

熱放射による傾斜霜層の融解に関する基礎研究*

稲葉 英男^{*1}, 大竹 秀雄^{*2}, 茂森 昭博^{*3}Fundamental Study on Melting of Inclined Frost Layer
by Radiative Heat Energy

Hideo INABA, Hideo OTAKE and Akihiro SHIGEMORI

This paper deals with a new defrosting method in which a frost layer is melted by radiative heat energy as an energy source. The far-infrared radiative heat energy having a maximum wavelength of $5.5\mu\text{m}$ is selected as the optimum radiative heat energy source for melting of the inclined frost-layer. The inclined frost-layer melting experiments using the radiative heat energy with a discharge of melted water on a cooling copper plate are carried out under various environmental parameters (inclination angle of frost-layer, radiative heat energy flux, air temperature, cooling brine temperature) including porosity of frost-layer as a frost structural factor. The dimensionless correlation equations which predict the time taken for complete frost-layer melting are derived as a function of various nondimensional frost-layer melting parameters.

Key Words: Defrosting, Radiative Heat Energy, Inclined Frost Layer, Melted Water, Far-Infrared Ray

1. 緒 言

冷蔵庫や空気熱源ヒートポンプの蒸発器などの低温熱交換器伝熱面上に発達する霜層は、伝熱面積の減少、霜層成長による熱抵抗および通風抵抗の増大をもたらす。熱交換器の性能を大幅に減少させる。従って、熱交換器性能維持のため、除霜運転が必要となる。しかし、除霜方式として一般に普及している逆サイクルホットガス方式は、除霜運転時の冷却停止による機能性の低下、投入するエネルギーに対して実際の霜層融解に使われるエネルギー割合が小さいことによる経済性の問題そして除霜運転の繰り返しによる冷凍機寿命の低下など様々な弊害を生んでいる現状にある⁽¹⁾。このように、逆サイクルホットガス方式には様々な解決しなければならない問題点があるため、著者らは新しい除霜方法として放射熱エネルギーにより霜層を融解する方法を提案した⁽²⁾。前報⁽²⁾においては、霜層の放射特性について着霜および霜層融解過程における霜層の吸収率、反射率および透過率を定量的に明らかにするとともに、広範囲にわたる波長帯を有する放射熱源を用いて霜層の放射特性を測定し、赤外線領域で長波長は

ど霜層の吸収率が大きいことを明らかにした。また、得られた知見をもとに、放射熱源として遠赤外線熱源を選定し、水平霜層を上部より融解させた場合の周囲環境条件（放射熱エネルギー強度、周囲空気温度、冷却ブライン初期温度）並びに霜層構造（空隙率）の変化による霜層融解（融解水を排出しない場合）に及ぼす影響を実験的に解明した⁽³⁾。しかしながら、実際の着霜面は様々な姿勢をもつもので、着霜面の姿勢によっては、融解水の排出などが起こり、放射熱エネルギーによる霜層融解に複雑さを持たすことが予想される。本論文では、冷却面姿勢検討の上で、最も基本的構造である冷却平板上の着霜層を様々な傾斜させた場合の放射熱エネルギーによる融解現象を、放射熱エネルギー強度周囲環境条件、霜層の構造を実験因子として検討したものである。さらに、本研究では、放射熱エネルギーによる霜層融解終了時間の短縮を目的として、冷却部熱容量の影響（着霜面冷却ブラインの有無そして冷却面背後の断熱条件）をも検討に加えてある。

記 号

A: 表面積, a: 温度伝導率, B: 定数, C: 定圧比熱
H: 高さ, 厚さ, L: 氷の融解潜熱量, M: 質量
 n_1, n_2, n_3, n_4, n_5 : 指数, Q: 熱量, q: 熱流束
S: 水分飽和度, T: 温度, t: 時間, x, y: 座標
 ε : 放射率, θ : 天頂角, λ : 熱伝導率, ρ : 密度
 χ : 空隙率, σ : ステファン・ボルツマン定数

* 原稿受付 平成5年5月7日。

^{*1} 正員, 岡山大学工学部 (〒700 岡山市津島中3-1-1)。^{*2} 正員, サンデン(株) (〒372 伊勢崎市寿町20)。^{*3} 岡山大学大学院。

ϕ : 傾斜角, ϕ : 相対湿度

無次元量 Q_{a}^* : 無次元周囲環境熱量, 式(4)

Q_{c}^* : 無次元熱容量, 式(5)

Q_{r}^* : 無次元放射熱量, 式(3)

τ : 無次元融解終了時間, 式(8)

τ^* : 修正無次元融解終了時間, 式(12)

ϕ^* : 無次元傾斜角, 式(7)

添字 a: 周囲空気, ac: 周囲空気からの熱伝導

ar: 周囲環境からの熱放射, b: 冷却ブライン

c: 排出限界, ca: 熱容量, cd: 熱伝導, cm: 融解終了

cp: 冷却銅板, f: 霜層, m: 霜層融解, he: 半球面, i: 氷

in: 初期, rf: 反射, rh: 放射熱源, si: 試験部側面

su: 供給, tp: 熱流束センサ, w: 融解水

2. 実験装置および実験方法

実験装置は、前報⁽⁴⁾に示したものと同様であり、その説明は省略するが、ここでは、図1に示される試験部の詳細および実験方法などについて述べる。試験部は、回転台に取り付けられ、任意の霜層傾斜角 ϕ ($\phi=0$, 水平配置) が得られるようになっており、傾斜角によっては、霜層融解により発生する融解水の排出が可能となる。放射熱源①として、前報⁽²⁾の実験結果より、放射熱を効率良く霜層が吸収するピーク波長 $\lambda=5.5\mu\text{m}$ の遠赤外線ランプを使用している。温度・湿度制御可能な着霜装置で任意の霜層を形成させる着霜板⑩には縦54mm×横111mm×厚さ1mmの銅板を使用し、銅板表面で放射熱の反射の影響を軽減するために、銅板表面に黒体塗料(放射率 $\varepsilon=0.99$)を約5 μm の厚さで均一に塗布してある。銅板下部には厚さ2mmのテフロンシート製熱流束センサ⑫(測定精度 $\pm 1\%$)を設置し、シートの上・下の温度差より通過熱流量を算定してある。熱流束センサ下部には60%エチレングリコール水溶液が流動する冷却槽⑬が設けてあり、初期条件としての冷却銅板表面および霜層温度の制御を可能としている。着霜銅板上の試験部空間の周囲空気温度 T_{a} および相対湿度 ϕ は一定条件となるように、前報⁽⁴⁾で述べた低温室内に設置した冷却装置および湿度調節器⑧により制御される。放射熱源①よりの放射熱が試験部容器壁面(厚さ10mmアクリル板)より反射して、霜層へ再入射する影響を避ける目的より、試験部空間壁には黒体テープ(放射率 $\varepsilon=0.99$)を取り付けて周囲壁面効果を極力軽減してある。着霜銅板上には、放射熱源からの放射熱が霜層表面で反射する熱量を測定するための放射熱量センサ⑦(測定熱流量範囲0~1kW/m², 測定精度 $\pm 1\%$)が、銅板中心より距離110mm離れた天頂角 $\theta = \pi/4$ の位置に設置されている。また、霜層高さ

H_{f} 、霜層表面温度 T_{f} 、および霜層表面近傍の空気温度 T_{a} を測定するための素線直径0.1mmのT型熱電対を取り付けた水平および垂直方向移動可能なトラバース装置④も設置してある。試験部下部には、融解水の排出量を測定するためにデジタル質量計(測定範囲0~310g, 測定精度 $\pm 0.3\%$)を設けてある。試験部内の相対湿度 ϕ は、湿度センサ⑨(電子式湿度計, 測定精度 $\pm 1\%$)により、また図1の黒丸印で示される各部の温度測定には、素線直径0.1mmのT型熱電対を使用している。各T型熱電対は、目盛り刻み0.05 $^{\circ}\text{C}$ の標準温度計により校正しており、測定温度の精度は $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ 以内と推定される。

実験方法は、着霜装置内で任意の着霜条件(空気温度・湿度および冷却ブライン温度など)にて厚さ $H_{\text{c,p}}=1\text{mm}$ の銅板上に着霜後、着霜した銅板をデジタル質量計にて計量した後、試験部内の一定温度に冷却されたテフロン製熱流束センサ⑫上に設置する。トラバース装置④により霜層高さ H_{f} (水平方向10点の平均高さ)と霜層表面 T_{f} 並びに空気温度 T_{a} を測定し、霜層および銅板下部温度の時間的変化が小さくなった後に試験部下部に設けた冷却槽内のブラインの流動を停止させ、ブラインを滞留したまま、あるいはブラインを排出した後、試験部を回転させ、所定の傾斜角 ϕ に設定する。その後、試験部上部の放射熱源①により放射熱エネルギーを入射させ、霜層融解を開始する。本実験に用いた霜層の状態は、文献⁽⁶⁾で分類される霜層成長期、すなわち霜柱の囲りに樹枝状結晶が成長した霜層密度の大きな霜層とした。なお、霜層の融解終了時間 t_{cm} は、銅板表面上に設置したT型熱電対による急激な温度上昇および霜層の完全融解を可視観察の結果より判断して求めた。本霜層融解実験での周囲環境条件の範囲は、放射熱エネルギー強度 $q_{\text{r,b}}=0\sim 1300\text{W/m}^2$ 、ブライン初期

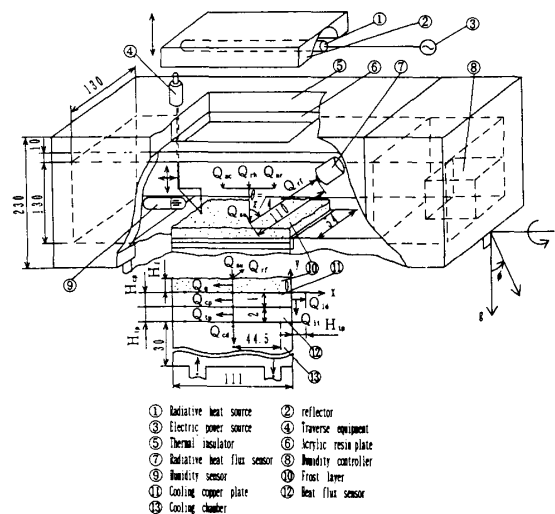


図1 試験部詳細図

温度 $T_{b,i,0} = -24 \sim -15^\circ\text{C}$, 周囲空気温度 $T_a = 0 \sim 17^\circ\text{C}$ および冷却銅板の傾斜角 $\phi = 0 \sim \pi/2 (\text{rad})$ であり, 霜層構造因子の範囲としては, 霜層高さ $H_f = 1.1 \sim 6.0 \text{ mm}$ および霜層重量 $M_f = 1.1 \sim 6.3 \text{ g}$ である. なお, 着霜冷却部熱容量の霜層融解に及ぼす影響の検討においては, 冷却槽内にブラインの存在する場合, ブラインを抜いた空気層のみの場合そして着霜冷却銅板を厚さ 50 mm のスタイロフォーム断熱材上に設置した断熱条件での実験が種々の因子のもので行われた.

3. 霜層放射融解過程における霜層周りの熱エネルギー収支

放射熱エネルギーを利用した霜層融解では, 図1に示されるように単位時間当たりの霜層への供給熱量 $Q_{s,u} (W)$ は放射熱源からの放射熱量 $Q_{r,b} (W)$, 周囲環境からの放射熱量 $Q_{a,r} (W)$ および周囲空気からの伝導熱量 $Q_{a,c} (W)$ の総和により, 次のように表される.

$$Q_{s,u} = Q_{r,b} + Q_{a,r} + Q_{a,c} \quad \dots \dots \dots (1)$$

ただし, $Q_{a,c} = \lambda_a (\partial T_a / \partial y |_{y=H_f}) A_f$, $Q_{a,r} = \varepsilon_r \sigma (T_a^4 - T_{f,s}^4) A_f$ であり, $\partial T_a / \partial y |_{y=H_f}$ は, 図1に示す座標系にてトラバース装置による空気層温度勾配 (y 方向) から求めた. ここで, 無限空間における放射率を $\varepsilon_a = 1$ とし, また, ε_r は文献⁽²⁾によった. 霜層表面での放射反射熱量 $Q_{r,r} (W)$ は, 銅板中心廻りに距離 110 mm 離れた半球面で受ける総熱量とし, その平均反射熱量となる天頂角 $\theta = \pi/4$ の位置で測定した単位面積当たりの放射熱エネルギー強度 $q_{r,r} (W/m^2)$ に半球面積 $A_{b,s}$ を掛けて算出している. 図1に示されるように y 方向の霜層下部の試験部を構成する銅板 (厚さ $H_{c,p}$) およびテフロン製熱流束センサ (厚さ $H_{t,p}$) への単位時間当たりの蓄熱量をそれぞれ $Q_{c,p}$, $Q_{t,p} (W)$ とし, 熱流束センサ下部から冷却ブラインへの伝達熱量 $Q_{c,d} (W)$, そして x 方向の冷却部側面から周囲環境への損失熱量を熱流束センサの蓄熱量 $Q_{t,i} (W)$ および伝導熱量 $Q_{t,d} (W)$ とすると単位時間当たりの霜層融解熱量 (霜層の顕熱と融解潜熱量の合計) $Q_m (W)$ は次式により算出される.

$$Q_m = Q_{s,u} - Q_{r,r} - (Q_{c,p} + Q_{t,p} + Q_{c,d}) - (Q_{t,i} + Q_{t,d}) \quad \dots \dots (2)$$

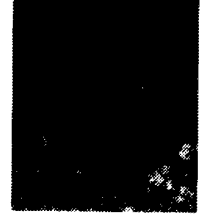
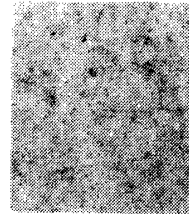
ただし, $Q_{c,p} = m_{c,p} C_{c,p} \Delta T_{c,p}$, $Q_{t,p} = m_{t,p} C_{t,p} \Delta T_{t,p}$, $Q_{c,d} = \lambda_{t,p} (\partial T_{t,p} / \partial y |_{y=-(H_{c,p}+H_{t,p})}) A_{t,p}$, $Q_{t,i} = m_{t,i} C_{t,p} \Delta T_{t,i}$, $Q_{t,d} = \lambda_{t,p} (\partial T_{t,p} / \partial x |_{x=0}) A_{t,i}$ である. ここで, $\Delta T_{c,p}$, $\Delta T_{t,p}$, $\Delta T_{t,i}$ は各材料の単位時間当たりにおける温度差である.

4. 実験結果および考察

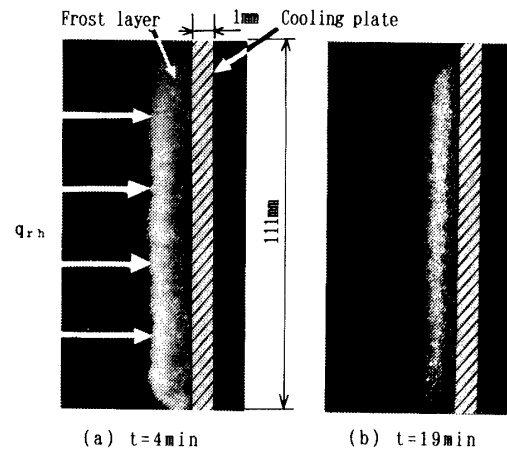
4.1 垂直平板における霜層融解挙動 図2は, 冷却伝熱面を傾斜角 $\phi = \pi/2$ に設定し, 冷却槽内にブライ

ンが存在する場合における霜層の融解過程を 35 mm カメラにて撮影した霜層断面および表面の可視化写真を示したものである. 実験条件は, 放射熱エネルギー強度 $q_{r,b} = 670 \text{ W/m}^2$, 周囲空気温度 $T_a = 9.8 \pm 0.8^\circ\text{C}$, およびブライン初期温度 $T_{b,i,0} = -20.0^\circ\text{C}$ とした. 本実験での霜層 ($H_f = 5.2 \text{ mm}$) は対象とした三次元的に成長・発達した霜

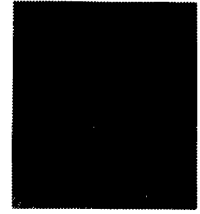
Surface of frost layer



Cross section of frost layer



Surface of frost layer



Cross section of frost layer

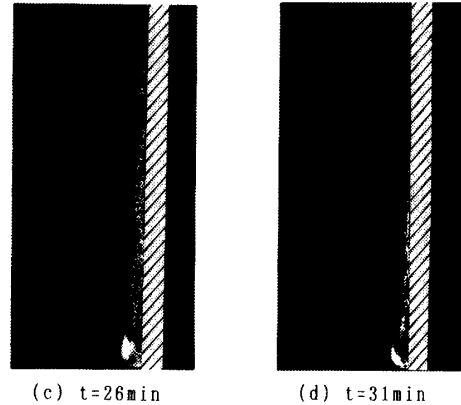


図2 霜層融解挙動

層密度の大きな霜層成長期における霜層構造をもつものである。放射熱源より霜層表面に放射熱エネルギーを照射すると、霜層表面近傍で放射熱エネルギーが吸収され、霜層表面が融解する。発生した融解水は毛管力により霜層内部へ浸透し、保水力により霜層内に保持される[図2(a)]。その後、時間が経過するにつれて霜層全体に融解水が浸透すると、融解水は重力方向に移動し、霜層下端より外部へ排出される[図2(b)]。さらに時間が経過すると、冷却銅板近傍に浸透した融解水が再凍結して氷層が生成される[図2(c)]。最終的には、冷却銅板上端より徐々に銅板表面が露出し始め[図2(d)]、冷却銅板上の全ての霜層が融解するところの融解終了となる。

4.2 冷却部熱容量による霜層融解に及ぼす影響

4.2.1 冷却部の温度分布および霜層周りの熱エネルギー収支

冷却槽内にブラインが滞留する場合の冷却部温度分布の経時変化を示したものが図3である。実験は、垂直霜層の状態(傾斜角 $\phi = \pi/2$)にて、放射熱エネルギー強度 $q_{r,s} = 670 \text{ W/m}^2$ 、周囲空気温度 $T_a = 9.8 \pm 0.8^\circ\text{C}$ 、ブライン初期温度 $T_{b,i} = -20.0^\circ\text{C}$ および相対湿度 $\phi = 88 \pm 4\%$ の条件下で行われた。融解開始初期において、冷却銅板表面および背面温度(図3中のf, e)は、霜層表面から霜層を介しての主に熱伝導による熱移動並びに融解水の霜層内部への浸透により、急激な上昇を示す。一方、冷却槽(d)およびブライン温度(a, b, c)は、徐々に上昇する傾向にある。また、融解開始時においてブライン温度(a, b, c)は、ほぼ -20°C の一定値を示していたものが、霜層の融解開始後、冷却槽内に発生した自然対流により、図中のa, b, cで示されるように温度分布が現われる。さらに時間の経過に伴って、冷却ブラインへの蓄熱熱量の増大とともにブライン温度(a, b, c)の上昇となる。このブラインの温度上昇が、霜層からの移動熱量の減少となり、冷却銅板などの温度(f, e)上昇割合の増加をもたらすことになる。その後、霜層全体が水分浸透層で形成されるまで、冷却銅板表面温度(f)は、氷の融点である 0°C に漸近する。このように冷却部の温度は、ブライン層に発達した自然対流により大きく影響を受けることになる。

図4(a)は、図3に示した冷却槽内にブラインが存在する場合の垂直配置(傾斜角 $\phi = \pi/2$)の実験条件における霜層周りの熱エネルギー収支の経時変化を示したものである。図4(a)より、霜層表面への供給熱量 $Q_{r,s}$ に対して、冷却部下部への伝導熱量 $Q_{c,d}$ と霜層融解熱量 Q_m の占める割合が大きいことがわかる。融解開始時において、放射熱源からの放射熱エネルギーは霜層表面近傍で吸収され、霜層の温度上昇および霜層表面近傍での

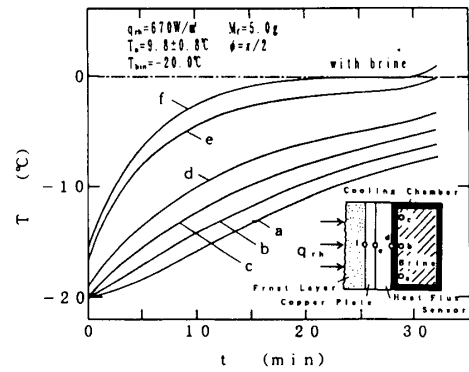
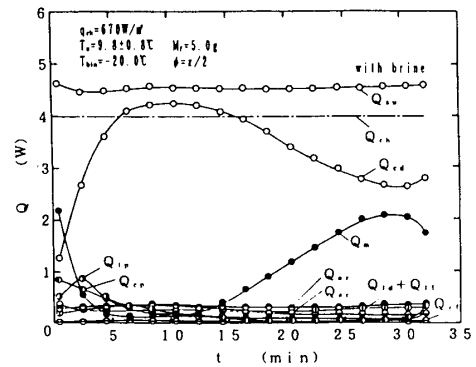
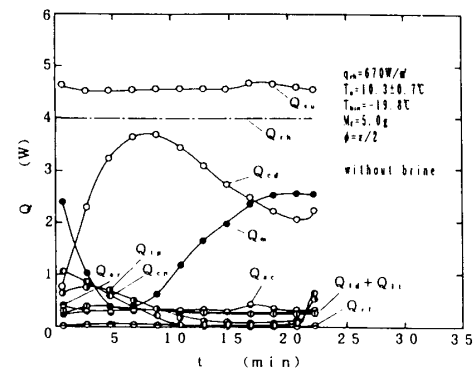


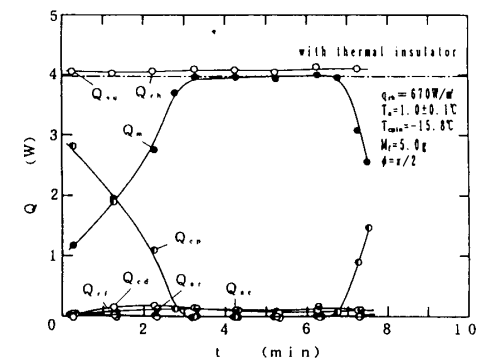
図3 垂直配置($\phi = \pi/2$)における冷却部の温度分布



(a) 冷却槽内にブラインが存在する場合



(b) 冷却槽内に空気が存在する場合



(c) 冷却銅板を断熱した場合

図4 霜層周りの熱エネルギー収支

融解に使われるため、 Q_m は大きな値を示すが、その後、霜層温度が上昇し、氷の融点 0°C に達すると霜層と冷却部下部との温度差が大きくなるため、 Q_{ca} は徐々に増大し、結果として Q_m が減少する傾向となる。さらに、時間が経過するにつれて、図3の冷却槽内に発生した自然対流の効果により、ブラインの温度上昇とともに Q_{ca} の減少、そして Q_m の増大となる。その後、融解がさらに進行し、冷却銅板表面が露出すると、冷却銅板、テフロン製熱流束センサへの蓄熱量、 Q_{cp} 、 Q_{tp} および冷却部下部への熱伝導による移動熱量 Q_{ca} の増加がみられ、結果として Q_m は霜層が完全に融解するまで減少傾向を示すことになる。

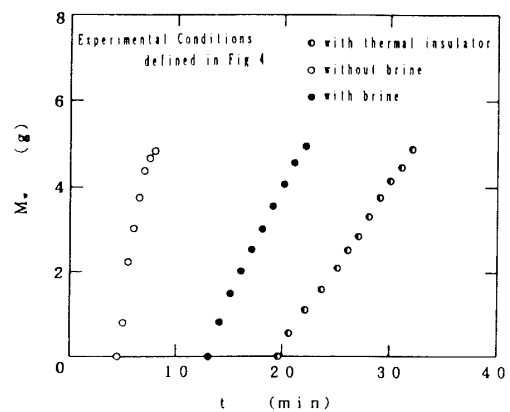
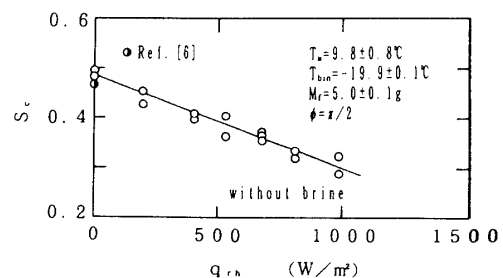
図4(b)は、図4(a)とほぼ同じ実験条件にて、冷却槽内のブラインを抜いて、空気層のみとした場合の熱エネルギー収支の経時変化を示したものである。図4(b)に示されるように冷却槽が空気層のみの場合には、ブラインの存在する場合(図3)と比較し、その熱容量の小ささより、短時間で空気層温度の上昇がみられ、結果的に Q_{ca} の最大値が早い時間に現れる。その後、 Q_{ca} の減少割合も大きくなる傾向を示す。霜層融解に費やされる熱量 Q_m は、極小値を示した後、ブラインの存在する場合よりも急激な上昇となり、 $t=17$ 分位より、 Q_m は Q_{ca} の値よりも大きくなり、最終的により短時間で融解終了となる特色を有する。

図4(c)は、冷却銅板を厚さ50mmのスタイロフォーム断熱材で覆った場合の垂直配置(傾斜角 $\phi=\pi/2$)における霜層周りの熱エネルギー収支の経時変化を示したものである。図4(c)に示されるように、断熱条件の場合、霜層融解熱量 Q_m の値は、実験開始とともに急激に増大し、ほぼ3分位より供給熱量 Q_{ca} の大部分を占め、ほぼ一定の値となり、最終的に約7分過ぎの融解終了に近づくに従って、急激な減少となる。また、冷却銅板への蓄熱量 Q_{cp} は、実験開始とともに急速に減少し、冷却銅板温度が 0°C となるほぼ3分位より、極めて小さな値で推移するようになる。その後、霜層の消滅とともに再び Q_{cp} の増大となる。このように冷却部の熱容量等により、霜層融解に費やされる熱量の経時変化、すなわち、融解終了時間に大きな影響を及ぼすことがわかる。

4・2・2 霜層より排出される融解水 図5は、図4で示した垂直配置の実験条件において霜層融解中、霜層より排出される融解水量 M_w の経時変化を示したものである。融解開始後、放射熱源からの放射熱エネルギーにより霜層温度は上昇し、氷の融点 0°C に達すると融解が起こる。発生した融解水は、瞬時に毛管力の影響により霜層内部へ浸透し、相変化を繰り返しながら、霜層全体が水分浸透層となると、融解水は重力の影響に

より、霜層下端より外部へ排出され、その質量 M_w は時間に対して増加傾向を示す。冷却部下部の熱容量が断熱条件よりブラインの存在へと大きくなるにつれて、融解水の排出開始時間は長くなり、排出速度(時間に対する排出量の勾配)も小さくなって、融解水排出終了に多くの時間が必要となる。冷却部下部の熱容量が大きいほど、前述のように単位時間当たりの冷却部下部への熱伝導による移動熱量 Q_{ca} が大きく、霜層融解熱量 Q_m の減少となる。その結果、霜層温度が氷の融点 0°C に達するまでの時間が長くなることと霜層表面で発生した融解水が毛管力により霜層内部へ浸透する際、融解水の再凍結が起こることが、このような融解水の排出時間の長期化をもたらすものと思われる。

図6は、垂直配置($\phi=\pi/2$)における放射熱エネルギー強度 q_{ra} と融解水の排出限界水分飽和度 S_c との関係を示したものである。ここで、 S_c の値は、融解水が排出されずに霜層内に蓄積される最大水分質量 M_{mw} と融解開始時の霜層質量 M_r の比 M_{mw}/M_r で定義し、水分質量 M_{mw} は霜層融解熱量 Q_m と図5に示されるような融解水排出までの時間の関係から算出する。実験は、冷却槽内にブラインが存在しない空気層の場合において、周囲空気温度 $T_a=9.8\pm0.8^\circ\text{C}$ 、およびブライン初期温度 $T_{bin}=-19.9\pm0.1^\circ\text{C}$ および相対湿度 $\phi=81\pm14\%$ の条件下で、空隙率 $\chi=0.81\pm0.01$ 、質量 $M_r=5.0\pm0.1\text{g}$ の霜層を用

図5 融解水排出量 M_w の経時変化図6 放射熱エネルギー強度 q_{ra} と排出限界水分飽和度 S_c の関係

いて、融解を行った。図中には、勝田らが行った自然融解除霜($q_{r,b}=0\text{W/m}^2$)に関する実験結果⁽⁹⁾も示してある。放射熱エネルギー強度 $q_{r,b}$ が増大するにつれて排出限界水分飽和度 S_e は減少する傾向を示すことが図6よりわかる。この減少傾向は、次のように説明できる。 $q_{r,b}$ が大きいほど、霜層表面近傍で放射熱源からの放射熱エネルギーが吸収されて、多量の融解水が発生し、毛管力により霜層内へ浸透する水分量に対して重力により霜層下端へ移動する水分量が増大するため、融解水が霜層下端より排出するまでの時間の短縮そして霜層融解熱量 Q_m の減少となる。その結果、 Q_m から求めた S_e は、 $q_{r,b}$ が増大するにつれて減少することになる。また、 $q_{r,b}=0\text{W/m}^2$ における本実験データは、勝田らの自然融解における実験値と良く一致していることもわかる。

4.2.3 傾斜角による霜層融解終了時間 図7は、冷却部の傾斜角 ϕ を変化させた場合の霜層融解終了時間 $t_{e,m}$ を示したものである。実験は、傾斜角を $\phi=0\sim\pi/2$ の範囲で変化させ、霜層融解中冷却槽内に冷却ブラインを滞留した場合および排出した空気層の場合においては、 $q_{r,b}=670\text{W/m}^2$ 、 $M_r=5.0\pm0.1\text{g}$ 、 $T_a=10.0\pm1.0^\circ\text{C}$ および $T_{b,i,n}=-19.9\pm0.1^\circ\text{C}$ の条件で、また冷却銅板背面を断熱した場合においては、 $T_a=1.0\pm0.1^\circ\text{C}$ 、 $T_{b,i,n}=-16.0\pm0.3^\circ\text{C}$ の条件で行われた。図7に示すように、冷却部下部の熱容量がブライン層より断熱条件へと小さくなるにつれて、霜層融解終了時間 $t_{e,m}$ が短くなることがわかる。このような $t_{e,m}$ の傾向は、前述したように冷却部下部の熱容量が小さいほど、融解初期において冷却部下部の温度上昇が大きく、冷却部下部への熱伝導による移動熱量 $Q_{c,d}$ が減少し、霜層融解熱量 Q_m が増加することに起因するものである。さらに、冷却部下部の熱容量が小さいほど、 ϕ の変化による影響が小さく、断熱条件の場合にはほとんど $t_{e,m}$ の傾斜角 ϕ 依存性の

無い結果となる。一方、冷却槽内に熱容量の大きなブライン層が存在する場合には、図3の垂直配置($\phi=\pi/2$)の温度変化からもわかるようにブライン層の自然対流の影響により、霜層融解終了時間 $t_{e,m}$ の増大となる。また、 ϕ の減少とともに自然対流の効果も弱まり、 $t_{e,m}$ の値も小さくなり、 $\phi=0$ の水平配置では、ブライン層は上部加熱の状態となり、自然対流の発生しない熱伝導のみにてブライン層への熱移動となる。その結果、霜層へ蓄積する熱量の増大をもたらす、 $t_{e,m}$ の値の減少となる。このような ϕ に対する $t_{e,m}$ の傾向は、冷却槽が空気層のみの場合にも見られるが、空気層の自然対流の弱さより、 $t_{e,m}$ の ϕ に対する依存性は少なくなる。

4.3 霜層融解終了時間に関する無次元整理式

4.3.1 無次元整理式の誘導

霜層融解終了時間 $t_{e,m}$ に影響を及ぼす諸因子としては、放射熱源からの放射熱エネルギー量 $Q_{r,b}$ 、周囲環境よりの放射熱量および伝導伝熱量 $Q_s(=Q_{s,r}+Q_{s,c})$ 、周囲空気温度 T_a 、相対湿度 ϕ (前報⁽³⁾の結果より、本実験範囲ではその影響は少ないので無視する)、冷却部の傾斜角 ϕ 、冷却部の熱容量($Q_{c,p}+Q_{i,p}+Q_{i,i}$)そして初期条件としての冷却ブライン温度 $T_{b,i,n}$ などがある。他方、霜層構造では霜層高さ H_r 、質量 M_r 、空隙率 χ および霜層初期温度 $T_{r,i,n}$ などが考えられる。これらの諸因子の効果は次元解析により次式に示すような無次元量として定義できる。

$$\text{無次元放射熱量 } Q_{r,b}^* = Q_{r,b}/Q_i \quad \dots\dots (3)$$

$$\text{無次元周囲環境熱量 } Q_s^* = (Q_{s,r}+Q_{s,c})/Q_i \quad \dots\dots (4)$$

$$\text{無次元熱容量 } Q_{c,s}^* = Q_m/(Q_{c,p}+Q_{i,p}+Q_{i,i}) \quad \dots\dots (5)$$

$$\text{空隙率 } \chi = 1 - \rho_i/\rho_i \quad \dots\dots (6)$$

$$\text{無次元傾斜角 } \phi^* = 1 + \phi \quad \dots\dots (7)$$

$$\text{無次元融解終了時間(7リI数)} \tau = a_i t_{e,m}/H_r^2 \quad \dots\dots (8)$$

なお、式(4)および式(5)における各熱量は、図4に示されたように時間と共に変化することより、実験開始から霜層融解終了時までの積算した値を用いてある。ここで、霜層内の伝導伝達量 Q_i は $\lambda_i(\Delta T_i/H_r)A_i$ 、霜層融解熱量 Q_m は $M_r(C_i\Delta T_i+L)$ 、 ΔT_i は融解開始時における霜層の平均温度と氷の融点である 0°C との温度差、および霜層の密度は $\rho_i=M_r/(H_rA_i)$ とする。式(3)~(8)で定義した無次元量を用いると、無次元融解終了時間 τ は次の無次元整理式で表現できる。

$$\tau = B \cdot Q_{r,b}^{*n_1} Q_s^{*n_2} Q_{c,s}^{*n_3} \chi^{n_4} \phi^{*n_5} \quad \dots\dots (9)$$

以下、冷却槽内のブラインの有無の条件において、各因子の指数(n_1, n_2, n_3, n_4, n_5)を実験因子毎に実験データをもとに求めるとともに、水平霜層の融解に関する結果と比較検討する。

図8は、傾斜角 $\phi=\pi/2$ における無次元放射熱量 $Q_{r,b}^*$ と無次元融解終了時間 τ の関係で、冷却槽内にブライ

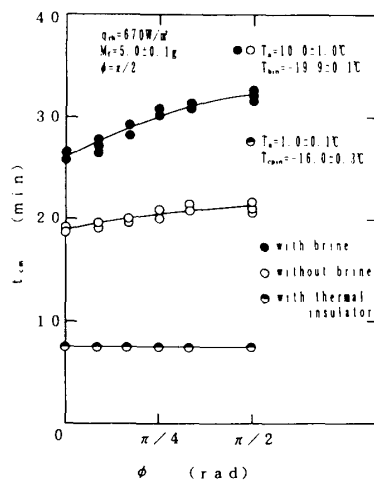


図7 傾斜角 ϕ の変化による霜層融解終了時間 $t_{e,m}$

ンが存在する場合と存在しない場合の実験データをプロットしたものである。また、前報⁽³⁾で示した傾斜角 $\phi=0$ における τ と $Q_{r,h}^*$ との関係 $[\tau \propto (Q_{r,h}^*)^{-1.10}]$ 、式(9)中の $n_1=-1.10$]も図中に実線で示してある。図8より、 $Q_{r,h}^*$ が増大するにつれて τ は指数関数的に減少する傾向にある。

無次元周囲環境熱量 $Q_{a,e}^*$ と無次元融解終了時間 τ との関係を示したものが図9である。 $Q_{a,e}^*$ が増加するにつれて、 τ は減少する傾向を示すことが図9よりわかる。この τ 値の減少は、周囲空気温度 T_a を増加させると、霜層表面温度 $T_{r,s}$ と周囲空気温度 T_a との差が大きくなり、周囲空気からの伝導伝熱量 $Q_{a,c}$ および放射熱量 $Q_{a,r}$ の増大によるものである。前報⁽³⁾で述べたように、冷却槽内にブラインが存在する場合の傾斜角 $\phi=0$ における $Q_{a,e}^*$ と τ の関係 $[\tau \propto (Q_{a,e}^*)^{-0.55}]$ 、式(9)中の $n_2=-0.55$ と比較すると傾斜角 $\phi=\pi/2$ における実験結果は、ほぼ同じような変化傾向を示すことより、 $Q_{a,e}^*$ と τ との関係において ϕ の影響が小さいことがわかる。また、冷却槽内にブラインが存在しない空気層の場合(図9中白丸印)においても、ブラインの存在する場合よりも、短時間で霜層融解終了となるが、傾向的には両者とも類似したものとなる。

図10は無次元熱容量 $Q_{c,e}^*$ と無次元融解終了時間 τ との関係を傾斜角 $\phi=\pi/2$ の場合を例にとって実験データをプロットしたものである。図10より、 $Q_{c,e}^*$ の増加とともに、 τ 値の減少がみられる。この τ の減少傾向は、熱容量パラメータである冷却ブライン初期温度 $T_{b,i}$ が増加するに従って、冷却部への熱伝導による入熱の減少となり、結果として、霜層融解に使われる熱量 Q_m の増加となることより説明できる。さらに、垂直配置 $\phi=\pi/2$ の本実測値は、水平配置($\phi=0$)の場合[図10中の実線、 $\tau \propto (Q_{c,e}^*)^{-0.75}$ 、式(9)中の $n_3=-0.75$]とほぼ同様な変化傾向となり、また、冷却槽に熱容量の大きなブラインの存在しない空気層のみの場合もその $Q_{c,e}^*$ に対する τ の変化傾向は、傾斜角 ϕ にあまり依存しない結果を得た。

霜層構造変化の因子である霜層の空隙率 χ と無次元融解終了時間 τ との関係を示したものが図11である。霜層高さ H_r が一定の条件において霜層質量 M_r を減少する(空隙率 χ が増大する)と霜層を完全に融解するまでの融解潜熱量が減少するため、無次元融解終了時間 τ が減少することになる。 χ に対する τ の変化傾向は、傾斜角 ϕ および冷却槽内のブラインの有無にはあまり関係がないようである。

図12は、無次元傾斜角 ϕ^* と無次元融解終了時間 τ との関係を示したものである。 τ の値は、 ϕ^* が増大

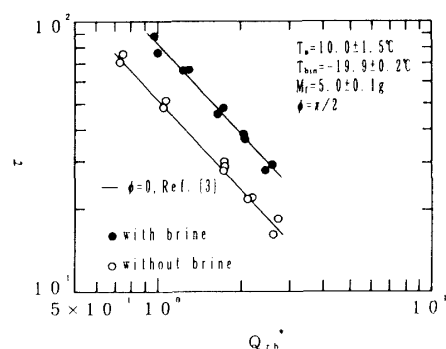


図8 無次元放射熱量 $Q_{r,h}^*$ と無次元融解終了時間 τ の関係

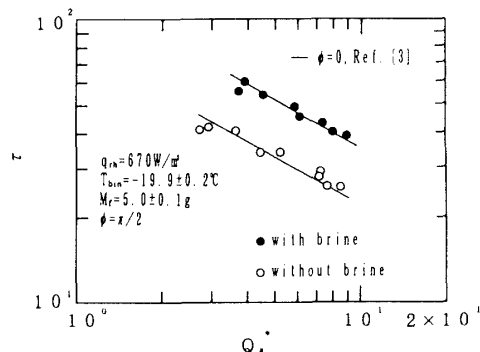


図9 無次元周囲環境熱量 $Q_{a,e}^*$ と無次元融解終了時間 τ の関係

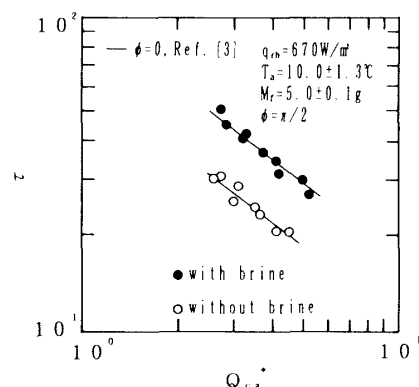


図10 無次元熱容量 $Q_{c,e}^*$ と無次元融解終了時間 τ の関係

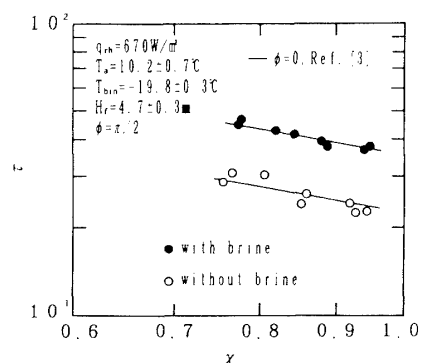


図11 空隙率 χ と無次元融解終了時間 τ の関係

するにつれて、増大傾向を示すことが図10より理解できる。この ϕ^* による τ の増大傾向は、 ϕ^* の値が増大（傾斜角の増大）するにつれて、融解水が重力の影響により、霜層下端方向へ浸透する際の再凍結の発生や霜層下端付近の霜層高さの増大が、霜層を完全に融解するまでに長時間を必要とすること、並びに冷却槽内で発生した自然対流による冷却銅板背面への移動熱量 Q_{ca} の増加を伴う霜層融解に費やされる熱量 Q_m の減少などが主要因と考えられる。また、冷却槽内で発生した自然対流による熱移動量の差が、ブライン層(図12中黒丸)および空気層(図12中白丸)の場合の τ と ϕ^* の関係の差となって現われている。図12の実線で示されるように、冷却槽内にブラインが存在する場合、 τ は、 $(\phi^*)^{0.19}$ [式(9)中の $n_s=0.19$]に比例して変化する。また、冷却槽内が空気層の場合、 τ は、 $(\phi^*)^{0.17}$ [式(9)中の $n_s=0.17$]に比例して変換することがわかる。

以上の各無次元量と無次元融解終了時間 τ の関係より、式(9)の定数Bを各条件にて算定すると無次元融解終了時間 τ に関する実験整理式は相対偏差 $\pm 8.5\%$ 以内で次のようになる。

冷却槽内にブラインが存在する場合：

$$\tau = 320 \cdot Q_{r,b}^{*-1.10} Q_{a,b}^{*-0.55} Q_{c,a}^{*-0.75} \chi^{-1.20} \phi^{*0.19} \quad (10)$$

冷却槽内に空気のみが存在する場合：

$$\tau = 230 \cdot Q_{r,b}^{*-1.10} Q_{a,b}^{*-0.55} Q_{c,a}^{*-0.75} \chi^{-1.20} \phi^{*0.17} \quad (11)$$

$$\text{適用範囲： } Q_{r,b}^* = 0.97 \sim 3.43, \quad Q_{a,b}^* = 2.65 \sim 8.80, \\ Q_{c,a}^* = 2.64 \sim 4.49, \quad \chi = 0.79 \sim 0.96$$

図13は無次元整理式と実験結果との比較を示したものであり、修正無次元終了時間 τ^* と無次元傾斜角 ϕ^* の関係で表している。修正無次元終了時間 τ^* は次式のように定義してある。

$$\tau^* = \tau / (Q_{r,b}^{*-1.10} Q_{a,b}^{*-0.55} Q_{c,a}^{*-0.75} \chi^{-1.20}) \quad (12)$$

これらの上式の無次元整理式を用いることにより、放射熱エネルギーを利用した霜層融解終了時間 t_{em} は、放射熱源からの放射熱エネルギー強度 $q_{r,b}$ (W/m²)、周囲空気温度 T_a (°C)などの周囲環境条件、霜層構造を代表する空隙率 χ および傾斜角 ϕ などを与えることにより算出することができる。

5. 結 言

本研究では、傾斜霜層を放射熱エネルギーにより照射融解した場合の霜層融解に係る諸因子の影響を明らかにし、次のような結論を得た。

(1) 霜層が傾斜した場合における霜層融解に影響を及

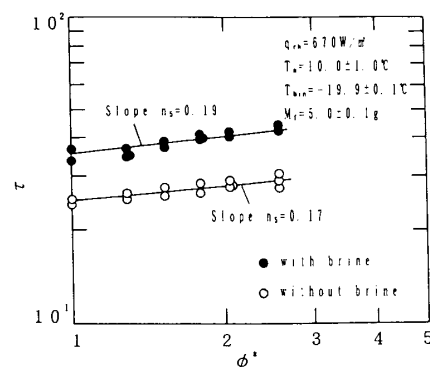


図12 無次元傾斜角 ϕ^* と無次元融解終了時間 τ の関係

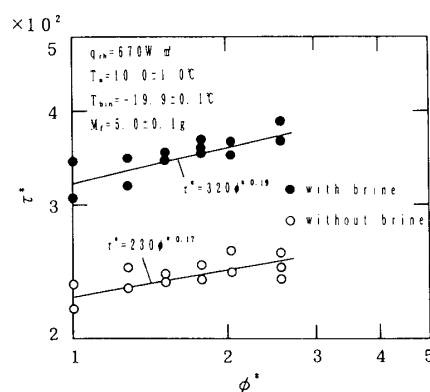


図13 無次元傾斜角 ϕ^* と修正無次元融解終了時間 τ^* の関係

ぼす因子として、放射熱源からの放射熱エネルギー強度、周囲空気温度、冷却ブライン初期温度、傾斜角および霜層の空隙率を取り上げ、これら諸因子の霜層融解挙動に及ぼす影響を温度分布、移動熱量および融解状況の可視化写真等により定量的に明らかにした。

(2) 傾斜角に依存した霜層冷却部に発生する自然対流の影響が霜層融解終了時間に影響を及ぼし、傾斜角の増大とともに自然対流の影響が大きくなり、霜層融解により多くの時間が必要となることが判明した。

(3) 次元解析により、霜層が傾斜した場合における霜層融解に影響を及ぼす諸因子の無次元量を定義し、最終的に霜層融解終了時間に関する無次元整理式を誘導することができた。

参考文献

- (1) 稲葉・福迫, 機械の研究, 43-5(1991), 621.
- (2) 稲葉・他2名, 日本冷凍協会論文集, 9-3(1992), 257.
- (3) 稲葉・他2名, 機論, 58-555, B(1992), 3373.
- (4) 稲葉・他4名, 機講論, No. 925-1(1992-3), 254.
- (5) Hayashi, Y., et al., Trans. ASME, J. Heat Transf., 99(1977), 237.
- (6) 勝田・他2名, 冷凍, 58-665(1983), 229.