

衝突噴流下にさらされた水平霜層の昇華蒸発に関する実験的研究*

稲葉 英男^{*1}, 今井 誠士^{*2}

Study on Sublimation Phenomenon of a Horizontal Frost Layer Exposed to Impinging Jet Flow

Hideo INABA and Seishi IMAI

The present study deals with a new defrosting measure by means of the frost sublimation phenomenon. The frost sublimation phenomenon occurs below the triple point of water (273.16 K, 610.5 Pa). The present experimental study has focused on the mass transfer rate of a horizontal frost layer exposed to an impinging jet flow. It is understood that the mass flux of the frost layer increases with increasing jet flow velocity and water vapor mass concentration difference between the frost and an impinging jet flow. The nondimensional correlation equations of mass transfer, heat transfer and finishing time of defrosting have been derived as a function of various parameters.

Key Words: Sublimation, Defrosting, Frost Layer, Impinging Jet, Moist Air

1 緒言

冷凍機の蒸発器などの低温熱交換器への着霜は、熱交換器の熱抵抗を著しく増大させ、その性能の低下をもたらすことより、着霜した熱交換器の性能維持のためには除霜運転が必要となる。従来から行われている逆サイクルを用いた霜層の融解による除霜は、発生した融解水の除去や除霜運転期間中の採冷熱操作の停止などの欠点を有する。従って、冷凍食品など効率的品温維持に対して、これらの欠点を克服する新たな除霜方法が求められている。著者らは、昇華蒸発現象(ここでは、霜から直接水蒸気へ相転移することを昇華蒸発と呼ぶ)を利用した新しい除霜方法の提案を行っており、水平霜層が平行に流動する湿り空気さらされた場合の霜層の昇華蒸発に関して、放射熱エネルギーの照射による昇華蒸発の促進も含めて、その除霜挙動を明らかにした^{(1), (2)}。本報では、霜層の昇華蒸発完了時間の短縮など、さらに効率的な昇華蒸発による除霜法を確立する目的から、霜層に対して垂直に湿り低温空気を吹き付ける、いわゆる衝突噴流にさらされた水平霜層の昇華蒸発を利用した除霜挙動を検討するものである。衝突噴流の平滑平板に対する物質伝達や熱伝達については、Gardon - Akfirat^{(3), (4)}や熊田ら^{(5), (6)}によって、二次元平滑平板の垂直衝突噴流のよどみ点近傍における物質伝達特性が評価されている。

本研究で検討する昇華蒸発による除霜系は、水平平滑板上の霜層に二次元衝突噴流を上部から垂直に吹き付けた場合を対象としたもので、霜の昇華蒸発に影響を及ぼす諸因子の効果を実験的に検討するものである。すなわち、衝突噴流下にさらされた水平霜層の昇華蒸

発現象に影響を及ぼす二次元ノズル噴流出口速度 U_b 、二次元ノズル位置と霜層表面との距離 H とノズル幅 B との比 H/B 、噴流湿り空気温度 T_∞ 、相対湿度 ϕ_∞ の効果を実験的に検討するものである。

2 実験装置および方法

Fig. 1は実験装置の概略を示したものである。可変インバーター式ブロワー(最大吐出圧力 2.1 kPa, 風量 0.5~25 m³/min)で駆動された流動湿り空気は、Fig. 1に示すアクリル板で構成された圧力室に流入し、圧力室下部の二次元ノズルより噴出する。二次元ノズルは幅 $B = 10$ mm, 長さ 400 mm の矩形断面を有する

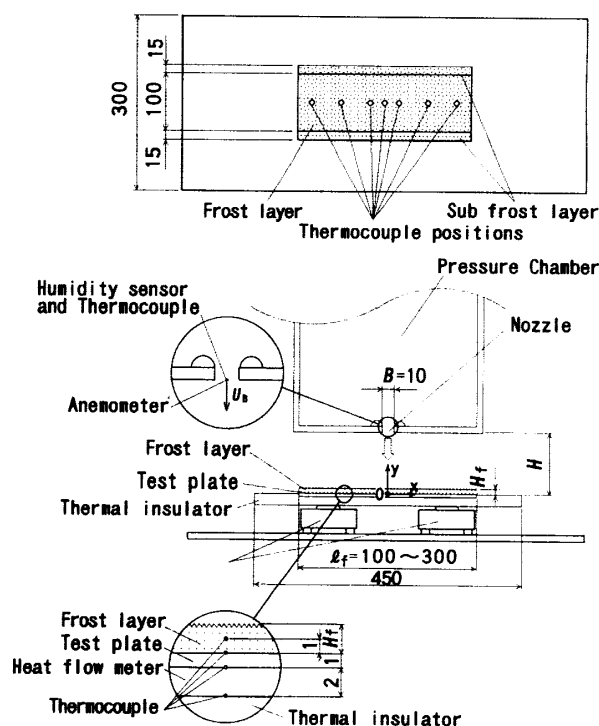


Fig.1 Schematic diagram of experimental apparatus

* 原稿受付 1996年2月23日。

^{*1} 正員, 岡山大学工学部(〒700 岡山市津島中3-1-1)。^{*2} 正員, 松下冷機(株)コイル事業部(〒525 草津市野路町2275)。

構造で、先端部は半径 14.0 mm の円弧部と 5.0 mm の平行部からなり、ほぼ一様な二次元出口空気速度分布を得ることができる。噴出口における軸線上の乱れ強さは二次元噴出口空気レイノルズ数 $Re_s = 2.21 \times 10^4$ で 1.2 % 程度である。湿り空気の噴出口速度 U_s は、測定精度 ± 0.034 m/s の熱線風速計にて測定され、そして噴出口の湿り空気温度は測定精度 ± 0.05 K の素線径 0.1 mm の K 型熱電対により測定される。なお、噴出口部の熱線風速計と K 型熱電対は、いずれも水平方向にトラバース可能である。二次元ノズルと霜層表面との距離 H は可変可能で、 H/B を $1 \leq H/B \leq 50$ の範囲で、無段階に設定することができる。湿り空気の相対湿度 ϕ_∞ は、測定精度 ± 0.1 °C の鏡面冷却式露点計によって測定された露点温度より算出した。

実験試料としての霜層の形成は前報⁽¹⁾と同様の着霜槽内で行い、着霜板表面温度、周囲空気温度を任意の値に設定し、霜層の成長時間を制御することにより、霜層密度、霜層高さの制御を行っている。着霜板は長さ 300 mm × 幅 100 mm × 厚さ 1 mm の銅板を用い、着霜板表面には、放射エネルギーの影響を極力軽減させるため、黒体塗料(放射率 $\varepsilon = 0.98$)を塗布してある。対象とする霜層は霜層成長期におけるものである。初期における霜層平均高さ H_{fin} は、約 20 箇所の位置で測定された着霜板から霜層先端までの垂直距離の平均値で定義する。霜層高さの計測後、着霜板は Fig. 1 における試験台上に水平に設置される。着霜板下部は試験台を構成しているスタイロフォーム断熱材により断熱しており、着霜板と下部の断熱材との間には、厚さ 2.0 mm の熱流束計(測定熱流束精度 ± 1.8 W/m²)を設置し、霜層から着霜板を介して、流入出する微小熱量を計測してある。実験開始前の霜層の昇華蒸発を極力避けるため、霜層と周囲空気の初期温度は同一に設定する。設置された水平霜層の温度および背面の銅板等の温度がほぼ同一であることを確認した後、衝突噴流による昇華蒸発実験が開始される。霜層の昇華蒸発量の測定は 0.50 ~ 1.0 分の一定間隔ごとに噴流を停止して、電子天秤上に設置された試験台と着霜板および霜層の質量を測定し、その変化量から求めた。この場合の霜質量の測定精度は ± 0.5 mg である。尚、質量測定のための噴流の停止時間総計は実験時間全体の 2 % 以内であり、噴流停止中の拡散による昇華蒸発量は無視することができる。また、噴出口から霜層表面までの距離 H は霜質量測定時に、噴出口とよどみ点における霜層表面とを基準として一定に保持される。

実験装置全体は $-20 \sim +15$ °C の温度範囲で制御可能な実験室に設置されている。

実験は以下の範囲で行った。初期霜層高さ $H_{fin} = 2.0 \sim 12.0$ mm, 霜密度 $\rho_f = 90 \sim 180$ kg/m³, 噴流空気温度 $T_\infty = 253.2 \sim 271.2$ K ($-20.0 \sim -2.0$ °C), 噴流空気の相対湿度 $\phi_\infty = 25 \sim 95$ %, 噴出口速度 $U_s = 10.0 \sim 45.0$ m/s.

3 実験結果および考察

3.1 霜層の昇華蒸発挙動

霜層の最大の特徴は、表面粗さを伴う樹枝状結晶構造を有することにある。従って、霜層の実際の昇華面積は、着霜板投影面積よりも大きくなる。この昇華面積を評価するため、霜層の表面粗さを定義することとする。ここでは、霜層の表面粗さ R を表面粗さの山の先端 H_{fmax} と谷の底 H_{fmin} との垂直距離 ($H_{fmax} - H_{fmin}$) で定義する⁽¹⁾。測定位置は、Fig. 1 に示すよどみ点 ($x = 0$) である。本実験範囲では着霜後、初期の霜層表面粗さ R は 0.5 mm 程度である。その後、昇華蒸発の進行に伴い表面粗さは減少し、最終的には 0.1 mm 程度で一定となる。

Fig. 2 は、よどみ点における噴流空気の霜層内流動様式を示したものである。Fig. 2 に示すような複雑な氷結晶構造を有する霜層に対して、衝突噴流下での昇華蒸発による除霜の特徴としては、まず衝突噴流により高い物質伝達率を得ることが可能となるため、局所的に大きな除霜効果を期待することができる。加えて、Fig. 2 に示すように噴流の衝突噴流領域⁽⁶⁾に霜層がさらされる場合は、霜層の樹枝状結晶構造も流れの乱れを助長し、昇華蒸発を促進することになる。

Fig. 3 ~ Fig. 6 は衝突噴流により昇華蒸発する霜層の形状を示したもので、Fig. 3 ~ Fig. 5 はいずれも Fig. 2 に示す霜層のよどみ点近傍における霜層の断面形状である。Fig. 3 は霜層の初期状態(霜層成長期の霜形状)を示す。実験条件は噴出口速度 $U_s = 45.0$ m/s, 噴流空気温度 $T_\infty = 268.2$ K, 相対湿度 $\phi_\infty = 60$ %, 霜密度 $\rho_f = 130 \pm 10$ kg/m³, 初期霜層高さ $H_{fin} = 5.0$ mm, 二次元ノズルと霜層表面と距離 $H = 100$ mm である。Fig. 4 は実験開始後 $t = 1.0$ 分の場合を示す。

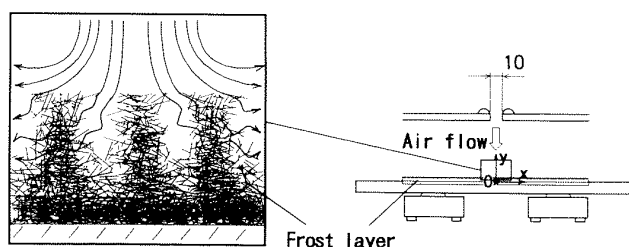


Fig.2 Air flow regime in the frost layer at the stagnation point

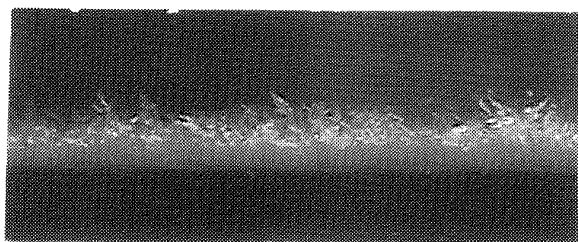
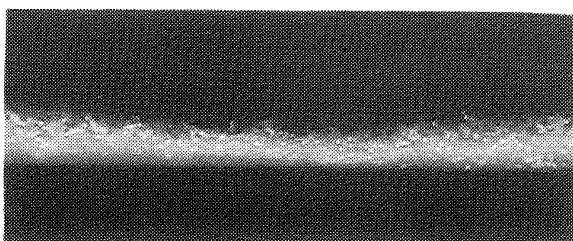
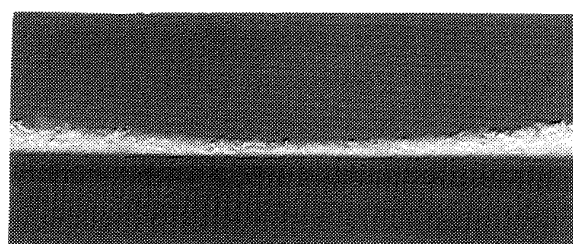


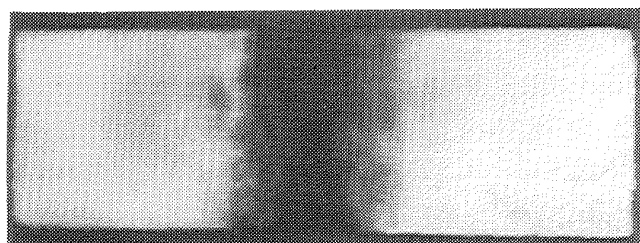
Fig.3 Initial shape of the frost layer
($t = 1.0$ min, $R = 0.5$ mm)



($U_a = 45$ m/s, $R = 0.2$ mm)
Fig.4 Shape of the frost layer ($t = 1.0$ min)



($U_a = 45$ m/s, $R = 0.1$ mm)
Fig.5 Shape of the frost layer ($t = 5.0$ min)



($U_a = 45$ m/s)
Fig.6 Upper side shape of the frost layer ($t = 10.0$ min)

Fig. 3の初期状態と比較すると、初期では $H_{fin} = 5.0$ mm であった霜層高さが、よどみ点近傍では $H_f = 2.0$ mm となり、わずか 1.0 分で 3.0 mm の霜層高さの減少となる。この初期段階における急激な霜層高さの減少を引き起こす原因としては次のようなことが考えられる。まず第一に、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、第二に霜層が、乱流せん断流中にあるため、Fig. 2に示す様に、空気流れが霜層の樹枝状結晶構造の中にまで透過し、霜層表面だけでなく霜層内部からも昇華蒸発が誘発されている可能性が高いこと、さらに第三に、霜層が垂直方向に密度分布を有し、表面近傍においては比較的密度が小さな構造となっているため、昇華蒸発の初期段階には、

霜層高さの変化割合が大きくなることなどが考えられる。Fig. 5に示す $t = 5.0$ 分の場合では、よどみ点における霜層高さは極めて小さくなり、 $H_f = 0.5$ mm となる。この実験条件では $t = 8.2$ 分でよどみ点が露出し始めることとなった。以上の観察結果から、霜層高さの変化割合は経時変化が極めて大きく、このことは、霜層の垂直方向密度分布が大きいことを示唆していることと、衝突噴流下では、よどみ点における除霜効果が極めて大きくなることが明らかとなった。

また、Fig. 6は、 $t = 10$ 分の段階における霜層の上面からの全体様相を示したものである。この段階になると、昇華蒸発の進行と共に物質伝達の大きなよどみ点近傍から霜層が消失し、着霜板が露出することとなる。なお、噴出空気流速 $U_a = 45$ m/s の条件においては、噴流の霜層への衝突による霜結晶の剥離飛散量は、飽和状態の噴流空気を用いた結果より、Fig. 3～5に示すよどみ点での着霜板の露出までの時間と同じ昇華蒸発実験に対して、約2%程度と少ないものであった。

3.2 霜層の昇華蒸発の経時変化

Fig. 7は霜層の昇華蒸発量 M_s の経時変化を噴出口速度 U_a をパラメータとして示したものである。実験条件は噴流空気温度 $T_\infty = 268.2$ K (-5.0 °C)、相対湿度 $\phi_\infty = 60$ %、初期霜層平均高さ $H_{fin} = 5.0$ mm、霜長さ $l_f = 0.10$ m、霜密度 $\rho_f = 130 \pm 10$ kg/m³ である。実験開始後、よどみ点から着霜板は露出し始め、これより後は霜層長さが次第に減少していくことになる。Fig. 7中の矢印はよどみ点が露出した段階を示すものである。着霜板の露出後は霜層長さの減少に伴い、昇華蒸発量の変化割合も次第に減少する傾向となる。 U_a の増大とともに、昇華蒸発が促進され、 $U_a = 45$ m/s の場合では、 $t = 17$ 分で霜層は完全に消失

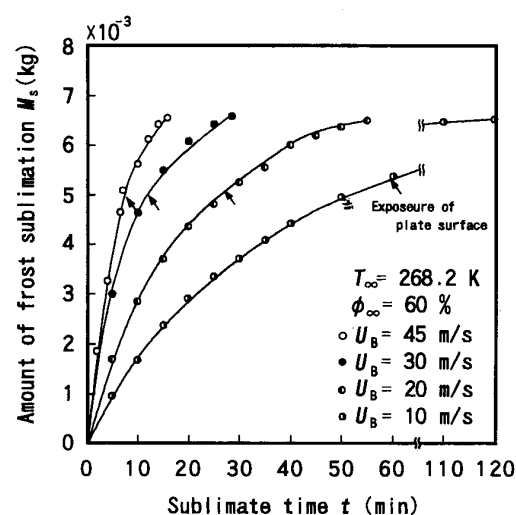
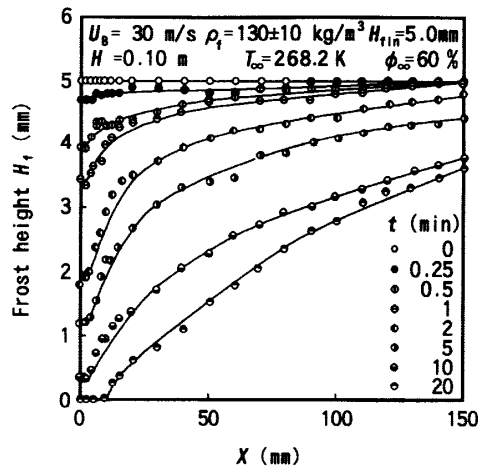


Fig.7 Time history of amount of frost sublimation M_s

Fig. 8 Time history of the frost height H_f

することとなる。

Fig. 8は、よどみ点を起点としたFig. 1に示す霜層の水平方向距離 x の霜層高さの分布の経時変化を示したものである。実験条件は、 $H_{f,in} = 5.0$ mm, $\rho_f = 130 \pm 10$ kg/m³, $T_\infty = 268.2$ K, $\phi_\infty = 60$ %, $U_b = 30$ m/s, $H/B = 10$ である。霜層高さ H_f は、霜層先端と着霜板表面との平均垂直距離で定義し、一定時間ごとに霜層の断面写真を撮影して、その写真から間接的に測定した。Fig. 8より、霜層高さの減少傾向には、よどみ点近傍の衝突噴流領域と、よどみ点から一定距離以上離れた壁噴流領域の二つの領域の間はかなり明確な差のあることがわかる。まず、よどみ点近傍においては、霜層高さ H_f が周辺と比較して急激に減少しており、物質伝達率が極めて大きいことになる。すなわち、衝突噴流を樹枝状結晶構造を有する霜層の昇華蒸発に用いた場合、境界層流れが形成されないよどみ点近傍での物質伝達率が極めて大きくなる。したがって、局所的な除霜に衝突噴流は極めて有効であると言える。一方、よどみ点近傍から離れると、衝突噴流領域から壁噴流領域への遷移⁽⁶⁾に伴って霜層高さは急激に増大し、そして壁噴流領域では、 x の増大に伴い霜層高さは緩やかに増大することとなる。また、霜層高さ H_f の減少速度(Fig. 8の時間に対する H_f の勾配)についてその傾向を観察すると、霜層全体にわたって、次のような傾向を有する。まず実験開始初期において、霜層高さの減少速度は非常に大きく、そして H_f の急激な減少となる。その後、表面近傍の低密度な霜層部分の昇華蒸発が終了し、そして、霜層高さの小さい領域での霜層高さの減少速度は急激に小さくなり、最終的に $H_f = 0$ mm となるまで減少速度は漸減することになる。

3.3 無次元整理

3.3.1 物質伝達の整理

実験データの整理に際して、局所的な実験値を求めることは本実験において不可能なため、平均値を用いることとする。また、昇華蒸発現象は時々刻々変化する複雑なものとなるため、時間平均したデータを用いて結果の検討を行う。

Fig. 9は、シャーウッド数 Sh と二次元ノズル幅 B と二次元ノズルと霜層表面との距離 H との比 H/B との関係を示したものである。

Sh 数を算出する際の物質伝達率 h_m (m/s) およびシャーウッド数 Sh は次式(1), (2)で定義される。

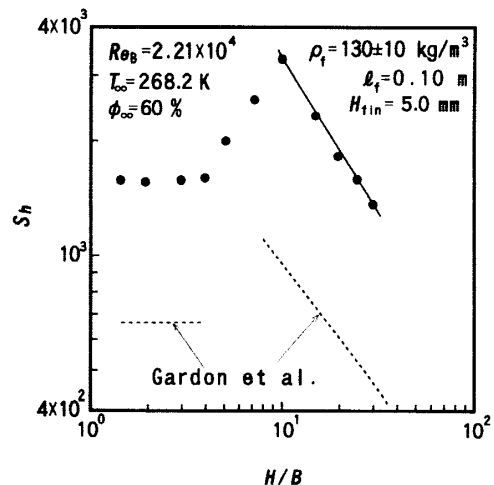
$$h_m = \frac{m_{A,t}}{C_s - C_\infty} \quad \dots(1)$$

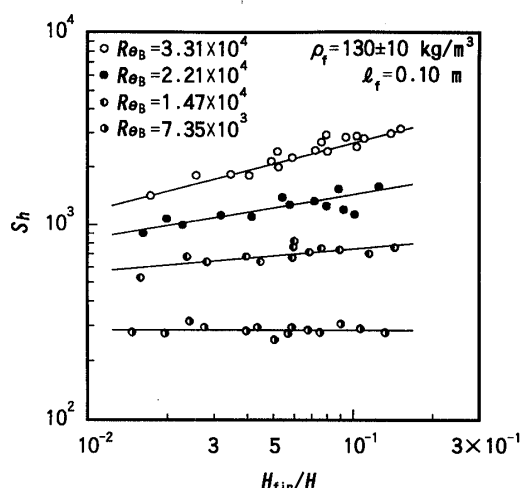
$$Sh = \frac{h_m \ell_f}{D} = \frac{m_{A,t} \ell_f}{(C_s - C_\infty) D} \quad \dots(2)$$

ここで、 C_∞ (kg/m³) は噴流空気の水蒸気質量濃度、 C_s (kg/m³) は霜層の飽和水蒸気質量濃度である。 C_s はよどみ点における着霜板表面温度から導かれる飽和水蒸気温度より求めた。 D は拡散係数である。また、二次元噴出口空気レイノルズ数 Re_B を次式(3)で定義する。

$$Re_B = \frac{U_b B}{\nu} \quad \dots(3)$$

Fig. 9より、霜層が衝突噴流下で昇華蒸発する場合についても H/B が物質伝達に大きな影響を及ぼすことがわかる。 H/B に対する Sh 数の変化は顕著に見られ、 $H/B \approx 10$ で最大値を示すことがわかる。 Sh 数の H/B に対する定性的な傾向は、平滑平板の結果^{(3), (7)}とほぼ一致し、 $H/B \approx 10$ 程度が、最も除

Fig. 9 Relationship between Sh and H/B


Fig. 10 Relationship between Sh and H_{fin}/H

霜効率が高いと言える。定量的な結果としては、平滑平板に対する Gardon⁽³⁾の結果よりかなり大きな値となる。これは、平滑平板の場合と異なり、霜層内部にまで流れが生じ、霜層内部の昇華蒸発が誘発されているためと考えられる。この結果を踏まえ、以後は、二次元ノズル配置として $H/B = 10$ の場合について検討するものとする。

Fig. 10は、霜層高さが物質伝達に及ぼす影響を、シャーウッド数 Sh と初期霜層高さ H_{fin} と二次元ノズルと霜層表面との距離 H との比 H_{fin}/H との関係で示したものである。実験条件は初期霜層平均高さ $H_{fin} = 2.0 \sim 12.0$ mm, 霜密度 $\rho_f = 130 \pm 10$ kg/m³, 霜長さ $l_f = 0.10$ m である。ここでは、特に物質伝達率に対する霜層高さの影響を把握するため、着霜板表面温度測定点が噴流中にさらされていない、よどみ点が露出する以前の物質伝達について整理することとする。Fig. 10より、 H_{fin}/H の増大に伴い、シャーウッド数 Sh が増大することがわかる。その増大傾向については、噴出口空気速度が比較的高いレイノルズ数 $Re_B = 3.31 \times 10^4$ の場合では、 Sh 数は H_{fin}/H に対して大きな依存性を示す。 Re_B が減少すると、 H_{fin}/H に対する Sh 数の増加割合は減少する傾向となる。そして、 $Re_B = 7.35 \times 10^3$ の場合では、 H_{fin}/H の Sh 数に対する影響は、ほとんどなくなる。この傾向は、霜層内部に空気流れが生じていることを示すものと言える。霜層は垂直方向に大きな密度分布を有する樹枝状結晶構造を有しており、 Re_B が比較的大きい場合には、着霜板近傍の霜密度の大きな部分にも空気流れが生じ、昇華蒸発が誘発されるものと考えられる。従って、 Re_B が大きい場合には、霜層高さの増大が霜層内部からの昇華蒸発量の増大を招き、 Sh 数が増大する

こととなる。これに対し、 Re_B が比較的小さい場合には、着霜板近傍における霜層の高密度部分での空気流れは小さなものになると考えられる。従って、昇華蒸発は主に霜層表面近傍で誘発されることとなり、 H_{fin} が Sh 数に及ぼす影響が小さくなると考えられる。

Fig. 11は、噴出口空気速度が物質伝達に及ぼす影響を、シャーウッド数 Sh と二次元噴出口空気レイノルズ数 Re_B との関係で示したものである。実験条件は初期霜層平均高さ $H_{fin} = 5.0$ mm, 霜密度 $\rho_f = 130 \pm 10$ kg/m³, 霜長さ $l_f = 0.10 \sim 0.30$ m である。ここでは、従来の平滑平板における物質伝達特性⁽⁷⁾との比較を行うため、よどみ点が露出するまでの物質伝達を対象として整理した。霜層の飽和温度は、よどみ点の着霜板表面温度で代表してある。Fig. 11より、 Re_B 数の増大に伴い物質伝達が促進され、 Sh 数が増大することとがわかる。その増大傾向は、 Sh 数の Re_B 数への依存性を示す Re_B^n の指数 n が霜長さ l_f によらず一定となる。 Sh 数と Re_B 数との関係は実験データと平均偏差 6.7 % で次式のように整理できる。

$$Sh = 4.01 \times 10^{-3} \alpha_1 \left(\frac{l_f}{H} \right)^{0.638} Re_B^{1.34} \quad (4)$$

但し、 $7.35 \times 10^3 \leq Re_B \leq 1.47 \times 10^4$ の場合

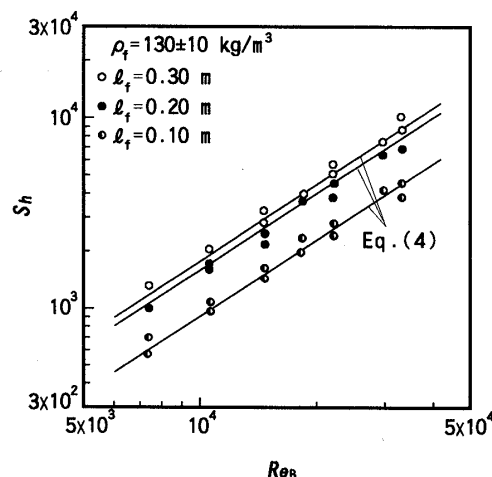
$$\alpha_1 = 1.0$$

$1.47 \times 10^4 < Re_B \leq 3.31 \times 10^4$ の場合

$$\alpha_1 = 4.06 \times 10^{-4} Re_B^{0.85} \left(\frac{H_{fin}}{H} \right)^{3.88 \times 10^{-7} Re_B^{1.30}}$$

$$\text{適用範囲: } \frac{l_f}{H} = 0.5 \sim 3.0, \quad \frac{H_{fin}}{H} = 2.00 \times 10^{-2} \sim 1.2 \\ \times 10^{-1}, \quad Re_B = 7.35 \times 10^3 \sim 3.31 \times 10^4$$

ここで、 α_1 は、Fig. 10で示した霜層高さが Sh 数


Fig. 11 Relationship between Sh and Re_B

に及ぼす影響を加味した係数である。平滑平板における物質伝達では、よどみ点における Sh 数の Re_B^n 数への依存性を示す指数は、 $n = 0.50 \sim 0.58$ 、壁噴流領域については、 $n = 0.80$ で整理できる⁽⁷⁾。すなわち、平滑平板と比較すると霜層はかなり大きな Re_B 数への依存性を有していることになる。衝突噴流領域において、 Re_B 数が小さい場合には霜層表面近傍の低密度部分しか空気流れが浸透せず、 Re_B 数が増大すると着霜板近傍の霜層の高密度部分にも流れが生じて昇華蒸発が誘発され、その結果として、 Sh 数の Re_B 数への依存性が大きくなるためと考えられる。

次に、霜層が完全に昇華蒸発し、除霜が完了するまでの物質伝達について整理を試みる。この場合、着霜板表面の温度測定点は、昇華蒸発の進行と共に噴流空気中にさらされ、その温度は噴流空気温度へと変化する。従って、式(2)で定義したよどみ点の着霜板表面温度を基準とする Sh 数を用いることには無理がある。本来のシャーウッド数の定義では、霜層の昇華蒸発界面温度のから算出される水蒸気質量濃度を計測して物質伝達の駆動力とすべきであるが、本実験のように、霜層が表面粗さを有し、流体力学的にも衝突噴流という複雑な挙動を示す系を取り扱う場合に、よどみ点以外の代表温度を決定することは困難であるし、また、霜層全体にわたる平均温度を決定しても、実際に適用する場合の煩雑さは避けがたい。除霜が完全に終了するまでの物質伝達を整理するにあたっては、式(5)に示す修正シャーウッド数 Sh_c^* を用いることとする。

$$Sh_c^* = \frac{h_D^* \ell_f}{D} = \frac{m_{A,f} \ell_f}{(C_{s,f} - C_{\infty}) D} \quad \dots(5)$$

ここで、 $C_{s,f}$ (kg/m^3) は噴流空気温度 T_{∞} で定義される飽和水蒸気質量濃度、 h_D^* は修正物質伝達率である。すなわち、 Sh_c^* および h_D^* は、噴流空気温度における飽和水蒸気質量濃度と、噴流の水蒸気質量濃度との差を駆動力として定義される。この定義の物理的な意義を検討する。まず、衝突噴流下で昇華蒸発が誘発されると、霜層の温度が低下して、昇華潜熱は噴流空気から供給されることとなる。このときのよどみ点の着霜板表面温度の温度降下は湿度条件により異なるが、 $0.5 \sim 3.0^\circ\text{C}$ である。霜層下部が断熱されていることを考えると、霜層の昇華蒸発界面もこれに近い温度と予測できる。すなわち、霜層の温度は噴流空気温度より高くはなり得ず、 $C_{s,f} - C_{\infty} > C_s - C_{\infty}$ となる。したがって、 Sh_c^* および h_D^* は、与えられた噴流空気温度、相対湿度から考えられる最大の水蒸気質量濃度差で定義されることとなる。

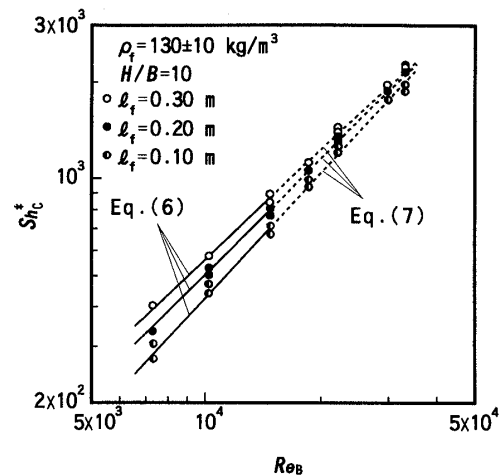


Fig.12 Relationship between Sh_c^* and Re_B

Fig. 12は、修正シャーウッド数 Sh_c^* と二次元噴出口空気レイノルズ数 Re_B との関係を示したものである。実験条件は、霜密度 $\rho_f = 130 \pm 10 \text{ kg/m}^3$ 、初期霜層平均高さ $H_{fin} = 5.0 \text{ mm}$ 、霜長さ $\ell_f = 0.10 \sim 0.30 \text{ m}$ である。 Re_B の増大に伴い、 Sh_c^* が増大することとなるが、前掲のFig. 11の着霜板が露出する前までの整理とは異なり、初期の霜長さ ℓ_f により、 Sh_c^* 数の Re_B 数への依存性を示す Re_B^n の指数 n は変化する。その傾向は、 ℓ_f の増大に伴い n は減少し、霜層に平行に空気を流動させた前報の結果⁽¹⁾の乱流域の傾きに近づくこととなる。また、わずかではあるが、 $Re_B > 1.47 \times 10^4$ の場合では、初期霜層平均高さ H_{fin} が物質伝達に影響を及ぼすことが明らかとなった。霜層が完全に昇華蒸発するまでの物質伝達に対する実験整理式は、実験データと平均偏差 5.5 % で次式(6)、(7)のように整理できる。

$$7.35 \times 10^3 \leq Re_B \leq 1.47 \times 10^4$$

$$Sh_c^* = 2.81 \times 10^{-3} \left(\frac{\ell_f}{H} \right)^{1.72} Re_B^{0.52} Sc^{1/3} \quad \dots(6)$$

$$1.47 \times 10^4 < Re_B \leq 3.31 \times 10^4$$

$$Sh_c^* = 9.10 \times 10^{-7} \left(\frac{\ell_f}{H} \right)^{1.72} Re_B^{(\alpha_2 + 0.872)} Sc^{1/3} \left(\frac{H_{fin}}{H} \right)^{\alpha_3} \quad \dots(7)$$

$$\text{但し, } \alpha_2 = 1.31 \left(\frac{\ell_f}{H} \right)^{-0.129}$$

$$\alpha_3 = 3.64 \times 10^{-2} Re_B^{0.322} - 0.68$$

$$\text{適用範囲: } \frac{\ell_f}{H} = 0.5 \sim 3.0, \quad \frac{H_{fin}}{H} = 2.00 \times 10^{-2} \sim 1.2 \times 10^{-1}$$

尚、シュミット数 Sc は次式(8)で定義する。

$$Sc = \frac{\nu}{D} \quad \dots(8)$$

3.3.2 対流伝熱量の整理

ここまで衝突噴流下における昇華蒸発による除霜の物質伝達について検討してきた。この除霜系では、昇華蒸発に必要とされる昇華潜熱は、ほとんど噴流空気からの対流入熱により供給される。ここでは、噴流空気から霜層へ流入する対流伝熱量の検討を行う。

衝突噴流下で昇華蒸発する霜層の除霜が完全に終了するまでには、前述のように、二つの段階がある。対流伝熱量を検討するにあたって、よどみ点の着霜板表面が霜層に覆われている第一段階では、噴流空気とよどみ点との温度差を代表温度として、熱通過率 h を定義することができる。しかしながら、よどみ点の着霜板表面が露出する第二段階では、このような代表温度を決定することができない。従ってここでは、第二段階の対流熱流束 q_{cvr} (W/m^2) を、前述の h から算出することのできる第一段階の対流熱流束 q_{cvo} (W/m^2) で無次元化して整理する。第二段階において、霜層の平均温度と噴流空気温度との差を熱伝達の駆動力として定義することも考えられるが、実際に適用する場合の煩雑さと、第二段階で霜層の昇華蒸発面積が減少することから、平均温度の妥当性にも疑問が残るため、上述の手法を採用することとする。

まず、第一段階における熱伝達の実験整理式を誘導する。昇華蒸発量潜熱量 Q_s (W) は、昇華蒸発質量流束 $\dot{m}_{Af}$ ($kg/(m^2 \cdot s)$) より次式(9)のように表される。

$$Q_s = \dot{m}_{Af} \cdot L \cdot S \quad \dots(9)$$

霜層の昇華蒸発潜熱量 Q_s は、噴流空気からの対流伝熱量 Q_{cvo} 、着霜板下部からの伝導伝熱量 Q_{cd} 、霜層の顕熱量 Q_{cpi} 、着霜板の顕熱量 Q_{cpt} 、熱流束センサの顕熱量 Q_{cpp} の総和となる。従って、空気からの対流入熱量 Q_{cvo} は次のように表される。

$$Q_{cvo} = Q_s - Q_{cd} - Q_{cpi} - Q_{cpt} - Q_{cpp} \quad \dots(10)$$

実験開始時からよどみ点が露出するまでの第一段階について、熱通過率 h およびヌセルト数 Nu を次式で定義する。

$$h = \frac{Q_{cvo}}{(T_{\infty} - T_w) \cdot S} = \frac{q_{cvo}}{(T_{\infty} - T_w)} \quad \dots(11)$$

$$Nu = \frac{h \cdot \ell_f}{k_{cd}} \quad \dots(12)$$

ここで、 T_w はよどみ点における着霜板表面温度、 k_{cd} は噴流空気の熱伝導率である。Fig. 13は実験開始

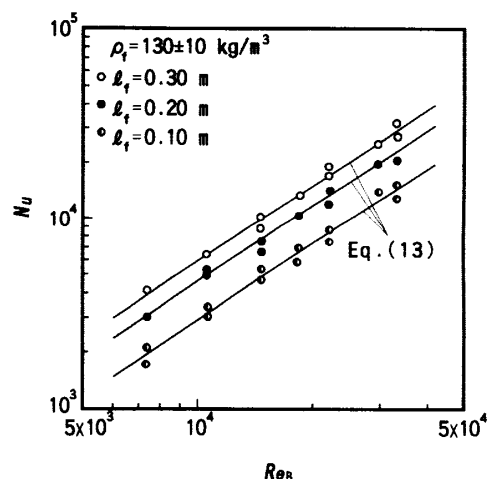


Fig.13 Relationship between Nu and Re_b

時から、よどみ点の着霜板表面が露出するまで上述の第一段階において、噴出口速度が熱伝達に及ぼす影響をヌセルト数 Nu と二次元噴出口空気レイノルズ数 Re_b 数との関係で示したものである。実験条件は、初期霜層平均高さ $H_{fin} = 5.0$ mm, 霜密度 $\rho_f = 130 \pm 10$ kg/m^3 , 霜長さ $\ell_f = 0.10 \sim 0.30$ m である。Fig. 13より、 Re_b 数の増大に伴い熱伝達が促進され、 Nu 数が増大することがわかる。その増大傾向は物質伝達の場合と同様に、 Nu 数の Re_b 数への依存性を示す Re_b^n の指数 n が霜長さ ℓ_f によらず一定となる。 Nu 数と Re_b 数との関係は実験データと平均偏差 6.7 % で次式(13)で整理できる。

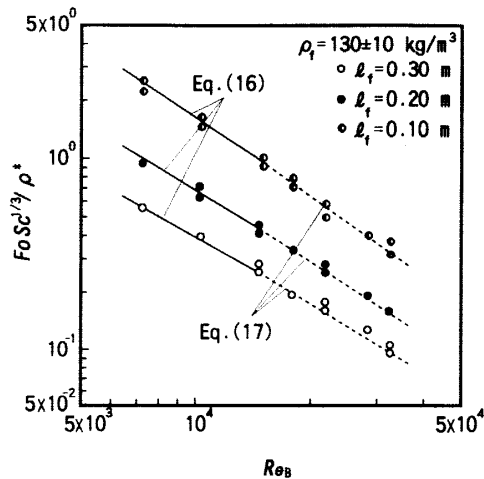
$$Nu = 1.73 \times 10^{-2} \alpha_1 \left(\frac{\ell_f}{H} \right)^{0.638} Re_b^{1.34} \quad \dots(13)$$

$$\text{適用範囲: } \frac{\ell_f}{H} = 0.5 \sim 3.0, \quad \frac{H_{fin}}{H} = 2.00 \times 10^{-2} \sim 1.2 \\ \times 10^{-1}, \quad Re_b = 7.35 \times 10^3 \sim 3.31 \times 10^4$$

α_1 は式(4)と同様に Re_b に応じて与えられる。式(11)~(13)より求められる第一段階の対流熱流束を q_{cvo} (W/m^2) とし、着霜板表面のよどみ点が露出してから、霜層が完全に消失するまでの第二段階において霜層に流入する平均対流熱流束を q_{cvr} (W/m^2) とする。第二段階における対流熱流束は実験データと平均偏差 ± 8.0 % で次式(14)で整理できる。

$$\frac{q_{cvr}}{q_{cvo}} = 0.261 \left(\frac{\ell_f}{H} \right)^{-0.418} \quad \dots(14)$$

式(13), (14)によって、昇華蒸発が終了するまでに霜層へ流入する対流伝熱量を把握することができる。

Fig.14 Relationship between $Fo Sc^{1/3} / \rho^*$ and Re_B

3.3.3 昇華蒸発終了時間の整理

Fig. 14は、実験開始から霜層が完全に消失するまでの時間で定義される昇華蒸発終了時間 t_{cs} (sec)と噴出口速度 U_B との関係を示したものである。フーリエ数 Fo とみかけの湿度比および密度比 ρ^* は前報⁽¹⁾と同様に次式(15)で定義される。

$$Fo = \frac{a t_{cs}}{\ell_f^2}, \quad C^* = \frac{C_s - C_\infty}{C_{TP}}, \quad \rho^* = \frac{\rho_f}{\rho_{ice}} \quad \dots (15)$$

ただし、 a は噴流空気温度の熱伝導率、 C_{TP} は三重点における水蒸気質量濃度、 ρ_f 、 ρ_{ice} はそれぞれ霜層および氷の密度である。

Re_B 数の増大に伴い、 Fo 数は減少するが、その減少傾向はかなり複雑な様相を示すことになる。霜長さ ℓ_f の増大に伴い壁噴流領域が支配的となり Fo 数の Re_B 数に対する依存性は減少することとなる。また、初期霜層高さ H_{tin} が増大すると初期霜質量が増大するため、 Fo 数は増大することとなるが、 H_{tin} の増大は、上述のように高 Re_B 数領域においては、物質伝達率の増大を招き、これは Fo 数の減少要因となる。したがって、 Re_B 数によって、 Fo 数の H_{tin} への依存性は変化することとなる。昇華蒸発終了時間に対する実験整理式は、 H_{tin} が Fo 数に有意な影響を及ぼす $Re_B > 1.47 \times 10^4$ の場合と、影響の見られない $Re_B \leq 1.47 \times 10^4$ 場合のそれぞれについて実験データと平均偏差 5.6 % で、次式(16)、(17)にて整理できる。

$$7.35 \times 10^3 \leq Re_B \leq 1.47 \times 10^4$$

$$Fo = 5.93 \times 10^7 Re_B^{0.2} \left(\frac{\ell_f}{H} \right)^{-2.72} \rho^* \left(\frac{H_{tin}}{H} \right) C^{*-0.98} Sc^{-1/3} \quad \dots (16)$$

$$1.47 \times 10^4 < Re_B \leq 3.31 \times 10^4$$

$$Fo = 1.83 \times 10^{11} Re_B^{0.2} \left(\frac{\ell_f}{H} \right)^{-2.72} \rho^* \left(\frac{H_{tin}}{H} \right)^{0.4} \times C^{*-0.98} Sc^{-1/3} \quad \dots (17)$$

$$\text{但し, } \alpha_2 = 1.31 \left(\frac{\ell_f}{H} \right)^{-0.129}$$

$$\alpha_4 = -3.64 \times 10^{-2} Re_B^{0.322} + 1.68$$

4 結言

本研究では、昇華蒸発現象を利用した除霜に関する研究の一環として、前報⁽¹⁾⁽²⁾で検討した霜層が平行に流動する湿り空気にさらされる場合よりも、さらに大きな除霜効果が期待できる二次元衝突空気噴流中に垂直におかれた水平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影響を及ぼす二次元衝突噴流空気条件による除霜促進効果を検討し、次のような結論を得た。

- (1) 物質伝達率は、平滑平板に対する従来の結果と比較すると、1.2 倍から最大 4.0 倍程度に増大し、二次元噴出口空気レイノルズ数に対する依存性も極めて大きくなることが判明した。
- (2) 霜層の昇華蒸発による物質伝達率は霜層高さに対する依存性を示し、噴出口空気速度が増大するとその影響が大きくなる。
- (3) 霜層の昇華蒸発による物質伝達率と、熱伝達率および昇華蒸発終了時間に関する無次元整理式の提案を行い、霜層高さ、霜長さ、霜密度、レイノルズ数、湿度比の無次元パラメータを用いた実験整理式の誘導を行うことができた。

参考文献

- (1) 稲葉, 今井, 機論, 61-585, B (1995), 1818.
- (2) 稲葉, 今井, 機論, 61-586, B (1995), 2261.
- (3) Gardon, R. and Akfirat, J. C., Int. J. Heat Mass Transfer, 8 (1965), 1261.
- (4) Gardon, R. and Akfirat, J. C., Trans. ASME, Ser. C, 88-1, (1966-2), 101.
- (5) 熊田, 馬淵, 機論, 38-315 (1972), 2915.
- (6) 熊田, 他2名, 機械学会誌, 76-655 (1973), 822.
- (7) 熊田, 馬淵, 機論, 35-273 (1969), 1053.