

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—

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 THE INFLUENCE ON THE
DELTA FORMATION PROCESS ASSOCIATED WITH
SUSPENDED LOAD AND LONGSHORE CURRENT—

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

Synopsis

Delta formation and its associated hydraulics in stream channels have been studied experimentally. Using a wide basin incorporating with water supply channel and a longshore current generator.

Tests have been carried out under two broad categories, these being the cases with and without longshore current.

The outflow behaved like a jet at the initial stage of building up a delta. The size of delta was progressively advanced mainly in the longitudinal direction of the flow, with the width increased at much slower rate. The suspended sediment settled down at place far from the river mouth and bedload deposited at its front. After this initial stage of delta formation the advancing speed decreased and the delta began to develop laterally. Finally, the delta configuration appeared to be smooth and symmetric, with a steep inclination in the front of delta so-called "fore-set bed", then connected to a much milder slope in its lower portion, which was called "bottom-set bed".

In the second category of test, the outflow was strongly affected by the longshore current. As the center line of the outflow was forced to turn transversely, the delta appeared to be asymmetric about the original center line. Under the interaction of bed configuration and outflow, self adjustment in the plan form was apparent, resulting, in the direction of the outflow being straightened gradually.

As a result, the plan shape of the delta became symmetric similar to that obtained in the test without longshore current, but the bottom-set bed which was formed by the suspended load was always influenced by the longshore current.

The grain size distribution on the delta surface was found to be coarser in upstream and finer in downstream. Analyzing the core sampling data it was also found that the sediment in the upper layer of the delta was coarser than that in lower layer, and a distinct boundary existed between the coarser and the finer

sediment.

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。著者らは、すでに、掃流砂を対象とした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、砂州前縁部での水流のもつ土砂輸送能力が低下し、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、三角州の前縁が、高くもり上がり横断方向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を見出している³⁾。本論では、さらに浮遊砂成分を含む混合砂の流出による三角州の発達過程について、屋内実験を行い、砂州形状の時間変化、流路の形成と変動過程、土砂の分級堆積を詳細に計測するとともに、さらに河口部の外力として沿岸流を考慮し、横方向から流れを発生させ、それが三角州の発達過程にどのような影響を及ぼすかについて実験的な検討を行う。

2. 実験方法

実験は2つのケースから成っている。CASEⅢ-1は海域側の外力を無視して水位一定の条件下で浮遊砂成分を含む混合砂の流出による三角州の発達過程を調べたもので、Fig. 1に示すように幅0.3 m、長さ5.0 mの直線水路部と、幅3.0 m、長さ5.0 mの長方形水槽部とを接続した装置を用い、水路部と水槽部には、それぞれ、縦断方向に勾配1/300と1/30で、横断方向には水平に砂をしきならし、水路部上流端

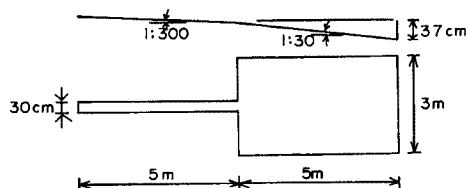


Fig. 1. Experimental equipment (case III-1).

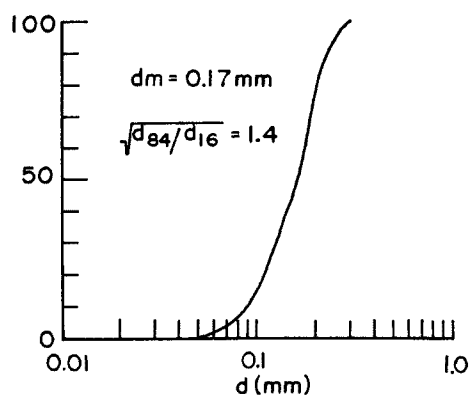


Fig. 2. Grain size distribution.

から流量5.0 l/sの給水と8.55 g/sの給砂を長時間継続した。Fig. 2は実験砂の粒度分布を示したものである。水槽部の下流端は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。CASEⅢ-2は河川から供給される底質が沿岸流および河川流の複合作用によって海岸に沿って移動することによる、三角州の発達過程への影響を調べたもので、Fig. 3に示すように、CASE 1と同様な水路かつ同じ給水、給砂、河床勾配、下流堰高の条件下で水槽の右側から全幅にわたって20 l/sの流量を給水し、沿岸流を発生させた。その際、流速を出来るだけ均

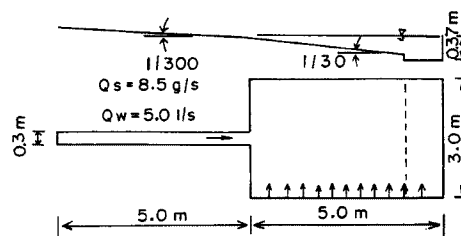


Fig. 3. Experimental equipment (case III-2).

等にするために右側に全幅堰を設け、溢水した後“ステラシート”によって整流した。平均流速は約 5.0 cm/s で底質の移動限界より低くなっており、沿岸流のみでは、沿岸方向の漂砂は存在しない。

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。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三角州の拡大過程を観察した。

主たる測定項目は、水面形状と底面形状の時間変化であるが、さらに流速分布、濃度分布、粒度分布等の測定を適宜行った。水面形状と底面形状の計測には、いずれも接触型のサーボセンサーを用い、流速分布の測定には紙片トレーサーと直径 5 mm のプロペラ流速計を併用し、濃度測定には光電式濁度計を用いて、通水中にできるだけ迅速な計測を行った。また、停水時に堆積物のコアサンプリングを行い、粒度の空間分布を測定した。

3. 実験結果

3.1 三角州の発達過程の概要

Photo. 1 は、CASEⅢ-1 における三角州の発達状況を示したもので、通水直後には、流れは噴流の様相を呈し、水路幅の 2 倍程度の広がりをもって、ほぼ水槽下流端まで浮遊砂が輸送され、流れの両側には大きい渦が見られる。堆積した土砂はただちに停止せず、ごく緩やかにではあるが、底面を移動し、砂漣が形成されている。やがて、堆積面の上昇に伴って流れは横断方向に広がるようになり、堆積範囲も広がっていく。また、明瞭な段丘が形成され、段丘肩を通過した掃流土砂は段丘前面に沿って滑落し、段丘前面はほぼ安息角を保って拡大する。前回までの掃流砂のみによる堆積では、堆積域全体がこの段丘前縁によって取り囲まれていたが、今回の実験では、浮遊砂の一部が段丘前縁を越えてさらに下流域にまで広がっている。しかしながら、浮遊砂が常に段丘前縁線の全体を通過しているわけではなく、各時刻においては、浮遊砂が通過している場所は段丘前縁線の一部に限られている。そのように浮遊砂が通過している部分では、段丘前縁線は不明瞭となり、掃流域が少し下流まで伸長する。

水路部分および三角州の上面には顕著なうろ状の砂漣が発生し、砂州全面を流れが覆っているものの、流速や流向は時間的、空間的にきわめて複雑に変化し、主流の位置も時間とともに変化する。段丘の上では、処々で間欠的に渦が生じ、浮遊砂の巻上げを伴う局所的な洗掘も発生する。しかしながら、砂州幅が拡大しても、主流部の幅はさほど変化せず、段丘の上面においても、主流以外の部分では主流部に比べてはるかに滑らかな表面形状を有している。主流の位置はさほど頻繁に変わるものではないが、時折、全く異なった方向に変化することが観察された。前回の掃流砂のみの実験では、分岐流路が形成されると、急速な直線化の生じることが多かったが、今回の浮遊砂を含む実験では、主流の方向が変化しても、流路の分岐にまでは至らず、河岸侵食過程は見られなかった。もっともこれは、まだ三角州の発達の比較的初期段階を見ているためであると考えられ、さらに時間が経過すれば、流路の分岐も生じるものと思われる。

Photo. 2 は、CASEⅢ-2 における沿岸流が存在する場合の、三角州の発達状況を河口部の真上から撮影したものである。通水直後には、流れは沿岸流の影響を受けて主流方向が左に偏っていき、ほぼ左側の堰まで浮遊砂が輸送されているが、土砂の堆積幅は水路幅とほぼ等しく、沿岸流のない場合と比べて若干せまくなっている。

三角州の発達の初期では、河川から流送されてくる浮遊土砂が沿岸流によって沿岸方向に移動し、沿岸流の影響が顕著に現れる ($t = 50 \text{ min}$)。

主流は彎曲しているので内岸側の堆積は外岸側の堆積より顕著である。それに伴って内側と外側の河床高の差が大きくなり、主流の直線化傾向の要因となる。

やがて、三角州が発達すると主流方向がだんだん中心線に近づくようになり、堆積範囲も広がってい

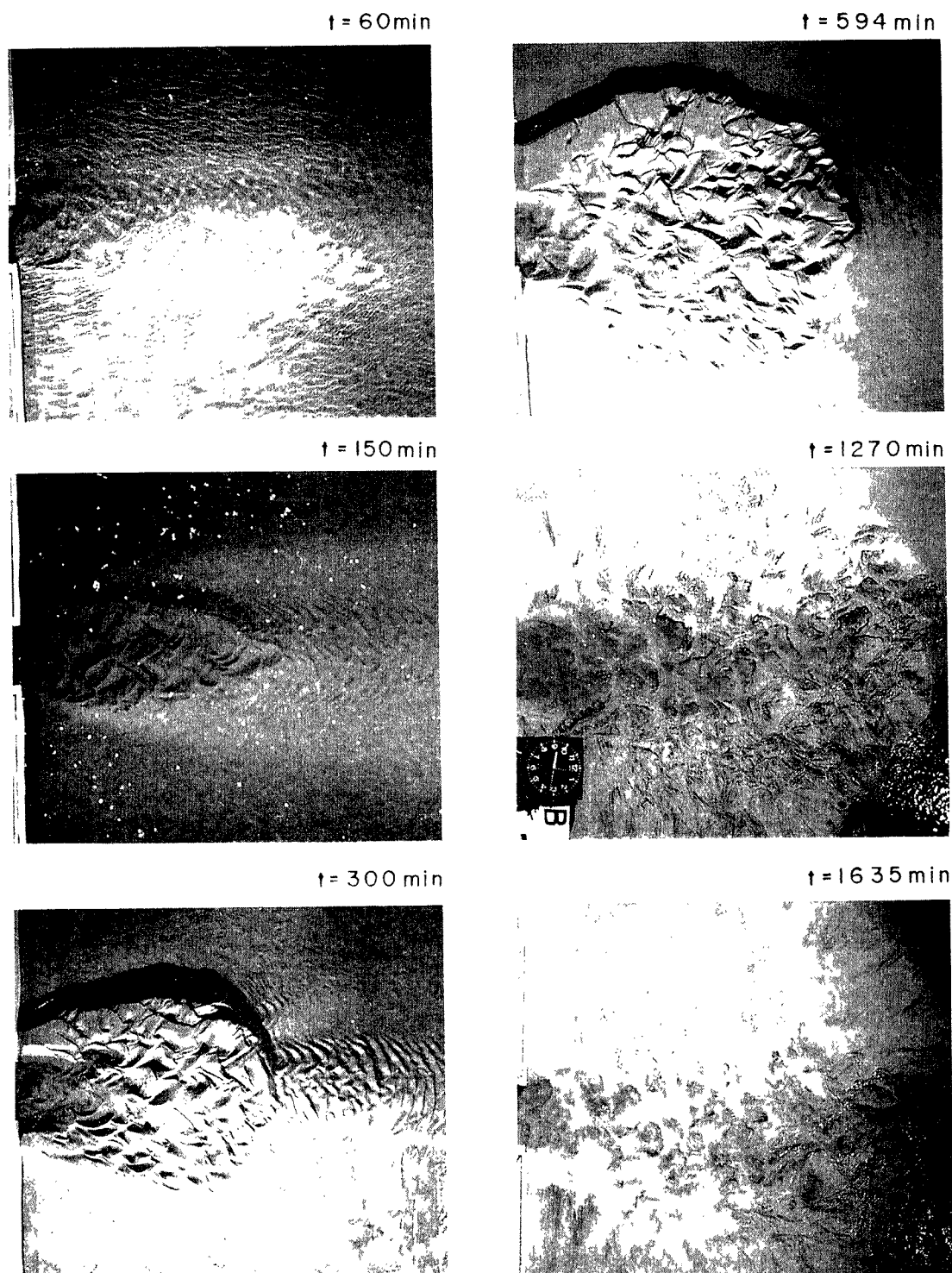


Photo. 1. Delta formation process in case III-1

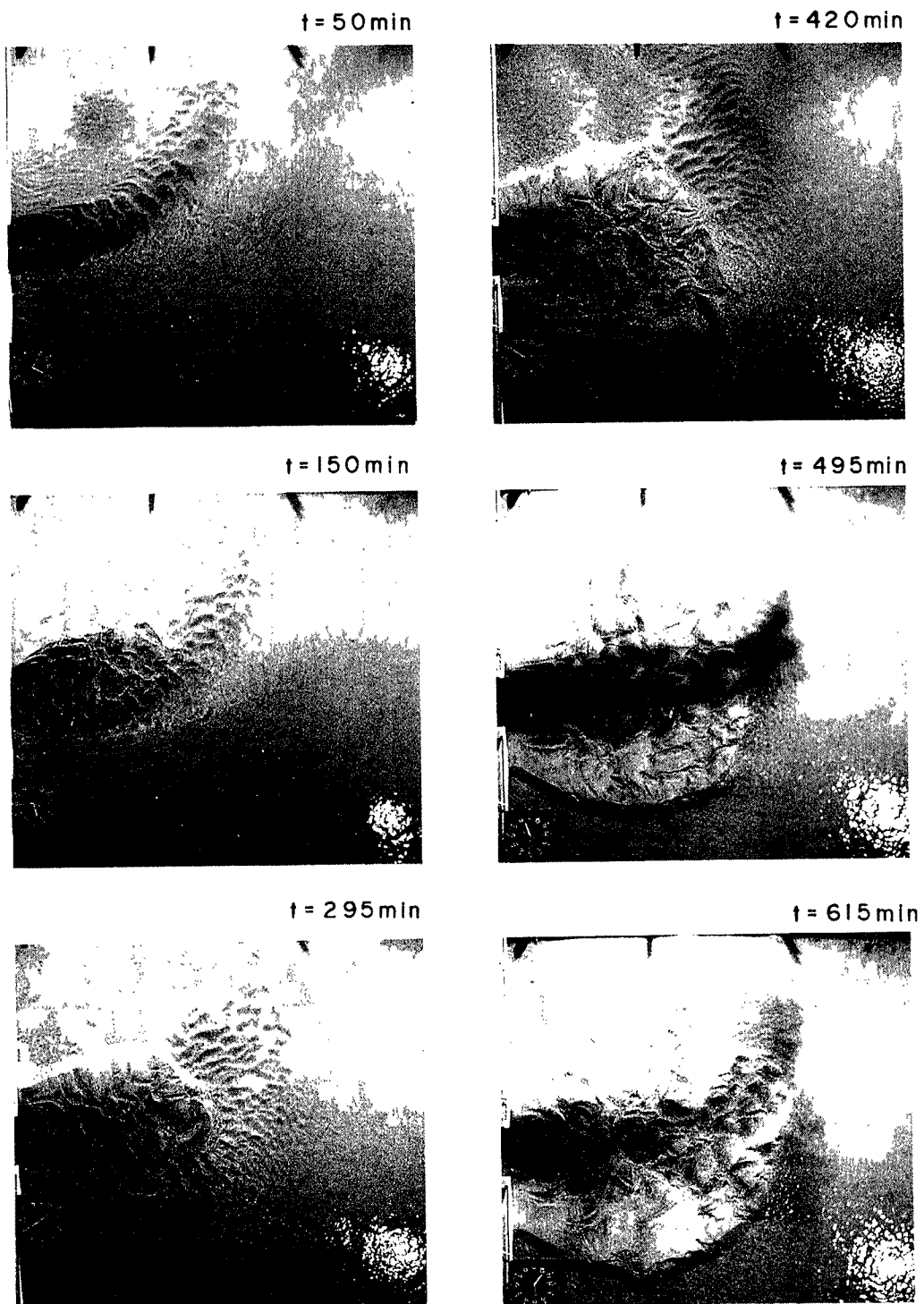


Photo. 2. Delta formation process in case III-2

る。明瞭な段丘肩はまだ形成されていないが、内岸側の堆積面は水面近傍に達している。この段階では、浮遊土砂の堆積と掃流土砂の堆積はほぼ同じ程度であり、沿岸流の影響が徐々に弱くなっている ($t=150$ min)。

堆積がさらに続くと左側に段丘肩が形成され、段丘の前面は、ほぼ安息角を保つが右側の河床高はまだ低く、段丘肩は形成されていない。このような三角州の地形変化につれて主流は一旦中心線に近づき、さらに中心線を越えて右に偏っていくようになる。 ($t=295$ min)

主流がさらに右に偏っていくと、三角州の右側にも段丘肩が形成され、段丘上の流れはほとんど沿岸流の影響を受けなくなる。

また、段丘前縁線を通じた掃流砂は段丘前面に沿って滑落し、段丘前面はほぼ安息角を保っており、CASE I とほぼ同じような堆積現象がみられる。しかしながら、浮遊砂の一部が段丘前縁を越えて下流域に広がっていくときには沿岸流の影響を受けて左に輸送される ($t=420$ min)。

まもなく、主流方向が中心線に戻るにつれて三角州は前に伸びていく。その際、掃流砂の堆積が卓越し、三角州の形状はCASE III-1における同じ通水時間の堆積形状と殆ど同じで、対称かつ相似形を保って砂州を拡大していくようになり、三角州の自己調節作用 (SELF-ADJUSTMENT) を示唆している。 ($t=495$ min)

やがて、段丘上の流路変動が生じながら全体的には、ほぼ対称で三角州が拡大していく。 ($t=615$ min)。

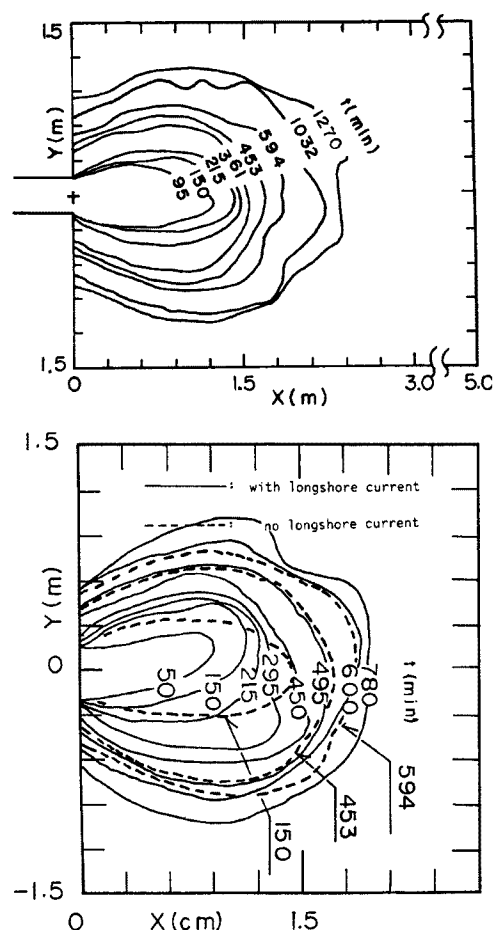


Fig. 4. Shape of delta edge.

このように、CASE III-2の実験では三角州の形状は沿岸流のない場合と殆ど変わらなかった。もっともこれは、沿岸流の強度が弱くて底質の移動限界を下回っていたためであると考えられ、さらに沿岸流が強くなり、底質の移動限界を上回ると、三角州が非対称な形になると考えられる。

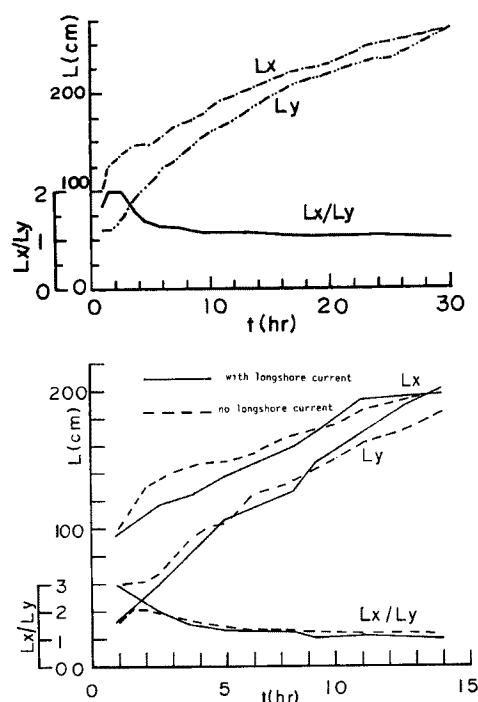


Fig. 5. Time variation of delta length and width.

3.2 三角州の平面形状

Fig. 4 は各ケースの写真情報から、砂州の輪郭をトレースして、その時間変化を示したものである。CASEⅢ-1 の場合、初期には、縦断方向への発達に卓越するがやがて時間が経過すると横方向へも広がり、円形に近くなっている。CASEⅢ-2 の初期には、沿岸流の影響が強く三角州の発達は左に偏っているがその段階の三角州の形状は沿岸流のない場合とかなり異なっている ($t = 150 \text{ min}$)。

やがて、時間が経過すると堆積幅が広がるとともにその形状の差異もなくなるようになった ($t = 600 \text{ min}$ の実線と $t = 594 \text{ min}$ の破線)。

Fig. 5 は各ケースにおける、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、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おり、前報¹⁾とほぼ同様の傾向が見られる。沿岸流の存在する場合、初期には幅 (L_y) は若干狭く、 L_x/L_y は CASEⅢ-1 と比べるとやや大きい値をもつが時間とともに各ケースとも 1.0 に収束していく。

3.3 三角州の縦横断形状

Fig. 6 は、各ケースにおける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。水路内では、ほぼ等流状態となっているが、時間とともにわずかずつ河床と水面が上昇している。河床には、波長約 35 cm、波高約 2 cm の明瞭な砂漣が形成されているが、水面、河床とも、平均的にはほぼ平行に上昇しているのが特徴的である。水槽部に入ると、一旦河床は逆勾配になり、段丘肩を過ぎるとほぼ安息角を持った前面を経た後、徐々に勾配を減じて元河床に漸近している。段丘肩の高さは、初期には河口部の河床高に近いが、三角州の発達とともに上昇し、下流水位に近くなると、ほぼ一定になっている。段丘の上

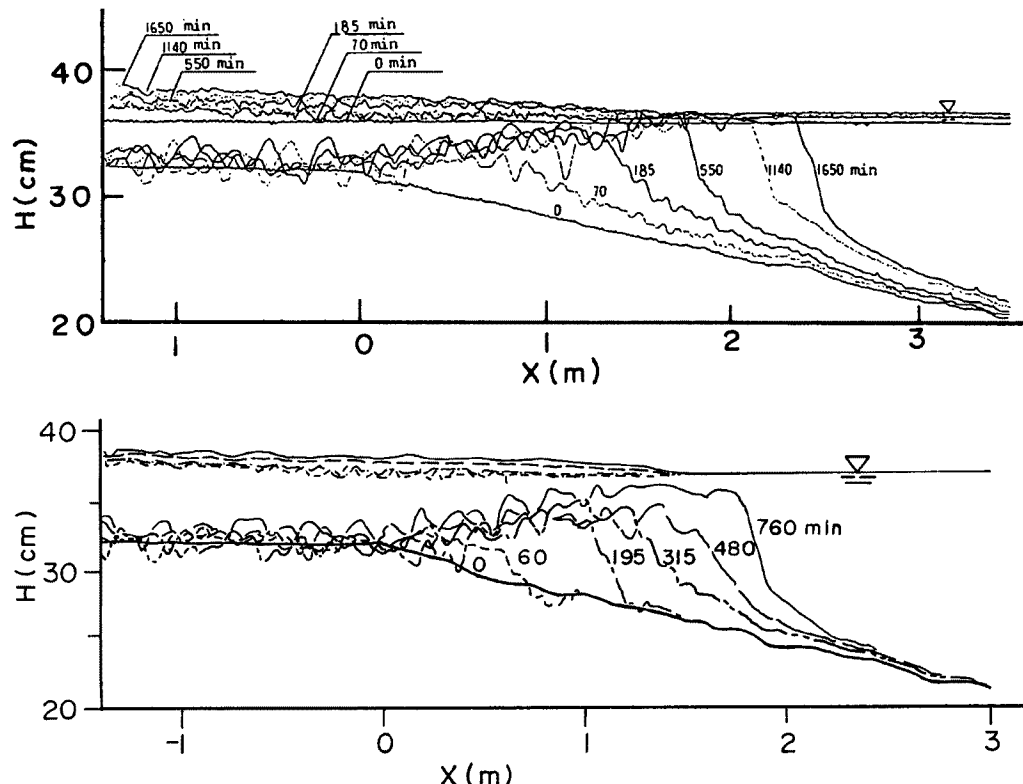


Fig. 6. Longitudinal profile of stream bed and water surface along the center line of the flume.

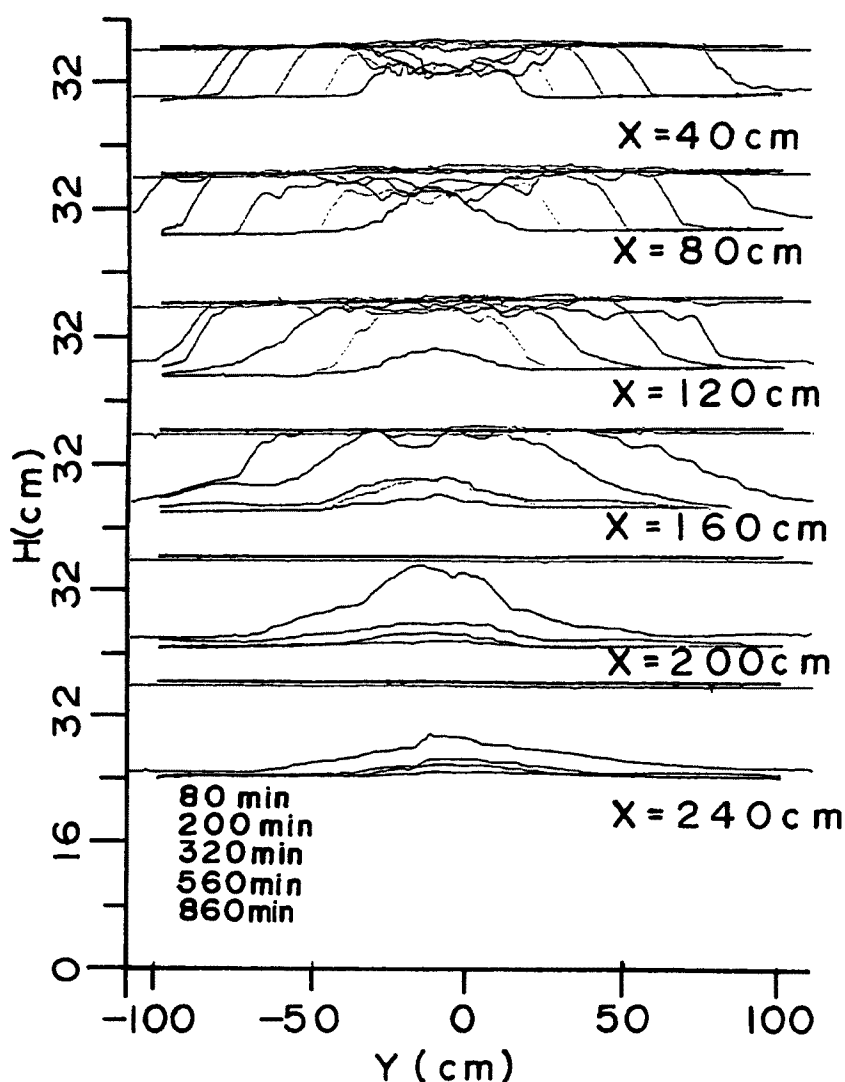


Fig. 7 (a)

面には、水路部におけるよりもややスケールの小さな砂漣が形成されて、段丘肩が不明瞭な間は、その前方にも砂漣が続いているが、段丘が発達すると、その前方の砂漣は消滅している。河口部から段丘上面に至る逆勾配区間では、ごく初期を除いて河床高の顕著な上昇は見られない。また、段丘肩よりも前方の堆積勾配は、時間の経過とともに増大しているのが特徴的である。

一方、水面形状は、多少の波立ちはあるものの、ほぼ上流の河床勾配に等しい勾配をもつ区間と、下流の堰で規定させるほぼ一定の水位の区間とに二分されるが、上流区間では下流に向かってやや勾配が小さくなっていく傾向がある。

Fig. 7 は、各ケースにおける三角州の底面および水面の横断形状の時間変化を、河口部から 40 cm 間隔で示したものである。CASEⅢ-1 の場合、段丘の断面形はほぼ台形であるが、それよりも前方の浮遊砂の堆積域では、堆積形状はつりがね状になっている。また、段丘の両側には、ほぼ周囲の水位に等しい高さのリッジが形成され、中央部分に流路の形成されているのがわかる。流路内には、3 次元砂漣による凹凸が見られるが、リッジ部分の水深はきわめて小さく、砂漣は見られない。しかし観察によると、この部分でも流砂は絶えず存在し、表面を滑るように移動していた。

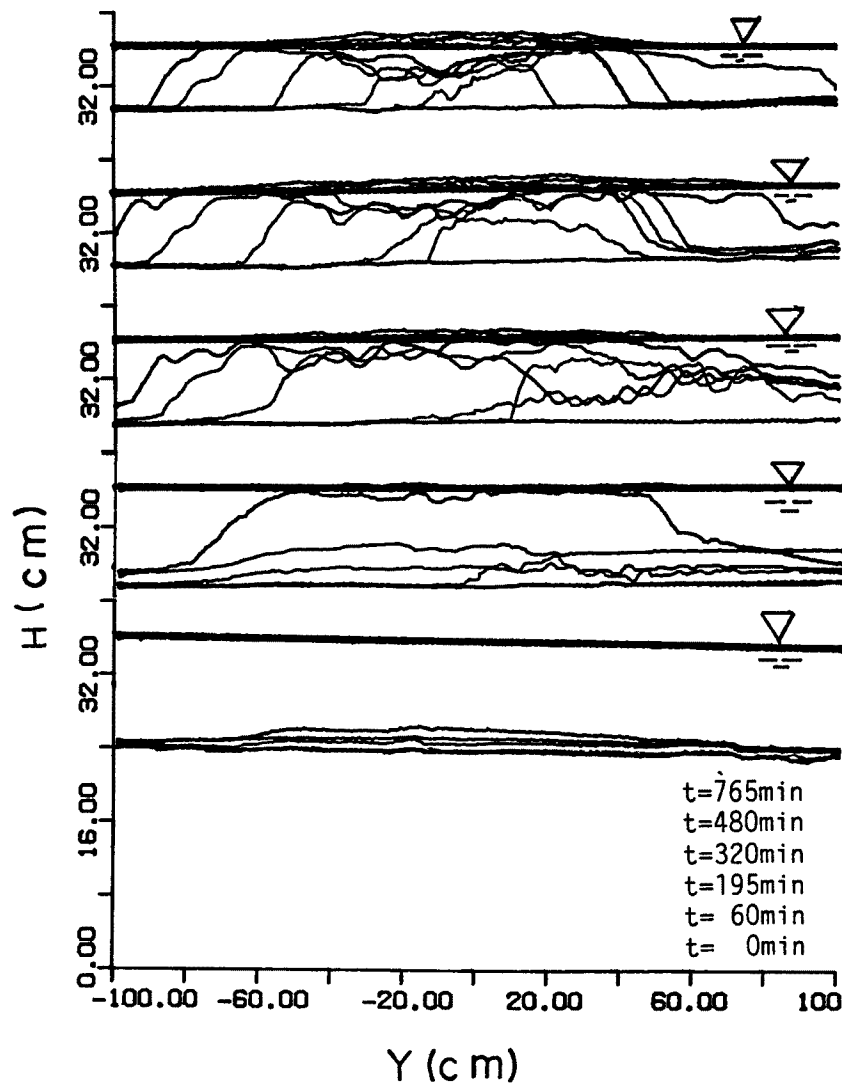


Fig. 7 (b)

Fig. 7. Cross sectional profile of delta.

主流部の水位は、周囲の水位よりもかなり高く盛り上がっており、横断方向にもある程度の勾配を有しているのが特徴である。

CASEⅢ-2の場合、段丘の断面形は、初期において彎曲の内側が外側よりかなり高くなっており、主流の直線化過程とともにその差が小さくなっていき、ほぼ対称な台形となっている。それよりも前方の浮遊砂の堆積域では、段丘上で変動したり分岐しながら流出した浮遊砂がさらに沿岸流の影響を受けて彎曲しながら重ね合わさり、かなり不規則な形状をしている。

3.4 流速ならびに堆砂の粒度分布

Fig. 8は、CASEⅢ-1水路中心線および段丘前縁線に沿ういくつかの点において計測した、流速分布を示したものである。ただし、流速はプロベラを水面における流れの方向に向けて検出している。

Fig. 9は、CASEⅢ-1の10時間通水後における、河床表層堆積砂の平均粒径の平面分布を示したものである。図からわかるように、水路部の表層堆積砂は、供給砂に比べて粗く、段丘肩に向かってしだいに細くなって供給砂の粒径に近づき、段丘肩を越えると粒径が急激に小さくなっている。

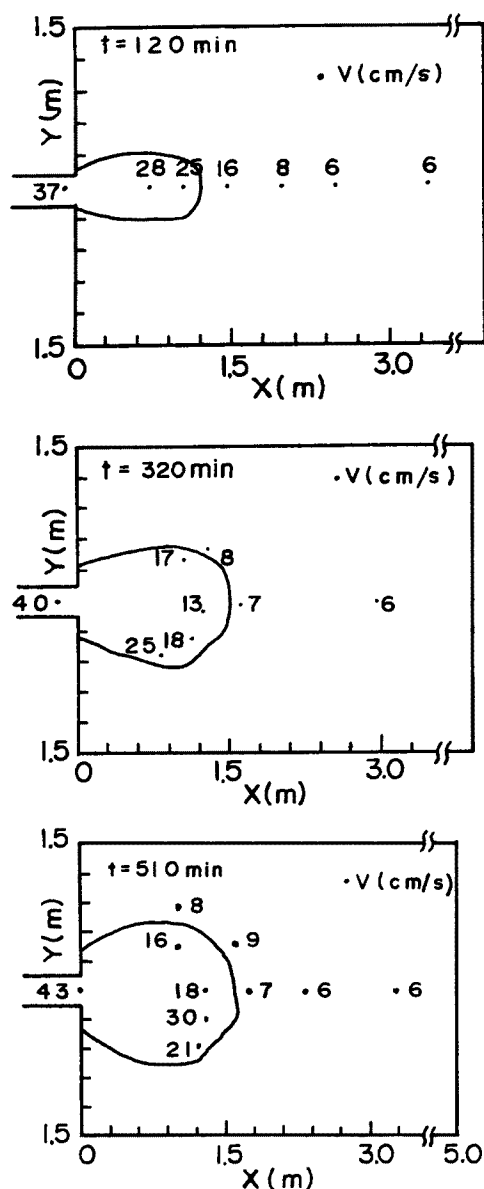


Fig. 8. Flow velocity in the basin.

3.5 流路幅

以上の過程を総合的に解析することは困難であるが、各時点での流路幅とその首振り方向の時間変化が把握できれば、1次元的な解析法によって、ある程度の定式化が図れるものと考えられる。

既に述べたように三角州の発達過程では、流路は不安定で、時間的にも空間的にも激しく変動するが、主流路の幅には、水理条件に対応した比較的安定なあるスケールが存在するように思われる。従来、レジム幅の指定式として次のような経験式

$$B_r = 5\sqrt{Q} \text{ (ただし, } m\text{-sec系)} \dots\dots\dots (1)$$

が提案されている。

一方、池田・Parker ら⁴⁾によれば、礫床一様直線流路の動的安定幅は、

$$B_U/d = 12.4(Q/\sqrt{gd^5})^{0.966} I^{1.11} \dots\dots\dots (2)$$

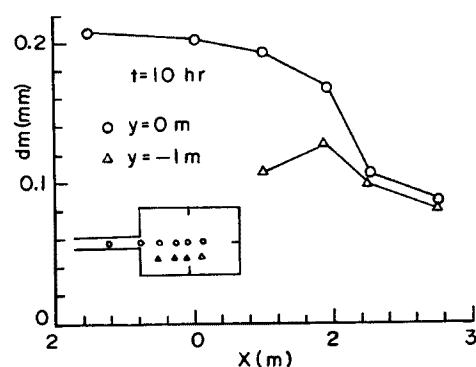


Fig. 9. Surface grain size distribution on the delta and the channel.

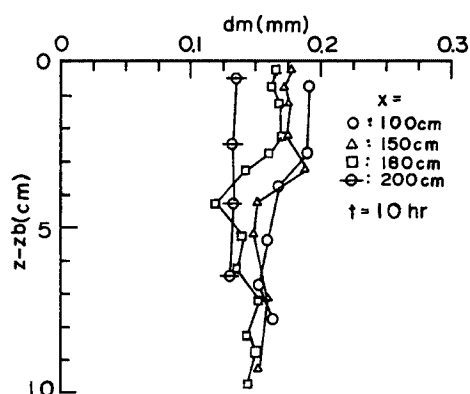


Fig. 10. Vertical grain size distribution on delta.

Fig. 10 はさらに堆積砂の平均粒径の鉛直分布を調べたものであるが、段丘肩の下部は細かく、上部は粗くなっていて、浮遊砂の堆積層と掃流砂の堆積層とのきわだった粒度の差異が現れている。また、段丘よりも下流では、全層にわたって粒径が細くなっており、掃流砂がまだ到達していないことを示唆している。

で発表される。ここに、 B は水面幅、 d は粒径、 Q は流量、 I は水面勾配、 g は重力加速度である。そこで、前回の掃流砂のみの実験ケースで、流路が明確に形成され、全流量がほぼ流路に集中していた状態に対して上記の２つの式で推定される流路幅と実験値とを比較し、両方ともある程度適合するが、池田、*parker* ら⁴⁾の式の方が適合性が高いことが明らかにされている。しかし、本実験は、三角州の発達過程の初期の段階で、流路が明確に形成するまでには至っておらず、流れは三角州の全幅にわたって流れている。また、著しい不等流状態を示している。しかし中心線に沿って、流速が速くて底面が侵食され流路のようなものの形成がすでに認められる。その幅は 40 ～ 50 cm である。

上記の２つの式を本実験にあてはめてみると、経験式（１）による推定値 $B_r = 35$ cm となる。本実験のように、流路はまだ平衡状態までには至っていない場合においても、主流幅はほぼ経験式（１）による推定値に近くなっていることは興味深い。一方、池田、*Parker* らの式によるものでは実験値とかなり異なる。これは流路の非平衡状態のためであるとも考えられるがこの点明確ではない。

4. 結 論

以上、砂州の発達・変動過程に及ぼす浮遊砂および沿岸流の影響について、詳細な実験を行い、その特徴を明らかにするとともに、解析上特に重要と考えられる流れの集中幅について考察した。今後、水理学的観点に立った予測モデルを確立するとともに沿岸流と河川流の不定常性およびそれぞれの強度を考慮した、より一般的な場での現象の解明を図っていきたいと考えている。

参 考 文 献

- 1) 澤井健二・芦田和男・謝正倫：河口部における河川流出土砂による三角州の発達機構に関する研究，第 32 回水理講演会論文集，1988，pp. 221 - 226.
- 2) 謝正倫・芦田和男・澤井健二：２次元水域における砂州の発達過程に関する研究（３）—砂州の発達・変動過程に及ぼす沿岸流の影響—，第 43 回年次講演会論文集，1988，（投稿中）
- 3) 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.
- 4) 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，pp- 117 - 126.