

傾斜水路の跳水特性に対する 空気混入射流の影響

THE EFFECT OF AERATED INFLOW ON CHARACTERISTICS OF HYDRAULIC JUMP IN A SLOPING CHANNEL

安田陽一¹・高橋正行²・小林純³・大津岩夫⁴

Youichi YASUDA, Masayuki TAKAHASHI, Jun KOBAYASHI, and Iwao OHTSU

¹正会員 工博 助教授 日本大学理工学部土木工学科 (〒101-8308 東京都千代田区神田駿河台 1-8)

²正会員 工修 助手 日本大学理工学部土木工学科 (〒101-8308 東京都千代田区神田駿河台 1-8)

³学生会員 修士課程 日本大学大学院理工学研究科土木工学専攻 (〒101-8308 東京都千代田区神田駿河台 1-8)

⁴正会員 工博 教授 日本大学理工学部土木工学科 (〒101-8308 東京都千代田区神田駿河台 1-8)

The Hydraulic design manual on energy dissipators has been reported on the basis of the experimental results on velocity characteristics of jumps, jump length, sequent depth ratio of jump, and etc. But, in these results, the effect of aerated inflow on characteristics of jumps has not been considered. Because, an aerated flow on smooth channel chutes has not been formed in experimental models even if the boundary layer of supercritical flow is fully developed. This paper presents the effect of the aerated inflow on characteristics of jumps in a sloping channel. The experiment reveals that the different flow condition is observed between aerated and non-aerated inflows. For an aerated inflow, the jump length can be reduced, and the maximum velocity at each section decays in a short distance when a downstream depth and a channel slope become large. The present study gives a significant point for the hydraulic design of an energy dissipator with a jump formation.

Key words: Energy dissipator, stilling basin, spillway, sloping apron, hydraulic jump, aerated inflow

1. まえがき

ダムや堰から流下する高速流において、特に落差が大きい場合、射流の乱流境界層が十分に発達し、やがて越流する流れが空気混入した流れとなる。模型実験の場合、越流面が滑面のとき、例え乱流境界層が十分に発達しても、模型規模を十分に大きくしない限り実構造物とは異なり、空気混入した流れは形成されない。

従来、乱流境界層の発達状態による跳水内部の流速特性の違いが Ohtsu et al.¹⁾によって示されている。また、跳水始端での乱流境界層が十分に発達した場合を対象に、跳水の表面渦から混入された気泡の分布特性が Rajaratnam²⁾および Chanson³⁾によって、示されている。しかしながら、前述のように、模型実験では模型規模を十分に大きくしない限り滑面水路上で空気混入した流れが形成されないため、跳水長、跳水内部の流速特性に対する流入射流の空気混入の影響は検討されていない。

減勢工の設計精度の向上のみならず構造物周辺の河川環境を考える上でも、流入射流の気泡混入が

跳水特性にどのように影響を与えるのかを解明することは重要である。

最近、著者らは階段状水路における流れの特性を実験的に検討し、空気混入した流れの水深評価方法を確立し、階段状流れの流水抵抗の定量評価を行なった^{4,5)}。

本研究では、階段状水路を用いることによって模型実験において空気混入した射流が容易に形成されることを利用し、跳水特性に対する流入射流の空気混入の影響を検討した。傾斜水路における跳水を対象にして、流入射流の空気混入の有無によって下流水深の変化に伴う流れのフローパターンがどのように異なるのかを明らかにした。また、跳水長、跳水内部の流速特性、空気混入の分布特性について、流入射流が空気混入した場合と空気混入していない場合との間で比較を行ない、同一な傾斜角度、流量、跳水始端水深、下流水深に対して、その違いを明らかにした。また、跳水始端が傾斜水路と水平水叩きとの接合部に位置した場合についても跳水特性に対する流入射流の空気混入の影響を示した。

2.実験

傾斜水路における跳水特性に対する流入射流の気泡混入の影響を明らかにするために、表-1 に示す実験条件のもとで検討を行なった。流入射流で空気混入が生じないときの流況を形成させるため、水路幅 40cm、水平水路長 5.0m、水路高さ 80cm の長方形断面水平水路に滑面傾斜水路模型を設置した。また、流入射流において空気混入した流れを形成させるため、水路幅 40cm、水平水路長 10.0m の長方形断面水路に高さ 152.5cm の傾斜水路模型を設置した。傾斜面上で空気混入した流れ(aerated inflow)が形成されるように、跳水始端上流部までは傾斜面上を階段状水路とし、それより下流側を滑面水路とした(図-1)。また、階段状水路上で多量の空気混入が生じ、かつ Skimming Flow (階段状水路のステップエッジを結んだ線とほぼ平行な流れ) ^{4),5)} が形成されるように、相対ステップ高さ S/d_c (S :ステップ高さ、 d_c :限界水深)の値が 0.6-0.9 となるように流入射流の水力条件を設定した。また、空気混入した射流の水深評価については、時間平均された空気混入率 C [空気量/(空気量+水の量)]の分布を点電極型のボイド率計で測定し、次式を用いて水だけに換算した水深 d_w として射流水深を求めている ^{4),5)}。なお、本実験条件のもとでは水路横断方向に空気混入率は変化しない。

$$d_w = (1 - C_{mean})Y_{90}, \quad C_{mean} = \frac{1}{Y_{90}} \int_0^{Y_{90}} C dy \quad (1)$$

ここに、 y は滑面水路底面からの垂直長さ、 Y_{90} は空気混入率 $C=0.9$ となった y の値、 C_{mean} は断面平均された空気混入率である。

跳水内部の流速測定については 2 次元電磁流速計を用い、120s 間の点計測を行ない、時間平均流速および乱れ強さを求めた。なお、底面付近の流速については空気混入が小さいため、ピトー管を併用して計測した。

跳水の位置は水路下流端のせき高さを変化させることによって調整した。

表-1 実験条件

aerated inflow	non-aerated inflow
$\theta = 30^\circ, 55^\circ$	$\theta = 30^\circ, 55^\circ$
$5.7 \leq F_1 \leq 5.8$	$5.7 \leq F_1 \leq 6.6$
$H_{dam} = 152.5\text{cm}$	$41\text{cm} \leq H_{dam} \leq 63\text{cm}$
$S/d_c = 0.625, 0.820$	$S/d_c = 0$
$C_{mean} = 0.38, 0.39$	$C_{mean} = 0$
$4.0\text{cm} \leq d_c \leq 6.1\text{cm}$	$4.4\text{cm} \leq d_c \leq 9.0\text{cm}$
$h_d/h_2 = 1.09, 2.0, 3.24, 4.2$	$h_d/h_2 = 1.09, 2.0, 3.24, 3.7$

θ : 水路傾斜角度, F_1 : 流入射流のフルード数 ($F_1 = V_1 / \sqrt{gd_1 \cos \theta}$; d_1 : 跳水始端水深, V_1 : 断面平均流速), h_d : 下流水深, $h_2 = \left(\sqrt{8F_1^2 \cos \theta} + 1 \right) / 2$, d_c : 限界水深($d_c = (q^2/g)^{1/3}$; q : 単位幅流量)

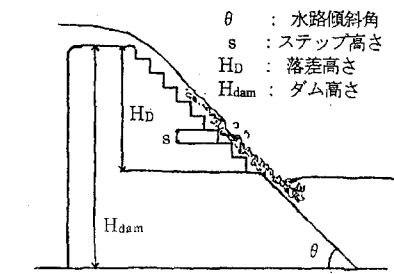


図-1 定義図

3.流況の説明

流入射流に気泡が混入されていない場合、傾斜水路において射流から常流に遷移する流況は水路傾斜角度 θ および相対下流水深 h_d/h_2 によって変化し、下流水深の変化に伴う流れのフローパターンは水路傾斜角度が 19 度以下と 23 度以上とに大別される ⁶⁾。

下流水深が大きい場合($h_d/h_2 \geq 3.2$)、19 度以下では傾斜面上で顕著な表面渦を伴った跳水が形成される ⁶⁾。23 度以上では高速流が底面に沿い下流側遠方まで続き、傾斜面上に顕著な表面渦を伴った跳水現象は形成されない。この場合、広範囲にわたって逆流(循環流)が形成されるようになる ⁶⁾。

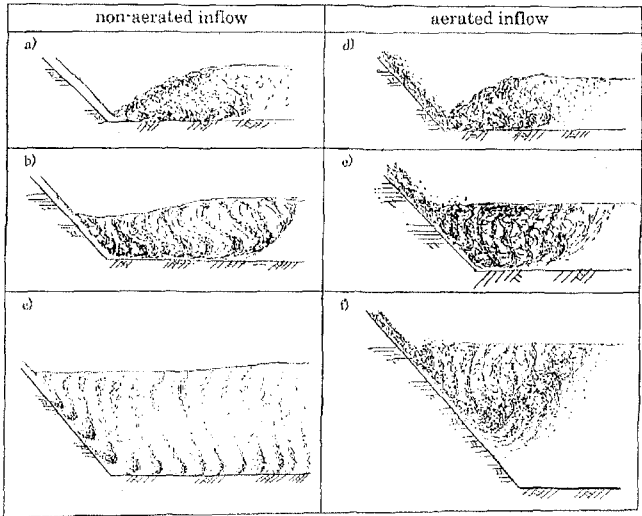


図-2 傾斜水路における流況図

水路傾斜角度が 23 度以上 55 度以下の場合、流入射流の空気混入の有無によって下流水深の変化に伴う流れのフローパターンは図-2 のように大別される。

特に、下流水深が大きい場合、流入射流に空気が混入された場合(aerated inflow の場合)と空気混入されていない場合(non-aerated inflow の場合)との間で流況が大きく異なる(図-2)。図-2(e),(f)の aerated inflow の場合、主流の中に空気が多量に混入されているため、気泡の浮力効果によって高速流が下流側遠方まで底面に沿って続くことはなく、短

区間で主流が水面に向かって上昇するようになる。また、下流水深が十分に大きくなると、傾斜面上に顕著な表面渦を伴った跳水現象が形成されるようになる。すなわち、流入射流に空気が混入される場合、傾斜角度および下流水深が大きい流況であっても、傾斜水叩き型減勢工として利用可能なものと考えられる。

4. 最大流速の減衰状況

跳水内部の最大流速の減衰状況について、実験値を(2)に基づき整理したものを図-3, 4に示す。

$$\frac{U_m}{V_1} = f\left(\frac{x}{d_1}, \theta, F_1, \frac{h_d}{h_2}, C_{mean}\right) \quad (2)$$

ここに、 U_m は各断面($x = x$)での最大流速、 x は跳水始端から水路床に沿った流下方向の長さ、 h_d は水平水路上の下流水深、 h_2 は同一な F_1 , d_1 , θ に対して自由跳水が形成されたときの跳水終端水深であり、

$$0.5d_1(\sqrt{8F_1^2 \cos \theta + 1} - 1) \text{より求められる。}$$

図中の矢印は跳水終端断面を示す。終端断面は水面において常に逆流が観察されなくなった最初の鉛直断面として定義している。また、図中破線一点鎖線は自由跳水の減衰状況⁷⁾を示し、図中実線は壁面噴流⁷⁾および衝突噴流による壁面噴流^{8,9)}の減衰状況を示す。

4-1 跳水始端が傾斜面と水平水叩きとの接合部に位置する場合

図-3に示されるように、aerated inflow の場合も non-aerated inflow の場合も最大流速は短区間で減衰する。また、同一な F_1 , θ に対して aerated inflow の場合と non-aerated inflow の場合との間で違いはほとんど認められない。すなわち、最大流速の減衰に対する流入射流の気泡混入の影響は小さい。

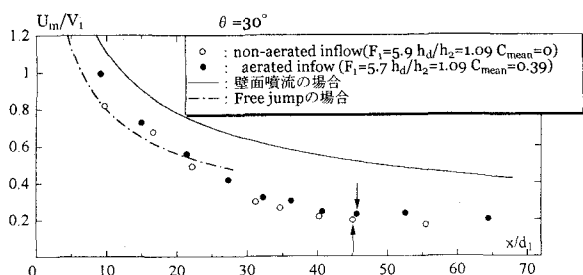


図-3 最大流速の減衰状況

4-2 跳水始端が傾斜面上に位置する場合

図-4に示されるように、同一な F_1 , θ , h_d/h_2 に対して、aerated inflow の場合、non-aerated

inflow の場合と比べて最大流速は短区間で減衰している。特に、non-aerated inflow の場合のように高速流が底面に沿って下流側遠方まで沿うことなく、傾斜面上で最大流速が大きく減衰している点が特徴として挙げられる。

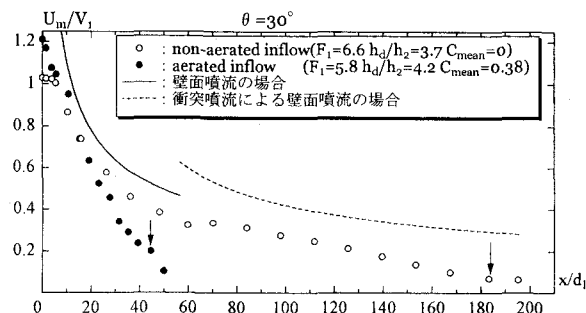


図-4 最大流速の減衰状況

5. 跳水内部の流速と空気混入の分布

跳水内部の流速分布および空気混入の分布を図-5, 6, 7に示す。図中、 u' は x 方向の乱れ強さ、 v' は y 方向の乱れ強さ、 x は跳水始端からの水路床に沿った流下長さ、 y は水路底面からの垂直長さを示す。なお、電磁流速計による空気混入中の乱れ強さの大きさについてはさらなる検討を有する。

5-1 跳水始端が傾斜面と水平水叩きとの接合部に位置する場合

図-5(a),(b)に示されるように、aerated inflow の場合、流入射流の気泡混入の影響により、乱れ強さの大きさは non-aerated inflow の場合より大きくなる。また、流入射流の気泡混入の有無に関わらず、常に主流幅 $Y_m(u=U_m/2)$ となる y の値より上方で乱れ強さの極大値が生じている。なお、aerated inflow の場合、空気混入率 C の極大値が Y_m より上方にある。この結果を最大流速の減衰状況と対応させると、主流の流速の減衰に対する流入射流の気泡混入の影響が小さかったものと考えられる。

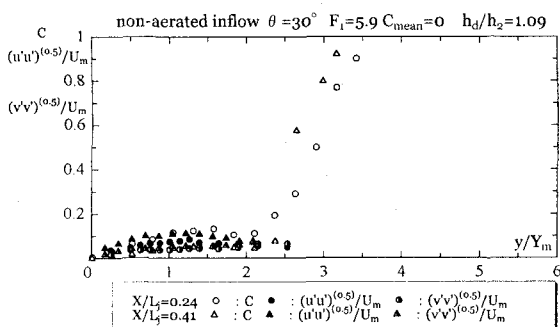


図-5(a) 流入射流に空気混入されていない場合の乱れ強さの分布

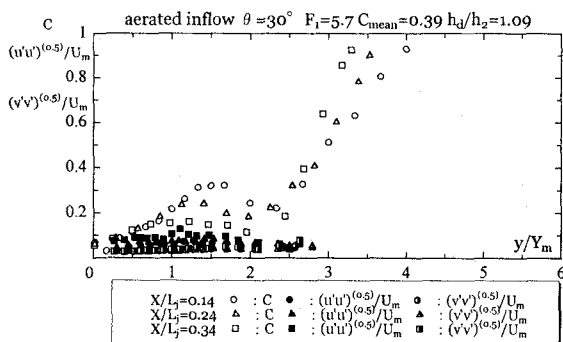


図-5(b) 流入射流に空気混入されている場合の空気混入率および乱れ強さの分布

5-2 跳水始端が傾斜面上に位置する場合

non-aerated inflow の場合、下流水深が大きくなるにつれて、跳水部内に気泡が混入しなくなり、乱れ強さの大きさは aerated inflow の場合より小さくなる(図-6). 一方, aerated inflow の場合, 図に示されるように, 主流が底面近くに位置する領域($0 < x/L_j < 0.4$: L_j は跳水始端から終端までの水平長)で各断面における乱れ強さ u', v' および気泡混入率 C の極大値が生じる. また, 乱れ強さおよび気泡混入率の極大値が主流幅 Y_m 付近に位置する. この場合, 流入射流中に混入された気泡が主流に連行され, 気泡の浮力効果によって, 鉛直方向の流速が卓越し, 主流が下流側遠方まで底面に沿うことがなく(図-7), 主流の流速が短区間で減衰したものと考えられる.

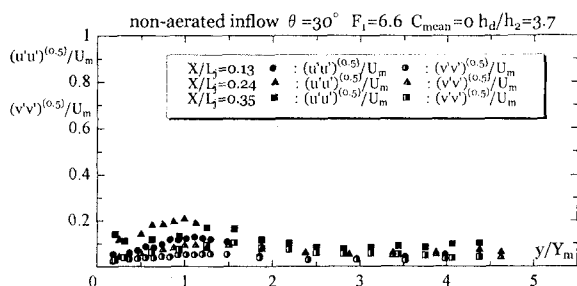


図-6(a) 流入射流に空気混入されていない場合の乱れ強さの分布

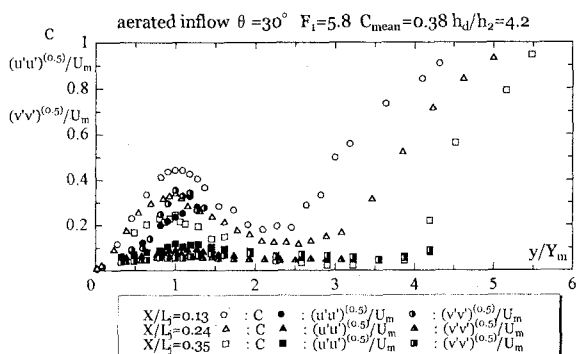


図-6(b) 流入射流に空気混入されている場合の空気混入率および乱れ強さの分布

6. 跳水長

aerated inflow の場合と non-aerated inflow の場合の跳水長の比較を行なうため, 実験値を(3)の関係で整理したものを図-8 に示す.

$$\frac{L_j}{h_2} = f\left(\frac{h_d}{h_2}, \theta, C_{mean}\right) \quad (3)$$

図中実線は non-aerated inflow の場合の実験式を示す⁶⁾.

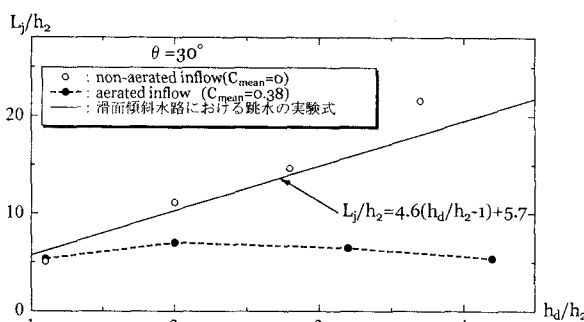


図-8 流入射流に空気混入されている場合と混入されていない場合の跳水長の比較

図に示されるように, non-aerated inflow の場合, 下流水深 h_d/h_2 が大きくなるにつれて, 跳水長 L_j/h_2 は直線的に大きくなる. 一方, aerated inflow の場合, h_d/h_2 による跳水長 L_j/h_2 の変化は小さい. 例えば, $h_d/h_2 = 4.2$ 付近では, 傾斜面上に跳水が形成され, non-aerated inflow の場合の 75% も短縮されることになり, 減勢池の長さを大幅に短縮できることが理解される.

7. まとめ

傾斜角度 θ が 23 度以上 55 度以下の傾斜水路における跳水を対象として aerated inflow の場合と non-aerated inflow の場合との比較を行なった. 得られた結果を要約して示す.

1. 水路傾斜角度が 23 度以上の場合, 下流水深の変化に伴う流れのフローパターンが aerated inflow の場合と non-aerated inflow の場合とで異なることを示した. non-aerated inflow の場合, 下流水深の増加に伴い, 高速流が底面に沿って下流側遠方まで続き, 広範囲にわたって逆流域が形成されることを示した. 一方, aerated inflow の場合, 下流水深の大小にかかわらず, 顕著な表面渦を伴った跳水が常に形成されることを示した. 特に, 下流水深が大きい場合, 傾斜面上で顕著な表面渦を伴った跳水が形成されることを明らかにした.

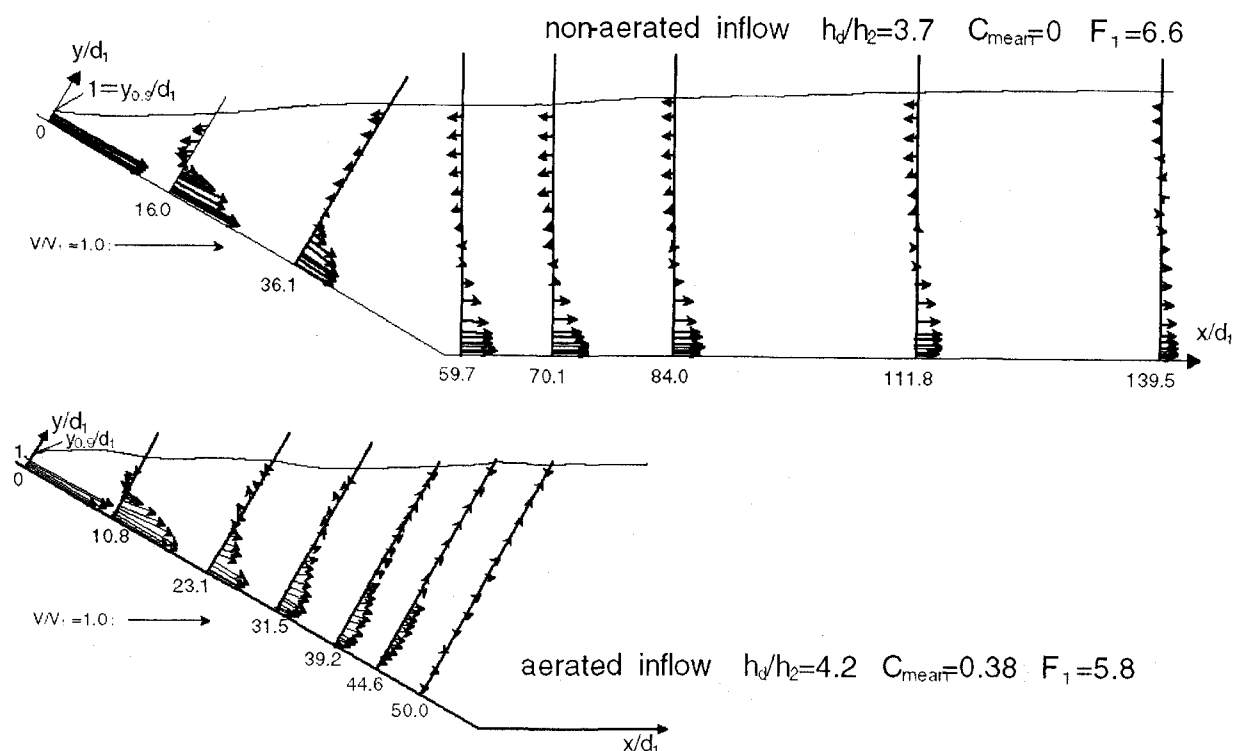


図-7 跳水始端が傾斜面上に位置する場合の流速ベクトル図

2. 跳水部内の最大流速の減衰状況，流速分布および空気混入の分布から，aerated inflow の場合と non-aerated inflow の場合との比較を行なった。跳水始端が傾斜水路と水平水叩きとの接合部に位置した場合，最大流速の減衰に対する流入射流での気泡混入の影響が小さい。また，跳水始端が傾斜面上に位置した場合，最大流速が短区間で減衰する。これは，流入射流中に混入された気泡が主流に連行され，気泡の浮力効果によって鉛直方向の流速が卓越し，主流が下流側遠方まで底面に沿うことなく，水面に向かって上昇するためと考えられる。
3. non-aerated inflow の場合と比較して aerated inflow の場合，跳水長が短縮されることを明らかにした。例えば，傾斜角度 θ が 30 度で下流水深 h_1/h_2 が 4.2 の場合，傾斜面上に跳水が形成され，non-aerated inflow の場合の 75% も跳水長が短縮されることを示した。また，aerated inflow の場合，跳水長の下流水深による変化が小さいことを示した。

以上のことから，流入射流に気泡が混入されたことによって跳水の水理特性が non-aerated inflow の場合と異なることを示した。また，減勢工の経済設計にあたって aerated inflow による跳水特性の解明が今後必要かつ重要であることを示唆することができた。

参考文献

- 1) Ohtsu, I., Yasuda, Y., and Awazu, S.: Free and Submerged Hydraulic Jumps in Rectangular Channels, Report 35, Research Institute of Science and Technology, Nihon University, pp. 1-50, 1990.
- 2) Rajaratnam, N.: An Experimental study of Air Entrainment Characteristics of Hydraulic Jump, Journal of Institution of Engineers (India) 42, pp. 247-273, 1961.
- 3) Chanson, H.: Air Bubble Entrainment in Free-Surface Turbulent Shear Flows, Academic Press New York, pp. 73-92.
- 4) Yasuda, Y. and Ohtsu, I. (1999) Flow Resistance of Skimming Flows in Stepped Channels, Proceeding of 28th IAHR Congress, Graz, Austria, Session of B14 (CD-ROM).
- 5) 安田、高橋、大津(2000) 階段状水路の流水抵抗、土木学会水工学論文集、第 44 巻、pp527-532.
- 6) Ohtsu, I. and Yasuda, Y. (1991) Hydraulic jump in sloping channels," Journal of Hydraulic Engineering, ASCE (American Society of Civil Engineers), Vol.117, No. 7, pp.905-921.
- 7) Rajaratnam, N. (1976) Turbulent jets (Developments in Water Science 5), Elsevier Pub. Co.
- 8) Beltaos, S. and Rajaratnam, N. (1973) Plane turbulent impinging jet, Journal of Hydraulic Research, IAHR, Vol.11, No. 1, pp.29-59.
- 9) Schauer, J.J. and Eustis, R.H. (1963) The flow development and heat transfer characteristics of plane turbulent impinging jets, Technical Report 3, Dept. of Mechanical Engineering, Stanford University, Stanford, California.

(2001. 10. 1受付)