時空間ビデオ画像解析による揖保川洪水流 シミュレーションの定量的評価

EVALUATION OF THE IBO RIVER FLOOD SIMULATION BY USING SPACE TIME IMAGE
VELOCIMETRY

熊野元気¹・藤田一郎²・浅見佳世³・中山昭彦⁴・川谷健⁵

Genki KUMANO, Ichiro FUJITA, Kayo ASAMI, Akihiko NAKAYAMA and Takeshi KAWATANI

¹ 学生会員 神戸大学大学院工学研究科 市民工学専攻 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1)

² 正会員 学博 神戸大学大学院教授 工学研究科 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1)

³ 非会員 博士 (理学) 榊里と水辺研究所 (〒533-0033 大阪市東淀川区東中島 4-11-32-602)

⁴ 正会員 Ph.D. (一財) 建設工学研究所 (〒657-0038 神戸市灘区深田町 4-1-1 ウェルプ六甲道 2 番街 653-3)

⁵ 名誉会員 Ph.D. (一財) 建設工学研究所 (〒657-0038 神戸市灘区深田町 4-1-1 ウェルプ六甲道 2 番街 653-3)

An image-based field measurement method of river flow was applied to a large flood that occurred in the Ibo River and the measurement results were compared with those calculated by two and three dimensional numerical simulation models for evaluating the accuracy of simulations. The target river site has a large bend with a cobble bar on its right in the mid reach of the river. Flow measurements were conducted by taking video images of flood surface flows; i.e. streamwise surface velocity distributions were obtained by the space-time image velocimetry (STIV). It was confirmed from the comparison of velocity distributions at some sections, simulation parameters need some modifications that takes into account of a number of large rocks located near the outer bank. Improvement of simulation accuracy was established by providing direct measurement data by STIV.

Key Words: river flow simulation, image analysis, STIV, LES, cobble bar

1. はじめに

河川の中・上流域には蛇行部や湾曲部が発達している箇所が数多くあり、河道が直線的となる低平地の河川とは全く異なる様相を呈する。このような場所では河床材料の粒径が大きく、平水時の流量は少なく水面幅も狭いが、一旦、洪水が発生すると水面幅が急激に増大する。特に、湾曲部の内岸側に広い砂州が発達しているときは、その場所の冠水頻度にも依存するが、河原に特有の貴重な植生群落が成立している場合がある。兵庫県を流れる河川においては、カワラハハコ¹⁾がその代表であり、浅見ら²⁾は「大出水時に避難地となるレフュージアの有無や立地条件の解明は、河川の生物多様性を保全する上で重要な課題となる」という観点から研究を進めてきている。その内容には、植生繁茂の経年変化や洪水前後の植生分布調査³⁾のような植生学的な観点だけではなく、流れのシミュレーションをベースとした河川工学的な視点も含まれている。

このような調査研究を行う場合、最も難しいのは出水時の流れの状態の把握である。それは、対象となる河川域の物理スケールが通常10mから100m以上のオーダーと非常に大きいこと、中上流域の流れは非常に速く毎秒4~5m/s以上の流速が発生するこ

と、水面変動が非常に激しくなる場合があること、さらには出水は夜間に生じることが多いことなどが直接的な計測を困難なものにしている。したがって、人がボートに乗って、プローブタイプの計測機器やADCP (Acoustic Doppler Current Profiler)により現地計測を実施することは大変危険であり、不可能である。大きな水面変動は、ラジコンで操作するボートを転覆させる可能性が高い上、高流速に耐えられる機種もあまりない。夜間の計測にはさらに危険が伴う。

以上のような現地計測の難しさから、出水時の流況の検討は、近年急速に発展してきた数値シミュレーションに頼っている場合が多い。一般的には平面二次元の水深平均流モデルをベースとする解析⁴⁻⁶⁾が普及してきたが、ハードウェアの進歩に伴って三次元解析モデルによる検討も始まっている⁷⁻⁹⁾。しかしながら、たとえ最新の解析モデルによる検討を行ったとしても、実河川における境界条件は非常に複雑であり、忠実にそのような複雑場を解析に取り込むことは不可能である。例えば、粒径が広範囲に及ぶ河床材料や多種多様な河岸植物の繁茂状況、あるいは水理構造物の影響を正確に解析モデルに反映させることはできない。したがって、実測値で比較できるのは、唯一、水位や水面勾配であることが多い

図-1 揖保川観測地点とカメラアングル

4-6). 水位が一致すれば、確かに複雑な境界条件によって生じる抵抗がマクロ的に再現されているといえるが、流速分布などの局所的な流況を検証することはできない。

洪水時にも流速分布を常時取得できる機器としては、固定設置型の計測装置のH-ADCP¹⁰⁾があるが、設置されているのは低平地の河道域などであり、平常時には水深があまりない中上流域で設置するメリットはあまりないし、臨機応変に洪水流を計測することはできない。このような現状において、唯一利用できるのは任意地点から河川表面流を撮影した画像情報であり、LSPIV(Large-Scale Image Velocimetry)¹¹⁾やSTIV (Space-Time Image Velocimetry)¹²⁾といった解析法がほぼ確立している。本研究では、画像解析による非接触計測法の有用性を確認するために、2011年9月に揖保川で発生した大規模出水時にビデオ撮影できた映像の解析を行い、数値シミュレーション結果との比較やパラメータの評価を行った。

2. STIV による洪水流計測の概要

本研究で対象としているのは、兵庫県を流れる一級河川揖保川の距離標約 24.6km から 26.8km にかけての大きな湾曲部であり、映像取得に成功したのは 2011 年 9 月 3 日に発生した洪水である。対象地区の概要図を図-1 に示す。河道は 90 度以上に大きく湾曲しており、途中には自然にできた落差があり、深掘れが生じている。湾曲部の内側で白く見える三日月状の河原がカワラハハコ植生群落の繁茂地である。

(1) 出水規模とビデオ撮影条件

対象地点より数キロ上流の 29.5km にある山崎第二観測所における過去 10 年間の月最大流量を図-2 に示す。2011 年の洪水は、10 年間で 3 番目に大き

図-2 過去 10 年の月最大流量 (山崎第 2 観測所)

図-3 観測時のハイドログラフ

(a) angle B の標定点 (特徴点)

(b) angle C の標定点 (特徴点)

図-4 標定点の事後計測

い流量規模で、ピーク流量は約 1300m³/s であった。ただ、図-3 に示すようにピークは夜間に発生したために、ビデオ撮影は流量が増大中の夕方に行った。これは、撮影に用いたのが家庭用のハイビジョンビデオカメラ (画素数 1920x1080 画素) であり、外光のほとんどない現地では流れの撮影ができなかったためである。今後、深夜に及ぶ撮影を実現するためには、遠赤外線カメラの利用¹³⁾が有用である。

図-5 各撮影アングルと水表面の様子

図-6 平水時の流況

(2) ビデオ画像の取得

洪水流の撮影は 予め大まかに決めておいた 3 つのアングルで行った. 各アングルは, 図-1 にも記している. 最上流の Angle A は左岸堤防から, Angle B は左岸の崖の上, 最下流の Angle C は右岸のあまり高さのない地点からである. 通常の画像解析による計測では, 現地に 1m 四方の標定パネルを設置するなどの事前準備を行う¹³⁾が, 本研究の場合は撮影時点では標定点の設置はあまり行っておらず, カメラの設置個所のみを正確に記録した. 仮に, 平水時の河岸際に標定パネルを設置していたとしても, 今回の洪水流は大規模だったために, 大半の標定パネルは水没か流失していたはずである.

そこで, 本研究では洪水後に現地で撮影アングルをできるだけ正確に再現し, 当日設置した標定パネルや対岸の樹木の根元など特徴点の測量を行って画像の幾何補正に利用した. ただし, アングルの再現は完全ではないため, 写真座標の座標値は適宜補正した. 平日における標定作業に用いた画像の例を図-4 に示す. 標定点(特徴点)の測量は洪水後, 時間が経過して行ったため, 植物の繁茂状況は変化していたが, 特徴点は概ね把握することができた. 本研究では画面の座標と物理座標の写像関係に, 写真測量における共線方程式を用いているため, カメラのアングルを微調整しながら幾何補正画像のチェックを行い, 適正な変換パラメータを求めた.

(3) STIV 解析に用いた画像の特徴

河川の表面流速を計測する手法は, どの方法も洪水時に河川表面に現れる波紋の移流速度が表面流速を代表するとみなしている. これまでの STIV の適用事例や他手法との比較でこの仮説がほぼ正しいことを確認している¹³⁾が, 流速が非常に大きく, 水面変動が大きい洪水流への適用事例はあまりな

図-7 Angle B の STI (横: 検査線長, 縦: 時間)

図-8 Angle B の STI (画像処理後)

い. 実際に中・上流域で発生する洪水は変動が非常に激しいものであり, STIV の適用が可能であればその有用性を確認できる. STIV では主流方向に検査線を想定し, 波紋がそこを通過する際に変化する輝度分布を時空間画像(STI:Space-Time Image)として表現する. STI 上に現れる傾いたパターン勾配から主流方向の流速を求める.

図-5 に洪水時の各アングルからの撮影画像, 図-6 に平水時の様子を示す. 湾曲部へ接近中の Angle A の河床は比較的平坦なため, 水面に大きな変動はない(図-5(a)). 一方, 湾曲部直前の落差より下流には巨岩が左岸寄りに点在しているが, 洪水時には流れがその上を乗り越えているため, Angle B と Angle C では激しい水面変動が生じている(図-5(b)の手前側, 図-5(c)の対岸側). 図-5 と図-6 の赤色の点線で囲んだ部分はほぼ同じ植生群落(カワラハハコではない)に対応する. 図-5 中の平行線が STIV に用いる検査線(長さ L)であり, angle A が $L=15.2\text{m}$, 間隔 5.37m , angle B が $L=21.7\text{m}$, 間隔 4.98m , angle C が $L=9.75\text{m}$, 間隔 6.04m である. 検査線の本数は 20 本なので, 約 100m の河川幅をカバーしている. 水面幅をカバーする撮影の俯角は, angle A が $3\sim 23$ 度, angle B が $6\sim 30$ 度, angle C が $1.5\sim 7$ 度であり, angle C の対岸側がかなり小さな値となっている.

(4) 時空間画像(STI)の特徴と画質改善

ここでは, 水面変動の激しい angle B と angle C に対

(a) 対岸側(2.5m/s) (b) 手前側(1.7m/s)

図-9 Angle C の STI (横 9.75m, 縦 10sec)

して得られたSTIについて調べる。図-7は図-5(b)に示した検査線のうち、手前から0, 4, 16番目のSTIである。STIの横軸は検査線長さで21.7m、縦軸は下向きに時間軸で10秒である。即ち、このSTIは毎秒30フレームの動画の連続300フレームの画像から生成したものである。横軸の長さが異なるのは、斜め画像から検査線上の輝度情報を引き出したためである。図-7(a)の縦の線は手前の樹木の枝であり、背景にある右斜めに傾いたパターンとは区別できる。このパターンの傾斜角はほぼ一様と見なせ、流速がこの間ほぼ一定であったことがわかる。図-7(b)は水面の変動が激しい場所を通過する検査線のSTIであり、斜めパターンには定在的な白波の影響でSTIの両側の端に縦方向に複雑なパターンが現れている。しかしながら、全体的には一定方向に傾いたパターンを識別できる。図-7(c)は内岸側で流速が小さく水面波紋がそのままではよく識別できないパターンである。

このようなケースを含めて、本質的にSTIに含まれる画像の特徴をより鮮明にするために、ここでは二次元FFTのバンドパスフィルターで低周波と高周波のノイズを除去した後、ヒストグラム均等化処理を行った結果を図-8に示す。ここに示した画像処理の適用は大変効果があり、図-7(c)では隠れていたパターンが図-8(c)では明瞭となっている。図-7(b)に含まれていた白波も分裂しつつも表面流に乗って流下している様子を見てとれる。重要なのは、図-8のレベルまで画像処理すれば、流速の大小をパターン勾配の大小として直感的に把握できる点である。電波や超音波を使う場合は、反射波に含まれるノイズ除去が精度に影響を及ぼすが、時空間画像上では目視でも本来の情報を識別できる点が優れている。このSTIV解析の結果ではNo.4の位置で4.6m/sの表面流速が発生していることがわかる。他の検査線に対しても同様の処理により主流流速の横断分布を求めた。

俯角が非常に小さくなったangle Cに対するSTIの例を図-9に示す。巨岩を乗り越える対岸側では白波が定在的に発生しており俯角も2度以下と小さいが、その部分を含めても波紋の傾きはほぼ一定であり、表面流速の算出は可能であった。手前側についても樹木の影響(黒い縦の模様)などは入っているものの、波紋の勾配はほぼ一定で解析できた。

実際のビデオ撮影は順次場所を変えながら行ったので、撮影時刻毎に推定流量は異なっている。上流地点(山崎第二)における推定流量と洪水伝播速度か

表-2 各アングル撮影時の推定流量

	撮影開始時刻	推定流量(m^3/s)
angle A	17:07	1100
angle B	16:31	1000
angle C	15:53	900

図-10 平均粗度係数の検討

ら推定した各アングルの流量を表-2に示す。撮影毎に約 $100\text{m}^3/\text{s}$ ずつ流量が変化していることが推定された。

3. 平面二次元解析との比較結果

ここでは、STIVによる表面流速の計測と二次元および三次元数値解析の結果を比較し、STIVで得られるような現地計測の有用性を確認していく。

(1) 平均的な粗度係数の推定

本研究では対象区間の3カ所に水位計を設置していたが、中間地点の水位計は取り付け用の塩化ビニル管ごと流された。そのため、河道域全体の平均的な粗度係数を推定するために、上下流水位差を再現する値を調べた。数値解析は一般座標系に基づく平面二次元解析モデルである。この河道域の河床データとしては定期横断測量とLPデータにより、計算格子上に再配置したものを用いた。下流端水位には近接している下流水位計のデータを用いた。粗度係数の範囲は0.03から0.06までである。検討結果を図-10に示す。これより、河道区間全体の平均値としては、0.055程度が妥当であることがわかる。粗度係数の値としては大きめの値であるが、平均粒径が約8.2cm程度の丸石河原の湾曲部で、しかも巨岩が多数分布していることからこのような値が得られたと考えている。ただ、巨岩による圧力抵抗は全体の抵抗の内、かなりの部分を占めていると考えられるので、巨岩部分以外には粗度係数の値0.05を用い、巨岩部分に局所的に大きな粗度係数(0.1~0.3)を与え、流速分布との比較からその妥当性について調べることとした。

(2) 更正係数について

STIVでえられた表面流速 U_s を平面二次元解析で得られる水深平均流速 U_m と比較するには、両者の

図-11 相対粗度と更正係数の関係

比である更正係数 $\alpha (=U_m/U_s)$ に関する検討が必要である。今、ひとつの目安として鉛直流速分布に粗面対数則を仮定すると、更正係数は以下ようになる。

$$\alpha = \frac{1}{1 - z_0/h} \left[\ln \left(\frac{h}{z_0} \right) \right]^{-1} \quad (1)$$

h は水深、 z_0 は、底面の粗さを表すパラメータで相当粗度の 1/10 程度の値である。 α と相対粗度高さ h/z_0 の関係をプロットすると図-11 のようになる。現地の河床材料の平均粒径と洪水発生時の水深から h/z_0 の値を推定すると、150～250 程度の値となる。これに相当する更正係数は 0.79～0.81 となる。したがって、以下では更正係数を 0.8 として比較する。

(2) 流速分布の比較

Angle A の断面について、STIV の実測値と計算値を比較したのが図-12 である。図-1 からわかるように、巨岩群はこの断面よりも下流に位置するため、巨岩部分に大きな抵抗を与えても計算結果に差は見られない。粗度係数の値として水位差から推定した 0.05 の分布は、右岸側では実測値とよく一致するが、左岸側では過小評価されている。差が生じた要因には補間操作による計算河床形状の実際との不一致や河床変動の影響などが考えられる。

次に、angle B に対する比較を図-13 に示す。この断面は図-4 (a) からわかるように、巨岩が上下流に点在する断面であり、巨岩抵抗導入の効果が計算値に現れている。ただ、実測値との比較からは差が増大する傾向となった。これは、本解析では、巨岩抵抗の影響を粗度係数の増大だけで表しており、その三次元的な幾何形状を河床高の変化としては考慮していないためと思われる。形状考慮の場合は実質的な水深が減少するため、解析流速は実測値程度に増大する可能性がある。

最後に angle C に対する比較を図-14 に示す。この断面も巨岩群の影響を受け、流速分布が巨岩導入の影響を受けているが、angle B とは異なり、局所的な粗度係数の割増し (0.05 から 0.3 へ) によって実測値により近づく平坦な流速分布が得られている。angle C の断面では、左岸付近に集中した巨岩の影響により流速が低減し、その分だけ右岸側に運動量が分散した効果が表れている。

以上より、巨岩部の粗度係数の割増しによって観

図-12 angle A に関する比較

図-13 angle B に関する比較

図-14 angle C に関する比較

測時の洪水流の流れ場をある程度再現できたが、全体的な比較をするために、図-15 に湾曲前後の流速ベクトルを示した。局所的な粗度係数の増加によって下流域の流速ベクトルが全体的に平坦化し、主流部が左岸から右岸側に遷移している様子がわかる。これらの結果は STIV による実測値とも概ね一致する傾向にある。

(3) 三次元 LES モデルによる検討

本解析区間では、すでに LES による検討も行っている²⁾。LES の利点は表面流速分布を直接的に比較できることである。angle A と B の断面において得られた比較結果を図-16 に示す。STIV の結果は更正係数を乗じない生の値であることが図-12 とは異なっている。これより、LES による表面流速分布は STIV の結果と概ね一致していることがわかる。このように表面流速分布が直接求めれば、更正係数を算出することができるため、今後さらに検討を行う必要がある。

図-15 全体的な流速ベクトル場の比較（赤い点が巨岩分布）

4. おわりに

本研究では、通常では取得が困難な橋の利用できない山地河川における洪水流の流速分布を画像解析(STIV)により求めた結果を、現地における計測法や解析手順とともに示した。山地河川で $1000\text{m}^3/\text{s}$ を上回るような流量が発生した場合、おそらく他のどのような機器を用いても内部流速の実測は不可能であるため、いわゆる更正係数の値については推定の域を越えないが、散在する巨岩などによる不均質な抵抗要因による流速分布形状の変化についてはある程度検討可能であることを示せた。従来の平面二次元の解析で、平均的な水面形の再現を重要視しているのは当然のことであるが、本研究のように表面流速ではあっても、流速分布の実測値があれば解析の精度や考察を一步進んだものにできることを示せたと考えている。ただ、本研究で用いた河床データは、2006年の定期横断測量をベースに作成し、早瀬の地形を検討するために湾曲部の一部で行った2010年の測量を反映したものであり、観測時までに時間が経過していることや、補間されたデータが大部分であることなどから、厳密な意味での河床境界面の再現は困難であったのは確かである。今後は詳細な河床形状の計測値に基づく検討が必要である。今回の計測で課題となったのは、ピーク流量が発生した夜間における実測であるが、今後は遠赤外線カメラの利用¹³⁾により、解決できるものと思われる。

本研究を進めるにあたり、国土交通省近畿地方整備局河川国道事務所から測量成果および水位・流量データを提供いただいた。本研究の一部はJSPS科研費23510298の助成により実施されたものである。なお、数値解析では、解析ソフトウェアとして汎用フリーソフトiRIC (Nays2D)を使用した。

参考文献

- 1) 浅見佳世：円山川におけるカワラハハコ群落の19年間の動態，人と自然22，pp.33-41，2011。
- 2) 浅見佳世・中山昭彦・川谷健・藤田一郎：揖保川中流カワラハハコ群落成立地の植生学的水理学的

(a) angle A

(b) angle B

図-16 LESによる表面流速分布とSTIVの比較

考察，土木学会論文集 B1(水工学) Vol.69, No.4, I_1339-I_1344, 2013.

- 3) Asami, K., Akamatsu, H., Fukui, S. and Tamura, K.: Morphological characteristics of flood refugia of cobble-bed vegetation., Journal of Hydro-environment Research 6 (2), pp.127-136, 2012.
- 4) 吉田圭介・前野詩朗：2011年9月旭川洪水における河道内植生の流水抵抗特性の検討，土木学会論文集 B1(水工学) Vol.69, No.4, I_715-I_720, 2013.
- 5) 前野詩朗・吉田圭介・三島望・松山悟：旭川の大原箇所における植生の生長と洪水時の植生流出条件の検討，土木学会論文集 B1(水工学) Vol.69, No.4, I_727-I_732, 2013.
- 6) 吉田圭介：浅水流 adjoint モデルによる複断面河道の河床粗度の逆推定法に関する基礎的検討，水工学論文集第55巻，S_1009-1014, 2011.
- 7) 柴田良一・中山昭彦・浅見佳世：実河川湾曲部礫原近傍流れの数値シミュレーション，水工学論文集第55巻，S_1099-1104, 2011
- 8) 猪熊裕司・中山昭彦：湾曲河川河床形状を有する湾曲水路乱流の数値シミュレーション，水工学論文集第55巻，S_1021-1026, 2011
- 9) Zeng, J., Constantinescu, G., Blanchaert, K. and Weber, L.: Flow and bathymetry in sharp open-channel bends: experiments and predictions, Water Resources Research, Vol.44, W09401, 2008.
- 10) 二瓶泰雄・木水啓：H-ADCP観測と河川流計算を融合した新しい河川流量モニタリングシステムの構築，土木学会論文集 B, Vol.64, No.4, pp.295-310, 2007.
- 11) Muste, M., Fujita, I., and Hauet, A.: Large-scale particle image velocimetry for measurements in riverine environments, Water Resources Research, 44, W00D19, doi:10.1029/2008WR006950, 2008.
- 12) 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.
- 13) 藤田一郎・小阪純史・萬矢敦啓・本永良樹：遠赤外線カメラを用いた融雪洪水の昼夜間表面流画像計測，土木学会論文集 B1(水工学), Vol.69, No.4, I_703-I_708, 2013.

(2013.9.30 受付)