成層をなす水平円管内流体の自然対流熱伝達*

福迫 尚一郎^{*1}, 高橋 正人^{*2}, 岡垣 理^{*3}Free Convection Heat Transfer of Air-Water Layers
in a Horizontal Cooled Circular Tube

Shioichiro FUKUSAKO, Masato TAKAHASHI, and Osamu OKAGAKI

An experimental study has been performed to investigate the influence of density inversion of water on the free convection heat transfer of air-water layers within a cooled circular tube. The experiments were carried out under the condition that the tube-wall temperature was successfully decreased at a uniform rate. A holographic interferometry technique was adopted to determine the time-dependent distributions of the temperature in the tube. It was observed that the temperature-distribution characteristics were to a great extent changed based on the cooling rate of the tube wall, along with the time-dependent sequential flow patterns. The heat-transfer characteristics along the tube wall were also extensively determined. Furthermore, it was found that there were three kinds from the water-air interface of the dendritic ice growths and also a pure ice growth along the tube wall.

Key Words: Free Convection Heat Transfer, Phase Change, Freezing, Dendritic Ice

1. 緒 言

水は0°以下の低温にさらされた場合潜熱を放出し水に相変化するが、このことは水の凍結現象として広く知られている。この現象は、製氷や食品の冷凍さらに氷蓄冷システムなど、工業的に有効に利用されているが、一方、低温熱交換器や各種工業用の流体輸送管などにおいて、凍結による性能低下や凍結破損などを引き起こし、凍害をもたらしている。

寒冷地における凍害として、水道管や下水道管の凍結破損などがよく見られる。これらは、主として使用されない深夜など、流体が静止している時に周囲の外気温度が徐々に低下していく場合に起こることが多い。これらのことから、水の凍結ならびにそれに関与する自然対流現象に関して、従来より多くの解析的ならびに実験的研究^{(1)~(6)}がなされている。例えば、Gilpin⁽²⁾⁽³⁾は、水平円管内の静水を徐々に冷却すると、水が過冷却された後、管上部から突然樹枝状氷(dendritic ice)が発生することを報告している。しかし、こ

れらの研究は管内に水が満たされている場合の凍結に関してなされたもので、工業的によく見られる、管内に空気と水が成層をなしている場合の凍結については報告がなされていないように思われる。

本研究は、管内に空気と水が成層をなす場合について、管内が凍結するに至るまでの管内流体の流動と熱伝達を、冷却速度および水位などを变化させ、ホログラフィー実時間干渉法などを用いて、実験的に検討したものである。

記 号

c_p : 比熱 kJ/kg·K

g : 重力加速度 m/s²

H : 水位 m

h_ϕ : 局所熱伝達率 $= q_\phi / (T_{H/2} - T_w)$ W/m²·K

Nu_ϕ : 局所ヌセルト数 $= h_\phi \cdot H / \lambda$

q_ϕ : 局所熱流束 W/m²

q_m : 平均熱流束 W/m²

T : 温度 °C

T_f : 水の凍結温度 = 0°C

$T_{H/2}$: 管中心線上の水側および空気側において、それぞれ水位の1/2および自由水面と管頂部間の1/2における流体の温度 °C

* 平成元年3月11日 北海道支部第30期総会講演会において講演、原稿受付 昭和63年7月11日。

^{*1} 正員、北海道大学工学部 (〒060 札幌市北区北13条西8)。

^{*2} 正員、北海道大学大学院。

^{*3} 正員、北海道工業大学 (〒063 札幌市西区前田419)。

T_w : 管壁温度 $^{\circ}\text{C}$
 t : 時間 min.
 t_c : 樹枝状氷発生時刻 min.
 V : 体積 m^3
 θ_v : 冷却速度 $^{\circ}\text{C}/\text{min.}$
 λ : 熱伝導率 $\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$
 ρ : 密度 kg/m^3
 ϕ : 管頂部より時計方向に測定した角度 deg.
 添 字
 c : 銅管壁
 t : テフロン
 ini : 初期値

2. 実験装置および実験方法

2.1 実験装置 本実験装置は、試験部および光学系より構成されている。図1に試験部の詳細図を示す。試験部は二重円管とし、内管に外径 67 mm, 内径 64 mm の銅管, 外管に外径 165 mm, 内径 155 mm の塩化ビニル管を用いている。銅管の両側面にペアガラスをはめ込み、レーザ光の透過および管内の可視化を可能にしている。また、銅管外壁には図に示すように、厚さ 1 mm の任意幅に分割したテフロンを、0.5 mm のすき間をおき、厚さ 50 μm の銅はくにより締付け接着させた。テフロンの内側および外側には、管頂部を零度とし 30 度おき(気液界面端部近傍では 15 度おき)に、銅管壁温度および水の温度測定のために $\phi 0.1$ mm クロメル・アルメル熱電対をそれぞれ取付けた。さらに、銅管壁温度が一定となるように、12 分割したテフロンの部分に、それぞれ流量を調節したブラインを噴射させた。さらに、試験部温度は、図2に示すホログラフィー実時間干渉法を用いて測定し、液体の対流の様子の観察はアルミ粉末を用いたトレーサ法によった。なお、レーザ光源には 50 mV の He-Ne ガスレーザを使用した。

2.2 実験方法 ホログラフィー実時間干渉法により、試験部温度分布を測定するため、光学的測定部の調整を行った。まず、参照波と信号波の光路差を 100 mm 以内となるよう光軸を設定し、同時に対物レンズによりレーザ光をコリメータ波とする。この時、参照波と信号波が乾板ホルダで一致するよう再び光軸を合わせる。光度比は、信号波:参照波 = 1:10 に近づくように ND フィルタで調節した。この後、試験部に純水をそれぞれ水位 $H=16, 32$, および 48 mm となるよう注入し、水温が 5°C となった後、基準となるホログラフィーを作成する。このホログラムをリキッドゲートにより露光時と同位置で現像・定着を行った。ま

た、銅管壁温度が周方向に一様となるよう、環状部に設置した 12 個のブライン噴射ノズル(図1参照)よりのブライン流量を調節した。管壁温度は時間に正比例して降下させ、管内に樹枝状氷が発生するまでこれを継続した。さらに、管内流体の対流の様子はレーザ光を光源とし、アルミ粉末をもちいたトレーサ法により観察した。

2.3 管内局所熱流束の算定方法 本研究において、管内の局所熱流束は銅管外壁に接着させた厚さ 1 mm のテフロンの内側と外側の温度差、およびテフロンと銅管の熱容量に基づき、次式より算定した。

$$q_s = \lambda \Delta T_t / \Delta r - \rho_t V_t c_{pt} \Delta T_t - \rho_c V_c c_{pc} \Delta T_c \quad (1)$$

ここで、 ΔT は Δt 時間内の平均温度差である。

さらに、試験部を構成する材料(銅管、塩化ビニル管、およびアクリル樹脂)の熱容量を考慮しながら、試験部に流入するブラインの入口と出口の温度差から総熱移動量の算定を行った。図3は、 $H=48$ mm, $T_{ini} =$

図1 試験部詳細図

図2 ホログラフィー実時間干渉法光学系

5.0°C, $\theta_v = 0.27^\circ\text{C}/\text{min.}$ において, 式(1)より算定した局所熱流束の平均値と, 試験部に流入するブラインの入口と出口の温度差から算定した熱流束の値を比較したものである。ここで, 冷却速度の設定は, 試験部に流入するブライン流量の調節, およびブライントank

内に設置した冷却用熱交換器とヒータによってブライン温度を制御しながら行った。図より, 式(1)より算定した平均熱流束の値は, ブラインの入口と出口の温度差より算出した熱流束と $\pm 5\%$ 内でよく一致していることがわかる。

3. 実験結果および考察

3.1 冷却に伴う管内温度分布および流れ挙動

図4は, 冷却速度 $\theta_v = 0.27^\circ\text{C}/\text{min.}$, 初期水温 $T_{ini} = 5.0^\circ\text{C}$ における管内温度分布(a)および流線の可視化写真(b)とそのスケッチ(c)を示している。実験開始より1分後, 管壁近傍に細かく干涉縞(a₁)が存在する。これは, 壁面に沿って発達した温度境界層と考えられる。この時, 冷却された流体は管壁に沿って降下し, 左回転の流れ(c₁)となっている。これは, 管壁近傍の水温が4°Cより高く, 水温の温度降下とともに水の密度が増加するためである。11分後, 干涉縞は気液界面端部より管内部へ広がり始める(a₂)。この

図3 管内熱流束

$H = 32\text{ mm}$, $T_{ini} = 5.0^\circ\text{C}$, $\theta_v = 0.27^\circ\text{C}/\text{min.}$, 1: $t = 1\text{ min.}$, 2: $t = 11\text{ min.}$, 3: $t = 15\text{ min.}$, 4: $t = 25\text{ min.}$
a: 温度分布, b: 流線, c: 流線スケッチ

図4 管内温度分布および流線

時、管内には初めの渦とは逆回転の渦が存在する(b_2 , c_2)。これは管内に水の密度逆転が生じ、 4°C より温度の低い水が管壁面に沿って上昇し、自由界面に近い領域で右回転の流れとなるためである。したがって、気液界面端部より管中心部方向に、対流によって低温流体が流れ込んでいることがわかる。15分後、水の密度逆転によって発生した右回転の2次流れの渦は、その後勢力を増し、逆に当初の左回転の渦は次第に消滅していく(c_3)。また、気液界面端部より広がった干渉縞はさらに管中心部へ広がっている(a_3)。このことから、管内の水は水面から過冷却されていくことがわかる。25分後、気液界面端部から広がった干渉縞は管全体に広がり(a_4)、 4°C より高い温度の水は存在しなくなり、右回転の渦のみが存在するようになる(c_4)。

3・2 管内温度分布挙動に及ぼす冷却速度の影響

図5(a)~(c)は、初期水温 $T_{ini}=5.0^\circ\text{C}$ において、冷却速度がそれぞれ $\theta_v=0.10$, 0.27 , および $3.87^\circ\text{C}/\text{min}$ の場合におけるホログラムによる温度分布挙動の時間的变化を示す。図5(a)において、冷却開始10

分後、気液界面端部より干渉縞が管中心部へ広がっている(a_2)。ここで、干渉縞は等温線を示し、気液界面端部より広がった縞は、熱の放出により水温が低下していることを表している。14分後(a_3)、干渉縞は円管の中心へと移動する。その後、管内の中心に達した縞は、管底部へ向かって広がり、37分後(a_4)に管内はほぼ均一な温度分布となることがわかる。

図5(b)は、 $\theta_v=0.27^\circ\text{C}/\text{min}$ で、図5(a)より冷却速度が大きいため、実験開始より10分経過後すでに干渉縞は管中心部に達している(b_2)。14分後、干渉縞の広がりは管底部へ向い、低温流体が管全体に広がる速度が速いことがわかる。さらに、37分後(b_4)には、水の過冷却が起こる気液界面端部より樹枝状氷(dendritic ice)が発生し、自由水面付近に分布している。

図5(c)は、さらに冷却速度が大きい場合($\theta_v=3.87^\circ\text{C}/\text{min}$)である。冷却速度が大きいため、実験開始より30秒後(c_1)、すでに管内に多くの干渉縞が広がっている。10分後、干渉縞はさらに管内に広がり、

$H=32\text{ mm}$, $T_{ini}=5.0^\circ\text{C}$, a : $\theta_v=0.10^\circ\text{C}/\text{min}$., b : $\theta_v=0.27^\circ\text{C}/\text{min}$., c : $\theta_v=3.87^\circ\text{C}/\text{min}$.
1 : $t=30''$, 2 : $t=10'$, 3 : $t=14'$, 4 : $t=37'$

図5 冷却速度による管内温度分布挙動の時間的变化

気液界面端部の干渉縞は管中心部へ広がっている。この時、管内に沿う縞も管内に広がっており、さらに管壁に沿ってすでに氷層(pure ice)が成長している(c₂)。この氷層はさらに成長を続け、37分後には管全体をほとんど覆うまでに成長している(c₄)。この場合には、管内において、樹枝状氷の発生は認められなかった。

3.3 管内局所熱流束に及ぼす冷却速度の影響

図6(a)および(b)は、 $H=32\text{ mm}$, $T_{in}=5.0^\circ\text{C}$ において、それぞれ冷却速度 $\theta_v=0.65$, および 0.10°C/min. の場合における水側(図中の記号○)および空気側(図中の記号□)の局所熱流束の時間的变化を示している。それぞれ、縦軸に局所熱流束、横軸に時間をとっている。

図6(a)に示すように、冷却速度が大きい場合($\theta_v=0.65^\circ\text{C/min.}$)、実験開始より約9分後(水の密度逆転の効果が現れ始める時間)まで、局所熱流束は急激に増加している。その後、管内に樹枝状氷が発生する約21分後まで、気液界面端部($\phi=97^\circ$)における局所熱流束の値は、わずかであるが減少した後増大しているが、あまり大きな変化は認められない。しかし、気液界面端部以外の部分($\phi=120^\circ\sim 180^\circ$)では、ゆるやかに増加していることがわかる。また、気液界面端部($\phi=97^\circ$)に比べ管底部($\phi=180^\circ$)になるに従って、局所熱流束の値が小さくなっている。なお、図には空気側の局所熱流束を示してあるが、図より明らかなように、その値は非常に小さく、またその変化もほとんど認められない。これらは冷却速度が大きいので($\theta_v=0.65^\circ\text{C/min.}$)、管壁近傍で水が急激に冷却され、水の密度

変化によって生ずる渦の勢力が時間とともに増大するためと思われる。しかし、実験開始より約9分後に水の密度逆転によって発生した2次流れが、最初に存在する渦の勢力を減少させるため、局所熱流束の増加割合が小さくなるものと考えられる。また、この2次流れは時間とともに徐々に勢力が増大するので、気液界面端部から管底部にかけて局所熱流束の増加割合がゆるやかに増加している。さらに、管底部付近の流体の流れがよどみ点に相当することから、気液界面端部に比べ管底部の局所熱流束の値が小さくなるものと思われる。

図6(b)には、冷却速度が小さい場合($\theta_v=0.10^\circ\text{C/min.}$)の局所熱流束の時間的变化を示している。図からわかるように、実験開始後局所熱流束は時間とともに増加し、約22分後に極大値をとっている。しかし、冷却速度が大きい場合[図6(a), $\theta_v=0.65^\circ\text{C/min.}$]と比べ、増加割合が小さくかつその値も小さい。また、局所熱流束は極大値に達した後、いったん減少するが気液界面端部($\phi=97^\circ$)を除きゆるやかに増加している。さらに、樹枝状氷が発生する時間は、約78分後と冷却速度が大きい場合と比べ遅くなっていることがわかる。

これらは、冷却速度が小さいため、管壁近傍の水側に生ずる温度差が小さく、水が冷却されることによって生ずる渦の勢力が小さいことによるものである。さらに、管内の水が冷却されるのに時間を要するため、2次流れの発生する時間が遅く、樹枝状氷が発生する時間も遅くなるものと考えられる。なお、空気側の局所熱流束の値は、冷却速度の減少とともにいくぶん減少するが、冷却期間を通しほとんど変化がなく、ほぼ一定値を示している。

図6 管内局所熱流束の時間的变化

3・4 局所ヌセルト数に及ぼす冷却速度の影響

本実験においては、局所熱伝達率を次のように算定した。すなわち、代表温度は水側については水位の1/2の位置（管中心線上）、空気側については、水面と管頂部の1/2の位置（管中心線上）の温度と定義し、これらの位置での温度と管壁温度との温度差で式(1)により算出した熱流束の値を除することによって算定した。さらに、水側および空気側の代表長さは、それぞれ水側は水位、空気側は水面から管頂部までの距離と定義し、物性値は水および空気側の代表温度における値を採用した。

図7(a)および(b)は、 $H=32\text{ mm}$ 、 $T_{ini}=5.0^\circ\text{C}$ において、それぞれ冷却速度 $\theta_v=0.65$ 、および 0.10°C/min. の場合における局所ヌセルト数の時間的变化を示す。それぞれ、縦軸に局所ヌセルト数、横軸に時間を

とっている。

図7(a)に示すように、冷却速度が大きい場合($\theta_v=0.65^\circ\text{C/min.}$)、実験開始後局所ヌセルト数は時間とともに急激に減少し、気液界面端部($\phi=97^\circ$)で約9分後、管底部($\phi=180^\circ$)で約11分後に極小値となっている。その後、樹枝状氷が発生する約21分後まで、局所ヌセルト数は気液界面端部($\phi=97^\circ$)で急激に増加し、管底部に近いほど増加割合がゆるやかになっている。これは3・3節で述べたように、冷却速度が大きい場合、管壁近傍の水が急激に冷却されるため、2次流れの発生が早く、最初に存在した渦の勢力を早く弱めること、また、2次流れの勢力の増加割合が大きいことによると思われる。

図7(b)には、冷却速度を $\theta_v=0.10^\circ\text{C/min.}$ と小さくした場合の結果を示している。実験開始後、局所ヌセルト数は時間とともに減少するが、冷却速度が大きい場合($\theta_v=0.65^\circ\text{C/min.}$)と比べ、減少割合が小さい

(a)

(b)

図7 管内局所ヌセルト数の時間的变化

(a)

(b)

図8 管内局所ヌセルト数の時間的变化

ことがわかる。さらに、局所ヌセルト数が極小値に達する時間は、2次流れの発生する時間が遅くなるため約20～32分後となり、樹枝状水が発生する時間も約78分後と遅くなっている。局所ヌセルト数は、極小値をとった後、管底部($\phi=180^\circ$)から気液界面端部($\phi=97^\circ$)に向かって増加割合が大きくなるが、その増加割合は冷却速度が大きい場合($\theta_v=0.65^\circ\text{C}/\text{min.}$)と比べ小さい。また、樹枝状水発生直前の気液界面端部($\phi=97^\circ$)と管底部($\phi=180^\circ$)の局所ヌセルト数の値の差が、冷却速度が大きいほど大きくなることからわかる。これは、冷却速度が小さいため、管内の水が徐々に冷却され、過冷却された水が管全体に広がって後、樹枝状水が発生することによるためと考えられる。空気側の局所ヌセルト数は、冷却速度の減少とともに幾分増加するがその割合はほとんど変化なく、ほぼ一定値となることがわかる。

3・5 管内局所ヌセルト数に及ぼす水位の影響

図8(a)および(b)は、 $T_{in}=5.0^\circ\text{C}$ および $\theta_v=0.10^\circ\text{C}/\text{min.}$ の条件で、それぞれ水位 $H=48$ および16mmの場合における局所ヌセルト数の時間的变化を示している。

図8(a)の $H=48$ mmの場合、局所ヌセルト数が

極小値となる時間は $H=32$ mm[図7(b)]の場合と比較して、大きな差はないが約19～35分後といくぶん遅くなる傾向がみられる[図7(b):約20～32分]。また、樹枝状水が発生する時間も $H=32$ mm[図7(b)]の場合と比べ遅くなっている[図7(b):約78分後、図8(a):約103分後]。さらに、樹枝状水が発生する直前の気液界面端部($\phi=97^\circ$)と管底部($\phi=180^\circ$)の局所ヌセルト数の差は、水位の増加とともに大きくなっている。これは、水位が増加すると管内水量が増加するため、管内の水が冷却されるまでに時間を要すること、また、自由水面と管底部の水の温度差が大きくなるためと思われる。

図8(b)は、水位を $H=16$ mmと低くした場合である。図より、 $H=48$ および32mmの場合と同様に、2次流れの発生に伴い、最初に存在する管壁に沿って下降する流れの勢力が減少していくために、局所ヌセルト数は減少し極小値をとるが、 $H=48$ および32mmの場合と比べ約20～30分後とわずかに早く[図8(a), $H=48$ mm:約19～35分後、図7(b), $H=32$ mm:約20～32分後]、減少の割合もゆるやかである。また、局所ヌセルト数が極小値となった後再び増加するが、その時間に対する増加割合は $H=48$ およ

$T_{in}=5.0^\circ\text{C}$, $\theta_v=0.27^\circ\text{C}/\text{min.}$, 1: $t=37'56''04$, 2: $t=37'56''54$, 3: $t=37'57''09$, 4: $t=37'58''12$

図9 樹枝状水の成長挙動

$H=32$ mm, $T_{in}=5.0^\circ\text{C}$, (a): $\theta_v=0.10^\circ\text{C}/\text{min.}$, (b): $\theta_v=0.80^\circ\text{C}/\text{min.}$, (c): $\theta_v=2.00^\circ\text{C}/\text{min.}$

図10 樹枝状水の性状

図 11 樹枝状氷の性状分布

び 32 mm の場合と比べゆるやかである。これは、水位が低いため、自由水面で水面中心部より管壁側の流体温度が低い(図 4 a₃参照)ために生ずる管壁方向に作用する表面張力が、管壁側から自由水面の中心へ向かって流れる 2 次流れの流動を妨げることに by と思われる。さらに、樹枝状氷が発生する時間は約 69 分後と、 $H=48$ および 32 mm の場合と比べ早く[図 8 (a), $H=48$ mm: 約 103 分後, 図 7 (b) $H=32$ mm: 約 78 分後], 樹枝状氷が発生する直前の気液界面端部と管底部の局所ヌセルト数の差が小さいことがわかる。これは、管内の過冷却に関して、表面張力の影響を受けるが、水位が低く水量が少ないので、水が十分過冷却されるためと考えられる。

また、図 8 (a) および図 8 (b) において、空気側の局所ヌセルト数は、水位の上昇とともに多少減少するが、その減少量は小さい。

3.6 管内樹枝状氷の発生と性状分布 図 9 は、管内初期温度 $T_{ini}=5.0^{\circ}\text{C}$, $H=32$ mm, および $\theta_0=0.27^{\circ}\text{C/min}$ の場合における樹枝状氷の成長挙動を示している。実験開始より 37 分 56 秒 04 後、気液界面端部より樹枝状氷が発生する。37 分 57 秒 09 後、気液界面端部より発生した樹枝状氷は管中心部に達し、その後さらに樹枝状氷は管底部へ向かって成長する。また、37 分 58 秒 12 後には図に示すように、樹枝状氷が自由水面から厚く広がっている。

この樹枝状氷は、管内の水が過冷却状態($-4\sim-8^{\circ}\text{C}$ 程度)になった後、急激に発生することが観察された。また、この過冷却状態は管内に樹枝状氷が発生すると同時に解消されて水温が上昇し、管内水温は瞬時に 0°C となった。これは、氷の発生時に潜熱が放出されるためである。さらに、この樹枝状氷は冷却速度に

よって管内に発生する分布状態が異なる。

図 10 には、 $H=32$ mm, $T_{ini}=5.0^{\circ}\text{C}$ において、冷却速度をそれぞれ $\theta_0=0.10$, 0.08 , および 2.00°C/min と変化させた場合の樹枝状氷の特性を示してある。冷却速度が小さい($\theta_0=0.10^{\circ}\text{C/min}$) 場合、氷は水面下全体に広がり、ほとんど瞬時(約 1~2 秒程度)に管全体に広がる。 $\theta_0=0.80^{\circ}\text{C/min}$ の場合には、水面にシャーベット状の氷が発生し、さらに水面付近から管底部に向かって樹枝状氷が成長している。さらに、冷却速度が大きい場合($\theta_0=2.00^{\circ}\text{C/min}$)、気液界面端部から発生した樹枝状氷は、水面全体にまで広がらないことがわかる。

図 11 は、気液界面端部から発生する樹枝状氷の性状の分類を示したものである。縦軸に実験開始から樹枝状氷が発生するまでの時間 t_c , 横軸に冷却速度 θ_0 をとっている。図において、各領域(A), (B), および(C)は、それぞれ図 10 の(a), (b), および(c)で示した性状を呈する樹枝状氷が発生する場合の領域を示している。また、(D)領域では樹枝状氷が発生せず、水面下の管壁に沿って氷層(pure ice)が発生する場合[図 5 (c)参照]を示している。

図より、樹枝状氷が発生するまでの時間は、水位の変化によりさほど大きな影響を受けないが、樹枝状氷の発生する分布状態は冷却速度によって変化することがわかる。

4. 結 言

気相と液相が成層をなす水平円管内流体(管径 64 mm, 初期水温 5.0°C) が冷却される場合の自然対流熱伝達に関する実験を行った結果、本実験範囲内で以下のことが明らかになった。

(1) 管壁面冷却開始後、冷却された水は壁面に沿って下降する対流を発生させる。その後、水の密度逆転によって対流は壁面に沿う上昇流に変化する。このため、気液界面端部の水が最も過冷却され、対流によって次第に管底部に過冷却された水が流れ込む。

(2) 局所熱流束は、冷却速度が大なるほど、極大値に達するまでの単位時間当たりの増加量が大きく、かつ極大値も大きくなる。また、空気側の局所熱流束の値は、冷却速度が増加するといくぶん増加するが、その割合は非常に小さく、ほぼ一定である。

(3) 冷却速度が大なるほど、局所ヌセルト数が極小値をとる時間、および樹枝状氷が発生する時間が早くなる。さらに、樹枝状氷発生直前の気液界面端部と管底部のヌセルト数の差が大きくなる。

(4) 空気側の局所ヌセルト数は、冷却速度の減少

とともに、また、水位の減少とともにいくぶん増加するが、その割合は極めて小さい。

(5) 円管内流体の気液界面端部より成長する樹枝状氷の分布状態は、冷却速度によって変化し、3種類の氷性状を示す領域と樹枝状氷が発生しない領域に区分される。

最後に、実験に協力された和田靖君、山下信博君に心より感謝する。

文 献

- (1) 福迫・ほか2名, 第23回日本伝熱シンポジウム講演論文集, (1986-5), 379.
- (2) Gilpin, R. R., *Int. J. Heat Mass Transfer*, **20**(1977), 693.
- (3) Gilpin, R. R., *Trans. ASME, J. Heat Transfer*, **99**(1977), 419.
- (4) 柏木・ほか3名, 機論, **53**-490, B (1987), 1822.
- (5) Cheng, K. C., ほか1名, *Trans. ASME, J. Heat Transfer*, **98**(1976), 581.
- (6) Gilpin, R. R., *Int. J. Heat Mass Transfer*, **18**(1975), 1307.