

H-10

スルースゲート下流側に形成される射流の水面変動に対するレイノルズ数の影響
Effect of Reynolds Number on Water Surface Fluctuation of Supercritical Flows below a Sluice Gate○林雄太郎¹, 佐藤柳言², 高橋正行²
*Yutaro Hayashi¹, Ryugen Satoh², Masayuki Takahashi²

Abstract: In order to clarify the characteristics of hydraulic jumps, it is important to know the effect of Reynolds number on the boundary-layer development and the water surface fluctuation of supercritical flow below a sluice gate. This paper shows the water surface fluctuation of supercritical flows below the sluice gate, and the effect of Reynolds number on water surface fluctuation of supercritical flows is discussed.

1. まえがき

スルースゲート下流側に形成される射流は縮流部 (vena contracta, Fig.1 参照) で一様な流速分布となり, 縮流部より下流側では乱流境界層が発達し, やがて水面に到達する. 乱流境界層が水面に到達した断面は critical point と呼ばれる^[1] ている.

Takahashi and Ohtsu^[2] は, スルースゲート下流側の射流の水面を高速度ビデオカメラで観察し, 乱流境界層の発達状態によって射流の水面に凹凸と変動の有無が生じることを示した. また, 跳水に流入する射流の水面の凹凸と変動の有無によって跳水の空気混入メカニズムが異なり, 跳水内部の空気混入特性に違いが生じることが明らかにされた^[2]. 高橋ら^[3] は, スルースゲート下流側の跳水の流況と空気混入特性に対してレイノルズ数が影響することを示した. すなわち, 射流の乱流境界層の発達状態と水面変動に対するレイノルズ数の影響を明らかにすることは, 跳水特性の解明のために重要である. スルースゲート下流側の射流については, 水面変動および乱れ強さ分布が流下方向にそれぞれ一定となるとききの流下距離が示されている^[4]. しかしながら, スルースゲート下流側の射流の水面の凹凸と変動に対するレイノルズ数の影響については明らかにされていない.

本研究は, スルースゲート下流側に形成される射流を対象に, 水面の凹凸と変動を観察した結果に基づき, 射流の水面変動に対するレイノルズ数の影響を検討したものである.

2. 実験

実験は, スルースゲートを有する水路幅 B の長方形断面水平水路 (Fig.1 参照) を用いて, Tab.1 の条件のもとで行われた. ここに, $Fr_0 [= U_0/\sqrt{g\bar{h}_0}]$ は縮流部のフルード数, U_0 は縮流部の流速, g は重力加速度, \bar{h}_0 は縮流部の時間平均水深, $Re [= Q/(\nu B)]$ はレイノルズ数, Q は流量, ν は動粘性係数, a はゲート開口高, x は縮流部を原点とする流下方向座標, y は水路床を原点とする鉛直上向き座標, z は水路横断方向の座標, x_{cp} は critical point までの x , U は乱流境界層外側の流速, \bar{u} は x 方向の時間平均流速, \bar{h} は時間平均水深, δ は乱流境界層厚である. 縮流部の水深は $\bar{h}_0 = 0.64a$ ^{[1],[5]} とし, 縮流部はスルースゲートから下流に $2a$ の位置^{[1],[5]} とした (Fig.1 参照).

水路中央面 ($z = 0$, Fig.1 参照) における射流の水面の凹凸と変動の有無を観察するため, 高速度ビデオカメラ (撮

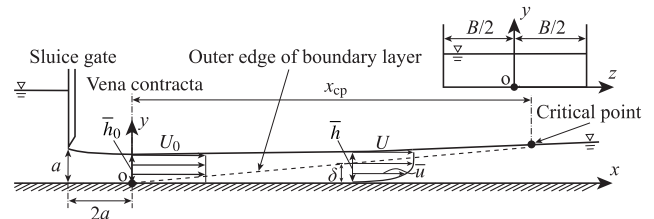


Figure 1. Definition sketch of supercritical flows below a sluice gate

Table 1. Experimental conditions

Fr_0 (-)	$Re \times 10^{-4}$ (-)	a (cm)	B (cm)
4.0	1.5	1.77	40.0
4.0	5.4	4.10	40.0
4.3	7.4	5.06	60.0

影速度 1000 fps, 露光時間 1/1000 s もしくは 1/2000 s) を用いて射流の水面を撮影した.

3. 射流の水面

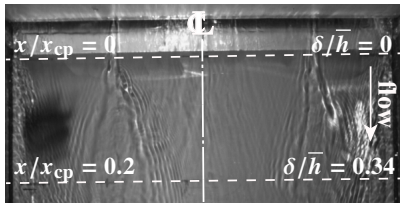
与えられた Fr_0 と Re に対する射流の水面の静止面の一例を Fig.2~Fig.4 に示す. 図中の乱流境界層の発達状態 δ/\bar{h} の値は Ohtsu and Yasuda^[1] の方法で求められた計算値である. また, 相対流下距離 x/x_{cp} の値は与えられた x/\bar{h}_0 の値を Ohtsu and Yasuda^[1] の方法で求められる x_{cp}/\bar{h}_0 の値で除した計算値である. なお, Fig.2~Fig.4 の射流の水面の比較は, 水路中央面 ($z = 0$) を対象に行う.

Fig.2(a), Fig.3(a), Fig.4(a) に示されるように, $0 \leq x/x_{cp} \leq 0.2$ では, Re の大きさによらず凹凸と変動が生じず, 滑らかな水面が形成されている. これは, $0 \leq x/x_{cp} \leq 0.2$ では, 乱流境界層が水面に到達していないためと考えられる.

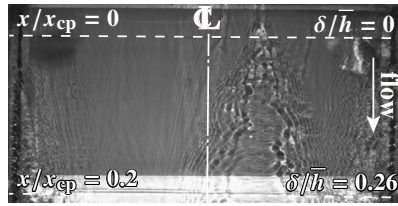
Fig.2(b), Fig.3(b), Fig.4(b) に示されるように, $0.6 \leq x/x_{cp} \leq 0.7$ では, Re の大きさによらず水面に凹凸と変動が生じ始めている. このとき, 乱流境界層の発達状態は $0.7 \leq \delta/\bar{h} \leq 0.8$ である.

Fig.2(c), Fig.3(c), Fig.4(c) に示されるように, critical point ($x/x_{cp} = 1.0$) の水面の凹凸と変動は, critical point より上流側 ($0 \leq x/x_{cp} < 1$) の場合よりも大きい.

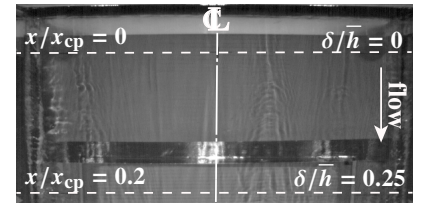
Fig.2(d), Fig.3(d), Fig.4(d) に示されるように, critical point より下流側である $1.4 \leq x/x_{cp} \leq 1.8$ では, critical point ($x/x_{cp} = 1.0$) よりも水面の凹凸と変動は大きい. ま



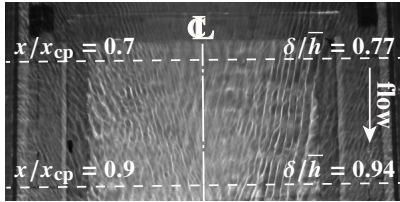
(a) $0 \leq x/x_{cp} \leq 0.2$



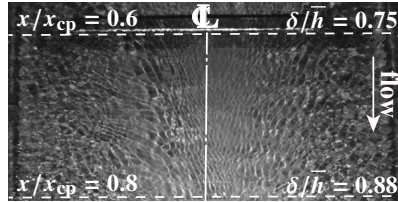
(a) $0 \leq x/x_{cp} \leq 0.2$



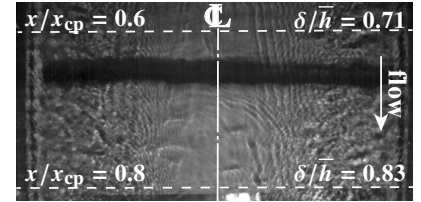
(a) $0 \leq x/x_{cp} \leq 0.2$



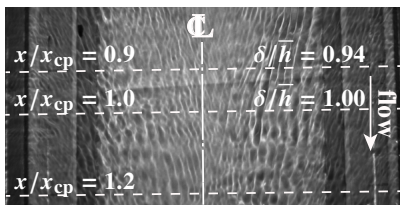
(b) $0.7 \leq x/x_{cp} \leq 0.9$



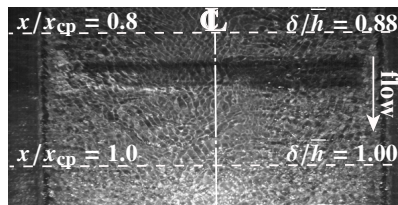
(b) $0.6 \leq x/x_{cp} \leq 0.8$



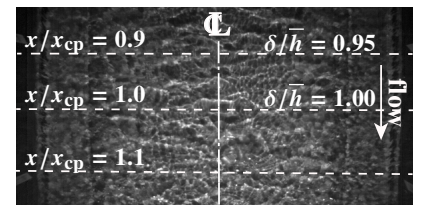
(b) $0.6 \leq x/x_{cp} \leq 0.8$



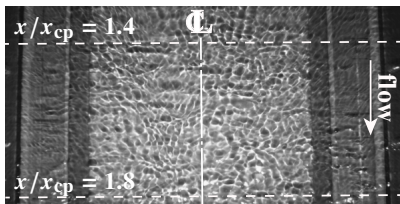
(c) $x/x_{cp} \approx 1.0$



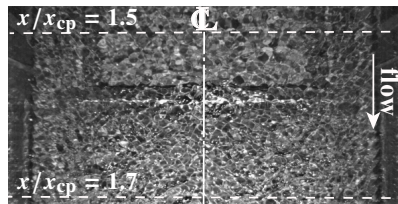
(c) $x/x_{cp} \approx 1.0$



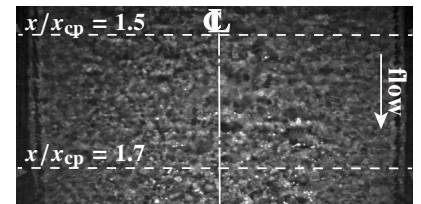
(c) $x/x_{cp} \approx 1.0$



(d) $1.4 \leq x/x_{cp} \leq 1.8$



(d) $1.5 \leq x/x_{cp} \leq 1.7$



(d) $1.5 \leq x/x_{cp} \leq 1.7$

Figure 2. Water surface of supercritical flows with $Fr_0 = 4.0$ and $Re = 1.5 \times 10^4$

Figure 3. Water surface of supercritical flows with $Fr_0 = 4.0$ and $Re = 5.4 \times 10^4$

Figure 4. Water surface of supercritical flows with $Fr_0 = 4.3$ and $Re = 7.4 \times 10^4$

た、 $1.4 \leq x/x_{cp} \leq 1.8$ の水面の凹凸と変動に対する x/x_{cp} の影響は認められない。

以上より、 $Fr_0 \approx 4$ で $Re = 1.5 \times 10^4 \sim 7.4 \times 10^4$ のとき、水面の凹凸と変動が観察される最上流断面は $x/x_{cp} = 0.6 \sim 0.7$ であり Re の影響を受けていない。また、水面の凹凸と変動が十分に大きくなる x/x_{cp} は $x/x_{cp} \approx 1.5$ であり、 Re の影響が認められない。

4. まとめ

スルースゲート下流側の射流の水面の凹凸と変動を観察し、与えられた縮流部のフルード数 Fr_0 における射流の水面変動に対するレイノルズ数 Re の影響について検討した。本研究で得られた結果を以下に示す。

- $0 \leq x/x_{cp} \leq 0.2$ の場合、 Re の大きさにかかわらず水面は滑らかで凹凸と変動が認められない。
- 水面の凹凸と変動が生じ始める相対流下距離は $0.6 \leq x/x_{cp} \leq 0.7$ であり、このとき $0.7 \leq \delta/\bar{h} \leq 0.8$ である。また、水面の凹凸と変動が生じ始める

x/x_{cp} に対する Re の影響は認められない。

- 水面の凹凸と変動が十分に大きくなる相対流下距離は $x/x_{cp} \approx 1.5$ である。また、水面の凹凸と変動が十分に大きくなる x/x_{cp} に対する Re の影響は認められない。

参考文献

- [1] Ohtsu, I. and Yasuda, Y.: Characteristics of supercritical flow below sluice gate, *J. Hydr. 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. 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), I_625–I_630, 2018.
- [4] 高橋正行, 佐藤柳言, 大津岩夫: ゲート下流に形成される射流の特性, 土木学会論文集 B1 (水工学), 74(5), I_721–I_726, 2018.
- [5] Rajaratnam, N.: Free flow immediately below sluice gates, *J. Hydr. Div.*, 103(4), 345–351, 1977.