

斐伊川における洪水流況と河床形状の同時計測

Simultaneous Measurement of Surface Patterns and Bed
Configurations during the Flood of the Hii River

宇民 正*・上野鉄男*・木下良作**

By Tadashi UTAMI, Tetsuo UENO, Ryosaku KINOSHITA,

松本直也***・室孝孝之***

Naoya MATSUMOTO and Takayuki MUROMOTO

Synopsis

The three-dimensional configurations of river bed were measured by a echo sounder, and, at almost the same time, time series of photographs were taken of the patterns of tracers scattered on the flow surface during a flood stage in the Hii River.

Photograph data were analyzed by picture processing technique to obtain velocity vectors. The relationships among streamlines, vorticity and divergence calculated from the obtained velocity vectors were examined.

The characteristics of wave height and wave length of dunes and small scale bars measured during the decreasing stage of flood flow are examined. The height of small scale bars increases while one of dunes decreases during the stage.

Keywords: field observation, flood flow, sand waves, turbulence structure

1. はじめに

斐伊川は、平時時にはうろこ状の砂州の発達が見られる典型的な砂河川である。平野部では天井川となっていてとともに、水はけの悪い宍道湖・中海に流入しているため、治水対策および河川管理の面で課題の多い河川である。現在、斐伊川水系の抜本的治水対策の一環として、中流部左岸の来原付近において、計画洪水流量 $4500 \text{ m}^3/\text{sec}$ のうち $2000 \text{ m}^3/\text{sec}$ を放水路を開削して、隣接する神戸川に分流する事業が実施されている。

今後のより適正な河川管理と治水計画の推進のための基礎資料を得るため、洪水時における河床変動と洪水流況を同時観測するための準備が 1992 年秋から進められてきた。

本観測計画は、①放水路開削地点（河口から 14.5 km）周辺におけるラジコンボートによる河床形状の広域かつ連続計測、②同じ河川領域におけるラジコンヘリコプター或は実機による洪水流況撮影、③北神立橋（河口から 10.8 km）における橋上からの洪水流況の連続写真観測、④同じ地点における十字浮体と音響測深機を用いた河床形状の三次元連続計測とから成り立っている。

本観測計画の下で、1993 年 6 月 29～30 日の出水、および 1993 年 9 月 4～5 日の出水について観測が実施された。本論文では後者の出水時における観測のうち、③および④の観測結果について述べる。この出水

* 正会員 工博 京都大学防災研究所

（〒612 京都府京都市伏見区横大路下三栖）

** 正会員 工博 自由学園（元）

（〒166 東京都杉並区阿佐ヶ谷北 5-30-11）

***正会員 建設省中国地方建設局出雲工事事務所

（〒693 島根県出雲市塩冶有原町5丁目1番地）

では大津におけるピーク流量は $1425 \text{ m}^3/\text{sec}$ に達した。観測はピーク時を若干過ぎた時点から始められた。

上記観測方法の発展経過についてふれると、浮体流下法は木下^{1),2),3)}により洪水流の構造と河床形態との関連を検討するために開発され、これによって洪水減水期にある種の河床波の形成・発達が発見になること等興味ある事実が明らかにされた。その後木下は、広範にわたる河床形状とその変動を計測するため、ホバークラフトの利用法を開発し⁴⁾、さらにラジコンボートによる観測へと発展させた⁵⁾。一方、航空写真を用いた洪水流の解析は 1960 年代に木下により開発され、洪水流の構造解明ならびに河道変動の解明に多大の貢献がなされた⁶⁾。木下・宇民・上野はこの解析に画像処理の方法を導入することにより洪水流の構造が一層詳細に把握できることを示した^{7),8),9)}。

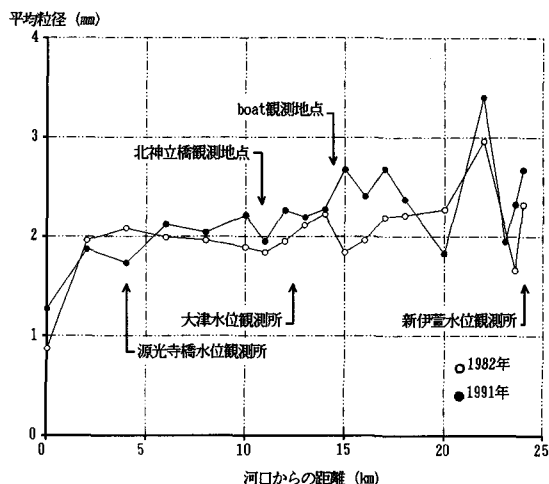


図-1 河床砂の平均粒径と観測地点

2. 観測方法

(1) 観測地点の概況

図-1 に河床砂の平均粒径の河道に沿う変化状況を示す。図には、洪水観測地点ならびに既設の水位観測所の位置も示されている。図から、観測地点周辺の河床砂の平均粒径は約 2 mm であることがわかる。

北神立橋観測地点の河道全幅は約 570 m、低水路幅は約 330 m であり、その上流約 3 km 以上にわたって河道はほぼ直線的である。一方、ボート計測地点の河道全幅は約 380 m、低水路幅は約 310 m であり、河道はここで約 80° 右側へ弯曲している。放水路開削は弯曲の外岸側であるため、それにより洪水流況と流砂現象に変化が生じることが予想される。

(2) 橋上観測の方法

十字浮体に音響測深機（鈴木魚探社製 ES-288 型）を装着し、橋下流の水面上を約 58 m 自然流下させ、その流跡に沿う水深変化を橋上で記録した。この様な計測を河道中央部の橋脚からつぎの橋脚まで、河道横断方向に 2 m 間隔で 40 m にわたって 21 測線について繰り返し行い、河床の三次元形態を把握した。

流況観測においては、長さ 4 m のアルミニウム製の梯子を橋の欄干に沿わせてほぼ鉛直に立て、その頂部に 35 mm スチルカメラを斜め下向きに設置した。カメラの底部にはパンチルターを取り付けてカメラの向きを遠隔操作できるようにし、その撮影範囲は、ファインダーに取り付けた小型 CCD カメラでモニターした。水面流況は 0.27 sec 間隔で連続撮影された。カメラから水面までの距離は 13~15 m であり、トレーサーとしてシュレッダーの屑を橋の上流から散布した。夜間の撮影には発電機を備えた照明装置を利用した。

写真画像の標定のため、長さ 4 m の測量用ポール 2 本を写真画像の左右の端に写し込まれるように橋面から水平に突き出して設置した。

1993 年 9 月 4 日から 5 日にかけて 8 回にわたって河床形態と水面流況の観測を行った。観測時刻（或は時間帯）と水位観測所における洪水ハイドログラフを図-2 に示す。

3. 洪水流況の解析

(1) 解析方法

時間的に連続している 2 枚の写真フィルムの濃度を CCD デジタルカメラで $1750 \times 2312 \text{ pixel}$ 、12 bit データに数値化した。流速ベクトルの計算は多段階相互相関法によった^{7),8),9)}。本観測では、カメラを斜め下

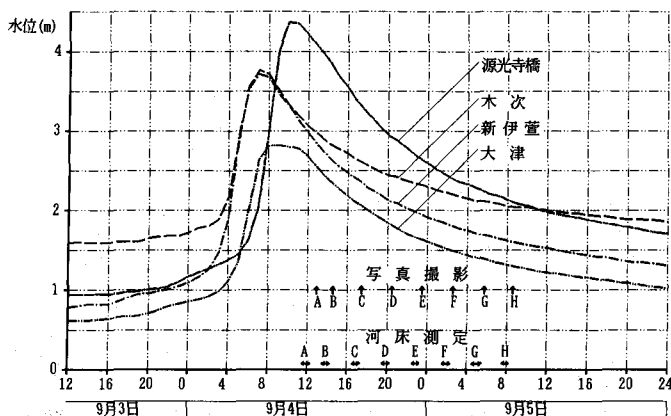


図-2 洪水のハイドログラフと観測時刻

向きに設定してあるため、標定竿として設置してあるボールの画像を用いて写真画像を標定し、画像中の各点の真の位置を計算した。標定のためには、画像データから計算されたボールの赤白の縞模様各々の長さが実際の長さ一致するようにカメラの回転角度ならびに倍率を決めた。以下に示す画像Cの各回転角は $\kappa = 4.80^\circ$ 、 $\phi = 0.20^\circ$ 、 $\omega = 24.78^\circ$ （俯角）であった。カメラの設置角度に関する以上の修正を施した後の画像（緑線強調図）を図-3に示す。本図において、横軸は欄干に沿う方向、縦軸は主流流下方向である。画像のあちこちに、トレーサーが分布していない箇所が認められるが、これが本画像の一つの特徴である。

(2) 解析結果

本論文においては、図-2中でCで示されている観測の結果について述べる。図-4に平均流速で移動する系から見た流線を示す。図において流線の集中、発散ならびに渦運動等が明確に認められる。本図を図-3と重ね合わせてみると、本図で流線が発散している所はトレーサーがぬけている所に相当している。この部分はボイルに相当している。また、本図中の顕著な渦運動はトレーサーの集中域によく対応している。これは、この様な領域では発散が正の大きな値をとらないためである。

図-5に発散の分布を示す。図において、発散の絶対値の大きな領域は特定のスケールをもっており、また、正符号の発散の大きな領域の横断方向の間隔は約4mで、この場合の水深2.3mのおよそ2倍に相当している。本図、図-3および図-4を比較すると、トレーサーの分散・集中の様子、流線の発散・集中の様子、発散の正負がよく一致していることがわかる。

図-6に渦度分布を示す。本図と図-3および図-4を相互に比較すると、渦度の絶対値の大きな所ではトレーサーが集中しており、流線が渦運動を示すことがわかる。本図と図-5とを比較すると、発散が正の大きな値を示す所（ボイル領域）では、概して、その右側で渦度が正、左側で渦度が負といった分布を示すことが認められる。

4. 河床の三次元形状の変動特性

(1) 河床の形状特性

十字浮体と測深機で計測された河床の三次元形状のうち、上記と同じCの時間帯で計測されたものの等高線図を図-7に示す。本図で、横軸は橋の欄干に平行に、縦軸は主流流下方向に設定されている。また、破線は十字浮体の流下方向を示している。斜線を施した部分は平均河床高さより低い部分を、また点を施した部分はそれより高い部分を示している。河床計測は本図の右の測線から順次行われたため、本図の右側と左側とで約50分の時間差があり、その間に河床波の流下方向への移動があるので、そのことを考慮して河床波の配置や形状を検討する必要がある。

本図から、ほぼ規則的に配列された砂堆が明瞭に認められ、洪水のピークが過ぎて水位が低下中に顕著な砂

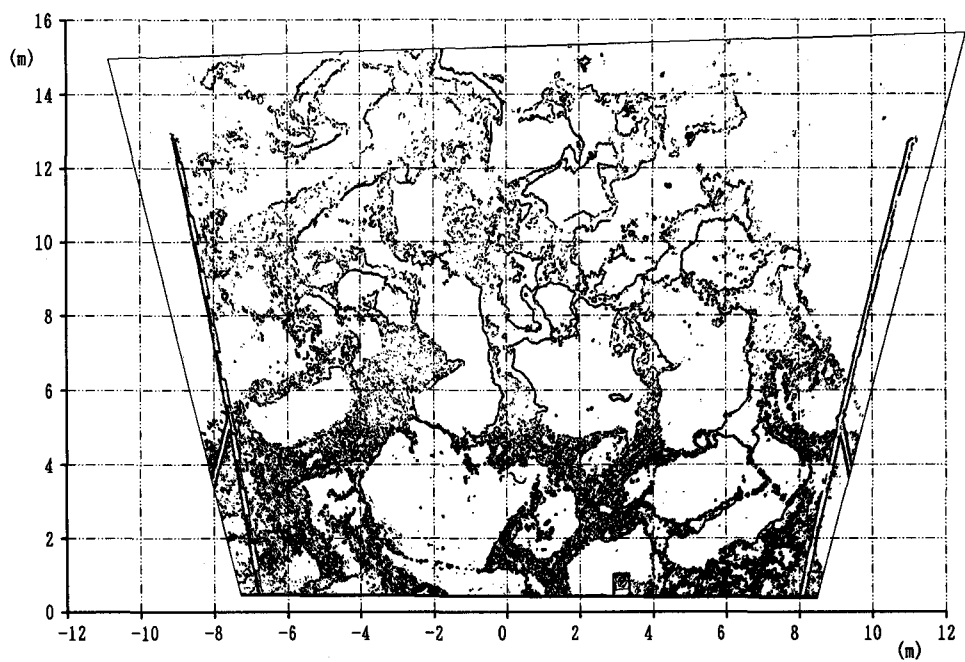


図-3 写真画像の縁線強調図（カメラ設置角度修正後）

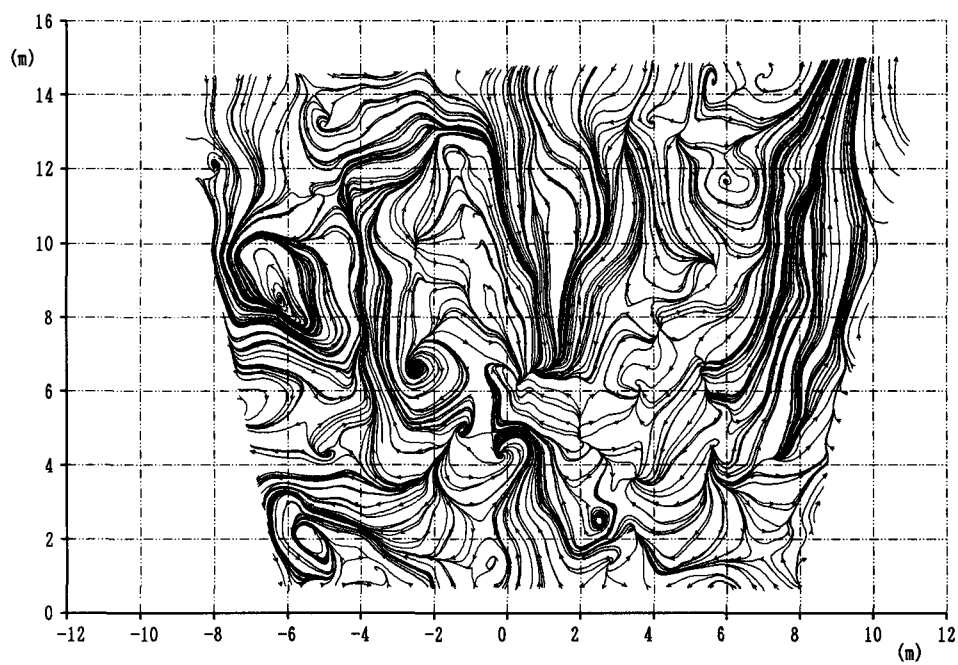


図-4 平均流速で移動する系から見た流線

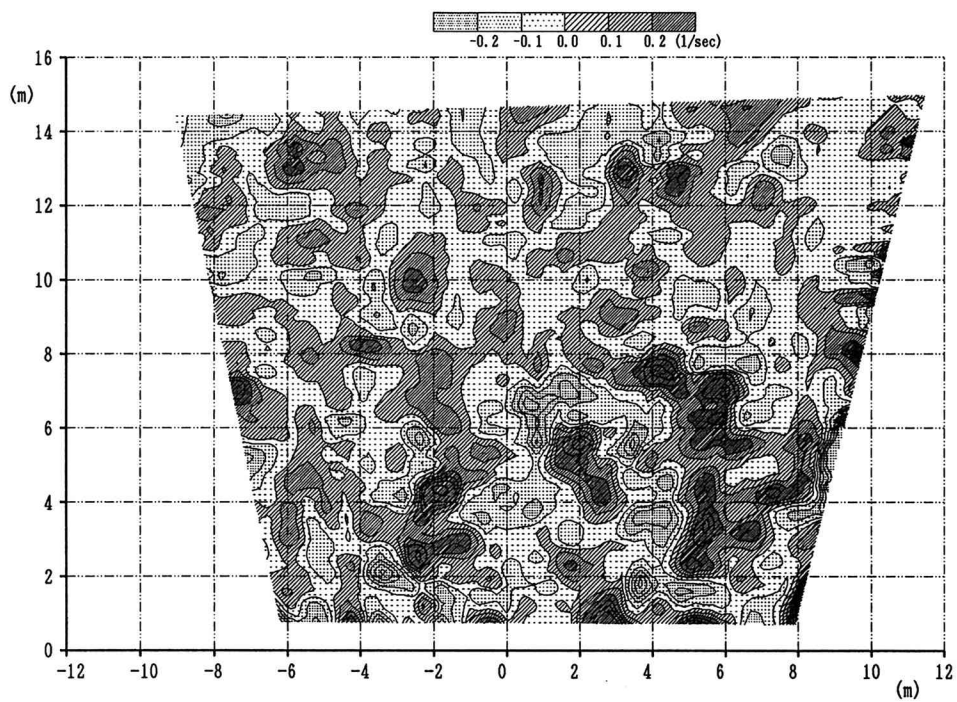


図-5 渦散分布

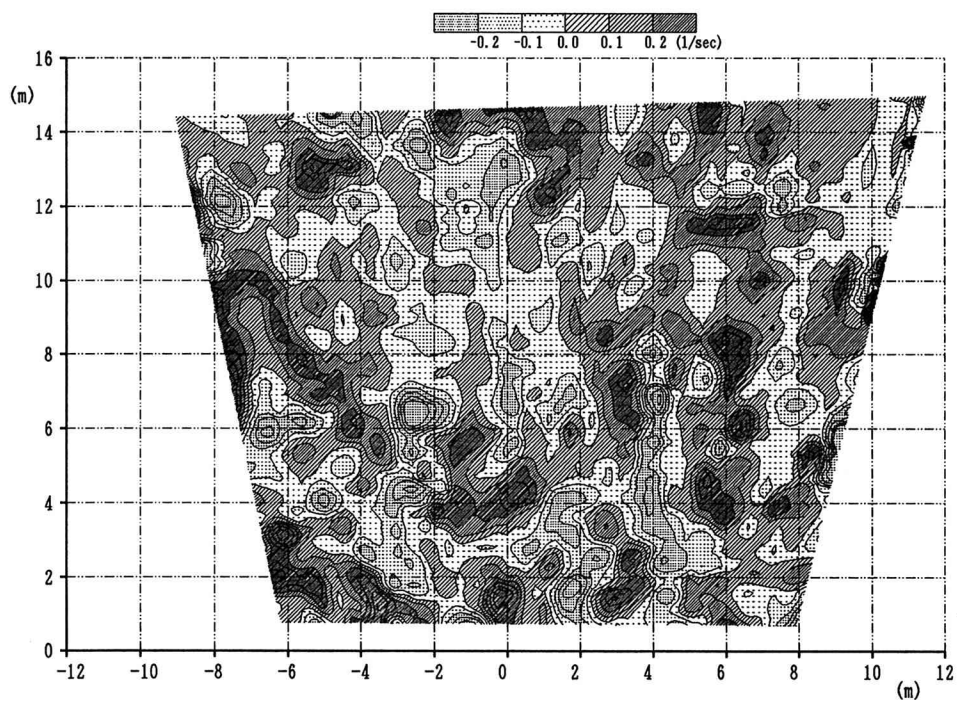


図-6 渦度分布

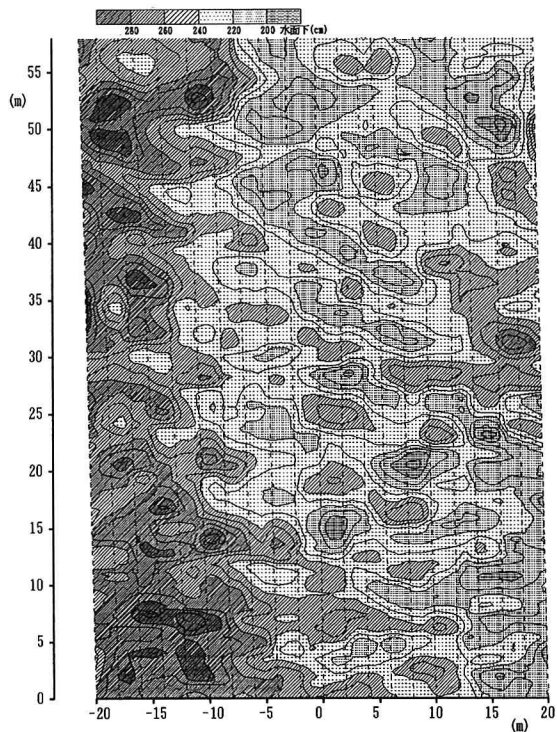


図-7 原河床の等高線図 (時間帯 C)

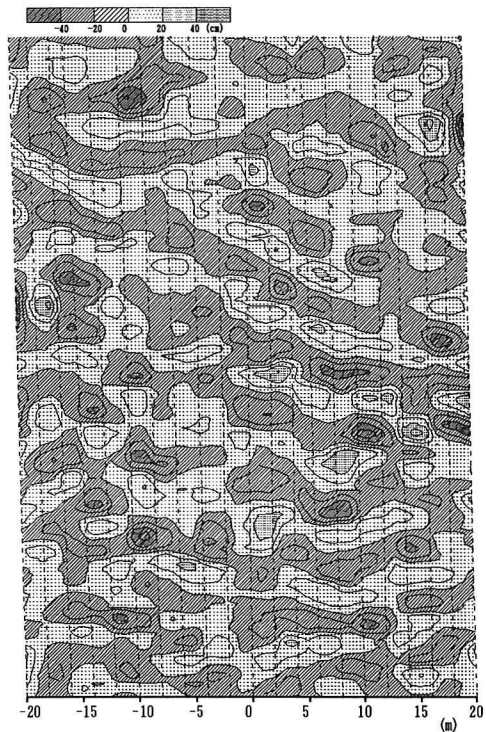


図-9 砂堆の等高線図 (時間帯 C)

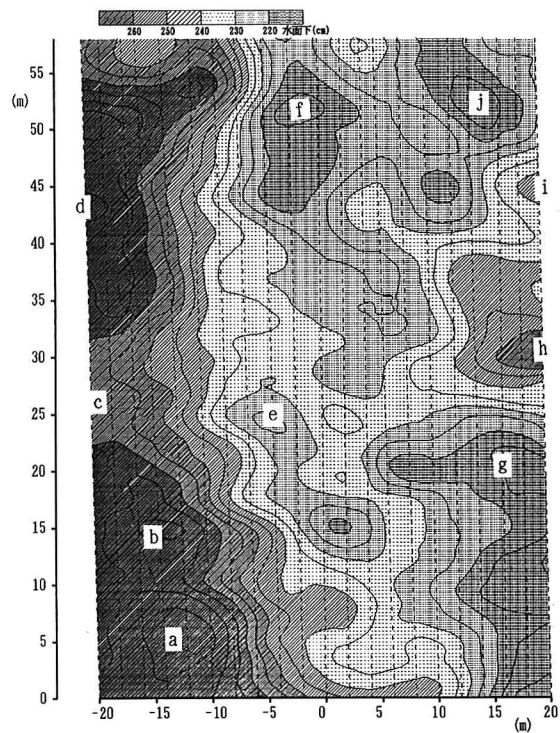


図-8(a) 平滑化河床の等高線図 (時間帯 C)

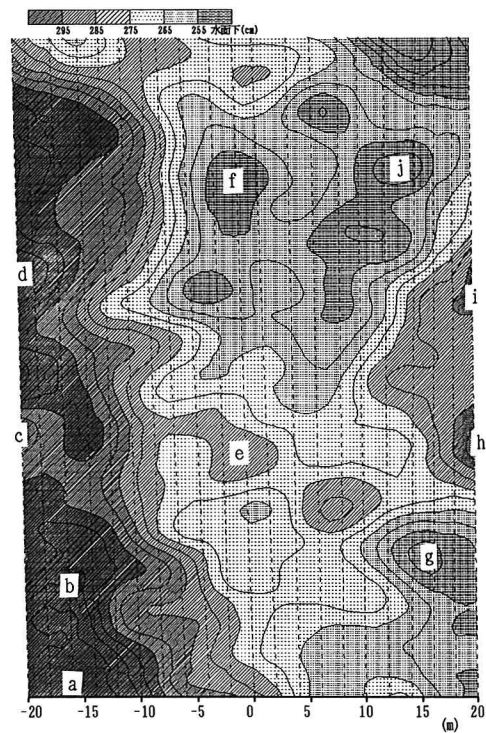


図-8(b) 平滑化河床の等高線図 (時間帯 B)

堆が現れると言う天塩川、石狩川ならびに尻別川における木下の観測結果^{1),2),3),4)}と一致している。また、この様な砂堆が先に述べたボイルの発生とどのように関連しているのか興味をもたれる。ところで、これら砂堆は、より大きなスケールの河床形状の上に乗っている様に見える。そこで、図-7の河床形状を5m×7mの範囲で局所的に平均することにより河床形状を平滑化し、その結果を図-8(a)に示した。本図で示される河床形状は、河幅に比べて小規模なスケールをもつ砂州であり、木下が尻別川で見いだした中間砂州⁴⁾に相当すると思われる。図-8(b)には、Cの測定より約3時間前の時間帯Bにおける測定結果について同様の平滑化を行ったものを示している。図-8(a)(b)の両図は互いによく対応しており、特に対応が明確な10個の点についてa～jの記号で示した。これらの点の位置関係から、約3時間の間に、水深の小さな図の右部分では6～8m、水深の大きな左岸側で4～5mほど河床形状が下流側に移動していることが認められる。

図-9に、図-7に示される原河床高さから図-8に示される平滑化された河床高さを差し引いたものの分布を示す。本図は、小規模砂州の上に乗っている砂堆の形状を示していると理解される。砂堆は横断方向に連なっており、ほぼ均等な波高と波長を有する規則的なものであることがわかる。

(2) 砂堆の波高と波長

砂堆の波高を、河床の局所的な最高点からその直下流の局所的最低点までの垂直距離で、また、波長を局所的な最高点からその直下流の局所的な最高点までの水平距離でそれぞれ定義することとし、各測線に沿う砂堆の波高・波長を求めた。得られた波高・波長の分布を、砂粒の粒径加積曲線と同じ考え方に基いて整理すると、それぞれ図-10(a)、(b)に示される様になる。本図におけるA～Hは、図-2に示されている測定時間帯を示している。

本図によると、波高・波長ともに均一に近い分布を示しており、水位のピークの直後の時間帯Aに計測されたものが最高の値を示し、時間が経過するにともなって減少する傾向を示している。

図-11に波高・波長・水深の経時変化を示す。波高と波長については、各々図-10における50%波高、50%波長を、水深は測深機による測定結果の平均値を用いた。本図で、太い実線で結ばれている波長と水深のデータは、図の左側の縦軸に対応しており、その他の細い実線で結ばれているデータは図の右に示された縦軸に対応している。

本図で特徴的なことは、洪水流量（或は水深）の減少過程で砂堆の波高と波長はともに減少しているが、平滑化された河床（小規模の砂州）の高さは増加していることである。このような特性は、木下による尻別川での現地観測でも捉えられている⁴⁾。

図-12に波高と波長の比、波高と水深の比ならびに波長と水深の比の経時変化を示す。波高と波長の比は0.07～0.04の間で、僅かに減少傾向を示し、波高と水深の比はおおよそ0.10～0.13の間に位置し、波長と水深の比は1.7～2.5の間を変動している。

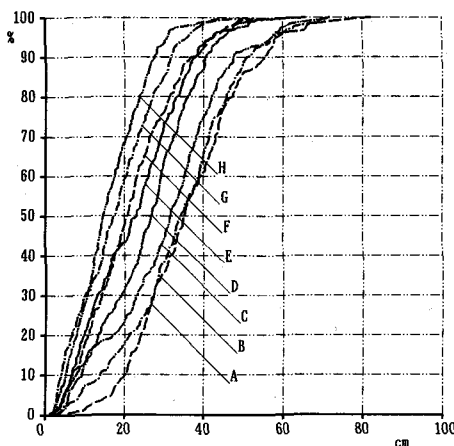


図-10(a) 砂堆の波高加積曲線の経時変化

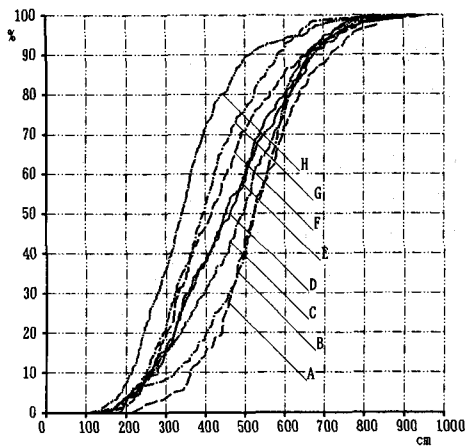


図-10(b) 砂堆の波長加積曲線の経時変化

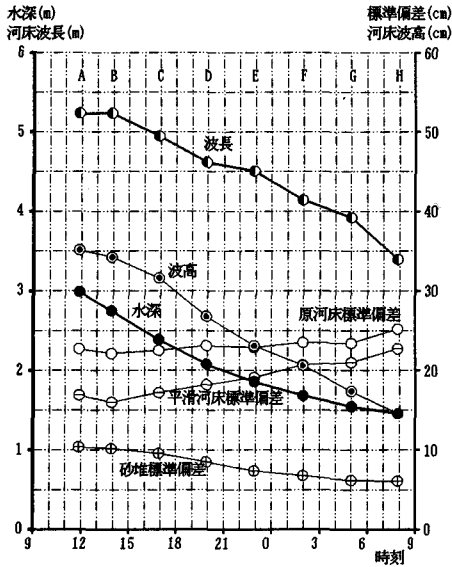


図-11 河床波の波高・波長、水深の経時変化

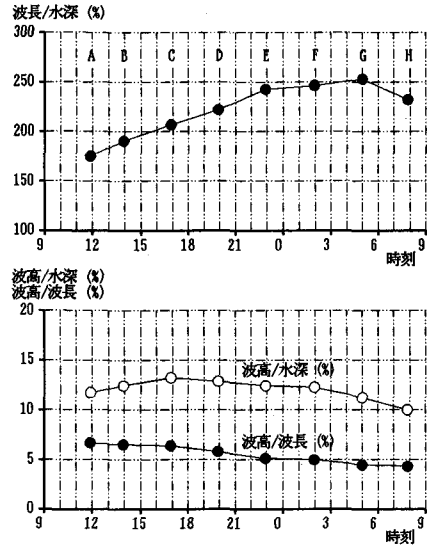


図-12 河床波の波高・波長、水深の相互関係

5. おわりに

洪水時における流れの乱流構造と河床形態ならびに土砂輸送機構の間には密接な関連があるであろうと言う予想の下に、洪水流の表面流況と河床形状の同時計測を行い、貴重なデータが得られた。現段階では、得られたデータの解析の緒についたばかりであり、今後、得られた連続写真の解析を進めることによって諸現象相互間の関連をも含め、詳しい検討を行うつもりである。

斐伊川は幹川流路延長 153 km と比較的小規模の河川であるため洪水の流出は早い。そのため、今回のように台風による出水を観測するに当っては、かなりの強風下でしかも雨の中で観測の準備を進めざるを得なかった。しかし結局計測はピークを過ぎてからになってしまった。また、夜を徹しての橋の上での観測作業も決して楽なものではなかった。この様な困難な観測事業を実施し或は協力していただいた建設省中国地方建設局出雲工事事務所、社団法人中国建設弘済会ならびに出雲グリーン株式会社の諸氏に深甚の謝意を表します。

参考文献

- 1) 木下良作：洪水流の河底境界面の可視化，流れの可視化，Vol. 7, Suppl., pp. 27-30, 1987.
- 2) 木下良作：洪水時の砂床形態の変化，第 33 回水理講演会論文集，pp. 439-444, 1989.
- 3) 木下良作：石狩川下流部における洪水時の濁度鉛直分布と流れの構造について，水工学論文集，第 34 巻，pp. 463-468, 1990.
- 4) 木下良作：砂洲・砂堆など河床波の洪水時形態変動，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，pp. 85-93, 1992.
- 5) 木下良作：洪水時河床音響調査用 R C エアポートの開発，河道の水理と河川環境シンポジウム，1993.
- 6) 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，pp. 1-19, 1984.
- 7) 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, pp. 4-17, 1990.
- 8) 宇民正・上野鉄男・木下良作：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，京都大学防災研究所年報，第 35 号 B-2, pp. 373-388, 1992.
- 9) 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, pp. 174-180, 1993.