

画像処理による曲線水路の断層面内流況の乱流構造の測定

Picture processing for the two-dimensional measurement
of turbulence structure in curved channel flow

京都大学防災研究所 宇民 正 Tadashi UTAMI

京都大学防災研究所 上野鉄男 Tetsuo UENO

The horizontal cross-sections of a meandering channel flow were visualized using fine particles as tracers. Picture films were digitized and processed by the computer to obtain two-dimensional distributions of velocity vectors.

In this paper, the methods of flow visualization and picture processing beside with the significance of the method are described. The results obtained by the method are discussed and observed vortices are related with the large scale vortices observed by the aerial photographs of the flood flow.

Keywords: Flow Visualization, Image Processing, Meandering Channel

1. 概説

曲線水路の流れにおいては、複雑な渦構造がその基本となっている¹⁾。この渦構造は時空間的に発達しながら変形して行く。すなわち、この渦構造は、空間的には境界条件に応じた独自のスケール・形状・配列をもっており、同時に時間的には発生・成長・減衰・消滅と言った過程を経る。その過程の中には渦の分裂・合体を含む。

この様な渦構造の実態を把握するための計測法について考えてみよう²⁾。まず、固定点計測法では、第一に、計測点は渦構造の中心を捉えることもあり、その縁辺を捉えることもある。少なくとも得られた計測値からそれが渦構造のどの位置のものであるかを判断することは困難である。第二に、この方法による場合、同時に設定できる計測点の数は限られているため、たとえ相互相関法などを用いて計測結果を解析しても渦構造の空間的な特性を把握するには不十分である。さらに第三に、固定点計測法では得られる情報はせいぜい流速の三方向成分であり、渦度に関する計測にはきわめて特殊な計測器と技術を要する³⁾。以上の理由のため、曲線水路においては、その平均流の計測には固定点計測法は使えるとしても、流れの構造の把握のためには事実上有効な計測法とは言えない。

一方、流れの可視化法による場合、ある瞬間における流速ベクトルの平面的な分布が得られるので、固定点計測法に比べてそのもたらす情報は圧倒的に豊富である。すなわち、第一に、可視化した写真に画像処理の手法を導入することによって得られた情報は定量化・精細化される。第二に、この計測結果は二次元的であり、それを使うならば、渦度や発散等といった水理量も容易に計算される。第三に、これらの諸量は図化して視覚的に情報を認識することができるので、測定結果についての認識や判断も一層高度化される。第四に現象を連続的に撮影するならば、その経時変化も把握できる。

複雑な渦構造の解析に耐える画像処理法については、独自の撮影法、画像処理法ならびに計算結果の表現法が必要である。本報告ではこれらに関する著者らの試みについて述べる。著者らは、画像処理による流速ベクトルの二次元分布の計測法として二種の方法を用いてきた。その第一は、微小時間差で撮影された二枚の写真を用いて相互相関法により個々のトレーサーを追跡する方法^{4), 5)}、そして第二は、同じく相互相関法により任意の位置の速度ベクトルを計算する方法^{6), 7)}である。本研究では、後者の方法に改良を加え、画像処理の精度を上げるとともに、曲線水路といった複雑な境界条件での乱流計測にも適用できるようにした。

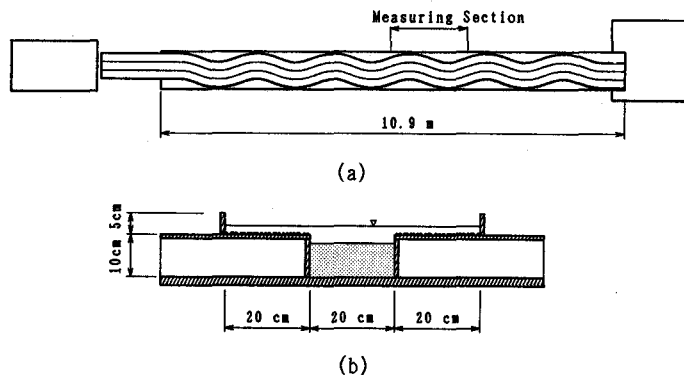


図-1 (a) 実験水路の平面図 (b) 実験水路の横断面図

2. 実験方法と実験条件

複断面蛇行形状の実験水路で流れの水平断面をスリット光で照射し、断面内の流況を撮影した。水路の平面形状の概要は 図-1(a) に示すようであり、水路の中心線は最大偏角 20° 、波長 180 cm の sine-generated 曲線である。水路中心線に直角方向の横断面は図-1(b) に示されるようであり、水路幅 60 cm、低水路幅 20 cm、低水路の深さ 21 mm、高水敷上の水深 19 mm であり、高水敷上には 3mm 粒径の砂粒で粗度付けた。低水路河床は粒径 0.4mm の砂で構成されているが、本実験の水力条件では、限界掃流状態以下である。流量は 1.38 l/s、水路床勾配 1/1000、水面勾配 1/9000 である。

流れの水平断面を水路の両側から厚さ 3 mm のシート状の光で照射し、その断面内の流況を水路の上方に光軸が平行になるように並べて設置した二台のカメラを用いて僅かな時間差 (約 38 ms) で撮影した。撮影は水路床面からいろいろな高さで行われた。測定に要する精度からして、ビデオカメラは使えないので、35 mm フィルム用のスチールカメラを用いた。撮影のタイミングはマイクロコンピュータで制御した。トレーサーとしては 0.4 mm のポリスチレン粒子を用いた。カメラフィルムの高水敷面からの高さは 256 cm、撮影断面の高水敷面からの高さ z は -16.5、-10.0、6.7、17.5 mm である。写真の周辺に 6 個の標定点を写し込む様にしており、この位置座標は予め計測されており、これによって一対の写真の位置関係を得た。

本報告において、 x 、 y および z 軸は直交直線座標系で、 x 軸は主流流下方向、 y 軸は水平横断方向、 z 軸は高水敷面から鉛直上向き方向である。また、 x および y 方向の流速成分をそれぞれ u および v で表記している。

3. 画像解析

3.1 写真画像の数値化

約 40 ms 間隔で撮影された二枚一組の写真フィルムを東京大学木曾観測所の PDS マイクロデンストメーターにより 10 ミクロン間隔 (実長 0.48 mm) で 12 ビットデータとして数値化した。解析には防災研究所宇治川水理実験所の計算機 (NEC MS190) を用いた。この計算機の容量上の制約のため、数値化されたデータを 8 ビットデータに変換して計算機に入力した。

3.2 標定点の中心点の位置座標の決定

標定点及びその周辺の各ピクセルにおける濃度の分布の一例を図-2 に示す。写真画像上の標定点の半径 (ピクセル単位) とほぼ等しい標準偏差をもつ二次元ガウス

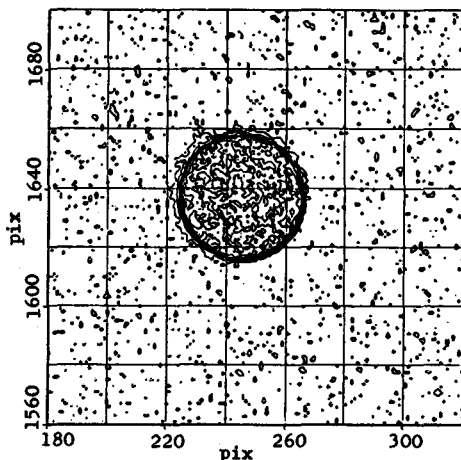


図-2 標定点周辺の各ピクセルにおける濃度分布

分布を想定し、これと標定点の近傍のある点を中心とする濃度分布との相関係数を計算し、それをその点における相関係数値とする。標定点及びその近傍の各ピクセル毎にこの相関係数を計算し、さらにそれらの内最大値を与える9点（縦方向3点、横方向3点）の間を内挿することにより相関係数の最大となる位置を求め、それを標定点の中心の位置座標とした。

3.3 速度ベクトルの計算

一対の写真のうち第一の写真の速度を求めるべき位置Aの周りの微小領域（a領域と呼ぶ、本計算ではx方向に23ピクセル、y方向に15ピクセルとした）における濃度分布と、その点から平均流速に相当する距離だけ流下した点を第二の写真の上にも求め、その点を中心とする同様の大きさの微小領域（b領域と呼ぶ）における濃度分布との間の相関係数を計算した。続いて、b領域を1ピクセル分x方向或はy方向にずらして、同様に相関係数を計算した。以上の操作を繰り返すことにより、第一の写真のA点に対して第二の写真上に相関係数の分布が得られるが、そのうちの最大の相関係数を与える点がA点の対応点と考えられる。ただし、1ピクセルの大きさが実長にして約0.48mmあるので、実際には、求まった対応点を中心とする9点（x方向3点、y方向3点）における相関係数の分布から、第二の写真においてそれが最大となる位置の座標を内挿法によって求め、それがA点の真の対応点であるとした。以上の方法により、流下方向および横断方向に10ピクセル（実長4.8mm）毎に流速ベクトルを算定した。

得られたベクトルおよびその位置座標（ピクセル単位）から水面での屈折の影響を除去し、さらに、標定点との相対的な位置関係を用いて真のベクトル並びにその位置を求めた。以上のようにして得られた結果の一例として $z = 17.5$ mm 断面において算出されたベクトルの分布を図-3に示す。本図には座標系もあわせて示されている。また、6個の十字印は標定点を示している。本図では、水路横断方向には得られた全ての流速ベクトルを、流下方向には5つに1つの割合で図示している。ただし、相関係数が0.2以下のベクトルはプロットされていない。

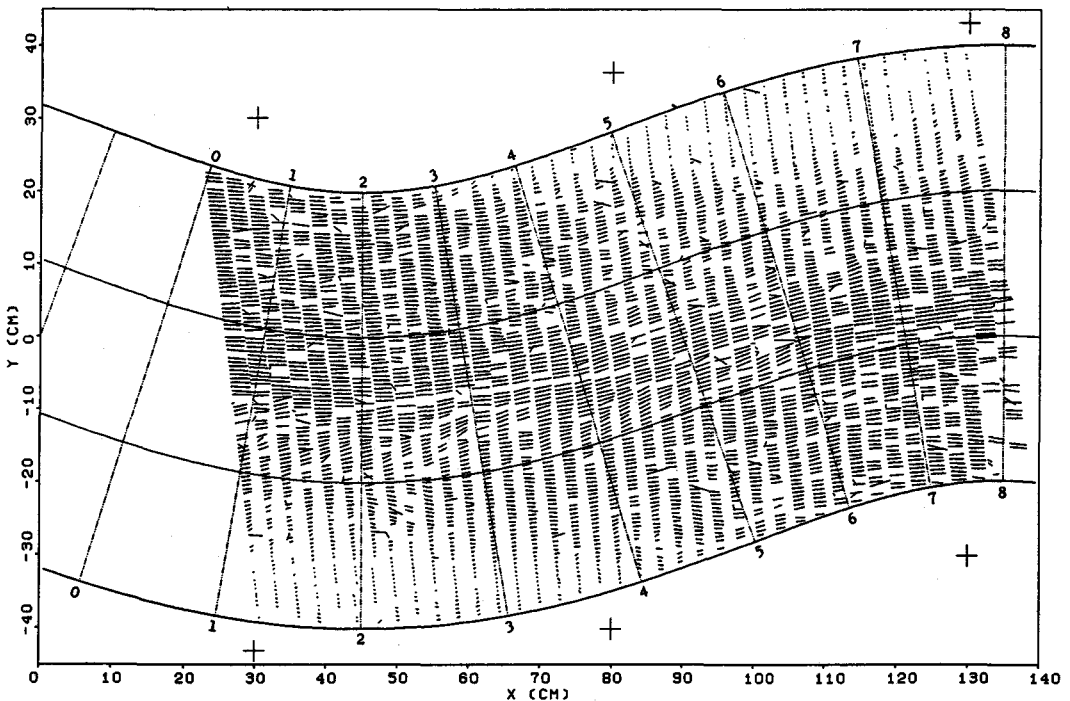


図-3 画像処理により得られた流速ベクトル

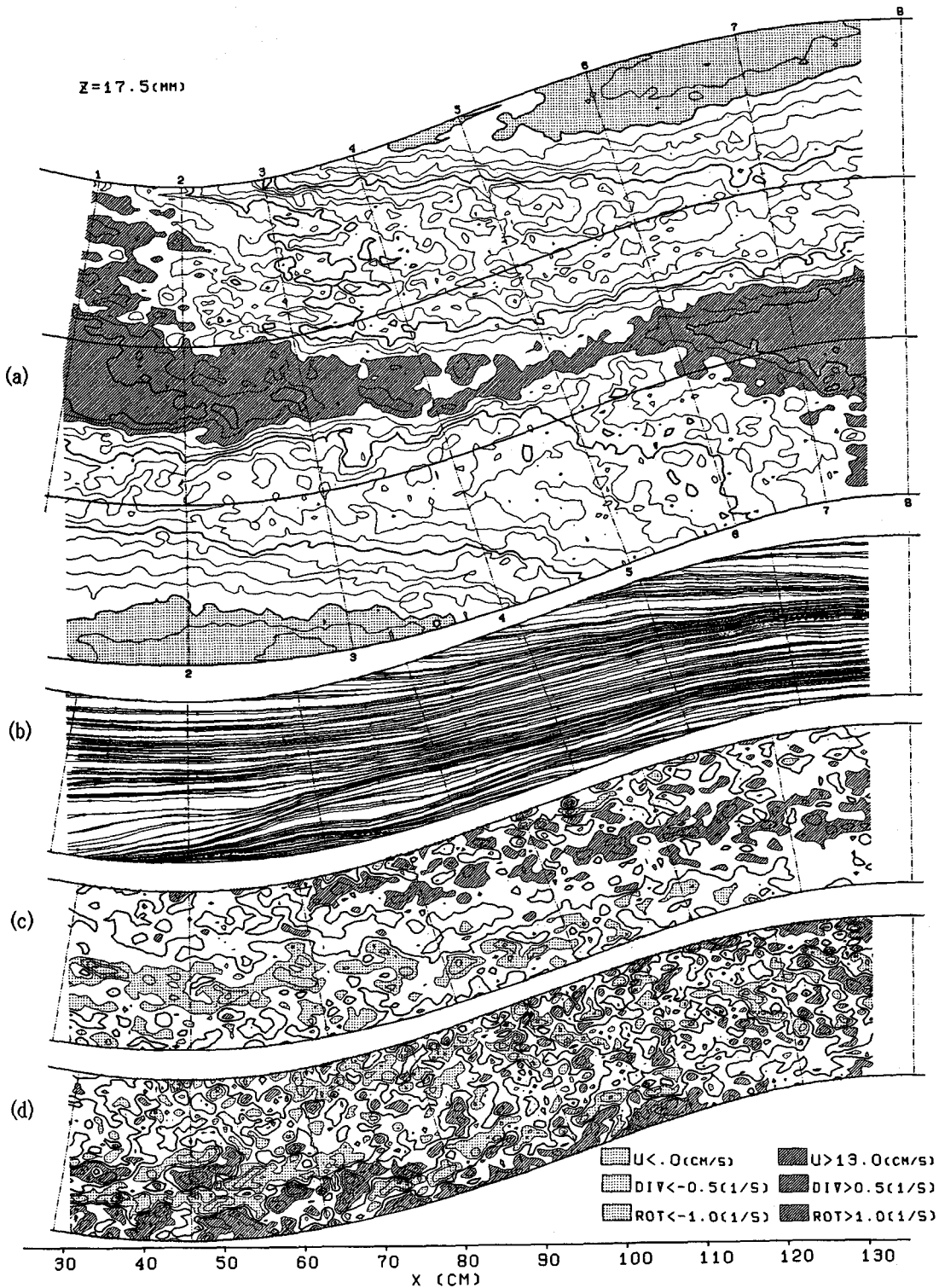


図-4 (a) x 方向流速成分 u の分布 (b) 流線 (c) 渦度分布 (d) 二次元発散分布

3.4 過誤ベクトルの除去

図からも明らかなように得られたベクトルの内には誤って求められたものも若干含まれている。これらの過誤ベクトルを以下の方法で除去した。まず、ベクトルを算出したときの相関係数が 0.4 以下のものを除去した。次に、ベクトルを計算した流れの場をいくつかの小領域に分割し、各小領域毎にその中に含まれるベクトルについてその x 方向成分 u と y 方向成分 v とを二成分とする二次元ヒストグラムを作成し、モード値からの偏位が閾値を越えるベクトルを除去した。

3.5 格子点ベクトルの計算

以後の計算の便のため、水路法線に一致した直交曲線座標系を設定し、そこでの各格子点でのベクトルを内挿法で求めた。この格子点の間隔は横断方向には 5 mm、流下方向には水路中心線上で 7.5 mm である。

4. 解析結果とその考察

以上の解析によって得られたデータの内、水面に近接した測定断面 $z = 17.5 \text{ mm}$ における (a) x 方向流速成分 u 、(b) 流線のパターン、(c) 渦度ベクトルの z 方向成分 ($\text{rot} = \partial v / \partial x - \partial u / \partial y$) ならびに (d) 二次元発散 ($\text{div} = \partial u / \partial x + \partial v / \partial y$) の分布を図-4 に示す。図において等高線の間隔は、 u については $1(\text{cm/s})$ 、 rot は $1(1/\text{s})$ そして div は $0.5(1/\text{s})$ となっている。なお、図には上記の諸量の半波長分が示されており、(b)-(d) については低水路内の分布のみが示されている。

(a) 図から、高水数においては凸岸下流で広い剝離域が認められる。また低水路凸岸下流にはせん断層が発達している。後者の様子は (c) 図において明快に認められる。(d) 図から、低水路の凹岸から凸岸にかけて発散の大きな領域が認められる。この断面が水面に近接していることを考慮すると、そこには強い上昇流があることがわかる。(b) 図から、この部分は低水路の流れが高水数に乗り上げている所に相当することがわかる。

これら流れのせん断層領域、すなわち河岸渦領域の内部構造を視覚的に把握するために、各横断線上の流速成分 u および v から渦中心近傍の平均的な流速を差し引いたうえで、流線を図化した。得られた流線のパターン内、低水路内の部分を図-5 に示す。この流線パターンは重要な特徴を示している。第一に流線が渦状の構造を示しているところや流線の曲率の大ききところで渦度が大きくなっている。第二に、各渦は流線の収束線によって隔てられている。この収束線の近傍では流れは沈み込む。第三に、各渦には右岸側と左岸側とからそれぞれ流れが巻き込まれている。この様な流線のパターンを単純化して示すと図-6 の様になる。木下¹⁾によって観測された石狩川浦臼地先の巨大な河岸渦はこの様な渦でないかと考えられる。

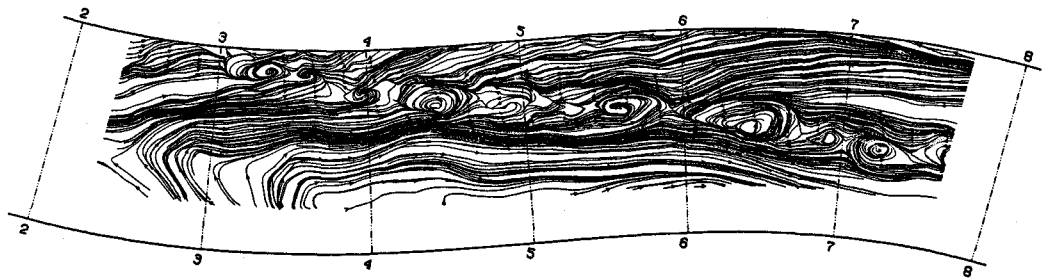


図-5 乱れ成分の流線 ($z=17.5\text{mm}$)

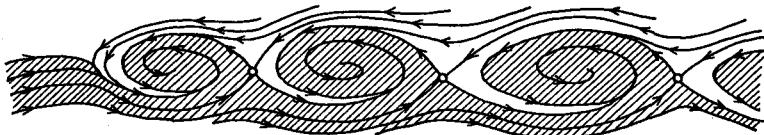


図-6 並進系から見た河岸渦の水面における流線の典型形状

これらの流線はあくまでも一種の乱流成分の流線である事に注意すべきであろう。実河川で観測される河岸渦は上記のような乱流成分によって巻き上げられる土砂の濃度の濃淡によって識別され、それは平均的な流速で運搬されるので、木下⁸⁾によって指摘されているように、河岸渦のパターンは実際の流線や流跡線とは全く別のものとなる。例えば、流線は渦領域およびその近傍で波状を呈するのみである。これは、非常に興味ある現象と言えよう。

6. 結 語

相互相関法に基づく画像処理により流速の二次元分布を測定する方法を示した。とくにこの方法が、①蛇行水路といった複雑な境界条件下の流れの計測に適用できる、②乱流構造といった複雑な現象の計測に適用できる、③幅60cm、長さ100cmの広い範囲にわたる流速分布が得られる、という点で非常に優位なものであることが示された。

本画像処理法を適用できるような流れの可視化法、解析結果の表現法の例、並びにそれに関する考察も併せて述べた。特に洪水時に河岸に形成される大規模渦の機構について実験結果と関連して考察した。

本研究を行うにあたり、自由学園の木下良作博士から懇切な御教示ならびに貴重な資料の提供を賜った。また、写真画像の数値化にあたり東京大学理学部天文学教育センター・木曾観測所の岡村定矩助教授ならびに樽沢賢一技官の御協力を得た。これらの方々に深甚の謝意を表したい。

参考文献

- 1) 木下良作；洪水時の沖積作用調査と適正複断面河道に関する実験的研究，沖積地河川における洪水流の制御と治水安全度の向上に関する研究，文部省科学研究費自然災害特別研究（岸力代表）報告書，1988，pp. 55-68.
- 2) Laufer, J; New trends in experimental turbulence research, Annual Review in Fluid Mechanics, vol. 7, 1975, pp. 307.
- 3) Foss, J. F. and J. M. Wallace; The measurement of vorticity in transitional and fully developed turbulent flows, Lecture Notes in Engineering, 'Advances in Fluid Mechanics Measurements', Springer Verlag, 1989, pp. 263-321.
- 4) 宇民正・上野鉄男；第 18 回乱流シンポジウム講演論文集，日本流体力学会，1986，PP. 178-181.
- 5) Utami, T., R. F. Blackwelder and T. Ueno; Flow visualization with image processing of three-dimensional features of coherent structures in an open-channel flow, Intern. Seminar on Near-Wall Turbulence, 1988.
- 6) 上野鉄男・宇民正・Ron F. Blackwelder；開水路乱流の水路床近傍の組織構造について，第33回水理講演会論文集，1989，pp. 547-552.
- 7) Utami, T., R. F. Blackwelder and T. Ueno; A cross-correlation technique for velocity field extraction from particulate visualization（投稿中）.
- 8) 木下良作；航空写真による洪水流解析の現状と今後の課題、土木学会論文集、第345号II-1、1984、pp. 1-19.