

階段状水路における Skimming flow の内部特性

FLOW CHARACTERISTICS OF SKIMMING FLOW IN A STEPPED CHANNEL

安田陽一¹・高橋正行²・大津岩夫³

Youichi YASUDA, Masayuki TAKAHASHI, and Iwao OHTSU

¹正会員 博(工) 日本大学助教授 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 日本大学助手 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正会員 工博 日本大学教授 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)

Recently, research onto the hydraulics of stepped chutes was driven by needs for better design guidelines (OHTSU and YASUDA 1997, CHANSON and TOOMBES 2002, BOES and HAGER 2003). Although stepped channel flows are characterized by intense turbulence and strong flow aeration, most studies did not investigate the turbulence characteristics. In this study, mean velocity and turbulent intensity distributions for skimming flows have been investigated. The air-concentration ratio (void fraction), and the bubble count rate (the number of bubbles impacting the probe tip per second) have also been studied. The difference of velocity characteristics between the aerated and the non-aerated flow regions can be found. Further, the friction factor in aerated flow region can be obtained on the basis of the measurement of the air-concentration.

Key words: stepped channel, aerated flow, bubble count rate, air-concentration ratio, turbulent intensity

1. まえがき

階段状水路の利用は射流のエネルギーを減勢するための有効な手段である^{1),2)}。また、階段状水路における流れは空気混入した流れとして特徴づけられ、流量、水路傾斜角度、ステップ高さ、総落差高さによって流況は変化し、skimming flow, transition flow, および nappe flow に大別される³⁾。

階段状水路流れについて多くの研究者によって実験的な検討がなされ、射流のエネルギー損失や skimming flow の流水抵抗が示されている^{1),2),4),5),6),7),8),9)}。エネルギー損失や流水抵抗(friction factor)の大きさを定量的に評価するためには階段状水路における気泡混入流れ(aerated flow)の水深評価を確立する必要がある。最近著者らによって水だけに換算した水深が主に用いられ、評価方法についても直接測定および間接測定の方法を提案した^{5),6),8),9),10)}。

また、skimming flow を対象として、気泡混入の開始位置(inception point of air-entrainment)や気泡混入量、気泡混入の分布などが示され^{1),2),11),12)}、気泡混入流れの特性について議論されている。

階段状水路流れにおける流速特性については、Yasuda and Ohtsu³⁾によって気泡が混入していない領域の平均流速および乱れ強さの分布が示されている。その後、Chanson¹³⁾および Boes¹²⁾らによって気泡混入流れの時間平均流速の分布が示された。さらに、Chanson and Toombes¹⁴⁾は気泡混入流れの乱れ強さについて統計的な評価に基づいた算定方法を提案した。このような気泡混入流れの流速特性の検討は始まっ

たばかりで不明な点が多いのが現状である。

本研究では、skimming flow(写真 - 1)を対象として、気泡混入率(air-concentration)、単位時間当たりの気泡通過数(bubble count rate)、流速の分布特性を実験的に検討した。その結果、気泡混入した領域と気泡が混入していない領域との流速特性の違いを示すことができた。また、流下方向の乱れ強さの大きさが単位時間当たりの気泡通過数に影響することを明らかにした。さらに、気泡混入率の分布に基づき skimming flow の流水抵抗を算定した。

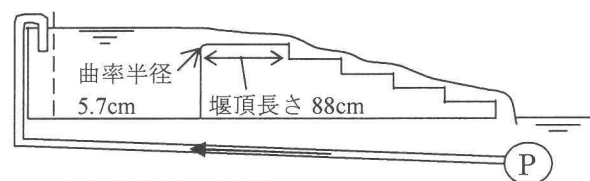


図 - 1 実験装置の概略図

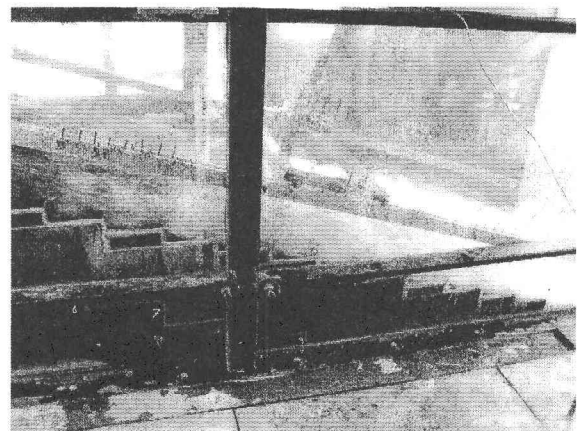


写真 - 1 階段状水路 (Queensland 大学)

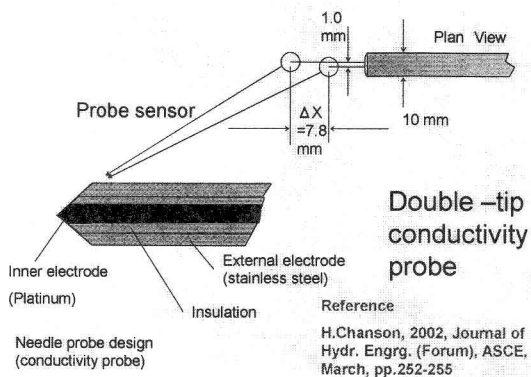


図 - 2 2点電極型ボイド計の概要図

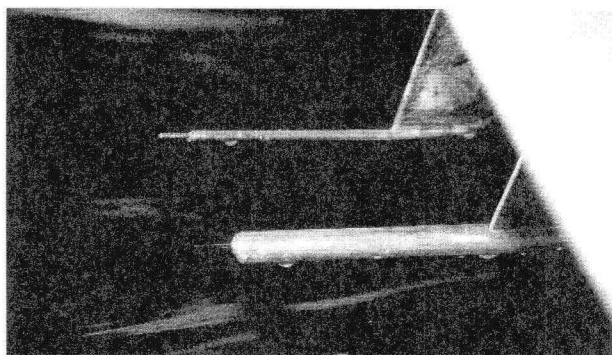


写真 - 2 2点電極型ボイド計の検出部

表 - 1 実験結果

断面位置 Step No.	x/d_c	Y_{90}/d_c	C_{mean} (0- Y_{90})	V_{90}/V_c	d/d_c	V_{mean} m/s
6-7*	11.8	-----	0	-----	----	---
7	12.8	0.445	0.242	2.72	0.337	2.45
9	17.1	0.432	0.298	2.85	0.304	2.45
10	19.3	0.509	0.257	2.88	0.378	2.34
11	21.4	0.603	0.351	2.80	0.392	2.33
12	23.6	0.540	0.279	2.95	0.389	2.38
13	25.7	0.617	0.386	2.87	0.379	2.41
14	27.8	0.486	0.230	3.21	0.374	2.53
15	30.0	0.643	0.367	2.95	0.407	2.45
16	32.1	0.553	0.280	3.0	0.398	2.46
17	34.3	0.597	0.366	2.95	0.379	2.50

$\theta = 15.9^\circ$, $Q = 0.0776 \text{ m}^3/\text{s}$, $d_c = 0.0850 \text{ m}$, $S/d_c = 0.588$

*気泡混入開始位置, x : 第1ステップエッジからの仮想底面に沿った長さ, S : ステップ高さ

2. 実験

実験は水路長 4m, 水路幅 1m の長方形断面水路に総落差 90cm, ステップ高さ 5cm, 傾斜角度 15.9° の階段状水路を設置して実験を行った。また, 階段状水路は堰頂長さ 0.88m を有する広長堰に接続されている(図 - 1)。

空気混入率, 単位時間当たりの気泡が通過する数, および流速を測定するため, Queensland 大学で開

Definition Sketch

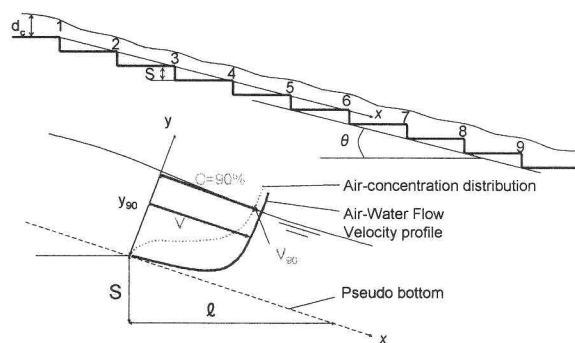


図 - 3 定義図

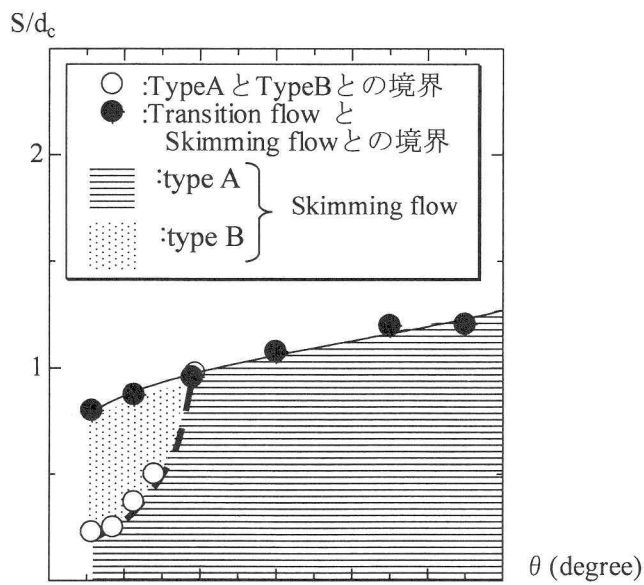


図 - 4 skimming flow における type A・type B の形成領域

発された 2 点電極型ボイド計¹³⁾(図 - 2) (検出先端の径 $\phi = 0.025 \text{ mm}$, 検出部間の距離: 7.8 mm)を用いた。なお, 流速はステップエッジを結んだ仮想底面に沿った方向で測定され, 各点における計測時間は 20s とし, 採取間隔は 20KHz とした。

本実験結果を表 - 1 に示す。ここに, d_c は限界水深, Q は水の流量, V_c は限界流速 [$Q/(Bd_c)$], V_{90} は $y = Y_{90}$ での時間平均流速, y は仮想底面からの垂直高さ, Y_{90} は仮想底面から気泡混入率が 90%に達した位置までの垂直高さである(図 - 3)。

d は水に換算した射流水深, C_{mean} は底面から Y_{90} までの断面平均した気泡混入率であり, 次式から算定される¹⁾。

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

3. 流況

skimming flow の形成領域を図 - 4 に示す。

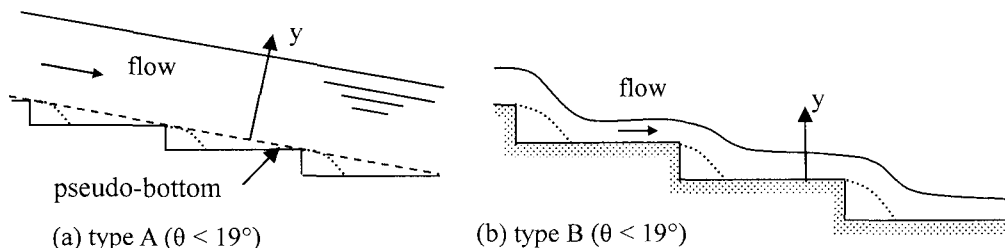


図 - 5 skimming flow の流況

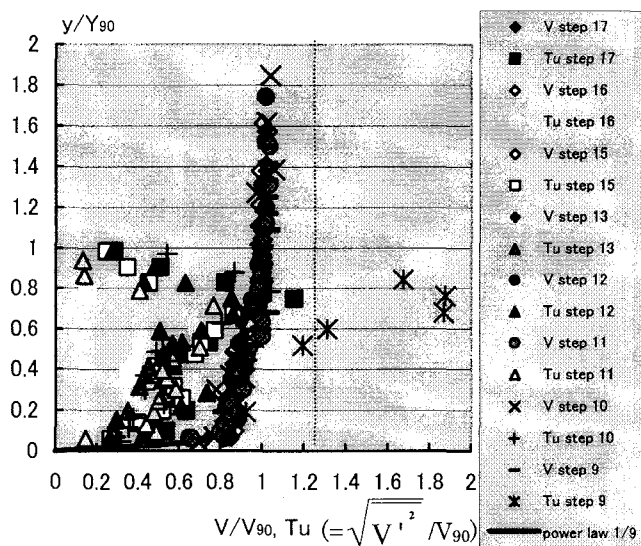


図 - 6 流下方向の時間平均流速および乱れ強さ分布 (aerated flow region, $\theta = 15.9^\circ$, $x/d_c = 0.588$)

skimming flow の流況は、図に示されるように、傾斜角度 θ 、相対ステップ高さ S/d_c によって 2 つに区別される¹⁰⁾。以下にその特徴を述べる。

(1) skimming flow (type A)

階段状水路における射流の流れは各ステップのエッジを結んだ仮想底面とほぼ平行に流下する。水路傾斜角度が $\theta \geq 19^\circ$ の場合、type A が常に形成されるが、水路傾斜角度 θ が $\theta < 19^\circ$ の場合、 S/d_c が小さくなると type A が形成される[図 - 5(a)]。

(2) skimming flow (type B)

階段状水路における射流の水面形がステップの形状によって変形し、ステップ水平面に平行な流れが形成されるようになる。水路傾斜角度が小さく $\theta < 19^\circ$ の場合、 S/d_c が大きいときに type B[図 - 5(b)] が形成されるが、水路傾斜角度が $\theta \geq 19^\circ$ の場合、type B の形成は認められない。

なお、図中実線は skimming flow と transition flow との境界を示す^{9), 15)}。また、破線は type A と type B との境界を示す¹⁰⁾。

4. 流速分布

気泡混入した流れのステップエッジ断面での時間平均流速および流下方向の乱れ強さについて、(2)の関係で整理したものを図 - 6 に示す。

$$V/V_{90}, Tu = f(y/Y_{90}, \text{Step No.}, \theta, s/d_c) \quad (2)$$

ここに、 V は $y=y$ での時間平均流速である。また、 Tu は流下方向(仮想底面と平行な方向)の乱れ強さの無次元量を示す。なお、 y 軸は流れに垂直な座標であるため、type A と B とでは異なる(図 - 5 参照)。 Tu の大きさについては、Chanson and Toombes¹⁴⁾によって提案された次式から算定される。

$$Tu = \sqrt{V'^2}/V_{90} = (1/1.175)[\Delta T^2 - \Delta t^2]^{0.5} \quad (3)$$

ここに、 ΔT は 2 点電極から出力された信号の時空間相関係数の最大値を示す時間差であり、 Δt は先導電極から出力された信号の自己相関係数の最大値の 50% を示す時間差である。

図 - 6 に示されるように、ステップエッジ断面(図 - 3)での時間平均流速については、平衡状態、非平衡状態に関わらずほぼ相似な分布が得られ、 $0 \leq y \leq Y_{90}$ での流速分布を指数則分布で近似すると、ほぼ $1/9$ 乗の分布(4)で示される。

$$V/V_{90} = (y/Y_{90})^{1/9} \quad (4)$$

なお、Boes and Hager は skimming flow における時間平均流速の分布が $1/4.3$ 乗則で近似できることを示しているが、測定断面がステップエッジの間にある隅角部の断面(step corner section)であるため、分布形状がステップエッジ断面の場合と異なるものと推定される。

$y > Y_{90}$ の領域では、時間平均流速 V はほぼ一様な大きさ V_{90} とみなすことができる。なお、 $y > Y_{90}$ では、水の流れは連続性を失い、水塊となって流下している。また、気泡混入率が 99% となる位置は Y_{90} の 1.4~1.5 倍程度となる。

気泡が混入されていない場合、すなわち気泡混入開始位置より上流側の断面では、流下方向の時間平均流速分布を指数則分布で近似するとほぼ $1/8$ 乗の分布で示される(図 - 7)。なお、このデータは傾斜角度 19° 、相対ステップ高さ $s/d_c = 0.573$ 、Step No. 5, 6 の場合の水路中央部で測定した結果である。気泡混入した領域と比較すると、指数則分布の指数に若干の違いが見られるものの、水路横断方向の流速の影響を考慮するとその違いは小さいものと考えられる。

流下方向の乱れ強さについては、図 - 6, 7 に示さ

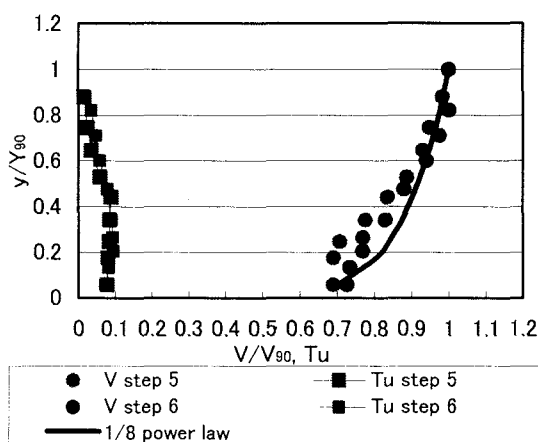


図 - 7 時間平均流速および乱れ強さの分布
(non-aerated flow region, $\theta=19^\circ, x/d_c=0.537$)

れるように、気泡混入した領域の乱れ強さは気泡混入していない領域よりも大きい。また、気泡混入開始位置に近い断面(ここでは Step No.9)で乱れ強さが最も大きな値を示す。さらに、気泡混入している領域では同一な断面で乱れ強さが最大値を示す位置は $y/Y_{90}=0.75$ 付近であるのに対して、気泡が混入していない領域では $y/Y_{90}=0.35$ 付近である。気泡混入した領域では、6 章で詳しく述べるが、単位時間当たりの気泡通過数(bubble count rate)が $y/Y_{90}=0.75$ 付近で最も多くなり、このことが乱れを大きくしているものと考えられる。気泡が混入していない領域で乱れ強さのピークが生じた位置($y/Y_{90}=0.35$ 付近)では、図 - 7 に示されるように、流速が指数則分布から離れているところに対応し、3 次元的な流れの挙動により乱れが幾分大きくなったものと考えられる。気泡混入率が 90% となるときの時間平均流速 V_{90} を限界流速 V_c で無次元化し、 V_{90}/V_c の流下方向の変化を次の関係で整理したものを図 - 8 に示す。

$$V_{90}/V_c = f(x/d_c, \theta, S/d_c) \quad (5)$$

ここに、 x は仮想底面に沿った第 1 ステップエッジからの流下方向の長さである。

図 - 8 に示されるように、 x/d_c が 25 前後で x/d_c による V_{90}/V_c の変化傾向が異なる。 x/d_c が 25 以下の場合、 x/d_c が大きくなるにつれて無次元量 V_{90}/V_c が大きくなる。これは、不等流区間であるため、重力の影響を受けて流速が大きくなるためである。また、 x/d_c が 25 以上(Step No.13 より下流)の場合、無次元量 V_{90}/V_c が一定値の周りを上下するような値を示す。この場合、流れが平衡状態になったものとみなせる。無次元量の値が一定値の周りを上下するのは、水路中央部のみ流速を計測したため、3 次元的に形成される隅角部付近の渦の影響により流速の値が交互に変化したためと考えられる。

5. 気泡混入量の特性

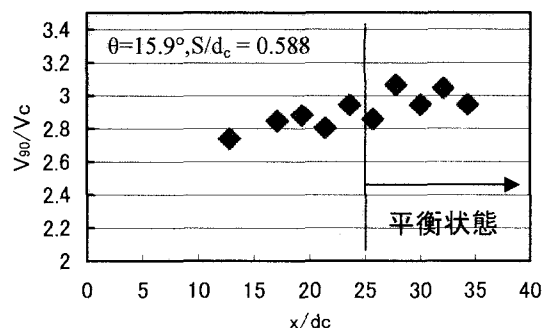


図 - 8 無次元量 V_{90}/V_c の流下方向の変化

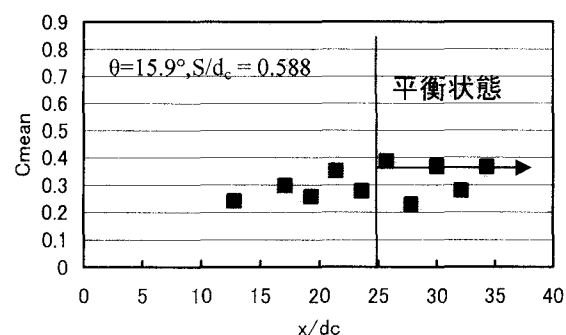


図 - 9 C_{mean} の流下方向の変化

$0 \leq y \leq Y_{90}$ の断面平均した気泡混入率 C_{mean} の流下方向の変化を示したものを図 - 9 に示す。図に示されるように、 x/d_c が 25 以上(平衡状態の領域)で C_{mean} が一定値の周りを上下する値となり、その平均値は 0.33 である。なお、 x/d_c が 12 付近で inception point(気泡混入開始位置)となることから、 $x/d_c < 12$ では気泡混入率は 0 となる。

平衡状態となる領域で $y = y$ での気泡混入率 C を(6)の関係で整理すると、図 - 10 に示されるように、相似な分布が得られる。

$$C = f(y/Y_{90}, \theta, S/d_c) \quad (6)$$

この場合、気泡混入率の分布は気泡の拡散モデルに基づいて提案された次式¹⁴⁾によって近似される(図 - 10 実線)。

$$C = 1 - \tanh^2 \left(K' - \frac{y/Y_{90}}{2D'} \right) \quad (7)$$

ここに、 D' および K' は断面平均した気泡混入率 C_{mean} の大きさで決まる定数であり、ここでは $C_{\text{mean}}=0.33$ の場合の値、 $D'=0.2496$ 、および $K'=2.3778$ を用いた。

平衡状態となる領域を対象にして単位時間当たりの気泡の通過する数(Bubble count rate) F について(8)の関係で整理すると、図 - 11 に示されるように相似な分布が得られる。

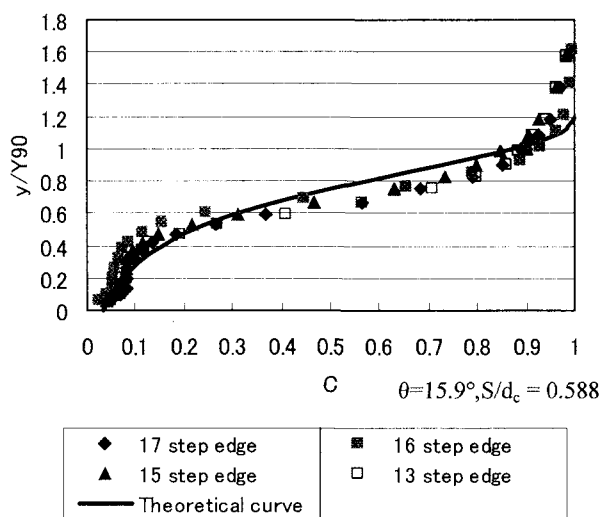


図 - 10 気泡混入率の分布(平衡状態の領域)

$$F/F_{\max} = f(y/Y_{90}, \theta, S/d_c) \quad (8)$$

$F_{\max}$ は同一断面における単位時間当たりの気泡の通過する数の最大値を示し、図に示されるように、 $y/Y_{90}=0.75$ 付近で生じている。気泡混入率 C の分布と比較すると、 C の分布の変曲点が $y/Y_{90}=0.75$ 付近であるなど興味深い点が見られる。この点についてはさらに検討を進めて解明する予定である。

$F_{\max}$ についての流下方向の変化を図 - 12 に示す。図に示されるように、 x/d_c が大きくなるにつれて、 $F_{\max}$ の大きさが大きくなり、 $x/d_c=25$ を境に変化傾向が異なる。すなわち、 $x/d_c < 25$ では不等流区間であるため、流下方向に向かうにしたがって断面平均した気泡混入率が大きくなり、単位時間当たりの気泡通過数も増加する。平衡状態の領域とした区間、 $L/d_c \geq 25$ では、 $F_{\max}$ の値はほぼ一定値の周りを上下する値となる。

6. 気泡混在領域における気泡通過数と乱れ強さとの関係

図 - 6 に示す乱れ強さの分布と図 - 11 に示す単位時間当たりの気泡通過数の分布とを比較すると、乱れ強さのピークと気泡通過数のピークが $y/Y_{90}=0.75$ 付近で生じている。そこで、平衡状態となる領域において、乱れ強さの分布と気泡通過数の分布を重ねてみると、図 - 13 に示されるように、同様な分布となることが理解される。すなわち、気泡混入流れの場合、単位時間当たりに気泡が通過する数が多いほど、乱れが発生しやすいことが推定される。なお、乱れ強さについては $Tu/Tu_{\max}$ ($Tu_{\max}$: 同一断面での乱れ強さの最大値) で整理している。

7. 気泡混在した流れの流水抵抗

平衡状態における skimming flow の流水抵抗 (friction factor) は次式から求められる⁴⁾⁻¹⁰⁾。

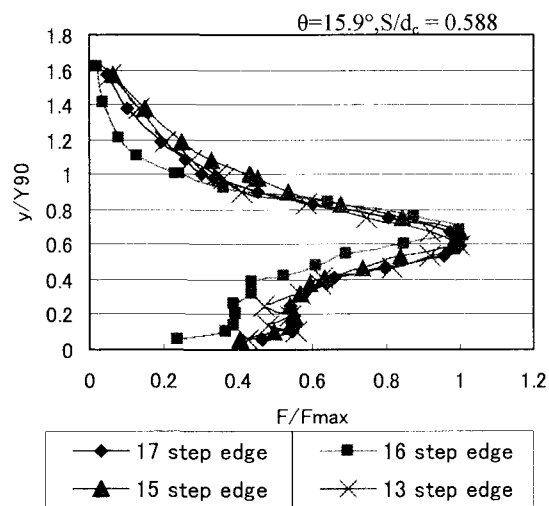


図 - 11 単位時間当たりの気泡通過数の分布

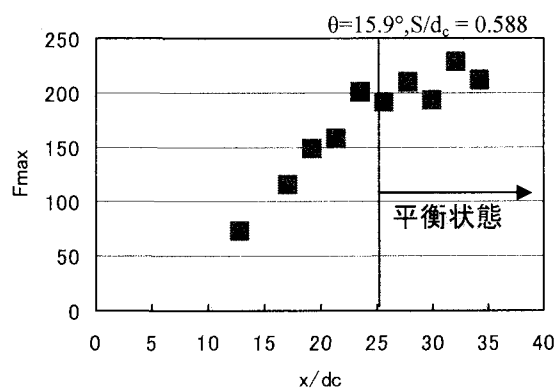


図 - 12 $F_{\max}$ の流下方向の変化

$$f = \frac{4 \tau_0}{\rho V^2 / 2} = 8 \sin \theta \left(\frac{d}{d_c} \right)^3 \quad (9)$$

ここに、 $\tau_0 = \rho g d \sin \theta$ 、 $V = Q/(Bd)$ 、 ρ は水の密度である。

断面平均の気泡混入率 C_{mean} および $C=90\%$ での仮想底面からの高さ Y_{90} の測定値を(1)、(9)より抵抗係数 f を求めたものを表 - 2 に示す。表 - 2 に示されるように、 $\theta=15.9^\circ$ 、 $S/d_c=0.588$ においてステップエッジで水に換算した水深を評価した場合、 $f = 0.115 \sim 0.147$ となる。

図 - 4 に示した形成領域から、この場合の skimming flow の流況は type A と type B の境界近くの流況となり、ステップエッジでの水深は、流線の曲がりの影響を受けるため、典型的な type A の場合に比べて小さな値になりがちになるものと考えられる。

8. まとめ

skimming flow の内部特性を明らかにするため、水路傾斜角度 15.9° 、ステップ高さ 5cm、総落差 90cm の階段状水路を用いて仮想底面に沿った方向

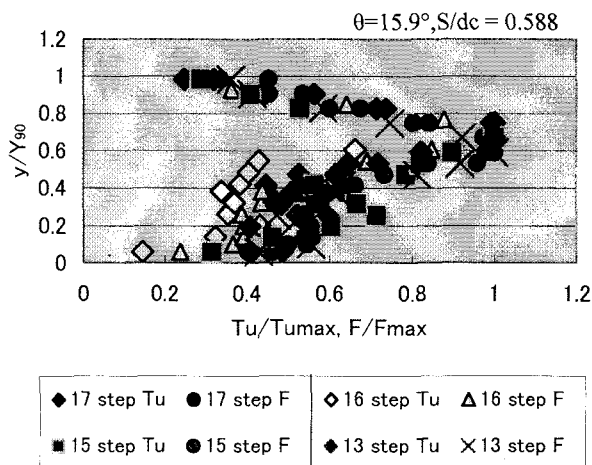


図 - 13 乱れ強さと気泡通過数との分布の比較

表 - 2 平衡状態の抵抗係数

断面位置 Step No.	Y_{90}/d_c	C_{mean} ($0-Y_{90}$)	d/d_c	F
13	0.617	0.386	0.379	0.119
14	0.486	0.230	0.374	0.115
15	0.643	0.367	0.407	0.147
16	0.553	0.280	0.398	0.138
17	0.597	0.366	0.379	0.119

の流速，気泡混入率，単位時間当たりの気泡通過数を計測し解明した結果を以下に要約して述べる。

- ① 気泡混入した領域における時間平均した流速を指数則分布で近似すると，1/9 乗の分布で示され，気泡混入していない場合(ただし，境界層が十分に発達した場合)との違いは小さい。
- ② 気泡混入した領域での乱れ強さの大きさおよび分布形状は気泡が混入していない場合と大きく異なる。また，気泡混入開始位置に近い断面で乱れ強さが最も大きくなる。さらに，各断面での乱れ強さの最大値と比較すると，気泡が混入していない場合より 10 倍から 18 倍程度大きくなる。
- ③ 仮想底面 $y=0$ から気泡混入率 C が 90% となる高さ $y=Y_{90}$ までを断面平均した気泡混入率 C_{mean} ， $y=Y_{90}$ における時間平均流速，および単位時間当たりの気泡通過数の最大値 F_{max} の流下方向の変化から，平衡状態となる領域を確認した。なお，水路中央部での測定結果から，平衡状態の領域におけるそれぞれの量はほぼ一定値を示す。
- ④ 平衡状態となる領域での気泡混入率，単位時間当たりの気泡通過数，および流速の分布はそれぞれ(2)，(6)，(8)の関係で整理することによって相似な分布が得られる。特に，単位時間当たりの気泡通過数の分布と乱れ強さの分布が同様な分布となり，気泡混入した領域では乱れ強さは単位時間当たりに気泡が通過する数に大

きく影響する。

- ⑤ 平衡状態での skimming flow の流水抵抗 f を気泡混入率の大きさと分布の測定結果に基づき算定した。 $\theta=15.9^\circ$ ， $S/d_c=0.588$ の場合，ステップエッジ断面での測定の結果，抵抗係数 $f=0.12$ から 0.15 となった。

謝辞

本研究を行うにあたり，Queensland 大学所属の Dr. Chanson により気泡混入した流れ場での流速の測定について助言を受けた。ここに，記して謝意を申し上げる。

参考文献

- 1) Chanson, H.: The Hydraulics of Stepped Chutes and Spillways, *Balkema*, Rotterdam, 2002.
- 2) Minor, H., E., and Hager, W., H.: Hydraulics of Stepped Spillways, Proceedings of International Workshop, *Balkema*, 2000.
- 3) Ohtsu, I. and Yasuda, Y.: Characteristics of Flow Conditions on Stepped Channels, *The 27th Cong. of IAHR*, Water Resources Engrg. Div./ASCE, Aug., San Francisco, USA, 583-588, 1997.
- 4) Chanson, H., Yasuda, Y., and Ohtsu, I.: Flow Resistance in Skimming Flows in Stepped Spillways and its Modeling, *Can. J. Civ. Engrg.*, NRC Canada, 29, 809-819, 2002.
- 5) Yasuda, Y., and Ohtsu, I.: Flow Resistance of Skimming Flow in Stepped Channels, *The 28th IAHR Cong.*, IAHR, Graz, Austria, Session B14 (CD-ROM), 1999.
- 6) Yasuda, Y., Takahashi, M. and Ohtsu, I.: Energy Dissipation of Skimming Flows on Stepped-channel Chutes, *The 29th IAHR Cong.*, IAHR, September, Beijing, Theme D2, Vol.1, 531-536, 2001.
- 7) Boes, R. M. and Hager, W. H.: Hydraulic Design of Stepped Spillways, *J. Hydr. Engrg.*, ASCE, 129 (9), 661-670, 2003.
- 8) 安田陽一，高橋正行，大津岩夫：階段状水路の流水抵抗，水工学論文集，土木学会，第 44 巻，527-532，2000.
- 9) 高橋正行，安田陽一，大津岩夫：階段状水路における Skimming flow のエネルギー減勢，水工学論文集，土木学会，第 45 巻，415-420，2001.
- 10) 高橋正行，安田陽一，大津岩夫：階段状水路における流水抵抗，流体力の評価とその応用に関する研究論文集，土木学会，第 2 巻，40-44，2003
- 11) Ohtsu, I., Yasuda, Y., and Takahashi, M.: Discussion of Characteristics of Skimming Flow over Stepped Spillways, *J. Hydr. Engrg.*, ASCE, 126(11), 869-871, 2000.
- 12) Boes, R. M. and Hager, W. H.: Two-Phase Flow Characteristics of Stepped Spillways, *J. Hydr. Engrg.*, ASCE, 129 (9), 671-679, 2003.
- 13) Chanson, H.: Air-Water Flow Measurements with Intrusive, Phase-Detection Probes: Can We Improve Their Interpretation?, *FORUM, J. Hydr. Engrg.*, ASCE, 128 (3), 252-255, 2002.
- 14) Chanson, H., and Toombes, L.: Air-Water Flows down Stepped Chutes: Turbulence and Flow Structure Observations. *Intl JI of Multiphase Flow*, Vol. 27, No. 11, 1737-1761, 2002.
- 15) Ohtsu, I., Yasuda, Y. and Takahashi, M.: Discussion of "Onset of Skimming Flow Stepped Spillways, *J. Hydr. Engrg.*, ASCE, 127(6), 522-524, 2001.

(2003. 9. 30 受付)