

# 供給土砂量の変化が流路形態に及ぼす影響に関する実験的研究

## Experiments on the Effect of Sediment Supply on the River Bedforms

泉 典洋<sup>1</sup>・高畑知明<sup>2</sup>

Norihiro IZUMI and Tomoaki TAKAHATA

<sup>1</sup>北海道大学大学院工学研究科教授

<sup>2</sup>北海道大学大学院工学研究科修士課程1年

### 要 旨

北海道をはじめとする日本全国の河川で砂州および流路の固定化に伴う河床低下が大きな問題となっている。その原因については(1)高水流量の減少に伴う植生の繁茂(2)大量の土砂採取(3)上流からの土砂供給量の減少などのいずれか、あるいはいくつかの複合であると考えられているが、個別の河川によって、どの要因がどの程度支配的であるのかは異なると考えられるものの、それを定量的に明らかにするには至っていないのが現状である。本研究では、中でも土砂供給量が河床変動に与える影響を対象にする。平坦河床であれば土砂輸送能は河床に働くせん断力のみによって決定されるが、砂州が発生したり網状流路になったりすると、砂州や流路の形状によって土砂輸送能が複雑に変化することが考えられる。そこで本研究では、川幅および流量、河床材料一定の条件の下で、上流からの供給土砂量を変化させた場合、流路形態がどのような影響を受けるのかを実験的に明らかにした。実験によれば、土砂供給量が多くなると網状化が激しくなり、より多くの流路へと分岐する様子が観察された。土砂供給量が少ない場合、河床は低下傾向を示し、砂州は単列的になり流路の固定化が進む。

《キーワード：砂州；流路形態；網状流路；河床低下；給砂量》

## 1. はじめに

近年の地球環境に対する人々の関心の高まりに伴って、河川環境への関心も高くなっている。20年ほど前に提案された「多自然川づくり」という考え方が人々の間に浸透しつつあるのはその端的な表れと言ってもよいかも知れない。河川では、水や土砂が上流域から下流域、周辺海域へと輸送され、下流の状況を考える際には上流の影響を無視することができないことから、河川の環境を考える際には、水や土砂の流れの連続性を意識することが大切であることは言うまでもない。

近年、北海道をはじめとする日本全国の河川、特に一級河川において、流路の単列化・固定化とそれに伴う河床低下が問題となっている。極端な河床低下は河床砂礫の流出を伴い、それによって水生昆虫が生息できなくなったり、魚類が産卵できなくなったりするなど、特に河川の生態環境を大きく変化させることが判ってきている。特に極端な河床低下を防ぐことは河川の良い生態環境を維持するためにも重要なことである。

流路の単列化・固定化および河床低下の原因については、高度経済成長期（昭和30 - 40年代）に活発に行われた河道内での大量の土砂採取によるというもの、ダムの建設による高水流量の減少に伴って進行した河道内植生の繁茂によって砂州と流路が固定化したことによるというもの、ダムや砂防ダムによる土砂供給量の減少によって河床低下が進行したことによるというものなど諸説あり、確実な原因については未だに断言できるような研究成果は存在していない。が、おそらくはそれらの複合的な原因によるというのが最も現実に近いのではないだろうか。今後は、個別の河川についてどの原因がどの程度寄与していたかを定量的に明らかにすることで、河床低下の原因をより詳細に明らかにすることが必要になる。

治水や利水のための多目的ダムや、土石流や流出土砂量を調整するための砂防ダムの建設が進むと、下流に供給される土砂量が減少するのは間違いがない。そういう意味で、供給土砂量の減少が河床低下にある程度の影響を及ぼしているのは間違いがないが、供給土砂量の変化は河床形態に大きな影響を及ぼすことから、河床縦断形状への影響はそれほど単純ではない。川幅を一定と規定しても、供給土砂量によって縦断形状が変化すると水深が変化するためアスペクト比が変化し、砂州のレジームも変化し、流路形態が大きく変化する可能性がある。流路形態に応じて土砂輸送能力が変化することから、流路形態の変化まで考慮しなければ土砂供給量の変化に対する河道の応答を正確に把握することは困難である。上流からの土砂供給量が減少した際、時間経過と共にどのような変化が生じ、河床低下や流路の単列化につながっていくのか等、未だ良く判っていない現象については、まず実験を行うことで現象を観察することが重要である。

本研究では、上流からの土砂供給量の違いによって流路形態がどのように変化していくのかを実験により明らかにすることを目的とする。本研究では、水路幅、粒径、流量が等しい条件下、給砂量の違う3パターンの実験を行い、時間ごとの流路・砂州の変化、下流端の流出土砂量および、実験終了後の河床高を明らかにした。

特に土砂供給量が多い扇状地河川には網状流路が良く見られると言われている<sup>1)</sup>。網状流路とは図.1の札内川のような横断面方向に複数の流路をもつ流路形態である( 図中流れの方向は南から北)。そこで本研究では網状流路を対象とし、土砂供給量の違いが網状流路の流路形態にどのような影響を与えるのかを実験的に明らかにすることを目的とした。

## 2. 実験概要

### (1) 実験装置

全長14.2m、幅80cmの水路( 図.2)に7cmの厚さに混合砂を敷き詰めた。使用した砂の粒径加積曲線を図.3に示す。図からわかるように、混合砂の中央粒径は0.77mmで標準偏差は1.6である。網状流路の

形成条件で詳しく述べるが、より少ない流量で水路床の砂が移動するように、河床勾配は今回使用する水路で可能な最大勾配の1/48に設定している。上流端と下流端には砂の流出を防ぐため、高さ7cmの板を横断方向に設置している。また、下流端で流量や流砂量を測定しやすくするために、図.4のように下流端を狭めている。給砂する砂は河床と同一の混合砂を乾燥させたものを用意した。



図.1 札内川（北海道帯広市，Google Earthより）



図.2 実験水路

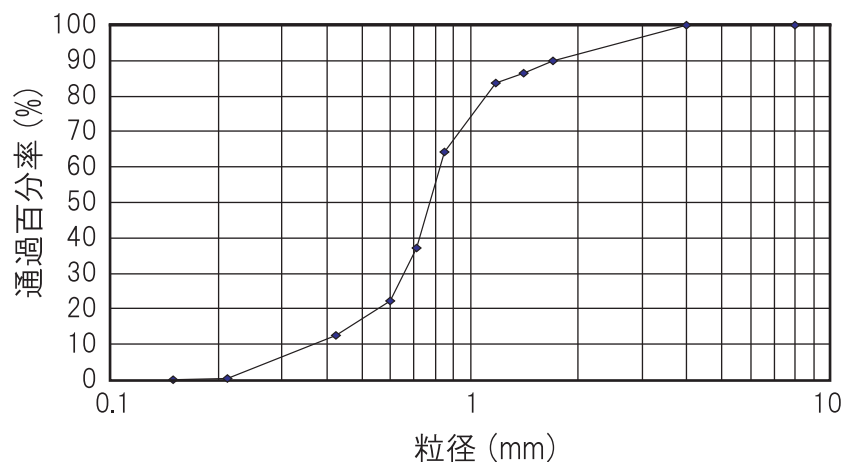


図.3 粒径加積曲線

## (2) 実験条件

本研究で対象とする網状流路の形成条件は次のようになる。網状流路は鱗状砂州が形成されているときの流路形態である。鱗状砂州は複列砂州が河川の横断面方向に何列も並んだ砂州である。複列砂州の形成条件は村本ら<sup>2)</sup>によって求められている（図.5）。特に影響が大きいのは川幅水深比  $B/h$  ( $B$ : 川幅,  $h$ : 平均水深) であり、この値が大きい時、すなわち川幅が広く水深が浅い河川に見られる。川幅水深比  $B/h$  をできるだけ大きくしたいが、水路幅  $B$  は変えることができないので、水深  $h$  を小さくしたい。浅い水深でも砂を移動するように、河床勾配を本実験水路が可能な最も急な勾配である1/48に設定した。



図.4 実験水路下流端の様子

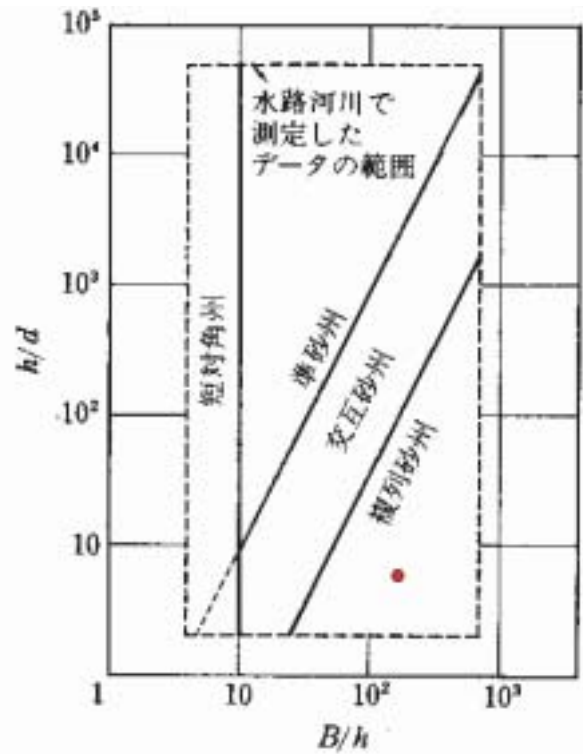


図.5 中規模河床形態の領域区分<sup>2)</sup>

表.1 実験条件

水路幅	80 cm
水路長	14.2 m
河床勾配	1/48
河床材料	中央粒径 0.77 mm の混合砂
流量	0.37 l/sec

表.2 給砂量

No.1	120 g/min
No.2	60 g/min
No.3	0 g/min

そして、上で説明した網状流路の形成条件を満たす流量を予備実験により求めた。予備実験の結果、流量は0.37 l/secで実験を行うことにした。この時の水深は5mmほどであるので、川幅水深比 $B/h = 800/5 = 160$ 、相対水深 $h/d = 5/0.77 = 6.5$ となり、今回の実験の条件は図の赤丸で示される。

また、給砂量の最大量を予備実験により求めた。120g/minで給砂すると上流端で閉塞しないことが分かったので、最大給砂量は120g/minとした。

本研究のパラメーターである給砂量は以下の3パターンである。

- No.1 . 120 g/min
- No.2 . 60 g/min
- No.3 . 0 g/min

実験条件をまとめると表.1および表.2のようになる。

### (3) 測定事項

測定した事項は以下の通りである。

1. 1時間毎の流路・砂州の形態（通水してから1.5 h, 2.5 h, 3.5 h, 4.5 h, 5.5 h, 6.5 h）
2. 30分間毎の下流端からの流出土砂の乾燥重量（給砂開始後から）
3. 実験終了後（6.5時間後）の上流端から1 m, 4 m, 8 m, 12 m 地点の横断面の河床高



1 については、流れを分かりやすくするため、水に着色してから水路の上から写真を撮影した。その写真をBytescout Graph Digitizer Scoutを用いて砂州をプロットし、Excelを用いて砂州の形状を描いた。2 については、下流端にさらしで覆ったザルを設置し流砂を採取した。十分乾燥させた後で重量を測定した。3 については、実験開始前と実験終了後の河床高の変化を測定した。

### 3. 実験結果

#### (1) 砂州・流路の形態

各実験の1時間ごとの流路・砂州の様子を図.6, 7, 8 に示す。いずれの図でも水は左から右へ流れている。給砂量の違いによって流路・砂州形態の時間変化に違いが見られるのが分かる。

図.6a, 図.7a, 図.8a から分かるように、給砂量が最も多いNo.1 (図.6a) では上流端から2 mのところまで水路幅全体を流れているのに対し、No.2 (図.7a), No.3 (図.8a) では上流端から2 mのところでは流路が狭まっている。

No.2, No.3 の実験ではこれ以降、上流端付近で水路幅全体に流れることはなかった。それに対し、No.1 では3.5 h 経過後も水路幅全体を流れていた (図.6c)。No.1 で流路が狭まり始めたのは4.5 h 経過後であった (図.6d)。

実験終了時 (6.5 h) では上流端周辺において河床が低下することで砂州のように見えるところを除くと、No.1 では上流端より2 m 地点から、No.2, No.3 では上流端より4 m 地点から砂州が形成され、分岐流路が形成されていることがわかる。

#### (2) 下流端流砂量

通水後0.5 時間 (給砂開始時) から30 分間ごとの下流端からの流砂量は図.9の通りである。

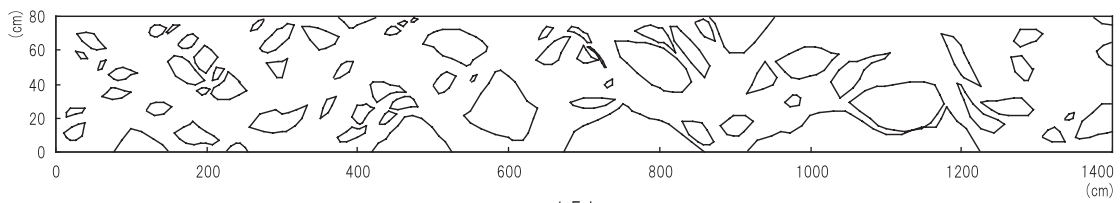
各グラフとも流砂量は時間ごとに大きく増減している。各グラフとも右上がりとなっており、流砂量は増加傾向にある。また、流砂量の最大値は各条件とも3000 g ほどでほぼ等しい。

下流端からの流砂量の総量は図.10の通りである。図中「0」が右岸、「80」が左岸である。また実験開始前より上昇した場合は「+」、低下した場合は「-」と表した。流砂量の総量は給砂量の最も大きい場合が大きくなったが、給砂量が2 番目に多い場合の流砂量の総量が最も少ないという結果になった。

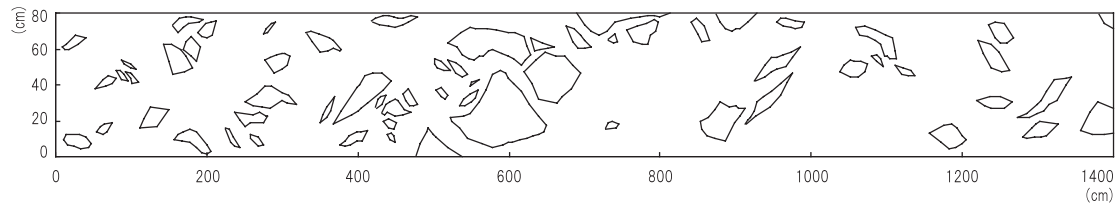
図.11a, b, cの各河床高を平均した各横断面の平均河床高は表.3のようになる。図.11a および表.3から上流端から1 m 地点の河床低下度は給砂量が少ないほど大きいことが分かる。また表.3から、上流端から8 m, 12 m 地点では給砂量の最も多いNo.1 の河床上昇度が最も小さいこと、No.2 の条件のとき4 m, 8 m, 12 m 地点の河床上昇度が大きいことが分かる。

以上の結果をまとめると次のようになる。

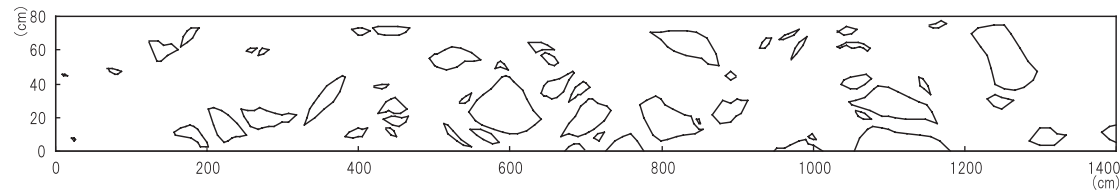
1. 給砂量が最も多いNo.1 は上流端付近で水路幅全体に流れている時間は3.5 h であるが、それより少ないNo.2, No.3 は1.5 h の時には流路が狭まっている。
2. 給砂量の最も多いNo.1 は6.5 h 経過時に上流より2 m 地点から流路が分岐しているのに対し、それより少ないNo.2, No.3 の場合、上流より4 m 地点から流路が分岐している。
3. 給砂量の違いは下流端からの流砂量の最大値に対して大きな影響を与えない。
4. 給砂量が少ないほど、上流端から1 m 地点では河床低下度は激しくなるが、8 m, 12 m 地点では給砂量が最も多いNo.1 の河床上昇度が小さい。
5. 給砂量が2 番目に多いNo.2 の条件が4 m, 8 m, 12 m 地点の河床上昇度が大きくなる。



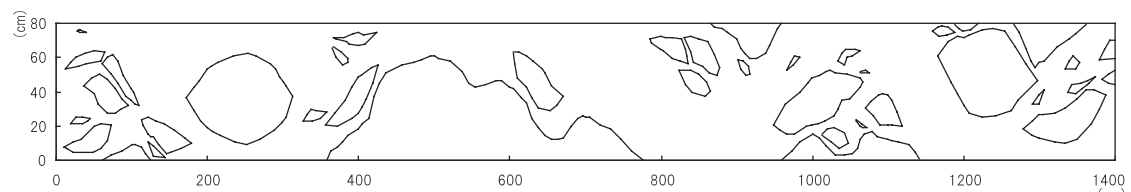
1.5 h  
(a)



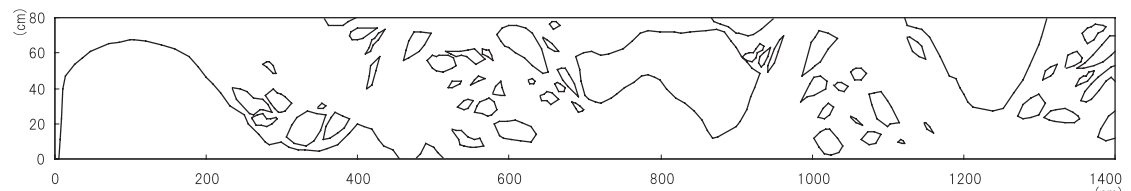
2.5 h  
(b)



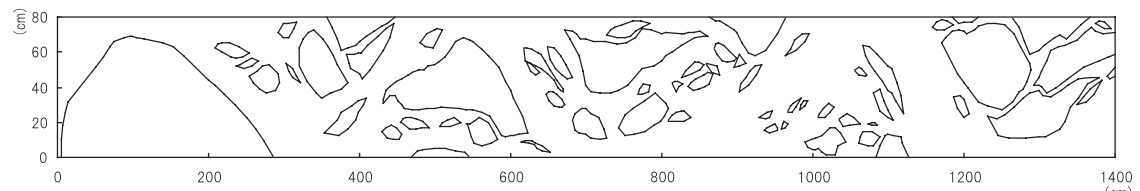
3.5 h  
(c)



4.5 h  
(d)



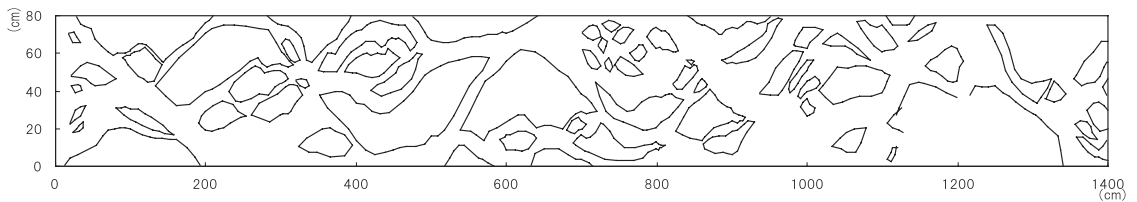
5.5 h  
(e)



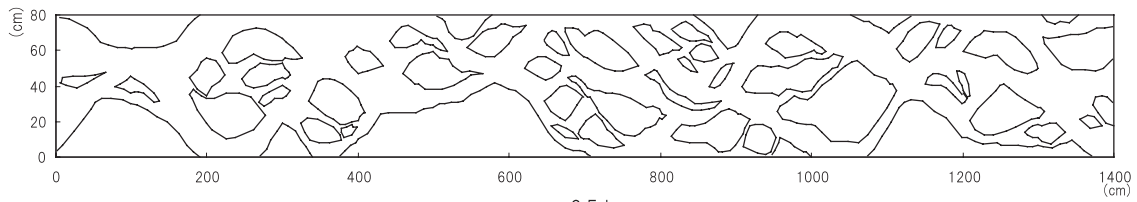
6.5 h  
(f)

図.6 砂州および流路形態 . ケースNo.1 .

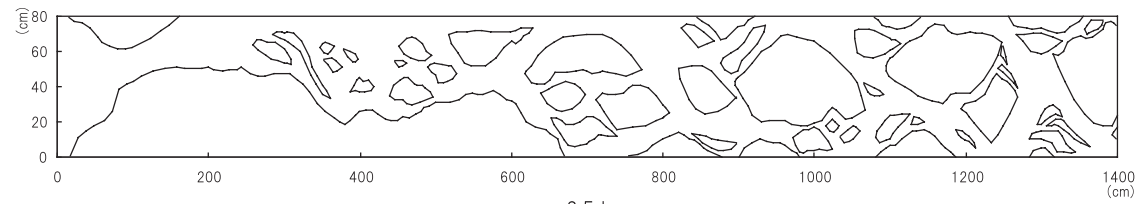
(a) 1.5 時間経過時 , (b) 2.5 時間経過時 , (c) 3.5 時間経過時 ,  
(d) 4.5 時間経過時 , (e) 5.5 時間経過時 , (f) 6.5 時間経過時 .



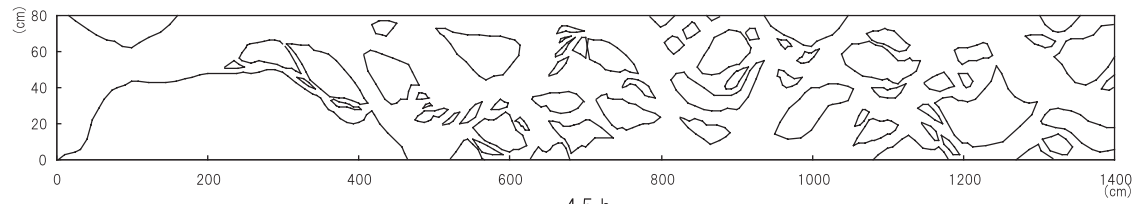
1.5 h  
(a)



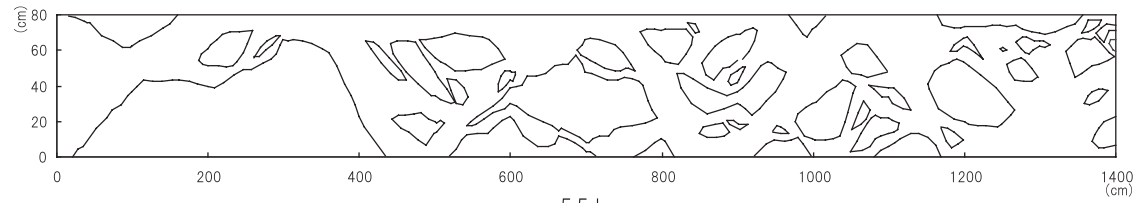
2.5 h  
(b)



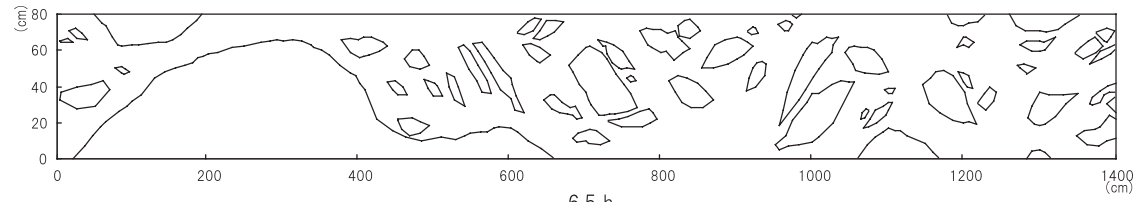
3.5 h  
(c)



4.5 h  
(d)



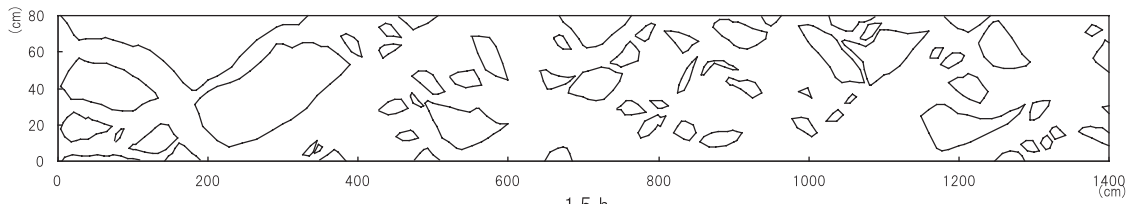
5.5 h  
(e)



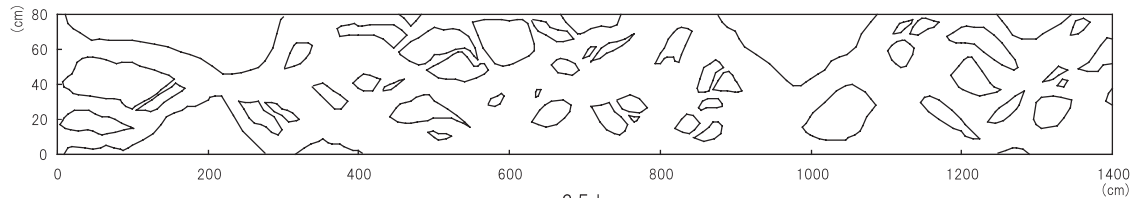
6.5 h  
(f)

図.7 砂州および流路形態 . ケースNo.2 .

(a) 1.5 時間経過時 , (b) 2.5 時間経過時 , (c) 3.5 時間経過時 ,  
(d) 4.5 時間経過時 , (e) 5.5 時間経過時 , (f) 6.5 時間経過時 .



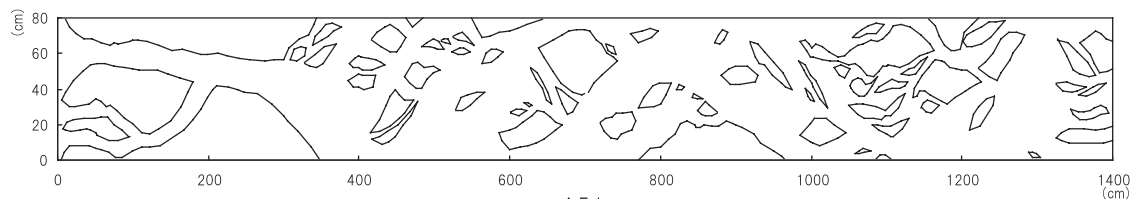
(a)



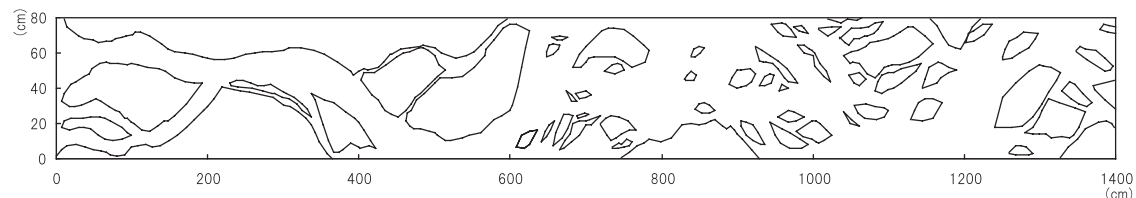
(b)



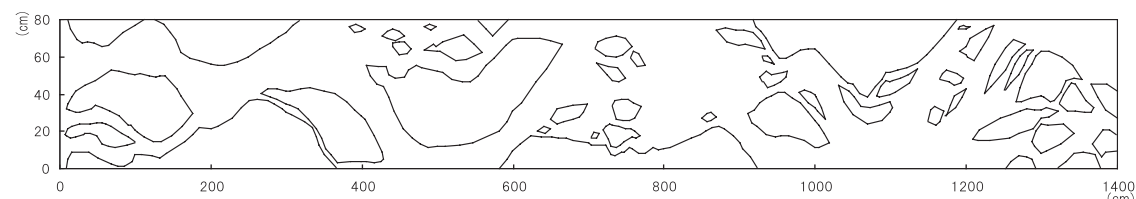
(c)



(d)



(e)



(f)

図.8 砂州および流路形態 . ケースNo.3 .

(a) 1.5 時間経過時 , (b) 2.5 時間経過時 , (c) 3.5 時間経過時 ,  
 (d) 4.5 時間経過時 , (e) 5.5 時間経過時 , (f) 6.5 時間経過時 .



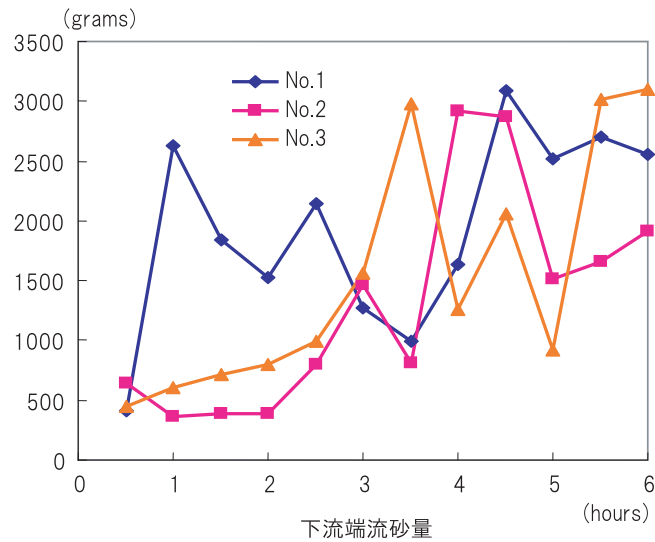


図.9 下流端流砂量の時間変化

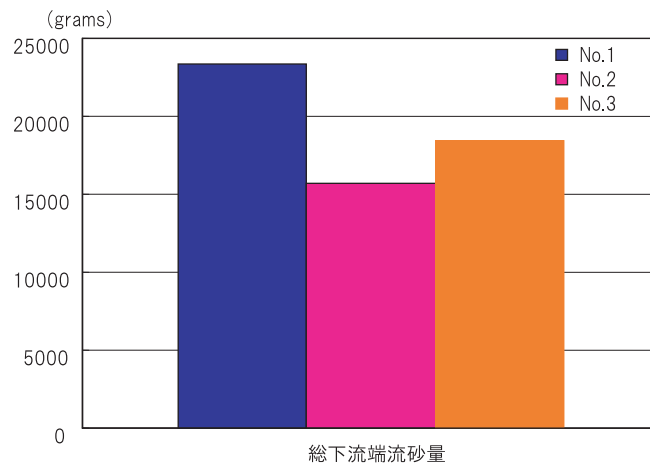


図.10 総下流端流砂量

表.3 各断面における平均河床高の変化

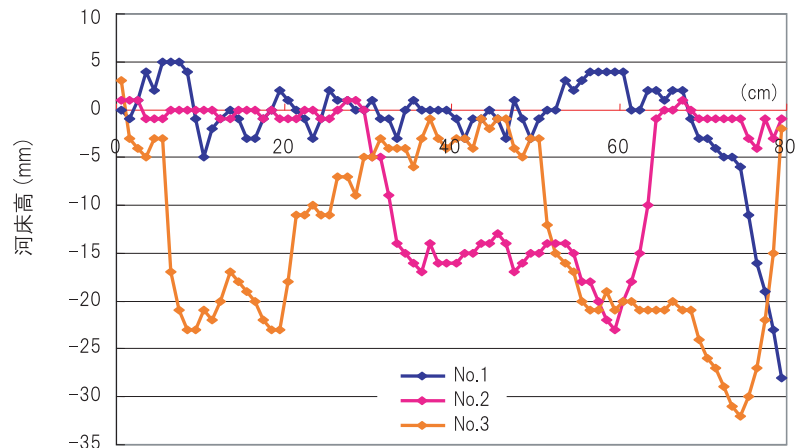
	No.1	No.2	No.3
1 m	-1.2 mm	-6.7 mm	-13.6 mm
4 m	-0.5 mm	+1.4 mm	-3.6 mm
8 m	+1.6 mm	+2.5 mm	+2.7 mm
12 m	+0.5 mm	+2.4 mm	+1.1 mm

\*\*実験開始前より上昇した場合は「+」、低下した場合は「-」と表した。

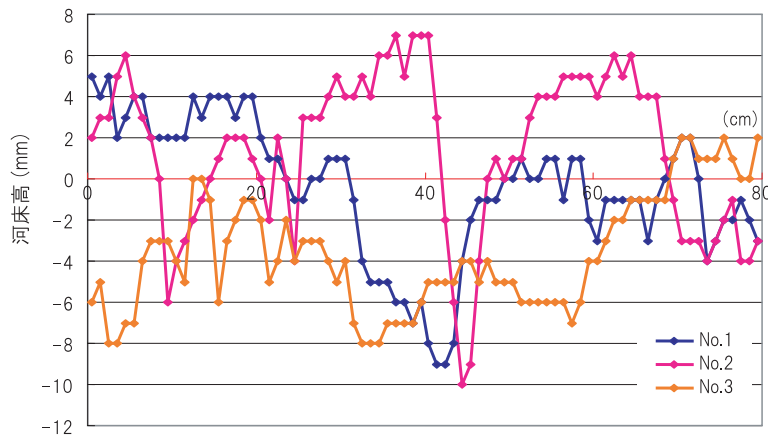
#### 4. 考察

実験結果より明らかとなった河床が混合砂の場合の網状流路形成プロセスは次のように要約できる。

1. 直線状の水みちが拡幅する。
2. 拡幅により水深が浅くなって掃流力が低下し、大粒径の砂粒子が堆積する。
3. 堆積が進むと流れが左右に分かれる。慣性力の大きい大粒径の砂粒径は堆積し、砂州を作る。それに対し、小粒径の砂粒子は分岐した流れによって輸送される。



(a)



(b)

図.11 実験終了時における河道横断面形状．上流端から(a) 1 m 地点，(b) 4 m 地点．

網状流路形成プロセスは前項の通りであるが，給砂がない，または少ない場合には上流端付近では以下の現象が起きる（図.13a.e）．

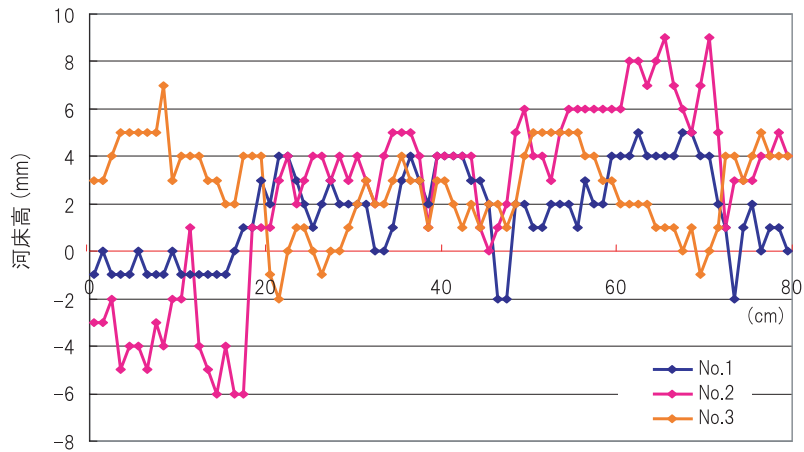
1. 始めは水路幅全体を流れている（図.13a）．
2. 流路が形成され始める（図.13b）．
3. 給砂がない，または少ないと河床から砂が流出し水路は深くなる（図.13c）．
4. 水路幅全体には流れなくなる（図.13d）．
5. さらに深く掘れ，流路が拡幅しにくくなる（図.13e）．

流量が一定で流路幅が狭まると水深が大きくなって，大粒径の砂粒子も堆積しにくくなる．よって，流路の拡幅，分岐が起こりにくくなる．しかし，図.7 および8 から分かるように，各条件とも4 m 以下では流路が分岐している．これは上流から流出してきた砂粒子が堆積したためだと思われる．

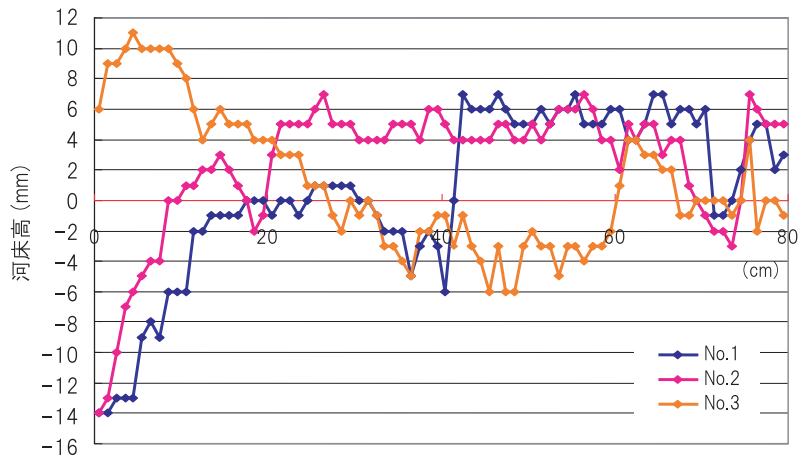
給砂量の違いは，実験時間内では，上流側の流路形態にしか影響を与えなかったため，30 分間の下流端からの流砂量の最大値が各実験ともほぼ等しいという結果になったと考えられる．

次に，No.1（給砂量が120 g/sec）の8 m，12 m 地点での河床の上昇度が最も小さかったのはなぜだろうか．先で述べたように 給砂量の最も多いNo.1 は3.5 h 経過時でも上流端付近では流路幅全体を流れている（図.6c）．つまりこれはその付近の水深が浅く掃力が小さいことを意味し，下流への流砂量がNo.2（給砂量が60 g/sec），No.3（給砂量が0 g/sec）より小さいからであると考えられる．

また，No.2（給砂量が60 g/sec）の4 m，8 m，12 m 地点の河床上昇度が大きいのは，給砂量が少なく流路幅が狭まったため，給砂した砂が下流へ運搬されやすかったためだと考えられる．



(c)



(d)

図.11 (前頁からのつづき) 実験終了時における河道横断面形状 .  
上流端から(c) 8 m 地点 , (d) 12 m 地点 .

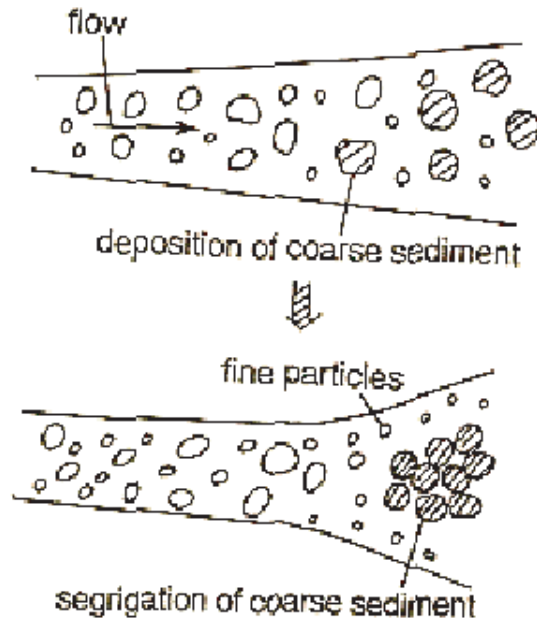


Fig. 16. Bifurcating of stream and sediment sorting due to deposition of coarse sediment.

図.12 混合砂の流路分岐プロセス<sup>3)</sup>

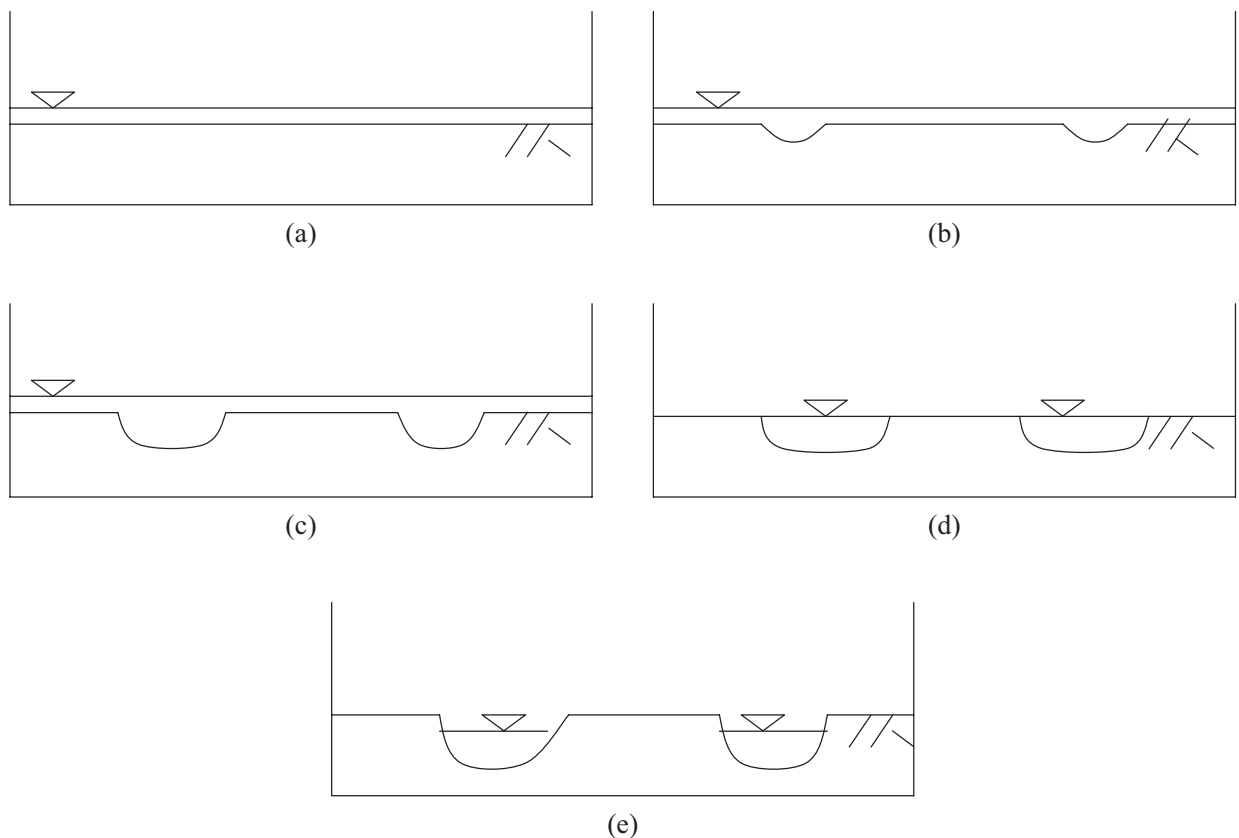


図.13 給砂量が少ない場合の上流端付近での河床変動 .

## 5. 結論

網状流路が形成される条件で給砂量が少ない場合，上流端付近で河床の砂が流出し侵食傾向となるため，流路幅は狭く，水深は深くなり，流路が分岐しにくくなる．よって，流路の分岐によって複数の水みちが顕著になるのは給砂量が多い場合の下流側である．

給砂量が少ないほど上流端から1 m 地点では河床低下度は大きくなるが，流路幅が減少し水深が深くなると，掃流力が大きくなって掃流砂量が多くなり，給砂量が最も多い場合より下流側の河床上昇度は大きくなる．

給砂量の減少では上流付近（4 m）までしか今回の実験時間では顕著な違いは見られなかった．河床低下や流路の単列化には，流路幅を狭めたことによる影響も考えられているので，今後は流量や給砂量が同じ条件下で，流路幅の違いで流路形態がどのように変化するかを調べる必要がある．

## 参考文献

- 1) 高橋裕，河川工学，東京大学出版会，2004
- 2) 村本嘉雄・藤田裕一郎，中規模河床形態の分類と形成条件，第22回水理講演会論文集，1978
- 3) 芦田和男・江頭進治・里深好文・後藤隆之・寺西直之，網状流路における混合砂礫の分級と流路変動，京都大学防災研究所年報，第34号，1991