垂直加熱壁を有するく形容器内 リキッドアイスの融解熱伝達*

福迫 尚一郎^{*1}, 山田 雅彦^{*1}, 金 明 煥^{*2}

Melting Heat Transfer of Liquid Ice in a Rectangular Cavity with Heated Vertical Wall

Shoichiro FUKUSAKO, Masahiko YAMADA and Myoung-hwan KIM

The melting characteristics of liquid ice in a rectangular cavity were studied experimentally. The liquid ice, a mixture of ice particles and ethylene-glycol aqueous solution, was heated by one of the vertical walls of the cavity. The shape of the mush-liquid interface, melting rate, and local/mean heat-transfer coefficient at the heated vertical wall were observed and measured under a variety of conditions of heat flux and initial concentration of the aqueous binary solution. It was found that the formation and growth of double-diffusive layers due to the thermal and solutal buoyancy forces have a great influence on the melting process of the liquid ice.

Key Words: Melting Heat Transfer, Liquid Ice, Double-Diffusive Layer, Natural Convection

1. 緒 言

冷房装置の一般的な普及による夏期昼夜間の電力需要格差の拡大は、発電設備投資の増加と省エネルギーの面で大きな問題になっている。このような電力需要を平準化する要求より、冷房装置の場合、安価な夜間電力を用いて氷を製造し、その融解時の潜熱を利用して、昼間の冷房を行うという氷蓄冷システム⁽¹⁾が使用されている。一般に蓄冷材としては、融解潜熱の大きい固形氷が利用されているが、製氷の高効率化、採冷熱時の負荷応答性、および運搬性などの要求から、現在、新たな蓄冷材としてエチレングリコールやプロピレングリコール水溶液などを凍結させて得られるシャーベット状のリキッドアイス⁽²⁾⁽³⁾が注目されている。

リキッドアイスは、氷粒と氷粒間の接合を防ぐ潤滑剤の役割を有するエチレングリコールまたはプロピレングリコール水溶液などの混合物である。リキッドアイスの採冷熱時の融解熱伝達特性に関しては、固・液二相静止層状態にあるリキッドアイス中に置かれた水平加熱円管周りの融解挙動および熱伝達特性が実験的

に検討され⁽⁴⁾、また、リキッドアイスを流動層とした新たな固・気・液三相流動層型熱交換方式の採冷熱法⁽⁵⁾が提案されている。しかしながら、リキッドアイスを利用する高効率熱交換器の開発には、リキッドアイスの融解特性に関する詳細な基礎資料が必要になるが、採冷熱時のリキッドアイスの融解メカニズムとその融解熱伝達特性に関しては、十分な検討がなされているとは言えない。

本研究が対象としている試料のような二成分系物質の相変化問題に関しては、近年、PCM(相変化物質)を利用する工学的問題⁽⁶⁾、および海水中の流水融解に関する海洋環境学的問題⁽⁷⁾などに関連して研究がなされている。しかしながら、リキッドアイスのような固・二成分液相の融解問題については、ほとんど報告がなされていないようである。

本研究は、リキッドアイスの融解メカニズムとその融解熱伝達に関する基礎資料を得ることを目的としている。垂直加熱壁を有するく形容器内における、リキッド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検討を行なったので、ここに報告する。

* 原稿受付 平成4年1月6日。

^{*1} 正員、北海道大学工学部(〒060 札幌市北区北13条西8丁目)。

^{*2} 正員、北海道大学大学院。

記 号

- C : 水溶液濃度 wt%
 C_i : 初期水溶液濃度 wt%
 H : 試験槽内部高さ m
 h : 平均熱伝達率 $W/(m^2 \cdot K)$
 h_x : 局所熱伝達率 $W/(m^2 \cdot K)$
 I. P. F.: 氷充てん率 (Ice Packing Factor, 氷質量/水溶液質量) wt%
 q : 加熱面熱流束 W/m^2
 T : 水溶液温度 $^{\circ}C$
 T_b : リキッドアイス温度 $^{\circ}C$
 T_{wx} : 局所加熱面温度 $^{\circ}C$
 t : 実験開始よりの経過時間 min.
 W_i : 初期充てん氷質量 kg
 W_m : 融解氷質量 kg
 Y : 試験槽底面からの距離 m
 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 実験装置は、試験部、ブライン循環系、光学系、および測定系よりなる。図1に、実験装置の試験部詳細を示す。試験槽は、内法寸法が幅 120 mm × 奥行き 50 mm × 深さ 200 mm の透明アクリル製のく形容器で、右側垂直面が加熱壁、上・下面および左側垂直面は断熱されている。左側垂直面の背部には、リキッドアイスの融解による体積減少分を供給する補償部を設けており、試料と同一のリキッドアイスを挿入した。前面には槽内を明りょうに観察するためペアガラスを使用した。図2に加熱面の詳細を模式的に示す。加熱面には、メインヒーターおよびガードヒーターを設けた。厚さ 5 mm のベークライト板の両面に厚さ 30 μm のステンレスはくを接着し、メインヒーターの表面には絶縁のためエポキシ塗料を薄く均一に塗った。メインヒーター表面温度分布測定のため、ステンレスはくとベークライト板の間に $\phi 0.1$ mm C-A 熱電対を、高さ方向 25 箇所、8 mm 間隔で取付けた。メインヒーターの背面には、ガードヒーターの温度測定のため、 $\phi 0.1$ mm C-A 熱電対を取り付けた。また、リキッドアイスの温度を測定するため、左側垂直面から 30 mm の断面の下面から 40, 100, 160 mm の位置、および左側垂直面から 60 mm の断面の下面から 100 mm の位置に、 $\phi 0.1$ mm C-A 熱電対を取り付けた。試験槽

は、図1に示すように、恒温室内に設置した。

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）のリキッドアイスを製作するため、供試試料として、雪を恒温室内（約 $-25^{\circ}C$ ）に長期間保存して得られた微細な氷球群（平均直径 1 mm）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に投入し、かくはんして流動性を付与したものを用いた。リキッドアイスの氷充てん率 (I. P. F.) は 65 wt% とし、初期水溶液濃度は、5, 10, 20, および 30 wt% の 4 種類を採用した。リキッドアイスの実験開始前の融解を防ぐため、試験槽をあらかじめ十分に冷却した後、リキッドアイスを槽内に投入し、所定の熱流束で通電加熱を始めた時点を実験開始時刻とした。図2に示すように、ベークライト表面と背面の温度が等

図1 実験装置の試験部

図2 加熱面の詳細図

しくなるように制御した。熱流束は $8 \times 10^2, 2.3 \times 10^3$, および $4.5 \times 10^3 \text{ W/m}^2$ とし、恒温槽の温度は、試験槽からの損失熱量を極力防ぐため、リキッドアイスと融解液平均温度の中間温度に制御した。実験中は、界面形状と融解液相領域の流れ模様を、He-Ne ガスレーザを光源としてシャドウグラフ法を用いて可視化し、融解量、加熱面における局所および平均熱伝達率の測定を行った。

2.3 熱伝達率の算定法 局所および平均熱伝達率は、加熱面とリキッドアイスの温度差およびメインヒーターの電力（電圧 V および電流 I ）より算出した熱流束に基づき、次式より算定した。

$$h_x = q / (T_{wx} - T_b) \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$h = (1/H) \int_0^H h_x dx \quad \dots\dots\dots (2)$$

本実験条件の下では、リキッドアイスの温度（平均温度）は、図3に示すように時間経過とともに上昇する。これは、融解界面近傍に存在する温度と濃度こう配の影響で、リキッドアイス層の内部には、氷粒融解による濃度拡散および融解界面の周囲流体とリキッドアイスとの濃度差による濃度拡散が生じ、その結果、リキッドアイス層内の水溶液濃度が時間経過とともに減少し、リキッドアイスの温度が水溶液濃度の平衡凍結温度に近い温度を保持しながら上昇するためではないかと考えられる。なお、本実験においてリキッドアイス層内に生ずる温度差は $\pm 0.75^\circ\text{C}$ 以内であるため、リキッドアイスの温度として、前述の4箇所で測定した温度の平均値を代表温度とした。

2.4 融解量の測定法 融解量は、レベルゲージが所定の液位を保つように、補償液部に厚さ5mm、幅45mmの融解量測定板（アクリル板）をトラバース装置を用いて静かに挿入し、測定板の移動量から体積

減少量 (ΔV) を測定し、次式より算出した。

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

ここで $\Delta V'$ は、融解液の温度上昇による体積増加量（加熱面とリキッドアイス温度の平均温度において算定）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4に、シャドウグラフ法を用いて可視化した、リキッドアイス融解挙動の時間経過を示す。図4より、融解液相部に成層の形成と成長が見られる。このような成層は、二成分系以上の物質の融解および凍結時に主に観察され、単成分系物質の融解には見られない。

このような成層の形成と成長を伴うリキッドアイスの融解挙動は、以下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) 図5(a)に示すように、初期融解では熱移動が熱伝導によって支配され、融解界面から流出する氷粒の融解水とエチレングリコール水溶液は、濃度不安定のための対流によって融解水は上方へ、エチレングリコール水溶液は下方へ、周囲流体との間に濃度拡散を生じながら移動する。この結果、融解液相部の高さ方向に濃度分布（下部へ向かって濃度が増加）が形成される〔図5(b)参照〕。

(2) 図5(c)に示すように、時間の経過とともに加熱面に沿って自然対流が生ずるが、この加熱面近傍の温度差による上向き流れは、周囲流体の濃度が垂直上方に向かって低下するため、上昇するにしたがって上向き流れの浮力が減少する。そして、温度差による浮力と濃度差による浮力との平衡点、すなわち温度の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垂直加熱面を離れ、水平左方向あるいは下方向に移動する。この流れは、水平左方向に進行して融解界面に達し、界面を融解させながら加熱面からの熱を伝達し、温度が低下するにしたがって密度が増加するため、融解界面に沿う下向き流れとなる。この下向き流れは、下降するにしたがって界面から冷却され、温度の低下による負の浮力の増加と周囲流体濃度の上昇による負の浮力の減少とに基づく浮力の平衡点、すなわち温度の低下によって増加する下向き流れの密度と、垂直方向濃度こう配によって増加する周囲流体の密度との平衡点近傍から融解界面を離れ、水平右方向あるいは上方向に移動する。

(3) このような流動特性により、融解液相部の高

図3 リキッドアイス温度の時間経過

図 4 融解挙動の時間経過
 $(C_i=10 \text{ wt}\%, q=8.0 \times 10^2 \text{ W/m}^2 : (a) t=30 \text{ min.},$
 $(b) t=100 \text{ min.}, (c) t=170 \text{ min.})$

さ方向に数個の層が形成される〔図5(d)参照〕。図5(e)は、成層内部の流れ模様の詳細を示したものである。層内部の主流は反時計回りであり、成層内部では、このような流れによって濃度拡散が速やかに進行し、そのため、成層界面には大きな濃度こう配が存在する。成層界面での流れは、低温・低濃度の右方向流れと、高温・高濃度の左方向流れによる対向流であり、成層界面は熱・濃度の拡散が生じている二重拡散界面である。また、図4より明かなように、成層界面は、融解界面に向かっていくぶん下へ下がる傾向を示している。これは、成層界面での熱拡散による密度の変化が濃度拡散による密度の変化より大きいので、成層界面上部融解液の密度は加熱面に近づくほど減少し、一方、成層界面下部融解液の密度は融解界面に近づくほど増加することによる影響に加えて、加熱面近傍の流れが上昇し成層界面に下から衝突するとともに融解界面近傍の流れが下降し成層界面に上から衝突する成層内部の対流方向（反時計回り）の影響によるものではないかと考えられる。リキッドアイスの融解による融解界面形状は、成層の位置と高さおよび成層数により大きく変化する。成層内の融解界面は、反時計回りの流れが融解界面に到達する部分が大きく融解し、下降するにしたがって融解界面近傍の流れの液温が低下するため、成層下部で加熱面方向にせり出す形を示す。

(4) 融解界面に沿っては、さらに上向き流れの低濃度の薄い層が形成される。これは、融解界面における氷粒の融解に基づく低濃度の融解液が、融解界面に沿って上昇することによって考えられる。この融解液

図 5 融解挙動のメカニズム

の一部は、反時計回りの流れと混合しながら下向きへ流れ、その混合液中で反時計回りの流れの濃度より低い部分は、反時計回りの流れを妨害しながら上方へ流れ、かつ上昇するにしたがってさらに混合が進む。この混合融解液と、融解界面に沿って上昇する低濃度の薄い層の融解液の中で、成層界面上・下の間の濃度〔たとえば、図5(e)における C_4 , C_3 または C_2 , C_1 の間の濃度〕を有する融解液が、成層界面左上端部に停滞するようになり、そのため成層界面が左端近傍で二つに分岐し、場合によっては非常に弱い対流を有する別の薄い層を形成する。

(5) 図5(f)に示すように、上述の融解界面の左端近傍の低濃度の薄い層が発達することにより、融解液相部の上部境界面に新しい成層が形成される。この低濃度の新しい成層は、下部成層よりの濃度拡散によって、成層内の融解液濃度が増加するとともに、またこの成層上部に融解界面からの低濃度の融解液が流入して次の成層の形成を促し、下方向へ移動しながら成層数を増やす〔図5(g)参照〕。

3・2 融解挙動に及ぼす熱流束の影響 図6は、融解挙動に及ぼす加熱面熱流束の効果をシャドウグラフ法により示したものである。図6より、熱流束の増加とともに融解液相部の成層数が減少し、それによって融解界面の形状が大きく変化することがわかる。これは、熱流束の増加に伴い加熱面近傍の温度が上昇し、それによって上向き流れの密度がさらに減少し、垂直方向に濃度こう配を形成する周囲流体に対する密度の

平衡点が上部に移動するためと考えられる。熱流束 $8.0 \times 10^2 \text{ W/m}^2$ の場合、融解界面の形状は加熱面に対して緩やかな凹凸を持ちほぼ平行になっているが、熱流束が大きくなると、融解界面の形状は加熱面に対して大きく変化する。また、初期水溶液濃度 5 wt%, 熱流束 $4.5 \times 10^3 \text{ W/m}^2$ の場合〔図6(c)〕には、成層の形成は観察されなかった。この場合の融解界面の形状は、単成分系物質、すなわち純水やパラフィンなどの融解時によく観察される融解界面の形状とほぼ同一である。

3・3 融解挙動に及ぼす初期水溶液濃度の影響

図7は、融解特性に及ぼす初期水溶液濃度の効果を示す。図より初期水溶液濃度の増加とともに成層数が増加することがわかる。これは、初期水溶液濃度の増加とともに融解液相部の垂直方向の濃度こう配が大きくなり、加熱面近傍の温度上昇によって密度が減少する上向き流れと、周囲流体との密度の平衡点が、下部へ移動するためと考えられる。

3・4 局所熱伝達率挙動

3・4・1 一般的挙動 図8は、加熱面よりの局所熱伝達率挙動を同条件の融解挙動と比較して示す。図より、加熱面の上部に行くにしたがって、全体的に局所熱伝達率は減少していることがわかる。これは、成層内の融解液濃度が上層に行くほど低くなり融解界面の融解温度が高くなること、および成層界面での垂直上方への熱移動より、融解液の温度が上層に行くほど高くなるためと考えられる。また、成層内の局所熱伝

図6 融解挙動に及ぼす熱流束の効果
〔 $C_i = 5 \text{ wt}\%$: (a) $q = 8.0 \times 10^2 \text{ W/m}^2$, $t = 180 \text{ min.}$,
(b) $q = 2.3 \times 10^3 \text{ W/m}^2$, $t = 50 \text{ min.}$, (c) $q = 4.5 \times 10^3 \text{ W/m}^2$, $t = 20 \text{ min.}$ 〕

図 7 融解挙動に及ぼす初期水溶液濃度の効果
 $[q = 2.3 \times 10^3 \text{ W/m}^2$: (a) $C_i = 5 \text{ wt}\%$, $t = 50 \text{ min.}$,
 (b) $C_i = 10 \text{ wt}\%$, $t = 80 \text{ min.}$, (c) $C_i = 20 \text{ wt}\%$,
 $t = 80 \text{ min.}$, (d) $C_i = 30 \text{ wt}\%$, $t = 80 \text{ min.}$]

図 8 融解挙動と局所熱伝達率挙動の比較

図 9 局所熱伝達率に及ぼす熱流束の効果

達率の変化は、成層内の自然対流によって、加熱面下部に行くほど増加している。図より、成層界面での局所熱伝達率は、非常に急激に変化することがわかる。これは、成層界面近傍の上下に低温と高温の対向流が存在することによって考えられる。

3・4・2 熱流束の影響 図 9 は、垂直加熱面の局所熱伝達率に及ぼす熱流束の効果を示す。図 9 より明らかなように、局所熱伝達率は、熱流束の増加とともに増加する。これは、熱流束の増加とともに成層数が減少し、成層の存在によって自然対流が妨げられる効果が減少するためと考えられる。成層数の増加は、成層

の形状係数〔成層の横方向長さ(幅)に対する成層の高さの比〕の減少をもたらす、自然対流の効果を阻害するため加熱表面上の熱伝達率を減少させる。

3・4・3 初期水溶液濃度の影響 図 10 は、垂直加熱面の局所熱伝達率に及ぼす初期水溶液濃度の効果を示す。図より明らかなように、初期水溶液濃度が低くなるにしたがって局所熱伝達率が増加している。これは、初期水溶液濃度が低いほど成層数が減少し、加えて融解液の粘性が小さくなることによって、自然対流の効果が増加するためではないかと考えられる。

3・5 平均熱伝達率挙動

3・5・1 熱流束の影響 図 11 は、垂直加熱面の平均熱伝達率に及ぼす熱流束の効果を示す。図より明らかなように、平均熱伝達率は、実験開始とともに急激に減少し、ある時点よりほぼ一定の値を示すようになる。初期の急激な減少は、熱移動が熱伝導によって支配されているためであり、その後ほぼ一定の値を示すのは、自然対流が発達することによると考えられる。また、自然対流の発生は、熱流束の減少とともに遅くなる。図より、熱流束の増加とともに平均熱伝達率が増加することがわかる。これは、前に述べたように熱流束の増加にしたがって成層数が減少し、自然対流が妨げられる効果が減少するためと考えられる。

3・5・2 初期水溶液濃度の影響 図 12 は、垂直加熱面の平均熱伝達率に及ぼす初期水溶液濃度の効果を示す。図より平均熱伝達率は、初期水溶液濃度の減少によって増加することがわかる。これは、初期水溶液濃度が低いほど成層数が減少し、加えて融解液の粘性が低くなることによって、融解を促進する自然対流が妨げられる効果が減少するためと考えられる。また、図より、自然対流の発生は、初期水溶液濃度の増加とともに少し遅くなることがわかる。これは、初期水溶液濃度の増加にしたがって融解液濃度が増加し、融解液の粘性が大きくなるためではないかと思われる。

図 10 局所熱伝達率に及ぼす初期水溶液濃度の効果

3・6 融解量

3・6・1 熱流束の影響 図 13 は、リキッドアイスの融解量に及ぼす熱流束の効果を示す。縦軸は、初期充てん氷質量に対する融解氷質量の比である。図より、融解量は全体的に時間の経過とともに緩やかに減少することがわかる。これは、時間経過にしたがって成層が形成され成長すること、および成層が加熱面に対して垂直方向に発達し、成層の形状係数が小さくなり、自然対流が妨げられる効果が大きくなるためと考えられる。

3・6・2 初期水溶液濃度の影響 図 14 は、リキッ

図 11 平均熱伝達率に及ぼす熱流束の効果

図 12 平均熱伝達率に及ぼす初期水溶液濃度の効果

図 13 融解量に及ぼす熱流束の効果

ド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リキッドアイスの融解温度の低下に伴って温度に依存する融解潜熱量が減少し、融解しやすくなる反面、前述のように、初期水溶液濃度の増加にしたがって成層数が増加することや融解液の粘性が増加することなどから、成層内部における流動状態に影響（自然対流が妨げられる）を及ぼし、融解界面における熱伝達が悪くなるためではないかと考えられる。

4. 結 言

垂直加熱壁面を有する容器内における、リキッド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ついて実験的に検討した結果、本実験の範囲内で以下のことが明らかとなった。

(1) リキッドアイスの融解初期においては、熱伝導による熱移動が支配的であり、融解界面は、加熱面に対してほぼ平行である。

(2) 融解時間の経過とともに、融解液相部には自然対流が発生し、これによっていくつかの成層が形成される。融解界面に沿って上向きに流れる低濃度の薄い層の存在によって、融解液相部の上部境界面に低濃度の層が形成され、これによって新しい成層の形成が促される。

(3) 融解界面の形状は、成層の位置と高さおよび

図 14 融解量に及ぼす初期水溶液濃度の効果

成層数により大きく影響され、成層の数は初期水溶液濃度が高くなるにしたがい、また熱流束が小さくなるにしたがい増加する。

(4) 加熱面の局所熱伝達率は、全体的には加熱面の下方向に行くにしたがって増加するが、成層界面が接する位置の上下で急激に変化する。

(5) 加熱面の平均熱伝達率は、実験開始とともに急激に減少し、その後ほぼ一定の値を示す。また、平均熱伝達率は、初期水溶液濃度が低いほど、また熱流束が高いほど増加する。

(6) 融解量は、融解時間の経過とともに緩やかに減少するが、初期水溶液濃度が融解量に及ぼす効果は非常に小さい。

文 献

- (1) 射場本, 冷凍, 62-714(1987), 351.
- (2) 遠藤・星野, 冷凍, 62-715(1987), 481.
- (3) Tanasawa, I. and Lior, N., ed., *Heat and Mass Transfer in Materials Processing*, (1992), 347, Hemisphere Pub. Corp.
- (4) 山田・ほか3名, 機論, 57-543, B (1991), 3904.
- (5) 福迫・ほか3名, 機論, 57-541, B (1991), 3293.
- (6) Himeno, N., ほか2名, *Int. J. Heat Mass Transf.*, 31 (1988), 359.
- (7) Huppert, H. E. and Turner, J. S., *J. Fluid Mech.*, 100 (1980), 367.