

衝突噴流による融解強制対流とカーボンナノチューブ分散系を用いる高速潜熱蓄熱技術開発

国立大学法人 北海道国立大学機構 北見工業大学

森田 慎一

1. はじめに

潜熱蓄熱材 (LHSM, Latent heat storage material) は、蓄熱密度が高いものの熱伝導率が低いことから、蓄熱に長い時間を要するため熱交換効率向上が望まれる。その研究例として、一面加熱モデルとして矩形蓄熱槽を対象とした Gadgil ら¹⁾の垂直加熱面融解の寸法効果の研究、Benard ら²⁾による融解挙動の検討などがある。また、斉藤ら³⁾は、フィン付加融解・凝固挙動の理論的・実験的研究による蓄熱時間短縮の成果を示している。潜熱蓄熱材の融解対流は、形状自然対流を効率的に発生させる縦フィン形状を検討した Wang ら⁴⁾が示した結果からも明らかのように、熱伝導率と同様に融解蓄熱の進行に大きく影響する要因である。潜熱蓄熱時の融解相内対流促進は、潜熱蓄熱時間の短縮に有効と考えられる。しかし、固・液相変化を伴う過程では、攪拌を機械的に実施することは困難である。噴流衝突伝熱は、熊田ら⁵⁾の二次元空気噴流熱・物質伝達の結果から伝熱量増加が期待され、同時に液相二次対流の発生を促すことができる方法である。よって、本研究では高温の空気噴流を潜熱蓄熱材に衝突させて熱交換する方法を採用し、円筒型蓄熱槽内の蓄熱材に対して上部から高温空気噴流を衝突させた場合の融解過程の観察と解析を実施した。本報では、パラフィン系潜熱蓄熱材の衝突噴流融解過程について、ノズル高さと同噴流流速を変化させることによる影響を実験的に検討した結果を報告する。

2. 測定試料

本研究で用いた潜熱蓄熱材は、テトラコサン (東京化成工業(株), Tetracosane, $(\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{22}\text{CH}_3 = 338.6538 \text{ g/mol}$, 純度 > 99 %, 規格値融点 50~53.0 °C, 実測融点 50.6 °C) であり、表 1 に基本的熱物性値を示す。

表 1 潜熱蓄熱材テトラコサンの基本熱物性値

温度 T [°C]	密度 ρ [kg/m ³]	比熱 C_p [kJ/(kg·K)]	熱伝導率 λ [W/(m·K)]	融解潜熱 Δh_f [kJ/kg]
50 (Solid)	903.9	1800	0.3556	304.8
53 (Liquid)	764.4	2300	0.1954	

3. 実験装置および方法

図 1(a)は実験装置構成、(b)は試験部、(c)は試験部内の熱電対配置を示している。試験部は、内径 90 mm、厚さ 10 mm の透明アクリル製、底面を厚さ 3 mm 銅板で作製してある。蓄熱槽内部の潜熱蓄熱材の加熱は、槽上部に配置されたノズル (外径 20 mm, 内径 19 mm, ステンレス製) より、温度および流速を制御した空気噴流衝突により行った。蓄熱槽底面は、電気ヒーターにより調節され所期温度に設定される。蓄熱槽の周囲は押出式ポリエチレンフォームを用いた断熱材で囲うことで外部への熱損失を抑制している。蓄熱槽内温度は、9 mm×3 mm の

間隔で配置された 36 組の熱電対（素線直径 0.2 mm）により測定した。また、ノズル出口にも熱電対を配置し、噴流の温度を計測している。

実験は、蓄熱槽内の各測定点温の平均値が $40 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$ 以内になったことを確認し、ノズルから高温空気を噴出し開始する。その後、10 秒ごとに温度データを収集し、蓄熱槽内の全測定点がテトラコサンの融点温度 $50.6 \text{ }^\circ\text{C}$ 以上となることを確認し終了する。ただし、噴流流速 7.9 m/s 、ノズル高さ 35 mm のみ、測定 4 回の結果を平均している。実験条件は、噴流速度 u ($7.2, 7.9, 9.3 \text{ m/s}$) とノズル高さ h ($25, 30, 35 \text{ mm}$) 組み合わせた 9 条件である。噴流温度は、全条件で $58 \pm 3.5 \text{ }^\circ\text{C}$ である。噴流流速は、ノズル出口直後の位置で測定した円筒中心の流速である。

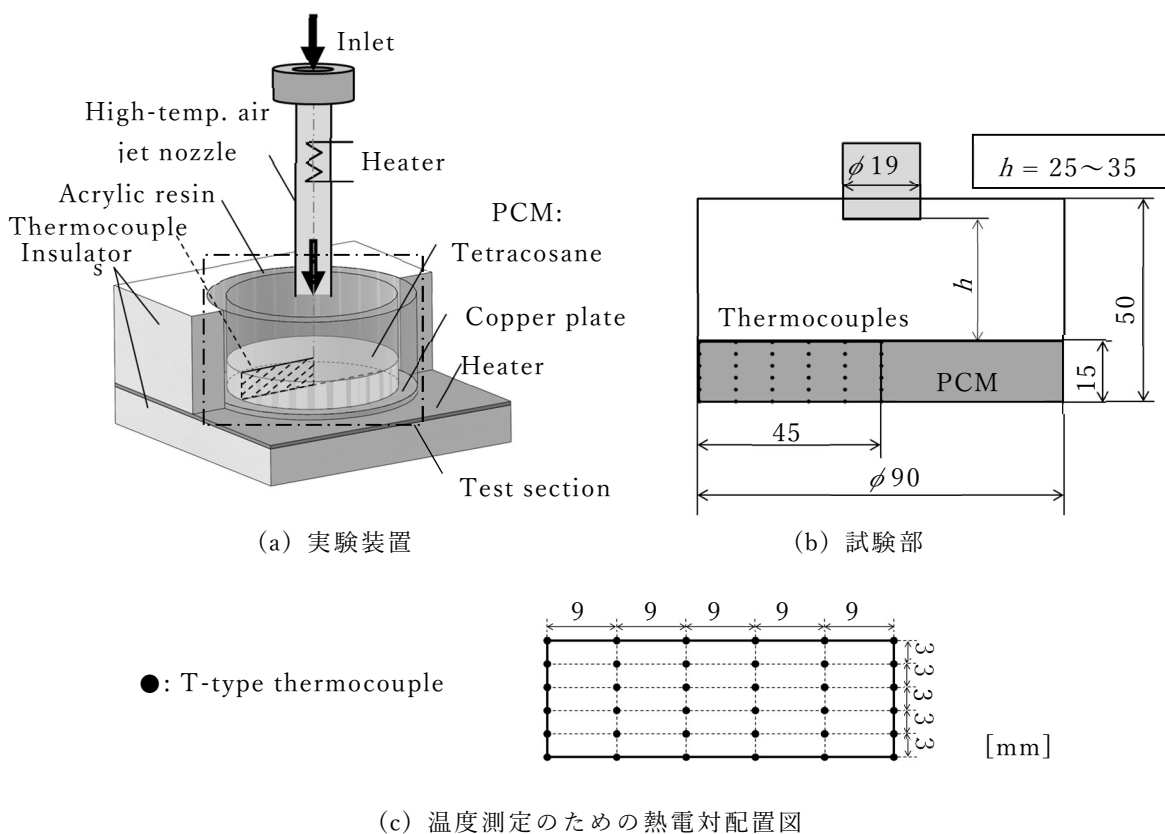


図 1 実験装置

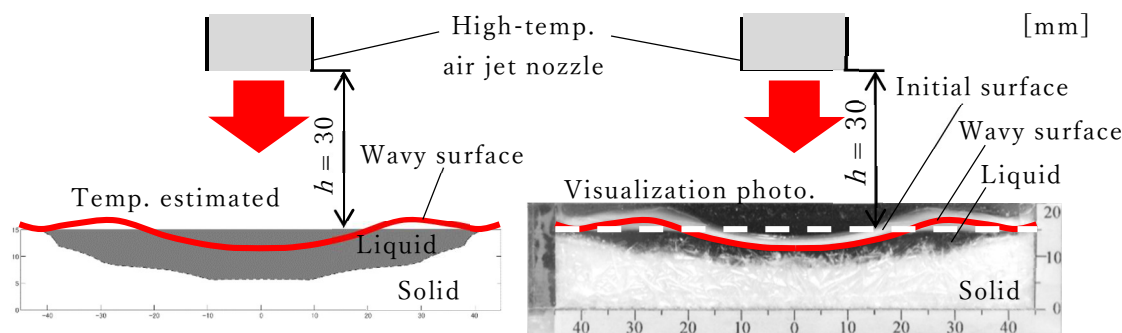


図 2 融解固液界面の様相イメージ

図 2 は、融点温度 $50.6 \text{ }^\circ\text{C}$ により判定した融解界面 ($\Delta V/V = 0.3$) と、高さ 20 mm 、幅 90 mm 、奥行き 10 mm の亚克力製矩形蓄熱槽を用いて撮影した融解界面の写真を比較

したものである。図中の破線は実験開始時点での試料表面，実線は矩形蓄熱槽の撮影画像から確認した液面形状を示している。実際の噴流融解過程における融解液面は，右図に示されるように噴流直下液面が凹み，その周囲は液面が隆起して波打ち盛り上がる。

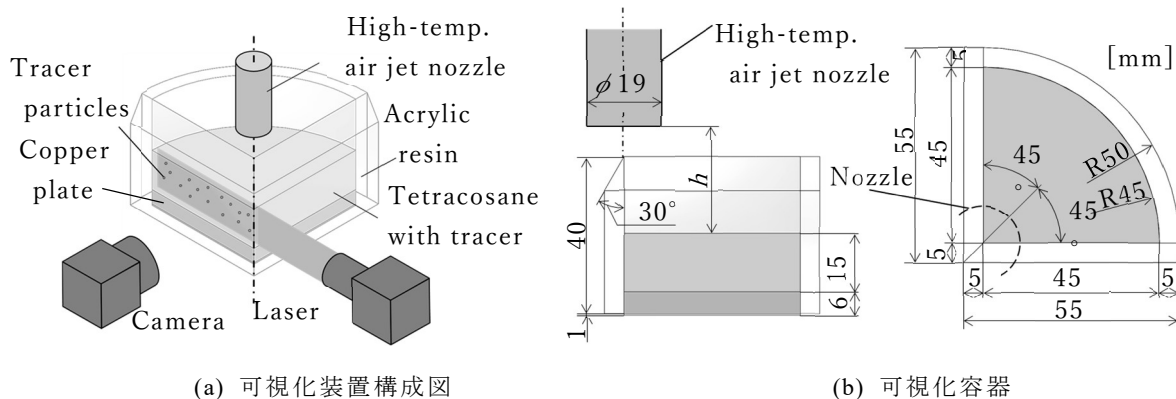


図3 融解過程観察用可視化装置

図3は，扇形可視化容器を用いた可視化実験の構成図と容器寸法を示している。図4(a)が扇形可視化容器の実験構成図，図4(b)が扇形可視化容器の寸法である。可視化容器は，円筒型蓄熱槽の円周方向形状を考慮した可視化のため，円筒型蓄熱槽を4等分した扇形状で側面が亚克力，底面銅製である。可視化の際には，トレーサー粒子（ポリアミドパウダー，比重1.06，平均粒径100 μm ）を分散させた液相テトラコサンを投入した。上部から噴流が衝突するアクリルの側壁は，衝突の影響を低減させるため上部に容器外側へ向けて30°の傾斜をつけている。PIV計測は，高温空気噴流ノズルによってテトラコサンに高温空気を衝突させ，内部流れをカメラで撮影して行った。PIV撮影条件は，テトラコサンの凝固を防ぐため底面の銅板をラバーヒーターで40°Cに加熱し，噴流温度を80.5°Cとする。

4. 結果および考察

4.1. 高温空気噴流による潜熱蓄熱材の強制対流融解実験結果

図4はノズル高さ $h = 30 \text{ mm}$ ，噴流空気温度 $58 \text{ }^\circ\text{C}$ の条件で測定された，試験部（噴流融解潜熱蓄熱槽）内の温度コンター図を示している。図中に示す点線は，温度 $50.6 \text{ }^\circ\text{C}$ （潜熱蓄熱材テトラコサンの融点温度）の等温線を表示したものであり，融解した液体相と固体相の境界である融解界面を示している。温度コンター図は，列の左から噴流流速 $u = 7.2, 7.9, 9.3 \text{ m/s}$ の順，行毎に融解割合 $\Delta V/V$ を合わせ表示してある。高温空気噴流は，槽の情報から下向きに衝突するため，中心上部が高温になっている。融解序盤の融解界面は，中心部で融解した液相が噴流により押しのけられて層が薄くなり噴流熱が固体相に伝わりやすく，中央部の融解が先行する。融解割合 $\Delta V/V = 0.3$ では，中心から半径方向40 mm以上の外周まで融解が進み，融解界面形状が平坦に広がっている。その後，中心からの距離10 mm付近の融解が，周囲よりやや先行して進んでいることがわかる。 $\Delta V/V = 0.7 \sim 0.9$ では，固体相として残る形状が，噴流流速によって異なることが観察される。

図5は， $u = 7.9 \text{ m/s}$ における融解割合の経時変化をノズル高さ $h = 25, 30, 35 \text{ mm}$ 毎に示したものである。融解割合 $\Delta V/V = 1$ に達するまでの時間は，ノズル高さ $h = 30, 25, 35$

mm の順で短く、 $h = 30$ mm 条件の 240 min が最も短い結果となった。ノズル高さ $h = 30$ mm 条件における融解割合 $\Delta V/V$ は、40 min で 0.138 に達するまで一定の傾きで上昇し、傾きを小さくして 0.191 (55 min) に達した後 0.386 (90 min) まで傾きを大きくして増加、続いて傾きを小さくして 0.632 (185 min) に到達後再度傾きを大きくして $\Delta V/V=1$ に達し融解を完了する。この融解割合増加における傾きの変化は、融解完了までの時間が長く変化の起こる時間帯は異なるが、ノズル高さ $h = 25, 35$ mm の条件においても観察される。

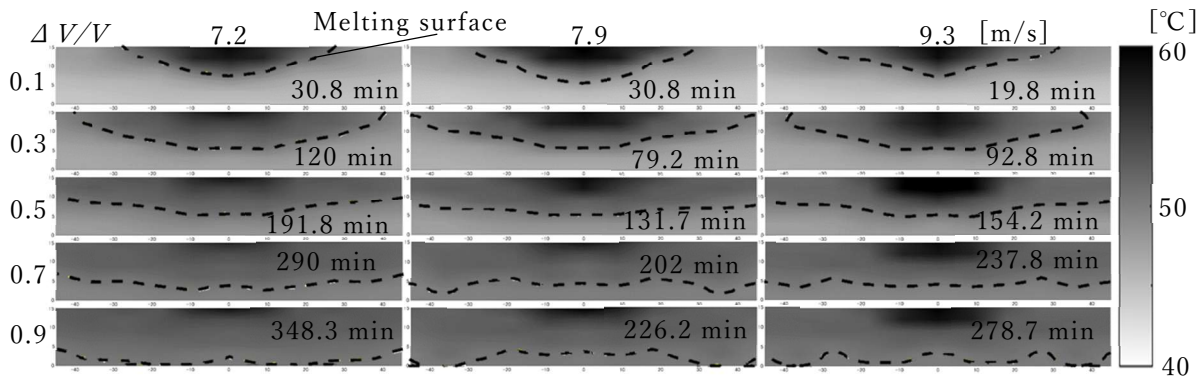


図4 温度分布および融解界面 ($h = 30$ mm)

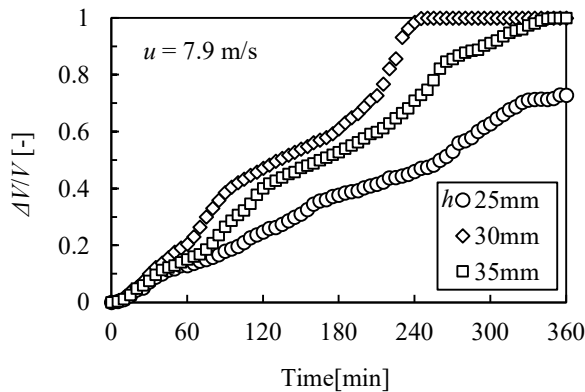


図5 融解割合の経時変化 ($u = 7.9$ m/s)

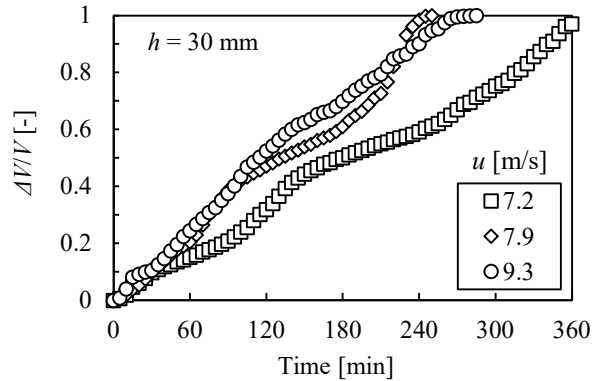


図6 融解割合の経時変化 ($h = 30$ mm)

表2 融解割合 $\Delta V/V = 0.9$ 到達までの融解速度 [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	—

図6は、 $h = 30$ mm での融解割合の経時変化を噴流流速 $u = 7.2, 7.9, 9.3$ m/s 毎に示したものである。融解割合 $\Delta V/V=1$ 到達時間は、噴流流速 $u = 7.9, 9.3, 7.2$ m/s の順で短く、 $u = 9.3$ m/s 条件の 240 min が最短である。融解割合上昇時の傾き変化は、変化発生時間帯は異なるが、噴流流速が異なる場合においても $u = 7.2, 9.3$ m/s の条件においても観察される。特に $u = 7.9$ m/s 条件では、 $\Delta V/V=0.8$ 付近で傾きの大きな増加が観察された。

表 2 は、実験開始から融解割合 $\Delta V/V = 0.9$ に到達するまでの融解速度 $v_{\Delta V/V=0.9}$ [mm^3/min] を計算した結果を示したものである。融解速度 $v_{\Delta V/V=0.9}$ は、 $\Delta V_{0.9}$ を $\Delta V/V = 0.9$ の融解体積、 $t_{\Delta V/V=0.9}$ を $\Delta V/V = 0.9$ 到達時間とし、次式で計算される。なお、表中の－は、6 時間を超えて $\Delta V/V = 0.9$ に到達していないことを示している。本研究の実験範囲では、 h, u に最適値が存在し、 $h = 30 \text{ mm}$, $u = 7.9 \text{ m/s}$ で最大融解速度 $418.53 \text{ mm}^3/\text{min}$ である。

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

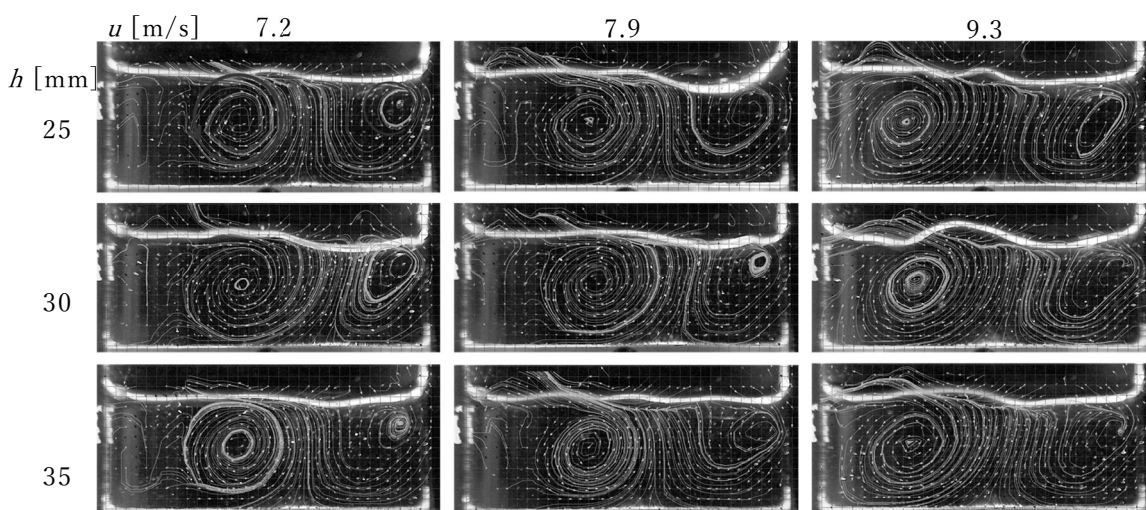


図 7 液体相時の潜熱蓄熱材内の可視化写真と流線

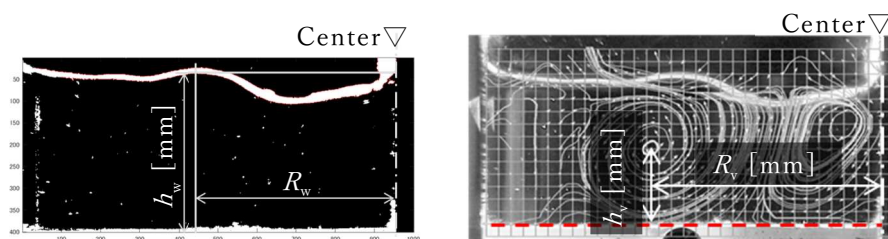


図 8 液面の波打ちと渦中心位置

4. 2. 可視化容器における液相観察および PIV 測定

図 7 に、計測した流れを平均化して求めた可視化容器内の流跡を条件ごとに示す。図中の矢印は液相の対流方向である。噴流によって液面が外周に引かれ、内部の液相で強制対流が発生している様子が確認できる。

図 8 は、左図に液面波の最高点の液位寸法 h_w [mm] と、中心軸からの半径距離 R_w [mm]、液界面に複数の頂点が見られる場合、すべての山のなかで最も高い点を液面の最高点とする。右図に渦の中心位置の底面からの距離 h_v [mm] と中心軸からの半径距離 R_v [mm] の定義を示している。液面の形状は、複数の頂点が見られる場合には最高位点を最高点として判定した。

図9に、ノズル高さ $h = 25 \sim 35$ mm における、 $R_{w_Ave.}$, R_v と噴流流速 u の関係を示す。 $u = 7.2$ m/s と 7.8 m/s では R_v の値に大きな変化はないが、ノズル高さによらず $u = 7.8 \sim 9.8$ m/s 範囲で噴流流速の増加と共に R_v が $5.6 \sim 4.7$ mm 増加する。液面波の最高点位置は噴流流速により変化しないものの、液相中に発生する渦中心位置は流速の増加と共に、蓄熱槽の外周側に移動すると考えられる。

図10は、ノズル高さ $h = 25 \sim 35$ mm における、液面波最高部液位 $h_{w_Ave.}$ 、渦中心位置の底面からの高さ h_v と噴流流速 u の関係である。 $h_{w_Ave.}$ は噴流流速の増加に伴い増大するが、 h_v はほぼ一定で推移することが分かる。本実験の条件範囲では、噴流流速の増加に伴い液面波の液位は増加するが、渦の中心位置の高さに変化がないことが明らかとなった。

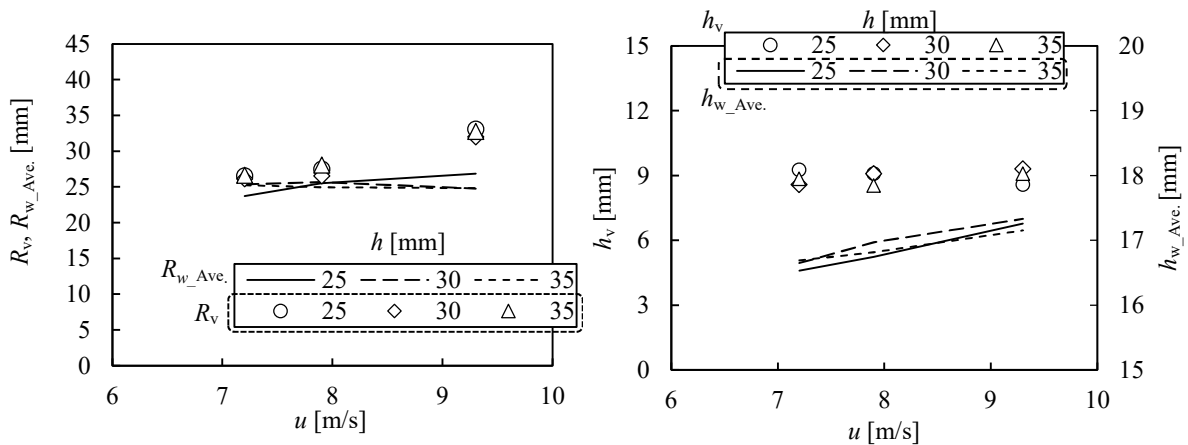


図9 波 $R_{w_Ave.}$ および渦位置 R_v と流速の関係 図10 波 $h_{w_Ave.}$ および渦高さ h_v と噴流流速関係

渦の位置と融解進行の関係を考察するため、試験部内を3分割することで、どの領域の融解速度が速いかを検討した。図11は、試験部の分割寸法と各領域の融解速度経時変化を示している。図11(a)は、円筒型蓄熱槽を容器上面から見た際の試験部の分割寸法を示している。容器底面積が3領域で面積1/3となるよう分割し評価するため、中心から半径(1) $0 \sim 26.1$ mm (上面からの投影面積 $S_{(1)} = 2140$ mm²)、(2) $26.1 \sim 36.8$ mm ($S_{(2)} = 2114$ mm²)、(3) $36.8 \sim 45$ mm ($S_{(3)} = 2107$ mm²) で、各領域の10分間隔の融解速度を算出した。10分間隔の各領域融解速度は次式で定義される。なお、 v_{10min} は10分ごとの融解速度、 ΔV_{10min} は10分間の融解量である。

$$v_{10min} = \frac{\Delta V_{10min}}{10} \quad (2)$$

図11(b)が領域 $0 \sim 26.1$ mm の融解速度の経時変化、(c)が領域 $26.1 \sim 36.8$ mm の融解速度の経時変化、(d)が領域 $36.8 \sim 45$ mm の融解速度の経時変化を示している。(b)の中心部を含む領域(1)の融解速度は、すべての流速で150 min程度まで経時変化の度合いが似ており、全流速で20~30 minがピークを迎えるが9.3 m/sが最も大きい。融解後半では7.9 m/s, 9.3 m/s, 7.2 m/sの順にピークを迎えており、7.9 m/sの後半ピークの融解速度は他の流速と比較して70%以上速い結果となった。(c)の領域(2)は、融解初期のピークが $u = 7.9$ m/s は80 min, $u = 9.3$ m/s は70 minと近いのに対して、 $u = 7.2$ m/sのみ120 minと

遅い。融解終盤のピークは $u = 7.9$ m/s が 220 min に最も早く迎える。(d)の領域(3)は、他の領域と違って噴流流速によって融解初期のピーク時間が異なり、 $u = 7.9$ m/s, 9.3 m/s, 7.2 m/s にピークがある。融解終盤は他の領域のように、 $u = 7.9$ m/s が 220 min にピークを迎え 240 min で融解が完了する。その後 $u = 9.3$ m/s が 290 min, 7.2 m/s が 360 min で融解が完了した。

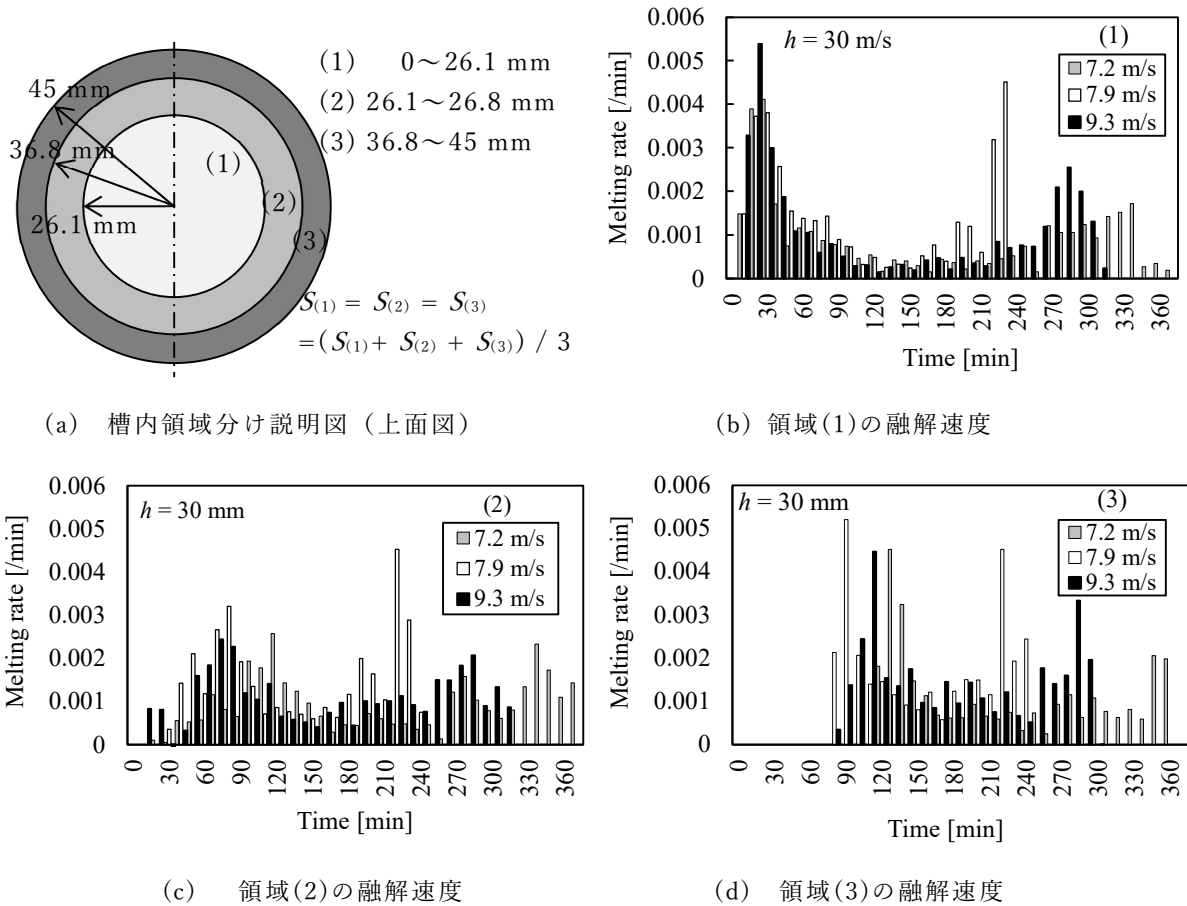


図 11 槽内の領域と融解速度

全領域を比較すると、 $u = 7.9$ m/s は融解初期と終盤の 2 回明確な融解速度のピークが存在することが明らかとなった。また、融解終盤のピークに関しては全領域で 220~230 min とほぼ同じ時間に、領域(1)で融解速度 0.004507 /min, 領域(2)で 0.004519 /min, 領域(3)で 0.004510 /min と全体的に融解速度が早いことがわかった。前述の実験結果では、 $h = 30$ mm, $u = 7.9$ m/s の全体融解割合は 60 min から融解割合の変化量が大きくなっていることが確認されたが、3 領域融解速度の結果より外周の融解が開始することで融解割合が急激に増加するためだといえる。 $u = 7.2$ m/s は、7.9 m/s に比べて外周の融解開始が遅く、融解終盤に向かうにつれての融解速度の増加量が低いことが分かった。しかし、領域 0~26.1 mm の融解開始時間や中盤程度までの融解速度に大きな差がないことから液相による熱伝達が影響していると考えられ、噴流流速の高い $u = 7.9$ m/s の場合、内部対流が速く熱伝達率が高い可能性が考えられる。 $u = 9.3$ m/s は、領域(3)の融解が完了しても他の領域が融解しきっておらず、融解速度のピーク値も領域(3)の 0.003328 /min に対して領域(1)が 0.002548 /min, 領域(2)が 0.002063 /min と低い。それに対して、 $u = 7.9$ m/s

は全領域が 0.0045 /min 以上と高い。融解終盤は液相が試験部の大半を占めているため液相対流が影響していると考えられ、 $u=7.9$ m/s は 9.3 m/s と比較して液相内の渦の位置が蓄熱槽の中心に近いと、領域全体でピークのタイミングが近く融解が早いと考えられる。

5. まとめ

本研究では、融解潜熱蓄熱の高速化を目指し、噴流強制対流による潜熱蓄熱材の融解実験および可視化実験を行った。結果検討し、実用設計に反映可能であり有用な以下の知見を得た。

1. 本実験の実験装置構成で、ノズル高さ 25~35 mm、噴流流速 7.2, 7.9, 9.3m/s の条件範囲では、ノズル高さ 30 mm、噴流流速 7.9 m/s で最も融解が早く、融解割合 $\Delta V/V=0.9$ 到達時の融解速度が次点に速い融解速度と比較して約 4.9%高い結果となった。
2. 実験と解析における融解界面は、どちらもすり鉢状に融解が進行する。PCM 液相は融解が進行するにつれて噴流により押し広げられ、液相内部では液相表面に沿うように渦が発生する。
3. 可視化装置実験により、噴流流速が大きくなるほど液相内の渦の位置が中心から半径方向に移動し、ノズル高さ 30 mm における噴流流速 9.3 m/s の渦の中心位置は 7.9 m/s に比べて 5.5 mm 外周に近い結果を得た。
4. 等しい上面分割面積の半径方向 3 領域の融解速度比較においては、噴流流速 7.9 m/s の融解終盤の融解速度ピークが概ね同時刻であるのに対して、9.3 m/s は中心部の融解速度が低く、噴流流速によって渦の位置が外周に移動することで、蓄熱槽中心の融解に支障を与える可能性が示唆された。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、公益財団法人 天野工業技術研究所から多大なご支援を頂きました。ここに記して謝意を示します。

参考文献

- 1) 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.
- 2) C. Bénard, et al., Melting in rectangular enclosures: experiments and numerical simulations, Trans. ASME, J. Heat Transf., Vol. 107, No. 4 (1985), pp. 794.
- 3) 斉藤彬夫・他 3 名, “潜熱蓄熱の伝熱に関する研究 (第 3 報, 密なプレートフィンを有する蓄熱装置における自然対流の影響)”, 日本機械学会論文集 B 編, Vol. 51, No. 467 (1985), pp. 2148.
- 4) 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 (2023), Article 127464, pp. 3.
- 5) 熊田雅弥, 馬淵幾夫, “衝突噴流による熱伝達に関する研究 (第 1 報, 二次元空気噴流に直角におかれた平板上の流れおよび物質伝達)”, 日本機械学会論文集 B 編, Vol. 35, No. 273 (1969), pp. 1053.