

昇華蒸発現象を利用した除霜に関する基礎研究*

(第2報, 強制対流下にさらされた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挙動)

稲葉英男*¹, 今井誠士*²

Study on Defrosting by means of Sublimation Phenomenon (2nd Report, Sublimation Phenomenon of a Horizontal Frost Layer Exposed to Forced Convection Air Flow and Radiant Heat)

Hideo INABA and Seishi IMAI

The present paper deals with the new defrosting method by means of the frost sublimation phenomenon with radiant heat. The frost sublimation phenomenon occurs at the triple point of water (273.16 K, 610.5 Pa). The present experimental study focuses on the mass transfer rate of a horizontal frost layer exposed to a moist air flow and radiant heat. It is understood that the mass flux of the frost layer increases with increase of the water vapor mass concentration difference between the frost and main moist air flow, the main air flow velocity, and the infrared radiant heat intensity. The non-dimensional correlation equations of mass transfer, heat transfer and finishing time of the defrosting process have been derived taking into account various parameters.

Key Words: Sublimation, Defrosting, Frost Layer, Forced Convection, Radiant Heat

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、新しい除霜方法として、霜層へ放射熱エネルギーを外部より直接入射させて、霜層の融解を行う新しい除霜システムの提案を行ってきた⁽¹⁾⁽²⁾。提案した除霜方法に関して、赤外線領域に大部分の波長分布を有する遠赤外線ランプが適しているとの結論を得ている⁽³⁾。

本研究は、前報⁽⁴⁾で述べた強制対流を伴う場合の昇華蒸発による新除霜法の結果をもとに、霜層の昇華蒸発をさらに促進させる方法について検討するものである。ここで、昇華蒸発現象とは、水が直接水蒸気に相転移する現象を指す。また、昇華蒸発を促進させるためには何らかの方法で、霜層界面へ熱を供給しなければならないが、Yonko⁽⁵⁾らの報告にあるように霜層の熱伝導率は $0.1 \sim 0.2 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ と低く、霜層の下面より加熱する場合には、霜層が熱抵抗となり、効率的昇華蒸発は期待できない。前報⁽³⁾では、霜層は高い赤外線吸収率を持つことを明らかにしている。本研究では霜層の高い赤外線吸収率に着目して、霜層の上面から赤外線放射熱エネルギーを加えて、霜層の昇華蒸発の促進効果を明らかにするものである。図1は、縦軸を絶

対湿度 x または水蒸気圧 P として、横軸を温度 T とした湿り空気線図を示したもので、TP 点は水の三重点である。昇華蒸発が起きると、霜層の界面温度は $\bar{0}$ 点から B 点へと向かって下降し周囲空気条件を示す A 点との湿度および温度差に基づいて昇華蒸発する。しかしながら、このように霜層界面と湿り空気間の温度差が小さいために、大きな昇華蒸発は望めないことになる。霜層に赤外線放射熱エネルギーを加えると、霜層の界面温度が上昇し、放射熱エネルギーの増大に伴って、図1中の C 点へと変化するが、主流空気の温度が霜層温度より高いために、依然として湿り空気からの対流による入熱もある。さらに、放射熱エネルギーを増加すると、D 点へと霜層表面温度が湿り空気温度より大きくなり、逆に霜層から湿り空気への熱損失も起こることになる。また、霜層表面温度が氷の融点以上

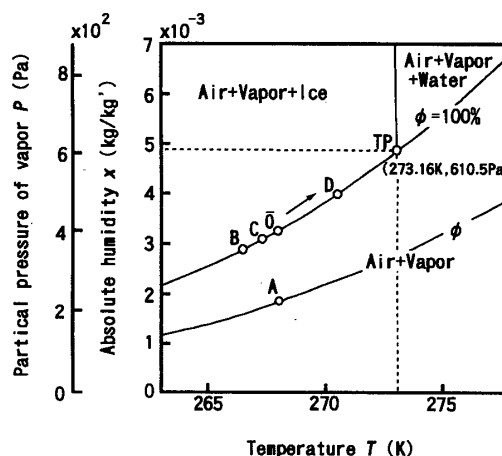


図1 湿り空気線図

* 原稿受付 平成6年10月19日。

*¹ 正員, 岡山大学工学部 (〒700 岡山市津島中3-1-1)。

*² 正員, 岡山大学大学院。

の温度となるまで、放射熱エネルギーを増大すると、霜層の融解が起こるところの前報⁽¹⁾⁽²⁾で述べた融解を伴う除霜方式となる。

本研究は、流動する湿り空気にさらされた水平霜層の昇華蒸発現象に影響を及ぼす周囲湿り空気温度、湿度、湿り空気主流速度、放射熱エネルギー強度の効果を実験的に検討したものである。著者らは、既に放射熱エネルギーを与えない場合については第1報において詳細な検討⁽⁴⁾を行っており、本第2報においては放射熱エネルギー照射による霜層の昇華蒸発の促進効果を主に検討するものである。

記号

- a : 温度伝導率, C_∞ : 主流質量濃度
- C_{TP} : 三重点における質量濃度
- C_s' : 主流空気温度における飽和質量濃度
- C^* : みかけの湿度比, C_{pf} : 霜層の定圧比熱
- D : 拡散係数, E_λ : 単色放射能, h : 熱伝達率
- h^* : 修正熱伝達率, h_b^* : 修正物質伝達率, H_f : 霜層高さ
- H_{fin} : 初期霜層高さ, k_{cd} : 熱伝導率, L : 昇華潜熱
- ℓ : 着霜板長さ (=0.3m), m_{A1} : 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_{cd} : 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_{cv}^* : 昇華蒸発における最大対流熱流束 (= $h(T_{TP} - T_\infty)$)
- S : 着霜板面積, T_∞ : 主流空気温度, T_s : 霜層飽和温度
- T_p : 放射板表面温度, T_{TP} : 三重点温度, T_0 : 絶対零度
- T_w : 着霜板表面温度, t : 時間, t_{cs} : 昇華蒸発終了時間
- U_∞ : 主流速度, Fo : フーリエ数, Re : 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^* : 修正シャーウッド数
- Nu^* : 修正ヌセルト数, ρ_f : 霜密度, ρ^* : 密度比
- ϕ_∞ : 主流空気相対湿度

2. 実験装置および方法

実験装置は前報⁽⁴⁾とほぼ同じものを使用したもので、その詳細な記述は省略する。試験部の概要を図2に示す。試験部流路は高さ $H=90$ mm×幅 $W=300$ mmの矩形断面を有する風洞である。試験部流路の上面は放射熱エネルギーの透過性の高い、厚さ3 μ mの塩化ポリエチレンフィルムで仕切られている。霜層への放射熱源としての赤外線放射板(縦310mm×横110mm×厚さ6mm)は、2枚の厚さ2mmの銅板中に厚さ2mmの面状ヒータを挟み込んだもので、霜層に面している銅板表面は黒体塗料が塗布されている。この赤外線放射板は前述の塩化ポ

リエチレンフィルムを介して、霜層の上部100mmの位置に平行に設置されている。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精度 ± 0.1 Wの放射強度計(測定波長 $\lambda=0.8\sim 3\mu$ m)と前報⁽⁶⁾で行った水膜法により得られた放射熱エネルギー強度と放射板表面温度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_λ と波長 λ との関係が図3に示してある。図3中の破線は前報⁽³⁾で使用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。本研究で使用した赤外線放射板よりの単色放射能 E_λ の波長分布は、黒体放射の仮定のもとで計算したもので、放射板温度 $T_p=285$ K (本実験における放射熱エネルギー強度 $q_r=25$ W/m²) および $T_p=485$ K ($q_r=900$ W/m²) では図3の実線で示されるような分布となる。本実験における放射板温度範囲での最大 E_λ を示すピーク波長は5.97~10.2 μ mと

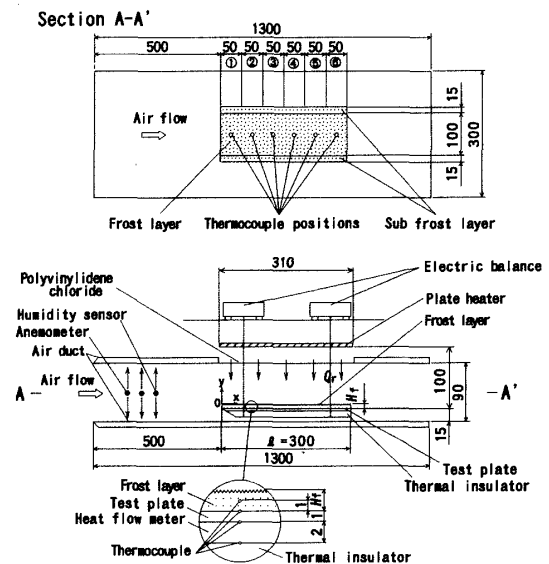


図2 試験部の概要

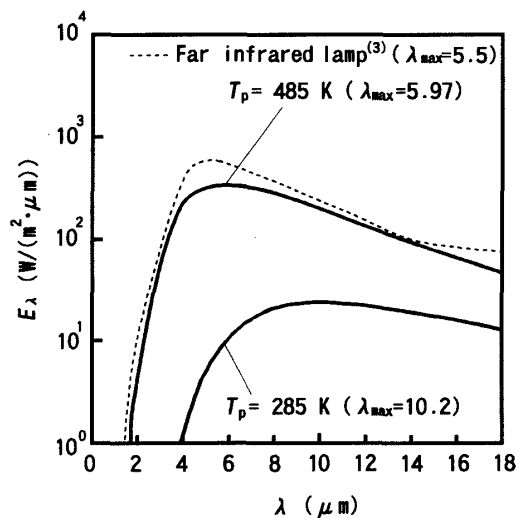


図3 放射特性

なる。

湿り空気的主流速度 U_∞ と湿り空気の相対湿度 ϕ_∞ は、前報⁽⁴⁾と同様に熱線風速計および鏡面冷却式露点計によって測定された。着霜板は前報⁽⁴⁾と同様に縦300mm×幅100mm×厚さ1mmの銅板を用い、放射熱エネルギーの反射の影響を極力軽減させるため、表面に黒体塗料を塗布してある。また、着霜板から下部の断熱材を介して、流入および流出する微小熱量は試験部下部に設置された熱流束センサにより計測された。本実験は以下の範囲で行った。初期霜層高さ $H_{fin} = 2 \sim 7$ mm, 霜密度 $\rho_f = 90 \sim 180$ kg/m³, 主流空気温度 $T_\infty = 253.15 \sim 271.15$ K (-20 ~ -2°C), 主流空気の相対湿度 $\phi_\infty = 50 \sim 90$ %, 主流速度 $U_\infty = 0.3 \sim 12$ m/s, 放射熱エネルギー強度 $q_r = 0 \sim 900$ W/m²。

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、表面粗さを伴う多孔質構造を有することにある。このため、実際の昇華面積は、着霜板面積よりも大きくなる。霜層の表面粗さを前報⁽⁴⁾と同様に、高さ粗さで定義すると、本実験範囲では着霜後、初期の霜層表面粗さは0.5mm程度となる。その後、昇華蒸発の進行に伴い徐々に表面粗さは減少し、最終的には0.1~0.2mm程度で一定となる。

図4および図5は昇華蒸発による霜層断面の状態を示したもので、図4は霜層断面の初期状態(霜層成長期⁽⁷⁾の霜層の状態)を示し、図5(a)~(d)は、主流速度 $U_\infty = 8$ m/sにおいて、実験開始から時間 $t = 10$ 分経過した霜層断面の状態を放射熱エネルギー強度がそれぞれ $q_r = 0, 280, 560, 840$ W/m² の場合について示したものである。主流の湿り空気条件は、 $T_\infty = 268.15$ K (-5°C), 相対湿度 $\phi_\infty = 60$ %で、霜層初期高さ $H_{fin} = 2$ mm, 霜密度 $\rho_f = 130$ kg/m³ である。

$U_\infty = 8$ m/sの場合において、図5(a)は放射熱エネルギーを照射しない場合を示したものである。図4の初期の霜層の状態と比較すると、初期段階では0.5 mm程度であった霜層の表面粗さは0.2 mm程度となり、平均霜層高さ H_f は1.3 mmに減少している。この場合の着霜板表面温度は昇華蒸発のために主流温度より低く

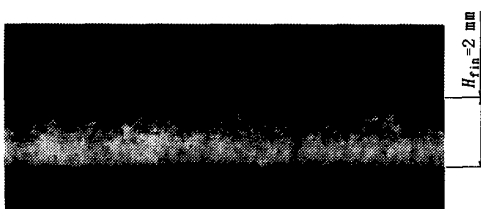
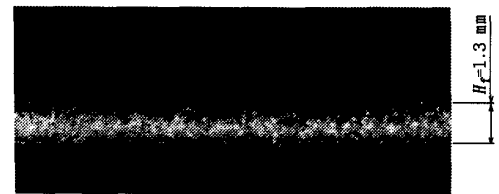


図4 霜層断面の初期状態

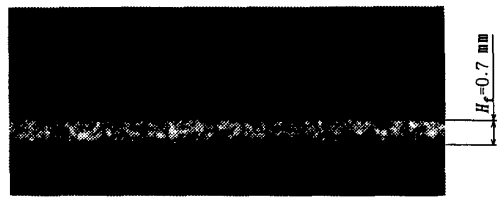
なり、 $T_w = -6^\circ\text{C}$ となる。放射熱エネルギーを照射した場合については、図5(b)に示す放射熱エネルギー強度 $q_r = 280$ W/m² の場合、昇華蒸発が促進され、表面粗さは0.1 mm程度となり、 H_f は1.0 mmまで減少することとなる。表面粗さが減少することから判断して、まず霜層表面の樹枝状の先端部における昇華蒸発が促進されていることが理解できる。さらに q_r を増大させた図5(c)の $q_r = 560$ W/m² の場合では、霜層表面の起伏は無くなり、霜層高さ H_f は0.7 mmとなる。このとき着霜板表面温度は放射熱エネルギーの霜層の透過により、 $T_w = -1.8^\circ\text{C}$ 程度まで上昇する。後述するように、放射熱エネルギーを照射した場合、霜層内温度分布は霜層下部ほど高くなる。 $q_r = 560$ W/m² の放射熱エネルギー強度では、まだ霜層の融解は発生していない。さらに q_r を増大させて $q_r = 840$ W/m² とすると、図5(d)に示すように、霜層は融解することになる。以下本



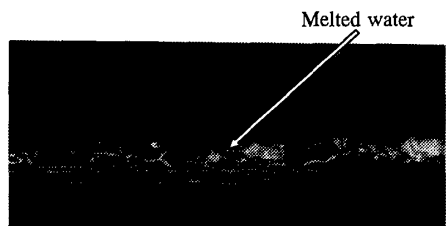
(a) $q_r = 0$ W/m²



(b) $q_r = 280$ W/m²



(c) $q_r = 560$ W/m²



(d) $q_r = 840$ W/m²

($U_\infty = 8$ m/s, $t = 10$ min)

図5 放射熱エネルギーを照射した場合の霜層断面の状態

研究においては、伝熱面に融解水が残留しない、昇華蒸発する場合のみを取り扱うこととする。

3・2 霜層の昇華蒸発の経時変化

図6は霜層の昇華蒸発量 M_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。実験条件は主流の湿り空気速度 $U_\infty = 8 \text{ m/s}$ 、主流の湿り空気温度 $T_\infty = 268.15 \text{ K} (-5^\circ\text{C})$ 、相対湿度 $\phi_\infty = 60\%$ 、初期霜層の平均高さ $H_{fin} = 2 \text{ mm}$ 、霜密度 $\rho_f = 130 \text{ kg/m}^3$ である。図6中の矢印は、霜層長さ(図2の x 方向)が着霜板長さ($l = 0.3 \text{ m}$)の99%となり、着霜板表面が露出し始めた時点を示したもので、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。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。図6より q_r の増大とともに、昇華蒸発が促進されるが、実験開始の初期段階では q_r による影響は比較的小さく、時間の経過とともにその影響が大きくなることがわかる。初期の段階において q_r による影響が小さい理由としては、霜層の表面粗さによる乱流熱伝達促進および伝熱面積の増大により、 $q_r = 0 \text{ W/m}^2$ の場合でも、主流空気から対流により霜層に供給される熱量が相対的に大きいためと考えられる。

図7は、霜層の昇華蒸発質量流束 \dot{m}_{A1} の経時変化を q_r をパラメータとして、主流速度 $U_\infty = 2$ および 8 m/s の場合について示したものである。図7より、 $U_\infty = 2 \text{ m/s}$ の場合は \dot{m}_{A1} の経時変化が小さく、霜層長さが減少するまでは(図中の矢印までの時間)ほぼ一定値となる。これに対して、 $U_\infty = 8 \text{ m/s}$ の場合は、初期段階において \dot{m}_{A1} が増大する傾向を有する。これは前述のように表面粗さの効果によるものと考えられる。 $U_\infty = 2 \text{ m/s}$ の場合に、この傾向が見られないのは、比較的境界層厚さが大きく、表面粗さの効果が境界層内

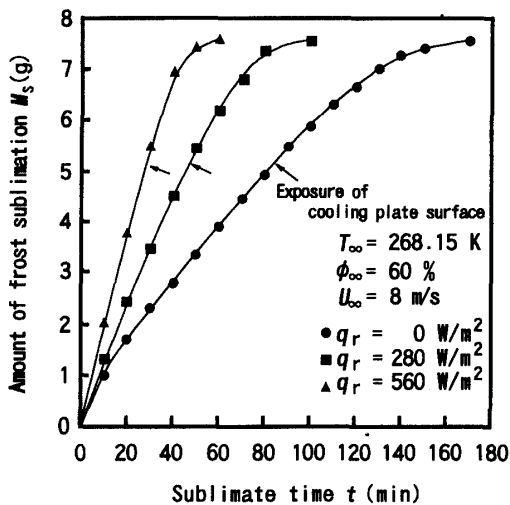


図6 昇華蒸発量 M_s の経時変化

に埋没しているためと考えられる。また、放射熱エネルギーの照射により、大幅に \dot{m}_{A1} 値の増大がみられ、着霜板表面が霜層に完全に覆われている除霜初期において、昇華蒸発による除霜の促進が図られることがわかる。

3・3 霜層周りの熱エネルギー収支

図8は $T_\infty = 268.15 \text{ K} (-5^\circ\text{C})$ 、 $\phi_\infty = 60\%$ 、 $H_{fin} = 7 \text{ mm}$ 、 $U_\infty = 2, 8 \text{ m/s}$ 、 $q_r = 0, 280 \text{ W/m}^2$ の場合において、実験開始後 $t = 3$ 分の着霜板前縁から $x = 150 \text{ mm}$ の位置での鉛直方向 (y 方向) の温度分布を示したものである。図8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、 $y > 0$ は主流の空気側を示す。図8より、 $q_r = 0 \text{ W/m}^2$ の場合、霜層が昇華蒸発すると、霜層の温度が低下し、主流空気から霜層内に熱が流入していることがわかる。霜層内部は、霜層界面から $y = -3 \text{ mm}$ 付近まで温度は低下し、それ以

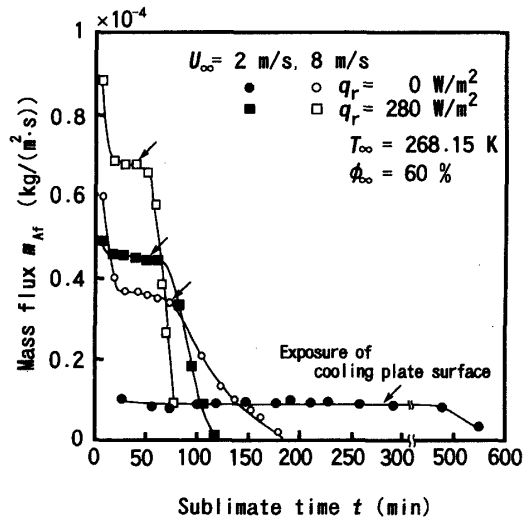


図7 昇華蒸発質量流束 \dot{m}_{A1} の経時変化

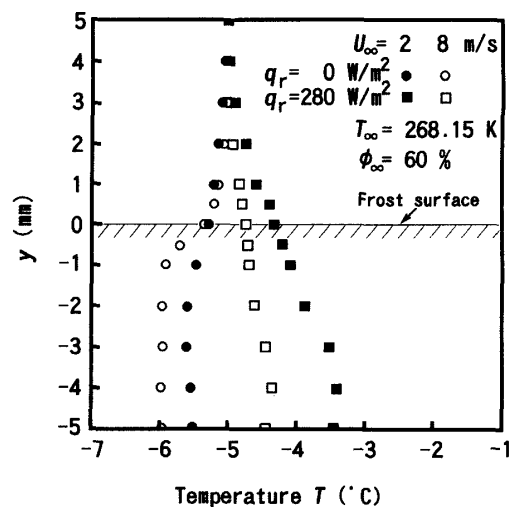
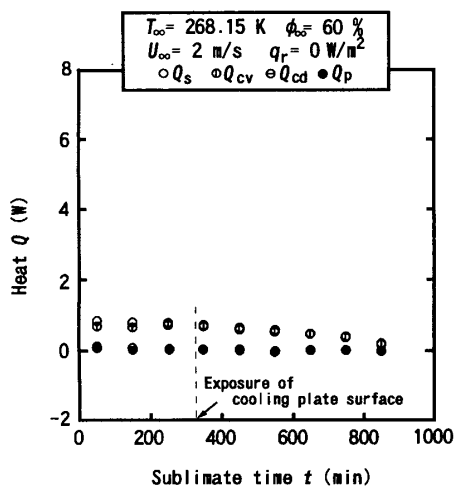
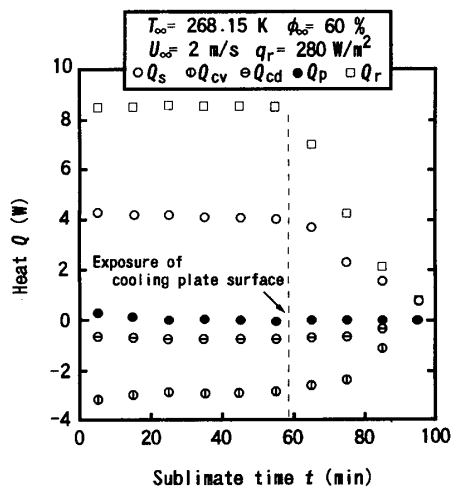


図8 霜層の鉛直方向温度分布

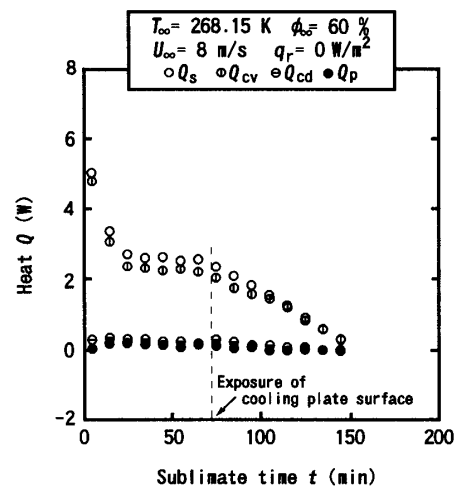
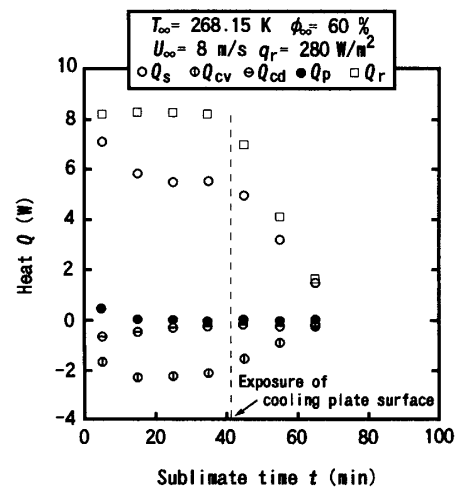
降はほぼ一定値となる。このことより、霜層界面下の $y = -3$ mm 付近まで、昇華蒸発が誘発されているものと考えられる。これに対して、 $q_r = 280 \text{ W/m}^2$ の場合には、放射熱エネルギーにより、霜層の温度が上昇し、逆に霜層内から主流空気へ熱が流出していることがわかる。また、霜層界面下の $y = -4$ mm 付近までは、霜層内の温度は霜層下部ほど高くなり、放射熱エネルギーの透過現象が確認された。これは霜層が多孔質構造を有するためと考えられる。

図9は主流速度 $U_\infty = 2 \text{ m/s}$ 一定とし、放射エネルギー強度 $q_r = 0, 280 \text{ W/m}^2$ の場合における霜層の熱エネルギー収支の経時変化を、霜層に熱が流入する方向を正として示したものである。図中の Q_s は昇華蒸発による潜熱量、 Q_{cv} は対流伝熱量、 Q_{cd} は着霜板下部からの伝導伝熱量、 Q_p は霜層、着霜板、熱流束センサの顕熱量の総計、 Q_r は放射伝熱量である。図9(a), (b) を比較すると、 Q_s は放射熱エネルギーを照射することにより著しく増大することがわかる。図中の破線は、

(a) $q_r = 0 \text{ W/m}^2$ の場合(b) $q_r = 280 \text{ W/m}^2$ の場合図9 $U_\infty = 2 \text{ m/s}$ の場合の熱エネルギー収支

霜層長さが着霜板長さの99%となり、着霜板表面が露出し始めた時点を示したものである。これより後は、霜層長さの減少に伴い、各伝熱量も次第に減少する傾向となるが、 $q_r = 0 \text{ W/m}^2$ の場合は、緩やかに減少するのに対して、 $q_r = 280 \text{ W/m}^2$ の場合では減少割合が大きく、急激に減少することとなる。これは次のような理由による。図2に示すように、着霜板前縁から主流方向に x 座標をとると、放射熱エネルギーを照射した場合には、 x の増大に伴い境界層厚さの増大となり、霜層の温度が上昇することとなる。この霜層の温度上昇が霜層表面近傍空気の飽和湿度を増大させ、主流空気との湿度差を大きくし、着霜板後方の昇華蒸発を促進することになる。また、対流伝熱量 Q_{cv} については、図8の温度分布からも推測されるように、 $q_r = 0 \text{ W/m}^2$ の場合には主流空気から流入するが $q_r = 280 \text{ W/m}^2$ の場合には主流空気へ流出し、熱損失を生じることになる。

図10は $U_\infty = 8 \text{ m/s}$, $q_r = 0, 280 \text{ W/m}^2$ の場合における霜層の熱エネルギー収支の経時変化を図9と同様に

(a) $q_r = 0 \text{ W/m}^2$ の場合(b) $q_r = 280 \text{ W/m}^2$ の場合図10 $U_\infty = 8 \text{ m/s}$ の場合の熱エネルギー収支

示したものである。 $U_{\infty} = 8$ m/s の場合では実験開始の初期段階において、昇華蒸発による潜熱量 Q_s は大きな値を示す。これは前報⁽⁴⁾で報告したように、表面粗さの影響が表れているものと考えられるが、 $q_r = 280$ W/m² の場合では、 Q_s の変化割合が低下している。 Q_s の増大は、初期における霜層の表面粗さが大きいことに起因する。また、 $q_r = 0$ W/m² の場合には、 Q_{ev} の減少が Q_s の減少に直接影響するのに対し、 $q_r = 280$ W/m² の場合では、霜層への放射熱エネルギーの供給により、 Q_{ev} の Q_s に及ぼす影響が弱まる傾向となる。

主流速度 U_{∞} の影響を調べる目的で、図9と図10とを比較すると、 $U_{\infty} = 2$ m/s の場合では、放射熱エネルギーによって昇華蒸発潜熱量が5倍程度に向上しているのに対して、 $U_{\infty} = 8$ m/s の場合では2倍程度にとどまっている。すなわち、主流速度が大きい場合は、放射熱エネルギーを照射しても、対流により熱が霜層から流出するため、その効果は小さいことがわかる。また、顕熱量 Q_o の影響は小さく、 $U_{\infty} = 2, 8$ m/s ともに Q_s の 2% 以下である。

3・4 無次元整理

前報⁽⁴⁾では放射熱エネルギーを照射しない場合について、 Re 数、 Sc 数、 Sto 数、密度比 ρ^* 、見かけの湿度比 C^* などから物質伝達、熱伝達、昇華蒸発終了時間の整理式を求めた。本報では、放射熱エネルギーを照射して昇華蒸発を促進しているため、無次元整理式の提案に際して、放射熱エネルギー強度 q_r を加味した無次元パラメータを定義する必要がある。霜層に放射熱エネルギーを照射した場合、霜層に供給されるエネルギーは、放射伝熱量と対流伝熱量によって支配される。すなわち、図9、図10において明らかなように、主流速度 U_{∞} が大きい場合には、放射伝熱量を増大させても、対流伝熱量が大きいいため、霜層から熱が流出し、 q_r の影響は小さくなる。逆に U_{∞} が小さい場合には、対流伝熱量が小さいため、 q_r の影響が大きくなる。したがって、対流伝熱量により放射熱エネルギーを無次元化することが適当である。

無次元放射熱エネルギー強度 q_r^* を次式で定義する。

$$q_r^* = \frac{q_r}{q_{ev}^*}$$

$$q_{ev}^* = h(T_{TP} - T_{\infty})$$

ここで、 T_{TP} は三重点温度、 q_{ev}^* は昇華蒸発における最大対流熱流束、 h は前報⁽⁴⁾の式(8)、(9)から求められる熱伝達率である。

3・4・1 物質伝達の整理

前報⁽⁴⁾では放射熱エネルギーを照射しない場合について、シャーウッド数 Sh の整理式を求めた。この際の霜層温度は、着霜板表面温度で代表し、飽和条件を仮定して霜層の水蒸気質量濃度を算出しているが、本報では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、着霜板表面温度で霜層温度を代表することはできない。強制対流下における霜層の表面温度測定法については、山川ら⁽⁸⁾が詳細に検討しているが、放射熱エネルギーを不均一な凹凸を有する霜層表面に照射した場合に、霜層表面温度を測定することは事実上不可能である。本報では物質伝達を整理するに当たって、次に示す修正シャーウッド数 Sh^* を用いて整理することとする。

$$Sh^* = \frac{h_D^* \ell}{D} = \frac{m_{A,1} \ell}{(C_s' - C_{\infty}) D}$$

ここで、 C_s' (kg/m³) は T_{∞} で定義される飽和水蒸気質量濃度、 C_{∞} (kg/m³) は主流空気の水蒸気質量濃度、 D (m²/s) は拡散係数、 h_D^* (m/s) は修正物質伝達率、 ℓ は代表寸法で着霜板長さ(0.3 m)を用いた。また、データの整理には、着霜板が露出する以前の物質伝達を対象とし、実験開始時から霜層長さが着霜板長さの99%となるまでの間について行った。

図11は放射熱エネルギーが物質伝達に及ぼす影響を修正シャーウッド数 Sh^* と無次元放射熱エネルギー強度 q_r^* との関係で、 $H_{fin} = 2$ mm の場合において、 Re 数をパラメータとして示したものである。図11より、霜層への放射熱エネルギーの照射による昇華蒸発の促進効果は顕著で、 q_r^* の増大に伴い Sh^* 数が増大する。その増大傾向は、小さい q_r^* 値で Sh^* 数の変化の少ない対流伝熱が支配的な領域から、 q_r^* の増大に伴って、 Sh^* 数の増加割合が大きくなる放射伝熱が支配的

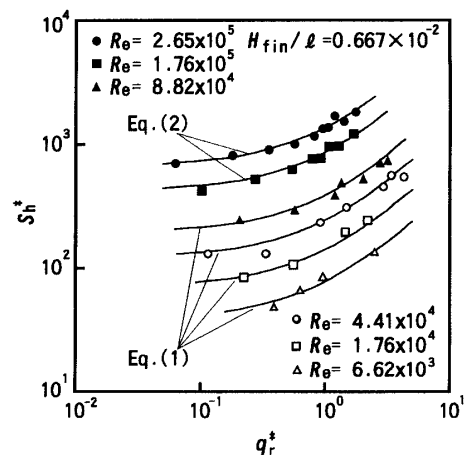


図11 Sh^* と q_r^* との関係

な領域へと変化する様相を呈する。物質伝達の促進は、放射熱エネルギーの照射による霜層への熱供給により、霜層表面の温度が上昇し、主流空気との水蒸気質量濃度差が増大するために生じると考えられる。 q_r^* の小さな($q_r^* < 1$)対流伝熱が支配的な領域では、霜層表面温度が主流空気温度より低く、また、対流により主流空気からの入熱の割合が多く、放射熱エネルギーの効果が表れにくくなる。一方、放射伝熱が支配的な領域($q_r^* > 1$)では、霜層表面温度が主流空気温度より高く、対流による熱流出があるものの、水蒸気濃度差の増大により、昇華蒸発が促進されることになる。 Sh^* 数に関する実験整理式は、平均偏差 4.6% 以内で以下の様になる。

$$5 \times 10^3 \leq Re \leq 9 \times 10^4$$

$$Sh^* = 0.175 Re^{0.611} \left(\frac{H_{fin}}{\ell} \right)^{0.242} Sc^{1/3} Ste^{0.00441} \times (0.953 q_r^* + 1)^{1.05} \quad \dots(1)$$

$$9 \times 10^4 \leq Re \leq 3 \times 10^5$$

$$Sh^* = 4.99 \times 10^{-4} Re^{1.13} \left(\frac{H_{fin}}{\ell} \right)^{0.242} Sc^{1/3} Ste^{0.00441} \times (0.953 q_r^* + 1)^{1.05} \quad \dots(2)$$

適用範囲: $H_{fin}/\ell = 0.667 \times 10^{-2} \sim 2.33 \times 10^{-2}$
 $q_r^* = 0 \sim 2.67, Ste = 0.189 \sim 0.203$

ただし、ステファン数 $Ste = \frac{C_{p,t}(T_{\infty} - T_0)}{L}$

なお、霜密度に関しては $\rho_f = 90 \sim 180 \text{ kg/m}^3$ の範囲では、 Sh^* 数の変化は殆ど見られなかった。 ρ_f は表面粗さに影響するが、霜層はもともと放射熱エネルギーの吸収率が大きいために⁽³⁾、放射熱エネルギーの影響を受けにくく、さらに対流伝熱量についてもその影響が現れるのは実験開始初期に限定されるためと考えられる。

3.4.2 熱伝達の整理

本実験においては、霜層に供給される昇華潜熱は、主に放射熱エネルギー量と対流伝熱量によって決まる。従ってここでは、霜層と主流空気との対流熱伝達について検討する。

前報⁽⁴⁾では放射熱エネルギーを照射しない場合について、物質伝達と同様に、着霜板表面温度 T_w を霜層の代表温度として、ヌセルト数 Nu を定義したが、前述のように、放射熱エネルギーを照射した場合は、 T_w の値は時間と共に変化するために、霜層の代表温度と

して T_w を用いることができないため、修正ヌセルト数 Nu^* を次式のように定義する。

$$Nu^* = \frac{h^* \ell}{k_{cd}} = \frac{q_{cv} \ell}{(T_{TP} - T_{\infty}) k_{cd}}$$

ここで、 k_{cd} (W/mK)は主流空気の熱伝導率、 q_{cv} (W/m²)は対流熱流束、 T_{TP} は三重点温度である。すなわち、 Nu^* は昇華蒸発する際の最大温度差で定義されるヌセルト数である。 Nu^* は温度差を昇華蒸発の最大温度差とするため、放射熱エネルギー強度が対流伝熱量に対して小さい場合は、霜層へ対流熱が流入し、 Nu^* は正となる。逆に、放射熱エネルギー強度が大きい場合は、霜層表面温度が主流空気温度よりも高く、対流伝熱により熱が霜層より流出し、 Nu^* は負となる。図12は Nu^* と q_r^* との関係を示したものである。 q_r^* が増大するに従い霜層への対流入熱量が減少するため、 Nu^* は減少し、0となった後、霜層からの熱流出となり、更に減少する。各 Re 数において q_r^* に対する Nu^* はほぼ一定の割合にて減少することがわかる。熱伝達に関する実験整理式は平均偏差 5.5% 以内で以下の様になる。

$$5 \times 10^3 \leq Re \leq 9 \times 10^4$$

$$q_r^* < 0.433$$

$$Nu^* = 0.376 Re^{0.611} \left(\frac{H_{fin}}{\ell} \right)^{0.242} Pr^{1/3} Ste^{0.00441} \times (1 - 2.31 q_r^*)^{1.08} \quad \dots(3)$$

$$q_r^* \geq 0.433$$

$$Nu^* = -0.376 Re^{0.611} \left(\frac{H_{fin}}{\ell} \right)^{0.242} Pr^{1/3} Ste^{0.00441} \times (2.31 q_r^* - 1)^{0.952} \quad \dots(4)$$

$$9 \times 10^4 \leq Re \leq 3 \times 10^5$$

$$q_r^* < 0.433$$

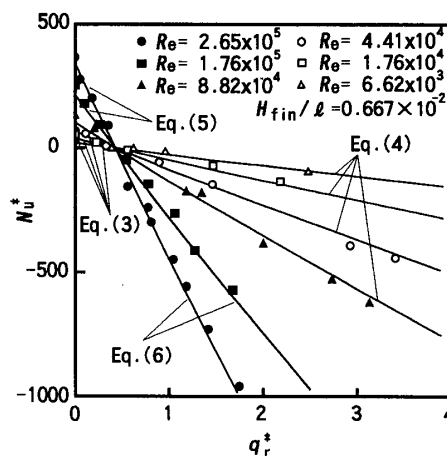


図12 Nu^* と q_r^* との関係

$$Nu^* = 9.79 \times 10^{-4} Re^{1.18} \left(\frac{H_{fin}}{\ell} \right)^{0.242} Pr^{1/3} Ste^{0.00441} \times (1 - 2.31 q_r^*)^{1.08} \dots (5)$$

$$q_r^* \geq 0.433$$

$$Nu^* = -9.79 \times 10^{-4} Re^{1.18} \left(\frac{H_{fin}}{\ell} \right)^{0.242} Pr^{1/3} Ste^{0.00441} \times (2.31 q_r^* - 1)^{0.952} \dots (6)$$

適用範囲: $H_{fin}/\ell = 0.667 \times 10^{-2} \sim 2.33 \times 10^{-2}$
 $q_r^* = 0 \sim 2.67, Ste = 0.189 \sim 0.203$

3.4.3 昇華蒸発時間の整理

図13は、実験開始から完全に霜層が昇華蒸発するまでの時間で定義される昇華蒸発終了時間 t_{cs} と放射熱エネルギー強度 q_r との関係を Re 数をパラメータとして、無次元放射熱エネルギー強度 q_r^* と $Fo Sc^{1/3}/(\rho^*(H_{fin}/\ell)^{0.769})$ との関係で示したものである。ここで、フーリエ数 Fo とみかけの湿度比 C^* 、密度比 ρ^* は前報⁽⁴⁾と同様に以下のように定義する。

$$Fo = \frac{at_{cs}}{\ell^2}, C^* = \frac{C_s - C_\infty}{C_{TP}}, \rho^* = \frac{\rho_i}{\rho_{ice}}$$

q_r^* の増大に伴い昇華蒸発は促進され、 Fo 数が減少することとなるが、放射伝熱量が対流伝熱量に比較して小さいときは、 q_r^* の Fo 数に及ぼす影響は小さく、 Re 数が Fo 数に対して支配的といえる。一方、放射伝熱量を増大させると、 Fo 数に対する q_r^* の影響が増大し、 Fo 数の減少が顕著となる。昇華蒸発終了時間に対する実験整理式は平均偏差 5.2% 以内で以下の様になる。

$$5 \times 10^3 \leq Re \leq 9 \times 10^4$$

$$Fo = 2.86 \times 10^4 Re^{-0.811} \rho^* \left(\frac{H_{fin}}{\ell} \right)^{0.769} \times C^{*-0.888} Sc^{-1/3} Ste^{-0.00441} (1 + 0.679 q_r^*)^{-1.06} \dots (7)$$

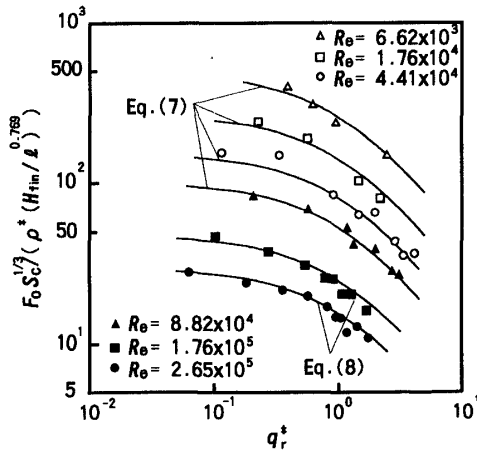


図13 $Fo Sc^{1/3}/(\rho^*(H_{fin}/\ell)^{0.769})$ と q_r^* との関係

$$9 \times 10^4 \leq Re \leq 3 \times 10^5$$

$$Fo = 1.08 \times 10^7 Re^{-1.13} \rho^* \left(\frac{H_{fin}}{\ell} \right)^{0.769} \times C^{*-0.888} Sc^{-1/3} Ste^{-0.00441} (1 + 0.551 q_r^*)^{-1.06} \dots (8)$$

適用範囲: $H_{fin}/\ell = 0.667 \times 10^{-2} \sim 2.33 \times 10^{-2}$
 $q_r^* = 0 \sim 2.67, Ste = 0.189 \sim 0.203$

4. 結言

本研究では、従来の除霜方法に代わる霜層の昇華蒸発現象を用いた除霜方法の検討を行った。前報⁽⁴⁾において水平霜層を上面からの強制対流により昇華蒸発させた場合を検討したが、更に本報では、昇華蒸発を促進するために、霜層の上面から放射熱エネルギーを照射し、昇華蒸発促進効果の定量的な検討を行った。霜層が昇華蒸発する際の対流伝熱と放射伝熱および、周囲空気条件と主流速度、霜高さと霜密度などの相互干渉効果を検討し、霜層が昇華蒸発する条件を明らかにしたもので、次のような結論を得た。

- (1) 強制対流下で霜層に放射熱エネルギーを照射した場合、対流伝熱量が昇華蒸発挙動に大きく影響する対流伝熱支配領域と放射エネルギー強度が大きく影響する放射伝熱支配領域に大別できることが判明した。
- (2) 主流速度を増大させると、実験開始初期において、昇華蒸発量の増大が見られるが、放射熱エネルギーを照射すると、その増加割合が小さくなることが明らかとなった。
- (3) 物質伝達率、熱伝達率および昇華蒸発完了時間に関する無次元整理式の提案を行い、無次元放射熱エネルギー強度、レイノルズ数、ステファン数、湿度比、霜層高さの無次元パラメータで有用な実験整理式を誘導することができた。

参考文献

- (1) 稲葉・他2名, 機論, 58-555, B(1992), 3373.
- (2) 稲葉・他2名, 機論, 59-561, B(1993), 3572.
- (3) 稲葉・他2名, 日本冷凍協会論文集, 9-3(1992), 257.
- (4) 稲葉・今井, 機論投稿中
- (5) Yonko, J. D. and Sepsy, C. F., Ashrae Transactions, 73, (1967), 11. 1.
- (6) 稲葉・大竹, 機論, 56-526, B(1990), 1796.
- (7) Hayashi, Y., Aoki, A., Adachi, S., and Hori, K., Trans. ASME, Vol. 99, (1977), 239.
- (8) 山川・他2名, 化学工学, 33-7, (1969), 103.