

局地的集中豪雨による都賀川水難事故時の 流量・流況の推定

ESTIMATION OF DISCHARGE AND FLOW FEATURE AT THE TIME OF WATER DISASTER IN THE TOGA RIVER CAUSED BY LOCALIZED TORRENTIAL RAIN

國田洋平¹・藤田一郎²・安藤敬済³

Yohei KUNITA, Ichiro FUJITA and Takazumi ANDO

¹学生会員 神戸大学 大学院工学研究科 (〒657-8501 兵庫県神戸市灘区六甲台町1-1)

²正会員 学術博 神戸大学教授 大学院工学研究科 (〒657-8501 兵庫県神戸市灘区六甲台町1-1)

³学生会員 神戸大学 大学院自然科学研究科 (〒657-8501 兵庫県神戸市灘区六甲台町1-1)

In the afternoon of July 28 in 2008, there occurred a flash flood in the Toga River due to localized torrential rain and tragically caused five fatalities including children. The water level allegedly rose about one meter in ten minutes and there seemed to be little time remained to escape from the site. In order to clarify the cause of this disaster, hydrological information such as time variations of local rainfall distribution and river discharge is indispensable. This research pays attention to the flow phenomena within the river channel by estimating the peak flow discharge from video images and performing a two-dimensional flow simulation utilizing laser scanning data for representing complicated river bed topography. It was made clear from the video analysis that the peak discharge is within the range between thirty and forty cubic meters per second. Moreover, the numerical simulation using the appropriate roughness coefficient can reproduce the detailed flow situation, from which it becomes possible to produce CG animations for educating people about the danger of flash flood.

Key Words : ,discharge measurement, water disaster, localized rain, image analysis, shallow water analysis, water-friendly space,CG

1. まえがき

平成20年7月28日午後2時40分頃、神戸市灘区内を流れる二級河川都賀川において局地的な集中豪雨が発生し、急激な水位上昇によって河川を利用していた児童を含む5名が亡くなるという水難事故が発生した。都賀川では神戸市という都会を流れる河川としてはめずらしく環境や親水性に配慮した様々な取り組みが「都賀川を守ろう会」を中心として行われてきた¹⁾。神戸市内の他の河川と比較すると階段工も数多く設置してあっただけに、今回の水難事故は親水性施設の安全性に関して新たな問題提起をすることとなった。

これを受けて土木学会では調査団を結成し様々な調査を行い、原因の究明にあたってきた²⁾。原因究明のためには、局地的集中豪雨に対するアウトプットとしての流量の把握が不可欠であるが、都賀川では約1.8kmの全川にわたって親水・環境施設が整備され、非常に複雑な河

床形状を呈しているため、10分間隔で計測が行われていた水位データのみから流量を的確に推定することは困難であった。神戸市が設置している監視カメラによる事故発生時の映像は、急激な増水の様子を見事にとらえたものであり各方面で衝撃的に伝えられたが、このモニタリングシステムでは2分間隔で静止画を撮影する形式となっているために、ここから流量を推定することはやはり困難であった。唯一、活用の可能性があったのは事故直後の様子を放映したテレビ局の映像であり、本研究では表面流の画像解析から流量の推定を試みる。また、河道内の微地形を地上型レーザにより詳細に計測し、その結果を平面二次元解析に適用して粗度係数の推定を行う。河道内遊歩道などにおける水深や流速の解析結果からは人に作用する流体力の分布を推定する。さらに、水難事故防止の啓蒙のために、得られた解析結果を用いて河道内にいる人の目からみた場合を想定したアニメーションを作成し、三次元的に急増した流れを体感できるようにする試みを行う。

2. 都賀川の概要

(1) 河川の特徴

都賀川は阪神地域の六甲山から瀬戸内海に注ぐ表六甲河川の一つであり、流域面積が8.57km²、本川長が1.79km、河川幅が15～20m程度の小規模な二級河川である（図-1）。河床勾配は河口から800mの国道2号付近までが1/200から1/60程度、そこから800m上流の甲橋付近は1/35程度、その上流は1/20程度と全体的に非常に急になっている。流域の大半は六甲山系の山林であるが、流域の下流側は山際まで市街地が開発されている。その市街地の最上流域を流れるのが支川の六甲川と杣谷（そまたに）川であり、両支川が合流した後、ほぼ直線的に市街地の間を流れ下る。市街地には雨水幹線網が整備されており、市街地に降った雨の多くは雨水幹線を通して都賀川に横流入する構造となっている。

(2) 水文観測データからの知見

この流域の観測に関する特徴は、図-1にはすべては示していないが、前述の神戸市による静止画の監視カメラに加えて、動画の監視カメラ（国土交通省のITV）3ヶ所、雨量計5ヶ所、水位計1ヶ所など多くの観測点が設置されていることである。さらに、神戸市には分解能が250mの雨量レーダがあり、気象庁のものと合わせて詳細な降雨分布を得ることができる。都賀川では小流域にもかかわらずこれだけの観測網があったために、詳細な検討を行うことができた。これらのデータから基本的に言えることは、降雨は流域下流の住宅密集地を中心に発生しており、山林からの流出は今回の急な増水にはほとんど寄与していないことであった²⁾。

また、今回の局地的集中豪雨の特徴を端的に表しているのが図-2に示す雨量（鶴甲：都市域上流地点）と水位（甲橋直上流点）のデータである。降雨は降り始めから10分間で24mmに達している。これは時間降雨強度に換算すれば144mmであり、極めて短時間に著しく激しい雨が降ったことを物語っている。水位位上昇率に関しては図からは10分間で1.34mと読みとれるが、神戸市が水位計下流の甲橋右岸に設置した監視カメラは2分間隔で撮影が行われているため、さらに詳細な状況がわかる。

(3) 監視カメラからの知見

図-3 (a) に増水開始直前の14時42分、図-3 (b) に増水直後の14時44分の監視カメラによる画像を示す。遊歩道の冠水状況が15時6分頃まではほとんど変化していないことを考えると、この2分間あるいは2分間以内に1m程度の水位上昇が発生していたと考えるのが妥当である。これは、現場にいた人に共通する「津波のような水が押し寄せた」という証言と一致する。図-3からは甲橋左岸

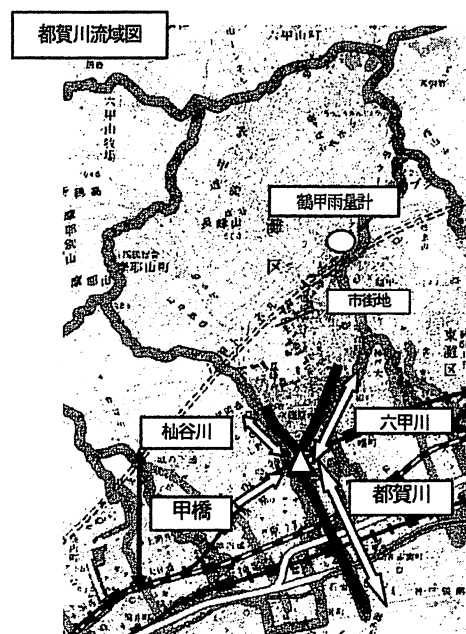


図-1 流域説明図

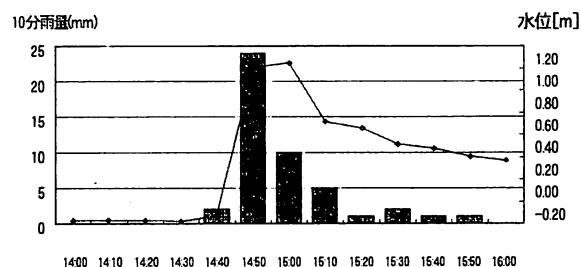


図-2 雨量（鶴甲）と水位（甲橋）



(a) 14時42分



(b) 14時44分

図-3 神戸市監視カメラの画像（甲橋）

にある大小2カ所の雨水幹線出口から大量の水が流入している状況もわかる。降雨との関連で見ると、監視カメラで降雨発生が認められるのは14時32分なのでその10分後には増水が始まっている。雨水幹線からの横流入は14時40分の画像から確認できるが、流域の規模を考えれば甲橋上流にある12カ所(甲橋地点も含めて)の雨水幹線からの横流入がほぼ同時に発生したことが急増水の主要因と推定できる。

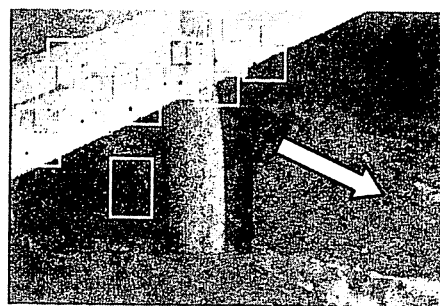
問題は、以上のような情報だけでは流量の推定が行えない点である。流量推定は、局所的な降雨に対する流出過程を再現するためのパラメータ設定に必要なだけでなく、遊歩道など河川内を利用していた人々にどのような力が及んだのかを知る上でも重要である。今回の流れ場では、1m程度の水深に対して河床の凹凸のスケールが50cm程度(飛び石のサイズは一辺60cmの立方体など)と大きいので、河道計画の際に用いられた粗度係数(0.025)を用いて等流近似するとかなり過大な流量を与える可能性がある。そこで、本研究では甲橋よりも下流の新都賀川橋で作業員を救出中の放映ビデオ画像(NHK)を利用して流量の推定を行うこととした。

3. ビデオ画像からの流量推定

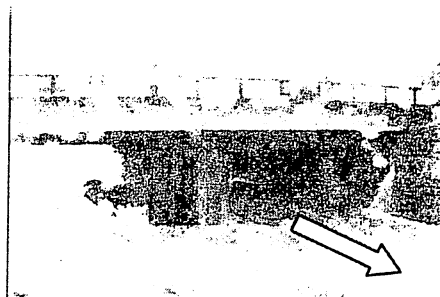
(1) プレ画像の補正

放映されたビデオは、逃げ遅れて新都賀川橋の下流側の橋台につかまり、かろうじて難を逃れることのできた作業員の救出の様子を中心に撮影したものである。撮影はカメラマンが手持ちの状態での撮影したものであるため、ブレが大きくそのままでは使えないため、まず、ブレ補正を行った。用いたのは、図-4に示した2つの撮影アングルの映像である。多少の時間のずれはあるが2つのアングルで撮影されたのは15時頃であり、ピーク水位が継続中の時間帯に入っている。これらのアングルを採用したのはズームが固定されており、比較的背景の動きが少ないためである。なお、人物の部分はマスキング処理で消している。

ブレ補正は橋の側面や橋脚に見られるコンクリート面上の凹凸などの固定点(不動点)を参照して行う。例えば、図-4(a)の白枠内には少なくとも1ヶ所の不動点が含まれるように配置し、その不動点の次のフレームでの相対的な移動ベクトルをテンプレートパターンマッチングによりサブピクセルレベルで求める。これらの移動ベクトルが移動前の位置と重なるように、移動後の画像を幾何補正する。ここでは、幾何補正にはアフィン変換を用いた。この幾何補正作業を1枚目の画像を基準として繰り返し実行することでおおまかなブレ補正が終了する。ただし、1巡目の補正だけでは背景移動を完全には除去できなかったため、全体の補正作業を数回繰り返したところ幾何補正の誤差をほぼ取り除くことができた。この



(a) アングル1



(b) アングル2

図-4 撮影アングル(新都賀川橋下流)



図-5 幾何補正画像と浮遊物の軌跡

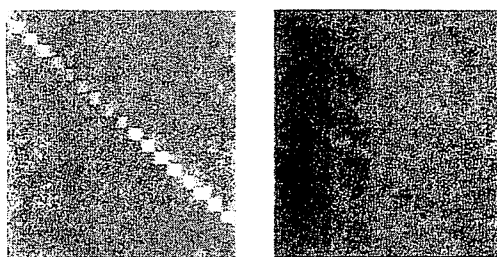
手順はアングル2の映像にも適用できた。

(2) 斜め画像の幾何補正

画像から求めるのは表面流速であり、そのためにはブレ補正した斜め画像をさらに無歪の画像に補正する必要がある³⁾。ここでは、ブレ補正に用いた各不動点の現地測量を行い、映像から水位を推定して画像の補正を行った。その結果の一例を図-5に示す。図には、偶然撮影中に流れてきた浮遊物(ボール)の軌跡を1/6秒間隔で多重合成して示している。

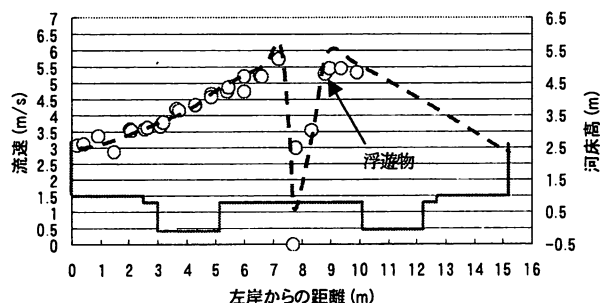
(3) STIV(Space-time image velocimetry)⁴⁾による解析

STIVは、流れ方向に設定した検査線上の輝度分布の時間変化を時空間画像として生成し、そこに現れるパターンの傾きから検査線上の平均流速を求める画像計測手法である。図-5の検査線に対して浮遊物がある場合とない場合の時空間画像図-6に示す。図-6(b)の水面の泡や波

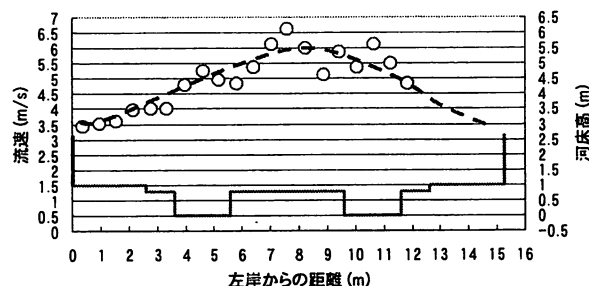


(a) 浮遊物 (b) 波紋

図-6 時空間画像 (横軸:3m, 縦軸:0.67s)



(a) アングル1



(b) アングル2

図-7 表面流速分布

紋によるパターンは浮遊物ほど明瞭ではないが、平均的な勾配は一致している。これより、特に浮遊物がなくても水面に現れる輝度パターンの移流速度は表面流速とほぼ等しいと仮定できるため、横断方向に配置した検査線に対しても同様の解析を行い、表面流速分布を求めた。図-7に各アングルに対する結果を示す。多少のばらつきはあるが、最大流速は5～6 m/sに達していることがわかる。ちなみに矢印で示した浮遊物の流下速度は5.2 m/sであった。図-7中に示した河床横断のデータを用いて表面流速分布から求めた流量を図-8に示す。ただし、撮影の死角部分の流速分布は不明なため、河床形状の対称性を考えて図-7に示した破線のような流速分布を与えて流量を算出した。どちらのアングルでも表面流速を水深平均値として求めた流量は37 m³/s、河川計測よく使われる校正係数0.85を乗じた流量は32 m³/s程度となることがわかった。新都賀川橋下流側の河床は図-9に示すように非常に複雑であるため、実河川の校正係数はそのままは使えないが、少なくともピーク流量に近い撮影時には40 m³/s程度の流量が流れていたと推定できる。

一方、図-7からは遊歩道においても流速が3 m/sにも達

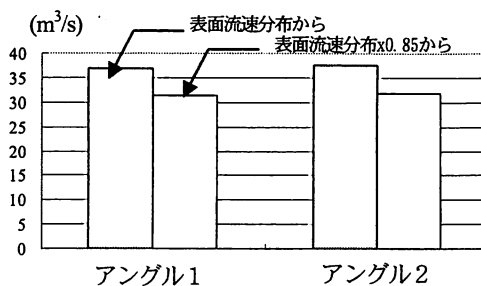


図-8 流量の推定値 (校正係数=0.85)

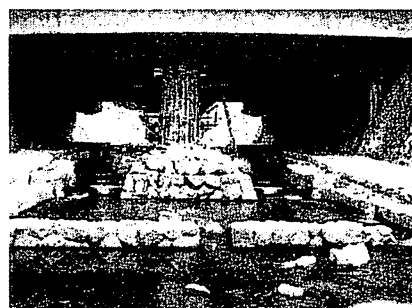


図-9 新都賀川橋下流の河床

していることがわかる。橋脚横の冠水量が20～30 cm程度であることから、仮にその場に人がいた場合に脚の部分の作用する流体力を算出すると、投影面積の幅を20 cm、抗力係数を1.0とした場合、180 Nすなわち20 kg弱となる。したがって、この場所から避難することは非常に困難であったことが推察される。

4. 二次元浅水流解析による流況の推定

(1) 地上レーザ計測

都賀川は全川にわたって環境や親水性に配慮した工夫が施されているため、通常の河川のように一定間隔の横断測定のデータだけでは、河床の微地形を再現できない。そこで、本川1.8 km区間を対象として地上型レーザ計測を実施した。計測は200 m程度の間隔で順次計測をすすめ、最後にすべてのデータを統合して1つの3次元微地形データを得た。図-10に新都賀川橋付近の測量結果を示す。橋の部分も含めてきわめて詳細なデータが得られている。河床の黒い部分は水面に相当しているが、データ密度は十分でない。したがって、これらの部分は現地における水深の実測値により補正した。また、植生や橋桁の部分もマニュアル作業により除去した。

(2) 平面二次元解析の概要

平面二次元解析には非構造格子に基づく解析プログラムを用いた⁵⁾。ただし、地上レーザ計測により得られた河床面の微地形はセンチメートル単位で細かすぎるので、一辺が0.6 mの三角形を基本とする非構造格子網の河床面

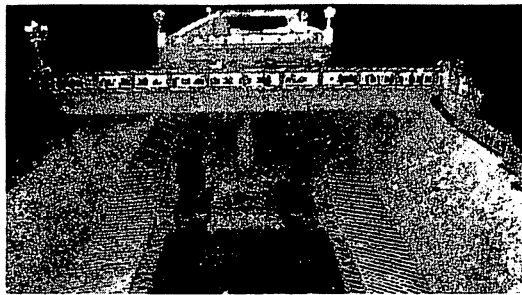


図-10 地上レーザ計測の一例（新都賀川橋下流から上流にむけて）

データに変換して解析を行った。ただし、格子サイズは壁面付近では細かくし解析精度の向上に努めた。格子数は約73000である。解析範囲は、図-11に示すように上流の合流点から新都賀川橋下流までの400mの範囲とした。この範囲の平均勾配は約1/20である。計算の初期条件は、六甲川と杣谷川にそれぞれ0.25m³/sの流量を与えて定常となった状態とした。なお、格子サイズの依存性を調べるために、格子サイズを1mと0.3mにしたものを比較した結果、1mでは結果に差が現れたが、0.3mでは0.6mの場合と大きな違いが見られなかった。したがって、0.6mとした格子サイズは概ね妥当な値と考えられる。

(3) 水理パラメータの推定法

流入ハイドログラフは、ステップ的にピーク流量まで急増する分布形を与えた。流量と粗度係数のチューニングは、以下の4つの事項をいずれも満足する組み合わせを求めるために、流量は20～60 m³/s、粗度係数は0.03～0.05の範囲で変化させた。

- 甲橋直上流の水位データ
- 甲橋監視カメラでの遊歩道の冠水状況
- 新都賀川橋遊歩道の冠水状況
- 新都賀川橋下流の流速分布

甲橋上流の水位データを比較したのが図-12である。水位計によるピーク水位1.05mを図中に破線で示すが、流量30m³/sのケースの再現性が高い。この流量は画像解析から得られた流量とほぼ一致する。なお、水位が粗度係数に応じて連続的に変化していないのは、河床底面が単純な平面ではなく縦横断に複雑なために局所的な流れの影響がケースごとに異なるからである。

図-13には甲橋の階段工前面の遊歩道部分における冠水深を比較した。監視カメラから推定できる冠水深の値は15cmから30cm程度なので、その範囲をハッチングで示した。また、図-14には、新都賀川橋の遊歩道の冠水深を比較した。流量が30m³/sのケースの多くが範囲内に入っている。画像解析（STIV）でも求めた新都賀川橋の下流部における流速分布を比較したのが図-15である。局所的な分布形に違いは見られるが、遊歩道から橋脚にかけての流速分布は流量が30～40m³/sのケースで実測値とよく合っている。

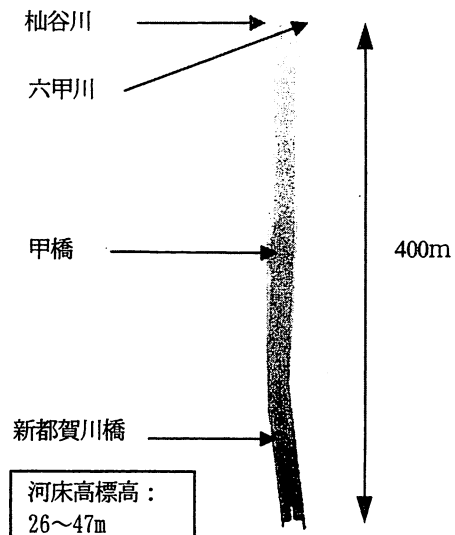


図-11 平面二次元解析の範囲

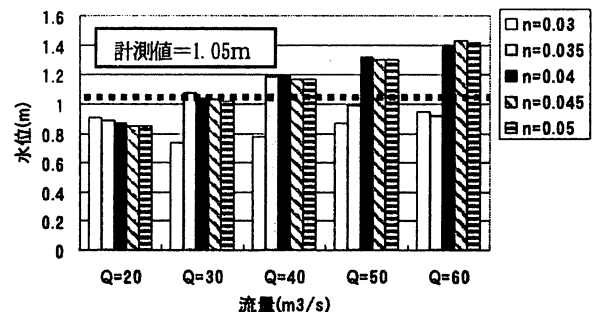


図-12 甲橋上流の水位データの比較

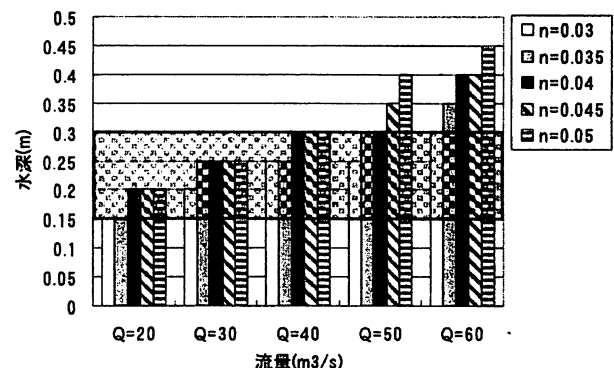


図-13 甲橋遊歩道の冠水深の比較

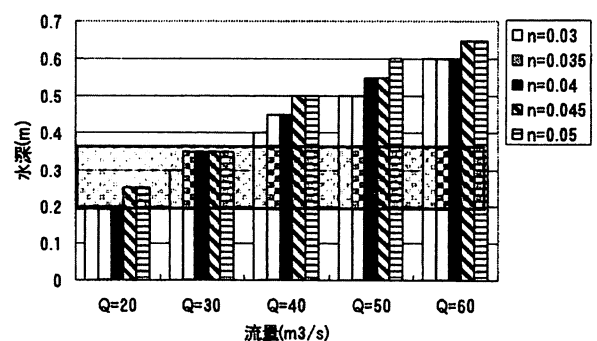


図-14 新都賀川橋遊歩道の冠水深の比較

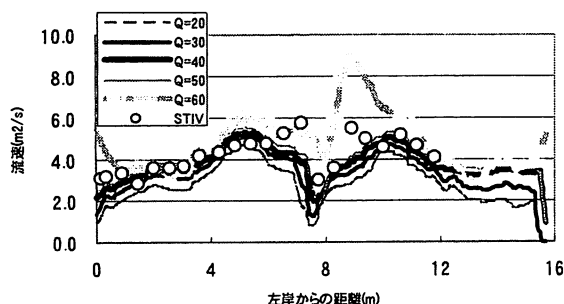


図-15 新都賀川橋下流の流速分布の比較 ($n=0.035$)

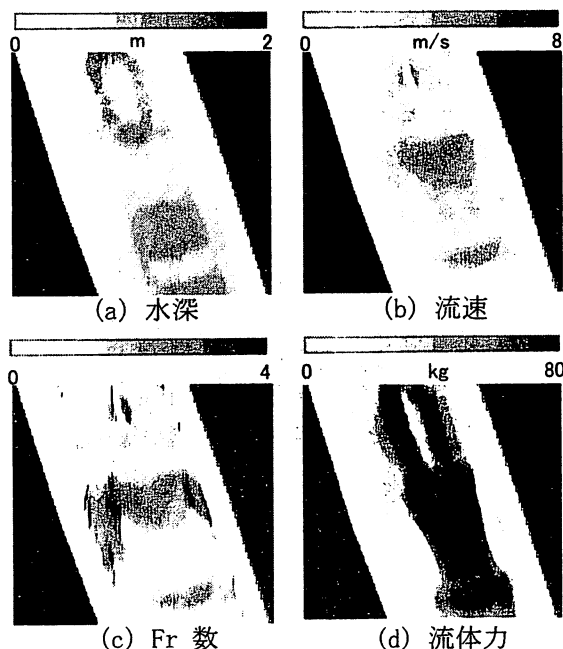


図-16 甲橋下流の流況データ

以上の結果を総合して考えた場合、実測値にもバラツキや推定値が含まれるため必ずしも一つだけの最適値の組み合わせは得られないが、ここでは、粗度係数0.035、流量 $30\text{m}^3/\text{s}$ を水理パラメータの組み合わせと考えることとする。

(4) 流況の推定

上述の最適パラメータを与えて求めたピーク流量時における甲橋周辺の水深、流速、フルード数および河道内に人がいた場合に作用する流体力の推定値の分布を図-16に示す。甲橋下流の凹部に流入した流れが下流の飛び石群によってせき止められ遊歩道にあふれる様子や、橋脚の両側の遊歩道に 3m/s 程度の流れが発生し流下している状況が得られた。また、フルード数の分布よりほぼ全域に渡って射流状態にあることがわかる。流体力は3(2)で示した方法を面的に拡張して分布を求めた。遊歩道上でも 200N (20kgW)を上まわる領域が大きく、一旦、流れに巻き込まれてしまった場合には、避難することが

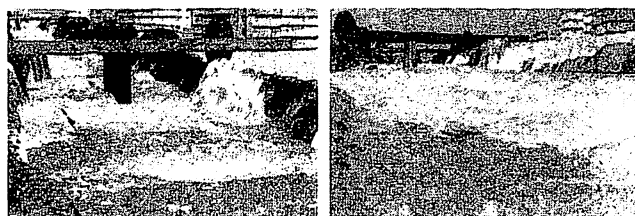


図-17 アニメーションの1シーン

非常に困難であったこと推察ができた。

(5) アニメーションの作成

地上レーザ計測による河床データに時々刻々解析結果を合成し、三次元的なアニメーション(実時間で3分程度)を作成した。甲橋監視カメラに近い視点と河道内の視点からの各1シーンを図-17に示す。このようなアニメーションを一般に公開することは、事前の避難行動の重要性を訴える啓蒙活動の一助になるものと期待できる。

5. あとがき

水難事故発生時の流量と粗度係数を詳細な画像解析と数値解析により推定し、その推定値を用いた二次元解析により実際の流況を概ね良好に再現できた。また、本研究では様々な推定段階で映像情報が非常に大きな役割を果たしており、可視化された河川情報の重要性を再確認することができた。

謝辞：地上レーザ計測においては、河川整備基金による支援および兵庫県からの協力があった。また、河川流のアニメーション制作においては、広島大学大学院の椿涼太助教からの多大な協力頂いた。ここに記して謝意を表す。なお、本研究は土木学会の水難事故調査団の調査研究の一環として行われたことを最後に記す。

参考文献

- 1) 都賀川を守ろう会：30周年記念誌，2007。
- 2) 土木学会都賀川水難事故調査団：都賀川水難事故調査について，平成20年度河川災害に関するシンポジウム，2009。
- 3) 藤田一郎：実河川を対象とした画像計測技術，2003年度水工学に関する夏期研修会講義集，水工学シリーズ03-A-2，2003。
- 4) Fujita, I., Watanabe, H. and Tsubaki, R.: Development of a non-intrusive and efficient flow monitoring technique: The space time image velocimetry (STIV), International Journal of River Basin Management, Vol.5, No.2, pp.105-114, 2007。
- 5) 藤田一郎・椿涼太：中小都市河川に設置された側岸凹部構造物の非構造格子有限体積法による影響評価，水工学論文集，47巻，pp.523-528，2003。

(2009. 4. 9受付)