

京都大学 工学部 正員 中川 博次
 京都大学 工学部 学生員 〇 祢津 俊久
 京都大学 工学部 学生員 上田 寛

1° はしがき

筆者らは、これまで管路内跳水の平均流特性に関する理論的および実験的考察を行ない、この跳水現象の内部機構を明らかにしようとした¹⁾。しかし、管路内跳水現象は上、下壁面によって拘束された局所的変動場であるのでその内部機構をさらに詳しく解明するには、乱れの挙動に関する研究をも行なう必要がある。幸い近年になって、2成分Hot-Film流速計の技術が著につき、実験室規模の乱れ計測にはきわめて優れた特性をもつことが示された²⁾。本論文は、管路内跳水のうち特にもぐり跳水(跳水始端でのピエゾ水頭が上壁高に等しく、空気通行がちょうど零の状態)の乱れの挙動をこの計器で計測し、乱れの内部構造を把握しようとしたものである。

2° 基本関係式

2次元流解析が可能な水平管路に発生したもぐり跳水を考える。この境界条件のもとで運動方程式および連続式から次式が導かれる。すなわち、(i) 運動量積分式

$$\frac{1}{\lambda} \int_0^1 \left\{ \left(\frac{U}{U_1} \right)^2 + \left(\frac{U^2 - V^2}{U_1^2} \right) \right\} d(y/b) + \frac{1}{F_1^2 \lambda} \left(\frac{h-D}{a} \right) + \frac{1}{\lambda R_e} \int_0^1 \left\{ \frac{U}{U_1} \left(\frac{\partial U}{\partial y} \right)_{y=0} - \left(\frac{\partial U}{\partial y} \right)_{y=1} \right\} dx = \beta_1 \quad (1)$$

ここで、 $\lambda = \alpha/D$ (角度), $F_1 = U_1/\sqrt{ag}$ (初期フルード数), $R_e = DU_1/\nu$ (初期レイノルズ数), h はピエゾ水頭, β_1 は初期運動量補正係数, U, u etc は大文字: 平均流速, 小文字: 乱れ流速成分, プライム: 乱れの R.M.S. 値 を表わす。

(ii) 平均エネルギー積分式

$$\begin{aligned} & \frac{1}{\lambda} \int_0^1 \left\{ \left(\frac{U^2 + V^2}{U_1^2} \right) \left(\frac{U}{U_1} \right) d(y/b) + 2 \cdot \frac{g}{U_1^3} (h-D) \right. \\ & + \frac{2}{\lambda} \int_0^1 \left\{ \frac{U}{U_1} d(y/b) \right\} \left\{ -\frac{UV}{U_1^2} \left(\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right) - \left(\frac{U^2 - V^2}{U_1^2} \right) \frac{\partial U}{\partial x} \right\} dx \\ & \left. + \frac{2}{\lambda} \int_0^1 \left\{ \frac{U^2 - V^2}{U_1^2} \frac{U}{U_1} + \frac{UV}{U_1^2} \frac{V}{U_1} \right\} d(y/b) \right\} = \alpha_1 \quad (2) \end{aligned}$$

ここで、 α_1 は初期エネルギー補正係数である。

(iii) 乱れエネルギー式

$$\begin{aligned} & \int_0^1 \left\{ -\frac{UV}{U_1^2} \left(\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right) - \frac{U^2 - V^2}{U_1^2} \frac{\partial U}{\partial x} \right\} d(y/b) \\ & = \frac{d}{d(x/b)} \int_0^1 \left\{ \frac{U^2 + V^2 + w^2}{2U_1^2} (U/U_1) + \frac{(U^2 + V^2 + w^2)U}{2U_1^3} \right\} d(y/b) \\ & + \int_0^1 \epsilon / U_1^3 d(y/b) \quad (3) \end{aligned}$$

$$\text{ここで、} \epsilon = 1/2 \cdot \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)^2 > 0$$

(乱れエネルギー-消散量) を表わす。

式(3)において、各項のオーダー比較より粘性による仕事、圧力変動による仕事は無視されている。いま、 $w \approx v$ と仮定すれば、式(1)~(3)の各項は2成分Hot-Film流速計ですべて既知の量となるので、乱れの挙動、特に興味のある乱れエネルギーの収支関係等を定量評価することができよう。

3° 実験方法および解析方法

直径17mm、高さ4mmの高圧ヘッドタンクが導か

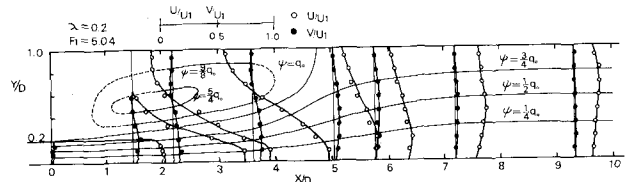


図-1 平均流速分布

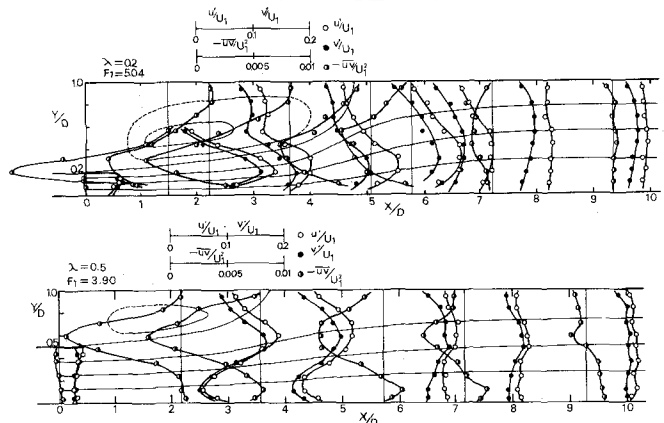


図-2 乱れ強度およびレイノルズ応力分布

い。roller境界面に沿って著しく発達して、非常に大きな分布をなす。図-4に示した $-\overline{uv}/U_*^2$ の等値線分布からも明らかである、この跳水場の流れをいかに関が局所的に歪ませているかを物語るものである。乱れがてい減し、跳水終端付近になると、 $-\overline{uv}/U_*^2$ の分布は $y/D=0.5$ を軸として反対称な分布をなし、次第に一様管流流の特性へと遷移して行くことがわかる。

(iv) 運動量関係 図-5は運動量関係を示したものであり、式(1)の左辺を2項ずつ示してある。乱れの運動量寄与分は大きくとも6%以内であり、それに壁面摩擦の項を加えてもせいぜい1割程度である、通常の運動量一次元解析でも1割程度の誤差を満足するものと思われる。

(v) 平均エネルギー関係 式(2)の左辺は順に平均流エネルギー(Mean E)、バリエーションによる仕事(P.W.)、乱れエネルギー発生(Production, P_i) および Reynolds応力による仕事(R.W.)を表わしたものであり、その総和を図-6に示す。この総和は、 $\lambda=0.2$ で約30%、 $\lambda=0.5$ で約15%の過剰に評価され、式(2)を満足するとはいえない。乱れエネルギー発生量 P_i は図7および図8よりrollerの前半が最大値に達するが、その付近(特に逆流部)の乱れ計測は極端に困難であって、 P_i の最大値を正確に決定できず、 P_i を過小に算定した結果と考えられる。したがって、以下の考察も定性的評価に限り、定量的評価をするにはさらに詳細な検証が必要であると思われる。

(vi) 乱れエネルギーの収支関係 乱れエネルギー消散量 ϵ をTaylor流に評価するには少なくとも1kHz程度の変動成分まで解析せねばならず、デジタル化では困難に近いから、ここではKolmogoroffの式を計算することによって算定した²⁾。図-7より、発生量 P_i が大きい割合ほど消散量 ϵ も大きくなるが、roller境界面付近は $P_i > \epsilon$ であって、乱れエネルギーは過剰となり、一方、 L_s 付近から下流では $P_i < \epsilon$ となり乱れエネルギーは不足し、両領域間には主流による乱れエネルギーの輸送が行なわれていることを示す。また、 $x < L_s$ のrollerの外側では $P_i > \epsilon$ であるが、roller内部は乱れエネルギー不足領域に相当し、roller境界面を通じて乱れエネルギーのy方向への拡散がかなり顕著であると推測される。各断面の ϵ の分布を評価することは容易でなかったから、

ここでは、式(3)の左辺(乱れの発生量 P_i)、右辺を2項(乱れの輸送 T)としたとき、 $D_i = P_i - T$ から乱れエネルギー収支関係を調べ、図-8に示した。大まかに言えば、 $D_i \approx P_i$ であるが、x方向に速度勾配が存在するから乱れエネルギーは二次的に輸送され、次第にエネルギー平衡状態に達することがわかる。

$T=0$ となる地点 x_0 は乱れエネルギー過剰領域から不足領域へと移行する点に相当し、 $\lambda=0.2$ の x_0 の方が小さいのはそれだけroller内部への乱れエネルギーの拡散が強いことを示唆し、乱れエネルギーの発生-輸送-消散システムにrollerが重要な役割を演じていると推測される。

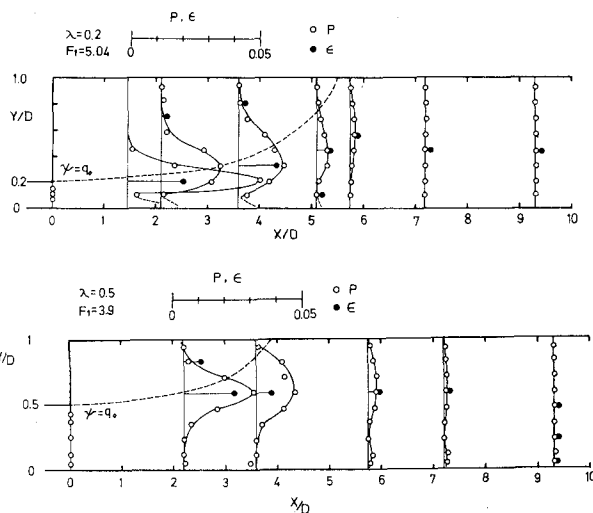


図-7 乱れエネルギーの発生と消散

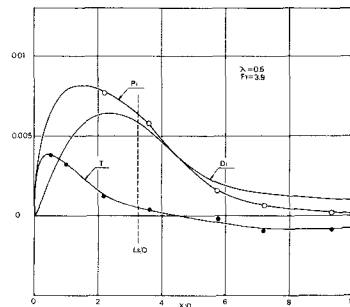
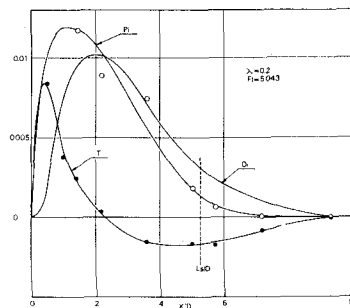


図-8 乱れエネルギーの収支関係

2) 中川, 祢津, 上田; 二成分熱濃度計による管流の乱れ計測について, 土木学会論文集, 1973

参考文献

1) 中川, 祢津; 管路内跳水に関する基礎的研究, 報告集第209, 土木学会, 1973
3) Rouse, H., et al; Turbulence Characteristics of the Hydraulic Jump, Proc. ASCE HY-1, 1958