

衝突噴流を用いた強制対流伝熱による融解潜熱蓄熱挙動

森田 慎一^{*1}, 鶴 若菜^{*2}, 木上 洋一^{*2}

Latent Heat Storage Behavior by Forced Convection Heat Transfer Using Impinging Jet

Shin-ichi MORITA^{*1}, Wakana TSURU^{*2} and Yoichi KINOUE^{*2}

^{*1}Division of Mechanical and Electrical Engineering, Kitami Institute of Technology
165 Koen-cho, Kitami-shi, Hokkaido, Japan 090-8507, Japan

^{*2}Graduate School of Science and Engineering Department of Science and Engineering, Saga University
1 Honjo-machi, Saga-shi, Saga, 840-8502, Japan

Abstract

The main factors that influence the latent heat storage process of melting are the thermal conductivity of the heat storage material and the melting convection. Since melting convection is the most influential factor, it is thought that promoting heat transfer by forced convection will significantly shorten the latent heat storage time. However, in latent heat storage of melting, where the phase-change from solid to liquid progresses, it is difficult to adopt a mechanical stirring method. Therefore, the heat exchange method adopted in this study is heat transfer in which high temperature air jets impinge on the latent heat storage material. Therefore, it is possible to generate forced convection in the molten liquid phase during latent heat storage. This paper describes the results of an experimental investigation of the impinging jet melting process of paraffin-based latent heat storage material. As a result of latent heat storage experiments, the characteristics of the forced convection melting behavior due to an impinging jet are shown, along with the optimal values of the jet flow velocity and the distance between the nozzle and the impinging surface. Furthermore, visualization of the flow in the molten liquid phase revealed that the location of vortex generation induced by the jet affects the melting behavior.

Key words : Impinging jet, Forced convection, Latent Heat Storage, Phase Change, Heat Transfer

1. 緒 言

潜熱蓄熱は、顕熱蓄熱に比べて非常に高い蓄熱密度を持つ有望な方式であるが、固液相変化過程を有することから蓄熱に長い時間を要する。潜熱蓄熱に関する研究例は、片面垂直加熱面を有する長方形蓄熱槽のサイズによる伝熱促進効果の検討 (Gadgil, et al., 1984)、融解挙動を検討した研究 (Bénard, et al., 1985)、潜熱蓄熱時間の短縮を狙ったフィン付加による融解・凝固挙動の理論的・実験的研究 (Saito, et al., 1986) などがある。融解液相内の対流が潜熱蓄熱の促進に大きな影響を与えることから、自然対流を効率的に発生させるための垂直フィンの形状を検討した例 (Wang, et al., 2023) も報告されている。潜熱蓄熱材料の融解液相内の強制対流は、潜熱蓄熱時間の大幅な短縮をもたらすと考えられるが、固・液相変化過程中に機械的な攪拌を施すことは困難である。噴流衝突による伝熱促進は、二次元空気噴流を平板に衝突にさせることにより、局所的に伝熱量を増加させる効果 (Kumada and Mabuchi, 1969) が示されている。本研究においては、高温空気噴流を潜熱蓄熱材に衝突させ融解液相内に強制対流を誘起させることにより伝熱促進する方法を採用し検討を行う。本報では、噴流ノズル高さや噴流流速を変化させ、円筒形蓄熱槽内の融解過程を実験的に観察し解析した結果について報告する。

2. 測定試料

原稿受付 2025年11月28日

^{*1} 国立大学法人北海道国立大学機構 北見工業大学 (〒090-8507 北海道北見市公園町165番地)

^{*2} 国立大学法人 佐賀大学 (〒840-8502 佐賀県佐賀市本庄町1番地)

E-mail of corresponding author: s-morita@mail.kitami-it.ac.jp

表 1 は, 試料として用いた相変化材料 (PCM: Phase Change Material) であるテトラコサン (東京化成工業株, テトラコサン ($\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{22}\text{CH}_3 = 338.6538 \text{ g/mol}$, 純度 > 99%, 融点 50.6°C) の主な熱物性値を示している.

Table 1 Thermophysical properties of tetracosane

Temp. T ($^\circ\text{C}$)	Density ρ (kg/m^3)	Specific heat C_p ($\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$)	Thermal conductivity λ ($\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$)	Latent heat Δh_f (kJ/kg)
50: Solid	903.9	1800	0.3556	304.8
53: Liquid	764.4	2300	0.1954	

3. 実験装置および実験方法

3.1 衝突噴流を用いる強制対流融解

図 1 は, 円筒形蓄熱槽 (透明アクリル: 内径 90 mm, 厚さ 10 mm 透明アクリル, 厚さ 3 mm 銅板: 底板) と高温空気噴流ノズル (SUS パイプ: 内径 19 mm) で構成される実験装置を示したものである. 蓄熱槽内の温度は, 9 mm × 3 mm 間隔で配置した $\phi 0.1 \text{ mm}$ の T 型熱電対を用いて測定した. 蓄熱槽は, 周囲への熱損失を低減するため断熱材で覆ってある. 潜熱蓄熱材には, テトラコサン (融点 50.6°C) を採用し, 試料液面高さ 15 mm になるように槽内に投入する. 実験は, 槽内温度が所期温度に到達したことを確認後, ノズルから所定温度の空気を噴射して開始した. 実験終了は, 10 秒毎に測定する槽内の全温度が融点温度に到達した時点, すなわち融解割合 $\Delta V/V = 1.0$ となった時点とした. データ解析は, 実験のばらつきを考慮し, 3 回以上行った結果の平均を用いて行った. 実験条件は, 実験開始時の槽内温度 $40 \pm 1^\circ\text{C}$ 以内, 平均空気噴流温度 $58 \pm 3.5^\circ\text{C}$, 噴流流速 $u = 7.2, 7.9, 9.3 \text{ m/s}$, ノズル高さ $h = 25, 30, 35 \text{ mm}$ である.

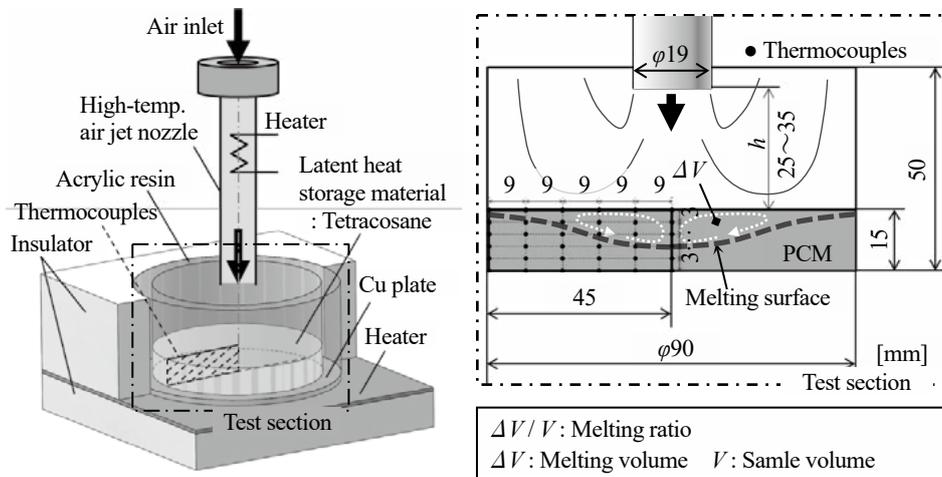


Figure 1: Experimental apparatus.

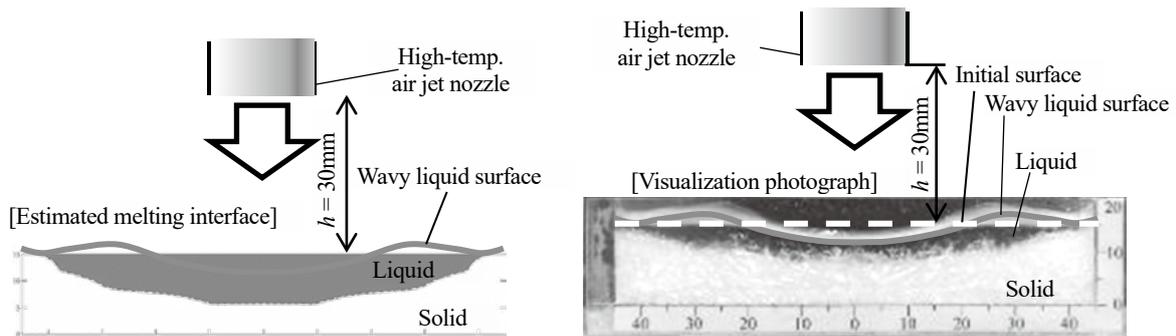


Figure 2: Melting solid-liquid interface by melting point temperature and visualization: thin rectangular tank.

図2は、ノズル高さ $h = 30\text{ mm}$ 条件での融解割合 $\Delta V/V = 0.3$ 到達時における、融点温度判定による槽内固液界面と長方形容器（高さ 20，幅 90，奥行き 10 mm）を用いて可視化撮影された融解界面の写真である。図中の破線は実験開始時の試料高さであり、実線は衝突噴流により波打つ融解液面を示している。融解液面は、噴流衝突によりくぼみ、周囲液面は盛り上がっている。液相内の渦発生位置は、液面の波形に左右され、融解の進行に影響を与えていると推察される。

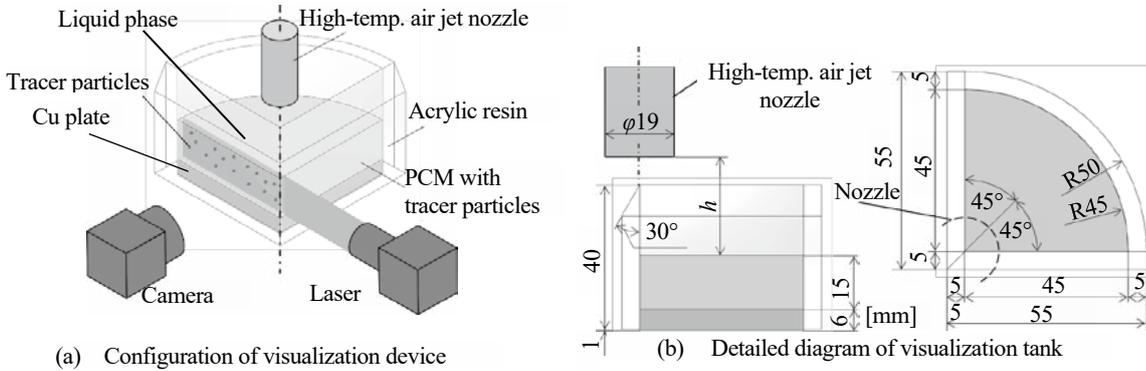


Figure 3: Radial direction visualization device using a 90° sector-shaped container.

3・2 PIVによる融解対流可視化

図3は、蓄熱槽内の内部流を観察するために用いた、(a)可視化実験装置構成と(b)透明アクリル製可視化容器（90°扇形）である。可視化実験は、テトラコサンを容器内に投入して加熱し全融解させ、噴流温度 80.5 °C、底面温度 40 °Cの状態で行った。内部流は、トレーサー（ポリアミド粉末：比重 1.06，平均粒径 100 μm ）を用いて撮影された、画像データによる解析を行った。

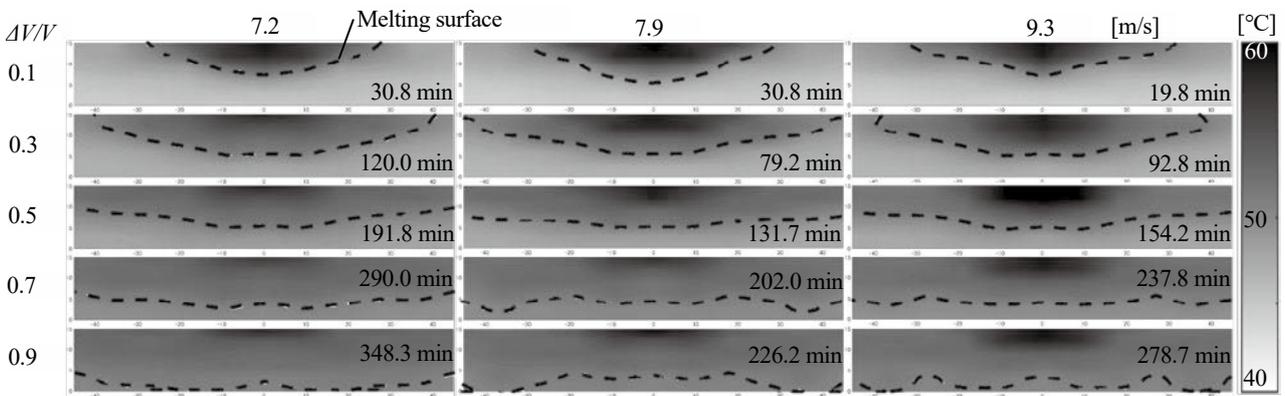


Figure 4: Temperature contour diagram illustrated with solid-liquid melting interface in the tank ($h = 30\text{ mm}$).

4. 実験結果および考察

4・1 強制対流融解

図4は、ノズル高さ $h = 30\text{ mm}$ 条件における、蓄熱槽内の温度分布を噴流流速ごとに示したものである。図中の点線は、下層が固体で上層が液体の融解界面を示している。高温噴流は、蓄熱材上面中央に向けて下向きに吹き付けられるため、中心部に近い上層域ほど高温となっている。融解割合 $\Delta V/V = 0.1$ の実験初期の時点では、衝突噴流の流速が大きくなるほど、融解領域の幅が大きくなっている。 $\Delta V/V = 0.3$ では、融解界面が外周に向けて広がり、半径 40 mm 程度までに広がる。 $\Delta V/V = 0.5$ における融解面は、最上層面から深さ 10 mm 程度まで達し、流速による大きな違いは見られない。 $\Delta V/V = 0.7 \sim 0.9$ の融解面は、噴流速度の違いが影響を与えている様子が見られ、融解界面形状の違いが表れている様子が観察できる。

図5は、噴流速度 $u=7.9$ m/s 一定条件において、ノズル高さを変化 ($h=25, 30, 35$ mm) させた場合の融解割合 $\Delta V/V$ の経時変化を示している。 $\Delta V/V=1$ に到達する時間は、 $h=30$ mm で最も短く 240 min, 次いで $h=35$ mm では 360 min, 最も時間のかかった $h=25$ mm では $\Delta V/V=0.7$ への到達までに 360 min かかっている。 $h=30$ mm の結果に着目すると、融解割合 $\Delta V/V$ は 0.138 (40 分) に達するまで一定の割合で増加し、その後傾きを小さくして 0.191 (55 分) に達した後、0.386 (90 分) まで急増加し、その後融解速度を減少して 0.632 (185 分) に到達の後、再び急増加して $\Delta V/V=1$ に達する。潜熱蓄熱過程におけるこれらの融解速度の変化は、時間の長さは異なるものの、ノズル高さにかかわらず $h=25$ mm と 35 mm でも同様の融解速度増減がある。

図6は、噴流速度 $u=7.2, 7.9, 9.3$ m/s に変化させた場合の、 $h=30$ mm 一定条件での融解割合変化を示している。融解割合 $\Delta V/V=1$ に到達するまでの時間は、噴流速度 $u=7.9$ m/s の場合が最も短く 240 min, $u=9.3$ m/s で 240 min, 7.2 m/s では 360 min を要する。特に、 $u=7.9$ m/s の場合は $\Delta V/V=0.8$ 付近で傾きの急増加が観察され、 $u=9.3$ m/s で条件よりも速く融解を完了している。

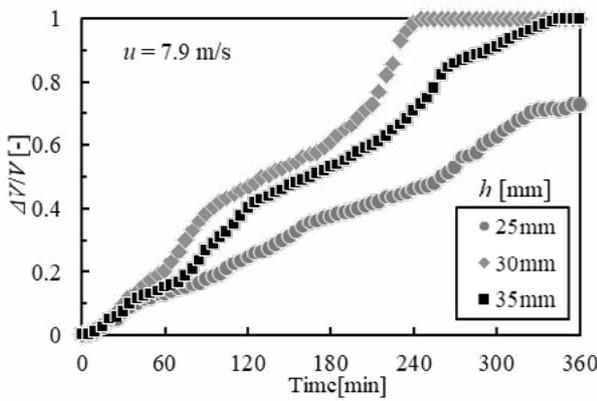


Figure 5: Variation of melting ratio with time ($u = 7.9$ m/s).

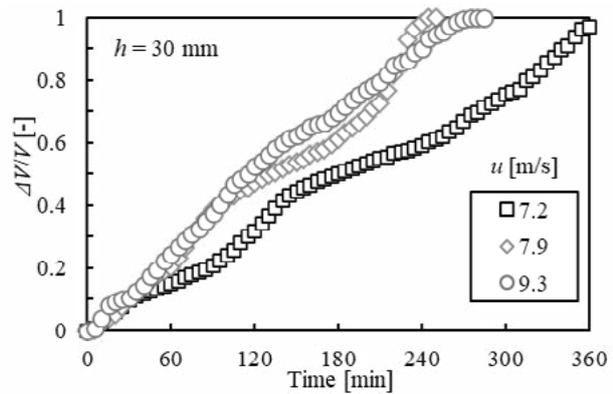


Figure 6: Variation of melting ratio with time ($h = 30$ mm).

表2は、融解割合 $\Delta V/V=0.9$ への到達時間 $t_{\Delta V/V=0.9}$ を用いて次式により算定される、平均融解速度 $v_{\Delta V/V=0.9}$ [mm^3/min] の計算結果を示したものである。表中の「-」は、6 時間以上 $\Delta V/V=0.9$ に達しなかったことを示している。本研究の実験範囲内では、ノズル高さ h と噴流流速 u には融解速度を高める最適値があり、最大融解速度は $h=30$ mm, $u=7.9$ m/s で $418.53 \text{ mm}^3/\text{min}$ である。

$$v_{\Delta V/V=0.9} = \frac{\Delta V_{0-0.9}}{t_{\Delta V/V=0.9}} \quad (1)$$

Table 2: Melting rate $v_{\Delta V/V=0.9}$ [mm^3/min]

u [m/s]	$h = 25$ mm	30	35
9.3	—	398.99	279.02
7.9	—	418.53	325.87
7.2	—	280.25	—

4・2 PIVによる可視化観察

図7は、ノズル高さ $h=30$ mm, 噴流速度 $u=7.9$ m/s の条件下で噴流衝突させたときの、テトラコサンの液面形状を示したものである。上段の図は、ANSYS による質量分布の数値シミュレーション結果に 90° 扇形容器を用いた可視化写真を重ねて示したものであり、下段写真は長方形容器 (高さ 20, 幅 90, 奥行き 10 mm) による画像である。シミュレーションと可視化結果のいずれでも、液面に波が生じている様子が観察される。

図 8 は、 $h = 30 \text{ mm}$ 、 $u = 7.9 \text{ m/s}$ の条件下で、 90° 扇形可視化容器内の噴流衝突液面を 2 秒間隔で撮影した写真である。液面は、液面は時々刻々わずかに変化するものの、噴流衝突部の凹面と周囲の波の盛り上がりは維持される。

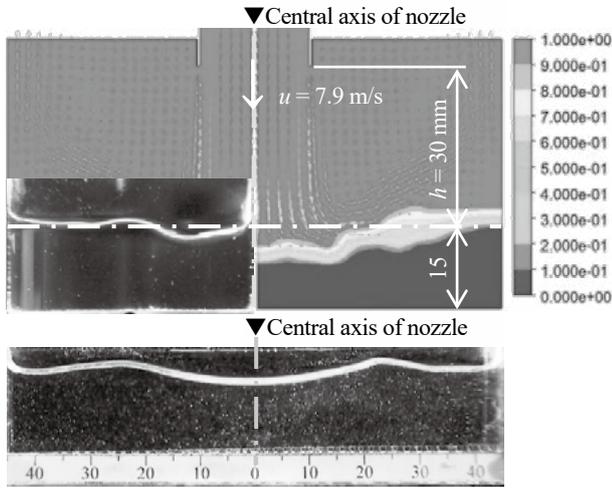
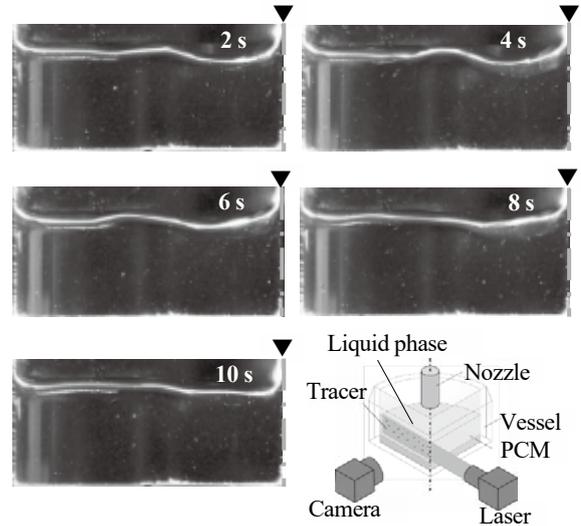


Figure 7: Visualization photographs using a 90° sector-shaped vessel (above the ANSYS simulation results, top image) and a rectangular vessel (bottom image) at the condition of $h = 30 \text{ mm}$, $u = 7.9 \text{ m/s}$.



$h = 30 \text{ mm}$, $u = 7.9 \text{ m/s}$

Figure 8: Visualization photograph of a sector-shaped container.

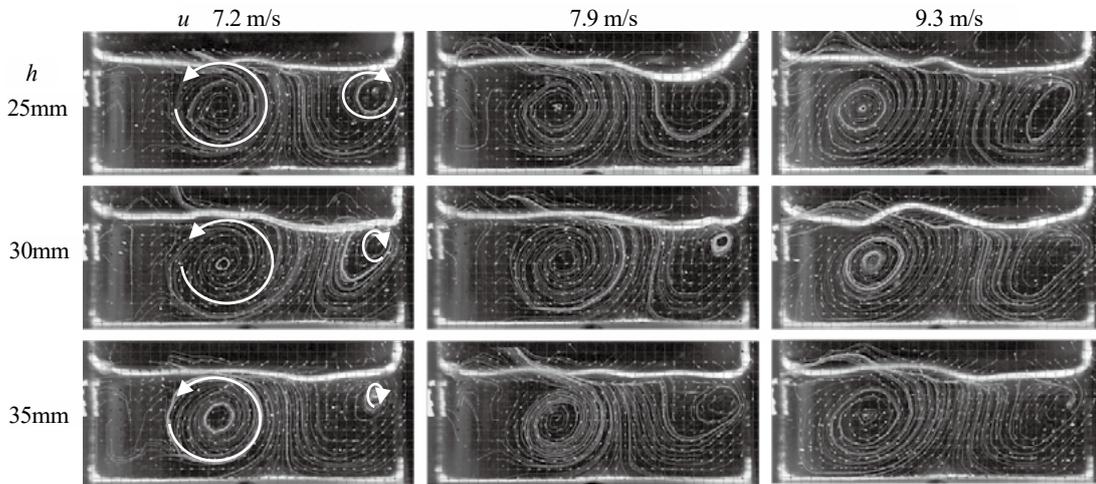


Figure 9: Streamlines by PIV visualization: Particle path of a sector-shaped container.

図 9 は、計測された流れを平均化して得られた流線を示している。対流の方向は、図中の矢印で示されており、噴流によって液面が外周方向に引っ張られる方向であると理解される。噴流衝突部周辺に維持される凹凸部は、液相内の大きな渦を定期的に発生させ、液面形状のわずかな変化（小さな非定常波）に比べて融解過程に大きく影響を与えていると考えられる。

図 10 は、内部流に影響すると考えられる盛り上がり液面の最大高さ h_w と半径方向距離 R_w 、液内部渦中心の高さ h_v と中心軸からの半径距離 R_v を示したものである。

図 11 は、液面最大高さ位置の半径方向距離の平均値 R_{w_Ave} および液内部渦中心の半径方向距離 R_v と噴流速 u の関係をノズル高さごとに示したものである。 R_{w_Ave} の値は、噴流速に対して大きく変化しない。一方、 R_v は $u = 7.8 \sim 9.8 \text{ m/s}$ の増加に伴い 5.6 mm から 4.7 mm もの増加がみられ、渦位置は噴流速の増加と共に外周側へ移動する。

図 12 は、波の最高高さ h_{w_Ave} と渦中心の底面からの高さ h_v と噴流速の関係を示している。噴流速の増加に伴い波の最高高さ h_{w_Ave} は増加するが、渦中心高さ h_v はほぼ一定である。本研究の測定範囲内では、噴流速 u の増加に伴い液面上昇は発生するものの、渦中心の高さは変化しない結果となった。

液相内の渦中心位置は、衝突噴流速の増加に伴い高くなる波面の効果により、高さ位置は変化しないが外周側へ移動すると考えられる。

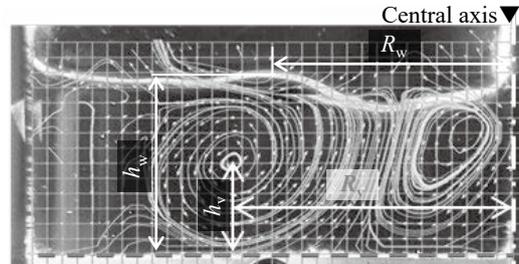


Figure 10: Location of maximum wave height and center of the vortex: Dimension definition of wave and vortex.

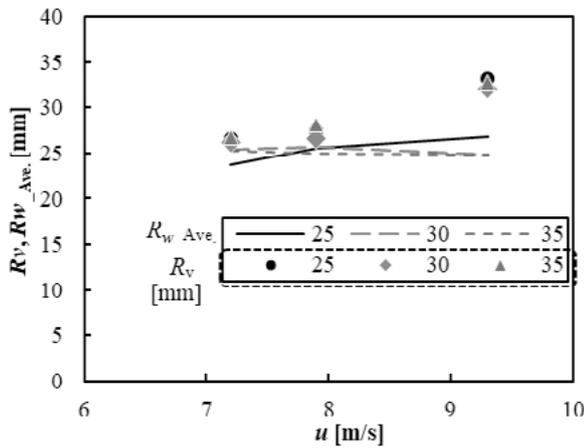


Figure 11: Relationship between R_{w_Ave} , R_v and velocity.

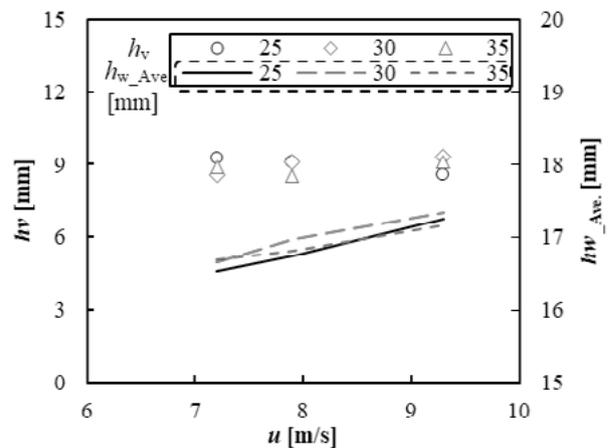
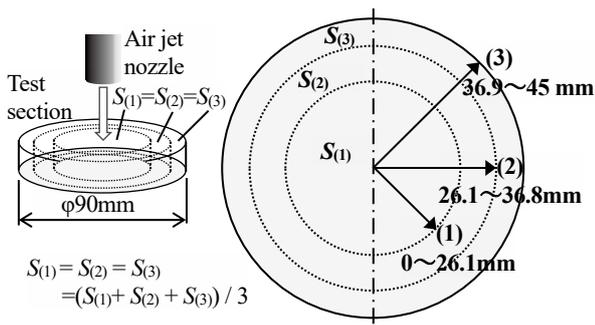


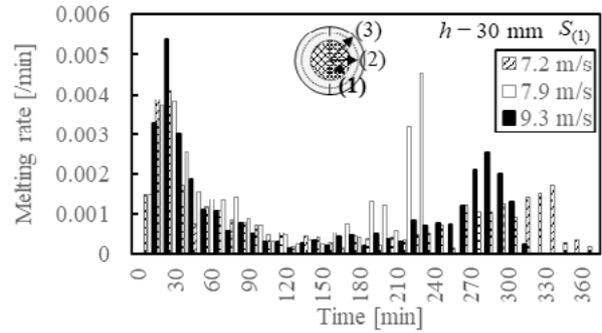
Figure 12: Relationship between h_{w_Ave} , h_v and velocity.

図 13 は、融解進行過程を評価するため、蓄熱槽である試験部を半径方向に同一面積で 3 領域に分割し、各領域の融解速度を比較評価した結果を示している。図 13(a)は、3 等分した寸法位置を図示したものであり、(1)中心 $0 \sim 26.1\text{mm}$ (面積 $S_{(1)}=2140\text{mm}^2$)、(2) $26.1 \sim 36.8\text{mm}$ ($S_{(2)}=2114\text{mm}^2$)、(3) $36.8 \sim 45\text{mm}$ ($S_{(3)}=2107\text{mm}^2$) である。図 13(b), (c), (d)は、それぞれ領域(1), (2), (3)における 10 分間隔の融解速度の時間変化を示している。領域(1)における融解速度は、噴流速によらず約 150 分までおおそ同一の値あることが分かる。150 分以降は、 7.9 m/s , 9.3 m/s , 7.2 m/s の順にピークが現れる。噴流速 $u = 7.9\text{ m/s}$ では 220 分に融解速度のピークが表れ 240 分に全融解したが、 $u = 9.3\text{ m/s}$ では遅れて 290 分に全融解、 7.2 m/s ではさらに遅れて 360 分に融解が完了した。

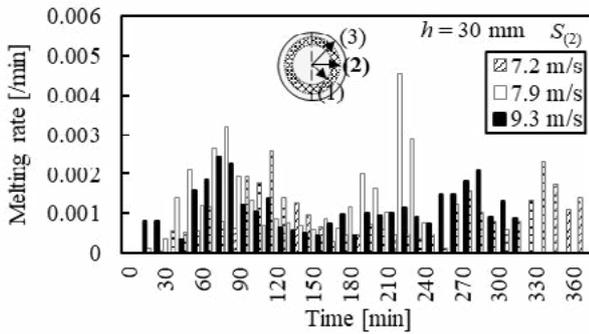
噴流速 $u = 7.9\text{ m/s}$ の融解速度は、領域(1), (2), (3)に関わらず、2つの明確なピークが観察された。2番目の融解速度ピークは、領域によらず 220~230 分に発生した。このときの融解速度は、領域(1) $0.004507/\text{min}$ 、領域(2) $0.004519/\text{min}$ 、領域(3) $0.004510/\text{min}$ であり、他の流速条件(7.2 m/s , 9.3 m/s)での融解速度と比較して高い。最も低い噴流速 $u = 7.2\text{ m/s}$ では、 7.9 m/s のときよりも外周部の融解進行が遅く、融解過程終盤の融解速度の増加が小さい。最も高い噴流速 $u = 9.3\text{ m/s}$ では、最も外周側の領域(3)の融解が完了後も他の内側領域に未融解領域が残り、融解速度のピーク値も低い(領域(1) $0.002548/\text{min}$ 、領域(2) $0.002063/\text{min}$ 、領域(3) $0.003328/\text{min}$)。一方、 $u = 7.9\text{ m/s}$ では、全領域で融解速度が $0.0045/\text{min}$ 以上と高くなっている。液相の割合が増加する融解過程終盤には、渦中心が蓄熱槽中心から外周の中間位置にあり、未融解位置との近いことが全域の伝熱促進となり融解の早期完了をもたらしたと考えられる。



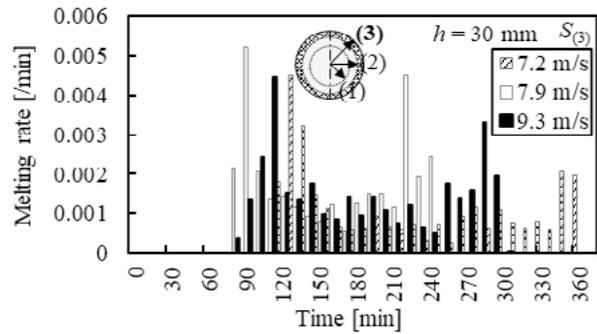
(a) Divisions viewed from the top of the test section



(b) Melting rate of region (1)



(c) Melting rate of region (2)



(d) Melting rate of region (3)

Figure13: Divided dimensions of the test section and melting rate of each division

5. 結 言

高温空気の衝突噴流を用いて液相内の強制対流を発生させる融解潜熱蓄熱実験および可視化を行い、以下の知見を得た。

1. ノズル高さ 25~35 mm, 衝突噴流速 7.2~9.3 m/s の範囲においては、ノズル高さ 30 mm, 噴流速 7.9 m/s が最も早く融解潜熱蓄熱を完了させる条件であることが示された。
2. 蓄熱槽内の可視化結果は、噴流速の増加に伴い衝突部周囲の液面が隆起し、液相内の渦中心の位置が外周側へ移動することが明らかとなった。
3. 融解割合 $\Delta V/V > 0.8$ の融解潜熱蓄熱終盤では、噴流速 7.9 m/s で蓄熱槽内全域において対流熱伝達が促進され、9.3 m/s では蓄熱槽中央で対流熱伝達が抑制されることが示唆された。

文 献

Gadgil, A., et al., Analysis of two-dimensional melting in rectangular enclosures in presence of convection, Trans. ASME, J. Heat Transf., Vol.106, No.1(1984), pp.20-26.

C. Bénard, et al., Melting in rectangular enclosures: experiments and numerical simulations, Trans. ASME, J. Heat Transf., Vol. 107, No.4(1985), pp.794-803.

Akio Saito, et al., A study on the heat transfer of latent heat thermal energy storage (3rd report, Natural convection effects on the performance of a thermal energy storage apparatus with dense plate fins), Bulletin of JSME, Vol. 29, No.249(1986), pp.845-853.

Z. Wang, et al., Experimental and numerical studies of thermal transport in a latent heat storage unit with a plate fin and a flat heat pipe, Energy, Vol. 275, Article 127464(2023), pp.1-18.

Masami Kumada and Ikuo Mabuchi, A Study on Heat Transfer by Impinging Jets: 1st Report, Flow and Mass Transfer on a Flat Plate with a Normal to a Two-Dimensional Air Jet, in Japanese, JSME B, Vol. 35, No.273(1969), pp.1053-1061.