

## 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

日本大学理工学部 学生会員 ○佐藤柳言  
 日本大学大学院理工学研究科 学生会員 内田健太  
 日本大学理工学部 正会員 高橋正行  
 日本大学理工学部 フェロー会員 大津岩夫

## 1. まえがき

一般に跳水中には空気を取り込まれ、多量の気泡が混入された流れとなっている。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<sup>1),2)</sup>。ここに、UD はスルースゲート下流側の縮流部に跳水始端を位置させた場合、PD は乱流境界層が発達中の射流に跳水始端を位置させた場合、FD は乱流境界層が水面まで到達した断面よりも下流側の射流に跳水始端を位置させた場合である。

Takahashi and Ohtsu<sup>3)</sup> は、高速度ビデオカメラを用いた跳水内部へ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、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、流入射流の水面は滑らかで変動がなく、PD ( $\delta/h = 0.8$ ) (PD<sub>0.8</sub> と略す) と FD の場合、水面に凹凸と変動が生じることを指摘し、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。ここに、 $\delta$  は乱流境界層厚さ、 $h$  は水深である。しかしながら、射流水面の凹凸と変動は定量的に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、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、跳水内部に流入する射流の水面変動について定性的かつ定量的に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  $B = 0.4$  m の滑面長方形断面水平水路を用いた。射流水面の凹凸と変動の開始位置を定性的に明らかにするため、PD ( $\delta/h = 0.5 \sim 0.8$ ) でのフルード数  $F_r = 4 \sim 8$ 、レイノルズ数  $R_e = 6.2 \times 10^4$  の射流を対象に、高速度ビデオカメラ (露光時間 1/2000 s, 撮影速度 1000 fps) を用いて PD ( $\delta/h = 0.5 \sim 0.8$ ) の範囲を撮影し、水面の観察を行った。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。射流の水面変動を定量的に知るため、表 1 に示される条件の射流を対象に、超音波水位計 (採取間隔 10 ms, 採取時間 200 s, 設置高さ 70 ~ 100 mm) を用いて評価断面の水路横断方向中央部で水深  $h$  を測定した。ここに、 $x$  は縮流部から評価断面までの流下方向距離、 $T$  は水温である。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 ( $x = x_{cp}, 1.5x_{cp}, 1.7x_{cp}, 2x_{cp}$ ) 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  $x = x_{cp}, 1.5x_{cp}, 1.7x_{cp}$  および  $2x_{cp}$  とした。ここに、 $x_{cp}$  は乱流境界層が水面に到達する critical point の  $x$  である (図 1 参照)。

評価断面において、与えられた  $F_r$  と  $R_e$  のもとで乱流境界層の発達状態を UD, PD, FD に変化させるため、Ohtsu and Yasuda の方法<sup>4)</sup> を用いて  $\delta, h, x$  を計算し、対象とする射流が形成されるように単位幅流量  $q$ , スルースゲートの開口高  $a$  を調整して実験を行った。なお、レイノルズ数  $R_e$  は  $R_e \geq 6.0 \times 10^4$  のとき、自由跳水の流況に対する  $R_e$  の影響がない<sup>5)</sup> ことから、 $R_e = 6.2 \times 10^4$  とした。

表 1: 水深測定の実験条件

Inflow condition	$F_r$ (-)	$R_e \times 10^{-4}$ (-)	$\delta/h$ (-)	$h$ (m)	$x$ (m)	$T$ (°C)	
UD	7.2	6.2	0	0.0175	0	28	
PD	7.2	6.2	0.3	0.0194	0.230	21	
			0.5	0.0180	0.406	26	
			0.7	0.0177	0.613	27	
			0.75	0.0177	0.669	27	
			0.8	0.0177	0.726	27	
FD ( $x = x_{cp}$ )	7.2	6.2	1.0	0.0201	1.093	19	
			( $x = 1.5x_{cp}$ )		0.0204	1.647	18
			( $x = 1.7x_{cp}$ )		0.0204	1.858	18
			( $x = 2x_{cp}$ )		0.0175	1.861	28
					0.0175	1.861	28

## 3. 射流の水面形状

評価断面の  $F_r = 7.2$ ,  $R_e = 6.2 \times 10^4$  の射流水面を高速度ビデオカメラで撮影した一例を図 2 に示す。図 2 に示されるように、UD (図 2(a)) と PD<sub>0.5</sub> (図 2(b)) の場合は、射流水面は滑らかで凹凸と変動が認められない。これは、UD では乱流境界層が未発達であり、PD<sub>0.5</sub> では乱流境界層内の乱れが水面まで影響を及ぼさないためと考えられる。一方、FD ( $x = 1.7x_{cp}$ ) の場合 (図 2(d)) は、水面の凹凸と変動が認められる。これは、乱流境界層が水面に到達し、水面での乱れが大きくなったためと考えられる。また、PD<sub>0.8</sub> の場合 (図 2(c)) は、FD ( $x = 1.7x_{cp}$ ) の場合よりも水面の凹凸が小さく変動は間欠的である。これは、乱流境界層内の乱れが間欠的に水面まで達し、水面の凹凸と変動を誘起したためと考えられる。

なお、上記結果を含む  $F_r = 4 \sim 8$ ,  $R_e = 6.2 \times 10^4$  の射流水面の観察の結果、 $F_r$  の変化によらず、 $\delta/h \approx 0.7 \sim 0.8$  で射流水面に凹凸が生じ始めることが確認された。

キーワード: 空気混入率, 射流水面, 水面変動, 乱流境界層の発達状態

連絡先: 〒 101-8308 東京都千代田区神田駿河台 1-8-14 日本大学理工学部土木工学科 TEL. 03-3259-0676

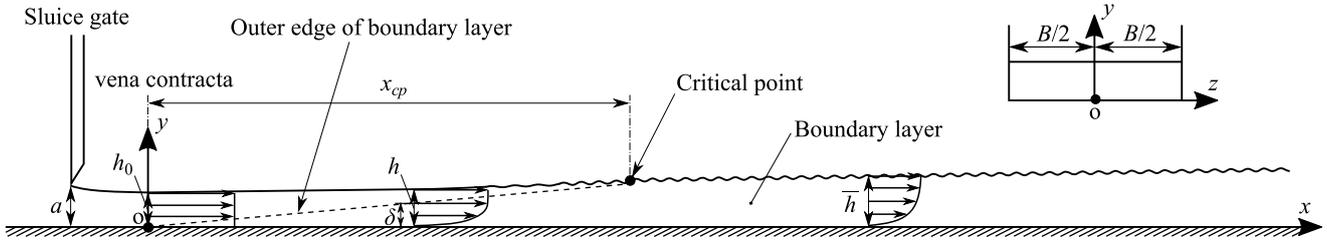
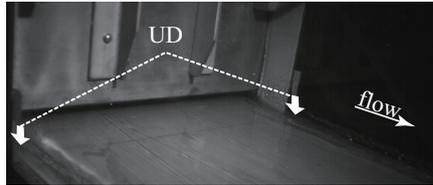
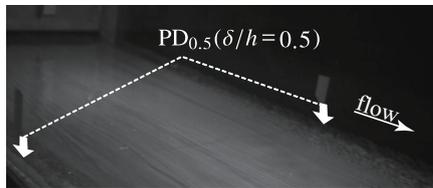


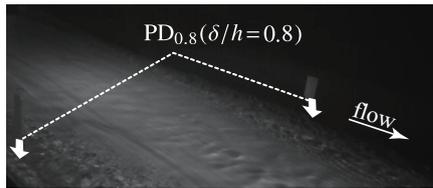
図1: 射流の定義図



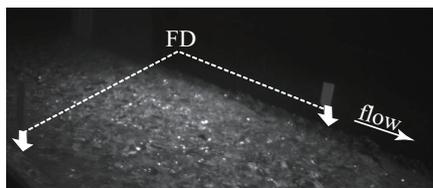
(a) UD



(b) PD<sub>0.5</sub>



(c) PD<sub>0.8</sub>



(d) FD ( $x = 1.7x_{cp}$ )

図2: 射流水面形状 ( $F_r = 7.2$ ,  $R_e = 6.2 \times 10^4$ )

4. 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図3に示す。ここに、 $\bar{h}$  は時間平均された射流水深、 $h' [= \bar{h} - h]$  は変動水深、 $h_0$  は縮流部 ( $x = 0$ ) における水深である。図3に示されるように、 $0 \leq \delta/h \leq 0.7$  の場合、 $\sqrt{h'^2}/\bar{h}$  はほぼ一定の値である。これは、UD (図2(a)) と PD<sub>0.5</sub> (図2(b)) の水面の凹凸と変動は目視では観察されないことに対応している。 $\delta/h = 1.0$  ( $1.5x_{cp} \leq x \leq 2x_{cp}$ ) の  $\sqrt{h'^2}/\bar{h}$  は  $0 \leq \delta/h \leq 0.7$  の  $\sqrt{h'^2}/\bar{h}$  に比べて大きい。これは、UD と PD<sub>0.5</sub> の水面の凹凸と変動は認められず (図2(a), 2(b)), FD の水面の凹凸と変動が認められた (図2(d)) ことに対応し、乱流境界層が十分に発達すると射流水面の凹凸と変動が大きくなることを示している。 $\delta/h \gtrsim 0.7 \sim 0.8$  の場合、 $\delta/h$  の増加に伴い

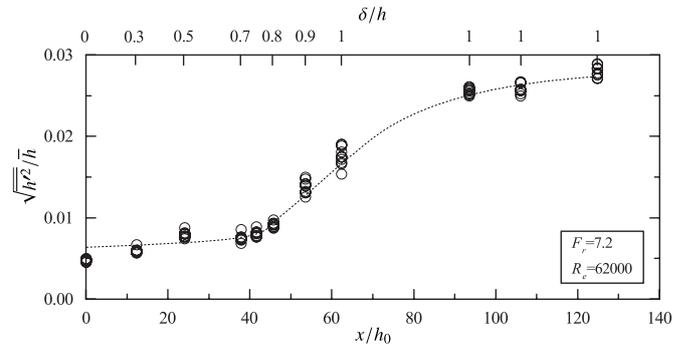


図3: 水面変動の流下方向変化

$\sqrt{h'^2}/\bar{h}$  は増加する。これは、PD<sub>0.8</sub> 付近の射流水面に間欠的な凹凸と変動が観察された結果 (図2(c)) に対応し、水面の凹凸と変動が生じ始める断面の乱流境界層の発達状態であることを示した結果である。このことは、PD<sub>0.8</sub> の場合は境界層内の乱れが間欠的に水面まで到達し、水面の凹凸と変動を誘起したためと考えられる。すなわち、平板上の乱流境界層では、 $y = 1.2\delta$  まで間欠的に乱流境界層が影響を及ぼすこと<sup>6)</sup> と類似な現象が生じ、 $y = 1.2\delta = 1.2 \times 0.8h = 0.96h \approx h$ 、つまり水面近く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。

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性的かつ定量的な検討を行った。 $F_r = 4 \sim 8$ ,  $R_e = 6.2 \times 10^4$  の射流を対象に高速度ビデオカメラを用いて撮影した射流水面の映像と、 $F_r = 7.2$ ,  $R_e = 6.2 \times 10^4$  の射流を対象に超音波水位計を用いて測定した水面変動の結果に基づき、①  $0 \leq \delta/h \leq 0.7$  の場合、射流水面の凹凸と変動は小さい；②乱流境界層が十分に発達すると射流水面の凹凸と変動は大きくなる；③射流水面の凹凸と変動が生じ始める断面の乱流境界層の発達状態は  $0.7 \lesssim \delta/h \lesssim 0.8$  である、ことが示された。

参考文献

- 1) 高橋正行, 大津岩夫: 跳水内部の空気混入特性, 土木学会論文集 B1 (水工学), 71 (4), I\_529-I\_534, 2015.
- 2) 高橋正行, 大津岩夫: 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, 2009.
- 3) Takahashi, M., Ohtsu, I.: Effects of inflows on air entrainment in hydraulic jumps below a gate, *J. Hydr. Res.*, DOI:10.1080/00221686.2016.1238016, 2016.
- 4) Ohtsu, I., Yasuda, Y.: Characteristics of supercritical flow below sluice gate, *J. Hydr. Engrg.*, 120(3), 332-346, 1994.
- 5) 持田俊, 安田陽一, 高橋正行, 大津岩夫: 自由跳水の流況形成に対するレイノルズ数の影響, 土木学会年次講演会概要集, 65, II 部門, 391-392, 2010.
- 6) Klebanoff, P.S.: Characteristics of turbulence in boundary layer with zero pressure gradient, *NACA Rep.*, 1247, 1955.