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

STANDARD FOR APPLICATION METHOD OF LSPIV TO SURFACE VIDEO RECORD OF ACTUAL FLOOD FLOW

岡部健士¹・藤田一郎²・椿涼太³・和久田敦志⁴ Takeshi OKABE, Ichiro FUJITA, Ryota TSUBAKI and Atsushi WAKUDA

¹フェロー会員 工博 徳島大学教授 工学部建設工学科(〒770-8506 徳島市南常三島町2-1)
²正会員 学術博 神戸大学教授 工学部建設学科(〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1)
³正会員 工博 神戸大学COE研究員 工学部建設学科(〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1)
⁴学生会員 徳島大学大学院先端技術科学教育部博士前期課程(〒770-8506 徳島市南常三島町2-1)

Using a surface video record of a large-scale flood in Yoshino River, Shikoku, Japan, some problems related to application method of Large Scale Particle Image Velocimetry (LSPIV) are examined in detail. First, from a hydraulic point of view, a new method is proposed for exclusion of incorrect velocity data and calculation of time-averaged velocity. Second, decision standards are examined with respect to the primary LSPIV model parameters. As a result, it was confirmed that the appropriate time-interval, template size and detection area size for PIV analysis procedure range between 1/3 to 1/2 seconds, between 1.5 to 2 times the maximum size of brightness pattern and about 2 times the estimated displacement distance of templates, respectively.

Key Words : river flow measurement, LSPIV, parameter identification, time-average procedure

1.まえがき

現地河川での流速計測法としては,従来,浮子法やプロペラまたは電磁流速計による接触型計測あるいは航測 写真などを利用した非接触型計測が実施されてきた.しかし,これらは多大な労力を要することに加えて機動性 も低いことから,近年,ビデオ画像や航測写真に流体画 像計測の分野¹¹で発展してきたPTV(Particle Tracking Velocimetry)やPIV(Particle Image Velocimetry)を適用して, 少ない労力で広範囲の表面流速データを取得する技術の 開発が進められている.

藤田らは,斜めビデオ映像からでも低・高水流の表面 平均流速分布を計測できる一手法としてLSPIV(Large Scale Particle Image Velocimetry)を提案し,その高度化や 実用化を図ってきた²⁻⁶⁾. LSPIVでは,種々の原因で発生 した伝播性の小さい水面波紋やボイル渦などによる浮遊 土砂が水面に作る0.1m~数mオーダーの模様を面トレー サーとし,まず,ある時間間隔で抽出した多数の画像対 ごとに,両者の輝度情報から相互相関法によってトレー サー移流速度ベクトルを求めたのち,これらの結果を平均して時間平均流速ベクトルを求める.LSPIV技術の信頼性向上に向けて,藤田らは,斜め画像の幾何補正法や画素単位で検出したトレーサー移動量のサブピクセル補正法^{2),5)},異常流速ベクトルの検出・補正法⁴⁾などに改良を加えるとともに現地計測システムの開発⁶⁾も行ってきた.これらによって現地向けLSPIVのノウハウはほぼ確立されたようではあるが,後述するように,トレーサー移流速度の検出に使用する画像対の時間間隔,テンプレートサイズ,探索領域の広さなど主要な解析パラメターの設定基準が現在も曖昧なままである.また,このあとの平均操作は異常値を排除したうえでなされるべきであるが,その方法に関する定量的な検討は,これまでほとんどなされていない.

本研究では,まず,徳島県内の一級河川・吉野川に発 生した比較的大規模な洪水を対象にLSPIV解析用のビデ オ映像を収録した.ついで,流木など水面浮遊物を対象 にしたPTV解析の結果を表面流速の真値として参照しな がら,LSPIV解析パラメターの最適設定の要領や効果的 な平均操作法の確立に資するための検討を行った.



図-1 観測地点とカメラ設置位置



図-2 河道横断図(解析断面付近)

2. 現地観測

(1) 観測地点の概要

観測地点は,徳島県三好郡三野町太刀野付近の吉野 川で,河口からは約63.5km上流,角の浦大橋の直上流 に位置する(図-1,図-2参照).観測地点付近の河道 線形はほぼ直線的で,築堤幅は約450m,河床勾配は約 1/800である.河道内の左岸には砂州が発達しており, その堤防沿いには藩政時代から続く水害防備林の竹林 が築堤後も取り残されている.一方,右岸側には幅の 広い高水敷があり,その水際にも竹林が分布している.

(2) 観測方法と対象洪水

洪水水面のビデオ撮影は,平成17年9月6日から7日に かけて,台風14号の影響で発生した洪水流を対象とし て行った.図-3に,当該観測地点から約10km上流の池 田水位観測地点で浮子観測も実施した結果として得ら れた流量ハイドログラフを示す.ピーク流量は,7日の 午前2時に記録され,9,327m³/sとなっているが,撮影は, 照度がビデオ撮影に十分な程度まで増加した同日午前6 時頃から開始し,その後12時まで,約1時間おきに1回 当たり5分間の撮影を実施した.

撮影には,デジタルビデオカメラ(SONY製,DCR HC1000,1/4.7型総画素数107万画素の3CCDを搭載)を 用いた.カメラは,三野町・三加茂町間に架かる角の



図-3 流量ハイドログラフ(池田)

浦大橋の垂直弦材に取り付けた専用ボックス内に,図-1,2に示した写角で設置し,左岸竹林の低水路側外縁 に沿う横断方向80m,縦断方向60mの範囲を画角に納め るようにした.ビデオ収録作業は,角の浦大橋北詰付 近において,撮影映像をモニターしながら無線遠隔操 作で行った.

3.LSPIV解析とパラメター

(1) LSPIV解析の基本

LSPIV解析では,映像記録から,下記の ~ の処理 を経て任意点の時間平均表面流速ベクトルを求める.

ある時間長の斜め撮影映像記録からRAW形式(モノ クロ)などのデジタル静止画像ファイル群(1/30秒間 隔)を作成したのち,全ての画像を2次または3次の 射影法により水平投影画像に変換・収録する.

表面流速の1次検出として,時間間隔△t で抽出した 一対のデジタル画像(以下,時間的に先行する画像を 第1画像,他を第2画像と呼ぶ)に,輝度の相互相関 係数に着目したテンプレートパターンマッチングを適 用して,この間の水面模様の移流速度ベクトルを算出 し,これを表面流速ベクトルとみなす.この処理を一 連の画像ファイルの全てを対象に逐次実行して,表面 流速ベクトルの時系列データセットを得る.

表面流速ベクトルの時系列データから,パターン マッチングの不成功や誤検出などに起因する異常値を 排除したのち,時間平均の表面流速ベクトルを求める.

(2) 解析パラメターと設定基準

LSPIV解析のアルゴリズムには,いくつかの解析パラ メターが含まれている.ただし,本文では,デジタル 水平投影画像ファイルの作成に係わるものは考慮の対 象外としておく.

まず,流速の1次検出(前項の)においては,時 間間隔 Δt ,テンプレートサイズ S_T およびマッチングの 探索範囲すなわち模様の移流量を求める画像上でのテ



ンプレートの最大移動量 B_p が基本パラメターである. これらのうち Δt は,実験室レベルのPIVの場合,テン プレートの最大移動量が10pix程度となるようにするの が目安となっているが,河川流の場合には,トライア ルにより安定した流速検出が可能な適値を模索するし かなく,結果の適否にまで立ち入った設定要領は得ら れていない.一方, S_T は,20~50画素程度が一つの目 安とされているが⁷⁾,追跡する模様が持つ何らかの幾何 スケールを基準に設定するのが望ましい.

つぎに,前項 における異常値の排除と時間平均操 作に関しては,実験室レベルのPIV解析用としては広域 的ヒストグラム処理や動的平均操作法などの異常値診 断法および欠損データの補間法がある¹⁾.しかし,実河 川レベルのLSPIV解析については,検出データ採否のた めのパラメターとして,第1,第2画像のテンプレー トの輝度の最大相互相関係数に0.4~0.5程度の閾値を設 定するまでに止まっている⁵⁾.いずれにしても, に係 わる議論は,処理ノウハウ構築の段階から始める必要 がある.

4. 吉野川ビデオ映像に基づく検討

本研究では,第2節で述べた撮影領域の中央部に一本の横断測線を設定し,はじめにPTV解析によってそれに沿う流速分布を求めた.そして,これを真値とする前提のもとに,LSPIV解析の要領やパラメター設定がその結果の信頼性に及ぼす影響を調べる過程を通して,現地用LSPIV解析の適正要領の確立を目指した.ただし,ここでのLSPIV解析は,上述した横断測線上に左岸からの距離(図-2参照)が105,125および145mである3点(以下,それぞれP-1,P-2およびP-3と呼ぶ)を代表点として選び,これらについてのみ実施した.

(1) LSPIV解析用画像と輝度分布パターンのスケール 検討には、ビデオ撮影開始時点(平成17年9月7日, 6:00)に収録された約5分の映像記録のうち中間部30秒



分を用いた.収録されたカラー映像記録から1/30秒間隔 で900枚のモノクロ静止画像を作成したのち,6点の標 定点を用いた3次元射影法^{5),7)}により水平投影画像に変 換して,LSPIV解析用の画像ファイル群を作成した.こ れらの画像のピクセルサイズは0.1m/pixとし,各ピクセ ルの輝度は256階調の離散値としてデジタル化した.

図-4は, S_{T} 値設定の参考とするために,点P-1,P-2 およびP-3を中心とし,LSPIV解析用の画像上で水平に 連なる251個の画素群を検査線1,2および3として,輝 度の空間的自己相関係数 R_{A} を計算した結果である.図 中の L_{m} は, R_{A} の $R_{A} \ge 0$ の範囲での積分値で,輝度パ ターンの平均スケールに相当する.また,自己相関曲 線が横軸と交わるずらしピクセル数を最大スケールと 解釈すると,それぞれ約40,30および30pixである. S_{T} は,テンプレート内部のパターンが周辺のものと有意 な差を持つように定めるべきことからすれば,それを 最大スケールと同程度に設定するのが適当と思われる.

(2) 表面流速のPTV解析とその結果

原映像記録の全体において見出された合計15個の流 木や浮遊ゴミなどをトレーサーとしてPTV解析を行った. ここでは,トレーサーが横断測線を通過する前後の約 5秒間を評価時間とし,まず,1秒間隔で抽出した幾 何補正のない静止画像から手作業でトレーサー中心の CRT座標を検出した.ついで,3次元射影法で歪みの ない水平座標値に変換し,1秒ごとの移動量から評価 された流速ベクトルを単純平均する方法をとった.

図-5にPTV解析の結果を示すが,流向は横断測線に概 ね垂直となっていたので,図では,流速ベクトルの大きさの横断分布を描いている.これよりP-1,P-2および P-3のPTV流速を1.95,3.50および4.35m/sと決定した.

(3) 1次検出流速の性質

(1)で作成した各点のLSPIV解析用画像について, Δt は,従来の目安(本文3.(2)参照)に従い, $5 \sim 10$ pix程度の輝度パターン移動量をもたらす1/6および1/3secの2種に変化させ, S_T は図-4を参考に40pix, B_D はPTV解析



図-7 移動平均された1次検出流速の変動

流速から推定される移流量の2倍程度に設定して, LSPIV解析の1次検出流速V₁を求めた.その結果を,最 高マッチングの判断がなされた第1,2画像のテンプ レート間における輝度の相互相関係数*R_c*との関係図と して示すと図-6のようである.

 V_1 のデータセットには, とくにP-2およびP-3の場合に 多数の異常値が含まれ, この傾向は $\Delta t = 1/3 \sec$ の場合 に著しい.そして, 異常値の可能性が高い検出値は R_c の値によらず高い頻度で出現しており, たとえば, 著者 らが従来とってきた R_c に異常値排除のための閾値を設 定するだけでは不十分であることがわかる.Δt が1/6sec になれば異常値は減少するように見えるが, P-2および P-3の場合に,異常値を排除した後に平均化操作の対象 となるであろう描点群の重心がPTV解析による流速レベ ルの下方にシフトする傾向が現れている.

図-7は, V₁のデータセットに含まれる異常値の検 出・排除法を見出すための一試みとして,まず,V₁の 時系列データセットに区間幅10の単純移動平均操作を施



図-8 Δt によるLSPIV流速の変化

し,この結果を R_c と第1画像のテンプレートの輝度の 標準偏差 S_B との積 R_cS_B に対して点描したものである. とくに $\Delta t = 1/3$ sec の場合に, R_cS_B がある値以上とな る範囲において異常データの発生頻度が減少する傾向が 明らかで, R_cS_B が異常値検出の有力なパラメターにな り得ることが示唆されている.なお, R_cS_B の代わりに R_c あるいは S_B のみを参照することについても検討した が,いずれも異常値検出用パラメターとしての有用性は R_cS_B より劣っていた.

(4) 選択的平均操作の方法

1次検出の流速データセットからいかにして異常値を 検出・排除し,適合性の高い時間平均流速を求めるかを 考えよう.前項において,すでに,1次検出の流速デー タへの移動平均操作がある程度有効なこと,および,移 動平均操作だけでは排除できない異常値を除くために R_cS_B が有用な参照情報になり得ることが示唆された. つぎの問題は,移動平均幅の設定基準と R_cS_B の利用法 などである.

ここで流体画像計測分野の状況を概観すると,移動 平均操作は実験室レベルのPIV解析でもよく行われてい るが,平均操作対象範囲の設定法は経験的である.一方, 異常値検出法としては,流れ場の連続性に着目して,注 目点の1次検出流速と周辺領域のそれの平均値と差に何 らかの閾値を与える方法,あるいは,1次検出流速のヒ ストグラムを利用する方法などが考えられている¹⁾.

さて,著者らは,上述のヒストグラムを利用する異常 値検出法からヒントを得て,つぎのような選択的平均操 作法を考案した.すなわち,流速の1次検出が適正なら ば,そのデータは洪水水面での変動流速と類似した統計 的特性を有するであろうから,この条件を満たすデータ のみについて選択的平均操作を施すというもので,具体 的な手順は以下のようである.

ある区間幅 N_A を設定し、単純移動平均の流速 V_{1M} を求める、

 $R_{C}S_{B}$ に閾値 $(R_{C}S_{B})_{TH}$ を設定し, $(R_{C}S_{B})_{TH} \leq R_{C}S_{B}$ の 条件で抽出した V_{1M} の歪度 γ_{3} と尖度 γ_{4} を計算する,



図-10 B_nによるLSPIV流速の変化

 $N_A \geq (R_C S_B)_{TH}$ を種々に変化させながら と を繰 り返して, $\gamma_3 \geq \gamma_4$ が洪水水面の変動流速におけるもの に最も近くなる $N_A \geq (R_C S_B)_{TH}$ の組み合わせを見出し, これに対応する V_{1M} のデータから時間平均流速を求める.

(5) Δt , S_T および B_D の設定基準

時間平均流速の計算には前項で提示した選択的平均操 作法を適用することを前提に,パラメター Δt , S_T およ び B_D の設定値がLSPIV解析の結果に及ぼす影響を調べ ることを通して,それらの適値を探索した.このとき, 平均操作法のパラメターである洪水水面の変動流速の歪 度 γ_{3F} および尖度 γ_{4F} は,禰津らの実験成果⁸⁾を参考に, それぞれ-0.3および3.25とした.また,平均操作用の V_{1M} を与える N_A と $(R_cS_B)_{TH}$ の組み合わせは, $|\gamma_3 - \gamma_{3F}|+|\gamma_4 - \gamma_{4F}|$ が最小となる条件で選定した.

まず,図-8は, S_T および B_D を本節(3)の場合と同様 な値に設定して Δt とLSPIV流速との関係を描くととも に,後者とPTV流速を比較したものである.ただし,図 では, Δt の大きさがビデオ撮影の基本周期である 1/30secの倍数で示されている.点P-1では Δt の広い範囲 でLSPIV流速とPTV流速がよく一致しているが,P-2お よびP-3では,2種の流速の良好な適合は Δt が概ね 1/3secの狭い範囲においてしか認められない.すなわち, 本検討の限りでは, Δt の適値は概ね1/3secということに なる. つぎに,図-9では, B_p を図-8と同様な値に設定する とともに, $\Delta t \ \epsilon 1/3 \text{sec} \ c \ c \ s_T \ \text{mLSPIV}$ 流速に及ぼ す影響を示す.P-1の結果は S_T によりほとんど変化しな いが,P-2とP-3では, $S_T \simeq 40 \sim 60 \text{pix}$ の範囲でLSPIV 流速とPTV流速の適合性が最も高くなっている.この範 囲は,本節(1)で触れた輝度パターンの最大スケール L_{max} の1.5 ~ 2倍に相当し,また,それが約40 \text{pix c mas } PTV 流速の適合性が十分に高いことから, S_T の設定基 準として, $S_T = (1.5 \sim 2)L_{max}$ が適切と判断される.

さらに,図-10では, $\Delta t = 1/3$ sec, $S_r = 40$ pixとし て, B_Dの影響を調べている.なお, P-1, P-2およびP-3 についてPTV流速と設定した∆t に見合う第2画像での 移動量 D。を求めると, それぞれ7, 12および15pixとな る . B_p が D_2 と同程度かそれ以下の範囲では , LSPIV流 速がPTV流速をかなり下回り,他方, B_p が D_2 の2倍以 上になると, P-1 の場合を除き, LSPIV流速がPTV流速 を越え, B, の増加とともに漸増している. B, が小さ い場合の結果は、探査領域を過度に制限したために、そ れを越える輝度パターンの移動量が計算上では高々 B_n と頭打ち的に過小評価され,逆に, P-2とP-3で B_nが大 きい場合の結果は,輝度パターンの寿命が短く,遠方に 新たに出現した類似のパターンを元のものと誤認識する 場合が多くあったためと推察される.以上より, B_n は D, の1.5~2倍が適切で, これ以下はもとより, 相互相 関ピーク検出の成功率を上げる目的で徒に大きくするこ ともまた好ましくないと言える.

最後に,LSPIV流速1次検出の解析パラメターを $\Delta t = 1/3 \sec$, $S_T = 40 \text{pix}$, $B_D = 25 \text{pix}$ に固定し,前 項で提示した選択的平均操作法も適用して,横断測線上 の流速分布を再解析した結果を図-11に示す.まず,原 映像のフレーム全体から作成した解析用変換画像ファイ ル(空間分解能0.1m/pix)を用いて全点の解析を一括処 理した結果をで示すとともに,PTV解析の結果と比較 している.LSPIV解析結果は,P-3より左岸側ではPTV 解析結果の代表曲線とよく一致しているが,右岸側では 過小な流速値を与えている.これは,粗い分解能の変換 画像を用いたためと判断し,右岸側の半領域のみについ て分解能を0.05m/pixと2倍にした変換画像を作成して再 解析してみた.この結果を図中ので示しているが, PTV解析結果との適合性が十分に高められている.

5. あとがき

本研究は,徳島県・吉野川に発生した大規模洪水の表面ビデオ映像を用いて,LSPIV解析法の信頼性向上に向けた実証的検討を行ったものである.まず,LSPIV解析の後処理としてなされる1次検出流速データから異常値検出・排除と平均化に対する新たな手法として,流速変動の確率分布特性に着目した選択的平均操作法を提案した.パラメターである時間間隔△t,テンプレートサイ



図-11 LSPIV解析とPTV解析による流速横断分布の比較

ズ S_{τ} および探査領域の辺長 B_{p} について,これらが解 析結果に及ぼす影響を調べながら,それらの適正な設定 要領を検討した.その結果, Δt は1/3sec程度, S_{τ} は解 析用画像の輝度パターンが持つ最大スケールの1.5~2倍 程度, B_{p} は別途概算した輝度パターン移動量の約2倍 に設定するのが適切であることが確認された.これらの 成果を用いて求められた表面流速の横断分布は,PTV解 析結果とよく一致し,著者らの平均操作法と見出された 解析パラメター設定要領の妥当性が確認された.今後は, 他の河川や多様な洪水イベントを対象としたケーススタ ディを通して,本成果の一般化を図る予定である.

参考文献

- 1) Markus, R. Willert, C and Kompenhans, J 著, 岡本孝司他訳: PIVの基礎と応用, 第3~6章, Springer-Verlag東京(株), pp.59-161, 2000.
- 2)藤田一郎・河村三郎:ビデオ画像解析による河川表面流計 測の試み,水工学論文集, Vol.38, pp.733-738, 1994.
- 3) 綾史郎・藤田一郎・柳生光彦:画像解析を用いた河川の洪水時の流れの観測,水工学論文集, Vol.38, pp.733-738, 1994.
- 4)藤田一郎・河村三郎:相関法における異常ベクトルの検出 と流速補正の新手法,可視化情報,Suppl. No.1, pp.43-46, 1992.
- 5) 藤田一郎・綾史郎・小澤純:河川表面流のモニタリング手 法LSPIVの改良,神戸大学都市安全研究センター研究報告, 第4号, pp.97-105.
- の林範之・金目達弥・藤田一郎: PIVによる洪水時河川流量 観測装置の開発,河川技術論文集,第8巻,pp.455-458, 2002.
- 7)藤田一郎:実河川を対象とした画像計測技術,2003年度 (第39回)水工学に関する夏期研修会講義集,Aコース,pp. A-2-1-A-2-20,2003.
- 8) 禰津家久:開水路流の乱流構造に関する基礎的研究,京都 大学学位論文,第5章,pp.58-76,1977.

(2006.9.30受付)