

## 衝突噴流下の水平霜層に放射熱エネルギーを照射した場合の 昇華蒸発促進効果

稲葉英男<sup>\*1</sup>, 今井誠士<sup>\*2</sup>

### Study on Sublimation Phenomenon of a Horizontal Frost Layer Exposed to an Impinging Jet Flow and Radiant Energy

Hideo INABA and Seishi IMAI

The present paper deals with a new defrosting method based on the frost sublimation phenomenon. The focus of the present experimental study is the sublimation mass transfer of a horizontal frost layer exposed to impinging jet flow and radiant energy. It is found that the mass flux of the frost layer increases with increasing jet flow velocity and the radiant heat intensity. Non-dimensional correlations for mass transfer, heat transfer and defrosting completion time have been derived in terms of various parameters.

**Key Words:** Sublimation, Defrosting, Frost Layer, Impinging Jet, Radiant Energy

#### 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。著者らは、昇華蒸発現象を利用した新しい除霜法の検討を行っており、水平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明らかにした<sup>(1)</sup>。その結果、霜層に平行な強制対流下で除霜する場合と比較して、極めて物質伝達が大きく、短時間での除霜が可能であることが示された。本報は、衝突噴流下で昇華蒸発する霜層にさらに赤外線放射熱エネルギーを照射した場合の、昇華蒸発の促進に関する基礎的検討を行うものである。これは、Schmidt<sup>(2)</sup>やCunnigham<sup>(3)</sup>の報告にあるように、霜層の赤外線吸収率が0.98程度と極めて高いことに着目したものである。既報<sup>(4)</sup>では、水平霜層が平行な強制対流下さらされる場合について、放射熱エネルギーの照射による昇華蒸発促進効果を実験的に検討した。その結果、放射熱エネルギーを照射した場合の昇華蒸発量は、放射熱エネルギーを照射しない場合に比較して最大10倍程度も増大することが明らかとなり、放射熱エネルギーの照射が昇華蒸発促進に非常に有効な方法であることが判明した。

本研究は、水平霜層に対して垂直に二次元噴流を衝突させ、さらに赤外線放射熱エネルギーを霜層表面に照射した場合の霜層の昇華蒸発の促進効果に及ぼす赤外

線放射強度、二次元噴流空気速度、および空気温度の効果を実験的に検討するものである。

#### 記号

$a$ : 温度伝導率,  $B$ : ノズル幅,  $C_\infty$ : 噴流水蒸気質量濃度,  $C_s$ : よどみ点の着霜板表面温度を基準とした飽和水蒸気質量濃度,  $C^{**}$ : みかけの湿度比,  $C_{pf}$ : 霜層の定圧比熱,  $D$ : 拡散係数,  $E_\lambda$ : 単色放射能,  $h$ : 熱伝達率,  $h_m$ : 物質伝達率,  $H$ : 二次元ノズルと霜層表面の距離,  $H_f$ : 霜層高さ,  $H_{fin}$ : 初期霜層高さ,  $L$ : 昇華潜熱,  $l_f$ : 着霜板長さ (=0.1m),  $m_{\lambda f}$ : 着霜板面積基準質量流束,  $M_s$ : 昇華蒸発質量,  $Q_{cv}$ : 対流伝熱量,  $Q_r$ : 放射伝熱量,  $Q_{cs}$ : 伝導伝熱量,  $Q_p$ : 顕熱量の総計,  $Q_s$ : 昇華蒸発潜熱量,  $q_r$ : 放射熱エネルギー強度,  $q_r^*$ : 無次元放射熱エネルギー強度,  $q_{cv}$ : 対流熱流束,  $q_{cv0}$ :  $q_r=0$ における対流熱流束,  $q_{cv}^*$ : 無次元対流熱エネルギー強度,  $S$ : 着霜板面積,  $T_\infty$ : 噴流空気温度,  $T_f$ : 霜層表面温度,  $T_p$ : 放射板表面温度又は熱流センサー温度,  $T_{tr}$ : 三重点温度,  $t$ : 時間,  $t_{cs}$ : 昇華蒸発終了時間,  $U_0$ : ノズル噴出口速度,  $Fo$ : フーリエ数,  $Re_s$ : レイノルズ数,  $Sc$ : シュミット数,  $Pr$ : プラントル数,  $Ste$ : ステファン数,  $Sh$ : シャーウッド数,  $\rho_f$ : 霜密度,  $\rho^*$ : 密度比,  $\phi_\infty$ : 噴流空気相対湿度,  $\varepsilon$ : 放射率

#### 2. 実験装置および方法

**2.1 実験装置の概要** 本実験装置は前報<sup>(1)</sup>において使用した実験装置を主に使用したので、ここではその詳細な記述は省略し、変更部を含めた主要な部分を述べる。実験装置の概略をFig. 1に示す。ノズルは幅  $B = 10$  mm, 長さ 400 mmの二次元ノズルである。

\* 原稿受付 1996年3月22日。

<sup>\*1</sup> 正員, 岡山大学工学部 (〒700 岡山市津島中3-1-1)。

<sup>\*2</sup> 正員, 松下冷機(株)コイル事業部 (〒525 草津市野路町2275)。

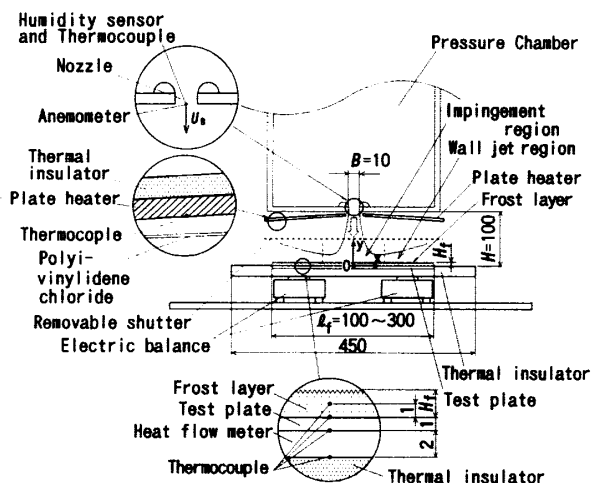


Fig.1 Schematic diagram of experimental apparatus

Fig. 1に示すように、霜層上の衝突噴流の流動様相は、よどみ点近傍の衝突噴流領域(Impingement region)と壁噴流領域(Wall jet region)とに大別できる<sup>(5)</sup>。霜層への赤外線放射熱エネルギーの照射は、ノズルを構成しているアクリル製の圧力室と霜層との間に設置した赤外線放射銅板(縦 150 mm × 幅 110 mm × 厚さ 6 mm)により行った。放射銅板は、2枚の厚さ 2 mm の銅板中に厚さ 2 mm の面状ヒータを挟み込んだものである。赤外線放射板の表面には放射率  $\epsilon = 0.98$  の黒体塗料が塗布され、赤外線放射板と霜層との間は、透過性の高い厚さ 3  $\mu\text{m}$  の塩化ビニリデンフィルムで仕切られている。

**2.2 実験方法** 水平霜層への放射エネルギーの照射は、まず放射板表面温度が所定の値となる定常状態に達したことを確認し、放射遮蔽板(アルミニウム箔を貼り付けた厚さ 5 mm のスタイロフォーム断熱材)をスライドすることにより行い、一定放射熱エネルギー強度を得た。霜層面に到達する放射熱エネルギー強度  $q_r$  は予め霜層の位置で、測定精度  $\pm 0.10$  W の赤外線放射エネルギー強度計(測定波長  $\lambda = 0.8 \sim 3.0$   $\mu\text{m}$ )と水膜法<sup>(6)</sup>により得られた放射熱エネルギー強度  $q_r$  と放射板表面温度  $T_p$  との関係から求めた。使用した放射熱源に関する単色放射能  $E_\lambda$  と波長  $\lambda$  との関係を示す図を赤外線放射銅板の表面温度 ( $T_p = 12^\circ\text{C}$ ,  $212^\circ\text{C}$ ) からプランクの黒体放射の式により求めたものを参考として実線にて Fig. 2 に示してある。Fig. 2 中の破線は既報<sup>(6)</sup>における霜層の放射特性の検討で霜層が高い赤外線熱エネルギー吸収の特性を示した、遠赤外線ランプにおける実測値を示したものである。着霜板上の放射熱エネルギー強度分布の変動幅は最大で  $\pm 1.2\%$  であり、ほ

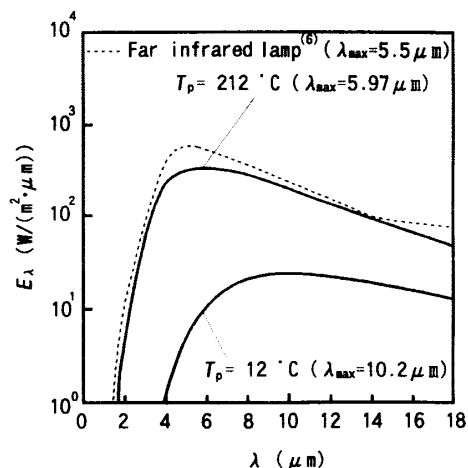
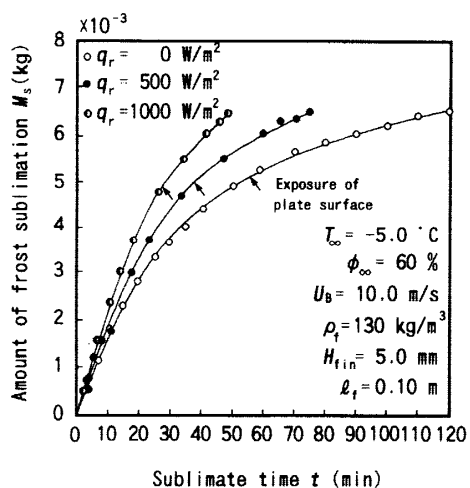


Fig.2 Radiative characteristics of electric heater

ぼ均一な放射熱エネルギー強度と言える。着霜板表面には、放射熱エネルギーの反射の影響を極力軽減するため、上述の黒体塗料 ( $\epsilon = 0.98$ ) を塗布してある。尚、衝突噴流下の実験において、二次元ノズル噴出口速度  $U_0$  が 35 m/s 以上の場合は、放射熱エネルギーを照射しない場合でも昇華蒸発量が大きく、昇華蒸発促進効果が顕著に現れる放射熱エネルギー強度は、かなり大きなものとなる。このため、前報<sup>(1)</sup>で検討した  $U_0 \geq 35$  m/s の高流速の場合を検討対象から除外することとする。また、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  $H/B$  は物質伝達特性に大きな影響を及ぼすが、前報<sup>(1)</sup>で霜層が昇華蒸発する場合に  $H/B = 10$  で物質伝達率は最大となる結果を得ている。従って、本報では、二次元ノズル配置として  $H/B = 10$  の場合を対象とする。尚、本研究は昇華蒸発現象を対象とし、霜層が融解しない範囲の放射熱エネルギー強度について検討することとする。従って、放射熱エネルギーを照射される霜層内の温度が  $0^\circ\text{C}$  以下の場合について検討を行う。また、本実験の温度、水蒸気質量濃度の計測に伴う不確かさは、それぞれ  $\pm 0.05^\circ\text{C}$ 、 $\pm 8.0 \times 10^{-6}$   $\text{kg}/\text{m}^3$  である。実験条件は以下の範囲で行った。初期平均霜層高さ  $H_{\text{fin}} = 2.0 \sim 12.0$  mm、霜密度  $\rho_f = 90 \sim 180$   $\text{kg}/\text{m}^3$ 、噴流空気温度  $T_\infty = -20.0 \sim -2.0^\circ\text{C}$ 、噴流空気の相対湿度  $\phi_\infty = 25 \sim 95\%$ 、噴出口速度  $U_0 = 10.0 \sim 30.0$  m/s、放射熱エネルギー強度  $q_r = 0 \sim 1330$   $\text{W}/\text{m}^2$

### 3. 霜層の昇華蒸発の経時変化

Fig. 3は、霜層の昇華蒸発量  $M_s$  (kg) の経時変化を赤外線放射熱エネルギー強度  $q_r$  をパラメータとして示

Fig.3 Time history of amount of frost sublimation  $M_s$ 

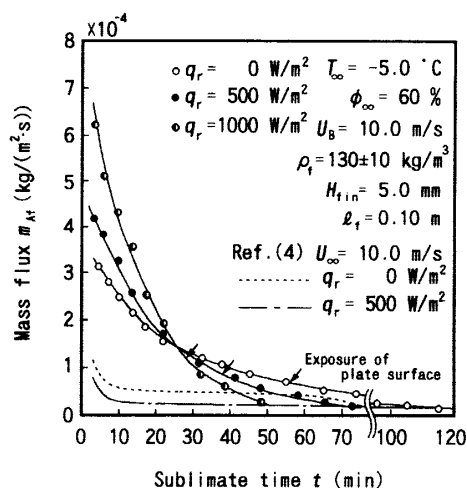
したものである。実験条件はノズル噴出口空気速度の小さい  $U_a = 10.0$  m/s, 噴流の湿り空気温度  $T_\infty = -5.0$  °C, 初期霜層の平均高さ  $H_{film} = 5.0$  mm, 霜長さ  $l_f = 0.1$  m, 霜密度  $\rho_f = 130$  kg/m<sup>3</sup> である。Fig.3より, 放射熱エネルギー強度  $q_r$  の増大と共に昇華蒸発が促進され, 除霜時間を短縮できることがわかる。

Fig.3中の矢印は, よどみ点の昇華蒸発が終了して着霜板が露出し始める時点を示したもので, この時点より後はFig.1に示す  $x$  方向の霜層長さが  $x = 0$  の淀み点より次第に減少していくことになる。前報<sup>(4)・(7)</sup>で検討した霜層が平行に流動する湿り空気さらされる場合には, 着霜板前縁部露出後の昇華蒸発量  $M_s$  の増加割合は急激に減少する。しかしながら, Fig.3に示す衝突噴流を用いた場合には, 着霜板の露出後の  $M_s$  の増加割合の減少は, 露出前の場合とそれほど大きな差は見られない。これは, 水平霜層に垂直な流れ方向を持つ噴流空気が, まず水平霜層内にまで透過し, 霜層内部からの昇華蒸発を誘発し, 全体的に大きな昇華蒸発割合を維持することによるものと考えられる。

一方, 前報<sup>(4)・(7)</sup>における水平霜層が平行に流動する湿り空気さらされた場合には, 水平霜層の表面近傍で平行に発達する濃度勾配層厚さが拡散抵抗となり, 衝突噴流の場合に比較して昇華蒸発割合の低下となり, その時間変化も少ない結果となる。

Fig.4は, 霜層の昇華蒸発による質量流束  $\dot{m}_{A,t}$  (kg/(m<sup>2</sup>・s)) の経時変化を放射熱エネルギー強度  $q_r$  をパラメータとして示したものである。霜層の昇華蒸発質量流束  $\dot{m}_{A,t}$  は次式(1)で表される。

$$\dot{m}_{A,t} = \frac{\dot{M}_s}{S \cdot \Delta t} \quad \dots(1)$$

Fig.4 Time history of mass flux of frost sublimation  $\dot{m}_{A,t}$ 

ここで,  $\Delta M_s$  (kg)は時間刻み  $\Delta t$  (s)で昇華蒸発した霜質量,  $S$  (m<sup>2</sup>)は霜層投影面積,  $\dot{m}_{A,t}$  (kg/(m<sup>2</sup>・s))は昇華蒸発質量流束である。 $\dot{m}_{A,t}$ の計測に伴う不確かさは, 霜質量測定の不確かさと, 計測の時間刻みから,  $5.6 \times 10^{-8}$  (kg/(m<sup>2</sup>・s))と評価できる。実験条件はノズル噴出口空気速度が比較的小さい  $U_a = 10.0$  m/s, 噴流の湿り空気温度  $T_\infty = -5.0$  °C, 初期霜層の平均高さ  $H_{film} = 5.0$  mm, 霜密度  $\rho_f = 130$  kg/m<sup>3</sup> である。Fig.4より, 放射熱エネルギー強度  $q_r$  の増大によって昇華蒸発が促進され,  $\dot{m}_{A,t}$ が増大することがわかる。参考のため, 前報<sup>(4)</sup>における霜層が平行に流動する湿り空気さらされた場合の結果をFig.4中に破線で示してある。この場合, 霜層表面粗さの大きい初期段階では,  $q_r$ の影響は小さく, さらに表面粗さが小さくなると,  $q_r$ の影響が大きくなる傾向が見られた。これは, 表面粗さの減少に伴って対流伝熱量が減少し, 放射伝熱量が昇華潜熱の供給に占める割合が相対的に増加するためである。しかしながら, 衝突噴流下では噴流が直接霜層内部へ流入し, その昇華蒸発により時間の経過と共に表面粗さが変化しても, Fig.4に見られるように  $q_r$ の変化に対しても, その昇華蒸発質量流束の時間変化割合は, それ程大きく変化しない傾向となる。これは, 表面粗さが, 実験開始初期の0.5~2.0分程度で一定値に漸近するため, その効果がごく初期の段階に限定されることと, 衝突噴流では前述のように霜層内部までに空気流れが透過し, かつその大きな熱伝達率のために対流による熱移動量が大きく, 放射伝熱量の影響が相対的に小さくなるためと考えられる。

4. 放射熱エネルギーを照射した場合の霜層の熱収支

本研究において昇華蒸発潜熱量  $Q_s$  は主に放射伝熱量  $Q_r$  と対流伝熱量  $Q_{cv}$  との熱収支により決まる。放射熱エネルギーを霜層に照射しない場合には、 $Q_{cv}$  は常に主流空気から霜層へ流入する。しかしながら、放射熱エネルギーを霜層に照射した場合の霜層の熱収支はやや複雑な様相を呈することとなる。Fig. 5は、放射熱エネルギーを照射した場合の霜層の熱収支を模式的に示したものである。Fig. 5中の  $Q_{cd}$  は断熱材を介して外部環境より霜層に流入出する伝導伝熱量、 $Q_{cpt}$ 、 $Q_{cpt}$ 、 $Q_{cpp}$  は、それぞれ霜層、着霜板、熱流束センサ温度と昇華蒸発温度差に基づく顕熱量である。放射熱エネルギーを霜層に照射した場合には、Fig. 5に示すように二通りの対流による熱流パターンが考えられる。第一は霜層の表面温度  $T_f$  が主流空気温度  $T_\infty$  より低く、 $Q_{cv}$  が主流空気から霜層へ流入する場合で、第二は  $T_f$  が  $T_\infty$  より高く、 $Q_{cv}$  が霜層から主流空気へ熱損失となって流出する場合である。従って、霜層の熱収支は次式のように表される。

$$\begin{aligned}
 Q_s &= Q_r \pm Q_{cv} \pm Q_{cd} \pm (Q_{cpt} + Q_{cpt} + Q_{cpp}) \\
 &= Q_r \pm Q_{cv} \pm Q_{cd} \pm Q_b \dots(2)
 \end{aligned}$$

ここで、断熱材を介して外部環境から流入出する伝導伝熱量  $Q_{cd} = k_{cdp} \frac{\partial T_p}{\partial y} S$ 、顕熱量  $Q_{cpt} = M_i C_{pt} \Delta T_i$ 、 $Q_{cpt} = M_i C_{pt} \Delta T_i$ 、 $Q_{cpp} = M_r C_{pp} \Delta T_p$ 、そして  $k_{cdp}$  は熱流束センサの熱伝導率、 $\Delta T_i$ 、 $\Delta T_i$ 、 $\Delta T_p$  および  $C_{pt}$ 、 $C_{pt}$ 、 $C_{pp}$  はそれぞれ、霜層と着霜板と熱流束センサの単位時間当たりの温度変化および比熱である。 $Q_b (= Q_{cpt} + Q_{cpt} + Q_{cpp})$  は顕熱の総熱量である。昇華蒸発潜熱量

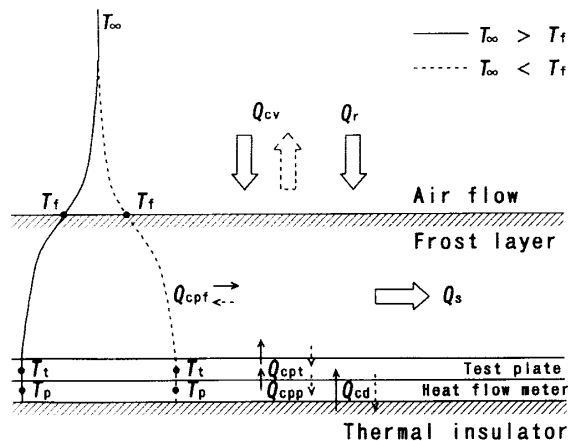


Fig.5 Heat balance of frost layer

$Q_s$  は式(1)で定義される  $m_{\Delta t} \times$  昇華潜熱量  $L (= 2834.5 \text{ kJ/kg}, 0^\circ\text{C}) \times$  霜層投影面積  $S$  から求められる。放射熱エネルギー強度  $q_r$  の計測に伴う不確かさは、赤外線放射エネルギー強度計と温度の測定精度から、 $\pm 1.0 \text{ W/m}^2$  と評価できる。また、対流熱流束  $q_{cv}$  の不確かさについては、 $Q_s$ 、 $Q_r$ 、 $Q_{cd}$ 、 $Q_{cpt}$ 、 $Q_{cpt}$ 、 $Q_{cpp}$  の測定精度から、 $\pm 1.8 \text{ W/m}^2$  である。

本実験は、放射熱エネルギーの照射を受ける霜層が衝突噴流下において昇華蒸発するという複雑な除霜系をその研究対象としており、また、霜層が樹枝状結晶構造を有しているため、霜層の熱収支は上述のように複雑なものとなる。しかしながら、霜層の熱収支の測定は、昇華蒸発挙動を把握する上で必要不可欠な因子である。ここでは、霜層の熱収支測定データの検討を行うために、霜層内の温度分布を測定した。Fig. 6は、霜層温度測定装置を示したものである。温度測定用の K 型熱電対はアルミニウム管とマイクロメータから構成されるトラバース装置に設置され、その位置を正確に固定することができ、噴流方向 (y 方向) に移動可能である。熱電対は放射の反射率の高いアルミニウムを塗布され、放射熱エネルギーの影響は極力軽減してある。熱電対は、熱伝導の影響の軽減し、かつ流れの乱れを小さくするため、素線径  $\phi 0.1 \text{ mm}$  のものを使用した。

Fig. 7は、よどみ点 ( $x=0\text{mm}$ ) の鉛直方向 (y 方向) の温度分布を放射熱エネルギー強度  $q_r$  をパラメータとして示したものである。実験条件は、 $T_\infty = -5.0^\circ\text{C}$ 、 $\phi_\infty = 60\%$ 、 $H_{fin} = 5.0 \text{ mm}$ 、 $\rho_f = 130 \text{ kg/m}^3$ 、 $U_B = 10.0 \text{ m/s}$  で、よどみ点の霜層高さが  $H_f = 2.0 \text{ mm}$  となった時点における温度分布を示してある。Fig. 7に示される y 座標は霜層の先端で定義される霜層界面を基準とし、 $y < 0$  は霜層内、 $y > 0$  は噴流空気側を示す。Fig. 7より、 $q_r = 0 \text{ W/m}^2$  の場合、霜層が昇華蒸発すると、

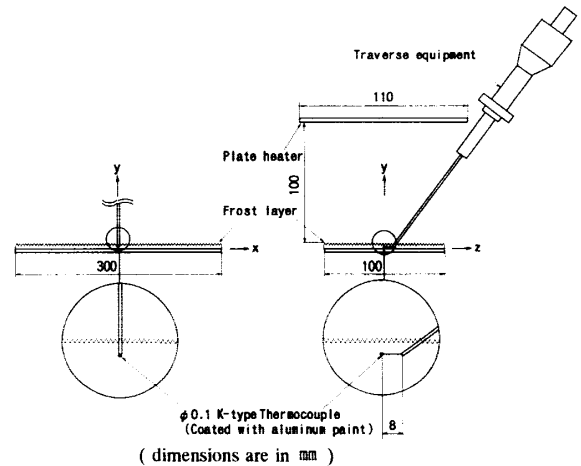


Fig.6 Temperature measuring device in frost layer

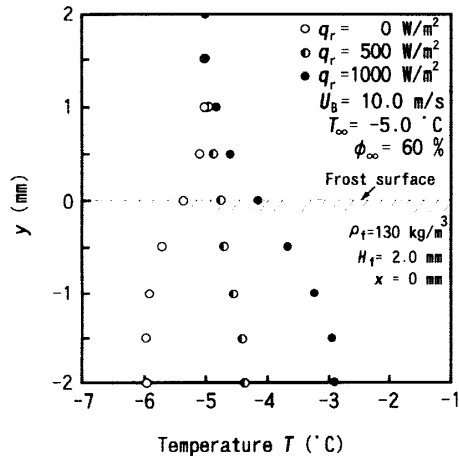
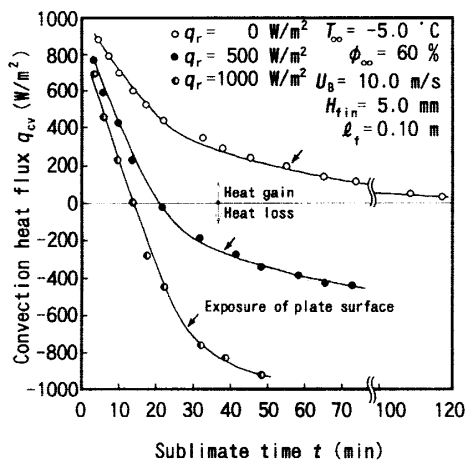


Fig. 7 Vertical temperature distribution in frost layer

Fig. 8 Time history of the convection heat flux  $q_{cv}$ 

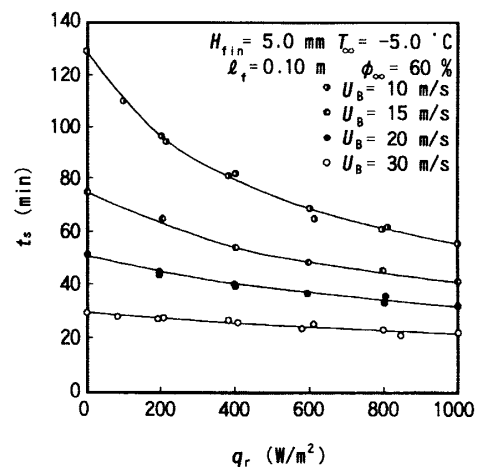
霜層の温度が低下し、噴流空気から霜層内に対流熱が流入していることがわかる。霜層内部においては、霜層界面から着霜板表面近傍まで温度は低下している。このことより、着霜板表面近傍まで、昇華蒸発が誘発されているものと考えられる。一方、放射熱エネルギーを照射すると霜層の温度が上昇し、逆に霜層内から噴流空気へ熱が流出していることが温度分布より推定できる。また、霜層内の温度は霜層下部ほど高くなり、放射熱エネルギーの透過現象が確認できる。これは霜層が樹枝状結晶構造を有するためと考えられる。

Fig. 8は、霜層へ流入する対流熱流束  $q_{cv}$  の経時変化を放射熱エネルギー強度  $q_r$  をパラメータとして示したものである。なお、 $y=0\sim 1\text{mm}$  の領域で放射熱のある場合に噴流空気温度の上昇傾向が認められるが、 $y=0$  の霜層表面位置の決定法や霜層からの高い温度の空気の逆流によるものかなど不明であり、今後の検討が必

要である。実験条件はFig. 4の場合と同様である。二次元ノズルからの衝突噴流空気が霜層に吹き付けられると、その空気温度が霜層表面温度より高い場合には、流動空気より対流熱を得て昇華蒸発する。また、放射熱エネルギーを霜層に照射すると霜層温度の上昇がみられ、流動空気からの対流入熱量は減少することがわかる。しかしながら霜層は放射熱エネルギーを得て、Fig. 4に示すように昇華蒸発が促進されることとなる。昇華蒸発が進行すると、霜層高さ  $H_f$  の減少から、実質的な昇華面積の減少となり、時間当たりの昇華蒸発潜熱量が減少する。それに伴い一定放射熱エネルギー強度が入射する放射熱により霜層温度は上昇し、結果として  $q_{cv}$  は減少することとなる。そして、霜層温度がさらに上昇し噴流空気温度よりも高くなると、 $q_{cv} < 0$  となり、霜層から噴流空気への熱損失となる。すなわち、霜層高さ  $H_f$  が大きく、物質伝達が大い昇華蒸発の初期段階においては、放射熱エネルギーの照射により対流入熱がやや減少するものの、霜層は放射熱エネルギーより昇華潜熱を得て、除霜が促進されることとなる。しかしながら、 $H_f$  が減少し物質伝達が小さくなると、 $q_r$  を増大させても、熱損失が増大することとなり、 $q_r$  の除霜促進効果は小さくなることがFig. 8より分かる。

##### 5. 放射熱エネルギーの昇華蒸発に及ぼす影響

Fig. 9は、放射熱エネルギー強度  $q_r$  が昇華蒸発終了時間  $t_s$  に及ぼす影響をノズル噴出口空気速度  $U_b$  をパラメータとして示したものである。実験条件は、噴流の湿り空気温度  $T_\infty = -5.0\text{ }^\circ\text{C}$ 、初期霜層の平均高さ  $H_{f,in} = 5.0\text{ mm}$ 、霜長さ  $l_f = 0.1\text{ m}$ 、霜密度  $\rho_f =$

Fig. 9 Relationship between defrost completion time  $t_s$  and radiant heat intensity  $q_r$

130 kg/m<sup>3</sup> である。放射熱エネルギー照射による除霜時間の短縮は顕著に見られ、特にノズル噴出口空気速度の小さい場合にはその効果が顕著に現れる。これは、噴出口空気速度の小さい場合は、放射熱エネルギー強度が除霜時間に対して支配的となり、放射熱エネルギー照射による除霜促進が極めて有効な手法となることを示している。逆に、噴出口空気速度が高い場合には、放射熱エネルギー照射による除霜促進効果は小さなものとなることがわかる。

## 6. 実験データの無次元整理

**6.1 昇華蒸発量の無次元整理** 前報<sup>(1)</sup>においては、衝突噴流を用いた除霜について、霜層に放射熱エネルギーを照射しない場合の物質伝達と昇華蒸発終了時間の実験整理式を誘導した。本研究では、放射熱エネルギーを照射した場合の除霜量の予測を行うために、前報<sup>(1)</sup>で誘導した実験整理式から求められる昇華蒸発質量流束によって無次元化を行い、除霜促進効果を検討する。まず、衝突噴流における昇華蒸発では、霜層の昇華蒸発過程は大きく二つの段階に分類することができる。まず、第一段階は除霜過程の前半で、着霜板全体を霜層が覆っている段階である。この場合、霜層を垂直方向から投影した面積と着霜板の面積は一致する。その後、昇華蒸発が進行すると、物質伝達率の大きいよどみ点近傍から、着霜板が露出する第二段階へと移行する。第二段階においては、霜層投影面積は除霜時間とともに減少し、よどみ点近傍の衝突噴流領域の影響は小さくなり、よどみ点から一定の距離にある壁噴流領域の物質伝達が支配的となる<sup>(1)</sup>。

放射熱エネルギーの除霜促進効果を検討するため、放射熱エネルギー強度  $q_r$  を  $q_r = 0$  (W/m<sup>2</sup>) の場合の対流熱流束  $q_{cvo}$  (W/m<sup>2</sup>) で無次元化する。無次元放射熱エネルギー強度  $q_r^*$  を次式で定義する。

$$q_r^* = \frac{q_r}{q_{cvo}} \quad \dots(3)$$

ここで、上述の第一段階において、霜層に放射熱エネルギーを照射しない場合の質量流束  $\dot{m}_{\Delta t 0}$  を次式で定義する

$$\dot{m}_{\Delta t 0} = h_b(C_s - C_\infty) \quad \dots(4)$$

ここで、 $C_\infty$  (kg/m<sup>3</sup>) は、噴流空気の水蒸気質量濃度、 $C_s$  (kg/m<sup>3</sup>) は、霜層飽和水蒸気質量濃度で、よどみ点の着霜板表面温度で定義される。 $h_b$  は物質伝達率で、放射熱エネルギーを照射しない場合については、次

式(5)より求められる<sup>(1)</sup>。

$$Sh = 4.01 \times 10^{-3} \left( \frac{\ell_t}{H} \right)^{0.638} Re_B^{1/3} \quad \dots(5)$$

$$\text{但し, } Sh = \frac{h_b \ell_t}{D}, \quad Re_B = \frac{U_B B}{\nu}$$

式(3)の  $q_{cvo}$  は式(4)、(5)から求められる  $\dot{m}_{\Delta t 0}$  と昇華潜熱  $L$  との積で求められる。

Fig. 10は、第一段階において放射熱エネルギーが昇華蒸発質量流束に及ぼす影響を  $\dot{m}_{\Delta t} / \dot{m}_{\Delta t 0}$  と  $(q_r^* + 1)$  との関係で示したものである。実験条件は、霜密度  $\rho_t = 130$  kg/m<sup>3</sup>、 $H_{tin} / H = 5.0 \times 10^{-2}$ 、 $\ell_t / H = 1.00 \sim 3.00$  である。霜層に放射熱エネルギーを照射すると霜層の温度が上昇し、霜層への対流入熱が減少する。また、霜層温度が噴流空気温度より高くなると、放射熱エネルギーの一部は対流により損失熱量として噴流空気中へ流出することとなる。すなわち、放射熱エネルギー強度  $q_r$  を増大させると、昇華蒸発量は増大するが、損失熱量も増大することになる。Fig. 10は、霜層に照射した放射熱エネルギーが昇華蒸発促進に用いられる割合を示すもので、 $q_r = 0$  W/m<sup>2</sup> の場合、 $\dot{m}_{\Delta t} / \dot{m}_{\Delta t 0} = 1.0$  となり、放射熱エネルギーによる昇華蒸発促進率は 0% を意味する。Fig. 10より、 $q_r^*$  の増大に伴い昇華蒸発は促進され、 $\dot{m}_{\Delta t} / \dot{m}_{\Delta t 0}$  が増大することがわかる。その増大傾向は、 $q_r^*$  への依存性を示す  $(q_r^* + 1)^n$  の指数  $n$  は、各  $Re_B$  数において一定となる傾向を有する。 $\dot{m}_{\Delta t} / \dot{m}_{\Delta t 0}$  と  $q_r^*$  は平均偏差 8.8% 以内で次式(6)のように整理できる。

$$\frac{\dot{m}_{\Delta t}}{\dot{m}_{\Delta t 0}} = (q_r^* + 1)^{0.626} \quad \dots(6)$$

適用範囲:  $0 \leq q_r^* \leq 4.20$

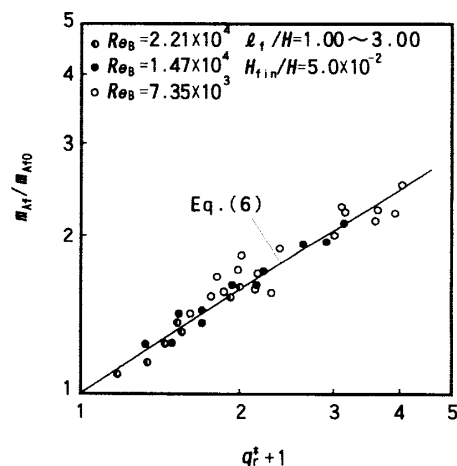


Fig.10 Relationship between  $\dot{m}_{\Delta t} / \dot{m}_{\Delta t 0}$  and  $(q_r^* + 1)$

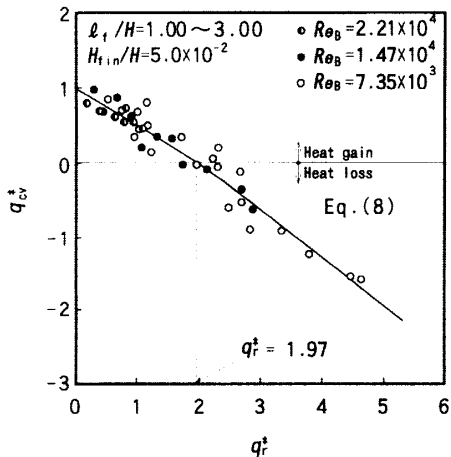


Fig. 11 Relationship between  $q_{cv}^*$  and  $q_r^*$

**6.2 対流伝熱量の整理** 衝突噴流下で昇華蒸発する霜層に放射熱エネルギーが照射されるとき対流伝熱についての検討を行う場合、霜層の表面温度が放射熱エネルギーの影響を受けるため、よどみ点における着霜板表面温度  $T_s$  を霜層の代表温度とすることはできない。ここでは、対流熱流束  $q_{cv}$  を放射熱エネルギーを照射しない場合の対流熱流束  $q_{cv0}$  で無次元化することとする。無次元対流熱流束  $q_{cv}^*$  を次式で定義する。

$$q_{cv}^* = \frac{q_{cv}}{q_{cv0}} \quad \dots(7)$$

ここで、 $q_{cv}$  は対流熱流束で、 $(m_{\lambda} L - q_r)$  から求められ霜層に対流熱が流入する方向を正とする。Fig. 11は、無次元対流熱流束  $q_{cv}^*$  と無次元放射熱エネルギー強度  $q_r^*$  との関係を示したものである。 $q_{cv}^*$  は  $q_r^*$  の増大とともに減少し、正から負の値へと遷移し、霜層からの熱流出となる。 $q_r^* > 1.97$  で  $q_{cv}^*$  は負となり霜層からの熱損失となる。 $q_{cv}^*$  は対流伝熱量で無次元化されているため、各  $Re_B$  数に対しては同様の傾向で減少することとなる。 $q_{cv}^*$  は平均偏差 8.8% 以内で以下の様に整理できる。

$$q_{cv}^* = (q_r^* + 1)^{0.625} - q_r^* \quad \dots(8)$$

適用範囲:  $0 \leq q_r^* \leq 4.20$

**6.3 昇華蒸発終了時間の整理** 衝突噴流下の霜層が昇華蒸発する場合の除霜時間は極めて複雑な現象となる。まず、よどみ点が露出する以前の上述の第一段階においては、霜層の投影面積は一定であり、よどみ点近傍の衝突噴流領域が除霜挙動に対して支配的である。よどみ点露出後の第二段階においては、霜層の

投影面積は時間と共に減少することとなり、よどみ点から  $x$  方向の一定の距離において発達する壁噴流領域が除霜挙動に対して支配的となる。また、放射熱エネルギーを照射しているため、Fig. 11に  $x$  座標で示す霜層の水平方向に温度分布が生じ、さらに第二段階においては、霜層の投影面積の減少に伴い、霜層に供給される放射伝熱量も減少することとなる。すなわち、現象の異なる第一段階と第二段階のそれぞれについて除霜時間に対して影響を及ぼすパラメータとその依存性を決定する必要がある。

本研究では、昇華蒸発終了時間を整理するに当たって、湿度比  $C^{**}$  を式(9)で定義する。

$$C^{**} = \frac{C_s - C_{\infty}}{C_{TP}} \quad \dots(9)$$

但し、 $C_{TP}$ は水の三重点における水蒸気質量濃度、 $C_s$  は放射熱エネルギーを照射しない場合のよどみ点の着霜板表面温度を基準とした飽和水蒸気質量濃度である。

Fig. 12は、フーリエ数  $Fo$  と無次元放射熱エネルギー強度  $q_r^*$  ( $= q_r / q_{cv0}$ ) との関係を霜長さとの比  $l_f / H$  をパラメータとして示したものである。フーリエ数  $Fo$  は、前報<sup>(1)</sup>と同様に次式(10)で定義される。

$$Fo = \frac{a t_{cs}}{l_f^2} \quad \dots(10)$$

ここで、 $t_{cs}$ は第一段階と第二段階を含む昇華蒸発終了時間であり、 $a$  は空気温度伝導率である。

Fig. 12から、放射熱エネルギーの照射により昇華蒸発が促進され、昇華蒸発終了時間  $t_{cs}$  が減少することがわかる。 $Fo$  数の  $q_r^*$  に対する依存性は、 $q_r^*$  が対流熱流束に対する放射熱エネルギー強度の大きさを表す無

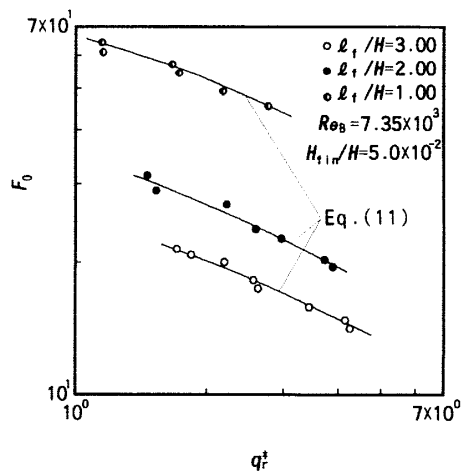
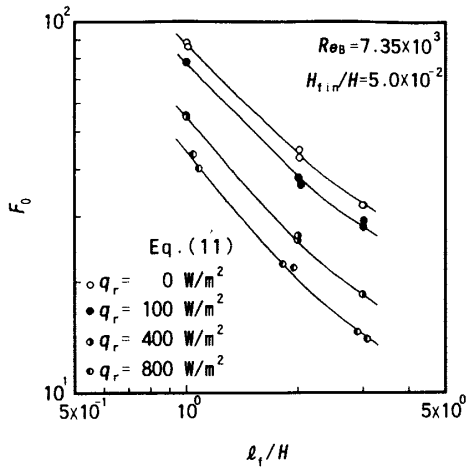


Fig. 12 Relationship between  $Fo$  and  $q_r^*$

Fig.13 Relationship between  $Fo$  and  $l_i/H$ 

次元数であるため、 $l_i/H$ によらず同様の傾向となる。

Fig.13は、フーリエ数  $Fo$  と霜長さとの比  $l_i/H$  との関係を示したものである。実験条件は Fig.12の場合と同様である。放射熱エネルギーによる昇華蒸発促進効果は顕著に見られ、放射熱エネルギーの照射により  $Fo$  数は減少することとなる。また、各放射熱エネルギー強度に対して、 $l_i/H$  の増大に伴って、ほぼ同様の傾向で  $Fo$  数は減少すると言える。上述のように、対象とする除霜系の現象が極めて複雑で  $Fo$  数に影響を及ぼすパラメータは多くなる。ここではよどみ点が露出する以前の第一段階と、よどみ点が露出し、霜層の投影面積が減少する第二段階を含む無次元昇華蒸発終了時間である  $Fo$  数に対する、霜層の形状、噴流空気条件、放射熱エネルギー強度の効果を表す実験整理式は、平均偏差 9.2% で式(11)のようになる。

$$F_o = 3.86 \times 10^4 Re_B^{-1.34} \left( \frac{l_i}{H} \right)^{-0.638} (q_r^* + 1)^{-0.625} \\ \times Sc^{-1/3} / C^{**} \left\{ 2.88 \times 10^1 \rho^* \left( \frac{l_i}{H} \right)^{0.416} \right. \\ \left. + 9.16 \times 10^2 \rho^* \left( \frac{l_i}{H} \right)^{-1.0} \left( \frac{H_{tin}}{H} \right) - 7.52 \rho^* \right\} \quad \dots(11)$$

但し、 $\rho^* = \frac{\rho_i}{\rho_{ice}}$ 、 $\rho_{ice}$  は水の密度である。

適用範囲： $\frac{l_i}{H} = 1.0 \sim 3.0$

$$\frac{H_{tin}}{H} = 2.0 \times 10^{-2} \sim$$

$$\rho^* = 9.8 \times 10^{-2} \sim 2.$$

$$q_r^* = 0 \sim 4.20$$

なお、上記の適用可能な霜層は、水平冷却面上に発生した霜層成熟期<sup>(4)</sup>である。

## 7. 結 言

本研究では、二次元空気噴流中に直角におかれた水平霜層の昇華蒸発を利用した除霜に関する一連の研究として、放射熱エネルギーによる除霜促進効果を明らかにした。その結果、霜層の昇華蒸発挙動に影響を及ぼす放射熱エネルギー強度、霜層の寸法、周囲空気条件と噴流速度が昇華蒸発に及ぼす効果を実験的に検討し、次のような結論を得た。

- (1) 二次元衝突噴流による昇華蒸発過程は、よどみ点の除霜が完了するまでの第一段階と、よどみ点から霜層が後退する第二段階とに区分され、霜層が平行に流動する湿り空気さらされる場合とは異なり、表面粗さの昇華蒸発挙動への依存性は小さいものとなる。
- (2) 二次元衝突噴流による霜層の昇華蒸発量は、霜層が平行に流動する湿り空気さらされる場合と異なり、実験開始時から終了時まで単調に減少し、その除霜時間は大幅に短縮される。
- (3) 放射熱エネルギーを照射した場合の昇華蒸発質量流束と対流伝熱量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、無次元放射熱エネルギー強度、レイノルズ数、湿度比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・今井, 機論, 63-607, B(1997), 1000.
- (2) Schmidt, E., Forshumg, 5-1(1934), 1.
- (3) Cunningham, T. M. and Young, R. L., Arnold Engineering Development Center, (1963), TDR 63-155.
- (4) 稲葉・今井, 機論, 61-586, B(1995), 2261.
- (5) 熊田・仲戸川・平田, 機械学会誌, 76-655(1973), 822.
- (6) Inaba, H., Imai, S. and Otake, H., The Fourth Asian Thermophysical Properties Conference, Tokyo (1995), 181.
- (7) 稲葉・今井, 機論, 61-585, B(1995), 1818.