

既設ビデオカメラを用いた画像解析法による 中小河川の流量観測のためのカメラ設定方法 および解析方法に関する研究

Optimal viewing angle and image analysis method for measuring flood discharge of
small-sized river using existing CCTV system

椿 涼太¹・藤田一郎²・眞間修一³・竹村仁志³・金原健一⁴

Ryota TSUBAKI, Ichiro FUJITA, Syuichi MAMA, Hitoshi TAKEMURA and Kennich KINNBARA

¹ 正会員 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)

² 正会員 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 八千代エンジニアリング株式会社 総合事業本部 河川部 (〒 161-8575 新宿区西落合 2-18-12)

⁴ 愛知県 尾張建設事務所 維持管理課 (〒 460-0001 名古屋市中区三の丸 2-6-1)

In this study, a Closed-Circuit TeleVision (CCTV) system, installed for the monitoring purpose, is utilized for measuring flow rate during flood. The procedure to determine both angle and scale-factor of the camera is described. Then, image analysis techniques, namely the marker tracing method and PIV method, are applied to the video images recorded by the camera, and the results by these methods are compared with each other including the conventional float method. In addition, the accuracy of the respective methods are discussed in detail. Finally, a set of low-quality video images, recorded during a flood in thunderstorm occurred under the dark ambient condition (mid-night), is analyzed and transition of flow rate during the event is successfully estimated in detail.

Key Words: Discharge measurement, CCTV, video image, image analysis, small sized river

1. はじめに

中小河川は、大規模な河川に比べ、流域面積が小さいため降雨から流出までの時間が短く、また降雨パターンによっては短期間に流量が増大することもある。市街化が進んだ流域では、このような特徴はさらに顕著となる。出水時の流量観測には一般的に浮子法が用いられるが、中小河川では、上記の出水特性のため、ピーク流量の観測が間に合わない場合がある。また中小河川を管理する都道府県等は、多数の管理河川を抱える反面、予算や人員の制約があり、測線数や観測回数などに限りがあり、十分な観測の実施が困難な状況にある。

近年では中小河川においても防災情報システムの整備が進み、光ファイバーネットワークの整備と併せて、河川水位・雨量・堤防の状況や出水状況の画像等の情報収集や提供が可能となりつつある。このような施設を利用して、流速・流量観測を行うことができれば、既存の施設を有効に利用しつつ、従来の流量観測業務の課題である、測線数や観測回数の制約、ピークの欠測といった問題を解消することができ、より確実な流量情報の収集・蓄積が可能となる。

本研究では、藤田ら¹⁾により開発されている画像解析技術をベースとして既設の画像情報収集設備 (CCTV:

Closed-circuit Television) および水位観測施設を用いて中規模河川の流量情報の取得を試みることで、中小河川での流量観測の課題の解決を図る際の問題点とその対処法について検討を行った。

2. 対象河川区間

本研究では、愛知県が管理する二級河川である天白川水系の流量計測を行う。天白川は、標高約 170 m の三ヶ峯付近を源に、いくつかの支川を合流し名古屋市内を通過して伊勢湾に注ぐ、河川延長約 21.5 km、流域面積約 118.8 km² の河川である²⁾。平成 9 年時点の流域内の土地利用は、宅地等の市街地が約 55 % となっており、上流域まで市街化が進んだ流域となっている³⁾。天白川は、伊勢湾台風、昭和 45, 46 年の洪水被害、平成 12 年の東海豪雨による被災を契機として治水事業が進められ、引堤、河床掘削等の河道改修とともに、ポンプ増強や雨水貯留施設等の内水対策が進められている²⁾。また、ソフト対策の一環として、河川監視カメラ (CCTV、合計 6 基) の設置や光ファイバーネットワークの整備を実施すると共に、平成 20 年 6 月から野並橋上流に設置された天白川水位観測所を基準地点として洪水予報の開始を行っている。天白川では東海豪雨後

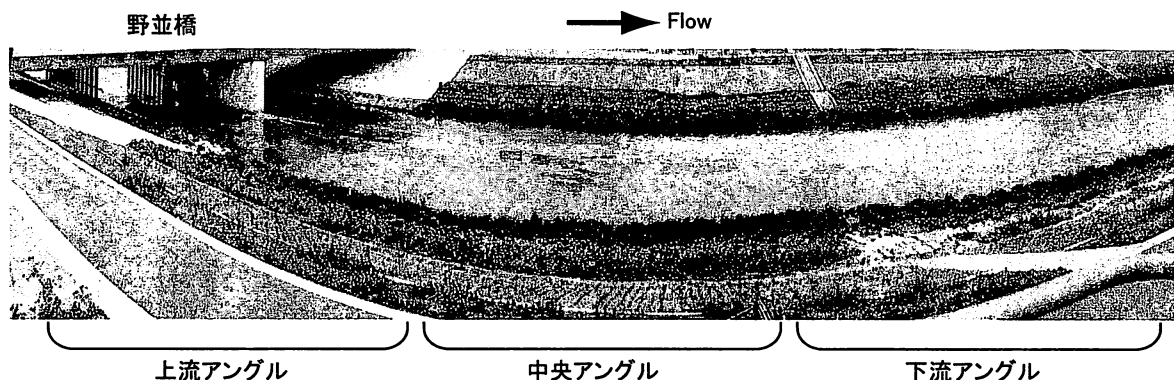


図-1 野並橋カメラの撮影画像のパノラマ図

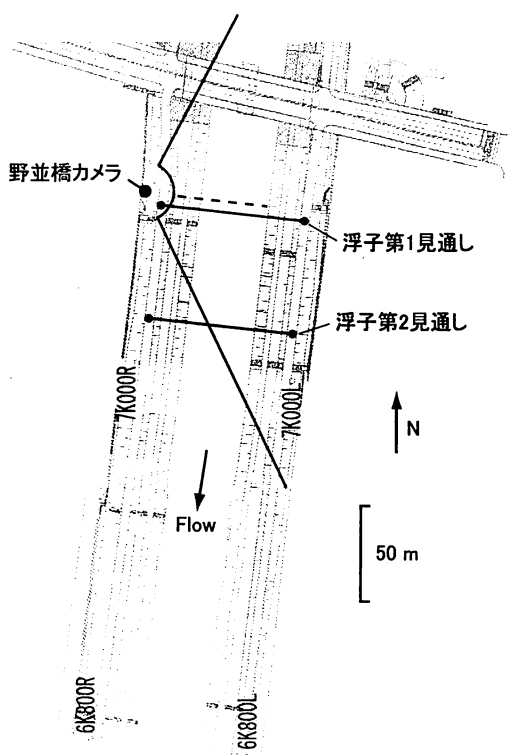


図-2 野並橋近辺の平面図とパノラマ図の撮影範囲

に再度災害防止対策を図るために、大規模な河道の拡幅及び河床掘削を実施しているため、洪水予測精度確保や維持管理の観点から、河道改修後の流況を早期に把握することが求められた。そこで本研究では、水防基準点である野並地点（河口から約 7.4 km）付近に設置された CCTV カメラ（野並橋カメラ）を利用して、流量計測を実施することとした。野並地点は川幅約 70 m で、平均河床高は約 0.3 m (T.P.)、平均河床勾配は約 1/850、計画高水流量は $1150 \text{ m}^3/\text{s}$ 、計画高水位は 7.12 m (T.P.) となっている²⁾。

3. 計測準備

既設の CCTV カメラを用いて画像解析による流量観測を行う場合、カメラの位置は固定されており、カメラの撮影角度およびズームを調整して、画像解析による流量観測に適した撮影範囲を設定する必要がある。図-1 に示したのは、野並橋カメラの撮影アングルをいくつか変えて撮影した画像をつなげたパノラマ図である。撮影範囲は図-2 に示した平面図の野並橋カメラ（丸印）の右側の扇型の範囲に相当する区間である。カメラのアングルは、より広い範囲に可動することが可能であるが、画像解析を行う上では、水面がはっきり確認でき、流れ方向の画像上の分解能を確保するため、図-1 より下流側の画像は解析が困難である。流れ方向の画像の分解能について補足すると、側岸から撮影する場合、流れに平面的に直角に撮影する場合（図-2 中の点線で示した方向）に、もっとも高分解能となり、平面的な角度が直角からずれると急激に分解能が低下することとなる。

図-1 に示した撮影範囲の中で、上流・中央・下流のアングルの比較を行う。上流アングルでは、橋脚が撮影されることから水位上昇が定量的に確認でき、流況の把握には適したアングルであるが、流量算定を目的とした場合、上流側の水面が橋によって隠れるため、解析に利用できる水面の面積が狭く、また橋脚周辺に複雑な流れが発生するという問題点を有する。中央アングルでは、水面を広く撮影でき、画像の分解能の観点でも最も有利であるが、本地点に関しては、橋脚後流の影響による流れの偏りが懸念される。下流アングルについては、水面が広く撮影できるとともに、浮子観測の見通し区間とオーバーラップするため、浮子法との比較や、データ蓄積という点で有効なアングルである。以上の検討により本地点に関しては、下流アングルを最適アングルと判断し洪水画像の記録を実施することとした。ただし、アングル検討前に出水が発生したケースについては、上流アングルにより録画されたものを利用して流量計測を行う。

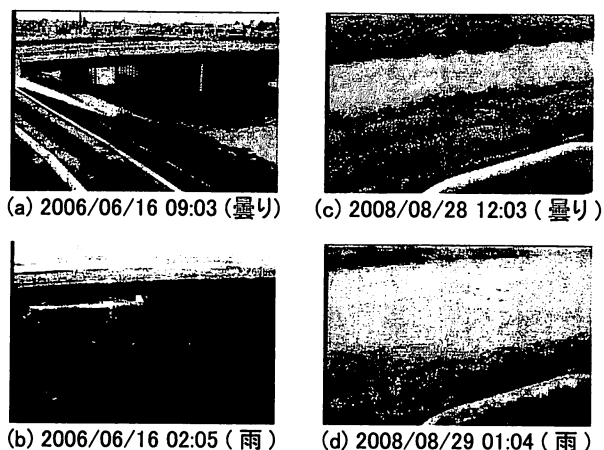


図-3 記録画像の比較 (a, b および c, d はそれぞれ同一地点の昼と夜の画像)

その他、撮影アングル設定の注意点として、撮影範囲に街灯が入っていると、夜間撮影においてカメラの明るさの自動調整機能が働き、街灯により照らされた範囲に合わせてカメラの明るさが調整され、水面の画像上の明るさが極端に低下するため(図-3a, b)、街灯を含めないようなアングル設定(図-3c, d)が望ましいことがわかった。

野並橋カメラの映像は、IP エンコーダにより 720 × 480 ピクセル、30 FPS の MPEG-2 (6Mbps) に符号化され、河道沿いに敷設された光ファイバーネットワークを通過して、サーバーへと伝送される。MPEG-2 で符号化されたデータは、高画質であるが、時間あたりの容量が大きいため、データ蓄積が困難である⁴⁾。そのため、MPEG-2 で伝送された画像データは、354 × 240 ピクセル、5 FPS の MPEG-4 (12 kbps) に変換され 1 週間保存された後に、保存操作を行っていない映像は破棄される。この保存用の MPEG-4 データは、時間あたりの容量を削減しつつ、連続的な映像記録を保管することを狙った設定であり、低画質であるため画像解析は比較的困難である。

4. 解析手法

画像から流速を求める方法には、二時刻の輝度の空間分布のパターンマッチングを行う PIV 法、各時刻でのマーカーの位置の変化を追跡する PTV 法、時空間断面画像上の輝度勾配に着目する STIV 法⁵⁾などが存在する。河川画像の表面流速の計測を目的とした場合、適度なトレーサー散布を行った場合には、いずれの手法でも解析が可能である。また、水面の微小な波や色のムラに起因する自然発生的なパターン(波紋)を対象とする場合は、PIV 法や STIV 法⁵⁾が利用可能であるが、ある程度明瞭かつ安定したマーカーの存在が前提となる PTV 法では、トレーサーを人為的に散布するか、泡の塊や流木などをトレーサーと見立てて解析するこ

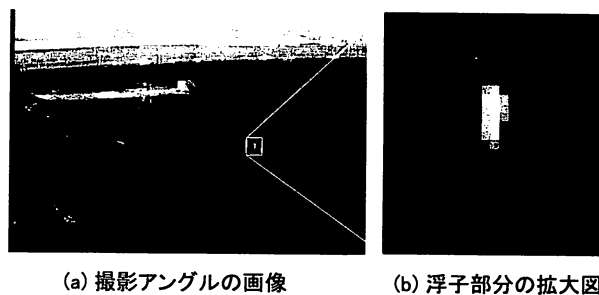


図-4 記録画像上の発光浮子

ととなる。

本研究では、洪水中の記録画像として MPEG-4 を利用するため、フレームレートが 5 FPS と小さく、データ圧縮によるノイズが比較的強い条件となっている。そこで、PIV 法を用いた水面の自然発生的なパターン(波紋)の解析と、浮子および流木を対象としたマーカー追跡による表面流速の算定を行うこととした。パターンのマッチングには、相互相関法を用い、撮影画像空間上の速度を算定した後に、画像空間上の速度ベクトルに対して幾何変換を適用して実空間の速度(m/s)に変換した。マーカー追跡については、画像が低画質であり、また浮子や流木が散発的に流れてくることから、PTV 法による自動追跡は行わず、画像上で目視で位置座標をピックアップすることとした。目視によるピックアップによる座標誤差を 2 ピクセル以内と見積もると、画像の幅は 354 ピクセルであるため、一つのマーカーが画像に入った位置と、出た位置より算定される平均移動速度は、ピクセルレベルでは 1 % 程度の誤差で算定可能である。ただし、実際スケールの速度(m/s 等)に変換する際には、幾何補正による系統的誤差が加わることとなる。図-4 は、浮子法による流量観測を実施している際の記録画像の例である。出水は夜間に発生したため、発光浮子が用いられている。記録画像は MPEG-4 で符号化された動画を展開した比較的低画質のものであるが、浮子の位置は明確に確認することができる。この浮子の位置を各時刻でピックアップして、座標変換を施したものを平面図上へプロットしたものが図-5 である。このような画像解析手法の利用により、従来の浮子法の課題点の一つである、橋脚後流等の影響による浮子の軌跡の偏りを直接把握することが可能である。本研究では、発光浮子の他に、流木を表面浮子と見立てて同様の追跡を行い、流下速度の算定を行った。

5. 結果

(1) 浮子観測とマーカー追跡法の比較

画像による流量観測法の中の、マーカー追跡法の精度を確認するため、従来法の浮子観測結果と、マーカー追跡により算定された速度の比較を行う。図-6 に示すのは、2006/6/16 の午前 2:00 前後に発生した出水時(ピー

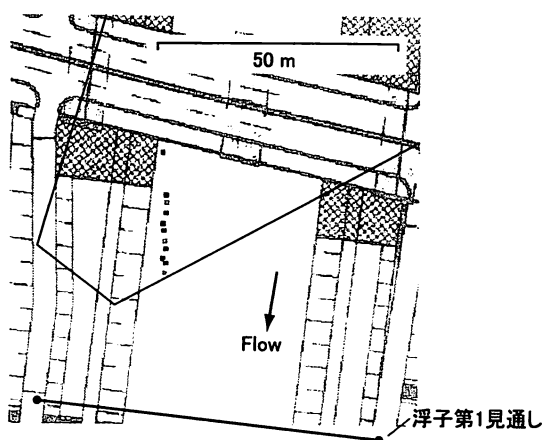


図-5 浮子の軌跡の平面図へのプロット

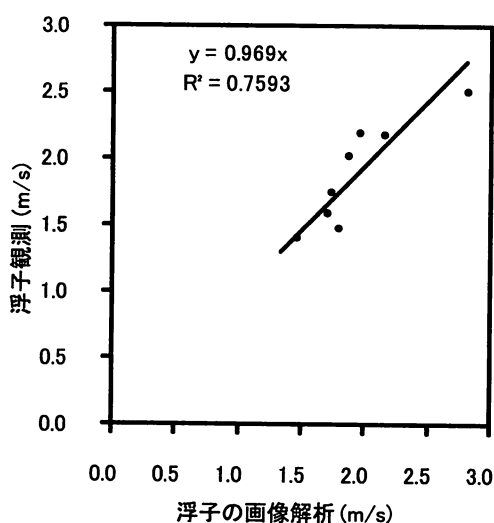


図-6 浮子観測結果と画像解析による浮子速度の比較

ク流量は約 $250 \text{ m}^3/\text{s}$) の浮子観測によるそれぞれの浮子の平均流下速度と、対応する浮子が画像上で確認できたもののマーカー追跡結果から算出した平均流下速度を比較したものである。本出水については、撮影アングルの検討以前に出水が発生したため、上流アングル(図-1を参照)において画像が記録されている。そのため、浮子の投下直後の限られた流下区間しか確認できず、浮子観測の対象である見通し区間と直接対応していない。しかしながら、図-6において値のばらつきはみられるものの、浮子観測結果と概ね同様の結果が得られている。浮子観測結果の誤差も存在するため、本データのみからマーカー追跡法の精度を断定することはできないが、少なくとも計測原理より、マーカー追跡法は、幾何変換が適切に行われた場合、従来の浮子観測結果と同等以上の精度をもつ。以上の検討により、マーカー追跡法は流速の算定方法として有効であると推察される。

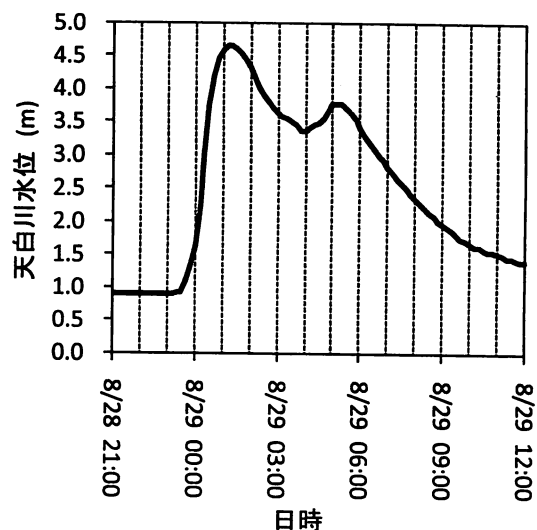


図-7 2008/8 出水のハイドログラフ(グリッドは1時間間隔)

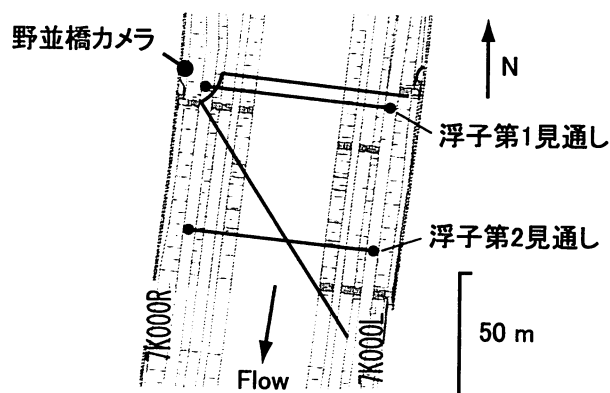


図-8 2008/8 出水の撮影アングル

(2) マーカー追跡法による流量観測

流木を表面浮子と見立てたマーカー追跡により、2008/8/29の午前01:00前後に発生した出水(ピーク流量は約 $330 \text{ m}^3/\text{s}$)の流量を算定した。図-7は、本出水での天白川水位観測所のハイドログラフである。8/28日の23:30ごろから水位が急激に立ち上がり、約一時間半後の8/29日の01:10ごろにピーク水位である4.66 mに達しており、その後なだらかに逓減しつつ朝方の05:00付近で第二の小さな水位ピークがみられる。

図-8に平面図上に本出水の撮影アングルを示した。本アングルは、第3章で検討した結果を踏まえたもので、画像上の解像度、夜間撮影の画質、浮子観測との比較等を考慮して決定されたものである。

図-9は、8/29日の01:00ごろの記録画像のスナップショットであり、確認できる流木の位置を矢印で示している。流木の数(密度)は水位や流量の増加にほぼ比例して増減(ピーク時には約15分間で21個確認)し、図-9に示すように、本河川では出水ピーク時に多数が流下するため、出水時のトレーサの代替として利用



図-9 2008/8 出水の撮影アングル

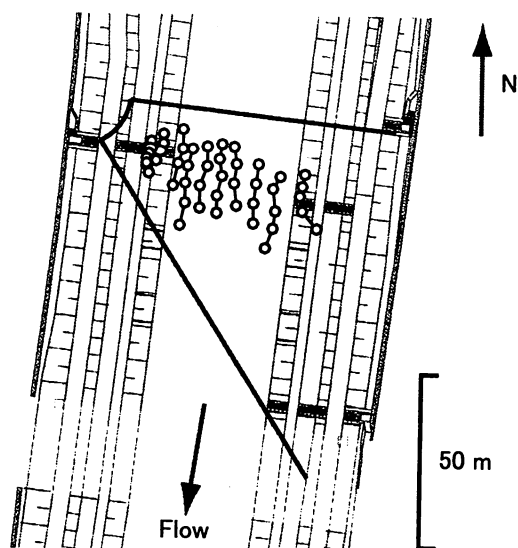


図-10 8/29 日の 01:10~01:35 に確認された流木のプロット (2 秒間隔の位置を示す)

可能である。ただし、流木の流下の時空間的な密度は流域にも依存し、また画像上でどの程度確認できるかは撮影アングルや川幅等も関連するため、他の河川での適用性については別途検討する必要がある。

図-10 は、出水ピーク付近での流木の位置を平面図上にプロットしたものである。出水ピーク時には、川幅全面にわたって、流速が算定可能であることが確認できる。流木が確認できた始点および終点の位置および時刻から、平均横断位置および平均流下速度を求め、安芸の式に基づく表面浮子での更生係数である 0.85 を乗じて、河道を横断方向に 10 m 間隔に 6 分割した断面 (従来の浮子観測とほぼ同等) 毎の平均流量を算定し、それらを合計することで、総流量を算定した。

図-11 は、マーカー追跡により算定されたデータを元に、2008/8/29 の出水の水位・流量関係をプロットしたものである。水位の立ち上がり前の 00:10 ごろから 02:10 の逓減部まで 30 分毎に、それ以降は、1 時間お

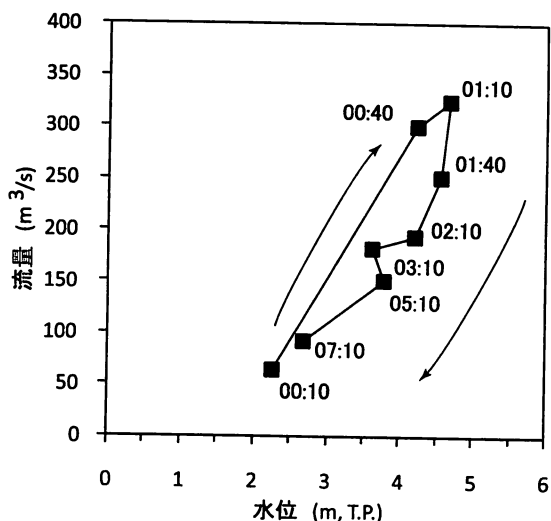


図-11 水位・流量プロットと近似曲線

よび 2 時間毎にプロットしており、短時間での水位および流量の急激な変化を、水位・流量変化の位相のずれも含めてとらえている。本河川のような中小河川に対して、浮子法を用いて、このような詳細な流量観測を出水毎に行うことは実務的な観点から困難であり、場合によっては観測の実施自体が困難な場合もあることを考えると、本手法のような記録画像を利用した画像解析法を用いた流量算定は、中小河川の出水特性把握のための有効な方法になると考えられる。

図-12 では、2008/8 の出水による水位・流量関係を 2006/6 の出水時の浮子観測結果と比較したものである。ただし、2006/6 のデータはピーク以降の逓減部のみのデータである。2006/6 の結果に比べると、2008/8 は同じ水位での流量が小さくなっている。これは、降雨や出水特性の違いによる影響も考えられるが、河川改修工事 (本研究の解析地点は 2005/3 完了) から比較的短期間しか経過していない 2006 年の時点にくらべ、2008 年には低水路や測岸部への植生侵入・拡大がみられることから通水抵抗が増加するとともに、本河道区間での流況自体も変化しているものと考えられ、その結果として水位・流量関係にも変化が見られたものと考えられる。

図-13 は、2008/8 の出水時のマーカー追跡による流量と PIV 法による流量を比較したものである。近似直線からのばらつきが小さい ($R^2 = 0.95$) ことから、流量変化についてはマーカー追跡と PIV 法で同様の傾向を示すものの、流量の絶対値としては、PIV による流量はマーカー追跡によるものに比べ 26 % 程度過小評価していることがわかる。マーカー追跡は、PIV により追跡を行う、水面状態や色の違いなどが組み合わされた表面パターンではなく、より確実に表面の流れに追従すると考えられる流木の位置をピックアップしたものであるため、マーカー追跡結果はより確からしいと考

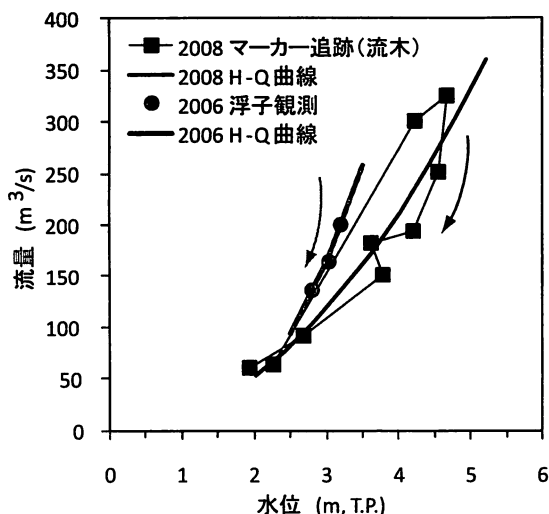


図-12 2006/6 (H18) 出水の浮子観測および 2008/8 (H20) のマーカー追跡による水位・流量関係の比較

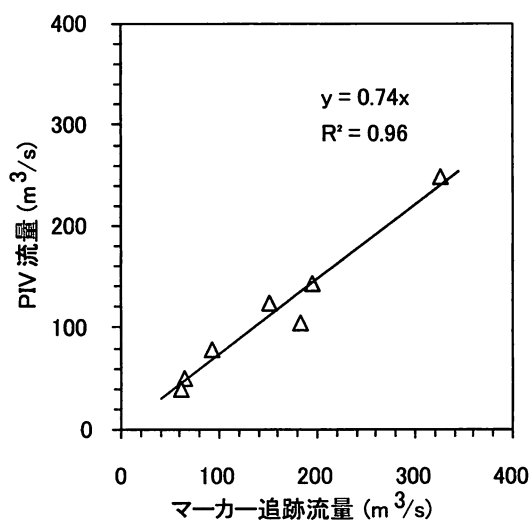


図-13 2006/6 (H18) 出水の浮子観測および 2008/8 (H20) のマーカー追跡による水位・流量関係の比較

えられる。PIV 流量が過小評価となった原因を以下に考察する。まず、解析画像は、低画質の MPEG-4 による記録に起因する画像の分解能の不足およびデータ圧縮によるノイズ発生、夜間撮影のため水面パターンが比較的不明瞭であること、並びに夜間の光量不足を補うために適用されるフレーム蓄積による時空間分解能の低下が相乗し、水面の微小な波や色のムラに起因するパターンの移動を捉えることが難しい条件となつて

いる。次に、定在的な水面の盛り上がり（スタンディングウェーブ）や、対岸の光の反射などの成分は、比較的大きな空間スケールを持ち、時間変動も少ないため、時空間分解能の低い画像でも比較的捉えやすい。PIV 解析において、これらの定在的な成分の影響を受けて表面流速を過小評価したことが、本解析条件において PIV 流量が過小評価を引き起こしたものと考えられる。これらのいくつかの要因は、記録方式をより高画質のものに切り替えることにより改善が可能と考えられるが、今後のさらなる観測による実証的な検討が必要である。

6. おわりに

本研究では、既設の一般的なスペックの河川監視用カメラを用いた流量計測を行った。まず、撮影アングルの検討手順の提案を行った。次に、浮子観測結果と画像解析（マーカー追跡）の比較を行い、画像解析の妥当性を確認した。また、夜間や降雨・雷雨時といった画像の撮影が困難な状況で、かつ記録画像が比較的低画質であっても、適切なアングル設定と流木のマーカー追跡法の利用により流量算定が可能であることを確認した。以上の検討を踏まえ、画像解析法を用いて、出水の立ち上がりから逡減部までの連続的な流量観測が実施され、水位・流量曲線が作成された。

画像解析手法は、従来の浮子観測の課題点である、測線数や観測回数の制約、ピークの欠測を解消する優れた代替方法であり、本研究により、中小河川の流量観測に利用できることが実証的に示された。今後の出水時にも、撮影アングルや記録画質に注意を払いつつ、記録画像を蓄積し画像解析を実施することで、浮子流量情報を補って、より確かな流量情報の取得が可能になると考えられる。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 愛知県: 二級河川天白川水系 河川整備基本方針, 2008.
- 3) 愛知県: 二級河川天白川水系 河川整備計画, 2009.
- 4) 福野哲也, 岩見隆弘: 共有化された多数の監視映像の長時間蓄積, 雑誌 Fujitsu, Vol. 60, No. 1, pp. 58-63, 2009.
- 5) 藤田一郎, 椿涼太, 岡部健士, 富尾恒一, 藤井啓: 河川表面のハイビジョンビデオ映像を用いた吉野川洪水流の流量・流速計測, 河川技術論文集, Vol. 12, pp. 127-132, 2006.

(2009.4.9 受付)