基板上に高密度に基盤目配列された円柱群の圧力損失*

五十嵐 保^{*1}, 森田 健^{*2}

Pressure Loss of Dense Arrays of In-Line Circular Cylinders on the Wall of Parallel Channel

Tamotsu IGARASHI^{*3} and Takeshi MORITA^{*3} Department of Mechanical Engineering, National Defense Academy,
1-10-20 Hashirimizu, Yokosuka-shi, Kanagawa, 239-0811 Japan

Pressure distributions of dense arrays of in-line circular cylinders, imitating arrays of condensers on the wall of parallel channel were measured. The diameter and height, d and H , of the cylinder were 16 mm and 20 mm, respectively. The effects of the cross-stream and stream-wise pitches of the cylinders, P_1 , P_2 , the number of row, N , and the other factors on the pressure loss were clarified. From the flow visualization using oil-film method, the flow pattern is divided into two regimes: one is fence-type for $P_1/d \leq 1.2$ and the other is In-line-type for $P_1/d > 1.2$. And the pressure drop is divided into three parts: the inlet, intermediate and outlet parts of the arrays of the cylinders. Depending on the above flow patterns, these pressure drop and pressure recovery are formulated by the dominating factor of the opening ratio, β , of the channel, the pitch, P_2 , and numbers of row, N , of the cylinders. The pressure loss given by the recommended equation agrees with the experimental data within $\pm 10\%$.

Key Words: Internal Flow, Pressure Distribution, Pressure Loss, Electronic Equipment, Array of Circular Cylinder, In-Line Arrangement, Flow Visualization, Oil-Film Method

1. ま え が き

電子機器の強制空冷の熱設計⁽¹⁾において重要問題の一つは流路の圧力損失および熱伝達に関する知見である。従来の報告^{(2)~(7)}では一般的結論は得られていない。著者の一人⁽⁸⁾は実装機器に近い寸法を有する正方形ブロックが基盤目配列された場合の圧力損失に関しブロック高さ、行数、列数、ピッチ等を系統的に変化させて実験を行った。流路をブロック群入口部、ブロック部、出口部に三分割し、ダクトの幅と高さおよび上記パラメータを用いて各部の圧力降下を定式化した。得られた圧力損失係数の一般関係式よりブロック群の圧力損失の予測が可能となった。

次報⁽⁹⁾では、基盤目配列された円柱ブロック群に対し前報⁽⁸⁾と同様の手法により円柱ブロック群の圧力損失係数の一般関係式を求めた。また、円柱群の各配列における平均熱伝達率を圧力損失係数を導入し無次元表示に成功した。圧力損失および平均熱伝達の関係式は実験値と $\pm 10\%$ 以内で一致する。

電子機器ではコンデンサが高密度に基盤目配列された場合もある。コンデンサは自らは発熱しないが熱に弱く、温度が 50°C 以上になると性能劣化をきたすため上流側の空気温度を低く抑えねばならない。そこで、実装密度の高いコンデンサ群の圧力損失に対する知見が必要であるが、報告例は見当たらない。このような点から、高密度に基盤目配列されたコンデンサを模した円柱群の圧力分布を測定した。実験結果を整理して圧力損失係数の推奨式を求めた。得られた推奨式は実験値と $\pm 10\%$ 以内で一致する。

記 号

A : 円柱群の前方面積 $= d \cdot H \cdot M$

A_0 : ダクトの流路面積 $= B \cdot W, B \cdot W'$

B : ダクト高さ

W, W' : ダクト幅, 補正ダクト幅 ($W' = W - 2t$)

d, H : 円柱の直径および高さ

C_p : 圧力係数 $= (p - p_a) / 0.5 \rho U_m^2$

C_{p1} : 最前列円柱の急縮小部の圧力降下係数
 $= (p_{upst} - p_1) / 0.5 \rho U_m^2$

C_{p2} : 中間円柱群の圧力降下係数 $= (p_1 - p_2) / 0.5 \rho U_m^2$

C_{p3} : 最後尾円柱の急拡大部の圧力回復係数 $=$

* 原稿受付 2001年4月17日。

^{*1} 正員, 防衛大学校 (〒239-0811 横須賀市走水 1-10-20)。^{*2} 防衛大学校研究科学生。

E-mail: tigarash@nda.ac.jp

$$(p_{dnst} - p_2)/0.5\rho U_m^2$$

g_1 : 流れと直角方向の円柱間のすきま

M, N : 円柱群の行数および列数

p, p_a : 壁面圧力, 大気圧

p_1, p_2 : ブロック群入口部および出口部の圧力

P_1, P_2 : 流れと直角方向および流れ方向の円柱ピッチ

Q : 流量 $= A_0 U_m = BW' U_m$

Re : レイノルズ数 $= U_m d / \nu$

t : ダクト幅補正用側板の厚さ

U_m : ブロック群上流の平均速度

β : 開口比 $= 1 - A/A_0 = 1 - (H/B)(d/W')M$

δ : 支配因子 $= (1 - \beta)/\beta^2$

ζ : 圧力損失係数 $= (p_{upst} - p_{dnst})/0.5\rho U_m^2$

ν, ρ : 流体の動粘性係数および密度

添字

exp, rec: 実験値, 推奨値

upst, dnst: 円柱群の上流および下流

2. 実験装置および方法

コンデンサの写真を図1に示す。いずれも直径 16 mm で、高さは左側が 29 mm, 右側が 20 mm である。コンデンサを模したアルミニウム製円柱は直径 $d=16$ mm, 高さ $H=20$ mm とした。円柱と下壁とのすき

Fig. 1 Condensers ($d=16$ mm)

Fig. 2 Configuration and symbols

まは実装機器では 1 mm 以下で、経験上すきまの影響は無視できるので、すきまは設けない。円柱頭部と上壁とのすきま $(B-H)$ の影響は開口比 $\beta=1-(H/B)(d/W')M$ で評価される。最終的には、流路の圧力損失は開口比 β の関数である支配因子 $\delta=(1-\beta)/\beta^2$ で表示される⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾ ので、本実験では $(B-H)$ は一定とする。円柱群の配列パターンと記号を図2に示す。テスト部は高さ $B=30$ mm, 幅 $W=250$ mm, 長さ $L=250$ mm である。流れと直角方向および流れ方向のピッチ P_1, P_2 および列数 N を詳細に変化させた。すきま g_1 は 1~12 mm, すなわちピッチ P_1 は 17~28 mm, 行数 $M=14\sim9$ である。流れ方向のピッチは $P_2=P_1, 2P_1, 3P_1$ とした。列数 N の最大値は $P_2=P_1$ では 10, $P_2=2P_1$ では 5, $P_2=3P_1$ では 4 である。なお、円柱間および円柱と側壁とのすきまが一定になるように必要に応じダクト幅を補正した。すきま $g_1=1, 2, 5$ mm に対し、厚さ $t=6, 8, 9.5$ mm の側板を側壁に接着した。ダクトの開口比 β の範囲は 0.373~0.616 である。

電子機器に多い流速 $U_m < 2$ m/s では測定誤差が大きい。本実験では、測定精度を上げるため装置の上限流速 $U_m=8\sim10$ m/s で実験した。予備実験結果によれば、 $U_m=1\sim10$ m/s の範囲でフローパターンに本質的な差異は認められなかった。圧力降下 $(p_{upst} - p_{dnst})$ は、厳密には U_m^2 に比例せず、 $U_m^{1.87\sim2.0}$ に比例する関係にある。したがって、圧力降下係数 $\zeta=(p_{upst} - p_{dnst})/0.5\rho U_m^2$ は、代表速度 U_m , 代表長さを円柱直径 d で定義されるレイノルズ数, $Re(=U_m d / \nu)$ が低くなるとやや増加する傾向がある。例えば、 $U_m=10$ m/s のどの値に比べ、 $U_m=1\sim2$ m/s のどの値は 10~20% ほど高いことを付記しておく。

まず、油膜法による基板上および円柱側面の表面流れの可視化を入口平均速度 $U_m=8\sim10$ m/s で行った。流量 Q の測定にはオリフィスを用いた。次に流路上壁の圧力分布の測定を同じ速度で行った。実験レイノルズ数範囲は $8.5\times 10^3\sim 1.07\times 10^4$ である。テスト部の上壁は流路のスパン方向に可動で、圧力分布測定用の $\phi 0.6$ の圧力タップが流れ方向に 10 mm 間隔に設けてある。圧力分布はスパン方向にほぼ一定であることを確認し、圧力タップが流路の中央断面になるよう上壁を設置した。この圧力タップを多管式傾斜マノメータに接続して流路の圧力分布を測定した。得られた圧力分布を解析し、高密度円柱群の圧力損失係数を求めた。

実験の不確かさ解析⁽¹²⁾を行った。多管式傾斜マノメータの測定精度はピッチ P_1 に依存するが 1~5% の

Fig. 3 Surface oil-flow patterns: $d=16$ mm, $H=20$ mm, $U_m=10$ m/s

範囲, 読取り誤差は1.5%以下である。入口部, 中間部の圧力降下係数, 出口部の圧力回復係数および圧力損失係数の不確かさは1.8%から5.2%の範囲である。

3. 流路の圧力損失

3・1 円柱群まわりの流れ 円柱表面と基板の油膜模様の一例を図3に示す。図3(a), (b)は流れと直角方向のピッチ $P_1=17, 19$ mm の場合で, 流れ方向のピッチ $P_2=P_1, 2P_1, 3P_1$ である。いずれの場合も第1列円柱での流れのせき止め効果が強く現れ, 円柱上面前縁はく離泡はV字模様を呈している。なお, ピッチ $P_1/d \geq 1.5$ の円柱群の円柱上面では前縁はく離泡は三日月模様を呈する⁽⁹⁾。基板上の各円柱まわりに馬てい形渦は形成されない。ピッチ $P_1=17$ mm の場合は円柱間のすきま流れは弱く, $P_1=19$ mm になるとすきま流れのこん跡がわずかに認められる。第2列円柱の上面には前縁はく離泡は形成されず, 後縁付近に流れのはく離模様が見られる。第3列以降の円柱上面は第2列と類似の模様を呈している。ピッチ $P_1/d = 19/16 < 1.2$ の場合は, 円柱列はフェンスの役目をして流れをせき止めている。実際, ピッチ $P_2=2P_1, 3P_1$ では円柱列間の流れはあたかもキャピティ流れの様相を呈している。図3(c), (d)はピッチ $P_1=21, 25$

mm, 流れ方向のピッチ $P_2=P_1, 2P_1, 3P_1$ である。並列円柱間の相互干渉は少なく, 直列円柱の流れ場を呈している。ピッチ $P_2=P_1$ の場合は円柱まわりに不完全な馬てい形渦が形成され, $P_2=2P_1, 3P_1$ では各円柱まわりに完全な馬てい形渦が形成される。特に, 第1列円柱の背後に大きく強い双子渦が形成され, 第2列以降の円柱まわりの油膜模様に差異はない。

以上の結果は次のようにまとめることができる。ピッチ $P_1/d \leq 1.2$ では流れと直角方向(並列)の円柱列はフェンスの役目をして, 各円柱列間の流れはキャピティ流れに近い。一方, ピッチ $P_1/d > 1.2$ では並列方向の円柱間の相互干渉は弱く, 直列円柱に類似の流れ場を呈する。特に, 流れ方向のピッチ $P_2=2P_1, 3P_1$ では各円柱背後に双子渦が形成される。以後フローパターンに関し, 前者をフェンスタイプ(Fence type), 後者を直列タイプ(In-line type)とする。

3・2 流路の圧力分布と損失係数 上壁の圧力分布の一例を図4(a)~(d)に示す。圧力分布に及ぼす円柱群のピッチ P_1, P_2 および列数 N の影響を示している。第1列円柱群の急縮小部で圧力係数は急減している。この圧力降下量は列数によらずほぼ一定である。また, ピッチ P_1 が小さいほど圧力降下は著しい。その下流の円柱群上では列数に比例し, 一定の割合で

圧力降下している。円柱群の最後尾の直後で C_p 分布は極小値をとるが、極小位置までの C_p 分布は列数によらず同一線上に重なっている。その後、円柱群の下流で急激な圧力回復している。次に、ピッチ P_2 の影響を見るため、流れ方向の円柱群の長さ $(N-1)P_2$ が一定の場合の圧力分布を図 5 (a), (b) に示した。ピッチ $P_1=19$ mm ではピッチ P_2 が大きいほど圧力降

(a) $P_1=P_2=17$ mm

(c) $P_1=P_2=21$ mm

(b) $P_1=P_2=19$ mm

(d) $P_1=P_2=25$ mm

Fig. 4 Pressure distributions on the upper wall

(a) $P_1=17$ mm, $\delta=2.80$, $P_2=P_1, 2P_1$

(b) $P_1=21$ mm, $\delta=2.10$, $P_2=P_1, 2P_1$

Fig. 5 Effect of pitch P_2 on the pressure distributions: $(N-1)P_2=\text{constant}$

Fig. 6 Division of pressure drop

Fig. 7 Comparison with arrays of low circular blocks: from Igarashi, et al.⁽⁹⁾, $H/d=0.45$

下は大きい。一方、ピッチ $P_1=21$ mm ではピッチ P_2 が大きいほど圧力降下は小さい。この両者の差異は流れの可視化で明らかにしたフローパターンが変化するピッチ P_1 の範囲、 $P_1/d \leq 1.2$ および $P_1/d > 1.2$ に対応している。

次に、円柱群前後の圧力損失係数 ζ は前報⁽⁸⁾⁽⁹⁾ と同様の手法により解析する。図 6 に示すように全圧力降下は圧力降下係数 C_{p1} , C_{p2} および圧力回復係数 C_{p3} の 3 領域に分割する。ただし、 C_{p3} は正の値とする。

$$\begin{aligned} \zeta &= (p_{upst} - p_{dnst}) / 0.5 \rho U_m^2 \\ &= [(p_{upst} - p_1) + (p_1 - p_2) \\ &\quad + (p_2 - p_{dnst})] / 0.5 \rho U_m^2 \quad \dots \dots \dots (1) \end{aligned}$$

$$\zeta = C_{p1} + C_{p2} - C_{p3} \quad \dots \dots \dots (2)$$

三つの圧力係数 C_{p1} , C_{p2} および C_{p3} は関係する諸因子の無次元パラメータで表示する。

Table 1 Symbols and values of β and δ

	P_1 (mm)	P_2		β	δ
		P_1	$2P_1$		
$d = 16$ mm $H = 20$ mm	17	○	●	0.373	4.52
	18	△	▲	0.407	3.57
	19	□	■	0.445	2.80
	21	▽	▼	0.492	2.10
	25	+	×	0.573	1.30
	28	◇	◆	0.616	1.01

$$C_{p1}, C_{p2}, C_{p3} = f(H/d, H/B, W/d, P_1/d, P_2/d, M, N) \quad \dots \dots \dots (3 \cdot a)$$

パラメータを少なくするため開口比 $\beta = 1 - (Hd/BW')$ M を導入する。さらに支配因子 $\delta = (1 - \beta)/\beta^2$ を用いる。ピッチ P_1/d は行数 M と関連するから、 P_1/d の項は削除できる。結局、式(3・a)は次式で表される。

$$C_{p1}, C_{p2}, C_{p3} = f(\delta, P_2/d, N) \quad \dots \dots \dots (3 \cdot b)$$

3・3 低層円柱ブロックとの比較 前報⁽⁹⁾ で求めた次の推奨式(4・a)～(4・c)で与えられる低層円柱ブロック群 ($d=40$ mm, $H=18$ mm, $H/d=0.45$) の圧力降下式に本実験条件を代入して求められた各圧力降下係数の総和である圧力損失係数 $\zeta_{rec eq.(5)}$ と円柱高さ $H/d=20/16=1.25$ の本実験結果 ζ_{exp} を比較する。ピッチ $P_1=P_2=17 \sim 28$ mm の場合に対する両者の関係を図 7 に示す。

$$C_{p1} = 2.86 \delta^{0.76} (P_2/d)^{-0.23} \quad \dots \dots \dots (4 \cdot a)$$

$$C_{p2} = 1.40 \delta^{0.86} [(N-1)(P_2/d-1)]^{0.47} \quad \dots \dots (4 \cdot b)$$

$$C_{p3} = 1.13 \delta^{0.47} [(N-1)/(P_2/d)^2]^{0.09} \quad \dots \dots \dots (4 \cdot c)$$

$$\zeta_{rec} = C_{p1} + C_{p2} - C_{p3} \quad \dots \dots \dots (5)$$

ピッチ $P_1=17$ mm の場合、本実験値は低層円柱の推奨値とよく一致している。 $P_1=18, 19$ mm の場合、推奨値は誤差 10～20% 以内で実験値よりやや低めの値を与える。一方、ピッチ $P_1=25, 28$ mm の場合、実験値は推奨値よりも低めの値を与え、上式は適用できない。

4. 圧力降下の定式化

高密度円柱群の入口部、中間部の圧力降下係数 C_{p1} , C_{p2} および出口部の圧力回復係数 C_{p3} の定式化を行う。

4・1 入口部の圧力降下 円柱群入口部の圧力降下係数 C_{p1} に及ぼす列数 N およびピッチ P_1, P_2 の影響を図 8(a), (b) に示す。ピッチ P_1 と開口比 β , 支配因子 $\delta = (1 - \beta)/\beta^2$ は一定の関係にある。表 1 には図 8 以降のピッチ P_1, P_2 に対する記号と β, δ の値が示してある。入口部では圧力降下係数 C_{p1} に及ぼす

Fig. 8 Pressure drop at inlet

Fig. 11 Correlations of C_{p3} vs δ : ($N > 2$)

Fig. 9 Correlations of C_{p1} vs δ

(a) C_{p3} vs P_2/d

(b) C_{p3} vs δ

Fig. 12 Pressure recovery at outlet: ($N = 2$)

(a) C_{p3} vs $(N-1)$

(b) C_{p3} vs P_2/d

Fig. 10 Pressure recovery at outlet: ($N > 2$)

Fig. 13 Pressure drop between inlet and outlet: C_{p2} vs $(N-1)$

Fig. 14 Pressure drop between inlet and outlet

列数 N の影響は無視できる程度である。ピッチ P_2/d が増加すると C_{p1} は減少する傾向があり、ほぼ $C_{p1} \propto (P_2/d)^{-0.09}$ で近似できる。次に支配因子 δ の影響を調べる。 $C_{p1}(P_2/d)^{0.09}$ と δ の関係を図9に示す。流れと直角方向のピッチ $P_1/d=1.3$ を境に圧力降下係数 C_{p1} の傾向が変化している。両範囲に対して、それぞれ次式が得られる。

$$C_{p1} = 1.87\delta^{1.2}(P_2/d)^{-0.09} \quad (P_1/d \leq 1.2) \cdots (6 \cdot a)$$

$$C_{p1} = 2.26\delta^{0.9}(P_2/d)^{-0.09} \quad (P_1/d > 1.2) \cdots (6 \cdot b)$$

このピッチ $P_1/d=1.2$ 前後における傾向の変化は、流れの可視化より示された $P_1/d \leq 1.2$ におけるフェンスタ型流れ(Fence type flow), $P_1/d > 1.2$ における直列タイプ流れ(In-line type flow)と対応している。これは、一様流中の並列3本円柱まわりの流れの干渉⁽¹³⁾におけるストローハル数やすきま流れがピッチ $P_1/d=1.2 \sim 1.3$ を境に変化すると同様と考えられる。

4.2 出口部の圧力回復 円柱群出口部の圧力回復係数 C_{p3} と列数 N および流れ方向ピッチ P_2/d の関係を支配因子 δ をパラメータとして図10(a), (b)に示す。出口部では列数 N の影響は無視できず, $N=2$ のデータは $N>2$ のデータと傾向が異なる。 $N>2$ の場合はほぼ $C_{p3} \propto (N-1)^{1/8}$ の関係がある。 $N=2$ の場合は後述する。ピッチ P_2 の影響は $C_{p3}/(N-1)^{1/8} \propto (P_2/d)^{-1/6}$ で近似できる。次に $C_{p3}(P_2/d)^{1/6}/(N-1)^{1/8}$ と支配因子 δ の関係を図11に示す。入口部の圧力降下係数 C_{p1} と同様、ピッチ $P_1/d=1.2$ 前後で δ の指数が異なる。それぞれの場合に対して次の関係が得られる。

$$C_{p3}(P_2/d)^{1/6}/(N-1)^{1/8} \propto \delta \quad (N>2, P_1/d \leq 1.2) \cdots (7 \cdot a)$$

Fig. 15 Pressure drop between inlet and outlet : $P_1/d = 1.06$

$$C_{p3}(P_2/d)^{1/6}/(N-1)^{1/8} \propto \delta^{0.5} \quad (N>2, P_1/d > 1.2) \cdots (7 \cdot b)$$

さらに $N>2, P_1/d \leq 1.2$ の全データに対し $C_{p3}(P_2/d)^{1/6}/(N-1)^{1/8} \delta$ を定数として求め、その平均値を求めるとほぼ0.67となる。 $N>2, P_1/d > 1.2$ の全データに対しても同様の方法により定数1.07が得られる。結局、 $N>2$ の出口部の圧力回復係数は次式で与えられる。

$$C_{p3} = 0.67(N-1)^{1/8}(P_2/d)^{-1/6} \delta \quad (N>2, P_1/d \leq 1.2) \cdots (8 \cdot a)$$

$$C_{p3} = 1.07(N-1)^{1/8}(P_2/d)^{-1/6} \delta^{0.5} \quad (N>2, P_1/d > 1.2) \cdots (8 \cdot b)$$

Fig. 16 Correlations of recommended values vs experimental values

Fig. 17 Pressure loss coefficient ζ

$N=2$ の場合の圧力回復係数 C_{p3} とピッチ P_2/d および支配因子 δ の影響を調べる。図 12(a) に示すように $C_{p3} \propto (P_2/d)^{-1/5}$ の関係が得られる。さらに $C_{p3}(P_2/d)^{1/5}$ と δ の関係を求めると、図 12(b) に示すように $N>2$ の場合と同じように P_2/d の範囲により二分される。結局、 $N=2$ の圧力回復係数 C_{p3} は次式で与えられる。

$$C_{p3} = 0.818(P_2/d)^{-1/5} \delta \quad (N=2, P_1/d \leq 1.2) \quad \dots\dots\dots (9 \cdot a)$$

$$C_{p3} = 1.20(P_2/d)^{-1/5} \delta^{0.5} \quad (N=2, P_1/d > 1.2) \quad \dots\dots\dots (9 \cdot b)$$

4.3 中間部の圧力降下 円柱群中間部の圧力降下係数 C_{p2} と列数 N の関係を図 13 に示す。絶対値が小さく誤差が多いが、ほぼ $C_{p2} \propto (N-1)$ の関係がある。次にピッチ P_2/d の影響を調べる。図 14(a) に示すようにピッチ P_1/d の範囲により P_2/d の影響が異なる。

$$C_{p2}/(N-1) \propto (P_2/d)^{1.7} \quad (P_1/d = 17/16 = 1.06) \quad \dots\dots\dots (10 \cdot a)$$

$$C_{p2}/(N-1) \propto (P_2/d)^{1.3} \quad (1.06 < P_1/d \leq 1.2) \quad \dots\dots\dots (10 \cdot b)$$

$$C_{p2}/(N-1) \propto (P_2/d)^{0.67} \quad (P_1/d > 1.2) \quad \dots\dots\dots (10 \cdot c)$$

ピッチ $P_1/d > 1.2$ の場合、支配因子 δ の影響は図 14(b) に示すように次式で与えられる。

$$C_{p2} = 0.225 \delta^{1.2} (N-1) (P_2/d)^{0.67} \quad (P_1/d > 1.2) \quad \dots\dots\dots (11 \cdot a)$$

上式の比例定数は $C_{p2}/[\delta^{1.2}(N-1)(P_2/d)^{0.67}]$ の全データに対する平均値 0.225 である。次にピッチ $1.06 < P_1/d \leq 1.2$ の場合、支配因子 δ の影響は図 14(c) に示すように $C_{p2}/[(N-1)(P_2/d)^{1.3}] \propto \delta^{-0.7}$ の関係があり、次式が得られる。

$$C_{p2} = 1.27 \delta^{-0.7} (N-1) (P_2/d)^{1.3} \quad (1.06 < P_1/d \leq 1.2) \quad \dots\dots\dots (11 \cdot b)$$

残りの $P_1/d = 1.06$ の場合は支配因子 δ の影響を調べることはできない。そこで、高さ $H=15, 10$ mm の円柱を新たに製作し、圧力分布を測定した。得られた結果を先述の結果と一緒に図 15(a), (b) に示す。図 15(a) は前述の式(10・a)の関係を満たしている。次に支配因子 δ の影響は図 15(b) に示すように、次式で与えられる。

$$C_{p2} = 0.05 \delta^{1.3} (N-1) (P_2/d)^{1.7} \quad (P_1/d = 1.06) \quad \dots\dots\dots (11 \cdot c)$$

上式の比例定数は前述と同様に求めた。

4.4 圧力損失の推奨式 ブロック群各部の圧力降下係数および圧力回復係数は式(6・a), (6・b), (8・a), (8・b), (9・a), (9・b) および式(11・a)~(11・c)で与えられた。これらの式から得られる各部の推奨値と実験値との比較を図 16(a)~(c) に示す。両者は $\pm 10\%$ 以内でよく一致している。また、これらの総和であるブロック群の損失係数の推奨値 ζ_{rec} は式(5)に上述の各式を代入して求められる。図 17 に示すよ

うに圧力損失係数 ζ_{rec} の推奨値は実験値と $\pm 10\%$ 以内で一致している。

5. 結 論

ダクト高さ $B=30$ mm, 幅 $W=250$ mm の平行平板流路の基板上にコンデンサを模擬した直径 $d=16$ mm, 高さ $H=20$ mm の円柱を流れと直角方向および流れ方向のピッチ P_1, P_2 , 列数 N で高密度に基盤目配列した。代表速度 U_m , 代表長さを円柱直径 d としたレイノルズ数 Re の範囲は $8.53 \times 10^3 \sim 1.07 \times 10^4$ である。この円柱群の圧力損失を調べ、次の結論を得た。

(1) ピッチ $P_1/d \leq 1.2$ では流れと直角方向の円柱列はフェンスの役目をし、各円柱列間の流れはキャビティ流れに近い。一方、ピッチ $P_1/d > 1.2$ では並列方向の円柱間の相互干渉は弱く、直列円柱の流れ場を呈する。前者をフェンスタイプ(Fence type), 後者を直列タイプ(In-line type)とする。特に、ピッチ $P_1/d > 1.2$, $P_2=2P_1, 3P_1$ では各円柱背後に双子渦が形成される。

(2) 円柱群の全圧力損失 ζ はフローパターンに対応した円柱群入口部, 中間部の圧力降下係数 C_{p1} , C_{p2} , および出口部の圧力回復係数 C_{p3} の総和で表示できる。

$$\zeta = C_{p1} + C_{p2} - C_{p3}$$

(3) 入口部の圧力降下係数は、次式で与えられる。

$$C_{p1} = 1.87 \delta^{1.2} (P_2/d)^{-0.09} \quad (P_1/d \leq 1.2),$$

$$C_{p1} = 2.26 \delta^{0.9} (P_2/d)^{-0.09} \quad (P_1/d > 1.2)$$

出口部の圧力回復係数は、次式で与えられる。

$$C_{p3} = 0.67 (N-1)^{1/8} (P_2/d)^{-1/6} \delta$$

$$(N > 2, P_1/d \leq 1.2),$$

$$C_{p3} = 1.07 (N-1)^{1/8} (P_2/d)^{-1/6} \delta^{0.5}$$

$$(N > 2, P_1/d > 1.2)$$

$$C_{p3} = 0.818 (P_2/d)^{-1/5} \delta \quad (N=2, P_1/d \leq 1.2)$$

$$C_{p3} = 1.20 (P_2/d)^{-1/5} \delta^{0.5} \quad (N=2, P_1/d > 1.2)$$

中間部の圧力降下係数は、次式で与えられる。

$$C_{p2} = 0.05 \delta^{1.3} (N-1) (P_2/d)^{1.7} \quad (P_1/d = 1.06)$$

$$C_{p2} = 1.27 \delta^{-0.7} (N-1) (P_2/d)^{1.3}$$

$$(1.06 < P_1/d \leq 1.2)$$

$$C_{p2} = 0.225 \delta^{0.67} (N-1) (P_2/d)^{0.67} \quad (P_1/d > 1.2)$$

上記各推奨式は実験値と誤差 $\pm 10\%$ 以内で一致する。

(4) 円柱群の全圧力損失 ζ は上記推奨式の総和で与えられ、実験値と誤差 $\pm 10\%$ 以内で一致する。

おわりに、本研究のきっかけを与えてくれた(株)日立製作所機械研究所の新隆之氏に謝意を表す。

文 献

- (1) 日本機械学会編, 電子機器冷却設計ハンドブック, 3. 流動抵抗・伝熱データ 3.2 強制対流 (1995), 3.2-1~3.2-22.
- (2) Sparrow, E. M., Niethammer, J. E. and Chaboki, A., Heat Transfer and Pressure Drop Characteristics of Arrays of Rectangular Modules Encountered in Electronics Equipment, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 25-7 (1982), 961-973.
- (3) Ashiwake, N., Nakayama, W., Daikoku, T. and Kobayashi, F., Forced Convective Heat Transfer from LSI Packages in an Air-Cooled Wiring Card Array, *ASME-HTD*, 28 (1983), 35-42.
- (4) 柳田武彦・中山恒・根本武夫, 長方形管路の壁面に配列された発熱体まわりの流動と熱伝達, 機論, 50-453, B (1984), 1294-1301.
- (5) Mohat, R. T., Arvizu, D. E. and Ortega, A., Cooling Electronic Components: Forced Convection Experiments with an Air-Cooled Array, *Proc. ASME/AIChE Annual Heat Transf. Conf., Heat Transf. Equip., HTD* 48 (1985), 17-27.
- (6) 松島均・柳田武彦・中山恒, 基板上配列されたパッケージ列の圧力損失, 機論, 59-560 (1993), 1244-1251.
- (7) 五十嵐保・高崎博美, 平行平板流路に置かれた角柱列まわりの流れと熱伝達, 機論, 56-529, B (1993), 2021-2027.
- (8) 五十嵐保・福岡健人, 基板上に基盤目配列されたブロック群の圧力損失, 機論, 66-646, B (2000), 1535-1543.
- (9) 五十嵐保・中村元・福岡健人, 基板上に基盤目配列された円柱ブロック群の圧力損失と熱伝達, 機論, 66-648, B (2000), 2157-2165.
- (10) 五十嵐保・稲垣進・西田幸造, 直円管内の渦発生体の抵抗係数, 機論, 58-550, B (1992), 1655-1660.
- (11) 五十嵐保・稲垣進, 管路要素の抵抗係数, 機論, 59-561, B (1993), 1480-1485.
- (12) Kline, S. J., The Purposes of Uncertainty Analysis, *Trans. ASME, J. Fluids Eng.*, 107 (1985), 153-160.
- (13) 熊田雅称・桧和田宗彦・伊藤真純・馬淵幾夫, 流れに直交する並列3本管まわりの流れの干渉, 機論, 50-455, B (1984), 1699-1707.