

階段状開水路における剥離せん断層の乱流構造

Turbulent Flow Structure of Separated Shear Layer 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 工学部環境システム工学科 (〒860-8555 熊本市黒髪 2-39-1)

**正会員 工修 第一復建(株) 技術統括本部 技術開発室 (〒812-0016 福岡市博多区博多駅南 3-5-28)

***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 and newly developed boundary-layer after the reattachment point were investigated experimentally to clarify the turbulent flow structure and energy dissipation mechanism of stepped steep open channel. Measurements were made by using particle image velocimetry (PIV) and a high-resolution camera with 15fps(frame per second); extend to a distance of about 24 step heights downstream of the step. The Froude numbers were about 2.1 and 2.13, the Reynolds number based on step height were about 32500 and 12500. The results showed that reattachment length became smaller in supercritical flow than in subcritical flow because of strong dependence on flow depth expansion ratio, Reynolds shear stress and streamwise turbulent intensity decreased rapidly from shear layer region, different from duct step flows. The Mechanism on characteristics of turbulence quantities were discussed based on momentum equation and budget of Reynolds shear stress and streamwise turbulent normal intensity.

Key Words : Stepped open-channel, Separated shear layer, Reattachment length, Accelerating flow

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」或いはホワイト・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、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¹⁾²⁾。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³⁾、そのため、流れの内部構造については不明な点が多く残されている。

著者等は、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。その結果、水路勾配が1/10の階段状流れは、ナップフローが観察されず、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を示す。また、単位幅流量は概ね水深の5/3乗則に従うことが判明したことから、平均流速公式としてマニング式が適用できることを示唆した。また、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の変化特性について検討し、階段エッジからの剥離流がステップに再付着する近傍で動圧および加速度が極大値を示すことを明らかにした⁴⁾。

さらに、ステップ内の流下方向の加速特性に着目し、乱流構造の解明を目的にホットフィルム・プローブを用いて乱れの計測を行った。階段エッジから剥離した流れの再付着点後の加速域では、乱れエネルギーが流下方向に急激に減少していることが認められ、その原因としてレイノルズせん断応力に起因する乱れエネルギー生成項が流下方向に減少することと、レイノルズ法線応力と主流速の流下方向の空間勾配との積が負となり、乱れから平均流にエネルギーが逆カスケードしていることが挙げられた⁵⁾。

階段流れの素過程を議論する上で、参考となるものに後方ステップ流れがある。後方ステップ流れは、流体機械の内部に発生する剥離泡のモデルとして⁶⁾、計算流体力学における乱流モデルを評価する対象として位置付けられ、さらに、最近では直接数値計算によって剥離・再付着現象を伴う乱流構造の解明が図られている⁷⁾。

一方、水工学の分野では急変流の基本モデルとして、さらに水理構造物周辺や河床波における剥離流や渦構造を捉える上で基礎的知見を与えている。開水路における段落ち流れを系統的に扱ったものに、欄津、中川^{8)・10)}の

研究がある。剥離泡の長さスケールが、レイノルズ数、フルード数に規定され、再付着点近傍からの組織渦をボイルとの関連で議論され有意な結果を与えている。この他に、可視化法と画像処理法を用いて段落ち下流部における乱れの組織構造を検討したものに川西、余越等¹¹⁾の研究があるが、大半は常流に限られており、射流における段落ち流れの乱流構造を扱ったものは著者等の知る限りあまり多く無い。著者等のこれまでの実験では、階段背後の循環流に関してホットフィルム流速計を用いた精度の高い計測は困難であった。そのため、本研究は、非接触型の代表的な画像処理法であるPIV法を用いて、階段流れの乱れ特性量を詳細に検討し、射流における階段流れの乱流構造を明らかにしようとするものである。

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光が照射可能なように全面がアクリル製となっている。水路勾配 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、既往の研究^{11),12)}に比べて緩い 1/100 に設定した。座標系は流下方向を x 軸、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流速変動成分を u, v および w とする。階段部はステップ高 H_s を 1cm、ステップ長 L を 100cm とした。なお、ステップ部分は水平勾配となっている。表-1 に実験条件を示す。

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（出力 25mJ）を用い、シート光

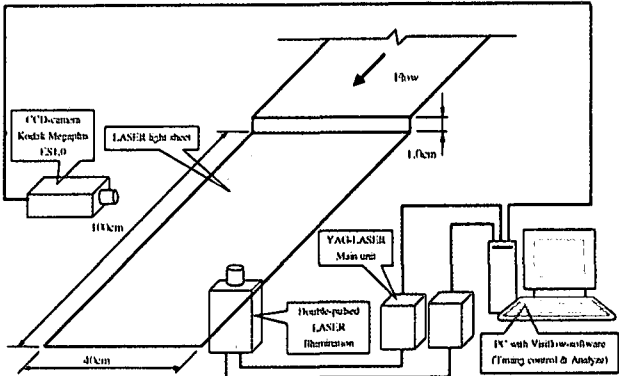


図-1 計測システムの概略

表-1 実験条件

項目	Case1	Case2
流量 $Q(\text{V/sec})$	13.0	5.0
水深 $h(\text{cm})$	2.9	1.5
平均流速 $U(\text{cm/sec})$	112	82
最大流速 $U_t(\text{cm/sec})$	120	91
限界水深 $h_c(\text{cm})$	4.8	2.5
フルード数 Fr	2.10	2.13
レイノルズ数 Re	32500	12500

の厚さを 1mm、幅を 8cm、パルス間隔を $600\mu\text{s}$ に設定し、水路下方から底面に垂直上向きに照射した。レーザ光と CCD カメラを同期させて読み込まれた可視化画像は、30fps (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 サイズは、0.093mm 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

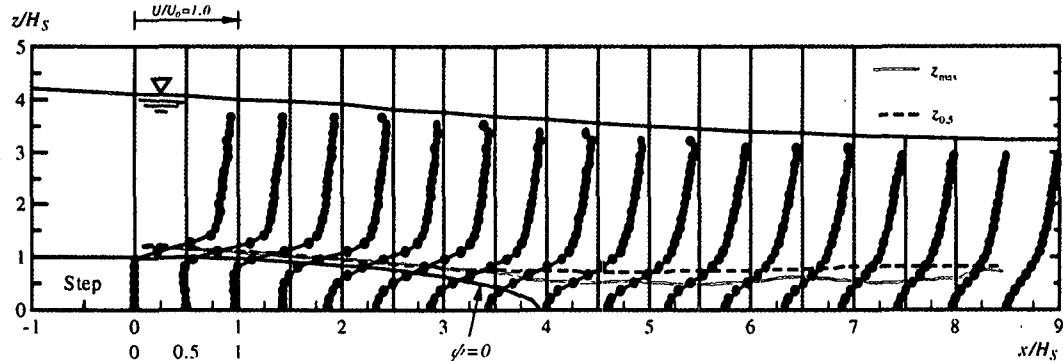


図-2 主流速の流下方向変化(Case1)

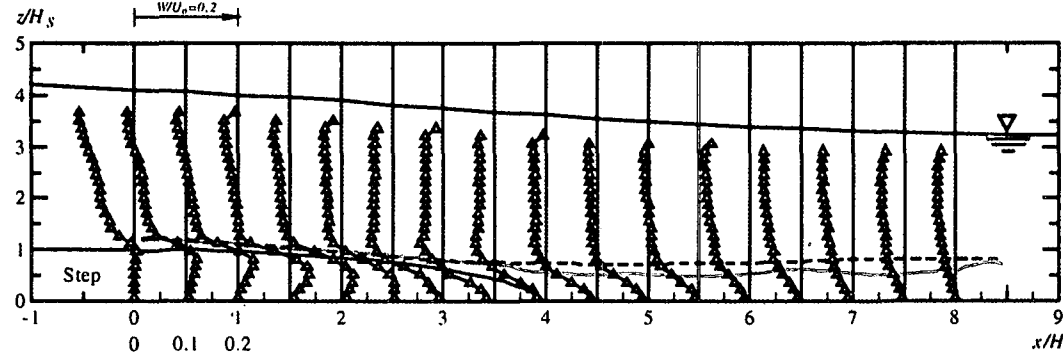


図-3 鉛直流速成分の流下方向変化(Case1)

て粒径 $30\mu\text{m}$ 、比重 1.02 のナイロン粒子を使用した。

また、水面変動の計測に使用した超音波水位計はそのままの状態では、空間分解能が低いことから、内径 8mm のアルミ製の円筒にセンサー部を装着し、分解能を 8mm として使用した。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。

3. 平均流特性

3.1 平均流速および流れ関数

Case1 における最大流速 U_0 で無次元化した主流速および鉛直流速成分を図-2 および図-3 に示す。図中には、剥離線および主流速の鉛直勾配が極大となる位置 z_{mix} および主流速 = (極大流速 + 極小流速) / 2 となる位置 $z_{0.5}$ を参考線として挿入している。図よりステップ直下流の階段流れは、階段エッジにおいて剥離した後、急拡大部下流では剥離循環流域および主流域から流体の連行を受けながら混合層が発達し、水路床に再付着していることがわかる。主流速は、混合層外層において鉛直上方に増加傾向にあり、混合層においては流下方向に増大が著しく、循環流における逆流速度は底面近傍で大きく、その最大値は約 $0.15U_0$ である。また、再付着点下流では剥離流は緩和され、壁面の拘束を受けた内部境界層が発達し、壁面乱流が流下とともに平衡状態に漸近する様子が認められ、基本的には管路の片壁のみにステップを有する二次元段落ち管路流れに類似していることが分かる¹³⁾。

管路段落ち流れに対する Eaton & Johnston のレビュー¹⁴⁾によれば、剥離泡における逆流速度の極大値は一般に U_0 の 20% 以上になる場合が多いことから射流階段流れの循環流では逆流が若干弱い。また、フルード数が 0.19 ~ 0.22 の開水路常流段落ち流れ⁸⁾との比較では、常流で逆流流量 $\Psi/(HsU_0) = -0.03 \sim -0.06$ を示し、射流階段流れでは $\Psi/(HsU_0) = -0.04 \sim -0.06$ であることから両者に顕著な差は無い。

鉛直流速成分 W は、 $x/Hs < 2$ においては剥離泡内で上昇流、剥離せん断層の外層では鉛直上方に下降流が強まり、 $x/Hs > 2$ では全層に亘って下降流となり、水深の流下方向変化率 $dh/dx < 0$ と強い相関のあることが分かる。棚津ら⁹⁾の実験結果である開水路常流 ($Fr = 0.45$, $dh/dx > 0$) の段落ち直下流では、下降流 W は混合層内で極大値を示し、その値は U_0 の約 10% であり、混合層外層の水面付近では上昇流となる。射流階段流れでは下降流速は混合層および自由水面で、その極大値は U_0 の約 15% となり、常流段落ち流れに較べて若干大きな値を示した。

常流の段落ち流れの混合層外層において $\partial W / \partial z > 0$ であることから、連続条件より $\partial U / \partial x < 0$ となり混合層外層の主流部で流下方向に若干減速傾向を有するのに対して、射流の階段流れにおける混合層外層では $\partial W / \partial z < 0$ であることから $\partial U / \partial x > 0$ となり主流速

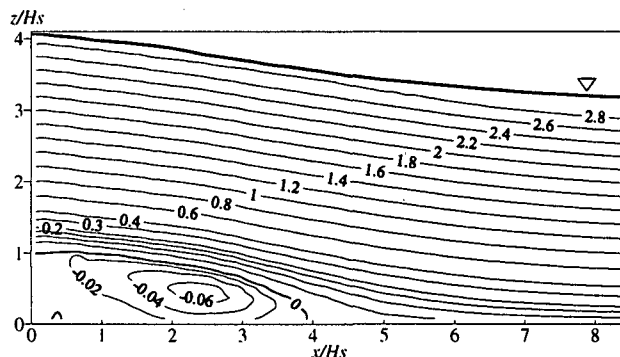


図-4(1) 流れ関数の等値線(Case1)

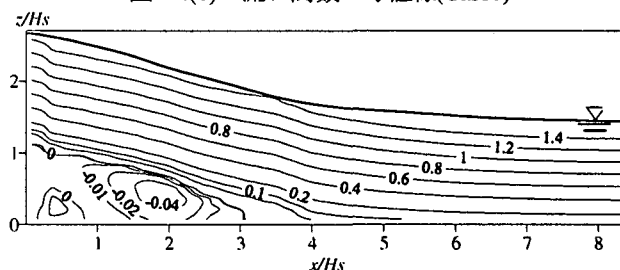


図-4(2) 流れ関数の等値線(Case2)

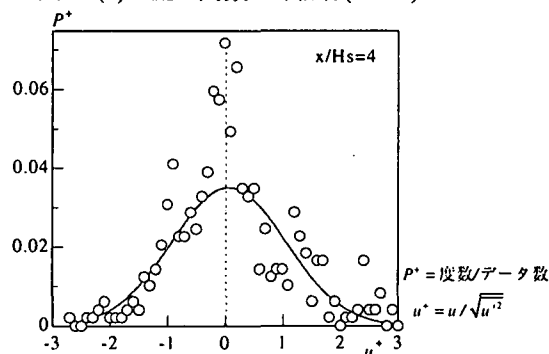


図-5 主流速変動の確率密度分布(case1)

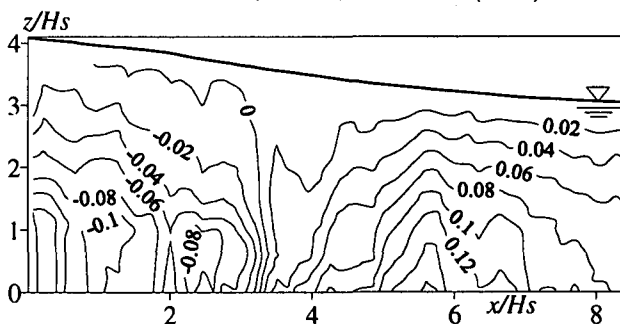


図-6 動圧力($p_d / (\rho U_0^2 / 2)$)の空間分布(case1)

は流下方向に増加傾向を持ち、自由水面の低下が強く影響していることが分かる。

流れ関数は、横断方向に流れ場が一様であると仮定し、次式

$$\psi(x, z) = \int_0^z U dz \quad (1)$$

から求められ、その等値線を図-4(1)および(2)に示す。一般に、再付着点は、1) 流れ関数の値がゼロとなるの流線と河床面との交点、2) 壁面近傍で時間平均流速がゼロとなる位置、3) 壁面せん断力がゼロとなる位置、4) 壁面上で順流と逆流の時間割合が等しくなる位置から同定される。流れ関数の等値線および主流速の流下方向変化が

ら Case1 および Case2 の再付着点距離は、それぞれ、 $x_R/Hs=3.9$ および $x_R/Hs=3.0$ であることが分かる。また、剥離線は固体壁から見て上に凸の放物線に近い形状を示し、再付着点付近の直上流でその曲率は大きい。

剥離線の下流では、循環流が形成され、逆流渦の中心 $(x_c/Hs, y_c/Hs)$ は Case1 で $x_c/Hs=2.4$, $y_c/Hs=0.4$, Case2 で $x_c/Hs=1.94$, $y_c/Hs=0.45$ であることから、開水路常流における逆流渦が循環流域のほぼ中心⁸⁾であるのに較べて、射流では下流の壁面寄りに位置する。逆流量は、Case1の方がCase2に較べて大きい。なお、Case2では階段エッジ直下流に空間スケールが $Hs/2$ 規模の二次渦の存在が確認できる。Case1の再付着点における主流方向の流速変動の確率密度を示すと、図-5 のようになる。再付着点位置で、順流と逆流の発生率は等しいことが分かる。

射流の階段流れにおいては、エッジ直下流に曲率の大きな水面形の変化や下流ステップにおける剥離流れの再付着が生じ、剥離泡が形成されるなど圧力は静水圧分布から大きくずれることが考えられ、動圧力の流れ場に与える影響の大きいことが予想される。そのため、圧力は、欄津、中川等と同様に、レイノルズ数の十分大きく、横断方向に一樣な二次流れを仮定し、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、次式のようになる⁸⁾。

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

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。図-6に、 $U_0^2/2$ で無次元化した動圧の等値線を示す。負となる動圧は、階段エッジから再付着点より若干上流側の $x/Hs < 3.5$ の間で生じており、その極大位置は階段コーナ部および剥離線に沿っていることが分かる。また、再付着点より下流側では正圧を示し、その極大値は河床面に沿って生じ、 $x/Hs=5.5$ 付近で最大値を示す。剥離循環流は、動圧の水平勾配が駆動力であることが明瞭に読み取られ、また、 $x/Hs=5.5$ 付近より下流では順圧勾配であり、加速流が形成されやすいことが分かる。

再付着点下流における主流速の鉛直分布を図-7に示す。さらに、開水路流れで成立する以下の対数則⁹⁾

$$U/u_* = \frac{1}{\kappa} \ln(z^+) + A_s \quad (3)$$

ここに、 $z^+ = u_* z / \nu$, $\kappa = 0.41$, $A_s = 5.3$ を基に、 $z^+ > 100$ 且つ $z/h < 0.2$ の条件を満たす位置において摩擦速度を算定し、無次元表示したものを図-8に示す。図-7より、 $z/Hs < 1$ の階段ステップより下層では、流下方向に急激な加速が現れるのに対して、 $z/Hs > 1$ では僅かに加速され、前報⁹⁾の水路勾配 1/10 の場合と類似の傾向を示す。底面付近で加速傾向が強く現れたのは、動圧の水平勾配が底面付近で大きいことが主因であることが分かる。また、図-8から主流速は平衡状態の式(3)に

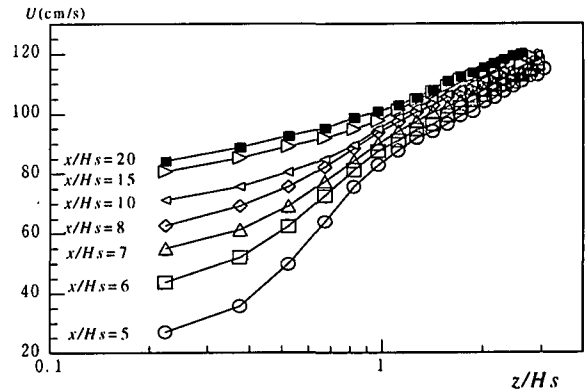


図-7 主流速の鉛直分布(Case1)

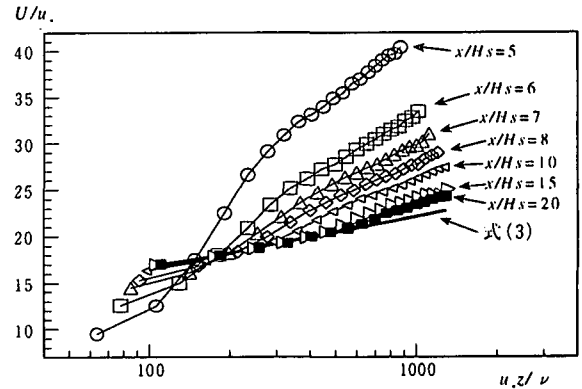


図-8 無次元主流速の鉛直分布(Case1)

漸近し、主流速の回復する様子が見られる。上層では対数則より大きく高速側にずれ、下層では逆に低速側にずれ、内部境界層の発達する様子が捉えられている。

3. 2 乱れ特性

最大流速 U_0 で無次元化した乱れ強度、レイノルズ応力 $-\overline{u'w'}$ の流下方向変化を図-9~11に示す。レイノルズせん断応力、乱れ強度の極大値の位置は、階段エッジから再付着点までの間では主流速の変曲点位置と一致し、自由せん断層と類似の傾向を持つことが分かる。

各流下位置におけるレイノルズ応力、乱れ強度の極大値は図-12および図-13のようになる。レイノルズ応力 $-\overline{u'w'}$ および $\sqrt{w'^2}$ は、 $x/Hs = 0.06$ の位置で最も大きく、流下方向に減少傾向のあることが分かる。鉛直方向の乱れ強さ $\sqrt{w'^2}$ は、再付着点付近で最も大きい。管路の段落ち流れにおいてはレイノルズ応力および乱れの強さは、再付着点付近で極大値を示し、流下方向に急減することが指摘されている。図中の Nezu&Nakagawa¹⁰⁾の実験結果によれば開水路常流では、レイノルズ応力は剥離点下流で増大し、 $x/Hs > 1$ では流下方向に減少傾向にある。また、乱れの強さは、 $x/Hs=2$ 付近までは増大し、それより下流では大きな変化は無い。同じく開水路常流である Etheridge&Kemp¹⁵⁾の実験結果についてみると、最付着点で極大値をとり、それ以降は流下方向に減少している。

管路および開水路常流の段落ち流れに較べて、射流の階段流れにおいては、レイノルズ応力および乱れ強度

$\sqrt{u'^2}$ が再付着点で極大値を取らず、それより上流位置から減衰が始まり、その低下傾向は強い。そのため、以下のレイノルズ応力方程式

$$\frac{\partial}{\partial t}(\overline{u'^2}/2) + U \frac{\partial}{\partial x}(\overline{u'^2}/2) + W \frac{\partial}{\partial z}(\overline{u'^2}/2)$$

$$= -\overline{u'^2} \frac{\partial U}{\partial x} - \overline{u'w'} \frac{\partial U}{\partial z} - \frac{\overline{u'} \partial p'}{\rho \partial x} + \nu \overline{u' \Delta u'} - \frac{\partial}{\partial x}(\overline{u' u'^2}/2) - \frac{\partial}{\partial z}(\overline{w' u'^2}/2) \quad (4)$$

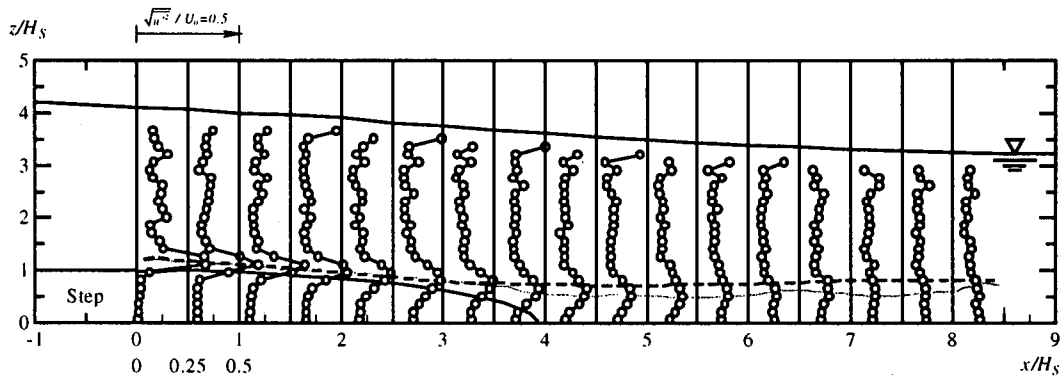


図-9 乱れ強度 $\sqrt{u'^2}$ の流下方向変化(Case1)

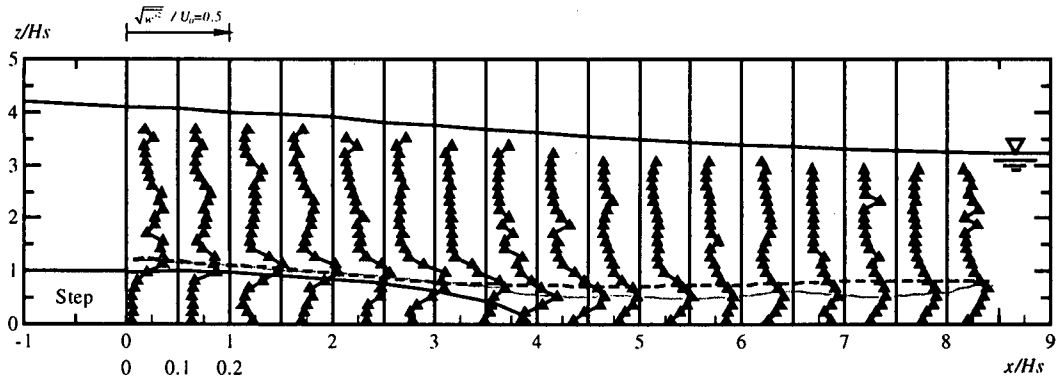


図-10 乱れ強度 $\sqrt{w'^2}$ の流下方向変化(Case1)

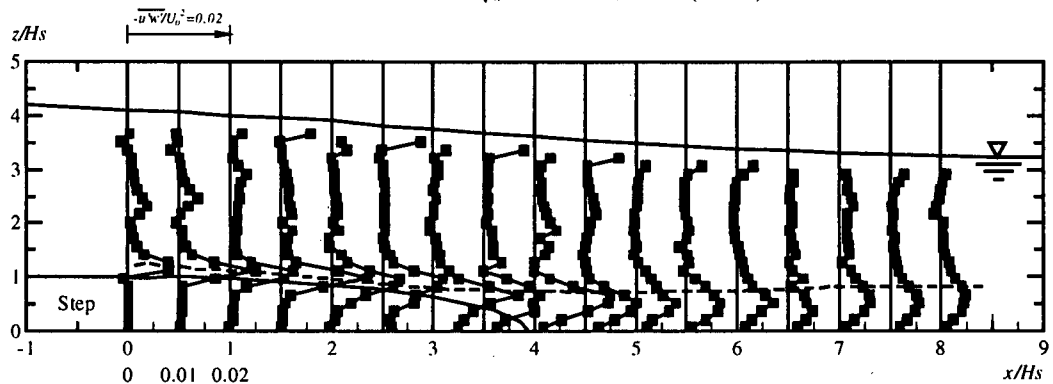


図-11 レイノルズ応力 $-\overline{u'w'}$ の流下方向変化(Case1)

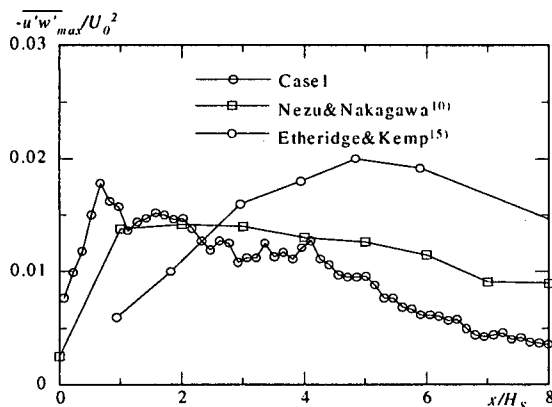


図-12 レイノルズ応力の極大値

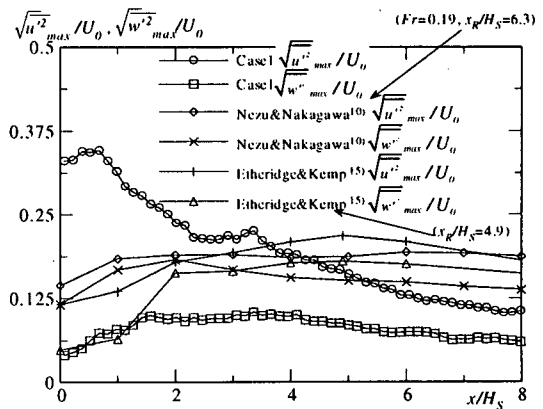


図-13 乱れ強度の極大値

$$\begin{aligned}
& \frac{\partial}{\partial t}(-\overline{u'w'}) + U \frac{\partial(-\overline{u'w'})}{\partial x} + W \frac{\partial(-\overline{u'w'})}{\partial z} \\
&= (\overline{u'^2}) \frac{\partial W}{\partial x} - (\overline{u'w'}) \frac{\partial W}{\partial z} - (\overline{u'w'}) \frac{\partial U}{\partial x} + \overline{w'^2} \frac{\partial U}{\partial z} \\
&\quad - \frac{\rho'}{\rho} \left(\frac{\partial u'}{\partial z} + \frac{\partial w'}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} (\overline{u'^2 w'}) + \frac{\partial}{\partial z} (\overline{u' w'^2}) \\
&\quad + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\rho' w'}{\rho} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\rho' u'}{\rho} \right) - \nu \Delta (-\overline{u'w'}) + 2\nu \frac{\partial u'}{\partial x_k} \frac{\partial w'}{\partial x_k} \quad (5) \\
&\Delta \equiv \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \quad k=1,2,3
\end{aligned}$$

を基に検討する。乱れ強度の生成項である式(4)の右辺第1項、第2項および鉛直流速成分による乱れ強度の移流項左辺第3項をプロットすれば図-14となる。図中の破線は、主流速の鉛直勾配が極大値を取る位置を示す。レイノルズせん断応力による乱れの生成は、主流速の鉛直勾配が極大値の位置で大きく、流下方向に減少傾向にあり、乱れ強度に起因する生成項は、主流速が混合層に沿って加速し、バーストが抑制されたことが考えられる。さらに、混合層の上層から乱れの相対的に小さい下降流が混合層に連行されたために混合層の乱れ強度が流下とともに小さくなることが認められる。

レイノルズせん断応力の生成項の式(5)の右辺第3項、第4項および鉛直流速成分によるレイノルズ応力の移流項左辺第3項を図-15に示す。レイノルズ応力の生成項の右辺第3項および右辺第4項は、それぞれ、乱れ強度の生成項の第1項および第2項の空間分布と類似したパターンを示す。さらに下降流によるレイノルズ応力への移流効果も乱れ強度への影響に類似していることが認められる。階段流れにおいて主流方向の乱れ強度やレイノルズ応力が剥離線に添って流下方向に減衰したのは、加

速に伴う生成項の減少および下降流による移流項の影響であることが認められた。

4. 圧力係数、摩擦係数および再付着距離

レイノルズ運動量方程式を鉛直方向に積分することによって得られた壁面圧力が流下方向に変化する様子を図-16に示す。図中の C_p は壁面圧力係数で、次式と定義する。

$$C_p = 2(p_d / \rho + g \Delta h) / U_0^2 \quad (6)$$

ここで、 Δh は、 $x=0$ における水位からの水位差である。壁面圧力は階段エッジから再付着点までの間では負となる動圧を、その極小値は階段エッジの直下流で $C_p = -0.14$ 、極大値は $x/H_s = 5.5$ で $C_p = 0.07$ となり、 $x/H_s = 5.5$ の上流側では流下方向に漸増し、それより下流側では漸減していることがわかる。

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。図より射流階段流れの壁面圧力への影響は、下降流による運動量輸送項(UW)と静水圧の項(S)が最も強いことが分かる。再付着点より下流では下降流に伴う運動量輸送項(UW)による圧力の増加は、水深の低下による静水圧(S)の減少によって相殺されること、下降流による動圧(W^2)が $x/H_s < 6$ の領域で C_p を 0.02 程度大きくしていることが認められ、乱れの項(w^2)は無視できることが分かる。

図中には、開水路常流および管路の段落ち流れにおける Nezu & Nakagawa¹⁰⁾、Jovic & Driver¹⁶⁾ の実測値や Le, Moin & Kim⁷⁾ による DNS の計算結果も示している。

開水路常流や管路の段落ち流れでは、壁面圧力がゼロとなるのは再付着点より上流側の位置にあり、流下方向

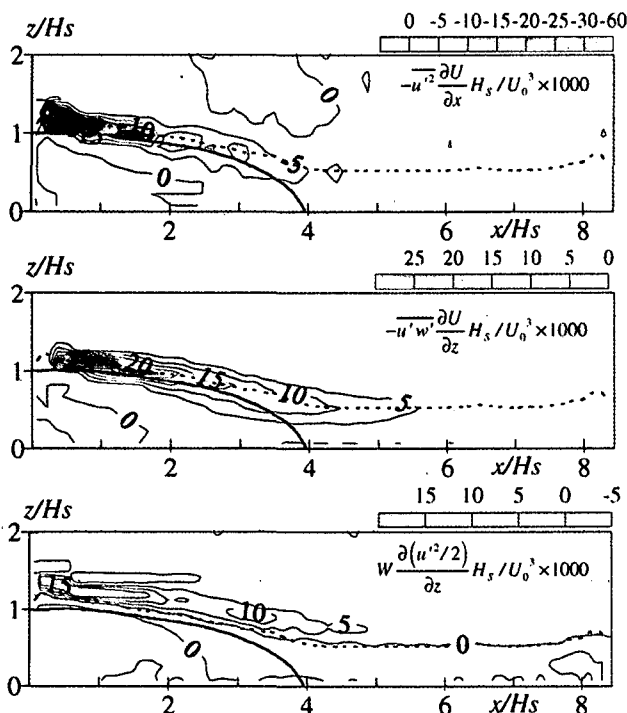


図-14 $-u'^2/2$ の収支関係

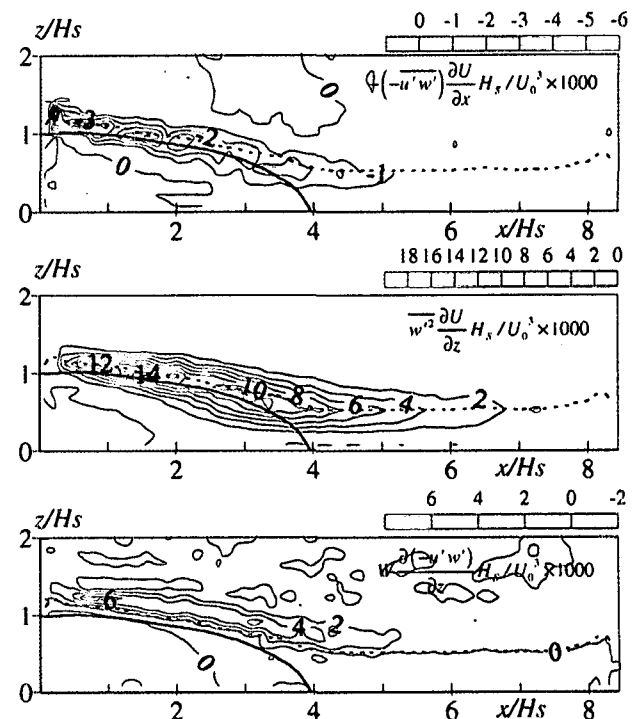


図-15 $-u'w'$ の収支関係

に漸増する傾向がある。一方、射流階段流れの壁面圧力係数は、開水路常流や管路の段落ち流れに較べて、階段直下流で小さく、再付着点下流で顕著に上昇せず、 $x/H_s > 6$ では減少傾向にある。射流階段流れの階段直下流の正圧が小さく現れたのは、この位置のせん断層外層で強い加速が生じたためであり、再付着点下流で壁面圧力が小さいのは、静水圧が順圧勾配であることが主因と考えられる。

再付着点下流における壁面摩擦係数 C_f の流下方向変化を図-17 に示す。摩擦係数は、

$$C_f = 2(u_* / U_0)^2 \tag{7}$$

で定義されている。図中には、開水路常流および管路の段落ち流れの壁面摩擦係数も併示した。摩擦係数は、再付着点の直下流で急激に増大し、その後、緩やかに増大しており、管路および開水路常流の場合と同程度の大きさで、流下方向の変化もほぼ一致していることが分かる。

管路段落ち流れの再付着点距離に影響するものとして、レイノルズ数、剥離点における境界層厚、混合層への乱れの連行量および段落ち前後の流路拡大比が挙げられる。さらに、開水路流れの場合には、常流に較べて射流で再付着点距離が短くなることが指摘されている¹⁰⁾。

図-18 は、再付着点距離と流路拡大率との関係を示したものである。Kuehn¹⁷⁾や柳津等⁹⁾によって指摘されるように再付着点距離は流路拡大率と正の相関があり、再付

着点距離は逆圧力勾配では増大し、順圧勾配では減少する傾向のあることが分かる。

図-19 は、再付着点距離を規定するものと考えられる混合層厚さ $2b$ 、運動量厚さを示す。混合層厚さおよび運動量厚さは、次式によって与えられている。

$$2b = (U_{max} - U_{min}) / (\partial U / \partial z)_{max} \tag{8}$$

$$\delta_M = \int_{z_{min}}^{z_{max}} (U / U_{max})(1 - U / U_{max}) dz \tag{9}$$

ここに、 z_{min} 、 z_{max} は、それぞれ、流下距離 x における極大流速 U_{max} および極小流速 U_{min} の生じた z 座標である。混合層厚さ $2b$ は、運動量厚さ δ_M の約2倍の大きさを示し、両者は、剥離点近傍から再付着点までの間では自由せん断層と同様に流下距離に比例して増大することが認められる。 $2b$ および δ_M に対して直線近似すれば、

$$2b / H_s = 0.32 + 0.16(x / H_s) \tag{10}$$

$$\delta_M / H_s = 0.18 + 0.036(x / H_s) \tag{11}$$

となる。自由混合層や自由噴流におけるせん断層の厚さ δ は、

$$\delta = C(x - x_0) \tag{12}$$

と近似でき、比例係数 C は、自由混合層¹⁸⁾で0.17~0.22、自由噴流¹⁹⁾で0.2~0.3の範囲にあり、階段流れのせん断層厚はこれらに較べて若干小さい傾向を示すことが分かる。

主流速の鉛直勾配が極大値を示す位置 z_{max} および主流速が $(U_{max} + U_{min}) / 2$ となる位置 $z_{0.5}$ の流下方向変化を

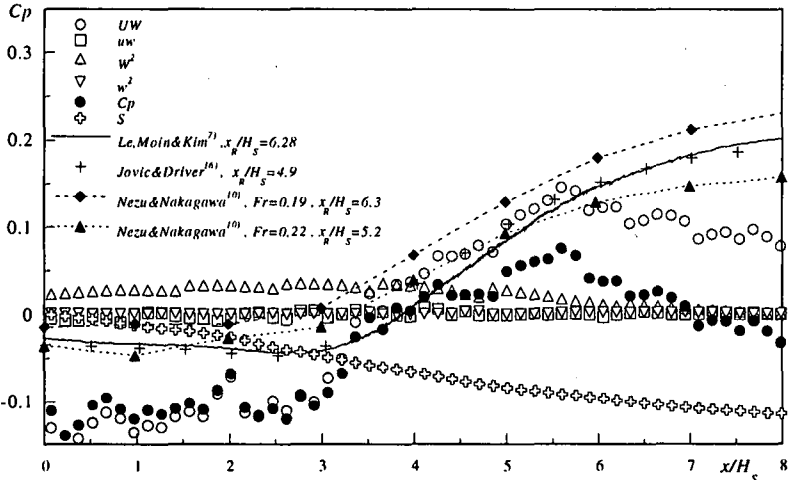


図-16 壁面圧力係数 C_p の流下方向変化

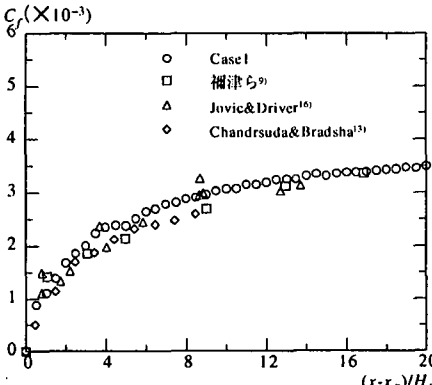


図-17 壁面摩擦係数 C_f の流下方向変化

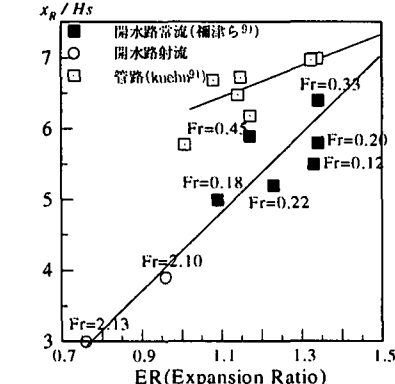


図-18 再付着点距離と流積拡大比

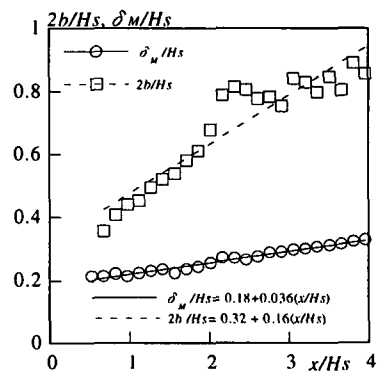


図-19 混合層厚さと運動量厚さ(Case1)

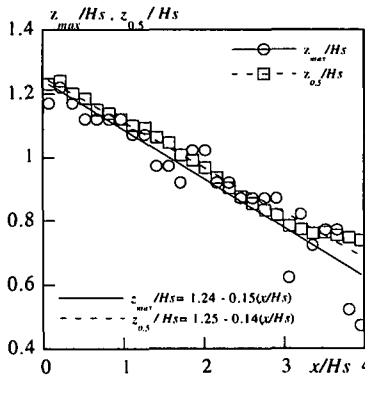


図-20 横渦中心位置の流下方向変化(case1)

図-20に示す。 z_{max} および $z_{0.5}$ は、流下方向に直線的に減少していることが認められる。混合層における横渦の中心位置を主流速の鉛直勾配が極大値を示す位置 z_{max} に一致すると仮定すれば、剥離点から発生した横渦は、 z_{max} の軌道に沿って流下方向に下降し、混合層厚 $2b$ で流下方向に空間スケールを拡大することが予想される。また、混合層の流下方向の増加率は自由混合層のそれに較べて小さく、また、 z_{max} および $z_{0.5}$ は、自由混合層に較べて急激に低速側にシフトしていることが認められた。このことから、射流階段流れにおいて再付着点距離が小さくなる主因として横渦の中心位置が流下とともに急激に下降したことが挙げられる。

5. おわりに

本研究では、急勾配階段状開水路流れにおける剥離せん断層の乱流構造を管路および開水路常流の段落ち流れとの比較の中で検討した。得られた結果を要約すれば、以下の通りである。

- 1) 主流速は、剥離せん断層およびその外層の主流域において流下方向に増加傾向を有し、再付着点下流域では、内部境界層の発達に伴い底面付近で強い加速傾向が認められた。
- 2) 射流階段流れでは下降流速は混合層および自由水面で、その極大値は U_0 の約15%となり常流段落ち流れに較べて大きな値を示す。この強い下降流に伴って生じた運動量の輸送は、混合層および再付着点下流における底面近傍の主流速の加速傾向を強める。
- 3) 運動方程式を積分して得られた動圧力の空間分布から、負となる動圧は階段エッジコーナ部および剥離線に沿って大きな値を示す。また再付着点下流の $x/Hs > 5.5$ において順圧勾配となる。
- 4) 管路および開水路常流の段落ち流れに較べて、射流の階段流れにおいてはレイノルズ応力および乱れ強度 $\sqrt{\tau}$ が再付着点で極大値を取らず、それより上流の位置 $x/Hs = 0.6$ から減衰が始まり、その低下傾向は強い。この原因として、加速に伴う乱れの生成項の減少および下降流に伴う移流項の影響であることが示された。
- 5) 射流階段流れの壁面圧力係数は、開水路常流や管路の段落ち流れに較べて、再付着点下流で顕著に上昇せず、 $x/Hs > 6$ では減少傾向にある。射流階段流れの剥離泡内の底面圧が小さく現れたのは、下降流による運動量輸送項の影響であり、再付着点下流で壁面圧力が小さくなるのは、静水圧の減少であることが示された。
- 6) 混合層厚さおよび横渦の中心位置の同定から、射流階段流れにおいて再付着点距離が小さくなる主因として横渦の中心位置が流下とともに急激に下降したことが挙げられる。

参考文献

- 1) Chanson, H.: Hydraulic Design of Stepped Cascades, channels, Weirs 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, pp.25-34, 1996.9.
- 3) 石川 誠, 赤司信義, 斎藤 隆: 急勾配階段流れの水深評価について, 土木学会第43回年次学術講演会, 第II部門, pp.428-429, 1988.
- 4) 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, 水工学論文集第43巻, pp.305-310, 1999.
- 5) 成合功光, 大本照憲, 矢北孝一: 急勾配階段状流れの乱流構造, 水工学論文集第45巻, pp.517-522, 2001.
- 6) 木谷 勝, 剥離・再付着流れの乱流構造, 日本機械学会論文集(B編), 55巻, 511号, pp.559-564, 1989.
- 7) LE, H., Moin, P. & Kim, J.: Direct numerical simulation of turbulent flow over a backward-facing step, J. Fluid Mechanics, Vol.330, pp.349-374, 1997.
- 8) 櫛津家久, 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.
- 9) 櫛津家久, 中川博次, 天野邦彦, 藤本和久: 開水路段落ち流れの流速回復過程と再付着点からの組織渦の放出特性, 水理講演会論文集, 第31巻, pp.413-418, 1987.
- 10) Nezu, I. & Nakagawa, H.: Turbulent Structure of Backward-facing Step Flow and Coherent vortex Shedding from Reattachment in Open-Channel Flows, Turbulent Shear Flows 6, Springer-Verlag, 1989.
- 11) 川西 澄・余越正一郎: 段落ち流れの組織構造, 水工学論文集, 第33巻, pp.463-468, 1989.
- 12) Hans-Erwin Minor & Willi Hager: Hydraulic of Stepped Spillways, Balkema, 2000.
- 13) Chandrsuda, C. & Bradshaw, P.: Turbulence Structure of a reattaching mixing layer, J. Fluid Mech. 110, pp.171-194, 1981.
- 14) Eaton, J. K. & Johnston, P. J.: A Review of Research on Subsonic Turbulent Flow Reattachment, AIAA J. Vol.19, No.9, pp.1093-1100, 1981.
- 15) Etheridge, D. W. & Kemp, P. H.: Measurements of Turbulent Flow Downstream of a Rearward-Facing Step, J. Fluid Mechanics, Vol.86, Pt.3, pp.545-566, 1978.
- 16) Jovic, S. & Driver, D. M.: Backward-facing step measurement at low Reynolds number $Re_\tau = 5000$, NASA Tech. Mem. 108807, 1994.
- 17) Kuehn, D. M.: Effects of Adverse Pressure Gradient on the Incompressible Reattaching Flow over Rearward-Facing Step, AIAA J. Vol.18, No.3, pp.343-344, 1980.
- 18) Champagne, F. H., Pao, Y. H. & Wygnanski, I. J.: On the two-mixing region, J. Fluid Mechanics, Vol.74, pp.209-250, 1976.
- 19) Abramovich, G. N.: The Turbulent Theory of Jets, MIT Press, Cambridge, MA, 1963.

(2001年4月20日受付)