

トレンチ付き落差工流れの水理特性

HYDRAULIC CHARACTERISTICS OF OPEN-CHANNEL FLOW DOWNSTREAM OF A FALLING WORKS WITH A TRENCH

藤田一郎¹・丸山達弥²
Ichiro FUJITA and Tatsuya MARUYAMA

¹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)

²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 turbulent flow downstream of a falling works were experimentally investigated by using image analysis methods. Trench section with various aspect ratios was installed just downstream of the falling work in order to understand the local effect of the trench shape to the main flow. In the experiment, two-dimensional flow field in a longitudinal cross-section was measured either by particle tracking velocimetry (PTV) or particle image velocimetry (PIV) depending on flow situations. The measurements were conducted by using a high-resolution video camera with 12 fps (frame per second). It was made clear that open-channel flows downstream of a falling work shows a drastic change in their surface shape as the aspect ratio of trench becomes greater than a specific value. In the experiment, it was discovered that a hydraulic jump created downstream of the trench section shows quite a periodic oscillation for a small range of aspect ratios. It was also shown that the imaging techniques used in the experiments are capable of measuring largely deformed free-surface flow with a reasonable accuracy.

Key Words : *turbulent flow, trench, image analysis, PTV, PIV, falling works, backstep, hydraulic jump, flow oscillation, nature-rich river works*

1. まえがき

都市域における中小河川、特に急傾斜地を背後にかかえる例えば神戸市内におけるような都市河川は、低平地の沖積平野を流れる一級河川とは異なって、いわゆる三面張りの護岸が施されており、基本的には河床洗掘等の問題は発生しない。しかしながら、これらの河川は中小規模であるとはいえ、周辺に住宅地等が密集する場合が多いために、ひとたび洪水流が堤防を越水すれば、洪水氾濫による被害は甚大なものになる。また、このような中小河川では上流域の開発が進んでいるケースが多いため、洪水流量そのものも増加傾向にあるのが特徴である。河床勾配が大きいのも特徴の一つであり、落差工などでエネルギー勾配を緩和しているとはいえ、洪水時にはかなり高速な流れが発生する。ただ、一旦、射流になってしまうと流れの制御が困難になるため、水路設計では射流部が発生しないような配慮が必要となる。他方、このような中小都市河川の平水時の姿は、流量が非常に少なく水面の占める面積がわずかであるため、いわゆる川らしさが失われていることが多い。そこで、このような人工的な河道においても平水時の水辺環境を多少なりとも

回復させるひとつの多自然型工法の試みとして、落差工下流にトレンチ部を取り付けることを考えてみる。すなわち、トレンチ部を備えることによって平水時の水面を確保し、河川環境の改善を試みてはどうかという提案である。ただ、洪水時におけるこのトレンチ部の影響については不明点が多く、場合によっては思わぬ水面の変形を引き起こし、流れに悪影響を与える危険性がある。したがって、新たな河川工法を提案する立場から見ればトレンチ部のアスペクト比が流れに与える影響を調べておくことは非常に重要な課題だと言える。

一方、流体力学的な観点からこの流れ場を考えると、開水路バックステップ流れにキャビティーを取り付けた流れ、あるいは非対称な凹部流れと見なすこともできる。この流れの最大の特徴は水面の大変形、および大規模な剥離渦を伴う開水路乱流場という点である。凹部流れに関する研究はこれまでも行われてきているが¹⁻⁵⁾、このような水面の変形を伴う乱流場を対象にした例はあまりないように思われる。それは、従来のプローブタイプの計測装置では射流を伴うような高速な流れ場の計測が容易ではなかったためと考えられる。そこで、本研究では非接触型の計測手法として代表的な画像計測法を用いて、流れ場の詳細な検討を行い、流れ場の基本的な特徴を明

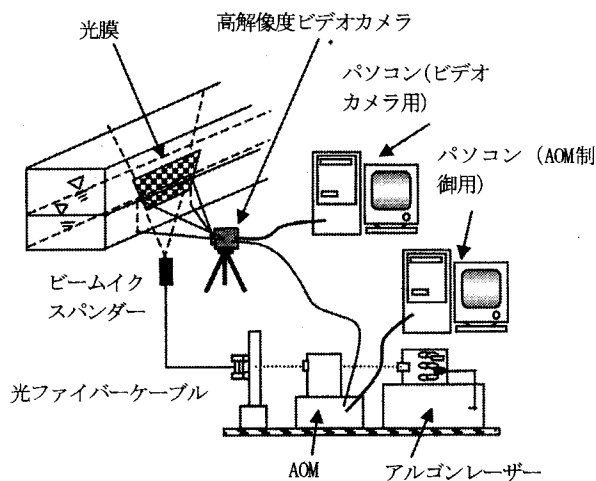


図-1 画像計測システム

表-1 実験条件

流量: Q (m ³ /s)	0.00227
勾配: I	1/500
流入水深: h_1 (cm)	1.95
上流側トレンチ高: Z_u (cm)	2.0
下流側トレンチ高: Z_d (cm)	1.0
流入平均流速: U_1 (cm/s)	38.9
流入フルード数: Fr_1	0.889
Reynolds数: Re	7590
L (cm)	0.0~11.0

らかにすることとした。

2. 実験概要

(1) 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。この水路は、側壁、底面ともガラス張りであり、特に水路中間の計測断面区間では底面および側壁の極近傍まで見通せるように、水路支持アングルに特別な工夫を施した。これによって、後述のレーザー光膜を水路内の任意の横断面に照射することが可能となった。流れの可視化には、平均粒径約60 μ m、比重1.02のナイロン破碎粒子を用いた。

画像計測システムの概要を図-1に示す。光源には空冷式アルゴンイオンレーザー（最大出力1W）を用い、出力ビームをAOM(Acoustic Optical Modulator)でパルス光へ、さらにビームイクスパンダーで光膜化したものを水路床から上向きに照射した。光膜厚は約3mm、水路部での光膜照射幅は約15cmである。可視化画像の記録は12fps(frame per second),1304x1024(pixel)のモノクロビデオカメラ（HITACHI製,KP-F100）で行った。流速計測のサ

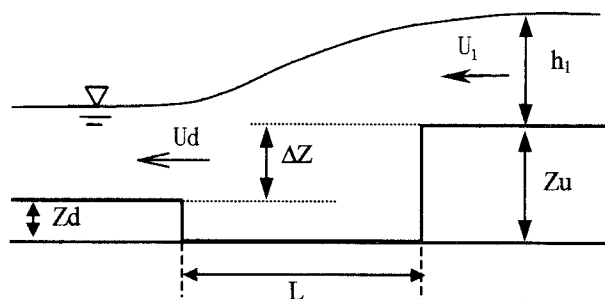


図-2 トレンチ付き落差工

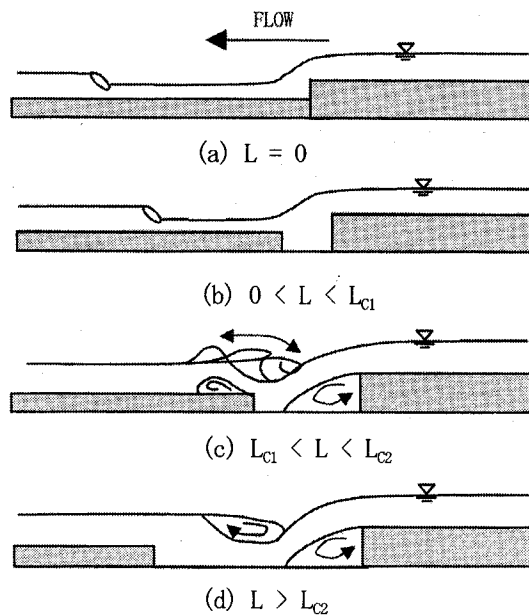


図-3 トレンチ部流況の変化

ンプリング周波数は6Hzであり、各実験ケースで各々972枚（81秒）の画像データセットを得た。1pixelサイズは0.00990cm、パルス間隔は画像上のトレーサの最大移動距離が10pixel程度となるように0.002秒とした。なお、解析に用いた画像データの総量は約19GBであった。

(2) トレンチ部周辺の流況および水理条件

トレンチ付き落差工の諸元を図-2に示す。ここでは、トレンチのアスペクト比を単純に $\gamma = I/\Delta Z$ で定義する。トレンチ下流側の流況は、言うまでもなく下流端の条件やトレンチのアスペクト比によって大きく変化してくる。著者らは、これまでアスペクト比を種々変化させた実験を行い、トレンチ内部の大規模循環流や乱流構造とエネルギー損失の関係について考察するとともに、ある狭いアスペクト比の範囲で非常に規則的な振動跳水が発生することを見出している^{6,7)}。下流水位を一定にし、トレンチ長さ L を徐々に大きくした場合の一般的な流況変化の様子を図-3に示す。図-3(a)(b)からわかるように、 L を増大させるとトレンチ下流側で発生する跳水位置はトレンチ側に近づく。これは、トレンチ内部の乱れの増大

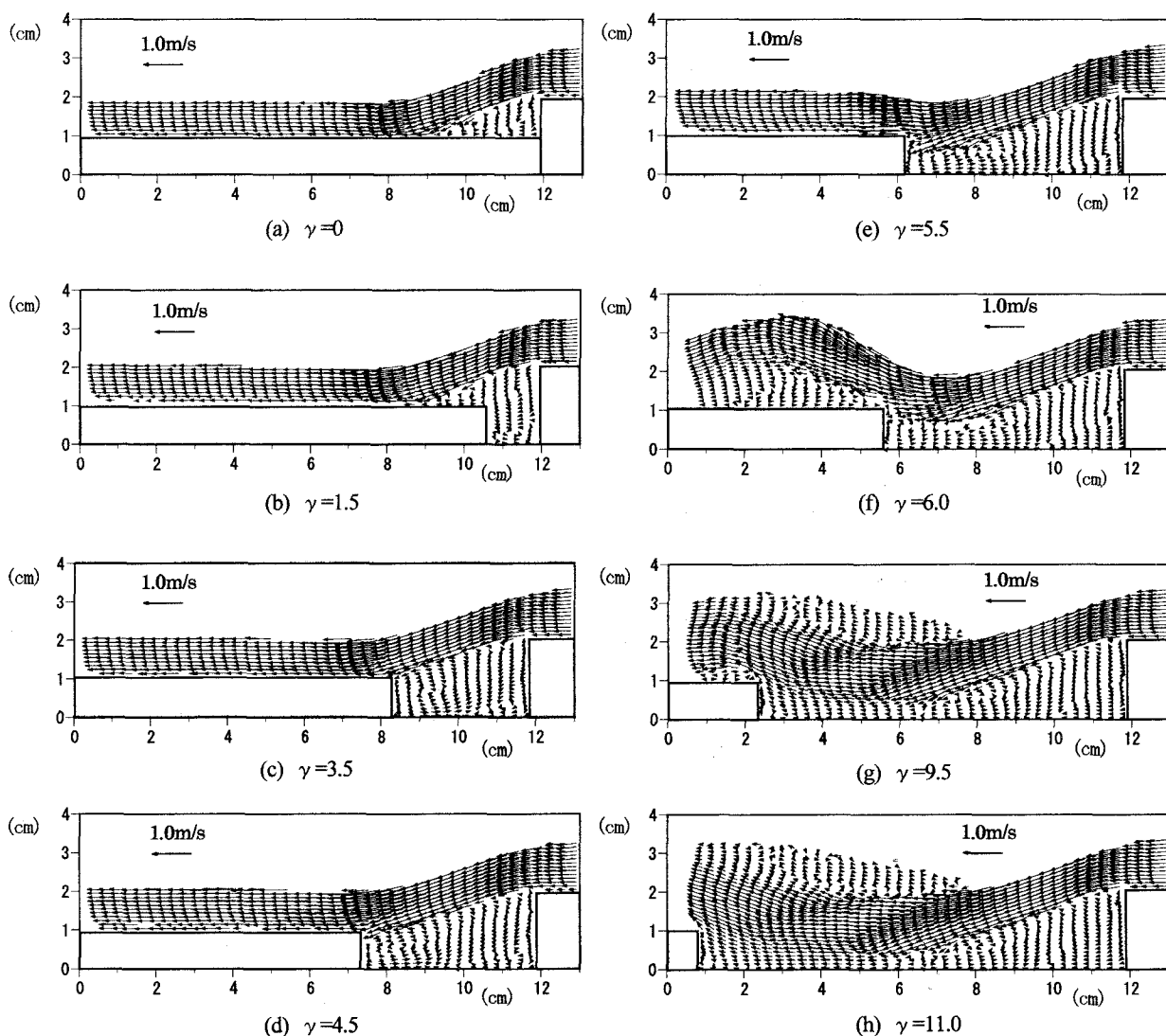


図-4 平均流速ベクトル (非振動のケース)

に伴うエネルギー損失に起因する。そしてLがある値 L_{C1} になると振動跳水が発生し始め (図-3(c))、 $L=L_{C2}$ になるまで続く。 $L>L_{C2}$ の範囲では振動現象は終息し、定常な状態が回復する。この一連の流況の中で流体力学的に特に興味深いのはこの振動現象であり、本研究ではその発生要因を含めた流れの構造を詳細に検討するために、表-1に示す単一の水理条件下でLをゼロから11cmの範囲で種々変化させた実験を行った。

(3) 画像解析方法

可視化された粒子画像の画像解析手法にはPTV (Particle Tracking Velocimetry) と PIV (Particle Image Velocimetry) がある。本研究では、当初、空間解像度の高いと言われるPTVのみによる解析を行っていたが、計測対象の流れのダイナミックレンジがかなり大きい (-10~50cm/s) 瞬間的な解析結果に異常ベクトルが多

数認められた。したがって、ここでは定常状態の解析にはPTV法、非定常状態の解析には異常ベクトル除去の容易な⁸⁾ PIV法を使い分けることとした。ただ、本システムでは連続光を電氣的に遮断する形でパルス光を得ているため、照射光のエネルギーは高々2mJ程度であり、YAGレーザに代表されるパルスレーザの出力に比べると1桁小さいレベルの光エネルギーしか有効に利用できなかった。このため、得られた可視化画像は必ずしも十分なものではなく、PTVにおける画像の二値化には特別な工夫が必要であった⁷⁾。

3. 定常流 (非振動) ケースの解析

本実験条件下では、トレンチ長が $6\text{cm} < L < 9.5\text{cm}$ ($6 < \gamma < 9.5$) の範囲で振動跳水が生じた。ここでは、ま

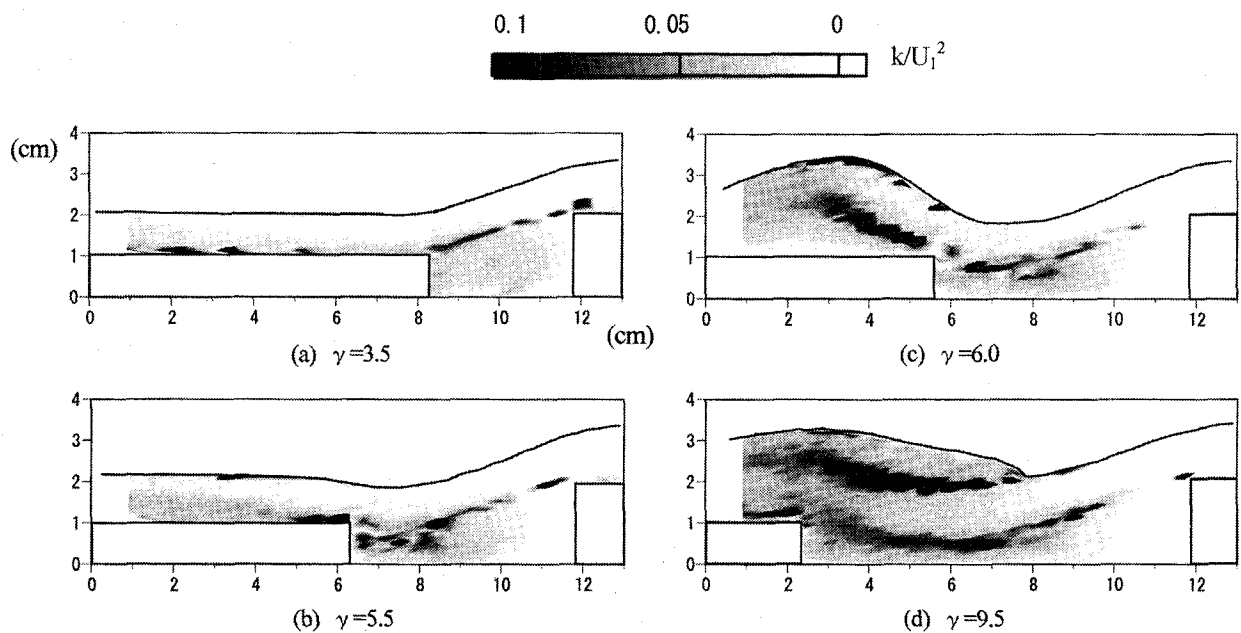


図-5 乱れエネルギー分布 (非振動ケース)

ずこの振動範囲を除く定常流(非振動)のケースについて検討する。

(1) 平均流速分布

図-4に平均流速分布を示す。解析方法は前述の通りPTVであり、縦1mm、横3mmのメッシュ内に入る流速ベクトルをピックアップして平均値や乱流統計量を算出している。異常ベクトルの除去は各メッシュで統計的に行った。図よりトレンチ長の増加に伴う流況が良好に計測されていることがわかる。すなわち、水面の状況は $L=5.5\text{cm}$ まではほとんど変化がなく、滑らかに下流部に接続している。ただし、下流側の水深はトレンチ規模の増大に伴って徐々に増加している。これはトレンチ内部におけるエネルギー損失増加に起因している⁷⁾。

流況が急変するのは、 $L=5.5\text{cm}$ (図-4(e))から $L=6.0\text{cm}$ (図-4(f))にかけてであり、トレンチ長の5mm程度のわずかな増加に対して下流側水面が急激な変化を示している。図-4(g)(h)をみると $Zu=2\text{cm}$ の落差に対する剥離流の再付着点は上流側ステップから5.5cm付近にあり、図-4(e)の場合はトレンチ長がこの距離とほぼ一致しているために再付着点は発生せず、トレンチ下流側で水平方向に引き伸ばされた循環流が存続している。また、主流部は下流側のステップに滑らかに誘導されている。ところが、図-4(f)ではトレンチ長が再付着距離を上回るために下流側ステップによって主流は上向きに跳ね上げられている。そのため、この上昇流に起因して下流側ステップ上で新たな大規模剥離領域が発生している。ただし、この場合の水面はまだ安定し定常状態が保たれている。ちなみに、図-4(f)のケースにおけるトレンチ下流端上の平均流速 Ud は約51cm/sであり、一方、トレンチ下流側の水位のピーク水深(約2.5cm)を用いて重力波と

しての波速を概算すると $c=49.5\text{cm/s}$ となる。これらの数値はほとんど等しいが少なくとも $c<Ud$ となっているため、波速と流速が均衡して定在波の状態が保たれているものと思われる。

後述のように、トレンチ長をこれよりもわずかに増やして $L=6.5\text{cm}$ とすると、この平衡状態はバランスを崩し、重力波が上流側に遡ってトレンチ区間で碎波し振動跳水が開始する。これは、トレンチ下流端での主流の跳ね上がりさらに上方に向かうために、トレンチ下流側における水位が局所的にさらに増大し、波速の方が流入流速を上回って $c>Ud$ となるためと考えられる。この状態は $L=8\text{cm}$ 程度まで持続する。

トレンチ長がさらに長くなると(図-4(g)(h))、トレンチ区間に剥離流の再付着点が現れ、跳水はトレンチ内に定常的に留まるようになる。この状態はさらにトレンチ長を増しても変わらない。図-4(g)(h)では、トレンチ区間に流入した高速流体が流下(落下)するにつれて徐々に拡散していく状況、その流れが再付着点近くでS字状に曲げられる状況、あるいは低流速で逆流する流体塊が主流の上部に保持されている状況などが良好に得られている。

(2) 乱流特性

図-5に乱れエネルギー k の分布を示す。 k は横断面内の乱れ強度が等しいと仮定して算出した。 $L=3.5\text{cm}$ の場合(図-5(a))は、剥離せん断層に沿った非常に細い帯状の領域で乱れエネルギーのピーク値が存在している。これは、せん断層の位置が時間的にほとんど変化せず、流入流体塊がトレンチ部を乗り越えて下流側の流れに滑らかに接続していることを示す。トレンチ内部にはいわゆるキャビティー的な流れがあり、一つの大きな循環流

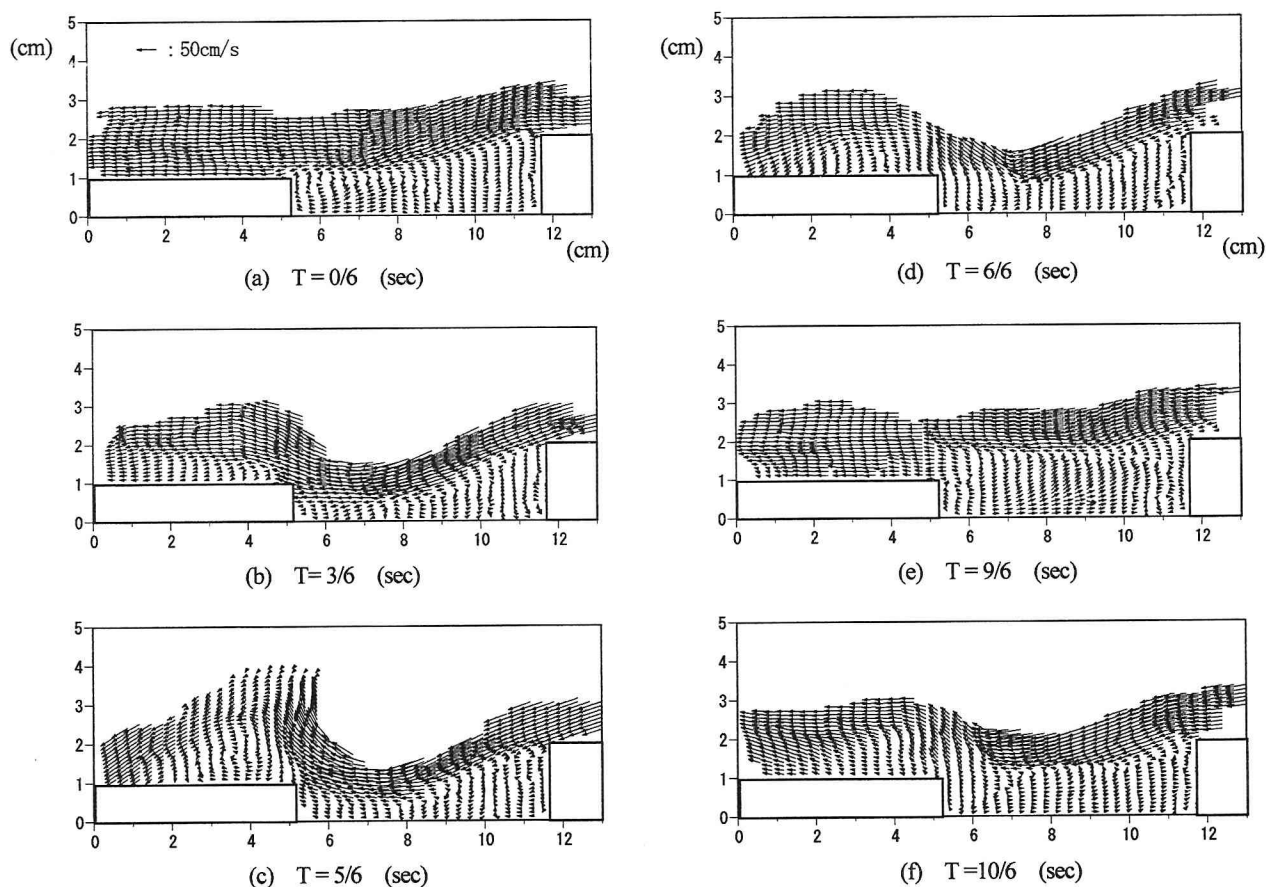


図-6 瞬間流速ベクトル (振動のケース: $L=6.5\text{ cm}$)

の揺らぎに伴う乱れが生じている。

トレンチ長が再付着距離にほぼ等しい $L=5.5\text{ cm}$ の場合 (図-5(b)) は、トレンチ下流端に主流の下部が衝突して新たな乱れエネルギーが生成され、その影響はトレンチ内部の下流側3分の1の領域にまで及んでいる。

$L=6.0\text{ cm}$ のケース (図-5(c)) では、トレンチ部よりもトレンチ下流に乗り上げた流れの領域でより大きな乱れの発生が見られる。ただし、その領域は流下とともに急激に消滅しており、きわめて局所的な現象であることがわかる。振動跳水のモード後の $L=9.5\text{ cm}$ (図-5(d)) では、二つのせん断層、すなわち、再付着点に向かう流入側のせん断層と、その上部の跳水に伴うせん断層の存在が特徴的である。乱れエネルギーは跳水に伴うせん断層でより強く生成されている。

4. 振動のケースの解析

(1) 瞬間流速分布

図-6に振動が発生した $L=6.5\text{ cm}$ の場合のPIV解析により得られた瞬間流速ベクトルの例を示す。水面がほぼ平坦な状態 (図-6(a) (e)) から水面が盛り上がりて碎波する状態 (図-6(c)) までは繰り返される様子が得られてい

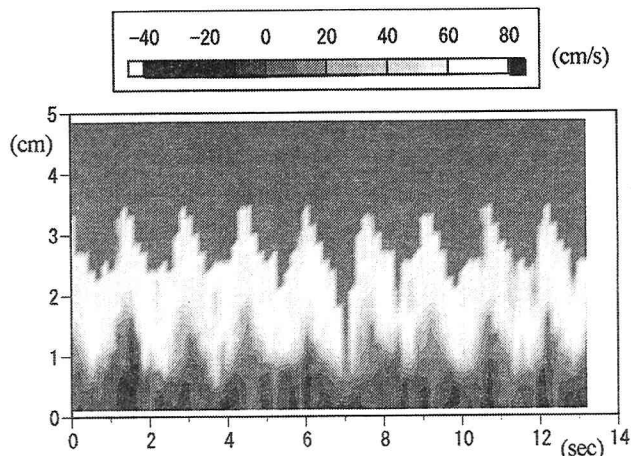


図-7 流速変動のダイアグラム
($L=6.5\text{ cm}$, トレンチ中央鉛直断面)

る。水面がほぼ水平になるのは、トレンチ区間に落下した跳水による流体塊が主流によってフラッシュされるときであり、それに伴ってトレンチ下流側の流速が高速化する。このとき、トレンチ底部では強い逆流が生じる。碎波が生じるのは、トレンチ下流端で非常に強い上向きの流れが生じ、これが波高を増大させているときである。このとき、トレンチ区間の流体はトレンチ下流側へ移流し、トレンチ部の水深は最大水深の半分程度になる (図-6(c))。後述のようにこれら一連の流体運動はきわめて

規則的な振動状況を呈する。なお、流入部分の流速分布に差が見られるのは光膜の照射が底面からのため、十分な粒子分布パターンが得られなかったことに起因している。

(2) 流速変動特性

流速変動の規則性を示すために、トレンチ中央の鉛直測線上の流れ方向流速分布の時間変化をダイアグラムの形で示したのが図-7である。図上部の無パターンの領域が空気相、下側が流体相に対応している。この図より、明らかに図-6で示した一連の流速変動が非常に規則的に生じていることがわかる。本実験ケースでの振動周期は約1.5秒であった。

(3) 変動の周波数特性

図-7に示した振動の特性をさらに検討するために、種々の実験範囲で振動の周波数特性を調べた結果⁷⁾を図-8に再掲した。流入流速とトレンチ落差高を代表値とするレイノルズ数とストローハル数は良好な相関関係を示している。すなわち、レイノルズ数の増大に伴ってストローハル数が一定値に漸近し、この振動現象のレイノルズ依存性が小さくなることがわかる。

5. あとがき

本研究では、急流中小河川における落差工としてトレンチ付のものを提案し、その水理学的特性について検討を行った。得られた知見等を以下にまとめる。

- 1) トレンチ付落差工周辺の平均流場および乱流場の特性が画像計測法によって良好に得られることを示した。
- 2) トレンチ付落差工では、あるアスペクト比の範囲で非常に規則的な振動跳水が発生する。
- 3) 振動跳水はトレンチ長がトレンチ内剥離せん断流の再付着点距離よりも若干長いときに発生する。
- 4) 振動の発生はトレンチ下流端によって主流が上向きとなり、下流側ステップ上で孤立的な波が生じることが第一要因である。
- 5) 振動跳水はトレンチ下流端流速 U_d よりも孤立波の波速 c が上回るとき開始する。
- 6) 振動のストローハル数はレイノルズ数の増大とともに一定値に漸近する。
- 7) トレンチの設計においてはこのような振動跳水を生じさせないようなアスペクト比をとる必要がある。

最後に、本研究で見出した振動現象はその再現性が非

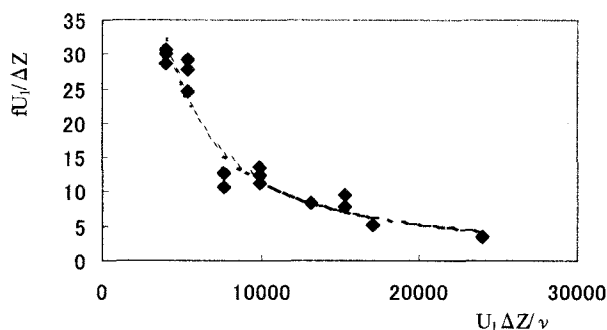


図-8 Re数とストローハル数の関係

常に良いため、跳水を含めた大規模な水面変動に関する数値シミュレーションモデルの検証に有効に活用できるものと思われる。

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) 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.
- 5) 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.
- 6) 藤田一郎, 丸山達弥: キャビティを有するバックステップ開水路流れの画像計測、可視化情報、Vol.20 Suppl. No.1, pp.235-238, 2000.
- 7) 藤田一郎, 丸山達弥: トレンチを有する開路段落ち流れの特性、応用力学論文集, Vol.3, pp.787-796, 2000.
- 8) Fujita, I. And Kaizu, T.: Correction method of erroneous vectors in PIV, Journal of Visualization and Image Processing, Vol.2, pp.173-185, 1995.

(2000. 10. 2受付)