

ミスト冷却熱交換器に関する研究*

(第5報, 管群効果と熱伝達について)

林 勇二郎*¹, 滝本 昭*¹
松田 理*², 本谷 克実*³

Study on Mist Cooling for Heat Exchangers (5th Report, Heat Transfer for Tube Bundles)

Yujiro HAYASHI, Akira TAKIMOTO,
Osamu MATSUDA, and Katsumi MOTOYA

In order to pursue a high performance mist-cooling heat exchanger, an experimental study of mist cooling has been performed on a heated tube bundle in an air-water mist flow. The mechanism of heat transfer enhancement was clarified in relation to the effect of a tube bundle. The operating condition was optimized for the heat exchanger configuration including a surface structure of heated tubes.

Key Words: Thermal Engineering, Mist Cooling, Heat Exchanger, Heat Transfer Enhancement, Tube Bundle

1. 緒 言

気流に懸濁した微小液滴を加熱面に衝突・捕集させ、壁面での伝熱促進を図るミスト冷却は、空冷式熱交換器の小形・省力化の有力な手段の一つである⁽¹⁾⁽²⁾。伝熱面が飽和温度以下の場合には、壁面熱伝達を液膜蒸発支配とするのが最も効果的であり、そのためには少量の液供給により薄い液膜をできるだけ広範囲に伝熱面上に形成することが要求される。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になり、著者らはそのような考え方に立って、これまで管群熱交換器の構成要素である水平単一円管を対象にミスト冷却の詳細を明らかにしてきた。

具体的には、(1)液膜形成の開始条件を与えるぬれパラメータ G^* の導出⁽³⁾、(2)壁面上での液挙動と局所熱伝達率、および円管全面に対する平均熱伝達率と G^* との相関関係⁽⁴⁾⁽⁵⁾、(4)表面構造の導入により液

膜形成域を拡張した高性能管の開発⁽⁶⁾、などである。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、熱伝達率との相関は運転に対する最適条件を与えることになる。また、高性能管の開発は、噴霧気流が衝突しない円管裏面では前半面からの液がう回しすじ流となっているが、これを微細表面構造による毛管力を利用し膜状化したものであり、方向性のある液供給というミスト冷却の致命的な欠点を回避したものである。

以上、単一円管のミスト冷却における機器構造と運転条件の最適化が達成され、最終的にこれらの基本的な知見をもとに、実機に近い管群のミスト冷却熱伝達、ならびにミスト冷却熱交換器の高性能化が追究されることになる。

ミスト冷却熱伝達に関する研究は、前報までに述べたようにこれまで主に単一円管を対象とした報告が多く、熱交換器そのものを取扱った研究は比較的少ない。大島ら⁽⁷⁾はフィン付き管群のミスト冷却を伝熱面の一様ぬれの仮定のもとで解析し、実験との比較により熱交換器の近似的な設計計算法を示している。Yang ら⁽⁸⁾は自動車用ラジエータを対象に実験を行い、気流速度の増加による液膜はく離のために伝熱促進率

* 昭和62年5月28日 第24回日本伝熱シンポジウムにおいて講演、原稿受付 昭和63年10月4日。

*¹ 正員、金沢大学工学部 (〒920 金沢市小立野2-40-20)。

*² 正員、石川工業高等専門学校 (〒929-03 石川県河北郡津幡町)。

*³ 准員、金沢大学大学院。

が40~45%にとどまることを報告している。また、Treeら⁽⁹⁾は低噴霧量[7~20 kg/(m²·h)]下で実験を行い、熱交換器管群のぬれ挙動を観察している。最近では、桑原ら⁽¹⁰⁾は、水平噴霧流下の平滑管あるいは微細構造管からなる管群を対象にぬれ面の分布状況を詳細に検討し、ぬれ面積割合による伝熱性能の推算式を導出している。しかしながら、管群に対するミスト冷却熱伝達は、運転条件と関連するパラメータの数が多く、また熱交換器形状(管配置、ピッチ、直径)に複雑に関係するため、まだ一般性をもった議論がなされていないのが現状である。

本報は、管群ミスト冷却を著者らがこれまで行ってきた単一円管に対する研究の延長線上に位置づけ、鉛直下降噴霧流中の等熱流束加熱された平滑管群ならびに高性能管としてのワイヤ巻付け管群を対象に、気流と液膜流の熱・流力的な管群効果を踏まえて実験的に追究したものである。

記 号

- d : 管直径
 G : 噴霧液滴質量速度
 G^* : 無次元ぬれパラメータ
 h : 熱伝達率
 j : 管群段数
 M_c : 管単位長さ当たりの液滴衝突捕集量
 M_e : 管単位長さ当たりの蒸発量
 M_f : 管単位長さ当たりの落下液量
 N : 管群段数
 Nu : ヌッセルト数
 ΔP : 圧力損失
 P_h : 管群列ピッチ
 P_v : 管群段ピッチ
 Q : 全熱流束
 q : 局所熱流束
 Re_d : レイノルズ数 $= U_\infty \cdot d/\nu$
 Re_{max} : レイノルズ数 $= U_{max} \cdot d/\nu$
 T : 温度
 U : 速度
 x : 管群水平方向距離成分
 λ : 熱伝導率
 ν : 動粘性係数
 ρ : 密度
 ϕ : 前方よどみ点からの角度
 ω : 蒸気質量分率

添 字

max: 最大値

- w : 壁面
 0 : 単相流
 ∞ : 主流
 ϕ : 局所値
 $-$: 平均値

2. 管群まわりの流れと液捕集

鉛直下降噴霧中に置かれた4段7列千鳥配列の等熱流束加熱された円管群をここでの取扱いの対象とし、その物理モデルを図1に示す。管群においては、気流の速度、温度、ならびにそれらの変動成分が流れ方向に変化するうえに、噴霧気流による液供給速度が各段管によって異なるため、ミスト冷却熱伝達は単一円管の場合と大きく異なる。以下、それらを流力的、熱的、さらには液捕集の群効果としてとらえ、実験結果をもとにその概略を述べる。

実験装置概要および方法については、供試管径が40 mmから20 mmと変わったこと以外は前報までとほぼ同様であり、ここでの説明は省略する。なお、高圧スプレーノズルにより供給される噴霧液滴群(水)は、ザウタ平均径85 μm であり、粒度特性数85 μm 、均等数3.75のRosin-Rammler分布を有する。また、管群には平滑管ならびに高性能管としてのワイヤ巻付け管(ニッケルめっきしたベークライト円管に直径0.1 mmニッケルワイヤを2.5 mmピッチで巻き付けたもの)⁽⁶⁾を用い、その構成を通常よく用いられている空冷式熱交換器に近いものとして、管径 $d=20$ mm、流れ方向ピッチ(段ピッチ) $P_v/d=2.0$ の一定とし、水平方向管ピッチ(列ピッチ) $P_h/d=1.2, 1.6, 2.0, 2.4$ の4種類とした。

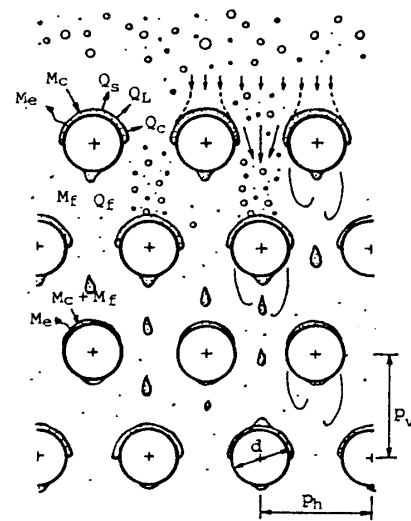


図1 物理モデル

2.1 流力的群効果 図2, 3に入口で一様速度分布をもつ流れの管群内での流動特性として, 速度, 乱れ分布および圧力損失の結果を示す. 管群流れの詳細については, これまでの報告⁽¹¹⁾⁽¹²⁾で明らかにされているとおりであり, 間げき流の加速, 下流での渦列の形成と乱れの増加, および圧力損失の増加がここでの結果においても確かめられる. なお, 図3中の白印で示す単相流での実験値は式(1)⁽¹²⁾および式(2)⁽¹³⁾で与えられる従来の結果に対して列ピッチ2.4の結果が若干大きいものとなっているものの, ほぼ一致している. 一方, 黒印で示す噴霧流の結果(最大噴霧量 $G = 200 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$)は, 単相流に比して若干高い値を示すものの, その差は小さく噴霧の影響がほとんどないものと言える.

$$\Delta P = \frac{1}{2} \xi \rho U_{\max}^2 \cdot N \dots\dots\dots (1)$$

$$\xi = 0.33 Re_{\max}^{-0.15} \left\{ \left(\frac{P_h}{d} + 1 \right) \left(\frac{d}{P_v} \right) \right.$$

$$\left. + 1.5 \left(\frac{P_v}{P_h - d} \right)^{0.75} \right\}$$

$$(2 \times 10^3 < Re_{\max} < 4 \times 10^4, 1 < P_v/d < 3.9,$$

$$1.25 < P_h/d < 3)$$

$$\Delta P = 2 \xi \rho U_{\max}^2 \cdot N \dots\dots\dots (2)$$

$$\xi = \left[0.044 + \left\{ \frac{0.08(P_v/d)}{\left\{ (P_h/d) - 1 \right\}^{0.43 + 1.13(d/P_v)}} \right\} \right] Re_{\max}^{-0.15}$$

2.2 熱的群効果 温度分布についての結果を図4に単相流と噴霧流の場合を比較して示す. 単相流では自由流れ域で温度が低く, 後流域では高くなつその分布は徐々に一様化する傾向をもつ. しかしながら, 噴霧流の場合には, 黒印で示すようにわずかに円管後流域で温度上昇があるものの主流温度とほぼ同じ様な値を維持する. これは主として, 液滴の気流蒸発の効果によるものであり, ミスト流が大気などの温度変動に対する熱交換器の制御法として有効であるとされるゆえんである⁽¹⁴⁾.

単相流における管群各段の平均熱伝達率の結果を図5(a)に示す. 各段に対する熱伝達率は, 一般的には下段へ行くほど流れの乱れにより増加し, 最下段では逆に流れの拡大によりわずかに低下する結果となる. ただし, 列ピッチ1.2の場合には前述の圧力損失の結果からもわかるように, 3段管以降での急激な速度の減少および乱れの低下のため2段管に比して3, 4段管の熱伝達率はかなり小さく, 他のピッチの場合と異なった傾向を示す.

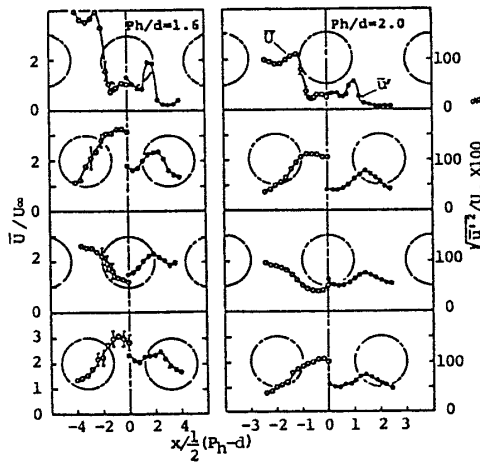


図2 速度および乱れ分布 (各段管通過後: $P_v/2$)

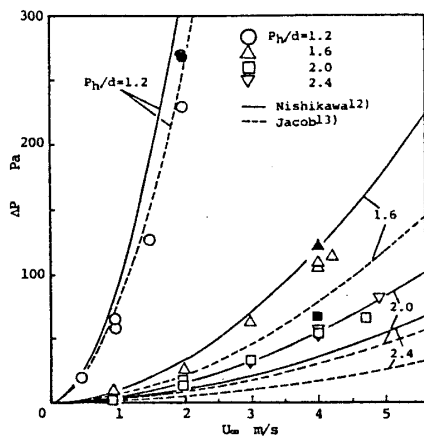


図3 管群流れの圧力損失

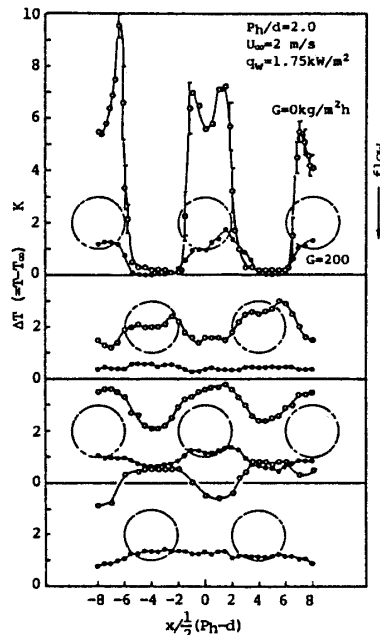


図4 単相流および噴霧流中での温度分布 (各段管通過後)

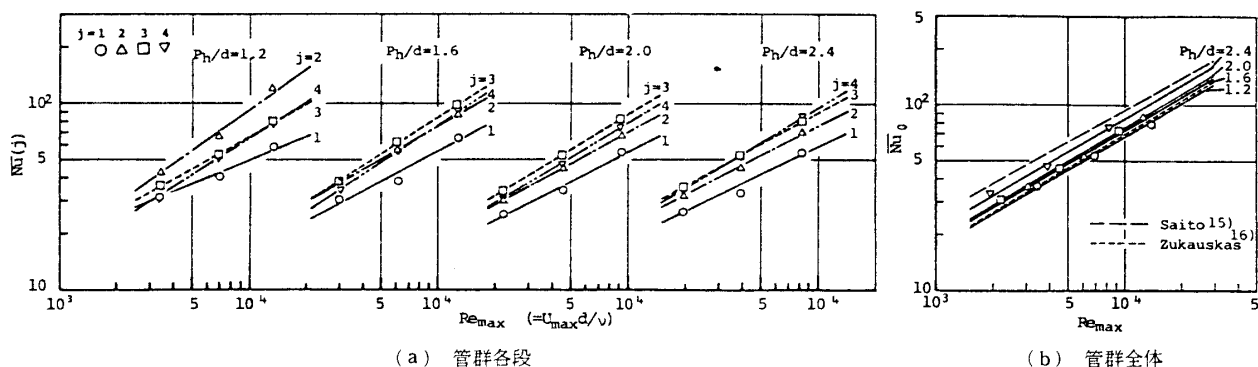


図5 单相流平均熱伝達率

図5(b)は各段の値より求めた管群全体の平均熱伝達率の結果であり、従来提示されている実験式⁽¹⁵⁾⁽¹⁶⁾による推算値とよく一致している。これより、列ピッチ1.6~2.4をもつここの千鳥配列管群に対する单相流の管および管群の平均熱伝達率の実験式がそれぞれ式(3)、(4)で与えられた。

$$\overline{Nu}_0(j) = \frac{\overline{h}_0(j)d}{\lambda} = 0.191j^{-0.42} \left(\frac{P_h}{d}\right)^{1.26} \times Re_{max}^{0.6j^{0.15}(P_h/d)-0.2} \dots\dots\dots (3)$$

$$\overline{Nu}_0 = \frac{\overline{h}_0 d}{\lambda} = 0.03 \left(\frac{P_h}{P_v}\right)^{0.31} \cdot Re_{max}^{0.6} \dots\dots\dots (4)$$

($2 \times 10^3 < Re_{max} < 2 \times 10^4$, $j=4$, $1.6 \leq P_h/d \leq 2.4$)

2.3 液捕集の群効果 以上の熱・流力的な影響を受けて噴霧気流は管群内を通過し、途中の各段管で液滴が衝突捕集される。捕集量が管表面からの蒸発量より多いと、余剰の液は管下端より離脱落下し、下段の管に影響を及ぼすことが予想される。すなわち、管群のミスト冷却においては管群全体に液を供給し、伝熱面のぬれ面積をいかに拡大するかが焦点となる。

図6に、噴霧気流による管群各段への液滴衝突捕集量 $M_c(j)$ の結果の一例を示す。実験は非加熱の条件で行い、各段管の下端からの離脱落下液量 $M_r(j)$ を測定したものであり、 $j=3, 4$ 段管についてはそこの落下液量 $M_r(j)$ (図6中破線) と上段管からの落下液量 $M_r(j-2)$ との差から $M_c(j)$ を算出した。各段での液滴衝突捕集量は噴霧液滴質量速度 G とともに直線的に増加するが、噴霧気流を直接受ける1, 2段管(以下では上段管と称する)と、衝突を避けた小径滴がわずかに残存する気流となる3, 4段管(以下では下段管と称する)とではその差は顕著である。上段管である1段管ではほぼ単管に近い結果となり、2段管では管間げきの自由流れ域での加速による液滴の集中化のためにさらに大きい捕集量となり、いずれも下段管に比して液供給は良好となる。これに対して、下段管への噴

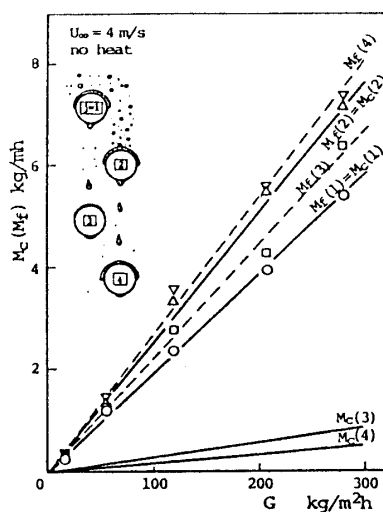


図6 管群への液滴衝突捕集量 ($P_h/d=2$)

霧気流の効果は極めて小さいものとなっているが(厳密には列ピッチに影響するが、これについては次報で述べる)、その反面、上段から離脱した落下液の供給を受けるため、結果的には上段管より多い液供給量となっている。しかしながら、1段と3段、2段と4段の組合せで与えられるここの結果は非加熱時のものであり、実際には上段管で液蒸発を伴うため落下液は量的にも質(温度)的にも異なったものとなる。すなわち、液滴のエリミネータでもある管群のミスト冷却においては、気流の熱・流力的な群効果とともに、上下の配列にある各段への液供給と壁面ぬれの関係が極めて重要な意味をもつことになる。

3. 管群ミスト冷却熱伝達

平滑管群およびワイヤ巻付け管群におけるミスト冷却熱伝達率の結果を、前方よどみ点を原点($\phi=0$)とした局所値の分布としてそれぞれ図7(a), (b)に示す。図中黒印の実験点は壁面ぬれ状態を表す。各段に

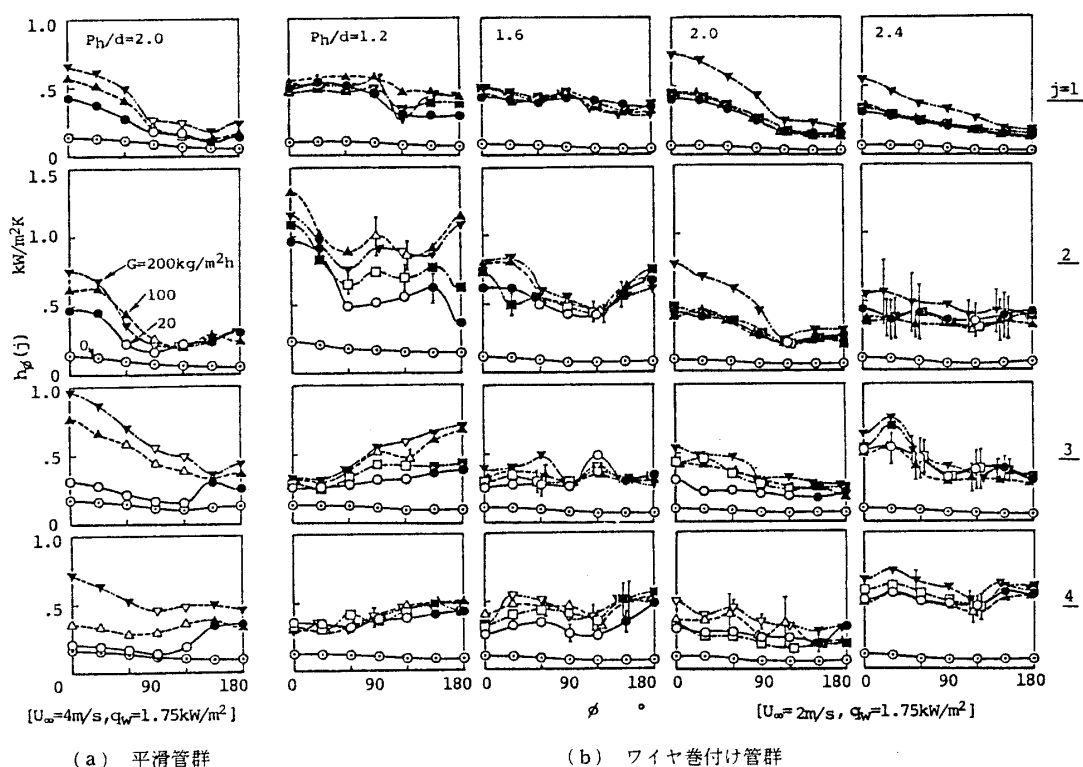


図7 ミスト冷却局所熱伝達率

おける熱伝達の特性は、ミスト冷却における伝熱促進の効果、すなわち対流伝熱 Q_c 、液膜からの蒸発潜熱 Q_L 、衝突液滴による顕熱 Q_s および落下滴による顕熱 Q_f と関係づけて次のように説明される。まず、平滑管群においては、1段目の結果はこれまで単一円管について報告したように单相流に比して液滴衝突面となる円管前半面で大きく、乾き面となる後半面で小さい熱伝達率の分布を示し、噴霧量の増加とともにぬれ面積の拡大によりそれはさらに顕著となる⁽⁴⁾。2段目では液滴捕集量の増加と集中化のため1段めに比べて Q_s の効果がよどみ点付近で強く現れている。上段管から落下液を受ける3段めと4段めを比較すると、前者においては1段目の熱伝達率が小さくかつ液捕集が少ないため、より高温の落下液を受けることになり、液蒸発の効果 Q_L が顕著に現れることになる。後者の4段管においては顕熱効果 Q_s は大きい、供給液の温度が高いため Q_L は小さく、全体としての熱伝達率は低いものとなる。

一方、ワイヤ巻付け管群の場合においても、大筋において上述の平滑管群の場合と同様であるが、平滑管との比較において高性能管としての伝熱促進の効果は顕著である。すなわち、単管に対する前報の実験⁽⁶⁾でも確認されたように、ワイヤ巻付け管は管表面での液膜の伸張性と管下端での液の離脱性が優れているた

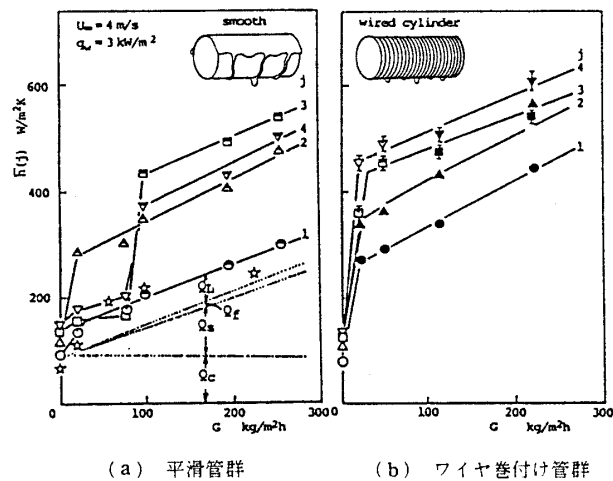


図8 平均熱伝達率

め、上段管においては低噴霧量で管前半面のみならず全面ぬれが達成され、管平均熱伝達率は平滑管に比べて著しく増加する。

なお、列ピッチの影響としては、 $P_h/d=2.4$ の場合には流れの偏向などにより噴霧液滴ならびに落下滴の2段め以降の管への衝突が不安定となることが起こるが(データのばらつきは図7中の実験値の縦線の長さで示す)、一般的にはピッチが小さくなるほど管間げきの流れの加速のため熱伝達率は大きくなる傾向を示

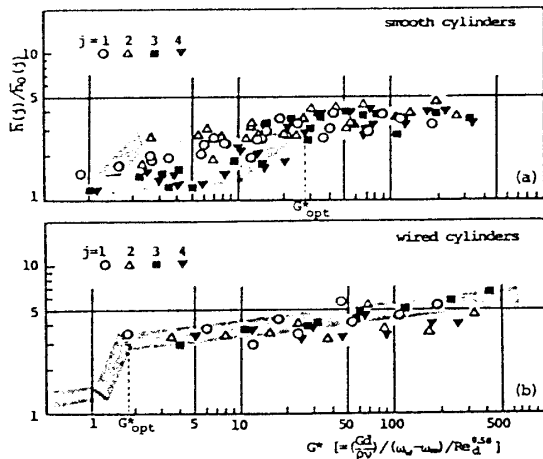


図9 伝熱促進率と G^* の関係

す。また、主流速度、加熱度の影響についても全体として熱伝達率変化の度合いが大きく現れるもののほぼ同様の傾向を示す。

以上の結果を各段に対する平均熱伝達率として噴霧液滴質量速度との関係で図8(a), (b)に示す。図8中、実験値の黒塗りは伝熱管のぬれ面積割合の概略を意味する。熱伝達率に及ぼす噴霧量の影響および各段の差異は前述のとおりであり、また1, 2段の上段管に見られる低噴霧域での蒸発支配による急激な熱伝達率の増加から、高噴霧域で顕熱輸送支配による緩やかな増加をたどる伝熱特性は単一円管の場合と全く同様である。しかし、上段からの液供給を受ける3, 4段の下段管の熱伝達が液膜蒸発支配となるのは、上段管の前表面ぬれが飽和となった後、管後半面をすじ流となって伝わりやがて下端から落下した液が下段管を十分にぬらし得る条件で与えられ、したがって伝熱特性も上段管と異なった傾向を示す。一方、ワイヤ巻付け管群の場合には、平滑管群と比較して、上段管においては低噴霧量で全面ぬれが達成され、さらに、下段管においても低噴霧の条件で上段管からの液供給を受けるため、熱伝達の立上りが早く管群全体を通して良好なミスト冷却が達成されていることがわかる。

前報までにおいて、単一円管に対するミスト冷却熱伝達が、式(5)で表されるぬれパラメータ G^* によって定式化され、ミスト冷却における最適運転条件が壁面熱伝達の液膜蒸発による潜熱支配から液膜流による顕熱支配への移行条件で与えられることが明らかにされた。

$$G^* = \frac{Gd}{\rho v} \frac{1}{(\omega_w - \omega_\infty)} \frac{1}{Re_d^{0.58}} \dots\dots\dots (5)$$

ここでは同様な観点からこのぬれパラメータを管群の結果に適用する。種々の噴霧条件下における平滑管

群ならびにワイヤ巻付け管群における各段の平均熱伝達率の結果を、単相流平均熱伝達率[式(3)]との比である伝熱促進率と G^* との関係で整理して図9(a), (b)に示す。図9中、白抜き記号が上段管を、黒印の記号が下段管の結果を示す。ワイヤ巻付け管の場合には、上段と下段管の差異はなく熱伝達率はほぼ一意的に G^* の関数として表される。これに対して、平滑管では単一円管とほぼ同じ関係を示す上段管と噴霧量による熱伝達率の立遅れとなって現れる下段管の両特性が現れ、それぞれ伝熱促進率と G^* とに相関関係をもつ。

以上、管群の熱伝達率についても単一円管と同様に G^* との相関があり、壁面熱伝達が顕熱輸送支配から液膜蒸発支配へ移行する G^* の値 (図9中の G^*_{opt}) で管群ミスト冷却の最適運転条件が与えられ、ここでも管群としての高性能管の優位性が確認される。

4. 結 論

ミスト冷却による空冷式熱交換器の高性能化の追究を目的として、鉛直下降噴霧流中に置かれた平滑管ならびにワイヤ巻付け管からなる等熱流束加熱千鳥配列の管群を対象にミスト冷却実験を行い、以下の結論を得た。

- (1) 管群効果として、気流温度分布の一様化および単相流熱伝達率の増加、さらに噴霧気流から各段管への液供給の違いが、流れの加速と乱れの増加などの流力的群効果と関連づけて明らかにされた。
- (2) 管群ミスト冷却熱伝達の伝熱促進機構が各段管の液供給の違い (噴霧気流からの直接衝突、上段管からの落下液) と関連づけて明らかにされた。
- (3) 高性能伝熱管としてのワイヤ巻付け管は管表面での液膜の伸張性と管下端での液の離脱性が優れているため、上段管においては低噴霧量で管前面のみならず全面ぬれが達成され、その熱伝達率は平滑管に比べて著しく増加する。さらに、下段管においても低噴霧の条件で上段管からの液供給を受けるため、熱伝達の立上りが早く管群全体を通して良好なミスト冷却が達成される。

(4) 単一円管に対して得られたぬれパラメータ G^* は管群においても有効なパラメータとなり、これにより最適運転条件が決定され、平滑管群に対しては3段管のぬれ条件により、また高性能管においてはほぼ1段管のぬれ条件により与えられることが明らかにされた。

最後に、本研究は昭和61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

る。

文 献

- (1) Mori, Y. and Nakayama, W., *Heat Transfer in Energy Problem*(1983), 211, Hemisphere.
- (2) 相原, 第506回機習教(1980), 83.
- (3) 松田・滝本・林・ほか1名, 機論, 52-482, B(1986), 3545.
- (4) 林・滝本・松田, 機論, 52-482, B(1986), 3554.
- (5) 松田・滝本・機論, 54-506, B(1988), 2864.
- (6) 林・滝本・松田・ほか1名, 機論, 54-505, B(1988), 2617.
- (7) 大島・ほか3名, 化学工学, 34-3(1970), 292.
- (8) Yang, W. J. and Clark, D. W., *Int. J. Heat Mass Transf.*, 18(1975), 311.
- (9) Tree, D. R., ほか3名, *Proc. 6th Int Heat Transf. Conf.*, HX-26(1978), 339.
- (10) 桑原・ほか3名, 機論, 50-454, B(1984), 1549.
- (11) 藤井・ほか2名, 冷凍, 57-658(1982), 787.
- (12) 西川・石谷, 機論, 43-373(1977), 3310.
- (13) 伝熱工学資料(改訂第4版), (1986), 64, 機械学会.
- (14) 中山, 第506回機習教(1980), 99.
- (15) 斎藤・岸浪, 冷凍, 16-519(1971), 2.
- (16) Zukauskas, A., *Advances in Heat Transfer*, 8(1972), 93, Academic Press.