

トレンチを有する開水路段落ち流れの特性

Characteristics of Open-Channel Backstep Flow with a Trench

藤田 一 郎 *・丸 山 達 弥 **

Ichiro FUJITA and Tatsuya MARUYAMA

*正会員 学博 神戸大学助教授 都市安全研究センター (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1)

**学生会員 神戸大学大学院自然科学研究科前期課程 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1)

Characteristics of open-channel backstep flows with a trench are experimentally investigated. The experiments were conducted by controlling a tailwater depth so that a hydraulic jump was generated downstream of the trench. In the one-dimensional investigation relative energy head losses and locations of the hydraulic jump were measured for various aspect ratios of the trench. Two-dimensional velocity measurements were also performed at the trench section by using a high-resolution video camera with 1304x1024 pixels. Mean and turbulent velocity distributions and the Reynolds stress distributions at a longitudinal cross-section were measured by applying a particle tracking velocimetry (PTV) technique. It was made clear that energy loss due to backstep is closely related to the aspect ratio of the trench and the size of recirculating region. In addition, it was observed that quite a periodic oscillation of a hydraulic jump was produced for a specific aspect ratio of the trench and its frequency characteristics were examined in detail.

Keywords : backstep flow, image analysis, particle tracking velocimetry, open-channel turbulence, energy dissipation, hydraulic jump, trench flow

1. 緒言

急傾斜地を背後に抱える中小の都市河川においては、河床勾配が比較的急なため落差工（段落ち部）を設置して平均的なエネルギー勾配を緩和させることがよく行われる。これは急勾配のままでは流れが射流となり、非常に不安定な流況が出現してしまうためである。都市河川においてはいわゆる三面張りの河道区間が多いので、河床洗掘に対する危険性はそれほど感じられないが、河床面には瞬間的に過大な流体力が作用する可能性があるため、落差工によるエネルギー減殺は河道の安全性を保つ上で重要な処置といえる。

一方、平水時の流量が非常に小さいのも急勾配都市河川の特徴であり、水辺としての河川の役割を果たしていないのも事実である。そこで、落差工の下流側にトレンチを設けることを考えてみる。トレンチによってある程度の水面が常時確保されるため、河川環境の改善あるいは新たな河川環境の創出が期待できる。また、出水時にはトレンチがエネルギー減殺装置として作用するため、防災面でも有効な河川構造物となり得る。トレンチを有する流れに関してはいくつかの研究があるが¹⁻³⁾、いずれも完全に堰上げを行って水面を平

坦にした状態が対象とされており、水面の大変形を有するような落差部のトレンチに関する研究例はあまりないように思われる。すなわち、その水理学的な特徴、例えばトレンチ部のアスペクト比がエネルギー損失に及ぼす影響やトレンチ部における詳細な流れの特性に関しては不明な点が多い。そこで、本研究では画像計測を主体とした実験によって詳細な検討を行うこととした。

2. 実験概要

2.1 実験装置ならびに画像計測システム

実験には長さ 7.5m、幅 0.3m、高さ 0.2m の循環式可変勾配水路を用いた。流量はインバータ制御により自在に設定でき、下流端水位は全幅堰によって調整可能となっている。本水路は全断面ガラス張りであり、鉛直・水平方向からの可視化観測が可能である。特に、水路中央区間では底面および側壁の極近傍までの画像計測ができるように水路の加工が行われている。また、PTV (Particle Tracking Velocimetry) による計測を行うため、流れには平均粒径が約 60 μ m、比重約 1.02 のナイロン破碎粒子を混入させた。混入に際しては予めア

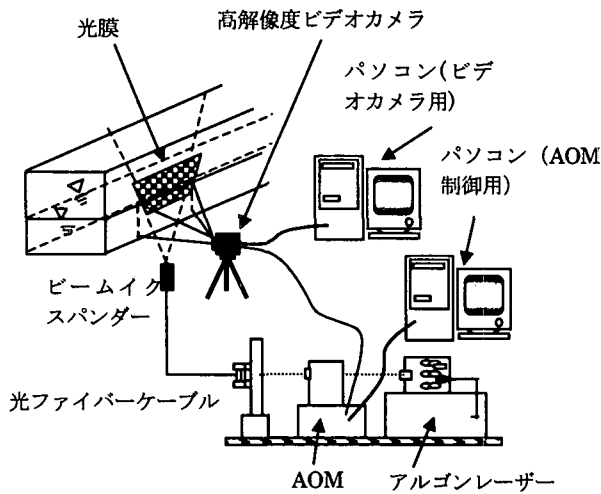


図-1 画像計測システム

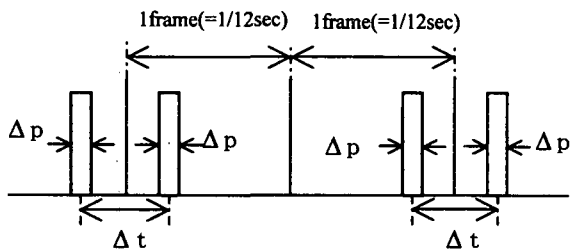


図-2 発光タイミングチャート

ルコールと十分混合させ、均等に水中に分散するようにした。

画像計測システムの概要を図-1 に示す。空冷式アルゴンイオンレーザー（最大出力1W）からの出力光は、まず、AOM(Acoustic Optical Modulator)に導かれ、そこで連続光からパルス光への変換が行われる。AOM の制御は図中に示したパソコンで行い、ビデオカメラのフレームレートに同期した任意のタイミングで発光させた。タイミングチャートの一例を図-2 に示す。 Δp はパルス長、 Δt はパルス時間間隔を示す。ビデオカメラには、1304x1024(pixel)の高解像度モノクロビデオカメラ（HITACHI 製 KP-F100）を用いた。このビデオカメラのフレームレートは12fps (frame per second)なので、画像計測のサンプリング周波数は6Hz となる。AOM からの出力光は光ファイバーケーブルを介してビームイクスパンダーに導かれ、光膜化されたレーザー光（厚さ3mm 程度）は水路床側から上方に向けて照射される。ビデオカメラからの画像出力は図-1 に示したパソコンの主メモリに直接書き込まれ、本システムでは162枚（13.5秒間）の連続画像（8ビットのビットマップファイル）が得られる。実験に際しては水路区間（約2m）とビデオカメラを暗幕で包み込み、外部からの光を遮断して計測を行った。また、パルス時間

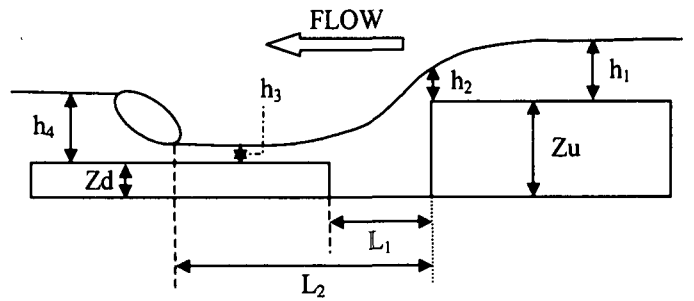


図-3 段落ち部の流況

表-1 水理条件

CASE	勾配 i	流量 $Q(m^3/s)$	Z_d (cm)	Z_u (cm)	Fr_1
B5_DIU2	1/500	5.0×10^{-3}	0.5	2.0	0.91
B5_DIU3	1/500	5.0×10^{-3}	0.5	3.0	0.95
B5_DIU4	1/500	5.0×10^{-3}	0.5	4.0	0.84
B5_DIU5	1/500	5.0×10^{-3}	0.5	5.0	0.97
B5_DhU3	1/500	5.0×10^{-3}	1.0	3.0	0.86
B5_DhU4	1/500	5.0×10^{-3}	1.0	4.0	0.90
A3_DhU2	1/1000	3.0×10^{-3}	1.0	2.0	0.81
C3_DhU2	1/250	3.0×10^{-3}	1.0	2.0	1.28
B10_DhU3	1/500	10.0×10^{-3}	1.0	3.0	1.02

間隔は流速に応じて $\Delta t=1/500$ 秒あるいは $1/1000$ 秒と設定した。パルス長はできるだけ短くするのが好ましいが、本実験のようにAOMを用いて連続光をパルス化した場合、パルス光の強度が非常に微弱なものになってしまうため $\Delta p=1/1000$ 秒とした。そのため、高速域では長円形の粒子軌跡が得られた。ただし、この場合でもトレーサ粒子からの散乱光は微弱であったため、粒子画像の二値化に際しては、後述のような工夫を行った。PTVでは粒子画像の重心の移動距離を計測するので計測精度への影響はあまりないものと思われる。ただ、水面変動の非常に大きなケースでは、PTVによる結果が十分ではなかったため、PIV (Particle Image Velocimetry)⁹⁾を用いた計測を行っている。

2.2 水理条件および計測対象

対象としたトレンチ付き段落ち部における流況の概略を図-3 に示す。本実験においては、下流側の水深 h_4 を制御し、トレンチの下流側で跳水が生じるようにした。各水深はデジタル式ポイントゲージで測定した。トレンチ部は厚さが0.5cmおよび1.0cmの透明塩ビ板を水路底面に敷き重ね、下流側の高さ Z_d および上流側の高さ Z_u を数通りに変化させて生成した。水理条件を表-1 に示す。ここで、 Fr_1 は h_1 の測定地点におけるフルード数である。勾配と流量はそれぞれ3通りとし、レイノルズ数の範囲は $1.0 \times 10^5 \sim 3.3 \times 10^5$ であった。

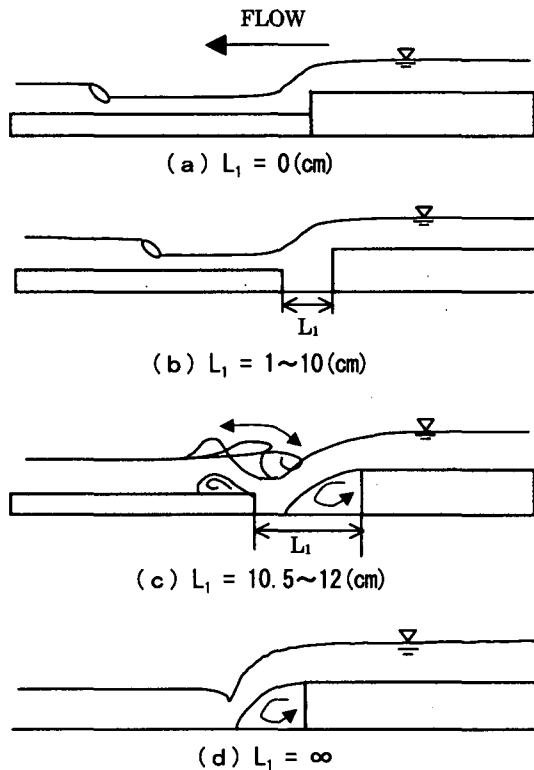


図-4 流況概略図 (B5_DhU3)

なお、本実験における最大落差は5cmであった (Run B5_DIU5)。

トレンチ部のアスペクト比は、各実験ケースにおいてトレンチ長さ L_1 をゼロの状態から徐々に長くしていき、様々な状態を実現させた。したがって、 L_1 を非常に大きくした場合は、 Z_d の分だけ落差が増した単一の段落ち流れが生じることになる。また、 L_1 の増大に伴う跳水位置の変化も観測されたため、トレンチ上流端からの距離 L_2 も計測した。さらに、ある条件下で発生した振動跳水に関しては平均的な振動周期をストップウォッチで測った。

B5_DhU3 のケースについては L_1 を7通りに変化させ、流れが定常であった $L_1 = 0, 1, 3, 5, 7, 9$ cm の6ケースに対してはPTVによる画像計測、振動跳水が発生した $L_1 = 11$ cm のケースに対してはPIVによる画像計測を行った。図-4にこのケースの流況概略図を示すが、他のケースでもほぼ同様の流況パターンが現れることを確認している。

3. 一次元的な流れの考察

3.1 トレンチ長の増大に伴うエネルギー損失

図-4の概略図からも明らかなように、トレンチ長さ L_1 を徐々に増大させると、跳水位置が上流側に移行すること、すなわち L_2 が短くなることがわかる。この現

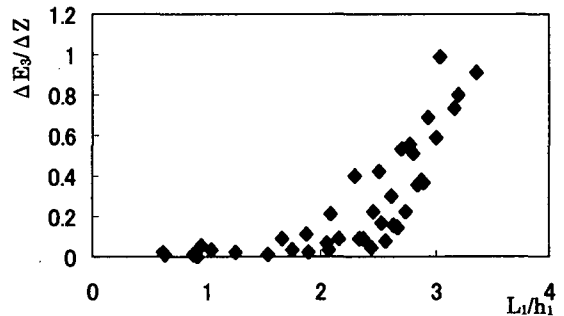


図-5 L_1/h_1 と $\Delta E_3/\Delta Z$ の関係

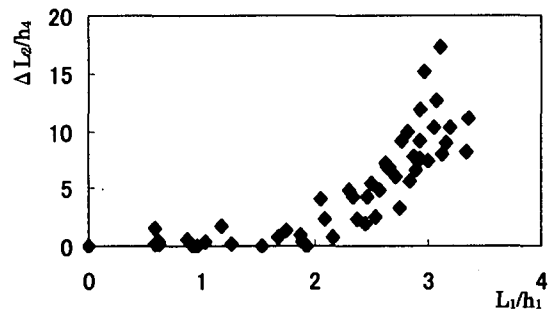


図-6 L_1/h_1 と $\Delta L_2/h_4$ の関係

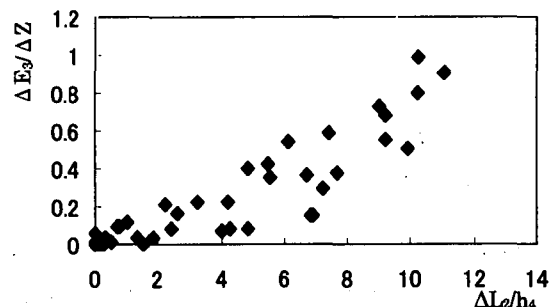


図-7 $\Delta L_2/h_4$ と $\Delta E_3/\Delta Z$ の関係

象は以下のように解釈できる。すなわち、まず、トレンチ長さ L_1 が長くなると、トレンチ部におけるエネルギー損失はそれに伴って増大する。これは、後述の二次元計測結果からも明かなように、トレンチ長の増大によってトレンチ内部の流れ方向の空間が広がると、内部流況が死水域的なものから循環流的なものへと変化するためである。このエネルギー損失により跳水前面の水深 h_3 はわずかながら増大する。一方、跳水はいわゆる共役の関係が成立する場所で安定する。共役の関係によれば、跳水の上流側の射流水深が増せばそれに対応する跳水の下流側の共役水深 h_4 は減少する。本実験では下流端を若干堰上げているため、水面形は堰上げ背水の状態となっている。したがって、跳水はこのわずかな水深の変化に敏感に反応し、水深が漸減している上流側へ移行する結果となる。

以上のようなトレンチ長の増大に伴うエネルギー

損失の状況を定量的に把握するために、トレンチ部の無い $L_1=0$ (単純な段落ち) に対する L_2 の値を $L_{\max}$, h_3 に対するエネルギーを E_0 として, $L_1=0$ の状態に対する相対的な各々の変化量 ΔL_2 , ΔE_3 を調べた。ここに ΔL_2 , ΔE_3 は, $L_1=X$ のときの L_2 を L_X , エネルギーを E_X とすると, 次式のように表せる。

$$\Delta L_2 = L_{\max} - L_X \quad (1)$$

$$\Delta E_3 = E_0 - E_X \quad (2)$$

トレンチ長とエネルギー損失の関係を図-5 に示す。 ΔZ は相対的な段落ち高さ(=Zu-Zd)である。これより, トレンチ長の増大に伴って相対的なエネルギー損失(ΔE_3)はあるところから急激に増大するがわかる。これは, トレンチ内部における流れのエネルギー散逸構造を反映したものと思われる。詳細な検討は二次元計測結果の考察によって行う。

トレンチ長と跳水の移動距離(ΔL_2)の関係を示したのが図-6 である。図-5 と類似した傾向を示すことがわかる。そこで, ΔL_2 と ΔE_3 の関係を図-7 にプロットしてみた。 ΔL_2 が増すにつれて ΔE_3 が増大していることがわかる。これは, 跳水の相対的な移動距離の計測によって相対的なエネルギー損失の推定が可能であることを示唆している。ただし, 跳水の移動距離は河床勾配や背水の状況によっても容易に変化するため, 図-7 の関係に関してはさらに今後の検討が必要である。

3.2 振動跳水の特性

上述の跳水の移動距離には上流側にトレンチがあるため限界があるが, 高い方の段落ち状態 (例えば, 図-4(d)) に至る遷移過程において特異な現象が観察された。これは, 図-4 に示した B5_DhU3 のケースを例にとると, $L_1=10.5\sim 12\text{cm}$ という極めて限られた範囲のトレンチ長に対してのみ生じた跳水の振動現象のことである。この現象の特徴は振動が非常に規則的な点であり, しかもその周期はトレンチ部のアスペクト比や水理条件によって明らかな変化を見せる。当初, この振動の原因はトレンチ内部の大規模な剥離渦の発生と水面変動との相互干渉によるものと考えていたが, 可視化画像を用いた詳細な検討の結果, 振動の原因は別にあることが推定された。以下, その点に関して考察を行ってみる。

図-4(c) に示しているように, 振動が発生するのはトレンチ内部に再付着点が現れた直後である。このとき再付着後の流れは, トレンチ下流側の段上がり部に乗り上がり, 斜め上向きになった流線の下部には小規模な剥離領域が発生し始める。トレンチ長を微妙に調整すると, B5_DhU3 のケースでは $L_1=10.2\text{cm}$ のときのみ安定した定在波が現れる。これは, いわゆる wave

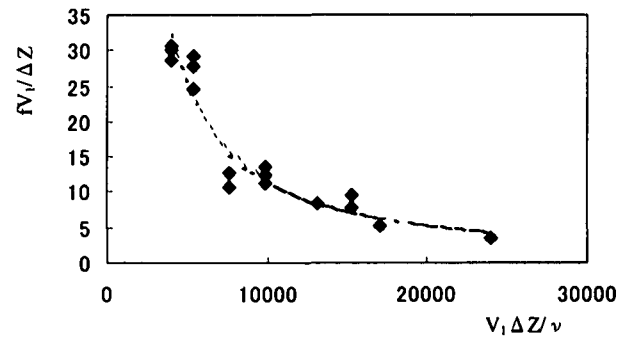


図-8 Re 数とストローハル数の関係

jump あるいは maximum wave と呼ばれているものに相当する^{10,11)}。このときの波高は上流側の水位近くにまで達する。ところが, トレンチ長をこれよりわずかでも (1mm 程度でも) 長くするとこの wave jump は砕波を伴いながらその上流側のトレンチ領域に突入し, wave jump は平坦化されてその下部の剥離領域も消滅する。しかしながら, この状態は安定ではなく, 再びトレンチ下流部での剥離域が発達を開始し wave jump が再生される。図-4(c) に示した範囲においては, この振動は非常に規則的に発生している。発生周期は, 1.8~2.2 秒でトレンチ長を長くすると周期が若干短くなる傾向にある。この振動特性を段落ちの相対高さ ΔZ を長さスケール, トレンチ部への流入流速 V_1 を速度スケールとして用い, 縦軸をストローハル数(Sr), 横軸をレイノルズ数(Re)としてまとめたのが図-8 である。明らかに両者の間には良好な相関関係があるのがわかる。レイノルズ数の増大に伴ってストローハル数は一定値に漸近する傾向が見られる。

4. PTVによる二次元的な流れの計測

4.1 実験方法

これまでの一次元的な検討によって流れ場の概略は把握することができたが, その内部構造には不明な点が多い。そこで, ここでは縦断面内の二次元流に関して PTV および PIV による詳細な検討を行う。対象としたのは, B5_DhU3 のケース (勾配=1/500, 流量= $5.0 \times 10^{-3} \text{m}^3/\text{s}$, トレンチの上流側の高さ $Z_u=3\text{cm}$, 下流側の高さ $Z_d=1\text{cm}$, 上流水深 $h_1=3.4\text{cm}$) である。画像データとしては, 各ケース 1458 枚(162 枚 $\times$ 9 回, 121.5sec)を取得した。パルス光の間隔は, PTV による画像計測では 1/500sec, PIV では流れのせん断変形の影響を小さくするために 1/1000sec とした。高解像度ビデオカメラはトレンチが画像の中心にくるように設置した。1 pixel のサイズは 0.0103cm であった。また, テンプレ

ートサイズは35x35pixelとした。

4.2 二値化画像の生成

PTV では、二値化された粒子画像を利用して流れ場の計測を行うが、前述のように連続光を AOM によってパルス化した場合、散乱光強度は非常に微弱になる。本実験においても得られた画像には、一見、全く何も写っていないような状況であったため、粒子画像を得るためにいくつかの手法を試みた。最初に試した方法は、粒子マスク相関法¹²⁾とエッジ検出を利用した方法^{13,14)}だが、前述のように今回の実験では得られる粒子形状が長円となるため、前者の方法は有効ではなかった。著者らが従来用いていた後者の方法も粒子形状をうまくとらえることができないことがわかったため、本研究では図-9 に示す5x5のSavitzky-Golayのラプラシアンフィルタ¹⁵⁾およびガンマ補正を利用して二値化画像を生成した。その結果、この手法によって非常に良好な粒子画像が得られることがわかった。

4.3 画像計測データの処理方法

4	1	0	1	4
1	-2	-3	-2	1
0	-3	-4	-3	0
1	-2	-3	-2	1
4	1	0	1	4

図-9 Savitzky - Golay のラプラシアンフィルタ

定常流に対して行った PTV の計測では流速ベクトルがランダムな場所で得られるため、鉛直方向に1mm 間隔、流れ方向に3mm 間隔のメッシュを想定し、そのメッシュに入るベクトルをピックアップして統計処理等を行った。振動跳水に適用したPIVのデータからは流速変動のダイアグラムを求めた。

4.4 実験結果

(1) 平均流速

図-10 に定常流に対する平均流速分布を示す。トレノチ長 L_1 の増大に伴う流況が良好に計測されている。

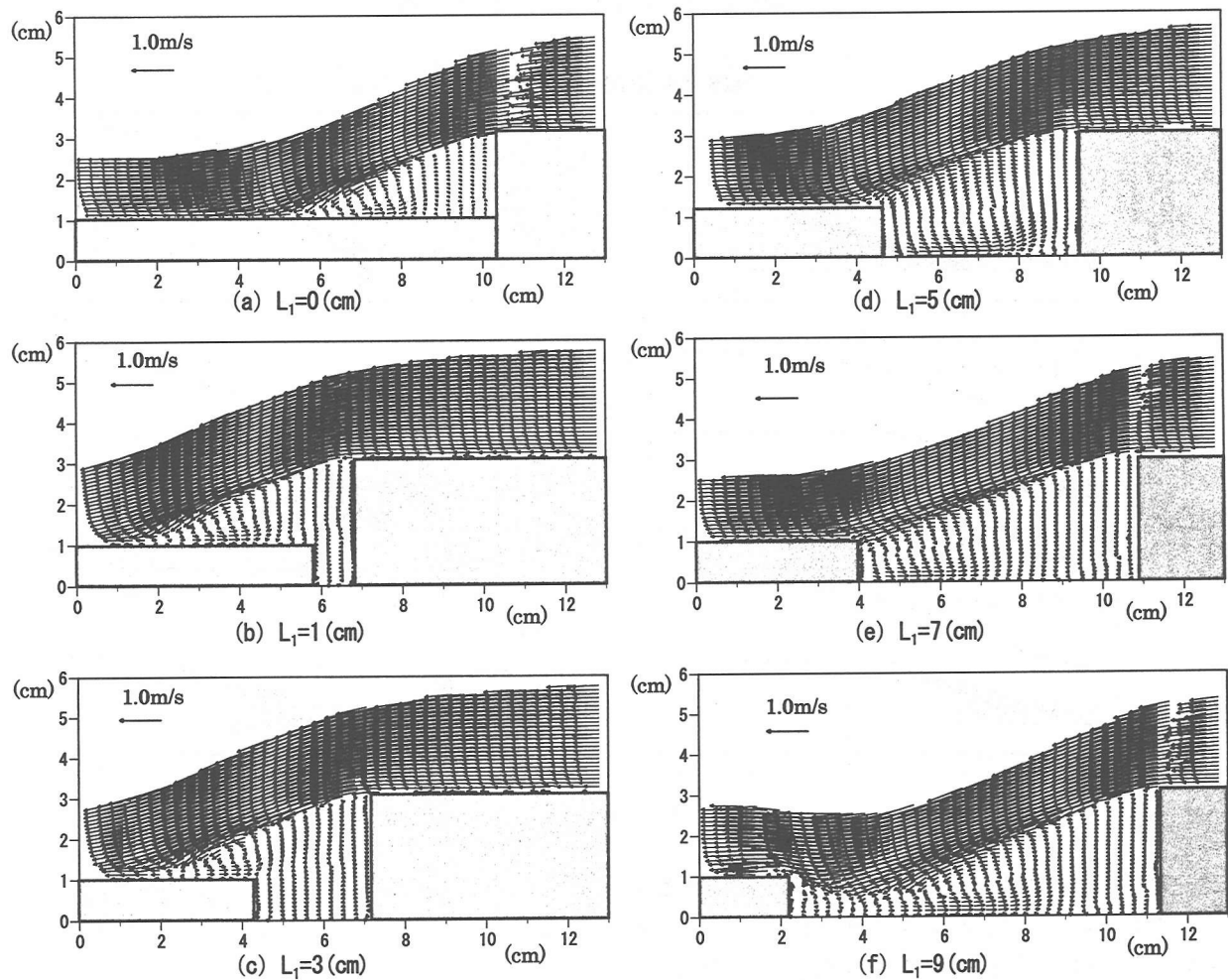


図-10 平均流速ベクトル (B5_DhU3)

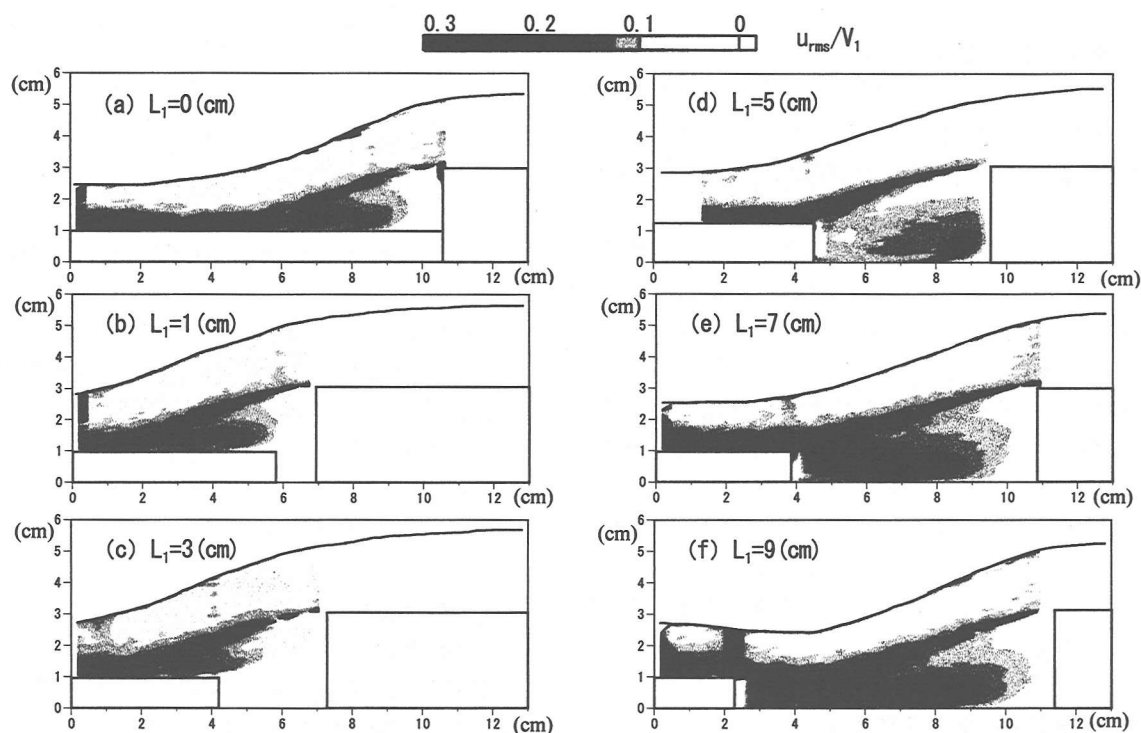


図-11 乱れ強度分布: u_{rms}/V_1 (B5_DhU3)

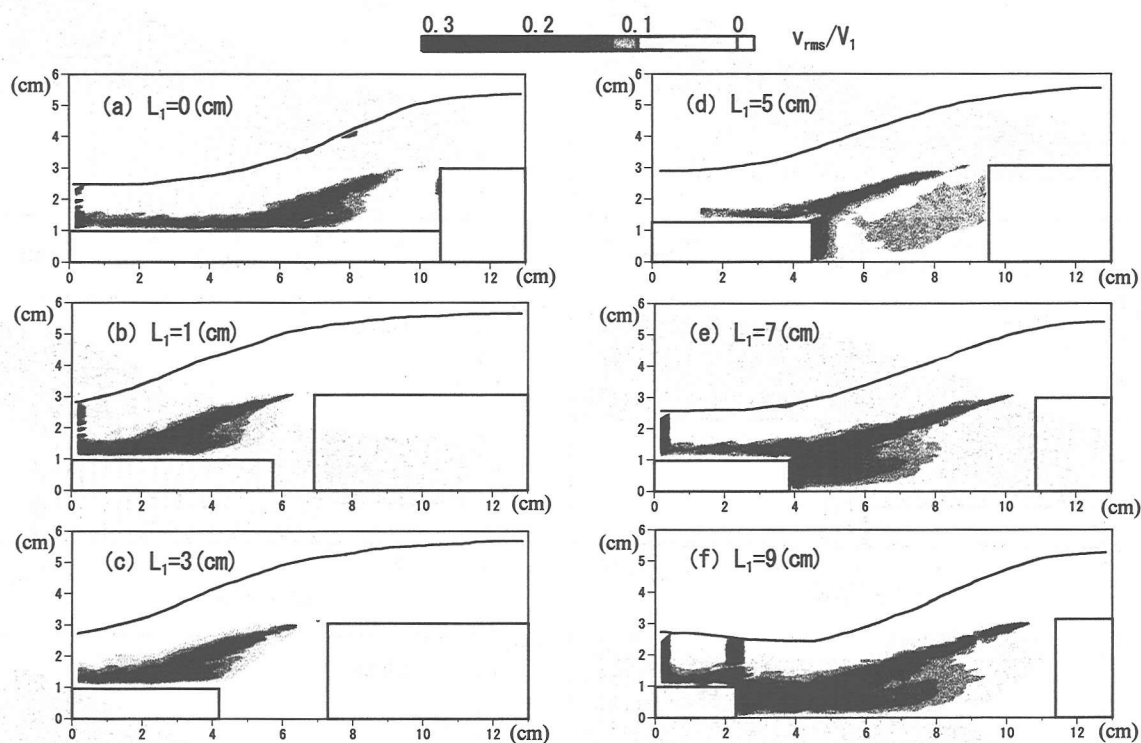


図-12 乱れ強度分布: v_{rms}/V_1 (B5_DhU3)

特に、PTV と高解像度ビデオカメラを組み合わせた本計測システムによって、流速差が 1m/sec にも達する落差部のせん断層の流速分布が鮮明に得られている点は注目に値する。一部、トレンチ上流側で流速データに欠損が見られるのは、レーザ光膜を下方から照射して

いるために鉛直壁面の影ができ、トレーサ粒子からの散乱光を十分にとらえることができなかったためである。

$L_1=0\text{cm}$ の結果からは、流れの再付着点がトレンチ上端から約 5cm の地点にあることがわかる。また、再付

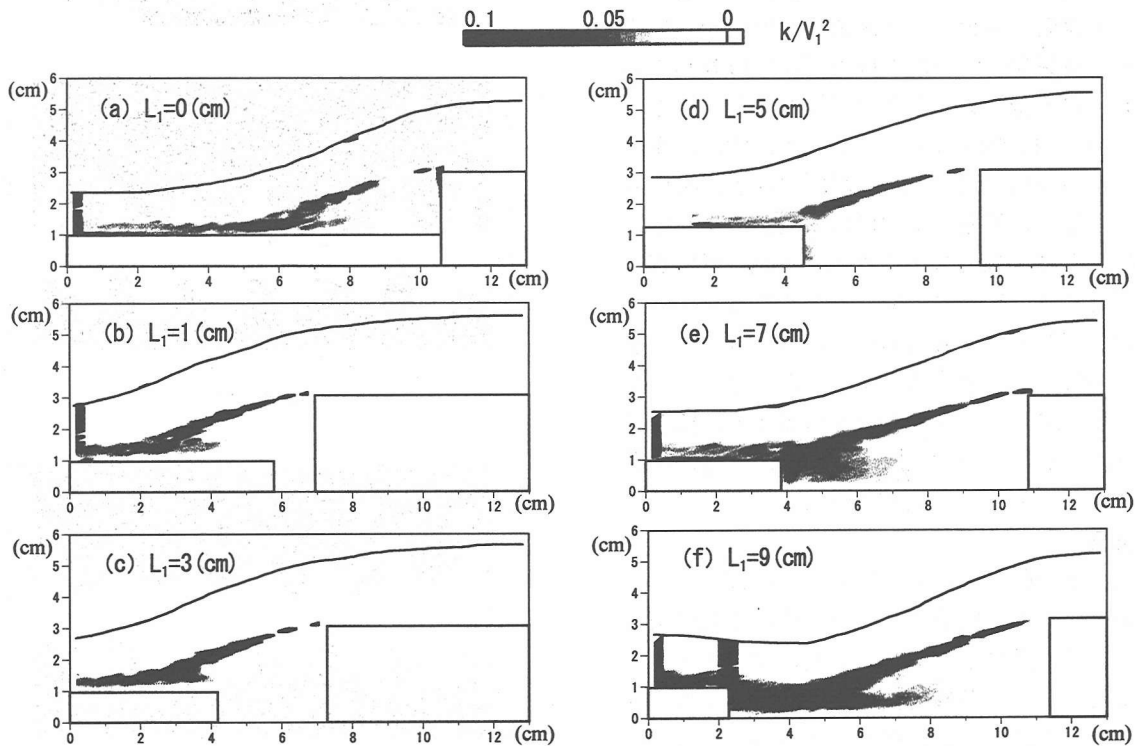


図-13 乱れエネルギー分布 (B5_DhU3)

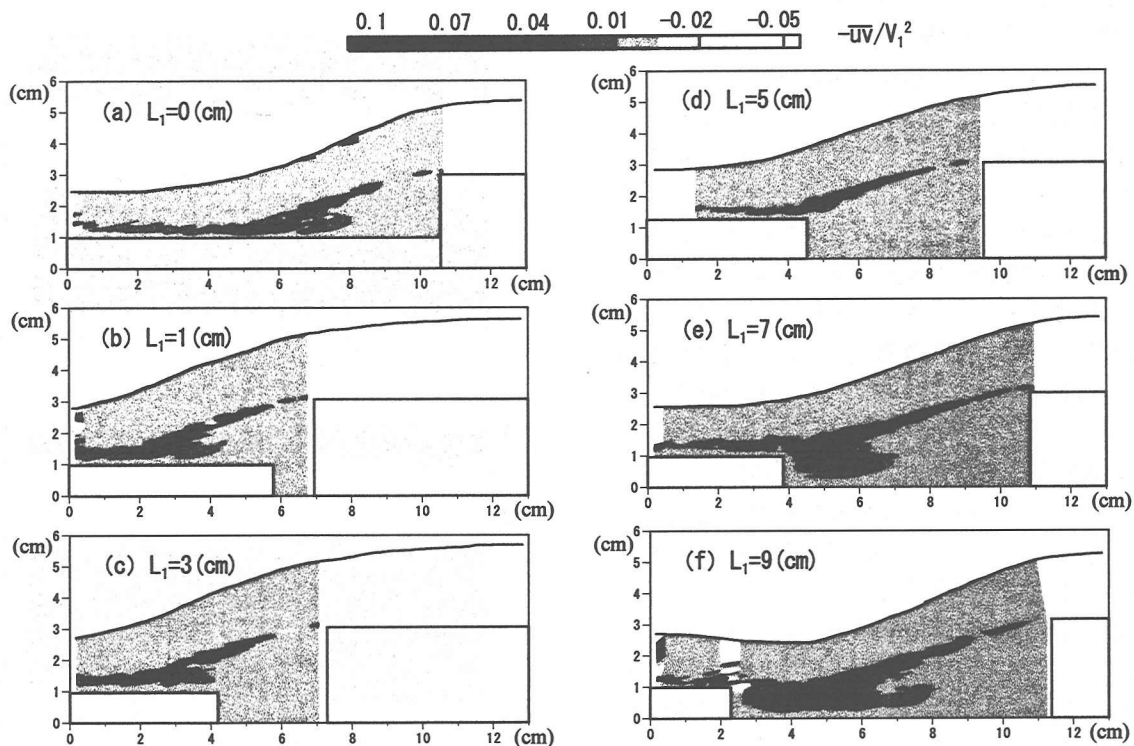


図-14 レイノルズ応力分布 (B5_DhU3)

着点側の領域で強い循環流が生じているが、それよりも上流側では流れはほとんど淀んでいることがわかる。この流況は $L_1=1,3\text{cm}$ のケースでも基本的には変わらず、トレンチによるキャビティ部には目立った循環

流は現れていない。ところが、トレンチ長と再付着点距離がほぼ等しい $L_1=5\text{cm}$ のケースになると、キャビティ内部で非常に強い循環流が生じている。循環流の中心はキャビティの中央に位置している。循環流

による底面付近の逆流流速もかなり大きくなっていることがわかる。 $L_1=7\text{cm}$ のケースでは、主流の下層部分がトレンチ下流側のステップに衝突して循環流が形成されている。循環流の中心は再び下流側に移動しており、水位低下の影響もあってその規模はかなり小さく抑えられている。 $L_1=9\text{cm}$ では、トレンチ区間内に高い方のステップ(3cm)に対応する再付着点が現れ、再付着点付近に $L_1=7\text{cm}$ と同様の小規模な循環流が生じている。再付着点距離は 7cm 程度である。また、再付着後の流れが下流側のステップに乗り上がる部分では、非常に小規模な剥離域が形成し始めている。全ケースを通じて明らかなのは、主流域がほぼ一定の厚みでベルト状に流下しており、トレンチ内部の流体との相互干渉は $L_1=5\text{cm}$ のケースを除けば、再付着点付近の循環流を通じてのみ行われている点である。

(2) 乱れ強度

乱れ強度分布を図-11 および図-12 に比較した。全体的な傾向としては、剥離せん断層に沿って乱れ強度が増大し、乱流拡散によって流下方向にせん断層厚が増していることがわかる。ただし、その層厚は数ミリ程度であり、非常に安定した定常状態が保たれていることを示唆している。再付着点の現れるケースでは、再付着点付近の乱れが局所的に増大しており、特に $L_1=9\text{cm}$ のケースでその傾向が顕著になっている。 $L_1=9\text{cm}$ の場合、局所的な高乱れ領域が底面から少し離れた地点で底面に沿って帯状に生じている点が特徴的である。また、 $L_1=5\text{cm}$ のケースではトレンチ内部での乱れ強度の高領域がトレンチ上流側に現れている点が他のケースと明らかに異なっている。これは、 $L_1=5\text{cm}$ の場合、トレンチ内部の循環流がトレンチ全域に及んでおり、逆流域がトレンチ内の上流端にまで達しているためである。また、ほぼ全領域にわたって水平方向の乱れの方が鉛直成分よりも大きくなっていることも明らかである。

(3) 乱れエネルギーおよびレイノルズ応力

図-13 に乱れエネルギー k の分布を示す。ただし、横断方向の乱れ強度は鉛直方向の値に等しいと仮定した。 $L_1=3\text{cm}$ まではよく似た分布を示しているのに対し、トレンチ長が再付着点距離にほぼ等しい $L_1=5\text{cm}$ のケースでは、キャビティー内部にまでその分布が及んでおり、乱れ強度分布と同様にトレンチ内の上流側にピーク領域が生じている。さらにトレンチ長が増大すると再付着点付近の循環流に起因する移流効果によって、乱れエネルギーが底面に沿って上流側に輸送されている様子がよくわかる。

前述の一次元的な考察においては、 $L_1=7\text{cm}$ の場合が $\Delta E_3/\Delta Z=0.038$ 、 $L_1=9\text{cm}$ の場合が $\Delta E_3/\Delta Z=0.149$ となって

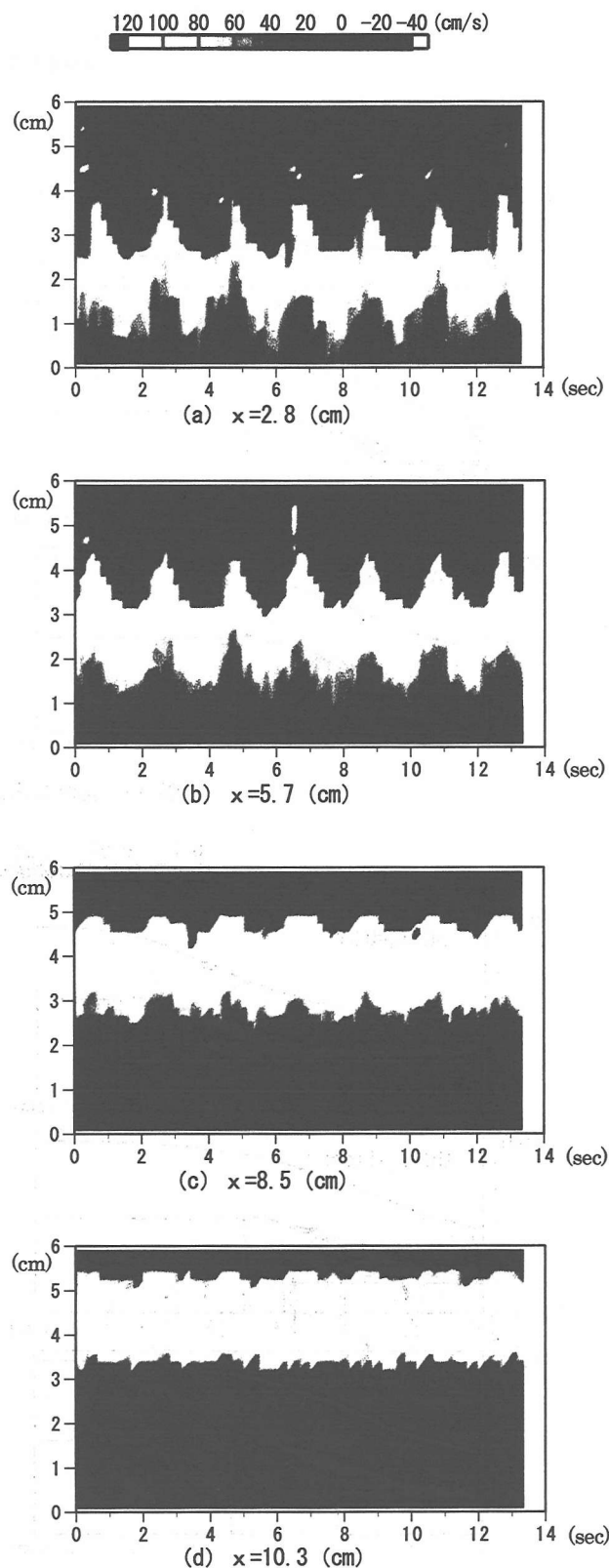


図-15 鉛直測線における流下方向流速の時間変動ダイアグラム (B5_DhU3, $L_1=11\text{cm}$)

おり、この間で4倍程度のエネルギー損失が生じている。これは、 $L_1=9\text{cm}$ における再付着点付近の急激な乱れエネルギーの生成に良好に対応している。なお、このケースで振動跳水が発生している場合のエネルギー損失は $\Delta E_3/\Delta Z = 0.5$ 程度とさらに数倍のオーダーであった。この場合は下流側ステップ上での剥離渦の生成が追加的なエネルギー損失に大きく関与しているものと思われる。

Reynolds 応力分布を図-14に示す。再付着点付近での Reynolds 応力の局所的な増大、あるいは循環流による底面に沿った上流側への輸送など流れ場の特徴が良好に捉えられていることがわかる。

(4) 流速変動特性

図-15にPIVの流速結果から得られた流下方向成分の時間変動に関するダイアグラムを示す。ここでは、4つの鉛直測線上の各瞬間データを横軸に時間、縦軸に底面からの距離をとって並べて示した。 x はトレンチの下流端から上流に向けての距離をさす。図の上部の黒い領域が水面上方の気体領域、それより下側の領域が流体領域に対応している。この場合のトレンチ長は $L_1=11\text{cm}$ である。非常に規則的な流速変動が水面変動に伴って生じており、その振幅は下流側(小さな x)ほど大きくなっていることがわかる。この場合の振動の周期は約2.0秒である。また、図-15(c)から流速分布の拡散幅は水面が下がった場合に広く、上昇したときに若干狭くなっていることがわかる。図-15(a)及び図-15(b)の気体領域に点在しているスポットは、跳水に伴うスプラッシュを捉えたものである。

5. 結言

本研究では、トレンチを有する段落ち流れに関して一次元解析によるマクロ的な検討を行うと同時に画像解析による詳細な流れ場の計測を行った。以下に得られた知見をまとめる。

- 1) トレンチ長の増大に伴うエネルギー損失は、トレンチ区間に再付着点が現れると急激に増大する。
- 2) トレンチ長の増大に伴う下流側跳水の移動はこのエネルギー損失に起因する。
- 3) トレンチ内部の乱れ構造は、キャビティ的な流れになるケース(本実験では $L_1=5\text{cm}$ のケース)と再付着点が現れるケースとは異なった特徴を示す。
- 4) 振動跳水の特性は、相対的な段落ち高さと流入流速に基づくストローハル数とレイノルズ数によって整理できる。

- 5) 一次元解析で得られたエネルギー損失の特性はPTVによる乱れ場の計測結果によって良好に説明できる。

今後は、振動跳水現象のモデル化および水面の大変形を伴う流れ場に対する数値モデルの開発が必要と考える。

謝辞：本研究の一部は、文部省科学研究費基盤研究(C)(2)(代表 藤田一郎、課題番号 10650502)による補助を受けた。記して深謝の意を表します。また、高解像度ビデオカメラの利用に際して便宜を図って頂いたジャパンフォトンクス(株)、実験に積極的に協力して頂いた神戸大学大学院自然科学研究科の横嶋哲、中瀬幸典の両氏に謝意を表します。

参考文献

- 1) 藤田正治, 道上正規, 檜谷治: トレンチ内の流れと浮遊砂濃度分布の数値シミュレーション, 水工学論文集, 第35巻, pp.377-382, 1994.
- 2) 藤田一郎, 神田徹, 門脇正夫, 森田卓光: 開水路凹部流れのPIVおよびLESによる乱流解析, 土木学会論文集, No.539/II-35, pp.79-88, 1996.
- 3) Fujita, I., Kanda, T., Morita, T. and Kadowaki, M., Numerical and image analysis of turbulent flow in open channel trench, HYDRA 2000, Vol.1, Thomas Telford, London, pp.284-289, 1995.
- 4) 宮本仁志, 神田徹, 藤田一郎, 池上迅: PIVによる開水路凹部流れの計測および数値解析, 水工学論文集, 第41巻, pp.1049-1054, 1997.
- 5) Kanda, T., Fujita, I., Miyamoto, H. and Ikegami, J.: Turbulent Behaviors in Open Channel Trench Analyzed by Using PIV and Turbulence Model, Proceedings of the 27th Congress of IAHR, Environmental and Coastal Hydraulics: Protecting the Aquatic Habitat, pp.143-148, 1997.
- 6) 藤田一郎, 神田徹, 河村三郎, 矢野芳広, 森田卓光: 高速ビデオカメラを用いた開水路凹部流れの画像解析とLESによる数値解析, 水工学論文集, 第37巻, pp.481-486, 1993.
- 7) 藤田一郎, 河村三郎, 森田卓光: LESによる三次元トレンチ流れの解析, 可視化情報, Vol.13, Suppl. No.1, pp.51-54, 1993.
- 8) 裾津家久, 門田章宏, 高津昌夫, 井上憲: 開水路キャビティせん断層の乱流構造と組織渦の発生機構, 水工学論文集, 第40巻, pp.761-766, 1996.
- 9) Raffel, M., Willert, C. and Kompenhans, J.: Particle Image Velocimetry, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg

1998.

- 10) Mossa, M.: On the oscillating characteristics of hydraulic jumps, *Journal of Hydraulic Research*, Vol.37, No.4, pp.541-558, 1999.
- 11) Ohtsu, I. and Yasuda, Y.: Transition from supercritical to subcritical flow, *Journal of Hydraulic Research*, Vol.29, No.3, pp.309-328, 1991.
- 12) 江藤剛治, 竹原幸生, 道奥康治, 久野悟志: PTVのための粒子画像抽出法に関する検討ー粒子マスク相関法についてー, *水工学論文集*, 第 40 巻, pp.1051-1058, 1996.
- 13) 藤田一郎: 開水路乱流に対する画像計測精度の比較検討, *水工学論文集*, 第 43 巻, pp. 359-364, 1999.
- 14) 藤田一郎, 遠松篤: 画像解析による開水路乱流場の空間計測, *応用力学論文集*, Vol.2, pp.627-636, 1999.
- 15) 河田聡, 南茂夫: 科学計測のための画像データ処理, C Q 出版, pp.171-172, 1994.

(2000 年 4 月 21 日受付)