

二次元水域における砂州の発達・変動過程に関する研究(3)

—三角州の発達・変動過程のシミュレーション—

芦田 和男・澤井 健二・謝 正倫

A STUDY ON THE DELTA FORMATION PROCESS IN A LATERALLY WIDE BASIN (3)

—SIMULATION OF THE DEVELOPMENT OF DELTA
WITH/WITHOUT CHANNELS ON ITS PLAIN—

By Kazuo ASHIDA, Kenji SAWAI and C. L. SHIEH

Synopsis

In this paper, the delta formation process in a laterally wide basin was formulated based upon the experimental results described in the previous papers of this series of research, and some numerical simulations were carried out to examine the formulation.

The results obtained are summarized as follows:

The delta formation process is divided into three stages; in the first stage, the delta develops mainly longitudinally; in the second stage, it develops mainly laterally; and in the third stage, it develops in all directions keeping a nearly similar shape in average.

In the first and the second stages, the flow expands on a delta plain without stream channels, which is well analyzed by a two-dimensional flow and bed variation model. In the third stage, however, some stream channels are formed and migrate on the delta plain, which is analyzed by a one-dimensional flow and bed variation model.

1. 緒 言

河口部・湖・貯水池など、広い水域に土砂が流出する場合、しばしば三角州が発達するが、その過程では、土砂の分級堆積、流路網の形成と変動など、きわめて複雑かつ興味ある現象が現れる。これらの現象の特性を明らかにし、的確な予測を行うことは、治水対策あるいは土地利用計画をたてる上で、きわめて重要なことからである。

著者らは、既に、直線水路から長方形水域に定常的な給水と給砂を行っていくつかの実験により、三角州の形成の初期段階では、流れは噴流の様相を呈し、砂州は横断方向にあまり広がらずに流下方向に延びていくが、やがて砂州長が大きくなると、砂州の前縁が盛り上がりその前進が停止し、横断方向への拡大が顕著になることや、さらに砂州が発達すると、やがて砂州上に流路が形成されて、激しく変動しながら、平均的にはほぼ相似形を保って砂州が拡大していくことなどを見出している^{1)~3)}。

本論は、そのような三角州の発達・変動過程を水理学的に予測する方法について検討したものである。

2. 三角州の発達・変動過程の特徴と段階区分

前述のように、三角州の発達過程の初期段階では、流れは噴流の様相を呈し、砂州は横断方向にあまり広がらずに流下方向に延びていく。この過程を Stage 1 と呼ぶことにする。Stage 1 において、砂州が前進するに伴って、その深さが増すため、前進速度は漸減し、やがて、砂州の前縁が盛り上がり土砂流送能力が低下し、その前進が停止する。

このように、幅があまり広がらずに砂州が前進していく過程は、幅が一定の一次元貯水池における堆砂現象と似ているが、一次元貯水池では単位幅流量が流下方向に一定であるのに対し、二次元水域の堆砂過程では砂州上の単位幅流量が流下方向に変化していく点が大きく異なっている。幅が流下方向に拡大する二次元貯水池でも、その拡幅が緩やかな場合には、単位幅流量が流下方向に減少はしていくものの、現象は横断方向にほぼ一様であるが、河口部のように急拡部を有し、しかも側方の拘束の弱い場では、諸量が横断方向に変化するとともに、その横断方向成分が無視できなくなる。Stage 1 において、砂州の前進速度が漸減するだけでなく、やがて停止に至るのは、流れの横断方向成分の影響によるものと考えられる。

砂州の前進が停止すると、砂州の上流部分での河床上昇が進行するとともに、横断方向への流砂量が増大し、砂州の横断方向への拡大が顕著となる。この過程を Stage 2 と呼ぶことにする。この段階では、砂州上に明確な流路は形成されておらず、表面形状はなだらかで、流れや流砂の分布も連続的であり、沿岸流がない場合には、現象は両側にほぼ対称に進行する。砂州が横断方向に拡大する場合には、流下方向に拡大する場合ほどには深さが増加しないが、やがて河床が上昇するとともに、砂州周縁部における土砂流送能力が低下し、その拡大速度が低下する。この段階での砂州上の流れは、水深がきわめて小さく、膜状に広がっているのが特徴的である。

さらに堆積が進行すると、この膜状の流れは存続できなくなり、砂州上のある方向に流路が形成されるようになる。一旦流路が形成されると、流れはますますそこに集中し、河床が洗掘されるとともに、流路の先端が前進する。このように、砂州上に流路が形成された段階を、Stage 3 と呼ぶことにする。

流路が形成されると、砂州形状は平面的にもなだらかでなくなり、また、流路の形成される方向が必ずしも上流の直線水路の延長方向でないため、沿岸流がない場合でも左右非対称となる。流路の形成され始める位置や方向は様々であるが、砂州の比較的上流部からはほぼ直角方向に流路が形成されることも少なくない。そのような場合には、上流水路からの遷移部において、強い弯曲流のために、2次流が発生し、外岸側の侵食と内岸側の堆積が生じるとともに、下流へ行くにしたがってその速度が大きくなり、流路が直線化していくことがしばしば見られた。

いずれにせよ、流路方向に砂州が拡大するにつれて、やがて河床は上昇し、土砂流送能力が低下して流れを維持できなくなってしまう。すると、また別のところに流路が形成されて、同様の過程を繰り返すようになるが、新しい流路は、比較的砂州の発達の遅れている部分に形成され易い傾向がある。

その結果、Stage 3 の各時点における砂州の発達は、その時に存在する流路部分に限定されるが、長い時間スケールで見ると、すべての方向にほぼ相似形を保って拡大することになる。

以上の過程を、砂州の長さ L_x と幅 L_y の比に着目して整理すると、Fig. 1 のように特徴づけられる。すなわち、Stage 1 では、 L_y が変化せずに L_x が増加する結果、 L_x/L_y が増加し、Stage 2 では L_x が変化せずに L_y が増加する結果、 L_x/L_y が減少し、Stage 3 では間欠的にはあるが、平均的には L_x と L_y とがほぼ同様に増加する結果、 L_x/L_y が 1 に近い一定値をとるようになる。

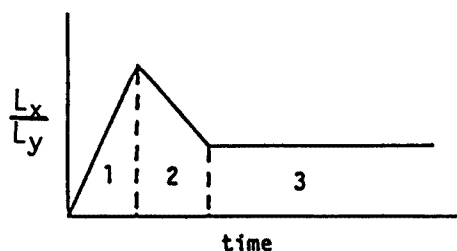


Fig. 1. Variation of the ratio of the width and the length of delta.

なお、以上は、著者らの行った定常的な給水と給砂条件下での実験に基づいて、その特徴を述べたものであるが、条件が非定常に変化する実際河川においても、大局的にはこれに類似の現象が生じているものと考えられる。

Fig. 2 は、野洲川放水路河口付近における 1980 年～1985 年の堆積形態⁴⁾を示したものである。この放水路は、1971 年～1978 年に掘削されたもので、現在のところ、ほぼ河道幅で砂州が前進しており、Stage 1 にあるものと判断される。しかしながら、既に低水時には砂州面が水面上に現れるまでになっており、近い将来、Stage 2 に移行するのではないかとと思われる。

Fig. 3 は、黄河デルタ地域における、流路の変遷⁵⁾を示したものである。過去 100 年間に黄河河口付近の海岸線は約 100 km の区間の平均で約 20 km 前進しているが、その間に 10 回以上、新しい流路が形成されている。これは、三角州の発達の Stage 3 に相当する。ただし、前述の実験が、上流からの定常的な給水

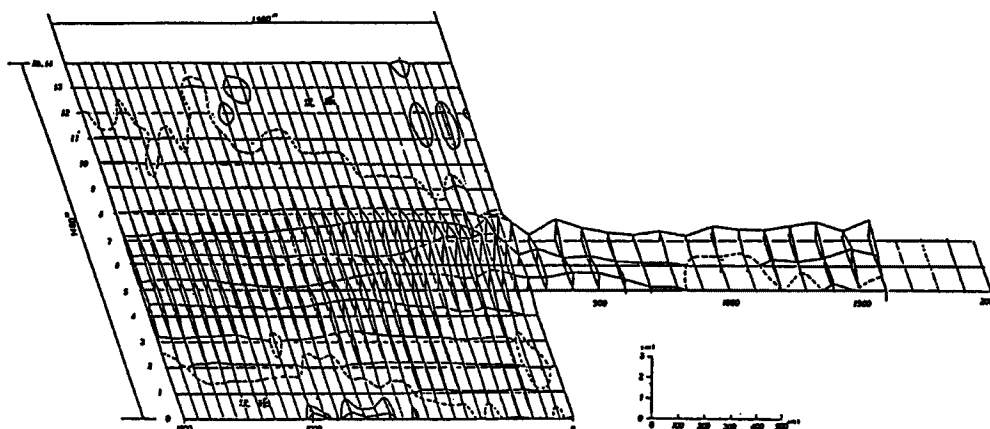


Fig. 2. Sedimentation at the mouth of River Yasu⁴⁾.

と給砂のもとで行われているのに対し、実河川の現象は非定常で、流路の変遷は主として大洪水時に生じているものと思われる。

このように、三角州の発達過程は、砂州の拡大方向や流路の有無によって、大きく 3 つの段階に分けられるが、流路の発生前と発生後では、現象の性質が異なり、これを同一の手法で解析することは、困難である。そこで、以下では、流路発生前の過程と発生後の過程を区別して、それぞれに適した解析法を用いたシミュレーションを行うことにする。

3. 流路発生以前の過程のシミュレーション

3.1 解析方法

前述のように、流路発生以前の過程では、流れは砂州面上に広く拡がり、流下方向ならびに横断方向に水量が連続的に分布するとともに、その分布形が時間とともに変化する。このような状況における砂州の発達過程を解析するには、流れおよび流砂の挙動を少なくとも二次元的に取り扱う必要があり、二次元浅水流モデルを用いた河床変動解析法を適用することにした。

(1) 支配方程式

深さ方向に平均化した流れの運動方程式および連続式を、Fig. 4 に示す座標系を用いて、次のように表す。

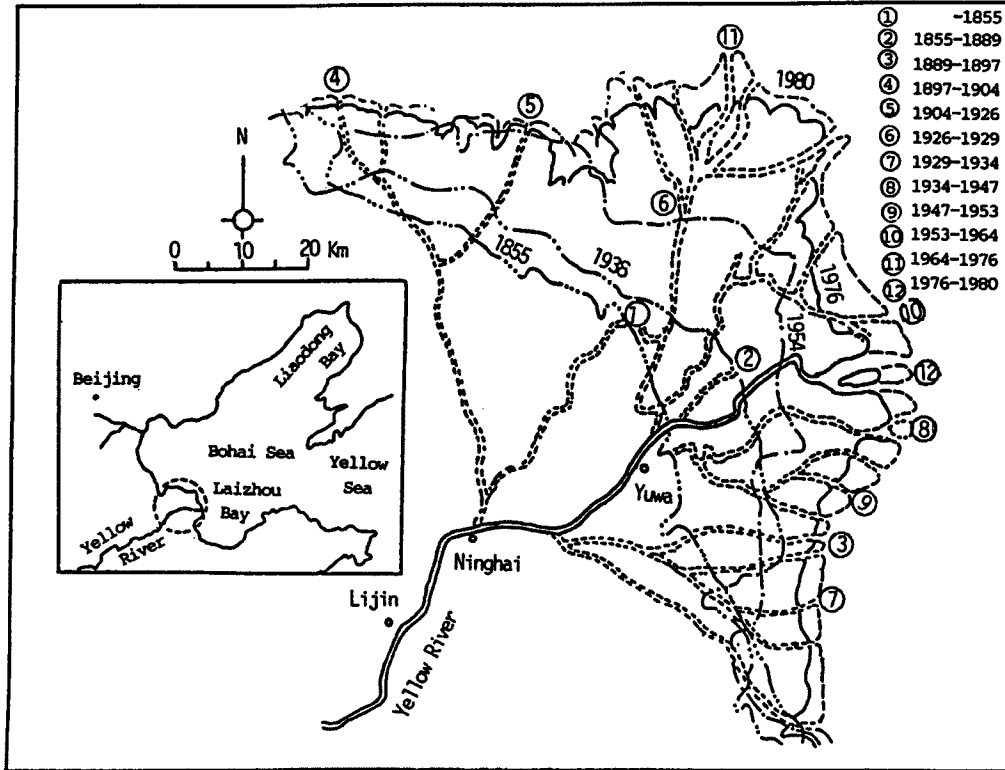


Fig. 3. The progress and stream migration of Yellow River Delta⁵⁾.

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -g \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{\tau_{bx}}{\rho h} + 2 \frac{\partial}{\partial x} \left(\epsilon \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\epsilon \frac{\partial u}{\partial y} \right) \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -g \frac{\partial H}{\partial y} - \frac{\tau_{by}}{\rho h} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\epsilon \frac{\partial v}{\partial x} \right) + 2 \frac{\partial}{\partial y} \left(\epsilon \frac{\partial v}{\partial y} \right) \dots\dots\dots (2)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial uh}{\partial x} + \frac{\partial vh}{\partial y} = 0 \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 u および v は流速の x および y 方向成分、 h は水深、 H は水位、 g は重力加速度、 ρ は水の密度、 ϵ は渦動粘性係数、 τ_{bx} および τ_{by} は底面せん断力 τ_b の x および y 方向成分で、 ϵ と τ_b は対数則を仮定して次式で与えられる。

$$\tau_{bx} = \frac{f}{8} \rho u \sqrt{u^2 + v^2} \dots\dots\dots (4)$$

$$\tau_{by} = \frac{f}{8} \rho v \sqrt{u^2 + v^2} \dots\dots\dots (5)$$

$$f = \frac{8}{\left(A_r + \frac{1}{\kappa} \ln \frac{h}{k_s} \right)^2} \dots\dots\dots (6)$$

$$\epsilon = \frac{\kappa}{6} u_* h \dots\dots\dots (7)$$

ここに、 f は摩擦損失係数、 k_s は相当粗度、 A_r ($= 6.0$) および κ ($= 0.4$) は定数である。

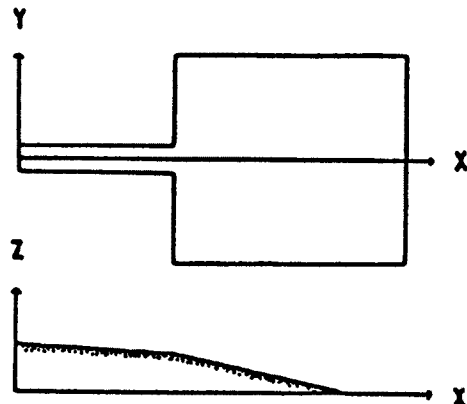


Fig. 4. Definition sketch of the coordinate system.

次に、流砂量であるが、流れ方向成分に芦田・道上⁶⁾の式、その直交成分に長谷川⁷⁾の式を適用すれば、

$$\frac{q_{Bs}}{\sqrt{sgd^3}} = 17 \tau_{*e}^{3/2} \left(1 - \frac{\tau_{*c}}{\tau_*}\right) \left(1 - \frac{u_{*c}}{u_*}\right) \dots\dots\dots (8)$$

$$\frac{q_{Bn}}{q_{Bs}} = -\sqrt{\frac{\tau_{*c}}{\mu_s \mu_k \tau_*}} \frac{\partial z}{\partial n} \dots\dots\dots (9)$$

$$\tau_* = u_*^2 / (sgd) \dots\dots\dots (10)$$

$$\tau_{*e} = u_{*e}^2 / (sgd) \dots\dots\dots (11)$$

$$\tau_{*c} = u_{*c}^2 / (sgd) \dots\dots\dots (12)$$

$$\frac{u}{u_{*e}} = 6.0 + 5.75 \log_{10} \frac{h}{d(1+2\tau_*)} \dots\dots\dots (13)$$

と表される。ここに、 q_{Bs} および q_{Bn} はそれぞれ流れ方向およびそれに直角方向の単位幅流砂量、 z は河床高、 n は流れに直角方向の座標、 μ_s は静止摩擦係数、 μ_k は動摩擦係数、 s は砂の水中比重、 d は粒径、 u_* は摩擦速度で、添字 e および c はそれぞれ流砂に対する有効成分および移動限界を表す。なお、移動限界には、底面の傾きの影響を考慮する。

また、河床高の変化速度は次式で表される。

$$\frac{\partial z}{\partial t} + \frac{1}{1-\lambda} \left(\frac{\partial q_{Bx}}{\partial x} + \frac{\partial q_{By}}{\partial y} \right) = 0 \dots\dots\dots (14)$$

$$q_{Bx} = q_{Bs} \cos \alpha - q_{Bn} \sin \alpha \dots\dots\dots (15)$$

$$q_{By} = q_{Bs} \sin \alpha + q_{Bn} \cos \alpha \dots\dots\dots (16)$$

$$\tan \alpha = \frac{v}{u} \dots\dots\dots (17)$$

ここに、 q_{Bx} および q_{By} はそれぞれ x および y 方向の単位幅流砂量、 λ は河床の空隙率、 α は流向と x 軸とのなす角である。

境界条件としては、水路上流端における一様な給水と給砂ならびに下流端における一定高の堰を想定し、堰の各位置における単位幅越流量と越流深との間に、全幅刃形堰の場合と同じ関係式を適用する。それ以外の境界においては、水および土砂の出入がないものとし、境界に垂直方向のそれらの成分を0とおく。

(2) 方程式の差分化

上述の方程式系を解くのに、差分法を用いるが、差分スキームは、清水・板倉⁸⁾および高橋・中川⁹⁾によるものを参考にした Leap Frog 法を用いる。ただし、 i は x 方向、 j は y 方向、 n は時間に対する格子を表し、各変数の計算点と格子点の関係は、Fig. 5 に示すとおりである。

まず、式(1)の各微分項は次のように差分化される。

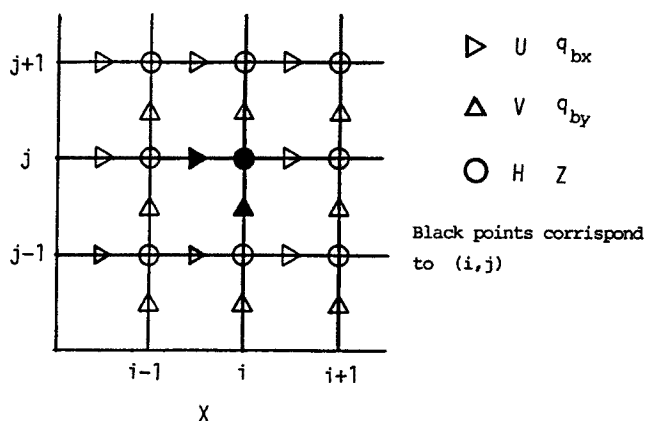


Fig. 5. Arrangement of computational grids.

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{u_{i,j}^{n+1} - u_{i,j}^{n-1}}{2\Delta t} \dots\dots\dots (18)$$

$$u \frac{\partial u}{\partial x} = \begin{cases} u_{i,j}^{n-1} \frac{u_{i,j}^{n-1} - u_{i-1,j}^{n-1}}{\Delta x} & (\text{for } u_{i,j}^{n-1} \geq 0) \dots\dots\dots (19) \\ u_{i,j}^{n-1} \frac{u_{i+1,j}^{n-1} - u_{i,j}^{n-1}}{\Delta x} & (\text{for } u_{i,j}^{n-1} < 0) \dots\dots\dots (20) \end{cases}$$

$$v \frac{\partial u}{\partial y} = \begin{cases} \bar{v}_{i,j}^{n-1} \frac{u_{i,j}^{n-1} - u_{i,j-1}^{n-1}}{\Delta y} & (\text{for } \bar{v}_{i,j}^{n-1} \geq 0) \dots\dots\dots (21) \\ \bar{v}_{i,j}^{n-1} \frac{u_{i,j+1}^{n-1} - u_{i,j}^{n-1}}{\Delta y} & (\text{for } \bar{v}_{i,j}^{n-1} < 0) \dots\dots\dots (22) \end{cases}$$

$$\bar{v}_{i,j}^{n-1} = \frac{v_{i,j}^{n-1} + v_{i-1,j}^{n-1} + v_{i,j+1}^{n-1} + v_{i-1,j+1}^{n-1}}{4} \dots\dots\dots (23)$$

$$\frac{\partial H}{\partial x} = \frac{H_{i,j}^n - H_{i-1,j}^n}{\Delta x} \dots\dots\dots (24)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon \frac{\partial u}{\partial x} \right) = \frac{1}{\Delta x} \left(\varepsilon_{i,j} \frac{u_{i+1,j}^{n-1} - u_{i,j}^{n-1}}{\Delta x} - \varepsilon_{i-1,j} \frac{u_{i,j}^{n-1} - u_{i-1,j}^{n-1}}{\Delta x} \right) \dots\dots\dots (25)$$

$$\frac{\partial}{\partial y} \left(\varepsilon \frac{\partial u}{\partial y} \right) = \frac{1}{\Delta y} \left(\bar{\varepsilon}_{i,j+1} \frac{u_{i,j+1}^{n-1} - u_{i,j}^{n-1}}{\Delta x} - \bar{\varepsilon}_{i,j} \frac{u_{i,j}^{n-1} - u_{i,j-1}^{n-1}}{\Delta x} \right) \dots\dots\dots (26)$$

$$\bar{\varepsilon}_{i,j} = \frac{\varepsilon_{i,j} + \varepsilon_{i,j-1} + \varepsilon_{i-1,j} + \varepsilon_{i-1,j-1}}{4} \dots\dots\dots (27)$$

式(2)の各項の差分は、式(1)の場合と対称であり、式(18)～式(27)における x と y 、 u と v をそれぞれ交換し、 i の変化と j の変化を交換する。

式(3)の各項は次のように差分される。

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{h_{i,j}^{n+2} - h_{i,j}^n}{2\Delta t} \dots\dots\dots (28)$$

$$\frac{\partial (uh)}{\partial x} = \frac{u_{i+1,j}^{n+1} h_{i+1,j}^n - u_{i,j}^{n+1} h_{i,j}^n}{\Delta x} \dots\dots\dots (29)$$

$$\frac{\partial (vh)}{\partial x} = \frac{v_{i,j+1}^{n+1} h_{i,j+1}^n - v_{i,j}^{n+1} h_{i,j}^n}{\Delta y} \dots\dots\dots (30)$$

式(14)の各項も、同様に差分される。

計算手順は、Fig. 6に示すとおりであるが、水深がある限界値よりも小さなメッシュからは水が流れ出ないように、流速算定のステップに補正を加えた。

3.2 モデルの適用ならびに実験結果との比較

(1) 実験ならびに計算条件

三角州の発達過程に関する上記のモデルを検証するために、幅10 cm、長さ1.5 mの直線水路部と、幅1 m、長さ1.5 mの長方形水槽部とを接続した装置を用い、次のような実験を行った。水路部と水槽部には、それぞれ、縦断方向に勾配1/140と1/100で、横断方向には水平に砂をしきならし、水路部上流

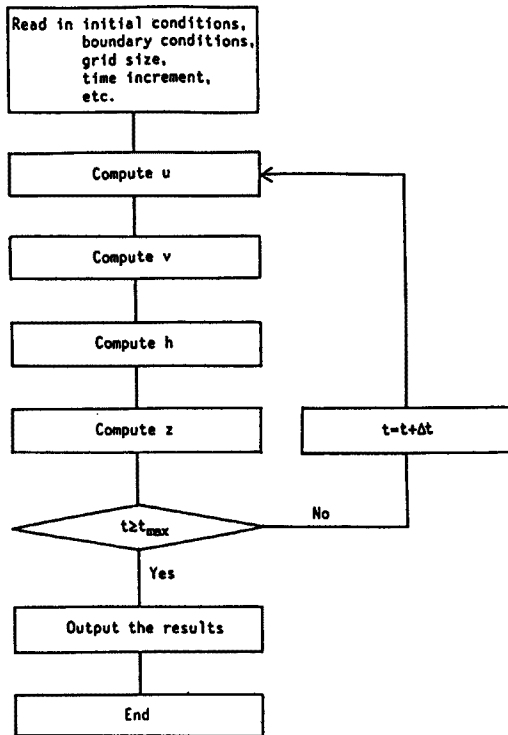


Fig. 6. Flow chart of the two dimensional flow analysis.

端から流量 0.4 l/s の給水と、 0.44 g/s の給砂を行った。実験砂の平均粒径は 1 mm で、ほぼ均一である。水槽部の下流端は高さ 2.6 cm の全幅堰となっており、河口部での初期水深が水路部での等流水深にほぼ等しくなるよう、堰高をセットした。給砂量は、水路部における河床勾配の変化がなるべく小さくなるように選んでいる。実験は、4つのCaseから成っており、Case 4-1では通水前、Case 4-2では70分、Case 4-3では180分、Case 4-4では285分後に河床をモルタルで固定し、給砂を止めて、流速分布を詳細に計測した。Case 4-2, Case 4-3, Case 4-4の河床固定時は、それぞれ三角州の発達段階のStage 1, Stage 2, Stage 3に対応している。流速測定には、ビデオ解析によるトレーサー追跡と、プロペラ流速計による方法を併用したが、ビデオ解析では、パーソナルコンピュータを用いて、精度と能率の向上を図った¹⁰⁾。

計算条件は5種類設定しているが、Cal. 1~Cal. 4はCase 4-1~Case 4-4の流速測定時の流れを求めるものであり、それぞれのCaseの実測の河床形状を与え、それが変化しないものとして、定常解が得られるまで式(1)~(3)を繰り返して計算した。Cal. 5は、

平坦床からの三角州の発達過程を計算したものである。

Table 1は、実験ならびに計算条件を要約したものである。

(2) 三角州の各発達段階における流速分布

Fig. 7は、各実験Caseにおける河床形状の等高線を示したものである。Case 4-1には砂州が存在せず、河床はほぼ平坦である。Case 4-2はStage 1にあり、細長い砂州が形成されている。Case 4-3はStage 2にあり、砂州が側方に広がるとともに、中央部が高く盛り上がって、その上流には逆勾配の領域が形成されている。Case 4-4では、砂州上に弯曲流路が形成されており、既にStage 3に達している。

Fig. 8およびFig. 9は、紙片トレーサーのビデオ映像から、水槽部の水面における流跡線および流速ベクトルを描いたもので、次のような特徴が読み取れる。すなわち、砂州が形成される前のCase 4-1で

Table 1. Experimental and computational conditions

Case	B_1 (cm)	B_2 (cm)	L_1 (cm)	L_2 (cm)	I_1	I_2	Q_w (cm^3/s)	Q_b (g/s)	W (cm)	Fr	Δx (cm)	Δy (cm)	Δt (sec)
4-1	10	100	150	150	0.005	0.01	400	0.00	2.6	0.45	5.0	2.5	0.01
4-2	10	100	150	150	0.007	0.01	400	0.40	2.9	0.73	5.0	2.5	0.01
4-3	10	100	150	150	0.007	0.01	400	0.44	2.9	0.75	5.0	2.5	0.01
4-4	10	100	150	150	0.007	0.01	400	0.41	2.9	0.69	5.0	2.5	0.01

B_1 : Width of channel
 L_1 : Length of channel
 I_1 : Initial bed slope of channel
 Q_b : Sediment feeding rate
 Q_w : Water discharge
 Δx : Pitch of computational grids in x direction
 Δt : Time increment in computational procedures
 B_2 : Width of basin
 L_2 : Length of basin
 I_2 : Initial bed slope of basin
 W : Height of weir
 Fr : Froude number at channel mouth
 Δy : Pitch of computational grids in y direction

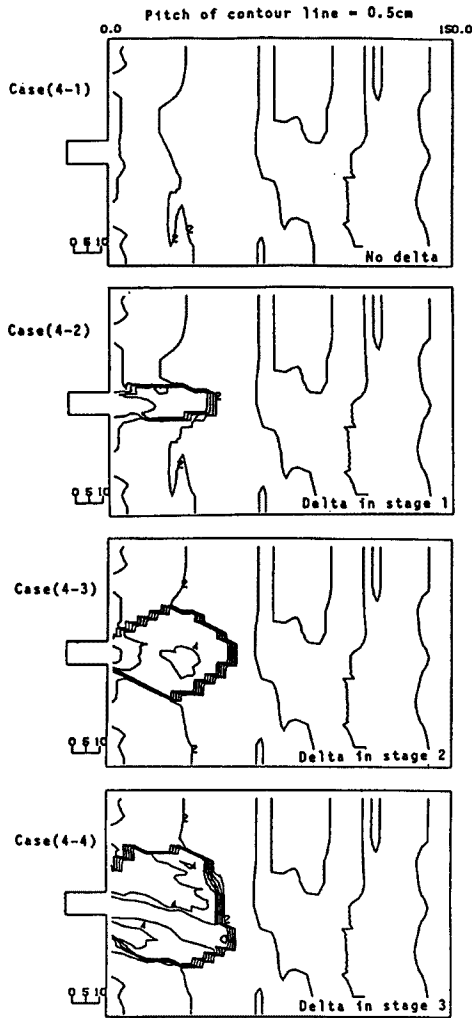


Fig. 7. Bottom configuration (measured).

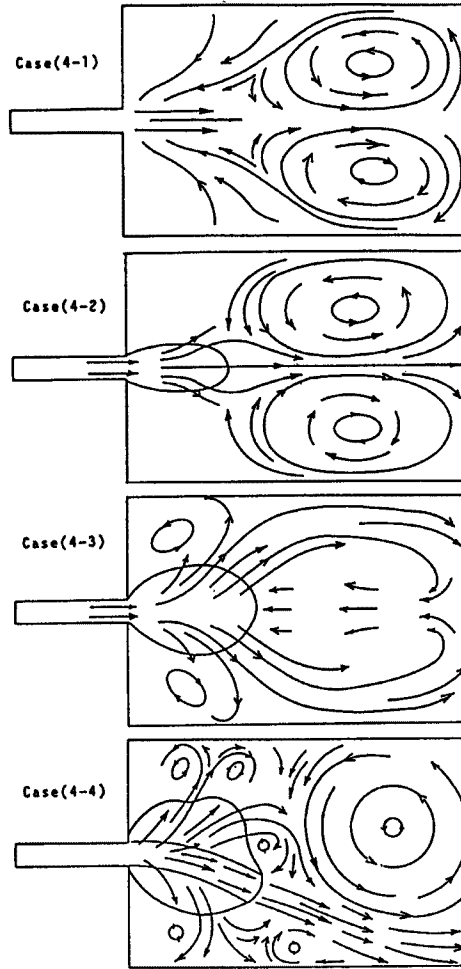


Fig. 8. Surface flow pattern (measured).

は、河口部を出た流れは、ほぼ一定の幅でかなりの距離を流下した後、水槽の下流端で両側に分かれ、側壁に沿って逆流する一対の大きな循環流を形成している。また、その手前の河口部両側には、かなり大きな死水域が形成されている。Stage 1の Case 4-2では、砂州の前縁付近で側方に広がった流れが、前縁通過後に中心線に向かって収束しているのが特徴的である。また、この段階では、前述の大きな循環流も存続している。Stage 2の Case 4-3になると、側方への流れがますます顕著になるとともに、砂州上で両側に2分され、水槽の側壁に沿って流下して、下流端から中心線に沿って逆流する1対の大きな循環流が形成されている。砂州前縁手前の中心線上では、水深と流速が共に極めて小さい。砂州上に流路が形成された Stage 3の Case 4-4では、流れが流路に集中するとともに、いくつもの小さな循環流が形成されている。また、流路位置や砂州形状そのものが非対称であるために、下流の大きな循環流のうち片方が発達し、他方は消滅している。

Fig. 10は、二次元浅水方程式より求めた、深さ方向に平均した流速ベクトル図であるが、Fig. 9とよく似通っている。

Fig. 11は、Case 4-4における流路内の流速を直径3mmのプロペラ流速計で測定し、深さ方向に平均化した流速ベクトルの分布を求めたものである。この図から、原点付近の横断面では、最大流速点が中央

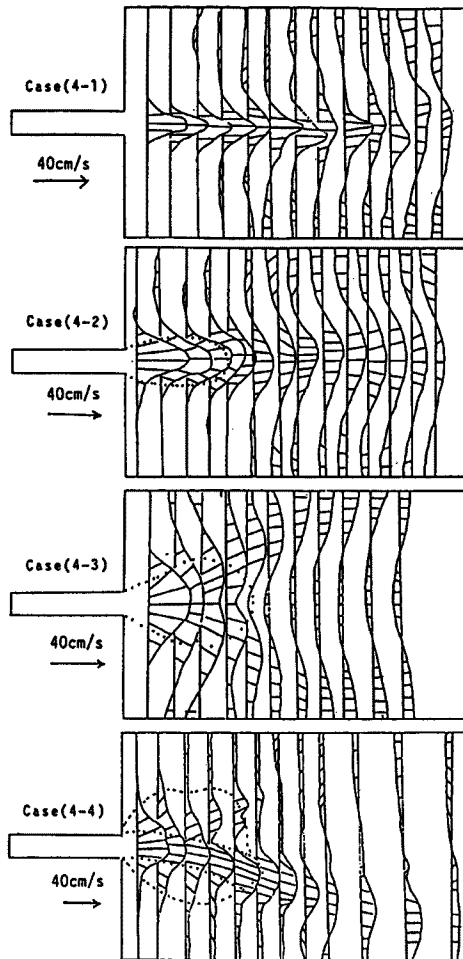


Fig. 9. Distribution of surface flow velocity (measured).

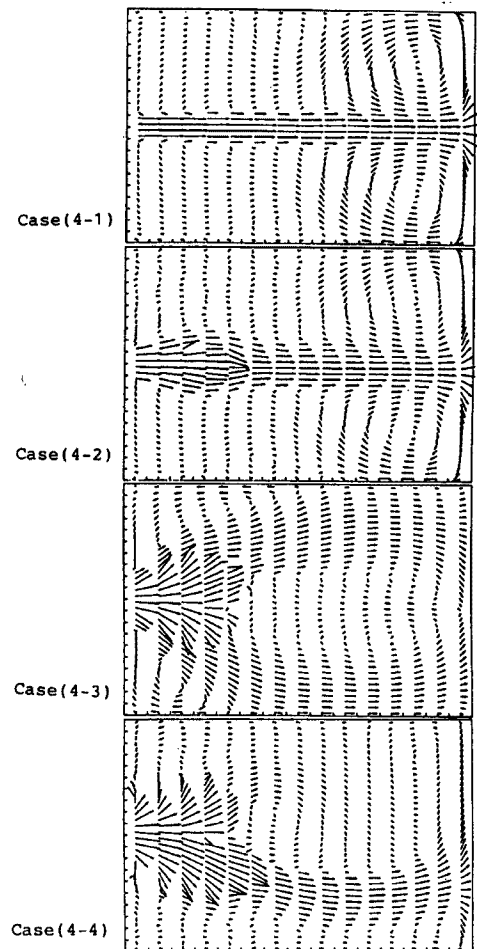


Fig. 10. Distribution of surface flow velocity (simulated).

もしくはやや内岸寄りであるが、下流へ行くにしたがって、外岸側へ移行し、外岸に沿う流速を増大させるとともに、内岸側の流速を減少させている。このことは、これまでのいくつかの実験において出現した、流路の直線化現象の原因のひとつになっているものと考えられる。流路変動機構には、さらに、底面付近の流況が大きくかかわっているものと考えられるが、本計測では、それを明らかにすることはできなかった。

Fig. 12 は、水槽部の中心線に沿う、深さ方向に平均化した x 方向流速分布を示したものである。砂州が形成される前の Case 4-1 では、中心線上の流速は下流へ行くにしたがって徐々に減少し、堰の近傍で急速に低下する。Stage 1 の Case 4-2 では、砂州面上において、かなり急速に流速が低減するが、さらに砂州前縁通過時に流速が激減し、その後、やや回復してから徐々に減衰していく。

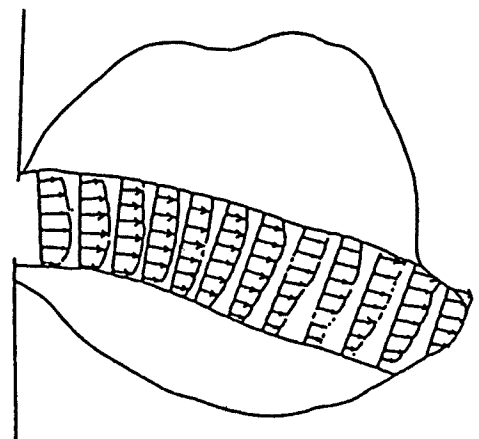


Fig. 11. Depth-mean velocity in the stream channel.

Stage 2 の Case 4-3 では、砂州幅が広い為、砂州面上での中心線に沿う流速の減少がさらに激しく、砂州前縁付近ではほとんど0になっている。Stage 3 の Case 4-4 では、水槽の中心線に沿う砂州面上では、水深が浅くて、プロペラ流速計を用いて流速を測定することができなかった。

Fig. 13 は、Case 4-4 における、流路の最深線に沿う、深さ方向に平均化した流速分布を示したものである。

これらの図からわかるように、河床形状が既知の場合には、二次元浅水流モデルによって計算される流速分布の定常解は、三角州の発達過程のすべての段階に対して、実験値とよく対応する。

(3) 平坦床からの三角州の発達過程

Fig. 14 は、Case 4-3 の実験に対応する条件下で、二次元浅水流モデルに基づいて、平坦床から三角州が発達する過程を計算したものである。初期段階においては幅があまり広がらずに砂州が前進するが、やがて砂州前縁付近が上昇して前進が停止して側方への拡大が進行し、さらに砂州面の中央付近が上昇して側方への拡大も緩慢になっていくという、Stage 2 の後半までの現象がよく再現されている。しかしながら、さらに時間が経過すると、計算に異常を来し、流路の発生までを再現することはできなかった。

Fig. 15 は、計算された流速ベクトルを示したものである。三角州の形成の初期段階では、流れがあまり広がらずに下流端にまで達したあと、両側に分かれ、側壁に沿って逆流する渦を形成するのに対し、砂州が発達するにしたがって、砂州の下流の中心線に沿って逆流が見られるようになるが、これらは前述の実験結果とよく対応している。

Fig. 16 は、計算された流砂量ベクトルを示したものである。実験からはこのような詳細な流砂量ベクトルを求めることはきわめて困難であるが、数値解析ではそれが比較的容易に求められ、現象を解明していく上での有力な手がかりを与えるものと考えられる。

Fig. 17 は、上流水路部を含んだ、水路中心線上の流砂量分布を示したものである。水路部と水槽部とでは流砂量の減少割合は急変するが、それぞれの部分において、流砂量は距離とともにほぼ直線的に減少しており、かつ、水路部においてはその減少割合が時間とともに緩和されるのに対し、水槽部ではむしろ増大しているのが注目される。

Fig. 18 は、水路中心線に沿う、底面および水面の縦断形状を示したもので、Fig. 19 は、いくつかの測線における横断形状を示したものである。計算値は実験値にくらべて、砂州の発達がやや遅れている。

Fig. 20 は、砂州長と砂州幅の比の時間変化を示したものであり、計算値は実験値よりもやや小さくなっているが、その変化のパターンはよく対応している。

4. 流路発生後の過程のシミュレーション

4.1 解析方法

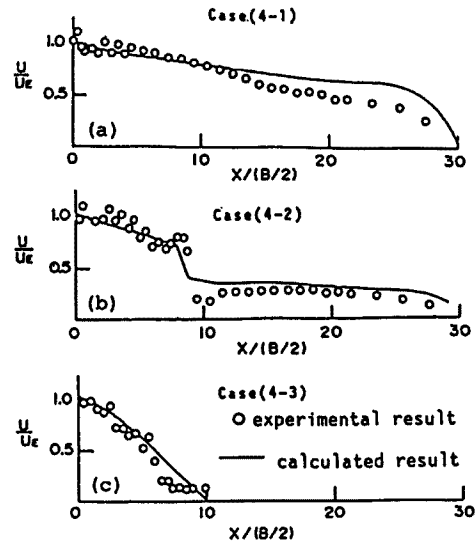


Fig. 12. Variation of the depth-mean velocity along the center line of delta area.

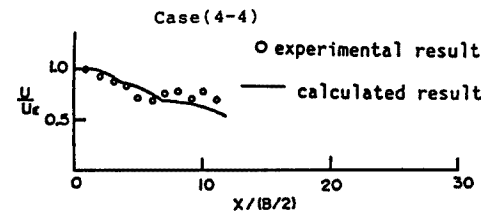


Fig. 13. Variation of the depth-mean velocity along the thalweg of stream channel.

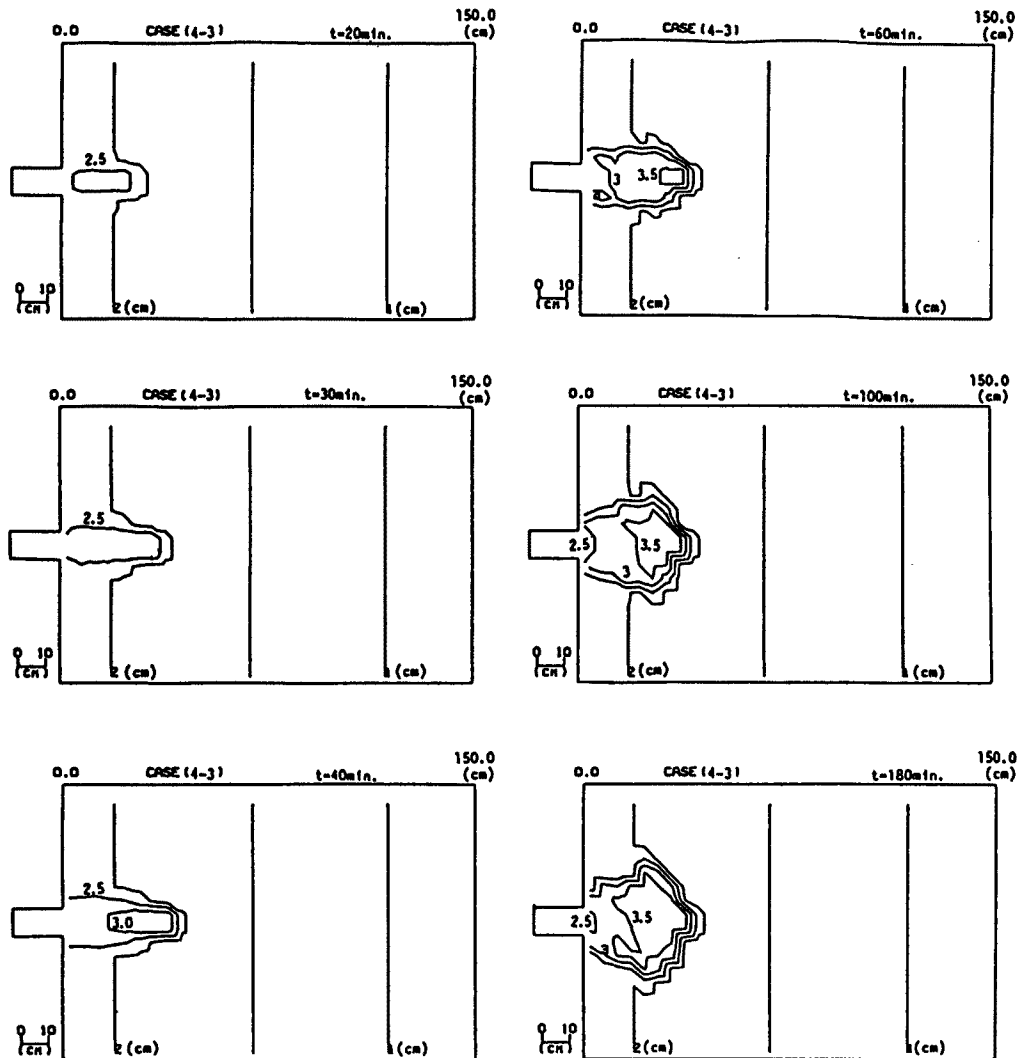


Fig. 14. Bottom configuration (simulated).

前章に述べたように、二次元浅水流モデルによる解析では、流路が形成される以前の三角州の発達過程を解析することはできたが、流路の発生以後の過程を解析することはできなかった。これは、流路の形成や変動には、流れの3次元性が深くかかわっており、さらに、河岸侵食が重要な役割を演ずるにもかかわらず、解析モデルにそれが含まれていないからであると考えられる。しかしながら、現在の段階でそれらを含めた解析モデルを組み立て、実際に解くことは、きわめて困難である。そこで、本章では、砂州面上に既に流路が形成され、その平面位置に関する情報がある程度与えられた場合の、砂州の発達および変動に関する解析法について考察することにする。

流路の存在を認識して、その変動を解析しようとする場合、その流路幅と流量を把握することは基本的な課題である。流路が分岐あるいは溢流していれば、その流量配分が問題となるが、ここでは、とりあえず、全流量が主流路に等配分されるものとしておく。三角州上に形成されるような、いわゆる自己形成流路においては、流路幅が水理条件に応じて調節され、ある種の平衡を保つものと考えられる。著者らは、先の報告^{1),2)}において、池田・Parkerら¹¹⁾による礫床一様直線流路の動的安定幅の理論式と、従来から平衡流路幅の経験式としてよく用いられているレジーム式とを検討し、理論の前提条件に近い条件下では前

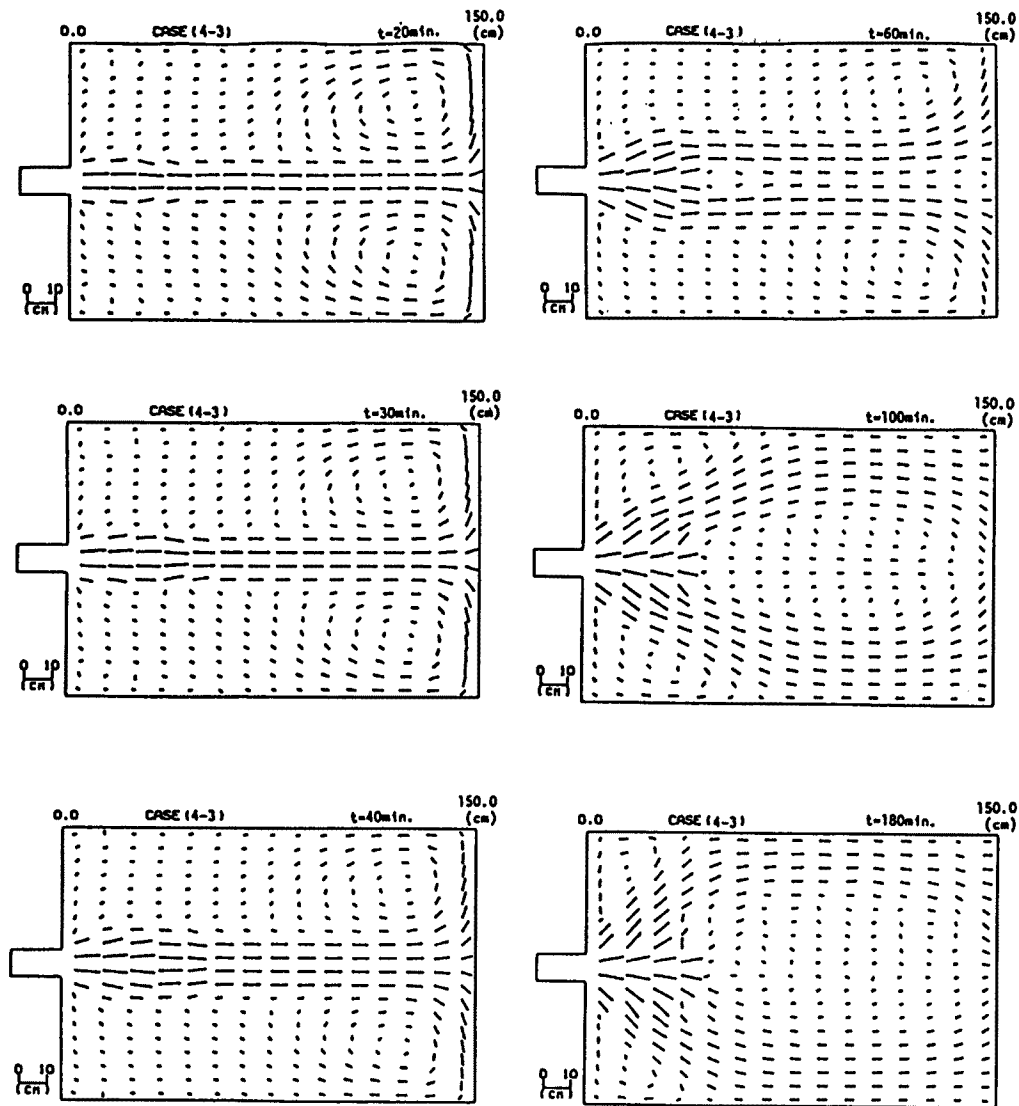


Fig. 15. Velocity distribution (simulated).

者の方が精度がよいが、より広範な条件を含めると後者の方が精度がよいことを見出している。したがって、ここでは、流路幅の推定式として、次のレジーム式を用いることにする。

$$B_r = 5\sqrt{Q} \quad (\text{ただし, m-sec系}) \dots\dots\dots (31)$$

ここに、 B_r はレジーム幅、 Q は流量である。

流路内の河床変動については、前章の二次元解析を適用することも可能であるが、ここでは、流路内の横断分布を求めることが主眼ではないので、より取り扱いの容易な一次元解析法の適用を試みることにする。流路が水平方向に変動しない場合、断面平均河床高の時間変化は次のように表される。

$$\frac{\partial z}{\partial t} + \frac{1}{(1-\lambda)B} \frac{\partial Q_B}{\partial x} = 0 \dots\dots\dots (32)$$

ここに、 z は断面平均河床高、 B は流路幅、 Q_B は流砂量である。 Q_B は各点の単位幅流砂量を横断方向に積分して求めるのが望ましいが、ここでは、簡単のため、断面平均の水理量から断面平均単位幅流砂量を求めることにする。断面平均水理量の算定には、流れの運動方程式と連続式とを用いるが、非定常項は省

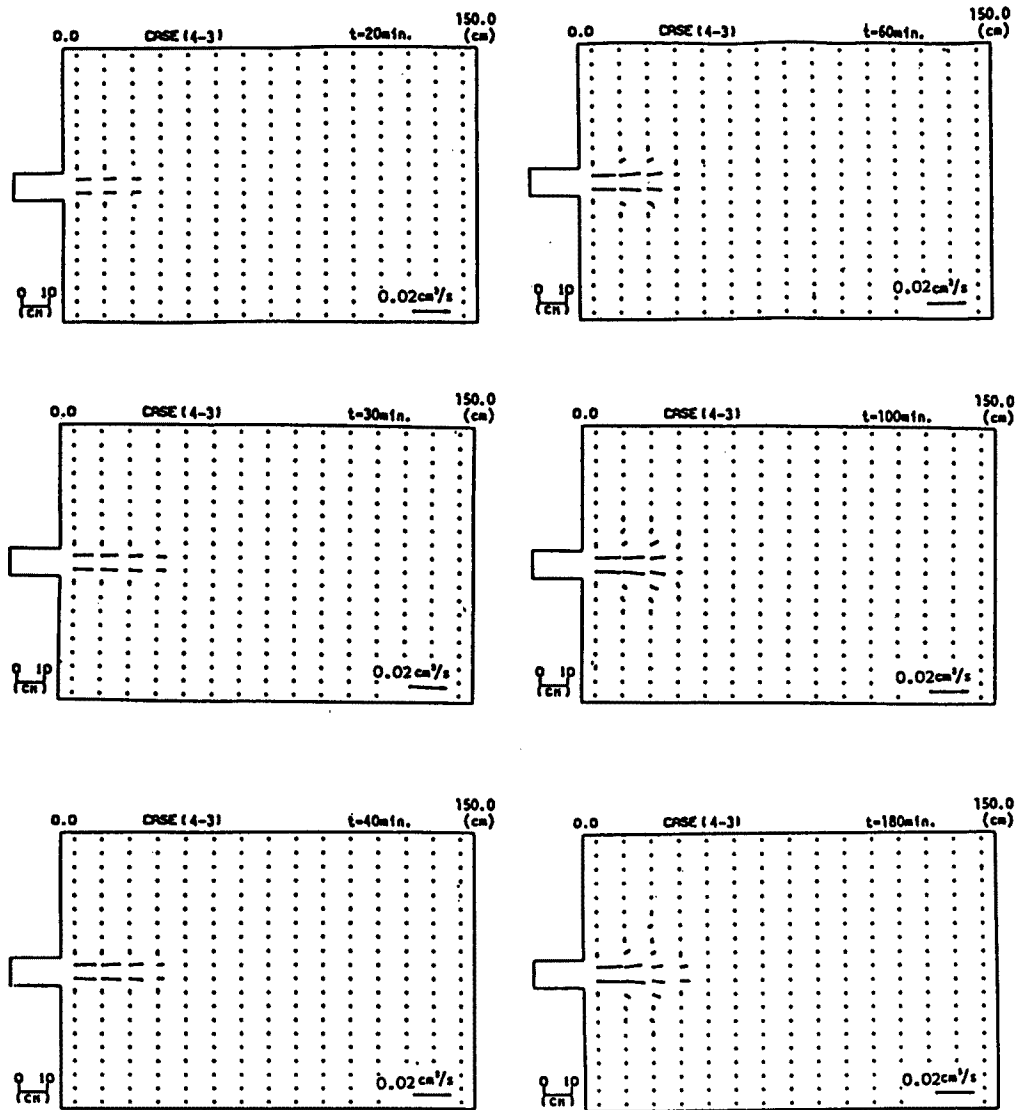


Fig. 16. Sediment discharge distribution (simulated).

略する。

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + g \frac{\partial H}{\partial x} = - \frac{u_*^2}{R} \dots\dots\dots (33)$$

$$Q = \text{const.} \dots\dots\dots (34)$$

ここに、 u は流速、 H は水位、 u_* は摩擦速度、 R は径深である。

ただし、このような取り扱いは、流路部分にしか適用できないことに注意を要する。そこで、三角州の前縁すなわち流路の終端部分では、このような流路部分での現象と下流水域での現象との接続を考える必要がある。ここでは、下流水域の水位が与えられているものとして、砂州前縁部の直前と直後の断面間に、運動量保存則と連続式とを適用し、砂州前縁部での水位を求めることにした。その際、流れの幅は変化しないものと仮定する。

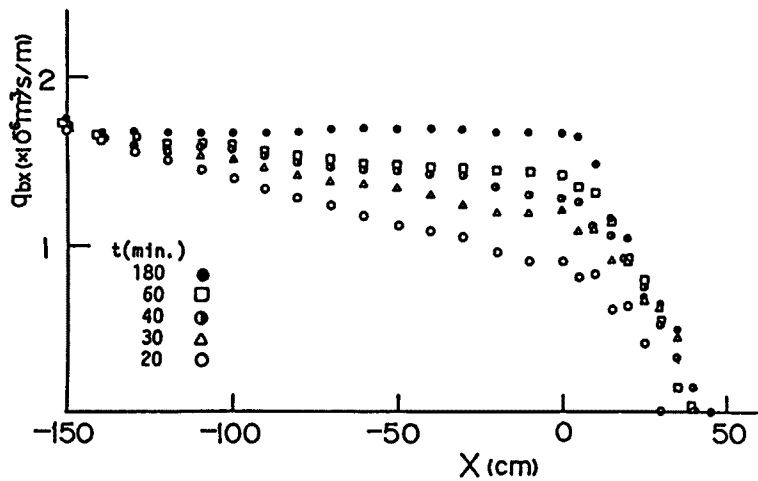


Fig. 17. Longitudinal variation of sediment transport rate along the center line.

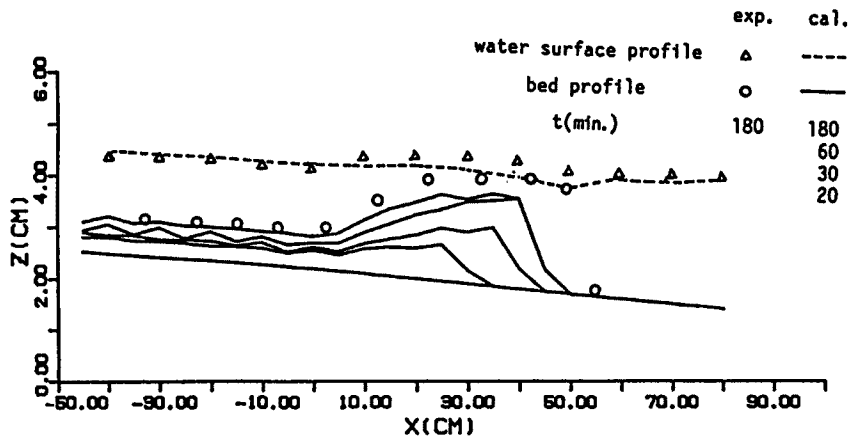


Fig. 18. Longitudinal profiles of delta bed and water surface.

$$\rho h_d u_d^2 - \rho h_b u_b^2 = - \frac{\rho g}{2} \{ (h_d + z_{sd} - z_{od})^2 - h_b^2 \} \dots \dots \dots (35)$$

$$h_d u_d = h_b u_b = q \dots \dots \dots (36)$$

ここに、添字 d は砂州前縁の上流側、 b は下流側、 s は砂州面、 o は元砂床面を表す。(Fig. 21 参照)
また、砂州前縁の前進速度 v_d については、次式が成立つ。

$$v_d = \frac{q_B}{(1-\lambda)(z_{sd} - z_{od})} \dots \dots \dots (37)$$

流路位置が変動しない場合には、上記の式系を連立させて解くことによって、河床変動を計算できるが、既に述べたように、三角州上の流路は時間とともにその位置が激しく変化する。そこで、Fig. 22 に示すように、三角州の原点から扇形に広がるいくつかの帯状領域によって下流水域を分割し、ある時間ピッチで対象とする帯状領域を移行させながら、その時間増分内は、ひとつの帯状領域内で一次元的な河床変動計算を行うという便法をとることにした。その際、帯状領域の幅が下流へ行くにしたがって広くなり、同一時刻には幅一杯に流れが広がれない状況が生じるが、その場合には、式 (31) に示した平衡流路幅を用

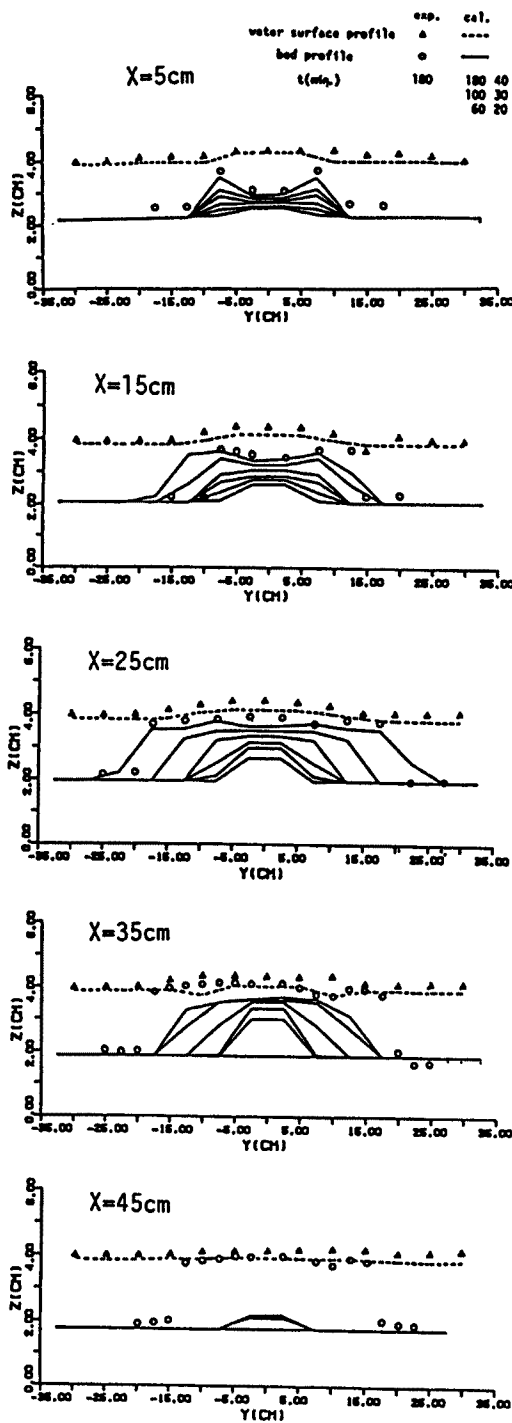


Fig. 19. Cross sectional profiles of delta bed and water surface.

いて流砂量 Q_B を算定した上で、式 (32) の分母の B には帯状領域の幅を用いて、河床高の変化量を算出することにした。式 (37) の v_d についても、同様に補正する。また、ある帯状領域から次の帯状領域へ計算を進める際、それらに重複部分がある場合には、個々の帯状領域内で構断方向に高さの違いが生じないように、平滑化を行った。

どの時刻にどの帯状領域に流路が存在するかを予測することは困難であるが、三角州の平面形状が、ほぼ相似形を保って拡大していくことから、どの方向にどの程度の時間割合で流路が存在するかを推定することは、ある程度可能であろう。

4.2 モデルの適用ならびに実験結果との比較

上記のモデルの適用性を検証するために、前々報に示した実験の中で、比較的明瞭な流路が形成された Case 1-1 に対して、差分法による追算を行った。

Fig. 23 は、Case 1-1 における主流路の方向の時間変化の計測値を示したものである。この実験は、前章に述べた実験と同じ装置を用いて、上流側の勾配 $1/200$ 、下流側の勾配 $1/15$ 、流量 0.36 l/s 、給砂量 0.43 g/s 、下流端の堰高 7 cm の条件で行ったものであるが、通水開始後 145 min に砂州面の右寄りに流路 A が発生し、急速に直線化する一方、 340 min 後には、

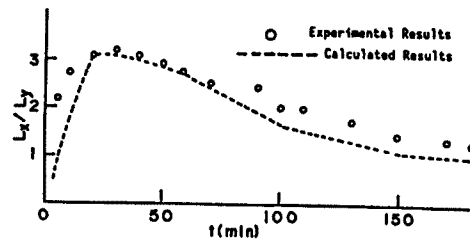


Fig. 20. Variation of the ratio of the length and width of delta plain.

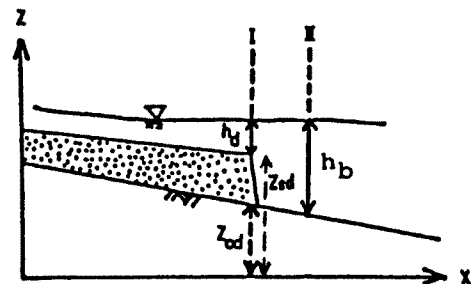


Fig. 21. Definition sketch of the delta front.

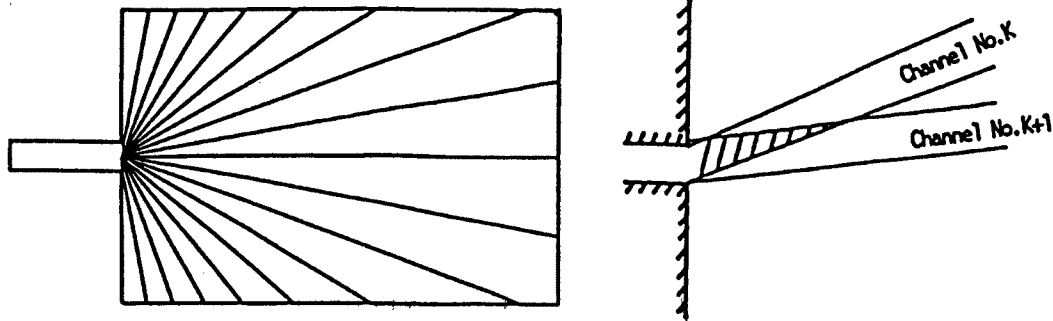


Fig. 22. Arrangement of the segments in a computational region.

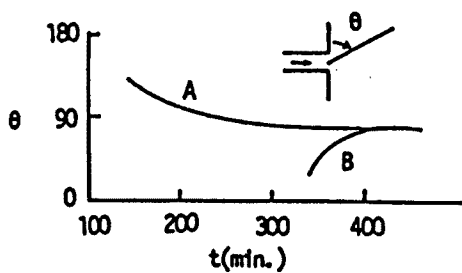


Fig. 23. Variation of the direction of stream channel with time.

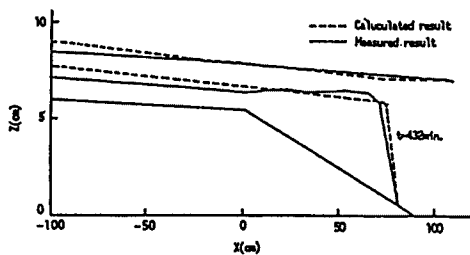


Fig. 25. Longitudinal profile of delta.

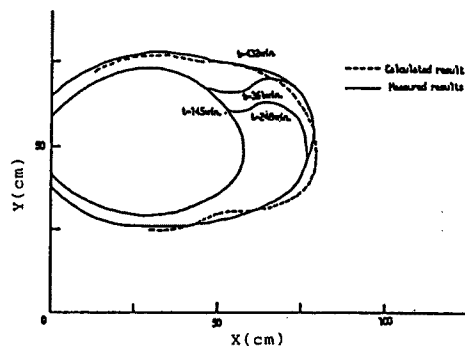


Fig. 24. Plain view of delta.

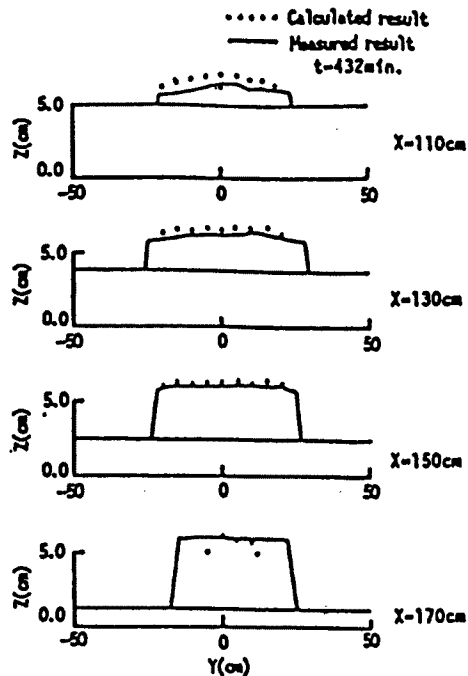


Fig. 26. Cross sectional profile of delta.

砂州面の左寄りに別の流路 B が発生し、やはり急速に直線化していった。そこで、 $t = 145$ 分における砂州形状を初期条件として与え、Fig. 22 の流向角の時間変化を既知量として、 $t = 432$ 分まで砂州の発達過程を追算し、実験結果と比較したのが Fig. 24 ~ 26 である。

これらの図からわかるように、流路の方向の変化を考慮した一次元解析法によって、Stage 3 における三角州の発達過程を比較的精度よく追算することができる。

しかしながら、現象の予測の観点からすれば、流路の方向の時間変化は未知であるから、それを推定するための法則をモデルに組み入れる必要がある。そのひとつの方法として、砂州の平面形状の相似性に着目す

ることが考えられる。すなわち、2. において述べたように、三角州の発達過程の Stage 3 においては、砂州の平面形状は、局所的に変動はするものの、ある程度の時間スケールでならして見れば、ほぼ相似形を保って拡大していく。そこで、あるひとつの平面形状から、それと相似な別の既知の平面形状に移行するまでの過程を、上記のモデルに従って解析すれば、その変形に要する時間を算出することができるであろう。すなわち、あるひとつの平面形状を呈する時点の諸量を初期条件として与え、ある方向の帯状領域に対して一次元解析法を適用して砂州の拡大を計算し、その前縁が所期の位置に達すれば、流路の方向を隣の帯状領域に移していき、すべての方向の計算が済めば、その時点の諸量を初期条件として同様のことを繰り返すのである。その際、あるひとつの平面形状と次の平面形状とにどの程度の隔たりをもたせるかが問題となるが、たとえば、河床が上昇して、堤防（自然堤防の場合もある）を溢流しやすくなるまでの期間などがひとつの目安となるであろう。

5. 結 論

以上、本研究では、二次元水域における砂州の発達・変動過程について、前報までに述べてきた実験結果に基づいて定式化を行うとともに、数値シミュレーションを行って、その適用性を検証した。

得られた結果を要約すると次のようである。

1. 河川流出土砂による三角州の発達過程は、幅があまり広がらずに流下方向に砂州が延びていく Stage 1、流下方向への前進が停止して、側方への拡大が進行する Stage 2、および多少の変動はしながらも、比較的砂州の未発達の方向を伸長させながら、長い時間スケールで見ると、ほぼ相似形を保って砂州が拡大する Stage 3 の3つの段階に区分される。

2. Stage 1 から Stage 2 あるいは Stage 2 から Stage 3 への移行は、いずれも、砂州前縁付近の路床が上昇して、元の方向への流砂能力を維持できなくなることによって生じている。その際、Stage 1 から Stage 2 への移行においては、流れあるいは砂州の拡大方向が変化するのみで、流路の形成は見られないが、Stage 2 から Stage 3 への移行においては、もはや膜状の流れが維持できず、流路の形成が見られる。

3. Stage 1 においては、河口部を出た流れは、周囲の水を連行しながら、噴流の様相を呈してかなり下流まで直進するが、Stage 2 においては、流れは砂州面上で両側に分かれ、砂州前方の中心線上には、逆流域が発生する。

Stage 3 においては、流れは流路部分にかなり集中するが、その位置は、時間とともに激しく変動し、分岐流路を形成することもある。

4. 流路が形成される前の過程である Stage 1 および Stage 2 は、二次元浅水流モデルに基づく二次元河床変動解析を行うことにより、比較的精度よく予測することができる。しかしながら、同一のモデルでは、Stage 3 に至る過程までは解析できなかった。

5. 流路が形成された後の Stage 3 に対しては、流路の方向を与えた上で、流路部分について一次元河床変動解析を行うことにより、現象を追算することができた。しかしながら、流路の方向を予測するまでには至らなかった。

6. 本研究では、上流からの定常的な給水と給砂がある場合の現象を論じたが、実際河川では、それらが非定常に変化する。その場合、本研究で見いだされたような下流からの河床上昇とは別の機構で流路変動が生じることも考えられる。今後、それらをも含めた、より広い観点からの検討が必要である。

また、本研究では、河川流が卓越する場での三角州の発達過程を対象としたが、さらに一般的には、波や沿岸流さらには潮汐・密度場の影響をも考える必要があるだろう。

なお、本研究を進めるにあたっては、文部省科学研究費補助金一般研究 (C) (課題番号 62550374) の補助を受けた。また、二次元河床変動解析には、京都大学大型計算機センターを利用した。

参考文献

- 1) 芦田和男・澤井健二・謝 正倫: 二次元水域における砂州の発達・変動過程に関する研究——掃流砂による砂州の発達・変動過程に関する実験——, 京都大学防災研究所年報, 第30号B-2, 1987, pp.475-491.
- 2) 芦田和男・澤井健二・謝 正倫: 二次元水域における砂州の発達・変動過程に関する研究(2)——浮遊砂および沿岸流の及ぼす影響に関する実験——, 京都大学防災研究所年報, 第31号B-2, 1988, pp.477-487.
- 3) Ashida, K., K.Sawai and C.L.Shieh: Experimental Study on the Process of Delta Formation in an Estuary, Proc. 4th International Symposium for River Sedimentation, Beijing, China, 1989 (under contribution).
- 4) 琵琶湖工事事務所: 野洲川の現状と今後の河川改修について, 1987, p.54.
- 5) Yen, Kai, Xue Hongchao and Liu Jiaju: Coastal and Estuarine Sedimentation Problems in China, Proc. 3rd Int. Symp. River Sedimentation, 1986, pp.257-272.
- 6) 芦田和男・道上正規: 移動床流れの抵抗と掃流砂量に関する基礎的研究, 土木学会論文報告集, 第206号, 1972, pp.59-69.
- 7) 長谷川和義: 非平衡性を考慮した側岸浸食量式に関する研究, 土木学会論文報告集, 第316号, 1981, pp.37-50.
- 8) 清水康行・板倉忠興: 河川における2次元流れと河床変動の計算, 土木試験所報告, No.85, 1986, pp.1-65.
- 9) 高橋保・中川一: 河川堤防の決壊に伴う浮遊砂の堆積に関する研究, 京都大学防災研究所年報, 第30号B-2, 1987, pp.597-609.
- 10) 澤井健二: スーパーインポーズボードとマウスを利用したパソコンによるビデオ画像読み取り法, 自然災害科学, Vol.7, No.1, 1988, pp.49-57.
- 11) 池田駿介・Gary Parker・千代田将明・木村善孝: 直線礫床河川の動的安定横断形状とそのスケール, 土木学会論文集, No.375/II-6, 1986, pp.117-126.