

## H3-13

スルースゲート下流側の射流の水面変動と乱流境界層の発達状態との関係  
Effect of boundary layer developments on water surface fluctuation of supercritical flows below a sluice gate○佐藤柳言<sup>1</sup>, 内田健太<sup>1</sup>, 高橋正行<sup>2</sup>\*Ryugen Sato<sup>1</sup>, Kenta Uchida<sup>1</sup>, Masayuki Takahashi<sup>2</sup>

Abstract: Characteristic of air entrainment in hydraulic jumps are influenced by inflow conditions. The air bubbles entrained at the impingement point are advected and diffused in the advective diffusion region. Also, it was reported that water surface fluctuation of supercritical flows affects the air concentration in the advective diffusion region. However, effect of boundary layer developments on the water surface fluctuation of supercritical flows have not yet been clarified. This report presents effect of boundary layer developments on the water surface fluctuation of supercritical flows below a sluice gate.

## 1. まえがき

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によって undeveloped inflow (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<sup>[1]</sup>.

Takahashi and Ohtsu<sup>[1]</sup> は、跳水内部の空気混入状況の観察と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)] の測定値に基づき、流入射流の水面と跳水の表面渦先端との交点である impingement point 付近から空気が混入する場合と表面渦の breaking によって空気が混入する場合の両方によって跳水中に空気が混入することを示した。また、跳水始端の流入射流の乱流境界層の発達状態が UD と PD ( $\delta/h = 0.5$ ) (PD<sub>0.5</sub> と略す) の場合 (Fig.1(a), 1(b)) は流入射流の水面は滑らかで変動もなく、PD ( $\delta/h = 0.8$ ) (PD<sub>0.8</sub> と略す) の場合 (Fig.1(c)) は凹凸と変動が間欠的に生じ、FD の場合 (Fig.1(d)) は凹凸と変動が常に生じていることを指摘し、流入射流の水面の凹凸と変動の有無が跳水内の advective diffusion region の空気混入率  $C$  に影響を与えることを示した<sup>[1]</sup>。ここに、 $\delta$  は乱流境界層厚、 $h$  は水深である。しかしながら、射流水面の凹凸と変動は明らかにされておらず、乱流境界層の発達状態と水面変動との関係に不明な点が残されている。

本研究は、スルースゲート下流側に形成される射流の水面変動と乱流境界層の発達状態との関係について実験的検討を行い、スルースゲート下流側の射流の水面変動について定量的に明らかにしようとしたものである。

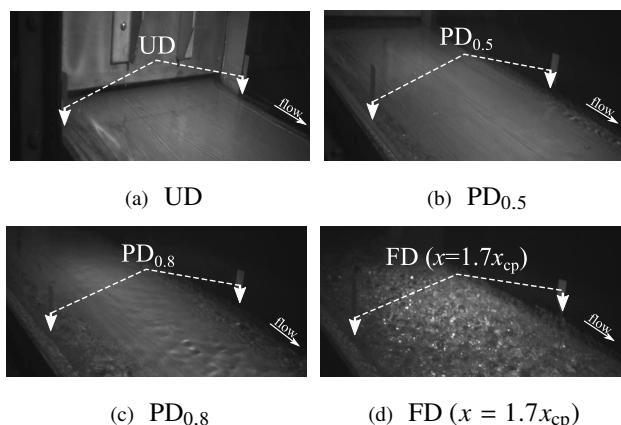


Figure 1. Water surface of supercritical flows for  $F_r = 7.2$  and  $R_e = 6.2 \times 10^4$ <sup>[1]</sup>

## 2. 実験

実験は、スルースゲートを有する滑面長方形断面水路において、Table 1 に示される条件の射流を対象に行われた。水深  $h$  は超音波水位計 (採取間隔 10 ms, 採取時間 200 s, 設置高さは水面より上方の 70 ~ 100 mm) を用いて各評価断面の水路中央面 ( $z = 0$ ) で 10 回測定された。ここに、 $F_r$  [=  $V/\sqrt{gh}$ ] はフルード数、 $g$  は重力加速度、 $V$  は断面平均流速、 $R_e$  [=  $Vh/\nu$ ] はレイノルズ数、 $\nu$  は水の動粘性係数である。評価断面は乱流境界層の発達状態が UD, PD ( $\delta/h = 0.3, 0.5, 0.7, 0.75, 0.8, 0.9$ ), FD ( $x = x_{cp}, 1.5x_{cp}, 1.7x_{cp}, 2.0x_{cp}$ ) になる断面を対象とした。なお、UD の場合は  $x = 0$ , PD の場合は  $\delta/h = 0.3, 0.5, 0.7, 0.75, 0.8$  および  $0.9$  となる  $x$ , FD の場合は  $x = x_{cp}, 1.5x_{cp}, 1.7x_{cp}, 2.0x_{cp}$  とした。ここに、 $x$  は縮流部から評価断面までの流下方向距離、 $x_{cp}$  は乱流境界層が水面に到達する critical point の  $x$  である (Fig.2 参照)。

与えられた  $F_r$ ,  $R_e$ , および  $\delta/h$  (UD, PD, FD) となる  $x/h_0$  を求めるため、Ohtsu and Yasuda の方法<sup>[2]</sup> を用いて  $\delta$ ,  $h$ ,  $x$  を計算し、Table 1 の条件が得られるように単位幅流量  $q$ , スルースゲートの開口高さ  $a$  を調整して実験を行った。ここに、 $h_0$  は縮流部 ( $x = 0$ ) における水深であり、 $h_0 = 0.64a$ <sup>[3]</sup> で求められている。

Table 1. Experimental conditions

Inflow condition	$F_r$ [-]	$R_e \times 10^{-4}$ [-]	$B$ [m]	$\delta/h$ [-]
UD	2.2 ~ 8.2	6.2	0.4	0
PD	7.2	6.2	0.4	0.3~0.9
FD	2.2 ~ 8.2	6.2	0.4	1

## 3. 乱流境界層の発達状態と水面変動との関係

乱流境界層の発達状態  $\delta/h$  と射流水深  $h$  の標準偏差  $\sqrt{h'^2}$  との関係および水面変動の流下方向変化を Fig.3 に示す。ここに、 $\bar{h}$  は時間平均された水深、 $h' [= h - \bar{h}]$  は変動水深である。

Fig.3 に示されるように、 $\sqrt{h'^2}/\bar{h}$  は UD ( $\delta/h = 0$ ) と PD ( $0 < \delta/h < 1$ ) に比べて FD ( $\delta/h = 1$ ) のほうが大きい。すなわち、乱流境界層が発達すると射流水面の凹凸と変動は大きくなる。UD と PD ( $0 < \delta/h \leq 0.7$ ) の  $\sqrt{h'^2}/\bar{h}$  はほぼ一定で小さい値を示す。これは、UD と PD ( $0 < \delta/h \leq 0.7$ ) の水面に凹凸が生じないことを示しており、UD と PD<sub>0.5</sub> の水面

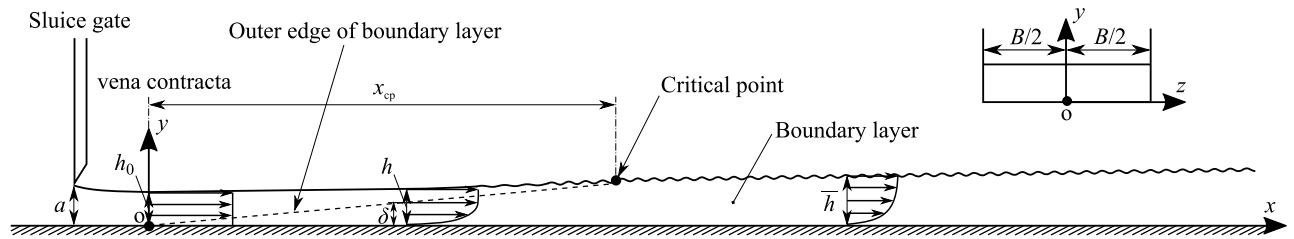


Figure 2. Definition sketch

に凹凸と変動が認められなかった結果 (Fig.1(a), 1(b)) と対応している. FD ( $1.5x_{cp} \lesssim x \lesssim 2.0x_{cp}$ ) の  $\sqrt{h^2}/\bar{h}$  はほぼ一定で大きい値を示す. これは, FD ( $1.5x_{cp} \lesssim x \lesssim 2.0x_{cp}$ ) では乱流境界層が水面に到達した後, 水面付近の乱れが十分に発達した状態になることを示している. PD ( $0.8 \lesssim \delta/h < 1$ ) では, 乱流境界層の発達に伴い  $\sqrt{h^2}/\bar{h}$  は増加する. これは, 射流水面の凹凸と変動は PD ( $\delta/h \approx 0.8$ ) 付近で生じ始めることを示しており, PD<sub>0.8</sub> の水面に間欠的な凹凸と変動が観察された結果 (Fig.1(c)) に対応している. このことは, 平板上の乱流境界層において, 乱流境界層内の乱れが  $y = 1.2\delta$  まで間欠的に影響を及ぼすこと<sup>[4]</sup> と類似な現象が生じ,  $y = 1.2\delta = 1.2 \times 0.8h = 0.96h \approx h$ , つまり水面付近まで乱流境界層内の乱れの影響を受けたものと考えられる.

#### 4. 乱流境界層の発達状態と水面変動との関係に対するフルード数の影響

乱流境界層の発達状態と水面変動との関係に対するフルード数  $F_r$  の影響を Fig.4 に示す. Fig.4 に示されるように, UD の場合,  $F_r \gtrsim 4$  では  $F_r$  の変化によらず  $\sqrt{h^2}/\bar{h}$  はほぼ一定で小さい値を示し,  $F_r \gtrsim 4$  の UD の水面に凹凸は生じない. 一方,  $F_r \lesssim 4$  では  $F_r$  の減少とともに  $\sqrt{h^2}/\bar{h}$  は大きくなる.

FD ( $1.5x_{cp} \lesssim x \lesssim 2.0x_{cp}$ ) の場合,  $F_r$  の増加に伴い  $\sqrt{h^2}/\bar{h}$  は大きくなる. これは,  $F_r$  の増加に伴って水面付近の  $y$  方向の乱れ強さ  $\sqrt{v'^2}$  [ $v'$ :  $y$  方向の変動流速] が大きくなることが影響したものと考えられる.

#### 5. まとめ

スルースゲート下流側に形成される射流の水面変動と乱流境界層の発達状態との関係について定量的に明らかになった結果を以下に示す.

- 乱流境界層の発達に伴い射流水面の凹凸と変動  $\sqrt{h^2}/\bar{h}$  は大きくなる.
- PD ( $0.7 \lesssim \delta/h \lesssim 0.8$ ) で射流水面に間欠的な凹凸と変動が生じ始める.
- $x \gtrsim 1.5x_{cp}$  になると水面付近の乱れが十分に発達した状態になる.
- $F_r \gtrsim 4$  の UD では  $F_r$  の変化によらず水面変動  $\sqrt{h^2}/\bar{h}$  は小さく, 水面の凹凸は生じない.
- FD ( $1.5x_{cp} \lesssim x \lesssim 2.0x_{cp}$ ) では  $F_r$  の増加に伴って水面の凹凸と変動が大きくなる.

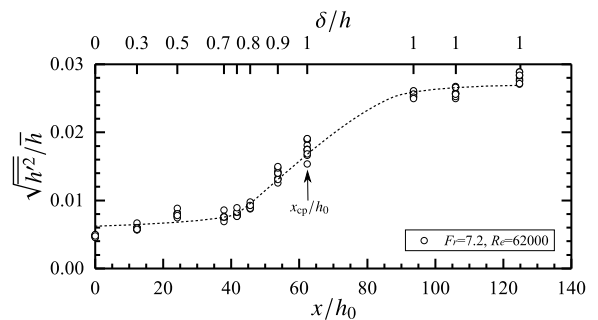


Figure 3. Streamwise development of water surface fluctuation

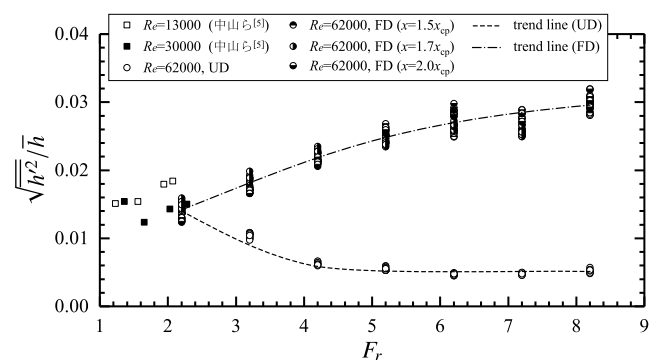


Figure 4. Effect of Froude number on water surface fluctuation of UD and FD

#### 参考文献

- [1] 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.
- [2] Ohtsu, I. and Yasuda, Y.: Characteristics of supercritical flow below sluice gate, *J. Hydr. Engrg.*, 120(3), 332–346, 1994.
- [3] Rajaratnam, N.: Free flow immediately below sluice gates, *J. Hydr. Div., ASCE*, 103(4), 345–351, 1977.
- [4] Klebanoff, P.S.: Characteristics of turbulence in boundary layer with zero pressure gradient, *NACA Rep.*, 1247, 1955.
- [5] 中山昭彦, 中瀬幸典, 横嶋哲, 藤田一郎: 水面変動をパラメータとした開水路乱流計算のための 2 方程式モデルの改良, 応用力学論文集, 3, 745–752, 2000.
- [6] Tominaga, A. and Nezu, I.: Velocity profiles in steep open-channel flows, *J. Hydr. Engrg.*, 118(1), 73–90, 1992.
- [7] Auel, C., Albayrak, I. and Boes, R. M.: Turbulence characteristics in supercritical open channel flows: effects of Froude number and aspect ratio, *J. Hydr. Engrg.*, 140(4), 04014004–16, 2014.