

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
Effect of Reynolds Number on Air Entrainment of Hydraulic Jumps with the Undeveloped Inflow Condition below a Gate

○酒井悠輔¹, 佐藤柳言², 高橋正行²

*Yusuke Sakai¹, Ryugen Satoh², Masayuki Takahashi²

Abstract: This study investigates the effect of the Reynolds number on the air entrainment for a hydraulic jump with an undeveloped inflow condition. The air entrainment region in the jump is divided into the advective diffusion and the breaking regions. For the advective diffusion region, the effect of the Reynolds number on the air concentration distribution may be negligibly small if the Reynolds number is larger than 4.2×10^4 .

1. まえがき

跳水は、射流のエネルギー減勢のために利用されることがある。跳水式減勢工などの水理構造物の設計では、フルードの相似則に基づく水理模型実験によって現象を再現する手法が用いられている^[1]。しかしながら、模型実験の規模を小さくすると粘性の影響が大きくなり、フルード相似則では力学的に相似にできない場合がある。このため、跳水式減勢工の水工設計のために、跳水の水理特性に対して粘性の影響を無視できるために必要なレイノルズ数の範囲を明らかにする必要がある。

跳水内部の空気混入特性については、空気混入特性に対するレイノルズ数の影響が無視できると考えられるレイノルズ数を対象に、跳水始端のフルード数と流入射流の乱流境界層の発達状態によって、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)] の分布に違いの生じることが示された^[2]。跳水の空気混入特性に対するレイノルズ数の影響については、流入射流の乱流境界層が十分に発達した場合の跳水では、原型での現象をフルード相似則によって把握するために必要なレイノルズ数の範囲が示された^[3]。しかしながら、流入射流の乱流境界層が未発達の場合の跳水の空気混入特性に対するレイノルズ数の影響は不明である。

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 $B = 60.0$ cm の長方形断面水平水路 (Fig.1) を用いて、Table 1 に示す跳水始端のフルード数 $Fr_1 (= V_1/\sqrt{gh_1})$ とレイノルズ数 $Re (= q/\nu)$ のもと、流入射流の乱流境界層が未発達の場合 (undeveloped inflow condition^[2]) の跳水を対象に行われた。ここに、 x は跳水始端を原点とする水路床に沿う流下方向座標、 y は水路床から鉛直上向きの座標、 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、 μ_w は水の粘性係数、 ρ_w は水の密度である。Table 1 の Fr_1 と Re が得られるように、流量 Q とスルースゲートの開口高 a を調整し、跳水の先端が時間平均的に縮流部 (vena contracta, Fig.1 参照) の断面に位置するように水路下流端の堰高を調整した。なお、縮流部はスルースゲートから流下方向に $2a$ の位置とし、 $a = h_1/0.64$ とした^[4]。

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 $50 \mu s$, 採取時間 $40 s$) を用いて、水路中央面 ($z = 0$) で測定された。ここに、 z は水路横断方向の座標である。

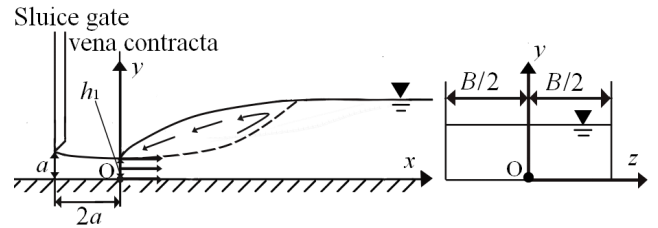


Figure 1. Definition sketch for a jump below a gate

Table 1. Experimental conditions

Fr_1 (-)	$Re \times 10^{-4}$ (-)	B/h_1 (-)	a (m)	q (m ² /s)
7.2	2.2	61	0.015	0.022
7.2	4.2	39	0.024	0.042
7.2	6.2	30	0.031	0.063

3. 跳水内部の空気混入特性に対するレイノルズ数の影響

長方形断面水平水路の undeveloped inflow condition の跳水において、水路中央面 ($z = 0$) の空気混入率 C は、

$$C = f\left(Fr_1, Re, W, \frac{B}{h_1}, \frac{x}{h_1}, \frac{y}{h_1}\right) \quad (1)$$

の関係で示されるものと考えられる。ここに、 $W (= \rho_w V_1^2 / \sigma_{wa})$ はウェバー数、 σ_{wa} は水の表面張力である。 W は liquid parameter $[= g\mu_w^4 / (\rho_w \sigma_{wa}^3)]^{[5]}$ を用いると、

$$W = \left(\frac{g\mu_w^4}{\rho_w \sigma_{wa}^3} Fr_1^2 Re^4\right)^{\frac{1}{3}} \quad (2)$$

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るため、ほぼ一定値を示す^[5]。また、 $B/h_1 \geq 10$ のとき、波状跳水の流況に対する B/h_1 の影響は無い^[6] ことから、 B/h_1 が自由跳水の流況におよぼす影響は小さいものと考えられ、式 (1) は、

$$C = f\left(Fr_1, Re, \frac{x}{h_1}, \frac{y}{h_1}\right) \quad (3)$$

の関係で示されるものと考えられる。

高速度ビデオカメラを用いた跳水の流況の観察によると、impingement point 近くで取り込まれた気泡は跳水中で移流・拡散する^[2]。そのため、跳水内部の C の値は Fig.2 に示されるように、 y の増加に伴い大きくなり、極大値 C_{max} を経て C の値は $y_{C_{min}}$ まで減少し、極小値 C_{min} をとる。Fig.2 のように、 C_{max} と C_{min} が存在する $y \leq y_{C_{min}}$ の領域は、advective diffusion region と呼ばれている^[7]。一方、 $y > y_{C_{min}}$ の領域では、跳水の表面渦の breaking によって空気を取り込まれるため、 y の増加に伴い C の値は 1 に

1: 日大理工・院(前)・土木 2: 日大理工・教員・土木

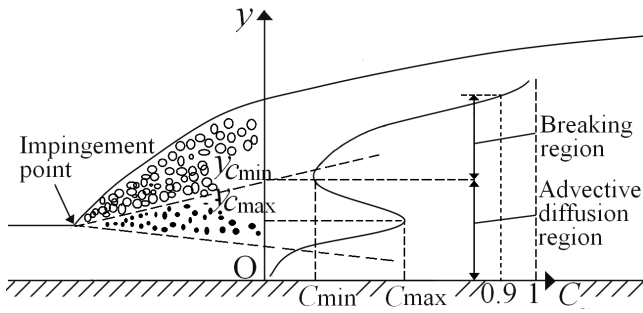


Figure 2. An air concentration distribution in jump

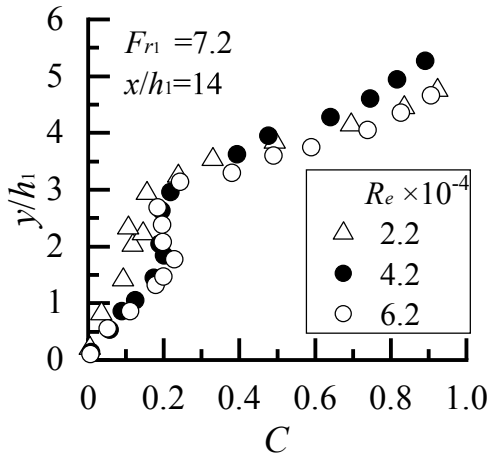


Figure 3. Air concentration distributions for the jump with the undeveloped inflow condition for $F_{r1} = 7.2$

近づく。この領域は、breaking region と呼ばれている [8]。

与えられた F_{r1} , R_e , x/h_1 に対する C の分布の一例を Fig.3 に示す。Fig.3 より、advective diffusion region 内について、 $R_e = 4.2 \times 10^4$ と 6.2×10^4 ではレイノルズ数 R_e の大きさに関わらず、同一の y/h_1 での C の値は同程度である。一方、 $R_e = 2.2 \times 10^4$ の場合、advective diffusion region 内の C は $R_e \geq 4.2 \times 10^4$ の場合と比べて小さくなっている。これは、 R_e の減少に伴い粘性の影響が大きくなり、impingement point から跳水内部に空気を取り込まれにくくなっているためと考えられる。Breaking region 内については、Fig.3 に示されるように、 R_e の変化に関わらず、 C の値はほぼ同じ値を示す。これは、breaking region 内での空気は表面渦の breaking によって取り込まれたものであること [2] から、粘性の影響に比べて重力の影響が大きかったものと考えられる。

Advective diffusion region 内の C の極大値 C_{max} の流下方向変化を Fig.4 に示す。与えられた F_{r1} と R_e に対して、 x/h_1 の増加に伴い C_{max} は減少する。また、同一の x/h_1 では、 $R_e = 4.2 \times 10^4$ と $R_e = 6.2 \times 10^4$ の場合、 C_{max} の値は同程度である。一方、 $R_e = 2.2 \times 10^4$ の場合の C_{max} の値は、 $R_e \geq 4.2 \times 10^4$ の場合に比べて小さくなっている。これは、 R_e の減少に伴い粘性の影響が大きくなり、impingement point から advective diffusion region 内に空気を取り込まれにくくなったためと考えられる。

C_{max} の生じる相対高さ $y_{C_{max}}/h_1$ については、Fig.5 に示されるように、与えられた F_{r1} と x/h_1 に対して、 R_e の大きさによらず $y_{C_{max}}/h_1$ はほぼ同じ値を示す。

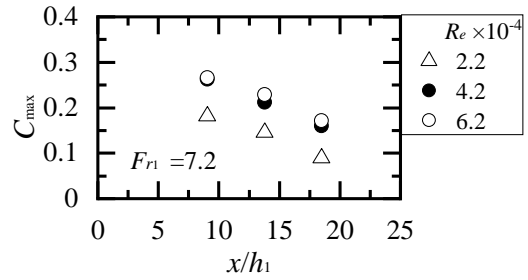


Figure 4. Effect of Reynolds number on C_{max}

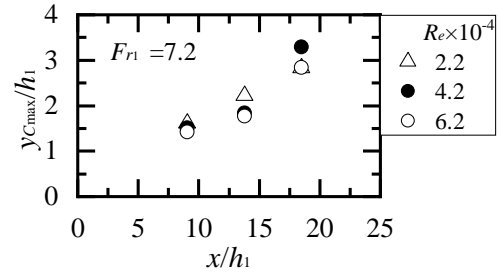


Figure 5. Effect of Reynolds number on $y_{C_{max}}$

4. まとめ

流入射流の乱流境界層が未発達の状態の跳水を対象に、与えられた跳水始端のフルード数 $F_{r1} = 7.2$ に対して、跳水内部の空気混入特性に対するレイノルズ数 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。

- $R_e \geq 4.2 \times 10^4$ の場合、advective diffusion region 内の C の値に対する R_e の影響は認められない。一方、 $R_e = 2.2 \times 10^4$ の場合の advective diffusion region 内の C は、 $R_e \geq 4.2 \times 10^4$ の場合に比べて小さい。
- Breaking region 内の C の値に対する R_e の影響は小さい。
- $y_{C_{max}}/h_1$ の値については、 R_e の大きさによらずほぼ同じ値を示す。

謝辞：著者の一人(高橋正行)は本研究の一部に科研費(19K04624)の助成を受けた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- [1] 土木学会水理公式集編集小委員会: 水理公式集 [2018年版], 土木学会, 2019.
- [2] Takahashi, M. and Ohtsu, I.: Effects of inflows on air entrainment in hydraulic jumps below a gate, *J. Hydr. Res.*, 55(2), 259–268, 2017.
- [3] 高橋正行, 内田健太, 大津岩夫: 跳水の流況と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 B1(水工学), 74(4), L_625–L_630, 2018.
- [4] Rajaratnam, N.: Free flow immediately below sluice gate, *J. Hydr. Div.*, 103(4), 345–351, 1977.
- [5] Wood, I. R.: *Air entrainment in free-surface flows*, Balkema, Rotterdam, 1991.
- [6] Ohtsu, I., Yasuda, Y., and Gotoh, H.: Flow conditions of undular hydraulic jumps in horizontal rectangular channels, *J. Hydr. Eng.*, 129(12), 948–955, 2003.
- [7] Chanson, H.: *Air bubble entrainment in free surface turbulent shear flow*, Academic Press, London, U.K., 1997.
- [8] Takahashi, M. and Ohtsu, I.: Effect of inflow condition on air entrainment characteristics in hydraulic jump, *Proceedings of the 33rd IAHR World Congress*, Vancouver, BC, Canada, 4917–4924, 2009.