

PIV の実河川流速計測への適用性に関する研究

APPLICABILITY OF PARTICLE-IMAGE VELOCIMETRY TO MEASUREMENT OF ACTUAL RIVER FLOWS

戸田祐嗣¹・池田駿介²・西 亮樹³

Yuji TODA, Syunsuke IKEDA and Ryoki NISHI

¹ 正会員 学士(工) 東京工業大学助手 大学院理工学研究科土木工学専攻(〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1)

² フェロー会員 工博 東京工業大学教授 大学院理工学研究科土木工学専攻(同上)

³ 正会員 学士(工) JR 西日本

The applicability of particle-image velocimetry (PIV) to the measurement of river flows were examined under the various situations. The measurements of flow velocity at ordinary water level were conducted in Tama-river, in which biodegradable particles were used as tracers for PIV. The temporally-averaged velocity distribution measured by using PIV shows a good agreement with that obtained by using ultrasonic velocimetry. The series of laboratory tests of PIV on an open channel flow was conducted by varying the angle of depression for video recording, the results of which indicate that the accuracy of PIV declines when the angle of depression is less than 15 degrees. The present analysis was applied to the measurement of flood flow in Tsurumi-river, and the discharge of the flood flow could be estimated within 10% errors.

Key Words: Particle-image velocimetry, river flows, angle of video recording, discharge of flood flow

1. はじめに

流れ場の瞬間的な空間構造を計測するための手法として、Particle-Image Velocimetry (PIV) や Particle-Tracking Velocimetry (PTV) といった画像解析を用いた流速計測法¹⁾が用いられている。その中で、PIV はアルゴリズムの明確さや多様な流れ場への拡張性の高さから、近年、一般的に用いられる流速計測法の一つとなっている。

これらの画像解析による流速計測は、瞬間的な空間分布が得られる、非接触計測が可能、計測が容易、などの長所があり、実験水路内での乱流構造の把握、実河川の流れ場の空間構造の把握、洪水時の流れ場の計測といったような、点計測用測器による流速測定が困難な場合などに高い効用を発揮する。

このような観点から、画像解析による実河川流速計測が現在まで数多く行われてきている。先駆的な研究とし

て、木下²⁾、木下ら^{3),4)}は洪水時の流れに見られる土砂濃度の濃淡や洪水流表面を浮遊するゴミ、波紋等をトレーサとして、航空写真を用いた PIV を実施し、洪水流中に存在する大規模組織構造を定量的に明らかにした。また、近年では、航空写真解析に代わり、より簡便に利用できる計測法として、斜め上方から撮影されたビデオ画像を用いた PIV^{5),6)}が実施されている。斜め撮影画像を用いた PIV は、撮影用の特別な施設を必要とせず、今後の河川流況・流量観測への発展性が期待される。

そこで本研究では、様々な流れ場に対して、斜めビデオ撮影による PIV を実施し、その精度検証および適用性について検討することを目的とする。

2. 現地観測および室内実験

本研究では、様々な流れ場に対する PIV の適用性を検

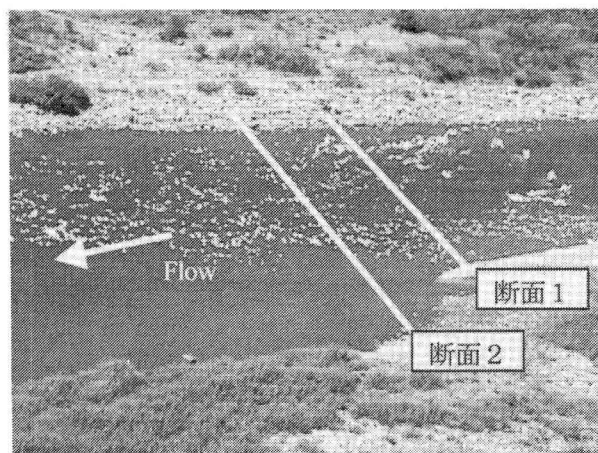


図-1 平水時多摩川観測 (2000.8.1)

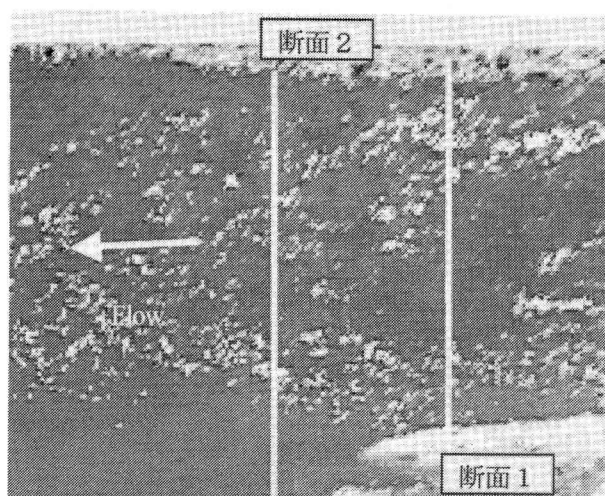


図-2 歪み補正後画像

討するため、平水時の河川流れ、実験水路内の流れ、洪水時の河川流れに対して観測および室内実験を実施した。それぞれの観測・実験方法について以下に記す。

(1) 平水時の河川流速の計測

観測は、2000年8月1日に多摩川河口より58.6km地点（東京都青梅市、川幅25～35m）で実施した。平水時の河川では河川表面に土砂濃度のむらや波紋などがなく、PIVに必要な画像内の輝度の濃淡情報が得られないため、人工的にトレーサを投入した。トレーサは、環境に配慮して、水中に投入後5分ほどで溶解し、その後、水中微生物によって生分解される緩衝剤（Vフォーム、㈱日祥製）を用いた。トレーサの形状は、直径2cm、長さ5～10cmの中空円柱形であり、水中に投入して1分後には70%程度が水没する。観測当日は晴天で微風であったため、トレーサの移動に対する風の影響は見られず、本トレーサによって精度良く河川水表面流速追従が行えるものと判断される。画像撮影は観測対象地に隣接するマンションの屋上からデジタルビデオカメラ（DCR-VX1000、ソニー（株）製、解像度640×480）を用いて行った。撮影時の俯角はおおよそ40度程度である。撮影されたビデオ画像（図-1）から、画面内にトレーサが十分に分散している40秒間を抽出し、そのフレーム画像を0.5秒間隔でPCに取り込んだ。ビデオ画像は斜め上方から撮影されているため、画像には歪みが生じている。その歪みを取り除くため、以下で示される二次射影変換式⁶⁾を用いた。

$$X = \frac{b_1x + b_2y + b_3}{b_4x + b_5y + 1}, Y = \frac{b_6x + b_7y + b_8}{b_4x + b_5y + 1} \quad (1a, b)$$

ここに、 X, Y : 物理（実）空間上平面座標値、 x, y : ビデオ画像内座標値、 $b_1 \sim b_8$: パラメータである。 $b_1 \sim b_8$ の値については、画像内に写し込まれているあらかじめ物理

空間上平面座標値の測量を行った6点の標識点に対して、最小自乗法を適用し決定した。歪み補正後のビデオ画像の一例を図-2に示す。ある時刻の画像を実スケールで1.7m×1.7mの部分画像（テンプレート）に分割し、微少時間後（ここでは、0.5秒後とした）の画像内で、相互相関係数値を最大とするテンプレート位置を検索した。テンプレートの大きさは、実際に相関解析を行いながら試行錯誤的に決定した。テンプレート間の移動距離を画像の時間差（=0.5秒）で除すことによって流速を算出した。但し、検出された相互相関係数値が0.4以下の場合は、追跡が正確に行えなかったものと判断し、欠測としている。以上により得られた流速ベクトルデータから、誤追跡されたデータを取り除くため、計測点の周囲15点の流速データの平均値を求め、計測点のデータがその平均値より±50%以上異なっていた場合には、過誤ベクトルと判断し除去した。過誤ベクトルと判断された地点や相関解析時の流速欠測点には、周辺9点のデータからの距離の逆数による重みを付け平均値を補間した。

また、PIVの精度検証のために超音波流速計を用いた河川表面流速計測を実施した。河川内に2つの横断側線を設定し、各横断側線上に2～3m間隔に測点を配置した。各測点では、水面より10cm下方地点における流速を3次元超音波流速計（Vector, Nortek製）を用いて、2Hzで40秒間計測した。

(2) 室内実験

画像撮影角度がPIVの精度に与える影響を明らかにするため、異なった角度から撮影されたビデオ画像に対してPIVを行った。循環式矩形断面広幅開水路（幅1.2m、長さ10m）内の流れに対して、撮影俯角7、15、30度において画像撮影を行った。図-3に撮影俯角30度におけるビデオ画像の一例を示す。実験水路にはトレーサとして、平均粒径100μm、比重1.04のポリスチレン・ビーズ

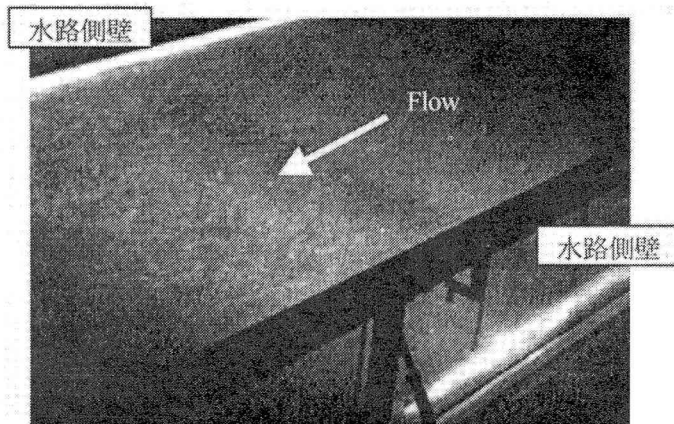


図-3 室内実験時のビデオ画像（撮影俯角：30度）

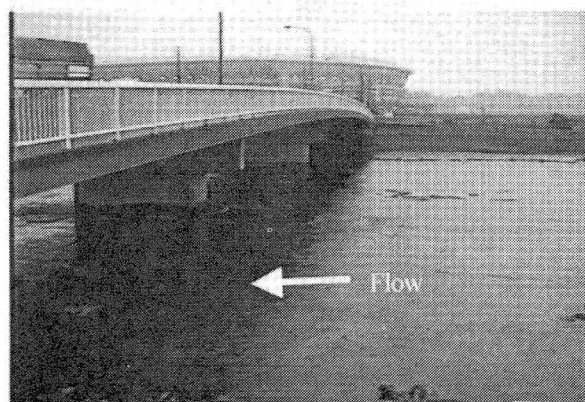
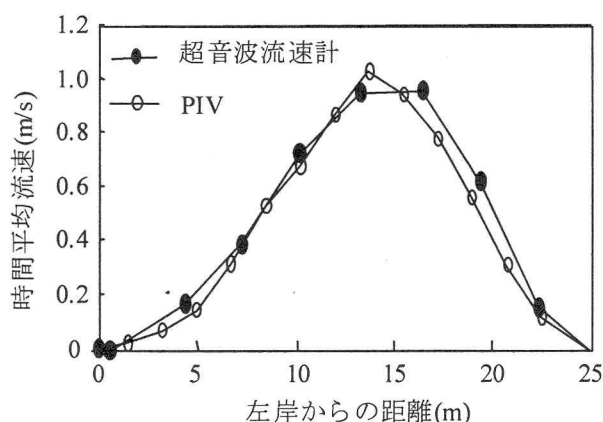
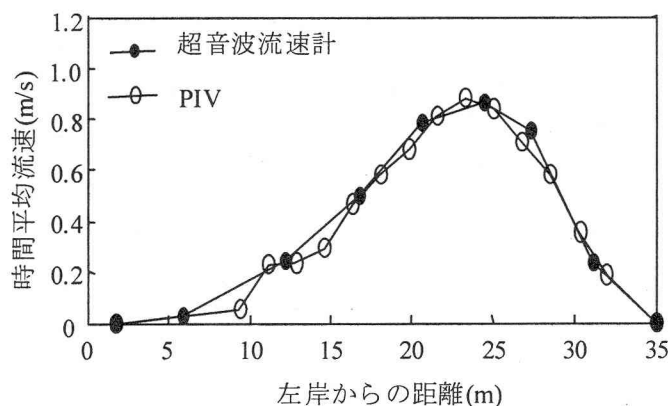


図-4 鶴見川洪水時画像（1999.8.14）



(a) 断面1



(b) 断面2

図-5 多摩川平水時における時間平均流速（流下方向成分）の横断分布

を大量に投入した。水表面付近には、厚さ 2mm のレーザー・シートを照射し、シート内のトレーサの挙動をビデオ画像に収録した。得られたビデオ画像を 0.2 秒間隔で 20 秒間デジタル化し、それらに 2. (1)と同様の手法で歪み補正を行った。相関解析に用いるテンプレートのサイズは実空間で 4cm×4cm の大きさに設定した。このテンプレートサイズでは、1 テンプレート内に 4, 5 個以上のトレーサが存在しており、相関解析に必要となる輝度分布を得るのに十分であると思われる。PIV より得られた流速データに対して、2. (1)と同様の方法で過誤ベクトルの除去および欠測点への流速補間を行った。

また、PIV の精度検証を行うため、画像撮影を行った領域内の横断測線上で、水表面近傍（水表面から 5mm 下方）の流下方向流速成分をレーザー流速計を用いて計測した。流速測定の際には、水表面の乱れでレーザービームが屈折する事を防ぐため、水表面にシャーレを浮かべ、そのシャーレを通して、レーザービームを水中投射した。計測は 100Hz で 1 分間行った。

(3)洪水時の河川流速の計測

ここでは、洪水流に対する PIV の適用性について検討を行った。解析対象画像は、建設省京浜工事事務所により撮影された 1999 年 8 月 14 日の鶴見川河口部から 13.9km 地点の洪水流画像（図-4）である。撮影時刻については、正確な記録が無かったため特定することが出来なかったが、浸水領域、画像内に写り込んだ橋脚の影の向きなどからおおよそ 10～12 時の間であったものと判断される。また撮影俯角に関しても、撮影時の正確な記録は残っていないが、撮影場所と撮影領域の関係から検討したところ、おおむね 10 度前後の俯角で撮影されたものと思われる。撮影された 18 秒間の洪水流況画像を 0.2 秒間隔でデジタル化し、画像内に写っている橋脚や標識等の構造物の座標を用いて、歪み補正画像を作成した。洪水流水表面に浮かぶゴミや波紋の大きさを参考にしてテンプレートサイズを 1.3m×1.3m とし PIV を行い、過誤ベクトルの除去および欠測点への流速補間を行った。

3. 観測および実験結果

(1) 平水時の河川流への適用性

図-5にPIVおよび超音波流速計で得られた時間平均流速(流下方向成分)の横断分布を示す。PIVによる流速計測値と超音波流速計による流速計測値は、10~20%程度の範囲で異なっている地点も見られるものの、全体的な流速分布は良好に再現されている。このことから、適切なトレーサを河川内に投入することによって平水時の河川においてもPIVにより時間平均流速の計測が可能であることが分かる。

図-6に断面2におけるPIVおよび超音波流速計による流下方向流速成分に関する乱れ強度

度($=(\overline{u'^2})^{1/2}$)を示す。主流速が大きくなる

左岸から20~25m付近で乱れ強度が大きくなっていることが、超音波流速計、PIVともに捉えられている。しかし、PIVによる乱れ強度は値の変動が大きく、乱流統計量については、现阶段では十分な精度を確保する事が困難であるものと思われる。また、全体的には、超音波流速計による乱れ強度と比較して、PIVによる乱れ強度の値が小さくなる傾向が見られる。この過小評価については、以下の原因が考えられる。本観測では実河川にトレーサを投入しているため、トレーサ量や投入方法の制約のため、実験室内でのPIVのように、水表面全体へのトレーサ分散を確保することが困難である。そのため、相関解析時の流速欠測点や過誤ベクトル検出地点数が増加し、それらに対して周辺の流速分布から補間を行うこととなる。その結果、補間による乱れのスムージングが生じ、PIVによる乱れ強度が、超音波流速計による乱れ強度より小さくなったものと推察される。

(2) 室内実験結果

図-7に実験水路内の流れにおけるPIVおよびレーザー流速計による時間平均流速(流下方向成分)の横断分布を示す。撮影俯角が30度、15度においては、PIVによる流速値はレーザー流速計で得られた測定結果とほぼ一致している。一方、撮影角度が7度になると、PIVの結果は全般的に3.0~5.0cm/sほど過小評価されたものとなっている。

図-8に乱れ強度(主流速方向成分)の横断分布を示す。乱れ強度は全般的にレーザー流速計より小さな値を示している。この原因としては、レーザー流速計は乱れの高周波成分まで計測が行えるが、PIV

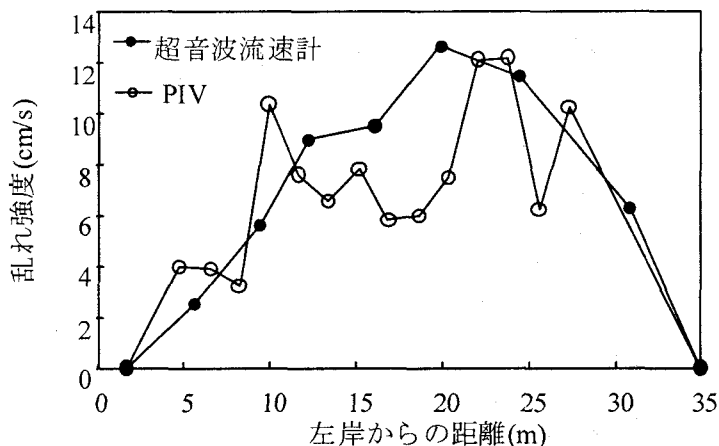


図-6 多摩川平水時における乱れ強度(流下方向成分)の横断分布

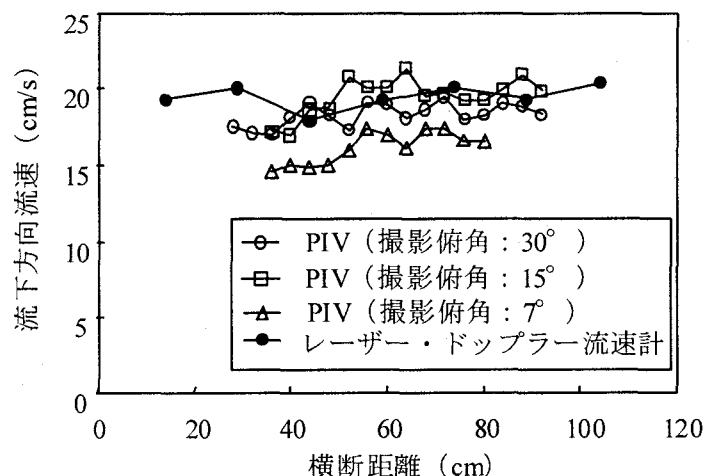


図-7 時間平均流速分布(流下方向成分, 室内実験)

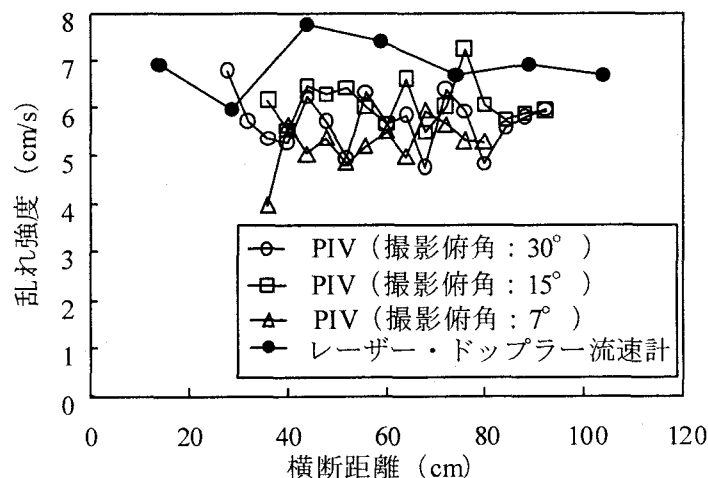


図-8 乱れ強度分布(流下方向成分, 室内実験)

による計測では高周波の乱れが捉えきれていないため、乱れ強度が過小評価されたものと思われる。PIVでは、

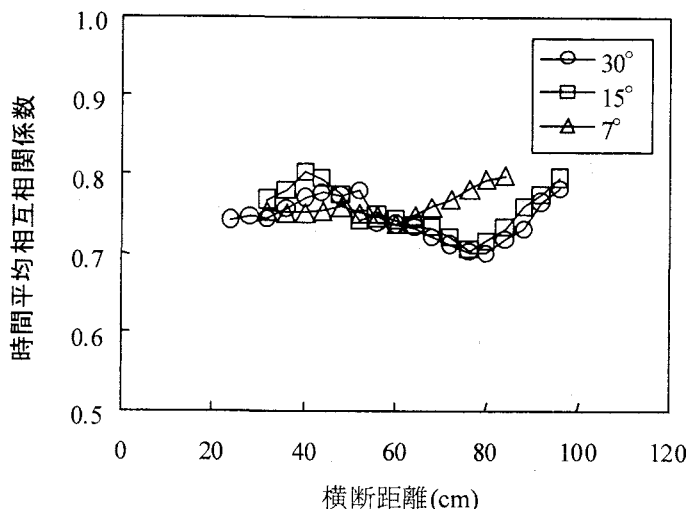


図-9 時間平均相互相関係数（室内実験）

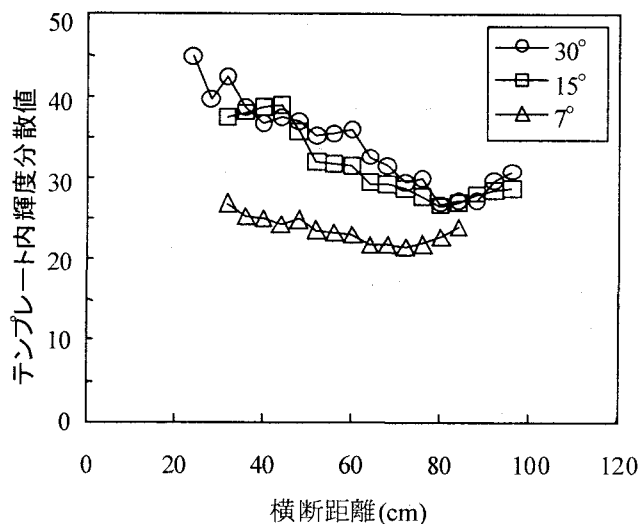


図-10 時間平均テンプレート内輝度分散値

相関解析を行う画像間の微小時間差内に、画像内のトレーサ群が有意な距離を移動している必要があるため、画像間の時間差をある一定値以上に小さく取ることが出来ない。そのため、乱流統計量に関する有意なデータを取得するためには、流速計測領域を小さな領域に限定するか、高解像度の撮影機器の使用が必要となり、本研究で対象とするような、比較的広範囲な領域の流速計測時においては、現段階では十分な精度が確保出来ないものと思われる。

平均流速分布でみられたような撮影角度の変化に伴う、解析精度の低下についてより詳細に検討するため、相関解析時に計算される相互相関係数を各横断地点において時間平均した値を図-9に示す。撮影俯角や画像の奥行き方向に関わらず相互相関係数値は0.7～0.8付近の値を示しており、相関係数値からは解析精度の低下については有用な情報は得られない。そこで、相関解析時のテンプレートに含まれる輝度情報量について検討を行った。各瞬間におけるテンプレート内の輝度分散値を算出し、それらを時間平均したものを図-10に示す。輝度分散値は、画像奥行き方向（横断距離が増加する方向）に低下している。これは、ビデオ画像の解像度が奥行き方向に低下することに対応しており、解像度の低下とともに、相関解析に必要な輝度分布情報量が減少していることが分かる。また、撮影俯角が15度と30度の場合には、輝度分散値の間に有意な差は見られないものの、撮影俯角が7度になると、その値が低下していることが分かる。この結果から、撮影俯角が7度程度まで低下すると、画像内の輝度分布情報量が全体的に低下し、十分なパターンマッチングが行えなくなる可能性が示唆される。一方で、前述のとおり、流速追跡の目印となる相互相関係数値は撮影俯角への依存性が小さい。これらのことから、十分な輝度分布情報が得られない場合には、濃淡分布が小さな画像間同士で比較的高い相関係数値を

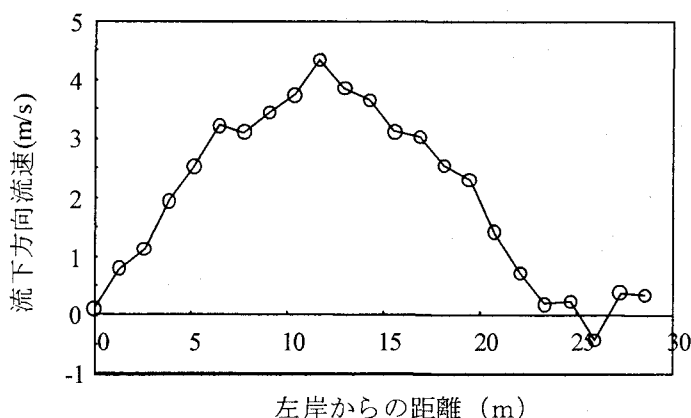


図-11 時間平均流速分布（流下方向成分、鶴見川洪水時）

示し、流速の誤追跡が生じることが分かる。本研究においては、撮影俯角が7度のケースにおいて、このような誤追跡が発生し、PIVによる流速計測精度の低下が生じたものと思われる。過小評価になった原因については、詳細には明らかになってはいないが、解像度が低下し輝度情報量が減少した場合、トレーサ粒子による輝度濃淡では無く、撮影条件等によって画像内に入り込む元々の光の場の分布特性を追跡し、その結果、ほぼゼロベクトルに近い値が検出されるようになることが一因であると思われる。

(3) 洪水流への適用性

図-11にPIVによる鶴見川洪水流の表面流速測定結果を示す。流速分布は、左岸から10～15m付近の河道中央付近で大きな値をしめし、高水敷上と思われる左岸から23m以上離れた地点では流速は小さな値を示している。鶴見川洪水時には、他の流速計による流速測定は行っていないものの、PIVによって地形変化に対応した大局的

表-1 浮子観測と PIV による流量推定値の比較

時刻	10:00	11:00	12:00
水位(m)	5.52	5.68	5.54
浮子観測 流量 (m ³ /s)	337.4	365.9	340.9
PIV 算出流 量 (m ³ /s)	322.6	334.1	324.3

な流速分布は再現可能であることがわかる。

PIV による表面流速計測値と鶴見川断面地形図を用いて、流量算出した結果を表-1 に示す。流量算出時には、鉛直方向の流速分布に対数則を仮定している。また、本研究で用いた鶴見川洪水時画像は撮影時刻が 10:00～12:00 の間で特定できていないため、10:00、11:00、12:00 のそれぞれの時刻の水位に対して、流量算出を行い、その結果を示している。算出された流量は、浮子観測による流量と比較して 10%程度過小評価となっている。流量算出時に用いた対数則を仮定することへの信頼性については現段階では検討を行っていないものの、流量が過小評価となる一因として、本解析に用いた画像が撮影俯角 10 度前後の小さな角度で撮影されており、室内実験時に見られたように表面流速を過小評価した可能性が考えられる。

4. 結論

様々な条件において、ビデオ画像による PIV の適用性を検討した結果、以下の成果が得られた。

1) 平水時の河川流れの計測に対して、PIV を適用した結果、流れへの追従性が高く、ビデオ画像内に明確に写り込むトレーサを河川内に投入する事によって、精度良く

河川水表面近傍の時間平均流速の計測が行えることが示された。

2) 室内実験の結果、撮影俯角が 7 度程度まで小さくなると、画像解像度の低下により、濃淡情報量が減少し、PIV による流速計測精度が低下することが明らかになった。

3) 鶴見川の洪水流に対して、PIV を適用した結果、洪水流量を 10%程度の誤差範囲内で算出する事が出来た。

謝辞：本研究を行うにあたり、神戸大学都市安全研究センターの藤田一郎助教授から生分解性のトレーサをご紹介して頂いた。また、本研究は日本学術振興会科学研究費補助金基盤研究(A)(2) (課題番号：11305035, 研究代表者：池田駿介) および同奨励研究(A) (課題番号：11750451, 研究代表者：戸田祐嗣) の補助を受けたものである。記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 例えば、Ronald J. Adrian: Particle-Imaging Techniques for Experimental Fluid Mechanics, *Ann. Rev. Fluid Mech.*, pp.261-304, 1991.
- 2) 木下良作, 宇民正, 上野鉄男: 洪水時河川に現れる大規模渦について, 第 23 回乱流シンポジウム講演論文集, pp.329-334, 1991.
- 3) 木下良作, 宇民正, 上野鉄男: 洪水流航空写真の画像解析, 写真測量とリモートセンシング, Vol.29, No.6, pp.4-17, 1990.
- 4) 木下良作, 宇民正, 上野鉄男: 蛇行河道の下流遷移と大規模渦列, 地球, 号外 No.8, pp.174-180, 1993.
- 5) 油谷利明, 露口肇, 綾史郎, 藤田一郎: PIV 計測による河川流の表面流速特性, 河川技術に関する論文集, 第 5 巻, pp.41-46, 1999.
- 6) 藤田一郎: トレーサを利用した実河川水制周辺流れのビデオ画像解析, 水工学論文集, 第 42 巻, pp.505-510, 1998.

(2001. 4. 16 受付)