

1. まえがき

噴流におよぼす境界面の影響は一般に Coanda 効果と呼ばれている。Coanda 効果に関する研究の多くは Dodd の提案した流れの model を用い、Curved jet の特性を規定する Spread parameter σ を floating parameter とみなして理論的解析を行なっている。著者の行なった実験においては、Spread parameter σ は自由噴流のそれより若干小さいがほぼ一定値である結果が得られたので、本文はこの実験結果を用い、Dodd の Model で 2-3 の仮定に修正を行なって理論解析を行なった結果と実験結果を報告するものである。

2. 理論的考察

a. 剥離領域 Curved jet の流速分布を二次元自由噴流のそれと類似なものとすると、流速分布は近似的に次式で与えられる。

$$\frac{u}{u_{\max}} = \operatorname{sech}^2\left(\sigma_0 \frac{y}{s+s_0}\right) \quad (1)$$

こゝに、 $u_{\max}$ は噴流中に於ける流速、 s は流過距離、 s_0 は噴流の仮想原点と噴流出口の距離である ($s_0 = 0.73$)。

Reattaching Stream-line と噴流中に線間の流量は一定であるとする、噴流中に於ける Reattaching Stream-line の位置 B_R

$$\text{は} \quad \frac{B_R}{2B_0} = \frac{1}{\sigma_0} \frac{s+s_0}{2B_0} \tanh^{-1} \left\{ \sqrt{\frac{\sigma_0}{3}} \left(\frac{s+s_0}{2B_0} \right)^{\frac{1}{2}} \right\} \quad (2)$$

と与えられる。噴流の境界面へ衝突する直前の流速を u_s 、衝突後の流下方向および剥離領域方向の流速を u_1 、 u_2 とし、その流速分布は図-2 に示すように (1) 式と類似なものであるとすると流れの連続の条件より

$$\frac{u_{1\max}}{u_{2\max}} = \frac{\sigma_1}{\sigma_0} \frac{s+s_0}{s_1} \left(1 + \tanh \sigma_0 \frac{B_R}{s+s_0} \right), \quad \frac{u_{2\max}}{u_{3\max}} = \frac{\sigma_2}{\sigma_0} \frac{s+s_0}{s_2} \left(1 - \tanh \sigma_0 \frac{B_R}{s+s_0} \right) \quad (3)$$

なる関係が求められる。衝突点附近における圧力分布を無視すると衝突点における運動量の関係より噴流流れの境界面への衝突角 θ_R は次式のようになる。

$$\cos \theta_R = \frac{1}{2} \frac{\sigma_1}{\sigma_0} \frac{s+s_0}{s_1} \left\{ \left(1 + \tanh \sigma_0 \frac{B_R}{s+s_0} \right)^2 - \frac{\sigma_1}{\sigma_2} \frac{s_1}{s_2} \left(1 - \tanh \sigma_0 \frac{B_R}{s+s_0} \right)^2 \right\} \quad (4)$$

噴流中心位置は半径 r なる円弧上にあるものとする幾何学的な関係より次の関係が存在する。

$$\frac{D}{2B_0} = \frac{180}{\pi \theta} \frac{s}{2B_0} (1 - \cos \theta_R) + \frac{B_R}{2B_0} \cos \theta_R \quad (5)$$

$$\frac{x_R}{D} = \left(\frac{r}{2B_0} - \frac{B_R}{2B_0} \right) \sin \theta_R \frac{1}{D/2B_0} \quad (6)$$

図-1

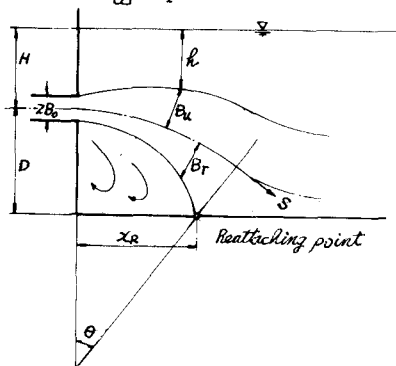
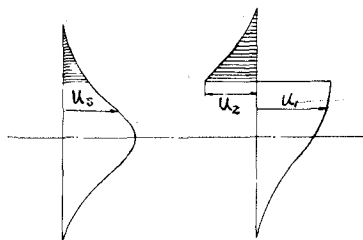


図-2 衝突前後の流速分布



(4)式中の $\sigma(S+S_0)/\sigma_0 S_1$ および $\sigma_0 S_1/\sigma_0 S_2$ の値が既知なれば、(4)、(5)、(6)の3式より噴流出口の高さ $D/2B_0$ と剥離領域の長さ $x_p/2B_0$ の関係が求められる。

b, 噴流流れの逆向条件

噴流は周囲の流体と連行しながら流過していく。この連行流量を補給するためには噴流流れと境界面の間に逆流を生じる。噴流中は $U/U_{max} = \text{const}$ なるものと考え、流速分布に(1)式を用いると連行流量 Q_R は

$$\frac{Q_R}{Q_0} = \sqrt{\frac{3}{\sigma_0}} \left(\frac{S+S_0}{2B_0} \right)^{\frac{1}{2}} \tanh \left(\cosh^{-1} \sqrt{\frac{U_{max}}{U}} \right) - 1.0 \quad (7)$$

で与えられる。図-1に示すように逆流中 $h = (H+r) - (r+B_u) \cos \theta$ 間はこの流量が一樣な流速分布で逆流しているものとする、この逆流により生ずる圧力低下は Energy 損失を無視してしまうと

$$\Delta \left(\frac{P}{\rho} \right) = (H+D) - \left(\frac{P}{\rho} + z \right)_s = \left(\alpha \frac{U_R^2}{2g} \right)_s, \quad U_R = \frac{Q_R}{h} \quad (8)$$

となる。この圧力低下量が最大になる点を(8)式を微分して求めると次の関係が導かれる。

$$\frac{1}{2} \sqrt{\frac{3}{\sigma_0}} \tanh \left(\cosh^{-1} \sqrt{\frac{U_{max}}{U}} \right) \left(\frac{S+S_0}{2B_0} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{H+r}{2B_0} - \frac{r+B_u}{2B_0} \cos \theta \right) = \left\{ \sqrt{\frac{3}{\sigma_0}} \tanh \left(\cosh^{-1} \sqrt{\frac{U_{max}}{U}} \right) \left(\frac{S+S_0}{2B_0} \right)^{\frac{1}{2}} - 1 \right\} \left\{ \frac{r}{2B_0} + \frac{\cosh^{-1} \sqrt{\frac{U_{max}}{U}}}{\frac{S+S_0}{2B_0}} \right\} \sin \theta \quad (9)$$

(9)式を満足する位置において、(8)の圧力低下量と剥離領域内の圧力低下量 $\rho g \Delta \left(\frac{P}{\rho} \right) = \frac{M_0}{K}$ と相等しいとき噴流流れの流れ方向の逆向が起こるものとする、この条件は次式のように導かれる。

$$\frac{H}{2B_0} = \frac{\sigma \beta}{2\sqrt{2}} \left(\frac{r}{2B_0} \right)^{\frac{1}{2}} \left\{ \sqrt{\frac{3}{\sigma_0}} \tanh \left(\cosh^{-1} \sqrt{\frac{U_{max}}{U}} \right) + \frac{r+B_u}{2B_0} \cos \theta - \frac{r}{2B_0} \right\} \quad (10)$$

こゝに β は運動量の補正係数で次式で与えられる。

$$\beta = \frac{M}{M_0} = \frac{3}{4} \left[\left\{ \tanh \left(\cosh^{-1} \sqrt{\frac{U_{max}}{U}} \right) + \sqrt{\frac{\sigma_0}{3}} \left(\frac{S+S_0}{2B_0} \right)^{\frac{1}{2}} \right\} - \frac{1}{3} \left\{ \tanh^3 \left(\cosh^{-1} \sqrt{\frac{U_{max}}{U}} \right) + \left(\frac{\sigma_0}{3} \right)^{\frac{3}{2}} \left(\frac{S+S_0}{2B_0} \right)^{\frac{3}{2}} \right\} \right] \quad (11)$$

2 実験結果との比較

Curved jet の流速分布の測定結果を示したものが図-3, 4, 5である。図中の計算結果は全て Spread parameter $\sigma \approx 6.00$ と置いて(1)式の流速分布を用いて計算したものである。いずれの場合も計算結果と実験結果との一致は良好であつて、Spread parameter σ_0 は 6.00 なる一定値とみなすことが出来るだろう。

流れが Reattached Flow の場合には水槽底に 1mm 間隔で接着した長さ 2cm の木綿糸のたながき方により、また Separated Flow の状態においては水表面に色素を注射針により滴下してその流れ方向によって測定した剥離領域の長さ x_p/D の値を噴流出口中心点より境

図-3 流速分布

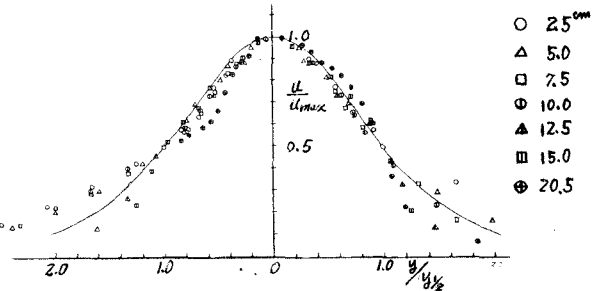
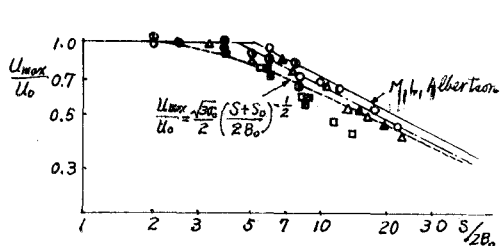
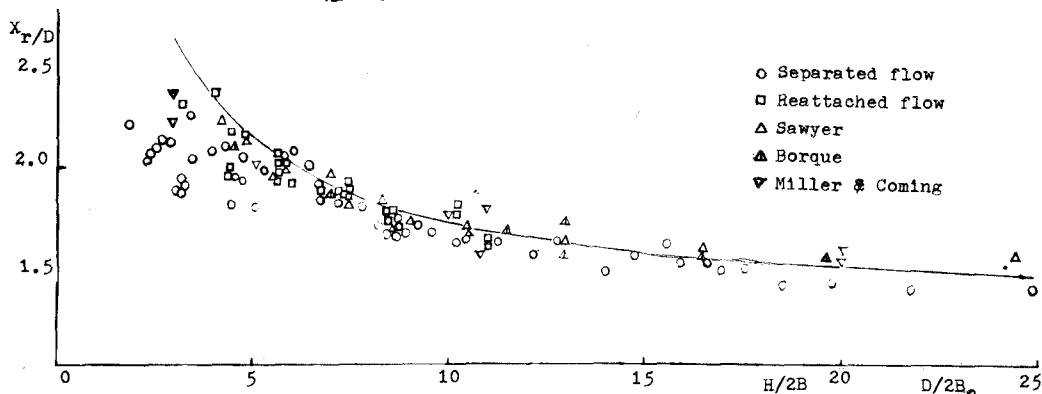


図-4 噴流中心流速



界面の高さ $D/2B$ or $H/2B$ に対して図示したものが図-6である。図中の計算曲線は(4)式中の $Q(S+S_0)/G_1 S_1$ および $Q S_2/G_1 S_2$ の両者とも1.00と置き、(4)、(5)、(6)の3式と同時に満足する X/D と $D/2B_0$ の関係と求めて図示したものである。この計算の途中において求められた Curved jet の曲率の値と実測値が

図-6



求めた値との比較を行なったものが図-7である。いずれも実験値との一致は良好であるが、 $D/2B_0$ が小さいところでは X/D の計算値と実測値とが離れるのは噴流の potential Core の存在によるものと思われる。

水槽内水位も徐々に変化していき噴流流れの方向の変化ととも、噴流出口の間

図-7

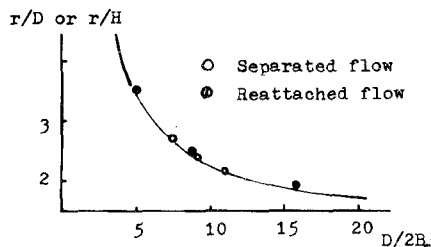


図-5

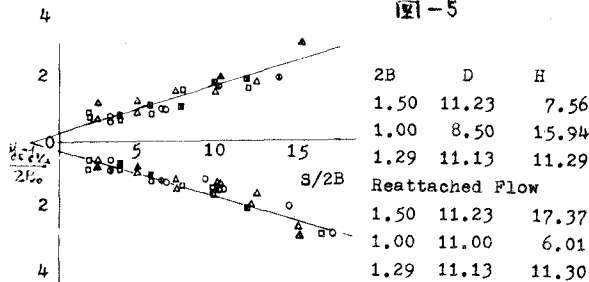
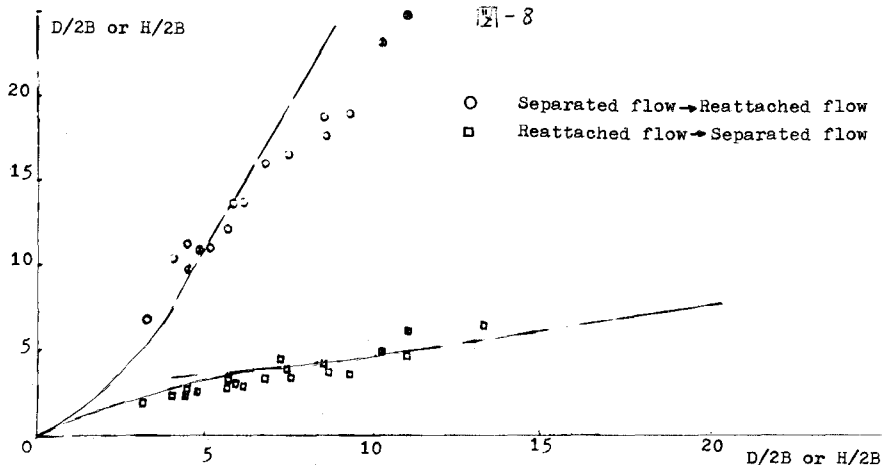


図-8



と $\frac{1}{2}B_0$ と深さ $\frac{1}{2}B_0$ の関係を図示したものが図-8である。図中の曲線は(10)式より求められ θ を用いて(10)式の限界条件を計算した結果である。Reattached Flow より Separated Flow への移行限界において、 $\frac{1}{2}B_0$ が5~6程度より小さいところでは計算値と実測値との一致が良くないのは、噴流流れに potential Core の存在によるものと考えられる。(計算結果において、この範囲では逆流流れによる最低圧力の生じる奥でまだ噴流の potential Core が存在することが認められる) また Separated Flow より Reattached Flow への流れの移行限界の計算値と実測値との合致があまり良好でないのは、 $\frac{1}{2}B_0$ が小さいところでは上述の2つと potential Core の存在によるものと考えられ、 $\frac{1}{2}B_0$ が大きい場合には、実験技術と水槽水位と除々に低下していくわけであるが、剝離領域内の水位を同時に変えることは困難であつて、剝離領域内の水が噴流流れを横断して流出していかねばならぬので、この攪乱によつて生じる圧力変動によるものでないかと思われる。なおこの際に、噴流出口の深さが大きくなるほど図-7より判るように噴流流れの曲率は大きく、その結果剝離領域内の圧力低下は小さいので、上述の圧力変動の影響が相対的に小さくなり、 $\frac{1}{2}B_0$ が大きくなるほど計算値と実測値の不一致の量も小さくなっていくものと推定される。

4 結 語

以上の実験結果および理論的考察によつて次のことが明らかとなつた。

- i Curved jet を理論的に考察する際に、従来 Spread parameter と Floating parameter として取扱つてゐるが流速分布の測定結果より Curved jet の Spread parameter は自由噴流のそれと較べて若干小さいが約6.00の一定値であることが認められた。
- ii 1の結果と若干の仮定の修正を行つた Dodd の流れの Model を用いて剝離領域の規模についての理論的結果は実測値と良好一致をみられた。
- iii 固体境界面と自由水表面とのように全く性質の異なる境界面が、噴流流れの流れ方向の變向に与える影響はほとんど差異が認められず、かつ2つの境界の影響を受ける場合に、噴流がどちら方向に偏向するか決定出来ない範囲の存在することが認められた。

以上の結果より水内などの下流部に生じる局所洗掘において下流の水位を調節することによつて、洗掘がある程度進行すると噴出する流れを噴き上げの状態(Separated Flow)に変えてかなり有効的に洗掘を軽減することが可能になることが出来るものと思われる。

参考文献

- 1) R.A. Sawyer; The flow due to a two-dimensional jet issuing parallel to a flat plate, Journal of Fluid Mechanics, Vol 9, 1960.
- 2) C. Bourque & B.G. Newman; Reattached of a two-dimensional incompressible jet to an adjacent flat plate, Aéro Quart, 1960
- 3) M.L. Albertson, Y.B. Dai, R.A. Jensen & H. Rouse; Diffusion of submerged jet, Tran. A.S.C.E. Vol 115, 1948.
- 4) 石原藤次郎, 志方俊之; 開水路急流部の水理学的性状に関する研究, 土木学会論文集, 第120号 1966
- 5) 岩田雄一, 土屋義人, 今村正孝; 水平噴流の特性と及ぼす境界の影響, 土木学会第16回年次学術講演概要 1961