

跳水内部の空気混入特性

日大院理工学研究科 学生会員 ○菅谷 一平
 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 大津 岩夫

1. はじめに

一般に跳水中には空気を取り込まれ、多量の気泡が混入した流れ(white water)となっている。跳水への空気混入メカニズムや跳水内部の空気混入特性については不明な点が多く、この解明が必要である。

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(図-1 参照)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。

従来の研究において Resch and Leutheusser¹⁾は UD と FD によって跳水内部の空気混入率【=空気の体積/(空気の体積+水の体積)】および流速特性に違いのあることを示した。しかし、この理由は不明であり、さらに実験値は熱線流速計で得られているため、空気混入率の測定としてはその精度に問題がある。Chanson and Gualtieri²⁾は点電極型ボイド率計を用いて PD の流況のみを対象に空気混入特性を示しているが、FD と UD についての検討はなされていない。高橋・大津³⁾と Ohtsu et al.⁴⁾は点電極型ボイド率計を用いて、一定の跳水始端のフルード数のもとで、UD, PD, および FD によって跳水内部の空気混入率が変化することを示している。しかしながら、この理由については、さらなる解明が必要である。また、広範囲のフルード数に対して、乱流境界層の発達状態(UD, PD, および FD)が跳水中へ空気を取り込む機構や跳水内部の空気混入特性に与える影響については不明である。

この研究では、跳水始端の乱流境界層の発達状態(UD, PD, および FD)が跳水内部の空気混入率におよぼす影響について、広範囲なフルード数に対して実験的に検討し、跳水内部への空気混入メカニズムについて明らかにしようとしたものである。

2. 実験方法

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を用いて、定常跳水が形成されるフルード数

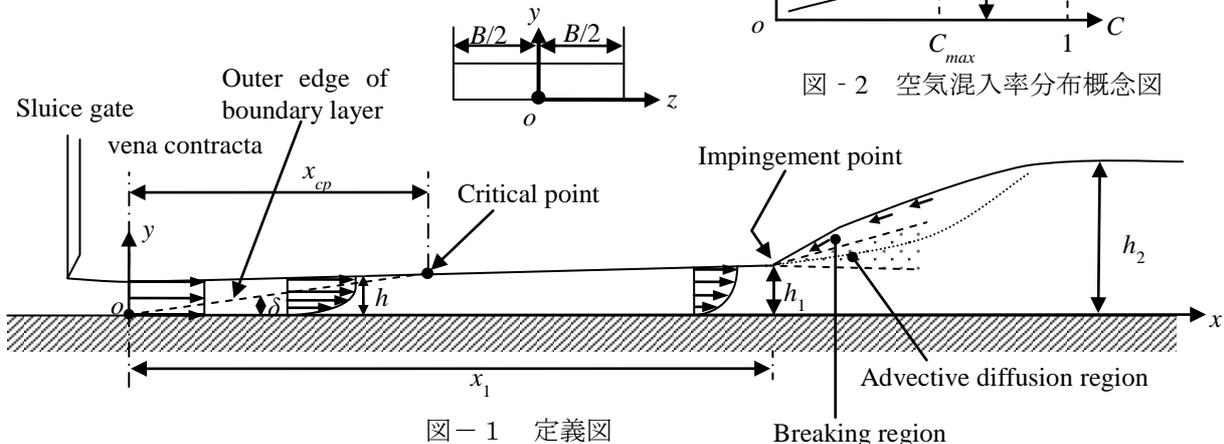


図-1 定義図

$F_{r1}=[V_1/(gh_1)^{1/2}]$ とレイノルズ数 $R_e=[V_1h_1/\nu]$ を対象に、表-1に示す条件のもとで実験を行った。ここに、 g は重力加速度、 h_1 は跳水始端水深、 V_1 は跳水始端断面の断面平均流速、 ν は水の動粘性係数である。FDの場合の跳水始端断面を $x_1=2.0x_{cp}$ (x_{cp} は critical point の長さ)、UDの場合は $x_1=0$, PDの場合は $\delta/h_1=0.5, 0.8$ となる x_1 とした。射流の乱流境界層厚さ δ と水深 h は Ohtsu and Yasudaの方法⁵⁾を用いて計算し、表-1の条件が得られるように流量、スルースゲートの開口高、水路下流端の堰高を調整した。跳水内部の空気混入率の測定には2点電極型ボイド率計(プローブ直径 25 μ m, 採取間隔 50 μ s, 採取時間 20s)を使用した。

3. 跳水内部の空気混入率分布

アスペクト比 $B/h_1 \geq 10$, $R_e \geq 6.0 \times 10^4$ の場合、水路中央断面($z=0$)での跳水内部の空気混入率 C は次の関係で示される³⁾。

$$C = f\left(\frac{y}{h_1}, \frac{x-x_1}{h_1}, \frac{\delta}{h_1}, F_{r1}\right) \quad (1)$$

表-1 実験条件

Inflow Condition	F_{r1}	$R_e \times 10^{-4}$	B	δ/h_1
	[-]	[-]	[m]	[-]
UD	4.2~8.2	6.2	0.4	0
PD	5.2~8.2	6.2	0.4	0.5 0.8
FD	5.2~8.2	6.2	0.4	1

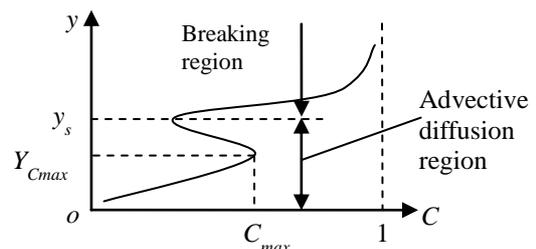


図-2 空気混入率分布概念図

キーワード 空気混入率, 跳水, 乱流境界層, 気液混相流, スルースゲート

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 TEL. & FAX. 03-3259-0676

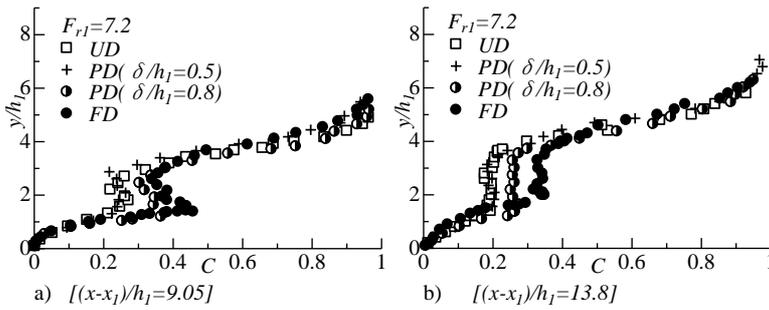


図 - 3 UD, PD, FD による C 分布の変化

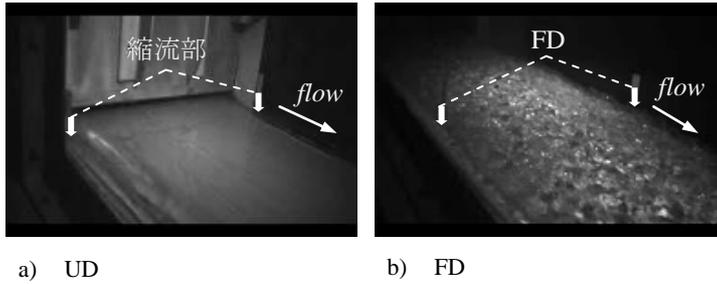


図 - 4 射流水面の様子

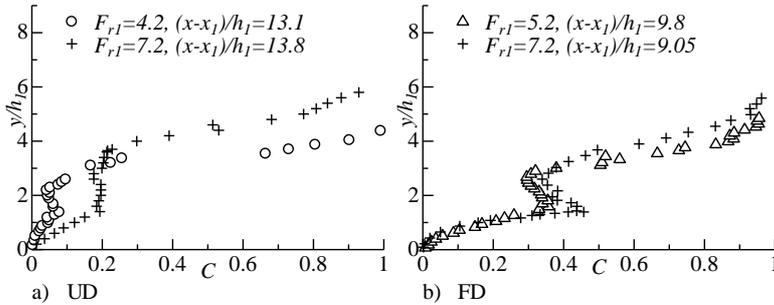


図 - 5 F_r1 による C 分布の変化

Impingement point(図 - 1)近くで取り込まれた気泡は跳水中で移流・拡散する. 跳水内部の C の値は $y \leq y_s$ で底面から y の増加に伴い大きくなり, 空気混入率の極大値 C_{max} を経て C の値は減少する. この領域($y \leq y_s$)を Chanson⁶⁾に従って advective diffusion region と呼ぶことにする(図 - 2). 一方, 跳水の上部($y > y_s$)では, 表面渦の水面の breaking により空気を取り込まれるため, C の値は 1 に近づく. この領域を breaking region と呼ぶことにする³⁾(図 - 2).

与えられた F_{r1} および跳水始端からの距離 $(x-x_1)/h_1$ に対して UD, PD[$\delta/h_1=0.5$ の PD(PD_{0.5} と略す), $\delta/h_1=0.8$ の PD(PD_{0.8} と略す)], FD による, C 分布の変化の一例を図-3 に示す. 与えられた F_{r1} および $(x-x_1)/h_1$ に対して advective diffusion region 内で UD と PD_{0.5} の場合の空気混入率分布はほぼ一致している. また, FD の C の値は UD と PD_{0.5} の C の値よりも大きい. これは, FD の場合, 境界層が水面にまで到達し, 水面の凹凸を伴う変動(図 - 4 b)を誘起し, impingement point(図 - 1)から取り込まれる空気量が多くなったためと考えられる. さらに, PD_{0.8} の C の値は UD と FD の C の中間の値を示す. これは, PD_{0.8} の場合, 乱れが間欠的に水面まで達し, 水面の凹凸を伴う変動が間欠的に誘起されたためと考えられる. Ervine and Falvey⁷⁾は pool に突入する water jet の乱れ強さが大きくなると pool に混入する空気の量が

多くなることを示している. また, Wilhelms and Gulliver⁸⁾は急勾配水路からの流れが水路下流側の pool に突入(plunging)するとき, 水面の凹凸の間の空気が突入点(impingement point)から気泡となり, pool 内に取り込まれることを指摘している. これと類似な現象が FD, PD_{0.8} の場合にも生じ, 流入射流の水面の凹凸の間の空気が跳水内部に取り込まれ, C の値が増加したものと考えられる. 一方, breaking region 内の C 分布は impingement point での乱流境界層の発達状態に関わらず同一の分布を示す(図 - 3).

与えられた乱流境界層の発達状態(UD, PD, FD)および $(x-x_1)/h_1$ に対して F_{r1} による C 分布の変化の一例を図 - 5 に示す. advective diffusion region 内の同一の y/h_1 での C の値は, F_{r1} が増加すると増加する. これは, UD, PD, FD 共に F_{r1} が増加すると表面渦の水面勾配と流入射流の流速が大きくなり, impingement point から取り込まれる空気量が多くなったためと考えられる. さらに, FD の場合は, 流入射流の水面での乱れ強さ $\sqrt{u'^2}$ (u' は流下方向の変動流速)が F_{r1} と共に大きくなり, 流入射流の水面の凹凸を伴う変動も F_{r1} と共に大きくなるため impingement point から取り込まれる空気量が増加したものと考えられる.

4. まとめ

跳水内部の空気混入領域は, impingement pint から取り込まれた気泡が移流拡散される advective diffusion region と表面渦の水面の breaking によって空気を取り込まれる breaking region に分けられる.

Advective diffusion region 内の空気混入率 C の大きさは, 与えられた跳水始端断面のフルード数 F_{r1} に対して, 乱流境界層の発達状態の影響を大きく受け, FD が UD より大きい C を示した. これは, 流入射流の水面の凹凸を伴う変動の大きさが advective diffusion region 内の空気混入率 C の大きさに影響を与えたことによると考えられる. 一方, 与えられた F_{r1} に対して, breaking region の C の大きさは乱流境界層の発達状態の影響を受けないことが示された.

乱流境界層の発達状態を同一にした場合, F_{r1} の増加に伴い advective diffusion region 内の C は増加する. これは, F_{r1} の増加によって表面渦の水面勾配と流入射流の流速が大きくなったためと考えられる. さらに, FD の場合は流入射流の乱れ強さが F_{r1} の増加と共に大きくなったことも影響したものと考えられる.

5. 参考文献

- 1) Resch, F.J., Leutheusser, H. J., (1972) Le ressaut hydraulique: mesures de turbulence dans la region diphasique, *La Houille Blanche*, 4, 279-293.
- 2) Chanson, H., Gualtieri, C., (2008), Similitude and scale effects of air entrainment in hydraulic jumps *J. Hydr. Res.*, 46(1), 35-44.
- 3)高橋正行,大津岩夫, (2009), 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.
- 4)Ohtsu, I., Yasuda, Y., Takahashi, M. (2009) Discussion of Similitude and scale effects of air entrainment in hydraulic jumps, *J. Hydr., Res.*, 47(2), 285-287.
- 5)Ohtsu, I., Yasuda, Y., (1994) Characteristics of supercritical flow below sluice gate *J. Hydr. Engrg.*, 120(3), 332-346.
- 6) Chanson, H.(1997) *Air bubble entrainment in free surface turbulent shear flows*, Academic Press, London, U.K..
- 7)Ervine, D. A., Falvey, H. T.(1987) Behavior of turbulent water jets in the atmosphere and in plunge pools, *Proc. Inst.Civ. Eng.*, Part 2, 83, 295-314.
- 8)Wilhelms, S.C., Gulliver, J.S. (2005) Bubbles and waves description of self-aerated spillway flow, *J. Hydr. Res.*, 43(5), 522-531.