君に感謝の意を表 します.

参考文献

1)Isaac B Smith, John W Holt : Onset and migration of spiral troughs on Mars revealed by orbital radar, Nature, 465, 450-453,2010.

2) 横川美和,泉典洋,内藤健介,山田朋人,Ralf GREVE:氷 上ステップ地形に関する実験的研究,水工論文集 Vol.69, No.4, I_1129-I_1134, 2013.

3) 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,水工論文集 Vol.69, No.4, I_1123 -I_1128, 2013.

4)NASAHP(http://www.nasa.gov/mission_pages/MROmul timedia/pia13163.html).