

# 跳水内部の空気混入特性に対する流入射流の影響

## EFFECT OF INFLOW CONDITION ON AIR ENTRAINMENT CHARACTERISTICS IN HYDRAULIC JUMP

高橋正行<sup>1</sup>・大津岩夫<sup>2</sup>

Masayuki TAKAHASHI and Iwao OHTSU

<sup>1</sup>正会員 博(工) 日本大学専任講師 理工学部土木工学科 (〒101-8308 東京都千代田区神田駿河台1-8)

<sup>2</sup>フェロー会員 工博 日本大学教授 理工学部土木工学科 (〒101-8308 東京都千代田区神田駿河台1-8)

The hydraulic jump is characterized by air entrainment and strong turbulence in the surface roller. However, little information is available on the air entrainment and the velocity field in hydraulic jumps. This paper presents the effect of inflow conditions on air entrainment in hydraulic jumps. It was found experimentally that the values of air-concentration ratio for a jump with a fully developed inflow condition are larger than those for jumps with a partially developed and an undeveloped inflow condition under given inflow Froude number and Reynolds number. Further, for jumps with the undeveloped and the partially developed inflows, jets entering the jumps are similar to the wall jet. While, for jump with the fully developed inflow, a jet entering the jump is lifted upward in a short distance, which is considered as the buoyancy effect of air bubbles.

**Key Words :** Hydraulic jump, inflow condition, supercritical flow, boundary layer development, air entrainment, air-concentration ratio

### 1. はじめに

射流のエネルギーを減勢させる有効な方法として跳水が利用されている。一般に跳水中には空気を取り込まれ、多量の気泡が混入した流れとなっている。跳水への流入射流は乱流境界層の発達状態によってUndeveloped inflow condition (以下, UDと略す), Partially developed inflow condition (PDと略す), およびFully developed inflow condition (FDと略す)に分けられる。すなわち, スルースゲート直下に跳水始端が位置する場合はUDの跳水, 乱流境界層が発達中のところに跳水始端が位置する場合はPDの跳水, 乱流境界層が水面まで到達した断面よりも下流側に跳水始端が位置する場合はFDの跳水が形成される(図-1参照)。

Resch and Leutheusser<sup>1), 2)</sup>は, UDとFDによって跳水内部の空気混入率【=空気の体積/(空気の体積+水の体積)】および流速特性に違いのあることを示した。しかし, この測定値は熱線流速計で得られているため測定精度上検討の余地がある。Chanson and Gualtieri<sup>3)</sup>は点電極型ボイド率計を用いてPDの跳水を対象に空気混入特性に対するレイノルズ数の効果を示しているが, FDとUDの跳水についての検討はなされていない。以上のことから, 跳水内部の空気混入特性と流速特性に対する流入射

流の乱流境界層の発達状態の影響については不明な点が多い。

跳水内部の空気混入特性や流速特性に対する流入射流の影響を知ることは跳水の内部特性解明のため, また水理設計上, 堰やゲートの下流に形成される跳水の特性を解明するために必要である。

この研究では, 長方形断面水平水路の跳水始端の乱流境界層の発達状態(UD, PD,およびFD)が跳水内部の空気混入特性におよぼす影響について実験的に検討した。また, 跳水内部の空気混入特性と流速特性との関係について検討した。

### 2. 実験方法

跳水内部の空気混入率および流速特性を明らかにする

表-1 実験条件

Inflow condition	$F_{r1}$	$R_e$ $\times 10^{-4}$	$h_1$	$x_1$	$x_{cp}$	$B$	$T$
	[-]	[-]	[m]	[m]	[m]	[m]	[°C]
FD	7.2	6.2	0.0178	1.27	0.96	0.40, 0.80	27
PD ( $\delta=0.5h_1$ )	7.2	6.2	0.0191	0.43	1.02	0.40	22
UD	7.2	6.2	0.0250	0.08	1.36	0.40	7

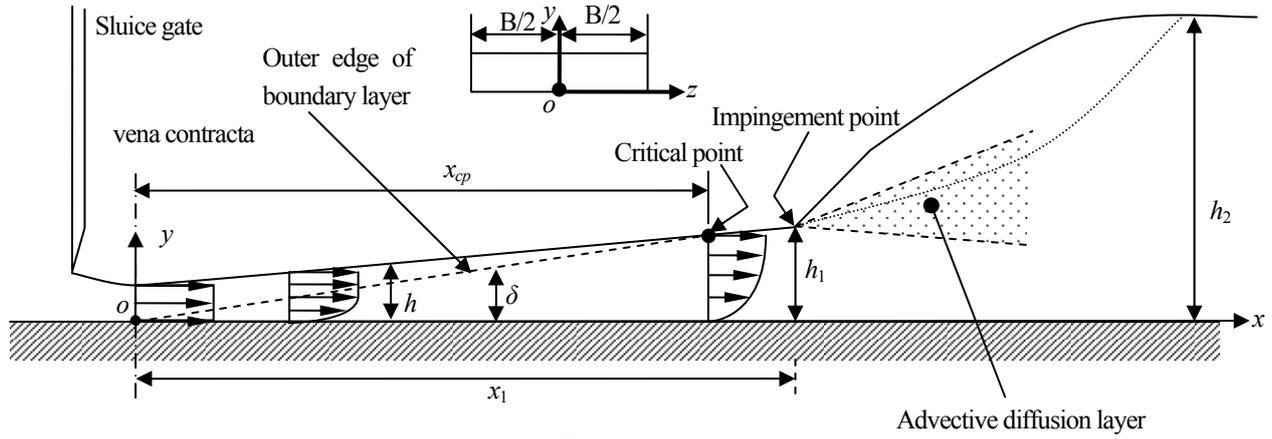


図-1 定義図

ため、スルースゲートを有する水路幅 $B$ の滑面長方形断面水平水路を用いて、定常跳水が形成されるフルード数 $F_{r1} [=V_1/(gh_1)^{1/2}]$ とレイノルズ数 $Re [=V_1 h_1 / (\mu_w / \rho_w)]$ を対象<sup>4)</sup>に表-1に示す条件のもとで実験を行った。ここに、 $g$ は重力加速度、 $h_1$ は跳水始端水深、 $T$ は水温、 $V_1$ は跳水始端での断面平均流速、 $\rho_w$ は水の密度、 $\mu_w$ は水の粘性係数である。跳水始端断面において同一な $F_{r1}$ と $Re$ の値のもとで乱流境界層の発達状態をFD, PD, UDそれぞれの場合に变化させるため、Ohtsu and Yasudaの方法<sup>5)</sup>を用いて射流の乱流境界層厚さ $\delta$ と水深 $h$ とを計算し、表-1の条件が得られるように流量、スルースゲートの開口高、水路下流端の堰高を調整した。空気混入率 $C$ の測定は2点電極型ボイド率計を用いた(採取間隔5ms, 採取時間45s)。また、流速の測定には2成分電磁流速計を主として用い(採取間隔50ms, 採取時間100s)、空気混入率が小さいところではプラントル型ピトー管およびレーザー流速計(採取間隔40ms, 採取時間164s)を併用した。跳水内部への空気混入状況の観察のため、高速ビデオカメラを使用した(露光時間1/2000s, 撮影速度2000fps)。なお、跳水内部の各測定断面において水路床( $y=0$ )から水面( $y=h$ )までの空気混入率 $C$ および流速 $u$ の測定値を次式に代入すると単位幅流量 $q$ が求められる。

$$q = \int_0^h (1-C) u dy \quad (1)$$

(1)式から得られた $q$ と全幅堰によって測定された単位幅流量 $q'$ が±15%以内で一致することを確認している。

### 3. スルースゲート下流側の射流の乱流境界層厚さと水深

長方形断面水平水路のスルースゲート下流側の射流に対して、Ohtsu and Yasuda<sup>5)</sup>は縮流部下流側の乱流境界層厚さ $\delta$ および水深 $h$ の解析的計算法を提示している。その方法を用いると、縮流部におけるフルード数 $F_{r0} (=V_0/(gh_0)^{1/2})$ ;  $h_0$ は縮流部水深;  $V_0$ は縮流部の断面平均流速)とレイノルズ数 $Re$ が与えられたとき、縮流部を原点とした流下方向の座標 $x$ での $\delta$ および $h$ を求めることがで

きる(図-1参照)。また、乱流境界層が水面に到達( $\delta = h$ )するcritical pointの位置 $x_{cp}$ (図-1)についても解析的に求めることができる。

跳水始端断面の流入射流の乱流境界層が十分に発達しているFDの跳水は縮流部から跳水始端断面までの距離 $x_1$ が $x_1 \geq x_{cp}$ となることで区分され、流入射流の乱流境界層が発達中のPDの跳水は $0 < x_1 \leq x_{cp}$ となることから区分される。さらに、跳水始端断面が縮流部に位置する場合( $x_1 = 0$ )は、UDの跳水が形成される。

### 4. 跳水内部の空気混入率分布

長方形断面水平水路における跳水内部の空気混入率 $C$ は次元解析的考察から次の関係で示されるものと考えられる。

$$C = F\left(\frac{x-x_1}{h_1}, \frac{y}{h_1}, \frac{z}{B/2}, F_{r1}, Re, We, \frac{\delta}{h_1}, \frac{B}{h_1}\right) \quad (2)$$

ここに、 $We$ はウェバー数 $[We = \rho_w V_1^2 h_1 / \sigma_{wa}]$ ;  $\sigma_{wa}$ は水の表面張力、 $x, y, z$ は座標である(図-1参照)。

ウェバー数 $We$ はliquid parameter $[=gu_w^4 / (\rho_w \sigma_{wa}^3)]$ <sup>6)</sup>を用いると次のように示される。

$$We = \left\{ \frac{g \mu_w^4 F_{r1}^2 Re^4}{\rho_w \sigma_{wa}^3} \right\}^{1/3} \quad (3)$$

liquid parameterは水と空気そのものの物性と重力加速度から決まり、ほぼ一定値を示すことから、 $We$ は $F_{r1}$ と $Re$ によって表示することができる<sup>7)</sup>。

また、アスペクト比が $B/h_1 \geq 10$ の場合、跳水の流況に対してアスペクト比の影響が無いものと考えられる<sup>8)</sup>。

以上より、流入断面のアスペクト比を $B/h_1 \geq 10$ の場合を対象にし、水路中央断面( $z=0$ )での空気混入率 $C$ を考えると、(2)は次のように示される。

$$C = F\left(\frac{x-x_1}{h_1}, \frac{y}{h_1}, F_{r1}, Re, \frac{\delta}{h_1}\right) \quad (4)$$

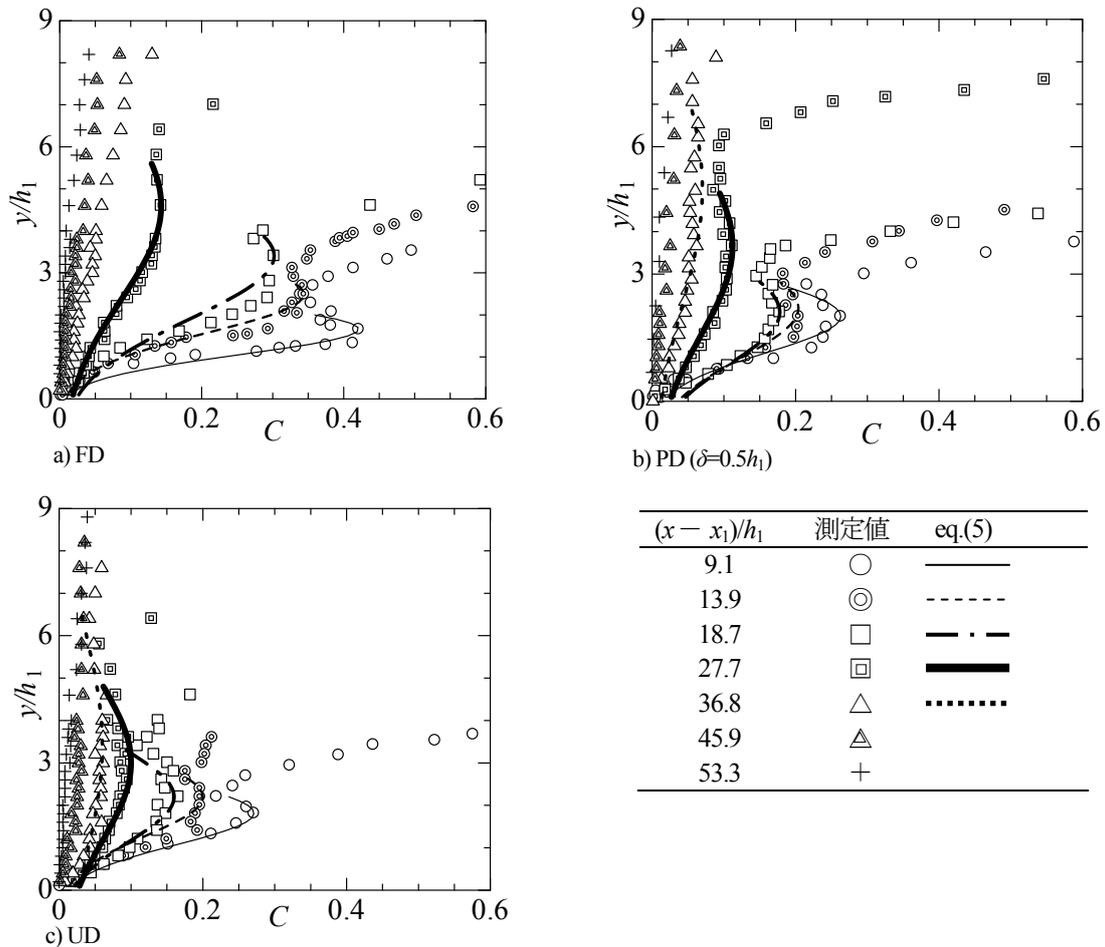


図-2 跳水内部の空気混入率分布

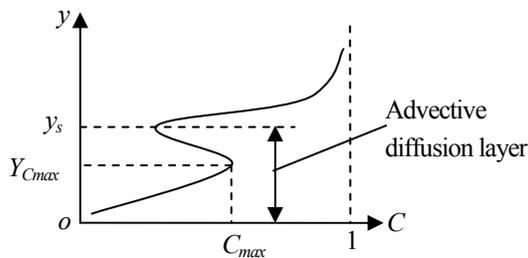


図-3 空気混入率分布概念図

与えられた跳水始端断面でのフルード数 $F_{r1}=7.2$ およびレイノルズ数 $R_e=6.2 \times 10^4$ に対して、流入射流の乱流境界層の発達状態がFD, PD, およびUDの場合の空気混入率 $C$ の実験値を(4)の関係に基づいて整理した結果を図-2に示す。図-2に示されるように、跳水始端断面近くでは空気混入率 $C$ が大きく、下流側に向かって $C$ の値は小さくなっている。

高速ビデオカメラを用いた跳水内部への空気混入状況の観察によると、流入射流の水面と跳水のローラー部(表面渦)先端との交点であるimpingement point(図-1参照)近くから空気を取り込まれている様子とローラー部の水面のbreakingによって空気を取り込まれている様子とが見られる。

Impingement point近くで取り込まれた気泡は跳水中で移流・拡散する。この移流・拡散領域での空気混入率 $C$ の値は図-3のように底面から $y$ の増加に伴い大きくなり、空気混入率の極大値 $C_{max}$ を経て $C$ の値は減少し、 $y=y_s$ で $C$ は極小値をとる。図-3の $y \leq y_s$ で $C_{max}$ が存在する領域をChanson<sup>9)</sup>はadvective diffusion layerと呼んでいる。

一方、跳水の上部( $y > y_s$ )では、ローラー部(表面渦)の水面のbreakingにより空気を取り込まれるため、 $C$ の値は増加して1に近づく。なお、advective diffusion layerは下流側へ向かうにつれて存在しなくなる。

advective diffusion layerの空気混入率分布については、Chanson<sup>9)</sup>は気泡の拡散モデルに基づいた次式を提案している。

$$C = C_{max} * \exp \left( - \frac{1}{4D^{\#}} \frac{\left( \frac{y}{h_1} + \frac{Y_{Cmax}}{h_1} \right)^2}{\frac{x - x_1}{h_1}} \right) \quad (5)$$

ここに、 $D^{\#}$ は無次元化された乱流拡散係数 $[D^{\#}=D_t / (V_1 * h_1)]$ ;  $D_t$ は空気混入流中の気泡の拡散係数]である。(5)式による曲線を図-2に示す。(5)式には実現象と異なる多くの仮定<sup>9)</sup>が含まれているが、図-2に示されるよう

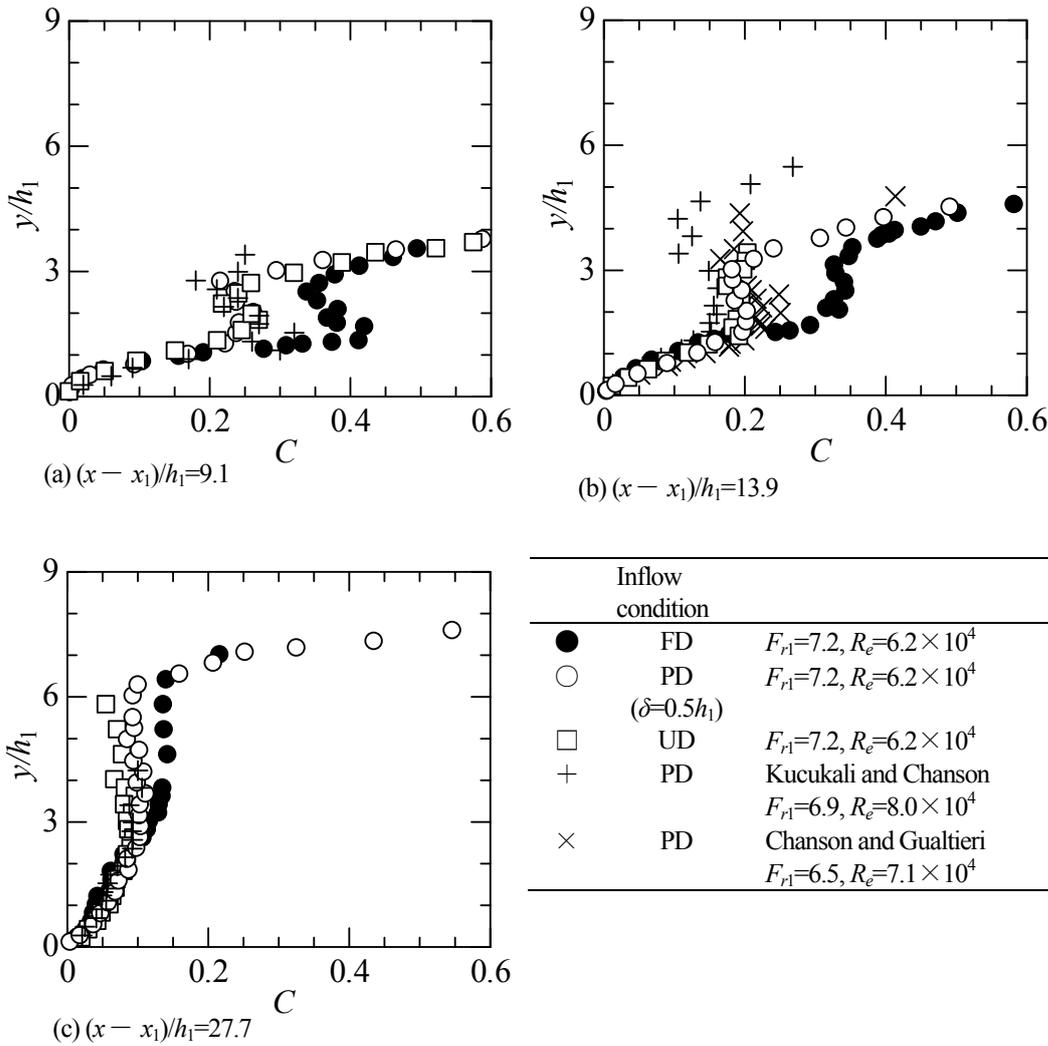


図-4 乱流境界層の発達状態による空気混入率分布の違い

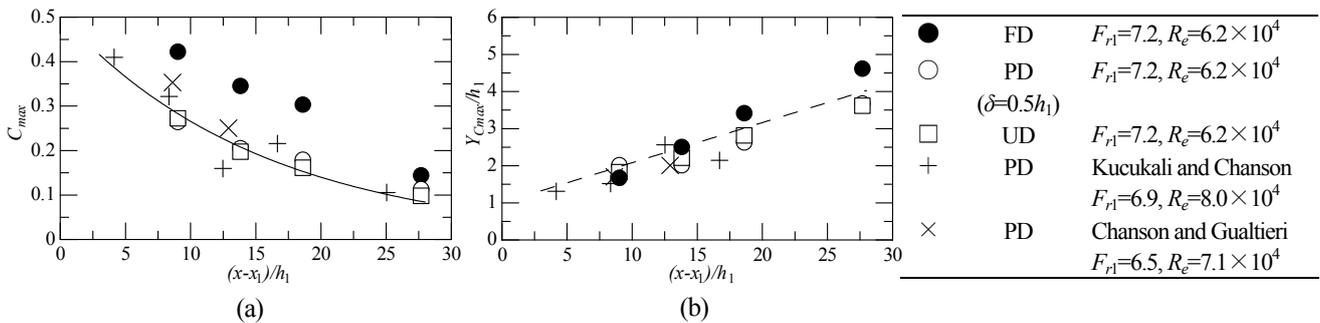


図-5  $C_{max}$ と $Y_{C_{max}}/h_1$ の流下方向への変化

に、FDの場合は $(x-x_1)/h_1 \leq 27.7$ 、PDとUDの場合は $(x-x_1)/h_1 \leq 36.8$ の範囲、すなわちadvective diffusion layerが存在する範囲 ( $y \geq y_s$ で $C_{max}$ が存在する範囲) で実験値は(5)式にほぼ従っている。

Chanson<sup>9)</sup>は流入射流がPDの跳水の場合、advective diffusion layerが存在し、FDの場合には存在しないとしている。しかしながら本実験によると、図-2に示されるように流入射流の乱流境界層の発達状態に関わらず、FD、PD、およびUDの全ての場合においてadvective diffusion layerが観察される。この相違の理由は、Chanson<sup>9)</sup>はFDのCとして

Resch and Leutheusser<sup>12)</sup>による空気混入率の測定値を用いているため、測定精度上の問題によるものと考えられる。

流入射流の乱流境界層の発達状態(UD, PD, およびFD)による空気混入率分布の変化を知るため、与えられた $F_{r1}$ 、 $R_e$ 、および $(x-x_1)/h_1$ のもとで実験値を整理すると図-4が得られる。本実験結果およびKucukali and Chanson<sup>10)</sup>とChanson and Gualtieri<sup>3)</sup>の実験結果共に、UDとPD( $\delta/h_1 = 0.5$ )の場合の空気混入率分布はほぼ一致している。

この図から、FDの空気混入率Cの値はUDとPD( $\delta/h_1 = 0.5$ )のCの値よりも大きいことが示される。

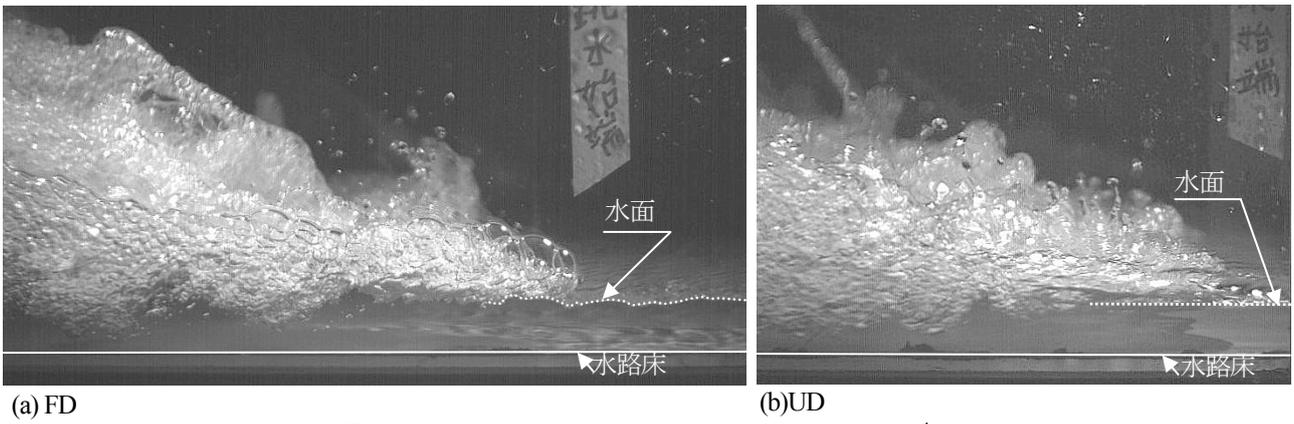


図-6 跳水始端での空気混入の様子 ( $Fr_1=7.2, R_e=6.2 \times 10^4$ )

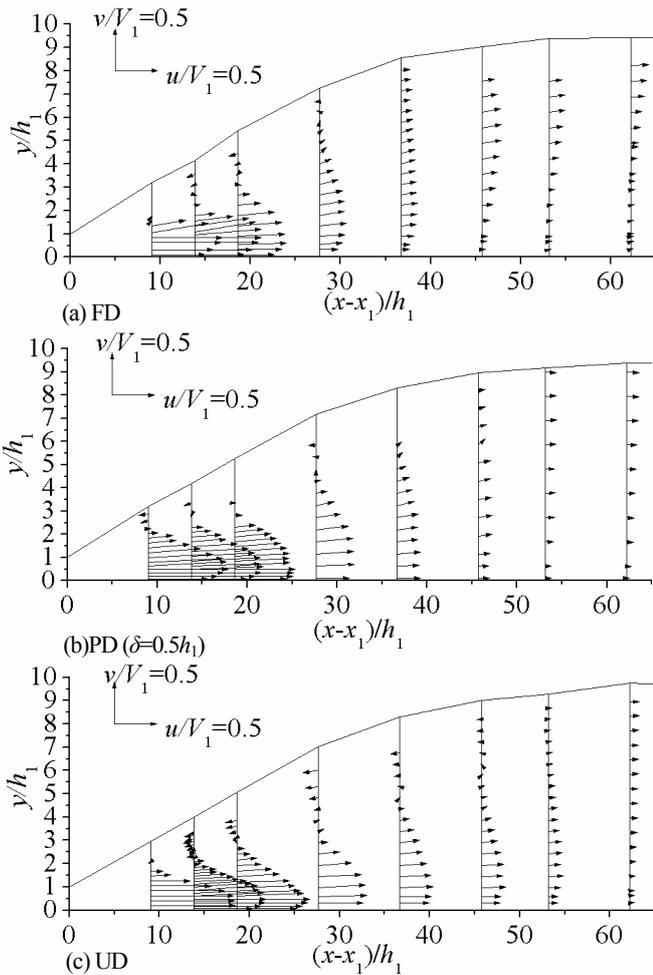


図-7 跳水内部の平均流速ベクトル

advective diffusion layer内の空気混入率の極大値 $C_{max}$ およびその位置 $Y_{Cmax}$ の流下方向の変化を図-5に示す。図-5(a)に示されるように、 $(x-x_1)/h_1$ の値が大きくなると $C_{max}$ の値は小さくなる。また、FDの $C_{max}$ の値はPD( $\delta/h_1=0.5$ )およびUDの $C_{max}$ の値よりも大きい。図-5(b)に示されるように、 $(x-x_1)/h_1$ の値が大きくなると $Y_{Cmax}/h_1$ の値も大きくなる。また、 $(x-x_1)/h_1$ の値が大きくなるに伴い、FDの $Y_{Cmax}/h_1$ の値はPDおよびUDの $Y_{Cmax}/h_1$ の値よりも大きくなる。

図-4および図-5より、advective diffusion layer内( $y \leq$

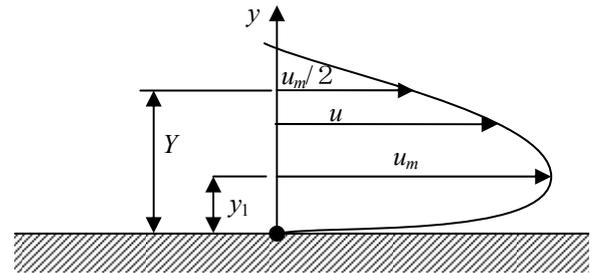


図-8 Yとy1の定義図

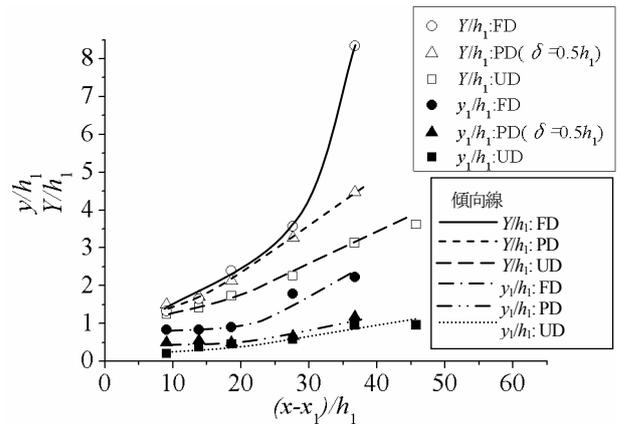


図-9  $y_1/h_1$ と $Y/h_1$ の流下方向への変化

$y_1$ )の空気混入率 $C$ はFDの方がPDおよびUDに比べて大きい。すなわち、impingement point付近から取り込まれる空気混入量は流入射流の乱流境界層の発達状態の影響を受け、空気混入率 $C$ の値はFDの跳水の方がUDおよびPD( $\delta/h_1=0.5$ )の跳水よりも大きい値を示す。

高速ビデオカメラを用いた観察によると、図-6に示されるようにFDの場合は流入射流に水面変動の存在を確認することができ、UDの場合は流入射流の水面変動がないことが確認された。また、Ohtsu and Yasuda<sup>5)</sup>はスルース・ゲート下流側における射流の乱流境界層の発達状態と乱れ強さとの関係を示しており、水面近くの乱れ強さはFDの場合 $\sqrt{u'^2}/V_1=6.9\%$ 、 $\delta=0.5h_1$ のPDの場合 $\sqrt{u'^2}/V_1=1.8\%$ 、UDの場合 $\sqrt{u'^2}/V_1=1.6\%$ となっている。なお、Resch and Leutheusser<sup>2)</sup>によると、水面近くの乱れ

強さはFDの場合  $\sqrt{u^2}/V_1 = 5.7\%$ , UDの場合  $\sqrt{u^2}/V_1 = 0.7\%$  となっている. すなわち, FDの場合, 乱流境界層が水面に到達しているため水面付近の乱れはPDおよびUDの場合よりも大きい. このことから, 跳水始端 (impingement point, 図-1参照) から取り込まれる advective diffusion layer内 ( $y \leq y_s$ ) の空気の混入量は流入射流の水面付近の乱れの影響を受けているものと考えられる.

Ervine and Falvey<sup>11)</sup>はpoolに突入するwater jetの乱れ強さが大きくなるとpoolに混入する空気の量が大きくなることを示している. このことは, 流入射流の乱れが跳水内部の空気混入率に影響をおよぼすことと類似な現象であると考えられる.

## 5. 跳水内部の流速分布

与えられたフルード数  $F_{r1} = 7.2$  およびレイノルズ数  $Re = 6.2 \times 10^4$  に対して, FD, PD, およびUDの場合の跳水内部の流速ベクトルを図-7に示す. 図に示されるように, 跳水内へ流入したジェットは流入射流の乱流境界層の発達状態がUDおよびPDの場合, wall jetと類似であるのに対して, FDの場合は短区間で上昇している.

各断面のx方向の流速uの最大流速を  $u_m$  とし,  $u = u_m/2$  となるyをジェットの代表幅Yとして表示する(図-8参照). また, 各断面での最大流速の生じる高さを  $y_1$  とする(図-8参照).  $Y/h_1$  および  $y_1/h_1$  の流下方向の変化を図-9に示す. 図に示されるように, 各断面の  $Y/h_1$  および  $y_1/h_1$  の値はFDの方がUDおよびPDに比べて大きく, FDの方がUDおよびPDよりもジェットが短区間で拡がりながら上昇していることを示している.

また, advective diffusion layer内においてFDの空気混入率CがUDおよびPDのCよりも大きい領域 (図-4参照) では, FDの場合の流れの方向がUDおよびPDの場合よりも上向きとなっている(図-7参照). すなわち, FDの方がUDおよびPD( $\delta/h_1 = 0.5$ )よりも空気混入率Cが大きく, したがって気泡の浮力効果も大きい. このため, FDの場合の方がUDおよびPDの場合よりも流れが上向きとなり短区間で上昇したのと考えられる.

## 6. まとめ

跳水始端断面のフルード数  $F_{r1} = 7.2$ , レイノルズ数  $Re = 6.2 \times 10^4$  を対象に跳水内部の空気混入特性に対する流入射流の乱流境界層の発達状態の影響を検討した結果を以下に要約して示す.

- FD (Fully developed inflow), PD (Partially developed inflow), およびUD (Undeveloped inflow)のいずれの

場合においても, Advective diffusion layerが形成されることを明らかにした.

- Advective diffusion layer内の空気混入率Cの大きさについては, UDとPD ( $\delta/h_1 = 0.5$ ) の場合はほぼ等しい大きさになり, FDの場合のCはUDおよびPD ( $\delta/h_1 = 0.5$ ) の場合よりも大きな値となることを示した. これは, 流入射流の水面近くの乱れがimpingement pointから取り込まれる空気混入量に影響をおよぼすため, FDの空気混入率CがUDとPDのCより大きくなったのと考えられる.
- 跳水内へ流入したジェットについては, FDの場合はPD ( $\delta/h_1 = 0.5$ ) およびUDの場合よりも短区間で拡がりながら上昇する. これは, FDの場合はPDおよびUDの場合よりもAdvective diffusion layer内の空気混入率が大きいため, 気泡の浮力効果が大きくなることによるものと考えられる.

## 参考文献

- 1) Resch, F.J., and Leutheusser, H. J.: Reynolds stress measurements in hydraulic jumps, *J. Hydr. Res.*, Vol.10, No.4, pp.409-429, 1972a.
- 2) Resch, F.J., and Leutheusser, H. J.: Le ressaut hydraulique: mesures de turbulence dans la region diphasique, *La Houille Blanche*, Vol.4, pp.279-293, 1972b.
- 3) Chanson, H., and Gualtieri, C.: Similitude and scale effects of air entrainment in hydraulic jumps, *J. Hydr. Res.*, Vol.46, No.1, pp.35-44, 2008.
- 4) Ohtsu, I., Yasuda, Y., and Takahashi, M.: Discussion of Particle image velocity measurements of undular and hydraulic jumps, *J. Hydr. Engrg.*, to be published.
- 5) Ohtsu, I., and Yasuda, Y.: Characteristics of supercritical flow below sluice gate, *J. Hydr. Engrg.*, Vol.120, No.3, pp.332-346, 1994.
- 6) Wood, I. R.: *Air entrainment in free-surface flows*, Balkema, Rotterdam, 1991.
- 7) 高橋正行, 安田陽一, 大津岩夫: 階段状水路における空気混入射流の特性に対するレイノルズ数の影響, 水工学論文集, 50巻, pp.871-876, 2006.
- 8) Ohtsu, I., Yasuda, Y., and Gotoh, H.: Flow conditions of undular hydraulic jumps in horizontal rectangular channels, *J. Hydr. Engrg.*, Vol.129, No.12, pp.948-955, 2003.
- 9) Chanson, H.: *Air bubble entrainment in free surface turbulent shear flows*, Academic Press, London, U.K., 1997.
- 10) Kucukali, S., and Chanson, H.: Turbulence in hydraulic jumps: Experimental measurements., *Report No. CH62/07*. Dept. Civil Engrg., The Univ. of Queensland, Brisbane, Australia.
- 11) Ervine, D. A., and Falvey, H. T.: Behaviour of turbulent water jets in the atmosphere and in plunge pools, *Proc. Instn. Civ. Engrs.*, Part 2, Vol. 83, pp.295-314, 1987.

(2008. 9. 30受付)