



# HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	塩水中に置かれた水平氷円柱の融解熱伝達
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, 25-33
Issue Date	1993-10-29
Doc URL	<a href="https://hdl.handle.net/2115/42385">https://hdl.handle.net/2115/42385</a>
Type	departmental bulletin paper
File Information	166_25-34.pdf



## 塩水中に置かれた水平氷円柱の融解熱伝達

福迫尚一郎 山田 雅彦 渡辺 力

(平成5年6月28日受理)

### Melting heat transfer from a ice cylinder immersed in saline water

Shoichiro FUKUSAKO, Masahiko YAMADA, and Chikara WATANABE

(Received June 28, 1993)

#### Abstract

Experiments were performed to determine the effect of saline water concentration on the melting heat-transfer characteristics of a horizontal ice cylinder immersed in quiescent saline water. The ambient saline water concentration ranged from 0.5 to 3.5 wt% in salinity for ambient temperature ranging from 1.8 to 24.0 °C. The measurements show that the flow patterns around the ice cylinder are a strong function of the saline water concentration, which causes a considerable effect on the local heat-transfer coefficients along the ice cylinder.

#### 1. 緒 言

塩化ナトリウムや糖類等の水溶液中で氷が融解する場合などのように、溶液中において固体が液体へと相変化する場合、固体周囲の溶液中では、温度変化および物質の拡散が同時に進行するいわゆる二重拡散現象が観察される。その際、溶液の密度が温度および濃度に依存することから、固体周囲では複雑な対流場が形成され、その結果、物質および温度拡散に影響を及ぼすことが知られている。

近年、氷蓄冷システムにおいて、流動性を有する液状の蓄冷材(リキッドアイス)を使用する、いわゆるダイナミック型蓄冷システムが、蓄冷材の可搬性や熱伝達の制御性などの点から注目されている。しかし、従来より数多く用いられてきているスタティック型蓄冷装置には、蓄冷槽の容積に対する蓄冷熱量が大きいという利点がある。このスタティック型蓄冷システムの蓄冷槽内の冷却管周囲に形成された氷層の周囲に、塩化ナトリウムなどの水溶液を注入することにより、氷層どうしの連結(ブリッジ)を妨げ、さらにその濃度によって氷層周囲の流れ場を操作し、融解時すなわち採冷熱時の伝熱特性が制御できる可能性が考えられる。

従来より、静止塩水中に置かれた垂直・傾斜水平板の融解熱伝達率に関しては、実験的<sup>1-6)</sup>ならびに解析的研究<sup>7-9)</sup>がなされている。著者らはこれまでに、海水中における氷塊の融解挙動を明ら

かにする目的より、塩水中における水平氷円柱の融解挙動について、実験的検討<sup>10)</sup>を行った。また、水中における氷層の融解に関しても検討<sup>11,12)</sup>がなされている。

本研究では、氷蓄冷槽内の冷却管周囲に形成された氷層周囲の流体濃度および温度が、氷層周囲の流れ場および氷層の融解挙動に及ぼす影響に関して検討を行い、スタティック型氷蓄冷装置の採冷熱時の伝熱特性制御のための基礎的資料を得ることを目的としている。

## 記 号

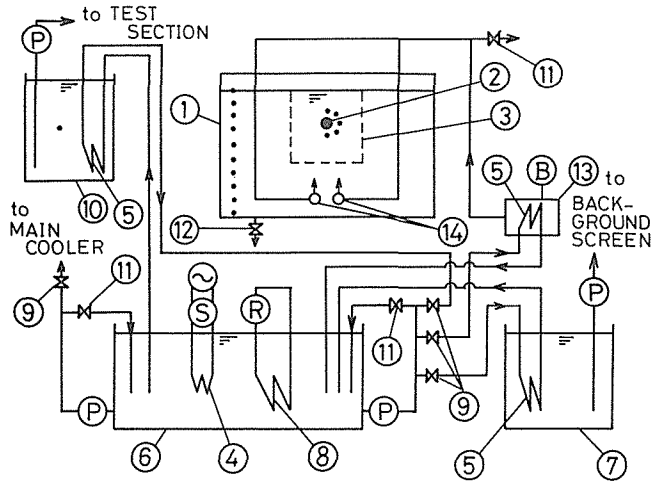
$A_\phi$ : 局所伝熱面積 $\text{m}^2$	ギリシャ文字
$a$ : 温度伝導率 $\text{m}^2/\text{s}$	$\lambda$ : 熱伝導率 $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$
$D$ : 氷円柱の直径 $\text{mm}$	$\nu$ : 動粘性係数 $\text{m}^2/\text{s}$
$(db/dt)_\phi$ : 氷円柱の法線方向融解速度 $\text{m}/\text{s}$	$\rho_i$ : 氷の密度 $\text{kg}/\text{m}^3$
$g$ : 重力加速度 $\text{m}/\text{s}^2$	$\phi$ : 氷円柱頂部よりの角度 $\text{rad}$ .
$h_m$ : 平均熱伝達率 $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$	添 字
$h_\phi$ : 局所熱伝達率 $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$	$\infty$ : 周囲流体
$L$ : 氷の融解潜熱 $\text{J}/\text{kg}$	$i$ : 氷
$n$ : (実験時間)/(写真撮影の時間間隔)	ini: 初期
$\text{Nu}_m$ : 平均ヌセルト数	o: 氷層界面
$\text{Nu}_m^*$ : 修正ヌセルト数	fp: 溶液の凝固点
$\text{Ra}$ : レーレー数	sc: 基準
$S$ : 濃度 $\text{wt}\%$	sp: 溶媒の凝固点
$T$ : 温度 $^\circ\text{C}$	
$\Delta T$ : 温度差 ( $= T_\infty - T_0$ ) $^\circ\text{C}$	
$t$ : 実験開始よりの経過時間 $\text{min}$ .	
$v$ : 流速 $\text{m}/\text{s}$	

## 2. 実験装置および実験方法

### 2.1 実験装置

実験装置の系統図を図1に示す。本実験装置は、試験部、冷却液循環系、および氷層製作装置などの周辺装置より構成されている。試験部は、厚さ15 mmの亚克力板およびペアガラスで製作された、内寸法730 mm×800 mm×200 mmの水槽および冷却円管よりなる。試験部背面は二重構造とし、可視化実験時において鮮明な流跡線像を得るため、黒色インクを流入させた。なお水槽は、写真撮影時以外周囲からの入熱を防ぐため、断熱材(厚さ100 mmのスタイロフォーム)で覆った。

冷却円管は、外径28.6 mmの銅管で、水槽中央断面の底面より450 mmの位置に水平に取り付けた。銅管表面を等温とするため、冷却管は二重構造とし、冷却液(ブライン)を内管から外管に噴射混入させ、等温壁が得られるようにした。冷却管表面温度は、上部、側部、および下部の3箇所、計9箇所に熱電対を取り付け測定した。また、氷層内温度を測定するため、熱電対( $\phi 0.1$  mm, C-A)を冷却管周囲に40本、放射状に取り付けた。さらに、周囲流体温度を測定するため、試験水槽内(銅管中心より水平方向350 mm)に、計13本の熱電対( $\phi 0.1$  mm, C-A)を設置した。



- |                     |                 |
|---------------------|-----------------|
| ① TEST SECTION      | ⑪ BYPASS VALVE  |
| ② MAIN COOLER       | ⑫ DRAIN VALVE   |
| ③ BACKGROUND SCREEN | ⑬ AIR COOLER    |
| ④ HEATER            | ⑭ AIR NOZZLE    |
| ⑤ HEAT EXCHANGER    | Ⓟ PUMP          |
| ⑥ MAIN BRINE TANK   | Ⓡ REFRIGERATOR  |
| ⑦ SUB BRINE TANK    | Ⓢ SLIDAC        |
| ⑧ EVAPORATOR        | Ⓡ BLOWER        |
| ⑨ CONTROLLING VALVE | • THERMOCOUPLES |
| ⑩ SALINE WATER TANK |                 |

図1 実験装置系統図

氷層製作装置は、ブライントーク、冷凍機、および循環用ポンプより構成される冷却液循環系と空気泡発生装置より構成される。空気泡発生装置は、気泡を含まない透明氷を製作するため、氷層を製作する際、水槽下部から空気泡を断続的に噴出させるもので、リングブローア(富士電機、VFC 204 P) およびエアノズルよりなる。

各部に取り付けた熱電対出力は、多点式ペンレコーダ(理化電機、HR 1300)に記録した。流跡線可視化装置には、光源としてHe-Neレーザー発信器(NEC、GLG 5400)を用い、シリンドリカルレンズを用いてシート状に拡げた光を試験部に照射した。

## 2.2 実験方法

水槽に純水を満たし、冷却管に冷却液を循環させ、気泡を含まない透明の氷円柱を製作する。その際、氷層内温度測定用熱電対を、5 mm間隔で氷層内に自然に埋め込ませた。氷円柱を、所定の直径( $\phi 87 \pm 2$  mm)に成長させたのち冷却を停止し、氷層内温度がほぼ0℃に到達した時点で排水し、温度および濃度を所定の値に設定した塩水(塩化ナトリウム水溶液)を流入させた。塩水の温度は、1.8~24.0℃の範囲で、また塩水の濃度は、0.5~3.5 wt%の範囲において設定した。

実験開始より融解が終了するまでの間、所定の時間間隔で、正面より氷円柱形状および流れ模様の写真撮影を行った。流れ模様の可視化光源にはHe-Neレーザーを用い、トレーサとしてアルミニウム粉末を用いた。

### 2.3 熱伝達率の算定方法

氷円柱内部が等温と見なせる場合、局所熱伝達率、平均熱伝達率は、それぞれ氷円柱界面の法線方向融解速度 $(db/dt)_\phi$ を用いて、次式より求められる。

$$h_\phi = \rho_i L / (T_\infty - T_0) \cdot (db/dt)_\phi \quad (1) \quad h_m = \sum_\phi h_\phi \cdot A_\phi / \sum_\phi A_\phi \quad (2)$$

ここで、試験水槽内各点の温度を測定した結果、周囲流体温度の時間的变化は、実験条件により異なるが、最大3%であったので、周囲流体温度 $T_\infty$ には初期周囲流体温度を用いた。

### 2.4 氷層界面温度

本研究の範囲内では氷層界面温度 $T_0$ は周囲流体温度 $T_\infty$ および周囲流体濃度 $S_\infty$ に対応して、ほぼ一定の値を示すことが観察された。図2に、周囲流体温度 $T_\infty$ および周囲流体濃度 $S_\infty$ に対する氷層界面温度 $T_0$ の変化を示してある。縦軸は、氷層界面温度 $T_0$ と塩水の平衡凝固温度 $T_{fp}$ の割合であり、横軸は、周囲流体温度と平衡凝固温度の温度差を、塩水の平衡凝固温度 $T_{fp}$ で除したものである。また、図2には参考のために、垂直水平板の場合の測定値<sup>1)</sup>を破線で示してある。図より、周囲流体温度 $T_\infty$ の上昇とともに、融解界面温度 $T_0$ が上昇していることがわかる。これは、 $T_0$ の上昇とともに融解速度が増大し氷層界面近傍における塩水濃度が低下し、その氷点が増大することによって考えられる。また、周囲流体濃度が低いほど線図の傾斜が緩やかになるのは、融解界面近傍の濃度低下率が周囲濃度が高い場合に比べ小さいためと考えられる。

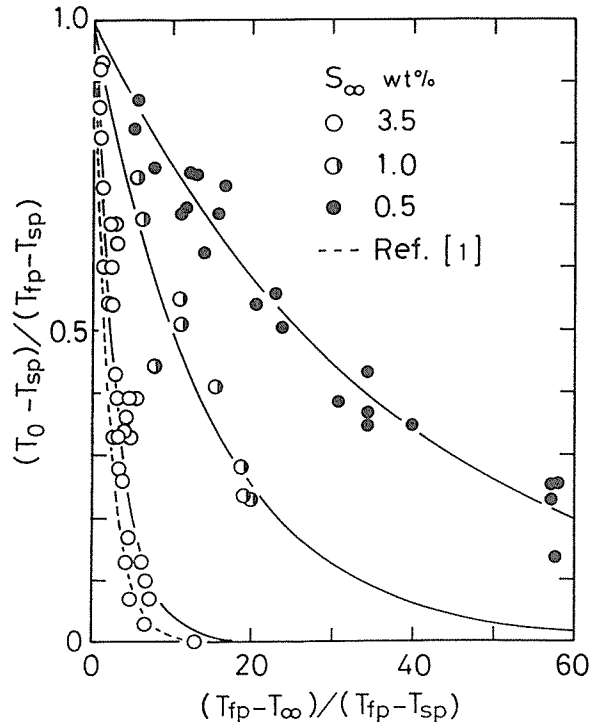


図2 氷層界面温度

## 3. 実験結果および考察

### 3.1 氷層形状および流れ模様

本研究では、氷層周囲流体の流れ場および融解氷層形状に及ぼす、周囲流体温度および周囲流体濃度の影響に関し、これらの条件を広範囲にわたり変化させて詳細な観察を行った。その結果、1) 氷層下部が鈍い角度を示す形状 (Dull Angle Bottom) となる場合、2) 氷層下部近傍で周囲流体の上下双方向の流れが形成され、上向きのステップ (Upward Step) が形成される場合、3) 下向きのステップ (Downward Step) が形成される場合の三通りが観察された。

さらに、図3に示すように、横軸に周囲流体濃度、縦軸に周囲流体温度をとり本研究における

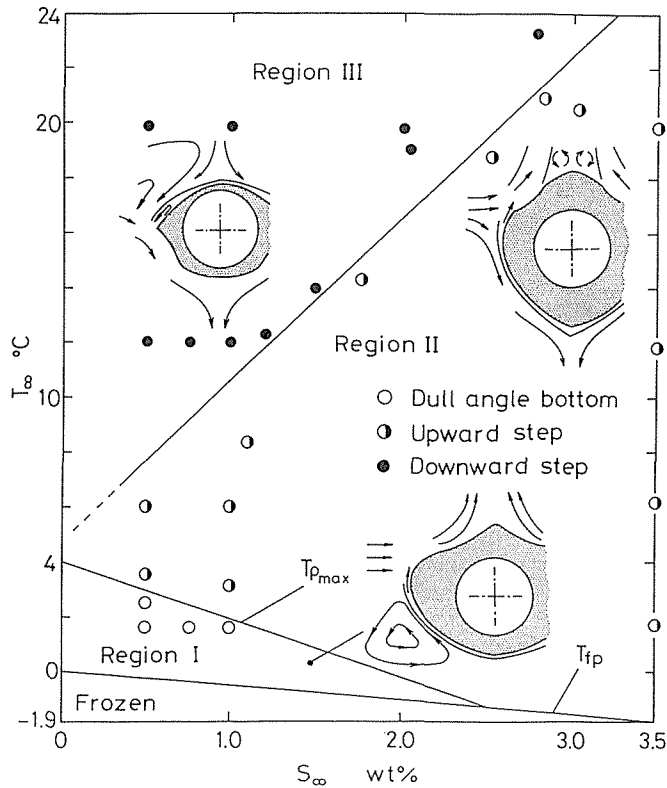


図3 温度・濃度による氷層形状の分類

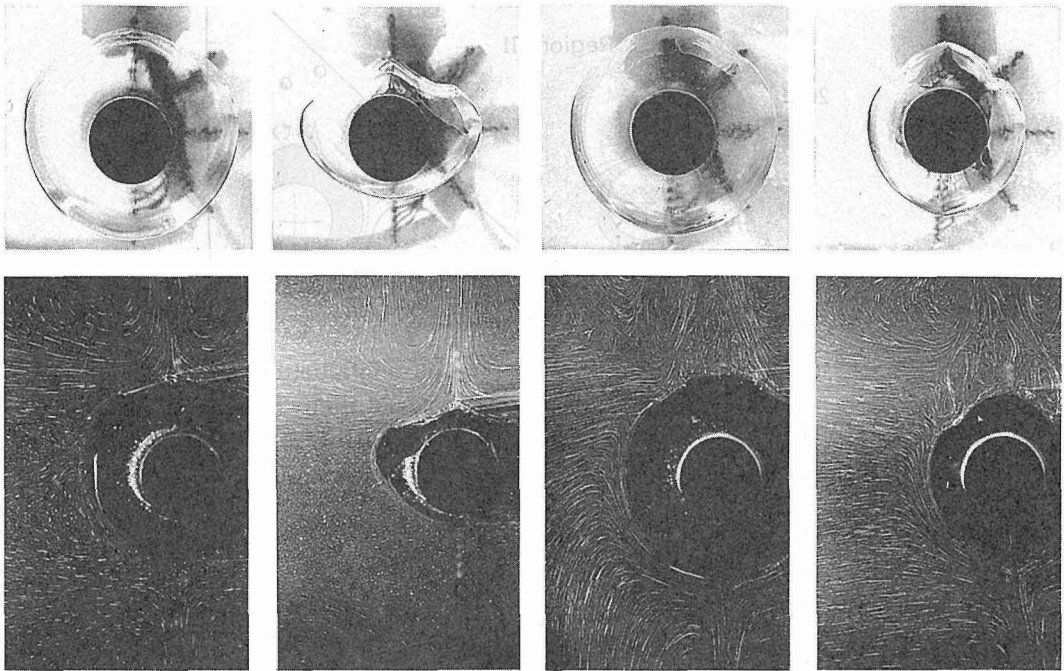
実験条件を示すと、周囲流体の流れ場および融解氷層形状の観察結果より、図3は三つの条件領域に区分できることが明かとなった。以下の考察では、上記の1) から3) の各々の結果が得られる条件領域をそれぞれ領域I～IIIと称する。

各条件領域における氷層形状および周囲流体流れ模様の時間経過をそれぞれ図4～図6に示す。図4に示す条件領域Iは、密度逆転域と一致し、この領域では氷層下部近傍で融水の上向き流れが観察された。この場合、融水とともに上方に流れる周囲流体は、氷層下部より上方に流れるに従い温度が低下する。その結果、上方に向かうほど熱伝達率が低下し局所の氷層厚さが厚くなるため、この条件領域では氷層下部が鈍い角度になるものと考えられる。

領域IIにおける条件の場合、図5に見られるように上向きのステップが形成され、氷層近傍の流れ場は氷円柱下部において、内部は低濃度の上向き流れ、外部は高濃度の下向き流れの二重流れとなる。また、氷層側部から上部の間に観られるステップは氷層近傍の上向き流れが遷移する点に形成されると考えられる。周囲流体は氷層側方より近寄り、ステップ近傍において上下に分かれている。

図5においては、二重流れの外部流体は下降するに従い温度が低下するので、時間経過とともに氷層下部先端が鋭角になるが、周囲流体濃度が高くなるに従い、十分に融解が進行した時点における氷層最下部の角度は大きくなることが観察された。これは、高濃度の場合にはステップから氷層最下部までの距離が短く、また流体の移動速度も速く、外部流体は十分冷却されずに最下部まで到達するため、氷層最下部において角度が大きくなるものと考えられる。

図6に、領域IIIの条件における氷層形状および流れ場を示す。図より、この条件の場合には、



(a) 120 min. (b) 360 min.  
[  $T_{\infty}=1.8^{\circ}\text{C}$ ,  $S_{\infty}=1.0\text{wt}\%$ , Region I ]

図4 氷層形状と流れ模様

(a) 20 min. (b) 50 min.  
[  $T_{\infty}=6.1^{\circ}\text{C}$ ,  $S_{\infty}=1.0\text{wt}\%$ , Region II ]

図5 氷層形状と流れ模様

下向きのステップが形成されるのがわかる。氷層上部は、曲率の大きな丸みを帯びた形状になっており、氷層上部よりの下向き流れが観察され、氷層側面のほぼ中間にステップがあり、下向き流れはステップ付近において剝離する。剝離点より下部では二重流れが観察されるが、氷層近傍の上向き流れは剝離点において氷層上部よりの下向き流れと衝突し、ステップ近傍の上下で渦を形成する。

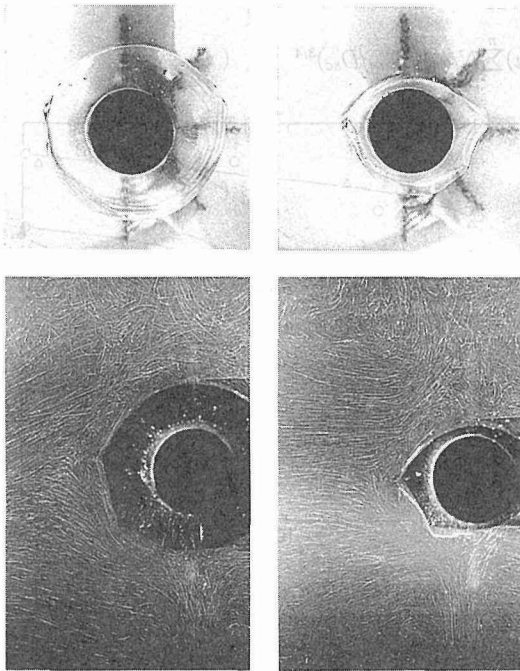
一方、時間経過とともに、剝離点の位置が下方に移っている。これは、氷層上部よりの下向き流れが剝離する、氷層頂部よりの距離が、時間経過とともに変化しないためと考えられる。また、 $t=9\text{ min.}$ においてステップ下部近傍に観察された渦は、時間経過とともに下方に移動して観察されなくなる。

### 3.2 局所熱伝達率挙動

図7に、領域Iの条件下における局所熱伝達率を示す。横軸の $\phi$ は、円柱頂部からの角度である。図よりステップが形成される位置より下部において熱伝達率が極端に低下し、氷層下部に向かって再び増加しているのがわかる。これは、前述のように氷層下部より上部に向かう流体は、上昇するに従いその温度が低下し、氷層との温度差が小さくなり融解量が減少するためと考えられる。

領域IIでは、図8に示すように、遷移点上部近傍において熱伝達率が極大となっている。また、氷層最下部において熱伝達率が極小になっているのがわかる。

図9に、領域IIIの条件下における局所熱伝達率を示す。熱伝達率は、ステップ上部近傍で最小となる傾向がある。これは、この条件領域では、氷層上部より下降する流体の温度が下降するに



(a) 9 min. (b) 18 min.  
 $[T_{\infty}=19.8^{\circ}\text{C}, S_{\infty}=1.0\text{wt}\%, \text{Region III}]$

図6 氷層形状と流れ模様

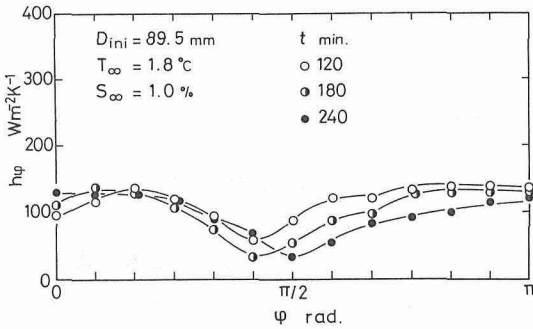


図7 局所熱伝達率 (Region I)

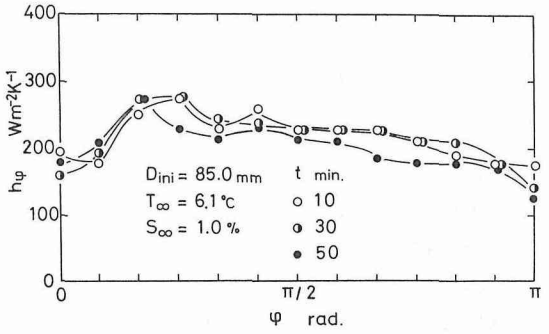


図8 局所熱伝達率 (Region II)

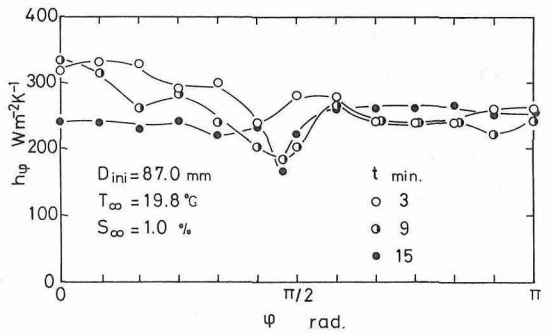


図9 局所熱伝達率 (Region III)

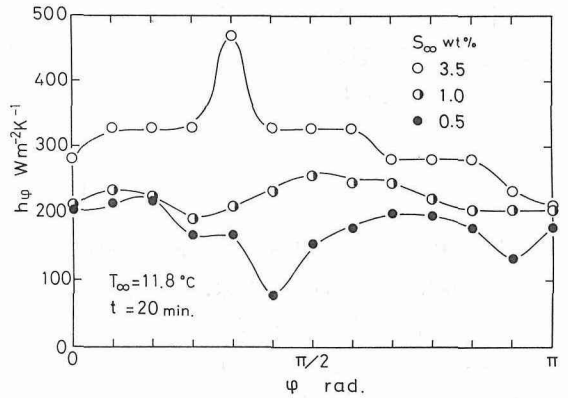


図10 局所熱伝達率

従い低下し、 $T_{\infty}$ との差が小さくなるためと考えられる。図10には、周囲流体濃度による熱伝達率の変化を示す。図より、周囲流体濃度が高いほど熱伝達率は高くなるのがわかる。これは、周囲流体と氷円柱近傍の低濃度の融水との密度差が大きいため、浮力が大きくなること、また周囲流体濃度が高くなるに従い、その氷層界面温度が低下し、周囲流体温度との差が大きくなることに基づくと考えられる。

### 3.3 平均熱伝達挙動

図11に、次式より定義される修正ヌセルト数挙動を示す。横軸は周囲流体温度と氷層界面温度

の差 $\Delta T$ である。

$$Nu_m = h_m D_{ini} / \lambda_l \quad (3)$$

$$Nu_m^* = (1/n) \sum_{i=1}^n Nu_m / (D_{ini} / D_{sc})^{3/4} \quad (4)$$

ここで、 $D_{sc}$ は100 mmとした。参考のために、図中には、純水中における氷円柱の融解過程における修正ヌセルト数挙動<sup>11,12)</sup>を示してある。

いずれの周囲流体濃度においても、高温度域において修正ヌセルト数 $Nu_m^*$ は緩やかに上昇する傾向がみられる。また、図にみられるように、 $Nu_m^*$ は、周囲流体濃度が0.5 wt%の場合には $\Delta T$ が7~9℃で、周囲流体濃度が1.0 wt%の場合には $\Delta T$ が9~11℃で、わずかながら減少するのが認められる。温度差 $\Delta T$ は、 $T_{fp}$ が $T_\infty$ に比べ非常に小さい場合、ほぼ $T_\infty$ に等しいと見なすことができ、図3で示す領域IIと領域IIIの境界の温度とほぼ一致する。これら修正ヌセルト数の減少が観られる温度は、周囲流体の密度と氷層界面近傍の流体の密度がほぼ等しくなる温度と考えられる。このため、これらの温度近傍においては、熱移動における対流の影響が小さくなるものと考えられる。さらに、純水中において氷円柱が融解する場合の修正ヌセルト数に比べ、塩水中の場合、 $Nu_m^*$ の減少の度合いが顕著でない。これは、塩水中における氷円柱の融解の場合、温度もしくは濃度のいずれかが変化すれば、周囲流体の密度と氷層界面近傍の流体の密度の平衡が崩れ、対流が生じるためと考えられる。

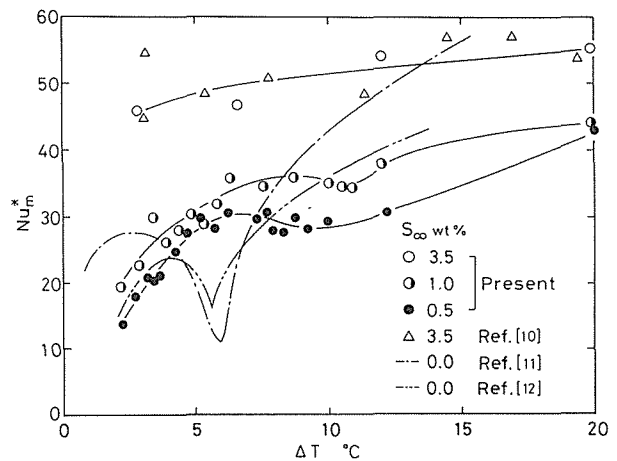


図11 修正ヌセルト数挙動

#### 4. 結 言

塩水中における水平氷円柱の融解挙動に及ぼす周囲流体濃度および周囲流体温度の影響について、実験的検討を行った結果、本実験の範囲内で以下のことが明らかになった。

- (1) 塩水中で氷円柱を融解させる場合、およそ3種類の流れ模様とそれにとまなう融解形状が観察される。また、それらの融解形状に基づき、 $T_\infty$ と $S_\infty$ の条件領域が三つの領域に区分できる。
- (2) 熱伝達率は、領域Iではステップより下部において極小値を示し、領域IIではステップ上部近傍で極大値を、また領域IIIの場合ステップ上部近傍で極小値を示す。
- (3) 修正ヌセルト数は、純水中における水平氷円柱の融解の場合と同様に、特定の温度付近において減少が認められる。また、この減少の程度は、純水中における氷円柱の融解の場合のそれと比較して小さい。

#### 参考文献

- 1) Josberger, E.G., et al.: J.Fluid Mech., 111(1981), p. 493.
- 2) Gebhart, B., et al.: J. Fluid Mech., 89(1978), p. 673.

- 3) Carey, V.P., et al.: J. Fluid Mech., 117(1982), p. 403.
- 4) Sammakia, B., et al.: Int. J. Heat Mass Transf., 27(1983), p. 1439.
- 5) Johnson, R.S., et al.: Int. J. Heat Mass Transf., 27(1984), p. 1928.
- 6) Yamada, M., et al.: Proceedings of 3rd Int.Symposium on Heat Transf., (1992), p. 505.
- 7) Mollendorf, J.C., et al.: J. Fluid Mech., 113(1981), p. 269.
- 8) Carey, V.P., et al.: J. Fluid Mech., 117(1982), p. 379.
- 9) Qureshi, Z.H., et al.: Int J. Heat Mass Transf., 29(1986), p. 1383.
- 10) 福迫尚一郎ら：日本機械学会論文集, 55-514, (1989), p. 1678.
- 11) Saitoh, T.: Appl. Sci. Res., 32(1976), p. 492.
- 12) 岸浪紘機ら：日機学会第50期全国大会講演・熱工学, (1972), p. 251.