

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 Leutheusser^{1), 2)}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、空気混入流の測定としてはその精度に問題がある。Chanson and Gualtieri³⁾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⁴⁾と Ohtsu et al.⁵⁾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, 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特性に

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

跳水内部の空気混入特性を明らかにするため、スルースゲートを有する水路幅 B の滑面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 $F_{r1} [=V_1/(gh_1)^{1/2}]$ とレイノルズ数 $Re [=V_1 h_1/\nu]$ 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 $x_1 = 2.0x_{cp}$ 、UD の場合は $x_1 = 0$ 、PD の場合は $\delta/h_1 = 0.5$ もしくは 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⁶⁾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 $25\mu\text{m}$, 採取間隔 $50\mu\text{s}$, 採取時間 20s)を使用した。

表-1 実験条件

Inflow Condition	F_{r1} [-]	$Re \times 10^{-4}$ [-]	B [m]	δ/h_1 [-]
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

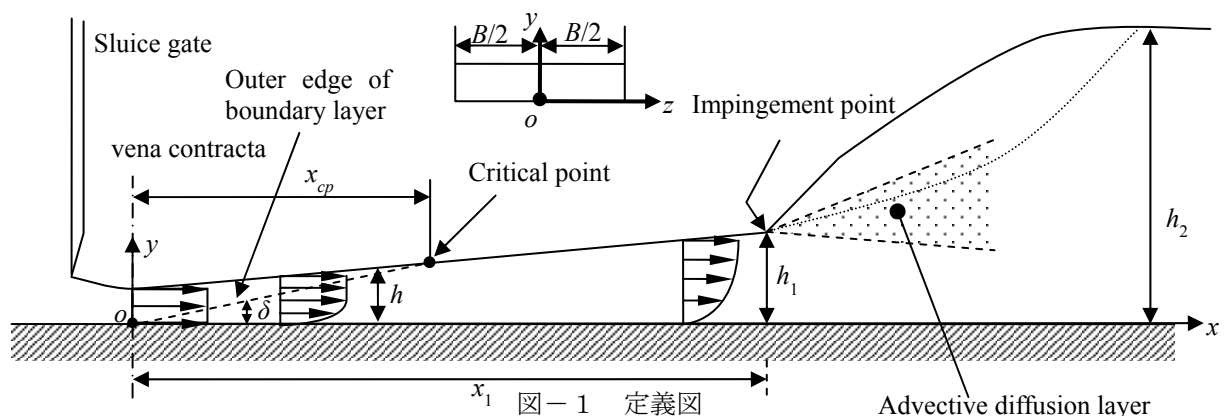


図-1 定義図

キーワード 空気混入率, 跳水, 乱流境界層, 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

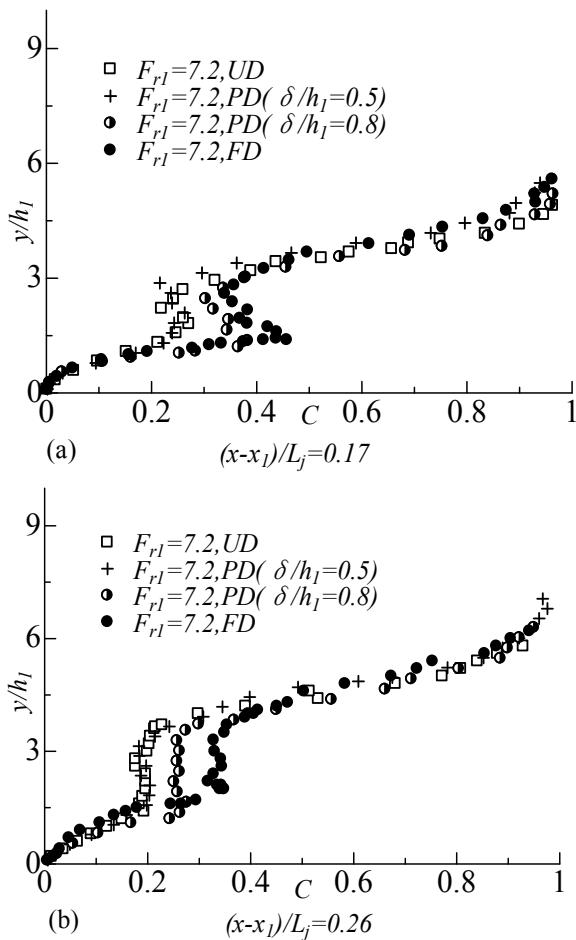


図-2 乱流境界層の発達状態による空気混入率分布の違い

3. 跳水内部の空気混入率分布

長方形断面水平水路における跳水始端断面のアスペクト比 B/h_1 が $B/h_1 \geq 10$ の場合の水路中央断面($z=0$)での跳水内部の空気混入率 C は次の関係で示されるものと考えられる⁴⁾.

$$C = f\left(\frac{x-x_1}{L_j} \text{ or } \frac{x-x_1}{h_1}, \frac{y}{h_1}, \frac{\delta}{h_1}, F_{rl}, R_e\right) \quad (1)$$

ここに、 L_j は跳水長であり、 $L_j = 5.5h_2$ で求められている⁷⁾.

与えられた跳水始端断面でのフルード数 F_{rl} 、レイノルズ数 R_e 、および跳水始端断面から評価断面までの無次元距離 $(x-x_1)/L_j$ に対して流入射流の乱流境界層の発達状態が FD、 $\delta/h_1=0.5$ の PD(PD_{0.5} と略す)、 $\delta/h_1=0.8$ の PD(PD_{0.8} と略す)、および UD の場合の空気混入率 C の実験値の一例を図-2 に示す。図-2 に示されるように、与えられた F_{rl} 、 δ/h_1 、 y/h_1 に対して跳水始端断面付近では空気混入率 C の値が大きく、下流側に向かって C の値は小さくなっていく。

Impingement point 近くで取り込まれた気泡は跳水中で移流・拡散する (図-1 参照)。空気混入率 C は図-3 のように $y \leq y_s$ で底面から y の増加に伴い大きくなり空

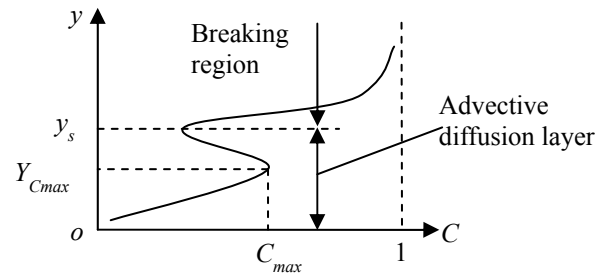


図-3 空気混入率分布概念図

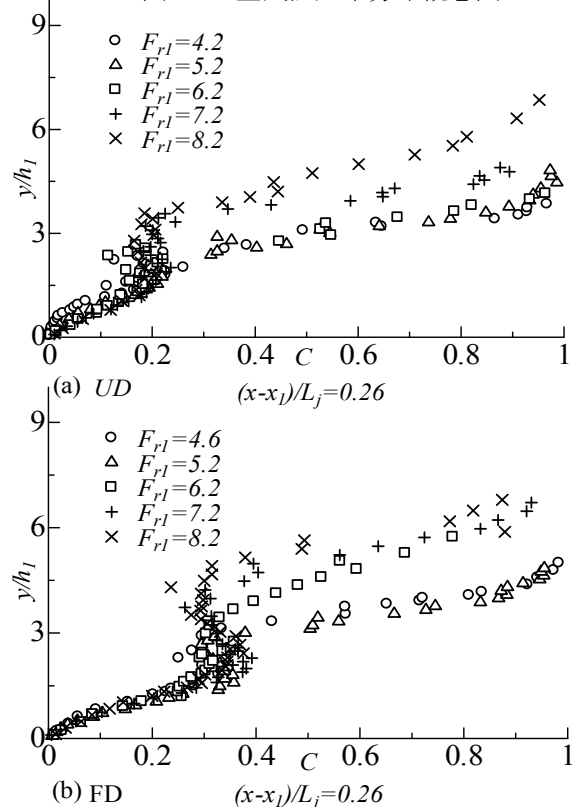


図-4 F_{rl} による空気混入率分布の違い

気混入率の極大値 C_{max} を経て C の値は減少する。このように C_{max} が存在する領域 ($y \leq y_s$) を Chanson⁸⁾ は advective diffusion layer と呼んでいる。なお、advective diffusion layer は跳水終端断面に近づくにつれて存在しなくなる。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 の値は増加して 1 に近づく。この領域は breaking region と呼ばれている⁴⁾。

図-2 に示されるように、与えられた F_{rl} 、 $(x-x_1)/L_j$ 、および R_e に対して、advective diffusion layer 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、境界層が水面まで到達し、水面近くの乱れも大きいため、水面の凹凸を伴う変動を誘起し、impingement point から流入する空気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 Falvey⁹⁾ 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 Gulliver¹⁰⁾ は急勾配水路からの流れが

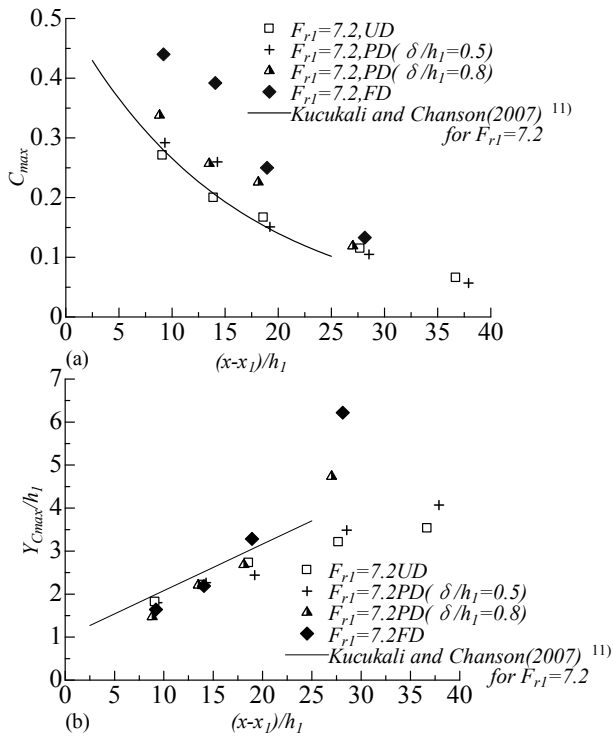


図-5 C_{max} と $Y_{C_{max}}/h_1$ の乱流境界層の発達状態による違い

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。これらのことは、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ることと類似な現象であると考えられる。

与えられた乱流境界層の発達状態 δ/h_1 , $(x-x_1)/L_j$, および R_e に対して F_{r1} による空気混入率 C の変化の一例を図-4に示す。Advective diffusion layer 内での C の値は、図-4(a), (b)に示されるように、 F_{r1} が増加しても、 C の値はほとんど変化しないか、わずかに増加する程度である。これは、与えられた δ/h_1 に対して F_{r1} の変化に関わらず流入射流の相対乱れ強さ $\sqrt{u'^2}/U$ (u' は流下方向の変動流速、 U は最大流速) が一定であり⁶⁾、これによって流入射流の水面の凹凸を伴う変動の大きさは F_{r1} によって変化せず、射流の水面の凹凸を伴う変動によって impingement point から取り込まれる空気量も F_{r1} によって変化しなかったためではないかと考えられる。また、breaking region では同一の C の値を示す y/h_1 の値は大きくなる。これは、 F_{r1} が増加すると跳水下流端の水深 h_2/h_1 が大きくなり、跳水の水面勾配が大きくなったためと考えられる。

与えられた F_{r1} と R_e に対して advective diffusion layer 内の空気混入率の極大値 C_{max} およびその位置 $Y_{C_{max}}$ の流下方向への変化の一例を図-5に示す。図-5(a)に示されるように、FD の場合の C_{max} の値は、UD, PD_{0.5}, および PD_{0.8} の場合の C_{max} の値より大きい。

C_{max} を $C_{max} = f[(x-x_1)/h_1, \delta/h_1, F_{r1}, R_e]$ の関係で整理した一例を図-6に示す。この関係で表示すると図-6(a), (b)に示されるように、同一の $(x-x_1)/h_1$ に対して、 F_{r1} の増加にともない C_{max} の値はいくぶん大きくなる。これ

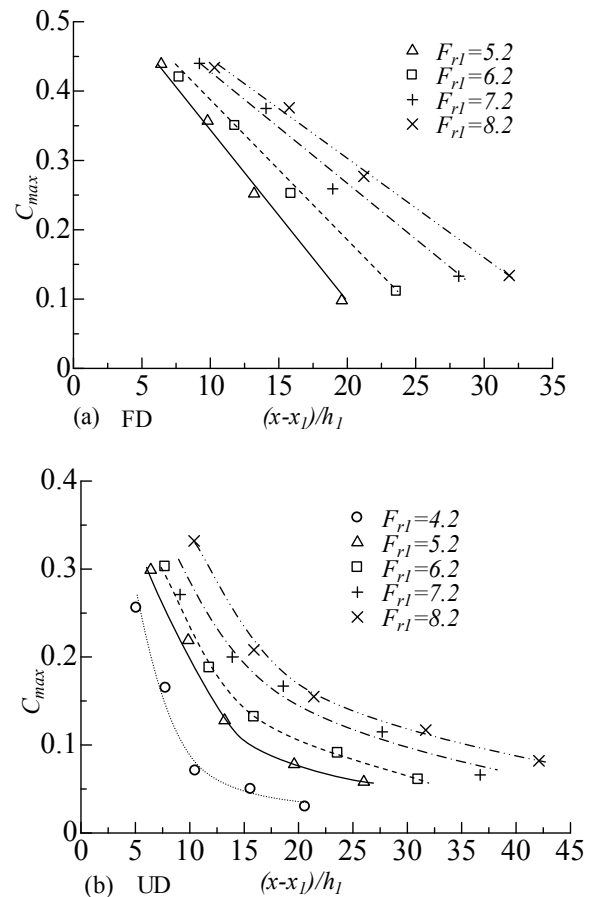


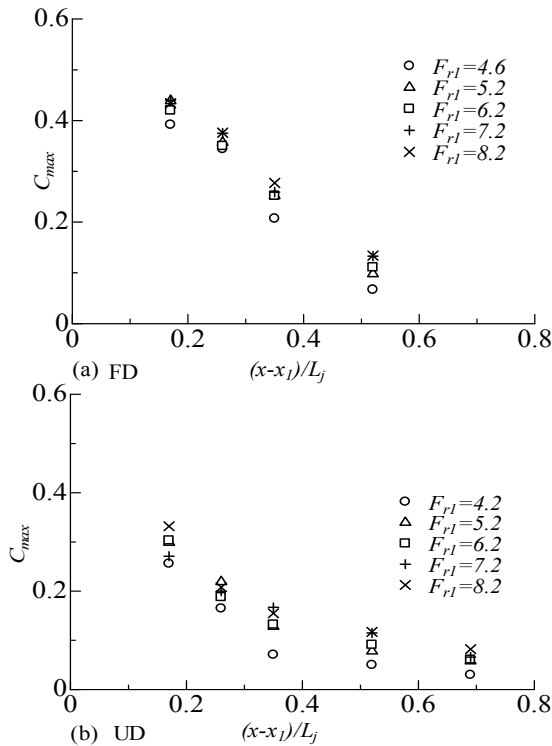
図-6 C_{max} の F_{r1} による違い

は、 F_{r1} が増加すると表面渦の水面勾配が大きくなり、表面渦の breaking による水面近くの空気混入率が増加し、impingement point から跳水内部に取り込まれる空気の量が大きくなったためと考えられる。さらに、 F_{r1} が大きくなるにつれて、advective diffusion layer が形成される $(x-x_1)/h_1$ の範囲が大きくなる。

一方、 C_{max} を $C_{max} = f[(x-x_1)/L_j, \delta/h_1, F_{r1}, R_e]$ の関係で整理した一例を図-7に示す。この関係で整理すると、与えられた δ/h_1 および R_e に対して advective diffusion layer が形成される範囲での C_{max} は F_{r1} の影響を受けない。また、advective diffusion layer が形成される範囲については、UD と PD_{0.5} の場合は $(x-x_1)/L_j \leq 0.69$, FD と PD_{0.8} の場合は $(x-x_1)/L_j \leq 0.52$ となっている。

4. 水面形状

空気混入率 $C=0.5$ となる y を跳水の水深 $h_{0.5}$ と定義し、跳水の水面形状を $(h_{0.5}-h_1)/(h_2-h_1) = f[(x-x_1)/L_j, \delta/h_1, F_{r1}, R_e]$ の関係で整理した一例を図-8に示す。図-8に示されるように、跳水始端断面近く $[(x-x_1)/L_j \leq 0.2]$ と終端断面 $[(x-x_1)/L_j = 1.0]$ では乱流境界層の発達状態に関わらず相対水深 $(h_{0.5}-h_1)/(h_2-h_1)$ は同一の値を示す。一方、 $0.2 < (x-x_1)/L_j < 0.85$ では、UD と PD_{0.5} の水深の大きさはほぼ等しく、FD と PD_{0.8} の水深の大きさもほぼ等しい。しかし、FD の水深は UD の水深よりも大きくなっている。

図-7 C_{max} の F_{r1} による違い

5. まとめ

跳水始端断面のフルード数 $F_{r1}=4.2\sim 8.2$ 、レイノルズ数 $Re=6.2\times 10^4$ を対象に跳水内部の空気混入率に対する流入射流のフルード数 F_{r1} と乱流境界層の発達状態 δ/h_1 の影響を検討した結果を以下に要約して示す。

・Advective diffusion layer 内の空気混入率 C の大きさは、FD の場合が最も大きい。また、UD と $PD_{0.5}$ の C はほぼ等しい大きさになる。さらに、 $PD_{0.8}$ の C は、UD と FD の中間の大きさを示す。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 layer 内の空気混入率 C の大きさに影響を与えたことによるものと考えられる。

・境界層の発達状態 δ/h_1 を同一にして、 F_{r1} を大きくしても C の値はほとんど変化しない。これは、射流の水面近くの相対乱れ強さが F_{r1} に影響されないため、射流の水面の凹凸を伴う変動の大きさも F_{r1} によらず、advective diffusion layer 内の空気混入率 C の値がほとんど変化しなかったものと考えられる。

・Advective diffusion layer の形成される $(x-x_1)/L_j$ の範囲は、UD と $PD_{0.5}$ の場合は $(x-x_1)/L_j \leq 0.69$ 、FD と $PD_{0.8}$ の場合は $(x-x_1)/L_j \leq 0.52$ となる。

・跳水の水面形状については、与えられた F_{r1} と Re に対して、跳水始端近く $[(x-x_1)/L_j \leq 0.2]$ および終端断面 $[(x-x_1)/L_j = 1.0]$ では $C=0.5$ となる水深 $h_{0.5}$ への乱流境界層の発達状態の影響は見られない。一方、 $0.2 < (x-x_1)/L_j <$

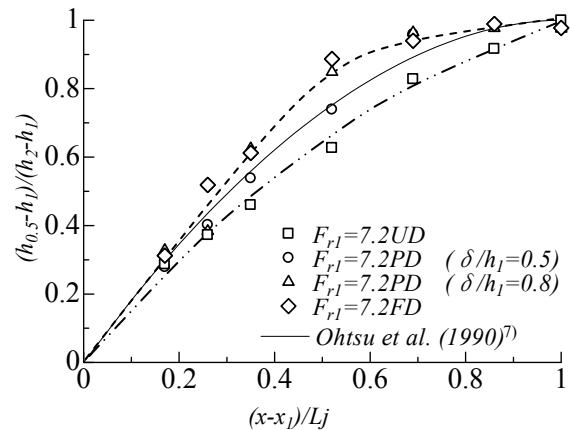


図-8 跳水の水面形状

0.85 では FD と $PD_{0.8}$ の場合の $h_{0.5}$ は UD と $PD_{0.5}$ の場合の $h_{0.5}$ よりも大きくなっている。

6. 参考文献

- 1) Resch, F.J. and Leutheusser, H. J.: Reynolds stress measurements in hydraulic jumps, *J. Hydr. Res.*, Vol. 10, No. 4, pp. 409-429, 1972.
- 2) Resch, F.J. and Leutheusser, H. J.: Le ressaut hydraulique: mesures de turbulence dans la region diphasique, *La Houille Blanche*, Vol. 4, pp. 279-293, 1972.
- 3) Chanson, H. and Gualtieri, C.: Similitude and scale effects of air entrainment in hydraulic jumps, *J. Hydr. Res.*, Vol. 46, No. 1, pp. 35-44, 2008.
- 4) 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*, 第 53 巻, pp. 985-990, 2009.
- 5) Ohtsu, I., Yasuda, Y., and Takahashi, M.: Discussion of Similitude and scale effects of air entrainment in hydraulic jumps, *J. Hydr. Res.*, Vol. 47, No.2, pp. 285-287, 2009.
- 6) Ohtsu, I. and Yasuda, Y.: Characteristics of supercritical flow below sluice gate *J. Hydr. Engrg.*, Vol. 120, No. 3, pp. 332-346, 1994.
- 7) Ohtsu, I., Yasuda, Y., and Awazu, S.: Free and submerged hydraulic jumps in rectangular channels, *Report of the research institute of science and technology*, Nihon Univ., Vol. 35, pp. 1-50, 1990.
- 8) Chanson, H.: *Air bubble entrainment in free surface turbulent shear flows*, Academic Press, London, U.K., 1997.
- 9) Irvine, D. A., and Falvey, H. T.: Behavior of turbulent water jets in the atmosphere and in plunge pools, *Proc. Inst. Civ. Eng.*, Part 2, 83, pp. 295-314, 1987.
- 10) Wilhelms, S.C., and Gulliver, J.S.: Bubbles and waves description of self-aerated spillway flow, *J. Hydr. Res.*, IAHR, Vol. 43, No. 5, pp.522-531, 2005.
- 11) Kucukali, S. and Chanson, H.: Turbulence in hydraulic jumps: Experimental measurements., *Report No. CH62/07*. Dept. Civil Engrg, The Univ. of Queensland, Brisbane, Australia, 2007.

