水平円筒容器内におけるスラッシュアイスの融解熱伝達*

川 南 剛^{*1}, 福 迫 尚 一 郎^{*1}
山 田 雅 彦^{*1}, 伊 藤 健 司^{*2}

Melting Heat Transfer of Slush Ice in a Horizontal Cylindrical Capsule

Tsuyoshi KAWANAMI, Shoichiro FUKUSAKO,
Masahiko YAMADA and Kenji ITOH

An experimental study has been performed to determine the melting heat transfer characteristics of slush ice in a horizontal cylindrical capsule. Slush ice, which is a mixture of fine ice particles and ethylene-glycol aqueous solution adopted as the testing material, was heated by the cylindrical capsule wall. The shape of the mush-ice interface, melting rate, temperature distribution, and local/average heat transfer coefficient at the heated wall were extensively observed and determined under a variety of conditions of heat flux and initial concentration of the aqueous binary solution. The results revealed that the melting heat transfer of slush ice is markedly effected by free convection in the double-diffusive layers owing to the thermal and solutal buoyancy forces.

Key Words: Slurry, Free Convection, Flow Visualization, Melting Heat Transfer, Double Diffusion

1. 結 言

河川や都市廃熱、および蓄熱技術を利用した地域冷暖房システムは、自然エネルギーの積極的活用および昼夜間における電力需要の平準化等への効果が大きく、普及が期待されている。このような冷熱供給システムにおいては、採熱部と熱利用部との距離が離れている場合が多く、熱媒体の搬送コストおよび土木施工費の低減がシステムの普及拡大に伴う最も重要な課題の一つである。その解決策として、従来の熱媒体である低温水に比べ、負荷応答性に優れ、さらに単位冷熱エネルギー当たりの搬送動力の軽減(高冷熱密度搬送)が可能である、氷と水または水溶液とを混合した固・液混相状態のスラッシュアイスが注目されている。

このような熱媒体としての固・液スラリー輸送に関しては、氷-水スラリーを用いた冷熱供給システムにおける搬送技術の検討がなされており⁽¹⁾⁽²⁾、システムの運転性能および製氷技術等が報告されている。また、輸送時の熱伝達特性に関しては、矩形流路内を流

れる固・液二相流の熱伝達⁽³⁾およびスラッシュアイスの強制対流熱伝達に関する研究がなされており⁽⁴⁾、熱伝達特性に及ぼす流速の効果等が検討されている。しかしながら、工業的な利用に際しては、管内におけるスラッシュアイスの融解メカニズムおよび熱伝達特性を詳細に検討し、基礎資料を蓄積することが重要であるにもかかわらず、スラッシュアイスの融解熱伝達および融解メカニズムに関して詳細に検討したものは数少なく⁽⁵⁾、十分な基礎資料が得られているとはいえない。

本研究は、スラッシュアイスの融解メカニズムおよび融解熱伝達特性に関する基礎資料を得ることを目的として、水平円筒容器内におけるスラッシュアイスの融解挙動および熱伝達に及ぼす加熱面熱流束および初期水溶液濃度の影響について、実験的検討を行ったものである。

記 号

C : 水溶液濃度(=エチレングリコール質量/水溶液質量) wt%

C_i : 初期水溶液濃度 wt%

h : 平均熱伝達率 $W/(m^2 \cdot K)$

h_ϕ : 局所熱伝達率 $W/(m^2 \cdot K)$

* 原稿受付 1996年7月29日。

^{*1} 正員、北海道大学大学院工学研究科 (〒060 札幌市北区北13条西8丁目)。

^{*2} 准員、動力炉・核燃料開発事業団 (〒107 東京都港区赤坂1-9-13)。

I. P. F. : 氷充てん率 (Ice Packing Factor = 氷質量 / 水溶液質量) %

q : 加熱面熱流束 W/m^2

T : 試験槽内温度 $^{\circ}C$

T_b : スラッシュアイス内温度 $^{\circ}C$

$T_{w\phi}$: 局所加熱面温度 $^{\circ}C$

t : 実験開始よりの経過時間 min.

W_i : 初期氷質量 kg

W_m : 融解氷質量 kg

ρ_i : 氷の密度 kg/m^3

ρ_w : 水の密度 kg/m^3

ΔV : 融解による体積減少量 m^3

$\Delta V'$: 融解液の温度上昇による体積増加量 m^3

2. 実験装置および実験方法

2.1 実験装置 本研究で用いた実験装置は、試験部、電力供給部、可視化用光学系、および測定系より構成されている。図1に実験装置の試験部を示す。試験槽は、内径100 mm、奥行69 mmの亚克力製の円管で、内壁面が加熱壁となっており、外部からの熱的影響を受けないよう恒温室内に設置した。試験槽の下部には、スラッシュアイスの融解による体積減少分を補償するための補償液供給口を設けており、試料と同条件のスラッシュアイスを挿入した。円管両端面には断熱および試験槽内部を明りょうに観察するため、ペアガラスを使用した。また、観察側のペアガラスは、取外しが可能であり、サーモビューアにより試験槽内温度分布を測定する際には、厚さ1 mmの亚克力板と交換ができる構造となっている。

図2に、加熱面の詳細を模式的に示す。加熱面は等

熱流束条件であり、円管の内外両壁面に厚さ25 μm のステンレスはくを接着し、それぞれメインヒータおよびガードヒータとした。メインヒータおよびガードヒータの表面には、絶縁のためエポキシ塗料を薄く均一に塗布した。メインヒータの表面温度測定のため、円管内壁とメインヒータ用ステンレスはくとの間に $\phi 0.1$ mmクロメル-アルメル熱電対を15°間隔で24箇所、またガードヒータ温度測定のため、円管外壁とガードヒータ用ステンレスはくとの間に、同熱電対を20箇所取付けた。スラッシュアイス内温度は、熱電対を外径 $\phi 0.81$ mmのステンレスパイプに挿入し、温度感知部を先端より出したものを、試験槽上部より挿入し、スラッシュアイス内を上下に移動させて測定した。試験槽内温度分布の計測は、サーモビューア〔日本電子(株)製: JTG-3100型〕を用いて行った。また、融解挙動の可視化用光源には、He-Neガスレーザ〔日本電気(株)製〕を用いた。

2.2 実験方法 本実験では、任意の条件(氷充てん率および初期水溶液濃度)のスラッシュアイスを製作するため、氷塊から削りだし、ふるいにより大きさをそろえた氷粒子(平均粒子径500 μm)を、所定の温度、濃度に設定したエチレングリコール水溶液と混合し、十分かくはんしたものを供試試料として用いた。スラッシュアイスの氷充てん率(I. P. F.)はすべて65%とし、初期水溶液濃度は、5, 10, 20 wt%および30 wt%の4種類、また、熱流束は、 8.0×10^2 , 1.6×10^3 W/m^2 および 2.4×10^3 W/m^2 の3種類とした。実験開始前のスラッシュアイスの初期融解を防ぐため、試験槽内外を十分冷却した後、スラッシュアイスを試験槽内に充てんし、所定の熱流束で加熱を開始した時刻を実験開始時刻とした。スラッシュアイスの融解挙動および流れ模様の観察には、シャドウグラフ法を用いた。

Fig. 1 Schematic of experimental apparatus

Fig. 2 Details of main and guard heaters

2・3 熱伝達率の算定方法 局所および平均熱伝達率は、加熱面とスラッシュアイスの温度差およびメインヒータへの供給電力(電圧 V および電流 I) より算出した熱流束に基づき、次式により算定した。

$$h_{\phi} = q / (T_{w\phi} - T_b) \cdots \cdots (1)$$

$$h = (1/\pi) \int_0^{\pi} h_{\phi} d\phi \cdots \cdots (2)$$

なお、スラッシュアイスの温度として、スラッシュアイス層内垂直方向の温度分布の平均値を採用した。

2・4 融解量の算定方法 融解量は、スラッシュアイスの融解に伴う体積減少分を補うため、所定の液位を保つように供給された補償液の量から体積減少量 ΔV を測定し、次式⁽⁵⁾により算出した。

$$W_m = (|\Delta V + \Delta V'|)(\rho_w \times \rho_i) / (\rho_w - \rho_i) \cdots \cdots (3)$$

ここで、 $\Delta V'$ は、融解液の温度上昇による体積増加量である。

3. 実験結果および考察

3・1 融解挙動およびそのメカニズム 図3に、シャドウグラフ法を用いて可視化した、スラッシュアイス融解挙動の時間経過を示す。図3の円周部が加熱面、中央部の黒い部分がスラッシュアイス層、その下部の白い部分が融解液相部を表している。融解液相部の水平方向の黒い線は、温度および濃度の平衡点の存在により形成される成層を表している。成層間のセル中には、自然対流による流動が観察された。また、スラッシュアイス下部頂点より、高濃度水溶液の流下が認められる。このような成層は、単成分系物質の融解には見られず、水溶液等の二成分系における相変化時に見られる特有の現象である。

このような成層の形成と成長を伴うスラッシュアイスの融解挙動は、次のようなメカニズムによって進行するものと考えられる。

(1) スラッシュアイスは融解開始とともに、周囲融解液との密度差のために上昇し、上部において加熱面とつねに接触を保ちながら融解する。したがって、加熱面と上部融解界面との間の融解液は、連続的に押し出され、加熱面と上部融解界面の間には、極めて薄い液層が形成される。このため、上部での熱移動は、熱伝導が支配的となる [図4(a)]。

(2) 融解初期において、融解界面からの氷粒の融解液と、エチレングリコール水溶液との間の濃度不安定による自然対流により、濃度の低い融解液は試験槽上部へ、また、濃度の高い水溶液は試験槽下部へと、周囲流体との間に濃度拡散を生じながら移動する。このため、融解液相部には上部へ行くほど濃度が減少するような濃度分布が形成される [図4(b)]。

(3) 時間経過に伴い、加熱面および加熱面近傍の融解液の温度が上昇し、温度差に基づく自然対流が生じる。加熱面近傍の融解液は、温度上昇による密度の減少により、加熱面に沿って上昇するが、周囲融解液の濃度が上部へ行くに従い減少するため、加熱面に沿って上昇する融解液の浮力が減少する。そして、温度差に基づく浮力と濃度差に基づく浮力の平衡点、すなわち温度上昇によって減少する上向き流れの密度と、垂直方向の濃度こう配によって減少する周囲流体の密度との平衡点近傍から融解液は加熱面を離れ、水平方向に移動する。この結果、濃度成層が形成され、シャドウグラフ法により観察される横方向の線(図3)として現れるようになる。水平方向に移動し、融解界面に達した融解液は、スラッシュアイスを融解させると同時に、加熱面からの熱を伝達し融解液自身の温度を低下させる。この温度低下により密度が増加し、融解液は融解界面に沿って下降するが、周囲融解液濃度は下部へ行くに従い上昇するため、下降する融解液に働く浮力が増加し、ある高さにおいて平衡点に達する。そ

Fig. 3 Melting behavior
[$q = 2.4 \times 10^3 \text{ W/m}^2$, $C_i = 20 \text{ wt\%}$: (a) $t = 5 \text{ min.}$, (b) $t = 15 \text{ min.}$, (c) $t = 25 \text{ min.}$]

Fig. 4 Melting mechanisms

の平衡点より、融解液は融解界面を離れ、横方向に移動するようになる [図 4(c)].

このようにして、成層間のセル内においては、セル上部に高温融解液、セル下部に低温融解液が存在する。このため、成層上下においては、成層上側に低温融解液、成層下側に高温融解液が存在する対向流となっている。また、成層間のセル内の濃度分布は、セル内においてはほぼ同濃度であるが、上部のセルへ行くほどセル内の濃度は減少する。一方、形成される成層の数は、スラッシュアイスの初期水溶液濃度が高いほど、また、熱流束が小さいほど、多く形成されることが観察された。これは、上に述べた密度差の平衡点の数が、初期水溶液濃度が高いほど、また、熱流束が小さいほど多くなることによるものである。

(4) 成層間のセル内には、加熱面で上昇し融解界面で下降するような自然対流が生じるが、これによりスラッシュアイスの融解界面は、凹凸の形状を呈するようになる。この凹凸はセル上部の融解界面において凹状になり、セル下部の融解界面において凸状になる [図 4(c)]。これは、セル上部においては、加熱面からの温度の高い融解液が融解界面に衝突することにより融解が促進されること、および融解界面に沿ってセル下部へ行くほど融解液の温度が減少し、融解界面に

おける融解が徐々に緩慢になるためと考えられる。

(5) 融解の進行に伴い、融解液がスラッシュアイス内部に浸透するため [図 4(d)]、スラッシュアイス下部頂点より、スラッシュアイス内の高濃度水溶液が流下するようになる [図 3(b), (c)]。したがって、スラッシュアイス内の水溶液濃度は徐々に低くなり、上部へ行くほど減少するような濃度分布が形成される。スラッシュアイスの周囲には、スラッシュアイス下部頂点より流下する高濃度水溶液温度よりも平衡凍結温度の高い、極めて低濃度の融解液層が存在する。そのため、高濃度水溶液流下点において低濃度融解液が凍結し、スラッシュアイス下部頂点において、樹枝状の凍結層が生じるようになる [図 4(e)]。また、試験槽下部の自然対流により、スラッシュアイス下部両側融解界面の融解が促進される。したがって、融解が進行するにつれ、スラッシュアイスの下部は、逆三角形の形状となる (図 5~7 参照)。さらに、スラッシュアイス周囲を取り囲む融解液がスラッシュアイス内に浸透することにより [図 4(e)]、スラッシュアイス内周囲温度は、外側へ行くほど徐々に上昇するようになる。しかし、スラッシュアイス下部頂点においては、高濃度水溶液の流下により、温度が低く維持される。

(6) スラッシュアイス上部側面融解界面においては、周囲融解液との密度差による浮力によって、多少の氷粒が上昇するのが認められた [図 4(f)]。

3・2 融解挙動および試験槽内温度分布

3・2・1 熱流束の影響 図 5 に、融解挙動および試験槽内温度分布に及ぼす加熱面熱流束の効果を示す。融解挙動はシャドウグラフ法、温度分布はサーモビューアにより得られたものである。温度分布における等温線(色)間の温度差は 1°C である。

図 5 より、熱流束の増加とともに、融解液相部の成層の数が減少し、それに伴い融解界面の形状が大きく異なっていることがわかる。これは、熱流束の増加に従って加熱面および加熱面近傍の融解液の温度が上昇することにより、加熱面に沿って上昇している融解液の密度が減少し、周囲融解液との密度差による平衡点が上部に移動すること、および成層の数が減少(成層間の距離が増加)し、自然対流の強さに差が生じることによるものと考えられる。また、スラッシュアイス下部頂点より流下する高濃度水溶液の流量およびスラッシュアイス下部頂点における樹枝状凍結層の生成量が、熱流束が大きくなるに従い増加していることが認められる。これは、スラッシュアイス内に浸透する単位時間当たりの融解液の量が、熱流束の増加に伴い多くなるためと考えられる。

Fig. 5 Melting behavior and temperature distribution [$q \times t = 2.88 \times 10^6 \text{ J/m}^2$, $C_I = 20 \text{ wt}\%$:
(a) $q = 8.0 \times 10^2 \text{ W/m}^2$, (b) $q = 1.6 \times 10^3 \text{ W/m}^2$, (c) $q = 2.4 \times 10^3 \text{ W/m}^2$]

また、試験槽内温度分布から、熱流束の増加に伴い、融解液相部の温度変化が大きくなっていることがわかる。これは、熱流束の増加により成層数が減少すること、および加熱面温度の上昇により自然対流の強さが増加することによるものと考えられる。また、スラッシュアイス内の温度は、熱流束が大きくなるに従い低下していることがわかる。これは、熱流束の増加に伴い短時間に融解が進行するため、スラッシュアイス内の濃度拡散が緩慢になり、スラッシュアイス内水溶液濃度の減少の割合が、熱流束が大きくなるに従い小さくなることによるものと考えられる。さらに、熱流束の増加に伴い、スラッシュアイス下部頂点よりの高濃度水溶液の流下が顕著になることが観察された。

3・2・2 初期水溶液濃度の影響 図6に、融解挙動に及ぼす初期水溶液濃度の効果を示す。可視化写真より、初期水溶液濃度が増加するに伴い成層の数が増加し、融解界面の形状が大きく変化していることがわかる。これは、初期水溶液濃度が大きくなるに従い、融解液内の濃度こう配が増加し、浮力の平衡点が多く存在するためと考えられる。

試験槽内温度分布については、初期水溶液濃度の増加に従い、融解液相部における温度変化が減少することがわかる。これは、初期水溶液濃度が増加するに伴

い、成層の数が多くなること、および融解液の粘性の増加により、成層間の自然対流が妨げられることによるものと考えられる。また、加熱面と融解界面との温度こう配が、初期水溶液濃度の増加に伴い大きくなっているが、これは、初期水溶液濃度の増加にもかかわらず、熱流束が等しい場合には加熱面の温度にはほとんど差がないのに対し、スラッシュアイス内の温度は初期水溶液濃度の増加に伴い大きく減少することによるものである。

3・3 局所熱伝達率挙動

3・3・1 一般的挙動 図7に、局所熱伝達率に及ぼす融解挙動の効果を示す。図7より、局所熱伝達率は、試験槽上部 $\phi=0$ 近傍の接触融解部分で高い値を示し、下部に行くに従い ($\phi=0 \sim \pi/3$)、融解液相部が発達することにより急激に減少することがわかる。また、局所熱伝達率は、成層部において極小値、および成層間で極大値をもつことがわかる。これは、加熱面近傍の成層下部においては高温の融解液が存在し、加熱面温度が局所的に上昇すること、および成層間セル内においては、自然対流の発達により熱伝達が促進されるためと考えられる。

3・3・2 熱流束の影響 図8に、局所熱伝達率に及ぼす熱流束の効果を示す。図8における三とおりの

Fig. 6 Melting behavior and temperature distribution

$[q = 2.4 \times 10^3 \text{ W/m}^2, t = 15 \text{ min. : (a) } C_i = 5 \text{ wt\%, (b) } C_i = 10 \text{ wt\%, (c) } C_i = 20 \text{ wt\%}]$

Fig. 7 Heat transfer coefficient distribution

Fig. 8 Effect of heat flux

データは、総加熱量($q \times t$)を等しく設定してある。局所熱伝達率は、 $\phi = 0 \sim \pi/4$ の試験槽上部において急激に減少し、下部に行くに従い多少の増減を繰り返して推移することがわかる。 $\phi = 0 \sim \pi/4$ の減少は、融解液相部の厚さが下部へ行くほど増加し、熱抵抗が大きくなることによるものと考えられる。また、 $\phi = \pi/4$ 以降において多少増減を繰り返すのは、融解液相部に生じる成層および成層間の自然対流の影響のためと考えられる。また、各熱流束における試験槽頂点の熱伝達率の差は、相変化の際の水粒子の融解潜熱により、熱流束

の増加に伴う加熱面の温度上昇が抑えられるためであると考えられる。一方、熱流束の増加に伴い熱伝達率が大きくなる傾向が認められるが、これは、融解液相部に生ずる成層の数が熱流束が大きくなるほど少なくなり、自然対流が妨げられる効果が減少するためと推察される。

3・4 平均熱伝達率挙動

3・4・1 熱流束の影響 図9に、平均熱伝達率に及ぼす熱流束の効果を示す。横軸は総加熱量である。図9より、融解初期において平均熱伝達率は急激に減少し、その後緩やかに減少もしくはほぼ一定の値を示し、融解終了前において再び減少することがわかる。初期の急激な減少は、加熱面と融解界面との間において融解液相が発達することにより熱抵抗が増加し、加熱面の温度が上昇するためと考えられる。その後、融解液相部において自然対流が生じ、熱伝達が促進されるため減少の割合が小さくなる。融解終了前における熱伝達の減少は、スラッシュアイスに働く浮力が減少すること、および円筒上部加熱面でのスラッシュアイスと加熱面の接触面積が減少することにより、円筒上

部加熱面の温度がさらに上昇することによって考えられる。

一方、熱流束が増加するに伴い、平均熱伝達率は増加しているが、これは、円筒上部で接触融解をしていること、および熱流束が増加するほど自然対流の流れが強くなることにより、熱流束の増加にもかかわらず、加熱面の温度上昇が抑えられるためと考えられる。

3・4・2 初期水溶液濃度の影響 図10は、加熱面平均熱伝達率に及ぼす初期水溶液濃度の効果を示したものである。いずれの初期水溶液濃度においても、平均熱伝達率は、融解初期において急激に減少し、その後緩やかに減少もしくはほぼ一定の値を示し、融解終了前において再び減少する。初期水溶液濃度が増加するに伴い、その融解終了前の低下の傾向が認められなくなるが、これは、初期水溶液濃度が高いほど、時間経過に伴うスラッシュアイス内温度の上昇傾向が大きくなるためと考えられる。また、初期水溶液濃度が増加するに伴い、平均熱伝達率の値は減少する傾向を示しているが、これは、初期水溶液濃度が増加するとともに、融解液相部に生じる成層の数および融解液の粘性の増加により自然対流が妨げられること、初期水溶液濃度の差異にかかわらず、接触融解をしている上部加熱面温度がほぼ一定であるのに対し、初期水溶液濃度が増加するに伴い、スラッシュアイス内の平均温度が低下するためと考えられる。

3・5 融解量

3・5・1 熱流束の影響 図11は、スラッシュアイスの融解量に及ぼす熱流束の効果を示したものである。縦軸は、初期充てん氷質量と融解氷質量の比である。図11より、融解量は総加熱量の増加に伴い、わずかに融解量を減少させながら推移することがわかる。これは、融解が進行するとともに、円筒上部における加熱面とスラッシュアイスとの接触面積が、徐々に減

Fig. 9 Effect of heat flux

Fig. 10 Effect of initial concentration of solution

Fig. 11 Effect of heat flux

Fig. 12 Effect of initial concentration of solution

少するためであると考えられる。また、融解量は熱流束の影響をほとんど受けていないが、これは、図9にも見られるように、ヒータからの入熱のほとんどが、融解液の温度上昇に伴う顕熱としてではなく、スラッシュアイスの融解に伴う潜熱として使われるためと考えられる。

3・5・2 初期水溶液濃度の影響 図12に、スラッシュアイスの融解量に及ぼす、初期水溶液濃度の効果を示す。図12より、融解量は、初期水溶液濃度の変化にほとんど影響されないことがわかる。これは、初期水溶液濃度の増加によるスラッシュアイスの融解温度の低下に伴って、融解潜熱量が減少し、融解しやすくなる一方、初期水溶液濃度の増加とともに、融解液相部に生ずる成層の数が増加すること、および融解液の粘性の増加などにより、自然対流が妨げられる効果が大きくなり、融解界面における熱伝達が低下するためと考えられる。

4. 結 言

水平円筒容器内におけるスラッシュアイスの融解挙動および熱伝達特性に及ぼす加熱面熱流束および初期水溶液濃度の影響に関して、実験的検討を行った結果、

本研究の範囲内において以下のことが明らかとなった。

(1) スラッシュアイスは浮力のため上昇し、上部加熱面で接触融解を行うようになり、上部加熱面と上部融解界面との間には極めて薄い液層が形成される。また、試験槽下部の融解液相部においては、自然対流が発生する。

(2) 融解液相部には、融解液の温度上昇および濃度による平衡点が存在し、そのため成層が形成され、成層間には自然対流が発生する。また、成層の数は、初期水溶液濃度の減少および熱流束の増加に伴い減少する。

(3) 試験槽内温度分布は、融解液相部に生じる成層、およびスラッシュアイス内の高濃度水溶液の流下により大きな影響を受ける。

(4) 加熱面の局所熱伝達率は、試験槽上部において最大を示し、試験槽下部に行くに従い、成層および自然対流の影響により多少の増減を繰り返しながら推移する。

(5) 加熱面の平均熱伝達率は、熱流束の増加とともに増加する。また、初期水溶液濃度の減少に伴い加熱面の平均熱伝達率は減少する。

(6) スラッシュアイスの融解量は、時間の経過とともに、ほぼ直線的に増加する。また、加熱面熱流束および初期水溶液濃度は、融解量に対してほとんど影響を及ぼさない。

文 献

- (1) 浜岡幸夫・ほか3名, 伝熱シンポジウム講論集, 1(1996), 241-242.
- (2) 楠本望, 機講論, No. 930-63, D(193), 91-93.
- (3) 原田英二・ほか2名, 化工論, 14-2(1988), 195-202.
- (4) Fukusako, S., ほか2名, *Proc. 5th Int. Symp. Therm. Eng. Sci. Cold Reg.*, (1996), 297-305.
- (5) 福田尚一郎・ほか2名, 機論, 58-552, B(1992), 2535-2542.