

日本大学理工学部 正会員 栗津清蔵
日本大学理工学部 正会員 大津岩夫
日本大学大学院 准会員 吉田保

潜流 [wall jet (壁面噴流) と Submerged hydraulic jump (潜り跳水)] と跳水 (hydraulic jump) の流速特性を知ることが跳水式減勢工の設計上必要である。この報告は、長方形断面水路における潜り跳水の諸特性と内部の流速について論じ、さらに跳水の振動について説明を加えたものである。

潜り跳水 図-1(A)の跳水(hydraulic jump)の状態から下流水位を大きくしていくと図-1(B, C)の状態になる。図-1(B)の状態を潜り跳水(Submerged hydraulic jump)と定義し、その終点は水面における逆流の観察されなくなった点とする。¹⁾ 潜り跳水前後の水深間の関係は

$$X_3^2 = 2F_0^2 \frac{1-X_4}{X_4} + X_4^2 \quad \dots(1)$$

潜り跳水によるエネルギー損失は

$$\frac{H_L}{H_0} = \frac{2(X_3 - X_4) + (1 - \frac{1}{X_4^2})F_0^2}{2X_3 + F_0^2} \quad \dots(2)$$

で表わされ、¹⁾ 実験により検証を行なった結果、理論とは一致することが認められた。適度に潜ると跳水の場合よりエネルギー損失を大きくすることができる。

潜り跳水の長さ 台形断面水路の潜り跳水の長さ L_{sj} は $f(\frac{L_{sj}}{H_L}, \frac{H_L}{H_0}) = 0$ (parameter: 側壁勾配)

で表示された。¹⁾ これに従い実験値を整理し、次式を得た。

$$\log_{10} \frac{L_{sj}}{H_L} = -1.71 \frac{H_L}{H_0} + 1.58 \dots(3)$$

$$2.2 < F_0 < 8.6, 1 < X_3 < 7.4 (0 < S < 0.47)$$

$X_3 = 1$ としたときは図-2より長方形断面における跳水の長さに関する各実験公式にほぼ一致している。また、(3)式は Rao-Rajaratnam により提案された式²⁾とも、ほぼ同一の L_{sj} の値を与える。

最大流速 U_m の減衰 水路中央線に沿って X 方向の縦流速分布の測定を行ない、資料を $\frac{U_m - U_0}{U_0}$ と $\frac{X}{L_{sj}}$ とで整理すると図-3のようになる。これより L_{sj} の定義は妥当であることがわかる。

潜り跳水内の流速分布 実験値(実験範囲表-1)を wall jet でなされているように $\frac{U}{U_m}$ と $\frac{y}{Y}$ とで整理すると、 $5 \leq X_3 \leq 20 \sim 25$ の範囲で各 Run は同様な分布となり(図-4にその一例を示す)、近似的に相似な流速分布をしている。これについて Schwarz-Cosart³⁾ と類似な考えで検討する。

運動の方程式(4)(5)及び連続の式(6)は

$$\rho \left(\bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} \right) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} (-\rho \bar{u}' \bar{u}') + \frac{\partial}{\partial y} (-\rho \bar{u}' \bar{v}') \dots(4)$$

$$0 = -\rho g - \frac{\partial \bar{p}}{\partial y} - \frac{\partial}{\partial y} (\rho \bar{v}' \bar{v}') \dots(5)$$

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} = 0 \quad \dots(6)$$

self-preserving flow であると仮定して、次のようにおく

$$\left. \begin{aligned} \frac{\bar{u}}{U_m} &= f(\eta), \quad \frac{\bar{u}^2}{U_m^2} = g_1(\eta), \quad \frac{\bar{v}^2}{U_m^2} = g_2(\eta), \\ \frac{\bar{u}' \bar{v}'}{U_m^2} &= g_{12}(\eta), \quad \eta = \frac{y}{Y} \end{aligned} \right\} \dots(7)$$

(4), (5), (6), (7) 式より(8)式が得られる。

$$\begin{aligned} & \frac{Y}{U_m} \frac{dU_m}{dx} [f(\eta)]^2 - \frac{1}{U_m} \frac{d(U_m Y)}{dx} \frac{df(\eta)}{d\eta} \int_0^\eta f(\eta) d\eta + \frac{2Y}{U_m} \frac{dU_m}{dx} g_1(\eta) \\ & - \frac{dY}{dx} \eta \frac{dg_1(\eta)}{d\eta} - \frac{2Y}{U_m} \frac{dU_m}{dx} g_2(\eta) + \frac{dY}{dx} \eta \frac{dg_2(\eta)}{d\eta} + \frac{dg_{12}(\eta)}{d\eta} \\ & = - \frac{dY}{dx} \left(\frac{U_m}{\sqrt{gY}} \right)^2 \dots\dots(8) \end{aligned}$$

Self-preserving flow であるためには、 $f(\eta)$, $g_1(\eta)$, $g_2(\eta)$, $g_{12}(\eta)$ は X とは無関係であらねばならず、

(9), (10), (11) 式が成立すべきである。

$$\frac{dY}{dx} \left(\frac{U_m}{\sqrt{gY}} \right)^2 = 0 \quad \dots(9)$$

$$Y \propto X \quad \dots(10)$$

$$U_m \propto X^a \quad \dots(11)$$

Jet の拡散が自由水面の影響をうけることなく行なわれるようになれば wall jet として扱うことができ、

Schwarz-Cosart によると(11)式は $U_m \propto X^{-\frac{1}{2}}$ となるが、逆圧力勾配のある潜り跳水では(9)式は成立せず、さらに、与えられた F_0 , X_3 (or S) のもとで $\frac{U_m}{U_0}$ と X_3 とで資料を整理すると図-5のようになり、 a は X により変化し、 U_m の減衰状況は wall jet の場合より急速である。これは、重力の作用と表面滑の効果のため

め、乱れの機構とエネルギー減衰状況が wall jet の場合とは異なるためである。また、図-3 から 潜り跳水では $0 \leq x \leq L_{sj}$ で u_m は急速に減衰しており、 L_{sj} 内で潜り跳水によるエネルギー損失の大部分が完了する。従って、潜り跳水の場合は厳密に相似な分布(exactly similar)とはならない。しかしながら、例えば図-4 のように $5 \leq \frac{x}{L_{sj}} \leq 20 \sim 25$ で近似的に相似な分布(approximately similar)が得られているのは、この範囲では Y と X の関係 ($\frac{Y}{L_{sj}} \leftrightarrow \frac{x}{L_{sj}}$, Parameter F_0, X_3) は図-6 のように(10)式を満足しており、(11)式の Q も、この範囲では一定とみなせ、さらに $\frac{u_m}{\sqrt{gY}}$ が大で(8)式の右辺の効果も小さく、近似的に相似な分布となったものと推定される。

図-7 に筆者の潜り跳水の実験曲線 ($0 < S \leq 0.11$), Rajaratnam の潜り跳水の実験曲線²⁾ ($0.18 \leq S \leq 1.17$) と跳水の実験曲線²⁾ ($0.18 \leq \frac{Y}{L_{sj}} \leq 1.0$), 及び Schwarz-Cosart の wall jet の実験曲線³⁾ との比較を行なった。この図から、近似的に相似な無次元流速分布は潜り度 (S or X_3) の影響をうけ、潜り度が小さくなると跳水の曲線に近づき、大きくなると wall jet の曲線に近づくことがわかる。

潜り跳水の表面渦終点での流速分布 $x = L_{sj}$ で一様流からどの位それているかを検討するため $\bar{u}/u_m$ と y/h_0 とで資料を整理すると図-8 のようになり、ある距離 l だけ流下して $x = L_{sj} + l$ で一般の開水路の流れに一致する。 $x = L_{sj}$ 及び $L_{sj} < x < L_{sj} + l$ での乱れのエネルギーについては 今後検討する必要がある。

潜り跳水 (Submerged jump) から跳水 (hydraulic jump) への遷移 下流水深を下げて $X_3 \rightarrow 1$ ($\frac{h_3}{h_0} \rightarrow 1$) とすると、潜り跳水の状態になったり、露出射流が現れる跳水の状態になったりして 水路方向に振動している。この実験では $F_0 = 2.6$ で $X_3 < 1.7$, $F_0 = 3.7$ で $X_3 < 2.0$ で、このような状態をくりかえす。また一般の跳水においても水路方向に振動していることが観察され、跳水の特性の一つである。この振動の原因について考察する。

跳水の振動について⁴⁾ 変動流の運動量方程式⁴⁾ は

$$\rho \int_V \frac{\partial \mathbf{u}'}{\partial t} dV + \rho \int_S [(\tau_{00} \cdot \mathbf{W}') \mathbf{W}' + (\tau_{00} \cdot \mathbf{W}) \mathbf{W} + (\tau_{00} \cdot \mathbf{W}') \mathbf{W}']$$

$$- (\tau_{00} \cdot \mathbf{W}') \mathbf{W}'] ds = \int_S \tau_{01} p' ds - \rho \int_S \frac{\partial \mathbf{W}'}{\partial t} ds \quad \dots (12)$$

跳水部に適用すると

$$\int_0^{h_2} p' dy = -\rho \int_0^{h_2} (2u'u' + u'u' - \overline{u'u'}) dy - \rho \int_0^{L_1} \int_0^{h_2} \frac{\partial u'}{\partial t} dy dx \quad \dots (13)$$

但し、I 断面(図-9)で $\frac{W'}{W} \approx 0$, $\frac{p'}{p} \approx 0$, 壁面で $\bar{u} = 0$, $W' = 0$, 水面で $W' = 0$, $\rho \int_S \frac{\partial \mathbf{W}'}{\partial t} ds = 0$ とした。(13)式より II 断面の圧力変動 $\int_0^{h_2} p' dy$ が跳水内部の発生 II 断面の $\bar{u}u'$, u'^2 により生じ、この圧力変動が跳水の振動を誘起することが推論される。すなわち、常流側の圧力 P_0 が変動するため、これに対応する射流水深になろうとして水路方向に振動するものと考えられる。主流と表面渦との間の separation zone では W' が大きく、振動は跳水の渦の type, 従って Froude 数 F_0 に影響されるであろう。ゲート直下で跳水を起こすと、この振動のため 潜ったり露出射流が現れたりする。また、潜り跳水において h_3 の変動が大きいのも 潜り跳水をさへえる圧力 P_0 が変動するためと推論され、 $\frac{h_3}{h_0} \rightarrow 1$ となると潜ったり、露出射流が現れたりする。(図-10)

跳水や潜り跳水におけるこの非定常な不規則振動と変動流速の状況については、さらに検討する必要がある。

(記号) h : 水深 δ : 水路幅

$$U_0 = \frac{Q}{\delta h_0} \quad u_0 = \frac{Q}{\delta h_0} \quad F_0 = \frac{U_0}{\sqrt{g h_0}}$$

$$X_3 = \frac{h_3}{h_0} \quad X_4 = \frac{h_4}{h_0} \quad S = \frac{h_4}{h_2} - 1$$

$$H_0 = \frac{U_0^2}{2g} + h_0 \quad H_4 = \frac{U_4^2}{2g} + h_4$$

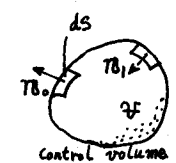
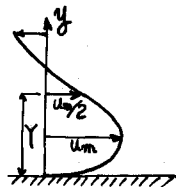
$$H_L = H_0 - H_4 \quad p = \bar{p} + p'$$

$$\mathbf{W} = \bar{\mathbf{W}} + \mathbf{W}' \quad \bar{\mathbf{W}} = \bar{u}\mathbf{i} + \bar{v}\mathbf{j} + \bar{w}\mathbf{k}$$

$$\mathbf{W}' = u'\mathbf{i} + v'\mathbf{j} + w'\mathbf{k}$$

τ_{00} : Control surface に垂直外向きの単位ベクトル

τ_{01} : 内向きの単位ベクトル



(文献)

- 1) 栗津・大津「台形水路の潜り跳水について」土木学会誌 1971
- 2) Rajaratnam, N. 「Hydraulic Jump」 Advances in Hydraulics vol. 4, (1967) (Edited by Chow)
- 3) Schwarz, W. H. and W. P. Cosart 「The Two Dimensional Turbulent Wall Jet」 J. of Fluid Mech. vol. 10, 1961
- 4) 栗津・大津「跳水の振動と跳水による床面圧力変動」日本理工・学術講演会講演集 1972

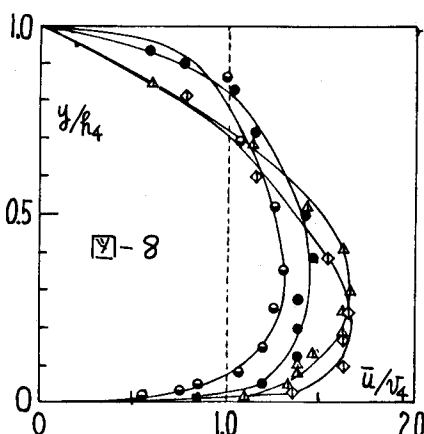
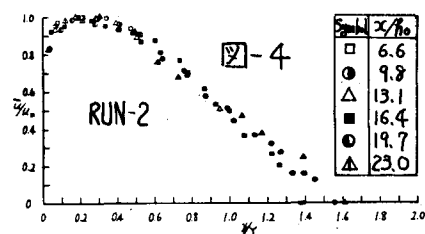
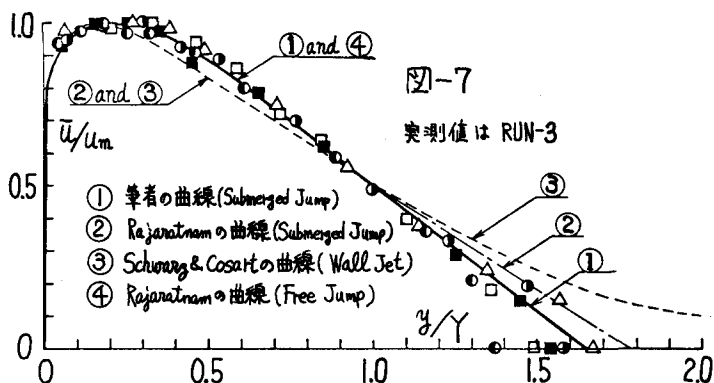
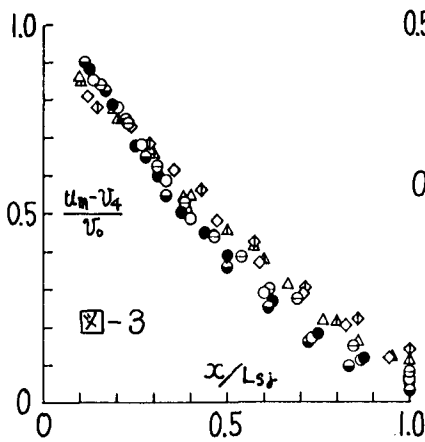
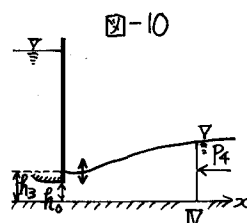
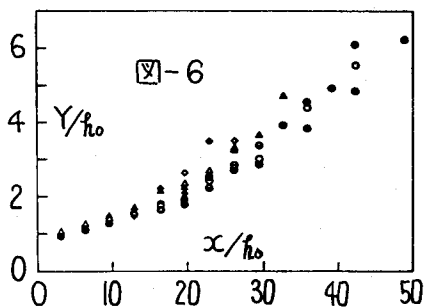
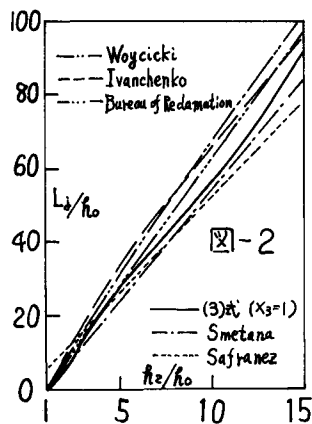
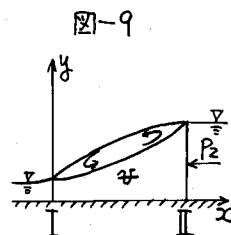
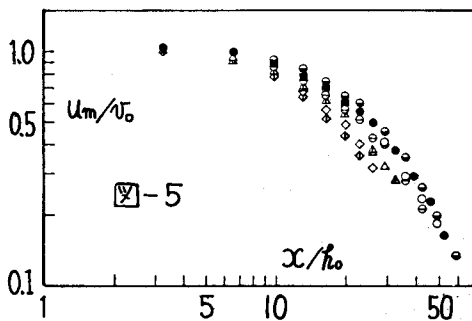
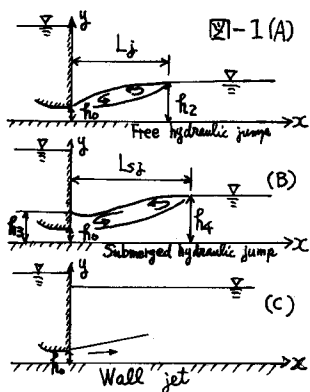


表-1 $b=15.0\text{cm}$
 $h_0=3.05\text{cm}$

RUN No.	Symbol	F_0	X_3
1	◇	3.48	2.74
2	◇	3.68	2.00
3	△	4.33	3.29
4	△	4.38	2.88
5	○	5.71	4.04
6	⊖	5.78	3.07
7	●	6.57	4.46
8	●	6.60	3.50