フィン付伝熱面上の氷粒子層の融解挙動*
(熱交換器の最適除霜に関するアプローチ)菅原 征洋*¹, 稲葉 英男*²
石野 真敏*³, 藤田 忠*¹The Melting Behavior of an Ice Particles Layer on a Heated Base with Fins
(An Approach to Optimum Defrosting for a Heat Exchanger)Masahiro SUGAWARA, Hideo INABA,
Masatoshi ISHINO, and Tadashi FUJITA

Experimental work was carried out to obtain information concerned with the optimum conditions for the melting of frost on a heat exchanger. An ice particles layer representing frost was melted on a heated base with fins consisting of copper plates. The size ratio of the length between the fins to the height of a fin L/H ranged from 0.33 to 1.33. It was demonstrated that the heat flux supplied to melt the ice particles layer produces a large heat loss compared with the melting of the ice plate. This behavior is mainly attributable to the fact that the ice particles layer is a porous media. The ratio of the net heat flux for the melting to the supplied heat flux Q_m/Q_s is dependent on the density of ice particles layer, the supplied heat flux, the environmental temperature (initial temperature of the ice particle layer) and the size ratio of the fin.

Key Words: Thermal Engineering, Melting, Ice Particles Layer, Frost, Size Ratio of Fins, Density, Heat Exchanger

1. ま え が き

空気を熱源とするヒートポンプ形空調機を寒冷地で運転する場合の最大の難点は着霜による熱交換器の性能低下と言われている。これを解決する一つの方法として熱交換器の最適除霜方法の確立が急務となっている。熱交換器などの着霜メカニズムに関してはこれまで数多くの研究がなされているが除霜に関する研究は比較的少ないのが現状である⁽¹⁾。

ヒートポンプ形空調機に使われている熱交換器は、例えばワッフルフィン形熱交換器のようにフィン付熱交換器が一般的である。このようなフィン付伝熱面上の着霜の融解は平面伝熱面上の着霜の融解と比較してかなり複雑な挙動を示すことが予測される。しかし、フィン付伝熱面上の着霜の融解に関する研究は今のところ極めて少ない状況であると言って良い。

本研究は、フィン付伝熱面上の氷粒子を融解させる実験を行ったものであり、これまであまり試みられなかったフィン付熱交換器の着霜を効率良く融解させる

ための基礎試料を得ようとしたものである。

2. 実験装置および方法

氷粒子層の融解実験は温度制御の可能な低恒温室内で行った。図1に融解実験装置の概要を示す。氷粒子で充てんされているフィン部(Test section)の下に融解に必要な熱量を供給する加熱部(Heating section)がある(図2にこの加熱部の詳細を示す)。主ヒータと補助ヒータはステンレスはくの電気抵抗体で作製した。加熱部の下に位置している冷却部を併用して両ヒータ間の温度差を零にすることによって主ヒータからの熱損失を軽減した。図1に示すように本実験では後述の熱量比を把握しやすくするためフィン部は厚さ5 mmで一辺が188 mmの正方形銅板の基板に溝を掘り、この部分にはんだを流して厚さ $\delta=1$ mmの銅製のフィン板を固定した。フィンの高さ H は15 mmで一定であり、フィン間距離 L を変えてフィンの寸法比 L/H を0.33, 0.67および1.33の3種類について実験を行った。ただし、最小寸法比0.33の設定は伝熱面の作製上の制約による。

融解実験に用いた氷粒子試料は次のようにして生成した。蒸留水を凍結させた氷塊を氷削機にかけて粗い粒子をまずつくる。この粗い粒子を若干メッシュサイ

* 昭和63年7月15日 東海支部浜松地方講演会において講演、原稿受付 昭和62年11月9日。

*¹ 正員、秋田大学鉱山学部 (〒010 秋田市手形学園町1-1)。

*² 正員、北見工業大学 (〒900 北見市公園町165)。

*³ 東芝(株) (〒105 東京都港区芝浦1-1-1)。

ズの異なる二つのふるいにかけて見掛けの粒子径 d をそろえたものを水粒子試料とする。

水粒子を所定の密度に充てんしたフィン部を加熱部上板にビスを用いて密着固定する。熱的接触抵抗を軽減するために密着部に流動パラフィンを詰めた。水粒子の融解の初期温度条件は外気温度と同じ一様温度 T_{in} である。融解の進行に伴って融解水は測定部側壁下に 10 箇所設けてある外径 14 mm のシリコンチューブからすみやかに流出する。この流出質量はメトラー上皿電子てんびんで連続的に測定した。融解水の流出が停止した時点と融解状況の観察によって融解終了時を判定した。

3. 結果および考察

水粒子層の融解実験を行う前に水の融点温度 0°C の外気温度の中で水板の融解実験を行って実験精度を検討した。図 3 は水板融解実験の場合の熱量比 Q_m/Q_t と供給熱流束 $q \text{ W/m}^2$ の関係を示した。ただし、 Q_m は全融解質量 (= 水板の質量) に融解の潜熱 L を乗じたもので融解に費やされた熱量であり、 Q_t は融解終了時まで主ヒータから供給した熱量である。もし、熱損失がなければ、この熱量比は 1.0 の値を示すことになるが、図 3 の結果をみると供給熱流束 q にあまり影響されず約 0.94 なる安定した値を示している。これから示す供給熱流束 q はこの 0.94 を乗じて補正したものである。

図 1 実験装置概要図

Enlarged figure of (A)

図 2 加熱部の拡大図

次にフィン間隔が広い場合に相当する平面伝熱面上の水粒子層の融解実験結果から水粒子層の融解挙動の特徴的なところをまず述べる。図 4 は平面伝熱面の場合の水粒子層の融解について熱量比 Q_m/Q_t と供給熱流束 q の関係の一例を示した。実験条件については図 4 中に示してあるが、融解実験中の外気温度は水粒子層の一樣初期温度 T_{in} と同一温度である。参考のため青木ら⁽²⁾の実測結果を載せてあるが、彼らの実験条件は、水粒子径 $d=0.2 \text{ mm}$ 、初期水粒子層厚さ $h_{in}=25 \text{ mm}$ 、水粒子層密度 $\rho=550 \text{ kg/m}^3$ 、外気温度は $\circ$ 印: -6°C 、 $\blacksquare$ 印: -11°C である。また、図 4 中の破線は融解水の水粒子層内浸透を無視したいわゆる氷板の融解のように扱って数値解析した結果である。 $\circ$ 印の実験条件 (実線でその傾向を示している) の場合についてのみ数多く実験を行ったが、比較的難しい実験にしては再現性は比較的良いものと思われる。供給熱流束 q の増加によって熱量比の値は若干小さくなる傾向にある。当然のことながら外気温度 T_{in} の低下に伴って熱量比が減少しており、外気温度の低下はかなり損失熱量を増加させている。青木ら⁽²⁾の測定した熱量比は著者らのそれよりもかなり低い値を示しているが、これは水粒子層上面の熱伝達率が著者らの自然対流であるのに対して青木らのは強制対流であることに多分に起因しているものと考えられる。また初期水粒子

図 3 氷板融解の熱量比 (実験精度の検討)

図 4 平面伝熱面上の水粒子層の融解

層厚さ h_{in} が厚いほど熱量比は高く供給熱量は有効に利用されている。融解水の層内浸透を無視して解析した熱量比（破線で示している）と比較して実際の融解時にみられる熱量比は約 30 % ほど低い値を示している。 h_{in} の影響も含めてこれらの挙動の原因としては、水粒子層内部への融解水の浸透が挙げられるほか⁽³⁾⁽⁴⁾ 水粒子層は多孔質層であることからふく射エネルギーの伝達による熱損失などが考えられる。その他の要因としては、やはり多孔質層であることから水粒子群表面からの昇華に伴う潜熱の吸収や昇華した水蒸気の層内拡散⁽⁵⁾なども無視できないであろう。

次にフィン付伝熱面上の水粒子層の融解について述べる。この場合の融解挙動はフィンの存在のため平面伝熱面の場合にみられないいくつかの特徴的なものが見られる。

図 5 はフィン付伝熱面上の水粒子層の融解過程の概念を示した。図 5 (a) は融解開始の状態の水粒子はフィン間に充てんされている。融解開始後しばらくするとフィン側面と基板から融解が先行して水粒子層はフ

図 5 融解過程の概念図

図 6 融解挙動の写真観察結果

イン側面から離れ狭い空気層ができる。〔図 5 (b)〕。このため水粒子層はこの空気層の伝熱抵抗のため一時融解速度が低下する。水粒子層は図 5 (b) の状態を維持できず図 5 (c) に示すように再びフィン側壁に接触して融解が促進する。図 5 (d) は融解終了近くの状態である。図 6 はフィンの寸法比 L/H (フィン間距離/フィン高さ) = 1.33 ($L=20$ mm) の融解時間 $t=6$ min のときのフィン伝熱面上から観察したもので図 5 (c) にほぼ相当する。これより、水粒子層がフィン側面に接触している部分と離れている部分が明確に認められる。

水粒子層の融解水は融解開始と同時に層外部へ流出するのではなく、最初融解水は表面張力（毛管力）の作用を受けて層内部へ浸透していく。そして、層内の水分飽和度がある限界値に達すると融解水は層外部へ流出し始めるのである。図 7 は水粒子層の融解開始時点から融解水が層外部へ流出し始める時間 t_0 に及ぼす供給熱流束 q 、フィンの寸法比 L/H 、初期雪層温度（外気温度） T_{in} および水粒子層密度 ρ の影響に関する一例を示したものである。ただし図 7 中の実線は $T_{in} = -5^\circ\text{C}$ 、 $\rho = 500 \text{ kg/m}^3$ の場合の実験の傾向を示したものである。当然のことながら q が増し T_{in} が高くなると融解速度が増すため t_0 が短縮する傾向にある。また興味深いのは水粒子層密度が小さいと t_0 がかなり短くなることである。これは、密度 ρ と空げき率 ϵ の関係が $\rho = (1 - \epsilon)\rho_i$ であることから（ただし ρ_i は水の密度）、密度の減少は水粒子層内の空げきの増加に相当するため融解水はそれほど層内部に浸透しないはずであるから早めに融解水が流出し始めるのであろう。実際に運転している熱交換器の着霜の密度は着霜時間があまり長くなければそれほど大きくはないであろうから、除霜時には比較的早い時期に融解水は流出してくるものと考えられる。

本実験ではフィン高さ H が 15 mm に固定した寸

図 7 融解水の層外部流出時点

図 8 熱量比に及ぼす諸因子の影響

法比の変化であり、しかも、見掛けの水粒子径 d が 0.33 mm と一定であるなど実験条件がある程度制約されている。これらの限られたデータからフィン付伝熱面上の水粒子層の融解に及ぼす因子の傾向をさぐべく熱量比 Q_m/Q_i の挙動を有次元変数で整理してみたのが図 8 である。これによるとフィン付伝熱面の場合の熱量比は水粒子層の密度 ρ に比例し、逆に熱流束 q と初期水粒子層温度 (外気温度) の絶対値 $|T_{in}|$ に反比例するという特徴をもつ。しかし寸法比 L/H の熱量比に及ぼす影響は比較的小さいながらも、熱量比は寸法比に比例する傾向を示している。これは、 L/H が小さくなると水粒子の融解時間が短縮されるという利点をもつ反面、損失熱量もこれに増して増加するからであると考えられる。一般の熱交換器に用いられている伝熱面の形状は平板を主体とした本研究のものと異なりフィン付管が一般に使用されている。しかもフィン付管の寸法比は本研究のそれよりはかなり小さい値である。したがって、本研究の結果がこのままの形で定量的にフィン付管に適用しにくい、しかし、熱量比に及ぼす諸因子の定性的なアプローチは期待でき、本研究は除霜性能の良い熱交換器の設計の際に考慮すべき一つの示唆を与えるものと思う。

図 8 に示されている実線は結果の傾向を近似したものであり本実験範囲内では次式によって示される。

$$Q_m/Q_i = 0.37 F^{0.429} \quad (1)$$

ただし

$$F = 4.2 \rho^{0.26} q^{-0.789} |T_{in}|^{-0.319} \times (L/H)^{0.063}$$

である。なお、変数の単位ならびに実験範囲などを次に示す。

水粒子層密度 (kg/m³): $250 < \rho < 500$,

供給熱流束 (W/m²): $1000 < q < 3300$,

初期水粒子層温度 (外気温度) (°C): $-10 < T_{in} < 0$,

フィンおよび基板の材質: 銅,

フィンの寸法比: $0.33 < (L/H) < 1.33$,

フィン高さ: $H = 15$ mm (固定),

フィン厚さ: $\delta = 1$ mm (固定),

見かけの水粒子径 $d = 0.33$ mm (固定)

4. む す び

除霜性能の良い熱交換器の設計や最適除霜条件に関する基礎試料を得るために、これまで試みられなかったフィン付伝熱面上の水粒子層の融解に関するモデル実験を行った結果、供給熱流束の有効利用度の一つの目安となる熱量比は本実験範囲内では本文式 (1) に示されているごとく水粒子層密度、供給熱流束、初期水粒子層温度 (外気温度) およびフィンの寸法比に影響されるという一つの定量的知見を得ることができた。ただし、本実験では見掛けの水粒子径やフィン高さが一定の場合に限られているという制約があるため今後これらの影響も検討してみたいと思う。

最後に本実験に協力していただいた片桐克彦氏 [東海ゴム(株)] に感謝の意を表するものである。

文 献

- (1) 桑原・山崎・河村, 日本冷凍協会論文集, 2-3 (昭 60), 203.
- (2) 青木・服部・千葉, 機論, 51-471, B (昭 60), 3567.
- (3) 菅原・ほか 3 名, 機論, 48-435, B (昭 57), 2407.
- (4) 菅原・木元, 機論, 49-442, B (昭 58), 1289.
- (5) 吉田, 低温科学, 5 (昭 23), 93.