

ゲート下流の射流の水面変動に与える境界層の発達状態とフルード数の影響

日本大学大学院理工学研究科 学生会員 ○佐藤柳言
 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

スルースゲート下流側に形成される射流は、乱流境界層の発達状態によって undeveloped flow (UD と略す), partially developed flow (PD と略す), および fully developed flow (FD と略す) に分けられている^{1,2)}。このような射流の特性を考慮し、ゲート下流側の水面形状と跳水位置の確定¹⁾、UD と FD における跳水の空気混入メカニズムの解明²⁾、FD における跳水の流況特性³⁾が明らかにされた。なお、乱流境界層の発達状態が UD と PD で $\delta/h = 0.5$ (PD_{0.5} と略す) の場合 (図 1(a), 1(b)) は射流の水面は滑らかで変動もなく、PD で $\delta/h = 0.8$ (PD_{0.8} と略す) の場合 (図 1(c)) は凹凸と変動が間欠的に生じ、FD の場合 (図 1(d)) は凹凸と変動が常に生じていることが示された²⁾。ここに、 δ は乱流境界層厚、 h は水深である。しかし、射流水面の凹凸と変動の有無は高速度ビデオカメラによる観察結果であり、射流水面の凹凸と変動を定量的に評価する必要がある。さらに、水面変動に対するフルード数の影響は明確には示されておらず、乱流境界層の発達状態とフルード数が水面変動に与える影響については不明な点が多い。

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が乱流境界層の発達状態とフルード数によって受ける影響について実験的検討を行い、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。

2. 実験

実験は、スルースゲートを有する長方形断面水平水路において、表 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鉛直上方の 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、 $Re [= Vh/\nu]$ はレイノルズ数、 ν 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 ($x/x_{cp} = 1.0, 1.5, 1.7, 2.0$) となる断面を対象とした。なお、UD の場合は $x = 0$ (縮流部), 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 $2.0x_{cp}$ 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 (図 2 参照)。与えられた F_r , Re , および δ/h (UD, PD, FD) となる x/h_0 を求めるため、Ohtsu and Yasuda の方法¹⁾を用いて δ , h , x を計算し、表 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 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、 $h_0 = 0.64a$ ⁴⁾で示される。

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 δ/h と射流水深 h の標準偏差 $\sqrt{h'^2}$

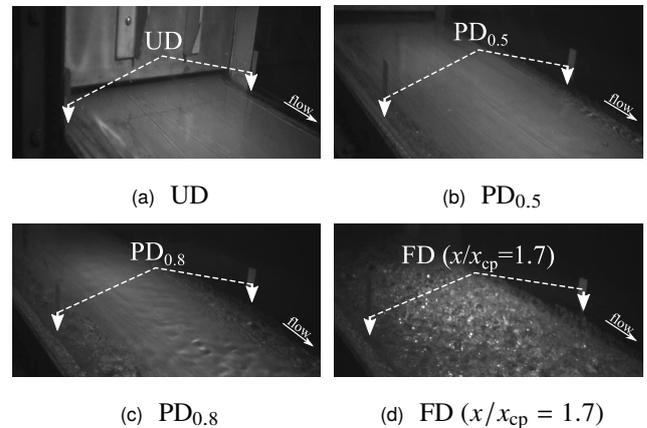


図 1 射流の水面形状 ($F_r = 7.2$, $Re = 6.2 \times 10^4$)²⁾

表 1 実験条件

Flow condition	F_r [-]	$Re \times 10^{-4}$ [-]	B [m]	δ/h [-]	x/x_{cp} [-]
UD	2.2 ~ 8.2	6.2	0.4	0	0
PD	7.2	6.2	0.4	0.3~0.9	0.2 ~ 0.9
FD	2.2 ~ 8.2	6.2	0.4	1	1.0 ~ 2.0

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} は時間平均水深、 $h' [= h - \bar{h}]$ は変動水深である。

図 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 ($x/x_{cp} \geq 1$) 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 ($0 < \delta/h \lesssim 0.7$) 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 ($0 < \delta/h \lesssim 0.7$) の水面に凹凸が生じないことを示しており、水面の観察によって UD と PD_{0.5} の水面に凹凸と変動が認められなかった結果 (図 1(a), 1(b)) と対応している。

FD ($x/x_{cp} \geq 1.5$) の $\sqrt{h'^2}/\bar{h}$ は、図 3 に示されるように、ほぼ一定で UD と PD に比べて大きい値を示す。これは、FD ($x/x_{cp} \geq 1.5$) 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発達した状態になることを示している。また、FD ($x/x_{cp} = 1$) の $\sqrt{h'^2}/\bar{h}$ は FD ($x/x_{cp} \geq 1.5$) に比べて小さい値を示す。これは、乱流境界層が水面に到達する critical point の断面 ($x/x_{cp} = 1$) において、水面付近の乱れは十分に発達していないことを示している。

PD ($0.8 \lesssim \delta/h < 1$) では、図 3 に示されるように、乱流境界層の発達 (δ/h の増加) に伴い $\sqrt{h'^2}/\bar{h}$ は増加してくる。このことから、射流の水面の凹凸と変動は PD_{0.8} ($\delta/h \approx 0.8$) 付近から生じ始めることを示しており、PD_{0.8} の水面に間欠的な凹凸と変動が観察された結果 (図 1(c)) に対応している。これは、平板上の乱流境界層において、乱流境界層内

キーワード：水面変動，乱流境界層の発達状態，フルード数，射流

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

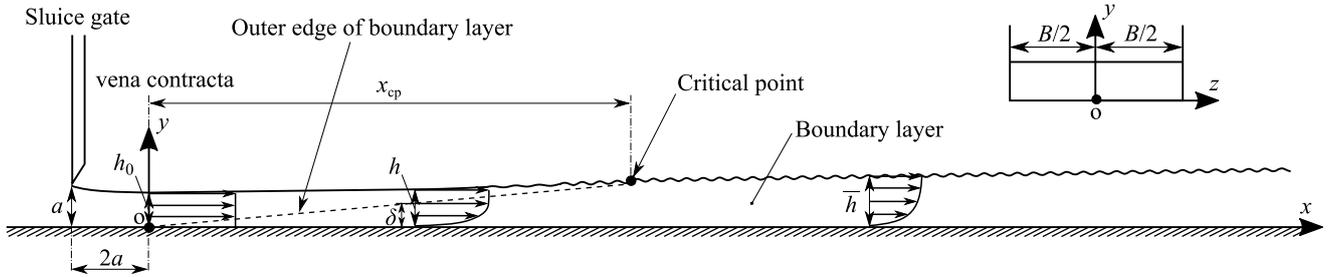


図2 定義図

の乱れが $y = 1.2\delta$ まで間欠的に影響を及ぼすこと⁵⁾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. 水面変動に対するフルード数の影響

射流の水面変動に対するフルード数 F_r の影響を図4に示す。参考のため、中山ら⁶⁾の実験値をプロットするが、 $Re = 1.3 \times 10^4, 3.0 \times 10^4$ であり、 Re が小さいことに注意されたい。

図4に示されるように、UDの場合、 $F_r \gtrsim 4$ では F_r の変化に関わらず $\sqrt{h^2/\bar{h}}$ 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。これは、UDの水面に凹凸と変動が認められなかった結果と対応している(図1(a))。 $2 \lesssim F_r \lesssim 4$ のUDでは F_r の減少とともに $\sqrt{h^2/\bar{h}}$ は大きくなり、 $2 \lesssim F_r \lesssim 4$ のUDの水面に変動が生じている。これは、スルースゲート上流側の水深が小さく、そこでの乱れが縮流部の下流側まで影響を及ぼしたためと考えられる。

FD ($x/x_{cp} \gtrsim 1.5$)の場合、 F_r の増加に伴い $\sqrt{h^2/\bar{h}}$ は大きくなっている。

5. まとめ

スルースゲート下流側に形成される射流を対象に、水面変動に与える乱流境界層の発達状態とフルード数の影響について明らかにされた結果を以下に示す。

- 与えられた F_r と Re に対して、 $0 \leq \delta/h \lesssim 0.7$ では水面に凹凸と変動がなく $\sqrt{h^2/\bar{h}}$ の値も小さい。 $0.8 \lesssim \delta/h \leq 1$ では水面に凹凸と変動が生じ、 δ/h の増加に伴い $\sqrt{h^2/\bar{h}}$ は大きくなる。すなわち、 $0.7 \lesssim \delta/h \lesssim 0.8$ で乱流境界層が間欠的に水面に到達しはじめているものと考えられる。
- 与えられた F_r と Re に対して、 $\delta/h = 1$ のとき、 $x/x_{cp} \lesssim 1.5$ では x/h_0 の増加に伴い $\sqrt{h^2/\bar{h}}$ の値は増加するが、 $x/x_{cp} \gtrsim 1.5$ になると $\sqrt{h^2/\bar{h}}$ の値は一定になる。すなわち、 $x/x_{cp} \gtrsim 1.5$ になると乱流境界層が十分に発達した状態になる。
- 与えられた Re に対して縮流部 (UD) では、 $F_r \gtrsim 4$ の場合は F_r の変化に関わらず水面変動 $\sqrt{h^2/\bar{h}}$ は小さく、水面に凹凸は生じていない。一方、 $2 \lesssim F_r \lesssim 4$ の場合は水面に変動が生じている。
- 与えられた Re に対して乱流境界層が十分に発達した (FD) $x/x_{cp} \gtrsim 1.5$ では、 F_r の増加に伴って水面の凹凸と変動が大きくなっている。

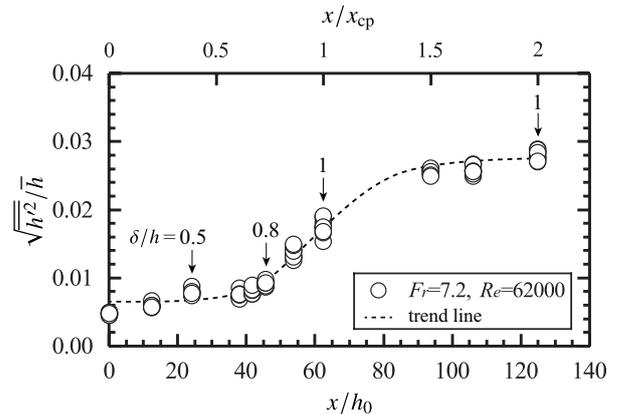


図3 水面変動の流下方向変化

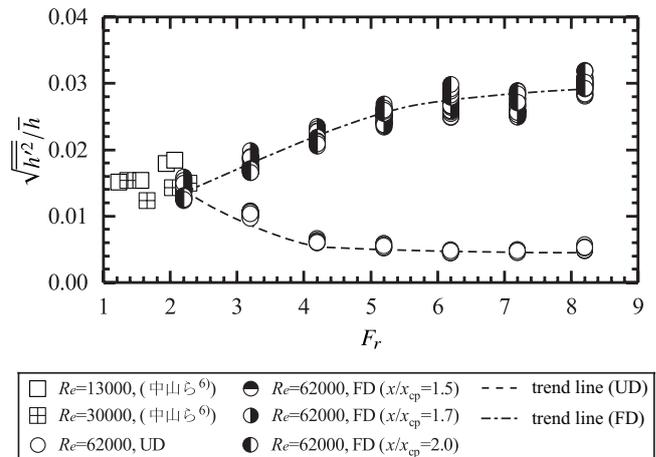


図4 UDとFD ($x/x_{cp} \gtrsim 1.5$)の水面変動に対する F_r の影響

参考文献

- Ohtsu, I. and Yasuda, Y.: Characteristics of supercritical flow below sluice gate, *J. Hydr. Engrg.*, 120(3), 332-346, 1994.
- 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.
- 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), 土木学会, 74 (4), 2018. (印刷中)
- Rajaratnam, N.: Free flow immediately below sluice gates, *J. Hydr. Div.*, ASCE, 103(4), 345-351, 1977.
- Klebanoff, P.S.: Characteristics of turbulence in boundary layer with zero pressure gradient, *NACA Rep.*, 1247, 1955.
- 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.