

航空写真の画像処理による洪水流の乱流構造と河床形状に関する研究

宇民 正・上野 鉄男・木下 良作

A STUDY ON THE TURBULENCE STRUCTURE OF FLOOD FLOWS AND RIVER BED FORMS USING THE PICTURE PROCESSING OF AERIAL PHOTOGRAPHS

By *Tadashi* UTAMI, *Tetsuo* UENO and *Ryosaku* KINOSHITA

Synopsis

A pair of aerial photographs of the 1966 flood flow in the Agano River was analyzed by the cross-correlation technique to obtain velocity vectors over the water surface. An experiment on the flow over a scale-like channel bed was also carried out, and the velocity vectors on the water surface were calculated by the same technique.

The distribution of divergence and velocity, and streamline patterns were shown concerning both of the Agano River flood flow and the experimental channel flow. Some of them were shown to have similar characteristic properties.

In conclusion, it was shown that the flood flow is comprised of hierarchical turbulence structure of various scales and they are closely related to their proper bed configurations of the similar scales.

1. 概 説

洪水流航空写真の解析法が1960年代に木下^{1)~3)}により開発され、これによって洪水流の蛇行現象や乱流構造に関する多くの新知見が得られた。とりわけ、洪水流の乱流構造に関しては、木下は、洪水流中に水深のほぼ2倍のスケールをもつ並列らせん流が形成され、それに対応して水面における流速の横断方向分布が波状を呈することを見いだした。また、木下は、この並列らせん流が、実験水路においても、それが固定床であろうと移動床であろうと水深に対して幅が広い流れであれば、一般に形成されることを明らかにし、並列らせん流が開水路における普遍的な乱流構造の一つであることを指摘した。

さらに木下⁴⁾は、水路床形態を種々に変化させて並列らせん流に関する詳細な実験的検討を行い、ウロコ状の河床の場合には、洪水流航空写真に見られるような明確な並列らせん流が形成されることを明らかにし、そのときの並列らせん流の3次元的な内部構造を流れの可視化法を用いて検討した。

一方、宇民・上野^{5), 6)}は、境界層内の大規模乱流構造と二次流に関する従来の研究成果と流れの可視化法を用いた実験的な検討から、階層的な乱流構造モデルを提案した。その中に、バースティング現象と並列らせん流の発生・発達機構との関連も示されている。

宇民・上野^{7), 8)}はまた、実験水路における流れの断層面を僅かな時間差で連続撮影し、得られた写真の画像解析により流速ベクトルを得る方法を開発した。著者ら^{9), 10)}は、この写真解析の方法が洪水流航空写真の解析に有効に適用できることを示した。すなわち、この方法の導入によって洪水流水面における流れ、

渦度、発散などが計算され、洪水流の構造が従来にもまして詳細かつ明確に把握できるようになった。

本研究は、見事な並列らせん流の形成が捉えられている阿賀野川の1966年9月25日の洪水流航空写真を画像解析することによって大河川の洪水流の乱流構造の実態を明かにしようとしたものである。また、ウロコ状の河床を人工的に敷きつめた実験水路における流れの可視化も行われ、その解析結果と洪水流のそれとが比較検討された。その結果、洪水流中には異なるスケールをもつ大規模な乱流構造が多重的に形成されており、それらは洪水時に河床に形成されている種々のスケールの河床形状と密接に関連していることが明かにされた。

2. 洪水流航空写真の画像解析の方法

2.1 写真の数値化

用いた航空写真は、阿賀野川の1966年9月25日の洪水の航空写真のうち、6.8 km測線付近の1対で、撮影時間間隔は3.77秒である。これら1対の航空写真を、各々CCDデジタルカメラ(Eikonics 1412)で撮影し、各点における濃度を12ビットデータに数値化した。写真の倍率が約10000であり、洪水流の水深が3 m～5 mであることを考慮すると、写真上における並列らせん流の半スケールは0.3 mm～0.5 mmとなる。流速計算は相互相関法によったが、それによって並列らせん流の構造の検討を可能にするためにはそのスケールの内に数個の画素が含まれる必要がある。したがって、ここでは画素間隔を 50μ とした。

Photo. 1 に解析した航空写真を示す。写真は洪水の増水中に撮影されており、流れは右から左へ向かっている。写真を詳細に見てみると、白く写っている泡が縦すじ状に分布していることが認められ、安定した並列らせん流が形成されていることが予想される。

2.2 流速計算

流速計算は多段階相互相関法⁹⁾によった。すなわち、はじめは粗に計算し、その次の計算では、その前段階の結果を用いて精度を上げて計算するということを繰り返した。それによって、計算時間を節約し、かつ計算精度を向上させた。各段階において用いた写真データの諸元ならびに相関計算の諸元は **Table 1** の様である。

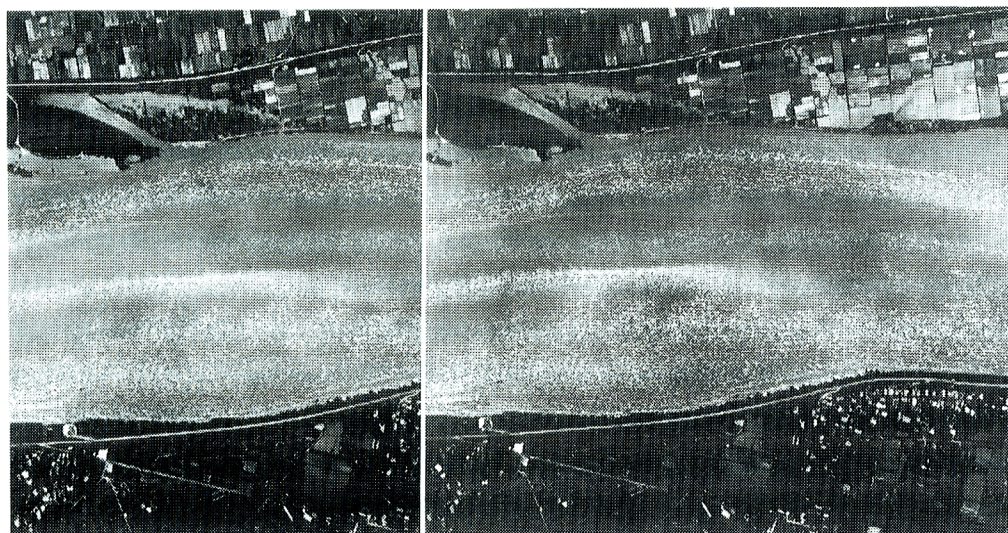


Photo. 1. Aerial photographs of the 1966 flood flow in the Agano River.

Table 1. Dimensions and resolutions of photograph data and analysis

	Number of Pixels (pixel)	Pixels Interval (mm)	Correlation Window (mm)	Vector Interval dx (mm) dy (mm)		Number of Vectors
1st process	464 × 320	0.40	6.0 × 4.4	4.0	4.0	44 × 29
2nd process	928 × 640	0.20	3.0 × 2.2	4.0	2.0	44 × 57
3rd process	1856 × 1280	0.10	1.9 × 1.3	2.0	1.0	171 × 225
4th process	3712 × 2560	0.05	.75 × .25	0.5	0.25	339 × 409

2.3 相関ベクトルから流速ベクトルへの変換

得られた流速ベクトル（正確には相関ベクトル）には、両写真のずれ、航空写真の回転（ ϕ, ω, κ ），ならびに写真数値化に伴う画像データの歪みが含まれている。ここでは、先ず、地上点をいくつか選出し、それらの点が両写真上で一致するように相互標定することによって、両写真のずれと航空写真の回転による歪みを除去し、次いで、水際線における流速が0となるように1次元最少自乗法を適用して写真数値化に伴うデータの歪みを除去するとともに両写真の倍率を等しくした。得られた流速ベクトルの分布（第3段階）を **Fig. 1** に示す。本図で、流れの方向はx軸の負方向であり、また図の右下の凡例に示されるように、流速ベクトルの太さで相関係数の値を表現している。

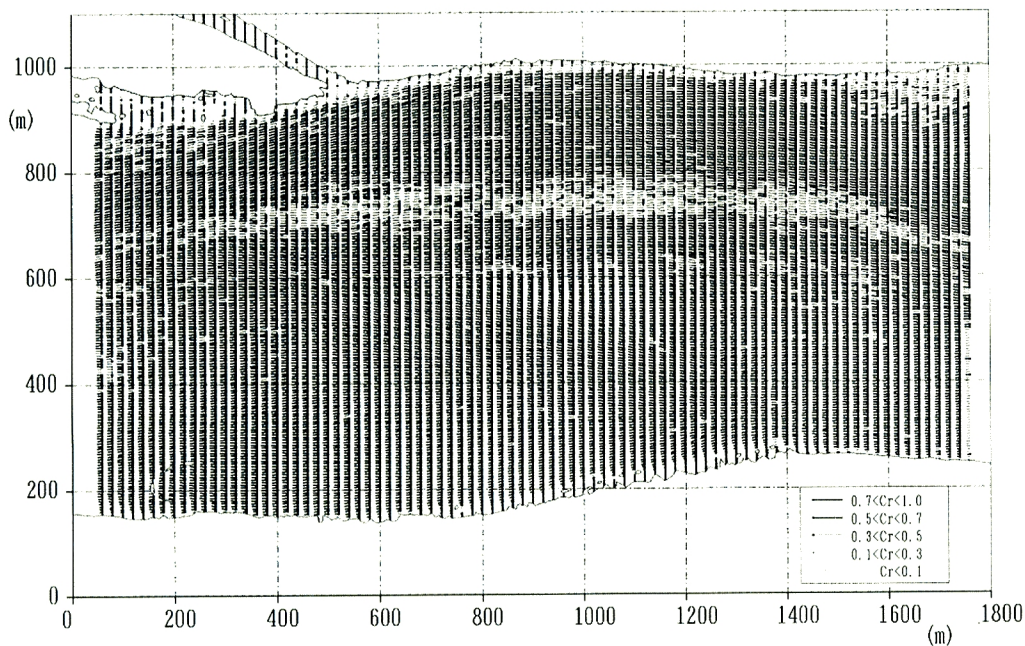


Fig. 1. Velocity vectors on the water surface of the Agano River obtained through cross-correlation analysis. The thickness of velocity vectors shows the cross-correlation coefficients as shown in the lower right corner of the figure.

3. 解析結果とその検討

3.1 流速分布, 流線および二次元発散の分布

Fig. 1の流速ベクトルから計算された絶対流速の分布をFig. 2に示す。図中の破線の枠は以下に示すFig. 6, Fig. 8ならびにFig. 9の範囲を示している。阿賀野川では単列の砂州が発達しており、1966年の洪水時の砂州の前縁位置³⁾が太い実線で描かれている。

本図から、淵の近くで流速が大きく、砂州の先端付近で小さくなっていることが認められ、流速の分布が砂州の配置に対応していることがわかる。

Fig. 3に二次元発散の分布を示す。本図から、正の発散の値が卓越する領域と、負のそれが卓越する領域とがある程度明瞭に分かれていることがわかる。そこで、二次元発散の分布に280 m × 100 mの範囲で二次元的に移動平均を施し、その結果をFig. 4に示した。本図においても砂州の前縁が太い実線で示されているが、その付近では発散は絶対値の大きな負値になっていることがわかる。水面においては二次元発散の負値は流れが沈み込んで行くことを意味するから、上記の事実は、砂州の前縁付近で強い沈み込みがあることを意味している。

本図のその他の領域においては、二次元発散の絶対値の大きな領域が千鳥状に配置されており、それらの符号は、あるところでは交互に変化し、他のところでは同符号の領域が斜め方向に連なっているという特徴ある傾向が認められる。先に述べた砂州の前縁と二次元発散との相互関係から類推すると、発散が負で絶対値の大きな領域付近には小規模砂州の前縁があるのではないかと推察される。そこで、二次元発散の値が相対的に小さくなっている位置に破線を描き入れると、図に示されるようにウロコ状の砂州を想起させるような模様が浮かび出る。これは、木下¹¹⁾が中間砂州と呼んだものに相当するのではないかと思います。この様なウロコ状の砂州の平均的なスケールは、波長が約500 m、幅が約250 mであり、一方、阿賀野川の場合、砂州は単列でその半波長が約1500 m、川幅が約800 mであるから、ウロコ状の砂州のス

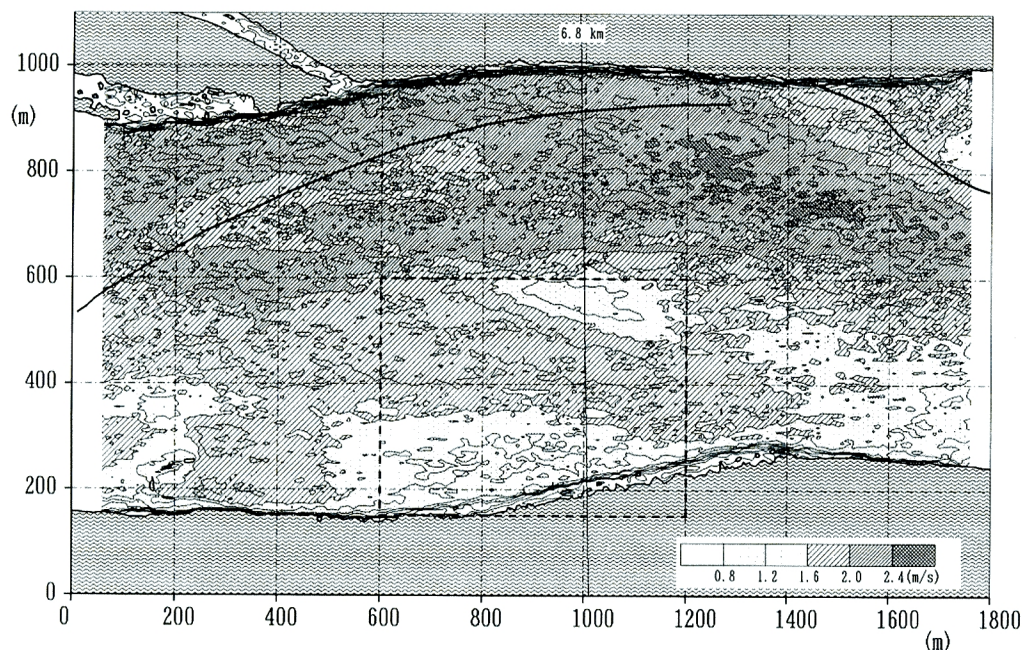


Fig. 2. Absolute velocity. Thick lines show the front lines of bars. The frame of broken line shows the area of Fig. 6, Fig. 8 and Fig. 9. A thin line shows the 6.8 km cross-section.

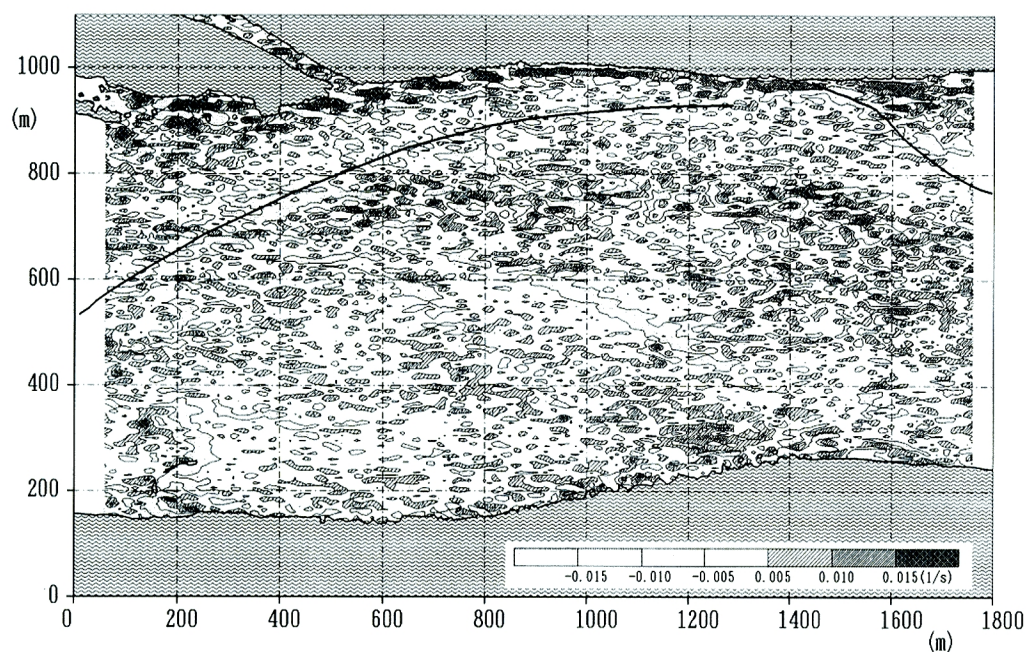


Fig. 3. Two-dimensional divergence.

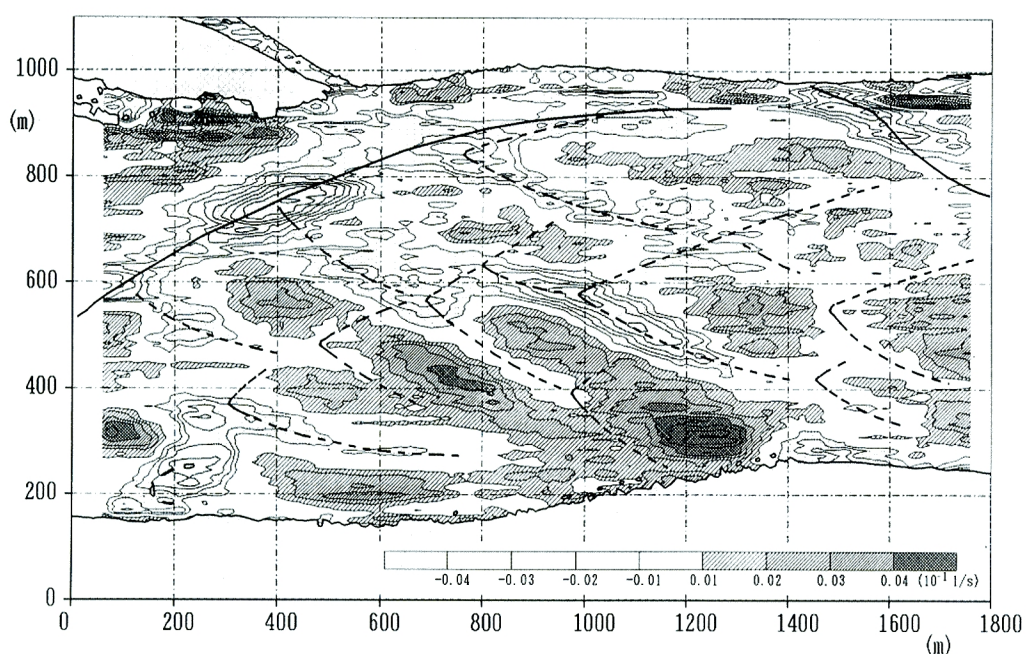


Fig. 4. Two-dimensional divergence smoothed over the local area of 280 m $\times$ 100 m. Thick lines show the front lines of bars and broken lines, which are passing the lower peaks of two-dimensional divergence, suggest the front lines of scale-like bars.

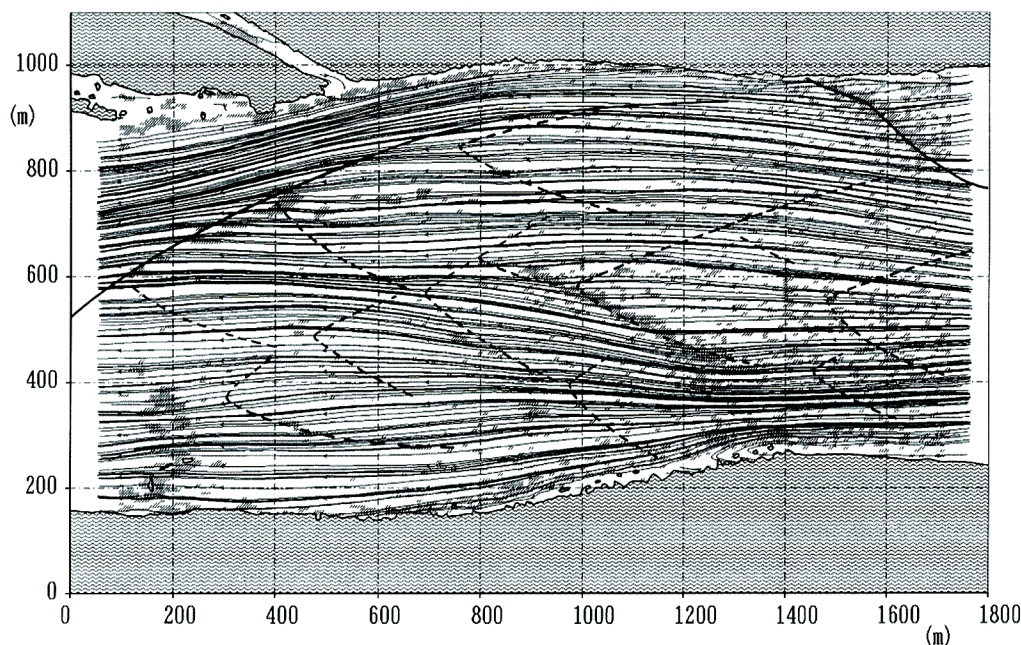


Fig. 5. Streamlines. Thick lines and broken lines are the same with those shown in Fig. 4. The shaded area is the area of large streamline curvature.

ケールは単列砂州の約1/6の規模であることがわかる。

Fig. 5に流線を示す。図には、Fig. 4と同様に、砂州の前縁が太い実線で、また、Fig. 4でウロコ状砂州の前縁と推測された位置を破線で示しているが、その付近で流線が屈曲していることがわかる。本図には同時に、流線の曲率の大きな領域に斜線を施してある。この領域が砂州あるいはウロコ状の砂州の前縁と推測した実線あるいは破線の位置と場所によってはよく一致していることが特に注目される。すなわち、流線はウロコ状の砂州の前縁付近で急に屈曲していると考えられる。

3.2 流下方向流速 u の空間的変動成分の検討

最終的に得られた各点における流速の x 方向成分 u から、その点を中心とする周辺の $m \times n$ 個のベクトルの平均値を差引くことによって、 u の空間的な変動成分 u' を求めた。 $m = 11$, $n = 11$ の場合における u' の分布を Fig. 6 に示す。本図の領域は Fig. 2 の一部であり、その範囲は Fig. 2 に破線の枠で示されている。

本図において、斜線を施した領域は流速が周辺より遅い部分を、点を施した領域は速い部分を示している。高速域と低速域とは共に流下方向に細長く続いており、しかも両者は横断方向には交互に現れている。Fig. 2に見られるように、 $X = 700 \sim 1000$ m, $Y = 500 \sim 600$ mのあたりでは加速域、Fig. 6のその他の領域は概ね減速域となっているが、Fig. 6で低速部と高速部が交互に顕著に現れるのは減速域においてであることがわかる。

Fig. 7はFig. 2中の細い実線で示されている河口から6.8 kmの測線の周辺の水深分布を示したものである³⁾。Fig. 6における低速域の横断方向間隔はおよそ20 mで、Fig. 7の水深図と比較すると、およそ水深の5～6倍になっていることが認められる。このようなスケールの乱流構造が、一般に水深の約2倍のスケールをもつといわれている並列らせん流ならびに洪水当時の河床状態とどのように関連しているかが注目される。

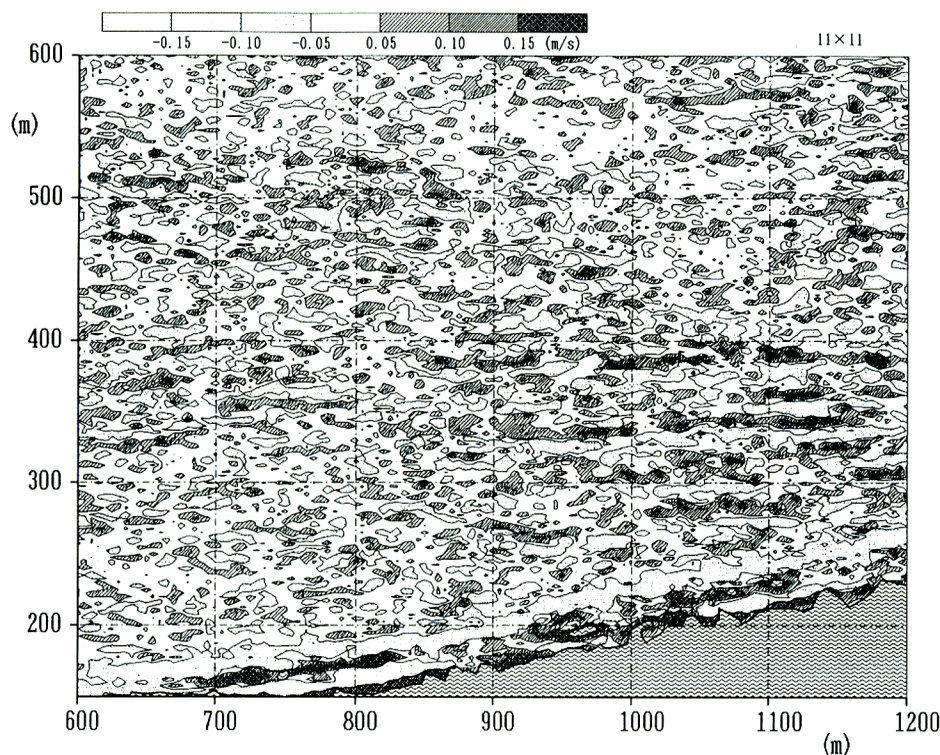


Fig. 6. Spatial fluctuation of longitudinal velocity component. The velocity is comparably low in the shaded area and high in the dotted area.

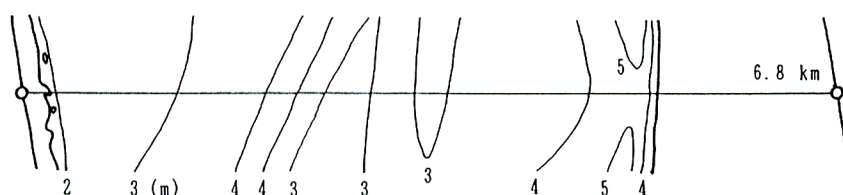


Fig. 7. Contours of water depth around the 6.8 km cross-section of the Agano River at the flood stage.

3.3 パターン認識による低速部と高速部の抽出

u 分布における低速部と高速部とを抽出するために、各流速ベクトルの位置を中心とするその周辺の 3×5 個の格子点における u 分布と、Fig. 8 の右側の表に示されるような同じ大きさの小領域における仮想的な流速分布との相互相関係数を計算し、その分布を Fig. 8 に示した。

本図においては低速域は斜線の部分に、高速域は点を施した部分にそれぞれ相当する。Fig. 6 においてあいまいにしか検出されていない低速部も本図では明確に抽出されており、また、低速部ならびに高速部の流下方向のつながりも明瞭になっている。その結果、本図の場合、低速部の間隔は水深のほぼ 2～3 倍であり、これが一般に水深の 2 倍スケールと言われている並列らせん流に相当するものと考えられる。

このことと前項での現象認識とを合わせ考えると、流速のへこみの大きなものと小さなものとが横断方向に交互に生じていることが推察される。

また、Fig. 8 において、高速部から低速部への、あるいはその逆の転換、あるいは、平均的な流向と斜交する低速部あるいは高速部の存在など興味ある現象が観察される。

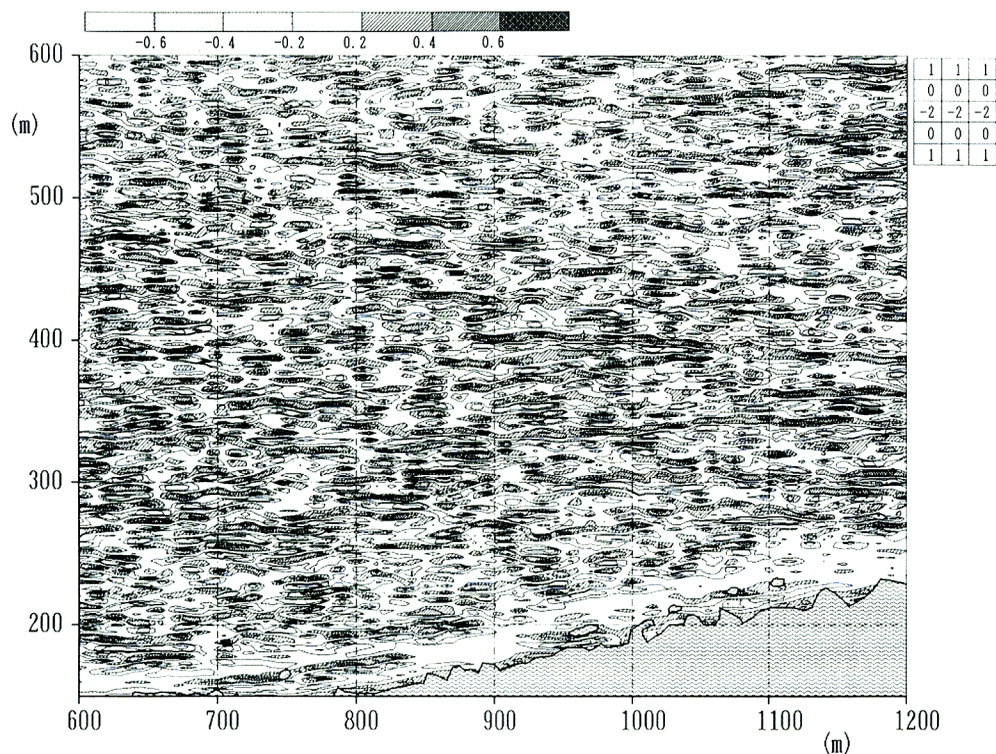


Fig. 8. The cross-correlation coefficient of the pattern recognition to detect low-speed regions of longitudinal velocity components. The detecting pattern is shown in the upper right corner. The shaded area shows the low-speed region and the dotted area, the high-speed region.

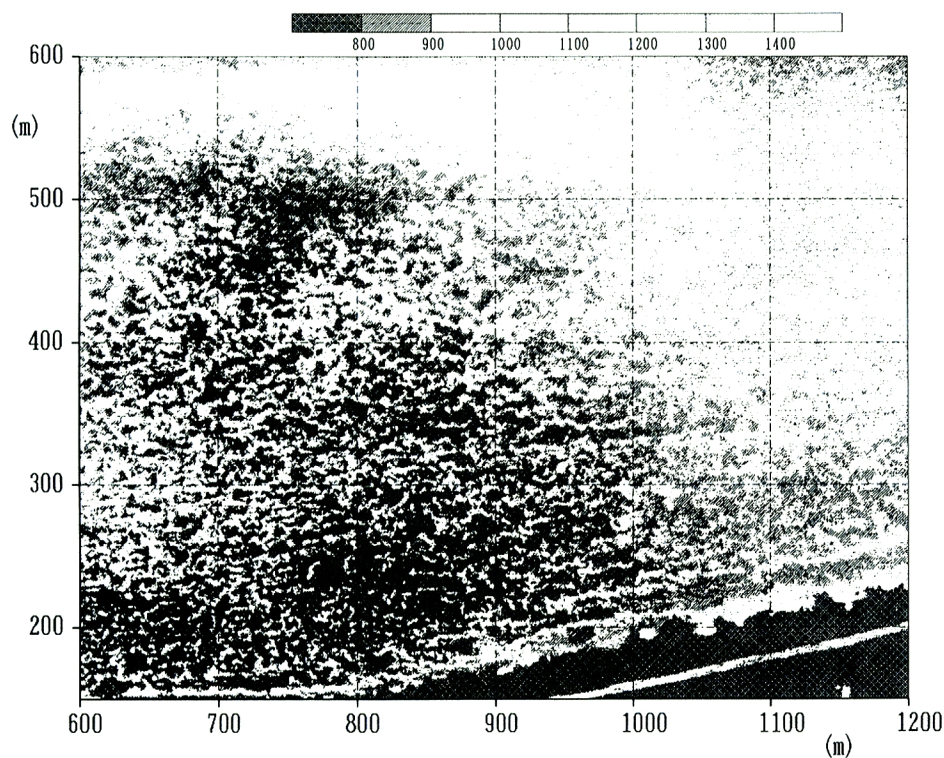


Fig. 9. Photograph densities.

Fig. 8と同じ範囲における写真の濃度分布を Fig. 9に示す。本図の範囲では、写真濃度が黒いところは、ボイルが上がっている部分に相当していると考えられ、白いところは気泡の集まったものと判読できる。本図と Fig. 8とを比較すると、Fig. 8における低速部は正確にボイルの領域上を走っており、一方高速部は白い気泡の列と一致していることが認められ、このことから、Fig. 8において検出された高速部と低速部の縞模様は互いに逆方向に回転する一対のらせん流構造⁴⁾によって生じたものであることが確認される。

なお、Fig. 8に示される低速部・高速部の位置と Fig. 3に示されている二次元発散の正・負の領域との対応性は、基本的にはあるが、それほど明確ではない。これは、ボイルなどによる水流の湧きあがりの内小規模のものは本解析の精度では捉えきれないためと考えられる。

4. ウロコ状河床上の流れの乱流構造に関する実験的検討

阿賀野川の1966年の洪水流の解析の結果、洪水流は各種のスケールの乱流構造から多重的に構成されており、しかもこれらの乱流構造は河床形状と深く関連していることが推測されるに至った。このことを確かめるため、以下のような実験的検討を行った。

4.1 実験の方法と画像解析の方法

長さ12 m、幅40 cmの一樣な開水路にウロコ状の河床波を木下⁴⁾と同じ方法で敷きつめた。ウロコの形状に関しては、阿賀野川のウロコ状の砂州の存在を示唆している Fig. 4において、横断方向に3波長のウロコ模様が見られ、ウロコの各辺が流下方向と約30度の角度をもっていることが認められる。したがって、実験ではウロコの幅を13.3 cm、長さを23.1 cmとした。また、実河川におけるウロコ状の砂州の高さの水深に対する比率はかなり小さいであろうことを予測して、実験におけるウロコの厚さを2.4 mmとした。Photo. 2は、河床の状況を水路上方から撮影したものである。

木下⁴⁾によると、水深がウロコの幅の1/4（本実験条件では3.3 cm）の時には、ウロコ床対応の並列らせん流が最も安定的に生じる。ここでは、それより水深がずっと小さい場合の流況を見ると言う目的で、水深を1.2 cmとした。

実験においては、水面近傍の厚さ3 mmの水平断面をシート状の光で照射し、その断面内の流況を水路上方から0.033秒の時間間隔で35 mmムービーカメラで連続撮影した。トレーサーとして平均粒径0.4 mmのポリスチレン粒子を用いた。ウロコ状河床の配置は Fig. 10 以下の各図に示されている。流量は0.47 l/sec、水路勾配1/3700、水面勾配1/1640、水面での平均流速12.6 cm/sec、Re数940である。Photo. 3に写真撮影結果の一例を示す。左上の円盤は撮影時間を得るための回転盤、中央上方の番号は、上下が逆になっているが、フィルムのコマ数を示す番号、また、水路側壁面に接して左右岸に3箇所づつ光が見えるのは標定のためのものである。

画像解析においては、連続した2枚の写真フィルムの濃度をCCDデジタルカメラで4096×4096 pixelの12 bit データに数値化した。画素間隔は約

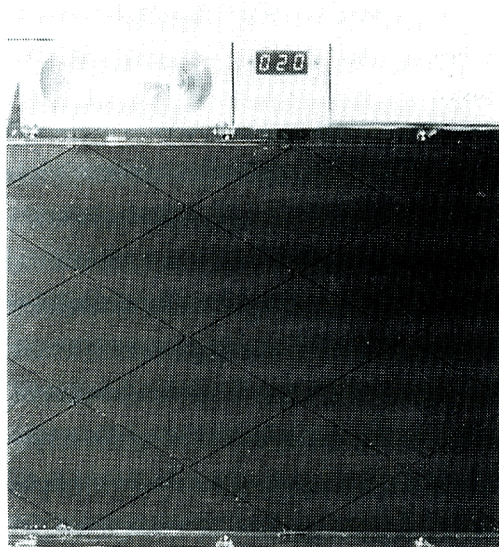


Photo. 2. Plan view of the scale-like channel bed.

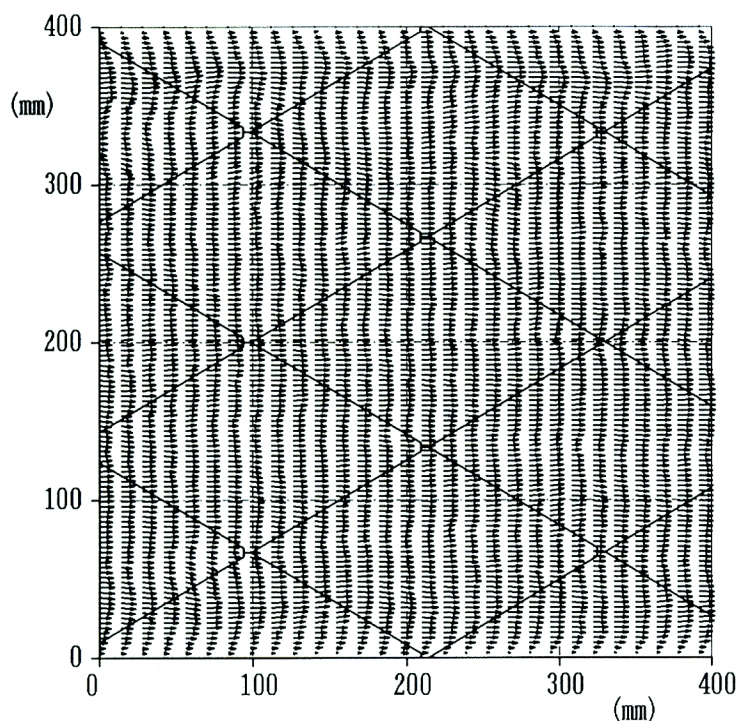


Fig. 10. Velocity vectors on the surface of a flow over the scale-like channel bed obtained through cross-correlation analysis. The solid lines show the scale-like bed profiles.

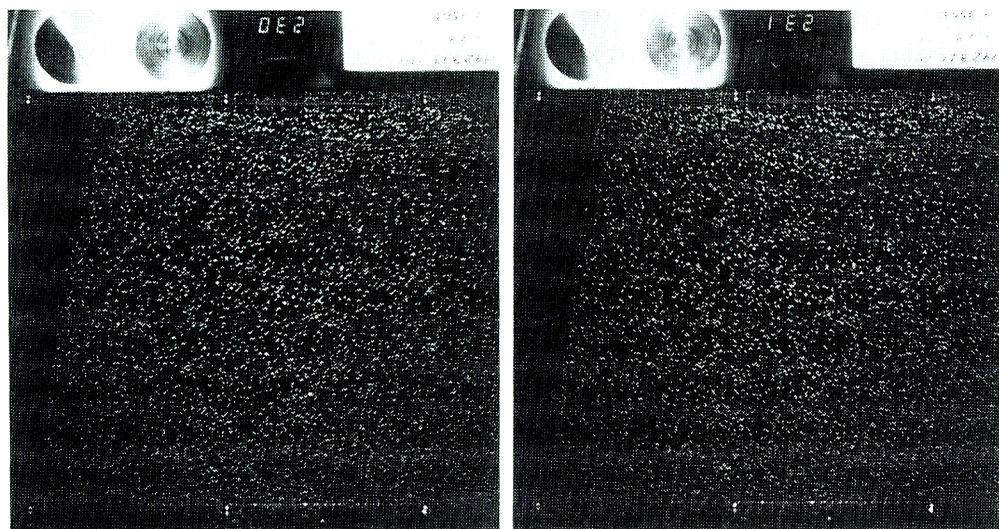


Photo. 3. Photographs of the surface of the flow over the scale-like channel bed.

7μ で、実長 0.17 mm に相当する。流速ベクトルの計算は、航空写真の場合と同様に多段階相互相関法によった。

得られた流速ベクトルの分布を Fig. 10 に示す。本図では、流速ベクトルは流下方向には1つおきに示されている。

4.2 ウロコ状の河床波上の流速分布特性

絶対流速の分布を Fig. 11 に示す。本図で、流速の峰線を実線で、谷線を破線で示している。本図から、ウロコの頂点を流下方向に結ぶ線上で流速が概ね小さくなっていることが認められる。これは、ウロコの頂点の下流部に発生する上昇流のために低速領域ができ、それが流下方向に連なったものと考えられる。一方、隣り合う低速領域の間では高速領域が流下方向に連続している。

以上の事実から、「ウロコ形状に対応した大規模二次流」とも呼ぶべき乱流構造があることがわかる。それは、ウロコの頂点を流下方向に連ねる領域で上昇流を形成し、その中間の領域で下降流を形成する。その横断方向のスケール（一対の大規模二次流の幅）はウロコのその半分であり、この場合は水深の約 5.5 倍である。したがって、その横断面は偏平なものとなる。また、流下方向には、ウロコの位相と同調して変化している。しかも、相隣る二つの大規模二次流の流下方向の位相は互いに半波長ずれている。

Fig. 11 の流速分布をさらに詳しく見ると、高速領域や低速領域の内部に細かい変動があることが見いだされ、水深規模の並列らせん流の形成が予想される。

そこで、先と同様にしてパターン認識によって低速部と高速部を検出し、その結果を Fig. 12 に示す。検出のためのパターンとしては、流れの横断方向の変動スケールを勘案して、同図の右側に示されるものを用いた。また、平均的な流速の横断方向勾配が大ききところでは、流速分布中の微小な変動がパターン認識では検出できない恐れがあるので、予め流速分布の場からその移動平均化されたものを差し引いた上でパターン認識のための計算を行った。

図において、小規模の低速部と高速部が明瞭に捉えられており、斜線を施した低速部の横断方向の間隔は水深の約 2 倍である。

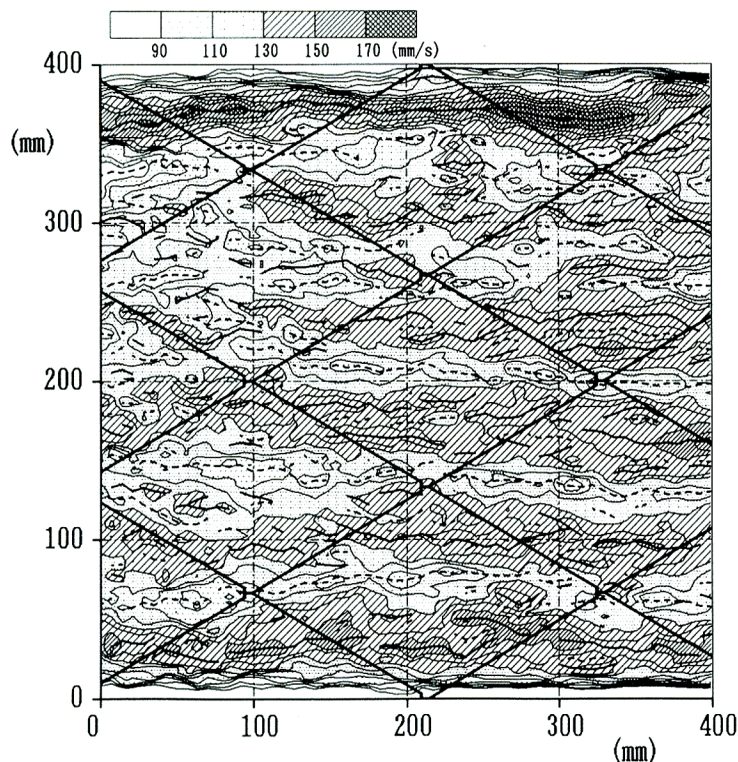


Fig. 11. Absolute velocity on the surface of a flow over the scale-like bed. The solid lines are passing the local peaks of the velocity and the broken lines, the local negative peaks.

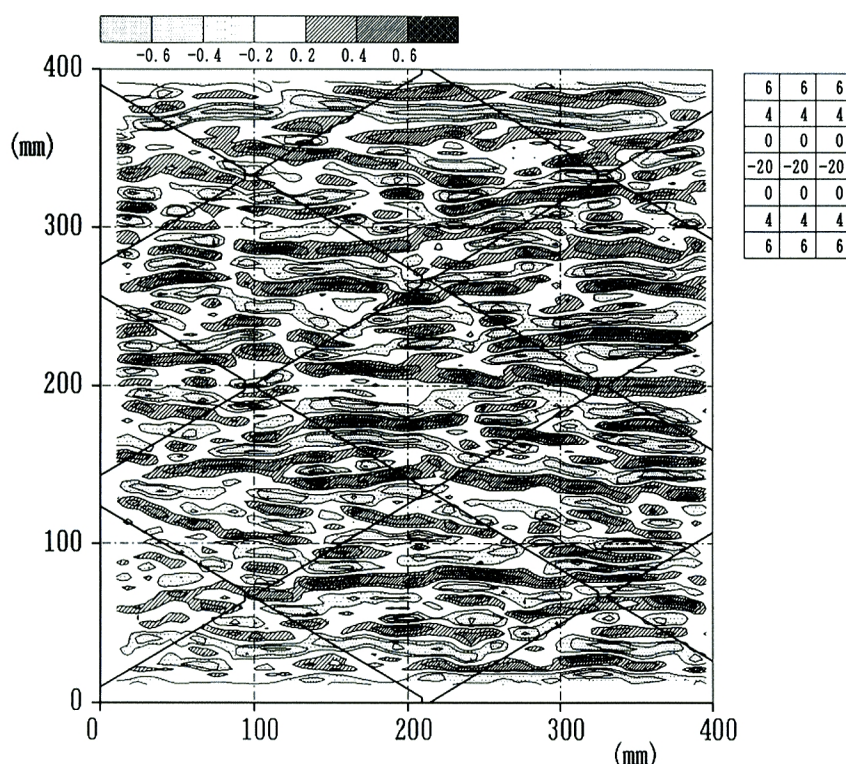


Fig. 12. The cross-correlation coefficient of the pattern recognition to detect low-speed regions of longitudinal velocity components. The detecting pattern is shown in the upper right corner. The shaded area shows the low-speed region and the dotted area, the high-speed region.

以上の実験的検討から、ウロコ床上の流れは二重構造物をもつことが明らかになった。すなわち、河床形態に対応した大規模二次流が形成され、その横断方向のスケールあるいは間隔はウロコの横断方向の波長の1/2であり、さらにその大規模二次流中には水深規模の並列らせん流が形成されている。

ところで、阿賀野川の洪水流においても、水深スケールの並列らせん流とともに水深の5～6倍のスケールの乱流構造が検出されたことが想起される。水深規模の並列らせん流は、たとえ河床面が平滑であったとしても一般に形成されるものである。したがって、上記の実験的検討から類推すると、阿賀野川では水深の数倍のスケールの二次流を生起させる河床形状があったのではないかと推測される。もしその様な河床形状がウロコ状であったとすると、その横断方向スケールは大規模二次流のその2倍となるから、水深の10～12倍となる。

4.3 流線ならびに二次元発散の分布

得られた流速ベクトルより計算された流線を Fig. 13 に示す。本図から、河床を形成する各ウロコ床の段落ち部で流向が変化する傾向があること、また、水路の側壁近傍で水流の蛇行が強くなっていることが認められる。

Fig. 14 に二次元発散の分布を示す。本図においても二次元発散の分布の峰線を実線で、また、谷線を破線で示している。水面では正の発散は湧き上がりを意味するが、本図によると、ウロコの頂点の下流部にてできるボイルは、その下流側のウロコのほぼ中央部に位置していることがわかる。

次に、Fig. 14 に示される二次元発散の分布を5 cm×3 cmの範囲で移動平均した値の分布を Fig. 15 に

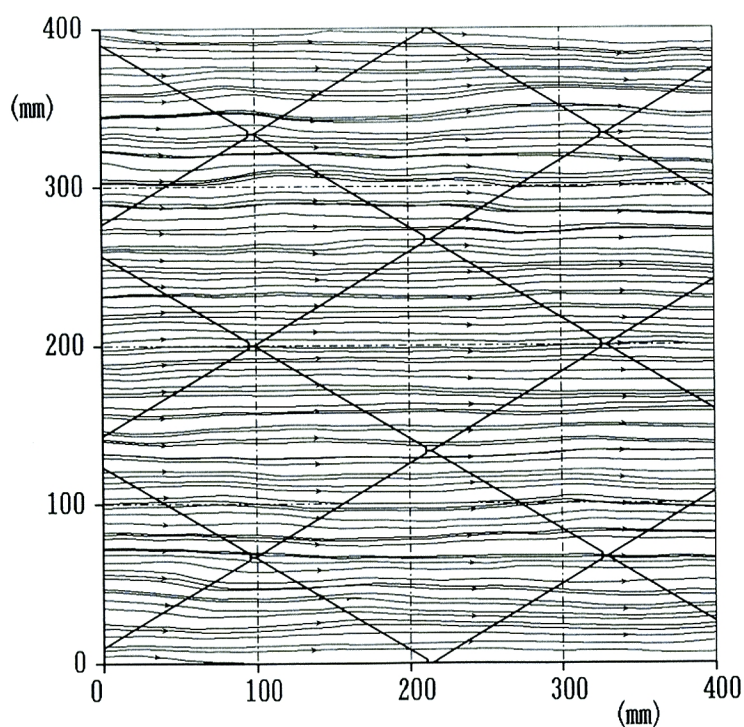


Fig. 13. Streamlines.

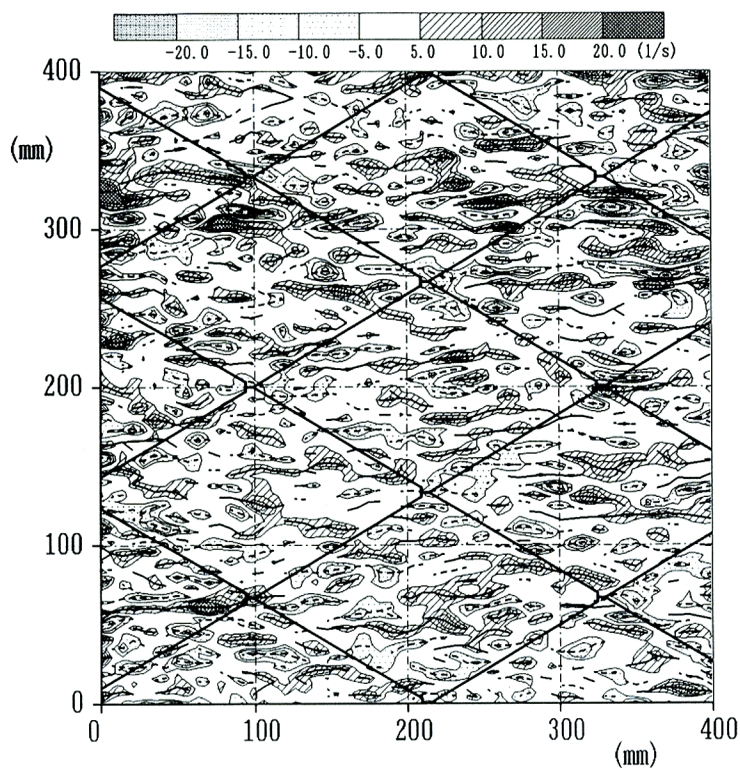


Fig. 14. The two-dimensional divergence on the water surface. The solid lines are passing the local peaks of the divergence and the broken lines, the local negative peaks.

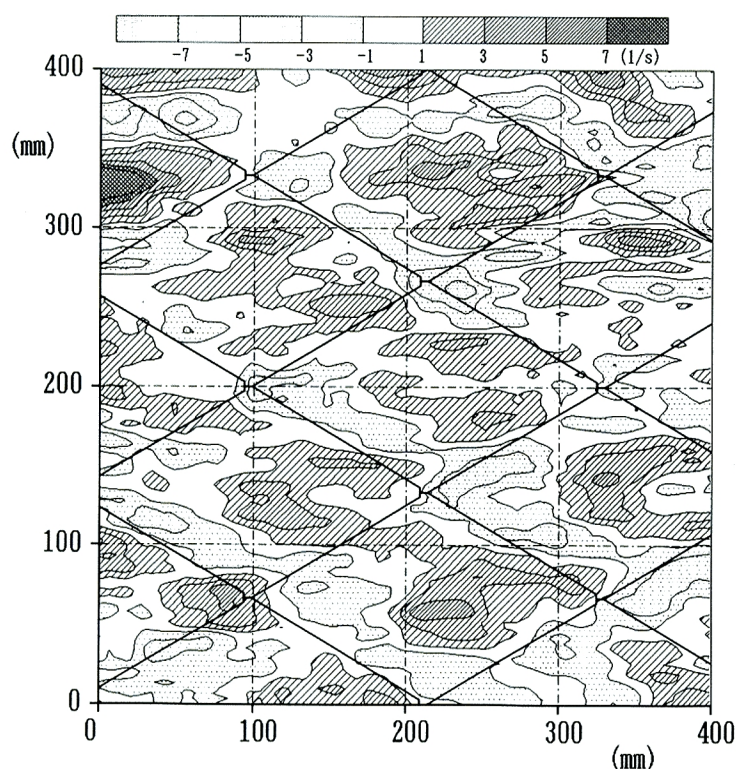


Fig. 15. The two-dimensional divergence smoothed over a local area of 5cm×3cm.

示す。図において、強い沈み込み領域がウロコ床の段落ち部の直下流で島状に分布していることが注目される。また、発散の正の絶対値の大きな領域も島状に分布しており、全体として、ウロコ床に対応した斜め方向の線上に沈み込みと湧きあがりの強い領域が交互に発生している。

以上に述べたウロコ床上の流れの流線のパターンならびに二次元発散分布の特性は、阿賀野川の洪水流のそれと酷似していることが注目される。このことから、3. で述べたように、阿賀野川においてその洪水時にウロコ状の河床形状あるいはそれらの内いくつかを斜め方向に連ねたような河床形状が形成されていたと結論づけて間違いないであろう。阿賀野川におけるこのウロコ形状の流下方向スケールはおよそ 500 m、横断方向スケールは約 250 m である。

また、本実験結果から推測すると、阿賀野川におけるウロコ状河床波の前縁の位置は Fig. 4 に示された破線の位置より僅かに上流側にずれた所と考えられる。

4. 4 流速分布、流線ならびに二次元発散の相互関連性

Fig. 12 の高速部ならびに低速部はそれぞれに細長い領域を形成しているが、それらが流下方向に揺らいでいることが認められる。しかも、これら高速領域・低速領域の方向は流線の方向とは必ずしも一致していないことが認められ、興味深い。また、Fig. 12 の高速部・低速部は、Fig. 14 の二次元発散の負領域・正領域にそれぞれ良く対応していることが認められる。

5. 洪水流の乱流構造ならびに河床形状の特徴

阿賀野川の洪水流航空写真を画像解析し、水面における流況を把握した。洪水流の乱流構造と河床形状との相互関連性を把握するため、ウロコ状の河床形状をもつ実験水路での流れについても、同時に検討を行った。その結果、洪水流は次の4つの特徴的なスケールをもつ乱流構造から多重的に構成されていることが明らかになった。また、これらの各種スケールの乱流構造は基本的には各々に対応する特徴的な河床形状に起因することが示された。

第1は、既に木下³⁾が詳細に解明していることであるが、半波長がおおよそ1500 mに及ぶ砂州の形成とそれに対応する乱流構造である。その横断方向スケールは川幅800 mに相当する。

第2は、Fig. 4の二次元発散分布に対応する乱流構造とウロコ状の砂州（中間砂州）の形成である。そのスケールは流下方向におおよそ500 m、横断方向におおよそ250 mである。

第3は、横断方向スケールが水深の5～6倍（約20～25 m）の偏平な横断面をもつ大規模二次流である。その生成原因は河床形状にあると考えられ、それがうろこ状であれば、その横断方向スケールは、大規模二次流の横断方向スケールのおおよそ2倍、約40～50 mと考えられる。

第4の構造は、水深によってその大きさが基本的に規定されている並列らせん流である。この並列らせん流の配置はFig. 8に明確にされており、その横断方向のスケールは水深の2～3倍に相当する。この並列らせん流は一般に河床波がある無しに関わらず生成されており、本研究でもこれと河床形状との関連は把握していない。本研究ではこれ以下のスケールの乱流構造については検討されていない。

木下¹⁾は、尻別川において洪水時に河床形状を実測し、砂堆、中間砂州ならびに砂州の代表スケールがそれぞれ10数m、約80 mおよび約500 mであることを見だし、それらのスケール相互間に6の倍数の比例関係があることを指摘した。阿賀野川においても、砂州と中間砂州との流下方向スケールの比は $1500 \times 2 / 500 = 6$ となっており、また、中間砂州とその下位の河床形状との横断方向スケールの比も $250 / (40 \sim 50) \approx 6$ となっており、興味深い。

結 語

(1) 阿賀野川の1966年の洪水流航空写真を画像解析し、水面における流況を把握した。洪水流の乱流構造と河床形状との相互関連性を把握するため、ウロコ状の河床形状をもつ実験水路での流れについても、同時に検討を行った。その結果、洪水流は4つの特徴的なスケールをもつ乱流構造から多重的に構成されていることが明らかになった。また、これらの各種スケールの乱流構造は基本的には各々に対応する特徴的な河床形状に起因することが示された。

(2) 実験に用いたウロコの形状ならびにスケールは一種であったが、その結果から、阿賀野川の洪水時における二種の河床形状の存在を示すことができた。すなわち、第1に、二次元発散の移動平均値の分布の相似性から中間砂州の存在が確認され、第2に、流速の横断方向分布特性の相似から水深の5～6倍の横断方向スケールをもつ河床形状の存在を予測した。

(3) 本研究により、洪水流航空写真の画像解析から洪水時河床形状の概況を把握できる展望が得られた。

末筆ながら、本実験に使用した35 mmムービーカメラを製作していただいた京大防災研究所宇治川水理実験所の北川吉男技官に深甚の謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 木下良作: 空中写真測量による洪水流の表面流速・流向の測定, およびその分布状況と河床形状との関連性について, 第8回水理講演会講演集, 1963, pp. 65-66.
- 2) 木下良作: 航空写真による洪水流の解析, 写真測量, Vol. 6, No. 1, 1967, pp. 1-17.
- 3) 木下良作: 航空写真による洪水時の流況測定, 水工学シリーズ, 68-12, 土木学会水理委員会, 1968.
- 4) 木下良作: 並列らせん流に関する実験的研究, 石狩川開発建設部, 1977.
- 5) 宇民 正・上野鉄男: 可視化法による大スケール乱れに関する研究, 京大防災研究所年報, 第19号 B-2, 1976, pp. 267-288.
- 6) 宇民 正・上野鉄男: 可視化法による大スケール乱れに関する研究(2), 京大防災研究所年報, 第20号 B-2, 1977, pp. 331-354.
- 7) 宇民 正・上野鉄男: 複断面蛇行流の可視化観測, 京大防災研究所年報, 第32号 B-2, 1989, pp. 963-983.
- 8) Utami, T., R. F. Blackwelder and T. Ueno: A Cross-Correlation Technique for Velocity Field Extraction from Particulate Visualization, Experiments in Fluids, Vol. 10, 1991, pp. 213-223.
- 9) 木下良作・宇民 正・上野鉄男: 洪水流航空写真の画像解析, 写真測量とリモートセンシング, Vol. 29, No. 6, 1990, pp. 4-17.
- 10) 木下良作・宇民 正・上野鉄男: 洪水時河川に現れる大規模渦について, 第32回乱流シンポジウム講演論文集, 1991, pp. 329-334.
- 11) 木下良作: 砂洲・砂堆など河床波の洪水時形態変動, 「種々のスケールにおける流れと流砂運動の同時計測による土砂輸送・河床変動機構の解明」, 平成3年度科学研究費補助金総合研究(A) (代表芦田和男), 研究成果報告書, 1992, pp. 85-93.