

## 流動過冷却水による連続製氷に関する基礎研究\*

稲葉英男<sup>\*1</sup>, 武谷健吾<sup>\*2</sup>, 野津 滋<sup>\*1</sup>Fundamental Study on Continuous Ice Making Using  
Flowing Supercooled Water

Hideo INABA, Kengo TAKEYA and Shigeru NOZU

Basic experiments were carried out concerning the possibility of continuous ice making in supercooled water in a forced flow. In the experiments, the critical conditions of ice formation and stability of supercooled water in cooled circular tubes were examined for four kinds of tube inner diameters under various Reynolds numbers. It was understood that two ice growth modes of annular ice and dendritic ice appeared in the cooling tube according to the degree of supercooling. Nondimensional correlation equations of supercooling for ice nucleation in laminar and turbulent flow regions were derived as a function of the nondimensional ratio of thermal boundary thickness to the pipe length, which length is defined as the distance from the position where the mixing average temperature of the flowing water becomes below freezing point to the pipe downstream end.

**Key Words:** Freezing, Cold Energy Storage, Supercooling, Ice Formation, Forced Convection

## 1. 緒 論

現在提案されている製氷法は、冷却伝熱面に氷を固着して氷貯蔵をするスタティック方式と、冷却面の氷を連続的または間欠的に離脱して氷貯蔵を行うか、希薄水溶液中に液冷媒を吹き込みその蒸発熱にて微細な氷片を形成させ貯蔵するダイナミック方式とがある。スタティック方式においては、着氷量の増加とともに氷層が熱抵抗となり、全体的な熱効率の低下をもたらすことより、適当な氷厚での除氷操作を必要とする。一方液冷媒の蒸発潜熱を利用した直接接触製氷においては、冷凍サイクルに持ち込まれる水分の除去に困難さと、水溶液中への高価な冷媒の拡散が経済的な不利益を伴うものである。本研究で対象とする流動過冷却水を利用した連続製氷法は、前述の各製氷法の欠点を克服すべく考案されたもので、冷却面では氷層を形成させずに流動する過冷却水と高い熱交換性能のもとで熱交換を行わせ、冷却部以降の下流領域にて過冷却の解放により、微細な氷片の生成を継続的に行うものである。したがって、冷却面を流れる水の過冷却の安定

性と、その過冷却度（水の凍結温度と過冷却水温度との差）の大きさが、本研究で提案する製氷能力を左右する重要な因子となる。

過冷却水中での氷核の発生には、水分子の集合体である水分子クラスタが、表面張力によるエネルギー不利を克服する臨界半径（約10数Å）を超えた場合に起こる氷核の成長による均質核生成と、浮遊異質粒子や異質表面などの助けにより氷核が成長する不均質核生成によるものがある<sup>(1)</sup>。均質核生成の場合には、液滴直径  $d=1\mu\text{m}$  にて過冷却温度が約 $-40^{\circ}\text{C}$ にもなることが報告されており、水体積の増大とともに過冷却限界温度の上昇となり、例えば容積 $1\text{cm}^3$ 前後の蒸留水の過冷却温度は $-10\sim-15^{\circ}\text{C}$ の範囲にあると言われている<sup>(1)</sup>。しかしながら工学的に扱う水は、浮遊物質そして異質材質の容器などの中で拘束された状態で使用される場合が多く、不均質核生成機構により氷結晶の発生および成長が行われることになり、過冷却状態を維持できる水温もおおよそ $-10^{\circ}\text{C}$ 以上の範囲となる。このように不均質核生成の場合には、過冷却状態の安定性は水に含まれる不純物質の構造や性質、水と接する壁面の構造・性状、水の温度、温度こう配（温度揺らぎ）、冷却速度などのさまざまな因子の影響を受けるものである。文献<sup>(2)</sup>によれば、静止状態の水道水

\* 原稿受付 平成3年10月21日。

<sup>\*1</sup> 正員, 岡山大学工学部 (〒700 岡山市津島中3-1)。<sup>\*2</sup> 准員, 岡山大学自然科学研究科。

で最大過冷却温度が $-5\sim-7^{\circ}\text{C}$ 、そして湖、河川水のような不純物を多く含むもので過冷却温度が $-3\sim-5^{\circ}\text{C}$ の範囲にあるようである。

冷却速度の影響としては、静止状態では $1^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 以下の冷却速度ではほとんど過冷却状態に関与しないようである<sup>(3)</sup>。さらに斎藤ら<sup>(4)</sup>は、さまざまな金属材料、表面粗さを有する冷却面での、静止過冷却水の解消に関して確率的手法を用いた研究を行い、結果として冷却面材質の過冷却解消効果は少ないが、表面粗さの大きなものほど過冷却解消となることを報告している。また不均質核生成は、水中の浮遊不純物よりも水に接する金属冷却面から起きる確率が非常に高く、そしてこの場合の過冷却温度は、比較的高いものとなるとの研究成果もある<sup>(5)</sup>。

河川水が表面より冷却され、過冷却度の小さい状態で氷結晶が生成するところのフラジルアイスにみられるような、流動する過冷却水よりの氷結晶の生成、成長に関する研究は、比較的少ないようである。Arora-Howell<sup>(7)</sup>は、乱流領域における円管内の流動過冷却水の安定性に関する研究を行い、円管内壁面近傍の温度こう配による氷核生成モデルを提案し実測との比較検討を試みたが、モデルの不十分さ、そして実験冷却条件の不備よりモデルの妥当性を証明するまでには至っていない。六串ら<sup>(8)</sup>は、Aroraらと同様の実験を一定の冷却条件に工夫した滑らかな円管を使用して、過冷却度は管内流速および管長 $l$ と管直径 $d$ の比 $l/d$ により変化し、過冷却温度 $\Delta T < 2\text{ K}$ の条件では片板状結晶、そして $\Delta T > 2\text{ K}$ の条件では粒状結晶の生成となることを報告しているが、管内凍結にまで言及していない。Gilpin<sup>(9)</sup>は、冷えた円管内に通水した場合の流動水の凍結による管閉そく条件を、大きな過冷却度の存在より発生する樹枝状氷による瞬時の管閉そくと、小さな過冷却度において管内壁より成長する円環状氷による管閉そくの存在を明らかにしている。このように従来の研究では、流動する過冷却水の安定性および氷結晶生成に関する基本的な因子の詳細な検討はまだほとんどなされていないのが現状である。

本研究は、円管内を流動する過冷却水の安定性、生成氷による管閉そく条件および過冷却水による製氷効率に関する基礎的知見を得る目的のもとで行ったものである。前述のように過冷却現象の不安定性にもとづく過冷却水よりの不均質核生成は、さまざまな因子が複合して起こるものと思われる。したがって本研究においては、水の性状、冷却伝熱面粗さおよび冷却速度による過冷却状態に及ぼす影響を極力少なくする実験条件のもとでの、流動過冷却水の安定性などに関する

実験的検討が行われた。すなわち比較的マクロな因子である円管寸法（管直径、管長さ）、試験水の流速および温度の流動過冷却水の氷形成に及ぼす効果を、流動過冷却水による氷結晶発生、成長の可視観察結果の定性的検討および定量的データの考察より検討し、その背後に横たわる流動過冷却水の安定性に関する基礎的知見を提供するものである。

## 記 号

- $d_i, d_o$ : 二重管内円管内直径および外円管内直径
  - $l$ : 二重管円管長さ
  - $l_s$ : 流動水の混合平均温度が $0^{\circ}\text{C}$ 以下となる円管長さ
  - $C_p, L$ : 水の定圧比熱および凝固潜熱
  - $P$ : 圧力
  - $Q_w, Q_b$ : 試験水流量, 冷却ブライン流量
  - $T$ : 温度
  - $T_f, T_n$ : 凍結温度( $=0^{\circ}\text{C}$ ), 核生成温度
  - $T_{in}, T_{out}$ : 試験部入口水温および出口水温
  - $\Delta T$ : 過冷却度
  - $\Delta T_l$ : 静止水の限界過冷却度( $=6.8\text{ K}$ )
  - $W$ : 単位時間当たりに生成された氷の平均質量
  - $V$ : 平均水流速
  - $Pr$ : プラントル数
  - $Re$ : レイノルズ数  $= V \cdot d_i / \nu$
  - $\Delta\mu$ : 化学ポテンシャルの差
  - $\delta$ : 温度境界層厚さ
  - $\nu$ : 水の動粘性係数
  - $\eta, \eta_{th}$ : 製氷効率, 理論製氷効率
- 添 字
- $s$ : 過冷却水                       $w$ : 冷却壁表面
  - $in$ : 試験部入口                   $out$ : 試験部出口
  - $b$ : ブライン

## 2. 実験装置および実験方法

実験装置は、図1に示されるように過冷却発生用二重円管式熱交換器を含む試験水循環系統（図1中実線）、試験水冷却用ブライン（エチレングリコール50%水溶液）循環系統および過冷却水状態の解放による製氷部に大別される。製氷槽②下部に貯留している試験水は、防せい（錆）処理の施された遠心ポンプ④によりフィルタ⑤、流量測定用ロータメータ⑥、入口水温調節用熱交換器⑦を経て、過冷却水発生器である二重管式熱交換器へ流入することになる。過冷却状態となった試験水は、製氷容器内に設けた金網（#50メッシュ）に衝突し、衝突のエネルギーまたはあらかじめ金網上

に置かれた氷結晶により過冷却状態の解放がなされ微細な氷となり、金網上にたい積する。一方、残存した試験水は製氷槽下部に落下し再び循環し、過冷却状態の形成および製氷を伴う一連の連続製氷ループが完成し、最終的には流動可能なほとんどすべての試験水は氷結晶へと変換されることになる。試験水の性状が、過冷却度および過冷却状態の安定に大きく影響を及ぼすと考えられるので、水道水内のイオン金属系不純物を極力イオン交換器にて除去した比電気抵抗  $10^6 \Omega \cdot \text{cm}$  程度の処理水を試験水として用いている。さらに、メッシュ径  $1 \mu\text{m}$  のフィルタを試験水系統に2箇所設けて、試験水中に  $1 \mu\text{m}$  以上の不純物を混入しないように工夫し、試験水の性状の確定と安定維持に努めた。二重管式熱交換器での冷却速度、冷却温度の設定は、過冷却状態の維持に重要となることより、冷凍機制御に伴う温度変動を緩和するため第一次および二次ブラインタンクを介して、試験熱交換器入口冷却ブライン温度をほぼ一定（設定温度  $\pm 0.05^\circ\text{C}$ ）となるようにしてある。なお、二重管式熱交換器では試験水と冷却ブラインの流れ方向が同じ並流熱交換方式を採用している。

製氷容器②は、内寸法  $720 \text{ mm}$ （高さ） $\times 1300 \text{ mm}$ （長さ） $\times 720 \text{ mm}$ （幅）の厚さ  $10 \text{ mm}$  のアクリル製で、外部環境の影響を避ける目的より、全体が厚さ  $100 \text{ mm}$  のスタイロホーム断熱材で覆われている。また形成された氷結晶状態維持のために、製氷容器内にコイ

ル形の冷却管③を設けて、容器内温度を約  $0^\circ\text{C}$  に保つ構造となっている。過冷却水の発生は、ステンレス製二重円管式熱交換器の内管内の流動試験水の冷却により起こるもので、ステンレス製内管は、発達した流れとするための助走区間（長さ約  $1.5 \text{ m}$ ）、冷却試験円管部および過冷却水放出部（断熱、長さ  $0.5 \text{ m}$ ）が、図1に示すように直列に配置されている。なお実験に用いた冷却試験円管は、内直径がそれぞれ  $d_i=4.5, 10.5, 15.6 \text{ mm}$ 、管長さ  $l=3800 \text{ mm}$  および  $d_i=10.5 \text{ mm}$ 、 $l=1000 \text{ mm}$  の4種類である。またステンレス製円管内表面粗さが、氷核生成に与える影響を極力避けることを目的として、円管内表面は電解研磨したステンレス表面で最大粗さ  $R_{\text{max}}=0.2 \mu\text{m}$  の非常に滑らかな冷却面である。なお、試験水の流れ状態および管内凍結状態把握のために可視化用の二重円管式熱交換器が、ステンレス製円管の本試験とほぼ同等の長さ寸法構成にて、内管にて内直径  $d_i=15 \text{ mm}$ 、厚さ  $2 \text{ mm}$  の耐圧ガラス（パイレックスガラス）、そして外管には内直径  $d_o=50 \text{ mm}$ 、厚さ  $2 \text{ mm}$  の透明アクリル管にて製作され、内円管内の状態を目視およびビデオカメラにより側面から観察、記録される構造となっている。

各部の温度測定は、あらかじめ校正された素線径  $0.1 \text{ mm}$  の C-C 熱電対を使用し、図1に示される試験水およびブラインの二重管式熱交換器出入口温度、ステンレス内管表面近傍温度（ブライン入口より  $760 \text{ mm}$  間隔に4箇所）そして各試験水、ブライン循環系統のタンク内温度情報がデータロガーに記録された。過冷却水放出管出口の過冷却水の温度は、素線径  $0.05 \text{ mm}$  C-C 熱電対を取付たトラバース装置によ測定された過冷却噴出水の温度分布にもとづいて決定され、測定にあたっては熱電対挿入による過冷却状態解放とならないように徐々に熱電対を移動させて計測が行われた。内円管内に形成された氷結晶による流動抵抗の経時変化は、助走区間の上流に設けられた精密圧力センサ⑧により測定され、その結果は管内の凍結挙動を間接的に推測するのに用いられた。製氷容器内の金網上に生成した氷結晶は含水状態にあるので、その一部を取り出してほぼ  $0^\circ\text{C}$  に保った恒温室内の遠心分離器にかけ脱水し、その前後の質量差より含水率を求め、最終的に後述する製氷効率を算出している。熱量計法による含水率の測定結果と比較した結果より判断して、本含水率の測定精度は、 $\pm 3\%$  以内の推定される。

二重管式熱交換器に流入する試験水入口温度  $T_{\text{in}}$  は、 $0.1 \sim 0.2^\circ\text{C}$  の低温に調節され、任意の一定流量（ $Q_w=0.4 \sim 8.0 \text{ kg/min}$ ）で過冷却水維持実験が行われた。また、試験内円管表面温度  $T_w$  は、内管外表面より

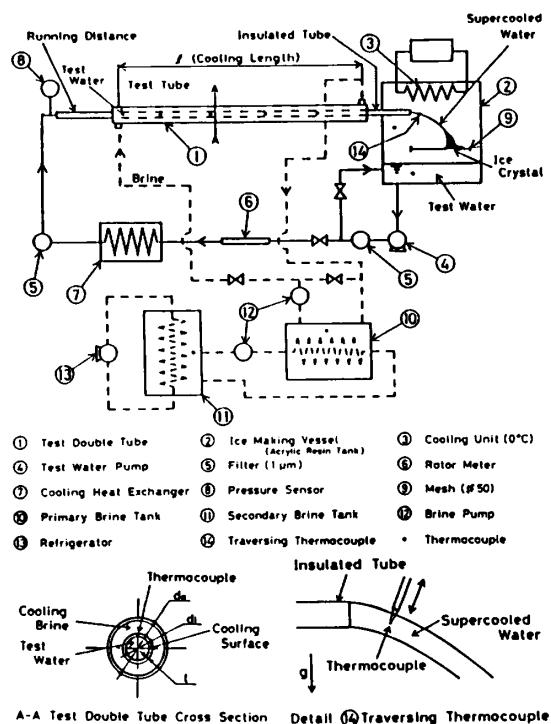


図1 実験装置概要

埋め込んだ前述の熱電対により外挿法により推定され、内円管内外の熱平衡より計算される表面温度とほぼ $\pm 3\%$ 以内で一致したことより、データ整理に使用する内管表面温度は、得られた熱平衡式より算定する方法を採用した。二重管環状部を流れるブラインは、初期温度約 $0^\circ\text{C}$ を維持した後、冷凍機からのブライン流量および冷却温度を制御し、ほぼ一定の冷却速度( $0.2^\circ\text{C}/\text{min}$ )にて試験水の徐冷を行った。ブラインによる冷却開始と同時に各測定部の温度および圧力の経時変化を記録し、管出口での氷結晶の目視観察と圧力上昇の変化より管内凍結の発生を確認し、管内凍結の発生した時点での各測定データをもって、その実験条件における上限の限界過冷却度とした。同じ試験水流量および冷却条件での実験を3, 4回繰返し実験の再現性を確認した。また、同じ実験条件でも管内で過冷却状態の安定が確認される場合とその過冷却温度以上の過冷却安定の時間的目安は4 h以上とした。すなわち、4 h以上の過冷却状態の維持が可能な場合の条件を下限の限界過冷却度とした。なお管内凍結が発生した後、繰返し実験を行う場合には、試験部全体の温度を約 $10^\circ\text{C}$ 前後に3 h以上保って、管内に氷結晶が残存しないように注意が払われた。

### 3. 実験結果およびその考察

**3.1 氷結晶の状態** 二重円管式熱交換器の過冷却放出口より噴出落下する過冷却水は、金網への衝突エネルギーまたは、あらかじめ金網上に置かれた氷片を結晶核として氷結晶の発生、成長がみられ、金網上に連続的に氷結晶のたい積が起こる。安定的に過冷却水の発生、維持そして連続的氷結晶の生成が、金網上で行われる場合の氷結晶生成状態が過冷却度 $\Delta T_s (= T_f - T_{\text{out}})$ に依存することを示したものが図2(a), (b)である。図2(a)は、 $\Delta T_s = 0.3\text{ K}$ の場合で過冷却度がそれほど大きくないことより生成された板状氷が流下する過冷却水の上流方向へ順次成長し、重力方向と逆方向へ成長する氷柱の形成となる。一方流動水としては、比較的過冷却度の大きい $\Delta T_s = 2.1\text{ K}$ の場合

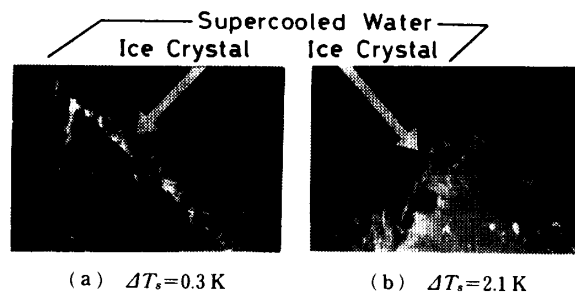


図2 管外排出過冷却水よりの氷生成状況

〔図2(b)〕には、その大きな過冷却度による急速な氷結晶の形成をよぎなくされ表面積の大きな微細な粒子状または針状結晶となり、金網上に比較的分散した形で氷結晶が存在する様子がわかる。図3(a), (b)は、図2と同様に $\Delta T_s = 0.3\text{ K}$ および $2.1\text{ K}$ の過冷却条件において生成された氷結晶の拡大写真である。過冷却度の小さい $\Delta T_s = 0.3\text{ K}$ の場合には、含水割合の小さい平板状氷結晶の成長したものであり、一方、 $\Delta T_s = 2.1\text{ K}$ の過冷却状態では、含水割合の大きな粒子結晶構造を持ついわゆるシャーベット状の水組織となる。同様な過冷却状態に依存した氷組織に関する報告が、六串ら<sup>(8)</sup>によりなされている。このような過冷却温度に関する氷結晶の成長習癖は Hallet-Mason<sup>(10)</sup> による、拡散箱内で成長する氷結晶軸の成長は過冷却度 $\Delta T_s$ に依存し、ほぼ $\Delta T_s < 2\text{ K}$ での角板状氷と $\Delta T_s > 2\text{ K}$ での針状または粒状氷となる報告とも類似した結果となることがわかる。

**3.2 管内凍結挙動** 図4(a), (b)は、壁温を基準とした過冷却温度 $\Delta T_w (= T_f - T_w)$ がそれぞれ $0.9\text{ K}$ および $2.8\text{ K}$ の条件において、管内凍結の発生後、ステンレス管( $d_i = 15.6\text{ mm}$ )出口より水ポンプ圧力(最大 $290\text{ kPa}$ )により押し出された氷の状態写真である。過冷却度の小さな図4(a)の場合において排出される氷は、密度の大きい透明な円環状氷と氷円環内部に樹枝状氷の詰まった二層構造が観察された。一方過冷却度の大きい図4(b)で示される氷の状態は、樹枝状結晶が結合した含水率の大きなシャーベット状の流動

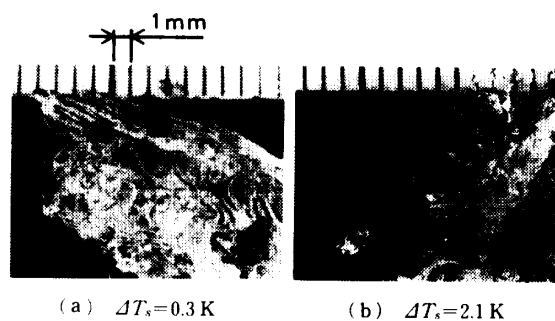


図3 過冷却度による氷結晶構造の変化

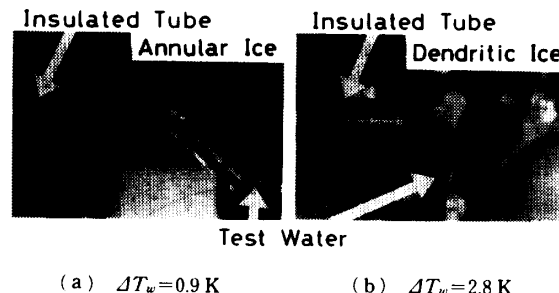


図4 管内凍結氷の排出状況

性のある氷構造を持ったものが外部へ排出されるのがわかる。管内での凍結状況をさらに詳細に観察するために、耐圧ガラス製内円管 ( $d_i=15\text{ mm}$ ) を用い、氷結晶の成長を高速度ビデオ装置に収録、結果をスケッチしたものが図5 ( $\Delta T_w=1.1\text{ K}$ ) である。可視観察の結果、氷結晶の発生は過冷却水領域の大きな試験内円管出口端に近く、かつ冷却面近傍で起こる確率が高いようである。図5で示される  $\Delta T_w=1.1\text{ K}$  の過冷却度の場合には、氷結晶発生後約  $t=0.01\text{ s}$  で樹枝状の氷晶が冷却円管内壁に沿って、円周および流れ軸方向に瞬時に広がり、続いて管半径 (中心) 方向にも発達し、流路を狭め水の流れが絞られるようになる。さらに  $t=1\text{ s}$  後には、樹枝状氷結晶の管半径方向と軸方向への発達が進み、樹枝状氷間を流れる水流速は急速に低下する。この際冷却円管内壁近傍の水は互いに結合成長し高密度の水結晶構成へと変化し、さらに徐々に高密度水の管中心への成長が起こる。この当初の樹枝状結晶の成長速度をビデオ装置映像より推算すると約  $80\text{ mm/s}$  と静止過冷却水における結晶成長速度<sup>(11)</sup> に比較するとかなり大きなものとなった。この結晶成長速度の差は、静止水よりも流動状態の過冷却水のほうが結晶界面と過冷却水間の熱伝達率が大きく、その結果凝固潜熱の放出が容易になることに起因するものと思われる。

図6は、試験内円管入口圧力、管内表面温度の経時変化および可視観察における凍結挙動の概要を示したものである。過冷却度が  $\Delta T_w=0.9\text{ K}$  と小さい場合の図6(a)においては、管内に円環状の高密度氷結晶の発達とともに管内圧力上昇となり、管内を流れる樹枝状氷の流路内での詰まり具合や押し流されたりする結果として、管内圧力がスパイク状に変化しながら最終的に氷結晶による管閉そくとなる一定圧力に達する。

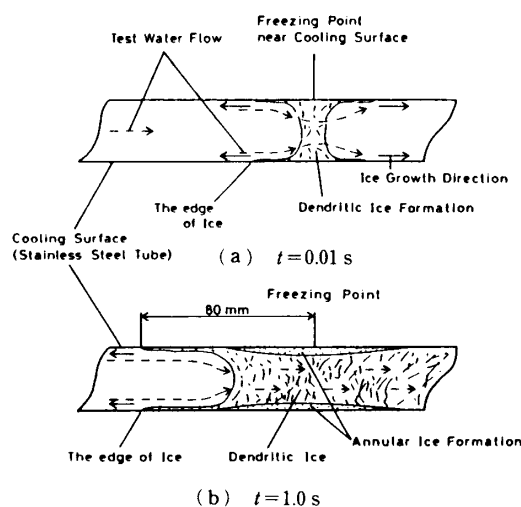


図5 管内での氷成長状況

また管内壁温度は、管内圧力の増大する場合 (水流速減少) には降下, そして管内圧力の減少する場合 (水流速増大) には, 上昇を繰返しながら全体として低下の傾向に保ちつつ, 最終的に管閉そく後比較的緩慢な温度減少となることが理解できる。一方, 過冷却度の大きな図6(b) ( $\Delta T_w=2.7\text{ K}$ ) においては, 管内圧力は凍結発生と同時に急増し, その後あまり大きな変動もなく管閉そく状態の一定圧力に落ち着くことになる。これは, 過冷却度が大きいことにより, 凍結初期に形成される樹枝状氷が多く, そして管中心まで発達するため, 瞬時に可視観察でみられる比較的流動抵抗の大きい樹枝状氷結晶充てん状態となり, 本研究で使用したポンプ圧力では, 管外へ押し出すことができないことによるものと思われる。このように流動過冷却水の管内凍結様式は, 過冷却度により大きく左右されることがわかる。

**3.3 管内凍結発生限界** 均質核生成および不均質核生成にかかわらず, 氷結晶の発生, 成長を起こさせる熱力学的な駆動力となる過冷却水相と氷結晶相との化学ポテンシャルの差 ( $\Delta\mu=L\cdot\Delta T_s/T_f$ ) と, 氷結晶核の成長を抑制する固-液界面の界面エネルギーの

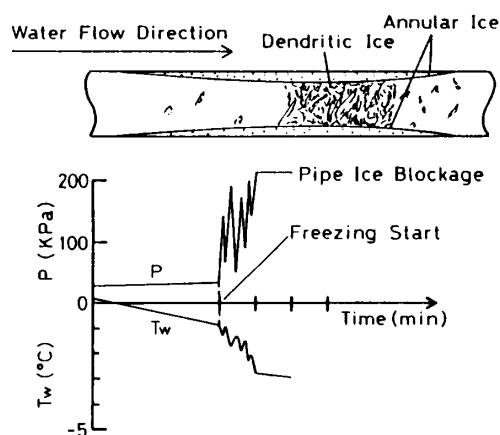
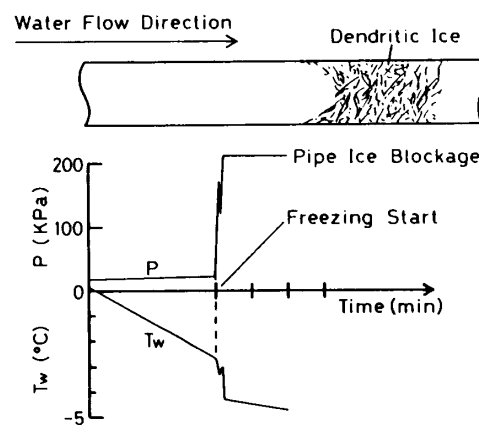
(a)  $\Delta T_w=0.9\text{ K}$ (b)  $\Delta T_w=2.8\text{ K}$ 

図6 管内水圧と管壁温度の経時変化および閉そく状況



$$\delta = 5d_i(2/f)^{0.5}/Re \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで摩擦係数  $f=0.079/Re^{1/4}$  を用いてある。層流領域においては、冷却部入口で速度分布が十分発達していると仮定し、エネルギー平衡式より管出口での境界層厚さ  $\delta$  を次式により求めた。

$$\delta = (d_i/2)[\{1/(2.72 \cdot Z^{0.347})\}^{15} + (1/0.72)^{15}]^{(-1/15)} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ただし、 $Z=2l/d_i/(Re \cdot Pr)$  である。

図9より、層流および乱流領域においても温度境界層厚さ  $\delta$  の増大とともに凍結発生過冷却度  $\Delta T_w$  も大きくなる傾向にあるが、両方の流れ領域での  $\delta$  に対する  $\Delta T_w$  の変化割合は差があるようである。 $\Delta T_w$  実測値の下限値以下は管凍結の起こらない領域（過冷却安定領域）、そして上限の  $\Delta T_w$  以上の領域では、完全に管内凍結の起こる領域である。

ここで、これまでの実験条件を基礎として、管内凍結発生限界に関する無次元整理式の誘導について考える。この種の過冷却水より氷結晶の発生、成長の大きな因子として供試水の性状を特定する必要があるため、静止状態で本実験と同じ冷却面性状を有する内径  $d_i=50$  mm、長さ 70 mm のステンレス円管内に同一試験水を種々の冷却速度（0.01~0.2°C/min）で徐冷した結果、最大過冷却度  $\Delta T_i=6.8$  K を得た。この最大過冷却度を基準として次式で示される化学的エネルギーポテンシャル  $\Delta\mu_s$  が決められた。

$$\Delta\mu_s = L \cdot \Delta T_i / T_f \quad \dots\dots\dots (3)$$

また、本実験における流動する過冷却水の化学的エネルギーポテンシャル  $\Delta\mu_w$  は、冷却壁面温度  $T_w$  を基準とした過冷却度  $\Delta T_w$  を用いて次のように定義した。

$$\Delta\mu_w = L \cdot \Delta T_w / T_f \quad \dots\dots\dots (4)$$

管半径方向の管内凍結因子には、図9で示されるように温度境界層厚さ  $\delta$  を用いた。一方、管軸方向における過冷却解消条件としては、図7のモデルに示すよう

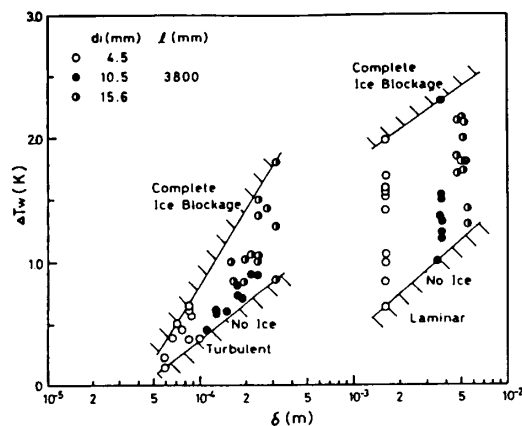


図9 過冷却度  $\Delta T_w$  と温度境界層厚さ  $\delta$  の関係

に下流に向かうにしたがって氷核となる水分子クラスターそして不純物の存在する確率も増大することより判断して、管内混合平均温度が凍結温度  $T_f$  以下となる領域の管長さ  $l_s$  を採用した。なお  $l_s$  の長さは、前述の冷却表面温度の計算に使用した関係式<sup>(12)</sup>を用いて算出している。

図10は、 $\Delta\mu_w/\Delta\mu_s$  と  $\delta/l_s$  の関係を管寸法をパラメータとしてプロットしたものである。全体的に  $\delta/l_s$  の減少とともに  $\Delta\mu_w/\Delta\mu_s$  の値は減少する傾向がみられる。これは、 $\delta$  を一定とするなら  $\delta/l_s$  の減少は  $l_s$  の増大となり、図7のモデルに示したように過冷却水が下流に向かうにしたがって氷核生成の確率が高くなり、管内凍結が小さな過冷却度で起こることを意味する。一方、 $l_s$  を一定とするならば  $\delta/l_s$  の減少は  $\delta$  の減少を意味し、前述のように壁近傍の温度こう配が大きくなり、氷核成長に伴う潜熱放出を容易にするために、小さな過冷却度 ( $\Delta\mu_w$  が小さい) で管内凍結が起こることになる。しかしながら、流動する過冷却水の安定性には、その本質からいってさまざまなミクロ的因子も含まれることより、図10に示すような実線の範囲で管内凍結の発生する無次元過冷却度が変動する結果となった。したがって最終的に提案する管内凍結発生因子である無次元過冷却度  $\Delta\mu_w/\Delta\mu_s$  は、以下に示すように定数  $C$  に幅を持たせた形で表現することにした。 $C$  の上限値以上は、管内で完全に凍結により管閉そくする領域、そしてその下限値以下は、過冷却状態の安定な領域となり、両上、下限で挟まれる領域は、管内凍結の発生する可能性のある不安定領域となる。

乱流領域 ( $Re=3\,000\sim 8\,000$ ,  $\delta/l_s=2\times 10^{-5}\sim 3\times 10^{-4}$ )

$$\Delta\mu_w/\Delta\mu_s = C \cdot (\delta/l_s)^{0.887} \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$426 \leq C \leq 1\,337$$

層流領域 ( $Re=500\sim 3\,000$ ,  $\delta/l_s=3\times 10^{-4}\sim 1\times 10^{-2}$ )

$$\Delta\mu_w/\Delta\mu_s = C \cdot (\delta/l_s)^{0.677} \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$13.4 \leq C \leq 43.0$$

なお図10中の破線は、本実験の強制対流下での実測

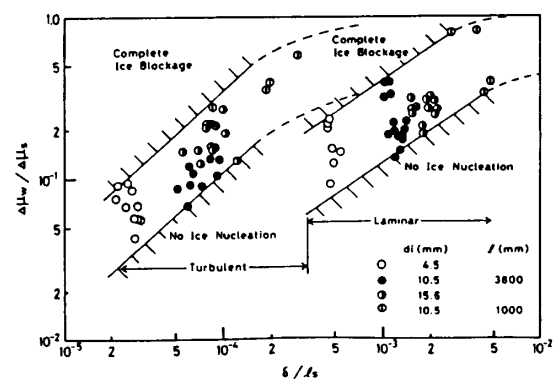
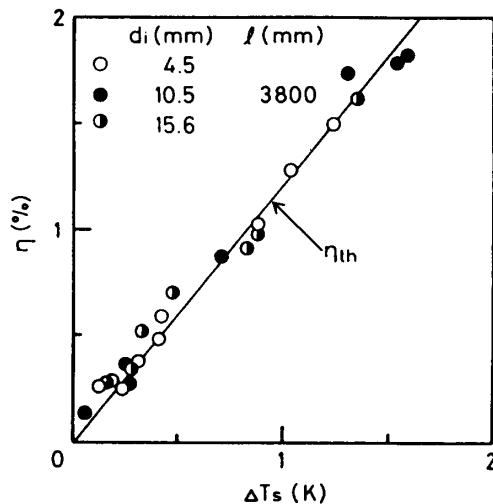


図10 管凍結閉そくと過冷却安定条件の実験データ整理

図 11 製氷効率  $\eta$  と過冷却度  $\Delta T_s$  の関係

範囲を超えた領域へ実測結果をもとにして外挿したものである。 $\delta/l_s$ の増加は、温度境界層厚さ $\delta$ の増大による自然対流領域を経て静止水状態への漸近または、 $l_s$ の減少による氷核出現確率の減少に伴う過冷却状態の静止水への移行傾向より、最終的に $\Delta\mu_w/\Delta\mu_s=1$ の静止状態の凍結状態へ変化するものと推察される。今後自然対流を含む低流速領域での過冷却安定性に関する研究がさらに必要と思われる。

**3・4 製氷効率** 管内凍結の起こらない条件のもとで、製氷容器内に流下した過冷却水は、氷結晶生成金網上で過冷却状態を解放され、含水氷結晶の生成となる。製氷効率は、この生成された水量割合および流下過冷却水温 $T_{out}$ を基準とした過冷却温度 $\Delta T_s$ より算出してある。対象とする実験データは、前述の提案された関係式(5)、(6)において、凍結発生下限值以下の領域に属するもので、かつ安定な過冷却状態が4 h以上確保されるものである。

製氷効率 $\eta$  [%]は、単位時間あたりに測定された平均氷質量 $W$  [kg/min]と過冷却水量 $Q_w$  [kg/min]の関係で次のように表される。

$$\eta = W/Q_w \times 100 \quad [\%] \quad \cdots \cdots (7)$$

また過冷却水の顕熱量と氷相変化に伴う潜熱量 $L$  (= 334 kJ/kg)の関係で定義される理論製氷効率 $\eta_{th}$ は、文献(8)を参考とすると次のように表現される。

$$\eta_{th} = \Delta T_s \cdot C_p / L \times 100 \quad [\%] \quad \cdots \cdots (8)$$

図11は、製氷量より求められた実製氷効率と $\Delta T_s$ の関係を示したもので、図11中の実線は式(8)にもとづいて求められる理論製氷効率 $\eta_{th}$ である。 $\Delta T_s$ の増大とともに $\eta$ の単調な増加がみられる。また $\eta$ の実

測値は、理論製氷効率 $\eta_{th}$ とよく一致することが理解できる。当然のことながら、過冷却度の増加が製氷効率の増大となり、過冷却度がわかれば製氷効率を式(8)より算出し製氷量を求めることが可能となる。

#### 4. 結 論

円管内を流動する過冷却水による連続製氷に関する基礎研究が、冷却円管内凍結発生限界、過冷却の安定性および製氷効率に影響を及ぼす冷却円管寸法、試験水流速および過冷却水温の効果を中心として実験的に検討され、次のことが明らかとなった。

(1) 流動する過冷却水の管内凍結様式は、過冷却度に依存して次の二つに分類されることが判明した。すなわち小さな過冷却度では、円管内壁近傍より徐々に密度の大きな円環状氷層の発達様式となり、一方大きな過冷却度の場合には、円管内に急速な樹枝状氷結晶の発達様式となる。

(2) 管内凍結の発生条件に対する試験水の流速、冷却壁温を基準とした過冷却度、管寸法の効果が定量的に明らかにされ、凍結による管閉そくおよび過冷却安定に関する無次元整理式の提案が行われた。さらに提案した無次元整理式により、過冷却状態安定領域および過冷却不安定領域の区別が可能となった。

(3) 流動過冷却水による製氷効率は、過冷却度を用いた熱的關係式(8)より導かれる製氷効率にて十分算定されることが判明した。

#### 文 献

- (1) Fletcher, N. H. (前野訳), 水の化学物理, (1974), 76, 共立出版.
- (2) Gilpin, R. R., *Trans. ASME, J. Heat Trans.*, **99** (1977), 419.
- (3) Hobbs, P. V., *Ice Phys.*, (1974), 496, Clarendon Press, Oxford.
- (4) 斎藤・ほか4名, 機論, **54-502, B** (1988), 49.
- (5) 斎藤・ほか2名, 第27回日本伝熱シンポジウム講論集, (1990-5), 22.
- (6) 稲葉・福迫, 機械の研究, **41-5** (1989), 70, 養賢堂.
- (7) Arora, A. P. S. and Howell, J. R., *Int. J. Heat Mass Transf.*, **16** (1973), 2077.
- (8) 六串・高橋, 化学工学論, **7-5** (1981), 449.
- (9) Gilpin, R. R., *Cold Regions Sci. Technol.*, **5** (1981), 163.
- (10) Hallet, J. and Mason, B. J., *Proc. Soc., London, Ser. A*, **247** (1958), 105.
- (11) 青木・ほか2名, 第16回日本伝熱シンポジウム講論集, (1979), 194.
- (12) Kay, W. M. and Pekis, H. C., *Handbook of Heat Transfer Fundamentals*, (1985), 7, McGraw-Hill Book Company.