

氷床上を流れるカタバ風の流速および温度の測定実験

Experimental study on measurement of flow velocity and temperature distribution of katabatic wind flowing on the ice floor

北海道大学大学院工学院	○学生会員	角田 堯史	(Takashi Sumida)
北海道大学工学部環境社会工学系	学生会員	長谷川 貴士	(Takashi Hasegawa)
北海道大学大学院工学研究院教授	正会員	泉 典洋	(Norihito 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

結氷河川の河氷の裏側に現れるリップル構造¹⁾や氷河の融解流によるステップ地形など、氷と流体との境界面に地形が形成される例が確認されている。南極氷床上に発達するメガデューン²⁾や火星北極氷冠上に発達するスパイラルトラフ³⁾も氷と流体の境界面に形成される地形の例であるが、これらはカタバ風と呼ばれる空気の流れが氷床に発生することによって形成される。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。特に火星北極冠上では、カタバ風はトラフに直交して吹いていることが確認されている⁴⁾。

氷と密度流との境界面に界面波が形成されることは筆者らの実験的研究で示されている。すなわち、氷の底面温度と大気温との温度差が大きい時、氷表面に融解が生じ、氷が厚くなりながら界面波が形成された⁵⁾(図-1)。また、タンク上面が充分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ている様子が目視で確認された。界面波の形成過程や形状を議論する上で氷上を流れるカタバ風の流速や温度は重要なパラメータであるが、測定が困難であるため実験データは得られていない。本研究では、空気は冷却されることによって発生する密度流を可視化することによる流速の測定、その時の温度の測定を行い、氷床上を流れるカタバ風の流動特性に基礎的な知見を与えることを目的とする。本実験では、温度の影響によって発生する密度流を簡潔に説明するため平坦床を対象とした。

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低温循環装置からなる(図-2(a))。アルミニウム製タンクは長さ 200 cm、幅 10 cm、高さ 10 cm である。アクリル板(長さ 200 cm、幅 2 cm、高さ 10 cm)2 枚を 2 cm の幅でタンク上面に設置することで、タンク上面に長さ 200 cm、幅 2 cm の水路を生成した。タンクのその他の面はスタイロフォームで覆った。

低温循環装置によって冷却されたアルコールをタンク内に循環させることで、タンクの上面が冷却された。これにより氷床を再現した。さらに、タンク上面付近で冷却された空気は密度を増し、タンク上面に沿って滑降することで密度流が発生した。タンク上面に水蒸気が着霜し氷となるが、その表面形状が平坦な状態で実験を行った。以後、上流端からの流下方向の距離を x 、タンク上面からの高さを z と定義する。

(2) 流速と温度の測定方法

タンク上面に流れる密度流の可視化のために線香を用いた。タンクの上面が充分に冷却された状態で火をつけた線香をタンク上面に可能な限り近づけた。線香から出る煙が空気の流れに沿って下流方向に流れることで密度流が可視化された。線香の煙によって可視化された密度流を側面から撮影し、その画像から流速を測定した。写真は 1 秒間に 30 枚の時間間隔で撮影することができ、 $x = 20, 60, 100, 140, 180$ cm 地点で撮影した。

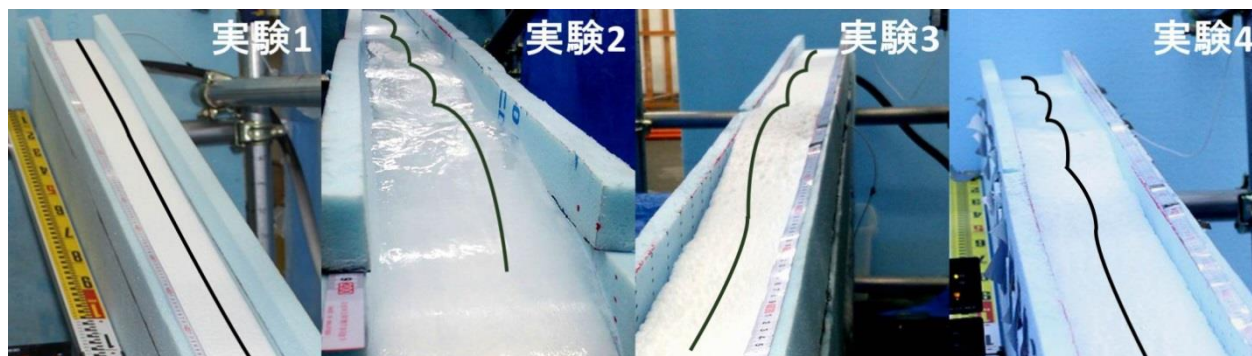


図-1 筆者らの実験⁵⁾でアルミニウムタンク上面に形成された界面波。黒線は氷表面の概形を表す。水路勾配は実験 1, 2 では 15° 、実験 3 では 4° 、実験 4 では 9.8° である。アルミニウムタンクの上面温度は実験 1-4 全てで -20°C 程度であり、室温は実験 1 では 12.9°C 、実験 2 および 3, 4 は 25°C 程度である。実験 1 では界面波は形成されず、実験 2 および 3, 4 ではタンク上面に 3-4 個の界面波が形成されている。

タンク上面を流れるカタバ風の温度を計測するために熱電対を用いた。タンク上面から鉛直方向にプローブを $z = 0 \text{ cm}$ から $z = 10 \text{ cm}$ まで 0.5 cm 間隔で設置し、その地点の温度を測定した。10秒間で100個のデータを採取し、その平均値をその地点での温度として扱った。測定は $x = 20, 60, 100, 140, 180 \text{ cm}$ 地点で行った。

(3) 実験条件

実験は北海道大学工学研究院の実験室で行われた。実験室内の室温を可能な限り高い状態に、タンク上面の温度を可能な限り低い状態にして行った。これは、角田ほかの実験において室温とタンク上面の温度との温度差が大きい時に界面波が形成された⁵⁾ため、その条件に従ったものである。なお、タンク上面の温度はタンク内を循環するアルコールの温度を低温循環装置で操作することで調整できる。アルコールの温度は -37°C 程度だった。水路勾配を 3° 、 10.2° 、 20° の3ケースに設定して実験を行った。室温とタンク上面温度(上流端と下流端)の温度を測定するために温度計を設置した。流速測定実験の実験条件を表-1に、温度測定実験の実験条件を表-2に示す。ここで、水路勾配を θ 、室温を T_a 、水路上流端でのタンク上面温度を T_{su} 、水路下流端でのタンク上面温度を T_{sd} とする。

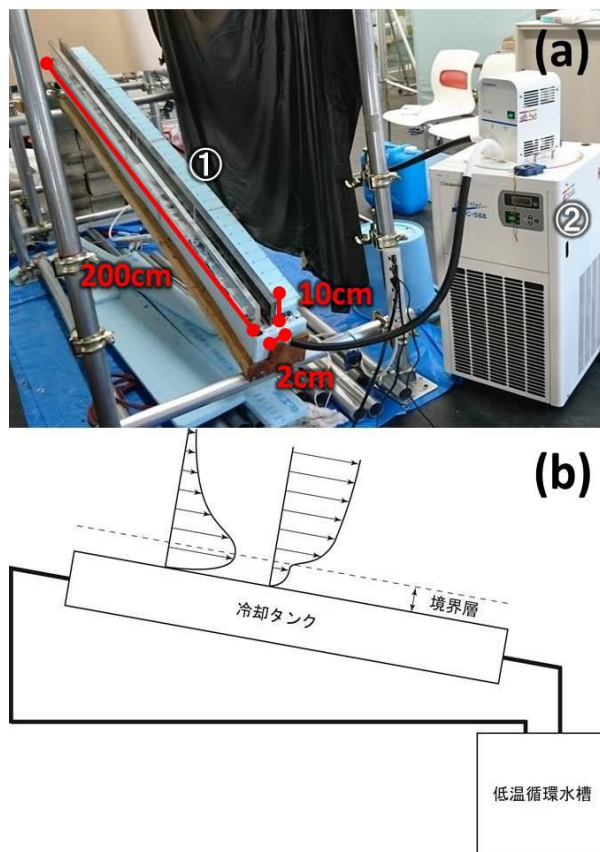


図-2 (a)実験装置全景と(b)カタバ風の概念図。実験装置は①アルミニウムタンク、②低温循環装置、からなる。(b)ではタンク上面に流れるカタバ風の流速分布(左)と温度分布(右)を概念的に示す。

(4) 流速分布と温度分布

図-2(b)にタンク上面を流れるカタバ風の流速分布と温度分布の概念図を示す。本論文では、底面(タンク表面)からカタバ風の流速が最大となる地点までを境界層と定義する。カタバ風の流速が最大となる地点では流速勾配がゼロとなるため、渦動粘性係数は小さくなる。乱流による温度拡散係数が渦動粘性係数とほぼ等しいとすると、境界層上端では乱流温度拡散係数もほぼゼロとなるため、熱フラックスの連続から温度勾配が非常に大きくななければならない。したがって、図-2(b)のように境界層の上端で温度は急激に変化することになる。

3. 実験結果と考察

(1) 密度流の流速

タンク上面付近の空気が密度を増すことで発生する密度流を、線香の煙を供給することで可視化することができた。実験1, 2および3で、水路最上流部($x = 20 \text{ cm}$ 付近)では線香の煙の多くが鉛直方向上向きに流れ、下流方向に流れる煙を撮影することができなかったため、水路最上流部における流速の測定はできなかった(図-3)。 $x = 60 \text{ cm}$ 地点より下流側では下流方向へ流れる煙を撮影することができ、撮影した写真で煙の位置を追跡することで各地点における流速を測定した(図-4)。各地点で

表-1 流速測定実験の実験条件

実験番号	水路勾配 θ	室温 T_a	タンク上面温度	
			T_{su}	T_{sd}
1	3	23.2	-21.8	-23.6
2	10.2	22.4	-21.6	-22.6
3	20	22.3	-22.1	-23.2

表-2 温度測定実験の実験条件

実験番号	水路勾配 θ	室温 T_a	タンク上面温度	
			T_{su}	T_{sd}
4	3	22.6	-22.3	-22.9
5	10.2	23.1	-21.8	-22.9
6	20	22.2	-22.0	-23.1

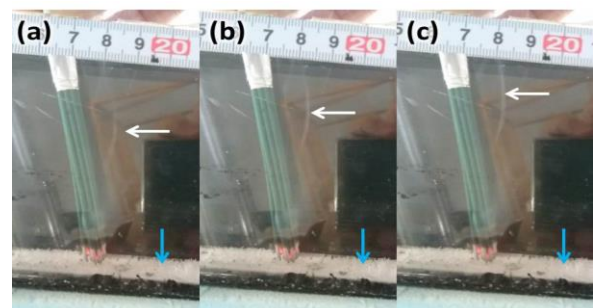


図-3 実験3の $x = 20 \text{ cm}$ 地点における線香の煙の動きを示した図。(a)(b)(c)の写真の撮影間隔はそれぞれ0.03秒であり、青の矢印はタンク上面の位置を、白の矢印は追跡した煙の中心位置を示す。鉛直方向上向きに煙が流れた。

煙の位置の追跡を8通り行い、その平均値を流速として扱った(表-3)。実験1, 2および3において密度流は下流方向へ流れるにつれて流速が増加する傾向が見られた。

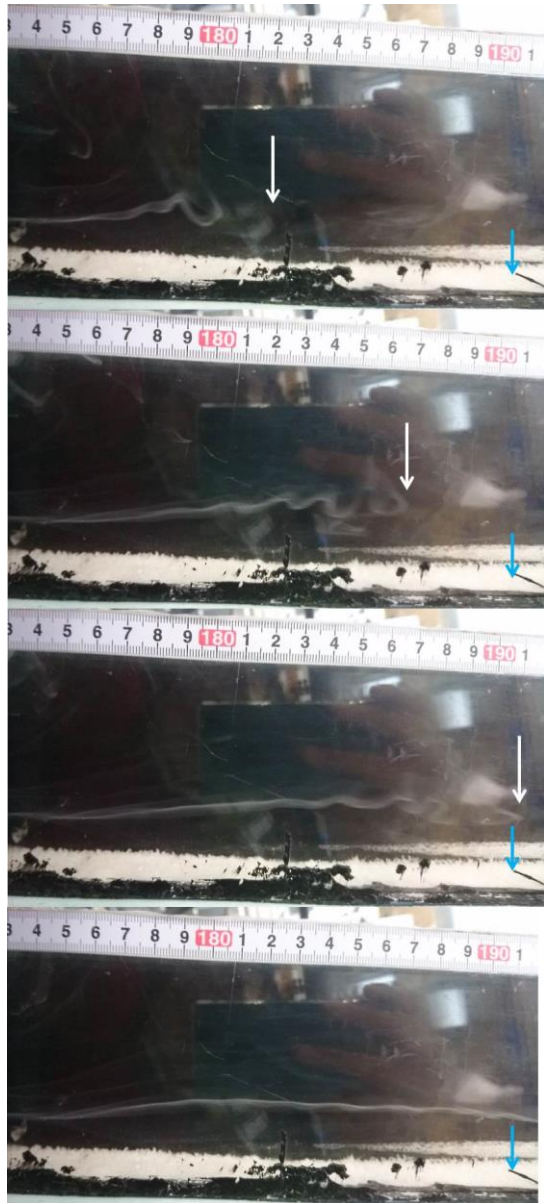


図-4 実験2の $x = 180$ cm 地点における線香の煙の流れを示した写真。上から順に 0.2 秒毎の写真である。線香の煙によって密度流を可視化することができ、煙の位置を追跡することによって流速を測定した。青の矢印はタンク上面の位置を、白の矢印は追跡した煙の位置を表す。

表-3 流速の測定結果(単位はcm/s)

実験番号	x			
	60	100	140	180
1	5.10	9.21	19.11	20.66
2	6.92	13.14	13.58	14.52
3	8.13	10.34	13.16	21.21

角田ほかの実験⁵⁾ではカタバ風が氷上を流れていることを直接的に示す結果を得られず、カタバ風の存在に関して定性的に述べるにとどまっていた。本実験では、線香の煙によってタンク上面付近の空気が冷却されて発生する密度流の動きを可視化し、流速を測ることができた。

また、氷とカタバ風との境界面に界面波が形成される現象にとって、氷上を流れる密度流の流速のデータは重要であるため、流速の測定方法、測定された流速の一つの例を提示することができたといえる。室温やタンク上面温度を変えることで流速がどのように変化するか、また図-2(b)に示すように流速が最大になる位置がどこに現れるのかを観察することは今後の課題となる。

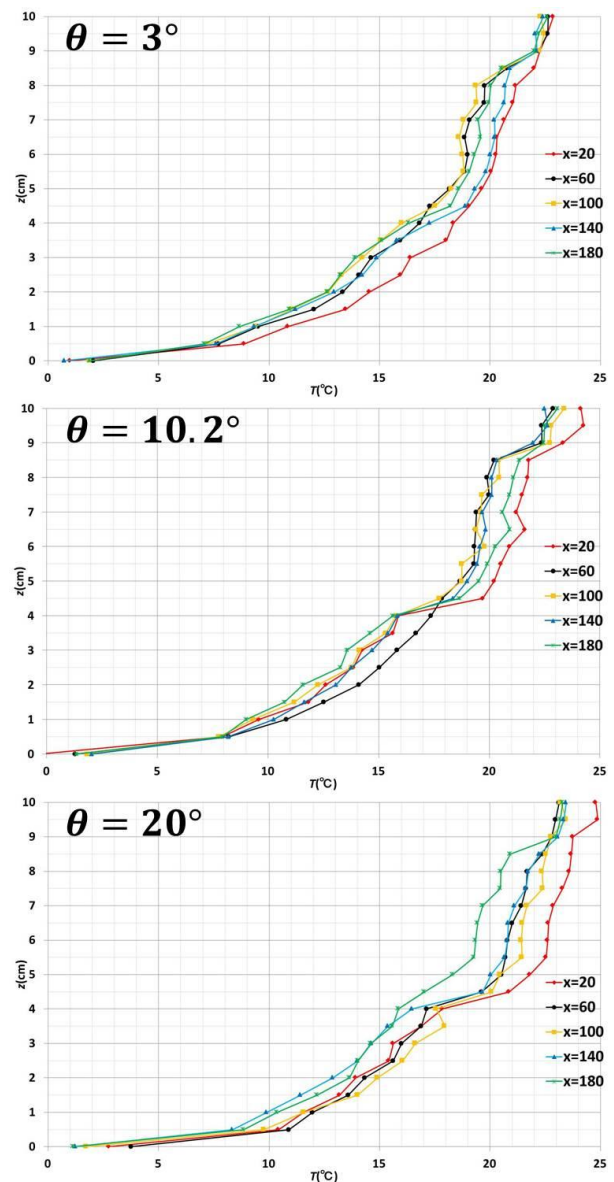


図-5 実験4, 5および6における温度の測定値の鉛直分布を示したグラフ。横軸は $T(^{\circ}\text{C})$ 、縦軸は $z(\text{cm})$ である。ここで、 T は温度の測定値である。一つのグラフに $x = 20, 60, 100, 140, 180$ cm における鉛直分布を示している。

(2) 密度流の温度の鉛直分布

熱電対を使用して、 x 方向の各地点において鉛直方向への温度の値を測定した(図-5).

実験 4, 5 および 6 において、 $z = 0$ cm から $z = 1$ cm の領域はタンク上面に接近しており、タンク上面に近ければ近いほど空気の温度は低くなるため、温度勾配が急であった。 $z = 1$ cm から $z = 4$ cm までは温度は緩やかに変化しているが、温度勾配が再び急になる領域が $z = 4$ cm から $z = 5$ cm の範囲で現れた。水路勾配が大きいほどその傾向は顕著である。その後、 z が大きくなるにつれて温度勾配は緩くなり、室温に近い値を取った。また、一つの実験の上下流方向での温度分布の違いは、水路勾配が大きいほど顕著になった。

氷床面で空気が冷却されることによって密度流が流れることは目視で確認されていた⁵⁾が、その時の水路内の温度分布やタンク上面の影響を受けて形成される境界層の厚さなどのデータはこれまで得られていなかった。本実験で図-5 のような温度の鉛直分布を示すことで水路内の空気に温度変化が生じ、その影響で密度流が発生していることを表す結果となった。また、本実験のような条件における温度の鉛直分布の一例を示す結果となった。図-2(b)に示すような温度分布の境界層上端付近での温度勾配はカタバ風の流動特性を把握するために重要であるため、温度の測定を本実験よりも短い距離間隔で行う必要がある。本実験では熱電対のプローブを鉛直方向に 0.5 cm 間隔で設置したが、さらに短い間隔で設置することで温度の鉛直分布をより詳細に測定することが今後の課題となる。

4. 結論

本研究では、冷却されたアルミニウムタンク上面に流れるカタバ風を可視化し、その流速を測定した。また、

熱電対によってタンク上面から鉛直方向に温度を測定することでカタバ風の温度分布を求めた。その結果次のことが明らかになった。

- ・タンク上面付近の空気が冷却されて密度が増し、密度流となって下流方向に流れることが線香の煙による可視化によって示された。
- ・密度流は下流方向に進むにつれて流速が増加する傾向が見られた。
- ・密度流の温度はタンク上面付近、 $z = 4$ cm から $z = 5$ cm の領域で大きく変化した。また、水路勾配が大きいほど上下流方向で温度の鉛直分布の違いが大きくなった。

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) 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) Howard, A.D.: The role of eolian processes in forming surface features of the Martian polar layered deposits, *Icarus*, 144.2: 267-288, 2000.
- 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).