

京都大学 工学部 正員 衿津 家久
京都大学 工学部 正員 中川 博次

1. まえがき

壁面を通して流体の吹出し (injection) や逆に吸込み (suction) を行つて壁面上の乱流を好ましい姿に制御しようとする基礎的・応用的研究が境界層流や管路流を対象にして戦後精力的に行われて来た。このような乱流制御の研究は南水路流でも今後重要な課題と考えられ、著者らは多孔質滑面水路底から水流の吹出しや吸込みを一様に与えて、南水路の乱流構造がいかなる変化を受けるか系統的に研究して来た。¹⁾

本報は、これまで得られた実験結果を総括し、その平均流速分布則を統一的に説明するとともに過大な吸込み率で生じる再層流化現象への遷移挙動に関して検討しようとするものである。

2. 理論的考察

底面 $y=0$ からの流出入速度 v_0 を考慮した2次元南水路乱流のせん断応力 $\tau^+ \equiv \tau/\rho U_*^2$ は次式で与えられる。¹⁾

$$\tau^+ \equiv \frac{-\overline{uv}}{U_*^2} + \frac{\partial U^+}{\partial y^+} = \left(1 - \frac{y^+}{R_*^+}\right) + v_0^+ \left(U^+ - \frac{y^+}{R_*^+} \cdot U_{max}^+\right) + \Psi(y^+) \quad (1)$$

$$\Psi(y^+) \equiv \frac{1}{(1 - \int_0^1 \zeta^2 d\xi)} \left\{ \left(1 - \frac{1}{\Omega}\right) + \frac{v_0^+ U_{max}^+}{\int_0^1 \zeta^2 d\xi} \left\{ \int_0^1 \zeta^2 d\xi - \xi \int_0^1 \zeta^2 d\xi \right\} - \frac{v_0^+ U_{max}^+}{\int_0^1 \zeta^2 d\xi} \left\{ \int_0^1 \zeta^2 d\xi - \xi \int_0^1 \zeta^2 d\xi \right\} \right\} \quad (2)$$

ここで、 $y^+ \equiv y U_* / \nu$ 、 $\xi \equiv y/h \equiv y^+ / R_*^+$ 、 $U^+ \equiv U/U_*$ 、 $\zeta \equiv U/U_{max}$ 、 $v_0^+ \equiv v_0/U_*$ などであり、+添字は壁面領域 ($y^+ \leq 100$) の特性スケール (U_* , U_*) による無次元化を表わし、¹⁾ また $\Omega \equiv \tau/\rho U_{*0}^2 \equiv (U_*/U_{*0})^2$ であり、0添字は $v_0=0$ の値を示す。式(1)の第2項は流出入による付加応力を、 $\Psi(y^+)$ は撓流項をそれぞれ表わしている。いま、十分に発達した乱流で有効な混合距離理論 $-\overline{uv}/U_*^2 = l^+ (dU^+/dy^+)^2$ を用い、 l^+ として van Driest の damping 関数を使うと、

$$\frac{dU^+}{dy^+} = \frac{2\tau^+}{1 + \sqrt{1 + 4l^{+2}\tau^+}} \quad (3) \quad l^+ \equiv K_0 y^+ \{1 - \exp(-y^+/A^+)\} \quad (4)$$

K_0 はカルマン定数であり、流出入 v_0 が存在しても 0.4 の普通定数をとることが一般に認められている。²⁾ buffer 層以上の壁面領域では式(1)は $\tau^+ \equiv 1 + v_0^+ U^+$ 、式(4)は $l^+ \equiv K_0 y^+ \gg 1$ と近似でき、式(3)を積分して次の二乗対数則を得る。

$$\phi \equiv \frac{2}{v_0^+} (\sqrt{v_0^+ U^+ + 1} - 1) = \frac{1}{K_0} \ln y^+ + D \quad (5)$$

ところで、過大な吸込みで再層流化現象に、吹出しで剥離現象にそれぞれ遷移するから¹⁾、粘性の効き具合を表わす係数 A^+ は v_0^+ の関数と考えられ、式(3)の数値解が壁面領域端 $\delta^+ = 100$ で式(5)に一致するように A^+ を決定すれば、普遍的な壁法則が得られる。

3. 摩擦速度 U_* の評価と平均流速分布形

乱流構造を解明するには U_* の正確な評価が不可欠である。式(1)には U が含まれているから、 $-\overline{uv}$ を実測しても乱れの self-consistency からほもはや U_* を評価できず³⁾、 $v_0=0$ の Prandtl-Karman の方法と同様にして式(5)の積分法から $\Omega \equiv (U_*/U_{*0})^2$ と $\beta \equiv v_0/U_{*0}$ の関係式をまず計算し、次に乱れの self-consistency が評価された U_{*0} を使って³⁾ Ω - β 曲線から U_* が評価された。 U の計測には一成分熱膜流速計が使われ、最低 $y=0.7\text{mm}$ まで計測できた。図1は、吹出し流で得られた流速分布の実測値であり、実線は式(3)の数値解である。壁面領域はもちろんのこと、自由水面にまで至る全領域

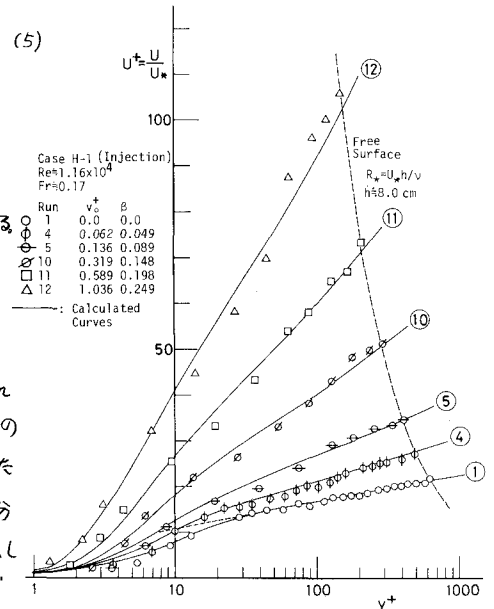


図1 吹出し流での平均流速分布

で両者の一致は非常によい。剥離現象へ遷移する $U^+ \approx 1$ という極大な吹出し率でも式(3)は有効であり、十分に発達した乱流が形成されていることがわかる。次に、図2は吸込み流での平均流速分布を示す。 $U^+ \approx 0.085$ 程度までの比較的小さな吸込み率では式(3)は依然有効であるが、これ以上の吸込み率では実験値との一致は悪く、もはや乱流状態を維持できず、再層流化に移行したものと考えられる。乱流状態では混合距離理論が有効となるが、 U_h の評価に式(5)が使われため、この明白な結論付けには U_h を式(5)とは独立に評価すべきである。

図3は、多孔質水路区間での水面形を $U_b=0$ での水面形 h_0 との差 Δh で示し、太い実線は式(1)と同等な $\frac{\partial \Delta h}{\partial x} = -\left(\frac{U_h^+}{g h}\right) \left(1 - \int_0^1 \eta^2 d\eta\right)^{-1} \left\{ \left(1 - \frac{1}{2}\eta\right) + \left(\int_0^1 \eta^2 d\eta / \int_0^1 \eta d\eta\right) U_{max}^+ \right\}$ を使い、式(5)からの U_h を代入して求めた計算値である。両者の一致はかなりよい。すなわち、実験の Δh から U_h を独立に評価するには誤差が大きい、図3は先の $\Omega-\beta$ 曲線からの評価が妥当なことを示している。

4. 再層流化遷移挙動

著者らはこれまでの乱流計測の結果、吹出しで乱流は促進されるが、吸込みでは抑制されて次第にせん断乱流の特性を失うことを明らかにし、¹⁾前節の平均流速分布にもこの特性は如実に現れた。このような再層流化現象は加速流を伴う境界層流や管路流でも観測され、⁴⁾不浸透床($U_b=0$)をも含めた各種の流れに関して統一ある説明が望まれる。Huffmanらは、壁面流入や圧力勾配などの升部因子はせん断応力 $\partial \tau / \partial y$ を介して壁面領域(内部層)に影響を及ぼすことを指摘した。²⁾いま、彼らと同様にせん断領域端 $\delta^+ = 100$ までのせん断応力の平均勾配を $\langle \partial \tau / \partial y \rangle$ とすれば、式(1)より次式のようになる。

$$-\langle \frac{\partial \tau}{\partial y} \rangle = - \frac{U^+ \delta^+}{\delta^+} + \frac{1 + U_{max}^+}{R_*} - \frac{U(\delta^+)}{\delta^+} \quad (6)$$

図4は式(6)の各項を計算したものである。 $-\langle \partial \tau / \partial y \rangle$ は U^+ とともに単調に増加するが、 $U^+ \approx 0.085$ でピークに達し、その後急減し、再び急増する。これは、図2に見られるように式(3)の数値解 $U(y)$ が $0 < y^+ < R_*$ 間で最大値をもち、補正項である $U(\delta^+)$ が過大に計算されるためである。したがって、このピーク値を再層流化遷移の限界値と見なしてもよく、 $-\langle \partial \tau / \partial y \rangle \approx 0.008$ となる。図5に、 $-\langle \partial \tau / \partial y \rangle$ に対する A^+ を各種の流れに関して図示したが、この遷移限界値で A^+ は急増し、粘性の作用が増大することがわかる。[参考文献] 1) 祐津、京大学位論文、1977

2) Huffman, JFM, vol. 53, 1972, 3) 祐津、論文集、第26巻、1977, 4) Patel, JFM, vol. 34, 1968.

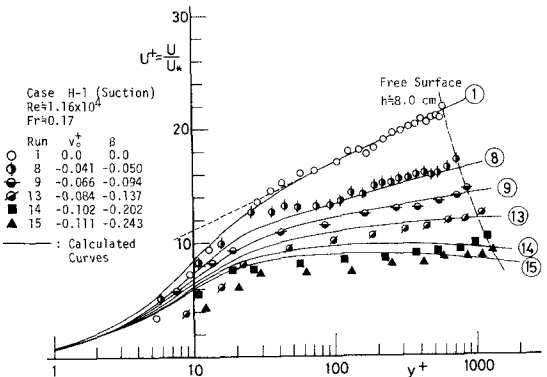


図2 吸込み流での平均流速分布

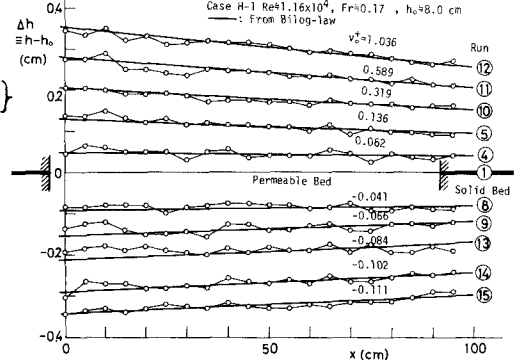


図3 吹出しおよび吸込み流での水面形

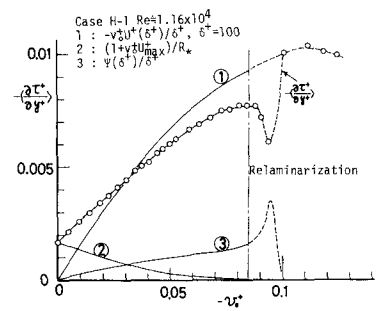


図4 せん断応力の平均勾配特性

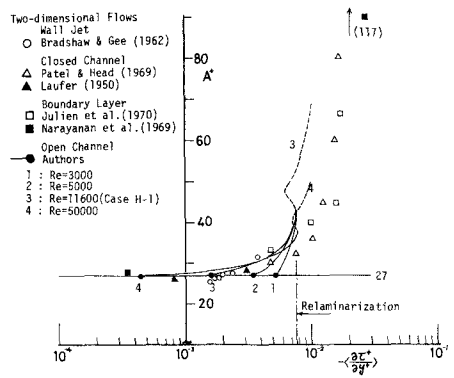


図5 各種の流れにおける再層流化