

# 急勾配階段状水路における流れの内部構造

## Flow Structure over Stepped Steep Open-Channel

大本照憲<sup>1</sup>・成合功光<sup>2</sup>・矢北孝一<sup>3</sup>・長屋孝介<sup>4</sup>

Terunori OHMOTO, Norimitsu NARIAI, Kouich YAKITA and Kousuke NAGAYA

<sup>1</sup>正会員 工博 熊本大学助教授 工学部環境システム工学科 (〒860-8555 熊本市黒髪 2-39-1)

<sup>2</sup>正会員 工修 第一復建株式会社 (〒812-0016 福岡市博多区博多駅南 3-5-28)

<sup>3</sup>正会員 熊本大学技官 工学部環境システム工学科 (〒860-8555 熊本市黒髪 2-39-1)

<sup>4</sup>学生会員 熊本大学大学院 工学研究科土木環境工学専攻 (同上)

The flow over a stepped channel can be divided into two regimes : nappe flow and skimming flow. It is indicated that for a nappe flow regime the energy dissipation occurs by jet breakup in air, by jet mixing on the step and that for skimming flow regime the energy dissipation is enhanced by the momentum transfer from main flow to skimming fluid near the steps. However, for the stepped steep channel where the wake vortices do not fill the entire cavity between the edges of adjacent steps, the flow structure was not clarified yet. In this study, the skimming flow characteristics in a stepped open-channel was discussed on the basis of experimental data of main flow velocity, pressure on channel bed and water depth. The authors found the correlation among them along the downstream distance from the step edge and clarified the three-dimensional flow structure embedded in the skimming flow from their spanwise variation.

**Key Words :** stepped open-channel, skimming flow, three-dimensional flow structure, wake vortices

### 1. はじめに

急勾配階段状水路は、堰やダムの洪水吐、雨水排水路等における流れの運動エネルギーを効果的に減勢させる工法として利用されて来た。また、近年では自由水面からの空気の連行により流れが白濁したいわゆる「ミルク・フローまたはホワイト・ウォーター」現象が清涼感を有することから都市の広場や庭園に利用されたり、水質浄化機能を有することから水処理装置としても注目を集めている<sup>1),2)</sup>。しかし、一般にフルード数の大きい急勾配階段状水路の流れは、高速で水深が小さく、水面変動や空気混入が大きいために計測が困難となり<sup>3)</sup>、その内部構造については不明な点が多く残されている。また、研究の多くは階段状水路のエネルギー減勢効果の解明を目的としているが、各研究者によってエネルギー損失係数の評価が異なり<sup>4),5)</sup>、実験データのばらつきも大きいことから、エネルギー損失量の算定法も確立されたとは言い難い。エネルギー損失係数のデータにばらつきが大きい原因として、対象領域が全域に亘って非平衡域で等流場が形成されていない実験ケースでは上流端の境界条件の影響が効いている可能性が有ることおよび気泡混入量、

水面変動の大きいことから水深の評価に曖昧さのあることが挙げられる。本研究では、急傾斜地に設置される雨水排水路のエネルギー減勢工として階段状水路を設計する際の基礎的知見を得るために、流れ場が平衡状態に達した等流と見なされる階段部において水面変動、圧力および流速を計測し、流れの内部構造について実験的検討を行った。なお、気泡混入の流れへの影響が強く現れ、データに対する物理的解釈を困難にすることを避けるため、水路勾配は既往の研究<sup>1),6)</sup>に比べて小さい1/10に設定し、限界水深のステップ高に対する比は、0.45~5.42の範囲で実験を行った。

### 2. 実験装置および方法

実験に用いた水路は、長さ6m、幅40cmの亚克力樹脂製可変勾配水路で、その概要を図-1に示す。階段部は、亚克力板で製作し、ステップ高さを1cm、ステップ長を10cmとしてその比を水路勾配1/10に一致させている。流速には境界層型ピトー管と差圧計を用い、水面変動には超音波水位計、底面圧力には円盤高さ1.8mm、直径8mmの小型圧力センサーによって測定した。その実験条件を表-1に

示す。超音波水位計は、そのままの状態では、空間分解能が低いので音波を収束するために、水しぶきが小さい流量  $1.6(\ell/\text{sec})$  の場合には内径  $5\text{mm}$  のアルミ製の筒にセンサーを装着して空間分解能を  $5\text{mm}$  とし、水しぶきが顕著に現れる流量  $3.0(\ell/\text{sec})$  の場合には内径  $8\text{mm}$  のエンビ管にセンサーを装着して空間分解能を  $8\text{mm}$  として使用した。流速、水面高および圧力の変動量は、サンプリング周波数  $100\text{Hz}$ 、1測点のデータ個数を  $4096$  に設定して統計処理が施されている。また、同一の水路を用いて流況を把握するために、流量が  $0.38\sim 15.8\ell/\text{sec}$  の範囲で  $10$  種類通水し、等流場が形成された水路中央において、階段エッジから流下方向に  $1\text{cm}, 5\text{cm}, 9\text{cm}$  の3ヶ所においてポイントゲージにより水深を計測した。

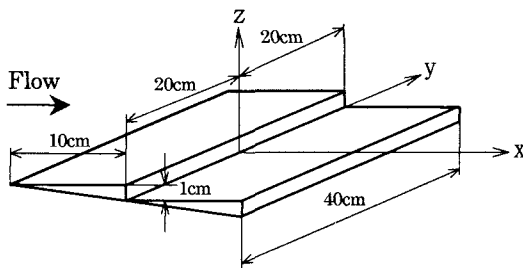


図-1 実験水路の概要

表-1 実験条件

	Case1	Case2
流量 $Q$ ( $\ell/\text{sec}$ )	1.6	3.0
限界水深 $h_c$ (cm)	1.18	1.79
水路勾配 $i_0$	1/10	1/10
フルド数 $Fr$	3.03	3.76
レイノルズ数 $Re$	4000	6600
ステップ高 $D$ (cm)	1.0	1.0
ステップ長 $L$ (cm)	10.0	10.0

### 3. 流況

階段状水路の流れは、流量と勾配が小さく水脈と階段背面にエアポケットが形成され、ステップ上で跳

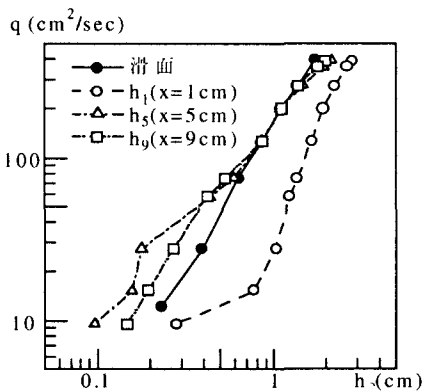


図-2 水深と単位幅流量との関係

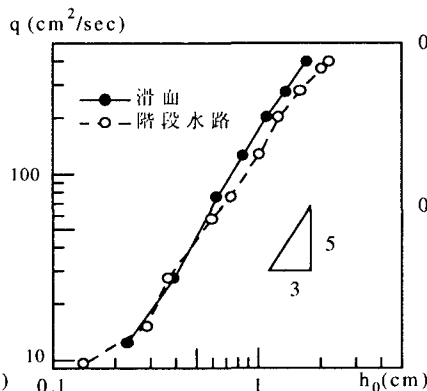


図-3 平均水深と単位幅流量の関係

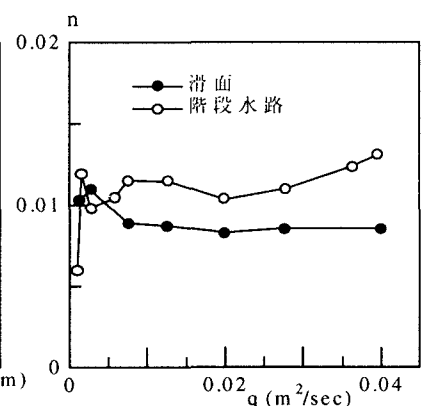


図-4 マニングの粗度係数  $n$

水が発生した場合をナップフロー(nappe flow)、流量と勾配が大きく階段隅部にローラー状の渦が形成され層状に流れる場合をスキミングフロー(skimming flow)として大別されている。広範な実験データを整理することによって得られた H.Chanson の判別式<sup>5)</sup>によれば、

$$hc/D > 1.057 - 0.465 \times D/L : \text{skimming flow},$$

$$hc/D \leq 1.057 - 0.465 \times D/L : \text{nappe flow} \quad (1)$$

となる。ここに、 $hc$ :限界水深、 $D$ :ステップ高さ、 $L$ :ステップ長である。式(1)は、ステップが  $D/L=0.2\sim 1.25$  の範囲から得られたものである。また、ステップが  $D/L=0.4\sim 0.9$  において整理した Rajaratnam の判別式<sup>7)</sup>は、

$$hc/D > 0.8 : \text{skimming flow}, hc/D \leq 0.8 : \text{nappe flow} \quad (2)$$

となっている。一方、十分に発達した跳水を伴うナップフローの発生域に対して、H.Chanson<sup>5)</sup>は、

$$hc/D < 0.0916(D/L)^{-1.276} \quad (3)$$

としている。式(3)は、実験が  $D/L=0.2\sim 6$  の範囲から決定された。水路勾配が  $1/10$  の本実験においてはステップ形状は  $D/L=0.1$  であり、ナップフローの発生する単位幅流量  $q$  は、式(1)によれば  $31.8\text{ cm}^2/\text{sec}$  以下であり、式(2)によれば、 $22.4\text{ cm}^2/\text{sec}$  となる。水路勾配が  $1/10$  においてナップフローの領域に入る、単位幅流量が  $9.5, 15.25, 27.5\text{ cm}^2/\text{sec}$  の3ケースについて目視観察した所、水脈は階段部から剥離せず、シートフロー状に流下し、それ故、エアポケットは見られず、また、跳水も発生していないため、ナップフローとは見なされない。

図-2は、局所水深と単位幅流量との関係を示す。図中には、階段を設置する前の滑面水路における水深を比較のために示す。階段エッジから  $x=5\text{cm}$  および  $9\text{cm}$  の局所水深は、流量が小さく水脈の影響が強い場合には、滑面水路の等流水深に比べて小さく、流量が増大し階段隅部の渦が卓越したスキミング流れにおいては、滑面水路の等流水深に比べて大きくなることが分かる。ステップ長間の平均水深  $h_0$  と単位幅流量  $q$  との関係を図-3に示す。階段状水路の流量は、水深の  $5/3$  乗にはほぼ比例して増大し、マニング式が適用可能であること、および滑面水路の場合に比べてその指数

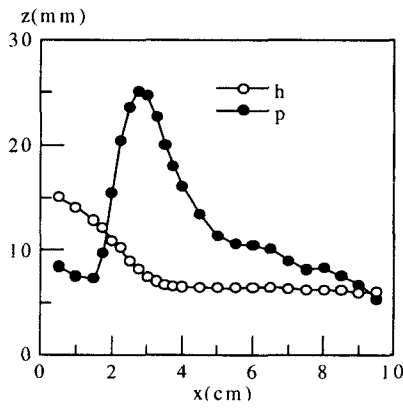


図-5 水深と圧力の流下方向変化

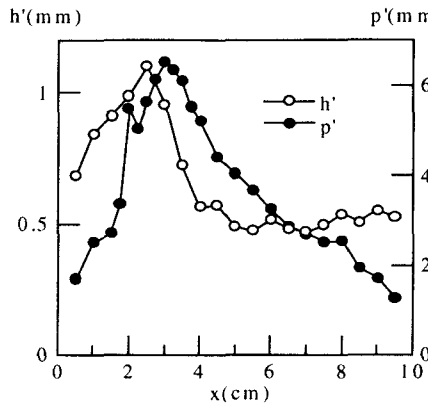


図-6 水面変動と圧力変動

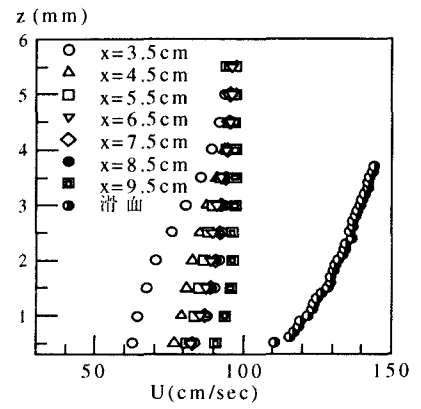


図-7 主流速の鉛直分布

が若干小さいことが分かる。図-4は、マンニングの粗度係数  $n$  と単位幅流量との関係を示す。滑面水路では流量の小さい2ケースをのぞいて、粗度係数  $n$  は  $0.0083 \sim 0.0089$  の範囲にありほぼ一定の値に近いが、階段水路の流れでは流量の増大に伴って粗度係数  $n$  が増大し、階段隅角部に形成されるローラー状渦の流れへの影響が流量の増大に伴って強くなっていることが示唆される。なお、単位幅流量が  $40 \text{ cm}^2/\text{sec}$  では、水面および底面にウロコ状のパターンが観察され、流れに三次元的構造の存在することが示唆された。また、単位幅流量が  $75 \text{ cm}^2/\text{sec}$  以上では底面にウロコ状のパターンは観察されるものの水面は横断方向にほぼ一様であった。流れの内部構造を以下の4章および5章で述べる。

#### 4. 階段状流れの流下方向変化

水路勾配が  $1/10$  においては、何れの流量においても水面形は流下方向に階段形状と同位相の形を取り、射流における水面形と壁面の凹凸との関係に類似し、Chanson の指摘する平坦な水面形<sup>5)</sup>を有するスキミングフローは形成されないことが観察された。

図-5は、表-1のCase2の実験条件における時間平均された水深  $\bar{h}$  および底板に働く圧力水頭  $\bar{p}$  の流下方向変化を示す。水深は、水路上流端より  $3\text{m}$  下流付近までは一様に減少し、それより下流では流れはほぼ平衡状態に達して等流に近い。限界水深は、 $h_c=1.79 \text{ cm}$  であることから流れは全区間で射流を呈し、水位は流下に従って漸減し、ステップ区間では局所水深は階段エッジから  $x=3\text{cm}$  の間で急激に減少し、それより下流ではほぼ一定、全体的に同様減少傾向にある。一方、平均圧力水頭は、階段エッジから  $x=1.5\text{cm}$  までは若干減少傾向にあり、 $x=1.5\text{cm} \sim 3\text{cm}$  の区間で急激な増加傾向を示し、 $x=3\text{cm}$  より下流では一様に減少していることが分かる。平均水深と比較すれば、 $x=2\text{cm}$  までは圧力水頭の方が低い。これは、この区間では流線の曲がりによる遠心力の圧力への影響が効いたことが考えられ、静水圧分布が崩れていることが予想される。

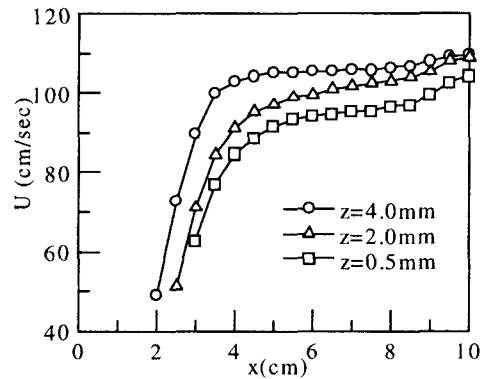


図-8 主流速の流下方向変化

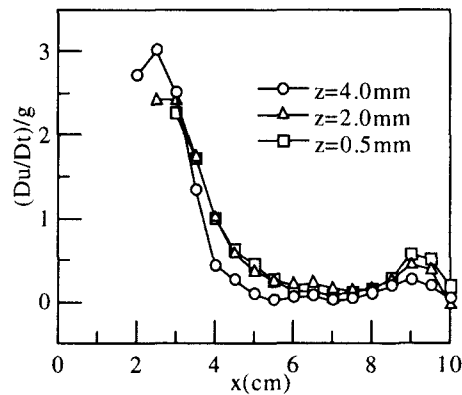


図-9 加速度の流下方向変化

また、圧力水頭と水深との差が極大値となるのは  $x=3\text{cm}$  であり、この位置でステップからの剥離流が下流側のステップに再付着し、動圧の影響が強く現れたものと考えられる。図-6は、水深および圧力の標準偏差の流下方向変化を示す。水深の標準偏差  $h'$  は、階段エッジから  $x=2.5\text{cm}$  において極大値を示し、 $x=5\text{cm}$  より下流の水深がほぼ一様に近いところでは、一定に近く、平均水深の10%程度であることが分かる。一方、圧力の標準偏差  $p'$  は、階段エッジから平均圧力が極大値を示す  $x=3\text{cm}$  までは増加傾向を示し、 $x=3\text{cm}$  より下流では同様減少傾向にあり、 $x=3\text{cm}$  において圧力の標準偏差は、平均値の26%を示し変動の大きいことが

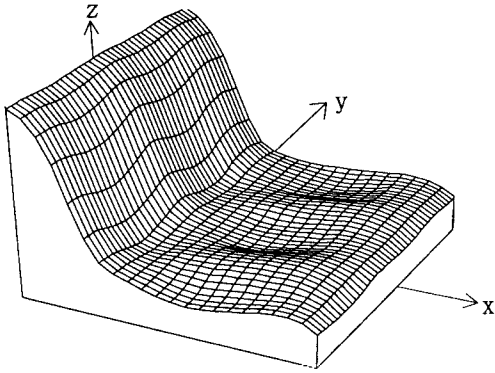


図-10 水面形の鳥瞰図

分かる。図-7は、再付着点より下流側における。主流速の鉛直分布を示す。図中には、流量および水路勾配が同一条件の滑面水路における主流速分布を併示している。階段水路における主流速は、再付着点より下流側では、水面付近で流下方向に大きく変化せず、底面付近で加速流となっていることが分かる。図-8および図-9は、さらに詳細に見るために底面付近における主流速および加速度の流下方向変化を示す。主流速が急激な加速を示すのは、ほぼ圧力が極大値を示す  $x=3\text{cm}$  の直下流からであり、図-9より主流速が平衡に達する流下距離は、路床から離れるにしたがって短くなること分かる。また、加速度が  $x=9\text{cm}$  付近で大きくなったのは、図-5の水面形から明らかなように階段エッジ付近で水脈が湾曲したことによる遠心力の効果が予想される。水路先端より  $3\text{m}$  以降の下流位置において流れは、ほぼ等流と見なせることからステップ間でのエネルギー損失水頭は、ステップ高さに等しい。この間のエネルギー損失は、階段隅角部のローラー状の渦による形状損失と再付着点より下流における底面の摩擦損失によって支配されていると考えられる。図-5においてほぼ水深が一様と見なせる区間において、摩擦損失水頭  $h_f$  を試算した所、 $h_f=0.52\text{cm}$  となり、1ステップ間に占める摩擦損失は約5割で残り5割が形状損失と見積もられた。

## 5. 階段状流れの三次元構造

水路底面に明瞭なウロコ状の紋様が目視観察され、流れの三次元性が示唆された表-1のCase1における流れの内部構造について考察する。図-10は、超音波水位計を単独に用いて計測されたステップ上の水面形の鳥瞰図を示す。ステップ中央部において水面形が横断方向に規則的な波状性を有していることが認められる。同図の横断方向変化をさらに詳細に示したものが、図-11である。階段エッジからの水脈は、水深が  $x=0\text{cm}$  において横断方向にほぼ一様であるが、流下に伴って顕著な波状性を示し、 $x=2.5\text{cm}$  付近まで波高を増幅させ、その後、 $x=4\text{cm}$  で再び水深は一様な状態

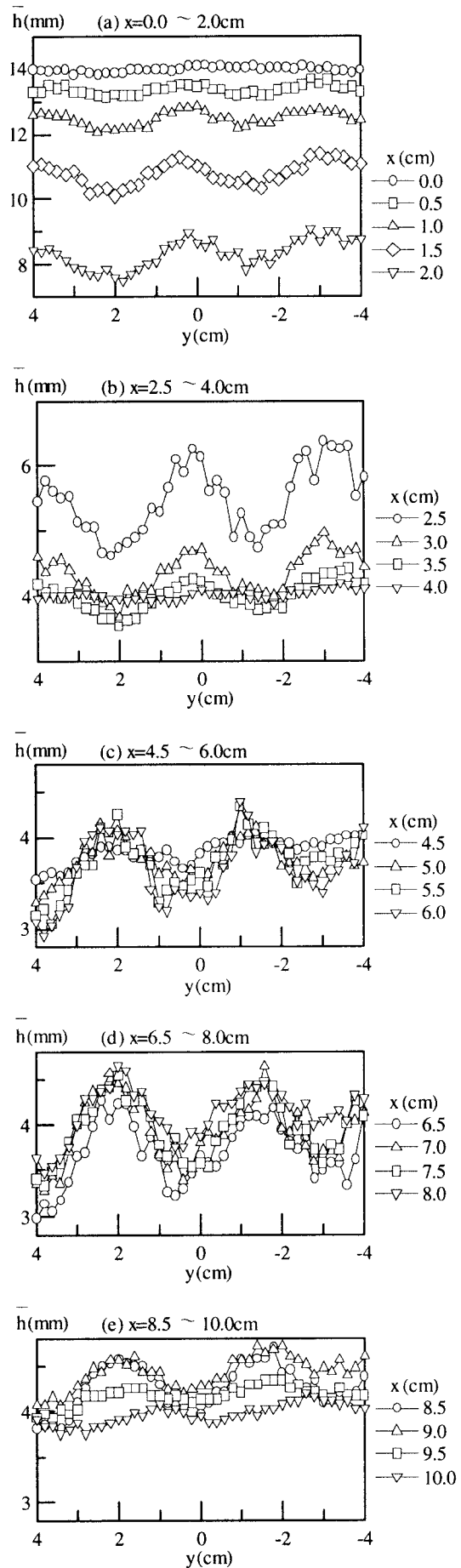


図-11 水深の横断方向変化

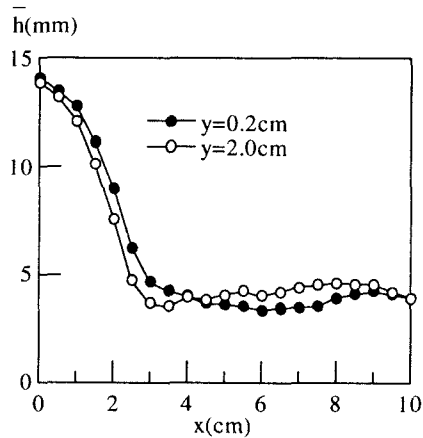


図-1 2 水深の流下方向変化

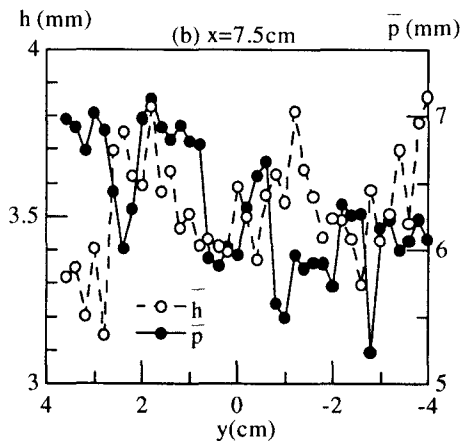
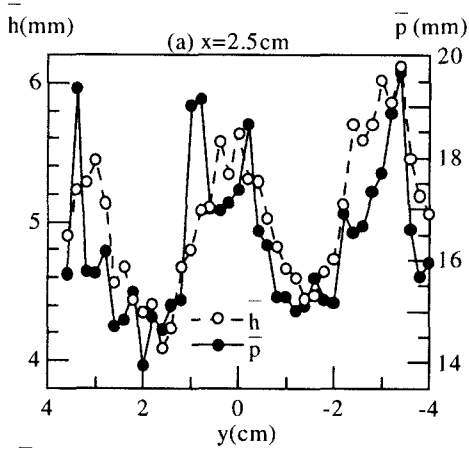


図-1 3 圧力と水位の関係

に近づき、さらに下流の  $x=7.5\text{cm}$  付近で波状性を強め、 $x=10\text{cm}$  では水深は  $x=0\text{cm}$  と同様に一樣に近い状態となっており、波長は約  $4\text{cm}$  であることが認められる。水路中央の  $y=0\text{cm}$  付近の水面形に着目すれば、水深は  $x=0\sim 4\text{cm}$  の間では横断方向に極大値を示し、 $x=4.5\sim 9.5\text{cm}$  の間では極小値となっている。また、水深が横断方向に極値を現した、 $y=0.2\text{cm}$  および  $2.0\text{cm}$  における流下方向の水深変化を図-1 2 に示す。 $y=0.2\text{cm}$  における水深は、 $x=6\text{cm}$  付近まで減少傾向を示し、 $x=9\text{cm}$  においては若干盛り上がっているのに対して、 $y=2\text{cm}$  における水深は、 $x=3.5\text{cm}$  で極小値を示し  $x=8\text{cm}$  までは僅

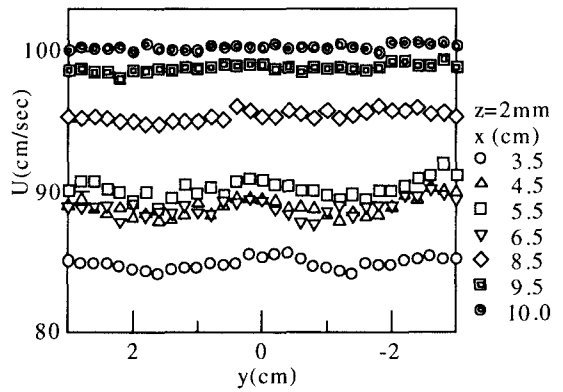


図-1 4 主流速の横断分布

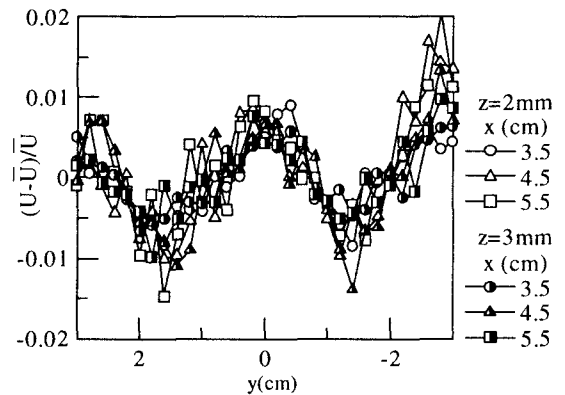


図-1 5 主流速の無次元化

かな増加傾向を示しているのが分かる。図-1 2 から分かるように、水脈および壁面摩擦の影響が強く現れるステップ上において横断方向に水深の高低差が大きい  $x=2.5\text{cm}$  および  $x=7.5\text{cm}$  における底面圧力と水深の同時計測結果を図-1 3 に示す。 $x=2.5\text{cm}$  においては、底面圧力と水深の横断分布は類似した形状を示し、ほぼ同位相であることが分かる。一方、 $x=7.5\text{cm}$  においてはばらつきが大きく、圧力と水深の横断方向変化に顕著な位相関係は見られないが、case2 の図-5 と同様に底面の圧力水頭は位置水頭に比べて大きく、静水圧分布とは見なされない。これは、動圧の影響が残存したことによるものと考えられる。なお、 $x=2.5\text{cm}$  および  $x=7.5\text{cm}$  における水深の横断方向変化が図-1 1 と図-1 3 において若干異なるのは、埋め込まれた圧力センサーが水面形に影響したものと予想される。

境界層型ピトー管を用いた、ステップより高さ  $2\text{mm}$  における平均流速の横断分布を図-1 4 に示す。主流速の波状性が強く現れているのは  $x=4.5\sim 6.5\text{cm}$  である。ステップより高さ  $2\text{mm}$  および  $3\text{mm}$  における主流速の横断方向分布を各高さにおける主流速の横断方向の平均値  $U$  で正規化したものを図-1 5 に示す。無次元化された主流速の横断分布は、図-1 1 の水面形と逆位相の関係にあり、 $y=0\text{cm}$  付近で極大値、 $y=\pm 2\text{cm}$  付近で極小値を示し、水面形と同様に波長は約  $4\text{cm}$  であることが分かる。目視観察および水面形、底面圧力、主

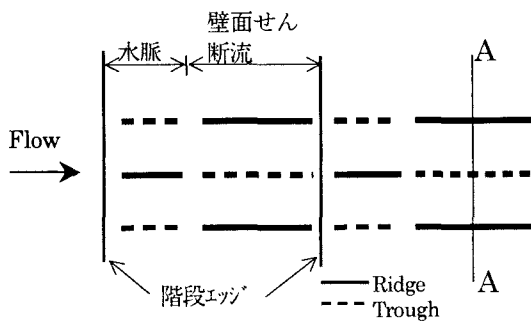


図-16 階段流れの平面流況

流速の横断方向の規則的な波状性から Case1 の流れ場は、以下の様な構造を有することが予想される。即ち、水脈に生じた流れの波状性は流下とともに増幅し、階段エッジからの剥離流がステップに再付着する地点では動圧としての波状性を示す。この動圧は横断方向に圧力勾配を生み出し、水脈で横断方向に峰部に当たる流れは、剥離流の再付着地点より下流の底面では流れの発散域に当たることが考えられ、水深は流下に従って横断方向には谷部となる。一方、水脈で横断方向に谷部に当たる流れは、剥離流の再付着地点より下流の底面では流れの収束域に当たることが予想され、水深は流下に従って横断方向に峰部となる。また、主流速と水面形との関係から、図-16の A-A 断面における流れを模式的に示したのが図-17である。二次流の計測を実施していないので、予想の域を越えないが、階段状流れにおいて流れが三次元的様相を呈した場合には、薄層流においても開水路乱流で観察される並列らせん流的運動<sup>8)</sup>を生じることが示唆される。

## 6. まとめ

エネルギー減勢工として階段状水路を設計する際の基礎的知見を得るために、流れ場が平衡状態に達した階段部において水面変動、底面圧力および流速を計測し、流れの内部構造について実験的検討を行った。得られた知見を要約すれば、以下の通りである。

- 1) 水路勾配が 1/10 の階段状流れにおいては、ナップフローは観察されず、流量の大きい場合にはスキミングフロー、流量の小さい場合にはシートフローの形態であった。また、単位幅流量は概ね水深の 5/3

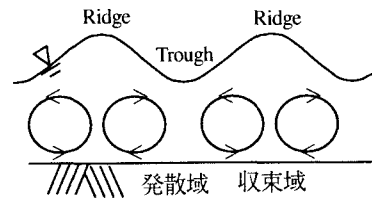


図-17 A-A断面における流れの模式図

乗則に従っている。

- 2) 水深が横断方向に顕著な変化をしない二次元階段流れにおける、水深、底面圧力、流速および加速度の流下方向変化の相互関係が明らかにされた。
- 3) 水深が横断方向に規則的波状性を有する階段流れにおいては、水深、底面圧力および流速の横断方向変化の相互関係から、流れに三次元的構造の存在することが明らかにされ、並列らせん流の存在が示唆された。

## 参考文献

- 1) Hubert Chanson: Hydraulic Design of Stepped Cascades, Channels, Weirs and Spillways, Pergamon, 1994
- 2) 柏井条介: ダム景観設計における水理的課題に関する一考察、ダム技術、No. 120, pp25-34, 1996. 9
- 3) 石川、赤司、斉藤: 急勾配階段流れの水深評価について、土木学会 43 回年次学術講演会、第 II 部門、pp. 428-429, 1988
- 4) Hubert Chanson: Comparison of energy dissipation between nappe and skimming flow regimes on stepped chutes, J.Hy.Res.32(2),213-218,1994,Discussion:33(1),114-143, 1995
- 5) Hubert Chanson: Hydraulics of skimming flows over stepped channels and spillways, J.Hy.Res. [Discussion:33(3), 414-419,1995
- 6) 安田、遠藤、大津: 階段状水路における流れの特性、土木学会 51 回年次学術講演会、第 II 部門、pp. 236-237, 1996
- 7) Rajaratnam, N.: Skimming flow in stepped spillways. J. Hydr. Engng., ASCE, 116(4), pp.587-591, 1990
- 8) 大本、平野、M. S. パルー: 縦筋河床上の三次元乱流構造について、第 33 回水理講演会論文集、pp. 529-534, 1989

(1998. 9. 30 受付)