

# 氷界面波が形成する密度流の速度分布と温度分布測定を試み

An observation of wave forming process on the ice surface by the density currents and the measurements on distribution of the temperature and velocity of the current

北海道大学工学部環境社会工学科	○学生会員	長谷川貴史 (Takashi Hasegawa)
北海道大学大学院環境フィールド専攻	学生会員	角田堯史 (Takashi Sumida)
北海道大学大学院工学研究院教授	正会員	泉 典洋 (Norihiro Izumi)
大阪工業大学情報科学部教授	正会員	横川美和 (Miwa Yokokawa)
北海道大学大学院工学研究院准教授	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やデューンなど、水の流れと移動床の境界面によって河床波が形成されている。これらは液相と固相の境界面が状態変化し、平坦な状態から波状の形状に遷移する界面不安定現象である。

また、同様の現象が氷上でも確認されている。その例としては、氷河の融解流により形成されるステップ地形、結氷河川の河氷の裏側に存在するリップル構造<sup>1)</sup>が挙げられる。

一方で、火星北極冠かららせん状に広がったスパイラルトラフ<sup>2)</sup>と呼ばれる地形が存在する。河川北極冠ではカタバ風と呼ばれる密度流が発生しており、それは氷床付近で冷却された空気が密度増加により斜面下方へ流れることによって発生する。カタバ風は地溝と直交して吹いている<sup>3)</sup>ため、

氷-密度流界面に形成される界面波の一種であると考えることができる。カタバ風に含まれる水蒸気が氷床上で凝固したり、氷床からの昇華が起こることによって氷の高さが流れの上下流方向に差が生じて界面波が形成される。<sup>4)</sup>

氷上を密度流が流れることによって界面波が形成される現象は角田ら<sup>5)</sup>による実験により確認されている。しかし、角田らの実験<sup>5)</sup>では界面波の発達過程の断面での観察や密度流の流速、境界層厚さの計測等ができなかった。特にカタバ風の温度分布や密度流の流速分布は界面波の形成において重要な要素の一つである。そこで、本研究では氷に冷やされて発生した密度流が空気中の水分によってできた氷表面上を流れる条件で実験を行い、その断面の様子や水路上の温度分布、密度流の速度分布を観察した。

## 2. 実験概要

### (1) 実験装置

実験装置は図-2 に示すように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器、加湿器からなる。タンク上面にのみ氷を生成させるため、側面と底面を断熱材(スタイロフォーム)で覆った。さらに密度流が側方にこぼれることを防ぎ、かつ界面波の形成過程を側面から観察するために透明なアクリル板を側壁として用いた。

これらの装置によってカタバ風が形成され、それによって界面波が形成される過程は次のとおりである。恒温循環器によって-26℃付近に冷却したエタノールをアルミニウムタンク内に循環させる。これにより、断熱材に覆われていない水路部分(タンク上面)の温度が-20℃付近に保たれる。水路部分に接した空気が冷却され密度が増すと空気が重力に引っ張られて斜面に沿って滑降し、カタバ風が発生する。水路を流れるカタバ風中の水蒸気が凝固し氷になったり、氷表面で融解が生じたりすることで界面波が形成される。密度流中の水蒸気を増やすことで氷の成長を促進するために、タンク上流端付近に加湿器を設置した。

### (2) 実験条件と測定方法

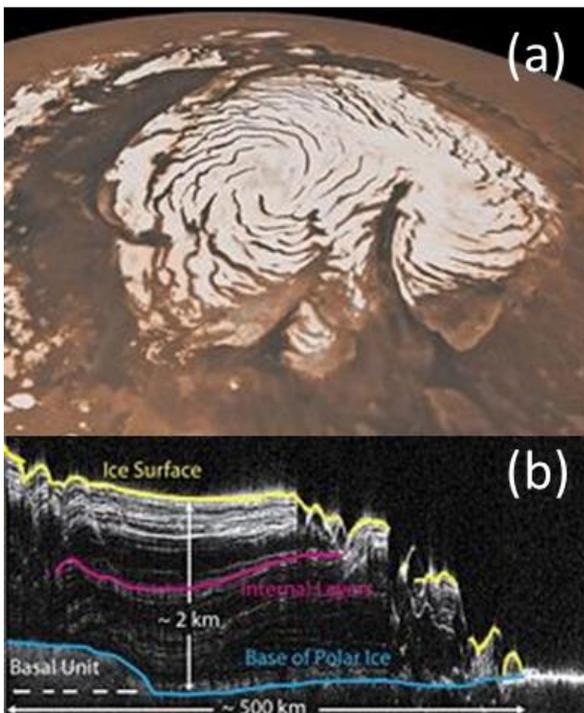


図-1(a)火星北極冠上のスパイラルトラフ。(b) スパイラルトラフの断面図。<sup>6)</sup>Courtesy NASA/JPL-Caltech

実験は北海道大学工学研究院の実験室で行われた。実験室内の室温はコントロールできないため、できるだけ気温が安定した期間に実験を行った。実験条件を表1に示す。

温度の測定は、室温とタンクの表面温度(上流端と下流端)と循環器内のエタノールの温度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記録した。熱電対を上流端から40, 90, 150 cmの地点に、高さが0.5, 3, 6 cmの3か所(上流端から150 cmの地点は0.5, 3 cmの2か所のみ)で設置し、温度を計測した。また、実験中の氷の成長や界面波の形成過程を観察するために水路側面の写真を撮影した。以上の計測は、全て30分間隔で行った。

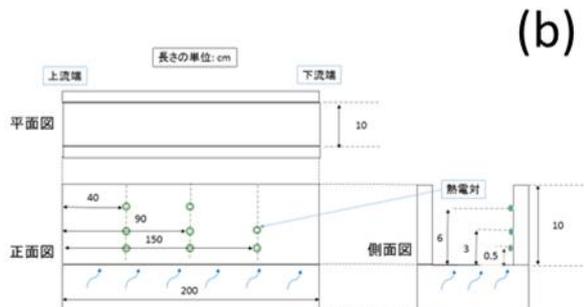
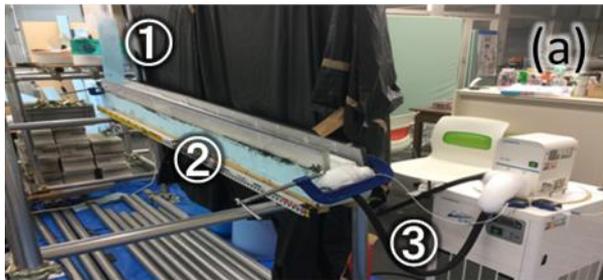


図-2(a) 実験装置全景。実験装置は①加湿器，②アルミニウムタンク，③恒温循環器からなる。(b) 水路図。図に示す8箇所熱電対を設置した。

表-1 実験条件と実験結果。水路勾配と波長の大きさは角田ら<sup>5)</sup>で示された通り、勾配が大きいほうと波長が長いという結果になった。

実験番号	水路勾配(°)	室温(°C)	タンクの上面温度(°C)	継続時間(h)	平均波高(cm)	平均波長(cm)
1	22	25.7	-17.5	272.5	1.89	48.5
2	3	22.2	-20.8	388	1.13	35.6

### 3. 実験結果

#### (1) 概要

冷却されたエタノールがアルミニウムタンク内において、タンク上面は-20°C程度に冷却された。タンク上面が十分に冷却された後に下流端付近を

観察すると、周囲よりわずかに白い空気の流れが下流端から流れ出している様子が目視で確認できた。冷却され、密度を増した空気が密度流を作って流れているのである。

その後、この密度流に含まれた水分が冷却された水路底面に着霜し、氷が堆積した。氷は上流から成長を始め、下流方向へと進行した。最終的には界面波の波数は4つで落ち着いたが、水路勾配の少ない実験2では下流方向への進行が遅く、上流から120 cmのところまでしか界面波が発生しなかった。

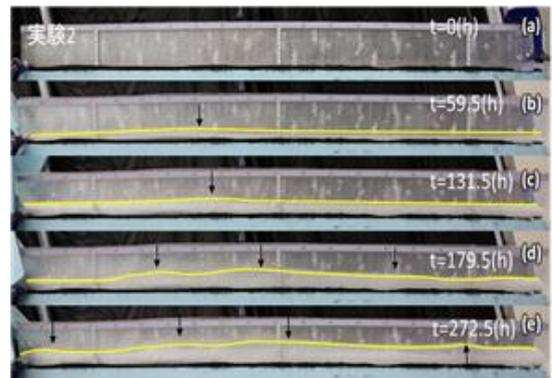
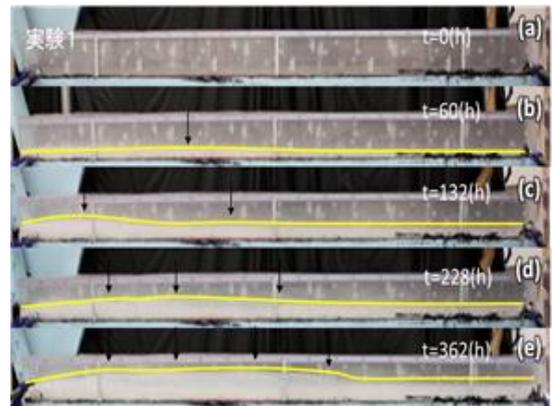


図-4 実験1と実験2の側面から観察した界面波の遷移。上流から界面波が発生し、下流へ進行すると同時に、上流で新しい界面波が形成されていた。

#### (2) 温度分布

密度流中の温度分布と氷内部の温度分布を確認するために熱電対で温度分布を測定した。(図-3) 氷の高さが熱電対を設置している高さ近辺まで成長すると、温度勾配が、それまでとは若干変化しているように見受けられる。

また、氷内部の温度は一定値まで下がると、変化が見られなくなることがわかる。

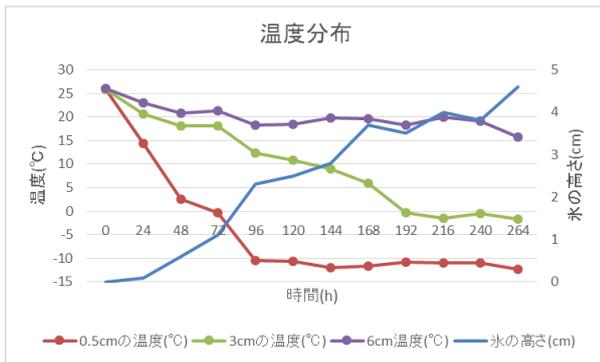


図-3 熱と同時刻の氷表面の高さを表したグラフ. いずれも上流から 40cm 地点において計測したものである.

### (3) 速度分布

今回、密度流の速度を計測するにあたり、線香の煙を使用して流体の流れを可視化する方法を採用した。水路に発生した密度流を煙が下流方向へ流れることによって可視化できた。線香の先端を一定の高さより下に下げると、煙は流下方向へと流れだした。

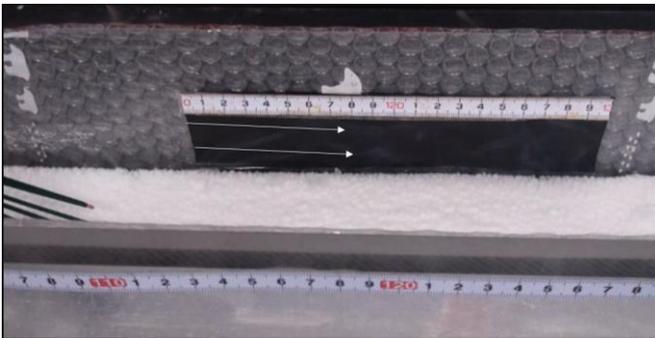


図-5 流速の可視化の実験. 煙は左から右の流下方向へと流れている。

### 4. 考察

界面波が上流で発生し、下流へ進行することから、この界面波は波数が比較的大きい領域で発生していることがわかる。

氷床近辺での特異な温度変化により、密度流中の温度分布が特殊な形をしていることがわかる。

また、線香の煙は上流側より下流側のほうがスムーズに流れたことから密度流は下流に行くにつれて、層が厚くなっていくことが予測できる。

### 5. まとめ

本研究では、氷床と密度流の間に形成される界面波の温度分布と速度分布に着目して実験を行い、その形成過程を観察した。その結果、以下のことが分かった。

- ・勾配が小さいと下流まで界面波が形成されない。これは重力によって吹き降ろすカタバ風の特性和一致してい

る。

- ・氷床近辺で温度が急激に変化したため、密度流の温度勾配が大きくなる点があることが予測できる。
- ・線香の煙が、下流に行くほど流下方向へ強く流れることから、密度流が下流に行くほど強くなっている。

### 6. 今後の展望

温度分布に関しては、熱電対を鉛直方向により短い間隔で設置し、詳細な温度分布を得られるように実験を行う。同時に、界面波が形成された状態で波の上流側と下流側における密度流の温度分布の違いを観察する。

速度分布に関しては、加湿器の水蒸気流が線香の煙に影響を与えている可能性があるため、加湿器を使わずに実験を行う。また、線香自身が持つ熱の密度流に対する影響を考慮しながら実験を行う。

### 参考文献

- 1) Carey, K. L.: Observed configuration and computed roughness of the underside of river ice, St. Croix River, Wisconsin. US Geological Survey Prof. Paper, B192-B198, 1966.
- 2) Smith, I.B., Holt, J.W.: Onset and migration of spiral troughs on Mars revealed by orbital radar, Nature, 465.7297: 450-453, 2010.
- 3) Howard, A.D.: The role of eolian processes in forming surface features of the Martian polar layered deposits, Icarus, 144.2: 267-288, 2000.
- 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) 角田堯史, 泉典洋, 横川美和, 山田朋人 : カタバ風によって氷床上に形成される界面波, 水工学論文集 Vol.60, 2016(受理)
- 6) NASA 「NASA Orbiter Penetrates Mysteries of Martian Ice Cap」  
<[http://www.nasa.gov/mission\\_pages/MRO/news/mro20100526.html](http://www.nasa.gov/mission_pages/MRO/news/mro20100526.html)>(アクセス日:2015/12/10)