

時空間画像を利用した河川表面波紋の 移流速度計測

CONVECTION VELOCITY MEASUREMENT OF RIVER SURFACE RIPPLES BY USING SPACE-TIME IMAGES

藤田一郎¹・椿涼太²
Ichiro FUJITA and Ryota TSUBAKI

¹正会員 学博 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)

²学生会員 神戸大学大学院博士後期課程 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1)

River surface elevation during flood is randomly deformed by the pressure fluctuation due to turbulence with various scales. This phenomenon is recognized as water surface ripples with numerous specular reflections when viewed from an oblique angle. We can assume that these surface ripples are convected with surface flow and usable as a kind of tracer for measuring velocity distribution when the wind effect is negligible. In this paper, a novel image analysis method for velocity measurement by using space-time image that indicates velocity information as its image orientation is proposed. The performance of the new method was verified with a synthetic space-time image. The method was then applied to some actual flow images. It was shown that the proposed method is superior to the method previously developed by the authors with respect to accuracy and robustness to noises.

Key Words : river flow measurement, space-time image, river surface ripples, image analysis, non-intrusive method

1. まえがき

河川流量を計測する方法として非接触法が注目されている¹⁾。通常、河川の流量は平時時には可搬式の流速計、洪水時には浮子観測法が用いられているが、特に浮子観測法の場合は、1) 人手の問題、2) 機敏性の欠如（ピーク流量欠測の可能性が高い点）、3) 連続観測ができない点、4) 浮子の流れに対する追従性の問題、5) 浮子長さの選択の問題などにより、高精度の観測が期待できないのが現状である。非接触法はこのような従来法の問題点を解消できる可能性の高い方法であり、流量計測の高精度化を図るとともに高効率性を実現する目的でその導入が模索されている。高品質の流量観測資料は今後の水資源計画あるいは治水計画の立案を合理的にすすめるために必要不可欠であり、明治以来の手法にとって変わるか、もしくは補完する新たな方法論として非接触法が注目を浴びるのは当然のことと考える。

著者らは、従来、河川表面の流速分布を非接触計測する方法として、テンプレートパターンマッチング法に基づくLSPIV (Large-Scale Particle Image Velocimetry)^{2,3)}、および時空間画像を利用したSTIV (Space-Time Image Velocimetry)を提案してきている^{4,5)}。前者は二次元流速分布を計測する手法であり、水位変動に連動した自動計測システムの開発等を含め、その実用化は

ほぼ完了している⁶⁾。後者は、流量観測法としての実用性をさらに高めるために計測対象を主流方向成分だけに限定して流速の横断分布を計測する方法である。本研究では、後者のSTIV法に関して従来の手法とは全く異なる考え方に基く画像計測法を導入した。以下では、その有用性をシミュレーション画像および実河川画像を用いて検討する。

2. 非接触計測法の特徴

(1) 計測媒体について

一般的に非接触計測法は、画像計測による方法とドップラー効果を利用した方法に大別できる。前者の画像による方法には、著者らのLSPIVやSTIVに加えて時空間微分法（オプティカルフロー）などがあり、後者の方法には電波流速計や超音波流速計などがある。計測原理は各々全く異なっているが、計測対象が表面流速という共通点がある。他の視点から見た共通点は、どの方法も河川表面流をひとつの移動媒体と見なしており、表面流とともに移動する何らかの移動体を追跡している点と同じである。

ドップラー効果を利用する方法では、電波流速計の場合、使用するマイクロ波の波長は使用周波数

(10.525GHz)に対して2.8cm程度、超音波流速計の場合、使用周波数(20.4KHz)に対して1.7cm(気温20度するとき)程度であるから、十分な散乱波強度を得るためには河川表面に少なくとも1cmオーダーの凹凸が存在していなければならない。逆にいえば、この方法の場合、水面の凹凸が微小な平水時の計測には使えないことになる。

一方、画像を利用する場合の計測対象はあくまでも画面内の輝度分布(通常0から255までの値をとる)だが、この輝度分布の大部分は自然光が水面の凹凸によって乱反射されることによって生じる。したがって、計測方法は異なるものの、基本的な計測媒体が水面の微細な幾何形状であると言う点ではドップラー効果を利用する方法と共通している。ただし、幅が10mから100m程度までの水域をカバーする画像計測で通常のビデオカメラを用いた場合には、空間解像度が低いために必ずしもドップラー効果を利用する装置と同一の計測媒体を同じ状態で‘視て’いることにはならない。例えば、河岸からの斜め撮影では1画素のサイズが1cmから10cmのオーダーまで分布するため、カメラから遠ざかるほど水面の状況を巨視的に観察する結果となる。しかしながら、平均的な流れ場を考えると、微視的であれ巨視的であれ同じ平均流に載った多重スケールの水面凹凸形状を観測していることには変わらない。

(2) 水面凹凸(水面波紋)の発生要因

非接触法で共通に観測している水面の凹凸は水面に凍結された状態で存在し移流されているのではなく、個々の微小な波が折り重なった渾然とした状態で存在している。個々の波は、船が作るような波高の大きな航跡波(重力波)とは異なって方向性がなく波長や波速も小さい。このような小スケールの波の発生要因としては、

- a) 開水路粗面乱流場における水面近傍の圧力変動
- b) ボイル渦等の水面への衝突
- c) 橋脚など河川構造物背後で発生した後流の痕跡
- d) 風の影響

などが考えられる。洪水時に観測されるのはこれらの要因が複合的に影響しあった結果生じる水面の擾乱である。したがって、単純にその波速を求めることは難しいが、洪水時に観察される水面凹凸の波長が1~10cm程度であるのに対し、水深がメートルオーダーの値をとることから、ちなみに深水波として波速を計算してみると10~40cm/s程度となる。ただ、現実にはこのような波があったとしても各々の波の波向は不規則で互いに打ち消しあうため、ビデオ画像上である種の移動媒体として認識されるのは、洪水の平均流(低平地では2~3m/s程度)に、平均流速の高々1割程度の群波速度を持つ水面の擾乱が重畳した場ということになる。通常、これらの微小水面擾乱には方向性がないため、これらのノイズ(微小波速の影響)は平均処理によって除去できる。ただし、強い風によって方向性の強い重力波が連続的に発生している

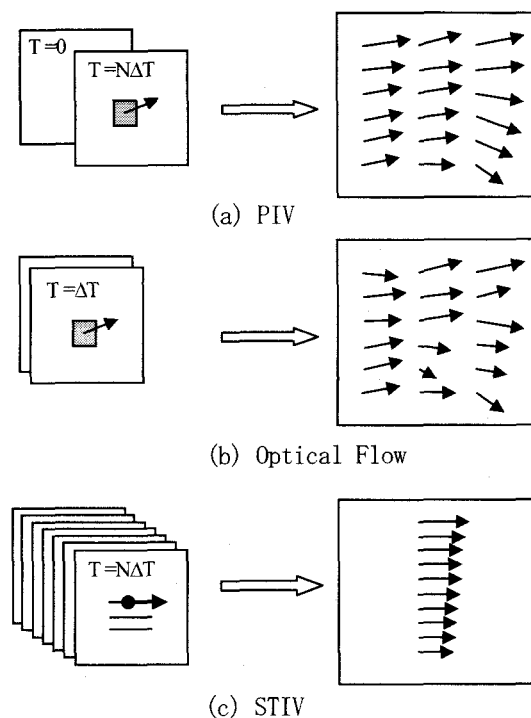


図-1 各手法の比較

場合は、その影響は無視できず、重力波の波速の方を追跡してしまう可能性が高い。ただし、この短所は画像利用法に限らずどの非接触法でも生じるものである。いずれにしても、このような水面の凹凸を河岸などから観察すると‘水面波紋’として認識できる。

まとめると、ドップラー効果を利用する計測法が比較的小スケール(センチメートルオーダー)の水面波紋(水面の凹凸)を微視的に追跡しているのに対し、画像を利用する方法では中小のスケールが混在した水面波紋の場を巨視的に追跡していることになる。ただ、このような水面波紋の発生条件やその強度と河川における水理条件との関係は必ずしも明らかになってはおらず、今後の研究が必要である。

3. STIV法の概要

(1) STIV法の位置づけ

ビデオ画像のような動画から移動体の動きを捉える方法としてよく知られているのは、前述のPIV法とオプティカルフロー法である。PIV法はもっぱら流体計測分野で用いられており、オプティカルフロー法はリアルタイムで物体の動きを識別する必要のあるロボット工学で用いられることが多い⁷⁾。一般にオプティカルフロー法はノイズが生じやすいため、様々な工夫が加えられている。PIV法では二枚の連続画像から、オプティカル



図-2 時空間画像の画像サイズ=101x31画素, 約1秒間31枚のフレーム画像から生成)

フロー法では二枚あるいは数枚の連続画像から二次元の瞬間速度場を求めるが, 本研究におけるSTIV法では連続する数十枚の画像から一次元(主流方向)の平均速度場を求めるのが大きな特徴である。

利用する画像に関して各手法の違いを模式的に示したのが図-1である。通常のビデオ画像ではフレーム画像の最小時間間隔(ΔT)は1/30secである。流れ場にもよるが, PIV法では計測精度を高めるために対象物の画像上での移動量が5~10画素となるように二連続画像の時間間隔を調整するのが通例である。図-1の例では最初の画像とN番目のフレーム画像から速度場を得ている。一方, オプティカルフロー法では輝度分布の移流方程式から移流速度を算出するので, 時間および空間方向の輝度の勾配値を精度よく求める必要がある。そのために, 図-1(b)に示すように最小時間間隔 ΔT の連続画像が用いられる。

これに対し, STIV法は数秒間のビデオ画像すなわち数十枚のフレーム画像の情報から流れ方向の流速成分を求める方法である(図-1(c))。輝度の空間勾配を求めるという点では, オプティカルフロー法の一次元版とも言えるが, 輝度の勾配値を移流方程式ではなく画像処理によって求めている点が従来の方法と大きく異なる。また, 前述の方法では一辺が10~50画素程度の正方領域が計測対象だが, STIV法では流れ方向に50~100画素程度, 横断方向に1画素の線状領域が計測対象となる。そのため, 横断方向に非常に高密度の流速分布を求めることができる。

(2) 時空間画像の構成要素

STIV法で用いる時空間画像の一例を図-2に示す。この画像は, 図-3に示した検査線上の輝度分布を時間軸方向に積み重ねて生成したものである。この例では, 時空間画像の生成に約1秒間31フレームのビデオ画像を用いている。対象河川では洪水流が流下中で水面には多数の水面の凹凸(水面波紋)が確認できる。部分的には小スケールの砕波も見られる。

図-2からわかるのは, 非常に多くのノイズが含まれてはいるが, 全体的な傾向として右下に向かう縞模様を確認できる点である。この中で相対的に黒い部分は水面

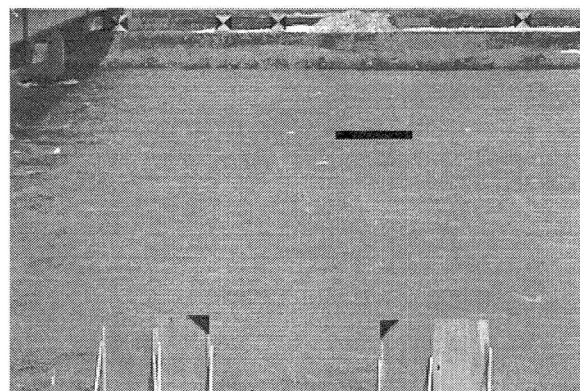


図-3 検査線の位置(図中の黒線部分)

凹凸の谷の部分, 白い部分は水面凹凸の峰の部分に対応している。また, 最も白く見えている部分は砕波した白波を示している。これらの縞模様は途切れ途切れではあるが局所的には連続しており, しかも各縞パターンがほぼ平行であることから, この微小時間内(約1秒間)においては水面凹凸(波紋)の形状がほぼ凍結された状態で移流されていると見なせる。STIV法では, 検査線上を通過中の平均流がこの移流状態を引き起す要因と考えている。従って, この縞パターンの傾きを求めれば検査線状を通過している表面流の流速が得られることになる。従来の研究^{4,5)}ではこの傾きを変形法によって求めていたが, ここでは, 別の手法として一次元オプティカルフロー法と輝度勾配テンソル法を用いて比較検討した。

(3) 一次元オプティカルフロー法

画像の輝度分布を $f(x,t)$ とし, その分布が流れ方向に凍結された状態で移流されるとすると移流方程式は

$$f_t + uf_x = 0 \quad (1)$$

と表せる。 u は移流速度を示しているが, ここでは, u の分布として次式を仮定する。

$$u = u_0 + u_x(x - x_0) + u_t(t - t_0) \quad (2)$$

ここに, u_0 は平均流速, x_0, t_0 は検査線の時空間における中心点, $x - x_0$ および $t - t_0$ は検査線上の中心点からのずれを表す。一次元オプティカルフロー法では次の目的関数 $G(u)$ を最小とする u_0, u_x , および u_t を最小二乗法によって求める。

$$G(u) = \sum_A (f_t + uf_x)^2 \quad (3)$$

ここに, A は時空間における検査領域をさす。

(4) 輝度勾配テンソル法⁸⁾

この方法では, 時空間画像内に含まれる縞パターンの傾きを求めるために, 縞パターンの勾配ベクトル ∇f と

局所的な方向単位ベクトル $\vec{n}$ の内積の二乗値,

$$H(x,t) = (\nabla f^T \vec{n})^2 \quad (4)$$

が最大となるような方向ベクトルを局所的な検査領域 A に対して求める。すなわち,

$$\int_A H(x,t) dx dt = \vec{n}^T \left(\int_A \nabla f \nabla f^T dx dt \right) \vec{n} \rightarrow \text{maximum} \quad (5)$$

が目的関数である。式(5)におけるカッコ内の積分は画像の輝度勾配に関連するテンソルで

$$J_{pq} = \int_A \frac{\partial f}{\partial x_p} \frac{\partial f}{\partial x_q} dx dt \quad (6)$$

とおける。ここに、 p, q は時空間の成分を表す指数でここでは、 $x_1=x$ および $x_2=t$ とする。 J_{pq} は対称テンソルなので座標系を適当に回転すれば対角化でき、そのとき式(5)を成分表示すれば(回転後の変数に'をつけて)次式のように表せる。

$$\begin{bmatrix} n'_1 & n'_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} J'_{11} & 0 \\ 0 & J'_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} n'_1 \\ n'_2 \end{bmatrix} \rightarrow \text{maximum} \quad (7)$$

この形にすれば、 $J'_{11} \geq J'_{22}$ としたとき、単位ベクトル $\vec{n}' = [1 \ 0]^T$ がこの条件を満たすことが容易にわかる。このことから、テンソル(マトリクス) J_{pq} の固有値を与える回転角が求めるべき角度ということがわかる。二次元問題の場合の固有値を λ_1 および λ_2 とすると固有値と回転角の関係は次式で与えられる。

$$\begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 \\ 0 & \lambda_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \phi & -\sin \phi \\ \sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} \\ J_{12} & J_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \phi & \sin \phi \\ -\sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix} \quad (8)$$

この式の非対角成分の比較より

$$\frac{1}{2}(J_{11} - J_{22}) \sin 2\phi + J_{12} \cos 2\phi = 0 \quad (9)$$

が得られる。式(9)より、回転角 ϕ すなわち縞パターン勾配は次式から求めることができる。

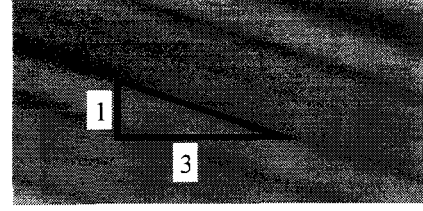
$$\tan 2\phi = \frac{2J_{12}}{J_{22} - J_{11}} \quad (10)$$

また、縞パターンのコヒーレンシーは次式で与えられる。

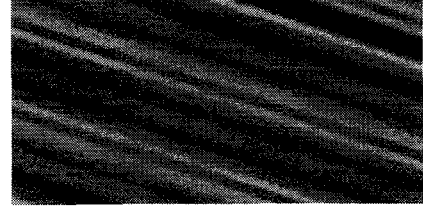
$$Cc = \frac{\sqrt{(J_{22} - J_{11})^2 + 4J_{12}^2}}{J_{11} + J_{22}} \quad (11)$$

このコヒーレンシーは、縞パターンの強さを示すパラメータであり、理想的な縞パターンの場合に1、全くパターンがない場合に0の値をとる指標である。

以上より、式(6)を用いて時空間各方向の輝度勾配の積をある検査領域内(A)で積分すれば、式(10)を用いて縞パターンの局所的な勾配が算出できる。本研究では、



(a) Case V



(b) Case C

図-4 模擬画像の例($\tan \phi=3$)

輝度勾配の計算には5次精度の中央差分を用いた。この差分式を空間軸方向について示せば

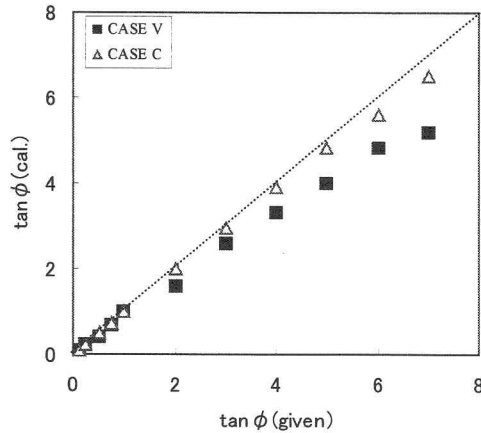
$$\frac{\partial f}{\partial x} \cong \frac{f_{i+3} - 9f_{i+2} + 45(f_{i+1} - f_{i-1}) - 4f_{i-2} - f_{i-3}}{60\Delta x} \quad (12)$$

となる。解析においては、検査領域を一辺が10~20画素程度の正方領域として時空間画像上で ϕ およびコヒーレンシー Cc の値の分布を求め、 Cc があるしきい値以上となる検査領域での ϕ の平均値を水面波紋の移流に関わる縞パターンの角度とした。

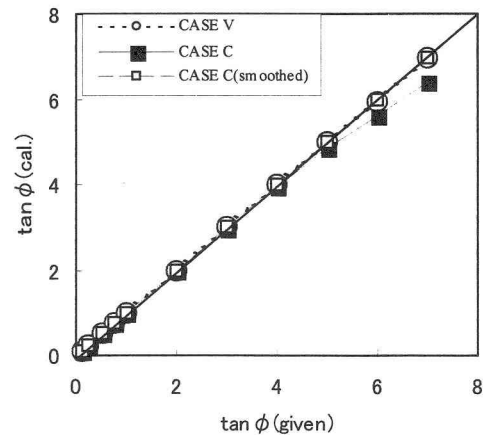
(5) 模擬画像による計測精度の検討

縞パターン勾配検出の精度を調べるために、まず模擬画像による検討を行った。シミュレーション画像は、縞パターンの輪郭が不明瞭な場合(CASE V)と明瞭な縞がある場合(CASE C)を想定して生成した。サンプル画像を図-4に示す。模擬画像は強度と標準偏差をランダムに発生させたガウス分布に従う輝度分布を重ね合わせ、それを時間軸(縦軸)方向に任意の角度でずらすことによって生成した。角度の範囲は、 $\tan \phi=0.1$ (5.7度)から $\tan \phi=7.0$ (81.9度)までとした。図-4では $\tan \phi=3$ の例を示した。

一次元オプティカルフロー法と輝度勾配テンソル法による結果の比較を図-5に示す。一次元オプティカルフロー法ではパターンの強さを表す指標がないため、画像内の勾配分布の平均値を求めた。輝度勾配テンソル法ではコヒーレンシーが0.9以上の値をとる勾配の平均値を求めた。図-5(a)からわかるように一次元オプティカルフロー法では $\tan \phi$ が1.0以下の範囲では良好な結果を示すが、勾配が大きくなるにつれて計算値が過小評価され



(a) 一次元オプティカルフロー法



(b) 輝度勾配テンソル法

図 - 5 精度の比較 (検査領域サイズ : 10X10画素)

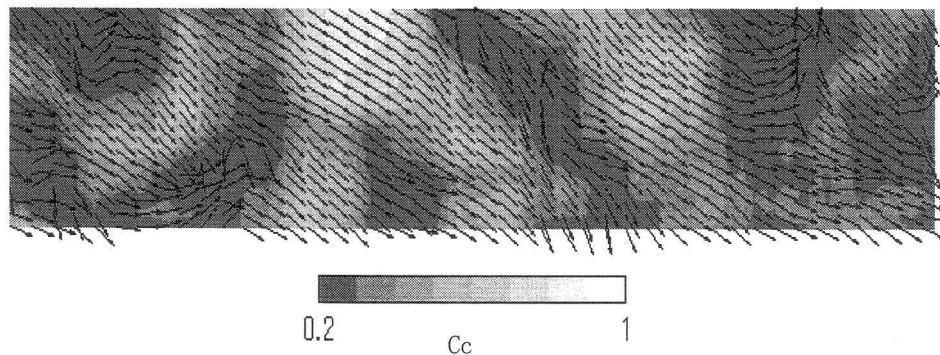


図 - 6 輝度勾配ベクトルとコヒーレンシーCcの対応関係 (画像サイズは図-2と同等で101X31画素)

るようになり、この傾向は縞パターンが不明瞭な場合に特に顕著であった。一方、輝度勾配テンソル法では縞パターンが不明瞭なCASE Vの方が全範囲に渡って非常に良好な結果を与えていることがわかる。これに対し、明瞭な縞パターンが現れているCASE Cでは誤差が発生しており、その傾向は一次元オプティカル法と同様のものがあった。そこで、二次元のガウスフィルタを用いて平滑化した後に輝度勾配テンソル法を適用したところ、CASE Vと同様の良好な結果が得られた。この点は、ノイズやもともと曖昧さの多い実河川に対する時空間画像を扱う上で非常に重要で有利な特徴である。従って以降の解析では輝度勾配テンソル法を用いることとする。

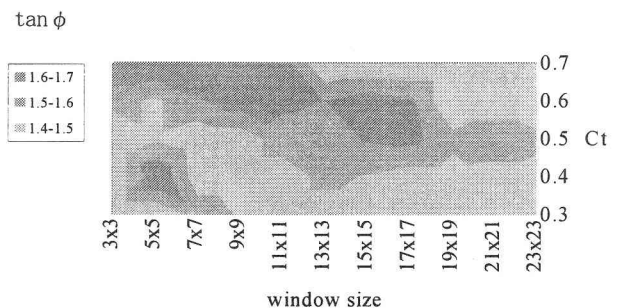


図 - 7 検査領域サイズおよびしきい値の影響

4. 実河川画像への適用

(1) 平均輝度勾配の算定法

実河川の表面流画像から得られる時空間画像への適用例として、図-2の時空間画像に輝度勾配テンソル法を適用した結果を図-6に示す。この例では検査領域サイズを7x7画素とした。図-2の時空間画像に現れた縞パターンはシミュレーション画像と比べればはるかに不鮮

明ではあるが、縞パターンが識別できる部分では明らかにコヒーレンシーが高く、輝度勾配ベクトルの傾きも一様化していることがわかる。また、その向きは縞パターンの向きと一致していることも確認できる。従って、相対的に高いコヒーレンシーを持つ輝度勾配ベクトルのみをピックアップしてその平均をとれば、後述の移流速度

の算出に有効な平均輝度勾配を得ることができる。図-2の時空間画像を対象として輝度勾配の平均値に及ぼすコヒーレンシーのしきい値(CI)ならびに検査領域サイズの影響を調べた結果を図-7に示す。コヒーレンシーの高い部分の輝度勾配には多少のばらつきがあるため、コヒーレンシーに対するしきい値の取り方によって得られた勾配値に差が見られるが、このケースではそのしきい値を0.5程度にとれば検査領域サイズにあまり依存せずにはほぼ一定の勾配値が得られることがわかる。平均輝度勾配が得られれば検査線上を通過する波紋の平均移流速度U(この例では約1秒間の平均になる)は次式から求めることができる。

$$U = \frac{S_x}{S_t} \tan \phi \quad (12)$$

ここに、 S_x (m/画素)は検査線軸の単位長さスケール、 S_t (sec/画素)は時間軸の単位時間スケールを表す。

(2) 輝度勾配テンソル法と変形法との比較

図-3に示したビデオ画像上に多数の検査線を設定し、二通りの方法、すなわち輝度勾配テンソル法と従来の変形法^{4,5)}によって横断流速分布を求めた。ここでは、瞬間的なデータの比較を行うために、図-2と同様の1秒間の時空間画像を解析した。比較結果を図-8に示す。Xは左岸からの横断距離である。これより、どちらの方法も左岸側に最大流速が現れるという全体的な傾向はとらえているが、データの不一致も見られる。個々の時空間画像を調べたところ、場所によっては明瞭な縞パターンが現れていないケースがあり、それが傾斜角の画像計測を困難にしていることがわかった。縞パターンの不足は計測時間(この場合1秒間)が短く、検査線の位置によっては輝度勾配生成に有効な波紋がその時間内に通過しなかったことが原因である。したがって、時間軸方向の情報を増せばこの不足点は解消できるはずであり、既報(変形法による)では約60秒間のデータから滑らかな分布形を得ている。手法別に比較すると、輝度勾配テンソル法の方がデータのばらつきが小さく、より少ない情報から有効な平均流データが得られる可能性を示唆している。なお、一次元オプティカル法ではノイズの影響が大きく現れ、有効な輝度勾配の計測はできなかった。

5. あとがき

本研究では河川表面流を非接触計測する際に利用する

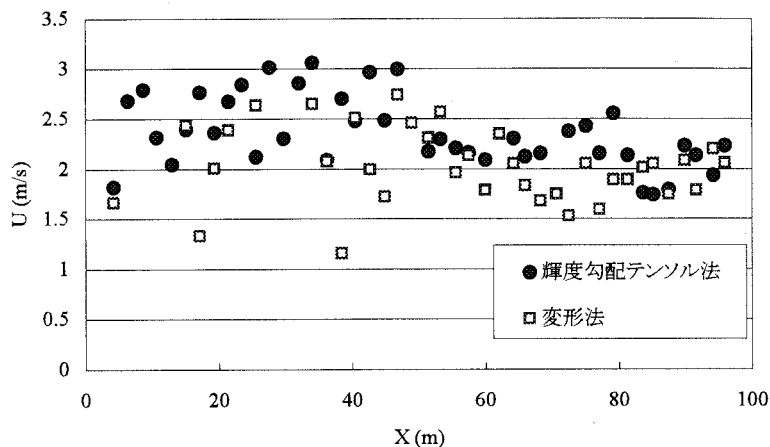


図-8 流速分布の比較(1秒間の平均値)

表面波紋に関して、その発生要因やトレーサとしての有効性について詳細な説明を加えた。また、時空間画像を利用した縞パターン解析法(STIV法)として輝度勾配テンソル法を紹介し、シミュレーション画像と実河川画像への適用からその有用性を示した。STIV法は横断方向の空間解像度が高いため、川幅がかなり広く(実績では対岸まで200m程度でも十分解析可能)撮影俯角が小さい場合でも適用可能である。ただし、利用するのはあくまでも画像であるため、撮影条件が悪く水面波紋の移流状況が目視でも識別できないような場合には適用できない。輝度勾配テンソル法は高速演算が可能のため、実用的な非接触計測法として将来性があるが、最適な計測時間や画像内のノイズ除去法に関しては今後の検討を要する。

参考文献

- 1) 土木研究所他：共同研究報告書第291号「非接触型流速計測法の開発」, 2003.
- 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) Fujita, I., Muste, M. and Kruger, A.: Large-scale particle image velocimetry for flow analysis in hydraulic engineering applications, *Journal of Hydraulic Research*, IAHR, Vol.36, No.3, pp.397 - 414, 1998.
- 4) 藤田一郎, 椿涼太：小俯角のビデオ画像に対応した河川表面流計測手法の開発, 河川技術論文集, Vol. 7, pp.475 - 478, 2001.
- 5) 藤田一郎, 椿涼太：時空間濃度勾配法による主流方向表面流速分布の現地計測, 水工学論文集, 46巻, pp. 821 - 826, 2002.
- 6) 小林範之, 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, Vol.8, pp.455 - 458, 2002.
- 7) Lucas, B. and Kanade, T.: An iterative image restoration technique with an application to stereo vision, *Proceedings of the DARPA IU Workshop*, pp.121-130, 1981.
- 8) Jahne, B.: *Spatio-Temporal Image Processing*, Springer, pp.150 - 152, 1993.

(2003. 4. 11受付)