

カタバ風によって流れ-氷界面に形成される界面波

Boundary waves formed on the flow-ice interface due to Katabatic wind

北海道大学大学院工学院

北海道大学工学部環境社会工学系

北海道大学大学院工学研究院教授

大阪工業大学情報科学部教授

北海道大学大学院工学研究院准教授

○学生会員 角田 堯史 (Takashi Sumida)

学生会員 石黒友紀 (Tomoki Ishiguro)

正会員 泉 典洋 (Norihiro Izumi)

正会員 横川美和 (Miwa Yokokawa)

正会員 山田 朋人 (Tomohito Yamada)

1. はじめに

デューンやサイクリックステップなど、流れと移動床の境界面の不安定現象によって形成される界面波が河床で見られ、それらの形成過程の研究は活発に行われている。

一方、氷上の流体によって界面波が形成される現象は様々な場所で確認されており、流れ-移動床界面に形成される界面波と非常に似た構造を有している。その例としては結氷河川の河水の裏側に存在するリップル構造¹⁾、氷河の融解流によるステップが挙げられ、これらは氷の上または下に水が流れ、流れ-氷界面が不安定となり形成される。

流れ-氷界面に存在する界面波の別の例には、南極氷床上に発達するメガデューンと呼ばれる大規模地形²⁾や火星北極氷冠上に発達するスパイラルトラフ³⁾(図1)がある。これらは氷床上にカタバ風と呼ばれる密度流が流れることによって形成される⁴⁾。カタバ風は氷床上で放射冷却された空気の塊が、密度増加のために斜面を滑降することによって発生する。また、カタバ風は火星北極冠上ではトラフに直交して吹いていることが確認されている⁵⁾。カタバ風中の水蒸気が氷床上で凝固したり、氷表面で昇華がおこることによって氷の高さに場所的な差が生じて界面波が形成される。

氷上を水が流れることによって界面波が形成される現象は横川らによる実験で確認されており⁶⁾、温度条件による界面波の伝播方向の違い⁷⁾や、流れ-氷界面の不安定性の解析⁸⁾も行われている。不凍液を用いることで氷上にカタバ風が流れることを想定した実験も同様に行われているが、密度流そのものが流れることによって界面波を形成する実験はまだ行われていない。そこで、本研

究では氷に冷やされて発生した密度流が氷表面を流れる条件で実験を行い、界面波の形成・発達過程を観察した。さらに、得られた結果を分析し、形成される界面波の特徴を議論する。

2. 実験方法

(1) 実験装置

実験装置はアルミニウム製のタンクと、液体の温度をコントロールしながらタンク内に液体を循環させられる恒温循環装置、加湿器からなる(図2(a))。タンクの中に恒温循環装置で冷却したエチルアルコールを循環させると、タンク上面付近の空気が冷却され、密度流が発生する。これによって界面波の形成を試みた(図2(b))。

アルミニウム製タンクは長さ 200cm、幅 10cm、高さ 10cm であり、タンク上面のみに氷を生成させるために側面、底面はスタイロフォームで覆った。さらに側面からの熱の侵入を妨げるために、上面よりも高い位置までスタイロフォームで側壁を設けた。恒温循環装置によって-25℃程度に冷却されたエチルアルコールを、タンク内に循環させることによってタンク上面は-20℃程度に冷却される。また、氷の原料となる水蒸気を供給するために、上流端付近に加湿器を設置した。

(2) 温度設定

実験は北海道大学工学部 D 棟実験室で行われた。実験室内の室温のコントロールは実験室内の窓の開閉によってのみ可能である。水路勾配が 15° の設定で室温が低い状態(約 13℃)と高い状態(約 25℃)の 2 ケースの実験

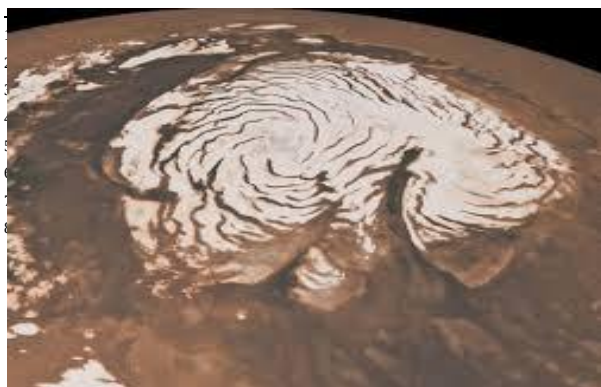


図 1 火星北極冠上に形成されているスパイラルトラフ地溝に直交してカタバ風が吹いている

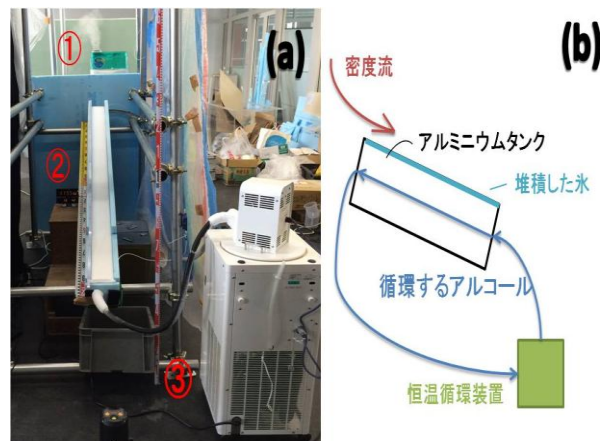


図 2 (a)実験装置全景図①加湿器②アルミニウムタンク③恒温循環装置 (b)実験装置概念図

を行い、さらに室温が高い状態(13℃)で勾配が4°、9.8°の2ケースの実験を行った(表1)。

(3) 測定

温度の測定は、室温とタンクの表面温度(上流端と下流端)を測定できるように温度計を設置し、ワイヤレスデータロガーを用いて30分間隔で記録した。タンク上面に堆積する氷の地形を測定するために、実験中に20分ごとに写真を撮影し、また、定規を用いて流下方向に一定間隔でタンク上面からの氷の高さ(以後、氷高さ)を測定した。実験2では20cm間隔、実験3、4では5cm間隔で計測した。

3. 実験結果

(1) 概要

2(2)で述べた4ケースの実験を行った。実験時間は228~557時間であった。タンク内全体に循環した常温のエチルアルコールを冷却し始めた瞬間を実験の開始とし、氷表面の形状変化が見られなくなる、または氷高さが側壁に設置したスタイロフォームより高くなった時点を実験の終了とした。

実験開始から約90時間はタンクの上流端から下流端まで一様に氷が堆積し、その後も実験1では氷の堆積が続き界面波が形成されることなく実験が終了した。

室温が高い状態で行った実験2、3、4ではタンク上面からの氷の高さが2.5cm程度になると氷の成長に場所的な差が生じるようになり、それが発達することで界面波が形成された。以後実験2、3、4の結果について述べる。

(2) 界面波が形成され始める高さ、地点

実験2、3、4では実験開始から約90時間が経過すると、氷の高さが約2.5cmを超えた地点で氷表面の融解が発生した。いずれの実験においても上流から40~50cmの地点で融解が発生し、氷高さに上下流方向で変化が生じることで界面波が形成された。さらに時間が経過するにつれて氷高さは高くなり、上流から40~50cmの地点よりも下流側の位置で融解が発生し、新たな界面波が形成された(図4)。界面波の進行は上流方向、下流方向ともに見られなかった。

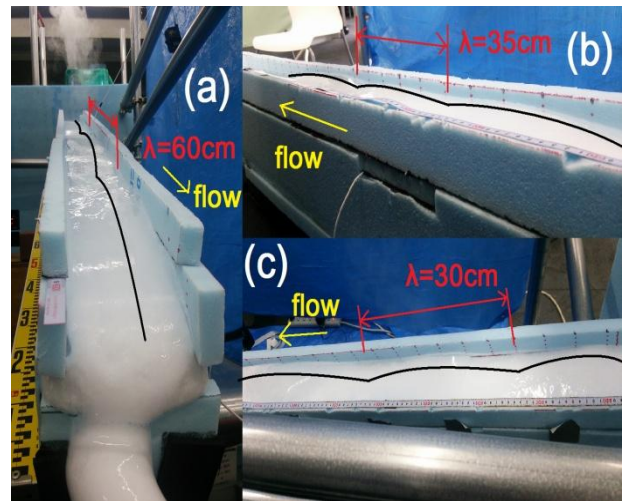


図3 実験によって形成された界面波の例
黒線は氷表面の概形を表し、2本の赤線に挟まれた部分に界面波が見られる。黄色矢印は密度流の風向を表す。(a)実験2: $\lambda=30\sim60\text{cm}$ (b)実験3: $\lambda=20\sim45\text{cm}$ (c)実験4: $\lambda=25\sim40\text{cm}$

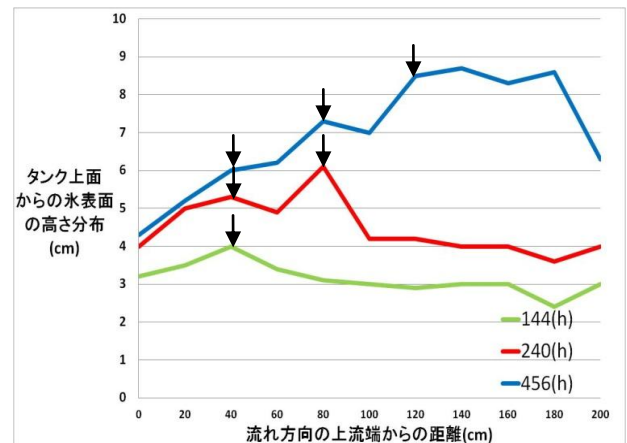


図4 実験2における氷表面の高さ分布

横軸は上流端からの距離(cm)、縦軸はタンク上面からの氷表面の高さ分布を表す。緑線は実験開始から144時間後、赤線は240時間後、青線は456時間後の氷の高さ分布を表す。時間経過につれて下流方向に新たな界面波が形成される。

表1 実験条件

実験番号	水路勾配 (°)	温度(°C)						継続時間 (h)	平均波高 (cm)		平均波長 (cm)	
		室温		タンク表面 (上流端)		タンク表面 (下流端)			平均値		平均値	
		平均値		平均値		平均値			最小 最大		最小 最大	
		最小	最大	最小	最大	最小	最大		最小	最大	最小	最大
1	15	12.9		-22.6		-24.9		238	-		-	
		6.7	19.5	-24.9	-20.6	-26.9	-23		-	-	-	-
2	15	25.9		-19.4		-21.7		557	0.8		46.7	
		23.5	29.4	-22.1	-16.3	-23.5	-18.9		0.3	1.3	30	60
3	4	26.4		-15.8		-16.1		332	1.1		30	
		24	28.2	-18.8	-13.8	-18	-14.9		0.6	1	20	45
4	9.8	24.7		-14.7		-18.2		336	1.3		33.3	
		22	26.9	-16.6	-13.2	-20.5	-17		0.8	2.4	25	40

(3) 形状と波長、波高

実験 2, 3, 4 において、実験終了までに緩やかな界面波が 3~4 個形成された。一つの界面波の山に着目すると、上流側斜面と下流側斜面の勾配に大きな差はなく、山から谷までの長さも双方でほぼ同じ長さであるため、界面波の山の頂点を中心として流れ方向に左右対称に形成されたと言える(図 5)。

実験 2 においては 30~60cm、平均値が 46.7cm の波長の界面波が形成され、波高の平均値は 0.795cm となった。実験 3 における波長は 20~45cm であり、その平均値は 30cm、波高の平均値は 1.137cm となった。実験 4 においてはそれぞれ 25~40cm, 33.3cm, 1.33cm という結果となった。波高が小さいのに対し波長は長く、勾配が大きいほど波長が大きい傾向が見られた。実験終了時の氷表面の高さ分布を図 6 に示す。

4. 考察

(1) 界面波の発達過程と形状

界面波の形成は、氷高さが 2.5cm を超えた地点から氷表面の融解が発生し、融解水が氷上で凝固、融解を繰り返すことで、上下流方向で氷高さに差が生じた。これにより界面波が形成された。室温が高い状態で実験を行ったため、室温とタンク上面の温度差が大きい環境となった。氷が高く堆積するにつれてタンク上面からのマイナスの熱の影響が小さくなり、氷-密度流界面が不安定となったために氷高さに差異が生じ、界面波が形成されたと考えられる。

一つ目の界面波が上流から 40~50cm 地点で形成され、時間経過に伴い氷高さが増加しながら下流方向に新たな波が形成された。上流側に形成された界面波をきっかけに擾乱が起こり、下流方向へ伝播して新たな波は形成されたといえる。

3 章で述べたように実験 2, 3, 4 において波高が小さく波長が長い界面波が 3~4 個形成され、流れ方向に対して左右対称の形状となった。1 章で述べたように流れ

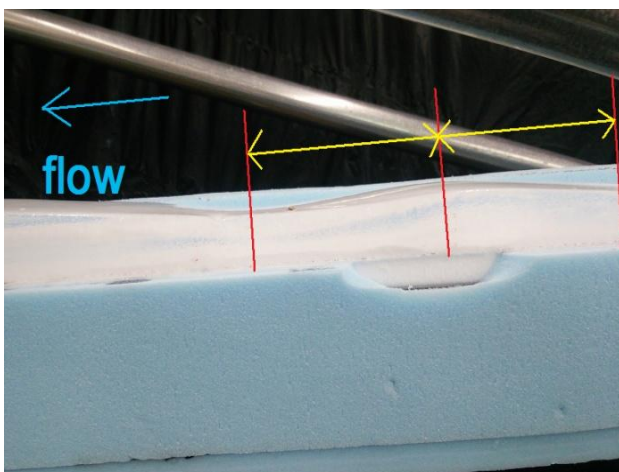


図 5 実験 2 で形成された波長 30cm の界面波の側面からの写真

赤線は一つの波の山と谷の位置を表し、黄線は山から谷の距離を表す。2 本の黄線の長さが同様であるため、界面波は上下流方向に対称な形状であると考えられる。

-移動床界面でデューンやサイクリックステップなどの河床波が形成されている。実験で形成された界面波と比較すると、上下流方向に対称な形状を持っており、フルード数が比較的大きい領域で形成されるアンチデューンに類似している。アンチデューンは通常上流方向に進行する波であるが、実験中では上流方向、下流方向ともに波の進行は見られなかった。河床波の種類はフルード数などのパラメータによって区別されており、密度フルード数などのパラメータの付与のために、氷上を流れる密度流の流速や水深の計測が必要である。

(2) シリコンオイルを用いた実験との比較

氷上に密度流が流れて界面波が形成される過程を想定した実験は過去に行われている⁷⁾。長さ 150cm、幅 2cm のアクリル製水路の中に水を張り、凍らせることで厚さ 8cm、長さ 120cm の氷床を作る。その上に流体(シリコンオイル+水)を流すことで界面波の形成を試みた実験である(図 7)。ここで、シリコンオイルを不凍液として用い、氷上を流れるカタバ風に見立てている。シリコンオイルに含有比が 10%程度になるように水を混ぜ、氷上で凝固、融解するカタバ風中の水蒸気に見立てた。この実験は氷温度<周囲気体(-6~-4℃)<流体温度(-0.5~0℃)という温度分布で行われ、初期擾乱として水路上流端より 30~50cm の地点に 1~2cm の切り欠けを設けた。勾配は 20°~30° で、フルード数は 1.33~3.07 の条件で行われた。以後この実験を実験 0 とする。

この条件での実験の結果では凝固により堆積が卓越する状況となり、氷床の高さが全体的に上昇しながらステップ地形が発達する様子が観察された。さらに一部のケースではステップが下流へ進行する様子が観察された⁷⁾。

実験 0 では氷底面からマイナスの熱を与えておらず、かつ氷を実験開始前から生成し、流体として不凍液を使用しているので、今回筆者らが行った実験とは条件が異なったものである。しかし、凝固による堆積が卓越する状況で界面波が形成されるという結果は双方で一致するものであった。実験 0 の一部のケースで界面波が下流へ

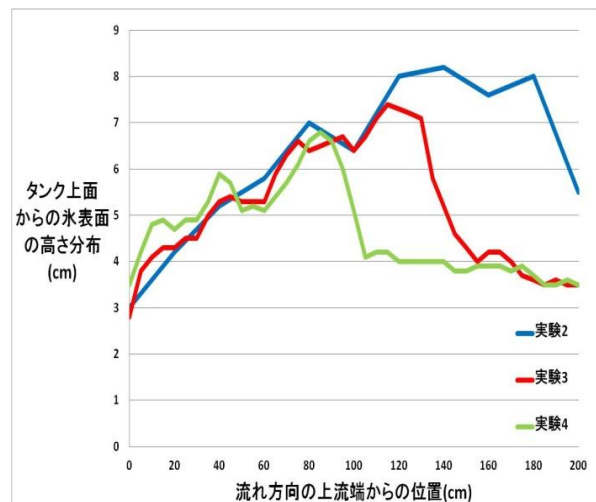


図 6 実験終了時の氷表面の高さ分布

青線は実験 2、赤線は実験 3、緑線は実験 4 を示す。

進行したことに、界面波の下流部では水深が小さいために低い室温の影響を受けやすく、その結果オイルに混ざった水分が凝固し堆積が発生することで、下流へ進行したと考えられる。今回行った密度流を用いた実験においても、界面波の上流部分と下流部分で流れる密度流の高さ(水深)や流速を測定できれば、界面波の進行方向を特定できる可能性がある。

5. 結論と今後の予定

本研究では氷の上を流れる密度流によって流れ-氷界面に形成される界面波について、実験によって形成過程を観察することにより以下のことが明らかとなった。

1)冷却されたエチルアルコールがアルミニウムタンク中を流れ、 -20°C 程度に冷却されたタンクの表面上に密度流が流れることで、密度流中の水蒸気が表面上に着霜し、堆積がおこる。室温が低い状態(約 13°C)では氷表面の融解が見られず、界面波は形成されなかった。室温が高い状態(約 25°C)では氷表面の融解を伴いながら底面からの氷高さに場所的な差が生じ、氷高さが上昇しながら実験終了までに界面波が 3~4 個形成された。

2)形成された界面波は、波高が小さいのに対して波長が長く、一つの波の頂点を中心として上下流方向に左右対称の形状を有している。勾配が大きいほど波長が大きくなる傾向も見られた。

今回の実験で、密度流によって氷上に界面波が形成されることが確認されたので、今後の実験においては界面波の形状の分類、解析を行う。そのために形成された氷

内部の温度分布、流速の測定が必要である。また、氷高さをさらに詳細に測定できれば、実験内での波長や波高の推移、界面波のわずかな進行等を観察しうる。さらに、タンク上面の温度を現在の設定である -20°C よりも高くし、界面波が形成され始める高さ、地点に今回の実験との違いが現れるかについても観察を今後行う予定である。

参考文献

- 1) Solari, L., Parker, G.: Morphodynamic modeling of the basal boundary of ice cover on brackish lakes, *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 118.3: 1432-1442, 2013.
- 2) Fahnestock, M. A., Scambos, T. A., Shuman, C. A., Arthern, R. J., Winebrenner, D. P., and Kwok, R.: Snow megadune fields on the East Antarctic Plateau: Extreme atmosphere - ice interaction, *Geophysical research letters*, 27(22), 3719-3722, 2000.
- 3) Smith, I.B., Holt, J.W.: Onset and migration of spiral troughs on Mars revealed by orbital radar, *Nature*, 465.7297: 450-453, 2010.
- 4) Smith, I. B., Holt, J. W., Spiga, A., Howard, A. D., and Parker, G.: The spiral troughs of Mars as cyclic steps, *Journal of Geophysical Research: Planets*, 118(9), 1835-1857, 2013.
- 5) Howard, A.D.: The role of eolian processes in forming surface features of the Martian polar layered deposits, *Icarus*, 144.2: 267-288, 2000.
- 6) 横川美和, 泉典洋, 内藤健介, 山田朋人, Ralf Grave: 氷上のステップ地形に関する実験的研究, 水工学論文集 B1(水工学), Vol.69. pp.I_1129-I_1134, 2013.
- 7) 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 B1(水工学), Vol.69, pp. I_1123-I_1128, 2013.
- 8) 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, 水工学論文集 B1(水工学), Vol.69, pp.I_1117-I_1122, 2013.

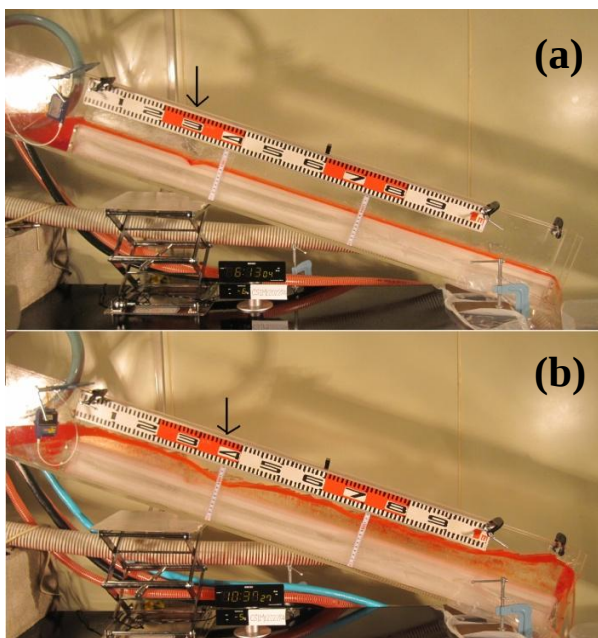


図 7 実験 0(実験番号 CSIM120227A)における(a)実験開始直後(b)64 時間経過後の氷の写真

室温: -6.0°C , 流体: -0.4°C , 勾配: 20° , 流量: $44.6\text{cm}^3/\text{s}$, 水深: 8.6mm , Fr 数: 1.70, 濃度: 10.8%, 継続時間: 65 時間, 常流から 30cm 地点に作った切り欠けが下流へ進行し、波長 10~15cm の界面波が 3~4 個形成された。