

複断面蛇行河道における洪水流況の画像解析

上野 鉄男・宇民 正

PHOTOGRAPH IMAGE PROCESSING OF FLOOD FLOW IN MEANDERING CHANNEL WITH COMPOUND CROSS-SECTION

By *Tetsuo UENO* and *Tadashi UTAMI*

Synopsis

The aerial photographs of the flood flow of the Tone river on Sept. 18, 1972 were analyzed to obtain velocity vectors. The main river course in the analyzed area is meandering with the wavelength 7-8 km and wide flood plain exists on the left side of the bank.

Sediment deposition problem on the flood plain and bank erosion were discussed in connection with the hydraulic characteristics of the flood flow like the absolute velocity, the streamline patterns, the vorticity and the two-dimensional divergence which were calculated by using the obtained velocity vectors.

1. 概 説

わが国では、河川の間地域およびデルタ地域において複断面形状が採用されることが多い。複断面河道の高水敷は都市の余裕空間としても意味があり、その様な目的のためには、高水敷に設置される諸施設や植生が河川の治水機能を減殺することがないように、また、洪水流が高水敷上を流れる場合に土砂堆積などによって高水敷の環境が悪化されないように、総合的な対策を講じる必要がある。とりわけ、低水路河道が蛇行している場所では、その複雑な境界条件のために二次流や剥離に伴う大規模渦などの複雑な流況が生じ、それが低水路河岸の局所的な洗掘や高水敷における堆積の原因となる。これらの問題に対応する上で、複断面蛇行河道における洪水流の実態を把握することが重要である。

複断面蛇行流に関しては、従来から、現地観測あるいは実験によっていくつかの特徴が明らかにされてきた。木下¹⁾は、航空写真による洪水時の流況測定から、淀川の低水路は洪水主流部と全面的に位相がずれており、高水敷の荒廃の著しいところは洪水主流部が低水路から高水敷上へ乗り上げているところと一致していることを指摘した。さらに、木下²⁾は着色された中立粒子を用いた流況の立体観測から、複断面蛇行流の三次元構造を実験的に検討した。著者ら³⁾は中小河川の氾濫後の現地調査にもとづいて、洪水時の複断面蛇行流れの構造を水理実験により検討した。その後、木下⁴⁾は堤防線形と低水路形状を変化させた数種類の複断面蛇行流れにおいて、流況の可視化計測ならびに河床の洗掘状況の測定を行い、適正複断面河道の条件を明らかにした。著者ら⁵⁾は、上記の木下の研究を参考にして、流れの可視化法と画像解析の手法を用いて複断面蛇行流の三次元構造を実験的に検討した。一方、森ら^{6), 7)}は複断面蛇行流の構造を三次元数値計算によって解析し、とくに高水敷から低水路に流入する低速流体の果たす特異な役割を明らかにした。

複断面蛇行河道において、低水路河岸周辺あるいは高水敷上の土砂堆積の問題は重要である。伊勢屋⁸⁾は中小河川の洪水時現地観測により、氾濫状態にある河川の河岸付近の特異な土砂堆積特性を見いだした。木下^{4), 9), 10)}は 1981 年の石狩川洪水後に、江別から上流の 54 km の区間にわたる高水敷の土砂堆積状況の現地調査を行い、加えて、天塩川の蛇曲河道および迂曲河道周辺の高水敷でトレンチ掘削によって過去の土砂堆積現象を詳しく調べた。その結果は、単に複断面河道の土砂堆積特性を明らかにするとどまらず、河道蛇行の下流への遷移機構に蛇行河道凸岸下流部における土砂堆積が重要な役割を果たすこと、ならびにこのような土砂堆積の繰返しがスクロールバーを形成することを明らかにした。さらに、木下¹¹⁾は 1981 年の洪水流航空写真に浦臼地先で観察されたような大規模渦が上記のような土砂堆積に果たす役割を航空写真の画像解析によって検討した。

本研究は、複断面蛇行河道の洪水流の実態を洪水流航空写真の画像解析によって明らかにしようとするものであるが、この手法は 1990 年前後から著者ら^{11)~13)}および藤田¹⁴⁾によって開発され、比較的単純な流れに対しては十分な適用性が得られるようになってきている。ここでは、高水敷の環境問題をも視野に入れて、高水敷における複雑な流れをも含む洪水の流況を定量的かつ定性的に把握しようとした。

2. 対象とした洪水流況と洪水流航空写真の画像解析の方法

2.1 対象とした洪水流況

本研究で解析の対象とした流れは、利根川の 66 km 地点における 1972 年 9 月 18 日の洪水である。Fig. 1 に対象地域の位置と河道の状況を示す。利根川は 78 km 付近で小貝川を合流し、対象地域はそれよりも 12 km ほど下流である。図に見られるように、利根川の 56 ~ 71 km にかけての約 15 km の区間では、低水路河道が波長 7 ~ 8 km で蛇行しており、この付近の低水路幅は 250 ~ 300 m となっている。また、対象地域では河川の幅が 1,000 ~ 1,300 m と広がっており、堤外には広大な高水敷があって、ゴルフ場や大利根飛行場として利用されている。

1992 年に作成された 1 / 2500 の平面図によると、対象地域周辺の堤内地の地盤高が 2 ~ 3 m であるのに対して、堤外の高水敷の標高が 3 ~ 5 m と高くなっていることが注目されるが、この差は、高水敷への土砂の堆積によるものであろうか。一方、1992 年作成の河川横断面図からは、湾曲部外岸側の河床の深掘れが 63 km 地点で海面下 9.87 m, 66 km 地点で 6.18 m にも達していることが注目される。しかし、1972 年

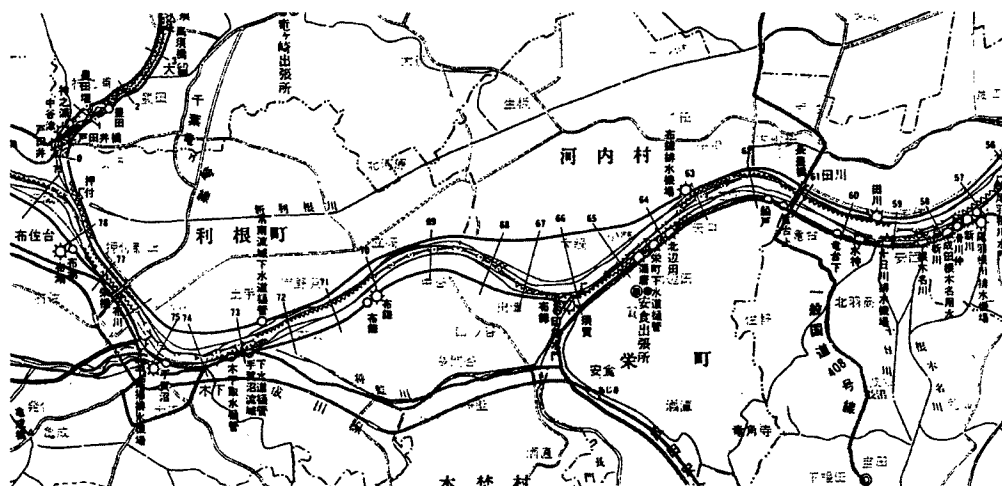


Fig. 1. Area map around the analyzed area.

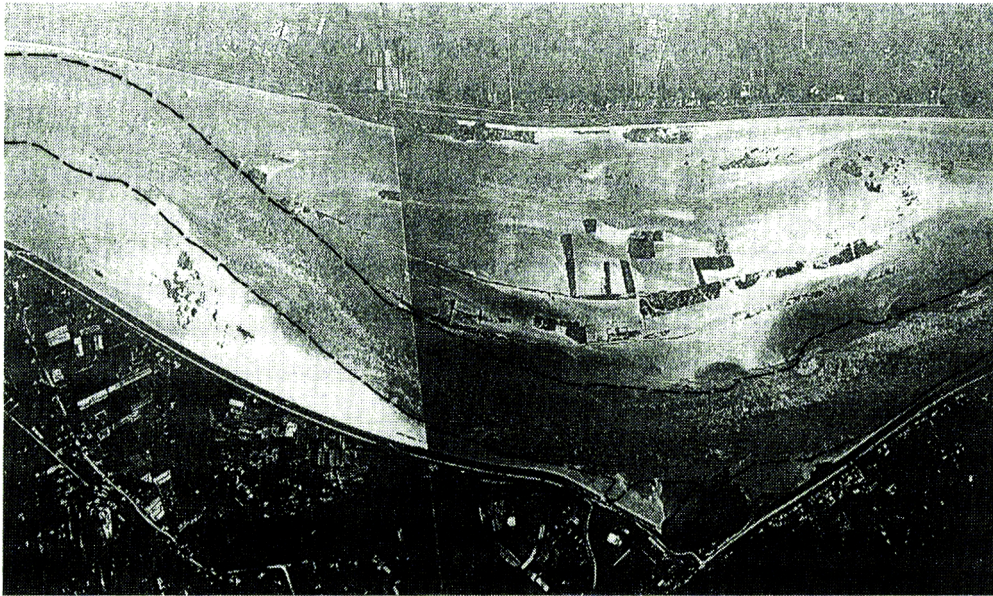


Photo. 1. Aerial photograph of the flood flow in the Tone river on Sept. 18, 1972.

作成の河川横断図によると、上記の深掘れはそれぞれ海面下 5.14 m および 3.64 m とそれほど大きくなかったことが認められる。

Photo. 1 に解析の対象とした洪水流況を示す。流れは両堤防間をほぼ全面にわたって左から右へ向かって流れている。紐のように写っているのは河床の浚渫用の施設であり、写真中の破線は低水路法線を示している。低水路が蛇行しているため、低水路左岸側の護岸周辺に直径 100 ～ 200 m の大規模な渦が発生しているのが認められる。また、高水敷上には凹凸があって、その高い部分は水面から出ており、そこでの流況も複雑な様相を呈している。

写真に見られる洪水流は高水敷に乗っているとはいえ、水位はそれほど高くなく、高水敷水深も比較的小さい流れである。したがって、複断面蛇行流れではあるが、堤防の線形の影響を大きく受けることはないと考えられる。この意味で、本研究で対象とした流れは、木下¹⁾が調べた、計画洪水位に達した 1965 年の淀川の洪水流や、著者ら¹¹⁾が画像解析によって検討した、計画洪水位を越えた 1981 年の石狩川の洪水とは異なっている。

2.2 洪水流航空写真の画像解析の方法

洪水流況の画像解析には、僅かな時間差（4.47 秒）で撮影された 2 枚の航空写真が用いられた。CCD デジタルカメラ（Eikonics 1412）を用いて、これらの航空写真の各点における濃度を 12 ビットデータに数値化した。写真数値化の画素間隔を 100 ミクロンとしたが、写真の倍率が 10000 であるので、それは実長にすると 1 m に相当する。

流速計算は多段階相互相関法¹²⁾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。

Table 1. Dimensions and resolutions of photgraph data and analysis.

	Number of Pixels (pixel)	Pixels Interval (mm)	Correlation Window (mm)	Vector Interval dx (mm) dy (mm)	Number of Vectors
1st process	506 × 385	0.40	10.0 × 6.8	10.0 8.0	19 × 18
2nd process	1014 × 770	0.20	5.8 × 4.2	4.0 4.0	49 × 37
3rd process	2030 × 1541	0.10	2.5 × 1.7	2.0 2.0	97 × 73

3. 解析結果とその検討

3.1 流線および絶対流速の分布

上記の手法によって流下方向に約2 kmの範囲の洪水流況が解析された。得られた流速ベクトルの分布を Fig. 2 に示す。図中の一点鎖線は低水路法線を示している。また、66 km 地点は $x = 1,100$ m 付近に対応している。

計算によって得られた流速ベクトルの内、若干の誤ったベクトルについてはそれらを除去して、周辺のベクトルを用いて補足した。それらは図において細い線分で描かれている。図から、低水路内では流速ベクトルがほぼ得られているが、高水敷上の流速の小さい場所で正しい流速ベクトルが得られていないことがわかる。

Fig. 2 の流速ベクトルから計算された流線を Fig. 3 に示す。概略的には、航空写真から推測される洪水流況に対応する流線が得られており、低水路内の流線はほぼ低水路に沿っていると言える。しかし、 $x =$

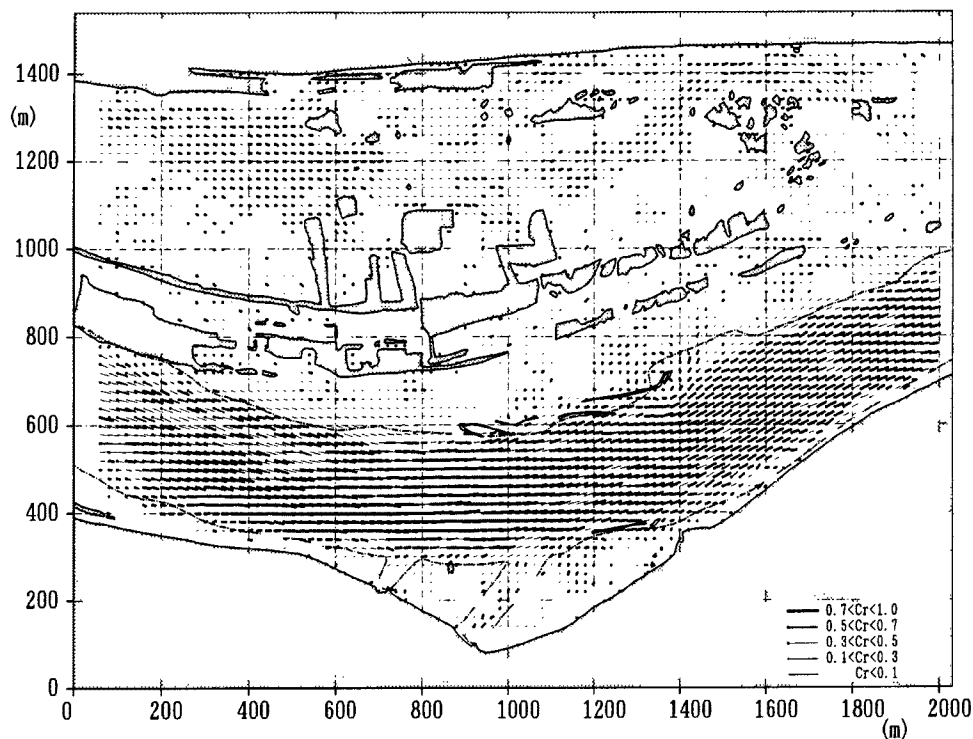


Fig. 2. The velocity vectors obtained by the photograph image processing.

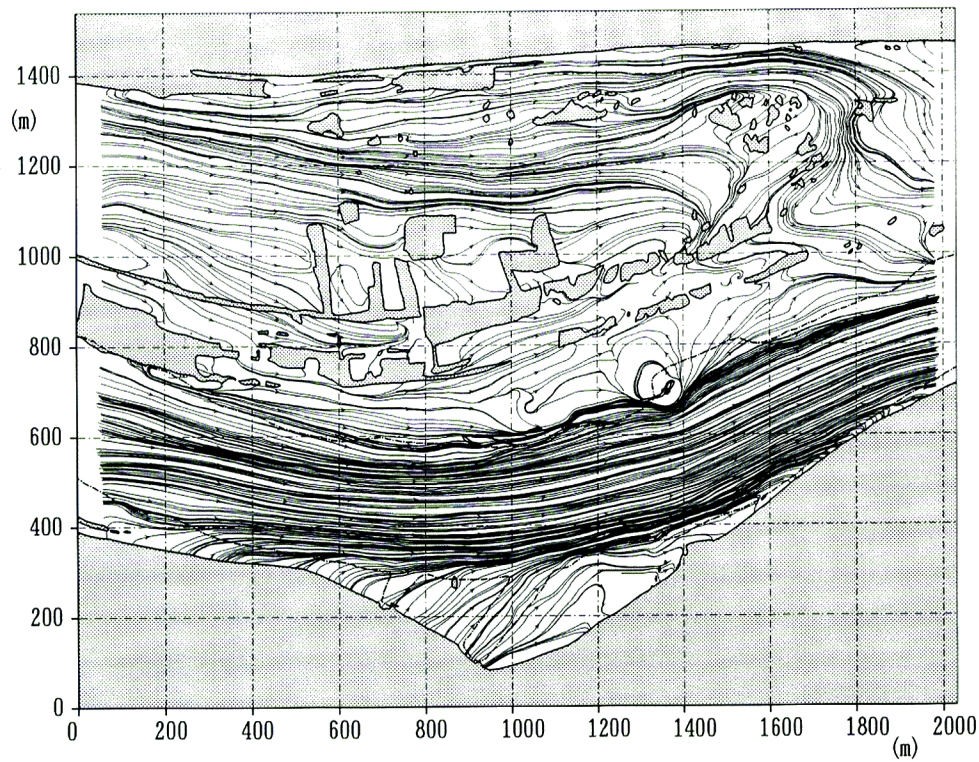


Fig. 3. The streamlines.

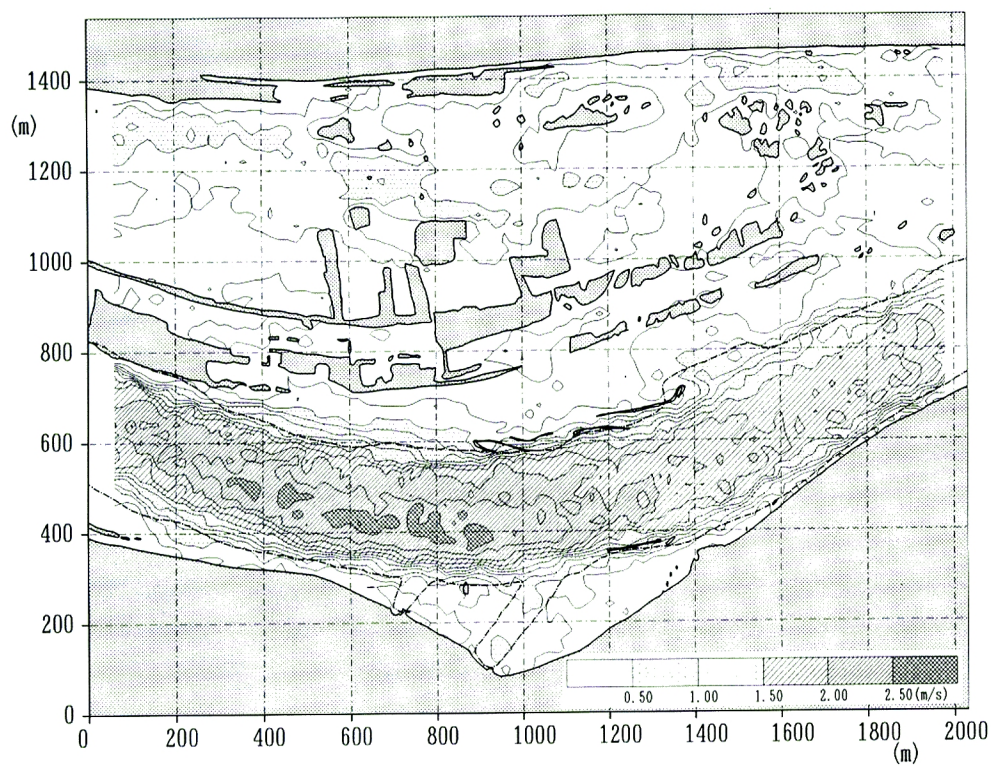


Fig. 4. The absolute velocity distribution.

1,200～2,000 m の範囲では右岸側低水路河岸に向かう流れがあることが認められる。また、2, 3 の箇所
で渦運動を表す流線も認められるが、それらの位置と航空写真に現れている渦の模様の位置とは一致して
いない。これについては次節で検討する。

絶対流速の分布を Fig. 4 に示す。図より、低水路内では流速が 2.5 m/sec を越えるところがあり、高水
敷上においても 0.5～1.0 m/sec の流れが所々で生じていることがわかる。また、高水敷上の座標の
(1600, 1200) 付近には、流れが流下しにくい場所があり、そのためにその上側の (1400, 1400) 付近から
(1800, 1400) 付近までの領域で流速が大きくなっている。さらに、低水路内では $x = 1,700 \sim 2,000$ m の
範囲で、高速部が右岸側の堤防近くまで接近している上に、Fig. 3 より流向も堤防に向かってることが
注目される。このような流れと河床の深掘れや低水路河岸の洗堀との関連に関心がもたれる。

3.2 低水路左岸の護岸周辺の大規模渦の特徴

渦度の分布を Fig. 5 に示す。本図より、左岸および右岸の低水路の護岸周辺に、それぞれ正および負の
渦度の絶対値の大きい領域が島状に分布し、それらが流下方向に連なっていることがわかる。本図と
Photo. 1 との縮尺を一致させて重ね合わせてみると、本図中の太い実線で囲んだ渦度の絶対値の大きい
領域は Photo. 1 中の大規模渦と一致することがわかる。

先に、Fig. 3 において流線が渦の模様を示す位置と航空写真に現れている渦模様の位置とが一致してい
ないことを指摘したが、移動系から見た流線を描くことによってこのことを検討する。Fig. 5 において
渦度分布の正の極大値の位置が破線で示されているが、この破線上の各点においてそれらの局所的な
平均流速を求め、これらの点を通る横断線上の各点の流速ベクトルから上記の局所的な平均流速を差し引
くことによって、各位置の流下方向ならびに横断方向の流速成分を求め、それらを用いて移動系から見た
流線を描くと Fig. 6 のようになる。本図には、Fig. 5 中の太い実線で囲んだ渦度の絶対値の大きい領域

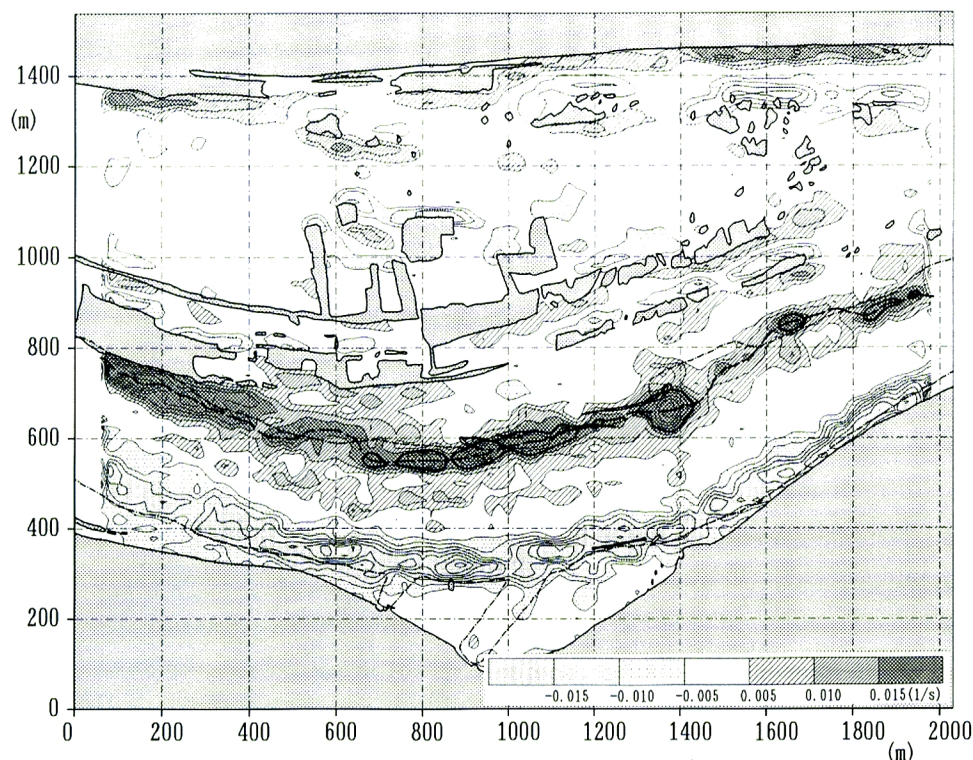


Fig. 5. The vorticity distribution.

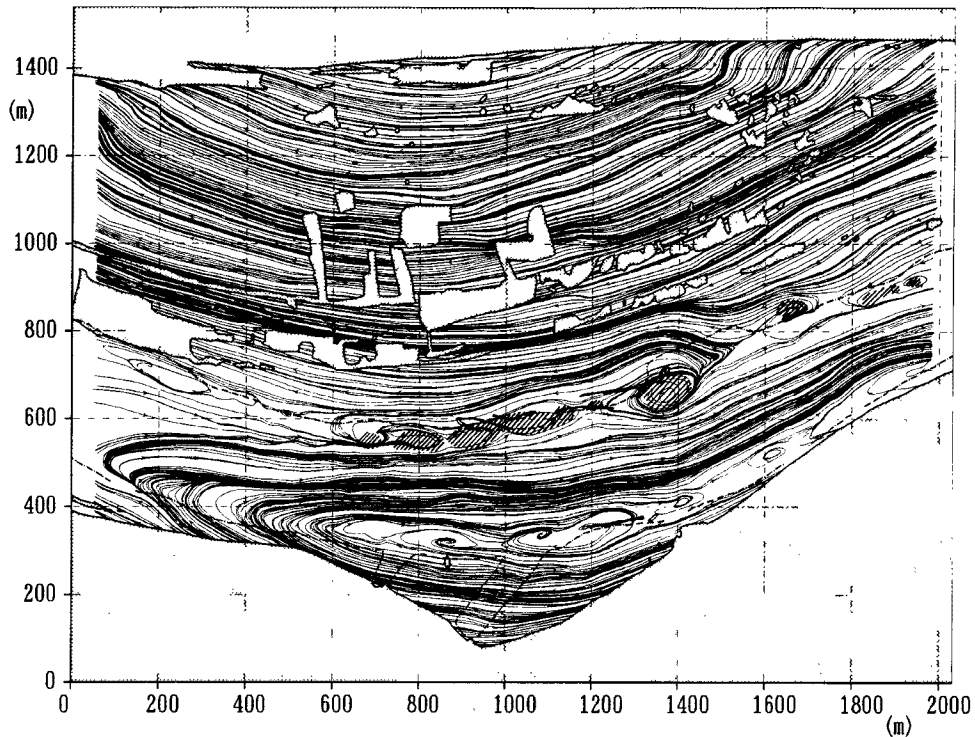


Fig. 6. The streamlines viewed from the moving frame.

が、斜線を施した領域で示されている。流線の渦のパターンはこれらの領域とほぼ重なっており、Photo. 1 に現われている航空写真の渦模様ともよく一致していることがわかる。

3.3 河床洗掘と土砂堆積

二次元発散の分布を Fig. 7 に示す。図において、二次元発散の絶対値の大きい領域が島状に分布し、それらが帯状に連なっていることが認められる。しかし、本図では二次元発散の分布の変化が細かいため、全体的な特徴を把握しにくいので、二次元発散の分布に $100\text{ m} \times 60\text{ m}$ の範囲で空間的に移動平均を施し、発散の分布の特徴を大局的に把握しようとした。その結果を Fig. 8 に示す。

先述の 1992 年作成の河川横断面図（ 0.5 km ごとに作成）によると、低水路右岸側の河床の深掘れは 65.5 km （図では $x = 1,600\text{ m}$ 付近）地点で海面下 3.64 m 、 66 km （図では $x = 1,100\text{ m}$ 付近）地点においても海面下 3.64 m に達しているが、それ以外の地点では顕著な深掘れは認められない。先に $x = 1,200 \sim 2,000\text{ m}$ の範囲で、右岸側低水路河岸に向かう流れがあることを指摘したが、Fig. 8 においては、低水路右岸側の上記の範囲では二次元発散は概ね負で絶対値が大きくなっている。水面における二次元発散の正の領域は流れの湧き上がりを、負の領域は流れの沈み込を意味するから、流速の大きい流れが河岸に向かって接近しながら沈み込むような流況が、上記の範囲の低水路右岸側で生じていると言える。このような流れが湾曲部の外岸側の河床洗掘と低水路河岸浸食に深く関わっていると考えられるが、この地点ではこのような湾曲に伴う水衝部が堤防に接近していることに注意を要する。

また、Fig. 8 における左岸側の高水敷上の二次元発散の負の絶対値の大きい領域は、Fig. 4 における流れの減速域に対応することがわかるが、そのような領域は障害物の前面になっていることが多く、そこでは土砂が堆積すると考えられる。

さらに、Fig. 8 においては、 $x = 700 \sim 1,300\text{ m}$ の範囲の左岸側低水路河岸近傍の高水敷上で二次元発

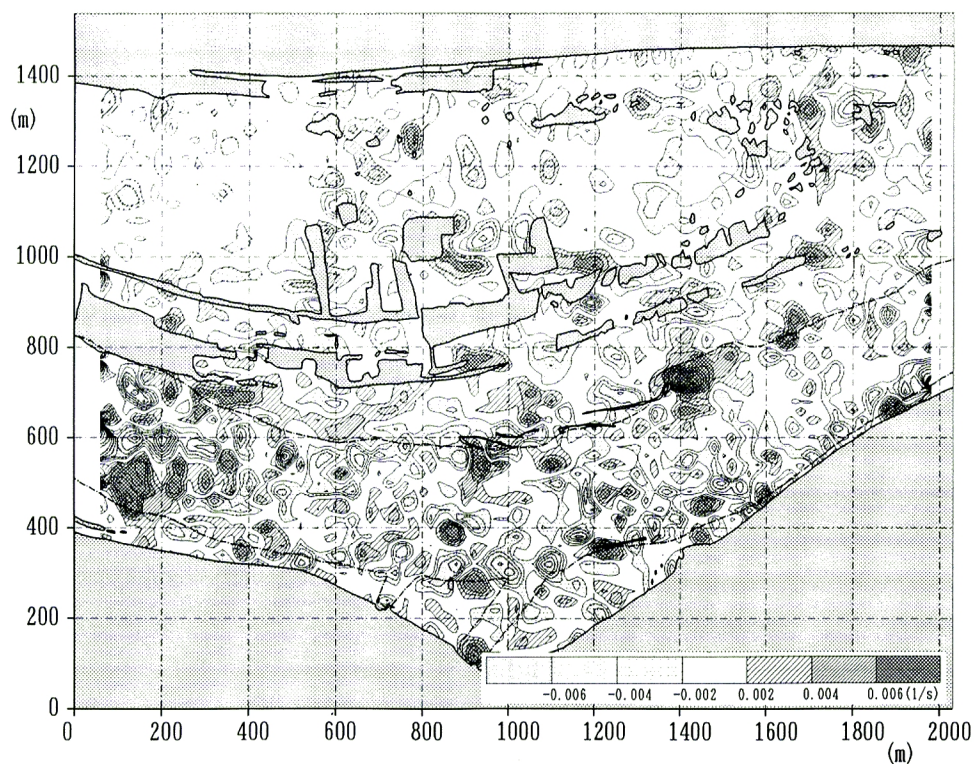


Fig. 7. The two-dimensional divergence distribution.

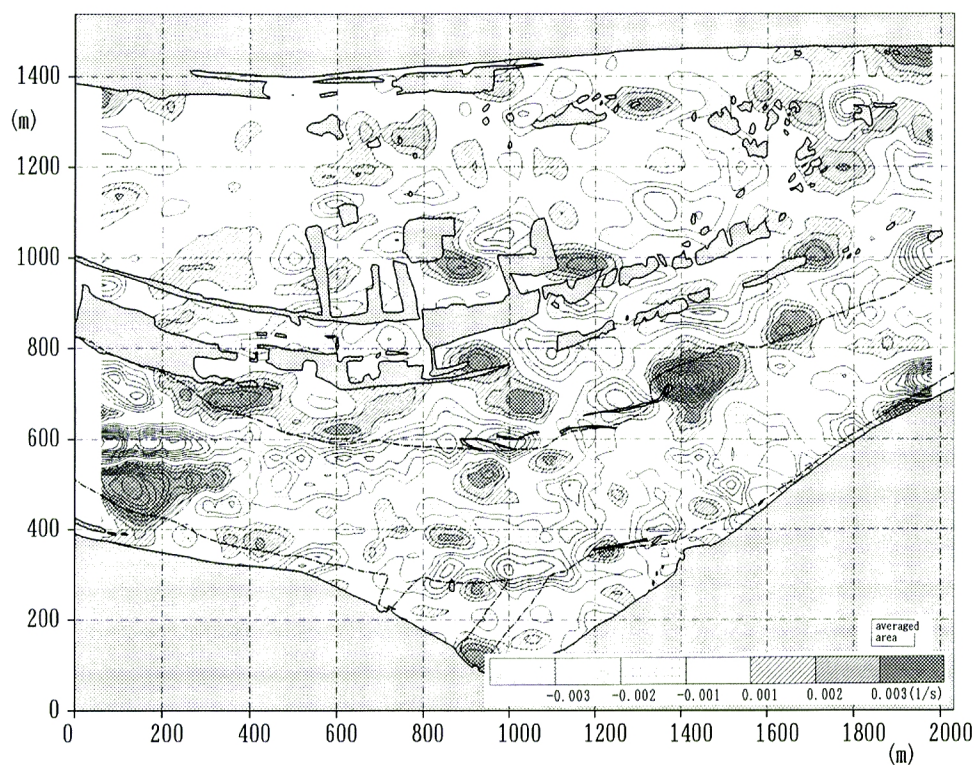


Fig. 8. Smoothed distribution of the two-dimensional divergence.

散が負の領域があり、また、Fig. 4においてこの領域では、流速が0.5～1.0 m/secと非常に小さくなっている。このことから、低水路における高濃度に土砂を含む流れが高水敷上に達し、そこでいわゆる河畔堆積を生じると考えられる。Fig. 6においては、上記の領域では低水路法線の近傍に複数の大規模渦が流下方向に連なって存在しており、このような土砂堆積と大規模渦との関わりに興味をもたれる。

4. お わ り に

複断面河道の治水機能と高水敷の環境問題を検討するため、複断面蛇行流れを呈する利根川の66 km地点周辺における1972年9月の洪水の航空写真を画像解析し、洪水流の実態を把握しようとした。

本報告は、研究目的に対してまだ中間的な段階であるが、高水敷における複雑な流れを含む洪水の流況を定量的に把握する展望が得られた。また、洪水流の詳細な流況（流速ベクトル、流線、渦度、二次元発散分布）と低水路河岸の深掘れや高水敷上あるいは低水路河岸近傍の土砂堆積との関連が明らかにされた。

今後、航空写真標定をより正確なものとすると共に、本解析範囲の上流側の湾曲部での流況の解析を加えることにより、現象把握を深めたい。

本研究を行うにあたり元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。同博士に深甚の謝意を表する次第です。また、建設省関東地方建設局利根川下流工事事務所から貴重な資料をいただいたことに謝意を表します。さらに、本研究に対し文部省科学研究費（一般研究（C））、代表：宇民 正）の補助を受けたことを付記する。

参 考 文 献

- 1) 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，pp. 1-40.
- 2) 木下良作：利根川下流部洪水流三次元流況の実験的研究，建設省利根川下流工事事務所，1981.
- 3) 上野鉄男・宇民 正：昭和58年7月豪雨による三隅川の河川構造物災害とその実験的検討，京大防災研究所年報，第27号B-2，1984，pp. 161-177.
- 4) 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.
- 5) Utami, T. and T. Ueno：Experimental Study on the Compound Meandering Channel Flow Using Flow Visualization and Picture Processing, Jour. Hydrosience and Hydraulic Engineering, Vol. 9, No. 1, 1991, pp. 1-10.
- 6) 森 明巨・岸 力：昭和56年石狩川洪水で観測された湾曲部河床変動の特性，第30回水理講演会論文集，1986，pp. 493-498.
- 7) 森 明巨：湾曲・蛇行河道における三次元数値解，沖積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. 91-104.
- 8) 伊勢屋ふじこ：茨木県，桜川における逆グレーディングをした洪水堆積物の成因，地理学評論，第55巻，第9号，1982，pp. 597-613.
- 9) 木下良作：昭和56年8月洪水による石狩川高水敷堆積調査，石狩川開発建設部，1983，538-594.
- 10) 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，土木学会論文報告集，第345号/II-1，1984，pp. 1-19.

- 11) 木下良作・宇民 正・上野鉄男：蛇行河道の下流遷移と大規模渦列，地球，号外，No. 8，1993，pp. 174-180.
- 12) 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.
- 13) 宇民 正・上野鉄男：写真画像処理による洪水流解析，土木学会論文報告集，No. 503/II-29，1994，pp. 1-17.
- 14) 藤田一郎・河村三郎・神田 徹：相関法の精度と洪水流航空写真への適用，水工学論文集，第 35 卷，1991，pp. 293-298.