

## 跳水内部の空気混入特性 Characteristic of Air Entrainment in Hydraulic Jumps

○菅谷 一平<sup>1</sup>, 高橋 正行<sup>2</sup>  
\*Ippei Sugaya<sup>1</sup>, Masayuki Takahashi<sup>2</sup>

Abstract: In this report, the air entrainment region is classified into an advective diffusion region and a breaking region. Effects of inflow conditions on the air entrainment in hydraulic jumps are shown. The distribution of air concentration ratios with high-speed video camera images of the supercritical inflow reveals the air entrainment mechanism in both the advective diffusion and the breaking regions.

### 1. はじめに

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(white water)となっている。跳水への空気混入メカニズムや跳水内部の空気混入特性については不明な点が多く、この解明が必要である。

スルースゲート下流側に形成される跳水への流入射流は乱流境界層の発達状態(Fig.1)によって Undeveloped inflow (以下 UD と略す), Partially developed inflow (PD と略す), および Fully developed inflow (FD と略す) に分けられる。

従来の研究において Resch and Leutheusser<sup>[1]</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、この理由は不明であり、さらに実験値は熱線流速計で得られているため、空気混入率の測定としてはその精度に問題がある。

Chanson and Gualtieri<sup>[2]</sup>は点電極型ボイド率計を用いて PD の流況のみを対象に空気混入特性を示しているが、FD と UD についての検討はなされていない。高橋・大津<sup>[3]</sup>と Ohtsu et al.<sup>[4]</sup>は点電極型ボイド率計を用いて、一定の跳水始端のフルード数のもとで、UD, PD, および FD によって跳水内部の空気混入率が変化することを示している。しかしながら、広範囲のフルード数に対して、乱流境界層の発達状態(UD, PD, および FD)が跳水中へ空気を取り込む機構や跳水内部の空気混入特性に与える影響については不明である。

この研究では、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、広範囲なフルード数に対して実験的に検討し、跳水内部への空気混入メカニズムについて明らかにしようとしたものである。

### 2. 実験方法

スルースゲートを有する水路幅  $B$  の長方形断面水

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  $R_e=[V_1h_1/\nu]$  を対象に、Table 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、 $V_1$  は跳水始端断面の断面平均流速、 $\nu$  は水の動粘性係数である。FD の場合の跳水始端断面を  $x_1=2x_{cp}$  ( $x_{cp}$  は critical point の長さ)、UD の場合は  $x_1=0$ 、PD の場合は  $\delta/h_1=0.5, 0.8$  となる  $x_1$  とした。射流の乱流境界層厚さ  $\delta$  と水深  $h$  は Ohtsu and Yasuda の方法<sup>[5]</sup>を用いて計算し、Table 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。跳水内部の空気混入率の測定には 2 点電極型ボイド率計(プローブ直径 25 $\mu$ m, 採取間隔 50 $\mu$ s, 採取時間 20s)を使用した。

### 3. 跳水内部の空気混入率分布

アスペクト比  $B/h_1 \geq 10$ ,  $R_e \geq 6.0 \times 10^4$  の場合、水路中央面( $z=0$ )での跳水内部の空気混入率  $C$  は次の関係で示される<sup>[3]</sup>。

$$C = f\left(\frac{y}{h_1}, \frac{x-x_1}{h_1}, \frac{\delta}{h_1}, F_{r1}\right) \quad (1)$$

Impingement point(Fig.1)近くで取り込まれた気泡は跳水中で移流・拡散する。そのため、跳水内部の空気混入率  $C$  の値は  $y$  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  $y=y_s$  まで減少し、 $y=y_s$  で極小値  $C_{min}$  をとる(Fig.2)。Figure 2 のように  $C_{max}$ ,  $C_{min}$  が存在す

Table 1. Experimental conditions.

Inflow Condition	$F_{r1}$ [-]	$R_e \times 10^{-4}$ [-]	$B$ [m]	$\delta/h_1$ [-]
UD	4.2~8.2	6.2	0.4	0
PD	5.2~8.2	6.2	0.4	0.5 0.8
FD	4.6~8.2	6.2	0.4	1

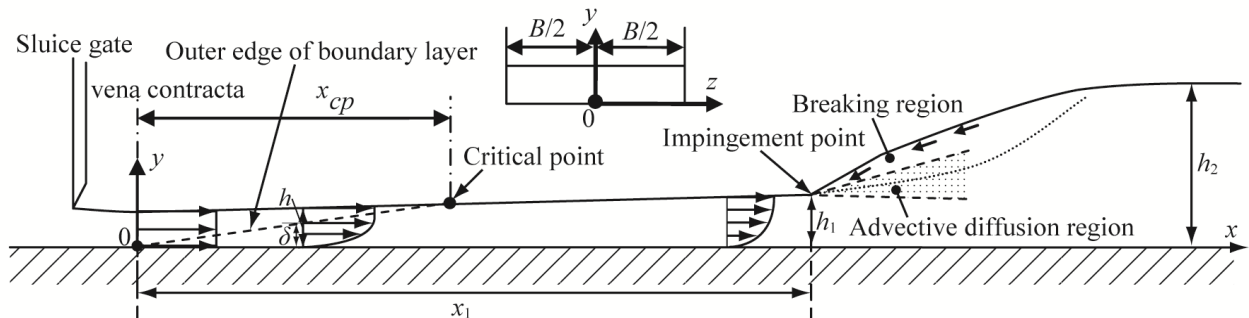


Figure 1. Definition sketch.

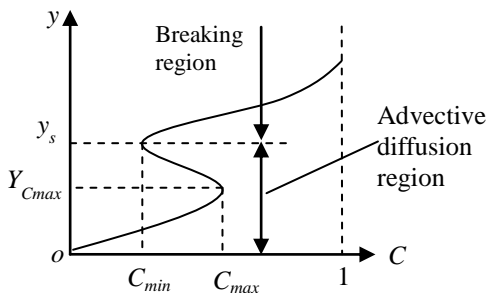


Figure 2. Definition sketch for advective diffusion and breaking regions.

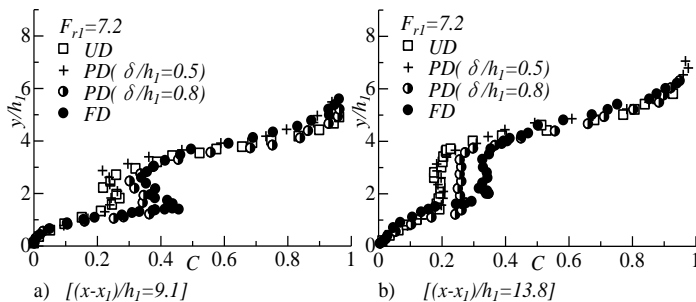


Figure 3. C-distribution for  $F_{r1}=7.2$  with (a)  $(x-x_1)/h_1=9.1$  and (b) 13.8.

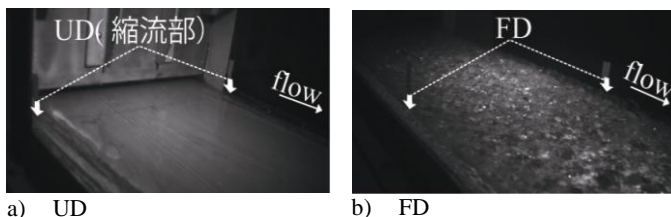


Figure 4. High-speed video camera images of water surface for supercritical inflows.

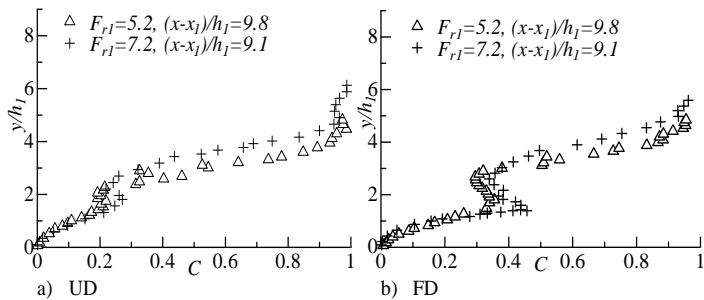


Figure 5. C-distribution for (a)UD and (b)FD.

る  $y \leq y_s$  の領域を Chanson<sup>[6]</sup>は advective diffusion region と呼んでいる。一方、 $y > y_s$  の領域では、跳水の表面渦水面の breaking により空気を取り込まれるため、 $y$  の増加に伴い  $C$  の値は 1 に近づく。この領域を breaking region と呼ぶことにする<sup>[3]</sup> (Fig.2).

与えられた  $F_{r1}$  および  $(x-x_1)/h_1$  に対して UD, PD[ $\delta/h_1=0.5$  の PD(PD<sub>0.5</sub>) と略す],  $\delta/h_1=0.8$  の PD(PD<sub>0.8</sub>) と略す], FD による  $C$  分布の変化の一例を Fig.3 に示す。Figure 3 に示されるように、advective diffusion region 内で UD と PD<sub>0.5</sub> の場合の  $C$  分布はほぼ一致している。また FD の  $C$  の値は、UD と PD<sub>0.5</sub> の  $C$  の値よりも大きい。これは、FD の場合、境界層が水面にまで到達し、水面の凹凸を伴う変動を誘起 (Fig.4 b) し、impingement point (Fig.1) から取り込まれる空気量が多くなったためと考えられる。さらに、PD<sub>0.8</sub> の  $C$  の値は UD

と FD の  $C$  の中間の値を示す。これは、PD<sub>0.8</sub> の場合、乱れが間欠的に水面まで達し、水面の凹凸を伴う変動が間欠的に誘起されたためと考えられる。一方、breaking region 内の  $C$  分布は impingement point での乱流境界層の発達状態に関わらず同一の分布を示す (Fig.3).

与えられた乱流境界層の発達状態 (UD, PD, FD) および  $(x-x_1)/h_1$  に対して  $F_{r1}$  による  $C$  分布の変化の一例を Fig.5 に示す。Advective diffusion region 内の  $C$  の値は、 $F_{r1}$  が増加すると増加する。これは、UD, PD, FD 共に  $F_{r1}$  が増加すると表面渦の水面勾配と流入射流の流速が大きくなり、impingement point から取り込まれ移流される空気量が大きくなったためと考えられる。さらに、FD の場合は、流入射流の水面での乱れ強さ  $\sqrt{u'}$  ( $u'$  は流下方向の変動流速) が  $F_{r1}$  と共に大きくなり、流入射流の水面の凹凸を伴う変動も  $F_{r1}$  と共に大きくなるため impingement point から取り込まれる空気量が増加したものと考えられる。一方、breaking region 内の空気混入量は  $F_{r1}$  の増加に伴い増加している。これは、与えられた  $h_1$  に対して  $F_{r1}$  が増加すると跳水終端の水深  $h_2$  が増加し、これに伴い跳水の表面渦の水面勾配が大きくなり、砕波によって breaking region に取り込まれる空気混入量が大きくなったためと考えられる。

#### 4. まとめ

跳水内部への空気混入特性について解明した結果を以下に示す。

跳水内部の空気混入率分布および空気混入機構に基づき、空気混入領域を advective diffusion region と breaking region に区分できた。

Advective diffusion region 内の  $C$  の大きさは、与えられた  $F_{r1}$  に対して、乱流境界層の発達状態の影響を大きく受け、FD が UD より大きい  $C$  を示した。これは、流入射流の水面の凹凸を伴う変動の大きさが advective diffusion region 内の  $C$  の大きさに影響を与えたものと考えられる。一方、与えられた  $F_{r1}$  に対して、breaking region 内の  $C$  の大きさは乱流境界層の発達状態の影響を受けない。

乱流境界層の発達状態を同一にした場合、 $F_{r1}$  の増加に伴い advective diffusion region および breaking region 内の  $C$  は増加する。これは、 $F_{r1}$  の増加によって表面渦の水面勾配と流入射流の流速が大きくなったためと考えられる。さらに、FD の場合は流入射流の乱れ強さが  $F_{r1}$  の増加と伴に大きくなったことも影響したものと考えられる。

#### 5. 参考文献

- [1] Resch, F.J., Leutheusser, H. J. (1972). Le ressaut hydraulique: mesures de turbulence dans la region diphasique, *La Houille Blanche*, 4, 279-293.
- [2] Chanson, H., Gualtieri, C. (2008). Similitude and scale effects of air entrainment in hydraulic jumps, *J. Hydr. Res.*, 46(1), 35-44.
- [3] 高橋正行, 大津岩夫. (2009). 跳水内部の空気混入特性に対する流入射流の影響, *水工学論文集*, 53, 985-990.
- [4] Ohtsu, I., Yasuda, Y., Takahashi, M. (2009). Discussion of Similitude and scale effects of air entrainment in hydraulic jumps, *J. Hydr. Res.*, 47(2), 285-287.
- [5] Ohtsu, I., Yasuda, Y. (1994). Characteristics of supercritical flow below sluice gate, *J. Hydr. Engrg.*, 120(3), 332-346.
- [6] Chanson, H. (1997). *Air bubble entrainment in free surface turbulent shear flows*, Academic Press, London, U.K.