



| | |
|------------------|---|
| Title | 矩形容器内リキッドアイスの融解熱伝達に関する実験的および数値解析的研究 |
| Author(s) | 福迫, 尚一郎; Fukusako, Shoichiro; 山田, 雅彦 他 |
| Citation | 北海道大學工学部研究報告, 166, 13-23 |
| Issue Date | 1993-10-29 |
| Doc URL | https://hdl.handle.net/2115/42382 |
| Type | departmental bulletin paper |
| File Information | 166_13-24.pdf |



矩形容器内リキッドアイスの融解熱伝達 に関する実験的および数値解析的研究

福迫尚一郎 山田 雅彦 金 明煥

(平成5年6月28日受理)

Experimental and Numerical Study on Melting Heat Transfer of Liquid Ice in a Rectangular Cavity

Shoichiro FUKUSAKO, Masahiko YAMADA, and Myoung-hwan KIM

(Received June 28, 1993)

Abstract

The melting characteristics of liquid ice in a rectangular cavity was studied experimentally and numerically. The liquid ice, mixture of ice particles and ethylene-glycol aqueous solution, was heated from 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, measured, and calculated under a variety of conditions of heat flux and initial concentration of aqueous binary solution. It was found that the formation of double-diffusive layers based on the thermal and solutal buoyancy forces exerted a great influence on the melting process of the liquid ice.

1. 緒 言

冷房装置の使用による夏期昼夜間の電力需要格差の拡大は、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という要求より、安価な夜間電力を用いて氷を製造し、昼間の冷房に利用する氷蓄冷システム¹⁾が用いられている。一般に蓄冷材としては、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観点から、現在、新たな蓄冷材として微細な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²⁻³⁾が注目されている。

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)を利用する蓄熱・蓄冷などに関する工学的問題⁴⁾、および海中の流水融解に関する海洋環境学的問題⁵⁾などに関連して実験的および解析的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(採冷熱時)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矩形容器内における、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実験的および数値解析的検討を行なったので、ここに報告する。

記 号

| | | | |
|-------------------------------------|-----------------------|-----------------------|--------------------------------------|
| C : 水溶液濃度 | wt% | ギリシャ文字 | |
| C_p : 比熱 | J/(kg·K) | α : 熱拡散係数 | m ² /s |
| D : 濃度拡散係数 | m ² /s | β : 体膨張係数 | °C ⁻¹ , wt% ⁻¹ |
| f : 融解界面位置 | m | λ : 熱伝導率 | W/(m·K) |
| h : 平均熱伝達率 | W/(m ² ·K) | ν : 動粘性係数 | m ² /s |
| h_x : 局所熱伝達率 | W/(m ² ·K) | ρ : 密度 | kg/m ³ |
| L : リキッドアイス の単位質量に対する 氷分の潜熱 | J/kg | Ψ : 流れ関数 | |
| q : 加熱面熱流束 | W/m ² | ω : 渦度 | |
| T : 温度 | °C | 添 字 | |
| t : 実験開始よりの経過時間 | min. | b : バルク | |
| u, v : 流速 | m/s | i : 初期値 | |
| x, y : 座標 | m | l : 液相 | |
| | | o : 参照値(0°C, 0 wt%) | |
| | | s : 濃度関係値 | |
| | | t : 温度関係値 | |
| | | w : 加熱壁 | |

2. 実験装置および実験方法

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矩形容器で、上・下面および左側垂直面は断熱されている。右側垂直面は、メインヒーターおよびガードヒーターより構成されている熱流束一定の加熱面である。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、試料リキッドアイスの一部を挿入した。前面には、槽内を明確に観察するためペアガラスを使用した。加熱面表面温度分布測定のため、 ϕ 0.1 mm C-A熱電対を、高さ方向25箇所に取り付けた。本実験では、供試リキッドアイスとして、微細な氷粒群(平均粒径0.5 mm)とエチレングリコール水溶液との混合物を用い、供試リキッドアイスの氷充填率(I.P.F.)は65 wt%とした。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するとともに、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。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($T_{wx} - T_b$)および熱流束に基づき、それぞれ次式より算定した。

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

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

本実験条件の下では、リキッドアイス層内の平均温度は、図2に示すように時間経過と共に上昇する。これは、融解界面近傍に存在する温度および濃度勾配の影響によって、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

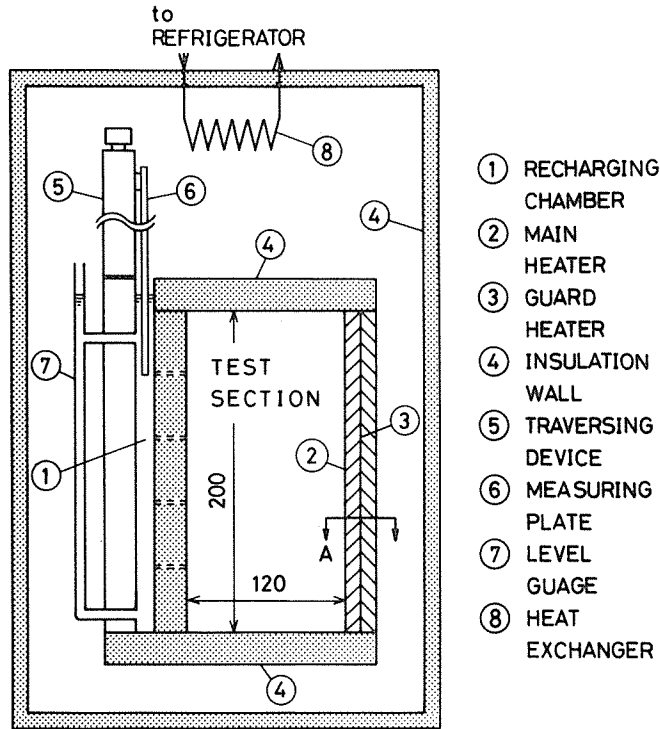


図1 実験装置

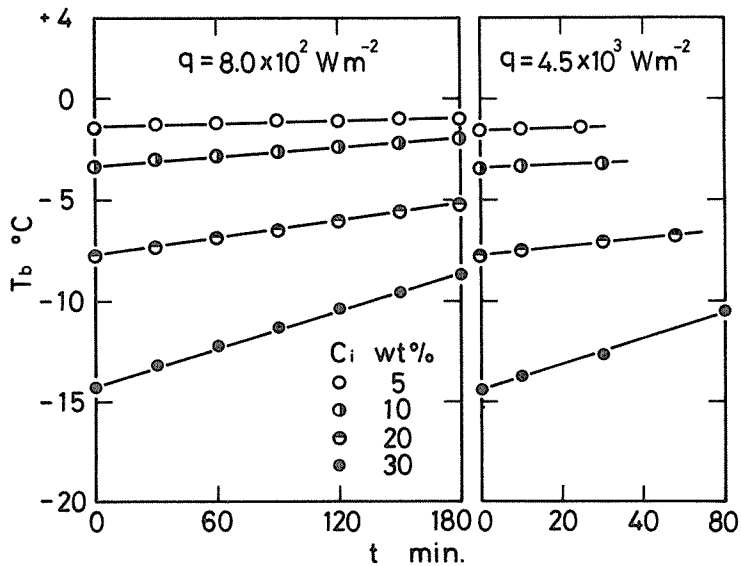


図2 リキッドアイス温度の時間変化

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共に減少し、リキッドアイス層の温度が水溶液濃度の平衡凍結温度に近い温度を保持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箇所測定した温度の平均値を代表温度とし

た。

3. 数値解析

図3に本解析に用いた座標系を示す。高さH、幅Wの矩形容器を考え、上下面および左側垂直面を断熱壁、右側垂直面を熱流束一定の加熱壁とする。解析に当たり次の仮定を導入する。

- (1) 液層内の流れは、二次元、非圧縮、および層流である。
- (2) Bousinesque近似が成立する。
- (3) 相変化に伴う体積変化はない。
- (4) リキッドアイス層は、温度および濃度一定の固相と見なし、層内の流動は無視する。

以上の仮定に基づき、融解液相領域における渦度方程式、渦度輸送方程式、エネルギー方程式、および物質移動方程式は、それぞれ次式により表される。

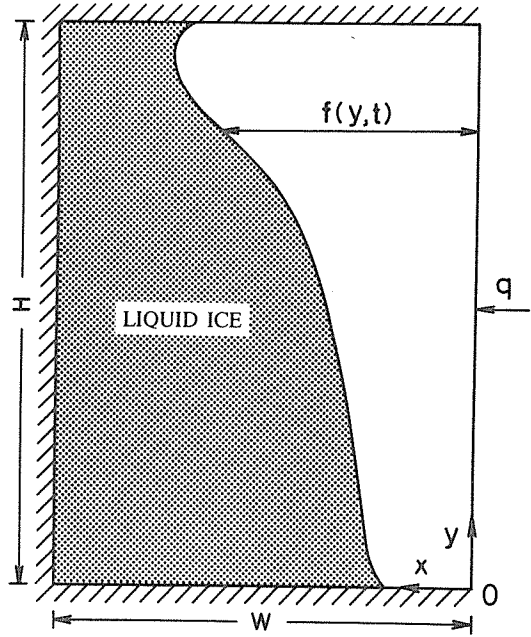


図3 座標系

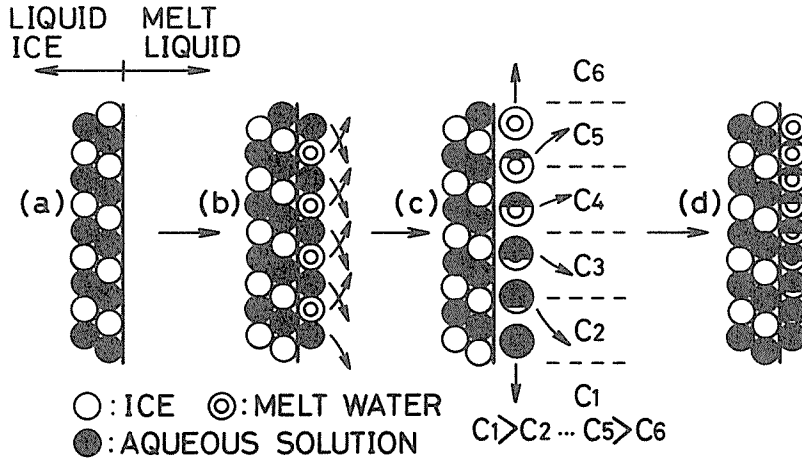


図4 融解界面における融解挙動モデル

$$\Omega = -\left(\frac{\partial^2 \Psi}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial Y^2}\right) \quad (3)$$

$$\frac{\partial \Omega}{\partial \tau} + \frac{\partial \Psi}{\partial Y} \frac{\partial \Omega}{\partial X} - \frac{\partial \Psi}{\partial X} \frac{\partial \Omega}{\partial Y} = Pr \left(\frac{\partial^2 \Omega}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \Omega}{\partial Y^2} \right) + Ra_t Pr \frac{\partial \theta_l}{\partial X} - Ra_s Pr \frac{\partial S}{\partial X} \quad (4)$$

$$\frac{\partial \theta_l}{\partial \tau} + \frac{\partial \Psi}{\partial Y} \frac{\partial \theta_l}{\partial X} - \frac{\partial \Psi}{\partial X} \frac{\partial \theta_l}{\partial Y} = \frac{\partial^2 \theta_l}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \theta_l}{\partial Y^2} \quad (5)$$

$$\frac{\partial S}{\partial \tau} + \frac{\partial \Psi}{\partial Y} \frac{\partial S}{\partial X} - \frac{\partial \Psi}{\partial X} \frac{\partial S}{\partial Y} = \frac{1}{Le} \left(\frac{\partial^2 S}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 S}{\partial Y^2} \right) \quad (6)$$

図4に、融解界面の挙動を模式的に示す。融解は、(a)→(c)の様に進行するものと考えられるが、(b)に示すような融解界面の液相側で水の融解水と水溶液が共存する不連続の濃度分布を境界条件として導入するのは、現在のところ非常に難しい。そこで、本解析においては、後述する実験観察結果に基づき、図4(d)に示すように、高さ方向に連続的に濃度が減少する分布を有する濃度境界条件を仮定する。また、融解界面の温度は、氷の融解水と水溶液が完全に混合した場合の水溶液平均濃度に対応する平衡凍結温度であると仮定する。したがって、融解界面におけるエネルギーバランス式は、

$$Ste \left(R \frac{\partial \theta_b}{\partial X} - \frac{\partial \theta_l}{\partial X} \right) \left(1 + \left(\frac{\partial F}{\partial Y} \right)^2 \right) = \frac{\partial F}{\partial \tau} \quad (7)$$

となる。

初期条件、および境界条件は、それぞれ次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} \tau=0; \quad \Psi=0, \theta_b=-1 \\ X=0; \quad \Psi=0, Q=const., \frac{\partial S}{\partial X}=0 \\ X=F; \quad \Psi=0 \\ X=1; \quad \frac{\partial \theta}{\partial X}=0 \\ Y=0, \frac{H}{W}; \quad \Psi=0, \frac{\partial \theta}{\partial Y}=0, \frac{\partial S}{\partial Y}=0 \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

上式に用いた無次元量は、次のように定義される。

$$\left. \begin{aligned} X = \frac{x}{W}, \quad Y = \frac{y}{W}, \quad F = \frac{f}{W} \\ \theta_l = \frac{(T_l - T_o)}{(T_o - T_i)}, \quad \theta_b = \frac{(T_b - T_o)}{(T_o - T_i)}, \quad S = \frac{(C - C_o)}{(C_i - C_o)} \\ \tau = \frac{\alpha t}{W^2}, \quad \Psi = \frac{\Psi}{\alpha}, \quad \Omega = \frac{\omega W^2}{\alpha}, \quad Q = \frac{qW}{\lambda_i(T_o - T_i)} \\ Pr = \frac{\nu}{\alpha}, \quad Ra_t = \frac{g\beta_i W^3(T_o - T_i)}{\nu\alpha}, \quad Ra_s = \frac{g\beta_s W^3(C_i - C_o)}{\nu\alpha} \\ Le = \frac{\alpha}{D}, \quad R = \frac{\lambda_b}{\lambda_i}, \quad Ste = \frac{C_p(T_o - T_i)}{L} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

本研究の問題は、融解界面の形状が時間経過とともに変化する移動境界問題であることから、境界固定法⁶⁾を用いて座標変換を行った。基礎方程式の差分化は、CONTROL VOLUME法により行い、対流項には風上差分を適用した。得られた差分式にSOR法を用い、微小時間ステップご

とに収束計算を行い、すべての格子点上における渦度、流れ関数、温度、および濃度の繰り返しの前後相対誤差が 10^{-4} 以内であれば収束したものとし、時間ステップを進めた。融解界面位置は、準静的近似 (quasi-stationary approximation) を適用し、各微小時間ステップにおいて融解液の流れ、温度、および濃度場による界面移動の効果は無視し、液相内の収束解を得た後、式(7)より計算し求めた。

4. 結果および考察

4.1 融解挙動

図5は、 $C_i=10$ wt%, $q=800$ W/m² の場合、実験開始から100分経過時の融解挙動について、シャドウグラフ法を用いて可視化した実験結果 [図5(a)] と、計算より得られた融解界面形状、流線 [図5(b)], 無次元温度分布 [図5(c)], および無次元濃度分布 [図5(d)] を示す。実験結果より、リキッドアイスの融解時には、融解液相部に成層の形成が見られる。計算結果も、成層の形成とそれによる融解界面の形状を良く表している。また、成層内部の流れは反時計回りであり、等温線および濃度分布は、成層界面で急激に変化していることが分かる。このような成層の形成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6(a), (b)に示すように、融解初期には熱移動が熱伝導によって支配され、氷粒の融解水とエチレングリコール水溶液との間に、濃度拡散を生じながら融解液相部の高さ方向に濃度分布が形成される。
- (2) 図6(c)に示すように、時間の経過と共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

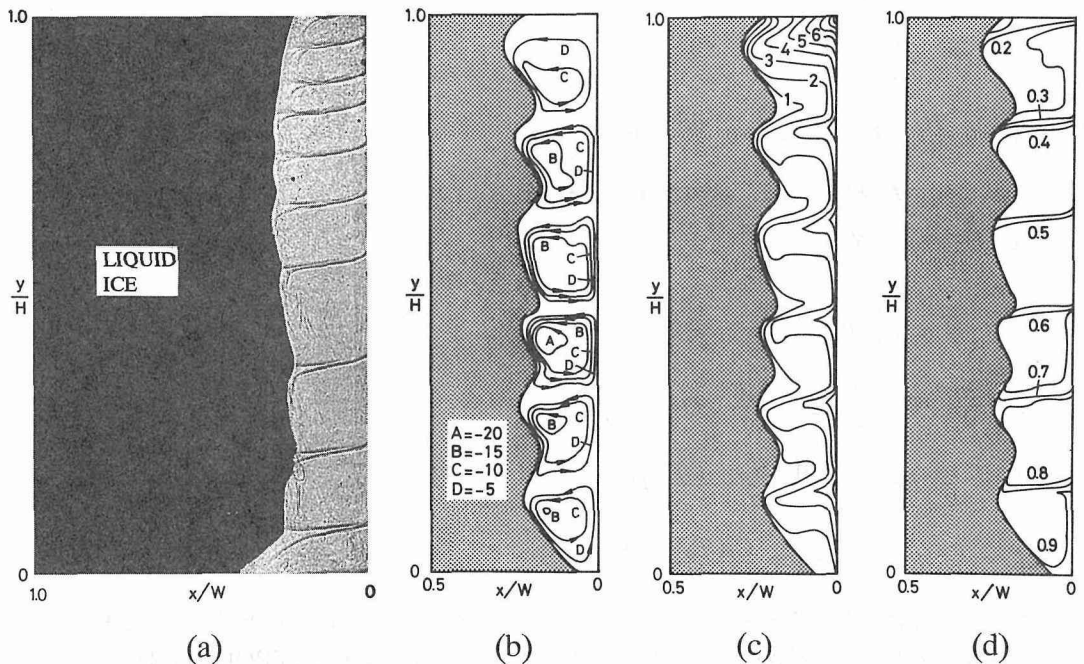


図5 流れ模様、等温線および等濃度線 ($C_i=10$ wt%, $q=8.0 \times 10^2$ W/m², $t=100$ min.)

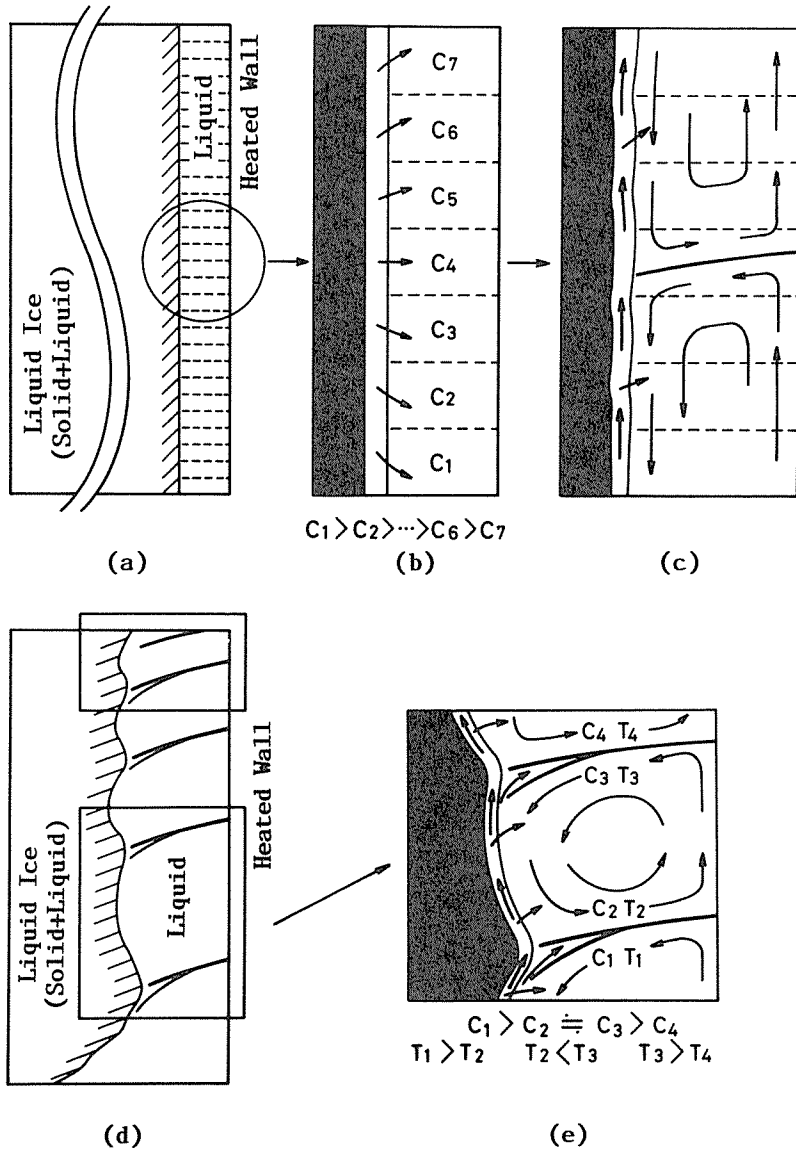
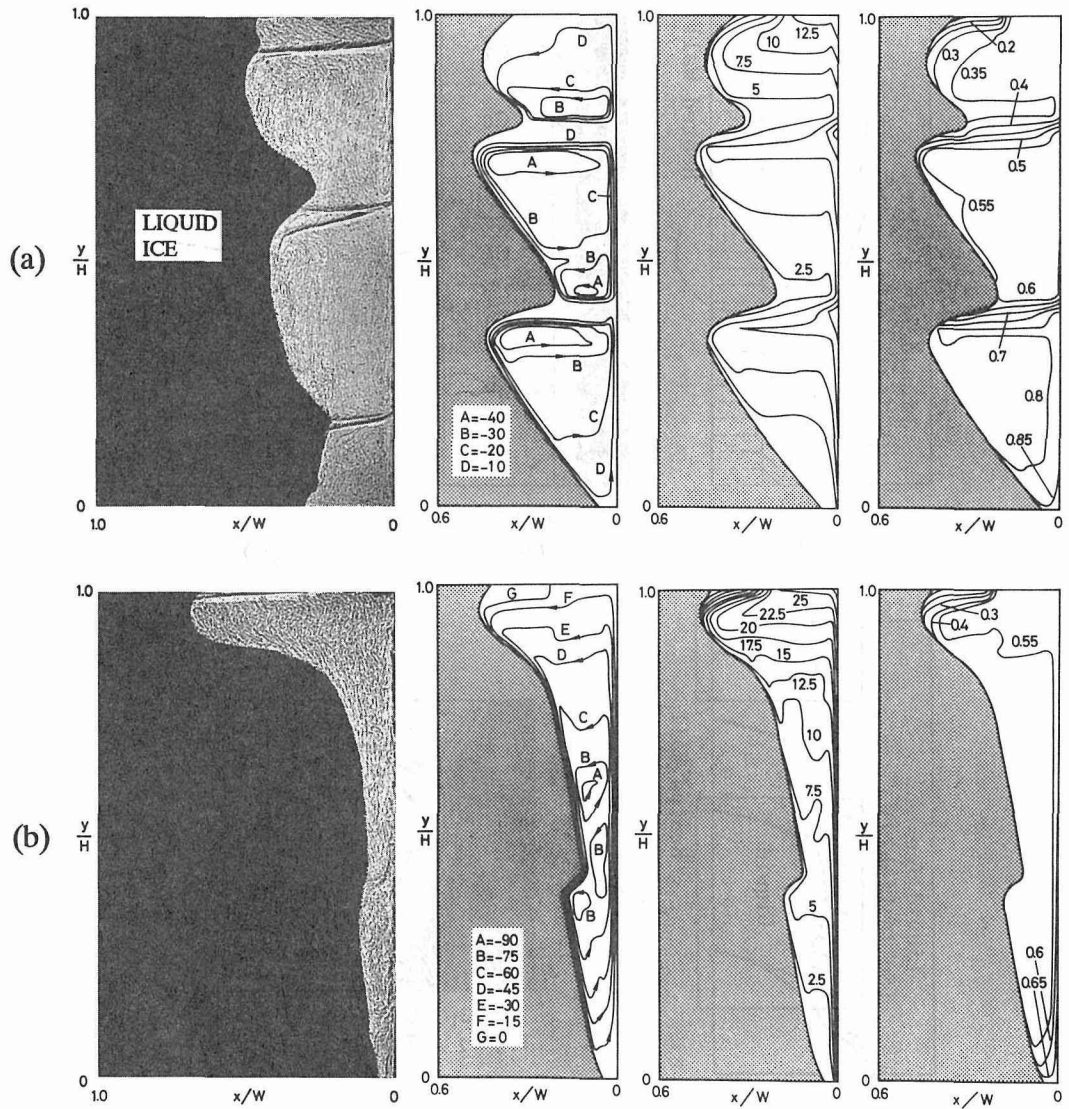


図6 融解挙動のメカニズム

に従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温度低下と共に融解界面に沿う下向き流れとなる。この下向き流れは、下降するに従って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、融解液相部の高さ方向に数個の層が形成される（図6(d)参照）。図6(e)は、成層内部の流れ模様の詳細を示したものである。層内部の主流れ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勾配が存在する。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



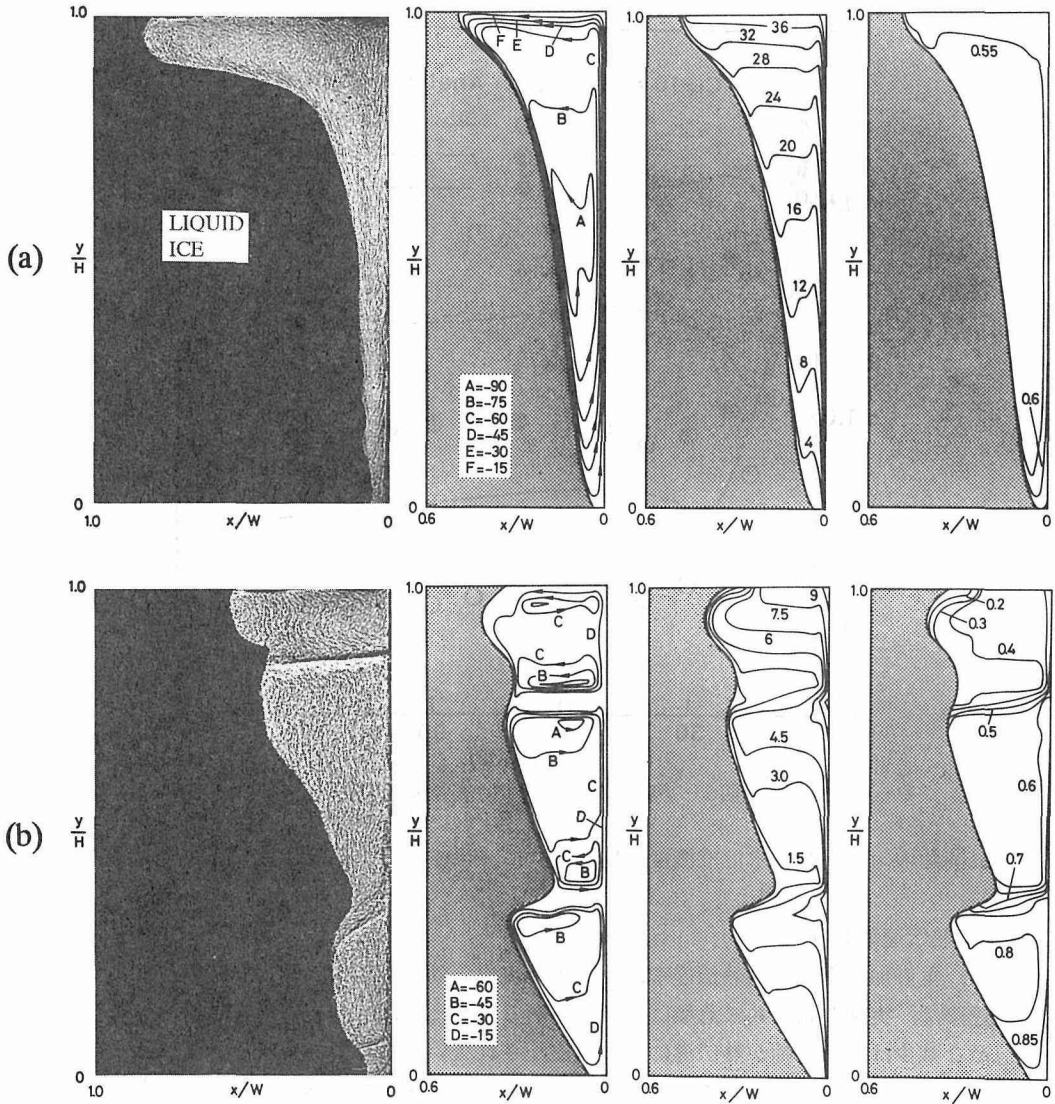
$C_1 = 10 \text{ wt\%}$: (a); $2.3 \times 10^3 \text{ W/m}^2$, $t = 70 \text{ min}$. (b); $q = 4.5 \times 10^3 \text{ W/m}^2$, $t = 20 \text{ min}$.

図7 融解挙動に及ぼす熱流束の影響

び成層数により大きく変化する。

4.2 融解挙動に及ぼす熱流束の影響

図5, 図7(a), および図7(b)に, 融解挙動に及ぼす加熱面熱流束の効果に関する実験および計算結果を示す。図より, 熱流束の増加と共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分かる。これは, 熱流束の増加に伴い加熱面近傍の温度が上昇し, それによって温度差による浮力がさらに増加し, 濃度差による浮力との平衡点が上部に移動するためと考えられる。解析結果も, 成層の形成とその数の変化を, 分離されている流線群によって良く表している。



$q = 4.5 \times 10^3 \text{ W/m}^2$: (a) $C_1 = 5 \text{ wt}\%$, $t = 20 \text{ min}$. (b) $C_1 = 20 \text{ wt}\%$, $t = 30 \text{ min}$.

図8 融解挙動に及ぼす初期水溶液濃度の影響

4.3 融解挙動に及ぼす初期水溶液濃度の影響

図7(b), 図8(a), および図8(b)に, 融解挙動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共に成層数が増加することが分かる。これは, 初期水溶液濃度の増加と共に融解液相部の垂直方向の濃度勾配が大きくなり, それによって加熱面近傍の上向き流れに対する濃度差による浮力がさらに増加し, 温度差による浮力との平衡点が下部へ移動するためと考えられる。初期水溶液濃度5 wt%の場合には, 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, すなわち純氷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。計算結果も, 初期水溶液濃度の増加により成層数が増加することを良く示している。また, 成層数および融解液の粘性の増加によって融解液相部の自然対流が妨げら

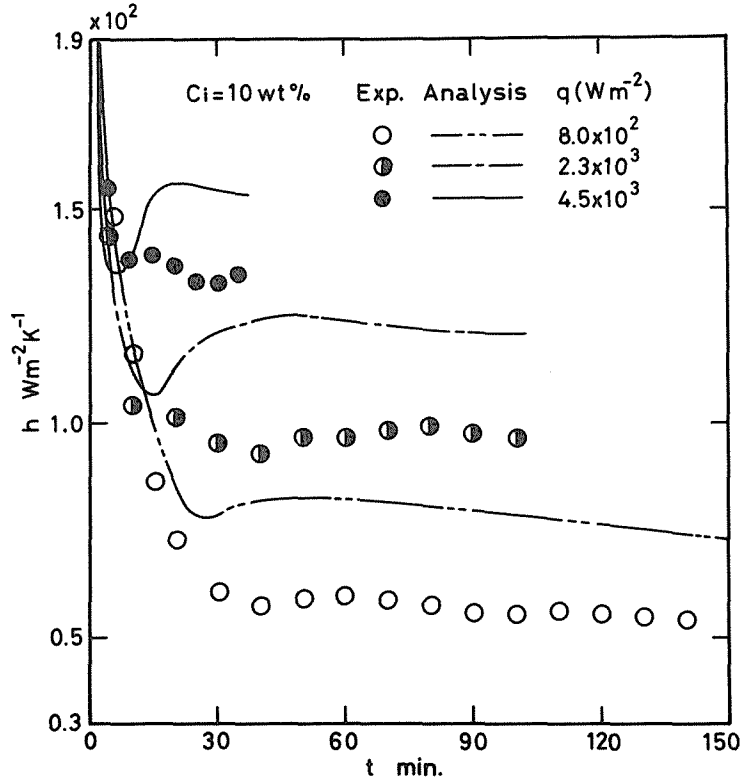


図9 平均熱伝達率に及ぼす熱流束の影響

れ、流れ関数の勾配が初期水溶液濃度の増加と共に減少することが分かる。

4.4 平均熱伝達率挙動

図9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、実験開始と共に急激に減少し、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。図より、熱流束の増加と共に平均熱伝達率が増加することが分かる。これは、先に述べたように熱流束の増加に従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。計算結果は実験結果と比較し、大きな値を示している。この理由の一つは、加熱面温度に大きく影響すると考えられる融解界面の温度に関して本計算で仮定した温度と実験上の実際温度との相違ではないかと思われる。しかし、計算結果はその定性的傾向を良く表していると言える。図10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分かる。これは、前述のように成層数と融解液の粘性の影響によって、初期水溶液濃度の減少と共に融解を促進する自然対流の効果が増加するためと考えられる。計算結果も同様の傾向を示している。

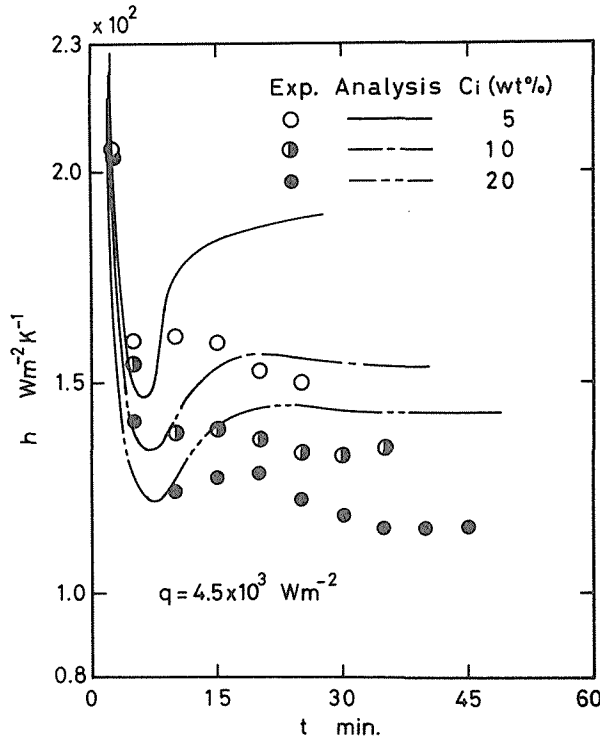


図10 平均熱伝達率に及ぼす初期水溶液濃度の影響

5. 結 言

垂直加熱壁面を有する矩形容器内における、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、実験的および解析的検討を行った結果、本研究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挙動は、成層の形成と成長を伴う。
- (2) 成層の数は、初期水溶液濃度が高くなるに従い、また熱流束が小さくなるに従い増加する。
- (3) 加熱面の平均熱伝達率は、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。
- (4) 本解析結果は、成層の形成とそれによる融解挙動および熱伝達率挙動の定性的傾向を良く表している。

参 考 文 献

- (1) 射場本忠彦：冷凍，62(1987)，714，p. 351.
- (2) Tanasawa, I. and Lior, N., ed. : Heat and Mass Transfer in Materials Processing, (1992), p. 347, Hemisphere Pub. Corp.
- (3) 遠藤正雄，星野誠：冷凍，62(1987)，715，p. 481.
- (4) Himeno, N., et al.: Int. J. Heat Mass Transfer., 31(1988), p. 359.
- (5) Huppert, H.E. and Turner, J.S.: J. Fluid Mech., 100(1980), p. 367.
- (6) Saitoh, T.: Trans. ASME, J. Heat Transf., 100(1978), p. 294.