

京都大学防災研究所 正員 芦田和男 ○村本嘉雄 奈良井修二

1. はしがき ; 河道の形態とその変動に関連してこれまで数多くの研究が行われており, 特に近年, 統計解析によつて各種のスケールの河道形態および河床形態を定量的に表現する方向に主力が注がれている。しかし, 河道の変動特性については各種の河床形態の発生条件と平衡状態の河道形状に関して主に論ぜられており, 河道の変動過程とその機構はまだ明らかにされていない実が多い。本研究では, 河道の変動過程を詳細に検討するために大規模な水路を用いて, 側岸が侵食される流路の変動特性に関する一連の実験を始めた。本文では, 一様こう配の定常流を行な, た実験の結果から水理量の時間的变化, 側岸侵食と河床変動との関係および砂礫堆と蛇曲流路の発達について検討する。

2. 実験の概要 ; 用いた水路は深さ1.5m, 幅7.5mの長方形断面水路であり, 砂床部分の延長は120~130m, 敷き均しこう配 $1/200$ である。河床砂の粒度分布と各通過百分率 $F$ の粒径 $d_F$ に対する限界摩擦速度 $U_{*c}$ を表-1に示す。中スケールから求めた河床砂の平均粒径は0.87mm, 標準偏差は2.62である。

表-1 実験砂の粒度分布と限界摩擦速度

| F (%)                                          |                | 5    | 10   | 20   | 30   | 40   | 50   | 60   | 70   | 80   | 90   | 95   |
|------------------------------------------------|----------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| $d_F$ (mm)                                     |                | 0.19 | 0.26 | 0.34 | 0.42 | 0.48 | 0.58 | 0.78 | 1.15 | 1.75 | 2.80 | 3.80 |
| $U_{*c}$<br>( $\frac{\text{cm}}{\text{sec}}$ ) | 岩垣式            | 1.47 | 1.55 | 1.62 | 1.68 | 1.72 | 1.78 | 2.07 | 2.52 | 3.40 | 4.73 | 5.86 |
|                                                | Egiazarov<br>式 | 3.09 | 2.87 | 2.73 | 2.71 | 2.72 | 2.76 | 2.86 | 3.08 | 3.33 | 3.76 | 4.08 |

実験の条件は表-2のようであり, 砂床へ中央部にこう配 $1/200$ の長方形断面の流路を作り, 流入角 $0^\circ$ , 給砂なしの条件で通水した。ただし, Exp. I-2はExp. I-1終了後, 流路を略形せむに継続して行な, た実験である。また, 流路の下流端はExp. I-1, I-2以外は砂止めによつて15cmの段落ちになつており, その下流で流出土砂の測定を行な, た。

表-2 実験条件

| Exp. No | 流路断面の寸法     |       |            | 流量<br>( $\text{l/s}$ ) | 通水時間<br>(°時分, '分) |
|---------|-------------|-------|------------|------------------------|-------------------|
|         | 床面幅<br>(cm) | 斜面: 涵 | 深さ<br>(cm) |                        |                   |
| I-1     | 100         | 1:1   | 20         | 7.5                    | $100^\circ$       |
| I-2     |             |       |            | 15.0                   | $30^\circ 19'$    |
| II      | 100         | 1:1   | 20         | 15.0                   | $28^\circ 41'$    |
| III     | 50          | 1:1   | 10         | 6.0                    | $71^\circ 26'$    |

これらの実験条件はExp. I-1以外はFerguson, Bose, Lacey などによる河道幅と流量との関係を参考にいて, それらの平均値を選んだ。また, 流路の初期条件はいつでも木下, 井ノ原, 林によつて検討されている砂礫堆の発生範囲にある。

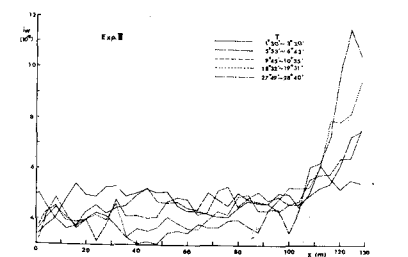
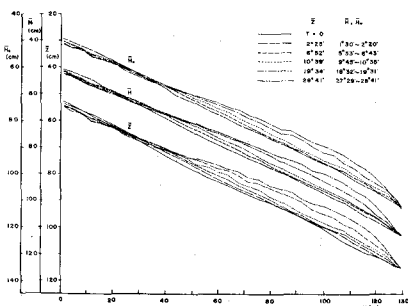
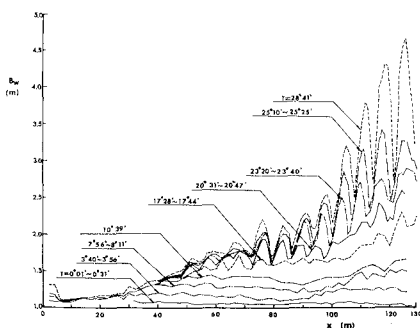


図-1 流路幅, 河床高, 水面こう配の変化(Exp. II)

3. 実験結果とその検討 ; 図-1は Exp. II と III について流路幅  $B_w$ , 平均河床高さ, 水位  $H$ , エネルギー水頭  $H_e$  および水面こう配  $i_w$  の変化を示したものである。  $B_w$  は初期には流下方向に一様に増加するが,

蛇曲の発生にともなう下流側で急激に振らねた波動形状を呈する。こうした側岸侵食により、中流、下流では河床上昇が顕著になり、  $H$ ,  $H_e$  の変化はほとんど  $B_w$  の変化に支配される。  $i_w$  は  $B_w$ ,  $B_w$  の変化に対応して上流、中流で減少し、下流で急激に増大するので次第に屈曲した形状になる。なお、Exp. I-2 も上、下流端付近を除いて Exp. II とほぼ一致する流路形状に達し、Exp. I-1 の影響は最終状態で認められなかった。

3-1 水理量の変化 : 流路の全長を上流、中流、下流部の三区画に分けて水理諸量の時間的変化を検討した。上流部としては河床低下の及ぶ範囲をとり、中流部と下流部の境界は  $B_w$ ,  $i_w$  が急激に変化する  $x=100m$  を便宜的に選んだ。図-2は各三区画における平均流速  $\bar{U}$ , 摩擦速度  $U_*$ , Manningの粗度係数  $n$  および Froude 数  $Fr$  の時間的変化を示したものであり、各水理量の変化はつぎのように表せる。

- i)  $\bar{U}$  は上流部に比して、中流、下流部で著しく減少する。流路の蛇曲度合の小さい Exp. III の方が Exp. II に比して流速低下率が大きいのは、前者では顕著な餅状砂溜が発生したことによる。
- ii)  $U_*$  は Exp. II でわずかに減少する傾向を示すが Exp. III ではほぼ一定している。各時刻において三区画の  $U_*$  値の差は小さく、下流部の急激な抗阻現象は  $U_*$  からは説明できない。
- iii)  $n$  は Exp. III の砂溜の発生時点で急激に増大する。Exp. II, III とともに砂礫堆が発生し、特に Exp. II の中流部でその発生が顕著であるが、  $n$  に対する影響は初期で若干現われるだけである。なお、相当粗度と掃流力との関係を検討した結果、Exp. II では平滑河床、Exp. III では砂溜砂床に近い値を示した。
- iv)  $Fr$  は Exp. II, III とともに限界流に近い値から減少し、それぞれ  $Fr=0.75$ ,  $Fr=0.55$  でほぼ一定になる。

以上のように図-1に示された流路の特性的な変化は水理量・特性に現われなく、断面平均量だけに着目して流

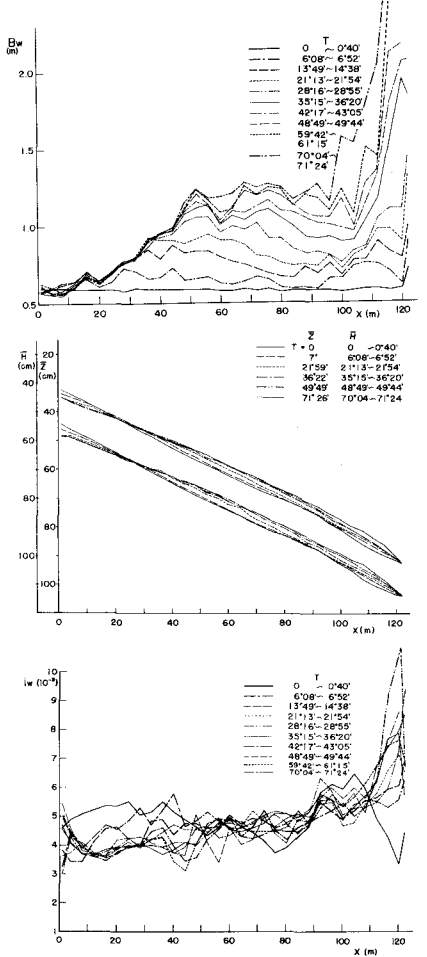


図-1 流路幅、河床高、水面こう配の変化 (Exp. III)

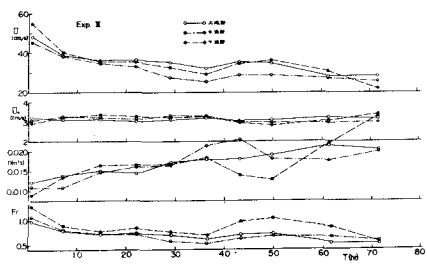
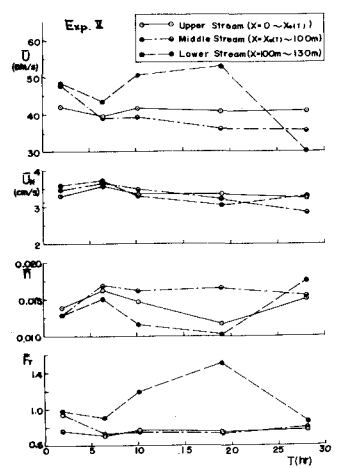


図-2 平均流速、摩擦速度、粗度係数、Froude数の変化

路の変動を予測することは難しいと考えられる。

図-3は最終時刻における流下方向各点の流路幅と平均水深および水面こう配の関係を示したものである。中流、下流部では $\partial h/\partial B_w < 0$ ,  $\partial \bar{h}/\partial B_w > 0$ の傾向にあるが、上流部の一部は $\partial h/\partial B_w > 0$ ,  $\partial \bar{h}/\partial B_w < 0$ となる。この範囲は後述するようにほぼ一様な粗粒化現象の生じている静的平衡範囲であり、沖積河道の至極式でもこうした関係が認められている。なお、粒径および粗度係数を一定とした等流の静的平衡式ではこの関係を説明できないが、さらに断面形状および河床状態の影響について検討する必要がある。

3-2 側岸侵食と河床変動の関係：流路の幅増現象と河床変動との関連性を検討するために、幅増速度 $\Delta B/\Delta T$ と河床上昇速度 $\Delta Z/\Delta T$ の変化をExp. IIについて示すと図-4のようである。各時間段階において $\Delta B/\Delta T = 0$ と $\Delta Z/\Delta T = 0$ となる位置はほぼ一致しており、 $\Delta B/\Delta T = 0$ にわたるうちに $\Delta Z/\Delta T < 0$ から $\Delta Z/\Delta T = 0$ に移行する。すなわち、側岸侵食の大きい流路は河床変動・動的平衡状態はほとんど現れず、幅増が停止して静的平衡状態に近づいていく。特に本実験の場合、表-1の $\bar{U}_{bc}$ と図-2の $\bar{U}_b$ との比較からわかるように $\bar{U}_b$ 以下の河床材料が約10%存在しており、粗粒化現象による静的平衡に達しやすい。図-5はExp. IIの最終時刻における河床砂の粒度分布を示したものである。上流部( $x=4\sim 44m$ )では $d=0.5\sim 2mm$ の範囲の砂が流出して、下流側の河床砂と粒度特性が著しく異なり、異なる。中流、下流部の河床砂および流出土砂( $x=132m$ )の粒度分布はExp. IIでは実験砂のそれと変化していないが、Exp. IIIでは細粒化が一様化する傾向が認められ、砂連の顕著な範囲では標準偏差は1.6~1.8に減少した。

つぎに、各時間段階における側岸侵食量と河床変動量から各測定

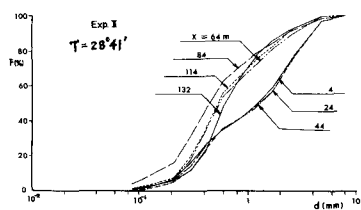


図-5 河床砂の粒度分布

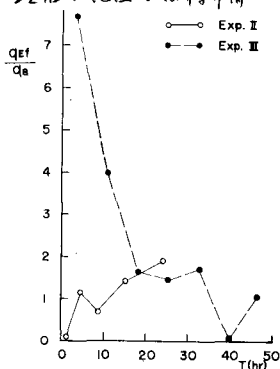


図-7  $q_{ef}$ と $q_b$ との比較

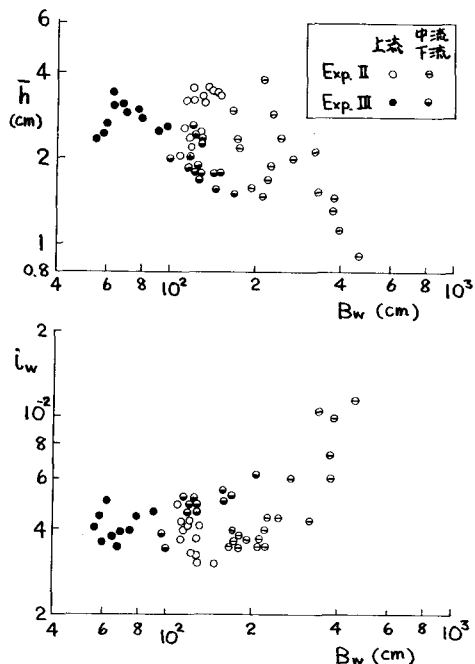


図-3 流路幅と水深および水面こう配の関係

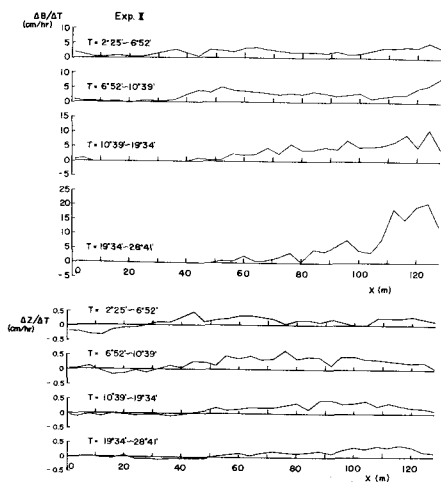


図-4 幅増速度と河床上昇速度の変化

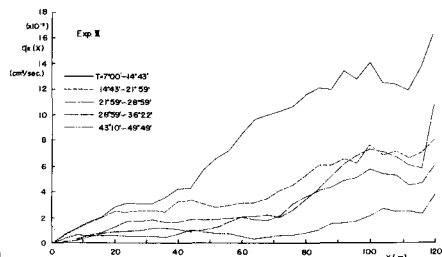


図-6 流出土砂量の累加分布

間の単位中流出土砂量を求め、その流下方向累加量 $g_e(x)$ の変化を示すと図-6のようになる。また、 $g_e(x)$ の下流端の値 $g_{ef}$ と流出土砂量の測定値 $g_b$ とを比較した結果を図-7に示す。 $g_e(x)$ の変化から、流路断面内で土砂収支の平衡している区間は次第に下流へ拡大し、ついで、流出土砂への寄与が下流部に限定されていくのかわかる。Exp. II の場合はその伝播速度が大きくなり、最終時刻は Exp. III と同様に  $x=80\text{m}$  付近まで平衡領域に達した。 $g_{ef}$  は  $4\text{m}$  毎の流路幅と河床高の測定値から求めているので、 $g_b$  との対応はよくなく、流砂量式と導入して土砂の収支を定量的に論ずることは難しい。

3-3 砂礫堆と蛇曲流路の発達：本実験ではいずれの場合も中流、下流部で砂礫堆が発生し、Exp. I-1 では砂礫堆の移動が停止した状態、Exp. I-2, II, III では移動状態で流路の蛇曲が発達した。Exp. II について砂礫堆の波長 $L_b$ と移動速度 $V_b$ の変化を示すと図-8、図-9 のようである。 $L_b$ の増大は $B_w$ の増大にほぼ対応するが、 $L_b/B_w = 4 \sim 8$  である、合流範囲が広い。また、砂礫堆の高さは $1.5 \sim 2.0\text{cm}$  から $4.5 \sim 5\text{cm}$  に発達して一定になり、場所的変化も小さい。このように砂礫堆の形状が一定になり、移動速度が低下した状態に蛇曲流路が発生する。図-10、図-11 は写真測定の結果から砂礫堆の移動と蛇曲の発達の状況を示したものである。砂礫堆の移動速度は蛇曲ピークのそれより速く、蛇曲が断続的に進行する様子がわかる。Exp. I-1 と Exp. III では、砂礫堆の発達は Exp. II のように明確でなく、本実験の範囲では流量条件による砂礫堆および蛇行の波長の相違は認められなかった。

4. 電すび；以上のように本実験の条件では河床上昇が顕著であり、上流部を除いて平衡状態に達しなかった。従来を土れている蛇行実験では河床変動との対応が明確にされていないが、その多くはこうした状態にあると考えられる。このような非平衡の状態では流路形状と初期条件とを一義的に関係づけることは難しく、流下方向の変動特性に注目して検討する必要がある。また、沖積河道との対応を考える場合、河道こう配の遷移状態、流量および流入土砂量の時間的変化、側岸の拘束条件の変化などを考慮する必要がある。今後、こうした諸要素について順次検討するつもりである。最後に、実験および整理に協力して頂いた塩入淑史君、田中修市君に感謝する。

1) 芦田和男、村本嘉雄、奈良井修二、塩入淑史；河道の変動に関する研究(1)、京大防災研究所年報第13号B

