

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

日本大学大学院理工学研究科 学生会員 ○中島直樹
 日本大学理工学部 正会員 佐藤柳言
 日本大学理工学部 正会員 高橋正行

表 1 実験条件

Fr_0 [-]	$Re \times 10^{-4}$ [-]	B/\bar{h}_0 [-]	a [m]	B [m]	q [m ² /s]
8.0	2.2	65	0.0144	0.60	0.0222
8.0	4.2	42	0.0222	0.60	0.0424
8.0	7.2	18	0.0345	0.40	0.0823
8.0	11	17	0.0373	0.40	0.0925

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, 図 1 参照) で一様な流速分布となり、縮流部の下流側では乱流境界層が流下とともにその厚さを増し、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 と呼ばれている¹⁾。

Takahashi and Ohtsu²⁾ は、跳水への流入射流の乱流境界層の発達状態によって射流の水面の凹凸と変動の有無が生じることを示し、流入射流の水面の凹凸と変動の有無が跳水の空気混入メカニズムに影響することを示した。すなわち、跳水内部の空気混入特性を解明するために、射流の水面変動の特性を知ることが重要である。

射流の水面変動の特性については、比較的大きいレイノルズ数を対象に、ある一つの縮流部フルード数のもとで水面の乱れが十分に発達するために必要な流下距離が示された³⁾。しかしながら、広範囲なレイノルズ数に対して射流の水面の乱れが十分に発達するために必要な流下距離は明らかにされておらず、射流の水面変動の特性に対するレイノルズ数の影響について不明な点が多い。

本研究は、長方形断面水平水路のスルースゲート下流側の射流を対象に、射流の水面変動に対するレイノルズ数の影響を実験によって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 の長方形断面水平水路 (図 1 参照) において、表 1 に示す縮流部のフルード数 $Fr_0 [= U_0/\sqrt{g\bar{h}_0}]$ とレイノルズ数 $Re [= \rho q/\mu]$ が得られるように、スルースゲートの開口高 a と流量 Q を調整して行われた。ここに、 U_0 は縮流部の断面平均流速、 g は重力加速度、 \bar{h}_0 は縮流部の水深、 ρ は水の密度、 $q [= Q/B]$ は単位幅流量、 μ は水の粘性係数、 x は縮流部を原点とする水路床に沿った流下方向座標、 y は水路床を原点とする鉛直上向きの座標、 z は水路横断方向の座標、 \bar{u} は x 方向の時間平均流速、 U は乱流境界層外側の \bar{u} である。なお、縮流部の水深は $\bar{h}_0 = 0.64a^{1.4}$ とし、縮流部はスルースゲートから下流に $2a$ の位置^{1),4)} とした (図 1 参照)。

水路中央面 ($z = 0$, 図 1 参照) において、時間平均水深 \bar{h} と水面変動 $\sqrt{h'^2}$ は超音波水位計 (採取時間 200 s, 採取間隔 100 Hz) で測定された。ここに、 $h' [= h - \bar{h}]$ は変動水深、 h は瞬間水深である。また、水路中央面 ($z = 0$) における射流

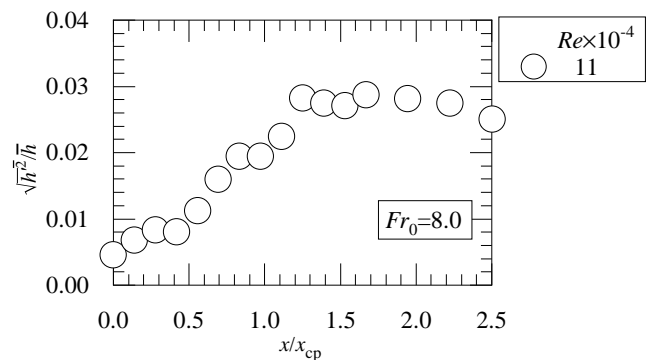


図 2 水面変動の流下方向変化

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 (撮影速度 1000 fps, 露光時間 1/1000 s) を用いて射流の水面を撮影した。

3. 結果

3.1 水面変動の流下方向変化

射流の水面変動の流下方向変化を示すため、 $Fr_0 = 8.0$ かつ $Re = 1.1 \times 10^5$ の場合の $\sqrt{h'^2}/\bar{h}$ の実測値を $\sqrt{h'^2}/\bar{h} = f(x/x_{cp})$ の関係で整理した結果の一例を図 2 に示す。ここに、 x_{cp} は縮流部から critical point までの流下距離であり、Ohtsu and Yasuda¹⁾ の方法で求められた $\delta = \bar{h}$ (δ は乱流境界層厚) となる x である。また、射流の水面を撮影した静止画の一例を図 3 に示す。なお、図 3 に示す δ/\bar{h} の値は、Ohtsu and Yasuda¹⁾ の方法で求められた計算値である。

図 2 に示されるように、 $0 \leq x/x_{cp} \leq 0.5$ では、 x/x_{cp} の大きさに関わらず $\sqrt{h'^2}/\bar{h}$ の値はほぼ一定で $\sqrt{h'^2}/\bar{h} \approx 0.008$ となっている。これは、縮流部近くの水面では、図 3(a) に示されるように、凹凸と変動の生じない滑らかな水面が形成されているためである。

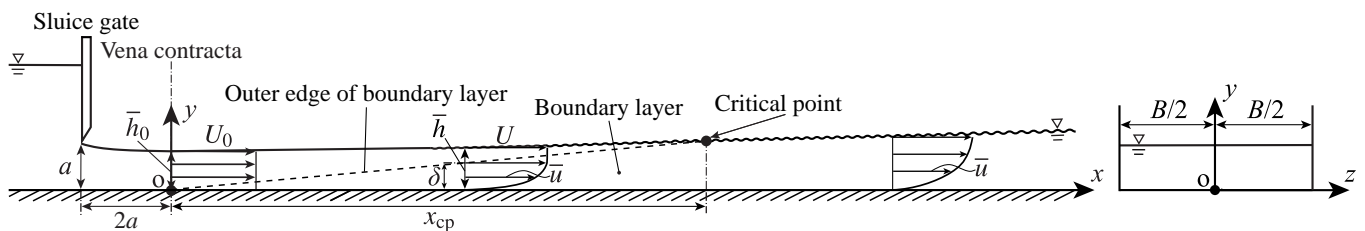


図 1 スルースゲート下流側の射流の定義図

キーワード：射流, スルースゲート, 水面変動, レイノルズ数, 乱流境界層

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

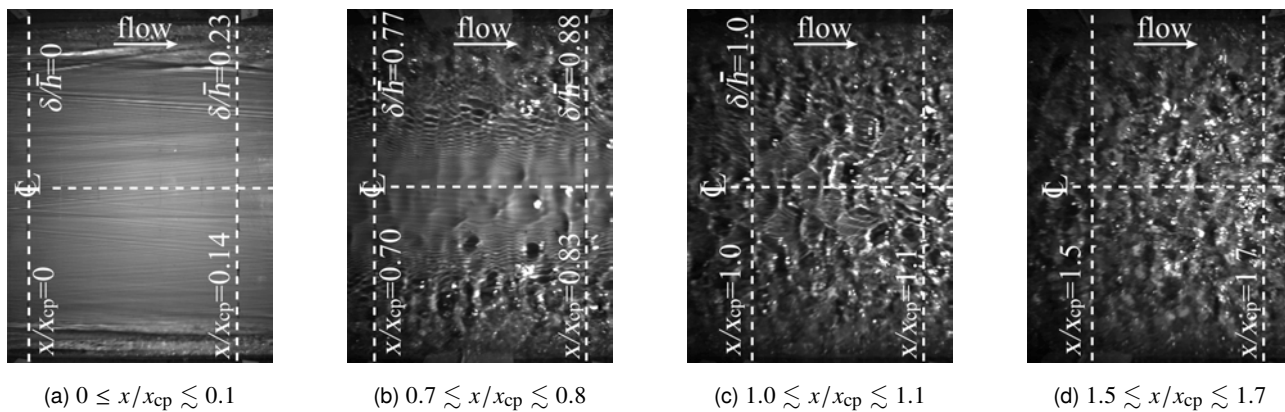
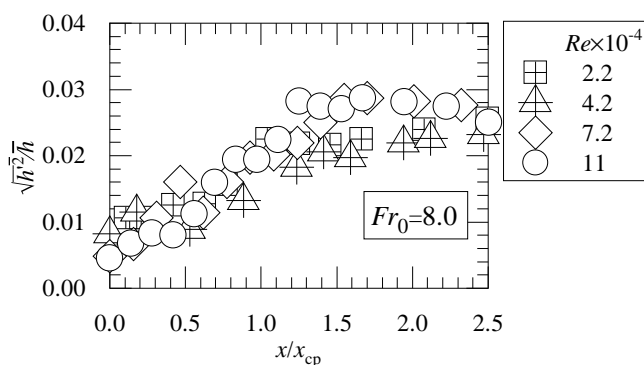
図3 射流の水面 ($Fr_0 = 8.0$, $Re = 1.1 \times 10^5$)

図4 水面変動の流下方向変化に対するレイノルズ数の影響

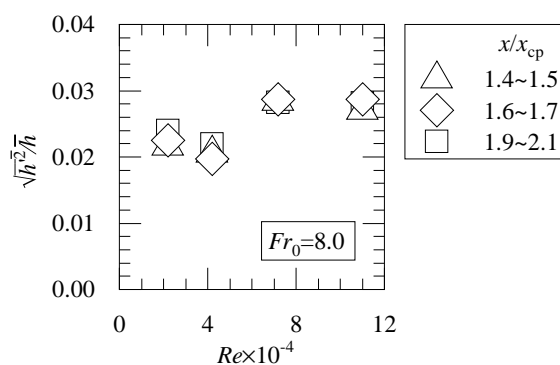
図2に示されるように、 $0.6 \lesssim x/x_{cp} \lesssim 1.3$ では x/x_{cp} の増加に伴い $\sqrt{h^2}/\bar{h}$ の値は大きくなる。これは図3(b)の水面に比べて図3(c)の水面のほうが凹凸と変動が大きくなっていることに対応している。

図2に示されるように、 $1.4 \leq x/x_{cp} \leq 2.5$ の $\sqrt{h^2}/\bar{h}$ はほぼ一定で、 $0 \leq x/x_{cp} < 1.4$ の $\sqrt{h^2}/\bar{h}$ より大きい値を示す。これは、 $x/x_{cp} \gtrsim 1.5$ の水面[図3(d)参照]では、critical point近くの水面[図3(c)参照]と比べて、水面の凹凸と変動が大きくなっていることに対応している。すなわち、 $x/x_{cp} \gtrsim 1.5$ では水面の凹凸と変動が十分に発達した状態になっているものと考えられる。

3.2 水面変動に対するレイノルズ数の影響

与えられた $Fr_0 = 8.0$ に対して、 Re を変化させた場合の $\sqrt{h^2}/\bar{h}$ の流下方向変化を図4に示す。図4に示されるように、 $2.2 \times 10^4 \leq Re \leq 1.1 \times 10^5$ の場合、 Re の大きさに関わらず $\sqrt{h^2}/\bar{h}$ は x/x_{cp} に対して概ね同じ変化傾向を示す。すなわち、3.1で述べたように、 $0 \leq x/x_{cp} \lesssim 0.5$ では $\sqrt{h^2}/\bar{h}$ はほぼ一定で小さい値を示し、 $0.6 \lesssim x/x_{cp} \lesssim 1.3$ では x/x_{cp} の増加に伴い $\sqrt{h^2}/\bar{h}$ の値は大きくなり、 $x/x_{cp} \gtrsim 1.5$ では $\sqrt{h^2}/\bar{h}$ はほぼ一定で大きい値を示している。このことから、 $Fr_0 = 8.0$ かつ $2.2 \times 10^4 \leq Re \leq 1.1 \times 10^5$ のとき、 Re の大きさによらず、 $x/x_{cp} \gtrsim 1.5$ では水面変動は十分に発達している。

相対流下距離 $x/x_{cp} \gtrsim 1.5$ において水面変動 $\sqrt{h^2}/\bar{h}$ の値に対する Re の影響を図5に示す。図5に示されるように、与えられた x/x_{cp} に対する $\sqrt{h^2}/\bar{h}$ の値は、 $Re = 7.2 \times 10^4$ と $Re = 1.1 \times 10^5$ のほうが $Re = 2.2 \times 10^4$ と $Re = 4.2 \times 10^4$

図5 $x/x_{cp} \gtrsim 1.5$ の水面変動に対するレイノルズ数の影響

よりも大きい値を示す。

4. まとめ

長方形断面水平水路のスルースゲート下流側の縮流部フルード数 $Fr_0 = 8.0$ の射流を対象に、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結果を以下に示す。

- $0 \leq x/x_{cp} \lesssim 0.5$ の場合、 Re の大きさによらず水面は滑らかで凹凸と変動が認められない。
- 水面変動が十分に発達するまでに必要な流下距離は、 $2.2 \times 10^4 \leq Re \leq 1.1 \times 10^5$ の場合、 Re の大きさによらず $x/x_{cp} \approx 1.5$ である。
- $x/x_{cp} \gtrsim 1.5$ の場合、レイノルズ数の大きい条件($Re = 7.2 \times 10^4$, $Re = 1.1 \times 10^5$)のほうがレイノルズ数の小さい条件($Re = 2.2 \times 10^4$, $Re = 4.2 \times 10^4$)よりも与えられた x/x_{cp} に対する $\sqrt{h^2}/\bar{h}$ の値は大きい。

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) Ohtsu, I. and Yasuda, Y.: Characteristics of supercritical flow below sluice gate, *J. Hydraul. 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. Hydraul. Res.*, 55(2), 259–268, 2017.
- 3) Satoh, R., Takahashi, M., and Ohtsu, I.: Effect of boundary-layer development on the water-surface fluctuations of supercritical flow below a sluice gate, *Proc. 8th IJREWHS*, 2021. (to be published)
- 4) Rajaratnam, N.: Free flow immediately below sluice gates, *J. Hydraul. Div.*, 103(4), 345–351, 1977.