

## 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——

芦田 和男・澤井 健二・謝 正倫

### A STUDY ON THE DELTA FORMATION PROCESS IN A LATERALLY WIDE BASIN ——LABORATORY STUDY OF DELTA FORMATION CAUSED BY BED LOAD——

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

#### Synopsis

A sand terrace, so-called delta is often formed in front of a river mouth. In this study the development of such a terrace accompanied by the active variation of streams caused by bed load sedimentation was studied experimentally.

The results are summarized as follows.

1) At the initial stage of the formation of delta, the flow shows the aspect of a jet and the delta mainly progresses longitudinally. After some time, the progressing speed slows down and the delta begins to develop laterally.

2) When the central part of the delta is raised and flow loses the enough power to carry sediment, a lateral stream is formed, which begins to erode the outer bank quickly and becomes to be fairly straight.

3) The averaged properties of the development of delta is estimated by the equations of sediment balance including the sediment discharge passing through the fore edge of delta and the representation of the delta form by means of some simple functions.

#### 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，三角州上の流路は不安定で，その規模や位置が激しく変動することが多い。このような広水域における砂州の発達・変動過程を明らかにすることは，河口周辺部における水害の防除あるいは新たな土地利用などを図る上できわめて重要な課題である。

従来，工学分野での河口砂州に関する研究は，主たる外力要因を水域側に求め，波や沿岸流による河口閉塞の問題として取扱われていることが多い。しかしながら，もう少し長い時間スケールで見た三角州の形成とその上の流路変動過程は，主として地形学の分野で論じられ，水理学的な解析のなされることは少なかったように思われる。最近，二次元貯水池における砂州の発達に関して Mertens<sup>1)</sup> が，砂州の平面形状を実験的に検討しているが，その発達機構を論じるには至っていない。田中ら<sup>2)</sup> は三角州の平面形状を実験的に検討し，その定式化を試みているが，ある限定された条件下での比較的短い時間内での形状を予測するものであり，三角州上の流路変動およびそれに伴う三角州の変形は論じられていない。

著者らは，貯水池の堆砂や河床変動，流路変動といった河川水理学的な観点から，三角州の発達・変動過程およびその上の流路変動機構をとらえ，より精密な現象の把握と予測モデルの確立を企てようとするもの

である。

本論文では、その第一段階として、対象を掃流砂に限定し、定常的給水と給砂のもとで三角州がどのように発達し、またそれが上流の河道にどのような影響を及ぼすかを実験的に明らかにするとともに、特に、三角州の非対称な発達に重要な役割を演ずる三角州上の流路の直線化機構ならびに河道中の中規模河床形態の影響を明らかにする。

## 2. 実験方法

実験は2つのシリーズから成っている。シリーズIは、三角州の発達・変動ならびにそれが上流河道に及ぼす影響を調べたもので、Fig. 1 に示すような直線水路と矩形水槽を接続した装置を用い、水路部と水槽部に、それぞれ、縦断方向に所定の勾配で、平均粒径

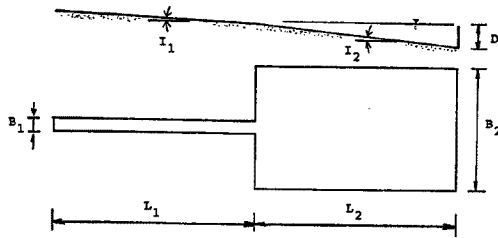


Fig. 1 Experimental equipment (Series I).

1 mm のほぼ均一な砂を敷き、水槽部の下流端に堰を設置して灌水させた後、水路部上流端から定常的な給水と給砂を行った。給砂材料は、底床材料と同じで、給砂量は、水路部の河床勾配がほぼ初期値を保つように定めた。下流端の堰高は、初期状態において、水路部と水槽部との接点(河口部)で、ほぼ上流水路の等流水深が生じるように設定した。Table

1 は、装置の諸元ならびに水理条件を要約したもので、Case I-1~I-4 には、幅 1 m、長さ 3 m、深さ 10 cm の水槽を隔壁で仕切って用い、Case I-5 には、幅 30 cm、長さ 5 m の直線水路と幅 3.0 m、長さ 5.0 m、深さ 50 cm の水槽を用いた。

給水と給砂は、水槽部に形成される三角州が水槽側壁あるいは下流端の近傍に達して、境界の影響を強く受けるようになるまで続けたが、途中、計測のために、適宜、停水した。

通水中には、水槽の中央上方約 5 m の位置に 35 mm カメラとビデオカメラを設置して砂州の拡大過程を観察するとともに、数 mm の紙片を適宜トレーサーとして投入し、表面流況(流速、流向、流跡)を計測した。また、Case I-4, I-5 には過マンガン酸カリウム溶液をトレーサーとして用い、流況と河床形態の様相を把握した。

水面形状と河床形状の計測は、Case I-1~I-4 には、触針式サーボ水位計と光反射式サーボ砂面計または、

Table 1 Experimental conditions (Series I)

CASE	$B_1$ (cm)	$B_2$ (cm)	$L_1$ (cm)	$L_2$ (cm)	$I_1$	$I_2$	$Q_w$ ( $\text{cm}^3/\text{s}$ )	$Q_B$ ( $\text{g}/\text{min}$ )	$D$ (cm)	$F_r$	$B_1/H_1$
I-1	10	100	150	150	$\frac{1}{200}$	$\frac{1}{15}$	360	25.7	7	0.8	77
I-2	2	100	150	150	$\frac{1}{100}$	$\frac{1}{30}$	98.5	7.3	5.6	1.1	16
I-3	4	100	150	150	$\frac{1}{50}$	$\frac{1}{30}$	200	93.7	4.1	1.5	38
I-4	4	100	150	150	$\frac{1}{20}$	0	20	14	0.8	1.8	20
I-5	30	300	500	500	$\frac{1}{50}$	$\frac{1}{30}$	1000	480	34.5	1.4	37

$Q_w$ : Water supply  $Q_B$ : Sand supply  $D$ : Weir height  $F_r$ : Froude number of channel flow  
 $B_1/H_1$ : Ratio of channel width and water depth

ポテンショメータ付きポイントゲージを縦横断方向にスライドできるポテンショメータ付き計測台車に装着して手で移動させ、パーソナルコンピュータで A/D 変換しながら、適宜トリガーを操作して、データを記録した。水面形状、河床形状とも、通水中にできるだけ頻繁かつ迅速に計測するよう努めたが、計測速度に比べて現象の変化速度が大きい場合には、一時停水して詳細な河床計測を行った。Case I-5 にはパーソナルコンピュータ制御の三次元自動計測台車を用い、水面形状・河床形状を詳細に計測した。

Case I-1 は、水路部の流れを常流としたもので、水路幅  $B_1$  を水槽幅  $B_2$  の 1/10 にセットした。Case I-2 は、水路幅と水槽幅の比をさらに小さくして、水槽境界の影響を小さくすることをねらったものであるが、水路部側壁の摩擦抵抗が増大するので、単位幅流量と水路部河床勾配を大きくして、流砂能力を確保した。Case I-3 では、水路部の流れを射流とするために水路部河床勾配をさらに大きくするとともに、側壁摩擦の減少と水路部の計測の容易化のため、水路幅を 4 cm とした。Case I-4 では、水路部に複列砂州が形成される水理条件を設定するため、流量と水深をさらに小さくするとともに、流砂能力を確保するために、水路部の勾配を大きくセットした。

Case I-5 で装置の諸元を大きくしたのは、境界の影響を極力除外することと、あまり不自然なパラメータの組み合わせを避けること、ならびに計測精度を上げることにねらいがある。

河口部での初期河床高および水槽部での初期底面勾配は、実験装置のスケールの制約を考慮した上で、できるだけ有効な実験範囲を広くとれるように設定した。

シリーズ II は、三角州上に形成された分派流路の直線化過程を調べることをねらいとしたもので、Case I-1 ~ I-4 と同様に、Fig. 2 に示すような、幅 1 m、長さ 3 m、深さ 10 cm の水槽を用い、上流側 1.5 m を幅 4 cm の側壁固定直線水路、下流側 1.5 m を二次元水域とし、縦断方向に 1/30 の勾配で、平均粒径 1 mm のほぼ均一な砂を敷き、その上に三角州として、同じ砂で、辺長 60 cm、高さ 45 cm の水平面を持つ台地を作り、水路部から滑らかに接続して弯曲する幅 4 cm の長方形断面の溝を掘り、下流端の堰高を台地面に一致させて、河口部直上流から定常的な給水と給砂を行った。実験は Table 2 に示すような流量の異なる 2 つのケースから成っており、初期の溝の深さは台地の上に溢流の生じる限界になるようにセットした。給砂量は直線水路部でなるべく河床勾配の変動が少なくなるようにセットした。初期の流路底面は水平である。

通水中は、トレーサーを流しながら上方から写真撮影を行って、流路の平面位置、表面流速、砂粒子の運動方向を読み取るとともに、適宜停水して、流路形状を詳細に計測した。

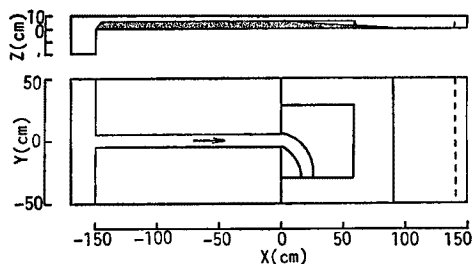


Fig. 2 Experimental equipment (Series II).

Table 2 Experimental conditions (Series II)

Case	$Q_w$ ( $\text{cm}^3/\text{s}$ )	$Q_B$ ( $\text{g}/\text{s}$ )	$h$ (cm)
II-1	73	0.078	1.1
II-2	221	0.344	2.0

$Q_w$ : Discharge  $Q_B$ : Sand supply

$h$ : Channel depth

### 3. 実験結果

#### 3.1 流れの概況ならびに平面形状

Fig. 3 は写真情報から、シリーズ I の各実験ケースにおける三角州や流路、河床形態などの輪郭と表面流況を読み取ってトレースしたものである。

中規模河床形態のない場合 (Case I-1 ~ I-3)<sup>3)</sup>、通水初期には、流れは噴流の様相を呈し、流砂はほとんど

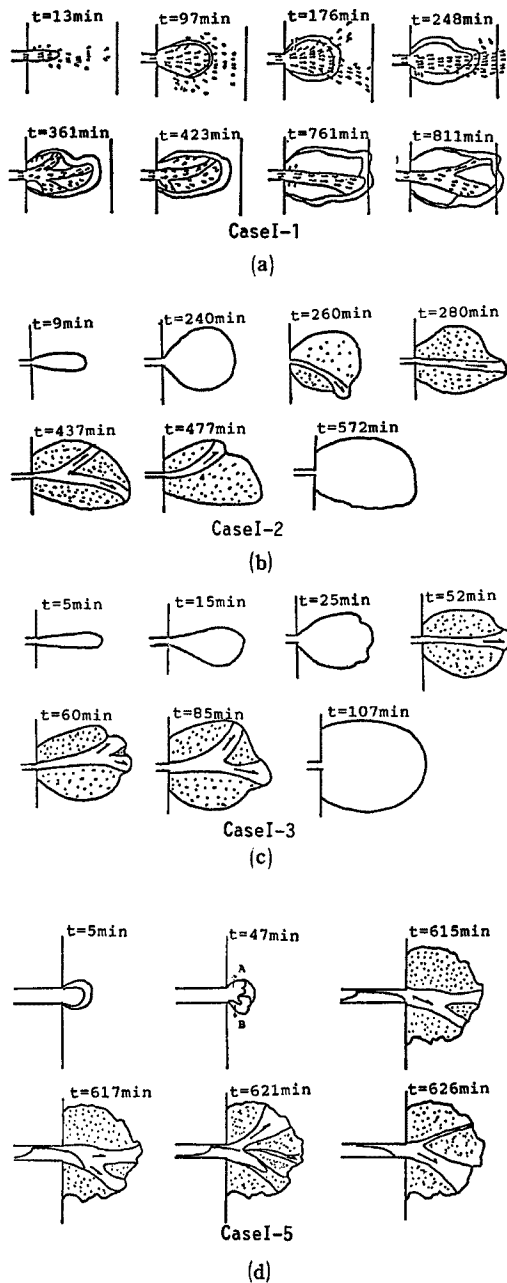


Fig. 3 Surface flow pattern and plane forms of delta and streams.

れるが、概して、砂州の未発達部に偏る傾向があり、その結果、砂州の非対称性や突起の存在はある程度以上には増大せず、全体的にはほぼ対称で、相似形を保ちながら砂州が拡大していく。(Case I-1 の  $t=423 \sim 811$  min, Case I-2 の  $t=477 \sim 572$  min, Case I-3 の  $t=85 \sim 107$  min)。

水路部に交互砂州が形成される Case I-5 では、Fig. 3(d) のように、通水初期には、三角州は滑らかでかつ左右対称である ( $t=5$  min) が、まもなく、水路部で長さ 120 cm、波高 1.5 cm 程度の交互砂州が次々に形成されて約 0.7 cm/s の速度で前進する。交互砂州の形成に伴って水流が蛇行し、河口部の流れもその影響を受けて、主流方向が時間的に変化する。土砂の堆積も主流方向の変化によって河口両側で ( $t=47$  min)

横断方向に広がらずに、前方へ押出されて堆積する (Case I-1 の  $t=13$  min, Case I-2 の  $t=9$  min, Case I-3 の  $t=5$  min)。まもなく、砂州が発達すると、砂州高が上昇するにつれて、流れが広がるようになり、砂州の形状は卵形に膨らんでいく (Case I-1 の  $t=99$  min, Case I-2 の  $t=240$  min, Case I-3 の  $t=15$  min)。この段階までは、砂州の平面形状はなめらかで、かつ左右対称である。やがて砂州前縁の肩部の土砂流送能力が減少して、掃流限界を下回ると、砂州の前進が停止して、堆積が河口部に向かって遡上し、流れは、流下方向 ( $X$  方向) よりも横断方向 ( $Y$  方向) に流れやすくなる。このような砂州の微地形の変化につれて、流れが  $X$  方向よりも  $Y$  方向に卓越するようになると、それに沿って底面が侵食され、横断方向に分岐流路が形成されるようになる (Case I-1 の  $t=176$  min, Case I-2 の  $t=260$  min, Case I-3 の  $t=25$  min)。

一旦分岐流路が形成されると、流れはそこに集中し、土砂の輸送が活発になって、その方向に三角州が前進拡大する。この段階では、砂州の形状は分岐流路の変遷に支配され、左右対称性が失われる。しかしながら、この流路は、河岸が低く、しかも弯曲しているので、外岸側の侵食と内岸側の堆積によって急速に直線化していく傾向にある。直線化した流路は、その水理条件に対応した平衡断面を形成し、しばらくは、初期に見られたような堆砂過程が進行する (Case I-1 の  $t=248$  min, Case I-2 の  $t=280$  min, Case I-3 の  $t=52$  min)。

やがて、流路床が上昇すると、再び横断方向の流れが生じ、それが砂粒の移動限界を上回ると、河岸が欠壊して横方向の流路が生じる (Case I-1 の  $t=361$  min, Case I-2 の  $t=437$  min, Case I-3 の  $t=60$  min)。

その後、流路は直線化と欠壊を繰り返しながら、砂州を拡大させていく。流路の分岐の位置、本数、方向は、三角州の微地形と水理条件によって支配さ

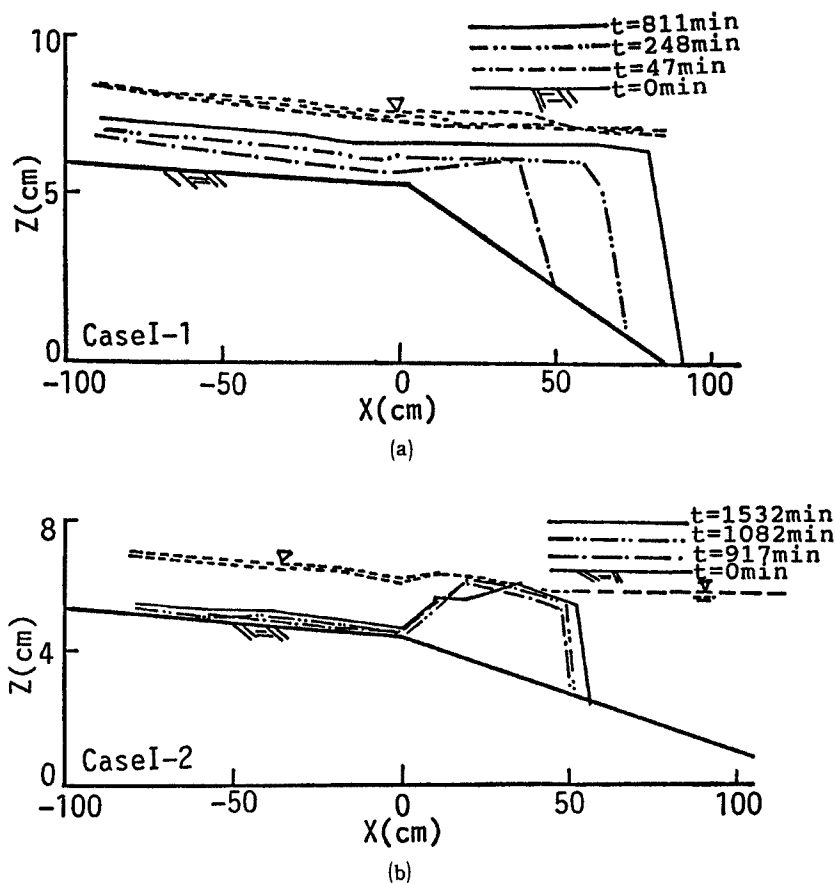
のように A と B 2つの砂州が同時に発達して重なる。この段階での三角州の発達は極めて複雑であるが、水路の両側から土砂が供給されて、三角州を拡大させるように思われる。

まもなく、三角州の前縁の土砂流送能力が低下して、掃流限界を下回ると、三角州の前進が停止して、堆積が河口部に向かって遡上し、三角州の中央部が高くもり上がる。そのような三角州の微地形変化および水路からの流出水の主流方向の時間的な変化につれて、三角州上に分岐流路が形成される ( $t=615 \text{ min}$ )。

一旦分岐流路が形成されると三角州上の水流がそこに集中し、土砂の輸送が活発になって、その方向に三角州が拡大する。分岐流路の発達につれて、交互砂州も河口部から伸びて、この流路に沿ってある程度前進する ( $t=617 \text{ min}$ )。その結果、流路の河床位が上昇する一方、上流から別の発達した交互砂州が河口部に至るにつれて主流はその方向に偏っていき、分岐流路の流量が減少する。 $t=621 \text{ min}$ ではこのような河床の上昇および流量の減少によって右側の分岐流路が減衰した。しかしながら、交互砂州の変動周期が 2~3 min と短いに対し、分岐流路の発生から消滅までの周期は 20~30 min とかなり長く、必ずしも両者は対応するとは限らない。分岐流路が一時減衰しても、主流が元の方に戻ってくると再び活発になることもある ( $t=626 \text{ min}$ )。このような過程が何回か繰り返されると分岐流路が消滅し、その後、まもなく、別の位置に新たな流路が発生し、類似の経過が反復された。

### 3.2 三角州の縦横断形状

Fig. 4 はシリーズ I の水路中心線に沿う底面ならびに水面形状を示したものである。全体としての傾向は、水路部ではほぼ初期河床に平行で、水位の上昇量は河床の上昇量とほぼ同じである。河口部には、逆勾配の斜面があり、砂州の前縁には安息角の斜面を有しており、段丘の肩は水面のわずか下の高さをほぼ水平に前



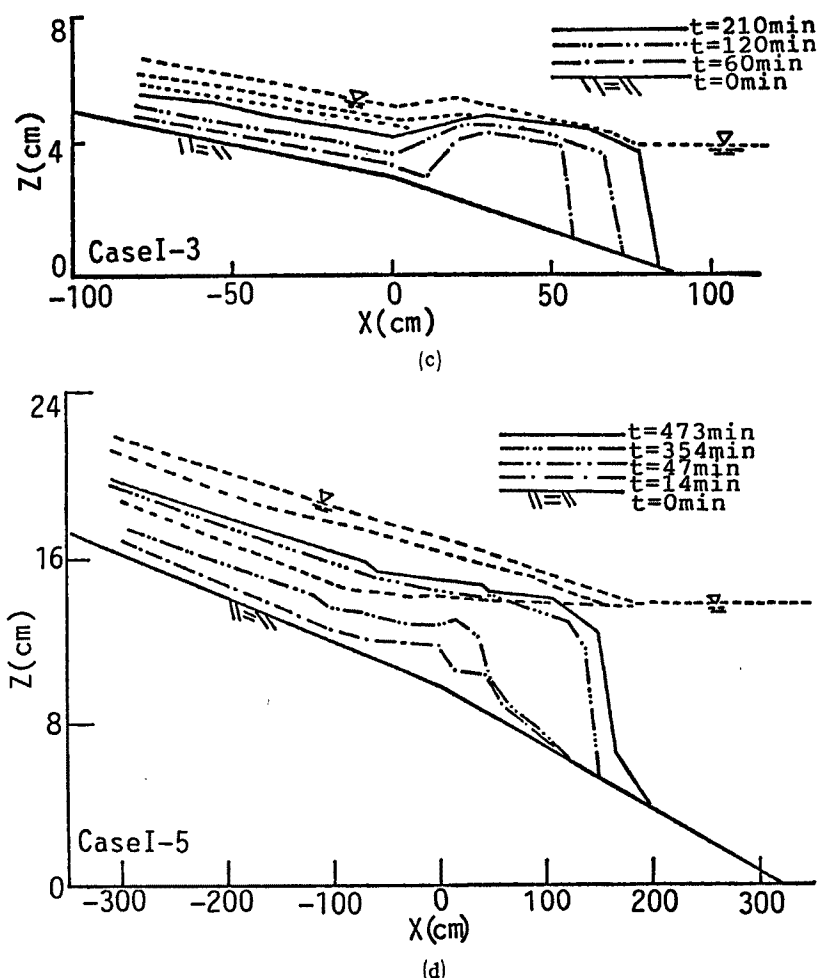


Fig. 4 Longitudinal profile of stream bed and water surface along the center line of the flume.

進している。これは、一次元貯水池の堆砂過程とよく似ている。砂州面の勾配は各ケースで異なり、Case I-1 はほぼ水平であるが、Case I-2 はほぼ水槽の初期河床と平行、Case I-3, I-5 は流下方向に沿って低くなっている。しかしながら三角州上で流路が変動するために、三角州中心線に沿った縦断形状の水文学的意味はややあいまいとなる。

Fig. 5 には三角州の横断形状を一定の間隔に示している。三角州の横断形状は、中心部が周縁よりやや高く、ほぼ左右対称の蒲鉾形である。周縁の肩は縦断図で見た段丘の肩とほぼ同じ高さを持ち、水面のわずかに下を進んでいく。

このように三角州の周縁部の河床位が下流側の水位ではほぼ決り、一定となるのは、一次元貯水池の堆砂過程にも見られる、掃流砂の堆積過程の最大の特徴である。三角州面の河床位は流路の変動によって時間的にも場所的にも変化するが、これは二次元的な堆砂の特徴である。また、縦断方向、横断方向とも、段丘の前進速度は時間とともに遅くなる。

### 3.3 流路の変動過程

三角州上の流路は非常に不安定でその位置や、幅や、勾配などが時間的にも、場所的にも激しく変動する。三角州の発達過程は、その流路変動によって強く支配されている。

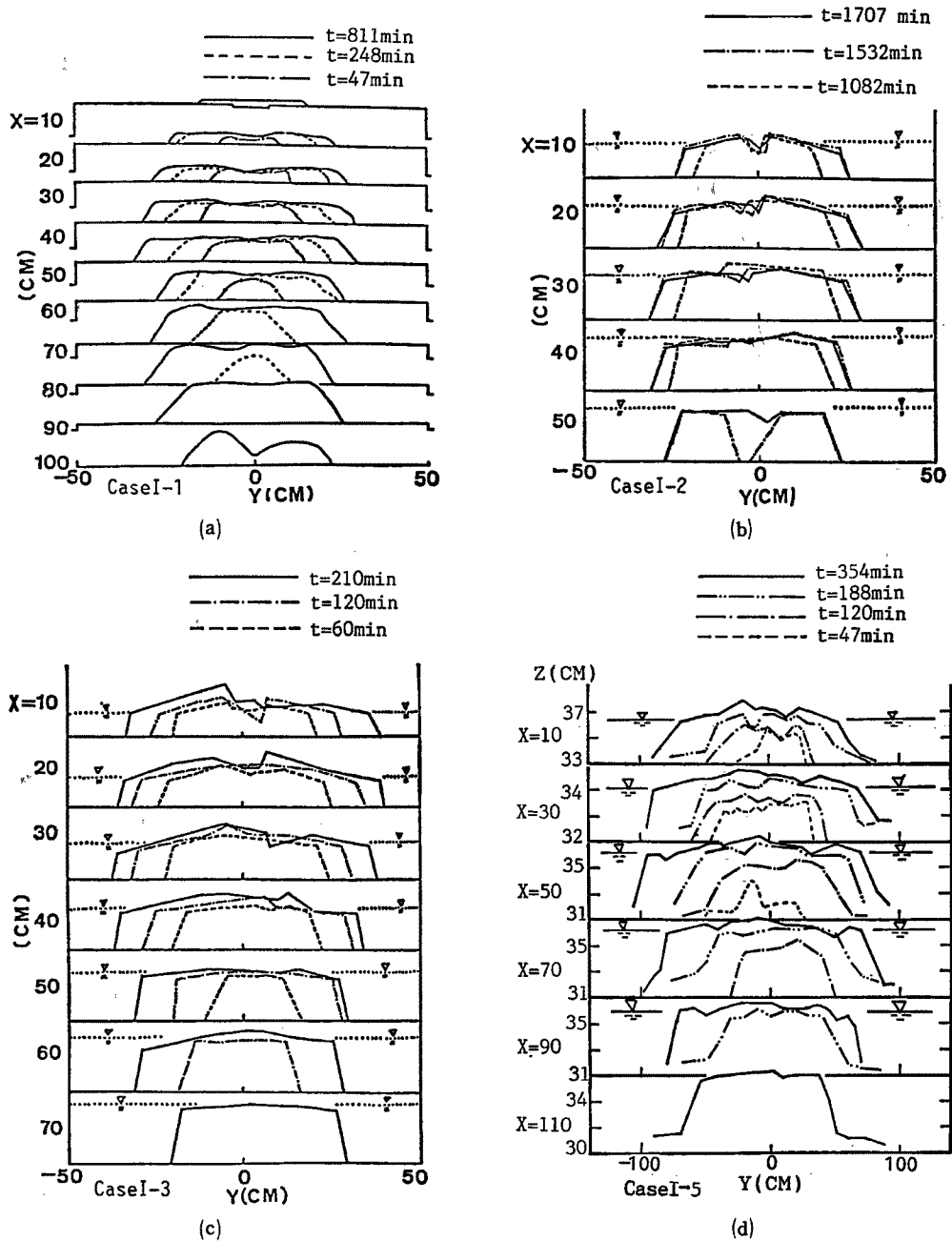


Fig. 5 Cross sectional profile of delta.

Fig. 6 は Case I-2 において一本の流路に着目し、流路の発生から消滅までのプロセスを流路の最深線に沿って追跡したものである。Fig. 7 は各時刻における流路の最深線に沿う水面形状および河床形状を示したものである。Fig. 8 には、それらの流路長と底面勾配の時間変化を示している。ここでいう流路とは、周囲に比べて著しく流水の集中している部分をさし、流れが分散して周囲と明瞭に区別できないところでは、たとえ流れがあっても流路とはみなしていない。これらの図からわかるように、発生直後の段階 (Fig. 6 の A) では、流路の規模はきわめて小さく、流路幅は数 mm 程に過ぎないが、河床勾配と水面勾配がともに大きく、かなりの洗掘力をもっている。その結果、流路は急速に発達するが、それに伴い、流れがますます集中

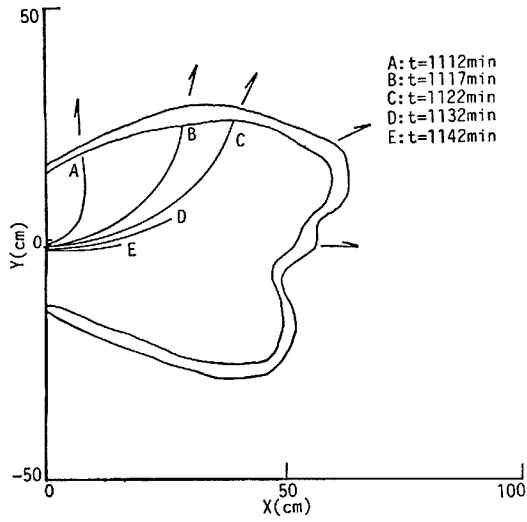


Fig. 6 Generating, developing and disappearing process of a tributary.

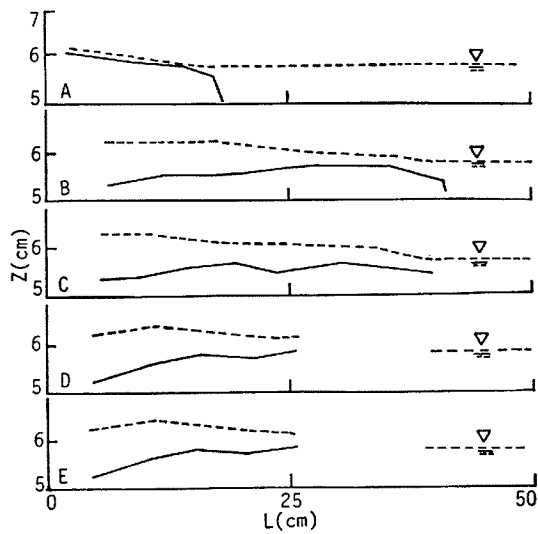


Fig. 7 Longitudinal forms of stream bed and water surface along a tributary.

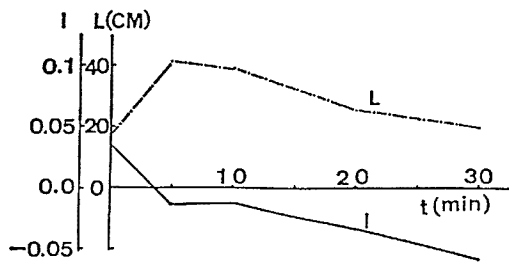
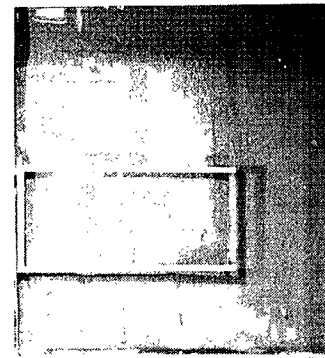


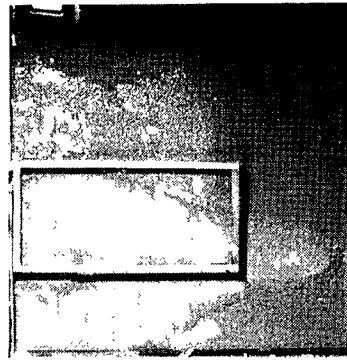
Fig. 8 The length and the bed slope of the active part of the tributary.



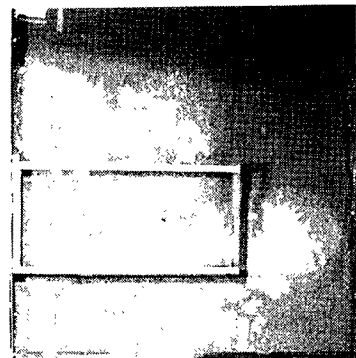
t=0 min



t=7 min



t=103 min



t=170 min

Photo. 1 Straightening process of a bend channel.



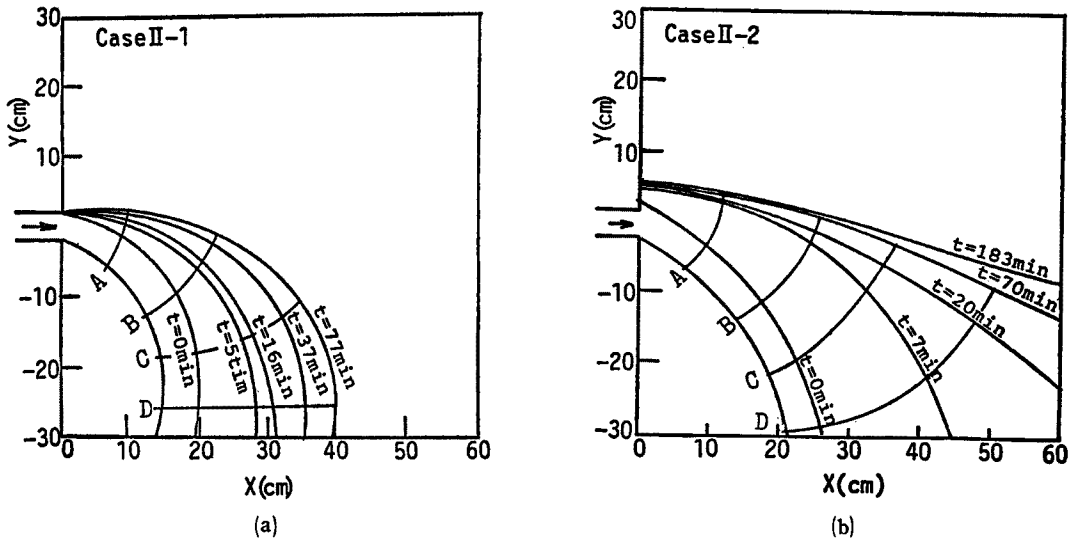


Fig. 9 Migration of the outer bank of the stream in Series II.

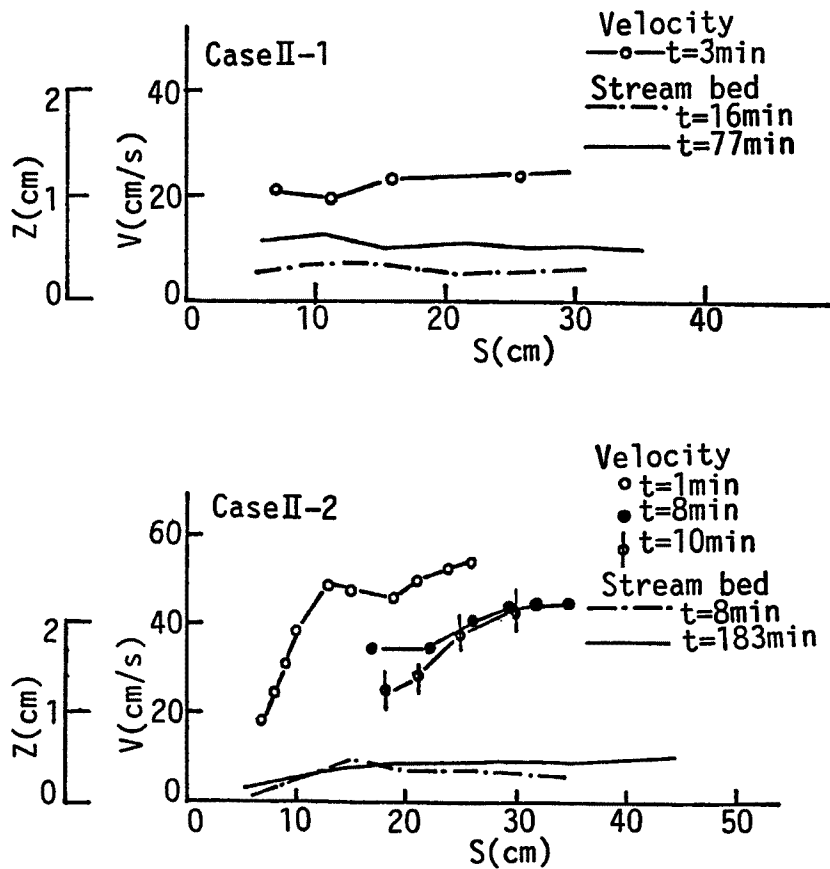


Fig. 10 Longitudinal bed profile and surface velocity distribution along the outer bank of the stream.

してくるので、流路の規模が大きくなる。しかしながら、この流路は大きく弯曲しているため、弯曲の外側で侵食、内側で堆積が生じ、急速に直線化していく傾向があり、5分後にはBの位置に移動しているとともに、河床勾配が負となっているのが大きな特色である。さらに5分後には、流路はCの位置にあるが、この段階では流路の曲率はかなり小さくなっており、直線化の傾向は弱まっている。また、流路の先端部では、流砂能力が弱まり、堆積が生じて、砂州の前縁に至るまでに流路が消滅してしまっている。このように流路の先端部に堆積が生じて流れが弱まると、それが急速に上流側へ伝播し、10分後には、Dのように流路長がかなり短くなっている。さらに10分後には流路はEの位置にあり、発生から約30分で消滅した。その後、まもなく、別の位置に新たな流路が発生し、類似の経過が反復された。

このように、流路の発生位置や発生時刻には、不確定な要素が強いが、流路が発生してから、発達、消滅するまでの過程は、かなり規則的に進行している。

Photo. 1 は、シリーズIIのCase II-2における流路変動状況を示したもので、弯曲流路の外岸が洗掘されて、急速に直線化していく過程を明確に捉えている。

Fig. 9 は、シリーズIIのそれぞれの実験ケースにおける、流路の水際線を示したものである。図中のA~Dは後述の横断形状測定断面を表している。流量の小さなCase II-1では、水路部出口の直下流ではほとんど河岸侵食が生じず、水衝部から下流の外岸のみが侵食されているのに対し、流量の大きなCase II-2では、水路部出口の直下流においても顕著な河岸侵食が生じ、流れが剥離するに至っている。いずれのケースにおいても、初期には下流へいくほど河岸侵食量が大きく、流路は直線化の傾向を示している。時間の経過とともに、河岸の侵食速度は小さくなり、Case II-1では $t=77$  min以後はほとんど河岸侵食が停止して、直線化が完了しなかったのに対し、Case II-2では $t=183$  minにおいてほぼ直線化が完了している。

河岸侵食速度を支配している最も大きな要因は、河岸付近の流速であると考えられる。Fig. 10は流路の縦断形状およびレーザーの軌跡から、水面における流心に沿う流速の変化を示したもので、Case II-1では、流下方向への流速の増加が緩慢であるのに対し、Case II-2では水衝部よりも下流において、流速がかなり急激に増加している。なお、流心の位置は、Case II-1では水路部出口から下流に至るまで、ほぼ外岸に沿っているのに対し、Case II-2では、水衝部よりも上流では直線水路の延長線上にあり、河岸からかなり離れている。

Fig. 11 は、各ケースの流路の横断形状の時間変化を示したものである。断面位置はFig. 9に示す通りである。横軸のNは、内岸から外岸に向かう横断距離を表している。Case II-1では外岸の侵食に伴って流路幅が拡大するとともに、河床全体が顕著に上昇しているのに対し、Case II-2では外岸の侵食に伴って内岸側に顕著な堆積が生じ、初期を除いて測線ごとにほぼ同一の形状を保って移動している。このように、内岸側に顕著な堆積が生じたのは、2次流による横断方向への土砂輸送が活発であったためであると考えられる。

#### 4. 三角州の形状特性に関する考察

Fig. 12 はシリーズIの各ケースにおける、三角州の長さ( $L_x$ )と幅( $L_y$ )およびそれらの比の時間変化を示したものである。全体的な傾向としては、長さ、幅ともに、初期に急速に増大し、時間とともにその速度を緩めながら増大を続けている。このように砂州の拡大速度がしだいに低下するのは、三角州の前進に伴って三角州前方の水深が増すことと、三角州の面積とりわけ周縁長さが増大していることに起因している。三角州の長さとの比は、初期にはかなり大きく変化するが、時間とともにある値に収束している。すなわち、交互砂州のない場合(Case I-1~I-3)、初期には、河口部での流向の影響のために、三角州は横断方向よりも縦断方向に卓越的に発達し、 $L_x/L_y$ はかなり大きな値に達するが、時間とともに流向の影響が弱まって、ある段階からは、変動しながらあらゆる方向に同程度に三角州が伸びていき、 $L_x/L_y$ は時間と共に1.0の近くに収束しているようである。

一方、交互砂州と三角州が同時に存在する場合(Case I-4, I-5)では、 $L_x/L_y$ は1.0に近い値でピークを

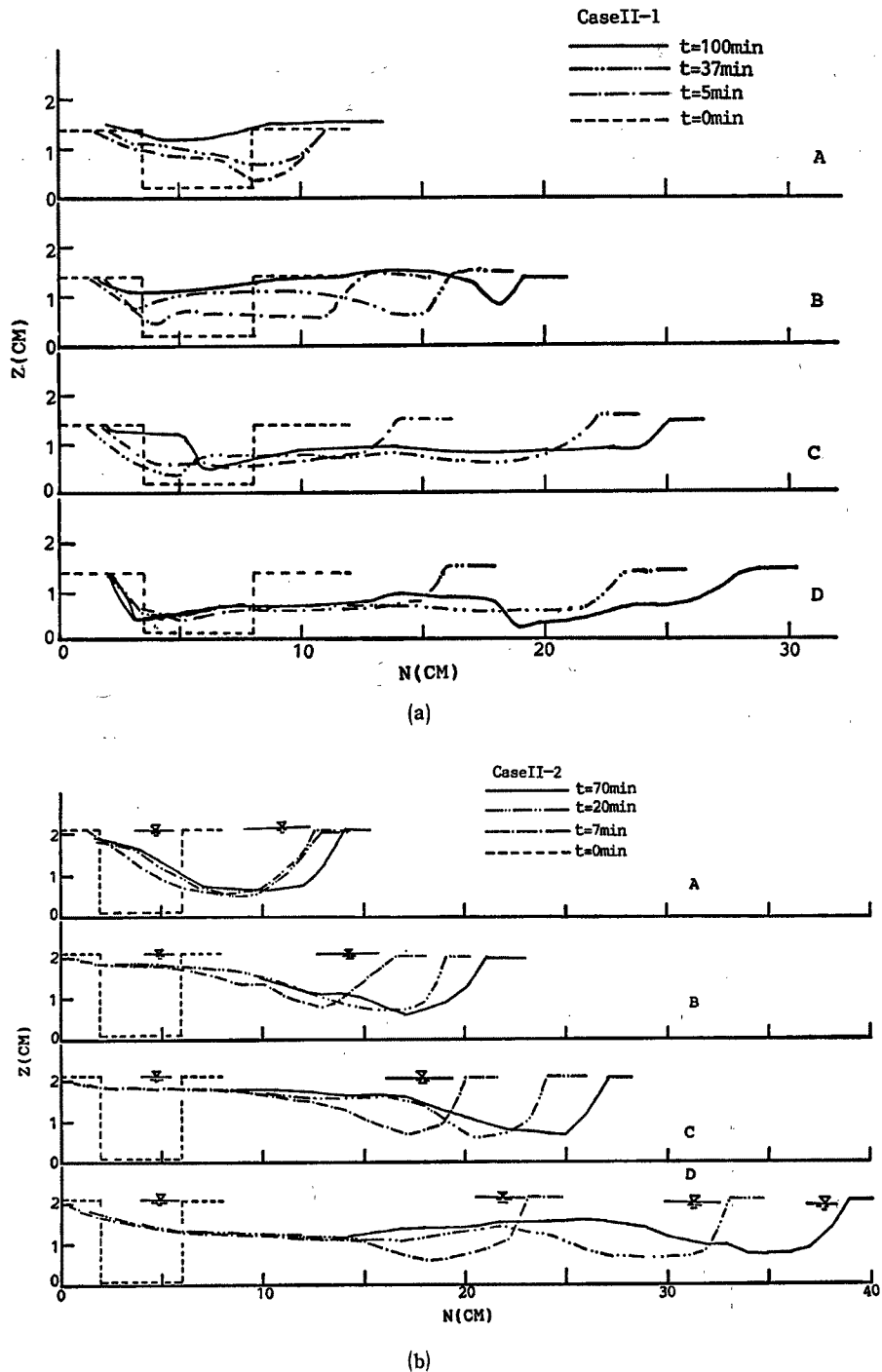


Fig. 11 Cross sectional profile of stream in Series II.

もち、時間とともに0.8近くに収束している。すなわち、交互砂州が形成される水理条件での三角州の発達は交互砂州がない場合に比べて横断方向に卓越している。

もちろん、二次元水域といってもさらに三角州が発達すれば、境界の影響は避けられず、本実験のように、水槽部側方への流れが拘束される場合には、ある段階から後は、 $L_x$  は一定で  $L_y$  のみが増大し、 $L_x/L_y$  は

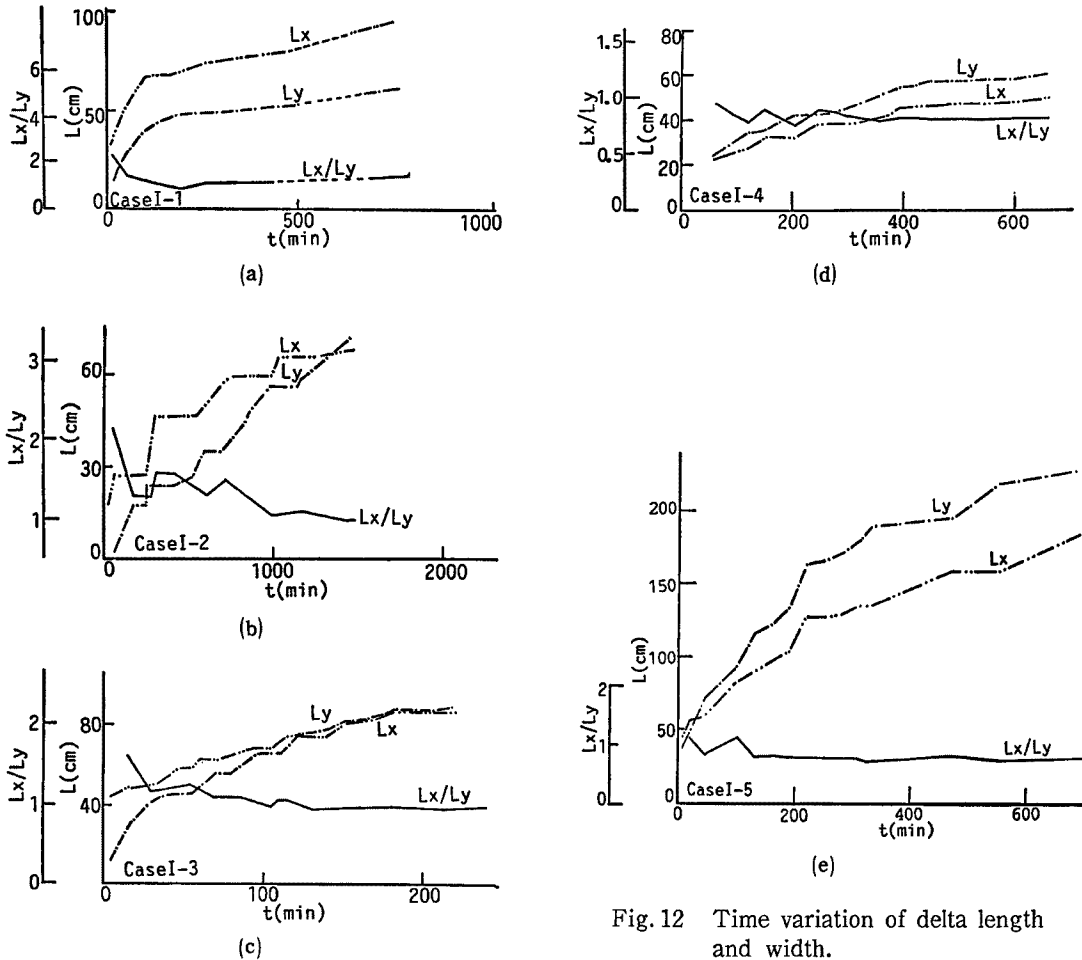


Fig. 12 Time variation of delta length and width.

再び増加し始めるはずである。Case I-1 において  $L_x/L_y$  の収束値が 1.0 でなく 1.5~1.6 に収束しているのは、既に水槽側壁の影響が現れているためとも考えられる。

つぎに、このような三角州の発達過程を、土砂収支の観点から検討するために、砂州形状の関数近似を試みる。個々の流路変動をならした比較的長い時間スケールで見ると、三角州の平面形状は、Fig. 13 に示す

ような座標軸を用いて、次式で表されるような楕円の一部分として近似される。

$$\left(\frac{x-x_c}{r_x}\right)^2 + \left(\frac{y}{r_y}\right)^2 = 1$$

ただし  $x \geq 0$ .....(1)

ここに、 $x_c$  は、河口から楕円の中心までの距離、 $r_x$  および  $r_y$  はそれぞれ楕円の長径および短径の半分である。前述の  $L_x$ ,  $L_y$  とこれらの変数の間には、次の関係がある。

$$L_x = x_c + r_x \dots\dots\dots(2)$$

$$L_y = 2r_y \dots\dots\dots(3)$$

これらの変数はいずれも時間の関数で、時間の経過とともに増大するが、前述のように、初期の段

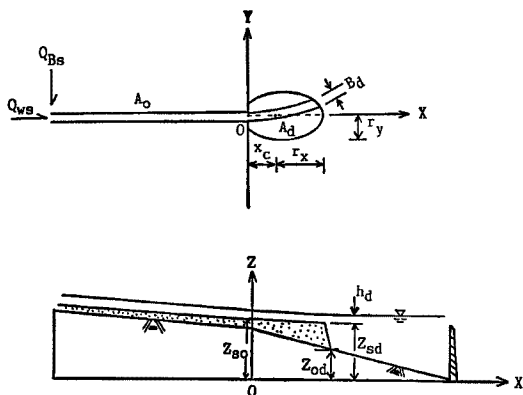


Fig. 13 Definition sketch for sediment balance calculation.

階を除くと、 $L_x/L_y$  はほぼ一定に保たれており、さらに  $x_c$  もほぼ一定値として近似できるようである。

つぎに、三角州の縦断形状は、各ケースごとに異なるが、それぞれのケース内においては、流路変動をならしたやや長い時間スケールで見ると、水路部はほぼ平行に上昇し三角州の表面は河口部を頂点とし、水面からわずかの下の高さを低部とする、錐面として近似される。したがって、水路部上流端での給砂量を  $Q_{B_0}$ 、三角州前縁を通過する流砂量を  $Q_{B_d}$  とすると、流砂の連続式は次式で表される。

$$Q_{B_0} - Q_{B_d} = (1 - \lambda) \left[ A_0 \frac{dz_{s0}}{dt} + \frac{1}{3} \frac{d}{dt} (A_d (z_{s0} - z_{sd})) \right] \dots\dots\dots(4)$$

ここに、 $\lambda$  は空隙率、 $A_0$  は水路部の水平投影面積、 $A_d$  は三角州の水平投影面積、 $z_{s0}$  は河口部の河床高、 $z_{sd}$  は三角州前縁の河床高である。

$Q_{B_d}$  は、三角州前縁での水理量によって定まるが、先に述べたように、三角州上には流路が形成され、それが時間とともに激しく変動する。いま、各時点における三角州前縁での全流路幅の代表値を  $B_d$ 、そこを通過する流量を  $Q_{wd}$  とおけば、平均的な水理量の間に関係が成り立つ。

$$Q_{wd} = B_d \cdot h_d \cdot u_d = \varphi \cdot B_d \cdot h_d \cdot u_{*d} \dots\dots\dots(5)$$

$$Q_{B_d} = B_d \cdot q_{B_d} \dots\dots\dots(6)$$

ここに、 $h_d$  は三角州前縁の流路部分の水深、 $u_{*d}$  は摩擦速度、 $\varphi$  は流速係数、 $q_{B_d}$  は単位幅流砂量である。

一方、三角州の前縁を通過した土砂は、ほぼ安息角を保って砂州を拡大させるので、次の土砂収支式が成立つ。

$$\frac{Q_{B_d}}{1 - \lambda} = 2 \int_0^{L_x} \frac{\partial y}{\partial t} \cdot (z_{sd} - z_{0d}) dx \dots\dots\dots(7)$$

ここに、 $z_{sd}$  は砂州前縁法肩の河床高、 $z_{0d}$  は砂州前縁法尻の河床高である。

三角州前縁において全流量のうちのどの程度が流路部分に集中するかは明らかでないが、ここでは係数  $\alpha$  を用いて、

$$Q_{wd} = \alpha Q_{w_0} \dots\dots\dots(8)$$

と表しておく。ここに、 $Q_{w_0}$  は上流端での給水流量である。

$Q_{wd}$  と  $B_d$  とは互に独立ではなく、影響し合っているものと考えられるが、それについては後述する。

以上の諸式を与えられた初期条件と境界条件のもとで解くことにより、三角州の発達過程の概況をシミュレートすることができる。境界条件としては、三角州前縁法肩の水位が下流端水位に等しいものとする。すなわち、

$$z_{sd} + h_d = \text{const.} \dots\dots\dots(9)$$

また、三角州前縁での砂面勾配を  $I$  とすると、

$$\frac{dz_{sd}}{dt} = \frac{\partial z}{\partial t} - I \cdot \frac{dx_d}{dt} \dots\dots\dots(10)$$

と表せるが、ここでは局所的な勾配には立ち入らない。

**Fig. 14** は、以上の仮定のもとに、Case I-1 の実験における三角州の発達過程をシミュレートしたものである。ただし、 $B_d$ 、 $x_c$ 、 $L_x/L_y$ 、 $h_d$  は時間的に変化しないものとし、実験によって得られた代表的な値を用いた。また、 $\alpha$  の値には、後述する安定断面における流量と流路幅の関係から、0.8を用いた。流砂量式には、芦田・道上式<sup>4)</sup>

$$\frac{q_B}{u_{*c} d} = 17 \tau_{*c} (1 - \tau_c / \tau) (1 - u_{*c} / u_{*c}) \dots\dots\dots(11)$$

を用い、また、 $\varphi = 15$  とした。

本計算には、多くの仮定が含まれており、今後、各パラメータの与え方や、モデルそのものの改良を図る

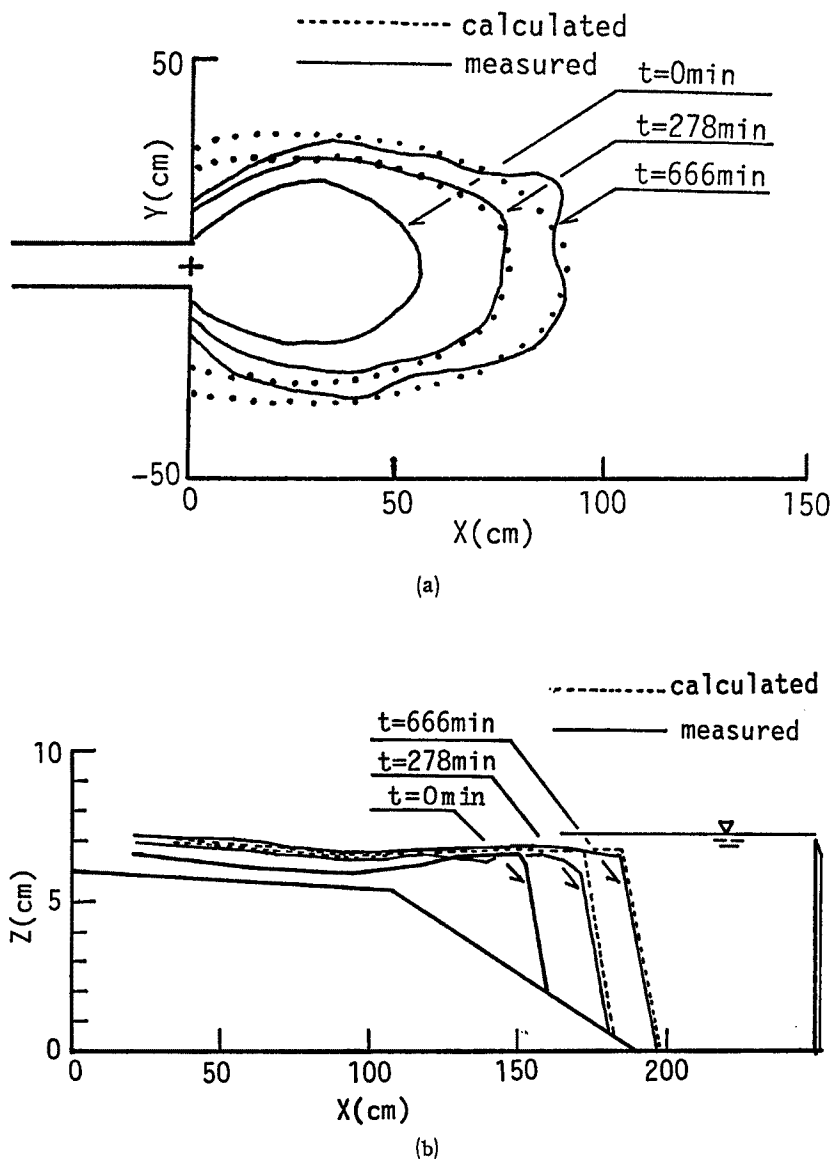


Fig.14 Comparison of measured and calculated forms of delta in Case I-1 ((a): Plan forms, (b): Longitudinal profiles).

必要があるものの、三角州の発達過程の概況をある程度表し得ているものと考えられる。

### 5. 三角州上の流路変動に関する考察

二次元水域における三角州の発達・変動過程には、大きく分けて2つの段階があり、第1段階では、明確な流路が形成されずに、三角州の全面に流れが広がって、三角州が拡大するのに対し、第2段階では、三角州上に流路が形成され、それが三角州上を激しく変動しながら、大局的には、ほぼ相似な形状を保って三角州を拡大させる。このように、ある程度三角州が発達すると、もはや砂州の全面に流れが存在し得なくなるのは、二次元水域における砂州の発達過程の大きな特徴である。

先にも述べたように、その過程を土砂水理学的に解析するには、三角州上に形成される流路幅を把握する

ことが極めて重要な課題となる。Fig. 15 に示すように三角州上には複数の流路の存在することが多いが、必ずしも個々の流路幅がわからなくても、その合計値がわかれば、水理量を概算することができる。

さて、本実験のように流路が激しく変動する場合、その流路幅を推定することは容易でないが、個々の流路において、各時点の水理量に対する流路幅の応答は比較的速く、ある法則性をもって変化しているように思われる。そこで、各時点での流路幅を、その時点の流量・勾配・粒径を有する直線流路の動的安定幅と比較してみよう。

池田・Parkerら<sup>5)</sup>によれば、一様砂の場合、動的安定幅は、

$$\frac{B}{d} \approx 12.4 \left( \frac{Q}{\sqrt{gd^5}} \right)^{0.986} I^{1.11} \dots\dots(12)$$

と表される。ここに、 $B$  は水面幅、 $d$  は粒径、 $Q$  は流量、 $I$  は勾配、 $g$  は重力加速度である。これによれば、勾配が一定の場合、流路幅は流量にほぼ正比例するから、流路が何本かに分かれても、流路幅の合計値はあまり変化しないことになる。しかしながら、派川ごとに勾配が異なる場合には、その流量配分によって流路幅の合計値が異なることになる。すなわち、勾配の大きな派川への流量配分が大きいほど、合計流路幅が増加することになる。

一方、流路幅の簡易推定式として、いわゆるレジーム公式

$$B \approx 5\sqrt{Q} \quad (\text{ただし, } m\text{-sec 系}) \dots\dots\dots(13)$$

があるが、これによると、派川の数が多くなるほど、合計流路幅が大きくなることが予想される。たとえば、流れが  $N$  本の等しい大きさの流路に分岐し、各流路において上式が成り立つものとすれば、合計流路幅は流路本数の平方根に比例することになる。

Table 3 は、各実験ケースにおける個々の流路幅ならびにその合計値の計測値を、上記の2つの方法で推定される値と比較したものである。ただし、流量配分については実測値がないため、各派川に均等に分配されているものとした。これによると、池田・Parker らによる動的安定幅の推定式が、本実験にもほぼ適合するようである。このように、非一様かつ非定常な条件下においても、一様直線流路の安定断面形状に近い流路幅が現れることは注目し値する。ただし、断面形状そのものは、先にも示したように、湾曲の影響を強く受け、外岸側が深く、内岸側が浅くなり、直線流路のものとは著しく異なっている。

一方、レジーム公式による推定幅は、実験値とはかなり隔たっており、精度が劣るようである。

次に、三角州上で流路が分岐する原因を、複列砂州の発生と関連づけて考察する。

藤田・村本ら<sup>6)</sup>によれば、モード  $m$  の砂州の形成条件は次のように表される。

$$2.2 m^{2/3} < \frac{(B/d)^{2/3}}{(h/d)} < 6.7 m^{2/3} \dots\dots\dots(14)$$

これは、主として、河岸を固定した水路での実験に基づいて導かれたものであるが、可食性の河岸を有する流路では、複列砂州が発生すると流路幅が広がり、浮州の発生すなわち流れの分岐が生じ易くなるものと考えられる。その際、流路幅がどこまで広がるか、また、分岐が生じることで、個々の派川の流路幅がいくらになるかが問題となるが、先に示した池田・Parker らの動的安定幅の算定式と動的安定水深の算定式

$$\frac{h}{d} = 0.0620 I^{-1} \dots\dots\dots(15)$$

を用いれば、モードの推定が可能となる。ここで、モードが2以上の流路は、モードが1以下になるまで分

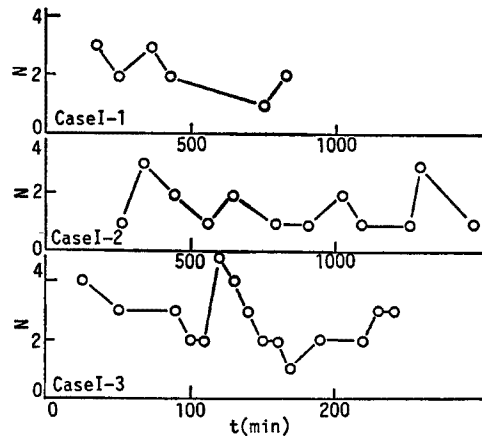


Fig. 15 Number of tributaries.

Table 3 Comparison of measured and estimated values of stream width

Case	$Q_w$ ( $\text{cm}^3/\text{s}$ )	$t$ (min)	$N$	$I_w$	$B$ (cm)	$B_e$ (cm)	$B_r$ (cm)	$\mu_B$	
I-1	360	248	1	$5.78 \times 10^{-3}$	14	13.2	9.5	2.4	
		361	2	$8.47 \times 10^{-3}$	12	10.2	6.7	2.98	
					$1.1 \times 10^{-2}$	8	13.6	6.7	4.7
		423	1	$6.8 \times 10^{-3}$	13	15.8	9.5	3.2	
		761	1	$5.78 \times 10^{-3}$	13	13.2	9.5	2.4	
I-2	98.5	1497	1	$1.03 \times 10^{-2}$	8	7.0	4.9	2.86	
		1507	1	$1.04 \times 10^{-2}$	6.5	7.05	4.9	2.86	
		1532	1	$8 \times 10^{-3}$	6.0	5.3	4.9	1.82	
I-3	200		2	$1.71 \times 10^{-2}$	10	12.4	5	6.87	
				$2 \times 10^{-2}$	9	14.8	5	9.02	
			3	$1.73 \times 10^{-2}$	11.5	8.4	4.1	5.37	
				$1.79 \times 10^{-2}$	6	8.77	4.1	5.7	
				$2.24 \times 10^{-2}$	10	8.4	4.1	8.4	
II-2	220	7	1	$4.5 \times 10^{-3}$	12	6.14	7.4	1.13	
		20	1	$9.1 \times 10^{-3}$	12	13.4	7.4	3.85	
		70	1	$9.0 \times 10^{-3}$	12	13.3	7.4	3.85	
		183	1	$6.25 \times 10^{-3}$	13	8.85	7.4	2	

$Q_w$ : discharge  $I_w$ : water surface slope  $B$ : stream width (measured)

$B_e$ : stream width (calculated by eq.(12))  $B_r$ : stream width (calculated by eq.(13))

派する傾向を有するのではないかと考えられる。

Table 3 には、そのような観点から、藤田・村本らのパラメータ  $\mu_B \equiv (B/d)^{2/3}/(h/d)$  の計算値を示しているが、上述の考え方を支持しているものとみなせよう。

## 6. 結 論

以上、掃流流出土砂による三角州の形成とその上の流路変動について長時間に及ぶ水路実験を行い、その特性を明らかにした。それらを要約すると、次のようである。

砂州の形成の初期段階では流れは噴流の様相を呈し、砂州は横断方向にはあまり広がらずに、流下方向に伸びていく。やがて砂州長が大きくなると、砂州前縁部での水流のもつ土砂流送能力が低下し、砂州の前進が一時停止して、横方向への拡大が進行する。この段階までは、三角州の外縁形状は滑らかで、かつ左右対称である。その後、三角州上に分岐流路が生じて、三角州が変形する。

三角州上の分岐流路は弯曲流路としての性質が強く、外岸側で侵食、内岸側で堆積が生じることにより、急速に直線化していく。

その流路幅は池田・parker らによる直線流路の安定断面形状の理論から得られるものに近くなっており、その安定幅および安定水深を用いれば、藤田・村本らの方法より、モードを算定することができ、分岐流路の本数ある程度推定できることがわかった。

一方、三角州の発達過程を土砂収支の観点から検討するために、砂州形状の関数近似を試みるとともに、三角州の前縁における水理量と流砂量の算定を試みた。これにより、三角州の発達過程の概況をある程度定式化することが可能となった。

今後そのメカニズムを解析することにより、より精密な予測モデルを確立していきたいと考えている。



なお、本研究の一部は、昭和61年度文部省科学研究費補助金一般研究(c)（代表者：澤井健二）の補助を得て行ったものである。

#### 参 考 文 献

- 1) Mertens, W. : On Sedimentation Process in Reservoirs, Proc. 3rd Int. Sym. River Sedimentation, 1986, pp. 1306-1311.
- 2) 田中仁・須賀堯三・高山博行・羽鳥定久：河口部の流れと河口砂州の形成に関する研究，第31回水理講演会論文集，1987，pp. 737-742.
- 3) 芦田和男・澤井健二・謝正倫：二次元水域への掃流砂の流出に伴う砂州の発達・変動過程に関する研究，第31回水理講演会論文集，1987，pp. 731-736.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) 藤田裕一郎・赤松英樹・村本嘉雄：網状流路の形成過程，第31回水理講演会論文集，1987，pp. 695-700.