乱れ促進機構における平板列まわりの流れ*
(第1報, 流路壁の影響について)川嶋元士*¹, 笠原英司*¹, 佐藤秀明*²Flow Patterns around the Flat Plates in a Turbulence Promoter
(1st Report, Effect of Duct Wall of Flow Passage)

Genshi KAWASHIMA, Eiji KASAHARA, and Hideaki SATO

To separate substances from solutions, membranes have been used. However in these cases, the phenomena of concentration polarization on the surface of the membrane and the growing of gel layers can not be avoided. These phenomena slow down the filtration. Creating a turbulence on the surface of the filter is one of the effective ways to prevent these phenomena on the filter surface. However, there are few reports which provide details about them. This report is a theoretical and experimental analysis of a flow patterns occurring around a single flat plate, the simplest type of turbulence promoter. The relationships between the Reynolds Number Re and the coefficient of loss, the coefficient of pressure, and the coefficient of pressure fluctuation were examined. The new non-dimensional number M which indicates the effect of the duct wall is proposed and the coefficient of loss ξ can be expressed as a function of the number M . And the relationships between the coefficient of loss in experiments and the number M are coincident with the theoretical values.

Key Words: Turbulence, Turbulence Promoter, Flat Plate, Coefficient of Loss, Effect of Duct Wall, Blockage ratio, Aspect ratio, Filter, Concentration Polarization

1. 緒 論

溶解物質の分離手段として汙過膜を用いる方法は、古くから行われ、近年、汙過膜そのものは効率の良い物が開発されている。しかし、汙過膜の機構的性質から、膜面における濃度分極、あるいは、ゲル層の生成は避けられず、これらの生成は、いわゆる目づまりをおこし、溶媒の透過を妨げ、汙過効率を低下させる。

このため、この効率を高め、または、維持するためにいろいろな方法⁽¹⁾が考えられており、その一つに処理液に乱れを与えて、濃度分極を防止する方法がある。

この乱れを与えるものとして、工業的にはタービュレンスプロモータ(乱流促進体)が多く用いられている。しかし、タービュレンスプロモータを、汙過装置の効率向上を目的として使用した例は、いくつか報告^{(2)~(4)}されているが、これらの流れの機構の解明は、必ずしも十分ではない。そこで本研究は、実際に多く用いられている二重円筒形の流路を展開した形の二次

元流路の中に、タービュレンスプロモータとして基本的構造である平板を1枚だけ下壁面に配置した場合における、そのまわりの流れの状態、圧力分布および変動圧力などを測定することにより、膜面と想定した下壁面の流れのようすを知り、汙過装置の設計の際に必要な基礎資料を提供することを目的としたものである。

2. 記 号

- A : アスペクト比 $= W/B$
 $A_1 \sim A_3$: 流路の断面積
 B : 平板の弦長
 C : 閉そく率 $= B/H$
 C_p : 圧力係数 $= 2(P - P_\infty) / \rho V_\infty^2$
 H : 測定部流路高さ
 K : 測定部流路壁の影響を表すためのパラメータ⁽⁸⁾
 M : 測定部流路壁の影響を表すためのパラメータ
 N : 平板の枚数
 P : 静圧
 P_∞ : 主流の静圧
 ΔP : 損失圧力
 ΔP_w : 圧力変動幅

* 昭和61年10月7日 第64期全国大会講演会において講演、原稿受付 昭和62年7月10日。

*¹ 正員、武蔵工業大学 (〒158 東京都世田谷区玉堤1-28-1)。

*² 准員、武蔵工業大学。

Re : レイノルズ数 $= 4mV_{\infty}/\nu$

V : 速度

V_a : 壁面における速度

V_{∞} : 主流平均速度

W : 測定部流路幅

X : 平板からの下流方向距離

m : 流路の水力学的平均深さ

δ_s : 弧長

ζ : 変動幅係数 $= 2\Delta P_w/\rho V_{\infty}^2$

ζ_m : 平均変動幅係数

ν : 流体の動粘性係数

ξ : 損失係数 $= 2\Delta P/\rho V_{\infty}^2$

ρ : 流体の密度

添 字

o : 開口部

c : 閉そく部

3. 理論解析

損失係数の理論的算出には、流路中を等流量が流れるように等分割する流線を求める方法である流線解析法⁽⁵⁾⁽⁶⁾を用いた。計算の仮定条件として、流体は非圧縮性かつ非粘性流体で、流れは定常、渦なしである。以上の仮定により図1に示すように、流路中に単独平板が配置された流れを考える。仮定条件より、直交曲線には含まれる弧の長さ δ_s を測ることにより、その点の速度 V が壁面の速度 V_a との比で表される。この関係と、各直交曲線を通過する流量は、十分上流の断面①を通過する流量に等しいことより、直交曲線上の点の速度を上流の速度との比で表すことができる。この速度比を直交曲線上のある区間で積分すれば、その区間の流量が求まり、直交曲線上の流量を等分割する点を求めることができる。この点を結んだ曲線が、第一次近似の流線になり、同様な計算を他の断面についても行うと、流路全体の第一次近似の流線が求まる。同様な操作を繰返し第二次以降の近似の流線を求めていき、第 n 次近似と第 $n+1$ 次近似における各断面の流量分布が一致し、流線の位置が収れんするまで繰返すと、この流路における流線の位置が最終的に定まる。図1において検査面を、①、②、③として次の仮定を行う。

(1) 断面①～②間は加速流であり、この間の損失は零とする。

(2) 平板後方には死水領域が形成され、断面②で流れは最小断面積を有する。

(3) 死水領域では流速は零とし、断面②において圧力は均一である。

以上の仮定により断面①～③において運動量の式を、断面①～②において運動量およびベルヌーイの式を立てて、損失係数 ξ を導くと、損失係数 ξ は

$$\xi = \left(\frac{A_1}{A_2} - 1 \right)^2 = \left(\frac{A_3}{A_2} - 1 \right)^2 \dots\dots\dots (1)$$

となり、損失係数を求めることができる。

4. 実験装置および方法

4.1 実験装置 実験装置の概略を図2に示す。実験に使用した流体は水である。水槽は一辺 900 mm の正方形であり、一定水頭に保つため、オーバフローさせた。流路には、円筒を展開したと考えた高さ 50 mm、幅 300 mm の長方形断面を用いており、その長さは 1400 mm である。流路内に設けた乱流促進体には、厚さ 1 mm の黄銅製の平板を用いており、その寸法は、弦長 $B=15, 22.5, 30, 35, 40$ mm の 5 種類であり、それらの幅は 300 mm である。平板の取付けは下壁面に密着させ、その取付角度は流れ方向に対して直角にした。測圧孔の直径は 0.5 mm であり、その位置は管路幅中央に設けた。流れ方向の測圧位置および平板との位置関係を図3に示す。

4.2 実験方法 流量の計測は重量法により行った。各点の圧力の測定は、平板を移動させ、測圧孔から

図1 単独平板のまわりの流れ

図2 実験装置概略

任意の位置に固定させて行い、微差圧トランスデューサ(セレスコ P 90 D)を用い、時間平均的圧力を測定した。またその出力を電磁オシログラフに記録し、圧力変動の最大のピークと最小のピークの差、圧力変動幅 ΔP_w を測定した。

5. 実験結果および考察

5.1 単独平板に及ぼす測定部流路壁の影響 測定部幅全体に渡された鈍い物体の二次元流路実験において、測定部の側壁の影響を完全に除去することは困難である。よって実験に用いられた流路測定部の特徴をあらかじめ理解しておくことが必要になる。たとえば、単独平板の背圧、抵抗係数についての多くの研究者の実験結果が異なるが、これは測定部上下壁による閉そく効果⁽⁷⁾および側壁の影響が考えられる。このため平野ら⁽⁸⁾は、図4に示す測定部断面形状において、上下壁および側壁の影響を表すパラメータ K を、平板の弦長と測定部断面の水力学的平均深さの比として

$$K = B / \left\{ \frac{W(H-B)}{4W+2(H-B)} \right\} \\ = 4 \frac{C}{1-C} + \frac{2}{A} \dots\dots\dots (2)$$

と定義した。本研究における二次元流路内の下壁に直立した平板の損失係数も、このパラメータで整理すれば、流路壁の影響を表現できると思われるが、このパラメータの流体力学的意味があまり明確でないように思われる。したがって図5に示す測定部断面形状において上壁および側壁の影響を表すパラメータ M を考え、開口部の断面の水力学的平均深さを m_o 、閉そく部の断面の水力学的平均深さを m_c として

$$M = \frac{m_c}{m_o + m_c} = \frac{\frac{BW}{2W+2B}}{\frac{W(H-B)}{2W+2(H-B)} + \frac{BW}{2W+2B}} \\ = \frac{C + \frac{1}{A} - \frac{C}{A}}{1 + \frac{2}{A} - \frac{2C}{A}} \dots\dots\dots (3)$$

図3 流路および測圧孔の位置

と定義する。このパラメータ M は、式の中に閉そく率 C とアスペクト比 A を含んでいることを特徴としている。パラメータ M は、水力学的平均深さをを用いた閉そく率を表しており、側壁の影響を考えた閉そく率を表しているとも言える。またアスペクト比 A が十分大きいときは、パラメータ M は閉そく率 C に近づき、二次元物体に及ぼす側壁の影響が小さいことを表している。図6中に M を用いて、本研究の二次元流路に配置された単独平板の損失係数の実験値、流線解析法による計算値、単独平板⁽⁹⁾、四角および三角突起⁽¹⁰⁾の損失係数、また比較のため、円管内に種々の形に配置された乱流促進体⁽¹¹⁾⁽¹²⁾の損失係数も併せて表示した。これより損失係数は M により一義的に定まり、この M を用いる整理の方法は、損失係数と閉そく率の関係をうまく表すことができる。

また、これと同じデータを平野らの K で表した物も、図6中に示した。これより両者ともほぼ1本の線で表されていることがわかるが、 M による表示のほうがばらつきは少ない。また Sparrow ら⁽¹¹⁾⁽¹²⁾の値を表した場合も同様なことが言える。これは円管内に、短冊形と欠円形の板を配置したものであるが、 K の場合、この短冊形と欠円形の代表長さをどこに選ぶかにより K の値は大きく変化してしまう。しかし M の場合、水力学的平均深さをを用いるため容易に定め得る。このように、 M は、任意の形の断面において、任意の形の物体が配置されていても整理できる。

5.2 レイノルズ数と損失係数の関係 図7はレイノルズ数 Re と単独平板が下壁面に配置された場合

図4 測定部断面形状⁽⁸⁾

図5 測定部断面形状

の損失係数 ξ の関係を示したものでパラメータは閉そく率 C である。 ξ の値は図9に示されるように、平板の影響が十分小さくなったと考えられる $X=400$ mm における損失圧力 ΔP より求めた。これより、閉そく率が大きくなるほど、損失係数は大きくなっている。またレイノルズ数が大きくなるほど損失係数は小さくなり、一定の値に近づくようになる。レイノルズ数が小さくなっていくと損失係数は大きくなっていくが、その大きくなる割合は閉そく率が小さい物ほど大きい。

5・3 下壁面上の静圧分布 図8, 9は、弦長 $B=15, 30$ mm の単独平板が下壁面に配置された場合の、単独平板の上流側および下流側の下壁面上の静圧分布を示す。これより、下流側においては、流れが平板

からはく離するため静圧が主流の静圧より低下する。下流側の各点の静圧は閉そく率に関係なく、レイノルズ数が小さくなるほど圧力係数は小さくなっている。また閉そく率に関係なく、静圧は回復していき、 $X=400$ mm 付近で圧力係数の値は、ほぼ一定の値を示すようになる。

5・4 下壁面上の変動圧力分布 図10~12は、弦長 $B=15, 30, 40$ mm の単独平板が下壁面に配置された場合の、単独平板の上流側および下流側の下壁面上の変動圧力分布を示す。横軸は平板からの距離、縦軸は変動幅係数である。閉そく率が小さいと明確でないが、全般に変動幅係数は平板に近い上流側より増大し、平板の背後で急速に増大し極大値をとった後減少している。そして平板後方において再び上昇し、極大値を形成した後、徐々に減少している。また、上に述べた分布の状態は、いずれの場合もほぼ同じであり、変動幅係数は、レイノルズ数が大きくなるほど、小さくなっている。ここで、平板後方上流側の極大値を $P1$ 、平板後方下流側の極大値を $P2$ 、と呼ぶことにする。図10の弦長 $B=15$ mm では閉そく率が小さいので、したがって平板の影響が少なく変動幅係数の極大値はあま

図6 M と $K^{(8)}$ を導入した損失係数の整理

図7 レイノルズ数と損失係数の関係

図8 圧力分布 (単独平板)

図9 圧力分布 (単独平板)

り明確ではないが、 $Re=3300$ ではP1が約25 mm, P2が約100 mmの位置に現れている。この場合P2の値は、P1の値より大きいことがわかる。図11の弦長 $B=30$ mmでは二つの極大値は明確になる。また各レイノルズ数ともP2の値は、P1の値より大きくなっている。図12の弦長 $B=40$ mmになると、二つの極大値はさらに明確になるが、各レイノルズ数ともP1の値は、P2の値より大きくなってしまふ。ここでP1, P2と流動状態との関係を調べるため、平板の後流の速度分布を外径1 mm, 測圧孔径0.4 mmの単孔ピトー管を用いて測定した。このピトー管はあらかじめ、角度 θ と得られる圧力の関係は $\theta=0$ に対して対称性をもつことを確認して使用した。図13は弦長 $B=30$ mmの平板後流における、このピトー管により測定した速度分布を示す。なお速度の測定は流路幅中

心で行った。これより平板背後には、強い渦が形成されていることがわかる(位置A)。このことは平板背後の静圧が、平板から十分離れた後方の静圧よりも低下していることからわかる。よってP1は、平板背後の渦によるものと思われる。また流れは平板からはく離し、平板後方にはく離泡が形成されていて循環流が見られ(位置B), 再付着点距離は約230 mm(位置C)となる。図11に示す弦長 $B=30$ mmにおいてはP2の位置($Re=7800$)は再付着点よりやや上流側になっており、P2ははく離せん断層の再付着⁽¹³⁾によるものと思われる。また図1に示される計算による、弦長 $B=30$ mmにおける縮流部 A_2 の流路高さ H に対する比は、 $A_2/H=0.26$ となる。図13からわかるように、平板後方において測定された主流の縮流部の大きさは、この計算結果に良く一致していることが認められた。

5.5 平均変動幅係数 実際問題としては、膜面と想定した下壁面における全体的な圧力変動幅も考える必要がある。よって平均変動幅係数 ζ_m も重要な要素である。本研究では、平均変動幅係数を、平板からの変動幅係数を流れ方向に平均した量とし、次式で定義した。

$$\zeta_m = \int_0^x \zeta dx/x \dots\dots\dots (4)$$

図14は平均変動幅係数 ζ_m を、 $Re=7800$ における各平板について示す。 ζ_m の値は閉そく率 C が大きくなるほど、大きくなっていくことがわかり、また流

図10 変動圧力の分布 (単独平板)

図11 変動圧力の分布 (単独平板)

図12 変動圧力の分布 (単独平板)

図13 平板後流の速度ベクトル線図 ($C=0.6$)

図 14 平均変動幅係数

れ方向における平均変動幅係数の分布の状態を示す。

図 15 は、単独平板が下壁面に配置された場合の損失係数 ξ と平均変動幅係数 ξ_m との関係を、レイノルズ数 Re と閉そく率 C をパラメータにして示したものである。これより、実験を行った範囲では、損失係数が大きくなっていくと平均変動幅係数は大きくなっていく傾向がある。本図は損失係数、平均変動幅係数、レイノルズ数および閉そく率の相互の関係を示す。すなわち主流のレイノルズ数と使用する平板が定まれば、あらかじめ損失係数と平均変動幅係数を求めることができる。

6. 結 言

濃度分極防止のための乱れ促進機構として、従来、平板列が経験的に用いられてきたが、これらの流れの特性については、あまり明確ではなかったように思われる。このため、本研究ではこれらの関係を明らかにするため、平板列に関する実験の基礎として、二次元流路の中に、単独平板を下壁面に配置した場合における実験を行い、汙過装置の設計に必要な基礎資料として次の結論を得た。

(1) 平板列に関する実験の基礎として、単独平板の特性に及ぼす測定部流路壁の影響を明らかにし、損失係数と閉そく率の関係を、流線解析法による計算および各種の実験結果の場合についてうまく表すことができる、流路壁の影響を表すパラメータ M を提案した。

(2) 二次元流路の中に、単独平板を下壁面に配置

図 15 損失係数と平均変動幅係数の関係

した場合の、下壁面上の圧力分布、変動圧力分布を明らかにした。

(3) 損失係数、平均変動幅係数、レイノルズ数および閉そく率の相互の関係を求めることができた。これより主流のレイノルズ数と使用する平板が定まれば、あらかじめ損失係数と平均変動幅係数を求めることができる。

文 献

- (1) 荻原・橋本, 膜による分離法, (昭 50), 13, 講談社.
- (2) Thomas, D. G., ほか 1 名, *I & CE Process Des. Develop.*, 7-3 (1968), 398.
- (3) Thomas, D. G., ほか 2 名, *Desalination*, 9 (1971), 33.
- (4) Pitera, E. W., ほか 1 名, *I & CE Process Des. Develop.*, 12-1 (1973), 52.
- (5) 内田, 内燃機関, 5-46 (昭 41), 51, 5-47 (昭 41), 51, 5-48 (昭 41), 93, 5-49 (昭 41), 12.
- (6) 川嶋, 機論, No. 835-4 (昭 58-11), 62.
- (7) 例えば, Maskell, E. C., *Rep & Mem., Aeronaut. Res. Council*, 3400 (1963).
- (8) 平野・大迫・川嶋, 機論, 49-447, B (昭 58), 2363.
- (9) 岡本, 日本航空宇宙学会誌, 30-337 (昭 57), 26.
- (10) 一宮・長谷川・山崎, 機論, 46-403, B (昭 55), 482.
- (11) Sparrow, E. M., Koram, K. K. and Charmah, M., *Trans. ASME, J. Heat Transf.*, 102-1 (1980), 64.
- (12) Koram, K. K. and Sparrow, E. M., *Trans. ASME, J. Heat Transf.*, 100-4 (1978), 588.
- (13) 森・内田・酒井, 機論, 52-481, B (昭 61), 3353.