



Title	成層をなす円管内流体の自然対流熱伝達
Author(s)	福迫, 尚一郎; Fukusako, Shoichiro; 高橋, 正人 他
Citation	北海道大學工学部研究報告, 146, 21-32
Issue Date	1989-05-31
Doc URL	<a href="https://hdl.handle.net/2115/42187">https://hdl.handle.net/2115/42187</a>
Type	departmental bulletin paper
File Information	146_21-32.pdf



## 成層をなす円管内流体の自然対流熱伝達

福迫尚一郎 高橋 正人  
(昭和 63 年 12 月 20 日受理)

### Free Convection Heat Transfer of Air-Water Layers in a Cooled Circular Tube

Shoichiro FUKUSAKO and Masato TAKAHASHI  
(Received December 20, 1988)

#### Abstract

An experimental study was performed to investigate the influence of density inversion of water in a 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 changed to a great extent by the cooling rate of the tube wall along with the time-dependent sequential flow pattern. The heat-transfer behavior along the tube wall was also extensively determined. Furthermore, it was found that there were three peculiar dendritic ice formations within the water layer of the horizontal tube based on the cooling rate.

#### 1. 緒 言

寒冷地で使用される低温熱交換器や各種工業用の流体輸送管は、 $0^{\circ}\text{C}$ 以下の環境にさらされるため、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すことが多い。たとえば、日常よく見られる凍害として、水道管や下水道管の凍結破損などがある。これらは主として使用されない深夜など、管内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。

このような凍害を防除するためには、まず管内の熱伝達について詳細に検討する必要がある。このため、水の凍結ならびにそれに関与する自然対流現象について、従来より多くの解析的ならびに実験的研究<sup>1)~7)</sup>がなされている。たとえば、Gilpin<sup>3),4)</sup>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十分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、管内に気相と液相が成層をなしている場合の凍結については報告が少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して存在する場合、管内が凍結に至るまでの管内流体の流動と局所の熱伝達に及ぼす冷却速度および水位などの効果について、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  $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$   
 $g$  : 重力加速度  $\text{m}/\text{s}^2$   
 $H$  : 水位  $\text{m}$   
 $h_\phi$  : 局所熱伝達率  $= q_\phi / (T_{H/2} - T_w)$   $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$   
 $N_{u\phi}$  : 局所ヌセルト数  $= h_\phi \cdot H / \lambda$   
 $q_\phi$  : 局所熱流束  $\text{W}/\text{m}^2$   
 $T$  : 温度  $^\circ\text{C}$   
 $T_f$  : 水の凍結温度 ( $= 0^\circ\text{C}$ )  
 $T_{H/2}$  : 水側 ; 水位の 1/2 の温度, 空気側 ; 自由水面と管頂部間の 1/2 における流体の温度  $^\circ\text{C}$   
 $T_w$  : 管壁温度  $^\circ\text{C}$   
 $t$  : 時間  $\text{min.}$   
 $t_c$  : 樹枝状氷発生時刻  $\text{min.}$   
 $V$  : 体積  $\text{m}^3$   
 $\theta_v$  : 冷却速度  $^\circ\text{C}/\text{min.}$   
 $\lambda$  : 熱伝導率  $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$   
 $\rho$  : 密度  $\text{kg}/\text{m}^3$   
 $\phi$  : 管頂部より時計方向に測定した角度  $\text{deg.}$

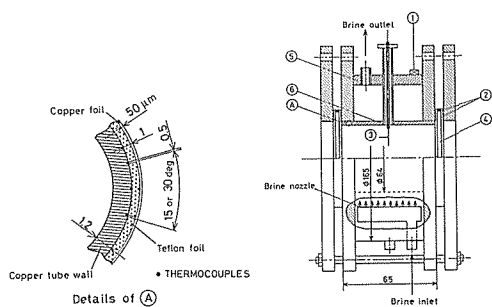
## 添 字

- $c$  : 銅管壁  
 $t$  : テフロン  
 $ini$  : 初期値

## 2. 実験装置および実験方法

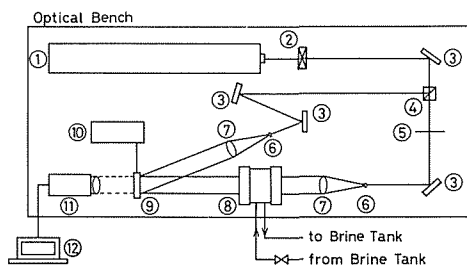
### 2.1 実験装置

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、レーザー光の透過および管内の可視化を可能にしている。また、図に示すように銅管外壁には、厚さ 1 mm の任意幅に分割したテフロンを、0.5 mm の隙間をおき、厚さ 50  $\mu\text{m}$  の銅箔により締め付け接着させた。テフロンの内側および外側には、管頂部を 0 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 のクロメル・アルメル熱電対をそれぞれ取り付けた。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、それぞれ流量を独立に調節したブラインを噴射させた。さらに、試験部温度分布は、図 2 に示すホログラフィー



- ① DRAIN
- ② PACKINGS
- ③ THERMOCOUPLES
- ④ PAIR GLASS
- ⑤ VINYL TUBE
- ⑥ COPPER TUBE

図1 実験装置詳細図



- ① He-Ne GAS LASER
- ② SHUTTER
- ③ MIRROR
- ④ BEAM SPLITTER
- ⑤ ND FILTER
- ⑥ OBJECT LENS
- ⑦ COLLIMATOR LENS
- ⑧ TEST SECTION
- ⑨ LIQUID GATE
- ⑩ FLOAT TANK
- ⑪ TV CAMERA
- ⑫ CALCULATOR

図2 ホログラフィー実時間干渉法光学系

実時間干渉法を用いて測定し、流体の対流の様子の観察はアルミ粉末を用いるトレーサー法によった。なお、レーザー光源には 500 mV の He-Ne ガスレーザーを使用した。

## 2. 2 実験方法

ホログラフィー実時間干渉法により、管内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ー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ー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 フィルターで調節した。この後、試験部に純水を所定の水位まで注入した。基準となるホログラフィーは、水温が 5℃ となった時作成する。このホログラムはリキッドゲートにより露出時と同位置で現像・定着を行った。また、銅管壁温度が周方向に一樣となるよう、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。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、およびブラインタンク内に設置した冷却用熱交換器とヒーターによってブライン温度を制御しながら行った。さらに、管内流体の様子はレーザー光を光源とし、アルミ粉末を用いたトレーサー法により観察した。

## 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。

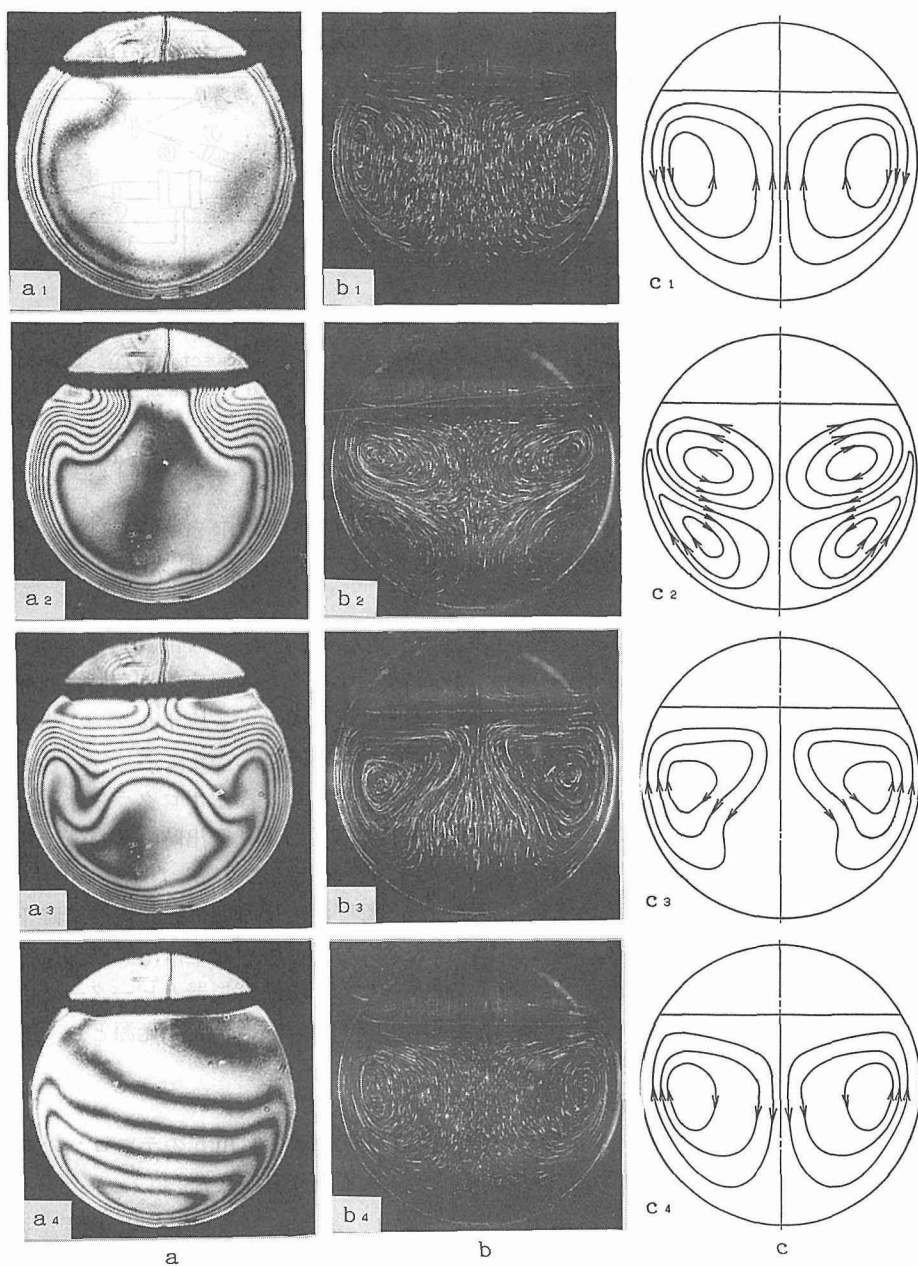
$$q_{\varphi} = \lambda_t \cdot \Delta T_t / \Delta r - \rho_t \cdot V_t \cdot C_{pt} \cdot \Delta T_t - \rho_c \cdot V_c \cdot C_{pc} \cdot \Delta T_c \quad (1)$$

ここで、 $\Delta T$  は  $\Delta t$  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移動熱量の算定を行った。この値より算定した熱流束の値は、テフロンを用いて (1) 式により算定した局所熱流束の平均値と  $\pm 5\%$  以内で一致した。

## 3. 実験結果および考察

### 3. 1 管内温度分布および流線の可視化

図 3 は、冷却速度  $\theta_c = 0.27^\circ\text{C}/\text{min.}$ 、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



$H=48 \text{ mm}$ ,  $T_{\text{ini}}=5.0^\circ\text{C}$ ,  $\theta_v=0.27^\circ\text{C}/\text{min.}$ ,  
 1 :  $t=1 \text{ min.}$ , 2 :  $t=12 \text{ min.}$ , 3 :  $t=30 \text{ min.}$ , 4 :  $t=46 \text{ min.}$   
 a : 温度分布, b : 流線, c : 流線スケッチ

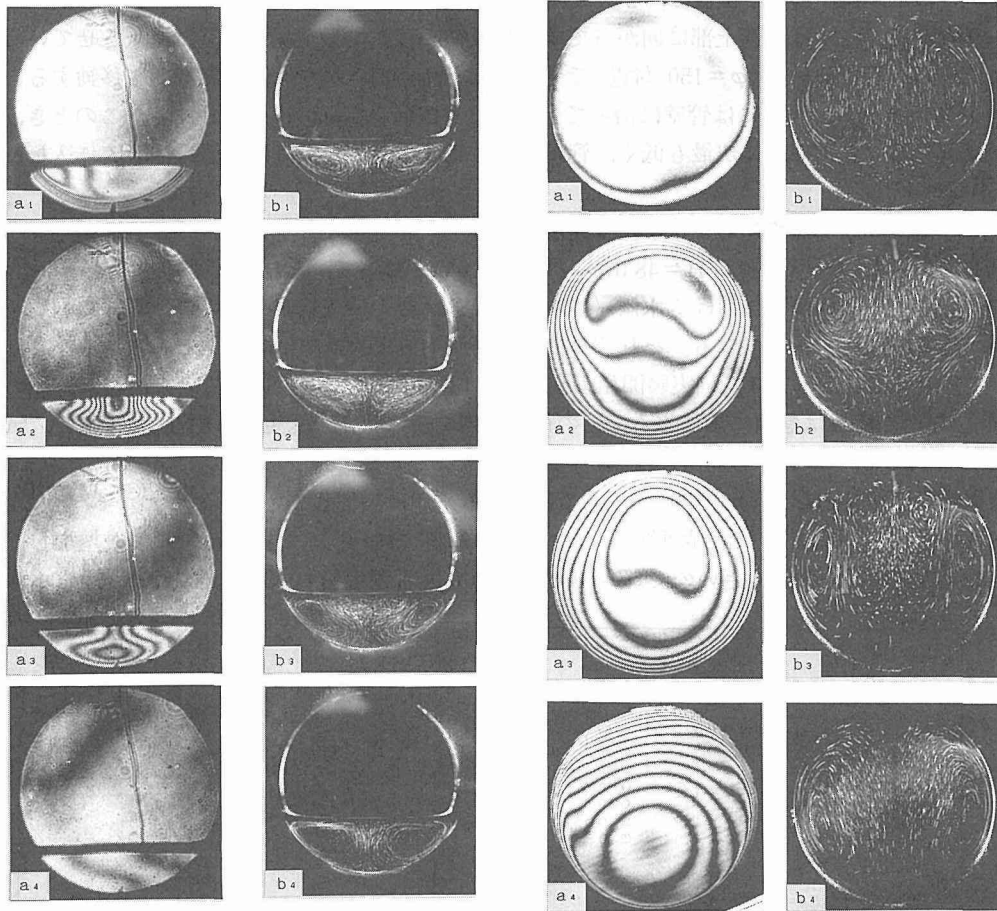
図3 管内温度分布および流線

流線の可視化写真 (b) とそのスケッチ (c) を示している。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示している。実験開始より1分後、管壁近傍に細かい干渉縞(a<sub>1</sub>)が存在する。これは、管壁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、管壁に沿って下降する左回転の流れ( $c_1$ )となっている。これは、壁面近傍の水温が $4^\circ\text{C}$ より高く、水温の温度降下によって水の密度が増大するためである。12分後、干渉縞は気液界面端部より自由界面の中心部へ広がり始める( $a_2$ )。この時、管内には初めのうずと逆回転のうずが存在する( $b_2, c_2$ )。これは管内に水の密度逆転が生じ、 $4^\circ\text{C}$ 以下の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。従って、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むことがわかる。30分後、水の密度逆転により発生した右回転の2次流れは、その後勢力を増大させ、逆に当初の左回転のうずは消滅する( $b_3, c_3$ )。また、気液界面端部より広がった干渉縞は、自由界面の中心部に達した後、水面から管底部に向かって広がり始めている( $a_3$ )。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。46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( $a_4$ )、管内水はすべて $4^\circ\text{C}$ より低くなり、右回転のうずのみが存在するようになる( $b_4, c_4$ )。

### 3. 2 管内温度分布および流れ挙動におよぼす水位の影響

図4および5は、 $T_{ini}=5.0^\circ\text{C}$ 、 $\theta_v=0.27^\circ\text{C}/\text{min}$ .において、それぞれ水位 $H=16\text{ mm}$ および $64$



$H=16\text{ mm}$ ,  $T_{ini}=5.0^\circ\text{C}$ ,  $\theta_v=0.27^\circ\text{C}/\text{min}$ .

1 :  $t=20\text{ sec.}$ , 2 :  $t=8\text{ min.}$ ,  
3 :  $t=15\text{ min.}$ , 4 :  $t=19\text{ min.}$

$H=64\text{ mm}$ ,  $T_{ini}=5.0^\circ\text{C}$ ,  $\theta_v=0.27^\circ\text{C}/\text{min}$ .

1 :  $t=20\text{ sec.}$ , 2 :  $t=12\text{ min.}$ ,  
3 :  $t=30\text{ min.}$ , 4 :  $t=48\text{ min.}$

図4 水位による管内温度分布および流線の時間的変化 図5 水位による管内温度分布および流線の時間的変化

mm (管内を水が満たしている状態) の場合の管内温度分布および流線の時間的変化を示している。図4において、実験開始より20秒後、管内の温度分布はほぼ一様で(図4. a<sub>1</sub>)、流線は管壁に沿って降下する左回転の流れとなっている。8分後、干涉縞は気液界面端部から自由界面の中心部へ広がること、また管内での水の密度逆転による2次流れの発生が、水位H=48 mmの場合(図3. b<sub>2</sub>: 実験開始より約12分後に2次流れ発生)に比べ早いことがわかる。15分後、干涉縞は自由界面の中心部に達し、水面から管全体に広がり始めている。また、2次流れは最初に存在した流れを徐々に消滅させながら勢力を増大させていることがわかる。19分後、管内の温度分布はほぼ一様になっており、管内には管壁に沿って上昇する右回転の流れのみが存在している。この時、水位がH=16 mmと低いので自由界面で表面張力が作用するため、右回転の流れの勢力が弱められていることが観察された。この表面張力については後述する。

図5は、管全体に水を満たした場合(H=64 mm)の温度分布および流線の可視化写真である。実験開始より20秒後、管内温度分布はほぼ一様であり、流線は管壁に沿って降下する左回転の流れとなっている。12分後、干涉縞は管底部付近( $\varphi=150^\circ$ 付近)で管中心部方向に広がり始めている。この干涉縞が広がる位置は、2次流れが存在する位置と一致していることがわかる。16分後、2次流れのうずは、管上部に向かって成長し最初に存在するうずを徐々に消滅させている。これに伴い、管底部付近( $\varphi=150^\circ$ 付近)で発生した干涉縞の広がりは管上部方向へ移動することがわかる。48分後、管内には管壁に沿って上昇する右回転の流れのみが存在する。このとき、管内の温度分布は管頂部流体が最も低く、管頂部から底部へ向って垂直に低温流体が流れ込むことがわかる。

### 3. 3 管内局所熱流束におよぼす冷却速度の影響

図6(a)および(b)は、H=48 mm,  $T_{in1}=5.0^\circ\text{C}$ において、それぞれ冷却速度 $\theta_v=0.65$ および $0.27^\circ\text{C}/\text{min}$ 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変化を示している。それぞれ縦軸に局所熱流束、横軸に時間をとっている。冷却速度が大きい場合(図6(a)), 実験開始より約8~13分後(水の密度逆転の効果が現われ始める時間)、局所熱流束は急激に増加する。その後、管内に樹枝状氷が発生する約28分後まで、気液界面端部( $\varphi=67^\circ$ )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。また、気液界面端部以外の部分( $\varphi=120^\circ\sim 180^\circ$ )では、ゆるやかに増加していることがわかる。さらに、管底部( $\varphi=180^\circ$ )に比べ気液界面端部( $\varphi=67^\circ$ )になるに従って、局所熱流束の値が増加している。これらは冷却速度が大きいので( $\theta_v=0.65^\circ\text{C}/\text{min}$ ), 管壁近傍の水が急激に冷却され、水の密

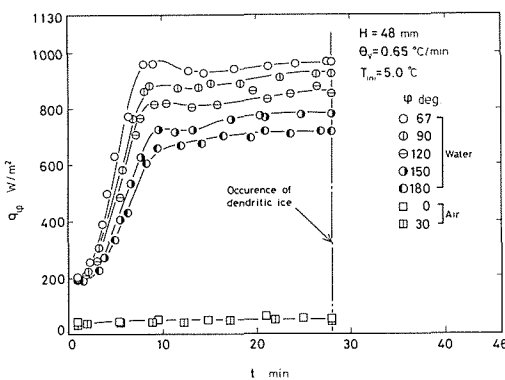


図6(a) 管内局所熱流束の時間的変化

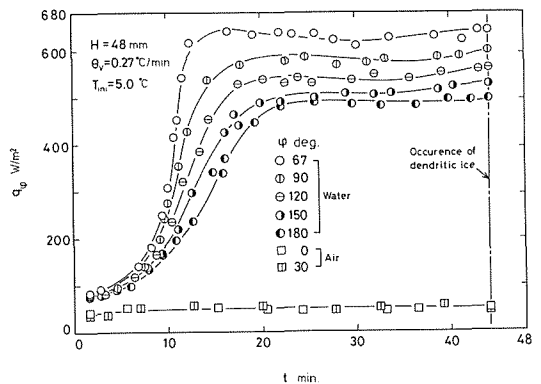


図6(b) 管内局所熱流束の時間的変化

度変化に伴い生ずるうずの勢力が時間とともに増大するためと思われる。しかし、水の密度逆転によって発生した2次流れが、最初に存在するうずの勢力を減少させるので、実験開始より約8～13分以降、局所熱流束の増加割合は小さくなっている。また、この2次流れは時間とともにその勢力が徐々に増大するため、局所熱流束が増加する割合は、気液界面端部から管底部にかけてゆるやかに増加する傾向を示している。さらに、管底部付近の局所熱流束の値は、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、気液界面端部付近の局所熱流束の値に比べ小さくなるものと思われる。図6 (b)は、冷却速度が $\theta_v=0.27^\circ\text{C}/\text{min.}$ と小さい場合の局所熱流束の時間的変化を示している。図より、実験開始後局所熱流束は時間とともに増加し、約12～22分後に極大値をとることがわかる。しかし、冷却速度が大きい場合[図6 (a),  $\theta_v=0.65^\circ\text{C}/\text{min.}$ ]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 ( $\varphi=67^\circ$ )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44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うず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多くの時間を要するため、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、図6 (a)および(b)には空気側の局所熱流束の値も示してある。両図を比較した場合、空気側の局所熱流束の値は、冷却速度の減少とともに幾分減少するが、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。

### 3. 4 局所ヌセルト数におよぼす冷却速度の影響

本実験において、局所熱伝達率の算定は次のように定義した。即ち、代表温度は水側については水位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、これらの位置における流体の温度と管壁温度との温度差で(1)式により算出した熱流束の値を除して算定を行った。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、 $H=48\text{ mm}$ ,  $T_{\text{ini}}=5.0^\circ\text{C}$ において、それぞれ冷却速度 $\theta_v=0.65$ および $0.10^\circ\text{C}/\text{min.}$ の場合における局所ヌセルト数の時間的変化を示す。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)は、冷却速度が $\theta_v=0.65^\circ\text{C}/\text{min.}$ と大きい場合である。図より、実験開始後局所ヌセ

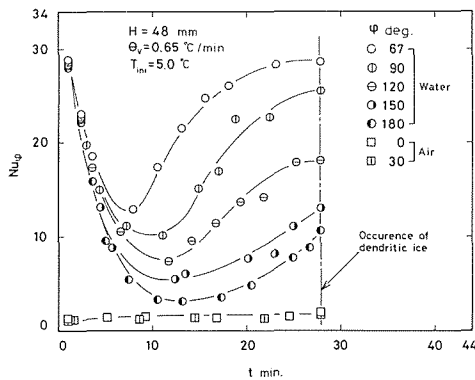


図7 (a) 管内局所ヌセルト数の時間的変化

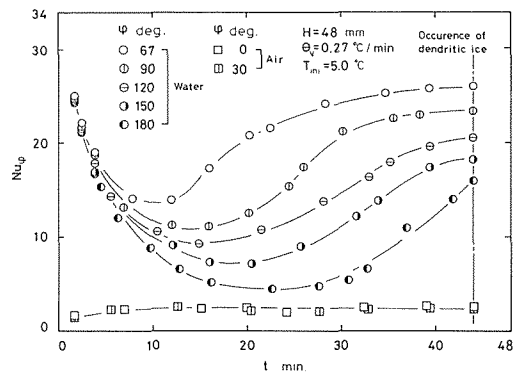


図7 (b) 管内局所ヌセルト数の時間的変化

ルト数は時間とともに急激に減少し、気液界面端部 ( $\varphi=67^\circ$ ) で約 8 分後、管底部 ( $\varphi=180^\circ$ ) で約 13 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 28 分後まで、局所ヌセルト数は気液界面端部で急激に増加し、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、冷却速度が大きいので管壁近傍の水が急激に冷却され、2 次流れの発生が早く、最初に存在したうず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ためと考えられる。

図 7 (b) には、冷却速度を  $\theta_v=0.10^\circ\text{C}/\text{min.}$  と小さくした場合の結果を示してある。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 ( $\theta_v=0.65^\circ\text{C}/\text{min.}$ ) と比べ、減少割合が小さいことがわかる。また、2 次流れの発生する時間が遅くなるため、局所ヌセルト数が極小値に達する時間は約 12~22 分後となり、樹枝状氷が発生する時間も約 44 分後と遅くなっている。局所ヌセルト数が極小値になった後、ヌセルト数の増加割合は管底部 ( $\varphi=180^\circ$ ) から気液界面端部 ( $\varphi=67^\circ$ ) に向かって増大するが、それらの差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。さらに、樹枝状氷発生直前の気液界面端部と管底部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た後、樹枝状氷が発生するためと考えられる。また、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っていることがわかる。

### 3. 5 局所ヌセルト数におよぼす水位の影響

図 8 (a), (b), および (c) は、 $T_{\text{ini}}=5.0^\circ\text{C}$  および  $\theta_v=0.27^\circ\text{C}/\text{min.}$  の条件で、それぞれ水位  $H=16, 48$  および  $64$  mm (管内を水が満たしている場合) における局所ヌセルト数の時間的変化を示している。

図 8 (a) は、水位  $H=16$  mm と低くした場合である。図より  $H=48$  mm の場合 (図 7 (b)) と同様に、2 次流れの発生にともない、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っている。しかし、 $H=48$  mm の場合と比べ約 10~30 分後と早く [図 7 (b),  $H=$

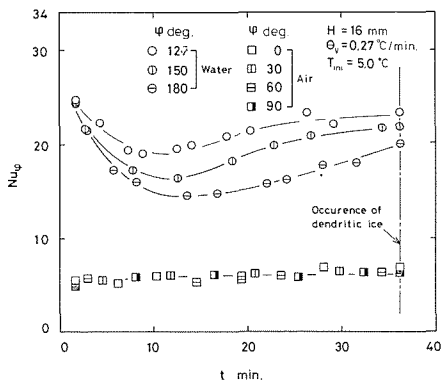


図 8 (a) 管内局所ヌセルト数の時間的変化

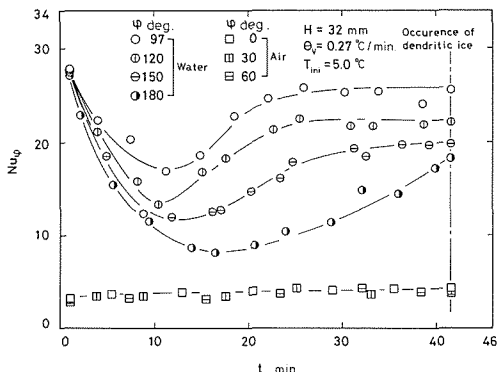


図 8 (b) 管内局所ヌセルト数の時間的変化

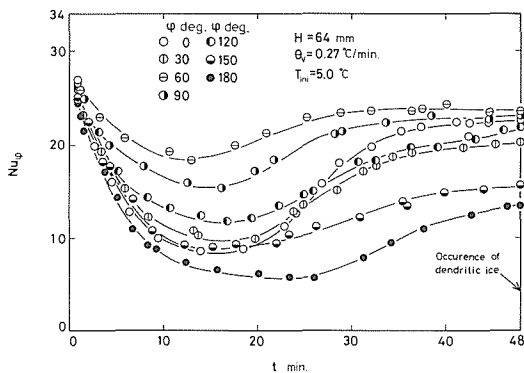
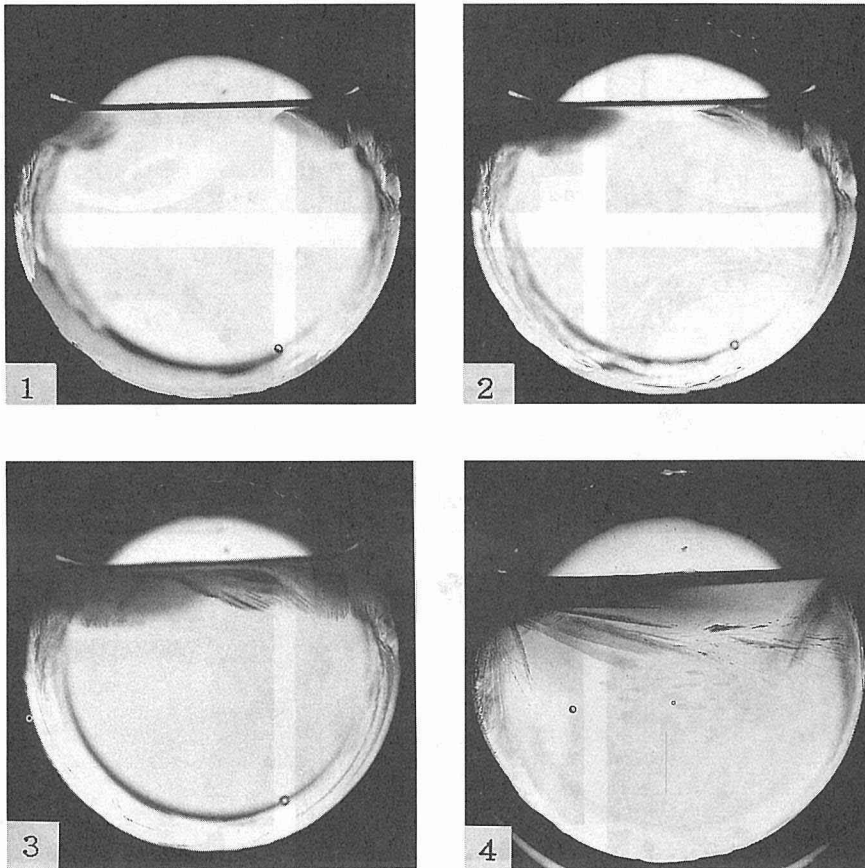


図 8 (c) 管内局所ヌセルト数の時間的変化

48 mm : 約 12~22 分後], 減少の割合もゆるやかである。局所ヌセルト数は, 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  $H=48$  mm の場合と比べゆるやかである。これは, 水位が低いため, 自由界面で水面中心部より管壁側の流体温度が低い (図 3・ $a_2$  の温度分布参照) ことに基づき生ずる管壁方向に作用する表面張力が, 管壁側から自由界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よると思われる。さらに樹枝状氷が発生する時間は, 実験開始後約 36 分と  $H=48$  mm の場合と比べ早く [図 7 (b),  $H=48$  mm : 約 44 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, 水位が低く水容量が少ないため, 水が十分過冷却されるためと考えられる。

図 8 (b) は, 水位  $H=32$  mm と大きくした場合である。局所ヌセルト数が極小値に達する時間は,  $H=16$  mm (図 8 (a)) の場合と比較して, 大きな差はないが約 11~16 分後と幾分遅くなる傾向がみられる。また, 樹枝状氷が発生する時間も約 41 分後と,  $H=16$  mm の場合と比べ遅くなっている。さらに, 樹枝状氷が発生する直前の気液界面端部 ( $\varphi=97^\circ$ ) と管底部 ( $\varphi=180^\circ$ ) 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容量が増加するため, 管内の水が冷却されるまでに時間を要すること, また, 自由界面と管



$H=48$  mm,  $T_{ini}=5.0^\circ\text{C}$ ,  $\theta_v=0.27^\circ\text{C}/\text{min}$ .  
 1 :  $t=44'56''04$ , 2 :  $t=44'56''04$ , 3 :  $t=44'57''09$ , 4 :  $t=44'58''12$

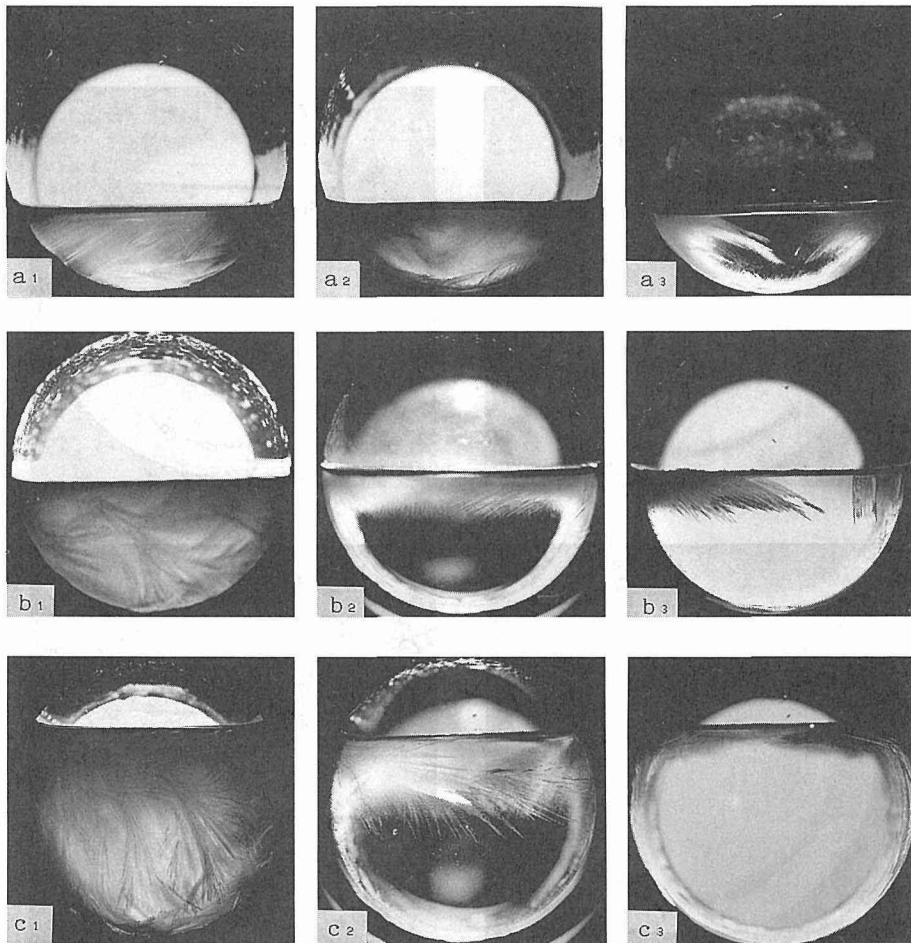
図 9 樹枝状氷の成長挙動

底部の水の温度差が大きくなるためと思われる。

図8(c)は、管内に水を十分満たした場合( $H=64$  mm)である。実験開始後、局所ヌセルト数は減少し、水の密度逆転による2次流れが発生し始める約15~26分後に極小値をとる。その後、樹枝状氷が発生する約48分後まで、局所ヌセルト数が増加する。この時、管上部側( $\varphi=0^\circ$  および  $30^\circ$ )の局所ヌセルト数の増加割合が大きいことがわかる。これは、2次流れの成長にともない、冷却された水が管壁に沿って上昇するため、管頂部( $\varphi=0^\circ$ )が最も過冷却されるためである。さらに、 $H=16, 32$ , および  $48$  mmの場合に比べ、 $H=64$  mmの場合は管頂部( $\varphi=0^\circ$ )と底部( $\varphi=180^\circ$ )の局所ヌセルト数の値の差が大きい。これは、水容量が $H=48$  mmの場合より、さらに増加しているため、管頂部と管底部の水の温度差が大きくなることによると思われる。

### 3. 6 管内樹枝状氷の発生と性状分布

図9は、 $T_{ini}=5.0^\circ\text{C}$ ,  $H=48$  mm, および  $\theta_v=0.27^\circ\text{C}/\text{min}$ . の場合における管内樹枝状氷の成長挙動を示している。実験開始より44分56秒04後、気液界面端部より樹枝状氷が発生する。44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



$T_{ini}=5.0^\circ\text{C}$ , a :  $H=16$  mm, b :  $H=32$  mm, c :  $H=48$  mm  
1 :  $\theta_v=0.10^\circ\text{C}/\text{min}$ ., 2 :  $\theta_v=0.80^\circ\text{C}/\text{min}$ ., 3 :  $\theta_v=2.00^\circ\text{C}/\text{min}$ .

図10 樹枝状氷の性状

管底部へ向かって成長する。また、44分58秒12後には図に示すように、樹枝状氷が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、水温が上昇し管内水温は瞬時に $0^{\circ}\text{C}$ 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は、水位 $H=16, 32, \text{および} 48\text{ mm}$ において、冷却速度をそれぞれ $\theta_v=0.10, 0.80, \text{および} 2.00^{\circ}\text{C}/\text{min.}$ と変化した場合の樹枝状氷の性状を示してある。冷却速度が小さい場合（ $\theta_v=0.10^{\circ}\text{C}/\text{min.}$ ）、樹枝状氷は水面下全体に広がり、殆ど瞬時（約 $1 \sim 2$ 秒程度）に管全体に広がる（図10,  $a_1, b_1, c_1$ ）。 $\theta_v=0.80^{\circ}\text{C}/\text{min.}$ 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。冷却速度が $\theta_v=2.00^{\circ}\text{C}/\text{min.}$ と大きい場合、気液界面端部から発生した樹枝状氷は、水面に薄く分布し（図10,  $c_3$ ）、水面全体にまで広がらない（図10,  $a_3, b_3$ ）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 $\theta_v$ 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、図11の（D）領域では樹枝状氷が発生せ

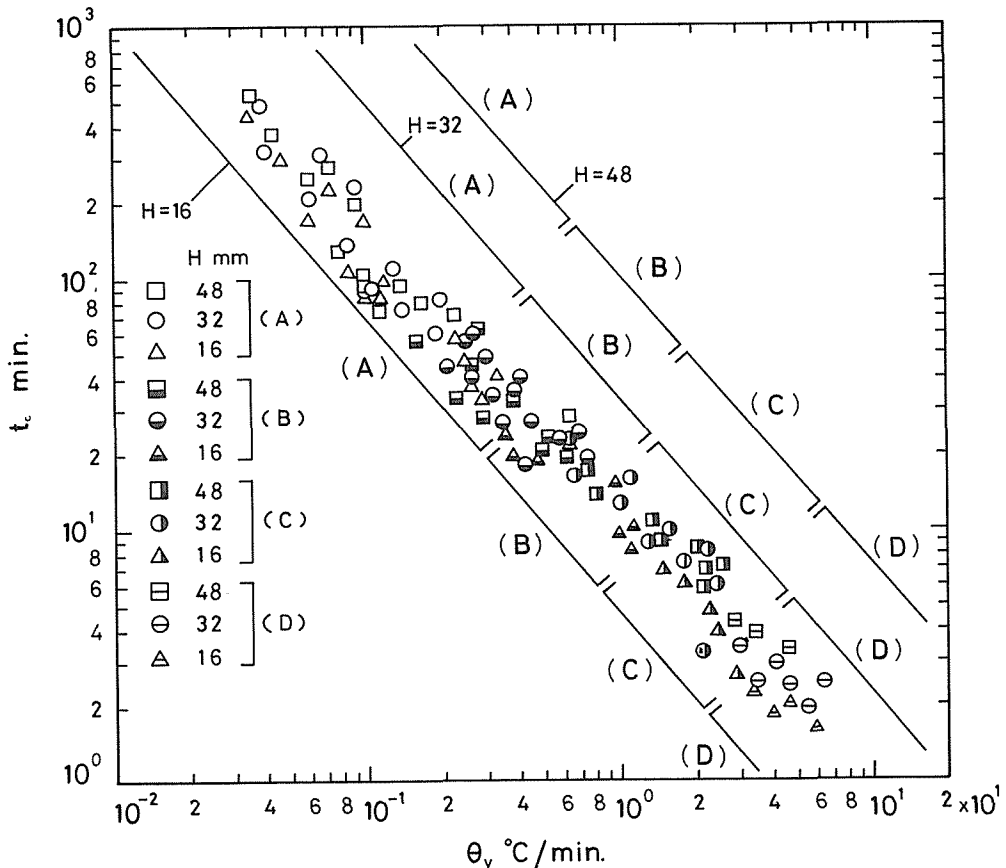


図11 樹枝状氷の性状分布

ず、水面下の管壁に沿って氷層 (pure ice) が発生する場合の領域を示している。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顕著に変化することがわかる。

#### 4. 結 言

空気と水が成層をなす水平円管内流体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、冷却された水は先づ壁面に沿って降下して流れ、その後、水の密度逆転によって壁面に沿う上昇流が発生し、時間と共にこの流れの勢力が大きくなる。このため、気液界面端部近傍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幾分増加するが、その割合は非常に小さく、ほぼ一定である。
- (3) 局所ヌセルト数は、冷却速度が大なるほど極小値をとる時間、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幾分増加するが、その増加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、冷却速度によって異なり、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。

#### 参 考 文 献

- 1) Gilpin, R. R., : Int. J. Heat Mass Transfer, 18 (1975), p. 1307
- 2) Cheng, K. C., et al. : Trans. ASME. J. Heat Transfer, 98 (1976), p. 581
- 3) Gilpin, R. R., : Trans. ASME. J. Heat Transfer, 99 (1977), p. 419
- 4) Gilpin, R. R., : Int. J. Heat Mass Transfer, 20 (1977), p. 693
- 5) 福迫尚一郎ら：第23回日本伝熱シンポジウム講演論文集 (昭61), p.379
- 6) 福迫尚一郎ら：流れの可視化札幌講演会論文集, 7 (1987), p. 89
- 7) 柏木孝夫ら：日本機械学会論文集, 53 (昭62), p. 1822