## ヘリ画像解析と非構造格子浅水流モデルによる 実河川洪水流の解析

# ANALYSIS OF FLOOD USING VIDEO IMAGES FROM A HELICOPTER AND SHALLOW WATER EQUATION BASED ON UNSTRUCTURED GRID SYSYTEM

### 國田洋平<sup>1</sup>・藤田一郎<sup>2</sup>・椿涼太<sup>3</sup> Yohei KUNITA,IchiroFUJITA,RyotaTSUBAKI

1 学生会員 神戸大学大学院 工学研究科 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1)
 2 正会員 学術博 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 正会員 工博 広島大学大学院助教 工学研究科 (〒739-8527 東広島市鏡山 1-4-1)

River flow structure during flood is one of the most difficult features to capture in river engineering. It is possible to use instruments such as ADCP to measure three-dimensional river flow structures; however, measurement volume or area capable for them to measure is limited to a restricted range. Local remote sensing technique is a good candidate for a wide-ranged river flow measurements. In this research, an aerial survey from a helicopter installed a high definition video (HDV) camera is conduced during a large flood occurred in the Yodo River on September 19 in 2006. From the videotaped flow images, river surface velocity distributions are obtained by PIV by mainly utilizing the movement of specular reflection from surface ripples after the correction of background drift. The measured results are compared with a two-dimensional simulation model based on the unstructured grid system.

Key Words: PIV, flood, surface flow measurement, HDV, helicopter, shallow water equation

#### 1. はじめに

わが国の河川計画において、合流部のような複数 の河川の境界条件を考慮に入れる必要がある場所で は、洪水流による影響を予測することは非常に困難 であるが、そこに樹木等の影響が加わると精度の良 い予測はさらに難しくなる.特に河道内に繁茂する 樹木群は洪水流にとっては大きな抵抗要素であり水 位上昇や河道貯留量の増大を引き起こす.従ってこ れらの樹木群による洪水時の流れへの影響予測は河 川管理にとって重要な判断材料となる.

このように複雑な形状をもつ河川の流れ場の特性 を知るための手法には、現地観測、数値解析および 模型実験がある.現地観測はもっとも基本的な方法 ではあるが、時間やコストの面で問題があった.し かし、近年では画像解析法<sup>1)</sup>の開発によりビデオ画 像を用いた流況の把握を比較的簡単にしかも高精度 に行うことが可能となった.一方、数値解析は河川 の規模を問わずに流れを再現することが可能である が、その精度を検証することは容易ではない.模型 実験においては、河道形状や河床構造を任意に設定 でき、結果においても高精度なものが期待できるが、 コスト面において問題があり、さらにレイノルズ数 が実河川よりも著しく小さいものとなるのでスケー ル効果の影響が現れたり、流体特性などの相似性に も問題が出る場合がある.現在、実河川における植 生の流況への影響を数値計算を用いて検討する際に は、観測所等における水位データをもとに再現モデ ルを作成することが多く、任意の場所からはデータ が得られないのが現状である.これに対し、本研究 では近年 PIV (Particle Image Velocimetry) 法により 精度の高いデータを得ることが可能になった河川表 面流の現地観測の結果と数値解析結果を比較するこ とで、計算モデルの検討を行った.

まず, 増水時の淀川三川合流地域の流況を調べる ために、2006年7月19日の洪水発生時にヘリコプ ターからハイビジョンカメラによって同地域を撮影 し、得られた画像に PIV 法を適用して表面流速分布 の計測を行った<sup>2)</sup>.そして、二次元浅水流方程式の 非構造格子有限体積法に基づく数値計算モデルによ って流況を再現したものと、ヘリコプターからのビ デオ画像より得られた結果とを比較検討することに より、流量や河床形状<sup>3,4)</sup>あるいは植生の影響などモ デルの妥当性に関する検討を進めた. PIV のヘリ画 像への適用に際しては背景移動除去を効率的に行っ た. また,二次元的な河床形状を再現するにあたっ ては 200m間隔で測量されている河床データを空間 的に精度よく補間する方法を開発した.最後に、マ ッチングを行った流況再現モデルを用いて,植生の 繁茂状況の違いによる流況への影響の変化 5.0 につ いて検討を行った.





図-4 幾何補正画像

#### PIV 法によるヘリ画像解析

#### (1) 撮影概要

本研究で解析を行った航空ビデオ画像は,2006年 7月19日13時~14時にかけて上空約300mからへ リコプターで撮影されたものである. その時の飛行 経路を図-1 に示す. 撮影範囲は, 淀川の約 33kp 地 点から合流部を経て木津川、さらに宇治川、桂川の それぞれの5km程度の区間までの経路であり、撮影 は HDV カメラ (VICTOR ハイビジョンカメラ GR-HD 1280×780,約100万画素)で行っている.撮 影当日は幸いなことに洪水ピークが昼に通過中であ ったため,雨もなく,低水路満杯に近い状態であり, 非常に貴重な映像データの取得に成功した.ただし、 撮影にあたっては常に河川を画面一杯に捉えるよう にしたため、ヘリコプターの飛行高度は必ずしも-定していない.

各河川の特徴としては、淀川はゆるやかに蛇行し ているのに対し,桂川は蛇行が激しく,宇治川はほ ぼ直線となっており、木津川は蛇行が激しく水深も 浅いことが挙げられる. 図-2 に平水時と撮影時の流



図-2 平水時と撮影時の比較



図-3 高浜観測所におけるハイドログラフ



図-5 幾何補正作業画像

況の比較, 図-3 に淀川 33.0kp 地点付近の高浜観測所 の当日のハイドログラフを示す. 図-2(a)(b)より淀 川の33.0kp付近では平水時は植生域には全く水に浸 かっていないが、今回の撮影時には植生にまで水が および,水位がかなり上昇していることがわかる. 図-2(c)(d)は桂川 5.0kp 付近で平水時は低水路内の みを水が流れているが、撮影時には高水敷のグラウ ンドまで水位が上昇していることがわかる.

#### (2) 多次元多項式による背景移動除去

ヘリにより撮影された画像は撮影位置が時々刻々 変化するため背景が全てずれており、PIV 法を適用 するには背景の移動を除去する必要がある.本研究 では、リモートセンシング・ラスタ GIS の専用ソフ トウェアである ErdasImagine(ESRI 社製)を利用して 画像の切り出しや背景移動を補正するための幾何補 正を行った.幾何補正には式(1)に示す多次元多項式 を用いた.

$$x_0 = a_0 + a_1 x + a_2 y + a_3 x y + a_4 x^2 + a_5 y^2$$
  

$$y_0 = b_0 + b_1 x + b_2 y + b_3 x y + b_4 x^2 + b_5 y^2$$
(1)





ここで, *x* と *y* はソース座標(入力), *x*<sub>0</sub> と *y*<sub>0</sub> は歪補 正後の座標(出力), *a*<sub>0-5</sub> と *b*<sub>0-5</sub> は最小二乗法で決定 すべき係数である.

例えば図-4(a)(b)には1秒間隔の2枚の連続画像 を示すが、明らかに背景がほぼ平行にずれているこ とがわかる. 目視では単なる平行移動のように見え るが、実際には微妙な画像の歪みがあるため単なる 平行移動では画像の周辺に無視できない歪みが残る. 従って画像(b)を画像(a)にあわせて背景除去を行う 場合、まず、それぞれの画像に共通して写っている 共通領域(a')および(b')を切り出す.次に、図-5に 例を示すように、共通領域(a')(b')内で共通する点 の各座標を求める. 図-5 には右岸付近の7つの不動 点を求めた状態を示している. 各座標はサブピクセ ルの精度で得られる.これらの座標を用いて式(1)の 幾何補正係数を決定後,幾何補正画像を生成する. 最後に,幾何補正された画像を画像(b)のサイズにあ わせることで背景移動を除去した画像(c)が得られ る.黒く塗りつぶされた部分が撮影時のわずかな回 転などの影響を表している.図-6に PIV 解析を行っ た淀川中流域の例を示すが、河川幅全体にわたり表 面流速ベクトルが良好に得られている. PIV はパタ ーンマッチングに基づく流れの追跡法であるが,こ こでは河川表面に現れている様々な模様(波紋)の動 きを追っている.

#### (3) PIV 解析を基にした流量の推定

数値計算を行うにあたって必要な流量は PIV によ

って得られた表面流速を基に推定した.水面幅及び 水位はヘリ画像と横断河床データとの比較から推定 した.今回の洪水では低水路満杯状態であり,部分 的に高水敷への越水が見られたので横断図との比較 から水位および水面幅の推定ができた.これらを用 いて区分的な流量を台形積分で求め,流量を推定し た.PIV による流速分布と推定された流量を用いて 実行した数値計算結果による流速分布を比較するこ とにより,計算モデルの妥当性を検討した.台形積 分には式(2)を用いた.

$$Q = \alpha \sum_{i=1}^{n} \left\{ \left( h_{i-1} + h_i \right) \times v_i \times \Delta B / 2 \right\}$$
(2)

ここで、Q:流量(m<sup>3</sup>/s)、 $h_0 \sim h_n$ :水深(m)、 $v_l \sim v_n$ :表 面流速データ(m/s)、 $\Delta B$ :水深データ及び流速デー タの横断方向の間隔(m)、 $\alpha$ :速度補正係数(=0.85、 velocity index)である.  $\alpha$ の値としては実河川で妥当 と見なされている値を採用した<sup>7)</sup>.

#### 3. 数值計算概要

#### (1) 基礎方程式

数値計算には非構造格子有限体積法による数値計 算モデル<sup>8)</sup>を用いた.ここではデカルト座標系で表 した基礎方程式を式(3)に示す.

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial E}{\partial x} + \frac{\partial F}{\partial y} + S + \nu \left(\frac{\partial}{\partial x}h\frac{\partial G}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y}h\frac{\partial G}{\partial y}\right) + \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{\partial I}{\partial y} = 0$$
(3)



図-10 桂川 36.4kp における PIV 解析結果

ここで、Uは保存量ベクトル、 $E \ge F$ はそれぞれx、 y 方向の流束ベクトル、Sは発生・消滅項ベクトル、 第 5 項は粘性項ベクトル、HおよびIは水深平均レ イノルズ応力、h:水深、V:動粘性係数である.

植生の影響は式(4)に示す方法で考慮に入れた<sup>9</sup>.

$$S = \begin{pmatrix} 0 \\ -gh(S_{0x} - S_{fx}) + F_{x} \\ -gh(S_{0y} - S_{fy}) + F_{y} \end{pmatrix}$$

$$F_{x} = \begin{cases} C_{d} \frac{a}{2}(l/h)uh\sqrt{u^{2} + v^{2}} & (h > l) \\ C_{d} \frac{a}{2}uh\sqrt{u^{2} + v^{2}} & (h < l) \end{cases}$$

$$F_{y} = \begin{cases} C_{d} \frac{a}{2}(l/h)vh\sqrt{u^{2} + v^{2}} & (h < l) \\ C_{d} \frac{a}{2}vh\sqrt{u^{2} + v^{2}} & (h < l) \end{cases}$$
(4)

ここで、 $S_{0y}$ ,  $S_{0x}: x, y$ 方向の河床勾配,l:植生の 高さ、a:樹木群密生度単位面積に占める植生の遮蔽 面積)、 $C_d$ :抵抗係数(=1.0 とした<sup>9</sup>)、u, v: x, y方向の流速である.なお、植生高はその分布が不明 であったので今回の解析では高水敷部分の画像から 判断して、水没しない値(5m)を一様に与えた.

#### (2)河床形状の再現方法

一般的に一級河川の直轄管理区間では,毎年ある いは隔年で横断測量が100~200mピッチで行われて いる.本解析区間では横断面方向の河床高さのデー タが200m毎にしかなかったため,データがない部 分を補間した.図-7に示したのは,みお筋を境界と して測量データを分割して補間を行う方法である. この場合,補間は基本的に線形補間で行い,図-7に 示す手順③④では次式に示す重み付け補間を用いた.



図-11 PIV 解析と数値計算結果の比較と河床高さと水位 (桂川)

$$z(x, y) = \frac{\sqrt{\left((x_{b} - x)^{2} + (y_{b} - y)^{2}\right)}}{\sqrt{\left((x_{a} - x_{b})^{2} + (y_{a} - y_{b})^{2}\right)}} \times z(x_{a}, y_{a}) + \frac{\sqrt{\left((x_{a} - x)^{2} + (y_{a} - y_{b})^{2}\right)}}{\sqrt{\left((x_{a} - x_{b})^{2} + (y_{a} - y_{b})^{2}\right)}} \times z(x_{b}, y_{b})$$
(5)

ここに, 求めたい点のデータを z(x,y), 前後の既知の データを  $z(x_a, y_a), z(x_b, y_b)$ とする. 測量データ群を分 ける分割線の数による補間の精度を比較検討した結 果を図-8 に示す.図-8(a)は測量されたデータを分 割せずに単純に線形補間したもの、図-8(b)はみお筋 のみで 2 分割して重み付け補間したもの, 図-8(c) はみお筋・両岸の低水路と高水敷との境界点を4分 割して補間したものを示す. 図からわかるように 4 分割した補間が最もデータのコンターがなめらかで あり, 高い精度の河床データが得られた. したがっ て、河床データの補間は4分割を基本として行った が合流部などの河床形状が複雑な場所においてはさ らに分割数を増やして補間を行った.ただ,分割数 を増やしすぎると分割されたそれぞれの領域でもと もと存在する河床データの数が少なくなるため、分 割数を増やせば精度の高い補間が行えるということ ではない、本研究で用いた最大分割数は5である。

#### 4. PIV 解析と数値計算結果の比較

#### (1) 桂川における比較

桂川では支川等からの流入が多数存在し、地形デ ータも十分になかったため、正確なモデルを作るこ とはできなかった.支川からの流入部は1.0kp~2.0kp の区間に2つあり、そこからの流入量が推定できな かったため支川からの流入部は考えないものとし, 36.4kp 地点での PIV 結果から推定された流量 1290 m<sup>3</sup>/s を 5.0kp の流入部に与え, PIV 結果と計算結果 の比較を行った.図-9に桂川の計算範囲と流速絶対 値の解析結果,図-10にPIVの結果(瞬間流速分布), 図-11 に横断面の計算値との比較と河床横断図,計 算水位を示す. PIV の流速分布は、水深平均値に換 算するために補正係数 0.85 を掛けたものを示した. また、PIV ではノイズを排除するために比較的大き なテンプレートサイズ (101x101 pixel) を用いた. ピクセルサイズは 0.263(m/pixel), 画像時間間隔は 1.0(sec)とした. 図-10 より, PIV 結果では左岸側の ほうが右岸側よりも全体的に流速が速くなっている



図-12 シミュレーション範囲(木津川)と Q=400 での流速コンター



図-13 木津川 1.8kp における PIV 解析結果



図-14 PIV 解析と数値計算結果の比較と河床高さと水位 (木津川)

ことがわかる.計算結果でも同じような傾向が見 られる.これはこの断面の上流における湾曲の影響によるものと思われる.PIV 解析結果に数値計 算結果は良好に一致しており,計算モデルの妥当 性が示された.

#### (2)木津川における比較

木津川では 1.8kp 地点における PIV 結果より推定 された流量 410 m<sup>3</sup>/s を用いて数値計算を行い, PIV 結果と計算結果の比較を行った. 図-12 に計算範囲 と絶対流速の解析結果, 図-13 には PIV 結果, 図-14 には PIV 結果と計算結果の比較と河床横断面図,計 算水位を示す. PIV ではテンプレートサイズは桂川 と同一, ピクセルサイズを 0.108(m/pixel),画像時間 間隔を 1.0(sec)として解析を行った. 図-14 に示すよ うに, PIV では全体的に一様な流速となっており, 0~20m 付近で違いが見られるものの計算結果でもほ ぼ同様の傾向が見られた.よって計算モデルは概ね 妥当であると言える.

#### (3) 樹木群による流況への影響

淀川の解析においては高水敷への流れの流入も見





られたため、樹木群の影響について若干の検討を行 った. 図-15 に計算範囲, 図-16 に 33.6kp の測量断 面に沿った PIV 結果,図-17 に数値計算との比較結 果,図-18 に河床横断形状と計算水位を示す. PIV の適用におけるピクセルサイズは 0.199(m/pixel),他 の条件はこれまでと同じである. ただ, PIV の場合, 主流部分では波紋での追跡が行えたが、樹木間での 追跡は困難であったため、表面に発生した泡群の移 動を追跡した.樹木群部分では流水部分の流れを追 跡するためにテンプレート内には樹木部分が含まれ ないように細長いテンプレート(51x81 pixel)を用い, マニュアルモードで個別の泡群を追跡した. 図-16 の樹林間で得られているベクトルがその追跡結果で ある. ただし, 図-17 の樹木間の流速分布は, 計算 値と比較するために空間的な移動平均値を求め点線 で示した.



図-19 合流部下流のせん断流れ

PIV で得られた流速分布の特徴は, 主流部(50~160m)において 3~3.5(m/s),樹木群間(160~250m)で は平均的に 1m/s 未満となっている点,また,左岸側 のワンド部では流速低減のために波紋が現れておら ず,流速が得られていない点である.樹木群密生度 を変化させて行った解析結果を図-17 に示している が,画像計測による流速分布は a=0.02 あるいは a=0.04 とした場合と同様な流速分布を与えている. なお,PIV で得られる流量は 2852m<sup>3</sup>/s であり,この 値は約 6km 下流に位置する枚方の流量観測所の H-Q 式から推定される 2944m<sup>3</sup>/s とほぼ一致した.また, 図-18 からわかるように樹木群密生度の変化は主流 部の水位へも影響を及ぼすため,樹木群の適切な管 理の重要性があらためて認識された.

#### 5. 合流部におけるせん断不安定流れ

ヘリビデオ画像からは個別の河川流の流況だけで はなく、合流部に特有の現象も見出せた.図-19(a) には、桂川と宇治川の合流点下流の画像を示すが、 各河川の水の色が異なるためせん断不安定による大 規模で正弦波的な界面変動を確認できた.このヘリ 画像から1秒間隔でせん断流れの部分のみ切り出し て並べたものが図-19(b)である.波長が約260mの 変動が約2.4m/sの移流速度で流下していることを確 認した.ただし、両河川を含んだ表面流速分布はこ の部分での波紋の視認性が十分でなかったため得ら れなかった.

#### 6. おわりに

本研究では、淀川で発生した低水路満杯状態の洪 水に関して、ヘリ画像解析から得られた流速分布や 流量を数値解析により得られたものと比較した.そ の結果、洪水時に河川表面に現れた波紋が河川表面 流とともに移流するトレーサとして利用できること を再確認した.ただ、今回の撮影はかなりの範囲に 及んだものの、波紋の移流が視認できない映像もか なりあった.これは、撮影アングルをほぼ真下に向 けたために光の入射方向によっては水面の凹凸が現 れにくい状況があったためである. 真下に加えて斜 め方向の撮影を追加し,同一領域を往復するような 撮影方法をとることによって計測範囲の大幅な改善 が期待できるものと考えている. 波紋の移流速度を 表面流速と見なしている点については議論があるが 10),洪水時に流速が毎秒数メートルにも達するよう な場合には,表面浮遊物の移動速度と波紋の移流速 度がほぼ一致することが確かめられている<sup>11)</sup>. ただ し、強風下では風波の影響が避けられないので何ら かの補正が必要である.シミュレーションモデルと の比較では、概ね良好な結果が得られたが、 河岸付 近や樹木間の流れについては画像解析と数値解析の どちらにもまだ不十分な点があるため、今後のさら なる検討が必要である.

#### 謝辞

本研究の一部は、財団法人関西エネルギー・リサ イクル科学研究振興財団 (KRF) からの研究助成によ り遂行することができた.また、ヘリ画像撮影にお いては(株)スカイマップからの協力を得た.ここに 記して謝意を表する.

#### 参考文献

- 藤田一郎: PIV 技術の実河川表面流速への応用,河川 技術論文集, Vol.4,pp.41-46,1998.
- 2) Fujita, I., Tsubaki, R., and Deguchi, T.:PIV measurement of large-scale river surface flow during flood by using a high resolution video camera from a helicopter, Book of extended abstacts, Hydraulic Measurements and Experimental Methods 2007, pp.344-349, 2007.
- 3) 財団法人国土技術研究センター編:河道計画検討の手 引き、山海堂、2002.
- 社団法人日本河川協会編:建設省河川砂防技術基準 (案)同解説・調査編,山海堂,1997.
- 5) 山下障司・巖倉啓子・馬場仁志:河道内樹木が流れに 与える影響について,開発土木研究月報 No.540, 1998.
- 6) 福岡捷二・渡邊明英・田端幸輔・風間聡・牛腸宏:利 根川・江戸川分岐点を含む区間における流量ハイドログ ラフと粗度係数・樹木群透過係数の評価,水工学論文集, 第 50 巻,pp.1165-1170,2006.
- 7)Creutin, I, D. et al.:River gauging using PIV techniques: approach of concept experiment on the Iowa River, Journal of Hydrology,277,pp.182-194,2003.
- 8)椿涼太・藤田一郎: 非構造格子浅水流数値モデルを用い た側岸凹部流れの水面振動構造の解析,水工学論文集, 第 50 巻,pp763-768,2006.
- 9) 前野詩朗・宮内洋介・森卓也:植生が旭川の洪水流に 及ぼす影響の検討,水工学論文集,第52巻,2008.
- 10)宮本仁志:河川ローカルリモートセンシングのための 可視化トレーサーとしての水面波紋の基礎性能評価,土 木学会論文集 B, Vol.63,No.4,pp.357-367,2007.
- 11)岡部健士・藤田一郎・椿涼太・和久田敦志:現地洪水 流の表面ビデオ映像に対する LSPIV 解析の適用要領, 水工学論文集,第51巻,pp.1087-1092,2007.

(2008.9.30受付)