

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

Mechanism of Development of Alluvial Fan in an Estuary Caused by Sediment Runoff

京都大学防災研究所 澤井健二 K. Sawai

京都大学防災研究所 芦田和男 K. Ashida

京都大学 大学院 謝 正倫 C.L.Shieh

1. はじめに

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、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^{1), 2)}。本研究は、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、土砂の分級堆積等を詳細に計測し、その機構を明らかにしようとしたものである。

2. 実験方法

実験に用いた水路は、図-1に示すように、幅 0.3m、長さ 5.0mの直線水路部と、幅 3.0m、長さ 5.0mの長方形水槽部とを接続したもので、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、水路部上流端から $Q=5.0$ l/sの給水と $Q_s=8.55$ g/sの給砂を長時間継続した。図-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。

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と直径5mm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。

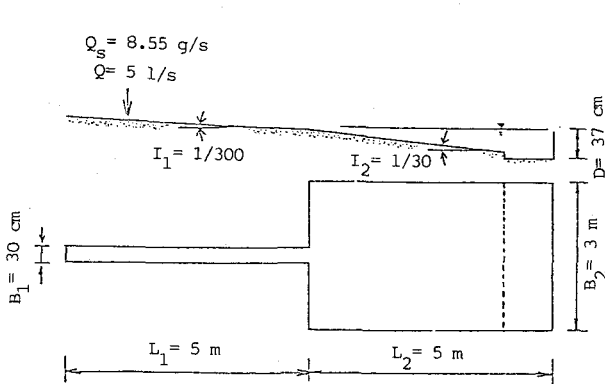


図-1 実験装置

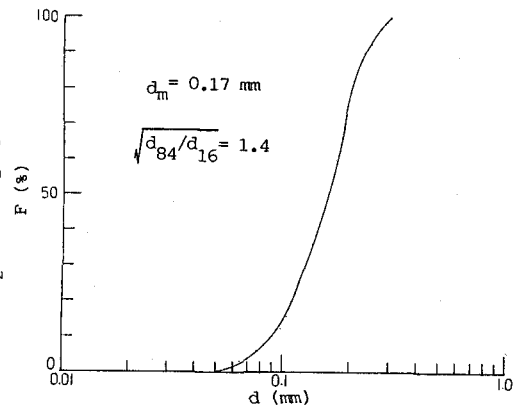


図-2 実験砂の粒度分布

3. 実験結果

3.1 三角州の発達過程の概要

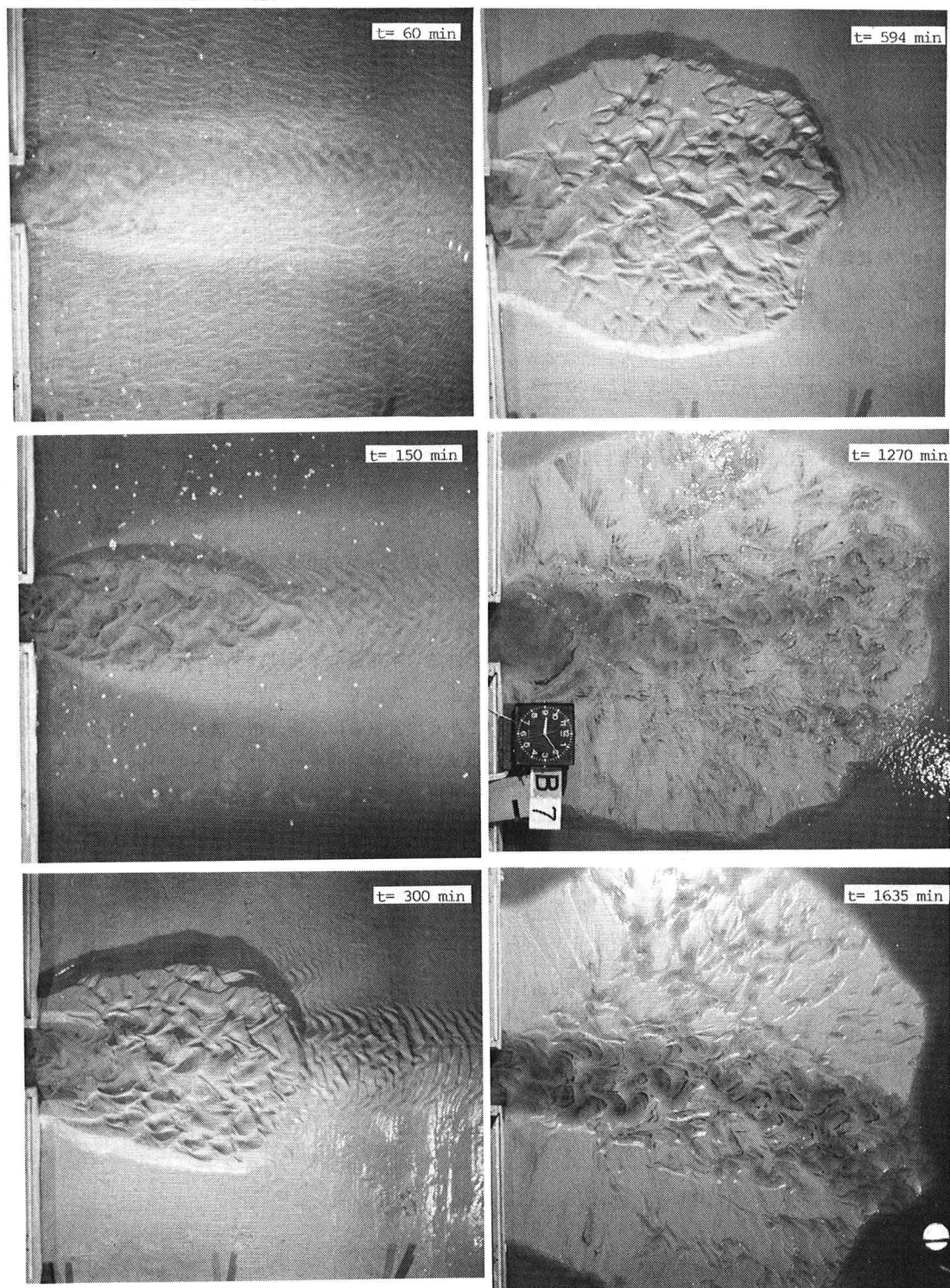


写真-1 河口部の直上から見た三角州の発達状況

写真-1は、河口部の真上から三角州の発達状況を撮影したもので、通水直後には、流水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ている。堆積した土砂はただちには停止せず、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。前回までの掃流土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ごきの砂漣が発生し、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、処々で間欠的に強い渦が生じ、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。

3.2 三角州の平面形状

図-3は、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。初期には、縦断方向への発達が卓越するが、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。図-4は、この図から砂州長 L_x 、砂州幅 L_y 、およびその比 L_x/L_y を読み取り、その時間変化をプロットしたものであり、前回までとほぼ同様の傾向が見られる。

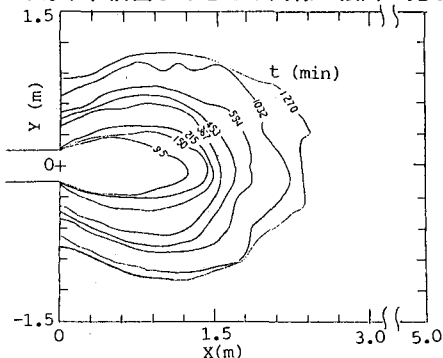


図-3 段丘前縁線

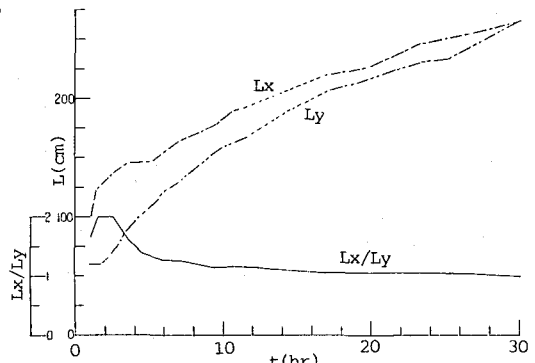


図-4 砂州長、砂州幅およびその比率

3.3 三角州の縦横断形状

図-5は、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35cm、波高約2cm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進している。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。段丘の上面には、水路部におけるよりもややす

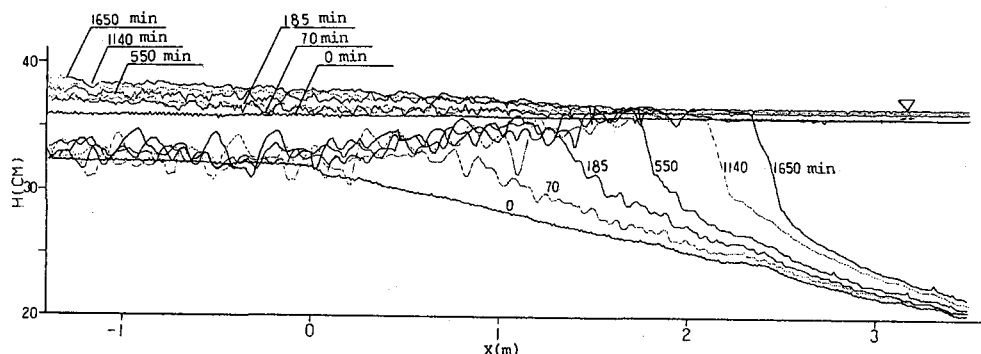


図-5 水路中心線に沿う底面ならびに水面形状

ケールの小さな砂澱が形成されて、段丘肩が不明瞭な間は、その前方にも砂澱が続いているが、段丘が発達すると、その前方の砂澱は消滅している。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、下流の堰で規定され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。

図-6は、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40cm間隔で示したものである。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次元砂澱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、砂澱は見られない。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。

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

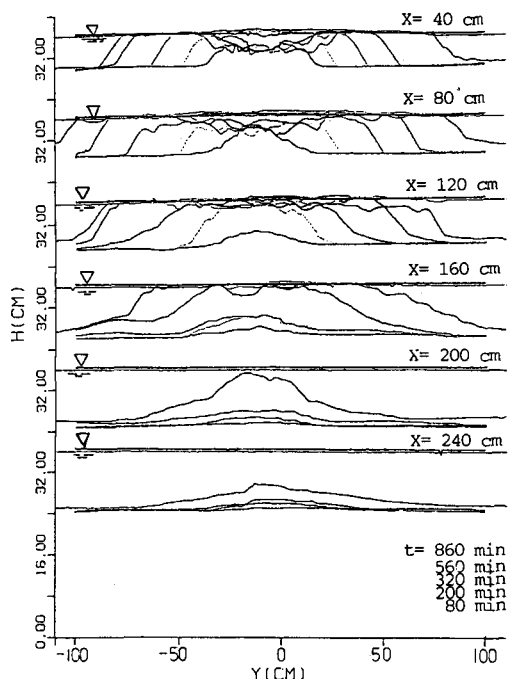


図-6 底面および水面の横断形状

3.4 流速ならびに堆砂の粒度分布

図-7は、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、流速は水面における流れの方向にプロベラを向けて検出している。

図-8は、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。

図-9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る、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。

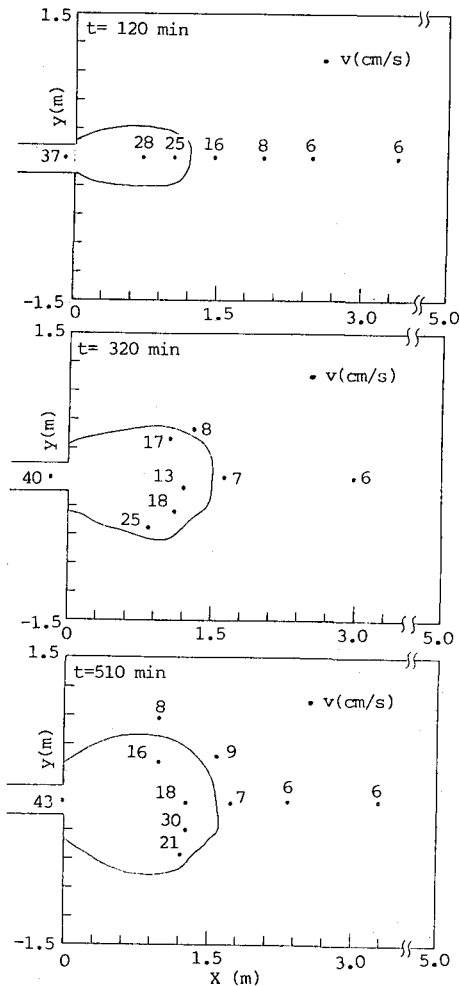


図-7 流速分布

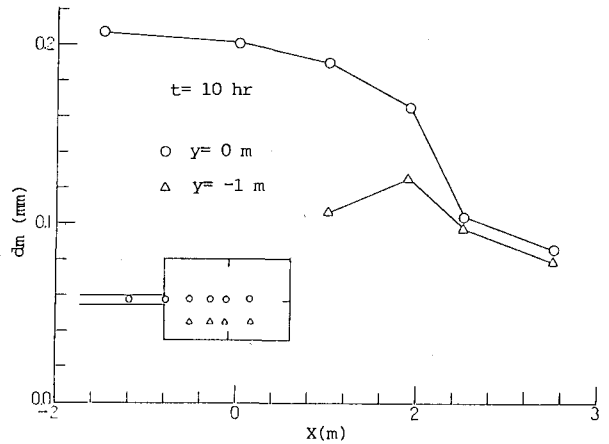


図-8 河床表層の粒度分布

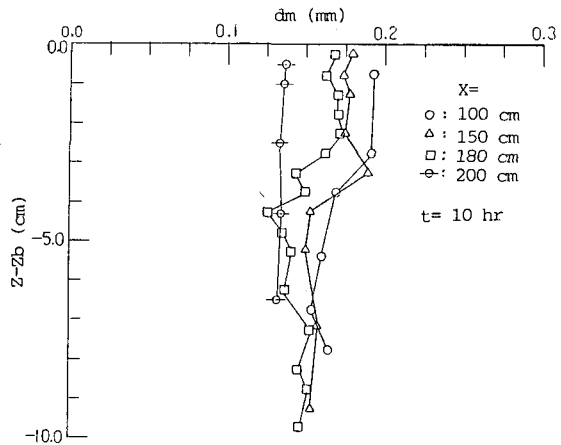


図-9 堆砂の鉛直粒度分布

4. 流路幅に関する考察

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周期が把握できれば、一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、主流には水理条件に対応して比較的安定したあるスケールが存在するように思われる。従来、平衡流路幅の簡易推定式として、レジーム式

$$B_r = 5 \sqrt{Q} \quad (\text{ただし、} B \text{ は } m, Q \text{ は } m^3/s \text{ で表す}) \quad (1)$$

があるが、これを本実験にあてはめると、 $B_r = 35 \text{ cm}$ となる。本実験の範囲では、流路が明確に分離するまでには至っておらず、また、著しい不等流状態であるにもかかわらず、主流幅はほぼそれに近くなっている。

ところで、池田・Parkerら³⁾によれば、礫床一様直線流路の動的安定幅は、

$$B_u/d = 12.4 (Q/\sqrt{g d^5})^{0.988} I^{1.11} \quad (2)$$

で表される。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。そこで、前回の掃流砂のみの実験ケースについて、上記の2つの式で推定される流路幅と実験値とを比較すると、表-1 のようである。ただし、分岐流路の流量配分については実測値がないため、各流路に均等に分配されている

ものとした。これによると、実験値はレジーム式よりも池田・Parkerらの式による推定値に近くなっている。いずれにせよ、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、注目に値する。ただし、本実験のように、浮遊砂が存在する場合には、式(2)を用いることはできない。

表-1 流路幅および流路本数

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

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・赤松・村本⁴⁾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。

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

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、浮き州の発生すなわち流れの分岐が生じやす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

$$h/d = 0.0620/I \quad (4)$$

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以下になるまで分派する傾向を有するのではないかと考えられる。表-1には、そのような観点から、藤田らのパラメーター $\mu_B = (B/d)^{2/3} / (h/d)$ 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。

5. あとがき

以上、浮遊砂を含む河川流出土砂による三角州の形成過程について、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、沿岸流の影響を考慮した、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) 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。
- 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—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。
- 3) 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。
- 4) 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。