

着霜2円管の昇華による除霜挙動*

稲葉英男*¹, 堀部明彦*¹, 川上理亮*²Defrost Behavior of Frost Layer Developed on
Two Cooling Pipes by Sublimation PhenomenonHideo INABA*³, Akihiko HORIBE and Yoshiaki KAWAKAMI^{*3} Okayama University, Graduate School of Natural Science and Technology,
TsushimaNaka 3-1-1, Okayama, 700-8530 Japan

The present paper has dealt with a new defrost measure by using sublimation phenomenon which occurs below the triple point of water (273.16 K, 610.5 Pa). The present experimental study has focused to examine the mass transfer of annular frost layers developed on two cooling horizontal pipes set in a vertical direction which was exposed to an impinging jet air flow. The morphology of the frost layer during sublimating was observed by using a CCD camera. The nondimensional correlation equations of mass transfer were derived as a function of various parameters.

Key Words: Defrost, Frost Layer, Impinging Jet Flow, Sublimation, Mass Transfer

1. 緒 論

著者らは、基本的な霜層の昇華蒸発現象を解明することを目的に、水平霜層に平行又は垂直に空気を流動した場合の昇華蒸発による除霜特性を報告^{(1)~(3)}してきた。また前報⁽⁴⁾において、一般に用いられている円管群型低温熱交換器に形成される霜層の除霜に昇華蒸発を適用した場合の検討を行うため、単一円管に発達した円環状霜層に、二次元ノズルより低温空気を噴流状態で衝突させて、霜層の昇華蒸発挙動の観察を試みた。本報では、実際の低温円管式熱交換器に発達した霜層の、昇華蒸発による除霜モデルに近づけるため、まず着霜した2円管における霜層の昇華蒸発の検討を行うものである。すなわち、二次元ノズルからの空気噴流を、その流動方向に2列に配置した着霜状態である2円管に衝突させて、円環状霜層の昇華蒸発を行う。この場合の霜層の昇華蒸発は、周囲空気の流動状態に大きく左右され、特に下流側の霜層はその影響を大きく受けることが予想される。本研究においては2つの円環状霜層の昇華蒸発に影響を及ぼす噴流出口空気速度、初期霜層高さ、霜層の初期霜層密度、2本の着霜円管の管ピッチなどの各因子が、昇華蒸発による除霜挙動、そして物質伝達に及ぼす効果について実験的に明らかにするものである。

2. 記 号

B : ノズル幅 [mm], C_∞ : 噴流空気の水蒸気質量濃度 [g/m³], C_s : 霜層飽和水蒸気質量濃度 [g/m³], D : 空気の拡散係数 [m²/s], d : 試験円管直径 [mm], d_f : 代表長さ ($d+2H_f$) [mm], H : ノズル霜層表面間距離 [mm], H_f : 初期霜層高さ [mm], h_D : 物質伝達率 [m/s], L : 氷の昇華潜熱 [kJ/kg], ℓ : 試験円管長さ [mm], M_f : 霜層質量 [g], M_s : 昇華蒸発量 [g], m_{Af} : 昇華蒸発質量流束 [g/(m²·s)], P : 管ピッチ [mm], Q_{cv} : 対流伝熱量 [W], Q_s : 昇華蒸発潜熱量 [W], Q_f : 霜層の顕熱量 [W], Q_p : 試験円管の顕熱量 [W], Re_b : 噴流ノズル出口レイノルズ数, Sc : シュミット数, Sh : シャーウッド数, T_p : 試験円管表面平均温度 [K], T_∞ : 噴流ノズル出口空気温度 [K], t : 除霜時間 [min], U_b : 噴流出口空気速度 [m/s], δ : 試験円管の肉厚 [mm], ϕ_∞ : 相対湿度 [%], ρ_f : 初期霜層密度 [kg/m³], ρ_{ice} : 氷の密度 [kg/m³], ρ^* : 密度比, ν : 噴流空気の動粘性係数 [m²/s], θ : 前部よどみ点からの角度 [°]

添字, b : ブライン, up : 上流管, $down$: 下流管, f : 霜層, p : 試験円管, $room$: 恒温恒湿室, s : 昇華蒸発, ∞ : ノズル出口, θ : 前部よどみ点からの角度 [°]

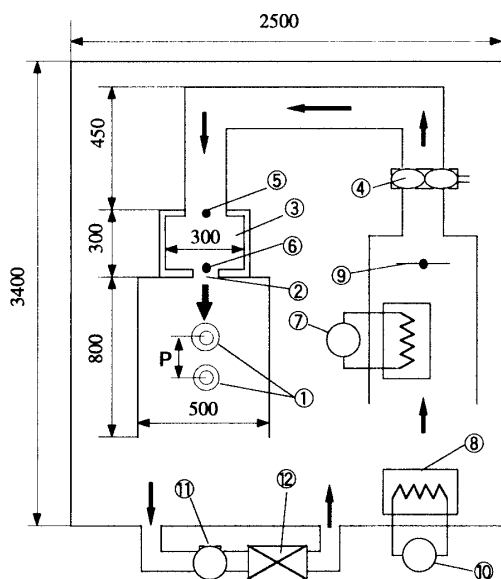
3. 実験装置および方法

図1に示す実験装置測定部全体は、大型恒温恒湿室(高さ3.4m×幅2.5m×奥行き4.0m)に設置される⁽⁴⁾。昇華蒸発実験で用いられる流動湿り空気は、恒温恒湿室

* 原稿受付 2000年4月13日。

¹ 正員, 岡山大学大学院自然科学研究科 (〒700-8530 岡山市津島中3-1-1)。² 学生員, 岡山大学大学院工学研究科。

E-mail: inaba@mech.okayama-u.ac.jp



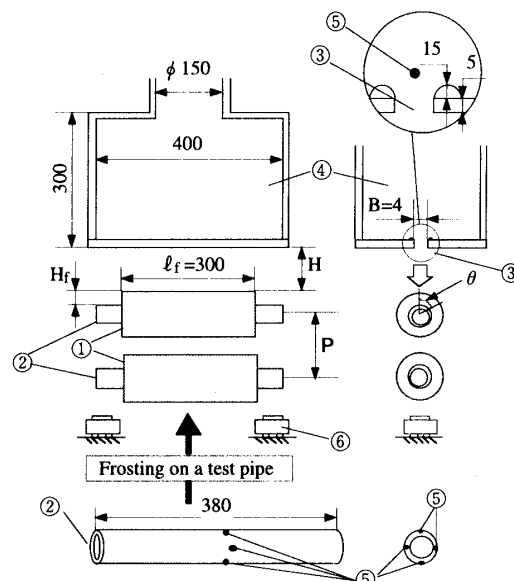
① Frost layer, ② Nozzle, ③ Pressure chamber, ④ Blower,
⑤ Humidity sensor, ⑥ Thermocouple, ⑦ Electric heater,
⑧ Heat exchanger, ⑨ Damper, ⑩ Refrigerator, ⑪ Membrane dryer,
⑫ Compressor

Fig.1 Schematic diagram of experimental apparatus

内に設置された冷却装置、及び電気ヒーターにより温度制御することにより、 $-20 \sim +15^\circ\text{C}$ の温度範囲で制御可能である。また、流動湿り空気の湿度制御は膜式除湿器と加湿器により行う。このように調温調湿された流動空気は可変インバータ式ブロワー（最大吐出圧力 2.1kPa 、風量 $0.5 \sim 2.5 \text{ m}^3/\text{min}$ ）により流動し、アクリル板で構成された圧力室（図2④）に流入する。

衝突噴流は、前報⁽⁴⁾と同様に図2に示すように、流動低湿度空気を圧力室下部に設置された二次元ノズルより噴出することで得ることができる。二次元ノズルは幅 $B=4.0\text{mm}$ 、長さ 400mm の矩形断面を有する構造で、先端部は半径 15.0mm の円弧部（はく離流れ防止用整流部）と 5.0mm の平行部からなる。噴流空気の温度及び湿度は、それぞれT型熱電対（測定精度 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ ）及び鏡面冷却式露点計（測定精度 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ ）によって測定される。また二次元ノズルと霜層表面との距離 H は $H=8 \sim 40\text{mm}$ の範囲で任意に設定できる。本実験では二次元ノズル幅 $B=4.0\text{mm}$ において、衝突面で最大噴流熱伝達の得られる $H=40\text{mm}$ に固定する⁽⁵⁾。

本実験で使用した試験円管は前報⁽⁴⁾と同様で、外径 $d=19.05\text{mm}$ 、長さ $l=380\text{mm}$ 、肉厚 $\delta=0.8\text{mm}$ の銅管を用い、その表面には円管外表面温度測定用の素線径 0.1mm のT型熱電対（測定精度 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ ）が上部よどみ点（ $\theta = 0^\circ$ ）を含み 90° 間隔に4本埋め込まれている。なお、流動空気の流れ方向に対して上流側を上流管、下流側を下流管と呼ぶ。また、上流管と下流管との距離を示



① Frost layer, ② Cooling pipe, ③ Two-dimensional nozzle,
④ Pressure chamber, ⑤ Thermocouple, ⑥ Electric balancer

Fig.2 Detail of test section

す管ピッチ P は $P=25 \sim 80\text{mm}$ の範囲で、任意に設定することができる。

一方、実験試料としての霜層の形成も前報⁽⁴⁾と同様、恒温恒湿槽内において、試験円管内に冷却ラインを流動させることによって、試験円管長さ方向に $l_f=300\text{mm}$ 、及び試験円管半径方向に向かって任意の初期霜層高さ H_f まで着霜を行っている。なお初期霜層高さ H_f は、試験円管の周方向に 45° おきに8ヶ所、試験円管長さ方向に4ヶ所で測定した、試験円管外表面から霜層先端までの垂直距離の平均値で定義した。また、形成された霜層の初期霜層密度 ρ_f は、初期の着霜質量を初期霜層高さ H_f から求めた見掛けの霜層体積で除することで算出した。図3に、周辺静止空気温度 $T_{room}=-2^\circ\text{C}$ 、湿度 $\phi_{room}=95\%$ 及び冷却ライン温度 $T_b=-25^\circ\text{C}$ の条件で着霜した霜層（ $H_f=7.0\text{mm}$ ）の高さ方向に対する平均密度分布を示す。この霜層の密度分布は、霜層先端から 1.0mm ずつ削り取り、その削り取った霜層の質量及び見かけの体積から算出した。この密度分布から、霜層先端に向かうにつれ霜層密度の減少が確認できる。

除霜実験は、まず着霜した試験円管内のラインを抜き、初期の霜層高さとして着霜円管の質量の測定を行う。そして2本の着霜円管を前述の除霜実験装置に設置し、調温調湿された衝突噴流を衝突させることで行った。霜層の昇華蒸発量の測定は、一定時間間隔ごとに噴流を停止して、試験円管を2台の電子天秤（分解能 0.001g ）上に置いて質量を測定し、その変化量より求めた。

本実験は以下の範囲で行った。管ピッチ $P=25 \sim 80\text{mm}$ 、噴流出口空気速度 $U_b=10 \sim 25\text{m/s}$ 、初期霜層高

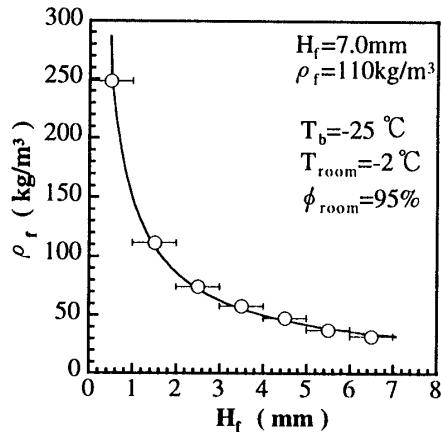


Fig.3 Vertical density distribution in a frost layer

さ $H_f=1.0 \sim 7.0\text{mm}$, 初期霜層密度 $\rho_f=60 \sim 150\text{kg/m}^3$.

4. 実験結果および考察

4・1 霜層の昇華蒸発挙動

図4は、衝突空気噴流により昇華蒸発する霜層の形状の可視化写真と、霜層周りの空気流れの状態と霜層形状モデルのスケッチを示したものである。霜層の昇華蒸発挙動及び形状変化の観察は前報⁽⁴⁾と同様、デジタルビデオカメラで霜層を撮影することにより行い、流れの状態はタフト法を用いて観察した。実験条件は、管ピッチ $P=40\text{mm}$, 噴流出口空気速度 $U_b=20\text{m/s}$, 噴流空気の相対湿度 $\phi_\infty=50\%$, 噴流出口空気温度 $T_\infty=268.2\text{K}$, 初期霜層高さ $H_f=6.0\text{mm}$, 初期霜層密度 $\rho_f=110\text{g/m}^3$ であり、噴流は写真上方から下方に流動している。

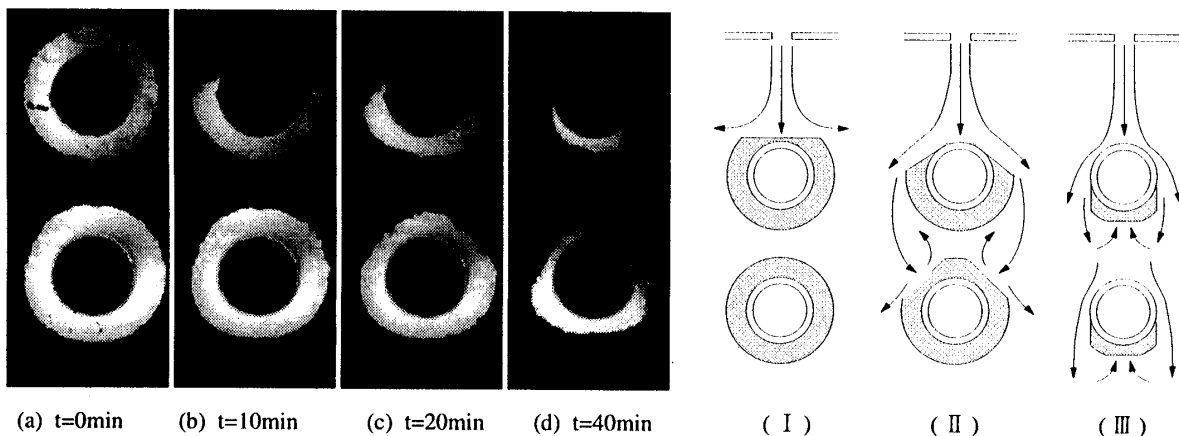
図4(a)は初期状態を示している。実験開始後 $t=10\text{min}$ の状態を示す図4(b)において、上流管においては単一円管で除霜実験を行った場合⁽⁴⁾と同様、上流管の前部よどみ点近傍で著しく霜層が減少している。しかしながら下流管での霜層の減少はほとんど見られない。これは、図4(I)のモデル図に示すように、衝突噴流が上流

管上方において剥離を起こし、衝突噴流が下流管に及ぼす影響が少ないためである。続いて $t=20\text{min}$ を示す図4(c)では、下流管の両側面上方 $\theta=30 \sim 60^\circ$ 付近の霜層が減少している。これは、図4(II)に示すように上流管両側面の霜層が減少したことで、上流管における噴流の剥離点が下方 ($\theta=90 \sim 100^\circ$) へ移動し、衝突噴流による下流管の霜層への影響が増大したためである。 $t=40\text{min}$ を示す図4(d)になると、下流管下方での霜層減少が確認できる。これは、下流管側面で剥離した流動空気が下流管下方に渦を伴う逆流を生じさせ、そのため霜層の昇華蒸発が促進されることによる。その後、上流管の霜層はほぼ全体的に消失し、噴流流れに霜層形状が影響を与えなくなるため、下流管全体に均一にわたって流動空気が行きわたり、下流管における霜層の減少は全域に拡大する。そして $t=261\text{min}$ で上流管及び下流管共に霜層は完全消失し、除霜終了となる。

このように、2本着霜円管の除霜挙動は図4のモデル図のように、大きく3つの除霜形態を経て進行していく。まず、(I)のように除霜初期段階では、上流管の霜層により噴流の流動が阻害され、下流管には大きな影響を与えず、上流管のみで除霜が進行する領域。続いて(II)のように上流管両側面霜層が減少することで剥離点が下方移動し、下流管にも流動空気が行きわたり霜層減少が行われるようになる領域。この間、時間経過により上流管の形状変化が流動空気の各地における剥離点を移動させるため、下流管に加わる流れは大きく変化し続ける。そして、最終的には(III)のように上流管での霜層が減少して、上流管の霜層形状が流動状態に影響を与えなくなり、ある程度流動形態が時間的な変化しない均一な噴流空気が下流管にも拡大する領域。

4・2 局所の物質伝達について

着霜した2円管に対して衝突空気噴流を用いる本実験は、複雑な流動形態及び形状変化を伴うため、除霜挙

Fig.4 Shape of the frost layer and air flow pattern ($H_f=6.0\text{mm}$, $P=40\text{mm}$)

動を把握する為には局所の物質伝達の検討は非常に重要である。そこで、本実験では霜層の形状変化より見掛けの局所物質伝達率の算出を試みることにした。

本実験では前述のように、単位時間ごとに霜層の形状写真の撮影を行っている。その形状写真において、前部よどみ点位置から 10° おきに36分割し、単位時間あたりに各位置で減少した霜層高さの測定を行った。そして、その減少量及び図3に示される霜層密度分布を積分することで見掛けの霜層昇華蒸発量を算出し、見掛けの局所のシャーウッド数を以下のように定義した。なお、局所の値を表す場合、添え字にそれぞれ(θ)を付ける。

$$Sh_\theta = \frac{h_D \cdot d_f}{D} = \frac{m_{Af}(d+2H_f)}{(C_s - C_\infty)D} \quad (1)$$

なお、 m_{Af} は昇華蒸発質量流束($g/(m^2 \cdot s)$)、 d_f は代表長さ($=d+2H_f$)、 D は空気拡散係数(m^2/s)、 C_∞ は噴流空気の水蒸気濃度(g/m^3)、 C_s は霜層表面の飽和水蒸気濃度(g/m^3)である。ここで本研究では、予備実験において霜層表面温度を円管表面温度 T_p と噴流空気温度 T_∞ の関係で求めておき(トラバースの先端に設けた $0.1mm$ 直径のT型熱電対で測定)、その温度における飽和水蒸気濃度 C_s を算出した。なお、 Sh の測定精度は $\pm 10\%$ 程度である。

図5は、単一円管の場合(図5(a))、二本円管の場合のそれぞれについて(上流管の場合(図5(b))、下流管の場合(図5(c)))、見掛けの局所シャーウッド数 Sh_θ の経時変化を示したものである。なお、 $\theta=0^\circ$ は前部よどみ点、 $\theta=180^\circ$ は後部よどみ点を表し、それぞれの角度における Sh_θ の値は左右の平均値を用いた。なお、各時間において Sh_θ の値の無いものは、円管表面が露出し、霜層が無いことを意味する。

単一円管の場合、除霜開始後 $t=10min$ において、図4の形状変化写真で見られた様に、前部よどみ点 $\theta=0^\circ$ における Sh_θ の値は $\theta=140^\circ$ における極小値と比べ100倍近い非常に大きな値となる。これは衝突噴流の

よどみ点における局所物質伝達率が極めて高いこと⁽⁵⁾、また霜層が針状及び樹枝状構造を有しているため、衝突噴流が霜層内部まで浸透し、実質昇華面積が増大していることなどが挙げられる。また Sh_θ の値は、噴流の剥離が確認された θ が $60 \sim 90^\circ$ 付近以降にて小さい値となる。そして、 $t=20min$ になると前部よどみ点における霜層はほぼ消失し、時間の経過と共に Sh_θ のピーク位置が、前部よどみ点から後方へ移動している。このピーク位置以降の Sh_θ は大きく減少していることから噴流が剥離していることが推測され、時間と共に剥離点が円管下方へ後退していることが伺える。

また、上流管では、図5(b)より Sh_θ は単一円管の場合と傾向的には大きな違いは見られないが、円管下方において単一円管の場合の方がやや大きな値を示している。これは下流管の存在が上流管周りの流れを妨害しているためと考えられる。

下流管においては、図5(c)より除霜開始後 $t=10min$ において、円管全域にわたり非常に小さい値を示している。そして $t=20min$ になると下流管の $\theta=30 \sim 60^\circ$ 付近で Sh_θ は大きな値を示し始める。これは上流管で剥離していた噴流流れが下流管へ加わるようになったためであり、流れの形態が図4の(I)から(II)へ移行していることを示している。続いて $t=40min$ になると $t=20min$ まで大きな値を示していた下流管の $\theta=30 \sim 60^\circ$ 付近での Sh_θ は減少し、代わりにその両側、つまり下流管に加わった流動空気が衝突する位置である $\theta=0 \sim 20^\circ$ 付近、及び流れが乱流境界層と推定される $\theta=80 \sim 100^\circ$ 付近で大きな値を示す。また下流管下方での逆流のため、後部よどみ点近傍でも Sh_θ は上昇している。

4・3 霜層の昇華蒸発の経時変化

図6は、図4に示した除霜実験時における、上流管及び下流管それぞれの霜層の昇華蒸発率 M_s/M_f と T_∞ 、 T_p

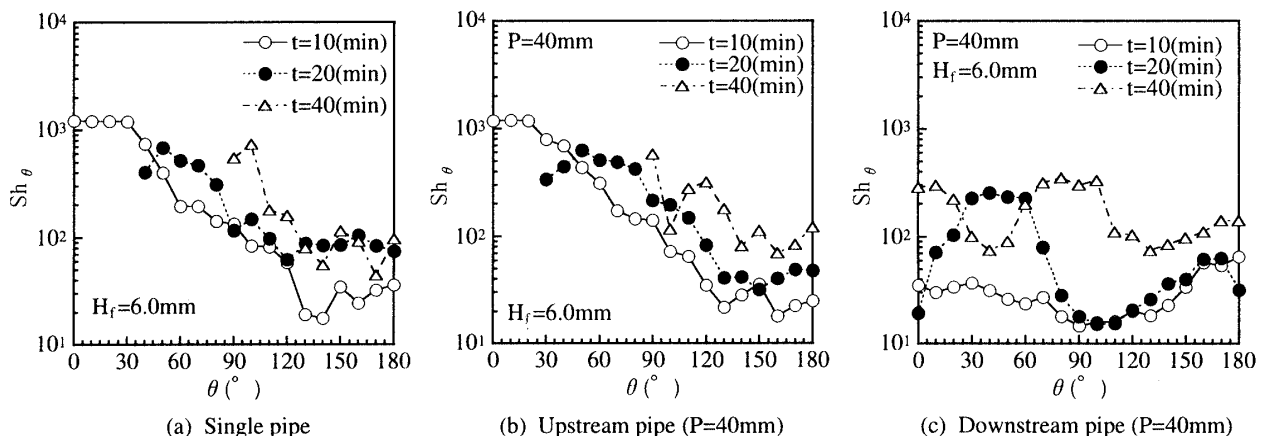


Fig.5 Relationship between Sh_θ and θ

の経時変化を示したものである。ここで、 M_s は霜層の昇華蒸発量、 M_f は霜層の総質量であり、 T_p は、試験管の上部、下部、右部及び左部における試験円管表面温度の平均値である。また上流管及び下流管の値を示す場合、添え字にそれぞれ(up)及び(down)を付ける。

図6に示すように除霜開始直後、上流管において霜層質量は急激に減少している。また、上流管の除霜終了時間は単一円管の除霜実験結果と比べ、若干大きくなっているが、昇華蒸発傾向には大差ない。しかしながら下流管では、除霜開始直後数分間、昇華蒸発はほとんど生じておらず、また下流管の温度低下も緩やかである。これは前述の霜層の形状変化で確認されたように、図4(I)の様に上流管において流動空気が剥離するため、下流管において昇華蒸発が顕著でないことによる。そしてある程度時間が経過すると下流管においても大きな昇華蒸発を示す。また、 T_p は除霜開始直後から、霜層の昇華に伴う吸熱作用のために著しい低下を示しており、時間が経過するに従って T_p は上昇に転ずる。これは霜層の昇華蒸発割合が小さくなったこと、及び試験円管の露出により、衝突噴流が試験円管に直接接するために噴流温度に近づくことによる。

4・4 霜層の熱収支の経時変化

本実験においては、昇華蒸発に必要とされる昇華潜熱の大部分は、衝突噴流空気からの対流入熱により供給される。従って、対流入熱の把握を行うために、前報⁽⁴⁾と同様の方法で、衝突噴流空気と霜層間の熱収支の検討を上流管及び下流管それぞれにおいて行った。衝突噴流空気による対流入熱量 Q_{cv} は霜層まわりの熱収支に基づき、次式により算出した。

$$Q_{cv} = Q_s + Q_f + Q_p \quad (2)$$

式中の Q_s 、 Q_f 、 Q_p はそれぞれ単位時間あたりの、霜層の昇華潜熱量、霜層の顕熱量、試験円管の顕熱量で、以下のように表される。

$$Q_s = L \cdot \Delta M_s \quad (3)$$

$$Q_f = M_f C_{pf} \Delta T_f \quad (4)$$

$$Q_p = M_p C_{pp} \Delta T_p \quad (5)$$

ここで、 ΔM_s は単位時間あたりに昇華蒸発した霜層質量で、 L は氷の昇華潜熱、 ΔT_p 、 ΔT_f 及び C_{pf} 、 C_{pp} はそれぞれ、霜層と試験円管の単位時間当たりの温度上昇量および比熱である。

図7は、上流管及び下流管それぞれにおける、霜層まわりの熱量収支の経時変化を示したものである。実験条件は図4の場合と同様である。図7にみられるように、霜層の顕熱量 Q_f と試験円管の顕熱量 Q_p は対流伝熱

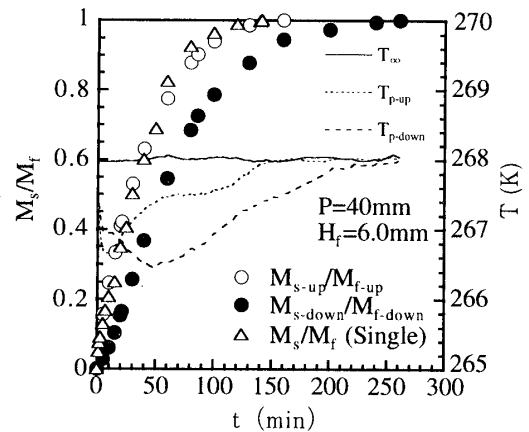


Fig.6 Time history of temperature and M_s/M_f

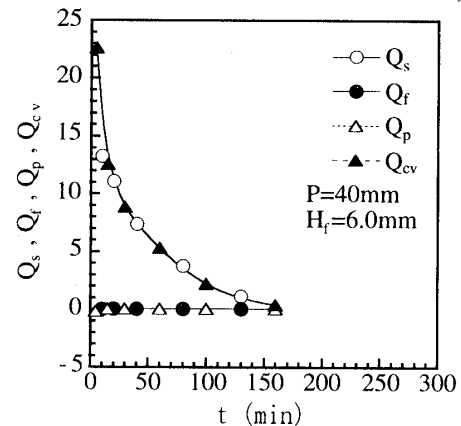


Fig.7(a) Time history of Q (Upstream pipe)

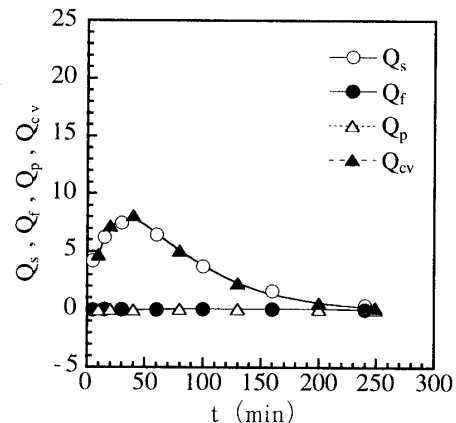
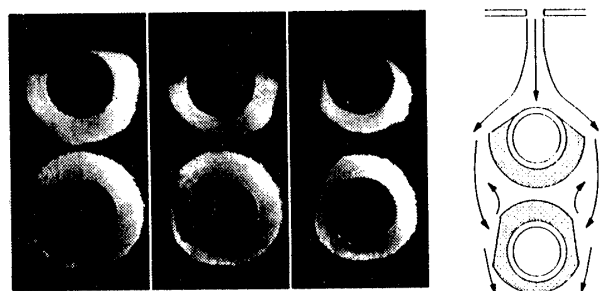
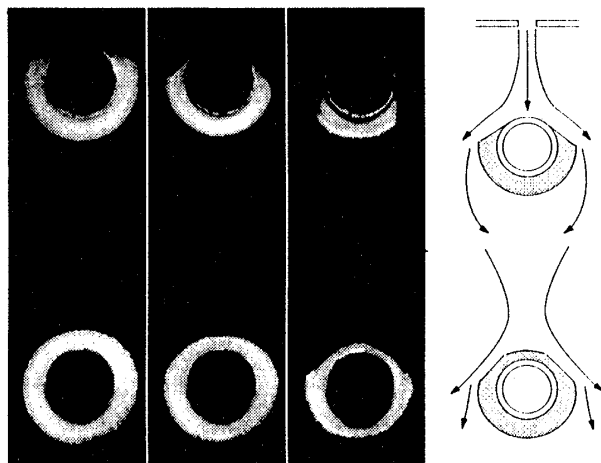


Fig.7(b) Time history of Q (Downstream pipe)

量 Q_{cv} と比べ2～3%程度と非常に小さく、対流による入熱の大部分は昇華潜熱に供する。上流管においては図7(a)のように実験初期において対流伝熱量が大きな値を示しており、その後 Q_{cv} は緩やかに減少する。それに対し下流管では、図7(b)より、図6の昇華蒸発率で見られたように、実験初期による対流伝熱量が小さくなる。そして $t=40$ min前後をピークに、 Q_{cv} は緩やかに減少している。これは $t=40$ min前後で下流管上方の霜層に、流動空気の衝突が起こり、霜層の昇華蒸発が促進し、霜層が消失したことによる。



(a) $t=10\text{min}$ (b) $t=20\text{min}$ (c) $t=40\text{min}$
Fig.8 Shape of the frost layer and air flow pattern($P=35\text{mm}$)



(a) $t=10\text{min}$ (b) $t=20\text{min}$ (c) $t=40\text{min}$
Fig.9 Shape of the frost layer and air flow pattern($P=80\text{mm}$)

4・5 管ピッチ P が除霜挙動に及ぼす影響

図8及び図9は、それぞれ管ピッチが $P=35\text{mm}$ 、 $P=80\text{mm}$ で除霜実験を行った場合における、霜層の形状変化を撮影したものである。また、下流管に噴流空気が大きく加わり始めた時点での、霜層周りの流れ形態のモデル図を併記している。そして、図10及び11にそれぞれの管ピッチの下流管における Sh_θ の経時変化を示す。なお管ピッチ以外の実験条件は図4の場合と同様である。

まず、ピッチの小さい $P=35\text{mm}$ の場合、図4の $P=40\text{mm}$ の場合を比較すると、図8(b)に示すように $P=35\text{mm}$ の場合では $P=40\text{mm}$ の場合と異なり、 $t=20\text{min}$ が経過した時点で、下流管下方の霜層が減少している。そして $t=40\text{min}$ になると下流管上方においても霜層の減少が確認できるが、 $P=40\text{mm}$ の場合と比べると下流管には上方に若干多い霜層が残留している。このような挙動を示す原因は、ピッチが小さくなったことで、図4(II)が変化し、図8のモデル図に示すように、上流管を剥離した流れが下流管の下方寄りへ加わり、2本管の間隙に入り込みにくくなるためである。そしてこの挙動は図10の局所物質伝達にも現れており、下流管の昇華蒸発の極大点は下流管下方から時間の経過と共に前方

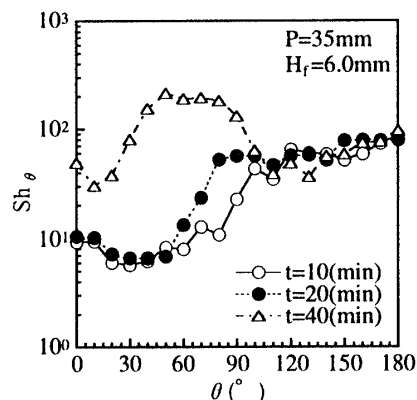


Fig.10 Relationship between Sh_θ and θ ($P=35\text{mm}$)

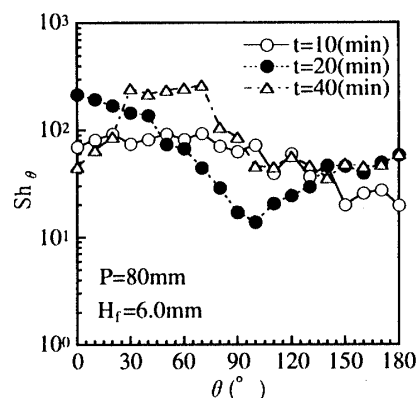


Fig.11 Relationship between Sh_θ and θ ($P=80\text{mm}$)

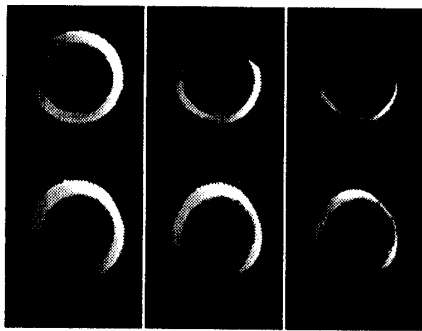
へ移動している。

これに対しピッチが大きい $P=80\text{mm}$ の場合、 $P=40\text{mm}$ の場合と比べると、図9より、 $t=20\text{min}$ が経過した時点で下流管上方全域の霜層が減少している。そして $t=40\text{min}$ が経過すると下流管に加わった流動空気が下流管の側面において剥離し、下流管下方が逆流により霜層が減少している。これは管ピッチが小さい場合とは逆に、2本円管の間隙が大きいことから、上流管の両側から流動してきた噴流が合流して、下流管に対して全体的に加わるためである。このため、図11の Sh_θ でも、下流管の昇華蒸発の極大点は下流管上方から時間の経過と共に下方へ移動することがわかる。

これらの結果、管ピッチは図4(II)のように下流管に噴流が衝突し始めた時点では、空気流動位置の時間的変化、並びに最終的な流れ形態に大きな影響をもたらす。

4・6 初期霜層高さ H_f が除霜挙動に及ぼす影響

図12は初期霜層高さが $H_f=4.0\text{mm}$ の霜層を用いて除霜実験を行った場合における、霜層の形状変化を撮影したものである。また、図13は、図12の条件での局所シャーウッド数 Sh_θ の経時変化である。なお管ピッチ $P=40\text{mm}$ は固定であり、その他の実験条件は図4の場合と同様である。



(a) $t=0\text{min}$ (b) $t=10\text{min}$ (c) $t=20\text{min}$
 Fig.12 Shape of the frost layer($H_f=4.0\text{mm}$)

図12から、 $H_f=4.0\text{mm}$ の場合には $t=10\text{min}$ と、早い除霜時間から下流管での霜層減少が開始している。これは H_f が低いと上流管において、形状変化による噴流剥離が起こりにくく、噴流が下流へ流れやすいためである。また $H_f=6.0\text{mm}$ で除霜実験を行った場合での Sh_θ である図4と比較すると、霜層高さが低い方が下流管の Sh_θ はどの時間でも全体的に大きな値を示しており、かつ各時間における Sh_θ の極大値は、比較的下流管の上方で示している。これは同じ上流管位置で噴流が剥離するとしても、霜層高さが低い場合、流動空気がより下流管上部方向へ流動することができるためである。

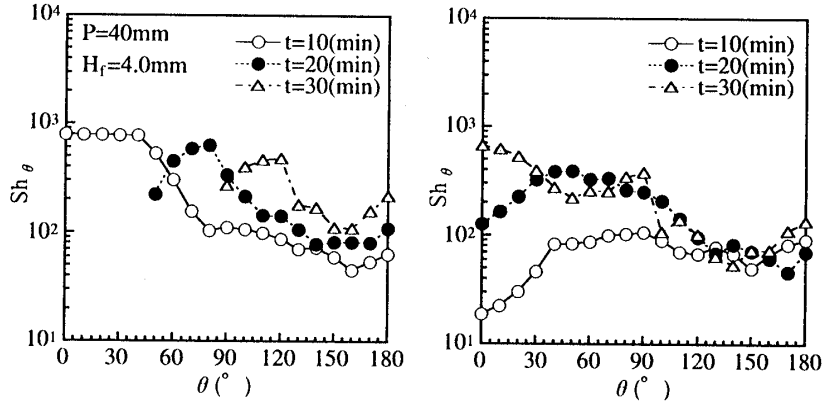
これらのことから、霜層高さが低いと上流管で噴流が剥離する時間が非常に短かく、また霜層高さが低いことから霜層形状が空気流動を大きく阻害しないことになる。

4・7 平均物質伝達の検討

2本の着霜円管の昇華蒸発による除霜実験結果により得られた、除霜終了までにおける各実験因子が物質伝達に及ぼす影響に関して無次元整理を行い、最終的に無次元整理式を導出する。

図14及び15は、実験開始段階における管の配列が、上流管及び下流管において、除霜終了までの平均物質伝達に与える影響を、管ピッチ P と着霜円管の初期直径である代表長さ d_f の比で表される管配列 P/d_f と、平均シャーウッド数 Sh の関係で示したものである。なお、図14には、比較のため単一円管の場合を波線で記している。また、ピッチは上流管の中心から下流管の中心の距離であるため、霜層高さによってその値は異なる。

図14より、上流管の Sh_{up} は、 P が大きくなるに従い単一円管に近づく。これは上流管下部における下流管の影響が少なくなるためである。一方、図15より下流管においては、 P が大きくなるに従い Sh_{down} は減少しており、これは下流管への噴流到達速度減少の影響が大



(a) Upstream pipe (b) Downstream pipe
 Fig.13 Relationship between Sh_θ and θ ($H_f=4.0\text{mm}$)

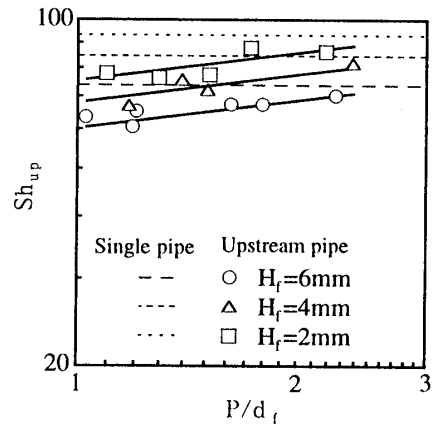


Fig.14 Relationship between Sh_{up} and P/d_f

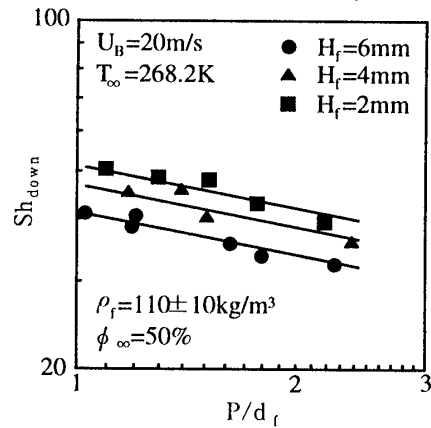
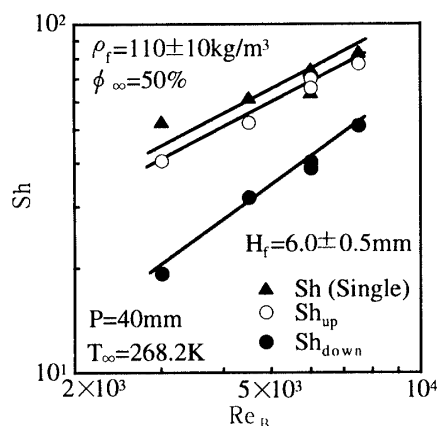
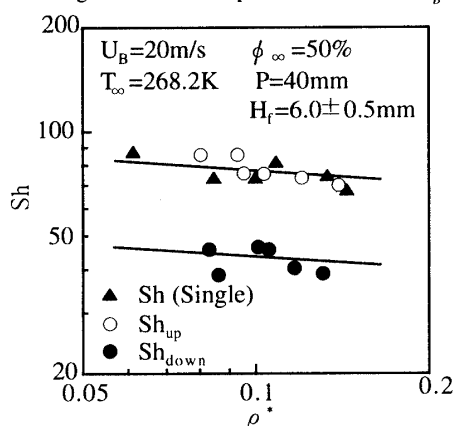


Fig.15 Relationship between Sh_{down} and P/d_f

きいことによる。さらに、最後まで霜層が残留するのは円管後部よどみ点付近であるため、この領域の霜層の消失が速い管ピッチの小さな領域の Sh_{down} が結果として大きくなる。

また、図14、15に示すように、 H_f の増大に伴い、上流管及び下流管のいずれにおいても、 P/d_f に関わらず Sh は減少する傾向を示している。これは前述のように、初期霜層高さ H_f が高いと空気流動を阻害するためである。

図16は、噴流出口速度 U_B が、上流管及び下流管における物質伝達に及ぼす影響を、平均シャーウッド数 Sh

Fig.16 Relationship between Sh and Re_B Fig.17 Relationship between Sh and ρ^*

と噴流ノズル出口レイノルズ数 Re_B との関係で示したものである。噴流ノズル出口レイノルズ数 Re_B を次式で定義する。

$$Re_B = \frac{U_B \cdot B}{\nu} \quad (6)$$

また、比較のため単一円管の場合も併記する。図16より、 U_B の増大に伴ってどの試験円管でも物質伝達率が向上していることが分かる。また下流管に加わる流動空気は、一度上流管に衝突した後の流れであるため、下流管に到達する速度は比較的小さいので、 Sh_{down} は Sh_{up} よりも小さい。

図17は、初期霜層密度 ρ_f が上流管及び下流管における物質伝達に及ぼす影響を、平均シャーウッド数 Sh と密度比 ρ^* との関係で示したものである。密度比 ρ^* を次式で定義する。

$$\rho^* = \frac{\rho_f}{\rho_{ice}} \quad (7)$$

なお ρ_{ice} は0℃の水の密度である。

図のように ρ^* が増大すると Sh が減少しているのは、霜層が密であればあるほど内部に噴流空気が浸透しにくいために、実質上の昇華表面積が減少することによる。また、 Sh の値は上流管よりも下流管の方が小さい。

これは下流管への噴流到達速度が上流管よりも小さいため、比較的霜層内部へ浸透しにくいことによる。

以上に述べた二本着霜円管の上流管、及び下流管それぞれにおける平均シャーウッド数 Sh_{up} 、 Sh_{down} に対する各無次元パラメータの影響を含め、最小二乗法にて本実験データを近似する実験整理式を以下誘導した。

$$Sh_{up} = 9.96 \times 10^{-2} (P/d_f)^{0.19} Re_B^{0.72} \rho^{*-0.12} (H_f/d_f)^{-0.10} Sc^{1/3} \quad (8)$$

$$Sh_{down} = 2.92 \times 10^{-3} (P/d_f)^{-0.29} Re_B^{1.03} \rho^{*-0.12} (H_f/d_f)^{-0.30} Sc^{1/3} \quad (9)$$

なお最大偏差は、上流管の場合±14.8%、下流管の場合±16.7%以内であり、上式の適用範囲は、 $P/d_f=1.1 \sim 2.7$ 、 $Re_B=3000 \sim 7500$ 、 $\rho^*=0.061 \sim 0.15$ 、 $H_f/d_f=0.057 \sim 0.23$ である。また、従来の実験結果⁽¹⁾を参考に、シュミット数 Sc の指数には1/3乗を用いてある。

5. 結 論

本研究では、冷却円管に発達した霜層に対する衝突噴流と昇華蒸発現象を利用した除霜実験を行い、流れ方向に配置した2本の円管に発達した円環状霜層に、二次元ノズルより低温空気を噴流状態で衝突させて昇華蒸発の促進を試みた。その結果、以下のような霜層の昇華蒸発挙動に及ぼす霜性状、円管配置及び周囲空気条件による昇華蒸発挙動を明らかにした。

- (1) 衝突噴流による昇華蒸発現象を利用した2つの円環状霜層の可視化実験により、除霜過程における霜層の形状変化、そして流動空気の霜層周りにおける流れの可視化を観察から、初期霜層高さや管ピッチにより霜層の局所物質伝達が大きく変化し、その結果霜層の形状が大きく変化する様子が明らかとなった。
- (2) 霜層の昇華蒸発量には、噴流空気による対流物質伝達が大きく影響を及ぼすことが判明し、噴流速度や霜層の密度がその対流物質伝達に影響を及ぼすことを定量的に解明した。
- (3) 着霜上流管及び下流管において、除霜が終了までの物質伝達に対する無次元整理式の提案を行い、噴流出口速度、初期霜層高さ、管配列、初期霜層密度の無次元パラメータを用いて実験整理式を誘導した。

文 献

- (1) 稲葉英男, 今井誠士, 機論, 61-585, B(1995), 1818.
- (2) 稲葉英男, 今井誠士, 機論, 61-586, B(1995), 2261.
- (3) 稲葉英男, 今井誠士, 機論, 63-607, B(1997), 1000.
- (4) 稲葉英男, 他4名, 第35回日本伝熱シンポジウム講演論文集, F335(1998), 869.
- (5) 熊田雅弥, 他2名, 機論, 38-315, B(1972), 2915.