

斐伊川における洪水観測について — 水面流況と河床形状の同時計測 —

宇民 正, 上野 鉄男, 木下 良作, 松本 直也, 盛谷 明弘, 室元 孝之

ON THE FIELD OBSERVATION OF FLOOD FLOWS IN THE HII RIVER — SIMULTANEOUS MEASUREMENTS OF SURFACE PATTERNS AND BED CONFIGURATIONS —

By Tadashi UTAMI, Tetsuo UENO, Ryosaku KINOSHITA, Naoya MATSUMOTO,
Akihiro MORITANI and Takayuki MUROMOTO

Synopsis

The three-dimensional river-bed configurations were measured by a echo sounder, and, almost at the same time, time series of photographs were taken of the patterns 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 streamlines, vorticity and divergence calculated from the obtained velocity vectors were examined to clarify the boil structure.

The time variation of wave height and wave length of dunes and small scale bars during the decreasing stage of flood flow are examined. In the Sept. 5-6 flood, the height of small scale bars increases while one of dunes decreases during the stage.

1. 概 説

本研究は、平水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斐伊川において、洪水時に河床形状と水面流況とを連続的かつ同時に計測を行った結果の報告である。斐伊川は平野部では天井川となっているとともに、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。

本観測計画は、いくつかの観測項目から成り立っているが、ここではそれらの内、河口から 10.8 km に位置する北神立橋上から行った洪水流況の連続写真観測、ならびに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の結果について述べる。本観測の特徴として、第一に河床形状と表面流況を同時観測したこと、第二に定点において連続観測がなされたことがあげられる。

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。これらの出水の大江におけるピーク流量は、6月の出水では $1145 \text{ m}^3/\text{sec}$ 、9月の出水では $1425 \text{ m}^3/\text{sec}$ に達した。両出水とも観測はピーク時を若干過ぎた時点から始められた。本研究では、主に後者の出水時における観測結果について述べる。

ところで、河床・河道形態の主要な変形は洪水時になされと考えられ、それだけに洪水時における洪水流や河床形状に関する実態把握は河川工学上きわめて重要である。しかし、洪水時における実態観測の例は

決して多くない。

芦田ら¹⁾は1968年に大戸川において流砂と流速変動の固定点観測を行った。また、1981年の石狩川洪水時において高木ら²⁾は、水位、河床変動、河床形状、ならびに流向・流速を計測し、これらに関する洪水時の貴重な資料を得た。さらに、建設省土木研究所河川研究室³⁾により1988、1989年に瀬沼川において、浮遊砂、河床波、ラジコンヘリコプターによる写真撮影とその解析、ならびに電磁流速計による乱流計測など洪水流の総合的観測の開発的研究がなされている。

木下⁴⁾は1989年の石狩川洪水時に濁度の鉛直分布、河床形態ならびに表面流速・流向の同時計測を行い、洪水の増水期と下降期とで乱流構造と河床形態が異った特性を示すことを明かにし、流れの構造と河床形態との関連性についても考察した。日野ら⁵⁾は、1991年の瀬沼川での出水時に複数の電磁流速計を用いて流れの中の8点で流下方向および横断方向の流速を同時計測し、洪水時における乱流構造の3次元的な瞬間像を明かにした。また、長谷川ら⁶⁾は、石狩川の洪水時に浮遊砂濃度分布、流速分布ならびに乱流特性を計測している。

洪水流の乱流構造の実測に関しては、上記の諸研究に先立って、洪水流航空写真の解析法が1960年代から木下⁷⁾⁻¹⁰⁾により開発されている。木下はこれによって河道の蛇行現象や洪水流の乱流構造に関する多くの新知見を明かにした。とりわけ、洪水流の乱流構造に関しては、木下⁸⁾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。

洪水流の乱流構造において、本研究ではとくにボイルの構造に注目した。Matthes¹¹⁾は、コルクと名付けた竜巻様の上昇流が河床の凹部から発生し、河床材料を持ち上げ、水面でボイルを形成すると述べた。Coleman¹²⁾はブラマプトラ川の河床観測と水面流況の観察から、河床波の峰の下流部に強いボイルが現れ、他の場所ではそれほど一般的ではないが渦運動が形成されること、および、ボイルの継続時間よりも渦運動の継続時間の方が長いことを見いだした。石原・余越¹³⁾は、河川における乱流計測に基づいて河川乱流の構造モデルを提案した。そこでは、ボイルの発生に馬蹄型渦が寄与していることを明かにした。Jackson¹⁴⁾は、河川におけるボイルの周期や大きさを測定し、実験室における境界層流れの大規模乱流構造と比較検討した。その中でバーストとボイルの関連性を指摘した。宇民・上野^{15),16)}は、流れの可視化法を用いた実験的検討に基づいて、開水路乱流構造に関する階層的な構造モデルを提案し、その中でバースティング現象、ボイルおよび並列らせん流の発生機構の関連を提示した。福岡ら¹⁷⁾はボイルの構造を可視化観測し、ボイルは水路床近傍から発生し、その構造は馬蹄型渦と類似のものであることを指摘した。板倉¹⁸⁾および中川ら¹⁹⁾は河床波とボイルの形成の関連について検討した。浅枝ら²⁰⁾は水路床にV字型物体を置いて上昇流の発生機構を検討した。以上の研究において、ボイルは水路床の比較的近傍で生成され、その生起には馬蹄型渦が寄与していることがほぼ共通した認識であると言える。

ところで、洪水流の乱流構造、土砂輸送特性、ならびに流れの非定常特性はそれぞれに洪水流現象の重要な側面をなすものであり、相互に密接な関連をもっていると考えられる。本研究では、洪水流の乱流構造、ならびに河床形状の時間変化特性に特に注目したが、乱流構造と流れの非定常特性との関連については検討が及んでいない。

2. 観測方法

2.1 観測地点の概況

Fig. 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2mm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、その上流側約 3 km 以上にわたって河道はほぼ直線的である。

2.2 観測方法

1993 年 9 月 4 日～5 日には A から H までの 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 Fig. 2 に示す。

(1) 十字浮体による河床形状の計測

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 60 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。9 月洪水の観測では、計測の間に河床波が移動する状況をチェックするため、第 21 測線を計測した後に第 1 測線に沿う河床形状を再度計測した。十字浮体の流下方向はアリダードを用いて、平板測量で計測した。

なお、この浮体流下法は木下⁴⁾・21)・23) 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たもので、これによって洪水減水期にある種の河床波の形成・発達が盛んになること等興味ある事実が明らかにされている。

(2) 水面流況の連続写真撮影

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。レンズとしては、焦点距離 28 mm の広角レンズを用いた。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。ただし、一部の写真は、カメラのモータードライブの不調のため 0.54 sec 間隔で撮影される結果となった。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（2.4 KW）を 4 台準備し、各発電機には 400 W の照明ランプを 2 個装着して水面を照明した。写真フィルムとしては Tri-X フィルム（ASA 400）を用いたが、夜間撮影では露出不足の懸念があったので、夜間撮影分は ASA 800 の増感現像処理した。

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。

写真撮影結果の一例を Photo. 1 に示す。

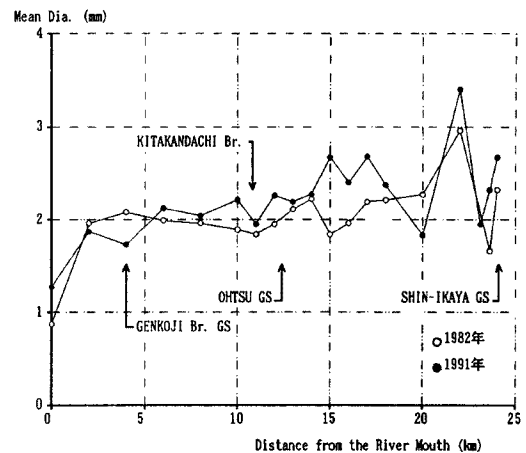


Fig. 1 Mean diameter of bed materials and the location of observation site.

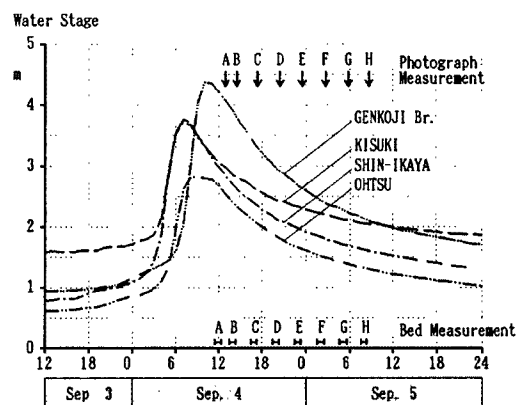


Fig. 2 Hydrograph of the flood on sept. 4-5, 1993.

3. 橋上からの流況写真の画像解析

3.1 解析方法と解析結果

9月の洪水に関しては8回の撮影が行われ、有効な結果が得られた。それらの内、とりわけFig. 2のFで示される撮影シリーズで良好な写真が得られたので、連続する5モードの写真解析を行い、洪水流の乱流構造の時間的変化特性を検討した。この場合、連続撮影の時間間隔は0.54秒、各モード間の時間間隔は1.08秒で、第1モードの撮影時刻を $t = 0 \text{ sec}$ とすると、第2～第5モードの撮影時刻はそれぞれ $t = 1.08, 2.16, 3.24$ ならびに 4.32 sec となる。

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。本観測では、カメラを斜め下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(κ , ϕ , ω)ならびに倍率を決めた。カメラの設置角度に関する以上の修正を施した後の写真画像(緑線強調図)をFig. 3に示す。図において台形状の枠は写真の撮影範囲を示しており、横軸は橋の欄干に平行な方向、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。

流速ベクトルの計算は多段階相互相関法²⁴⁾ による。得られた流速ベクトル分布を用いて得られる流線

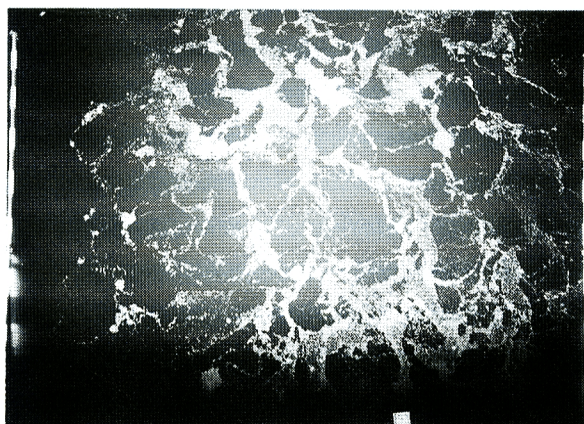


Photo. 1 A Photograph of the flood flow surface.

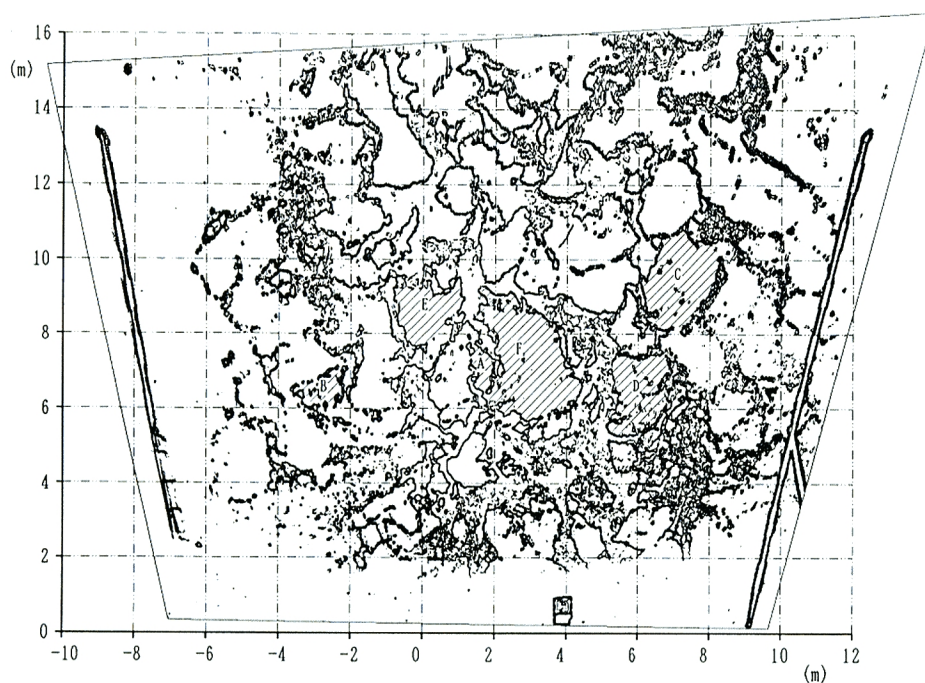
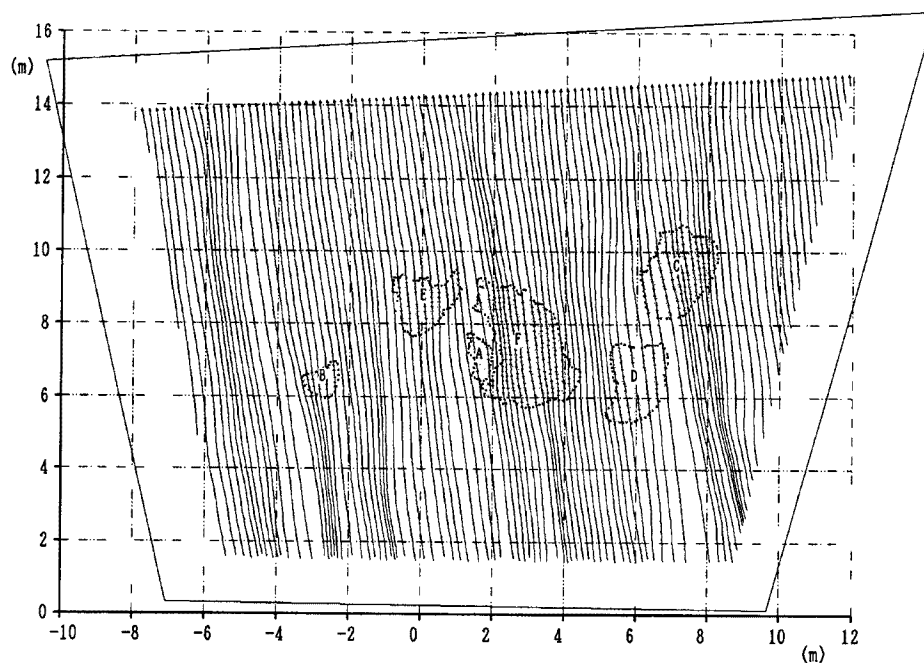
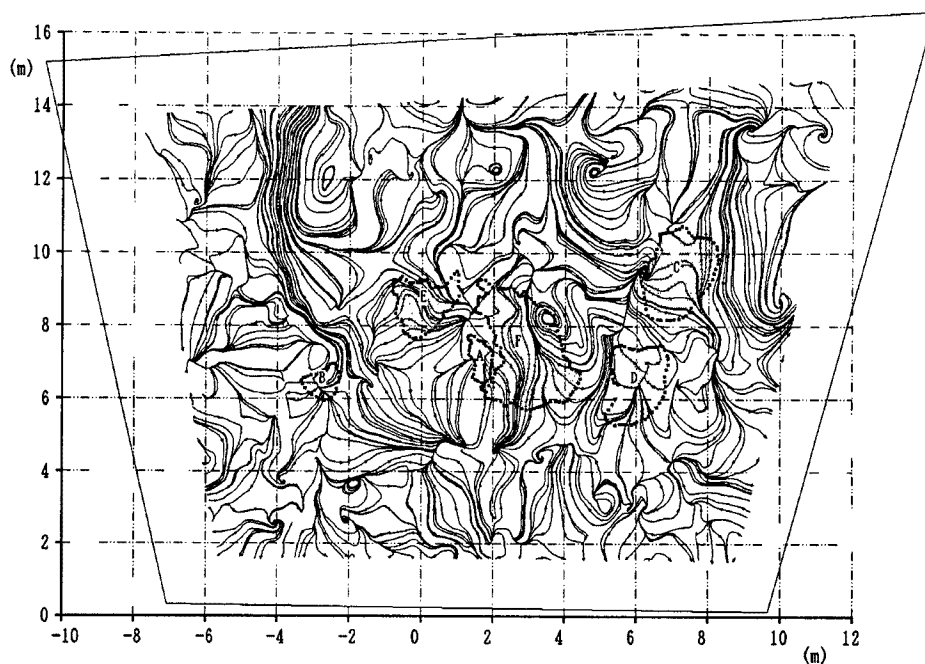


Fig. 3 Edge-enhanced image of the photograph of water-surface ($t = 2.16 \text{ sec}$).


 Fig. 4 The streamlines ($t = 2.16$ sec).

 Fig. 5 The streamlines viewed from the frame moving at the mean velocity ($t = 2.16$ sec).

の一例として $t = 2.16$ sec のものを **Fig. 4** に、平均流速で移動する系から見た同じ時刻における流線を **Fig. 5** に、絶対流速の分布を **Fig. 6** に示す。また、 $t = 0, 2.16$ ならびに 4.32 sec における渦度の分布を **Fig. 7** に、発散の分布を **Fig. 8** に示す。

Fig. 3、**Fig. 5** ならびに **Fig. 8(b)** を相互に比較すると、発散の値が正の大きな領域（ボイル領域）ではトレーサーは概してその領域の周辺に追いやられており、流線は放射状にひろがっている。また、

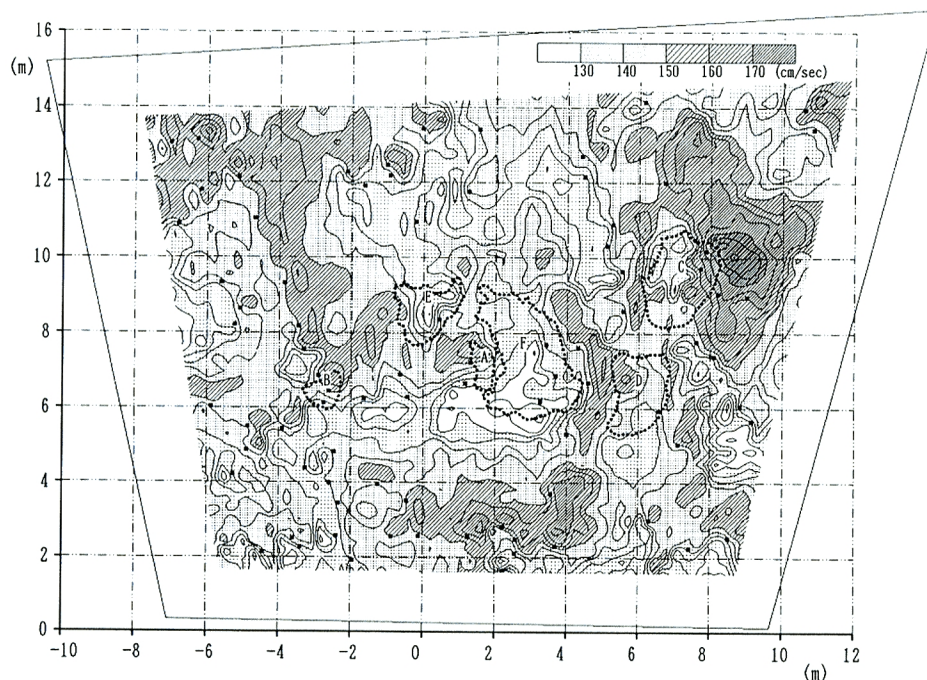
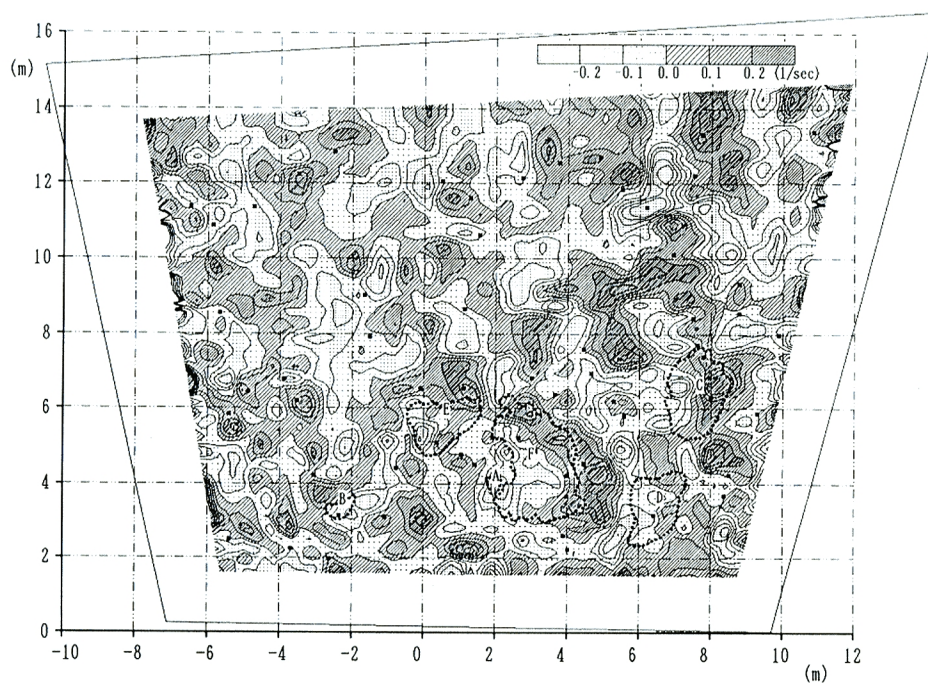
Fig. 6 The absolute velocity ($t = 2.16$ sec).Fig. 7 (a) The vorticity ($t = 0$ sec).

Fig. 7(b)と**Fig. 3**とを比較すると、渦度の絶対値の大きな所ではトレーサーが集中していることがわかる。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。

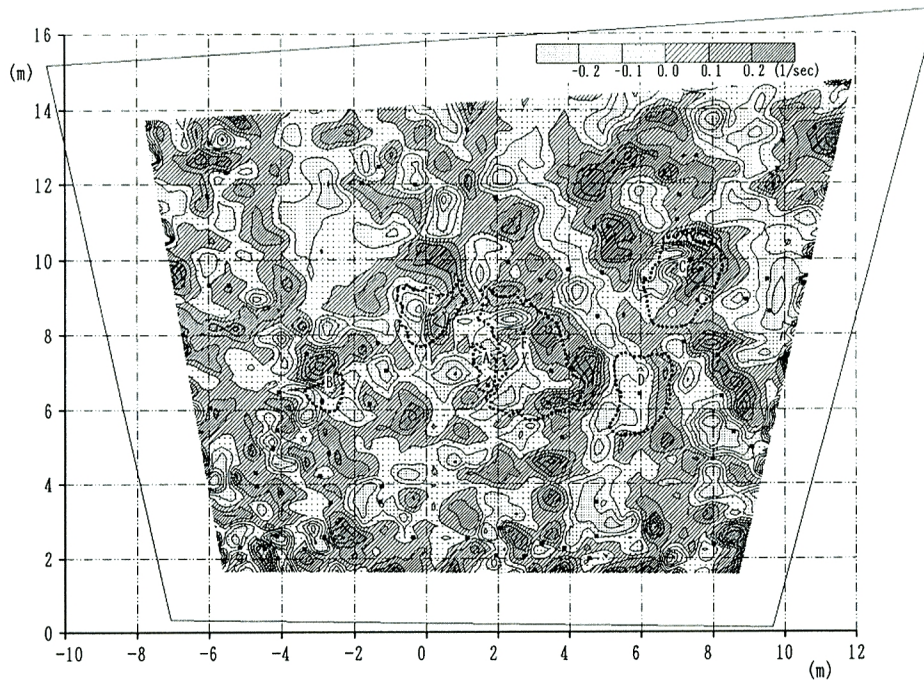


Fig. 7 (b) The vorticity ($t = 2.16$ sec).

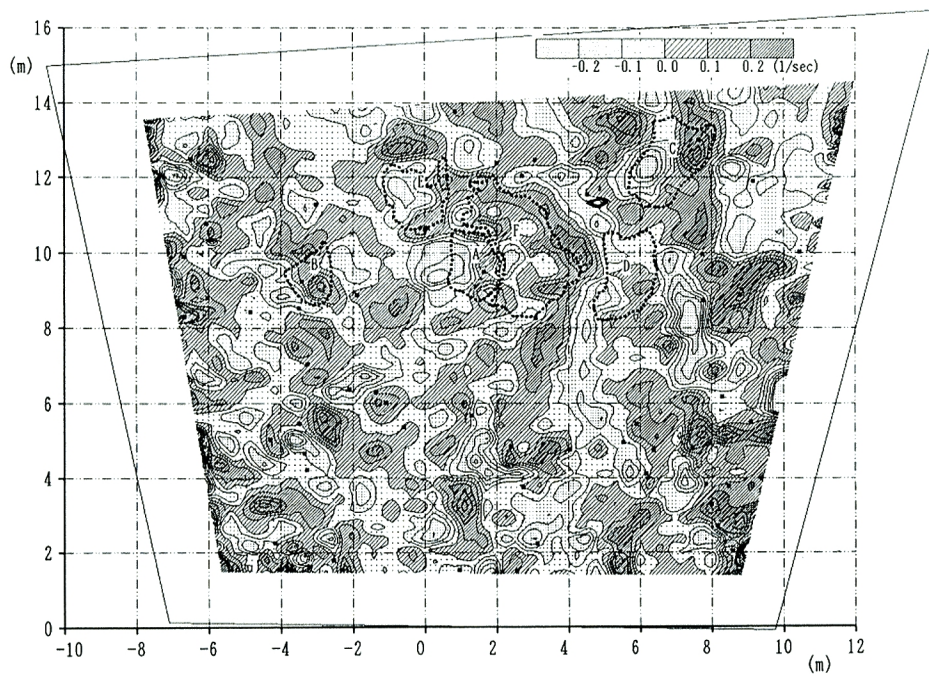
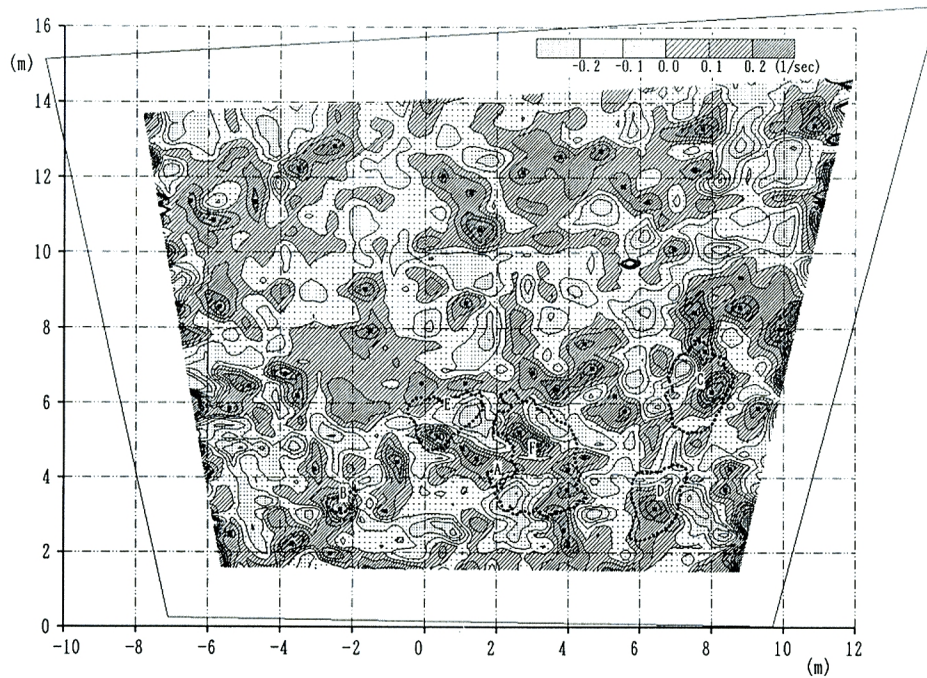
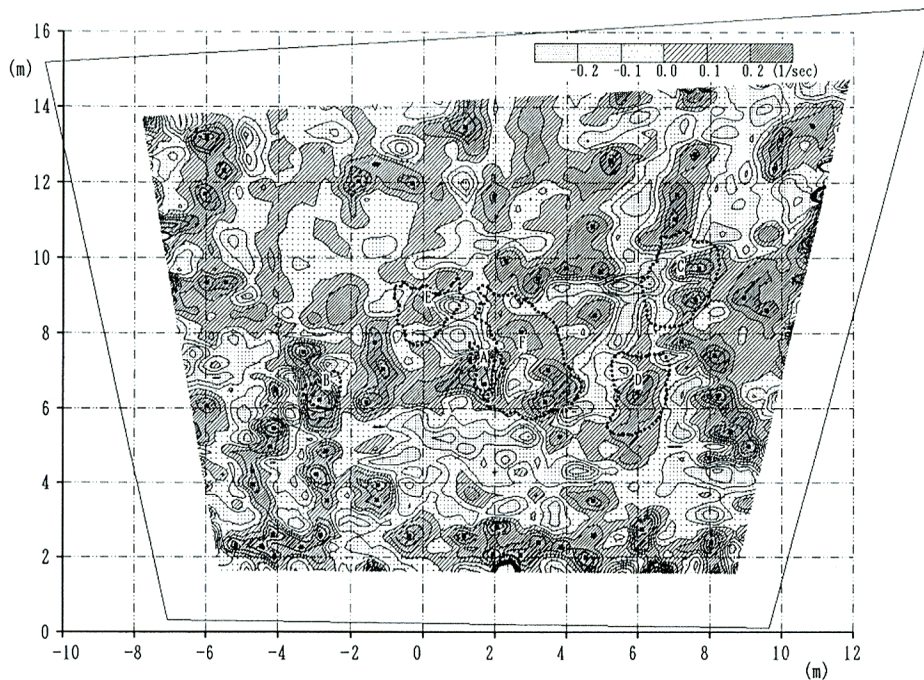


Fig. 7 (c) The vorticity ($t = 4.32$ sec).

3.2 洪水流の乱流構造の時間変化特性

目視観測でも明らかな様に、ボイル構造は、生成→発達→減衰→消滅という過程を経ているので、その間におけるボイルの内部およびその周辺の乱流構造の変化特性について以下に検討する。なお、ボイルの発

Fig. 8 (a) The two-dimensional divergence ($t = 0$ sec).Fig. 8 (b) The two-dimensional divergence ($t = 2.16$ sec).

達・減衰は、ボイル領域の発散の積分値の増加・減少で判断した。

ボイルの構造の経時変化を追うために、**Fig. 3**に陰影をつけて示されている様に、特徴的な発散の分布を含む水面の領域を6箇所選択し、それらにA～Fの記号を付し、それらが時間経過とともに流下しながら変

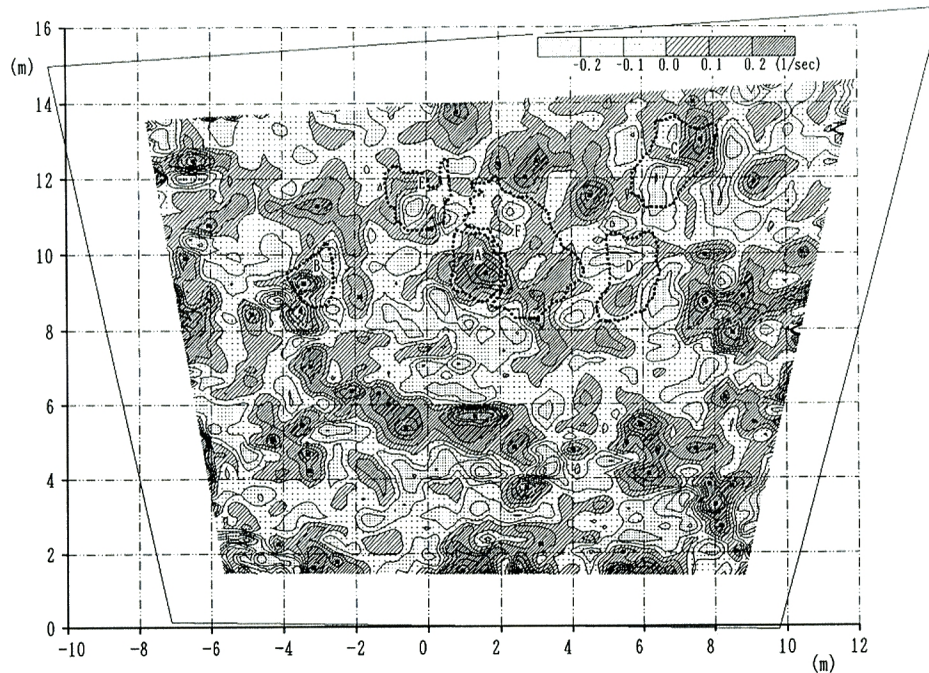


Fig. 8 (c) The two-dimensional divergence ($t = 4.32$ sec).

形してゆく過程やそこにおける発散，流速，渦度，ならびにそれらの相互関係が経時的にどのように変化するかを検討した。

Fig. 4～Fig. 8において，それぞれの時刻におけるA～Fの領域が太い点線で示されている。また，Fig. 6～Fig. 8の各図には，Fig. 8における発散の局所的なピークでその値が 0.2 1/sec を超えるものの位置が黒点で示されている。

A～Fの各領域は，ボイルの発生，発達ならびに減衰の過程が全体としてたどれるように選択されたものであり，各領域における発散の最大値の経時変化はFig. 9に示されるようである。すなわち，A領域内のボイルは $t = 0 \sim 1.08 \text{ sec}$ 前後に発生し，その後発達を継続している。B領域内のボイルは，発生して間もないボイルが $t = 0 \text{ sec}$ 前後に急激に発達し，その後も発達を続けている。C領域内のボイルは， $t = 0 \sim 1.08 \text{ sec}$ の時刻にかけて発達し， $t = 2.16 \text{ sec}$ 以後は減衰している。D領域内のボイルは， $t = 0 \text{ sec}$ においてすでに減衰過程にあるとみなされ，その後も減衰を継続する。E領域内のボイルも， $t = 0 \text{ sec}$ においてすでに減衰過程にあり， $t = 4.32 \text{ sec}$ においては領域の中央部には沈み込みを示す負の発散が現れている。以上のようにA～E領域内のボイルは前の記号のものほど若いと言える。

一方，F領域内には正の発散のピークが複数存在する。これは複数のボイルによって水面の模様が形成さ

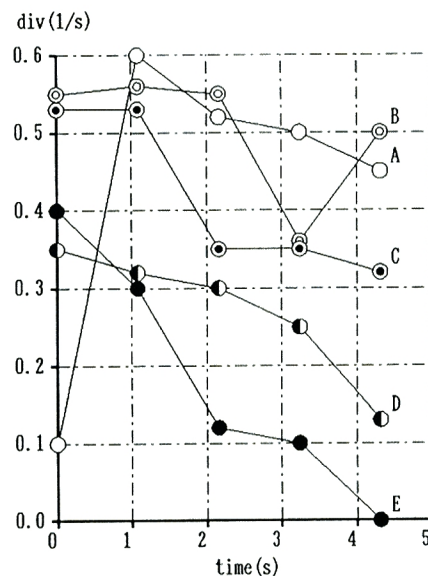


Fig. 9 Time variation of peak value of the divergence in each marked area.

れていることを意味する。これら複数のボイルの中には計測された 4.32 sec 間に徐々に減衰してほぼ消滅してしまうものやいったん発達してから減衰するものがある。

なお、A～F 領域内のボイルの発生・発達過程を総合すると、ボイルが発生して消滅するまでの寿命は 7～10 秒程度と考えられる。この時間内にボイルは 10～10 数 m 流下することになる。このことから、ボイルは単に河床で発生した湧昇流が水面に達したというのではなく、その発生・発達過程に慣性力の強い構造が関与していると考えer必要がある。

A～F の各領域内のボイルの変動特性を、流速分布ならびに渦度の経時変化と対応させて述べると次のようになる。

- ① 時間とともに発散が小さい値から急激に大きくなるボイルの発生過程では、ボイルの周辺の渦度分布ならびに流速分布には顕著な特徴は認められない。
- ② 発散の値が増大し、あるいは大きな値を維持しているボイルの発達過程では、ボイル領域の右と左側にそれぞれ正および負の渦度領域が現われ、それに伴ってボイル領域の上流側が低流速、下流側が高流速という特徴のある流速分布が認められる。
- ③ ボイルが十分に発達した段階では、渦度の絶対値が大きい正負の対をなす渦度領域が形成される。渦度の値は発散がピークに達した後にピークに達する。発散の最大値は、正負の渦度領域を分けている渦度 0 の線上に位置する。流速分布は上記の特徴を維持しつつ、同時にボイル周辺の平均的な流速は時間の経過とともにだんだん小さくなってゆく。
- ④ 発散の値が減少してゆくボイルの減衰過程でも、絶対値が大きい正負の対をなす渦度領域は維持されており、ボイル周辺の平均的な流速の低下が進行する。すなわちボイルを中に挟んでいる渦対の渦度の絶対値が大きい間は流速の低下が進行すると考えられる。
- ⑤ ボイルの減衰過程で渦度の絶対値が小さくなり始めると、流速の低下は止まり、ボイル周辺の平均的な流速は水面における平均的な流速値に向かって回復して行く。
- ⑥ 発散の値が 0 になってボイルが消滅したと見なされる段階（例えば $t = 4.32 \text{ sec}$ における E 領域のボイル）においても、絶対値は小さいながら依然として対をなす渦度領域が形成されている。

以上の記述を模式的に図示すると **Fig. 10** のようになる。これらの事実は、ボイルが対をなす渦運動により形成されることを示している。

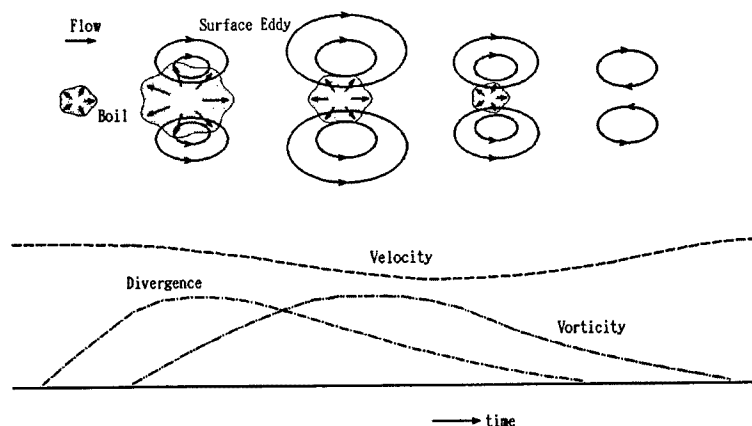


Fig. 10 Conceptual model of time-variation of the divergence, the vorticity and the velocity in boils.

3.3 ボイルの生成機構のモデル化

宇民・上野¹⁶⁾は可視化法を用いた開水路流れの実験から、開水路流れの乱流構造の概念図を **Fig. 11** に示されるように表現した。この図の意味するところは次のようである。

水路床近傍で形成された第一次渦の集中によって、第二次渦、すなわち馬蹄型渦が形成され、それは平均流によって下流側へおし流されると同時にビオ・サバールの法則によって上方へ持ち上げられ、水路床とある傾きをもって伸長させられる。この馬蹄型渦の運動によってボイルが形成されるが、同時に馬蹄型渦はさらに伸長させられて水面まで達すると、渦管の水面に接近している部分での渦度の減衰によって馬蹄型渦の頭部が切り取られた形となり、その残りの部分が水面渦を形成する。同時に、流下方向に連続して発生するこれらの馬蹄型渦の運動の総合が流下方向の軸をもつ並列らせん流を形成する。

本研究における解析結果は上記の概念図とよく一致しており、これに即してボイルの発生・発達機構を説明すると次のようになる。

水路床において形成された馬蹄型渦が伸長させられて、その頭部が水面に接近してゆく段階でその運動によって水面にボイルが発生する。この段階では水面には渦はまだ現れない。馬蹄型渦が水面に到達すると、その頭部は消滅して両脚部が残り、それによって水面渦が形成され、徐々にその強さを増加させてゆく。ボイルはその後減衰の方向へ向かうが、ボイルの減衰がかなり進んだ段階で馬蹄型渦の水面における現われである水面渦も弱くなってゆく。そして、ボイルが完全に消滅した後においても、水面渦は減衰したとはいえ残っている。

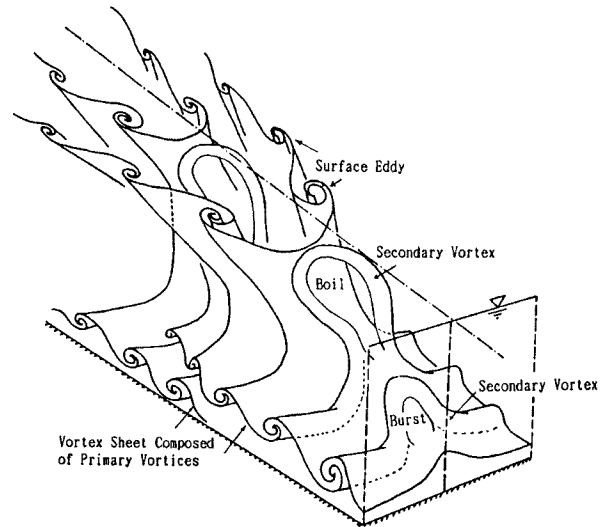


Fig. 11 Conceptual model of the turbulence structure of open-channel flows (by Utami and Ueno).

4. 橋上からの河床計測結果

4.1 解析方法

各測線上の水深の変化を音響測深機で計測し、その結果をディジタイザーを用いて計算機に入力した。その一例を **Fig. 12** に示す。本図において、測線は計測範囲の中央を基準にして、 $X0 = 20$ m (第1測線), 18 m, ..., -20 m (第21測線) と表されている。図において河床波の上流側より下流側の方が斜面の勾配が大きくなっていることが認められる。

4.2 河床の形状特性

(1) 原河床形状

十字浮体と測深機で計測された河床の三次元形状の内Fの時間帯で計測された等高線図を **Fig. 13** 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50~60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実測結果^{4), 21) - 23)}と一致している。また、このよう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。

(2) うろこ状の砂州形状

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、**Fig. 13**の河床形状を5 m × 7 m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**Fig. 14**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²³⁾に相当すると考えられる。時間帯Fより3時間後の時間帯Gの測定結果についても同様の平滑化を行い、**Fig. 15**に示す。それらと比較することにより河床波の移動について調べてみると、**Fig. 14**および**Fig. 15**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、図の右岸側部分では約6 m、左岸側で約7 m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。すなわち、河床波の移動速度は右岸側で約3.3 cm/min、左岸側で4 cm/minとなる。

(3) 砂堆形状

Fig. 13に示される原河床高さから**Fig. 14**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**Fig. 16**に示す。本図は、うろこ状の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。以上のように、斐伊川では洪水時に砂州と砂堆とが多重的に形成されている。

4.3 河床波の波高と波長の変動特性

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、波長を局所的最高点からその直下流の局所的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づいて整理すると、**Fig. 17**に示される様になる。本図におけるA~Hは、**Fig. 2**に示されている計測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、それらは一般的には時間が経過するにともなって減少する傾向を示す。

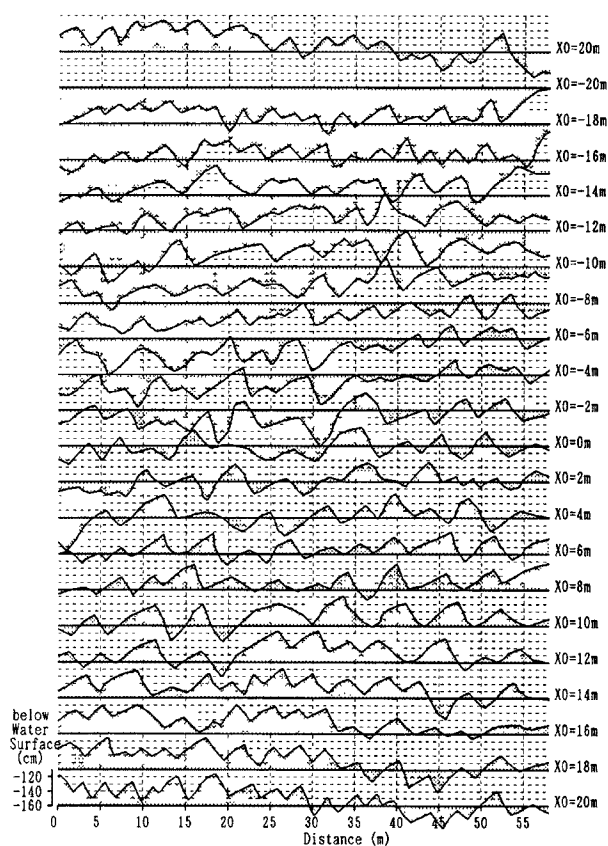


Fig. 12 Measured river-bed configurations.
(Series F, Sept. 5, 1993) .

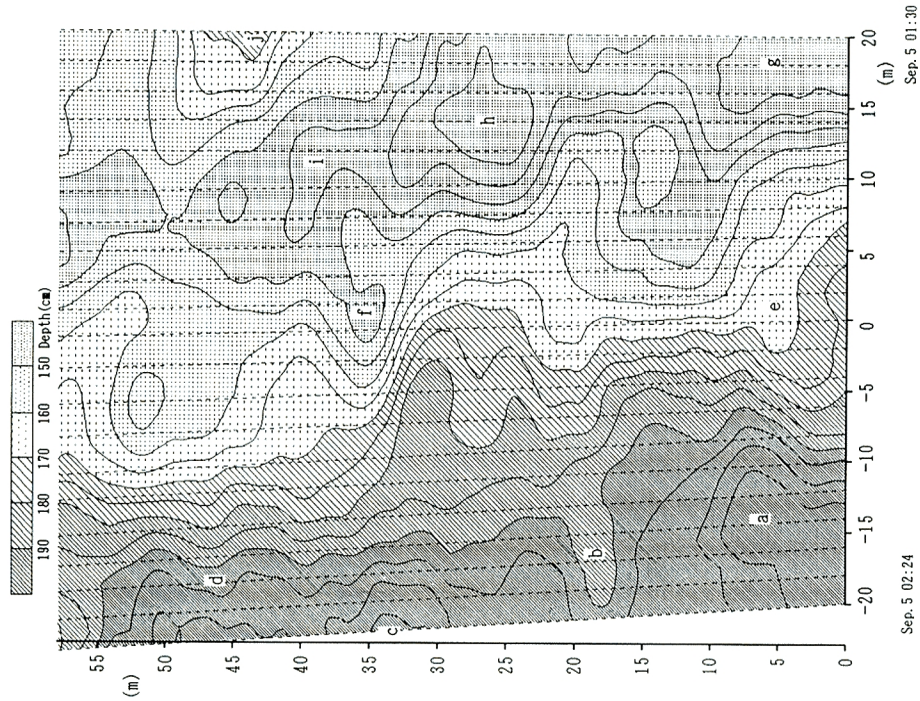


Fig. 13 Contours of river-bed configurations (Series F, Sept. 5, 1993).

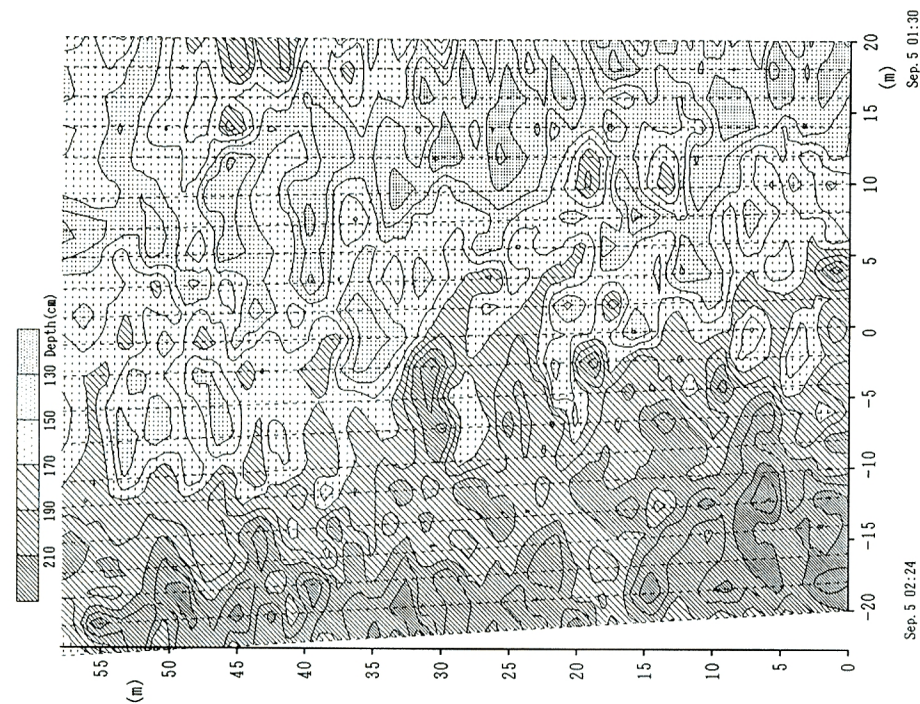


Fig. 14 Contours of smoothed river-bed configurations (Series F, Sept. 5, 1993).

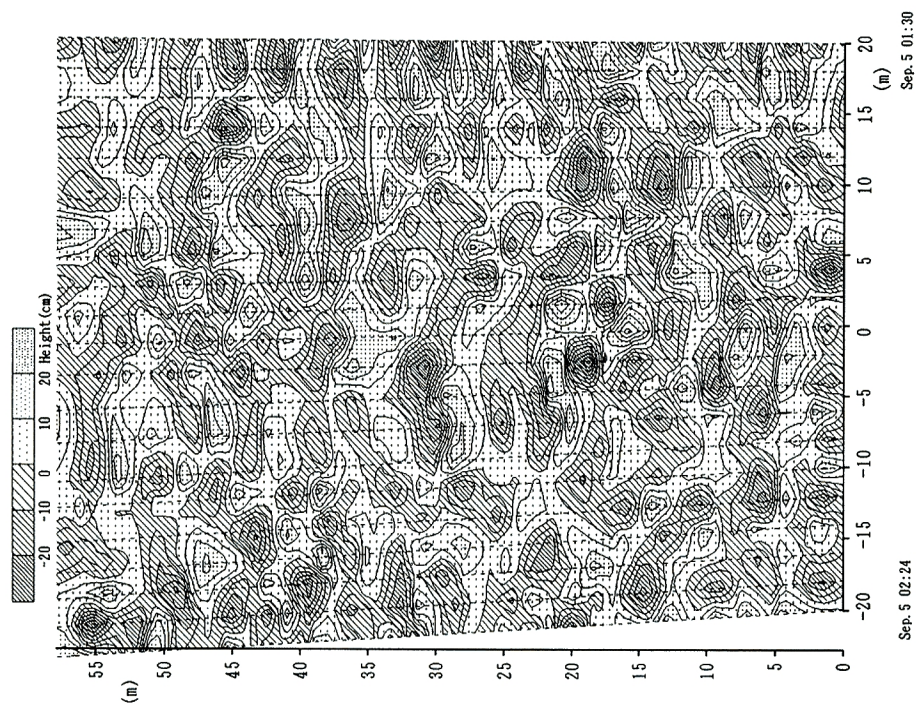


Fig. 15 Contours of smoothed river-bed configurations (Series G, Sept. 5, 1993).

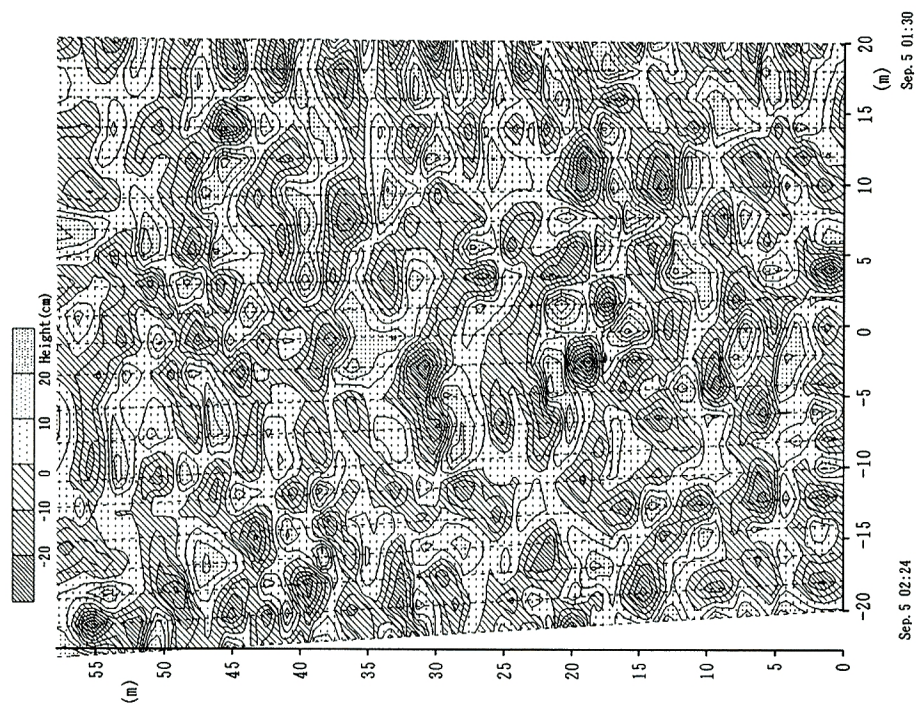


Fig. 16 Configurations of dunes (Series F, Sept. 5, 1993).

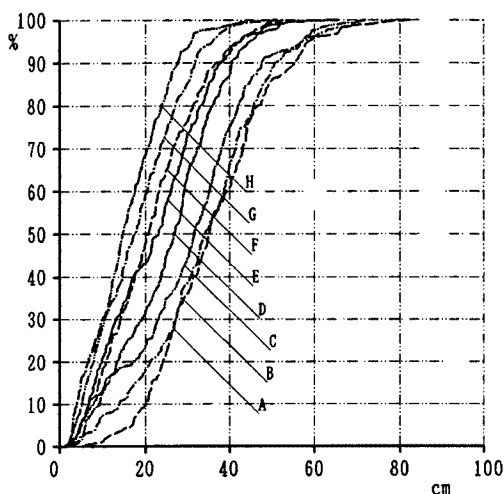


Fig. 17 (a) Time variation of dune height distribution.

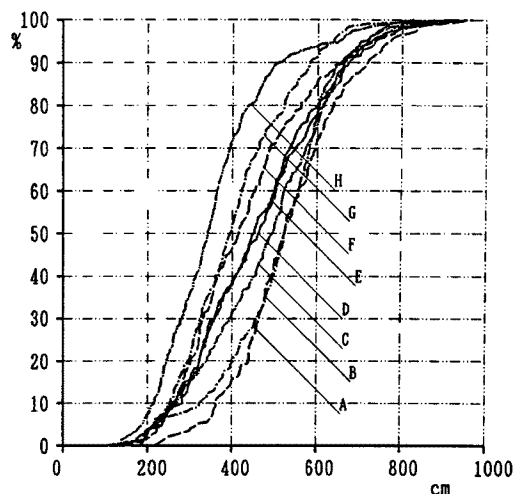


Fig. 17 (b) Time variation of dune length distribution.

Fig. 18 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 Fig. 17 における 50 % 波高, 50 % 波長を, 水深は測深機による計測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。

なお、これらの図においては Fig. 13 から Fig. 16 までに示した原河床、平滑化河床ならびに砂堆河床のそれぞれの測線に沿う縦断方向変動の標準偏差が合わせて示されている。

砂堆の波高は、時間の経過とともに時間帯 A の 35 cm から時間帯 H の 15 cm にまで半分以下に減少している。また、砂堆の波長は時間の経過とともに徐々に減少している。

次に、各河床形状の標準偏差について述べると、砂堆の波高の経時変化と砂堆河床の標準偏差のそれとは、当然のことながら、同様の傾向をもっている。また、うろこ状の砂州を意味する平滑化河床の標準偏差の方が砂堆河床のそれよりも大きくなっている。さらに、上の事実とも関連するが、原河床の標準偏差は平滑化河床のそれと同様の傾向をもって時間的に変化している。

ここで、Fig. 18 において平滑化河床の標準偏差が時間の経過とともに増大していることが注目される。洪水の減水過程において砂州の波高が増加するという特性は、木下²³⁾ によって尻別川の現地観測で捉えられている。ところが、6 月洪水においては平滑化河床の標準偏差が時間とともに減少しており、逆の傾向を示している。そこで、9 月洪水の平滑化河床の時間的な変化の実態を見てみると、砂州の流下にとまって河床の凹凸の度合いの大きくなる部分が計測領域内に進入して来ていることが認められ、このために標準偏差が大きくなったとも考えられる。今回の計測では、十字浮体による河床変動の計測範囲が砂州の規模に比較して相対的に小さかったので、平滑化河床の標準偏差が増大しているからといって直ちに砂州が発達しているとは結論づけられない。

Fig. 19 に河床波の波高と波長の比、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。図において、水深との相対波高および相対波長がある時間帯にピークを持つことが注目される。このようなピークが存在は河床波の発達を意味するものではなく、洪水流量の減少に遅れて河床波が変形してゆくことによるものであると考えられる。これが洪水という非定常流れにおける河床波の変形過程の特徴を示すものであると言えよう。また、相対波長のピークは相対波高のピークよりも遅れて生じており、流量の減少に対して波長の変化よりも波高の変化の方が対応が早いことがわかる。これと関連して、波高と波長の比は時間とともに減少する傾向を示すが、それは実験水路で形成される砂堆の波高と波長の比の平均的な値²⁵⁾ である $1/20$

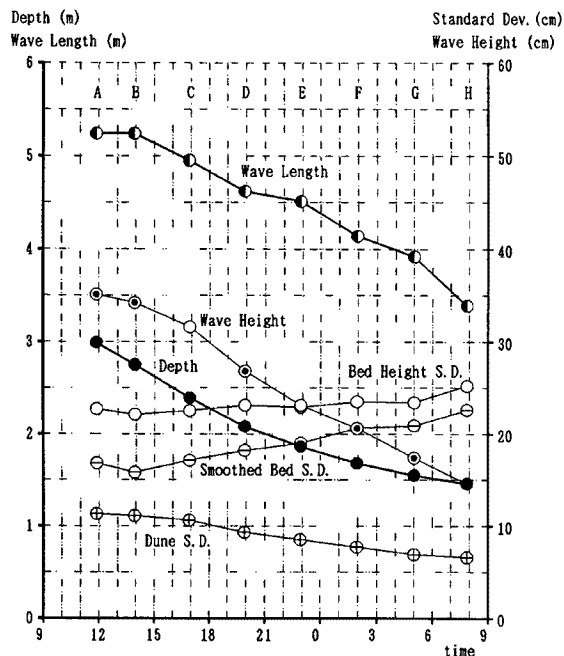


Fig. 18 Time variation of dune height, dune length and water depth.

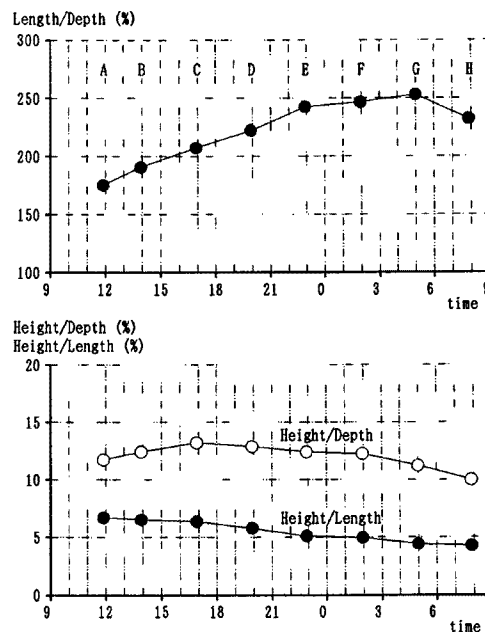


Fig. 19 Relationship between dune height, dune length and water depth.

に近い値となっている。

4. 4 河床形状とボイルとの関連

ところで、このよう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。これに関しては以下の指摘がなされる。

- ① 洪水の表面の平均流速が1.4 m/s、砂堆の平均波長が4.1 mであることを勘案すると、ボイルはその1寿命7～10秒の間に約3波長にわたって流下することになる。
- ② ボイルの間隔は、単純にFig. 8とFig. 16とを比較すると、河床波長のおよそ半分に相当するが、個々のボイルはそれぞれに生成・発達・減衰の何れかの過程にあるので、例えば発達過程にあるボイルだけを取り出してその間隔や配置を検討する必要がある。
- ③ ボイルの生成機構と河床の三次元形状との関連について今後検討する必要がある。

5. 結 語

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いう予想の下に、洪水流の表面流況と河床形状の同時連続観測を行い、貴重なデータが得られた。

本研究によって明らかにされたこと、あるいは検討された結果の概要は以下のようである。

- ① 洪水流の橋上からの写真観測によって、洪水流の乱流構造の空間的および時間的变化特性を検討した。その結果、ボイルの発達過程における発散、渦度および流速の時間的变化特性が明らかにされた。
- ② 斐伊川の洪水流の乱流構造と河床形状との関連について検討された。
- ③ 十字浮体による河床計測によって、斐伊川においては洪水時にうろこ状の砂州と砂堆とが多重的に形

成されていることが明らかにされた。これらの砂州と砂堆の波高と波長の時間的変化特性について興味ある事実が明らかにされた。

木下によるいくつかの洪水時の観測によって、洪水流の水面流況、河床形状ならびに浮遊砂濃度分布が洪水の増水期と減衰期とは著しく異っていることが見いだされている。洪水流の非定常特性と乱流構造との相互関連性に関しては今後の検討課題としたい。

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、結局観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に協力していただいた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) 芦田和男・村本嘉雄・今本博健・田中祐一郎・奈良井修二・上野鉄男：大戸川に関する調査研究，京都大学防災研究所年報，第 13 号 B，pp.187-197，1970.
- 2) 高木譲治・牧野成雄・竹本成行・森田康志：石狩川下流部における洪水流と河床変動の観測，第 26 回水理講演会論文集，pp.57-62，1982.
- 3) 建設省土木研究所河川部河川研究室，涸沼川洪水観測所レポート（1）1988-1989，土木研究所資料，第 2895 号，1990.
- 4) 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.
- 5) 日野幹雄・孟 岩・村山宣義：多点同時計測システムによる実河川洪水流中の 3 次元大規模乱流構造の測定，水工学論文集，第 36 巻，pp.175-180，1992.
- 6) 長谷川和義・道口敏幸・柿崎恒美・大串弘哉：石狩川における乱流と浮遊砂濃度の同時計測結果について，土木学会北海道支部論文報告集，第 47 号，pp.347-352，1991.
- 7) 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，pp.65-66，1963.
- 8) 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，pp.1-17，1967.
- 9) 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.
- 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，土木学会論文集，第 345 号Ⅱ-1，pp.1-19，1984.
- 11) Matthes, G.H. : Macroturbulence in natural stream flow, Trans., A.G.U., Vol.28, No.2, pp.255-265, 1947.
- 12) Coleman, J.M. : Brahmaputra River; Channel process and sedimentation, Sediment. Geol., vol.3, No.2/3, pp.129-239, 1969.
- 13) 石原安雄・余越正一郎：河川の乱流構造に関する一考察，京都大学防災研究所年報，第 13 号 B，pp.323-331，1970.
- 14) Jackson, R. G. : Sedimentological and fluid-dynamic implications of the turbulent bursting phenomenon in geophysical flows, Jr. Fluid Mech., vol.77, part 3, pp.531-560, 1976.
- 15) 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，京都大学防災研究所年報，第 19 号 B-2，pp.267-288，1976.

- 16) 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)，京都大学防災研究所年報，第 20 号 B-2，pp.331-354，1977.
- 17) 福岡捷二・福島祐介・奥津一夫：大規模渦によって誘起される上昇流およびボイルの構造，土木学会論文報告集，第 298 号，pp.41-52，1980.
- 18) 板倉忠興：河川における乱流拡散現象に関する研究（北海道大学博士論文），1984.
- 19) 中川博次・禰津家久・松本利典・金沢文彦：開水路河床波上の乱流構造と組織渦に関する研究，第 33 回水理講演会論文集，pp.475-480，1989.
- 20) 浅枝隆・中井正則・玉井信行・堀川清司：V 字形構造物による上昇流，土木学会論文集，第 423 号／II-14，pp.83-90，1990.
- 21) 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.
- 22) 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.
- 23) 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，pp.85-93，1992.
- 24) 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.
- 25) 水理委員会移動床流れの抵抗と河床形状研究小委員会：移動床流れにおける河床形態と粗度，土木学会論文報告集，第 210 号，pp.65-77，1973.