

ビデオ画像解析による河川表面流計測の試み

Application of Video Image Analysis for Measurements of River-Surface Flows

藤田一郎・河村三郎^{* **}

By Ichiro FUJITA and Saburo KOMURA

An image analysis method for the calculation of two-dimensional velocity distributions of river-surface flows is examined. In this method, complicated water surface configurations, which are created by the conffliction of boils to the water-surface or by the fluctuation of pressure influenced by turbulence, are considered to be convected with the water surface velocity. Water surface images are taken from the riverside using a video camera. Velocity distributions are calculated by the correlation method after the transformation of images to the non-distorted ones. The application of the method to the Nagara River indicates favorable velocity distribution for the downstream components.

Keywords: image analysis, correlation method, flood flow

1. まえがき

最近の画像解析技術の進展に伴い、洪水流航空写真の解析手法として、カメロン効果を利用した従来の解析図化機による方法ではなく、河川表面の濃淡、流木、ごみあるいは泡のような表面浮遊物の分布パターンの自動追跡から表面流況を得る新しい手法、すなわち画像相関法が注目されるようになってきている¹⁻⁵⁾。この手法によれば、煩雑な熟練者による作業が省けるだけでなく、ほとんど自動的に全体的あるいは細部にわたる流れの様子を調べることが可能である。著者らはこの手法を淀川等の洪水流航空写真に適用し、その有効性についていくつかの検討を行ってきているが、突発的に発生する洪水時に臨機応変に航空写真撮影を行うことは實際上非常に困難である。また、洪水流の観測時が必ずしも晴天であるとは限らず、河川表面が雲によって遮られているために画像解析ができないケースも多くある。航空機による撮影では同一地点における連続撮影はその地点を部分的にカバーする数枚の写真から得られるだけであり、定点観測は本質的に不可能という点にも問題がある。本研究では、このような航空写真解析の問題点を補うために、機敏性に富み定点における連続観測が可能なビデオ画像を利用して、実用的な精度で表面流況が得られる画像解析システムの構築を試みる。

* 正会員 岐阜大学助教授 工学部土木工学科

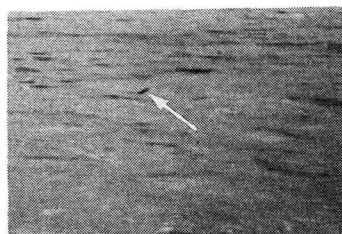
** 正会員 岐阜大学教授 工学部土木工学科

(〒501-11 岐阜市柳戸1-1)

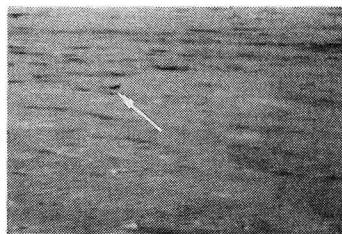
2. 相関法におけるトレーサ

相関法を洪水流航空写真に適用する場合は、河川表面の浮遊物や濃度分布パターンを一種のトレーサと考えて解析が行われるが、洪水の規模や観測時点によっては浮遊物が少なく画像解析が困難な場合も多い。ところで河川表面を詳しく観察すると、河川表面には多種多様な波紋が現れている。これらは流れの乱れに伴う複雑な圧力変動が反映された水面変動、あるいは河床付近で生成される様々なスケールの湧昇流（ボイル）が水面に到達して生じた水面変動等が混然一体となって発生した結果現れるものと考えられる。場合によっては風によってそれらが増長されることも考えられる。

長良川中流部の地点においてこのような水面波紋を局所的に注目してさらに詳細に調べると、それらのパターンは時間が経過すると崩れて別のパターンに変形するが、わずかな時間（1秒程度）の間はほとんど変形せずにそのままの凹凸のパターンを保ったまま移流することが観察された。図-1には4/15秒間隔の二枚の画像を示すが、同時に流下している固形浮遊物（流木）と比較すると、その短時間の間は水面波紋も含めて局所的な流れ場がほぼ凍結されたような状態で移流していることがわかる。このような状況は風の強くない他の地点における観測でもほぼ同様に認めることができたので、本研究では水面波紋の局所的な移流速度がその水面部分における表面流速を代表するものと考え解析を行うこととする。



(a) $t = 0 \text{ (sec)}$



(b) $t = 4/15 \text{ (sec)}$

図-1 水面波紋と浮遊物の移流状況
(矢印が浮遊物)

3. 画像解析システムの概要

本研究におけるビデオ画像解析が従来の手法と異なるのは、撮影位置が河岸近辺か橋上に限られるため、航空写真と比較するとカメラから河川表面までの距離が相対的に短くなり、得られる画像がかなりの歪を伴ったものとなる点である。図-2には河岸から撮影する場合の概略図を示すが、この例では右岸側の撮影範囲が左岸側と比べてかなり狭くなる。すなわち、ビデオ画像においては各画素の物理サイズがすべての点で異なり、特に奥行き方向の単位長さは数倍程度異なってくる。したがって、画像解析における前処理としてビデオ画像の無歪画像への変換が必要となる。画像変換を含めた画像解析の手順を以下に説明する。

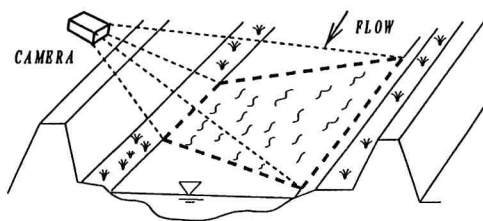


図-2 ビデオ撮影の概略図

3. 1 画像データの取得と量子化

洪水流の撮影には8ミリビデオ（SONY製CCD-VX1）を用い、得られた画像はパーソナルコンピュータ（PC9801 RA21）に装着した画像処理ボード（DITECT製）を通して512x512画素のモノクロ濃淡画像データ（8ビット、256階調）に量子化する。本ボードでは連続12枚のフレーム画像をメモリ上に格納できるので、画像サンプリングを30Hzとすると0.4秒間の連続画像を得ることができる。サンプリング周波数は任意に設定可能だが、連続画像間のトレーサの移動量や計測精度を考慮して適宜調整する必要がある。

3. 2 現地における測量

前述の画像変換を効率的に行うためには、ビデオ画像における河岸に沿ったいくつかの点（標識点）の座標を、カメラ設置位置を中心とする適当な座標系に対して求める必要がある。本研究では対象領域の河川表

面はほぼ水平面であると仮定し、ビデオ画像の中心を通る軸をY軸、それに直交する平面方向の軸をX軸、鉛直上向をZ軸とする物理座標系を想定する。ここでは水面を $Z=0$ とする。測量においては兩岸の水際に沿って設置した標識点の座標 $(X_i, Y_i, 0)$, $i=1\sim N$, をレーザ測距器等により計測する。標識点の数 N は10程度とする。この際、ビデオ画像上ではこれらの点が明確に識別できるように注意する必要がある。特にビデオカメラの対岸側では対象とする目印(ボールなど)が目視では確認できても、解像度の関係で画像上では

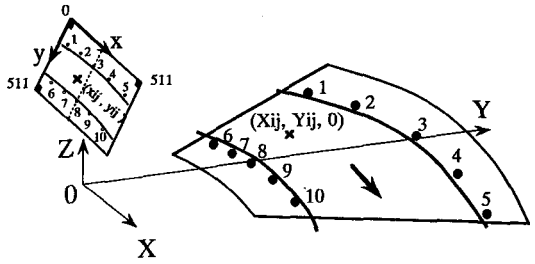


図-3 画像面座標と物理座標の対応関係

小さすぎるか暗すぎて確認できない場合があるので標識点が目立つような工夫をする必要がある。標識点座標 (X_i, Y_i) に対応する画像面上の座標を (x_i, y_i) とする。両座標の対応関係を図-3に示す。画像面の座標系は通常左上が原点であり、単位は画素である。 (x_i, y_i) の値はモニター上のマウスで輝度の変化等に注意しながら慎重に求めるが、画像面における標識点座標は画素すなわち整数値で与えられるので、物理座標に比べると計測精度はかなり低くならざるを得ない。

3.3 二次射影変換による座標間関係式の決定

図-3に示されるように画像面座標 (x, y) と物理座標 (X, Y) は1対1に対応しているので両座標間の関係式がわかれば、各画素の座標に対する物理座標の値が求められ画像の歪補正が可能となる。本研究では、画像面と河川表面が平面同士の対応関係にあると考え、両座標間の関係を次式に示す二次射影変換によって求めることとする⁹⁾。

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

変換における係数は $b_1\sim b_8$ の8つなので、少なくとも4つの標識点の位置が両座標系で既知ならば確定できるが、前述の計測誤差の影響を軽減するために、ここでは合計10点程度の標識点の値を用い、最小自乗法により変換係数を決定する。すなわち、標識点数を N とすると、次式により $b_1\sim b_8$ を求めることができる。

$$\begin{aligned} b_1x_1 + b_2y_1 + b_3 - b_4x_1X_1 - b_5y_1X_1 &= X_1 \\ b_1x_2 + b_2y_2 + b_3 - b_4x_2X_2 - b_5y_2X_2 &= X_2 \\ &\vdots \\ b_1x_N + b_2y_N + b_3 - b_4x_NX_N - b_5y_NX_N &= X_N \\ -b_4x_1Y_1 - b_5y_1Y_1 + b_6x_1 + b_7y_1 + b_8 &= Y_1 \\ -b_4x_2Y_2 - b_5y_2Y_2 + b_6x_2 + b_7y_2 + b_8 &= Y_2 \\ &\vdots \\ -b_4x_NY_N - b_5y_NY_N + b_6x_N + b_7y_N + b_8 &= Y_N \end{aligned} \quad (2)$$

3.4 画像変換

画像面座標における濃度分布 $G(x_{ij}, y_{ij})$ ($i, j=0\sim 511$)は既知なので、式(1)を用いて各座標値を物理座標値 (X_{ij}, Y_{ij}) に変換する。実際の変換は適当に切り出した解析対象領域に対して行えばよい。各画素に対応する物理座標は図-4(b)に示すように不等間隔で分布する。この濃度分布を等間隔なメッシュ上の値に補間すれば無歪の画像が得られる。本研究では図-4(c)に示すような長方形の領域を解析対象とし、X, Y方向で異なるメッシュサイズ(dX, dY)をとる画像、あるいは図-4(d)に示すようにオリジナルの不等メッシュ間隔が反映できるようにメッシュサイズを部分的に調整した画像に対して相関法を適用する。

4. 相関法の精度について

画像解析には濃淡画像相関法を用いるが相関法の適用に際してはその計測精度に注意する必要がある。相関法における流速の分解能 (dU , dV) は、1 画素の X , Y 方向の物理サイズをそれぞれ dX , dY , 画像間の時間間隔を dt とすると基本的には

$$dU = dX/dt, \quad dV = dY/dt \quad (3)$$

で与えられる。したがって、同一の dt に対しても部分部分で実質的な画素の物理サイズが異なる本研究のような場合には、流速分解能もそれに従って変化する。本研究では、画素サイズ以下のトレーサ移動量を効率的に推定するために、次のような簡便な方法を用いる。すなわち、図-5 に示したように、画素単位の探査で得られた最大相関点 P での相関値を $R_{\max}$ 、その X 軸方向の両側の相関値を R_{xm} 、 R_{xp} 、 Y 軸方向の両側の相関値を R_{ym} 、 R_{yp} および初期画像における参照フレームの中心点を O とする。そして、相関係数の分布が局所的に X 、 Y 軸のそれぞれの方向に二次関数分布していると仮定して、それぞれの分布関数の極大点を示す位置が真の最大相関点 P_R であると考え。したがって、点 P と点 P_R のずれがトレーサ移動量の補正量であり、次式で与えられる。

$$dX_m = \frac{(R_{XM} - R_{XP}) dX}{2(R_{XM} + R_{XP} - 2R_{max})} \quad (4)$$

$$dY_m = \frac{(R_{YM} - R_{YP}) dY}{2(R_{YM} + R_{YP} - 2R_{mx})} \quad (5)$$

このような方法で実際にどの程度のトレーサ移動量を捉えることができるかを調べるために、粒子画像のシミュレーションを行った結果によると、平行流では平均的に0.2画素程度の移動量が推定可

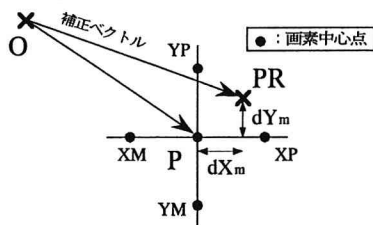


図-5 トレーサ移動量の補正

能なことがわかっている⁷⁾。一般的な河川流の表面流はマクロ的にはほぼ平行流的に流れていると考えられるので、本相関法による流速分解能は $0.2 dU$ および $0.2 dV$ 程度とみなすことができる。以上の手順で得られる流速ベクトルには、トレーサパターンの誤対応による異常ベクトルが含まれているので、本研究ではこれらのベクトルを検出・補正するアルゴリズムを適用した⁸⁾。

5. 実験水路による検討

実河川を想定して水路幅30cmの実験水路を用いた実験を行った。実験室レベルでは水面波紋の生成は容易

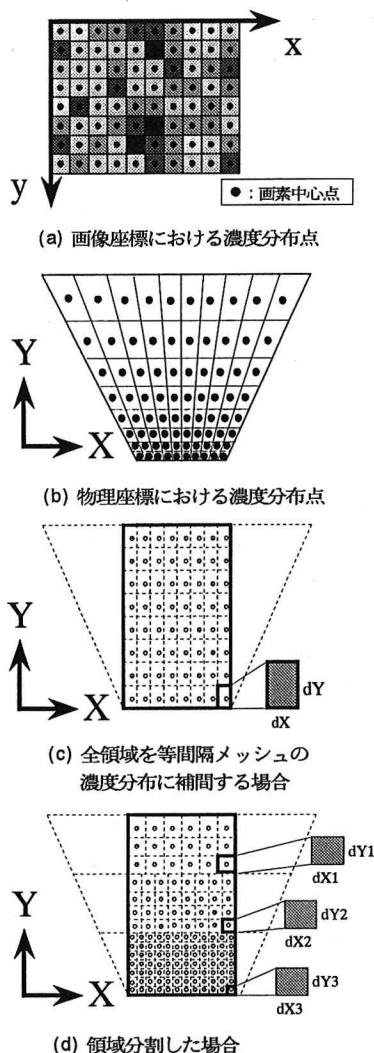


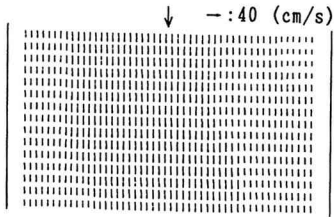
図-4 画像変換の手順

でないため表面流はオガクズにより可視化し、水路上方と透明な水路側壁側に各々ビデオカメラを設置して表面流の同時撮影を行った。水路真上からの画像では画素サイズはほぼ一様であり、 $dx=dy=0.16\text{cm}$ である。斜め撮影では手前側では $dx=0.16\text{cm}$ 、後方では $dx=0.24\text{cm}$ 、また、 dy は平均的には 0.87cm 程度となる。画像変換は斜め撮影した画像に対してのみ行い、各々の連続画像に相関法を適用して流速分布を求めた。結果を図-6に示す。

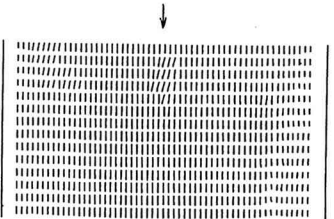
画像間隔はどちらも $dt=1/15$ 秒なので、垂直撮影の流速分解能は $dU=0.48\text{cm/s}$ 、斜め撮影では $dU=0.48\sim0.73\text{cm/s}$ 程度である。斜め撮影でも一様な表面流速が捉えられており、画像変換が良好に行われることを確認することができた。

6. 実河川への適用

実河川における適用例として、長良川の藍川橋直上流の断面（河口より約59.5km）における表面流に対する解析例を以下に示す。撮影は1993年8月18日と10月1日に右岸側堤防上から行った。水面幅は120m程度、ビデオカメラの高さは水面から8m程度である。変換前後の各画像の例を図-7に示す。水面

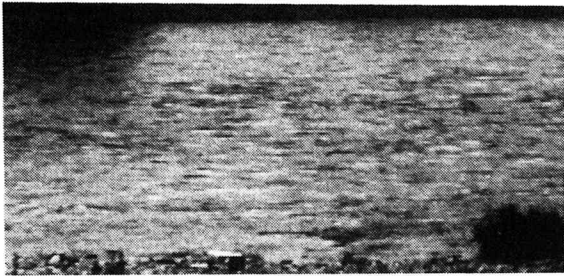


(a) 垂直撮影

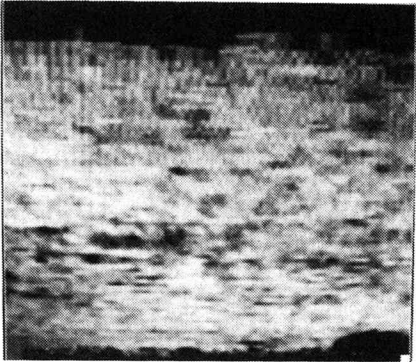


(b) 斜め撮影

図-6 実験水路の表面流速

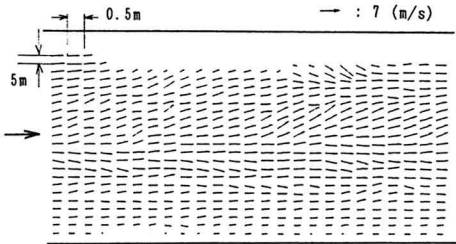


(a) 変換前

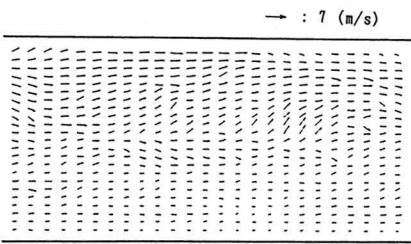


(b) 変換後

図-7 画像変換の例（長良川59.5Km地点：1993.10.1）



(a) 8月18日の出水



(b) 10月1日の出水

図-8 画像解析結果（破線は水際線）

波紋が画像の濃淡分布として全領域にわたって現れているが、解像度に限界があるために変換後の画像ではビデオカメラに近い部分で密、遠い部分で粗な分布パターンが得られている。原画像の濃淡分布を一定のメッシュ($dx=0.05m$, $dy=0.2m$)上の値に補間して 281×824 画素の画像を生成し、解析を行った結果を図-8に示す。画像上の参照フレームサイズは正方形としたが一画素の単位長さが異なるので、相関法では流下方向が $1.75m$ 程度、横断方向が $7m$ 程度の偏平な矩形領域の濃度パターンの追跡を行っていることになる。流速分解能は前述のシミュレーション結果を考慮すると $dU=0.15m/s$, $dV=0.6m/s$ 程度となるが、濃度分布等の画像の状態から判断するともう少し低いと考えられる。図-8より相対的に流量の大きかった8月18日出水の主流部分の流速が $4m/s$ 程度なのに対し、わずかな出水であった10月1日の主流速は $2 \sim 3m/s$ 程度であり、明らかに流量の変化に対応した結果が得られていることがわかる。また、解析対象地点は滞筋が左岸側へ寄っている地点であるが、流速分布はその様子をうまく捉えている。ただ、8月出水の場合はビデオカメラから遠い左岸側付近においてトレーサとしての水面波紋等の画像が不鮮明であったために良好な流速ベクトルを得ることはできなかった。また、流速分解能から推測できるように横断方向成分の精度が流下方向に比べてかなり低いため、横断方向成分に関しては部分的に不自然と思われる流速ベクトルも計算されている。しかしながら、低い堤防上からというかなり厳しい撮影状況であったにもかかわらず、流下方向成分に関しては全体的な流速分布をほぼ良好に得ることができたものと考えられる。

7. あとがき

河川表面の波紋が一種のトレーサとみなせると仮定し、河岸から撮影したビデオ画像の相関法による画像解析手法を示した。実河川に対する適用結果は比較的良好なものと考えられ本手法の有効性を確認できたが、水面波紋の移動すべてが必ずしも流速に対応しているわけではなく、河岸付近から発生する衝撃波が著しい場合や風波が卓越している場合等には当然ながら本手法は適用できない。また、ビデオカメラから離れた地点における精度は特に横断方向の成分に関してかなり低下するが、両岸からあるいは橋上からの観測を含めた同時観測により精度向上が期待できる。本手法は、比較的簡便な方法でマクロ的な流速分布をとらえることができるので、流量計測手法としての可能性も含めて今後さらに検討を行っていく必要がある。

謝辞

本研究では河川環境管理財団河川整備基金（代表者：綾史郎大阪工業大学教授）による補助を受けた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) Fujita, I. and Komura, S.: Computation of Two-Dimensional Velocity Profiles during Floods by the Correlation Method, Proc. of 7th Cong. IAHR (APD), Vol. 1, pp. 69-74, 1990.
- 2) Utami, T. and Ueno, T.: A Study of the Structure of Flood Flows by Picture Processing of Aerial Photographs, Proc. of XXV Cong. of IAHR, Vol. II, pp. 721-727, 1993.
- 3) Fujita, I. and Komura, S.: Image Analysis of Aerial Photographs of Flood, Proc. of XXV Cong. of IAHR, Vol. II, pp. 728-735, 1993.
- 4) 藤田・河村：相関法の精度と洪水流航空写真への適用, 水工学論文集, Vol. 35, pp. 293-298, 1991.
- 5) 藤田・河村・神田・安田：相関法による洪水流画像解析システム, 可視化情報, Vol. 13, Suppl. No. 1, pp. 71-74, 1993.
- 6) 日本写真測量学会編：写真による三次元測定, 共立出版, pp. 172-174, 1983.
- 7) Fujita, I. and Komura, S.: On the Accuracy of the Correlation Method, Proc. of the 6th Int. Symp. on Flow Visualization, pp. 858-862, 1992.
- 8) 藤田・河村：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, pp. 43-46, 1992.