ピンフィン放熱器の自由対流・ふく射熱伝達* (伝熱特性の統一表示)

相原利雄**, 円山重直**, 小早川真一***

Free Convective/Radiative Heat Transfer from Pin Fin Arrays with a Vertical Base Plate (General Representation of Heat Transfer Performance)

Toshio AIHARA, Shigenao MARUYAMA, and Shinichi KOBAYAKAWA

An experiment was performed on free convective and radiative heat transfer from highly populated pin fin arrays. Data analyses were made in consideration of the temperature distribution in pin-fins, radiative heat transfer, and base plate convection. The free convection heat transfer characteristics of the pin fin arrays were well expressed by rendering the Nusselt number and Rayleigh number in terms of the horizontal pin pitch as a characteristic length, and the generalized characteristics were similar to those of rectangular fin arrays. An experimental formula of the pin fin array performances was presented.

Key Words: Convective Heat Transfer, Free Convection, Pin Fin, Heat Sink, Thermal Radiation

1. 結 言

細線の熱伝達率が平板に比べてかなり大きいことから、ピンフィン形放熱器の性能が優れているであろうことは、想像に難くない。しかしその自由対流熱伝達特性に関する研究は、著者が行ったプレートフィン列との比較実験⁽¹⁾と基板寸法を $100 \times 100 \text{ mm}^2$ に固定した実験⁽²⁾ (ピン径 $= 1.23 \text{ mm}$) のほかは、 $3.18 \sim 6.35 \text{ mm}$ の比較的大直径のピンフィン (植ピン密度 $N = 0.31 \sim 1.33 \text{ 本/cm}^2$) に関する Sparrow らの実験⁽³⁾ が知見されるだけである。

一般に多列ピン群の自由対流においては、上部のピンは下方のピンの浮力流れによって影響を受け、隣接ピン相互の境界層の干渉も関与してくるため⁽⁴⁾、その熱伝達特性を単一細線や単列ピン群のものから類推することは、極めて困難である。

著者らは以上の観点に立って、電子機器冷却用の高性能放熱器開発の目的で、植ピン密度 N が Sparrow らのものより 1 けた大きい 59 種類のピンフィン放熱器について実験的研究を行い、その自然空冷特性に及

ぼす温度条件、ピン径、ピン長さ、ピン列長、ピン間隔などの影響を明らかにした。更に得られた実験データについて、ピンの温度分布やふく射伝熱も考慮した解析を行い、それらの全パラメータを包括する実験式を提出した。

2. 主 要 記 号

A : 伝熱面積 m^2

a : 基板の横幅(図1) m

b : 基板の鉛直長さ(図1) m

d : ピンの直径(図1) m

g : 重力の加速度 m/s^2

H : 有効ピン列長〔式(14)〕 m

h : 平均(対流)熱伝達率 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$

h_{pe} : ピン群の総括熱伝達率〔式(19)〕
 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$

l : ピンの長さ(図1) m

N : 植ピン密度 $= (\text{全ピン数})/ab$
 $= (S_n S_v)^{-1}$ 本/ m^2

$Nu_{p,s}$: ピン群の平均ヌセルト数〔式(20)〕

$\dot{Q}$: 伝熱量 W

$\dot{Q}_t$: 供試放熱器の片面からの全伝熱量 W

P_r : プラントル数

* 昭和61年11月18日 第940回講演会において講演、原稿受付 昭和61年4月4日。

** 正員、東北大学高速力学研究所 (〒980 仙台市片平2-1-1)。

*** 正員、日本針布㈱ (〒182 調布市柴崎2-13-1)。

R_{sa}^* : S_h 基準の修正レイリー数〔式(13)〕

S_h : 水平方向のピン列間隔(図1) m

S_v : 鉛直方向のピン間隔(図1) m

T : 温度 K

β : 体膨張係数 $\cong 1/T_a$ K^{-1}

ε : 半球全ふく射率

ε_a : 供試放熱器の見掛けのふく射率〔式(15)〕

λ : 空気の熱伝導率 $W/(m \cdot K)$

λ_p : ピン材料の熱伝導率 $W/(m \cdot K)$

ν : 空気の動粘度 m^2/s

σ : ステファン・ボルツマン定数 $W/(m^2 \cdot K^4)$

$\bar{\phi}$: ピンの無次元平均温度

$$=(\bar{T}_p - T_a)/(T_b - T_a)$$

添 字

a : 周囲流体

b : 基板, または基板温度における値

f : 物性値を膜温度で評価

p : ピン

r : ふく射成分

∞ : 単一鉛直平板に関する値

$-$: 平均

3. 実験装置および測定方法

供試放熱器の斜視断面を図1に, 主要諸元を表1に示したが, 基板③に関し前後対称な伝熱面を構成しているのが特徴である。これは, この種の実験において問題となる基板背面からの熱漏えいを防ぐためである。この銅製基板③は, 磁性管に通したニクロムヒータ②を内蔵し, その表面には多数の銅ピン⑤が千鳥配

列にはんだ付けされており, 伝熱面にはすべて黒色のエポキシ樹脂塗装⁽⁵⁾(半球全ふく射率 $\varepsilon=0.9$)を施してある。基板の外周には, その部分からの放熱量を測定するため, シリコンゴム製の熱流計④を密着させた⁽⁵⁾⁽⁶⁾。またニクロムヒータ②の挿入ピッチは, 等温基板の条件が得られるよう, 下部を密に上部を粗にし, その銅導線①は基板上端の熱流計を貫いて上方に引き出した。

この供試放熱器を, $0.9 \times 0.9 \times 1.6 m^3$ の木製対流槽のほぼ中央に, 基板が鉛直となるよう糸でつり, 更にこれらを $2.7 \times 2.7 \times 1.8 m^3$ の鞘槽内に設置した。対流槽内の空気温度 T_a は, 基板と同じレベルに位置する $0.1 mm$ 径の C-C 熱電対で測定した。また基板については6箇所, 多列ピン群については22箇所(単列ピン群は15箇所)の温度を, それぞれ $0.1 mm$ の C-C 熱電対で計測した。

供試放熱器の片側からの正味伝熱量 $\dot{Q}_t$ は, ヒータ②への電気入力 $\dot{Q}_{in}$, 熱流計④を介しての放熱量を $\dot{Q}_m$ とすれば

$$\dot{Q}_t = (\dot{Q}_{in} - \dot{Q}_m)/2 \dots\dots\dots (1)$$

で与えられる。ただしヒータ導線や熱電対を通しての損失熱量は, $\dot{Q}_t$ の 0.1% 以下であったので, これらは無視した。

以上の方法により, 基板の平均温度 T_b と周囲空気温度 T_a との差を約 20, 50, 85 K の3水準にとり, 定常状態において伝熱実験を行った。なお基板の温度分布は, $b=200 mm$ のとき $(T_b - T_a)$ の $\pm 4\%$ 未満, b

図1 供試放熱器の斜視断面図

表1 供試放熱器の主要寸法
(単位: N は本/cm², その他は mm)

	d	a	b	l	S_v	S_h	H	N
SINGLE ARRAY	2.00	6	108	70	3.5 5.0	∞	100.0 97.0	4.48
	4.00	6	108	70	7.0 10.0 16.0	∞	102.0 104.0 100.0	1.08 ~ 4.48
MULTI-ARRAYS	1.23	100	50	32	2.11	5.73	45.5	0.90
				45	4.26 ~ 4.62	2.14 3.37 4.62	44.1 43.8 43.9	~ 2.42
				60	4.29	6.99 9.43	44.0 43.9	~ 2.42
			100	32	2.09	9.11	95.3	10.58
				45	4.25 ~ 4.27	2.12 2.79 4.59	94.7 92.6 92.8	~ 2.25
				60		7.25 9.23 10.43	92.8 93.0 93.0	~ 2.25
			200	32	4.24 ~ 4.25	4.69 6.35 8.05	194.6 194.1 194.1	~ 1.86
				45		10.36	194.1	~ 1.86
				60		13.70	194.1	~ 1.86

=50 mm のとき±1%以下であった。更に放熱器まわりの空気の流動状態を調べるため、ステアリン酸亜鉛の微粒子を浮遊させて速度場の計測⁽⁷⁾も行った。

4. 実験結果および考察

4.1 放熱器まわりの速度分布 図2(a)と図3(a)は、放熱器の基板面から30 mm離れた鉛直断面における対流パターンと速度分布を示したものであり、図2(b)と図3(b)は基板中心を通る鉛直断面における対流パターンと速度分布を例示したものである。ピン群へ向かう流れは安定しているが、流出気流はピン群を通過中に生じた乱れのためかなり変動しており、図中の流出速度の分布はその最大値を描いたものである。ピン群はプレートフィン列に比べ、周囲への開放度が大きいため、周囲流体との圧力差が小さく、側面からの吸込みは意外に少ない。したがって基板幅 a の影響は、さほど大きくないと予想される。

4.2 単列ピン群の平均熱伝達率 ピン群の鉛直ピン間隔 S_p を決定するために、単列ピン群の伝熱特性について予備実験を行った。

本報におけるピン群の平均(対流)熱伝達率 h_p は、次式から決定される。

$$h_p = \dot{Q}_p / A_p (\bar{T}_p - T_a) \quad (2)$$

ここで A_p はピン群の表面積 $= abN\pi d(l+d/4)$ 、 $\bar{T}_p$ は測定値から算定したピン群の平均温度、 $\dot{Q}_p$ は次式で与えられるピン群の対流伝熱量である。

$$\dot{Q}_p = \dot{Q}_i - \dot{Q}_b - \dot{Q}_r \quad (3)$$

上式で $\dot{Q}_b$ は基板からの対流伝熱量で、基板の実効面積を $A_b = ab(1 - N\pi d^2/4)$ 、その平均熱伝達率を h_b とすれば、

$$\dot{Q}_b = A_b h_b (T_b - T_a) \quad (4)$$

と与えられるが、 h_b については現在のところ不明である。そこで h_b には単一鉛直等温平板の平均熱伝達率[式(11)]を適用した。

また $\dot{Q}_r$ はピン群と基板からの全ふく射伝熱量で、単列の供試放熱器については、 $\epsilon=0.9$ のもとに数%の誤差内で、次式で近似できる。

$$\dot{Q}_r \cong \epsilon \sigma (\bar{T}_p^4 - T_a^4) [ab\{1 + N\pi d(l+d/4)\} - \epsilon \pi d l F_{pp}(abN-1)] \quad (5)$$

$$\text{ここで } F_{pp} = (2/\pi) [\sin^{-1}(d/S_p) + \sqrt{(S_p/d)^2 - 1} - (S_p/d)] \quad (6)$$

図4は、以上のごとくして求めた平均熱伝達率 h_p を、下に定義のグラスホフ数 Gr_n に対して無次元表示したものである。

$$Gr_n = g\beta(\bar{T}_p - T_a)H^3/\nu^2 \quad (7)$$

ここで H は式(14)で定義の有効ピン列長である。同図4には、熱流束一様の単列円柱群に関する Marsters⁽⁸⁾ の測定値の中から著者らの実験条件に近いものを選

図3 放熱器近傍の速度分布
[$a=100$, $b=100$, $l=60$, $S_p=4.26$,
 $S_n=6.20$ (単位: mm), $T_b - T_a=20.3^\circ\text{K}$]

図2 放熱器近傍の自由対流の可視化写真
[$a=100$, $b=100$, $l=60$, $S_p=4.26$,
 $S_n=6.20$ (単位: mm), $T_b - T_a=20.3^\circ\text{K}$]

図4 単列ピン群の平均熱伝達率 h_p

び、中央の円柱温度で整理した結果も打点してある。ピンの直径や長さ、加熱条件の相違にもかかわらず、有効列長 H を用いた無次元数でよく整理され、両対数グラフ上でのこの配が $1/4$ となる点が注目される。

図4の測定値について実験式を作れば次のようになる。

$$h_p H / \lambda_f = [0.311 + 0.454 \ln(S_v/d)] G_{r,u}^{1/4} \quad \dots\dots (8)$$

上式は、図4の中に実線で描いた様に、測定値を極めて良く表しており、更に鉛直粗面の熱伝達率⁽⁹⁾との対比から、適用範囲は $S_v/d=1\sim4$, $G_{r,u}=10^5\sim10^8$ と考えてよい。

したがって式(2), (8), (14)から、単列ピン群の占有空間当たりの伝熱量 $\dot{Q}_p/dHl$ を最大にするピン間隔を求めると、 $d=1.23$ mm, $H=100$ mm のとき、 $S_v \cong 1.72$ mm を得る。一方、使用材料当たりの対流伝熱量を最大とするピン間隔は、少なくとも $S_v/d \geq 10$ であると予測される⁽⁸⁾⁽¹⁰⁾。以上の考察と製作の容易さから、本報の多列ピン群については、表1のように $S_v=4.3$ mm ないし 2.1 mm に選んだ。

4.3 多列ピンフィン放熱器の伝熱性能

4.3.1 総括熱伝達率 図5は本実験で得た熱量関係を例示したものである。全伝熱量 $\dot{Q}_t$ に占めるふく射伝熱量 $\dot{Q}_r$ の割合は、プレートフィン列⁽⁶⁾よりも大きく、全実験を通じ、19~48%程度であった。

ところで Sparrow-Vemuri⁽³⁾ は、基板面積基準の総括熱伝達率 $h'_t = \dot{Q}_t / A_b (T_b - T_a)$ を、下に定義のヌセルト数とレイリー数によって整理している。

$$(Nu)_{s-v} = h'_t b / \lambda_f$$

図5 多列ピンフィン放熱器の熱量関係の一例

$$= \dot{Q}_t / (A_b (T_b - T_a) \lambda_f) \quad \dots\dots\dots (9)$$

$$Ra_b = Pr_f [g \beta (T_b - T_a) b^3 / \nu^2] \quad \dots\dots\dots (10)$$

図6は、試みに Sparrow らの無次元数を用いて、著者らの測定値を打点したものであって、単一鉛直平板の平均熱伝達率 h_∞ に関する次式の相似解⁽¹¹⁾も描いてある。

$$Nu_\infty (= h_\infty b / \lambda_f) = 0.515 Ra_b^{1/4} \quad \dots\dots\dots (11)$$

ヌセルト数 $(Nu)_{s-v}$ と Nu_∞ は、総括フィン有効度⁽¹⁶⁾を E_t で表すと、 $(Nu)_{s-v} = E_t \cdot Nu_\infty$ の関係にあるから、 $(Nu)_{s-v}$ の値はピンの間隔や長さに応じて広範囲に分散し、基板長さ b とともに増大する。したがって本報のように植ピン密度 N が大きく、ピン群の対流成分が支配的な放熱器では、式(9), (10)のパラメータでは伝熱特性の統一表示は難しい。そこで以下のごとく、ピン群の対流成分のみを取り出して解析を行った。

4.3.2 多列ピン群の平均熱伝達率の決定 多列ピン群の平均(対流)熱伝達率 h_p は、以下の手続を経て決定した。

(i) まず基板面の平均熱伝達率 h_b については現在のところ全く不明なので、とりあえず垂直凹状面の基板に関する下記の熱伝達率⁽⁵⁾を近似的に適用する。これは $\dot{Q}_b$ をその真値より若干高めに見積もることになる。

$$h_b S_h / \lambda_b = (Ra_s^*/70)$$

$$\times [1 - \exp\{- (57/Ra_s^*)^{2/3}\}] \quad \dots\dots\dots (12)$$

ここで

$$Ra_s^* = Pr_b \left[\frac{g \beta (T_b - T_a) S_h^3}{\nu^2} \right] \frac{S_h}{H} \quad \dots\dots\dots (13)$$

上式の適用範囲は $Ra_s^* < 10^3$ であって、これ以上の Ra_s^* 域については原著⁽⁵⁾を参照されたい。

また式(13)中の H は鉛直方向の有効ピン列長で、各列のピン数 N_v が等しいときは、次式から求める。

$$H = (N_v - 1) S_v + d \quad \dots\dots\dots (14)$$

図6 Sparrow らの無次元数⁽³⁾による基板面積基準の総括熱伝達率 h'_t の表示

奇数列と偶数列のピン数が異なるときは、 N_v には両者の平均値を使用する。

(ii) 三次元ピン群、特に基板を持つピンフィン放熱器のふく射伝熱について、解析結果の統一表示に成功した例は知見しない。そこで本報では、著者らの開発した任意形状の三次元黒体ふく射伝熱に関する数値計算法⁽¹²⁾を適用して、ふく射伝熱量 $\dot{Q}_r$ の推算を行った。その際、放熱器伝熱面のふく射率は $\epsilon=0.9$ であるが、 $\epsilon=1$ と置いて解析を進めた。これは二次元半無限ピン群⁽¹³⁾やプレートフィン列⁽¹⁴⁾の解析結果から予測されるように、本報の放熱器形状(多列)では、ピン群間および基板間の空洞効果のため、黒体近似による誤差は数%以下にすぎないからである。

いまピン群に外接する仮想伝熱面[面積 $\cong ab+2l \times (a+b)$]について、見掛けのふく射率⁽¹⁴⁾ ϵ_a を導入すれば、供試放熱器のふく射伝熱量 $\dot{Q}_r$ は次式で表される。

$$\dot{Q}_r = \epsilon_a \sigma (\bar{T}_p^4 - T_a^4) [ab + 2l(a+b)] \quad \text{.....(15)}$$

ピン群の平均温度 $\bar{T}_p$ には、(iii)に記述の有効温度差 $(\bar{T}_p - T_a)_e$ から算出したものを用いた。図7は上記の数値計算法で得られた見掛けのふく射率 ϵ_a を、植ピン面積比 $d^2/S_h S_v$ と全ピン数 $ab/S_h S_v (=abN)$ について打点したものである。本報の実験範囲 [$d^2/S_h S_v = 0.03 \sim 1$, $ab/S_h S_v = 120 \sim 1060$, $l/d = 26 \sim 50$] では、 l/d の影響は非常に小さく(2%以下)、したがって ϵ_a の値は次式で良く近似できる。

$$\epsilon_a = (d^2/S_h S_v)^{0.5} \sqrt{S_h S_v} \quad \text{.....(16)}$$

(iii) 供試放熱器の植ピン密度がかなり高いため、ピン先端部と外縁のピンを除けば、全部のピンに熱電対を取り付けることは困難である。そこで実用的見地から、以下のようにして得られるピン群と周囲流体との有効温度差 $(\bar{T}_p - T_a)_e$ をもってピン群の平均温度 $(\bar{T}_p - T_a)$ と見なし、式(2)から平均熱伝達率 h_p を算出する近似的手法を用いた。

いまピン群の総括熱伝達率を h_{pt} とすれば、有効温度差 $(\bar{T}_p - T_a)_e$ は一次元熱伝導問題の解として、下のごとく得られる。

図7 多列ピンフィン放熱器の見掛けのふく射率 ϵ_a

$$\bar{\phi} = \frac{(\bar{T}_p - T_a)_e}{T_b - T_a} = \frac{\tan h(Ml)}{Ml} \quad \text{.....(17)}$$

$$\text{ここで } M = 2\sqrt{h_{pt}/(\lambda_p d)} \quad \text{.....(18)}$$

一方、 $A_b/A_p = 0.01 \sim 0.1$ であり、かつピン群による遮へい効果のため、基板からのふく射伝熱量はピン群の全伝熱量に比べ、十分小さいと見て大過ない。したがって有効温度差 $(\bar{T}_p - T_a)_e$ に基づく総括熱伝達率 h_{pt} は、次式で近似できる。

$$h_{pt} = (\dot{Q}_e - \dot{Q}_b) / [A_p (T_b - T_a) \bar{\phi}] \quad \text{.....(19)}$$

かくて式(17)、(19)を連立させて解けば、 $(\bar{T}_p - T_a)_e$ ないし $\bar{\phi}$ が決定される。本報の供試放熱器については、 $\bar{\phi} = 0.82 \sim 1.00$ 程度であった。

以上のようにして基板の(対流)熱伝達率 h_b 、全ふく射伝熱量 $\dot{Q}_r$ 、有効温度差 $(\bar{T}_p - T_a)_e$ を求め、それらを式(2)~(4)に代入して多列ピン群の平均(対流)熱伝達率 h_p を求めた。

4.3.3 平均熱伝達率 h_p の統一表示 単列ピン群に関する熱伝達実験式(8)や温度境界層⁽¹⁰⁾が鉛直平板のものに酷似していること⁽⁴⁾、図2と図3に見るごとくピン群側面からの外気流入が小さいこと、などから、ピン群についてもプレートフィン列⁽⁶⁾類似の伝熱様式が期待される。そこで多列ピン群の熱伝達率 h_p の測定値を、下記の無次元数で整理したものが図8である。

$$Nu_{p,s} = h_p S_h / \lambda_b \quad \text{.....(20)}$$

$$\bar{\phi} Ra_s^* = Pr_b \left[\frac{g\beta(\bar{T}_p - T_a) S_h^3}{\nu_b^2} \right] \frac{S_h}{H} \quad \text{.....(21)}$$

ただし物性値には、鉛直管内路の自由対流に関する著者らの解析結果⁽¹⁵⁾と簡便さから、基板温度 T_b における値を使用した。

図8を見ると、平均ヌセルト数 $Nu_{p,s}$ は、各鉛直ピン間隔 S_v ごとに極めて良くまとまっており、ピン長

図8 式(20)、(21)の無次元数による多列ピン群の平均(対流)熱伝達率 h_p の表示

l によるわずかな差異は残るものの、それぞれ固有の曲線で表せることがわかる。なお供試放熱器の S_h/l 比に対応する長方形フィン列の実験式⁽⁶⁾も参考に描いてある。

次に有効列長 H のピン群からの対流伝熱が、各々のピン列に外接する厚さ d 、長さ H の仮想の長方形フィンによってなされたものと見なし、 $H \cong N_v S_v$ と置いて、その見掛けの熱伝達率 h_a を形式的に求めれば、次式が得られる。

$$h_a = (\pi d / 2 S_v) h_p \quad \dots\dots\dots (22)$$

この関係を図8の測定値に適用して、 $(\pi d / 2 S_v) N_{u,p,s}$ と $\bar{\phi} R_{a,s}^*$ との関係を示すと図9のようになる。図9には、単列ピン群に関する実験式(8)を変形した次式も描いてある。

$$\left(\frac{\pi d}{2 S_v} \right) N_{u,p,s} = 0.534 \left(\frac{d}{S_v} \right) \times \left[1 + 1.46 \ln \left(\frac{S_v}{d} \right) \right] (\bar{\phi} R_{a,s}^*)^{1/4} \quad \dots\dots\dots (23)$$

このように整理することによって、多列ピン群の対流伝熱特性は、長方形フィン列のそれに酷似したものとなり、修正レイリー数 $\bar{\phi} R_{a,s}^*$ の増大につれて、単列ピン群に関する式(23)に漸近するようになる。そして全測定値は、ピン間隔 S_h と S_v 、ピン列長 H 、ピンの直径 d と長さ l 、温度条件 $(T_b - T_a)$ の違いにかかわらず、誤差 $\pm 10\%$ 内で次式によって統一的に表すことができる。

$$\left(\frac{\pi d}{2 S_v} \right) N_{u,p,s} = \frac{1}{20} (\bar{\phi} R_{a,s}^*)^{3/4} \times \left[1 - \exp \left(\frac{-120}{\bar{\phi} R_{a,s}^*} \right) \right]^{1/2} + \frac{1}{200} (\bar{\phi} R_{a,s}^*)^{1/4} \quad \dots\dots\dots (24)$$

上式の適用範囲は、 $\bar{\phi} R_{a,s}^* = 0.3 \sim 600$ 、 $S_v/d = 1.7 \sim 3.5$ 、 $l/H = 0.16 \sim 1.37$ である。

ピンフィン放熱器と長方形フィン列との優劣は、詳細な検討(たとえば16)を経なければ確定的なことは

言えないが、大まかには以下のようなだろう。すなわち図9に見るごとく、 $\bar{\phi} R_{a,s}^*$ が $5 \sim 10^2$ 程度では、煙突効果によってフィン列のほうが若干コンパクト性に優れているが、 $\bar{\phi} R_{a,s}^* < 3$ では新気流入効果のため、開放度の大きいピン群のほうが勝っている。このような傾向は、フィン列と長方形管⁽⁶⁾、有限幅と無限幅平行平板⁽¹⁷⁾などの対比からも首肯される。また図8から知れるように、もしピンの直径が長方形フィンの板厚と同じならば、使用材料当たりの伝熱特性は、ピン群のほうがフィン列の4倍以上も優れている。

5. 結 言

ピン径が比較的細く、植ピン密度が $1.08 \sim 10.58$ 本/cm²、伝熱面ふく射率が0.9で、基板鉛直の59種類のピンフィン放熱器について、空気中で自由対流による伝熱実験を行い、下の結果を得た。

(1) 流れ場の可視化と速度計測によれば、開放度の大きいピンフィン放熱器では、ピン群側面からの周囲空気の流入は比較的小さく、したがって基板横幅の影響はさほど大きくないと予想される。

(2) 単列ピン群の平均(対流)熱伝達率 h_p は、有効ピン列長 H を代表寸法に選ぶと、単独鉛直平板と類似の整理法が適用できる。そこでピンの鉛直間隔 S_v と直径比が $1 \sim 4$ で、列長 H に基づくグラスホフ数が $10^6 \sim 10^8$ の範囲について、Marstersの実験値をも含む、 h_p の統一的な実験式(8)を提出した。

(3) 多列ピンフィン放熱器のふく射伝熱について数値解析を行い、見掛けのふく射率について、放熱器諸元をパラメータとする一般式(16)を提出した。

(4) 放熱器の全伝熱量から、基板の伝熱量とふく射伝熱量を減じて求めた多列ピン群の平均(対流)熱伝達率は、ピンの列長 H と水平間隔 S_h を代表寸法に選ぶと、長方形フィン列と類似の手法でおおむね整理することができる。

(5) 新たに提出した修正ヌセルト数と修正レイリー数を用いることにより、ピン間隔 S_h と S_v 、列長 H 、ピンの直径と長さ、温度条件の違いを超えて、ピン群の平均熱伝達率を統一的に表す実験式(24)を得た。

本研究を行うにあたり、元日本針布(株)取締役 宮田芳郎氏からは、供試放熱器の製作等に多大の援助を受けた。ここに記して厚く謝意を表します。

文 献

- (1) 相原・畑田, *Natl. Tech. Rep.*, 8-3 (昭37), 228.
- (2) 相原・小早川, 第10回伝熱シンポジウム講演論文集, (昭48), 257.
- (3) Sparrow, E. M. and Vemuri, S. B., *Trans. ASME, J.*

図9 ピン群の平均(対流)熱伝達率 h_p の統一表示

- Heat Transf.*, 107-1 (1985), 190.
- (4) 相原, 伝熱工学の進展, 4 (昭51), 119, 養賢堂.
- (5) 相原, 機論, 34-261 (昭43), 915.
- (6) 相原, 機論, 36-282 (昭45), 248.
- (7) Aihara, T., ほか2名, *Int. J. Heat Mass Transf.*, 15-12 (1972), 2535.
- (8) Marsters, G. F., *Int. J. Heat Mass Transf.*, 15-5 (1972), 921.
- (9) 藤井・ほか2名, 機論, 36-286 (昭45), 994.
- (10) Lieberman, J. and Gebhart, B., *Int. J. Heat Mass Transf.*, 12-11 (1969), 1385.
- (11) 藤井, 伝熱工学の進展, 3 (昭49), 1, 養賢堂.
- (12) 円山, 相原, 第64期通常総会講演概要集 No. 870-2 (昭62-4), 218.
- (13) 増田・北沢, 機論, 42-363 (昭51), 3523.
- (14) 相原, 機論, 33-245 (昭42), 77.
- (15) 相原・ほか2名, 機論, 51-471, B (昭60), 3582.
- (16) 相原, 機論, 36-292 (昭45), 2077.
- (17) Sparrow, E. M. and Bahrami, P. A., *Trans. ASME, J. Heat Transf.*, 102-2 (1980), 221.

討 論

〔質問〕 越 後 亮 三〔東京工業大学工学部〕

ピンフィンのイメージを変えるような新しい着想に敬意を表す。

(1) 高密度ピンの生産技術と製造コストの見通しについてご説明願いたい。

(2) ピン側部ならびにピン先端部の開放空間からの流体の流入量は伝熱特性に影響しない程度であるとの説明であるが, 図3に示されているように下部と上部の速度分布からみて流量は大幅に変化しているように見受けられ, 実質的にはかなり影響しているのではないか。

〔回答〕 (1) 本報のピンフィンは, 既存のワイヤブラシの製造技術を用いて製作した。すなわち細いUピンを薄い帯板に連続的に打ち込み, ブラシ状に組み立てたものを基板の表面に半田付したものであり, 大量生産が可能である。使用材量は, プレートフィンに比べて格段に少なくできるから, 大量生産した場合には, 大幅に製造コストが低減できるものと期待される。

(2) ピン群の出口速度は時間的に変動しており, 図3の分布はそれらの最大値を示したものである。したがって時間平均の出口速度は図3のものよりは小さくなるが, 側面からの新気流入の影響が無視できるわけではない。たとえば図9に見られるように, 低レイリー数域では, ピン群側面からの新気流入のために, ピンフィンのヌセルト数はプレートフィンのものに比べ高い値となる。しかし本実験の大半の領域でピンフィンは, 側面からの新気流入のないプレートフィンときわめて類似の伝熱特性を示しており, このことから, 本文中では「基板幅の影響はさほど大きくないと予想される。」と記述した。

〔質問〕 田 中 貞 行〔福井工業高等専門学校〕

(1) Sparrow⁽³⁾らは植ピン密度がおおよそ0.5～0.8なる範囲に総括 N_u の極大値が存在することを示している。貴報ではこれより1けた大きい植ピンについて実験しておられるがこの点についての考えをお示しいただきたい。

(2) ピンフィン放熱器設計に際して式(24)は熱的条件(Q_i , T_b , T_a , ε , λ_p)を与えて形状変数(a , b , d , l , S_n , S_u)を特定するというような手続の中で利用されると考える。この場合繰返し計算になるかと思うが設計手順をお示しいただきたい。

〔回答〕 (1) Sparrowら⁽³⁾の実験はピン径6.35mmに関するものであるが, 本研究では細線の高熱伝達率を利用するため, 主として直径1.23mmの細いピンを用いている。これはSparrowらのピン径の約1/5に相当する。したがって直接の比較はできないが, 基板に対するピンの投影面積比 $R = (\pi/4)d^2N$ を求めると, Sparrowらの最適植ピン密度に対しては $R = 0.16 \sim 0.25$, 本研究では $R = 0.022 \sim 0.13$ となる。一方, 使用材料当たりの伝熱量は, ピン長さが同じ場合には, $Nu_{s-v}/R Nu_\infty$ で表されるので, R の小さいほうが使用材料当たりの伝熱量は大きくなる。すなわち, 本研究では, コンパクトネスの最大となる $R \approx 0.13$ から, 使用材料当たりの放熱量が増大する範囲について実験を行ったということである。

(2) 式(24)は, 放熱器を与えて伝熱性能を精度良く計算するためのものである。ただ図9に示すように, ピンフィンがプレートフィンときわめて類似な伝熱特性を示すので, プレートフィンに関する最適化法⁽¹⁶⁾や設計手法(付1)が適用できると考える。

(付1) Aihara, T. and Maruyama, S., *Proc. Int. Symp. Cool. Tech. Electron. Equipm.*, (1987), 31.