各種平織り網を通過する流れと抵抗特性の比較*

大坂 英雄^{*1}, 宇都宮 浩司^{*2}
枝村 博^{*3}, 山田 英巳^{*1}Fluid Flow through Various Plain Square Screens and Comparison
of the Resistance CoefficientHideo OSAKA, Koji UTSUNOMIYA,
Hiroshi EDAMURA and Hidemi YAMADA

The fluid flow through woven screens in a circular pipe was measured to evaluate the resistance coefficient of those screens. Three kinds of screens, stainless steel, brass and polyethylene, made of round wire forming a square mesh, were used in this study. The Reynolds number based on the pipe diameter was kept constant at 9×10^4 . Results show that after the flow passes through the three kinds of screens, the velocity profiles show three different patterns due to the coefficient of porosity. In particular, the velocity profile for the polyethylene screen is different from those for the stainless and the brass screens. The resistance coefficient K vs the wire diameter Reynolds number can be classified into three categories according to the patterns of the velocity profile. The value of K for the polyethylene screen is larger than those of both the stainless and brass screens because the streamwise gradient of the streamline through the polyethylene screen shows the maximum value. The use of average velocity U_e/β and pore spacing l as a characteristic velocity and scale enables a more general correlation between the resistance coefficient and the Reynolds number.

Key Words: Fluid Mechanics, Plain Square Screen, Resistance Coefficient, Coefficient of Porosity, Velocity Profile

1. 結 言

各種流体機械装置に用いられる整流装置のうちスクリーン(主として金網)は、その簡便さ、安価であること、他の装置との組合せの容易さ等のため多用されている。スクリーンを使用する目的は、流動抵抗を利用して速度分布の均一化や乱れの減衰をはかることであり、これを用いる際抵抗が小さいほうが望まれる。機械学会編「管路・ダクトの流体抵抗」の著書⁽¹⁾中にもJIS規格と合せてスクリーンの使用時の適用範囲や諸注意が記載されている。しかしながら、実際の設計にあたりこの規格のみでは、不備な点もある。そのため著者らはステンレススクリーンの抵抗特性とスクリーン通過時の流れ特性を調査報告⁽²⁾した。また石塚ら⁽³⁾は低レイノルズ数におけるステンレススクリーンの抵抗特性を測定し、著者らの結果⁽²⁾と合せて広い範囲のレイノルズ数における抵抗係数の整理式を与えている⁽⁴⁾。

最近、ステンレススクリーンに加えて黄銅製、ポリエチレン製のスクリーンが使用される場合が多い。こ

れは、簡便さ、目的用途の多様化(例えば耐食性、蒸留・吸収用)、極細メッシュスクリーンの製作が可能となったこと、低価格等による理由のためである。しかし、これらの材質のスクリーンの抵抗係数の値は規格がない。そのため、従来のステンレススクリーンの抵抗係数の結果を利用してきたようである。ところがスクリーンの剛性、線材の強度、製作精度の差異が両者の間にはあり、ステンレススクリーンの結果をそのまま使用することはできない。したがって、ステンレス以外の材質のスクリーンについて系統的に抵抗係数を調べることは意義がある。これに関連して、Mehta⁽⁵⁾は開口比が0.556~0.614の7種類(ステンレス、黄銅、プラスチック製)のスクリーンについて、スクリーン通過後の速度分布の不均一性(超過や欠損)とスクリーンの材質との関係を調べている。しかし、抵抗係数の評価はなされていない。この報告以外、ステンレススクリーン以外のものについて調査した例は見あたらず、広い範囲の開口比について多種類のスクリーンの抵抗係数を評価することは急務である。

本研究に関連したスクリーンによる流れの均一化や抵抗係数の評価についてはTaylorら⁽⁶⁾、Schubaureら⁽⁷⁾、Collar⁽⁸⁾、Simmons-Cowdrey⁽⁹⁾、Macphail⁽¹⁰⁾によるものがあるが、いずれもステンレススクリーンを

* 原稿受付 平成5年2月23日。

^{*1} 正員, 山口大学工学部 (〒755 宇都宮市常盤台)。^{*2} 正員, 広島工業大学工学部 (〒731-51 広島市佐伯区三宅)。^{*3} 正員, NTT(株) (〒180 武蔵野市中町)。

取扱っている。これらの結果を利用して、他種類のスクリーンの特性を評価する際、基準となる物理量、例えばレイノルズ数の尺度、スクリーンの開口比の定義、線径等は十分考え方の参考となる。

以上の点をふまえ、本報ではステンレス、黄銅およびポリエチレン製平織りスクリーンの抵抗係数について、開口比、線径の広い範囲にわたり系統的に実験を行った結果から明らかにする。加えて、各種スクリーンを通過する流れの速度分布の変化と流線形状の解析から、スクリーンの線材質の差による抵抗係数の値や傾向の差異の説明を試みる。

2. 実験装置および方法

2・1 実験装置 実験装置の概略と座標系を図1に示す。管路は内径 $D=80$ mm、全長 7130 mm の透明アクリル樹脂製である。管入口はく離しないよう長円ノズル形状で、上流の入口タンク（開口比 $\beta=0.64$ のスクリーン2枚とエアフィルタ1枚を装着）内に突き出している。管下流端は出口タンク（ $\beta=0.64$ のスクリーン2枚とハニカムを装着）に接続している。供試スクリーンは管入口部から 540 mm 下流の位置で管軸に垂直な面内に取付けた。この位置で流れのポテンシャルコア領域は管断面積の約 70%（境界層厚さは 12 mm）である。

管壁にはスクリーンの圧力損失測定用と壁面圧力測定用の孔（ $\phi 0.5$ mm）およびピトー管挿入用孔（ $\phi 2.1$

図1 実験装置および座標系

図2 スクリーン形状図

mm)が測定断面に応じて設置されている。なお、測定をしない圧力孔は常に栓をして空気漏れを防止した。座標は供試スクリーンより軸方向に x 、管壁から半径方向に y 、管半径を r とした。

2・2 実験条件および方法 スクリーンの抵抗係数評価のため、圧力損失 Δp はスクリーンの上下流それぞれ 1D の位置⁽¹⁾で測定した値の差（管路の周上 3 箇所の圧力孔からの値の平均をとる）をゲッチングマンノメータで読取った。半径方向速度分布は扁平な開口部（高さ 0.16 mm、幅 0.9 mm）をもつピトー管を管軸に垂直に移動させ、その位置と同一の流れ方向位置の壁面圧力との差から求めた。スクリーン挿入時のスクリーンの近傍上流位置の半径方向速度分布は円筒形ピトー管（ $\phi 2.2$ mm、ピトー管軸端から 5 mm 位置に $\phi 0.5$ mm の全圧孔を有する）を用いた。スクリーン上下流の流線形状を評価するために、 $x/D=-1, -0.5$,

表1 供試スクリーンの幾何学的形状値

(a) ステンレス

Wire dia. d(mm)	Mesh m	Pitch Pi(mm)	Pore Spacing l(mm)	Porosity β	Void fraction ϵ	Surface area to unit volume ratio $\sigma(1/\text{mm})$	Symbol
0.10	50	0.51	0.41	0.64	0.84	5.69	□
0.10	70	0.36	0.26	0.52	0.77	7.78	■
0.10	100	0.25	0.15	0.36	0.66	10.9	■
0.30	16	1.58	1.28	0.66	0.85	1.84	△
0.30	24	1.10	0.80	0.53	0.78	2.57	▲
0.31	32	0.80	0.49	0.37	0.67	3.47	▲
0.50	8	3.15	2.65	0.71	0.87	0.93	⊙
0.51	10	2.52	2.01	0.64	0.84	1.15	⊙
0.51	12	2.10	1.59	0.57	0.80	1.36	⊙
0.50	14	1.81	1.31	0.53	0.78	1.56	⊙
0.50	16	1.59	1.09	0.47	0.74	1.77	⊙
0.50	18	1.42	0.92	0.42	0.71	1.96	⊙
0.51	20	1.25	0.74	0.35	0.65	2.20	●
0.70	7	3.65	2.95	0.65	0.85	0.80	⊗
0.72	10	2.60	1.88	0.52	0.77	1.09	⊗
0.72	14	1.83	1.11	0.37	0.67	1.15	⊗
1.03	5	5.04	4.01	0.63	0.84	0.57	◇
1.03	10	2.53	1.50	0.35	0.65	1.09	◆

(b) 黄銅

Wire dia. d(mm)	Mesh m	Pitch Pi(mm)	Pore Spacing l(mm)	Porosity β	Void fraction ϵ	Surface area to unit volume ratio $\sigma(1/\text{mm})$	Symbol
0.10	50	0.51	0.41	0.64	0.84	5.69	□
0.10	80	0.32	0.22	0.46	0.74	8.78	■
0.10	100	0.25	0.25	0.36	0.66	11.0	■
0.32	18	1.42	1.10	0.60	0.82	2.20	△
0.32	24	1.16	0.84	0.49	0.78	2.24	▲
0.46	14	1.18	1.35	0.56	0.79	1.57	⊙
0.46	16	1.59	1.13	0.51	0.76	1.77	⊙
0.46	20	1.27	0.81	0.41	0.70	2.18	●
0.60	10	2.53	1.94	0.59	0.81	1.13	◇
0.71	8	3.17	2.46	0.60	0.82	0.90	◇
0.81	5	5.08	4.27	0.71	0.87	0.58	◇

(c) ポリエチレン

Wire dia. d(mm)	Mesh m	Pitch Pi(mm)	Pore Spacing l(mm)	Porosity β	Void fraction ϵ	Surface area to unit volume ratio $\sigma(1/\text{mm})$	Symbol
0.09	144×100	0.18×0.25	0.09×0.16	0.34	0.64	13.25	■
0.09	130×100	0.19×0.25	0.10×0.16	0.37	0.66	12.50	■
0.12	83×64	0.31×0.41	0.19×0.28	0.42	0.71	8.05	□
0.17	50×47	0.51×0.54	0.34×0.37	0.45	0.73	5.32	◇
0.24	34×32	0.75×0.79	0.51×0.55	0.47	0.74	3.63	◇
0.30	25×23	1.02×1.10	0.72×0.80	0.52	0.77	2.67	▲
0.35	20	1.27	0.93	0.53	0.78	2.23	▲
0.35	16	1.59	1.24	0.61	0.83	1.81	△
0.55	12	2.12	1.57	0.55	0.79	1.34	⊙
0.55	7	3.63	3.08	0.72	0.88	0.81	⊙
0.77	5	5.08	4.31	0.72	0.88	0.58	⊗

-0.31, 0.25, 0.5 および 1.0 の 6 箇所の位置で速度分布を測定した。

レイノルズ数の設定方法は既報⁽²⁾と同一である。実験の際の管径レイノルズ数 $Re = U_e D / \nu$ (U_e は断面平均流速, ν は空気の動粘度) は, 抵抗係数測定の場合, 9×10^4 一定で, 一方流線の評価の際には 6×10^4 一定で行った。なお, $Re = 9 \times 10^4$ の場合, 線径レイノルズ数 $R_d = U_e d / \nu$ (d はスクリーンの線径) を 40~1400 の範囲で種々に変化させた。

2・3 供試スクリーン 平織りスクリーンの形状を図 2 に示す。線の曲線部を直線とみなした検査体積を考え, 以下の各式に示すような形状値を定義した⁽²⁾。

$$\text{開口比: } \beta = (l/Pi)^2 \dots\dots\dots (1)$$

$$\text{空孔率: } \varepsilon = 1 - \pi d \sqrt{Pi^2 + d^2} / 4Pi^2 \dots\dots\dots (2)$$

$$\text{比表面積: } \sigma = \pi(2\sqrt{Pi^2 + d^2} - d) / 2Pi^2 \dots\dots\dots (3)$$

ここで, Pi はスクリーンのピッチで $Pi = l + d$ (l はスクリーンの目開き) である。

本実験で使用した 3 種類の供試スクリーンの幾何学的形状値を表 1 に示す。ステンレス (SUS 27 製) スクリーンは既報⁽²⁾と同様 18 種類ですべて正方形メッシュである。黄銅スクリーンも 11 種類ですべて正方形メッシュである。ポリエチレンスクリーンは 11 種類であるが, 比較的目的の細かいスクリーンはく形である。なおく形メッシュの場合の目開きは, 流体平均深さ⁽¹²⁾の定義で置き換えて算出した。なお, 以下の図中の結果表示は表 1 右端欄の記号を用いていることを注意しておく。

3. 結果を表示する定義式

3・1 抵抗係数の表示式 本報において, スクリーンの抵抗係数を次の 2 種類の定義式でまとめた。

$$K = 2\Delta p / \rho U_e^2 \dots\dots\dots (4)$$

$$K' = 2\Delta p / \rho (U_e/\beta)^2 \dots\dots\dots (5)$$

ここで, K は抵抗係数, K' は修正抵抗係数, Δp はスクリーンの圧力損失, ρ は空気密度である。修正抵抗係数は Taylor ら⁽⁶⁾に従い, 線間の縮流により加速された U_e/β のほうが近寄り速度として妥当であるという考え方に基づいている。

抵抗係数と開口比との関係は, Wieghardt⁽¹²⁾の考え方に従い, かつ著者らの既報⁽²⁾の結果を参考にして次式で表示する。

$$K = C(1 - \beta)/\beta^2 \dots\dots\dots (6)$$

ここで, C は線の抗力係数で既報⁽²⁾では $C = 0.85$ の値

を得ている。スクリーンを充てん層や多孔質物体の一種とみなして開口比に代わる定義式を用いて評価した抵抗を表示する式に Armour-Cannon の式⁽¹³⁾がある。これは化学工学の分野で知られ, K の代わりに網摩擦係数 f を次式で定義するものである。

$$f = \Delta p / \{ \rho (U_e/\beta)^2 (2d/l) \} \dots\dots\dots (7)$$

上式を用いた結果のまとめは, 既報⁽²⁾においてかなりうまく表示できた。

3・2 レイノルズ数 抵抗係数の表示に際し, 以下に示すような種々のレイノルズ数を定義して結果をまとめることにする。

$$R_d = U_e d / \nu \dots\dots\dots (8)$$

$$R_d' = (U_e/\beta) d / \nu \dots\dots\dots (9)$$

$$R_l' = (U_e/\beta) l / \nu \dots\dots\dots (10)$$

$$NRe = (U_e/\sigma l) (1/\sigma) / \nu \dots\dots\dots (11)$$

式(8)は線径レイノルズ数である。式(9)は修正線径レイノルズ数で, 代表速度として線間の流速 U_e/β を用いている。式(10)は修正目開きレイノルズ数で, スクリーン通過後の速度分布不均一性が目開き l により影響されることを考慮するものである。式(11)は網レイノルズ数で, スクリーン形状を三次元的にとらえ, 代表長さには比表面積の逆数 $1/\sigma$, 代表速度に $U_e/\sigma l$ をとったものである。なお, 式(11)は平織り金網の場合の表示式である。

4. 結果および考察

4・1 スクリーン通過後の流れ特性 既報⁽²⁾における結果を参考にして, スクリーン通過後の速度分布に及ぼす開口比 β の影響を調べる。図 3 (a)~(c) はそれぞれのスクリーンについて $Re = 9 \times 10^4$ で $x/D = 0.25$ の位置の速度分布を, 代表として線径 d がおよそ 0.1 mm と 0.5 mm の場合について比較したものである。ステンレスの結果を見ると, $d = 0.5$ mm の場合すべての開口比 β で速度分布は不均一性を示すが, 分布傾向は β により既報⁽²⁾の分類が可能である。すなわち, (1) $\beta \leq 0.42$, (2) $0.47 \leq \beta \leq 0.53$, (3) $\beta \geq 0.57$ と 3 分類できる。既報を参照すると, その特徴は(1)の場合, $u/U_e = 1.0$ を平均とした分布の不均一を示し, 壁近くで加速領域が存在する。(2)の場合, $u/U_e = 1.0$ を平均とした分布の不均一があるが, 壁近くで加速は生じない。(3)の場合, u/U_e の値が 1 以上の値を平均とした分布の不均一が見られ, 壁近くでは減速した境界層的な領域が生じる。 $d = 0.1$ mm の場合 $d = 0.5$ mm の場合と同様の分類が可能であるが, $\beta = 0.36$ の結果は壁近くの加速の程度が大きく, $\beta = 0.64$ の結果は速度がほぼ一定となる領域が広い。この速度が一定となる領

域が広がるのは、目開き l が実質上狭く、 $x/D = 0.25$ の位置を x/d の値に換算すると、 $d = 0.1 \text{ mm}$ の場合は $d = 0.5 \text{ mm}$ と比べ 5 倍の下流位置に相当する。また速度分布に不均一性が見られるのは目開き l が小さいことによる空間的不均一性⁽¹⁹⁾が依然として

(a) ステンレス

(b) 黄銅

(c) ポリエチレン

図 3 半径方向速度分布に及ぼす開口比の影響

残るため、むしろ l/d や l/D の効果と考えられる。次に黄銅の結果を見ると、 $d = 0.46 \text{ mm}$ の場合、すべての β で壁近くに減速した境界層領域が見られる。たださらに β が小さい場合、増速の傾向が生じると思われる。また、速度がほぼ一定となる領域の u/U_e の平均値は $\beta = 0.41$ のとき 1、他の β では 1 を超える。 $d = 0.1 \text{ mm}$ の場合、 $\beta = 0.36$ と 0.46 では壁近くで加速が見られ、 $\beta = 0.64$ では壁近くで減速の傾向を示す。この黄銅の結果は前述のステンレスの場合の分類におおよそ当てはまる。ポリエチレンの結果は比較しうるデータがそれぞれの線径の場合 2 種類しかない。 $d = 0.55 \text{ mm}$ の場合、 $\beta = 0.55$ と $\beta = 0.72$ では壁近くで減速した境界層領域が見られる。ただ、ステンレスの結果と比べ、不均一性が著しい。 $d = 0.09 \text{ mm}$ の場合、 $\beta = 0.34$ と 0.37 では壁面近くで著しい増速傾向を示す一方、管中心領域で最小の値をとる速度分布となる。ポリエチレンの結果はステンレスの結果と比べ、分布傾向は類似しているが分布の変化が著しく現れている。これは線材質の差によるスクリーンの平面性(流れに垂直な面内のたわみ)や織りむら、線の交差部の変形および形メッシュ形状による影響である。以上の 3 種類のスクリーンの結果を総合すると、工業上取扱う場合上述したように既報⁽²⁾で示したステンレススクリーンの β による分類 [上述の (1) $\beta \leq 0.42$, (2) $0.47 \leq \beta \leq 0.53$, (3) $\beta \geq 0.57$] が第 1 近似として成り立つものと考えられる。

図 4 はスクリーン通過後の速度分布に及ぼす線径 d の影響を調べたもので、3 種類のスクリーンについて $\beta \approx 0.5$ の場合の結果である。ステンレスの結果を見る

図 4 半径方向速度分布に及ぼす線径の影響

と、 $d=0.1\text{ mm}$ では壁近傍で加速を示し、 $u/U_e < 1$ を平均とする不均一な分布である。 $d=0.3, 0.5\text{ mm}$ では壁近傍で境界層の分布をとり、 $u/U_e=1$ を平均とするやや不均一な分布である。黄銅の結果を見ると、 $d=0.1\text{ mm}$ では壁近傍でステンレスと比べ小さいが、加速を示し、 $u/U_e=1$ を平均とする不均一な分布である。 $d=0.32, 0.46\text{ mm}$ では壁近傍で境界層の分布をとるが、 $u/U_e > 1$ を平均とする分布となる。ポリエチレンの結果を見ると、 $d=0.3, 0.35, 0.55\text{ mm}$ では壁近傍で境界層の減速傾向を示し、 $u/U_e=1$ に近い平均値をとる不均一分布である。以上の結果をまとめると、線径が小さいと壁近くで加速を示す速度分布をとるが、線径が大きくなるにつれ境界層の分布へ移行し、 $u/U_e > 1$ の平均値をとる分布となる。

4.2 各種スクリーンの抵抗係数 3種類のスクリーンの抵抗係数 K と線径レイノルズ数 R_d との関係を図5に示す。ステンレスの場合、既報⁽²⁾で示したように K は R_d の増加に対し減少していき、浜口ら⁽¹⁵⁾と同じ実験式の形

$$K = A_1/R_d + B_1 \quad (A_1, B_1 \text{ は定数}) \quad (12)$$

で表せる。結果はスクリーン通過後の速度分布と同様、 β でおおまかに3分類できるが、 β が大きいほど曲線[実験式(12)]からのずれが大きい。図5中の曲線①は $\beta=0.36$ ($A_1=125.5, B_1=2.38$)、曲線②は $\beta=0.52$ ($A_1=46.45, B_1=1.00$)、曲線③は $\beta=0.64$ ($A_1=28.22, B_1=0.56$)、の場合である。このようにスクリーンの抵抗係数はスクリーン通過後の速度分布と密接に関連があることは興味深い。黄銅の結果について見ると、ステンレスの場合の分類と同じ曲線①～③により、 K と R_d の関係をまとめることができるようである。すなわち、 β が等しいならば黄銅の場合の K と R_d との関係はステンレスの場合の分類式で妥当に表現できる。ポリエチレンの結果(図5中にステンレスの場合の実験式を示す)を比較すると、 β による K - R_d の分類はステンレスの場合と若干異なっており、 K の値が大きい値を示す。この傾向は β の小さい値のスクリーンで特に顕著で、スクリーンのたわみ、材質差による線の交差部の塑性変形およびく形メッシュ形状による影響である。以上3種類のスクリーンの結果から、 K と R_d との関係を β をパラメータとして本実験の範囲($\beta=0.35\sim 0.70$)で実験式にまとめると、下式が得られた。

$$K = A/R_d + B \quad (13)$$

$$(A=7.96\beta^{-2.72}, B=0.19\beta^{-2.48})$$

そこで他研究者の結果を上式(13)を用いて比較したものを図6に示す。図6中、曲線①～③は代表としてそれぞれ $\beta=0.36, 0.52$ 、および 0.64 の結果を示した

ものである。他研究者の結果はばらつきがあるものの明らかに β をパラメータとして式(13)で表示できるようなのである。ただし、Taylor-Batchelor⁽¹⁴⁾の $\beta=0.585$ の結果のみずれが大きい。この理由は原著論文を参照して検討したが不明である。

次に、スクリーン通過後の速度分布の不均一性は目開きにより強く影響されることがわかったので、 K と目開きレイノルズ数 R_t でまとめてみたが、図5と比べややまとまりが改善されるにとどまった。さらに、Taylorら⁽⁶⁾の考え方に沿い代表速度として U_e/β を用いて、修正抵抗係数 K' と修正目開きレイノルズ数

図5 抵抗係数に及ぼす線径レイノルズ数の影響 (記号は表1に示す)

図6 K - R_d の関係 (他研究者の結果のまとめ)

$R'_i = (U_e/\beta)l/\nu$ との関係でまとめてみた。図 7 は 3 種のスクリーンの K' と R'_i との関係を示す。図 7 中の実線は浜口ら⁽¹⁵⁾による積層金網の実験式で、 $K' = 33.6/R'_i + 0.377$ の関係を示す。これは積層金網による圧力損失を金網 1 枚あたりに換算して得た結果を表す実験式である。ステンレスの結果を見ると、本測定結果は浜口らの関係式でまとめることができない。しかし、およそ $\beta = 0.53$ を境に 2 大別してまとめることができるようである。図 7 中の実線①と②は

$$K = A_2/R'_i + B_2 \dots\dots\dots (14)$$

($\beta \leq 0.53$ の場合 $A_2 = 68.8$, $B_2 = 0.327$, $\beta > 0.53$

の場合 $A_2 = 71.4$, $B_2 = 0.229$)

としてまとめた実験式で、結果をおおまかに表していると思われる。黄銅の結果を見ると、これも浜口らの実験式よりもステンレスの場合に示した本実験式①、②でまとめることが可能である。ポリエチレンの結果を見ると、ほかの材質の同一形状(β , 目開き等)のスクリーンと比べ K' の値が大きい。また、 β の小さい場合については結果はやや悪いようである。ただ、他のスクリーンと比べ、 β の種類が少なくさなるデータの蓄積が必要である。以上の結果をまとめてみると、3 種のスクリーンについて浜口ら⁽¹⁵⁾の実験式よりも式(14)でおおまかに結果をまとめることができるようである。

そこで式(14)を用いて、他研究者の結果をまとめたものを図 8 に示す。図 8 中破線は浜口ら⁽¹⁵⁾の結果を実線①、②は式(14)を示す。これを見ても、浜口らの実験式を用いて他研究者の結果をまとめることができず、式(14)のほうがおおまかに見て結果をうまく表現しているのがわかる。したがって、スクリーンの開口比 β , 目開き l の値があらかじめわかっているときは、式(14)を用いれば $\beta = 0.53$ を境にして 2 大別して抵抗係数の評価を与えることができる点に利用価値がある。

さらに開口比 β の値が零であっても透過流れが存在するようなスクリーン(例えば Plain dutch screen⁽¹³⁾)の場合、これまでに示してきた方法では抵抗係数を表現できない。この場合、3 章で記述したように式(7)を用いることができる。Armour - Cannon⁽¹³⁾によれば

$$f = 8.61/NRe + 0.52 \dots\dots\dots (15)$$

でまとめられる。ここで f は網摩擦係数、 NRe は網レイノルズ数である。図 9 に f と NRe との関係を 3 種類のスクリーンについて表す。図 9 中、曲線①は式(15)を、曲線②は著者らの関係式⁽²⁾ [式(15)の付加定数の値が 0.43]を示す。ステンレスの場合、開口比、線径によらず、ほぼ 1 本の曲線でまとめることができ、

曲線②のほうが結果を妥当に表示している。これより、スクリーンの形状値がわかれば抵抗係数の値を NRe のみで示すことができる。黄銅の場合、ステンレスと同様、式②で妥当に表現することができる。これはスクリーン通過後の速度分布が両方で類似していたことから理解できる。ポリエチレンの場合、結果のまとまりが悪いが、曲線①のほうに近い結果を示している。なお、スクリーンの抵抗係数として、 K , K' , f のいずれをとってもポリエチレンの場合が最も高い値を示す。したがって、スクリーンの形状値が同一であって

図 7 修正抵抗係数に及ぼす修正目開きレイノルズ数の影響 (記号は表 1 に示す)

図 8 $K' \sim Ri'$ の関係 (他研究者の結果のまとめ、図中の記号は表 6 と同じ)

も、材質差により抵抗係数の値に差が生じることは重要な事柄である。以上まとめると、Armour-Cannonの式⁽¹³⁾は、スクリーンの三次元構造を妥当に表現しているため、抵抗係数の表示式として適している。ただし、流路の最大速度を代表速度とするのに難点がある。また、計算が煩雑であるため実用上不便である。

次に、スクリーンの抵抗係数の評価式として多く用いられている Wiegardt による式⁽¹²⁾を調べてみる。図 10 は K と β との関係を示す 3 種類のスクリーンについて表したもので、曲線は $K=0.85(1-\beta)/\beta^2$ の式を示す。ステンレスの場合、 $R_d=10^2 \sim 10^3$ の結果を見る

図 9 網摩擦係数と網レイノルズ数との関係 (記号は表 1 に示す)

図 10 抵抗係数 K に及ぼす開口比 β の影響

と曲線の周りを系統的にばらついている。すなわち、定数 C の値は R_d に依存して変化する。このことは Wiegardt⁽¹²⁾も述べている。黄銅の場合、 $R_d=150 \sim 10^3$ の結果はやはり曲線の周りにばらついており、定数 C の値は R_d に依存している。ポリエチレンの場合、 $R_d=150 \sim 900$ の結果は $C=0.85$ の曲線に沿っている。これは同一の β の値に対し、ポリエチレンの抵抗はステンレス、黄銅に比べ大きいことを意味する。この理由の一つはメッシュ交差部の厚みが薄いことによる。すなわち、直交 2 円柱の相貫体の抵抗係数 C_D が接触 2 円柱の C_D と比べ大きい⁽¹⁶⁾⁽¹⁷⁾ことを考慮すると、ポリエチレンの場合、形状が変化しやすく相貫体形状に近くなるため、同一の β に対し、抵抗係数が高いと予想される。他の理由は公称の β と実際の β との間に差があるためと思われる。すなわち素線の材質により変形が異なり、公称の β の値が同一でも実際には異なっていることが予想される。さて、他研究者の結果も、図示していないが、式(6)で表すことができる。以上の結果をまとめると、 K と β との関係は式

図 11 ステンレススクリーン通過時の流線形状

図 12 3 種類のスクリーンを通過する流線の比較

(6)で図示できるが、定数 C の値は $C=6.0R_d^{-1/3}$ でまとめられる。この結果は Wieghardt⁽¹²⁾, Schubauer⁽⁷⁾, 著者ら⁽²⁾により得られている。

4・3 スクリーン通過時の流線形状 これまで述べてきたように、スクリーン通過後の速度分布が β により異なること、壁近傍の速度分布がオーバシュートすること、同一の β に対し K の値が異なること等が明らかとなった。この理由をさぐるため、スクリーンの上下流の6断面で速度分布を詳細に計測し、流線形状から検討してみる。図11は代表としてステンレスの場合の結果で、 $Re=6 \times 10^4$, $\beta=0.36$ と $\beta=0.53$ について示す。軸対称管内流であるため、ストークスの流れ関数⁽¹⁸⁾ ψ を導入し、無次元値 $2\pi\psi/Q$ の値が等値となる線を示している。ここで Q は流量を表す。なお、見やすさのため流線形状は直線で結んでいる。スクリーン通過時の流線の傾きは、開口比の値が大きい $\beta=0.53$ の場合ゆるやかである。このことは β の値が小さいほどスクリーンの抵抗が大きく、スクリーン通過後に管壁の方向に強く曲げられることを示す。また、同一の β の場合に比較すると、管中心に近いほど流線の傾きは小さく、一方 $y/\delta \approx 1.0$ (δ は境界層厚さ) 付近 ($y=12 \text{ mm}$, $2\pi\psi/Q=0.4 \sim 0.5$ 位置) で流線の傾きが最大である。これは Mehta の報告⁽⁵⁾と同様である。なお、 β が小さくなるほど δ 付近の流線の傾きが増加している。これはスクリーンの抵抗によるよどみ圧が高くなるためである。図示していないが、黄銅、ポリエチレンの場合、ステンレスと同様、 $y/\delta=1.0$ 付近で流線の傾きが最大である。次にスクリーンの材質差による流線形状の変化を調べてみる。図12は3種類のスクリーンについて、 $\beta=0.36$, $d \approx 0.1 \text{ mm}$ で $2\pi\psi/Q=0.4$, $y/\delta \approx 1.0$ の流線形状の比較を示す。スクリーン通過時の流線の傾きはポリエチレン、黄銅、ステンレスの順に大きい。この傾きは抵抗係数、スクリーンの剛性と密接に関係していると思われる。すなわち、半径方向の各局所位置で局所の抵抗係数が異なるため、スクリーンの上流でよどみ圧が半径方向に変化し壁面へ向かう二次流れが誘起される。したがって壁近くの速度分布は、オーバシュート現象を示し、スクリーン下流の境界層厚さは薄くなる。この結果、スクリーン通過時の流線の傾きが大きい。次にスクリーンの剛性について見ると、流体圧力によりスクリーンはたわみ、そこに流入する流体はスクリーンによりスクリーン面と垂直方向に曲げられる。したがって流線は壁面に向かって曲げられることになる。ポリエチレンスクリーンは剛性が

最も弱いスクリーン通過時の流線の傾きが最も大きくなる。

5. 結 言

定常流下で線材質の異なる3種類の平織りスクリーンを通過する流れと抵抗係数を実験的に調べ、本実験の範囲内で以下の結果を得た。

(1) スクリーン通過後の速度分布は、ステンレス、黄銅、ポリエチレンの場合とも、開口比 β によりおよそ3分類できる。ただ線材質間の差による影響、く形メッシュ形状のため、分類にやや変化が生じている。

(2) 3種類のスクリーンの抵抗係数について、 K と R_d との関係、 K' と R'_d との関係を実験値から適切に表示できる式として求めた。これらはスクリーン通過後の速度分布の傾向とおおまかに対応している。また、すべてのスクリーンの抵抗係数を統一的に表示できる Armour-Cannon と同形式の結果を得た。

(3) 同一の形状値をもつ材質の異なるスクリーンが異なる抵抗係数を示す原因を、スクリーン通過時の流線形状から明らかにした。

本研究の遂行に際し、山口大学工学部 井上忠義技官、当時の卒研 生 工藤辰夫、宮岡己利両氏に感謝の意を表する。

文 献

- (1) 日本機械学会編、管路・ダクトの流体抵抗、(1979)、109、日本機械学会。
- (2) 大坂・ほか3名、機論、52-473, B (1986)、312。
- (3) 石塚、機論、52-484, B (1986)、3954。
- (4) 石塚・佐々木、機論、No. 880-6 (1988-10)、281。
- (5) Mehta, R. D., *AIAA J.*, 23-9 (1985)、1335。
- (6) Taylor, G. I. and Davies, R. M., *ARC Rep. Memo*, 2237 (1944)、163。
- (7) Schubauer, G. B. and Spangenberg, W. G., *NACA Rep.*, 949 (1945)、185。
- (8) Collar, A. R., 文献(1)の109ページ。
- (9) Simmons, L. F. G. and Cowdrey, C. F., *ARC Rep. Memo*, 2276 (1945)、185。
- (10) Macphail, D. C., *ARC Rep. Memo*, 1876 (1939)、1。
- (11) 中村・大坂、機械流体工学、(1982)、99、共立出版。
- (12) Wieghardt, K. E. G., *Aeronaut. Q.*, 4-1 (1953)、186。
- (13) Armour, J. C. and Cannon, J., *AIChE J.*, 14-3 (1968)、415。
- (14) Taylor, G. I. and Batchelor, G. K., *Q. J. Mech. Appl. Math.*, 2-1 (1949)、1。
- (15) 浜口・ほか2名、機論、48-435, B (1982)、2207。
- (16) 大坂・ほか4名、機論、48-431, B (1982)、1229。
- (17) 山田・ほか3名、機論、53-486, B (1987)、333。
- (18) 今井、流体力学、(1973)、155、裳華房。
- (19) Head, M. R. and Rechenberg, I., *J. Fluid Mech.*, 14-1 (1962)、1。