

画像解析を用いた河川の洪水流の観測

—基礎水理部会研究分科会報告—

Field-Observation of Flood Flows in the River by Video Image Analysis

—Report from Research Group of Basic Hydraulics Division—

綾 史郎*・澤井 健二**・藤田 一郎***・富永 晃宏†

・後野 正雄*・村上 正吾††・石井 義裕†††

By Shirou AYA, Kenji SAWAI, Ichiro FUJITA, Akihiro TOMINAGA,

Masao NOCHINO, Syogo MURAKAMI, and Yoshihiro ISHII

The new method for the velocity distribution measurement of the flood flow in the river was developed and successfully examined. The water surface images, which are recorded from the roof of tall building facing to the river by the video camera, are transformed into non-distorted images, then they are analyzed by the Particle Image Velocimetry using a personal computer, and the distributions of the velocity vector are finally presented. The field application was made to the flood flow in the Yodo River in July, 1993; the water surface velocity vector distributions were demonstrated; and the discharge of the flood peak was well estimated. The proposed method has the advantages of smaller equipments, less manpower, less cost, more safety and more convenience.

Keywords: PIV, video image analysis, particle image correlation, flood flows

1. はじめに

洪水流の構造の把握や流量観測は河川工学上・河川管理上極めて重要であるが、洪水時という必ずしも安全でない状況下、降雨や強風の悪環境の下で、非定常現象を時機を得て観測することは必ずしも容易ではなく、施設、

* 正会員 工博 大阪工業大学助教授 工学部土木工学科 (535 大阪市旭区大宮 5-16-1)

** 正会員 工博 摂南大学 教授 工学部土木工学科 (535 寝屋川市池田中町 17-8)

*** 正会員 学博 岐阜大学助教授 工学部土木工学科 (501-11 岐阜市柳戸 1-1)

† 正会員 工博 名古屋工業大学助教授 工学部社会開発工学科 (466 名古屋市昭和区御器所町)

†† 正会員 工博 京都大学助手 工学部環境地球工学教室 (606-01 京都市左京区吉田本町)

††† 正会員 工博 大阪大学助手 工学部土木工学科 (565 吹田市山田丘 2-1)

計測機器、費用、安全性等の面に現地観測上の困難があった。本研究グループは水理委員会基礎水理部会の研究分科会として、比較的安価で安全な流れの観測法である高所からのビデオカメラを用いた洪水撮影とその画像解析による洪水流の観測技術の開発・実用化ならびにそれを用いた洪水流の水理学的研究（複断面水路上の洪水流、河道内植生の洪水流への影響）を目的として、1993 年度より 2 年間にわたり開発・研究を進めてきた。その結果、1) 斜め上方から撮影した流れの画像処理技術の開発^{1),2),3)}、2) 実験室における非定常流の水理学的特性^{4),5),6)}、3) 木曽川、淀川における洪水流のビデオ観測とその解析^{1),7)}、4) 河川における河道内植生の調査とその流れへの影響の解析^{8),9)}等の成果を得ることができた。これらの成果の一部は水理講演会や年次学術講演会において逐次発表されてきているが、本論文では、本研究グループにより開発されてきたビデオ画像を用いた河川における洪水流の現地観測法とその結果について研究成果をまとめて公表し、研究分科会報告とする。

洪水時の河川流の現地観測法としては浮子による洪水時の流量測定や洪水観測塔、航空写真を利用した観測が行われているが、安全性、時間、費用の点から強い制約を受ける。本方法はビルの屋上や塔先端から汎用ビデオカメラにより河川の洪水流を連続撮影・観測し、得られたビデオ画像をパーソナルコンピュータを用いて画像解析することにより水表面の流速分布を得ようとするものであって、経済性もあり、かつ取扱いも容易な方法である。航空写真の利用と異なり、本方法は定点における連続面観測であり、表面のみとはいえ、平面的な流速分布を時間的に追跡し、その時間的変化や大規模渦運動等を解析することが可能であって、河川の洪水流の実態を理解するためには極めて有用な方法と考えられる。

2. 画像解析法

藤田らは従来より航空写真やビデオ画像を利用し、簡便なやり方で河川表面の流速分布を推定する手法について検討してきている。この方法は河川表面の様々な浮遊物や水面上の波紋等による濃淡（水表面の輝度の違い）を一種のトレーサとして取扱い、濃淡画像相関法（Particle Image Velocimetry）を利用してその追跡を行うことにより、二次元流速分布を得るものであり、自動的に全体的／細部の流れの様子を調べることができる。しかし、航空写真と異なり、河岸の堤防やビルからのビデオ撮影は河岸から斜めに行わざるを得ないため、画面の手前側と遠方側では距離が異なる結果、ビデオ画像は歪んだものが得られるから画像解析に当たってはこれを水平面上の無歪画像に変換せねばならない。また、撮影角度が浅ければ画像計測が満足に行われな可能性があり、撮影角度の影響³⁾、誤差等⁷⁾について検討しなければならないが、以下では現地への適用法を中心に述べる。

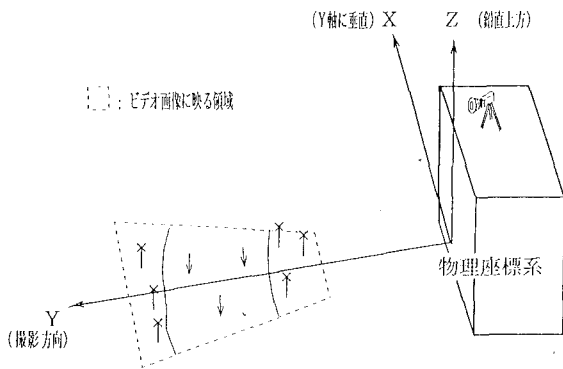
2.1 画像解析システムの概要

解析に用いたシステムを図－1 に示す。洪水流の観測は汎用の 8mm ビデオカメラ（SONY 製 CCD-VX1）を用いて行う。更に、洪水流撮影の前後に後述の標識点およびビデオカメラの位置を測量器（旭精密製 PTS-II）を用いて測量する。得られた画像をビデオデッキを用いてモニターに再生しながら希望の画像を選択し、画像処理ボード（DITECT 製）を装着したパーソナルコンピュータ（PC9801）により量子化して連続画像として取り込んだ後、適当な計算機により画像変換・解析する。

2.2 画像計測の手順

解析のフローチャートを図－2 に示す。ビデオカメラを用いた洪水観測のサイトとしては観察に便利で安全であり、かつ、水面が十分に見渡せ、良好な画像が得られる場所であることが要求されるが、カメラが水表面中央を望む俯角は 10°以上あることが望ましい。洪水流の撮影にあたっては、水面と後述の標識点を同一画面上に撮影する。また、水面に水際の建物や木、雲等が鮮明に写っていたり、濃い影ができていたり、或いは逆に太陽光の水面反射がきつい場合は水表面の輝度分布の移流を明瞭に捉えることが困難となり、誤差の原因となるので注意が必要である。

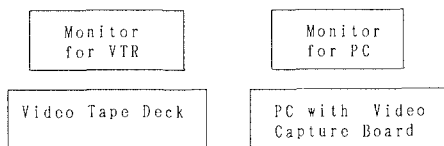
標識点は次に述べるビデオ画像の無歪画像への変換に必要であって、両岸に 2 点ずつ以上計 10 点程度設けることが望ましい。水際近くの建物、看板、特徴ある樹木、植生、堤防等の河川構造物などを利用することができる。



↑: 標識点 (高さを0として考える)

Video Recording of Flood
Surveying of Sign Points

Field Work



Office Work System

図-1 画像解析システム.

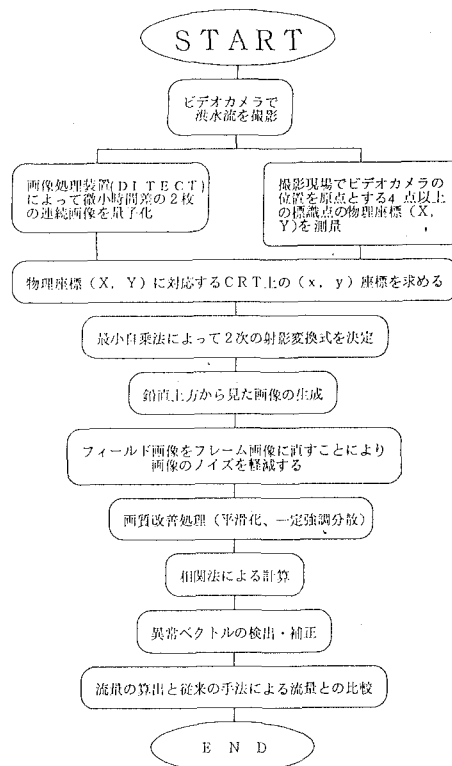


図-2 画像解析の手順.

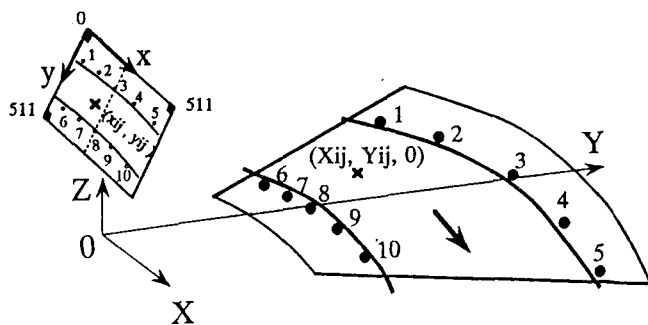
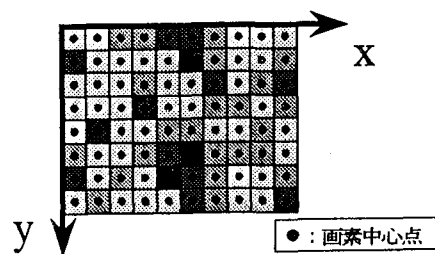
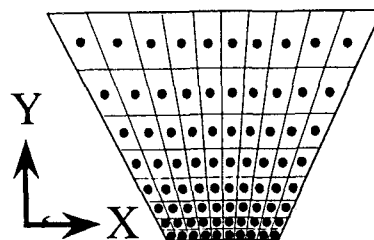


図-3 画像座標系と物理座標系の対応関係.



(a) 画像座標における濃度分布点



(b) 物理座標における濃度分布点

図-4 画像変換の手順.

適当なものがない場合は、目立ちやすく彩色したボードやボール等を設置することになる。特に遠方となる対岸側の標識点は目視では確認できても、画像上では解像度の関係上小さすぎたり暗すぎたりして確認できない場合があるので注意が必要である。後述の淀川の例では植生や 0.9m×0.9m のボードを 2.5m 程度の長さの角柱に打ち付けたものを用いた。なお、標識点の 3 次元的座標位置はカメラ位置を原点とするものに変換しておく。以上が外業である。

これ以外は内業であって、まずはじめに、選択された微小時間差の連続するビデオ画像を画像処理装置を用いて、モノクロ濃淡画像（512×512 画素 256 階調）に量子化して取り込む。CRT 座標上の各画素は歪んでいるので、すべてを物理座標面上の値に変換する（図-3、図-4 参照）。

座標変換には次式で示される二次射影変換、

$$X = \frac{ax + by + c}{gx + hy + 1} \quad (1)$$

$$Y = \frac{dx + ey + f}{gx + hy + 1} \quad (2)$$

或いは、式(1)、(2)の逆変換である次式

$$x = \frac{(hf - e)X + (b - ch)Y + (eh - bf)}{(ge - hd)X + (ah - bg)Y + (bd - ae)} \quad (3)$$

$$y = \frac{(d - gf)X + (cg - a)Y + (af - cd)}{(ge - hd)X + (ah - bg)Y + (bd - ae)} \quad (4)$$

を利用する。ここに、 (x, y) : CRT 画面上の座標、 (X, Y) : 河川表面を水平面とみなした物理座標、 $a, \dots, h$: 変換係数であって、物理座標 (X_i, Y_i) と CRT 画面上の座標 (x_i, y_i) ($i \geq 4$) との関係が与えられれば定めることができる。未知変換係数の数は 8 個なので、少なくとも 4 点以上の標識点の位置が両座標系で既知であれば変換係数を決定できる。

変換後の濃度分布は不等間隔なので等間隔メッシュ上の値への補間処理を行う。メッシュ間隔 (dX, dY) は大きすぎるとピンボケになり、小さすぎるとピクセルの数が大きくなり、計算時間が多量に必要となる。以下の例では、351 個×838 個のピクセル数とした。

相関法により流速ベクトルを算出する。必要であれば補間後の画像に重み付け平均を施し平滑化した後、相関法を適用すると良い。

部分的なトレーサの欠如等のために計算される異常ベクトルには、検出・補正アルゴリズムを適用する¹⁰⁾。

本解析法の解析精度については参考文献 3) に詳しいが、淀川の例では 10% 程度と推定されている。

3. 淀川洪水への適用

3.1 '93 年 7 月出水とその観測

図-5 は 1993 年 7 月における淀川の基準点である上流側の枚方水位観測所（25.8km）の水位ハイドログラフとこれから水位-流量曲線によって換算された流量ハイドログラフおよび下流側の淀川大堰のある毛馬水位観測所（9.8km）の水位ハイドログラフを示したものである。この図に見られるように今回の出水は 7 月 5 日 0 時ころから 6 日 12 時にかけて一つのピークを迎え、枚方地点で 5 日 15 時頃ピーク流量 3800m³/s を記録した。

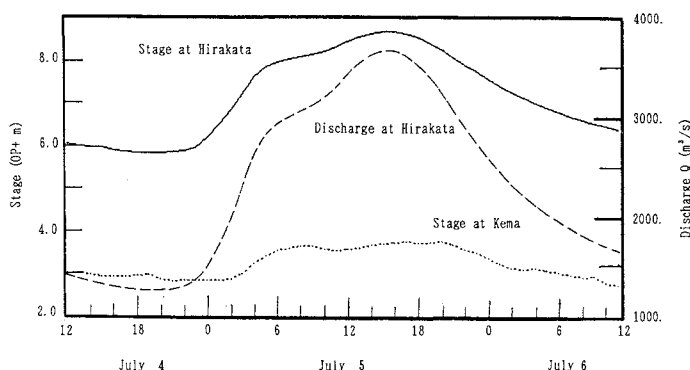


図-5 '93 年 7 月の淀川洪水ハイドログラフ。

洪水観測のサイトは淀川左岸 13.0km の堤防裏側に立地する大阪工業大学 6 号館屋上（図-6 参照）とし、淀川水面上約 65m の高さよりビデオカメラにより洪水流の撮影を行った。ビデオ撮影は、この洪水ピークの約 3 時

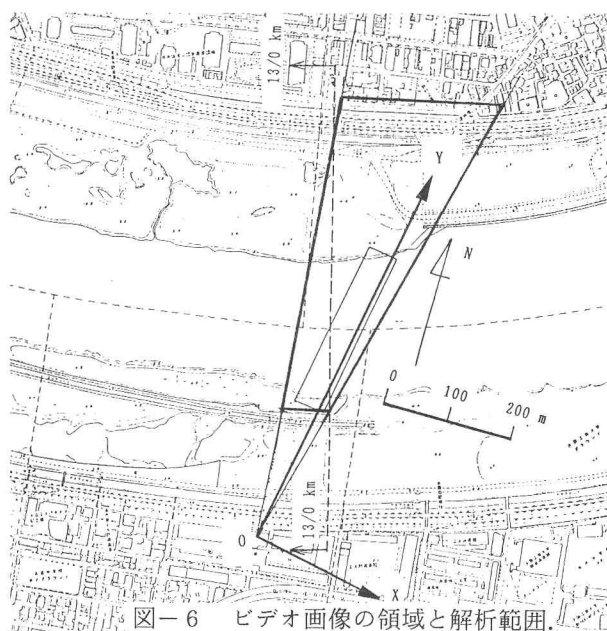


図-6 ビデオ画像の領域と解析範囲。

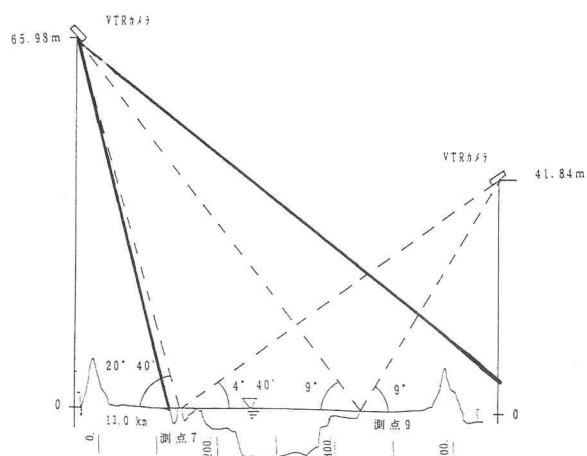


図-7 ビデオ撮影時の断面図。

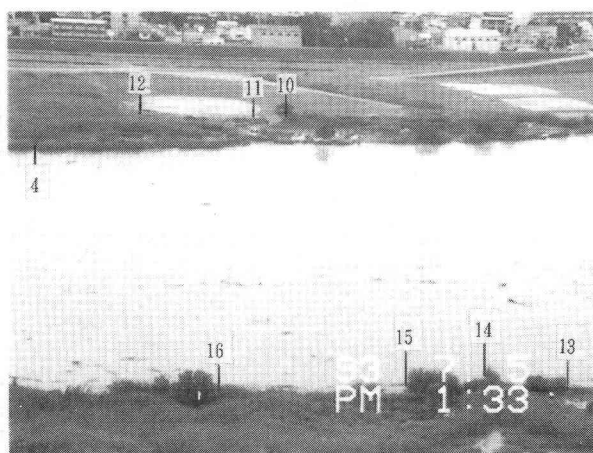


写真-1 解析に用いた原画像（淀川水面）。

写真-2 無歪画像に変換された原画像の一部。

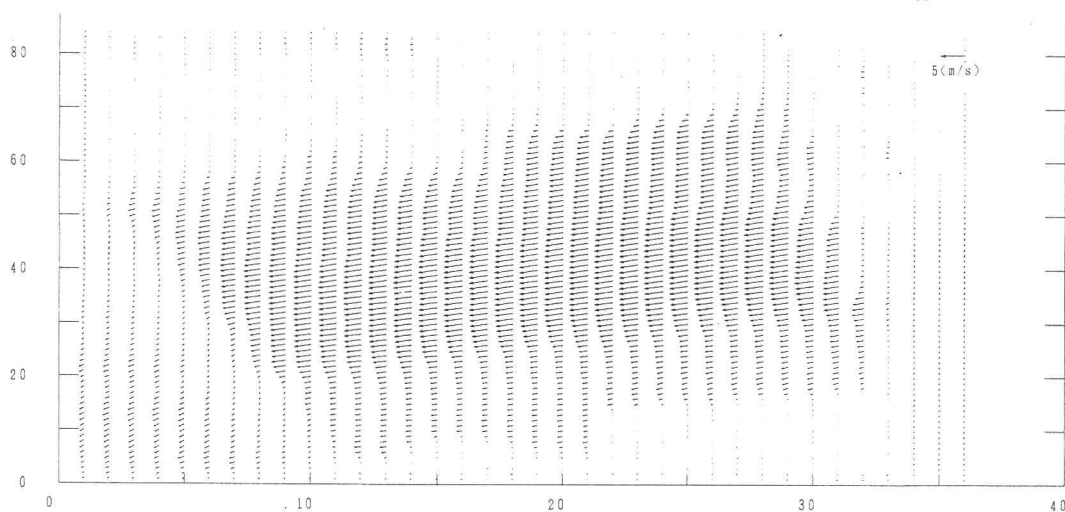
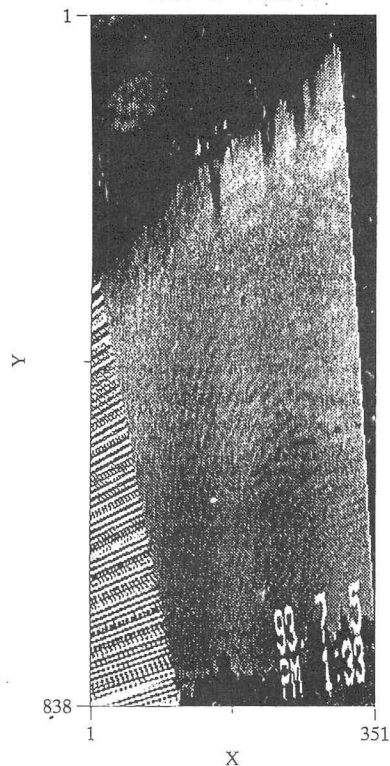


図-8 水表面平均流速ベクトルの分布。

間前の5日13時頃より行われ、画像解析には13時30分前後の画像を用いた。写真-1はビデオ画像よりビデオプリンターにより得られた洪水時の淀川水面である。数m大の流木、ゴミ等が風に流されながら、水表面に浮きながら流れるとともに水表面には様々な文様を形成していた。ビデオ撮影の領域と今回の解析領域を図-6の地図上に示した。図-7に撮影時の状況を横断面図で示した（水平縮尺は鉛直縮尺の1/10であることに注意）。図-6、7からわかるように高所から斜めに水面を眺んで得られたビデオ画像でも歪が大きく、写真-1の黒枠で囲んだ台形状の領域を今回画像解析の対象として切り出し、変換(3)(4)を用いて行った。なお、写真-1中の数字で示した点は変換に用いた標識点を示しており、洪水後の測量によりこれらの点の座標位置を求めた。

3.2 画像解析結果

画像変換後の画素サイズを流下方向に $dX=0.40\text{m}$ 、横断方向に $dY=0.40\text{m}$ とし、画像の時間間隔は $dt=2/3\text{sec}$ とした。流速分解能は流下方向に $dU=0.2\text{m/s}$ 、横断方向に $dV=0.2\text{m/s}$ 程度である。物理座標上で横4m縦4m間隔で 36×84 の固定点で流速ベクトルを求め、そのうちの異常値は棄却し、その点は周囲のベクトル値より内挿補間した。写真-2に式(3),(4)を用いて変換された画像を、図-8に連続する48画像を処理した約32秒間の平均流速のベクトル分布図が示されている。流速ベクトル図の左下、左上方、右下、右側等の周辺部分は写真-2に見られるように原画像において水面が写っていない領域或いは原画像外の領域であり、本来除外すべきものである。解析領域の内部でも写真-2の水面上方にみられる水面に映し込まれた植生の陰やタイマー表示の部分を除けば、流速ベクトルは流軸に一致して左下方向を向いており、表面流速分布のパターンが表現されていることがわかる。図-9は図-8の流速ベクトルの分布図より内挿するすることにより得られた13.0kmの横断測量線に沿った流速ベクトル図と13.0km断面の低水路部の横断面図を共に描いたものである。河川の法線形状に沿った流速・流向が得られていることが明瞭に分かる。また、流速分布形は中央部で最大流速を有し、水深の浅くなる側岸付近で小さい流速となっており、断面図にみられる水深の分布を良く反映した分布形となっている。

図-10は前報(7)で示された式(1)(2)を用いて変換により求めた流速分布(a)、一般曲線座標系を用いた平面2次元解析によって得られた水深平均流速の分布(b)を比較して示したものである。画像解析により得られた結果は画像変換の方法に係わらず、断面図にみられる水深の分布を反映したよく似た分布形といえるが、今回得られた結果のほうが最大流速等はやや大きな値となっている。

図-9の流速分布と水深分布を用いて流量の推定を行った。流速分布公式としては1/7乗則を用い、表面流速を画像解析結果より求め、水深平均流速を算出した後、水路幅方向に積分して求めた。推定流量は $3200\text{m}^3/\text{s}$ となった。この値は枚方地点の水位-流量曲線から算定した流量 $3440\text{m}^3/\text{s}$ と比較すると約7%小さな値であった。

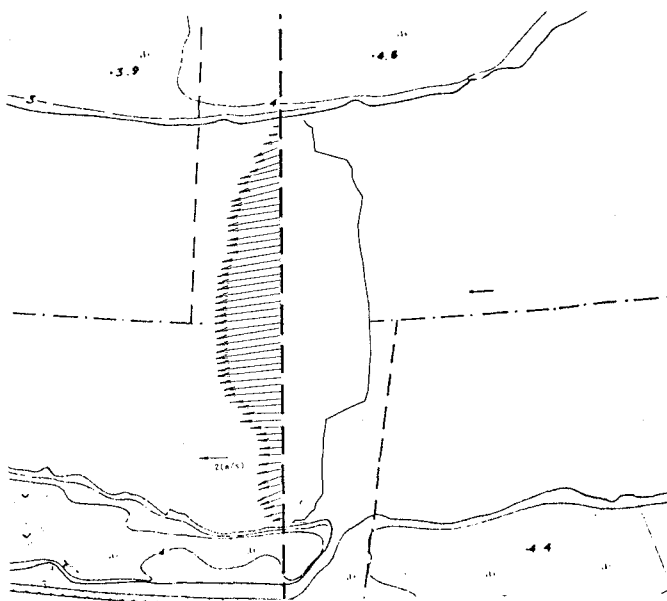


図-9 13.0kmの横断測量線上の流速分布と横断面図（部分）。

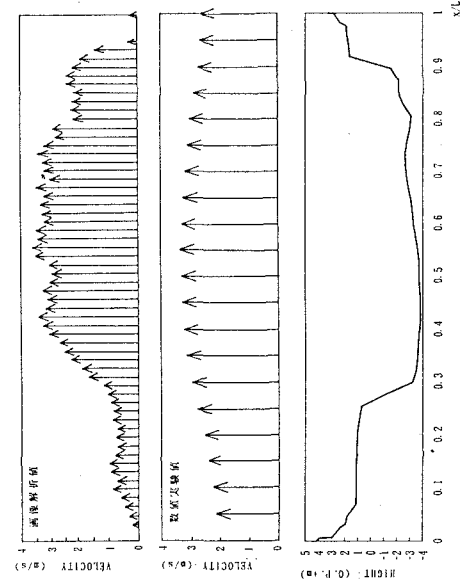


図-10 流速分布の比較と横断面図。

5. 結論

河川における洪水流の表面流の観測方法として、高所から撮影されたビデオ画像を利用した濃淡相関法による画像解析による方法を提案し、その実際への適用法を説明した。提案した方法は1993年7月の淀川洪水流の解析に適用され、表面流速の分布が求められるとともに、流量の推算が行われた。流速ベクトル分布のパターンは河川の放線形状や断面形―水深の分布をよく反映したものであった。また、洪水流のピーク流量も精度よく推定され、本手法の実河川への適用結果は良好なものであったと考えられ、本論文で提案した方法で洪水流の観測・解析が可能なことが示されたものとする。今後、解析例を増やし実用化に努めるとともに、十分な準備を整えた上で、一洪水波の各レベルにおける連続画像による洪水解析とそれを利用した洪水流の水理の研究を進めて行きたい。

謝辞：本研究の実施にあたっては、建設省近畿地方建設局淀川工事事務所および中部地方建設局木曽川上流工事事務所から貴重な資料の提供を頂き、また、河川環境管理財団河川整備基金（代表 綾 史郎）の研究費補助を受けた。記して深謝する。観測・解析にあたっては大阪工業大学水圏環境研究室、岐阜大学土木工学科水環境講座所属学生にご助力頂いた。謝意を表する。

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, 733-738, 1994.
- 2) 藤田 一郎・綾 史郎・河村 三郎・中島 三郎：ビデオ画像を利用した洪水流量の新計測法、土木学会第49回年次学術講演会概要集 2-A, 382-383, 1994.
- 3) 藤田 一郎・綾 史郎・石川 貴大：ビデオリモートセンシングによる河川表面の計測精度，第2回河道の水理と河川環境シンポジウム論文集，1995（投稿中）。
- 4) 富永 晃宏・長尾 正志・三尾 憲史・劉 建：複断面水路を通過する洪水波の水理特性，水工学論文集，Vol. 38, 443-448, 1994.
- 5) 富永 晃宏・金田 雪雄・神谷 昌文：河川湾曲部における3次元乱流構造の現地計測と底面せん断応力の評価法，水工学論文集，Vol. 38, 727-732, 1994.
- 6) 村上 正吾・中川 博次：非定常開水路流中の浮遊砂に関する実験的検討，水工学論文集，Vol. 38, 603-608, 1994.
- 7) 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. 39, 447-452, 1995.
- 8) 富永 晃宏・長尾 正志・劉 建・鈴木 徹也：洪水流の抵抗と流れ構造に及ぼす高水敷樹木群配置の影響，水工学論文集，Vol. 39, 477-482, 1995.
- 9) 井上 茂之・山本 貴章・綾 史郎：淀川河川敷における植生調査，土木学会第50回年次学術講演会講演概要，1995（投稿中）。
- 10) 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技术，可視化情報，Vol. 12, Suppl. No.1, 43-46, 1992.