流動水溶液による管内連続製氷に関する基礎研究*

稲葉英男^{*1}, 宮原里支^{*2}, 武谷健吾^{*3}Fundamental Study on Continuous Ice Making in a Circular Tube
by Flowing Water Solution

Hideo INABA, Satoshi MIYAHARA and Kengo TAKEYA

Fundamental study was carried out concerning the possibility of continuous slurry ice making using D-sorbitol solution flowing in cooled circular glass and stainless-steel tubes. In the present experiment, the supercooling condition of the flowing water solution was released by injecting ice nucleation material such as fine ice particles into the cooled tube. As a result, three types of operating conditions in the pipe, that is supercooling, continuous ice making and ice blockage, were classified. It was clarified that the ice making efficiency was increased with an increase in the nondimensional cooling ratio, and with decreasing of Reynolds number and the concentration of the water solution. The efficiency of continuous ice making in the cooled tube was greater by 2~5 times than that of continuous ice making outside the tube under the by supercooling condition. A nondimensional correlation equation for the ice making efficiency was derived as a function of some nondimensional parameters.

Key Words: Continuous Ice Making in Tube, Water Solution, Ice Making Efficiency, Supercooling, Ice Blockage in Tube

1. 緒論

近年,夏の冷房期における昼夜間の消費電力格差の拡大や,地球温暖化等の環境問題に直接結び付く化石燃料依存率の増大傾向などを回避するために,省エネルギーを含むエネルギー有効利用に関する技術開発が急務となっている.このようなエネルギー有効利用の方法として,安価な夜間電力を利用した氷蓄熱システムへの関心が高まっている⁽¹⁾.また,製氷方法の多様性,冷熱エネルギーの輸送性の良さ,冷熱(融解時)の高い負荷追従性能等の観点から,スラリー状氷を用いた氷蓄熱システムが注目されている.スラリー状氷の有効な生成方法としては,著者らの報告した二重管式熱交換器内を流動する水⁽²⁾あるいは水溶液⁽³⁾の過冷却状態を利用するものがある.この製氷方法は,水又は水溶液の過冷却状態を形成する冷却部(二重管部)と,管外にて過冷却状態を解放し製氷を行う製氷部とが独立しており,製氷装置も比較的簡単で,将来有望な氷蓄熱システムとなる可能性を秘めている.しかしながら,管内での過冷却状態の長期間にわたる安

定維持の困難さ,絶えず生成氷による管内閉塞の可能性,そして小さな過冷却度による低い熱効率など多くの問題点がある.本論文では,前報⁽²⁾⁽³⁾で述べた過冷却管外製氷方法を発展させ,管内冷却部において人工的に過冷却状態の解放を行い,冷却面上に析出した氷晶を主に水溶液の流れに伴うせん断力等により連続的に剥離,そして管外へ排出する新しい管内製氷方法を提案するものである.水溶液より生成される氷結晶は,一般に,水のみにより冷却面上で生成された氷が,その固体表面と強い結合力(付着力)を示すのに対して,僅かな外力により冷却面から剥離させることが可能である⁽⁴⁾.従って,氷結晶の成長を支配する壁面冷却条件と壁面材質および水溶液の管内流動状態が本研究にて提案する製氷システムにおける製氷の安定性ならびに製氷能力を左右する重要な因子となる.本論文では,管内での製氷挙動に対するこのような因子の影響を検討するとともに,従来の流動過冷却水を用いた管外製氷法との製氷効率の比較検討をも行うものである.

記号

* 原稿受付 1995年1月17日.

^{*1} 正員, 岡山大学工学部 (〒700 岡山市津島中1-1).^{*2} 学生員, 岡山大学大学院.^{*3} 正員, (株)日本製鋼所広島製作所 (〒736 広島市安芸区船越南1-6-1). C : 水溶液質量比 ($=M_s/(M_s + M_w)$) C_{mass} : 水溶液質量濃度 ($=M_s/(M_s + M_w) \times 100$) d_i : 内管内直径

- d_f, d_p : フィルタメッシュ径, 氷核粒子径
 L : 氷の潜熱量 ($=333.46 \text{ kJ/kg}$)
 l : 管長
 M_s : 溶質質量
 M_w : 水質量
 m_i : 熱量計にて採取された氷質量
 m_s : 熱量計に投入された固液混合物質量
 P_{in} : 水溶液入口圧力
 Q : 水溶液質量流量
 R : 純水の比抵抗
 Re : レイノルズ数 ($= u_m d_i / \nu$)
 T, T_{fs} : 温度, 水溶液凝固点温度
 T_w : 内管外壁温度
 T_{wm} : 内管内壁平均温度
 T_{sin} : 水溶液入口温度
 ΔT_{wm} : 管壁基準過冷却度 ($= T_{fs} - T_{wm}$)
 u_m : 管内平均流速
 t : 時間
 α : 試験流体の円管内熱伝達係数
 θ : 無次元過冷却度比 ($= (T_{fs} - T_{wm}) / (T_{sin} - T_{fs})$)
 η : 製氷効率
 ν : 試験流体の動粘性係数

2. 実験装置および方法

実験装置は、図1に示されるように、水溶液の冷却および製氷を行うための二重管式熱交換器を含む試験水溶液循環系統(図中実線)、試験水溶液冷却用ブライン(エチレングリコール40 mass% 水溶液)循環系統(図中破線)および管より排出された氷を蓄えるための集氷部②に大別される。集氷部下部に貯留している試験水溶液は、防錆処理の施されたポンプ(最大揚程 100 kPa)③により電磁流量計④、試験水溶液入口温度調節用熱交換器⑤、フローメータ⑥を経て、一定温度($T_{fs} + 0.2 \sim 0.4 \text{ K}$ の温度範囲、 T_{fs} : 試験水溶液凝固点温度)にて水溶液の冷却および製氷を行う二重管式熱交換器(並流型)①へと流入することになる。二重管式熱交換器の内管内で所定の過冷却条件に冷却された水溶液は、後述するように氷核物質を管内に投入することにより、内管冷却面上に微細な氷結晶を析出させ、そして流動する水溶液により形成した氷結晶を冷却面上から剥離後、氷と水溶液の混合状態で集氷部内の金網上に排出される。そして、金網上では生成された氷結晶のみが堆積し、残存した水溶液は製氷部下部に設けた貯留槽へと落下、再び循環する連続製氷ループを形成する。

試験水溶液はその性状を明確にする目的から、水道水内のイオン系不純物質をイオン交換器にて除去した、比抵抗 $R = 5 \times 10^6 \text{ } \Omega \text{cm}$ 程度の処理水と、この処理水に溶質として食品添加物などに広く使用されているD-ソルビトール(分子量182.17, 化学式 $\text{C}_6\text{H}_{14}\text{O}_6$)を種々の濃度($C_{mass} = 0 \sim 20 \text{ mass\%}$, C_{mass} : 水溶液質量濃度)で溶解した水溶液を使用した⁽³⁾。水溶液の凝固点温度 T_{fs} と質量濃度 C_{mass} の関係は、次のようになる。 $T_{fs} = 273.15 - 0.896C_{mass} - 2.903C_{mass}^2 + 1.113C_{mass}^3$ 。なお、これらの試験水溶液は、メッシュ径 $d_f = 1 \text{ } \mu\text{m}$ のフィルタを流路に設けて、水溶液中に $1 \text{ } \mu\text{m}$ 以上の不純物質が混入しない条件のもとで実験を行い、試験水溶液の性状の確定と安定維持に努めた。また、試験製氷部には、内管内径 $d_i = 10.5 \text{ mm}$ の電解研磨したステンレス製円管(管長さ $l = 2800 \text{ mm}$, 平均管表面粗さ $0.2 \text{ } \mu\text{m}$)と内管内径 $d_i = 10 \text{ mm}$ のガラス製円管(管長さ $l = 2800 \text{ mm}$, 平均管表面粗さ $0.01 \text{ } \mu\text{m}$)を使用した。

各部の温度測定は、素線径 0.1 mm のT型熱電対を使用し、その測定位置は図1に示される試験水溶液および冷却ブラインの二重管式熱交換器出入口部、内管の外表面温度(ブライン入口からの距離 $x = 930 \text{ mm}$ 間隔に4箇所)、試験水溶液、冷却ブラインのタンク内温度等である。なお、熱交換機出口の氷水混合水溶液の温度は、出口に設けた混合容器に受けた氷水混合水の平均温度とした。

図1 実験装置概要

また、熱交換器入口の試験水溶液温度は、氷水混合水注入部下流に設けた熱電対により、測定した。試験水の入口温度は管内ではほぼ一様であることを予備実験で確認してある。また、トラバース装置に設けた熱電対を用いることで管出口部における水溶液の温度分布の測定も同時に行った。

実験は、所定の温度、流量に調節された試験水溶液および冷却ラインを二重管式熱交換器へと流入させる。内管内を流動する水溶液が、一定の過冷却状態を形成した後、製氷部の助走区間上流 100 mm の位置から、水溶液の過冷却状態を解消する氷核物質として、微細な氷結晶を含む固液混合水溶液 (10 cm^3) をプラスチック製注射器により、ほぼ管内水溶液流速に近い速度で管内に注入する (注入時間 5 ~ 20 秒)。ここで、管内に注入される固液混合水溶液に使用する氷粒子は、予め低温室内 (-10°C) で微粒化された氷を 3 種類のメッシュ径 (0.25 mm, 0.1 mm, 0.05 mm) を有するステンレス製のふるいにかかけ、氷粒径 ($d_p = 0.05 \sim 0.1 \text{ mm}$) を調整したものである。得られた氷粒子を実験と同一の温度および濃度の水溶液中に混合し、含水率 1 ~ 2 mass% 程度のスラリー状氷水溶液を氷核物質とした。その後管内に注入された氷結晶は、水溶液の流れと共に二重管式熱交換器へと流入し、流動水溶液の過冷却状態が解放され、多くの氷結晶の成長となる。この時の内管内に発生した氷結晶の様子を側面よりビデオカメラにより撮影、同時に各温度、流量ならびに管出口より流下する固液混合水溶液の含水率 (製氷効率、測定法は後述の 3.3 節参照) をデータロガーおよび熱量計により測定、記録した。なお、本研究では、連続製氷 (内管冷却面上より氷晶が連続的に析出、剥離される状態) の時間的目安は、5 時間以上とした。従って、5 時間以上の安定な製氷が確認された条件を連続製氷条件と定義した。

3. 実験結果および考察

3.1 管内流動水溶液中での氷核物質の状態

本実験では本製氷システムの実機への応用を考え、連続製氷を行っている際に管壁温度が上昇した場合 (水溶液の凝固点温度以下の範囲) に、冷却面上において氷核物質が消滅せずに維持されるかどうかを確認するための氷核維持に関する実験をも行った。この場合の管壁温度 ($x = 2790 \text{ mm}$) の変化を図 2 に示す。図において、まず、時間 $t = 0 \text{ sec}$ において内管内に氷核を注入する。この際、内管内の冷却面上には多量の氷晶が析出し、これに伴う凝固潜熱の放出により管壁温度は急激に上昇している。その後、安定した連続製氷を行っている途中 ($t = 900 \text{ sec}$) にブラインの冷却を停止し、冷却面温度を徐々に上昇さ

せる。この過程において、壁温の上昇に伴い冷却面より析出する氷晶は微細なものとなり目視観察が困難となった。管壁温度が水溶液の凝固点温度 T_{fs} 付近まで上昇した時点 ($t = 3000 \text{ sec}$) で再びブラインの冷却を開始し、初期の温度まで徐冷する。この時、冷却面上に氷核が残存していなければ、管壁温度も氷核注入前の初期の温度となるはずであるが、冷却の進行に伴い氷晶の析出が確認され、そして、管壁温度も連続製氷時の値となった。このことから、一度連続製氷を開始した場合には、凝固点温度以下の温度であれば氷核を再注入することなしに、管内連続製氷が可能であることが明らかとなった。

3.2 種々の冷却条件および冷却管材質による製氷挙動

本研究では、試験水溶液の冷却条件および流量により、3 種類の管内製氷領域が観察された。第一に、氷核の注入に伴い析出した氷晶が、水溶液の流れにより全て冷却面から剥離、排出され、初期の過冷却状態の流れに戻る場合 (過冷却安定状態)、第二に、析出した氷結晶が消滅することなく、冷却面から連続的に生成、そして剥離し管外に排出される場合 (連続製氷領域)、第三に、冷却面より析出した氷晶が管壁より剥離せずに成長し、最終的に水溶液の流れが停止する場合 (管閉塞領域) の 3 種類の領域である。以下、これら 3 種類の管内製氷領域についての検討を行う。図 3 (a), (b), (c) はそれぞれ、試験部にガラス管を用いた場合の過冷却安定領域、連続製氷領域、管閉塞領域における内管の外壁温度 T_w および水溶液の管入口圧力 P_{in} の経時変化を示したものである。それぞれの図において過冷却状態の解放のために氷核物質を注入した時刻を $t = 0 \text{ sec}$ としてある。図 3 (a) ~ (c) において、氷核の注入後、内管の外表面温度 T_w は、管内での過冷却状態の解消による氷結晶の発生そして凝固潜熱の放出により急激に上昇する。その後、図 3 (a) ($Re = 500$, $U_m = 0.42 \text{ m/s}$, $\Delta T_{wm} = 0.3 \text{ K}$) に見られるように、内管の外表面温度 T_w は徐々に低下し、最終的には初期の温度へと戻る。このような

図 2 氷核維持実験における経時変化

小さな管壁基準過冷却度では、管内において発生した氷結晶の量が次第に減少しながら、最終的には管内から消滅したことを示している。なお、図中の x はブライン入口からの距離であり、その値から氷結晶が管中央部付近 ($x = 930 \sim 1860$ mm の間) より析出していることが理解される。また、氷結晶の析出に伴う水溶液入口圧力の大きな変化は見られない。図 3 (b) ($\Delta T_{wm} = 1.6$ K) においては、内管の外壁温度 T_w は、凝固潜熱の放出により急激に上

昇した後、比較的高い温度を維持したまま推移している。これは、内管の冷却面上から連続的に氷晶を析出しているためであり、この時の氷結晶の様子を撮影したものを図 4 (a) に示す。図 4 (a) に示されるように、内管冷却面上に析出した非常に微細な氷結晶 (およそ 0.1 mm $\sim$ 1 mm) が水溶液の流れにより剥離され、流れと共に流下する様子がわかる。内管の外壁温度 T_w の変化に注目すると、 $x = 930$ mm では実験開始 (時間 $t = 0$ sec) 直後において急激に温度上昇した後、徐々にその温度を低下させている。これは、氷結晶の生成位置が次第に下流へと移動し、その結果 $x = 930$ mm の位置を単位時間当たり通過して生成する氷結晶の量が減少したためである。その後、氷結晶の生成位置はさらに下流へと移動し、最終的には $x = 930 \sim 1860$ の間において連続的に多量の氷結晶を生成していることが理解される。さらに大きな $\Delta T_{wm} = 2.0$ K の条件における図 3 (c) では、しばらく連続製氷が継続した後、時間 $t = 500$ sec 付近において水溶液の管入口圧力 P_{in} が急激に上昇している。これは、大きな ΔT_{wm} のために、壁面近傍に多くの氷結晶が成長し、その氷結晶は、管壁との大きな付着力により剥離されず成長し、その結果水溶液の流路が縮小したためである。その後、水溶液の流量 Q は零となり管閉塞状態に至る。この時の管内の氷による閉塞の様子を図 4 (b) に示す。

次に、試験部にステンレス管を用いた場合に観察された管内の製氷挙動に関する検討を行う。二重管冷却部にステンレス管を使用した場合には、外部からの可視観察が不可能となるため、内管の外壁温度 T_w 、水溶液の管入口圧力 P_{in} 、水溶液の流量 Q 、等の変化あるいは管出口より排出される氷結晶の様子から、管内における製氷挙動を推測しなければならない。その結果、試験部にステンレス管を用いた場合にも、ガラス管同様に 3 種類の管内製氷領域が観察された。さらに、ステンレス管においては、前述の連続製氷領域 (微細な氷結晶を連続的に管外に排出する状態) に加え、氷結晶の集合した円柱状の氷塊を断続的に排出し続ける製氷挙動が観察された。この場合の内管の外壁温度 T_w および水溶液の管入口圧力 P_{in} の経時変化を図 3 (d) に、また、この際に観察された氷結晶を撮影したものを図 4 (c) に示す。図 3 (d) の水溶液の管入口圧力 P_{in} に注目すると、スパイク状にかなり激しく時間と共に変動しており、管内において氷結晶の塊が流路を遮断し、暫くしてそれが排出されている様子が伺われる。このような現象がステンレス管にのみ観察される原因としては、ステンレス管の内管の平均表面粗さが、ガラス管に比べ大きいため、比較的小さな過冷却条件でも氷結晶の生成が容易となることとステンレス管の大きな熱伝導率による管壁の熱抵抗の小ささにより、

図 3 製氷時における内管外壁温度 T_w および水溶液入口圧力 P_{in} の経時変化

水溶液中の水量の増大に伴う温度上昇に敏感に反応し、その結果としての冷熱量の増大が生成水量の増加となる。⁽²⁾ その結果、剥離した氷結晶が多く集まる管出口付近の局所的な範囲で氷塊により管閉塞状態が生じ、それに伴って、水溶液の管入口圧力が増大し、氷塊が管外に押し出されることになる。この現象は、新たな管内連続製氷方法を示唆するものである。

図5(a),(b),(c)及び図6(a),(b),(c)はそれぞれ、試験部にガラス管及びステンレス管を用いた場合の、D-ソルビトール5 mass%, 10 mass%, 20 mass% 水溶液の管内製氷挙動を、氷核注入前における水溶液の Re 数 ($= u_m d / \nu$) と壁面基準過冷却度 ΔT_{wm} ($= T_{fs} - T_{wm}$) とをパラメータに採用してプロットしたものである。ここで、 ν は、試験水溶液の動粘性係数(熱交換器出入口の混合水溶液温度の平均値

の温度基準で求められている)、 T_{fs} は凝固点温度、そして T_{wm} は前報⁽²⁾と同様に、本実験データに基づき既存の2重円管に関する熱伝達相関式⁽⁵⁾よりの総括熱伝達係数から算出される内管の伝熱面温度の平均値である。ここで、層流、乱流領域は前報⁽²⁾のように、管内水溶液流のレイノルズ数 Re を管摩擦係数 f の測定結果より判定した。本実験円管では、 $Re = 2200$ 位から遷移領域となり、 $Re = 2350$ 位より乱流域となる。遷移領域は狭いために乱流域に含めて議論する。試験部にガラス管を用いた場合には、層流域における連続製氷領域は、過冷却安定領域と管閉塞領域に挟まれた形で存在しており、その上限および下限を示す壁面基準過冷却度 ΔT_{wm} は、 Re 数の増加に伴い増大する傾向が見られる。これは、 Re 数の増加に伴い、管壁より生成した氷結晶を剥離させるための外力(流動水溶

(a) 連続製氷状態

(b) 管閉塞状態

(c) 連続製氷状態

図4 ガラス管およびステンレス管における製氷挙動

(a) $C_{mass} = 5 \text{ mass\%}$ (b) $C_{mass} = 10 \text{ mass\%}$ (c) $C_{mass} = 20 \text{ mass\%}$

図5 ガラス管における管内製氷状態

液によるせん断力)の大きさが増大し、氷結晶の剥離が容易となるためである。また、乱流域においては、管内連続製氷領域は観察されず、比較的小さな壁面基準過冷却度 ΔT_{wm} において管閉塞領域が現れている。これは、管内を流動する水溶液の乱流域における混合促進効果により、内管の伝熱面から水溶液への冷却熱流量(乱流域における熱伝達促進効果)が増大し、冷却面上にて生成した氷結晶の成長速度が大きくなり、また多数の氷結晶が成長するため、剥離され難い円管状氷が比較的短時間で内管冷却面上に形成されたことによるものである。さらに、水溶液濃度の管内製氷状態に対する影響に着目すると、水溶液濃度の低下に伴い、比較的小さな Re 数領域における連続製氷の範囲が縮小している。これは、濃度が小さくなるほど、形成されるスラリー状氷の性状が、水から生成される氷性状に近くなり、その結果、冷却面と氷

図7 トラバース装置概略図

との付着力が増大することに起因する。試験冷却円管にステンレス管を用いた場合の管内製氷状態は、ガラス管の場合に比較して小さな壁面基準過冷却度 ΔT_{wm} にて管閉塞状態が出現している。また、連続製氷領域も狭い Re 数の範囲に限られている。特に、5 mass% 水溶液においては、層流域における連続製氷領域は観察されず、前述した断続的な連続製氷現象が乱流域においてのみ観察された。これは、ステンレス管の冷却面表面粗さ、そして熱伝導率がガラス管に比べ大きいことが原因となり、前述したような理由により、冷却面上に生成した氷結晶の剥離が困難となることによるものと思われる。

以上の結果から、管内製氷に用いる試験部材質としては、熱抵抗の大きさなどを考慮した場合にはステンレス管の方が適しているが、製氷領域(初期の過冷却度)の大きさあるいは製氷状態の安定性などから判断するとガラス管の方が適していると考えられる。しかし、試験部にガラス管を用いた場合には、氷による管内閉塞が発生した場合に管破裂の危険性を考慮する必要がある。水溶液濃度に関しては、濃度の大きなものほど管内での安定な製氷領域が広いことから凝固点降下等を考慮した上で、水溶液濃度を定める必要がある。

3.3 管内製氷における製氷効率に対する検討

図8(a),(b)は、水溶液の初期 Re 数がそれぞれ $Re = 850$, 1275 における流動水溶液の内管出口位置における y 方向(重力方向)温度分布の測定値を示したものである。測定には、図7に示した温度分布測定用トラバース装置を用いた。冷却条件は両図とも初期壁面基準過冷却度 $\Delta T_{wm} \sim 1.6$ K の場合である。なお、図中には、管内製氷前(氷核注入前)の過冷却状態にある流動水溶液(図中○印)及び管内製氷過程における固液混合水溶液(図中●印)の y 方向(重力方向)に対する温度分布を示している。また、図8(b)には、固液混合水溶液の z 方向(水平方向)に対する温度分布(図中□印)も同時に示してある。低レイノルズ数 $Re = 850$ に関して、管内製氷前(氷核注入前)の温度分布(図中○印)は、管中心軸を対称軸とした放物線形状を有する発達した管内温度場を形成しており、 $y = \pm(2.5 \sim 5$ mm)の範囲において凝固点温度(T_f)以下の過冷却状

図6 ステンレス管における管内製氷状態

態を形成しているのが分かる。一方、管内製氷過程における温度分布(図中●印)は、放物線形状の温度場が崩れ、管上部の $y = 4.5 \sim 5 \text{ mm}$ の範囲ではほぼ水溶液の凝固点温度と等しく、管底部 ($y = -5 \text{ mm}$) に向かうに従って過冷却度の増大した特徴的な温度分布が観察される。このような低 Re 数での管内製氷における温度分布の変化より、管内を流下する氷結晶は、その浮力により主に管上部を流動し、管底部においては依然として過冷却度を維持した状態で流れていることが分かる。図 8 (b) に示すように $Re = 1275$ と流速が増大すると、管内で氷の発生を伴わない場合の温度分布(図中○印)は、放物線形状となり、 $y = 0$ の管中心における温度が $Re = 850$ の低 Re 数よりも若干大きくなる。一方、管内製氷を伴う場合の流動水溶液の温度は、管中心軸近傍で、水溶液の凝固点温度 T_{fs} となり、管壁 ($y = \pm 5 \text{ mm}$) に近づくに従ってその温度は降下(過冷却度の増加)することになる。この温度分布の傾向は円管内雪水二相流に関する報告⁽⁷⁾からも、管内の上流側より流下する氷結晶群が水溶液の Re 数の増加とともに流速の大きな管中心付近に集まることに起因する。なお、水溶液の z 方向(水平方向)温度分布は、およそ対称な分布形状となっている。これより、管内製氷過程において放出口より排出される固液混合水溶液が、二次元的な温度分布を形成していることが推察される。

製氷効率 η の測定は、次の手順により行った⁽²⁾⁽³⁾。まず二重管内管より排出される固液混合状態となった水溶液

を一度ビーカーに受け攪拌し、水溶液中に残存する過冷却状態を完全に解放した後、熱量計法により製氷量 m_i を測定する。製氷効率 η は、得られた氷質量 (m_i) と抽出された固液混合液量 (m_s) の比として、次式のように表される。

$$\eta = m_i / m_s \times 100(\%) \dots \dots \dots (1)$$

熱量計の測定精度は、純水の潜熱量 ($L = 333.46 \text{ kJ/kg}$) を測定した結果と比較した結果、標準偏差 $\pm 6\%$ で一致していた。なお、管外製氷の場合も、同様の方法で製氷効率を測定した。

図 9 (a),(b),(c) は、D-ソルビトール 5 mass%, 10 mass% および 20 mass% 水溶液の、管内製氷における製氷効率 η と無次元冷却温度比 $\theta (= (T_{fs} - T_{wm}) / (T_{sin} - T_{fs}))$ との関係を示したものである。ここで T_{sin} は、二重管入口における試験水溶液温度である。なお参考のために、同じ条件での管外製氷による製氷効率 η の値(図中△印)も同時に示す。まず管外製氷と管内製氷の製氷効率の比較検討を行う。ここで、管外製氷は過冷却水溶液

図 8 ガラス管内製氷における排水溶液の温度分布

図 9 ガラス管内製氷および管外製氷における製氷効率

を管外で過冷却状態を開放し、製氷する方法である。図9 (a)～(c)より、管内製氷および管外製氷の両者とも無次元冷却温度比 θ の増加に伴い製氷効率 η は増加する傾向が見られる。しかし、その増加割合、および同一の冷却温度比における製氷効率は、管外製氷に比べ管内製氷の方が高い値を示している。管内製氷による製氷効率の増大は、次のように説明される。図8(a),(b)に示す管出口部の固液混合水溶液の温度分布から、管内製氷では管内を流れる水溶液が固液混合状態にあるため、特に $y = 5, -5$ mmの冷却面近傍の温度が管外製氷における過冷却温度に比べ、凝固点温度近傍の比較的高い温度に維持される。その結果として、管内製氷の場合に内管外側の環状部を流動する冷却ラインと内管内を流動する水溶液との温度差が大きくなり、流動する水溶液への冷却熱量が増加する。この冷却熱量の増加が、管内製氷において生成する氷量を増加することになる。次に管内製氷効率に注目して、その結果を説明する。製氷効率 η は、無次元冷却温度比 θ の増加とともにほぼ単調に増加する傾向を示す。一方、 Re 数の増加に伴い η は減少する傾向が見られる。これは、図8(a)(b)の管内水溶液の温度分布からもわかるように、 Re 数の増大に伴い、管内における氷結晶の滞留時間が短くなるため、管内において水溶液の過冷却状態が十分に解放されないことと、管内氷生成量に比較して、管内への流入水溶液流量の割合が増大すること起因するものと思われる。

次に、水溶液濃度の違いによる製氷効率への影響を検討すると、同一 Re 数における製氷効率 η は水溶液濃度の増加に伴い低下する傾向にある。この傾向は、一定の管直径の場合、同一の Re 数でも水溶液濃度の大きなものほど動粘性係数の増大となり管内における水溶液の平均流速が相対的に大きくなり、氷結晶の管内滞留時間の減少と、氷結晶が生成される際に氷結晶中に含まれる溶質成分を排出しながら凍結するため、初期の水溶液濃度の大きなものほどその生成氷周囲の凝固点降下度が大きくなり、氷結晶の周囲の過冷却水溶液に対する氷核

物質としての機能を低下することによる。さらに、過冷却水溶液中での氷結晶の成長速度が高濃度水溶液ほど遅くなり、過冷却状態で管外排出される水溶液の増大も製氷効率の低下につながる。

以上のことから、D-ソルビール水溶液を用いた管内製氷の製氷効率 η は水溶液濃度、 Re 数、無次元冷却温度比 θ に影響を受けることから、以下、本実験データをもとに最小二乗法により算出した無次元整理式(2)を示す。

$$\eta = 15\theta^{0.85} Re^{-0.59} C^{-0.47} \dots\dots\dots (2)$$

図10は、無次元冷却温度比 θ と無次元変数 $\eta/Re^{-0.59}C^{-0.47}$ の関係を示したものである。なお、図中の点は本実験における実験データであり、実線は実験整理式(2)である。実験整理式(2)は、実測値の傾向を良く表し、相対誤差 $\pm 11\%$ 以内で実測値と一致する。なお、式(2)の適用範囲は $\theta = 1.2 \sim 6.0$, $Re = 500 \sim 2200$, $C = 0.05 \sim 0.20$ である。

4. 結論

二重管式熱交換器内を流動する過冷却水溶液を用いた管内連続製氷法について、水溶液濃度、流量、冷却壁面温度および管材質等の諸因子の製氷挙動などに及ぼす影響を実験的に検討し、次のような結論を得た。

- (1) 管内の過冷却水溶液の過冷却条件により、管内過冷却安定領域、管内連続製氷領域および管内閉塞領域の3領域の存在することを明らかにした。
- (2) 表面の滑らかなガラス管の方が、熱伝導率の大きなそして表面の粗いステンレス管よりも管内連続製氷領域の範囲が広いことが判明した。
- (3) 管内製氷効率が、管外製氷効率よりも大きいことが明らかとなりその原因を管内流動水溶液の温度分布より解明した。
- (4) 最終的に管内連続製氷効率に影響を及ぼす諸因子の効果を有用な無次元整理式の形で表すことができた。

参考文献

- (1) 稲葉, 混相流, 7-2(1993), 113.
- (2) 稲葉, 他2名, 機論, 58-548, B(1992), 1321.
- (3) 稲葉, 武谷, 機論, 60-578, B(1994), 3440.
- (4) 福迫, 稲葉, 機械の研究, 43-7(1991), 832.
- (5) Rohsenow, W.M., Hartnett, J.P. and Ganic, E.N., Handbook of Heat Transfer Fundamentals, (1985), 7, McGraw-Hill Book Company.
- (6) 国立天文台編, 理科年表, 62(1989), 486., 丸善株式会社.
- (7) 高橋, 他2名, 日本雪工学会誌, 7-3(1991), 18.

図10 無次元冷却温度比 θ と $\eta/(Re^{-0.59}C^{-0.47})$ の関係