

階段状開水路流れにおける三次元波状跳水の内部構造

Three Dimensional Flow Structure of Undular Hydraulic Jump in Stepped Open Channel

大本 照憲*, 成合功光**, 矢北 孝一***

Terunori OHMOTO, Norimitsu NARIAI, Kouichi YAKITA

*正会員 工博 熊本大学助教授 大学院自然科学研究科 (〒860-8555 熊本市黒髪 2-39-1)

**正会員 博士(工学) 第一復建(株) 技術第2本部 水工部 (〒816-0094 福岡市博多区諸岡 1-7-25)

***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)

Characteristics of separated shear layer due to a backward facing step, newly developed boundary-layer after the reattachment point and an undular hydraulic jump have been investigated experimentally to clarify the turbulent flow structure and energy dissipation mechanism of stepped steep open channel. Flow measurements were conducted by using particle image velocimetry (PIV), a high-resolution camera with 15fps (frame per second) and hot film anemometry. In this paper, authors discussed the three-dimensional turbulent flow structure, dynamic pressure distribution and bed shear stress in the stepped open channel with the undular hydraulic jump, which was generated by interaction between lateral shock waves propagating from sidewall. The upstream Froude numbers were 1.42, the Reynolds number based on step height were about 12500.

Key Words : Stepped open-channel, undular hydraulic jump, three-dimensional turbulent flow structure, dynamic pressure distribution, bed shear stress

1. はじめに

跳水は、急変流の代表的な流れとして位置付けられ、射流から常流への遷移域においてエネルギーを効果的に減勢させる作用（エネルギー・キラー）を有することは良く知られている。また、その運動形態は、跳水前の上流フルード数 F_1 によって規定され、その代表的なものとしてChow¹⁾により次のように分類されている。上流フルード数 F_1 の増大に伴い、水面形が碎波した波状跳水 ($F_1=1.0\sim1.7$)、水面付近に小さな渦が形成される弱跳水 ($F_1=1.7\sim2.5$)、その他動揺跳水 ($F_1=2.5\sim4.5$)、定常跳水 ($F_1=4.5\sim9.0$)、強跳水 ($F_1>9.0$) に分類されている。

また、森ら²⁾は、跳水と境界層との相互干渉が跳水内の内部構造に影響するものとして、実験的に検討を行い、積分型運動量方程式の各項の評価や三次元波状跳水の形成機構を考察している。

後藤ら³⁾は、波状跳水の発生条件に対して上流フルード数 F_1 の他にレイノルズ数およびアスペクト比の影響を実験的に検討している。特に、波状跳水の形成に対して、レイノルズ数 $Re>65000$ および跳水前水深 h_1 と水路幅 B で表されるアスペクト比 $B/h_1>10$ の場合には、上流フルード数 F_1 が1.7~1.8以下となると波状跳水が発生することを指摘している。

Chanson⁴⁾らは、目視観察や写真撮影から波状跳水には5種類のタイプがあり、両側壁から発生した衝撃波は上流フルード数 F_1 が1.2を超えた段階で生じ、 F_1 が1.5~2.9の

範囲で波状跳水は消滅すること、波状跳水の波高や波長は上流フルード数 F_1 とアスペクト比の関数であることを指摘している。

しかしながら、これらの研究は、目視観察や主流速の実験データに基づくものであり、既往研究で鉛直流速成分や横断流速成分および乱れ特性量の実測データに基づいて流れの内部構造を議論した研究事例は少なく、跳水内部のメカニズムについては不明な点が多く残されている。

ところで、著者らはこれまで、急勾配階段状水路の流れの内部構造について実験的検討を行い、水路内の流れ場を明らかにするとともに、階段での主なエネルギー減勢の要因が、主流部と剥離循環流との運動量の交換によって行われていることを実験データに基づいて示した⁵⁾。

その際、ステップ上で跳水が発生する場合があった。その跳水現象は、ステップ上でのエネルギー減勢効果の一部を担うものである。つまり、階段部で跳水が発生した場合には、エネルギー減勢は剥離循環流と主流との運動量の交換だけによるものではなく、跳水によるエネルギー減勢も含まれる。そのため、その内部構造を解明することは、階段流れのエネルギー減勢機構を解明する上で重要であると考えられる。

本研究は、階段状水路流れにおいて発生した波状跳水に注目し、流れの三次元特性、圧力特性および底面せん断力について実験的検討を行なったものである。

表-1 実験条件

項 目		
流 量	$Q(l/s)$	5.0
水 路 幅	$B(cm)$	40.0
単位幅流量	$q(cm^2/s)$	125
限界水深	$h_c(cm)$	2.52
ステップ長	$Ls(cm)$	100.0
ステップ高	$Hs(cm)$	1.0
平均路床勾配	i_0	1/100
限界流速	$U_c(cm/s)$	49.7
跳水前水深	$h_1(cm)$	1.99
跳水前流速	$U_1(cm/s)$	62.81
跳水前フルード数	F_1	1.42
跳水前レイノルズ数	Re_1	12500
跳水前アスペクト比	h_1/B	0.050
断面平均水深	$\bar{h}(cm)$	2.77
断面平均流速	$\bar{U}(cm/s)$	45.13
平均フルード数	Fr	0.87
平均レイノルズ数	Re	12500
最大流速	$U_0(cm/s)$	68.0
最大水深	$h_0(cm)$	3.51
平均アスペクト比	h/B	0.069

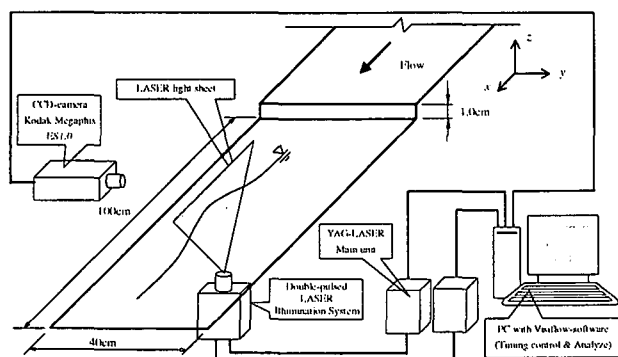


図-1 計測システムの概略(PIV法)

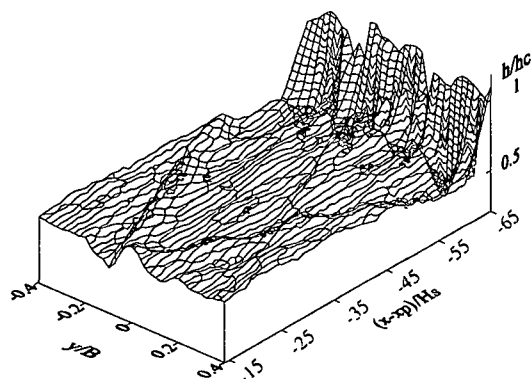


図-2 水面形の鳥瞰図(落差部, Run-2)

2. 実験装置および方法

実験に使用した水路は、長さ10m、幅40cm、高さ30cmの可変勾配型の循環式直線水路である。計測部は、側壁および底面からレーザー光が照射可能なように全面がアクリル製となっている。階段部も同様にアクリルで製作

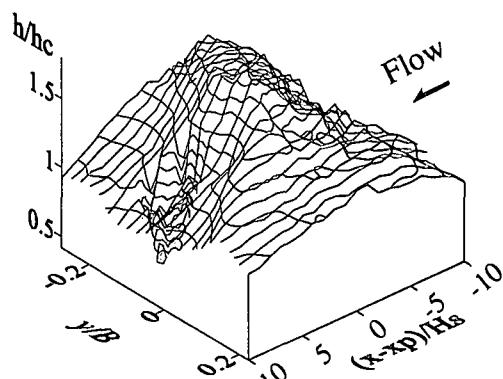


図-3 水面形の鳥瞰図(水面上昇部, Run-2)

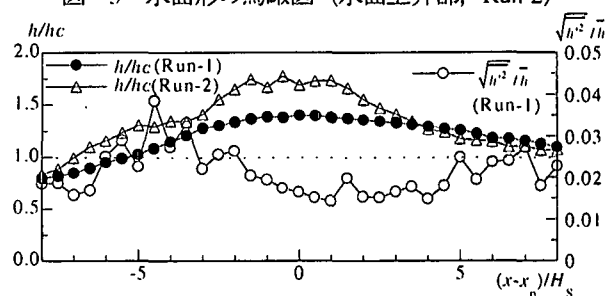


図-4 水路中央における水深と標準偏差 (Run-1)

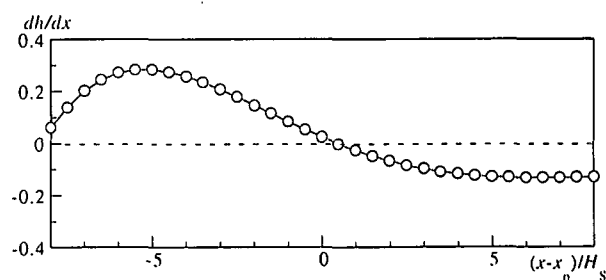


図-5 水深の流下方向変化率 (Run-1)

し、水路に設置した。階段の平均路床勾配 i_0 は大量に気泡が混入することによってデータの物理的解釈を困難にすることをさけるために、階段状水路の既往の研究^{6),7)}に比べて緩い1/100に設定した。また、ステップ高 Hs を1cm、ステップ長 L を100cmとした。なお、ステップは水平勾配となっている。座標系は右手座標系を用い、流下方向を x 軸、水路中央を $y=0$ として水路横断方向を y 軸、鉛直上向きを z 軸とし、それぞれに対応した平均流速成分を U, V, W 、変動流速成分を u', v', w' とする。表-1に実験条件を示す。

流速は非接触型の代表的な計測法である PIV 法 (Run-1) と接触型の点計測のホット・フィルム (Run-2) を用いて計測を行った。PIV 法による計測システムの概要を図-1に示す。光源に空冷式ダブルパルス YAG レーザー (出力25mJ) を用い、シート光の厚さを1mm、幅を8cm、パルス間隔を800 μ sに設定し、 xz 平面を計測する場合は水路下方から底面に垂直上向きに、 xy 平面を計測する場合は水路側方から側壁に水平に照射した。レーザー光と CCD カメラを同期させて読み込まれた可視化

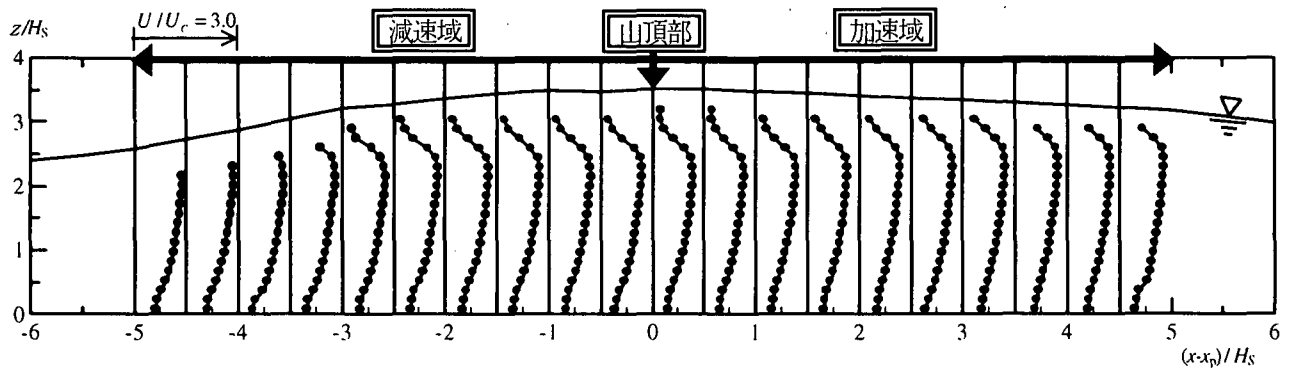


図-6 主流速 U の流下方向変化 (Run-1)

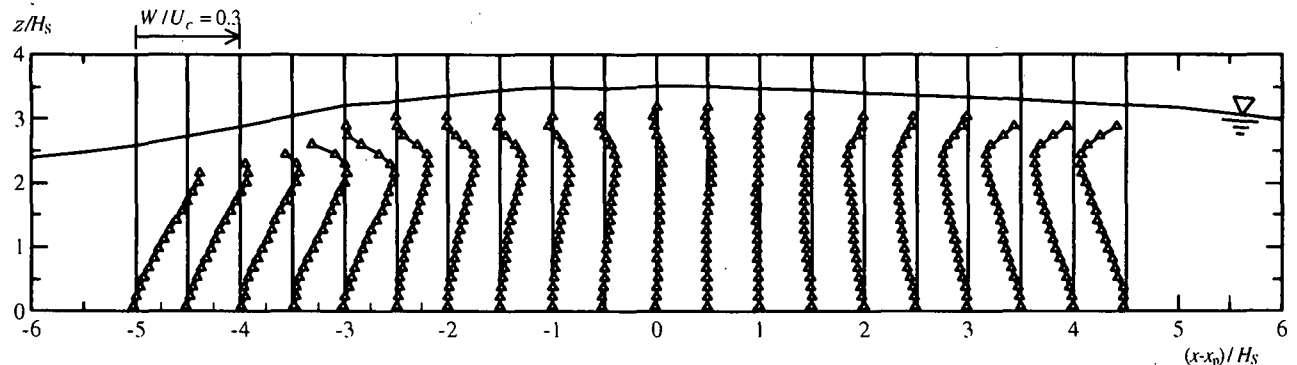


図-7 鉛直流速成分 W の流下方向変化 (Run-1)

画像は、15fps (frame per second) 960×1018(pixel)のモノクロビデオ画像としてパーソナルコンピュータのハードディスクに記録され、PIV 法によって処理された。ここに、画像の 1pixel の最小サイズは、0.070mm である。流速のサンプリング周波数は 15Hz、1 計測面での画像データは 1000 枚、計測時間は、33.3sec であった。なお、トレーサとして粒径 30 μ m、比重 1.02 のナイロン粒子を使用した。

また、ホット・フィルムは、サンプリング周波数 200Hz、1 測点のデータ個数を 4096 に設定した。ここで、一般に、階段流れは空気の流れを伴う気液混相流であることから、ホット・フィルムへの気泡の影響がスパイク状のノイズとして表れる。そのため、気泡の影響を除去するために、ホット・フィルムのデータ処理は流速計からの応答電圧が 0V 付近を示したものは除外し、残りの計測値の平均値より標準偏差の 3 倍の範囲にあるデータを抽出して統計処理を行った。

水面変動の計測には、超音波水位計を使用した。水面変動は PIV およびホットフィルム計測時のそれぞれの水面変動を計測した。サンプリング周波数は 100Hz、1 測点のデータ個数は 2048 に設定した。

なお、Run-1 および Run-2 の実験結果より得られた水面形や平均流特性等の傾向は一致していることは確認している。ここでは、より明瞭に傾向が表れているものを採用し検討を行なった。

また、水面の上昇部が表れたステップ上の最大水深位置の階段エッジからの流下距離を x_p と定め、各点を表記した。

3. 水面形

表-1 の実験条件における Run-2 での階段エッジ部の水面形の鳥瞰図を図-2 に、水面上昇部の水面形を図-3 に示す。なお、この二つの水面形は同一のステップ上には現れておらず、側壁からの衝撃波の干渉が卓越したステップ上に水面の上昇部が現れた。まず、図-2 の階段エッジ部の水面形をみると、階段形状と同位相の水面形で、水脈は階段部から剥離せず、ステップ上で跳水が発生しないシート・フロー状⁸⁾に流下しており、側壁から角度約 27°、波高約 2.5mm の衝撃波が発生し、 $x/L=0.5$ 付近で交差している。図-3 では、側壁で発生した約 16°~18° の衝撃波の干渉が顕著にあらわれ、 $x/L=0.55\sim0.75$ の水路中央部において、水面の上昇が発生した。

図-4 は Run-1 での水路中央における時間平均された水深と標準偏差である。なお、図中には、参考として Run-2 における水路中央部における水深を示している。水深は $(x-x_p)/H_s < -5.0$ で射流となり、それより下流では常流を示している。波高水深比 $(h_0-h_1)/h_1$ は、0.76 であり、森ら²⁾の波高水深比 1.2 より小さい。水面変動の強さを示す標準偏差は、 $(x-x_p)/H_s=4.5$ で最も大きく水深の 3.8% であり、流下するにつれて減少し、 $(x-x_p)/H_s > 5.0$ では増加の傾向にある。時間平均された水深の流下方向変化率を図-5 に示す。これから、流下方向変化率の最も大きい $(x-x_p)/H_s=5.5$ と標準偏差の極大位置がほぼ同位置にあることがわかる。

4. 平均流特性

4. 1 流下方向変化

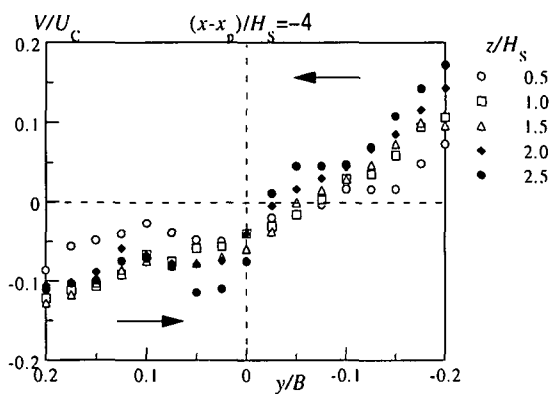


図-8 横断流速成分の横断分布 (減速域, Run-2)

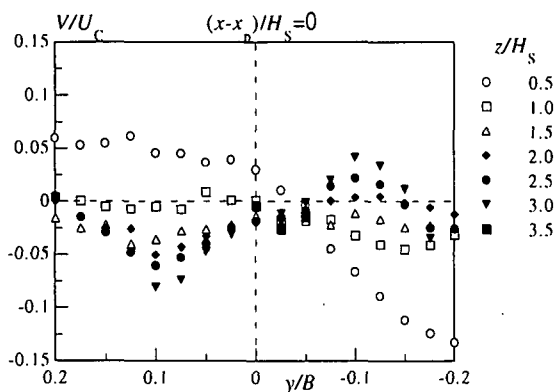


図-9 横断流速成分の横断分布 (山頂部, Run-2)

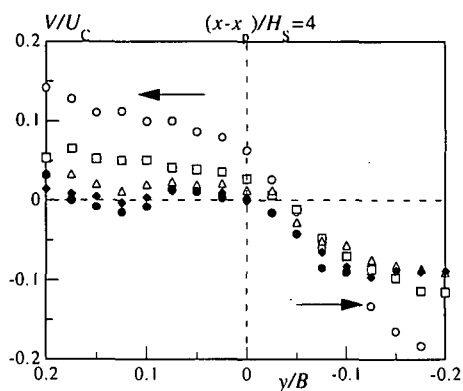


図-10 横断流速成分の横断分布 (減速域, Run-2)

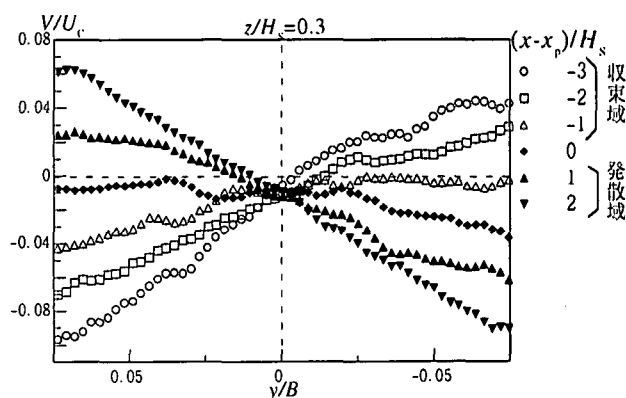


図-11 横断流速成分 V の横断分布 (Run-1)

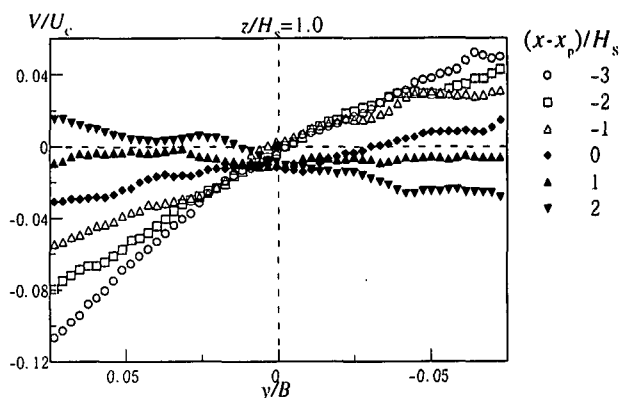


図-12 横断流速成分 V の横断分布 (Run-1)

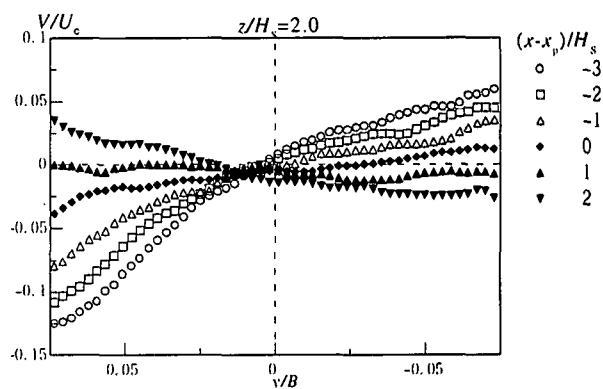


図-13 横断流速成分 V の横断分布 (Run-1)

図-6にRun-1における水面上昇部での主流速 U の流下方向変化を示す。これから、 U は山頂部： $(x-x_p)/H_s = 0.0$ に近づくにつれて減速し、 $(x-x_p)/H_s > 0.0$ の下流域では加速していることがわかる。図-7にRun-1における水面上昇部での鉛直流速成分 W の流下方向変化を示す。これから、 W は、 $(x-x_p)/H_s < 0.0$ において上昇流、 $(x-x_p)/H_s > 0.0$ では、下降流を示し、上昇流は $(x-x_p)/H_s = 0.0$ に近づくにつれて弱まり、下降流は $(x-x_p)/H_s = 0.0$ から離れるにつれて強まっている。 $-5.0 < (x-x_p)/H_s < 5.0$ における上昇流および下降流の極大値は、上昇流が限界流速 U_c の約17%、下降流が U_c の約10%を示した。また、水面付近では U および W とも急激に小さくなっている。

4. 2 横断方向変化

Run-2における減速域、山頂部： $(x-x_p)/H_s = 0.0$ および加速域での横断流速成分 V の横断分布を各点での鉛直方向についてまとめたものを図-8～10に示す。これから、図-8に示す減速域では、流れが水路中心に収束し、その傾向は底面から離れるにつれて強くなっている。図-9の山頂部の水面付近では、水路中心に流れが収束し、鉛直下方に向かってその傾向は弱まる。底面付近においては、水路中央から側壁方向に流れが発散している様子が見とらえている。また、 $z/H_s > 1.5$ では、 $y/B > \pm 0.1$ で水路中央に向かう V が弱くなっている。図-10の加速域では全層にわたって発散しており、その傾向は底面近傍が最も強くなっている。

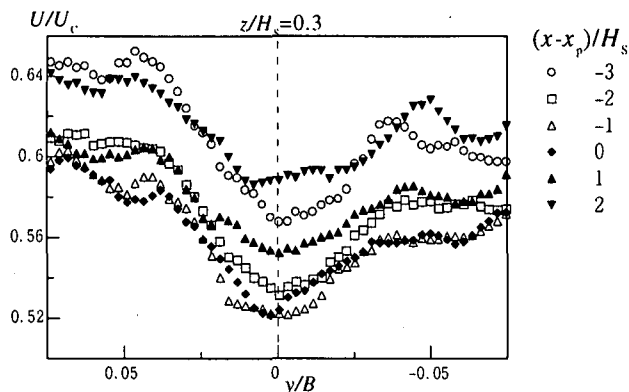


図-14 主流速 U の横断分布 (Run-1)

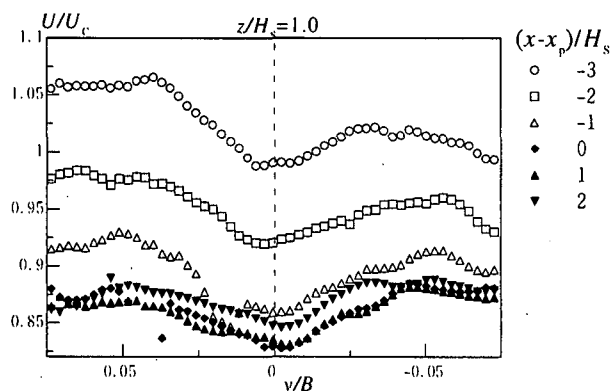


図-15 主流速 U の横断分布 (Run-1)

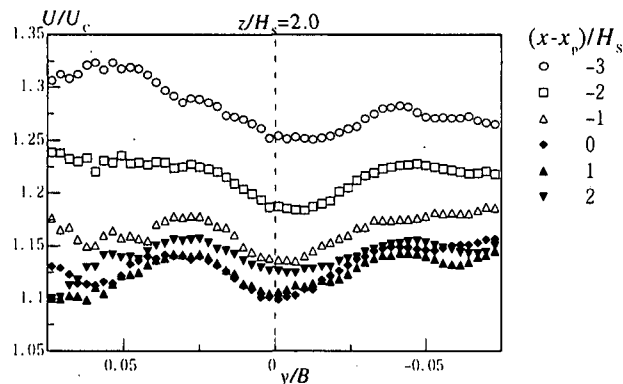


図-16 主流速 U の横断分布 (Run-1)

図-11～図-13 は、Run-1 における減速域、山頂部および加速域での横断流速成分の横断分布を流下方向についてまとめたものである。図-11 より、底面付近の V 成分は水路中央部に収束しながら山頂部に接近し、山頂部では、 $y/B > 0$ ではほぼ 0 であり、山頂部を通過すると発散し、流下にしたがってその発散傾向が強くなる。図-12 の $z/H_s = 1.0$ では、減速域において、 $z/H_s = 0.3$ より強く水路中央部に収束する。しかし、山頂部付近では、弱い収束傾向を示し、 $(x-x_p)/H_s = 1.0$ ではほぼ横断方向に 0 で、 $(x-x_p)/H_s = 2.0$ で発散に変化している。図-13 に示す $z/H_s = 2.0$ でも、減速域では強い収束傾向を示すが、加速域での発散傾向は直前の収束域に比べ弱い。

図-14～図-16 に Run-1 における減速域、山頂部および加速域での主流速の横断分布を流下方向についてまとめた

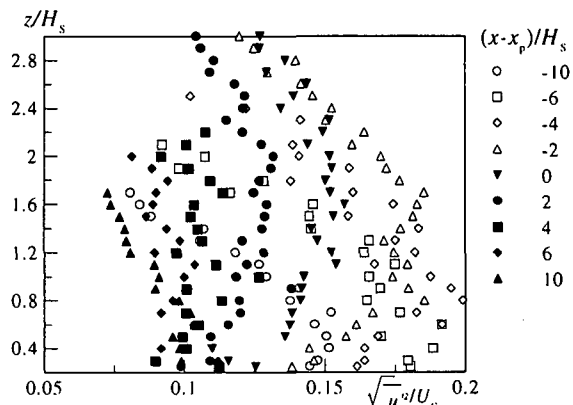


図-17 主流速の乱れ強度 $\sqrt{u'}$ の鉛直分布 (Run-2)

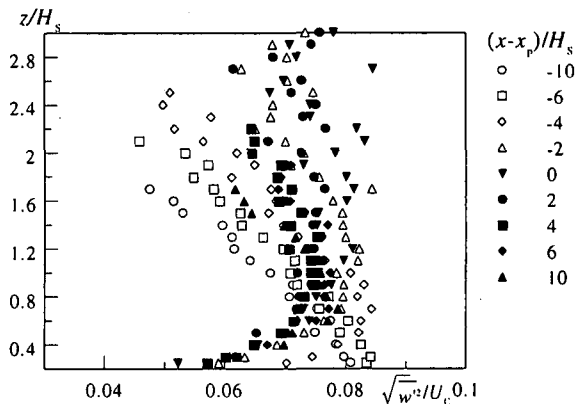


図-18 鉛直流速成分の乱れ強度 $\sqrt{w'}$ の鉛直分布 (Run-2)

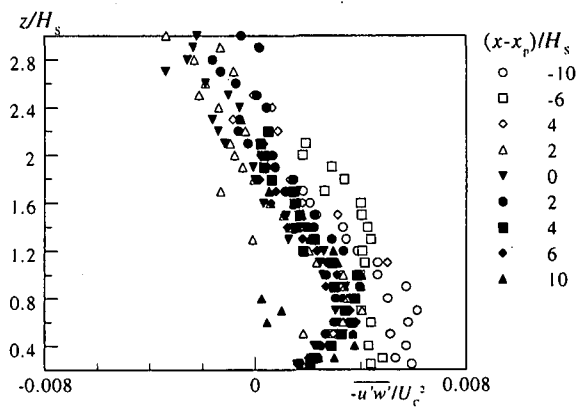


図-19 レイノルズ応力 $-u'w'$ の鉛直分布 (Run-2)

ものである。図-14 に示す $z/H_s = 0.3$ では、山頂部に近づくにつれて減速し、山頂部を通過した後は加速しているのがわかる。また、減速域および加速域ともに、水路中央部は周囲の主流速よりも小さくなっている。 $y/B = \pm 0.05$ 周辺では、各層とも U が強くなっている。図-15 に示す $z/H_s = 1.0$ においても、水路中央部は周囲と比較すると U が小さくなっているのがわかる。また、山頂部に近づくにつれて流速は小さくなっているが、山頂通過後の加速傾向は直前の減速傾向よりも弱く、 $z/H_s = 0.3$ と比べてもその加速傾向は弱い。また、 $z/H_s = 0.3$ ほど顕著には表れていないが、 $y/B = \pm 0.05$ 周辺での U の増加が読み取れる。図-16 の $z/H_s = 2.0$ においても図-15 の $z/H_s = 1.0$ と同様の傾向がみられる。

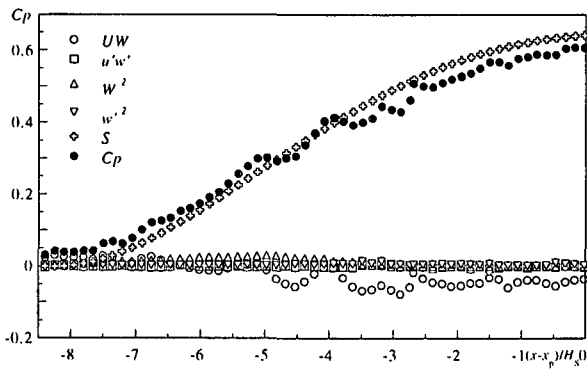


図-20 C_p の流下方向変化(減速域, Run-1)

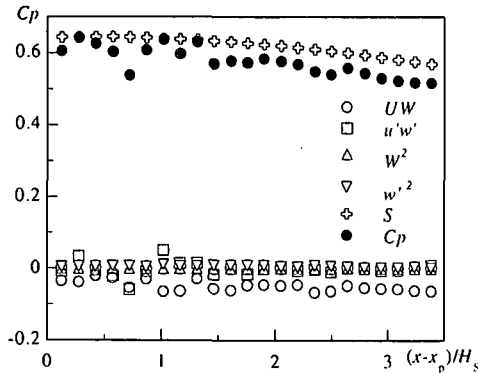


図-21 C_p の流下方向変化(加速域, Run-1)

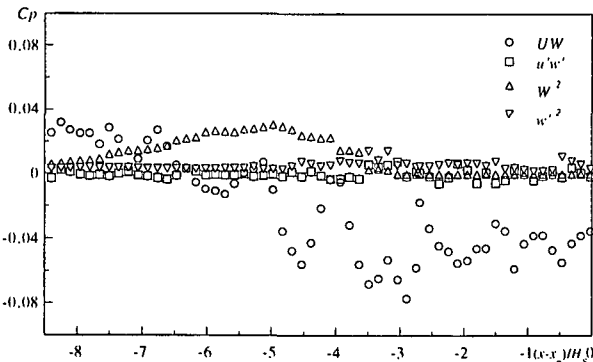


図-22 動圧力 p_d の各項の流下方向変化(減速域, Run-1)

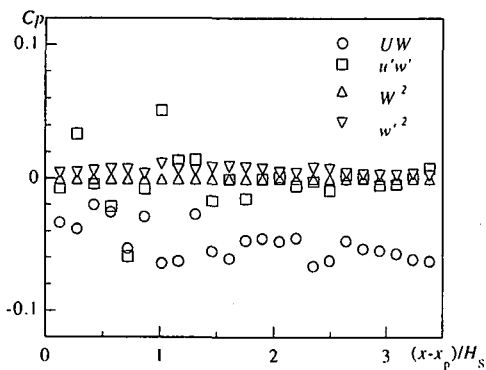


図-23 動圧力 p_d の各項の流下方向変化(加速域, Run-1)

5. 乱れ特性量

図-17にRun-2における水路中央部で時間平均された主流速の乱れ強度 $\sqrt{u'^2}$ の鉛直分布を示す。これから、それほど明瞭ではないものの、減速域では流下にともなって乱れ強度が大きくなり、加速域では小さくなっており、

全体的には減速域の乱れ強度が大きくなっている。図-18にRun-2における鉛直流速成分 $\sqrt{w'^2}$ の鉛直分布を示す。これより、減速域では全体的に底面付近で乱れ強度が大きく鉛直上方に $\sqrt{w'^2}$ が小さくなる三角形分布に近似しているのがわかる。また、底面から離れると、山頂部に近づくにつれて、 $\sqrt{w'^2}$ が流下方向に強くなっているのが読み取れる。加速域では、山頂部からの相対距離による $\sqrt{w'^2}$ の違いはそれほど明確に表れていないが、全体的に見ると底面付近の乱れ強度は減速域よりも小さく、 $z/H_s > 0.8$ では鉛直上方に一樣になる傾向がある。図-19にRun-2におけるレイノルズ応力 $-u'w'$ の鉛直分布を示す。これから、全体的な傾向として、減速域の $-u'w'$ が加速域の $-u'w'$ よりも大きく、その分布は、減速域および加速域ともに、底面付近で極大となり鉛直上方に減少する傾向がある。

6. 圧力場の算出と評価

6.1 壁面圧力係数

次に、複雑な流れ場である三次元波状跳水内の圧力場を明らかにするために、壁面圧力および動圧力を検証する。図-20にRun-1における減速域での壁面圧力係数 C_p の流下方向変化を示す。図中の C_p は壁面圧力係数で、レイノルズ数の十分大きい流れを仮定し、鉛直方向のレイノルズ運動量方程式を z 軸に関して積分することにより求められ、次式と定義する。

$$C_p = 2(p_d / \rho + g \Delta h) / U_0^2 \quad (1)$$

ここで、 Δh は、跳水前の水位からの水位差である。また、式(1)の p_d は、動圧力の項で、次式のようになる。

$$\begin{aligned} \frac{p}{\rho} &= \int_z^h \frac{\partial(UW + u'w')}{\partial x} dz + \int_z^h \frac{\partial(VW + v'w')}{\partial y} dz \\ &\quad + [W^2 + w'^2]_z^h + g(h-z) \\ &= p_d / \rho + g(h-z) \end{aligned} \quad (2)$$

ここに、 ρ は水の密度、 p は総圧、 p_d は動圧、 h は水深、 g は重力加速度である。なお、水路中央での壁面圧力係数算出の場合、右辺第2項の V 成分を含んだ項は、オーダー評価より、約10%以下であることから、無視して算出した。また、図中には壁面圧力に影響することが考えられる式(2)の各項の算定値も併示した。

図-20から、水路中央部の壁面圧力は、減速域において、静水圧の項 S が支配的となることがわかる。また、図-21に示すRun-1における加速域での壁面圧力係数 C_p の流下方向変化も同様に、静水圧の項 S が支配的になることがわかる。

さらに詳細に見るために、静水圧の項 S を除いた各項の流下方向変化を示したものが図-22および図-23である。図-22から、減速域での動圧力で支配的となるのは、運動量輸送項 UW であり、 $(x-x_p)/H_s < -6.0$ で正側に、それより上流域では負側にシフトさせる。また、鉛直流速成分の動圧項 W^2 も $-8.0 < (x-x_p)/H_s < -4.0$ において正側に動圧力に働きかける。図-23の加速域では、運動量輸送項 UW が支配的で、負側にシフトさせる。

った。山頂部を過ぎると τ/ρ は流下方向に大きくなっている。また、式(3)と式(4)は、良好な一致をみせ、3次元波状跳水が形成される場合の底面せん断力の算出には、対数則のみならず指数関数の近似式による算出も有効であることを示している。

8. まとめ

本研究では、階段状水路流れにおいて発生した波状跳水に注目して、流れの3次元特性、圧力特性および底面せん断力について実験的検討を行なった。得られた知見を要約すれば、以下のとおりである。

- 1) 階段状流れの波状跳水は、側壁からの衝撃波の干渉が卓越したときに水路中央部に発生した。また、水面変動は $(x-x_p)/H_S = 4.5$ で最も大きくなり、水深の流下方向変化率の極大値とはほぼ同位置であった。
- 2) 主流速 U は、波状跳水の山頂部に近づくにつれて減速され、山頂部を通過すると加速流となり、鉛直流速成分 W は、山頂部に近づくにつれて上昇流、通過すると下降流となる。また、横断流速成分 V は、減速域では水路中央部に収束し、鉛直上方にその傾向が強まる。山頂部では、鉛直下方に流れが収束する傾向が徐々に弱まり、底面部では発散した。加速域では全層にわたって発散し、その傾向は底面近傍が最も強い。
- 3) 乱れ強度 $\sqrt{u'}$ 、 $\sqrt{w'}$ およびレイノルズ応力 $-\overline{u'w'}$ の大きさは、いずれも減速域が加速域より大きくなる傾向を示す。
- 4) 水路中央部における圧力場は静水圧で近似可能である。また、動圧力は運動量輸送項 UW によって規定され、動圧力の空間分布は、運動量輸送項の空間分布に依存する。
- 5) 底面せん断力の流下方向変化は、水面形と逆位相を示す。また、波状跳水内の底面せん断力を対数則および指数関数の近似式で算出した結果、両者には良好な一致が見られた。

波状跳水を伴う階段状水路流れにおけるエネルギー損失は、階段隅角部の剥離循環流、波状跳水および気泡混入の影響が大きいことが予想される。本研究では、波状跳水に伴う平均流や乱れエネルギーの収支の解明、エネルギー減勢効果の定量的な把握までには至っていない。これらは、階段水路と一様水路床上の波状跳水との比較を含めて今後の検討課題としたい。

参考文献

- 1) Chow, V. T.: Open Channel Hydraulics, McGraw-Hill, p.359, 1959.
- 2) 森 秋巨, 板倉忠興, 森平宏治, 高田修二: 跳水と境界層の相互干渉—三次元波状跳水—, 水工学論文集第 36 巻, pp.367-372, 1992.
- 3) 後藤 浩, 安田陽一, 大津岩夫: 波状跳水の形成条件に対するレイノルズ数・アスペクト比の影響について, 水工学論文集第 43 巻, pp.299-304, 1999.
- 4) Chanson, H. and Montes, J. S.: Characteristics of Undular Hydraulic Jumps : Experimental Apparatus and Flow Patterns, Journal of Hydraulic Engineering, Vol.121, No.2, pp.129-144, 1995.
- 5) 大本照憲, 成合功光, 矢北孝一: 階段状開水路における剥離せん断層の乱流構造, 応用力学論文集, Vol.4, pp.541-548, 2001.
- 6) Chanson, H.: Hydraulic Design of Stepped Cascades, Channels, weirs and Spillways, Pergamon, 1994.
- 7) Minor, H.-E. and Hager, W. H. editors : Hydraulic of Stepped Spillways, Balkema, 2000.
- 8) 大本照憲, 成合功光, 矢北孝一, 長屋孝介: 急勾配階段状水路における流れの内部構造について, 水工学論文集第 43 巻, pp.305-310, 1999.
- 9) 欄津家久, 中川博次, 天野邦彦: 開水路段落ちにおける剥離流の乱流構造に関する研究, 水理講演会論文集第 30 巻, pp.601-606, 1986.

(2002 年 4 月 19 日受付)