

H-4

ゲート直下に形成される跳水の空気混入特性に対するフルード数とレイノルズ数の影響  
**Effects of Froude and Reynolds Numbers on Air Entrainment Characteristics in Hydraulic Jumps with Undeveloped Inflow Conditions**

○ 佐久間光希<sup>1</sup>, 佐藤柳言<sup>2</sup>, 高橋正行<sup>2</sup>

\*Koki Sakuma<sup>1</sup>, Ryugen Satoh<sup>2</sup>, Masayuki Takahashi<sup>2</sup>

Abstract: For hydraulic jumps with an undeveloped inflow condition, the magnitude and the distribution of the air concentration have been investigated for a wide range of Froude and Reynolds numbers. Air entrainment regions in jumps are divided into the advective diffusion and the breaking regions. This study shows the effects of Froude and Reynolds numbers on the air concentration distributions in the jumps for the advective diffusions and the breaking regions.

1. まえがき

スルースゲート下流側に形成される射流では縮流部 (vena contracta) が形成され、縮流部では水路床極近傍を除いて流速が一様分布となる<sup>[1]</sup>。Fig. 1 に示されるような跳水始端が縮流部に位置する場合を対象に、与えられたレイノルズ数に対して、跳水内部の空気混入率  $C$  [= 空気の体積 / (空気の体積 + 水の体積)] の大きさと分布に対するフルード数の影響が示された<sup>[2]</sup>。また、与えられたフルード数に対して、跳水内部の空気混入率  $C$  の大きさと分布に対するレイノルズ数の影響が示された<sup>[3]</sup>。しかしながら、跳水の空気混入率  $C$  に対する広範囲なフルード数とレイノルズ数の影響について、さらに検討する必要がある。

本研究は、長方形断面水平水路のスルースゲート直下に形成される跳水の空気混入特性に対するフルード数とレイノルズ数の影響を明らかにしようとしたものである。

2. 実験

実験は、スルースゲートを有する水路幅  $B = 0.600$  m の長方形断面水平水路 (Fig. 1 参照) を用いて、Table 1 に示す跳水始端のフルード数  $F_{r1} [= V_1 / \sqrt{gh_1}]$  とレイノルズ数  $Re [= q/\nu]$  を対象に、流量  $Q$ 、スルースゲートの開口高  $a$  を調整して行われた。ここに、 $V_1$  は跳水始端の断面平均流速、 $g$  は重力加速度、 $h_1$  は跳水始端水深、 $q$  は単位幅流量、 $\nu [= \mu_w / \rho_w]$  は水の動粘性係数、 $\mu_w$  は水の粘性係数、 $\rho_w$  は水の密度、 $x$  は縮流部を原点とする流下方向の座標、 $y$  は水路床を原点とする鉛直上向きの座標、 $z$  は水路横断方向の座標である。跳水の表面渦先端が時間平均的に縮流部 (Fig. 1) の断面に位置するように、水路下流端の堰高を調整した。縮流部はスルースゲートから流下方向に  $2a$  の位置<sup>[4]</sup>とした。

跳水内部の空気混入率  $C$  は、二点電極型ボイド率計 (採取間隔  $50 \mu\text{s}$ 、採取時間  $45$  s) を用いて、水路中央面 ( $z = 0$ ) において測定された。

3. 跳水内部の空気混入特性

跳水始端が縮流部に位置する場合を対象に、代表長さとして跳水始端水深  $h_1$ 、代表流速として跳水始端の断面平均流速  $V_1$  を選ぶと、長方形断面水平水路の水路中央面 ( $z = 0$ ) での跳水内部の空気混入率  $C$  は、

$$C = f(x/h_1, y/h_1, F_{r1}, Re, We, B/h_1) \quad (1)$$

の関係で支配されるものと考えられる。ここに、 $We [= \rho_w V_1^2 h_1 / \sigma_{wa}]$  はウエバー数、 $\sigma_{wa}$  は水の表面張力である。 $We$  は liquid parameter  $[= g\mu_w^4 / (\rho_w \sigma_{wa}^3)]$ <sup>[5]</sup> を用いると、

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

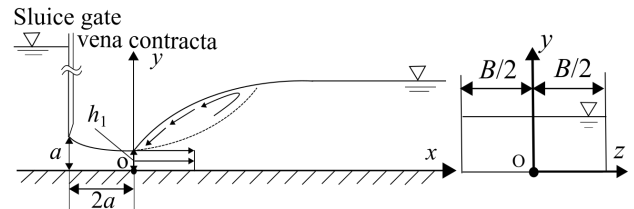


Figure 1. Definition sketch for the hydraulic jump

Table 1. Experimental conditions

Inflow condition	$F_{r1} (-)$	$Re \times 10^{-4} (-)$	$B/h_1 (-)$
UD	5.2	1.2-9.8	18-73
UD	7.2	1.2-10	22-91

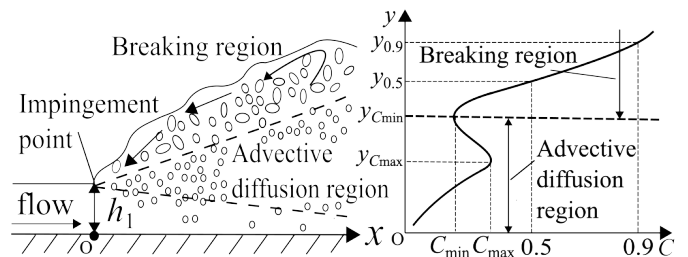


Figure 2. Definition sketches for air concentration

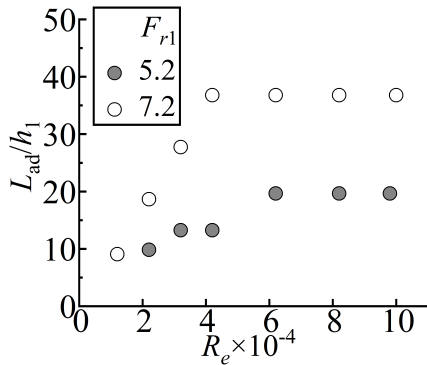
のように示される。Liquid parameter は水と空気の物性と重力加速度から決まり、一般的な開水路流れの水温ではほぼ一定値を示す<sup>[5]</sup>ため、 $We$  は  $F_{r1}$  と  $Re$  で示される。また、 $B/h_1 > 5$  のとき、流入射流の流速分布は二次元的である<sup>[6]</sup>ことから、 $C$  に対する  $B/h_1$  の影響は小さいものと考えられる。すなわち、式 (1) の関係は、

$$C = f(x/h_1, y/h_1, F_{r1}, Re) \quad (3)$$

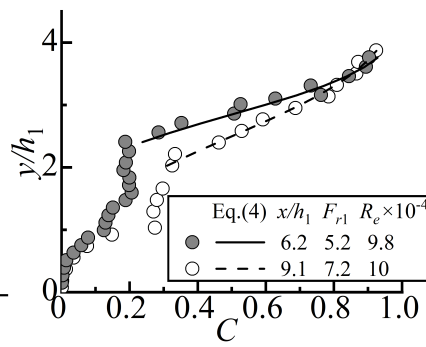
の関係となる。

Fig. 2 を用いて、跳水の空気混入メカニズムと  $C$  分布を説明する。Fig. 2 に示されるように、 $C$  の値は  $y$  の増加に伴い大きくなり、空気混入率の極大値  $C_{max}$  をとる。さらに  $y$  が増加すると、 $C$  の値は減少し、極小値  $C_{min}$  をとる。Fig. 2 のように  $C_{max}$  が存在する  $y \leq y_{Cmin}$  ( $y_{Cmin}$  は  $C_{min}$  の生じる  $y$ ) の領域は、advective diffusion region と呼ばれている<sup>[7]</sup>。Advective diffusion region 内の空気は、impingement point (Fig. 2) 付近から取り込まれる<sup>[2]</sup>。跳水中に取り込まれた空気は流下とともに移流・拡散し、やがて advective diffusion region の形成は認められなくなる<sup>[2]</sup>。一方、 $y > y_{Cmin}$  の領域では、表面渦の水表面での breaking によって空気を取り込まれ、 $y$  の値の増加とともに  $C$  の値は 1 に近づく。この領域は breaking region と呼ばれている<sup>[8]</sup>。

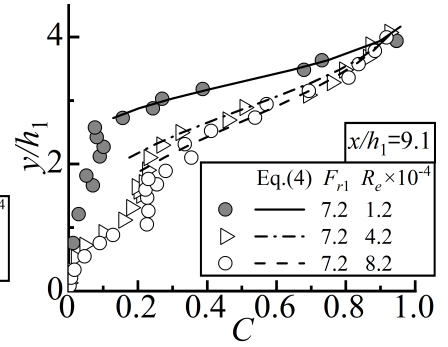
1: 日大理工・院 (前)・土木 2: 日大理工・教員・土木



**Figure 3.** Effects of  $R_e$  on  $L_{ad}/h_1$  in UD jumps

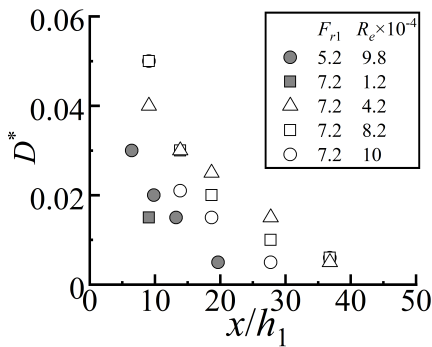


(a) Effects of  $F_{r1}$  on  $C$

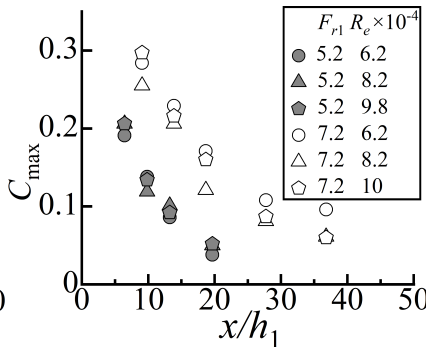


(b) Effects of  $R_e$  on  $C$

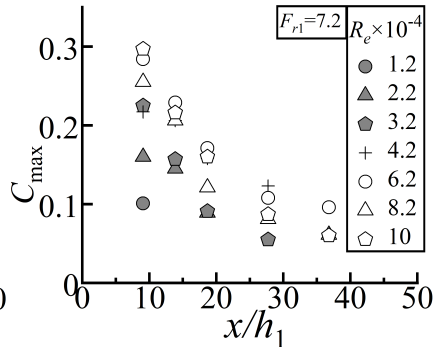
**Figure 4.** Air concentration distributions for UD jumps



**Figure 5.** Streamwise changes in  $D^*$  for UD jumps



(a) Effects of  $F_{r1}$  on  $C_{max}$



(b) Effects of  $R_e$  on  $C_{max}$

**Figure 6.** Streamwise changes in  $C_{max}$  for UD jumps

Advective diffusion region が形成された流下距離を  $L_{ad}$  とし、 $L_{ad}/h_1 = f(F_{r1}, R_e)$  の関係で整理した結果を **Fig. 3** に示す。 **Fig. 3** に示されるように、与えられた  $F_{r1}$  に対して、 $R_e \leq 3.2 \times 10^4$  の場合、 $R_e$  の値の減少とともに  $L_{ad}/h_1$  の値は小さくなる。一方、 $R_e \geq 4 \times 10^4 \sim 6 \times 10^4$  の場合、 $L_{ad}/h_1$  の値は  $R_e$  によらず一定であり、 $L_{ad}/h_1$  に対する  $R_e$  の影響は認められない。

式 (3) の関係で整理した  $C$  分布の一例を **Fig. 4** に示す。 **Fig. 4(a)** に示されるように、与えられた  $x/h_1$ 、 $R_e$  に対して、 $F_{r1} = 5.2$  では  $F_{r1} = 7.2$  の場合より advective diffusion region 内の  $C$  の値が小さい。また、 **Fig. 4(b)** に示されるように、与えられた  $x/h_1$ 、 $F_{r1}$  に対して、 $R_e = 1.2 \times 10^4$  では、 $R_e \geq 4.2 \times 10^4$  の場合より advective diffusion region 内の  $C$  の値が小さい。一方、breaking region 内の  $C$  分布は、

$$C = \frac{1}{2} \times \left\{ 1 + \operatorname{erf} \left( \frac{y/h_1 - y_{0.5}/h_1}{\sqrt{4 \times D^* \times x/h_1}} \right) \right\} \quad (4)$$

によって近似される<sup>[9]</sup>。ここに、 $y_{0.5}$  は  $C = 0.5$  となる  $y$ 、 $D^*$  は無次元化された乱流拡散係数である。式 (4) によって得られた計算値を **Fig. 4** に示す。

$D^* = f(x/h_1, F_{r1}, R_e)$  の関係で整理した結果を **Fig. 5** に示す。 **Fig. 5** に示されるように、 $R_e \geq 4.2 \times 10^4$  の場合、与えられた  $x/h_1$  に対して、 $F_{r1} = 5.2$  では  $F_{r1} = 7.2$  の場合より  $D^*$  の値が小さい。また、与えられた  $x/h_1$ 、 $F_{r1} = 7.2$  に対して、 $R_e = 1.2 \times 10^4$  では、 $R_e \geq 4.2 \times 10^4$  の場合より  $D^*$  の値が小さい。

$C_{max} = f(x/h_1, F_{r1}, R_e)$  の関係で整理した一例を **Fig. 6** に示す。 **Fig. 6(a)** に示されるように、与えられた  $x/h_1$ 、 $R_e$  に対して、 $F_{r1} = 5.2$  では  $F_{r1} = 7.2$  の場合よりも  $C_{max}$  の値は小さい。 **Fig. 6(b)** に示されるように、与えられた  $x/h_1$ 、 $F_{r1}$  に対して、 $R_e \leq 3.2 \times 10^4$  の場合、 $R_e$  の値の減少ととも

に  $C_{max}$  の値は小さくなる。一方、 $R_e \geq 4 \times 10^4 \sim 6 \times 10^4$  の場合、 $C_{max}$  の値は  $R_e$  によらず一定であり、 $C_{max}$  に対する  $R_e$  の影響は認められない。

#### 4. まとめ

跳水始端が縮流部に位置する場合を対象に、跳水の空気混入特性に対するフルード数  $F_{r1}$  とレイノルズ数  $R_e$  の影響を検討した。本研究で得られた結果を以下に示す。

- 与えられた  $x/h_1$ 、 $R_e$  に対して、 $F_{r1} = 5.2$  では  $F_{r1} = 7.2$  の場合より、 $D^*$  と  $C_{max}$  の値が小さい。
- 与えられた  $x/h_1$ 、 $F_{r1}$  に対して、 $R_e = 1.2 \times 10^4$  では  $R_e \geq 4.2 \times 10^4$  の場合より、 $D^*$  と  $C_{max}$  の値が小さい。

#### 参考文献

- [1] Ohtsu, I. and Yasuda, Y.: Characteristics of supercritical flow below sluice gate, *J. Hydraul. Eng.*, 120(3), 332–346, 1994.
- [2] Takahashi, M. and Ohtsu, I.: Effects of inflows on air entrainment in hydraulic jumps below a gate, *J. Hydraul. Res.*, 55(2), 259–268, 2017.
- [3] 佐藤柳言, 高橋正行: ゲート直下に形成される跳水の空気混入特性に対するレイノルズ数の影響, 土木学会論文集, 80(16), 23-16046, 2024.
- [4] Rajaratnam, N.: Free flow immediately below sluice gates, *J. Hydraul. Div.*, 103(4), 345–351, 1977.
- [5] Wood, I. R.: *Air entrainment in free-surface flows*, Balkema, Rotterdam, 1991.
- [6] Auel, C., Albayrak, I., and Boes, R. M.: Turbulence characteristics in supercritical open channel flows: Effects of froude number and aspect ratio, *J. Hydraul. Eng.*, 140(4), 04014004, 2014.
- [7] Chanson, H.: *Air bubble entrainment in free surface turbulent shear flows*, Academic Press, London, 1996.
- [8] Takahashi, M. and Ohtsu, I.: Effect of inflow condition on air entrainment characteristics in hydraulic jump, *Proc. 33rd IAHR World Congress*, Vancouver, BC, Canada, 4917–4924, 2009.
- [9] Murzyn, F., Mouazé, D., and Chaplin, J.: Optical fibre probe measurements of bubbly flow in hydraulic jumps, *Int. J. Multiph. Flow*, 31(1), 141–154, 2005.