

## ミスト冷却熱交換器に関する研究\*

### (第3報, 高性能管による伝熱促進)

林 勇二郎\*<sup>1</sup>, 滝本 昭\*<sup>1</sup>  
松田 理\*<sup>2</sup>, 北川 剛\*<sup>3</sup>

## Study on Mist Cooling for Heat Exchangers (3rd Report, Development of High-Performance Mist Cooled Heat Transfer Tubes)

Yujiro HAYASHI, Akira TAKIMOTO,  
Osamu MATSUDA, and Takeshi KITAGAWA

In order to pursue a high-performance mist-cooled heat exchanger, development of heat-transfer tubes with various surface structures, such as grooved, wire-wound, and screen mesh wrapped tubes, has been performed on the basis of the previous results of smooth surface tubes. The effect of surface structures on heat-transfer enhancement was clarified experimentally and theoretically with relation to the extension of a wetted area.

**Key Words:** Thermal Engineering, Mist Cooling, Heat Exchanger, Heat Transfer Enhancement, Liquid Film Formation, Surface Structure

### 1. 緒 言

飽和温度以下の比較的低温の加熱面を対象としたミスト冷却においては、壁面熱伝達を液膜蒸発支配とするのが最も効果的である<sup>(1)(2)</sup>。このことは、少量の液供給によりできるだけ広範囲にかつ、薄い液膜で加熱面を覆うこと、すなわち、ミスト冷却熱交換器の高性能化はそれにかなう機器構造と運転条件の最適化によって達成されることを意味する。著者らは、これまでに管群熱交換器の構成要素として表面が平滑な水平単一円管を対象として、気流によって搬送される分散液滴群の管表面への衝突・捕集、衝突滴の付着安定性とぬれ条件など、ミスト冷却の基本的な問題について明らかにしてきた<sup>(3)</sup>。さらに、ミスト冷却熱伝達について、液滴が積極的に衝突する円管前面での液膜形成を考慮した解析と、そこでオーバーフローした液が筋流として円管裏面をう回し下端部より落下離脱するという実験的事実とによる議論を展開し、管全面に対する熱

伝達率が壁面衝突滴の付着安定性に基づいて導出されたぬれパラメータと相関があることを明らかにした<sup>(4)</sup>。ここで、ぬれパラメータは供給液滴の質量速度、気流速度、円管の加熱条件など、ミスト冷却における諸条件を含む無次元量であり、熱伝達率との相関関係より運転条件の最適化が決定されることになる。

以上の平滑管の結果をミスト冷却管の高性能化の観点からとらえると、円管裏面での筋流を膜状流とし、それを管下端部から速やかに離脱させることにより、管表面からの液蒸発効果を如何に向上させるかが最大の焦点となる。しかし、噴霧気流を直接受けない管裏面は、液の供給ならびに気流せん断力を受けて液が膜状化することに対して極めて無力であり、ここに森・中山<sup>(5)</sup>が主張する平滑管に替わって表面構造管を導入する考え方が浮上する。伝熱促進をねらった表面構造は、フィン、溝、コーティングやリエントラントキャビティなど多種多様であり、例えば単相流では流れのはく離と再付着、沸騰においては気泡核の生成と離脱、凝縮では核生成と液の流下など、それぞれ用途に応じて開発されている。ミスト冷却に関しては、Simpson<sup>(6)</sup>、Tree<sup>(7)</sup>のフィン付き面、Kosky<sup>(8)</sup>の溝付き面、桑原ら<sup>(9)(10)</sup>の微細構造などの研究があるが、これらの表面構造はどちらかと言えば従来のものを転用したにすぎ

\* 昭和61年5月28日 第23回日本伝熱シンポジウムにおいて講演、原稿受付 昭和62年11月9日。

<sup>1</sup> 正員、金沢大学工学部 (〒920 金沢市小立野2-40-20)。

<sup>2</sup> 正員、石川工業高等専門学校 (〒929-03 石川県河北郡津幡町)。

<sup>3</sup> 准員、三菱自動車工業(株) (〒616 京都市右京区太秦異町1)。

ず、ミスト冷却の特性とも言える方向性のある気流噴霧の弱点を必ずしも踏まえたものではない。

本報は以上の考え方に立って高性能なミスト冷却管を開発すべく、各種表面構造をもつ伝熱管を供試し、壁面ぬれと熱伝達の向上を実験的に追究するとともに、得られた結果の理論的裏付けを行ったものである。

## 記号

- A: 表面積
- $C_p$ : 比熱
- $d$ : 円管直径
- $d_p$ : 液滴直径
- $E_n$ : 伝熱促進率
- G: 噴霧液滴質量速度
- $G^*$ : ぬれパラメータ [式(8), (9)]
- $h$ : 熱伝達率
- $h_D$ : 物質伝達率
- L: 潜熱
- M: 物質流束
- $m_c$ : 液滴捕集速度
- $Nu$ : ヌッセルト数
- $Pr$ : プラントル数
- Q: 全熱流束
- q: 熱流束
- Re: レイノルズ数
- Sc: シュミット数
- Stk: ストークス数
- T: 温度
- v: 速度
- $\delta$ : 液膜厚さ
- $\lambda$ : 熱伝導率
- $\nu$ : 動粘性係数
- $\rho$ : 密度
- $\phi$ : よどみ点からの角度
- $\omega$ : 蒸気質量分率

## 添字

- g: 気体
- i: 気液界面
- o: 単相流
- p: 液滴
- v: 蒸気
- w: 円管表面
- $\infty$ : 主流
- : 平均値

## 2. 表面構造管による実験

実験では、溝付き管 (I-1, I-2型), ワイヤ巻付け管 (II-1, II-2型), メッシュ巻付け管 (III型) からなる表面構造管と平滑管がミスト冷却管として供試された。表面構造管の形状・寸法は表1に示されるが、いずれも直径 40 mm, 長さ 130 mm のペークライト円柱の表面を溝加工したもの、表面に 0.1 mm のニッケルワイヤあるいはナイロンメッシュを巻き付けたものであり、ペークライト表面 (溝付き管の場合は機械加工された表面) には無電解ニッケルメッキが施されており、メッキ膜への通電により壁面熱流束一定の加熱条件を得ている。ワイヤ巻付け管に対しては壁温一定の実験も行っているが、この場合にはメッキ膜を軸方向にストライプ状に加工し、各分割ヒータへの供給電力を調整することにより等温加熱の条件を得た。各供試管には 0.1 mm の C-C 熱電対が、長手方向中央の円周方向に 20° 間隔の位置で、ニッケルメッキ膜の裏側に 18 点埋め込まれており、これにより表面温度の測定を行った。なお、I, II 型の表面構造管は、凝縮伝熱管として凝縮液膜の流動・離脱に優れたものであり<sup>(11)~(13)</sup>、ミスト冷却管としてこれらの特性が生かされることを期待して供試したものである。

実験は鉛直下降噴霧気流中に水平に設置された表面構造管のミスト冷却を、主流速度 2~5.5 m/s, 噴霧液滴質量速度を 0~220 kg/(m<sup>2</sup>·h), 壁面熱流束 0.8~1.75 kW/m<sup>2</sup> あるいは壁面温度 30~50°C の範囲で種々変化させて行い、主として熱伝達率の測定と壁面に形成される液膜の様相の観察を平滑管との対比のもとで行ったものである。なお、送風機、ぬれ壁塔、噴霧液滴を供給する高圧スプレーノズル (ウェットマスター製), 鉛直試験ダクトからなる密閉回流式の実験装置は前報<sup>(3)</sup>で用いたものと同様であり、ここでの説明は省略する。

## 3. 実験結果と考察

**3.1 ぬれ特性** 平滑管ならびに I 型と II 型の表面構造管に対するぬれの様相を観察し、結果の一例を図1に示す。ぬれ始めはいずれの管においても前方よどみ点で生じ、その条件は前報<sup>(3)</sup>でのぬれパラメータ  $G^* [= (Gd/\rho v)/\Delta\omega/Re_d^n]$  により一義的に決定される。平滑管のぬれの様相については前報<sup>(4)</sup>でも説明したが、噴霧量の増加とともにぬれ領域が拡大し、ぬれに対する飽和状態としての最大ぬれにおいても図1(a)に示すように前方よどみ点から約 80~85° のはく離点近傍までの液膜流域となり、余剰の液が裏面を筋

流(rivulet)として流下し、それらは管下端より離脱付近での液膜は、流れが悪くなるために厚くなり、また時間的にも場所的にも不規則な筋流の影響を受けて、不安定な波状の輪郭を呈する。このようなぬれの様相は本実験条件の範囲ではほぼ同一であるが、噴霧量および流速の増加あるいは加熱量の減少により筋流の本数が増すため、液の流れを伴う壁面ぬれは安定な状態に近づく傾向を示す。表面構造管では、図1(b), (c)に示すように全面ぬれが実現されており、溝あるいはワイヤーなどをもつ表面構造が液膜の流動および伸張に対して有効であることがうかがえる。これら表面構造のぬれに対する有効性は、管径や操作条件など関係するため安易に評価できないが、ここでは非加熱時に形成される液膜の厚さとその流速の値から、また加熱時での円管全面ぬれに対する必要噴霧条件の両面から実験的に検討する。

表1に、非加熱時の各供試管に保持される液膜量  $M_l$ 、そのときの液膜の平均的な厚さ  $\bar{\delta}_l$ 、流速  $\bar{v}_l$  などについての結果を示す。各値は、直接測定が困難なことから、一定の噴霧質量速度のもとで、円管下端から落下離脱する液量  $M_f$  [kg] を測定し、その時間変化が一定となった時点での円管への液滴付着速度  $M_c$  [kg/s] の時間積分値と  $M_f$  の差をもって液膜量  $M_l$  を算出し、 $\bar{\delta}_l$  および  $\bar{v}_l$  の値を液膜が微細構造をもつ表面に沿い一様に存在するものとして、次式よりその平均値を算出した。

$$\bar{\delta}_l = M_l / \rho_l A \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\bar{v}_l = M_c / 2\rho_l \bar{\delta}_l \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、液滴付着速度  $M_c$  は前報<sup>(3)</sup>で明らかにされた噴霧液滴の円管への衝突質量速度  $m_c$  を用いて計算されるが、これについては後述される。

液膜厚さが薄くかつ液膜流速が早いこと、すなわち液膜の伸張性および流動性からぬれに対する有効性を評価すると、結果は表1の右欄に示す順となる。ただし、ここではI-1型および平滑管の結果を評価の対象から除いた。これはI-1型は溝部が深く、ピッチが大きいため液が溝部に集中し、実際には液膜を形成せず算出された値は見掛けのものにすぎないこと、また、

平滑管の場合には、前述のように加熱時には円管後半面のぬれが期待できない致命的な欠点をもっているためである。

図2に、加熱時における各表面構造に対するぬれ特性について、管全表面を液膜で覆うのに必要な噴霧量  $G$  と熱流束  $q$  との関係を示す。図2中の各実験線より上側の領域が円管全面ぬれを、下側が円管表面に乾き状態が存在することを示し、そのこう配が小さいものほどぬれやすいことを意味する。これより、ぬれに対する有効性の順序はIII型を除き非加熱の場合と良く一致していることがわかる。なお、III型については、熱伝導性の悪いナイロン製のメッシュを用いたことや、実験におけるぬれの確認の困難さなどの理由から、ここではその結果を参考にとどめる。

**3・2 熱伝達率** 熱伝達率に対する表面構造の効果を検討する。図3は、溝付き管 (I-2型) に対する局所熱伝達率  $h_s$  の実験結果の一例を平滑管と比較して示したものである。溝付き管の熱伝達率は平滑管と同一の表面積を用いて算出しており、したがって、ここでの熱伝達率は実効表面積の増加に相当する分を含んでいる。図3中に示した運転条件のもとで、平滑管に比して表面構造管の熱伝達率は後方よどみ点 ( $\phi = 180^\circ$ ) 付近を除く全表面にわたって上回っていることがわかる。このことは、管下端では懸垂状態の液膜から液が滴下離脱しているため液膜蒸発にはそれほど有効となっていないが、その付近を除く  $\phi > 90^\circ$  の領域

表1 ぬれ特性 [ $U_\infty = 4\text{m/s}$ ,  $G = 100\text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ]

Type	Geometory s Dimension	Liquid rate $M_l$ (Kg) $\times 10^{-3}$	Film Thickness $\bar{\delta}_l$ (m) $\times 10^{-4}$	Film Velocity $\bar{v}_l$ (m/h)	Surface Area $A_t$ ( $\text{m}^2$ ) $\times 10^{-2}$	Evalu- ation
I-1		4.37	1.51	14.4	2.90	—
I-2		3.71	2.29	9.5	1.62	2
II-1		3.56	2.67	8.1	1.33	3
II-2		3.09	2.19	9.9	1.41	1
III		4.64	2.67	8.1	1.74	4
	$d = 40\text{mm}$	2.66	2.12	10.2	$A = 1.26$	—

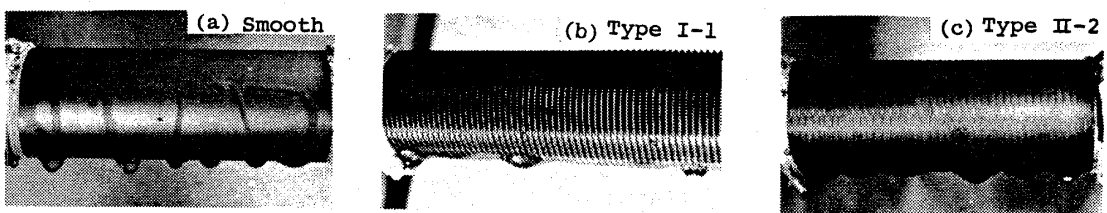


図1 ぬれの様相 [ $U_\infty = 4\text{m/s}$ ,  $G = 100\text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ,  $q_w = 1.75\text{ kW}/\text{m}^2$ ]

では筋流が液膜化されていること、さらに $\phi < 90^\circ$ の管前半面ではより薄い液膜流となっていることなどが、3・1節での観察結果をも参考として推察される。

図4および図5に、等温および等熱流束加熱条件下での各種表面構造管に対するミスト冷却の平均熱伝達率の実験結果をそれぞれ平滑管のものと比較して示す。図4、5中の記号の縦線入りのものはぬれ面積率 $A_w/A_o$ が100%の状態となったことを表している。図4に示す等温加熱の実験は、供試管の製作上ワイヤ巻付け管についてのみ行われたが、熱伝達率は平滑管に比して大きく、それも加熱面温度が高いほど顕著となっている。噴霧量 $G$ に対する効果としては、噴霧量が小さい範囲ではドライアウト状態、さらにはそれに続く液膜形成とその領域の拡大により、熱伝達率が急激に増加する蒸発潜熱支配となる。それ以上の高噴霧量の範囲ではぬれ面がすでに頭打ちとなっているため、熱伝達率の変化は噴霧液滴による顕熱輸送の効果として緩やかな増加をたどる。平滑管に対する表面構造管

の伝熱促進をぬれ特性の改善の観点からとらえると次のようになる。低噴霧質量速度の範囲では、液膜の流動性の向上としての薄膜化により、表面構造管の熱伝達率は $G$ に対してより急激な立上りとなるとともに、ぬれ領域の拡大により蒸発潜熱支配域から顕熱輸送支配域への移行点での熱伝達率の値も大きく、しかもそれはより小さな噴霧量で達成される。さらに、顕熱輸送支配域となる $G > 50 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ では、 $G$ に対する熱伝達率のこう配が若干大きくなっており、表面構造管では管下端部からの液の離脱性が向上していることがわかる。

図5(a)に、伝熱促進に対する各種表面構造の効果を示す。おおよその傾向は等温加熱の場合と同様であるが、各表面構造の伝熱性能の優劣( $G$ に対する $\bar{h}$ のこう配、および蒸発潜熱支配域での $\bar{h}$ の最大値)は、低噴霧質量の範囲では3・1節で議論したぬれ特性に対する評価の順に従うことがわかる。また、高噴霧質量速度では、流動性の悪いIII型メッシュ巻きを除きほぼ

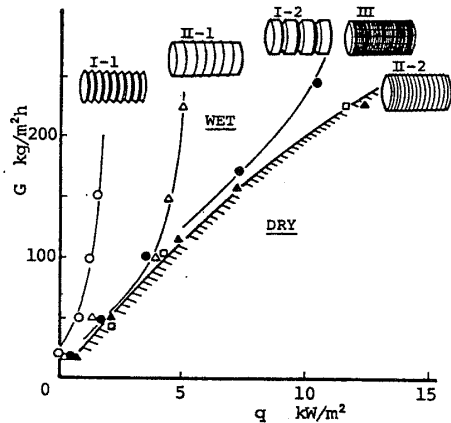


図2 全面ぬれの条件 ( $U_\infty = 4 \text{ m/s}$ ,  $T_\infty = 16^\circ\text{C}$ )

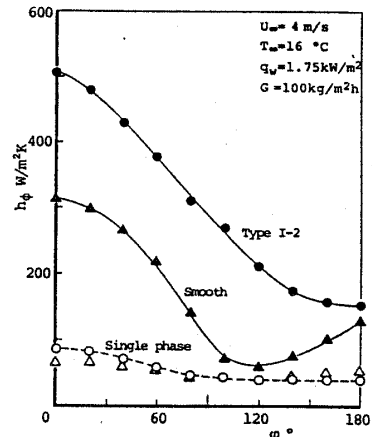


図3 局所熱伝達率

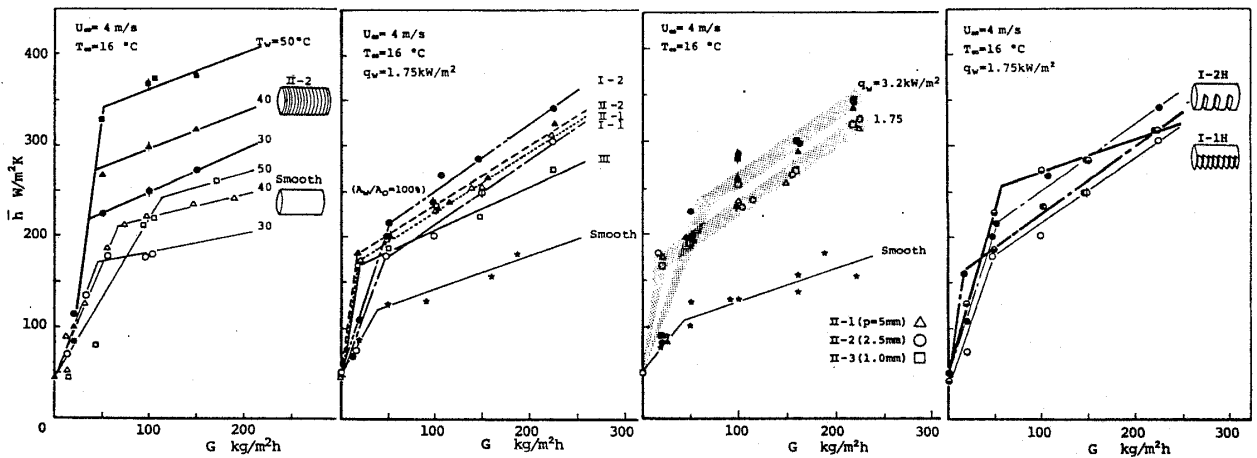


図4 熱伝達率 (等温加熱)

図5 熱伝達率 (等熱流束)

同程度の性能を示す。この中、ワイヤ巻付け管におけるワイヤピッチ( $p=1, 2.5, 5$  mm)の影響についての結果を図5(b)に示す。 $p=2.5$  mmの熱伝達率が液膜蒸発支配から顕熱支配へ移行する付近で若干高い値を示しているが、その差は小さくピッチの影響が明確に現れていないようである。これは、ここでのピッチ $p=2.5$  mmのものが表面張力による液膜の伸張性において有効なものではあるが、それ以外のピッチでは、液膜のホールドアップやワイヤによる伝熱面増加(フィン効果)による蒸発促進のバランスからほぼ同程度の伝熱性能を示したためと考えられる。

図5(c)は、管前半面( $\phi < 75^\circ$ )を未加工とし、後半面のみ表面溝加工を施した半周溝付き伝熱管に対する結果である。図5中の各線は実験線であり、太い実線および一点鎖線が半溝加工のものを、細い線が全周溝加工のものを示す。両者の比較において、実線で示すI-1型は全面加工に比して半周溝付き管のほうが本実験範囲において流動性が改善されたため良好な伝熱性能を示し、また、一点鎖線のI-2型については高噴霧量では伝熱面積の低下により若干低い値となっているものの、低噴霧量での立上りが大きくなっており、加工法に問題がなければ(方法あるいは価格)、高性能化の点で半溝がより優れたものと言える。

4. 理論的考察

各種表面構造管がミスト冷却に対して有効であることが明らかにされたが、単管としてのミスト冷却の高性能化には運転条件の最適化が必要である。ここでは最適化の基礎とすべく、表面構造管を用いた場合のミスト冷却の伝熱性能を、実験的に得られた結果を理論的に裏付けることにより追究する。解析は円管の全面が液膜で覆われた状態を対象とし、前報<sup>(4)</sup>での平滑管に対する近似的な解法を円管後半面まで拡張する。すなわち、前報での仮定はそのままここで適用されるが、さらに円管表面の構造や液膜の存在は熱・流力的に無視されるものとする。

まず、全面ぬれの臨界条件を、次式で与えられる円管への噴霧液滴の衝突・付着速度 $M_c$ と全面からの蒸発速度 $M_e$ とのバランスより求める。

$$M_c \geq M_e \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 $M_c$ は液滴の衝突質量速度の局所値 $m_c$ を用い、

$$M_c = d \int_0^{\pi/2} m_c d\phi \dots\dots\dots (4)$$

$$m_c = fG \cos \phi \dots\dots\dots (4')$$

$$f = 0.675 \left( \frac{Stk}{1 + 0.125 Re_p^{0.72}} \right)^{0.2} \left[ 1 - C \left( \frac{\phi}{90} \right)^{1.8} \right]$$

$$C = 5.78 \times 10^{-3} Re_p^{-1.55} Re_d^{1.11}$$

$$Re_p = U_\infty d_p / \nu, Re_d = U_\infty d / \nu$$

となり、また $M_e$ は物質伝達率 $h_D$ およびルイスのアナロジーを適用し、次のように与えられる。

$$\begin{aligned} M_e &= d \int_0^\pi h_D (\rho_w - \rho_\infty) d\phi \\ &\doteq \bar{h}_D A (\bar{\rho}_w - \rho_\infty) \\ &= \frac{\bar{h}_D A}{\rho C_p} \left( \frac{Pr}{Sc} \right)^{2/3} (\bar{\rho}_w - \rho_\infty) \dots\dots\dots (5) \end{aligned}$$

単相平均熱伝達率 $\bar{h}_D$ に前報での次の実験式(6)あるいは(7)を適用し、

$$\overline{Nu} = \bar{h}_D d / \lambda = 0.623 Re_d^{0.5} Pr^{0.4} [\text{等温}] \dots\dots (6)$$

$$\overline{Nu} = \bar{h}_D d / \lambda = 0.34 Re_d^{0.58} Pr^{0.4} [\text{等熱流束}] (7)$$

式(3)に式(4)、(5)および式(6)あるいは式(7)を代入し整理すると、全面ぬれの条件は等温および等熱流束加熱に対し、それぞれ次の式(8)、(9)のように求められる。

$$\begin{aligned} G^* &= \frac{Gd}{\rho\nu} \cdot \frac{1}{\Delta\omega} \cdot \frac{1}{Re_d^{0.5}} \\ &\geq \frac{0.623\pi}{\int_0^{\pi/2} f \cos \phi d\phi} \frac{1}{Pr^{0.6}} \left( \frac{Pr}{Sc} \right)^{2/3} \dots\dots\dots (8) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} G^* &= \frac{Gd}{\rho\nu} \cdot \frac{1}{\Delta\omega} \cdot \frac{1}{Re_d^{0.58}} \\ &\geq \frac{0.34\pi}{\int_0^{\pi/2} f \cos \phi d\phi} \frac{1}{Pr^{0.6}} \left( \frac{Pr}{Sc} \right)^{2/3} \dots\dots\dots (9) \end{aligned}$$

ここで、 $\Delta\omega = \omega_w - \omega_\infty$ 、 $\omega [= \rho_v / (\rho_a + \rho_v)]$ は蒸気の質量分率であり、等熱流束加熱時での $\rho_{vw}$ は次の熱バランス式より求まる $T_w$ の飽和蒸気密度として算出される。

$$\begin{aligned} Q_w = q_w A &= \bar{h}_D A (\bar{T}_w - T_\infty) + M_e L \\ &+ C_{p1} \cdot M_c (\bar{T}_w - T_\infty) \dots\dots\dots (10) \end{aligned}$$

$$\bar{T}_w = \frac{q_w A - M_e L}{\bar{h}_D A + C_{p1} \cdot M_c} + T_\infty \dots\dots\dots (10)'$$

次に、円管全面がぬれ状態にあるミスト冷却の平均熱伝達率について解析する。円管全面に対する熱バランスは、全加熱量 $Q$ 、対流伝熱量 $Q_c$ 、液膜からの蒸発潜熱量 $Q_L$ および衝突液滴による顕熱量 $Q_s$ によって、次のように表される。

$$Q = Q_c + Q_L + Q_s \dots\dots\dots (11)$$

ここで、

$$Q_c = \bar{h}_D A (\bar{T}_i - T_\infty) \doteq \bar{h}_D A (\bar{T}_w - T_\infty)$$

$$Q_L = M_e L$$

$$Q_s = C_{p1} \cdot M_c (\bar{T}_i - T_\infty) \doteq C_{p1} \cdot M_c (\bar{T}_w - T_\infty)$$

ミスト冷却平均熱伝達率は、液滴の衝突・付着速度 $M_c$ および蒸発速度 $M_e$ に対する式(4)および式(5)を用い、式(11)より次のように求められる。

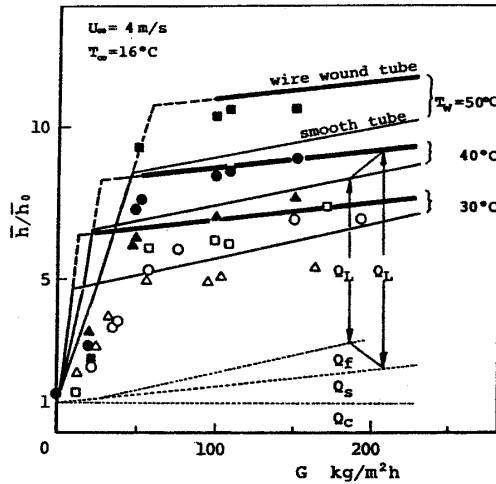


図6 伝熱促進率 (等温)

$$\begin{aligned} \bar{h}_{mist} &= \frac{Q}{A(\bar{T}_w - T_\infty)} \\ &= \frac{A\bar{h}_o(\bar{T}_w - T_\infty) + M_e L + C_{p1} \cdot M_c (\bar{T}_w - T_\infty)}{A(\bar{T}_w - T_\infty)} \end{aligned} \quad \dots\dots\dots(12)$$

また、単相流に対するミスト流熱伝達率の比である伝熱促進率  $E_n$  は、

$$E_n = \frac{\bar{h}_{mint}}{\bar{h}_o} = 1 + \frac{M_e L}{A\bar{h}_o(\bar{T}_w - T_\infty)} + \frac{C_{p1} \cdot M_c}{A\bar{h}_o} \quad \dots\dots\dots(13)$$

となる。これより、加熱条件に対し式(6)あるいは式(7)を用い、式(12)および式(13)より熱伝達率および伝熱促進率が求められる。

図6および図7に、等温および等熱流束加熱に対する平滑管の単相流平均熱伝達率  $\bar{h}_o$  を基準とした伝熱促進率と噴霧量との関係についての解析結果を実験結果[図4, 5(a)]とともに示す。図6, 7中、細線は前報<sup>(4)</sup>での平滑管の結果を、太い実線が全面ぬれ状態の場合の解析値を示す。破線はぬれ領域が円管前半面にとどまる平滑管の結果を拡張し、表面構造管の結果と結んだ推定値である。また伝熱促進の効果としての衝突液滴による顕熱  $Q_s$ 、液膜からの蒸発潜熱  $Q_L$ 、さらには平滑管についてのみ後半面を流下し下端から離脱する液流による顕熱  $Q_f$  の内訳を管表面温度  $40^\circ\text{C}$  に対して示す。いずれも、ぬれ領域の拡大に伴う  $Q_L$  の効果の増加により、熱伝達率がかなり向上していることがわかる。加熱条件の違いについては直接比較することは困難であるが、等温加熱の場合においては高い対流熱伝達率をとる前半面での  $Q_L$  の効果が支配的なため、後半面のぬれ領域の拡大による  $Q_L$  の効果は20~30%程度にとどまっている。それに対して等熱流

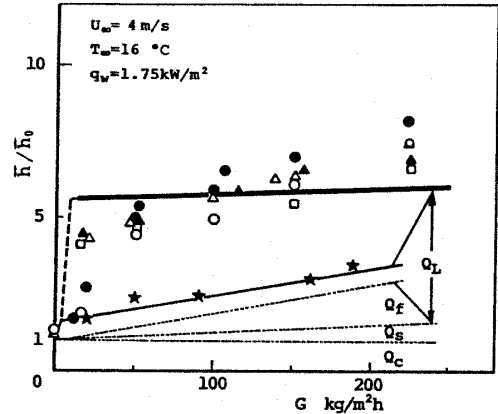


図7 伝熱促進率 (等熱流束)

束の場合には、後半面からの蒸発潜熱の効果に加えて壁面温度の低下が著しいため、1.7~3.3倍と極めて高い効果を示す結果となっている。実験値との比較においては、ここでの近似的な取扱いにもかかわらず極めて良い一致を示しており、これにより高性能管の伝熱性能の推算が可能となる。ただし、全面ぬれとなる条件は、解析値の噴霧量のほうが実験値よりいくぶん低い結果となっており、厳密には微細構造をもつ管表面での液膜の安定性(ドライパッチ)や流動性が影響するものと考えられる。

5. 結 論

ミスト冷却熱交換器の高性能管の開発を目的に、鉛直下降噴霧流中に水平に置かれた表面に微細構造をもつ種々の供試管を対象に壁面ぬれと熱伝達の増加向上について主として実験的に検討し、以下の結論を得た。

(1) 溝付き、ワイヤ巻付けおよびメッシュ巻付けによる表面構造管は液膜の流動性・伸張性に対して有効であり、円管全面にわたってぬれを実現し得る。特に、ワイヤ部-平滑面間の表面張力差により液の集中化が大きいII-2型が流動・伸張性の点で優れ、次いで溝付きI-2型、ワイヤ巻きII-1型、メッシュ巻きIII型の順となる。

(2) ミスト冷却における表面構造管の平滑管に対する伝熱促進の要因は、円管前面での液膜の薄膜化、後半面での筋流の液膜化、管下端部からの液の離脱性の向上による。すなわち、比較的小さな噴霧質量速度で管全面にわたるぬれが達成されるため蒸発潜熱支配となるこの範囲での伝熱促進が特に顕著である。

(3) 表面構造管に対して、全面ぬれとなる臨界条件および全面ぬれを前提としたミスト冷却熱伝達率について解析され、実験的に得られた結果が理論的に裏

付けられた。これにより、機器構造として優れた表面構造管に対する運転条件の最適化が可能となり、最終的に単管としてのミスト冷却熱交換器の高性能化が追求される。

最後に本研究は昭和60年度科学研究補助(エネルギー特別)によって行われたものであり、謝意を表す。

#### 文 献

- (1) 相原, 機習教, (昭55-7), 83.
- (2) 中山, 文献(1)の99ページ.
- (3) 松田・滝本・林・ほか1名, 機論, 52-482, B (昭61), 3545.
- (4) 林・滝本・松田, 機論, 52-482, B (昭61), 3554.
- (5) Mori, Y. and Nakayama, W., *Heat Transfer of Energy Prob.*, (1983), 211, Hemisphere.
- (6) Simpson, H. C., ほか2名, *Proc. Symp. Multi-Phase Flow syst.*, 38 (1974), 1.
- (7) Tree, D. R., ほか3名, *Proc. 6th Int. Heat Transf. Conf.*, 4-26, HX (1978), 339.
- (8) Kosky, P. G., *Int. J. Heat Mass Transf.*, 19-5 (1976), 539.
- (9) 桑原・中山・森, 機論, 47-414, B (昭56), 326.
- (10) 桑原・ほか3名, 機論, 50-454, B (昭59), 1549.
- (11) Webb, R. L., ほか2名, *Trans. ASME, J. Heat Transf.*, 107-2 (1985), 369.
- (12) Yau, K. K., ほか1名, *Trans. ASME, J. Heat Transf.*, 107-2 (1985), 377.
- (13) Sethumadhavan, R., ほか1名, *Ind. Eng. Chem. Proc. Des.*, 24-3 (1985), 783.