衝突噴流による円環状霜層の昇華特性*

稲葉 英男^{*1}, 堀部 明彦^{*1}, 高本 直樹^{*2}
川上 理亮^{*2}, 今井 誠士^{*3}

Sublimation Behavior of Annular Frost Layer by Impinging Jet Flow

Hideo INABA^{*4}, Akihiko HORIBE, Naoki TAKAMOTO,
Yoshiaki KAWAKAMI and Seishi IMAI^{*4} Okayama University, Graduate School of Natural Science and Technology,
Tsushimanaka 3-1-1, Okayama Japan

The present paper has dealt with a new method of defrosting by using the frost sublimation phenomenon which occurs below the triple point of water (273.16 K, 610.5 Pa). The present experimental study has focussed to examine the mass transfer of the annular frost layer developed on a cooling pipe exposed to an impinging jet flow. Morphology of the frost layer during sublimating was observed by using a CCD camera. It was understood that the mass flux of the frost layer increased with increasing the jet flow velocity and the difference of the mass concentration of water vapor between the frost surface and the impinging jet flow. The nondimensional correlation equations of mass transfer of defrosting were derived as functions of various parameters.

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

1. 緒 論

低温熱交換器の伝熱面回りに発生する霜層は、熱伝達の低下や空気流路の減少に伴う送風動力の増加などの弊害をもたらすため、その効率的な除霜法の開発が重要な課題となっている。

従来の除霜方法としては、逆サイクルを用いたホットガス方式や電気ヒーター方式等の加熱融解方式が挙げられる。しかしながら、これらの方法を用いると除霜運転時の冷却運転停止による冷却機能の低下、融解に使われる有効熱量が小さいこと(20%前後⁽¹⁾)による経済性の低下、除霜後の融解水の処理などが問題となっている。

一般に氷は、水の三重点(温度 273.16 K)以下の条件下においては、昇華蒸発を生じ、固相から直接水蒸気の生成となる。この昇華蒸発現象を利用して除霜を行えば、霜層は空気中に水蒸気となって拡散されるため、融解水は残らない。また、霜層上面から昇華蒸発するため、伝熱面が低温のまま除霜することが可能である。この昇華現象に関しては、熊田ら⁽²⁾はナフタレンを用いた

昇華実験を行い、円管表面の局所熱伝達率を測定している。氷の昇華蒸発現象を利用した食品保存法である凍結乾燥に関しては、Kochsら⁽³⁾が自然対流下での種々の周囲条件下における昇華蒸発速度の予想を行っている。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^{(4)~(6)}してきた。

本研究は、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ものである。すなわち、円管群の最小単位としての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昇華蒸発の促進を試みた。具体的には霜層の昇華蒸発に影響を及ぼす噴流出口空気速度、ノズルと霜層表面間距離、噴流出口空気温度、噴流空気の水蒸気質量濃度、初期霜層高さ、霜層の初期霜層密度などの各因子が、昇華蒸発による除霜挙動、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

a : 霜層温度伝導率 [(mm)²/s], 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], c_p : 空気の定圧比熱 [kJ/(kg · K)], D :

* 原稿受付 1999年12月16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。^{*3} 正員, 松下冷機(株)コイル事業部 (〒525-0055 草津市野路町2275)。

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

空気拡散係数 $[m^2/s]$, d : 試験円管直径 $[mm]$, d_f : 代表長さ $(d+2H_f)[mm]$, Gu : グーマン数, H : ノズルと霜層表面間距離 $[mm]$, h_d : 物質伝達率 $[m/s]$, H_f : 初期霜層高さ $[mm]$, 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 $[kg/(m^2 \cdot s)]$, 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, S : 見掛けの昇華面積 $[m^2]$, Sc : シュミット数, Sh : シャーウッド数, T_a : 噴流空気の霜層到達温度 $[K]$, T_p : 試験円管表面平均温度 $[K]$, T_{tp} : 水の三重点温度 $[K]$, 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 $[kg/m^3]$, ρ_{ice} : 氷の密度 $[kg/m^3]$, ρ^* : 密度比, λ : 噴流空気の熱伝導率 $[W/(m \cdot K)]$, ν : 噴流空気の動粘性係数 $[m^2/s]$, θ : 前部よどみ点からの角度 $[^\circ]$

添字, 0: よどみ点露出, c: 除霜終了, f: 霜層, p: 試験円管, s: 昇華蒸発, ∞ : ノズル出口

3. 実験装置および方法

図1は、恒温恒湿室内に設置された実験装置の全体概要を示したものである。このうち昇華蒸発実験で用いられる流動湿り空気は、冷却装置、およ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

① Frost layer, ② Test pipe, ③ Nozzle, ④ Pressure chamber,
⑤ Thermocouple, ⑥ Electric balancer

Fig.2 Details of test section

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に流入する。

図2は、実験装置測定部の概略を示したものである。衝突噴流は、流動湿り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 400 mm の矩形断面を有する構造で、先端部は半径 15.0 mm の円弧部と 5.0 mm の平行部からなる。噴流空気の温度は、ノズル出口前に取り付けられた素線径 0.3 mm のT型熱電対(測定精度 $\pm 0.1^\circ\text{C}$)により測定される。噴流空気の水蒸気濃度 C_∞ は、測定精度 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ の鏡面冷却式露点計によって測定された露点温度と、湿り空気温度により算出した。さらに二次元ノズルと霜層表面との距離 H は可変で、 $H=8 \sim 80\text{ mm}$ の範囲で、任意に設定することができる。すなわち、霜層表面に到達する噴流状態は距離 H の減少と共に発達した噴流領域、遷移領域およびポテンシャルコア領域へと変化する⁽⁷⁾。

本実験で使用した試験円管には、外径 $d=19.05\text{ mm}$, 長さ $\ell=380\text{ mm}$, 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 0.1 mm 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、熱電対素線は円管外表面に設けた浅い溝に沿わせて、エポキシ樹脂で固定した後、その表面が平滑になるように仕上げ加工をした。

一方、実験試料としての霜層の形成は、恒温恒湿槽内において、試験円管内に冷却ブラインを流動させるこ

Fig.3 Vertical Density distribution in a frost layer

とによって、試験円管長さ方向に $\ell_f=300\text{mm}$ 、およ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 まで着霜が可能である。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。なお、 H_f の測定は、約3倍に拡大した可視化写真から測定精度 $\pm 0.05\text{mm}$ のノギスにより測定したもので、その読みとり誤差等を含めると H_f の測定誤差は、 $\pm 0.1\text{mm}$ 程度と考えられる。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。本実験の着霜条件は試験円管表面温度を $-30 \sim -15^\circ\text{C}$ 、周囲空気温度を $-10 \sim -2^\circ\text{C}$ の任意とし、着霜時間を制御することで、霜層は任意の初期霜層高さ H_f 、初期霜層密度 ρ_f に設定することが可能である。図3は、着霜した霜層(初期霜層高さ $H_f=6.0\text{mm}$)の高さ方向に対する密度分布を示したものである。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およ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することが確認できる。

除霜実験は、まず着霜を行った試験円管内のブラインを抜き、初期の霜層高さとして着霜円管の初期質量の測定を行う。そして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、試験部円管を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。なお、電子天秤の校正や分解能を考慮すると、霜層の質量測定誤差は $\pm 1\text{mg}$ 程度である。

本実験は以下の範囲で行った。ノズル霜層表面間距

Fig.4 Shape of the frost layer and air flow Pattern

離とノズル幅の比 $H/B=2 \sim 20$ 、噴流出口空気温度 $T_\infty=272.2 \sim 268.2\text{K}$ 、噴流空気の相対湿度 $\phi_\infty=30 \sim 80\%$ 、噴流出口空気速度 $U_b=5 \sim 25\text{m/s}$ 、初期霜層高さ $H_f=1.0 \sim 7.0\text{mm}$ 、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

霜層は表面粗さを伴い、図3に示されるように密度分布を有しているため、実際の昇華面積は見掛け上の表面積より大きく、除霜挙動に大きな影響を与えている^{(4)~(6)}。

Fig.5 Time history of temperature and M_f

図4は、衝突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のスケッチを示したものである。霜層の昇華蒸発挙動および形状変化の観察はデジタルビデオカメラで霜層を撮影することにより行った。また、流れの状態はタフト法を用いて観察した。タフトには素線径0.5mm、長さ33mmのまち針に、素線径0.01mm、長さ18mmの刺繍糸の端を接着剤で固定したものをを用いた。これをよどみ点より円周方向に45°間隔、半径方向に2カ所ずつ、計16ヶ所に設置した。このタフトの挙動をデジタルビデオカメラで撮影することにより霜層周りの空気流れの観察を行った。実験条件は、ノズル初期霜層表面間距離とノズル幅の比 $H/B=10$ 、噴流出口空気速度 $U_B=20\text{m/s}$ 、噴流空气の相対湿度 $\phi_\infty=50\%$ 、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。

実験開始後10分の状態を示す(b)と初期状態(a)を比較すると、円管上方のよどみ点近傍で著しく霜層が減少している。この急激な霜層厚さの減少を引き起こす原因としては、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、また霜層が針状およ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考えられる。また、この霜層厚さの著しい減少のため、噴流が円管上方で左右に霜層より剥離する様子が観察された。続いて実験開始後20分の状態を示す(c)では、円管上部が露出し、噴流はその露出した円管部と減少した霜層に沿って横方向に流れ、剥離する。さらに実験開始後80分の状態を示す(d)では、すでに試験円管表面の約6割が露出しており、試験円管下部に若干の霜層を残すのみとなっている。また試験部の下方においては矢印

Fig.6 Details of test pipe for measuring temperature distribution in a frost layer

に示されるような後流が確認された。その後、この霜層は実験開始後164分で完全に消失し、除霜終了となる。

4・2 霜層の昇華蒸発の経時変化

図5は、霜層質量 M_f と噴流出口空気温度 T_∞ 、試験円管表面平均温度 T_p の経時変化を示したものである。ここで、 T_p は、それぞれ試験部の上部、下部、右部および左部における試験円管表面温度の平均値である。実験条件は図4で示した昇華蒸発挙動の場合と同様である。除霜開始直後、霜層質量は急激に減少している。これは前述の昇華蒸発挙動で確認されたとおり、試験円管のよどみ点近傍においての著しい霜層の減少のためである。また、時間の経過と共に霜層の減少は緩やかになっているが、これは時間の経過と共に霜層の表面粗さが小さくなっていること、衝突噴流が霜層の形状変化に伴い剥離しているためと考えられる。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いる。また、30分を越えると 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、およびよどみ点の露出により、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・3 霜層内部の温度分布

霜層は針状および樹枝状結晶構造を有している。そのため衝突噴流により霜層の昇華蒸発を行う場合、当然霜層内部においても昇華蒸発が生じ、除霜の促進が期待される。したがって、霜層内での昇華蒸発挙動を把握するために、霜層内部の温度分布の測定を行った。

図6は霜層内温度分布の測定位置を示したものである。図のように試験円管前部のよどみ点位置($\theta=0^\circ$)から噴流方向に対して、 $y=2.0, 4.0, 6.0, 8.0\text{mm}$ と2.0mm間隔で4ヶ所に素線径0.1mmのT型熱電対を設けてある。この熱電対を設けた試験部円管に着霜を行

Fig.7 Vertical temperature distribution in a frost layer

い、除霜実験を行った。

図7は円管前部よどみ点の鉛直方向での霜層内温度分布を示している。実験条件は $H/B=10$ 、噴流出口空気速度 $U_B=5\text{ m/s}$ 、初期霜層高さ $H_f=6.0\text{ mm}$ 、噴流空気の相対湿度 $\phi_\infty=70\%$ 、噴流出口空気温度 $T_\infty=268.2\text{ K}$ 、および初期霜層密度 $\rho_f=110\text{ kg/m}^3$ である。また、縦軸は試験円管表面を基準として鉛直方向を示しており、図中の斜線を伴う横線はそれぞれの除霜時間における霜層表面位置を表している。

除霜実験を開始して1分後には霜層内部の温度が約 1.5 K 程度低下していることがわかる。そして、時間の経過とともに試験円管近傍にわたる霜層温度の低下がみられ、霜層内部においても昇華蒸発が誘発されていることがわかる。また30分経過後に霜層表面近傍の温度上昇が確認される。これは霜層表面に噴流空気からの対流熱が流入していることに起因する。なお、円管表面が露出後も、前部よどみ点付近の温度が低いのは、周囲にある霜層の昇華に伴う吸熱の影響によるものと思われる。

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、衝突噴流空気と霜層間の熱収支の検討を行った。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。

$$Q_{cv} = Q_s + Q_f + Q_p \quad (1)$$

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。

Fig.8 Time history of Q

$$Q_s = L \cdot \Delta M_s \quad (2)$$

$$Q_f = M_f C_{pf} \Delta T_f \quad (3)$$

$$Q_p = M_p C_{pp} \Delta T_p \quad (4)$$

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_f 、 ΔT_p および 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8は、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6の場合と同様である。図8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用いられている。実験初期において対流伝熱量が大きな値を示しているのは、まだ霜層高さが十分大きいために、実質伝熱面積が大きいことが挙げられる。その後 Q_{cv} は緩やかに減少するが、これは試験円管の露出による伝熱面積の減少並びに衝突噴流が剥離し、霜層に直接噴流が接しなくなる部分が増大することによる。

4・5 霜の昇華による物質伝達の検討

本除霜系において、衝突噴流下で昇華蒸発する円環状霜層の除霜が完全に終了するまでには、二つの領域がある。第一の領域は、除霜開始から、前部よどみ点の霜層が昇華蒸発し試験円管表面が露出するまでであり、第二の領域は、試験円管が露出し、霜層が完全に消失する迄である。第二の領域では霜層の昇華蒸発が進むにつれて昇華面積が大きく減少するため、除霜挙動は複雑となる。そこで、実験データの整理に際して、よどみ点の試験円管表面が霜層に覆われ、昇華面積の変化の少ないところの前部よどみ点露出迄と、霜層が完全に消失し、除霜終了迄の二つの領域に分けて実測値の

Fig.9 Relationship between Sh and Re_B

整理を試みた。なお、よどみ点が露出するまでの時間的平均値を表す記号には $(\circ)$ を、除霜終了までの時間的平均値を表す記号には $(\bullet)$ つける。

よどみ点露出まで、および除霜終了までの平均シャーウッド数 Sh は次式で定義される。

$$Sh = \frac{h_D \cdot d_f}{D} = \frac{m_{Af}(d + 2H_f)}{(C_s - C_\infty)D} \quad (5)$$

ここで、 m_{Af} は実験開始から前部よどみ点露出迄、および除霜終了迄の平均霜層昇華蒸発質量流束、 C_∞ は噴流空気の水蒸気濃度、 C_s は霜層の平均温度における空気の飽和水蒸気濃度である。なお、 m_{Af} の算出において、霜層の見掛けの昇華面積 S には、霜層の存在する部分の投影面積を用いてあり、さらに D は空気の拡散係数で、代表長さ d_f は、 $d_f = d + 2H_f$ である。

図9は、噴流出口速度 U_B が物質伝達に及ぼす影響を、平均シャーウッド数 Sh 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。

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

図9より、 Re_B は円管衝突噴流⁽²⁾の場合よりも20～50%程度大きな値を示している。これは、霜層の表面粗さにより実質上の昇華面積が増大しているためと考えられる。また、円管衝突噴流の場合と比べ、 Re_B に対する Sh の変化が顕著であるが、これは、霜層が図3に示すような密度分布を有する針状および樹枝状結晶構造を有していることから、 Re_B が比較的大きい場合には、着霜円管近傍の密度の大きな霜層内部にも空気流れが生じ、昇華蒸発が誘発されるためと考えられる。

図10は、初期霜層密度 ρ_f が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

Fig.10 Relationship between Sh and ρ^* Fig.11 Relationship between Sh_0 and H_f/d_f

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為、実質上の昇華面積が減少することによる。

次に初期霜層高さ H_f が物質伝達に及ぼす影響を、前部よどみ点露出迄の場合を図11に、除霜終了までの場合を図12に示す。これらは Sh と初期霜層高さ H_f と代表長さ d_f との比との関係で示したものである。前部よどみ点露出迄の場合、 H_f/d_f の増大と共に、 Sh_0 の単調な増加が見られる。これは、 H_f/d_f の増大に伴う実質上の昇華面積の増加に加え、除霜中の霜層の形状変化による影響を大きく受けないためと考えられる。しかしながら、除霜終了迄の図12においては、 H_f/d_f の増大に対し、 Sh_C

Fig.12 Relationship between Sh_c and H/d_f Fig.13 Relationship between Sh and H/B

が緩やかに減少することが分かる。これは、 H/d_f の増大に伴い、除霜中の霜層の形状変化が大きくなることによって、試験円管の前部よどみ点露出後衝突噴流が霜層から剥離し、昇華蒸発が抑制されることによる。

図13は、 Sh と H/B との関係を示したものである。 H/B の増加に対し Sh が減少することが分かる。これは、 H/B が増加するに伴い、噴流の状態⁽⁷⁾がポテンシャルコア領域、遷移領域そして発達領域へと変化し噴流が広がり、また噴流の霜層到達速度も減少することによる。そして、除霜終了迄の Sh_c は、前部よどみ点の円管表面露出迄の場合である Sh_0 に比べて、 H/B の影響は小さい。この原因としては H/B が大きい場合、霜層に到達する迄に噴流空気が大きく広がり、円環状霜層全体で昇華蒸発が誘発されて、噴流の霜層到達速度低下の影響が相殺されたものと考えられる。

実際に霜層が昇華蒸発する際の表面温度は、霜層が

Fig.14 Relationship between Sh and Gu

針状および樹枝状構造であること、さらに内部での昇華蒸発を伴うため表面温度が常に一定でないこと等の理由から、厳密に求めることは困難である。そこで衝突噴流の霜層への到達温度 T_a と試験円管表面平均温度 T_p から、霜層表面温度を代表する温度として文献⁽⁸⁾に基づいて、次式のような無次元温度であるグーマン数 Gu を本実験整理に採用した。グーマン数は、霜の昇華蒸発に影響を及ぼす空気側の熱移動に対する霜層側の熱移動の割合と見なせる。

$$Gu = \frac{T_a - T_p}{T_a} \quad (8)$$

ここで、 T_a は衝突噴流空気が着霜円管の前部よどみ点に到達した時点での温度を示している。なお、霜層表面よどみ点温度 T_a の値は、図6に示す霜層内の温度分布の測定結果から外挿して求めた。図14は、噴流到達温度 T_a が物質伝達に及ぼす影響を、平均シャーウッド数 Sh とグーマン数 Gu との関係で示したものである。

図のように Gu が増大すると Sh が増大している。これは昇華蒸発を誘発する霜層表面付近の温度 T_a が高いと、霜層の飽和水蒸気濃度が上昇するために物質伝達の駆動力が増大するためである。

以上に述べた前部よどみ点の円管表面露出迄の平均シャーウッド数 Sh_0 、および除霜終了までの平均シャーウッド数 Sh_c 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に誘導した。

$$Sh_0 = 3.68 \times 10^{-2} Re_B^{1.16} \rho^{*-0.79} \times (H_f/d_f)^{0.89} (H/B)^{-0.23} Gu^{0.20} Sc^{1/3} \quad (9)$$

$$Sh_c = 7.38 \times 10^{-2} Re_B^{0.90} \rho^{*-0.41} \times (H_f/d_f)^{-0.12} (H/B)^{-0.09} Gu^{0.31} Sc^{1/3} \quad (10)$$

なお平均偏差は、よどみ点露出までの場合 $\pm 14.0\%$ 、除

霜終了までの場合 $\pm 9.8\%$ である。また、従来の実験結果を参考に、シュミット数 Sc の指数には $1/3$ 乗を用いている。

5. 結 論

本研究では、冷却円管に発達した霜層を用いて衝突噴流と昇華蒸発現象を利用した除霜装置にて除霜実験を行い、噴流中におかれた円環状霜層の昇華蒸発挙動を実験的に検討した。その結果、霜層の昇華蒸発挙動に及ぼす諸因子の影響を明らかにし、次のような結論を得た。

- (1) 衝突噴流と昇華蒸発現象を利用した円環状霜層の除霜において、可視化実験により除霜過程における霜層の形状変化、霜層周りの流れの様子を観察し、霜層の形状変化が噴流の流れに大きな影響をもたらす様子が明らかとなった。
- (2) 霜層が昇華蒸発する際の霜層内における温度変化を測定し、霜層内部で温度が低下していることから昇華蒸発が誘発されていることを確認した。
- (3) 霜層の昇華蒸発に影響を及ぼす諸因子について、霜層質量および熱収支の時間的変化の挙動を把握した。
- (4) 前部よどみ点の円管表面が露出する迄の物質伝達率、および除霜が終了する迄の物質伝達率間に関する無次元整理式の提案を行い、噴流出口速度、噴流水蒸気濃度、噴流到達温度、初期霜層密度、初期霜層高さ、ノズル霜層表面間距離の無次元パラメータを用いた実験整理式の誘導に成功した。

文 献

- (1) 菅原征洋, ほか4名, 機論, 56-531, B(1990), 3457.
- (2) 熊田雅弥, ほか2名, 機論, 38-315, B(1972), 2915.
- (3) M. Kochs, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 36, No. 7(1993), 1727.
- (4) 稲葉英男・今井誠士, 機論, 61-585, B(1995), 1818.
- (5) 稲葉英男・今井誠士, 機論, 61-586, B(1995), 2261.
- (6) 稲葉英男・今井誠士, 機論, 63-607, B(1997), 1000.
- (7) 稲葉英男, ほか3名, 第33回日本伝熱シンポジウム講演論文集, (1996-5), 535-536.
- (8) B.M.Smolsky, G.T.Sergeyev, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 5, (1962), 1011.