

流量, 土砂流入条件が 砂州の変動に及ぼす影響の一考察

A STUDY ON THE TRANSFORMATION OF BAR MORPHOLOGY AFFECTED BY FLOW AND SEDIMENT DISCHARGE

寺本敦子¹・辻本哲郎²
Atsuko TERAMOTO and Tetsuro TSUJIMOTO

¹正会員 博(工) 松江工業高等専門学校 環境・建設工学科 助手
(〒690-0865 島根県松江市西生馬町14-4)

²正会員 工博 名古屋大学大学院工学研究科 教授 社会基盤工学専攻
(〒464-8603 愛知県名古屋市千種区不老町)

These days, physical environment of the river have been changed appreciably. The reasons of such changes may be dam constructions and gravel mining and so on. Actually, the bar morphology and vegetated area in the downstream of a dam have dramatically changed, and they are caused by the change of flow and sediment discharge due to the existence of a dam. The purpose of this paper is that the impacts of the change in sediment and flow discharge on the transformation of the bar morphology will clarify. Numerical simulations and flume experiments were conducted, and we demonstrated that the estimation of the relationship between sediment and flow discharge is important for prediction of the sand bar transformation.

Key Words : Bar formation, transition of bar, sediment discharge,

1. はじめに

近年, ダム建設等人為的インパクトにより河道が著しく変遷している河川が多く存在する. 例えば, 手取川においては, 手取川ダムの建設, 砂利採取により, 上流からの河床低下, それに伴うアーマー化が進行しており, 滞筋の固定化, 砂州の単列化, 河道内樹林化が起きている^{1) 2)}. こういった河道内物理環境の変化といえる現象は, 年最大流量の減少, 流況の平滑化などダムによる流量の変化, ダム下流河道への土砂供給の減少, 土砂の質の変化, 砂利採取による河床低下などが原因とされており, さらに別の現象を促進するなど, それぞれの現象が相互に影響しあって複雑に絡み合っている場合が多い. こういった河道内物理環境の変化を解明し, それぞれの現象に対する対策を講じるためには, 主な原因を知り, 現象が起こる基本的なメカニズムを知る必要がある.

本研究においては, 砂州形成河道の変化に着目し, 主に土砂供給量, 流量により砂州地形がどう変化するかを検討する.

これまでの砂州に関する研究としては, 砂州の発生領域や平衡形状の議論など数多く検討されており (例えば, 林ら³⁾, 藤田・村本⁴⁾, 黒木ら⁵⁾), どれも平衡土砂量

が供給されているときの平衡状態での議論が展開されており, 上流端境界条件 (土砂供給条件) が平衡状態とは異なる河道, 例えば河床低下傾向にある河道での砂州形成を扱ったものは少ない. しかし, 実河道での砂州地形は, 必ずしも, 同一流量や流量と河道条件に対応した平衡土砂量の供給条件下で形成されておらず, 物理環境の変化を論じるためには, どんな土砂, 流量供給条件のもとに形成されていた河道が, それらの条件が変化することによりどう変化しているかと言った議論が重要となる.

こういったものを検討した例として, 長田ら⁶⁾ は, 様々な河道条件下での交互砂州の挙動を検討し, 供給土砂を減少させた場合には, 砂州は間延びし波高が低くなることを, 数値解析手法を用いて示している. 一方で, 内島・早川⁷⁾ は, 形成された砂州上に砂州を形成した流量よりも少ない流量を流すことにより, 実河川に近い流路の状態が移動床実験でも形成されることを示し, 小流量を考慮することの重要性を示している. また, 近年では, 桑村・渡辺⁸⁾, 三輪ら⁹⁾ により非定常流量下での砂州の動態が調べられている.

既往の研究から, 河道の安定, 不安定を考える際に河道を流れる流量や土砂供給条件の検討が重要であることが分かるが, 近年実河道で顕著となっている砂州モードの減少, 高低差の拡大が起きている状況の説明にまで

は到っていない。また、内島・早川⁷⁾の結果によると、必ずしも一定流量では平時の河道状態の形成は考えられないことが分かる。実河川においては、出水時の砂州の形成は常に平衡状態まで到達しておらず、かつ、河道に流れるそれぞれの流量に対してその流量と河道条件にみあった平衡土砂量が供給されているわけではないと推測される。河道内地形は河道に流れる流量と上流から供給される流砂量により河道内地形は形成されるため、河道地形の変遷を知るためには、流量と供給土砂量の関係とそれによる砂州地形の変化を知ることが重要となる。

そこで、本研究では、実験および数値解析によって供給土砂量、流量を変化させた砂州動態の検討を行い、近年河道で起こっている現象解明に向けて考慮すべき事項を提示することを目的とする。

2. 一定流量通水時の土砂供給量の違いによる砂州形成の違い

ここでは、河床低下傾向と上昇傾向の水路において、一定流量通水条件のもとでは、どのように砂州が形成されるかを実験および数値解析を用いて検討する。

(1) 移動床実験による土砂供給量の違いによる砂州動態の違いの検討

(a) 実験条件

まず、幅50cm、長さ20mの可変勾配水路を用いて勾配を1/100に設定し、移動床実験を行う。水路上流側に2m、下流側に1.5mの固定床を、水路中央に16.5mの移動床区間を設置する。上流には給砂区間を設けそこに設定した土砂量を均等に投入するように給砂を行う。移動床区間には厚さ8cm程度で平均粒径が0.88mmの4号珪砂（一樣粒径河床）を敷き詰める。

本実験で検討する条件は、流量 $Q=1.4\text{ l/s}$ のケースAの水理条件（表-1）において、土砂供給量のみを変化させたものを用いる。これは、交互砂州が形成される条件内である。ケースA1では土砂供給をせずに、ケースA2では、平衡土砂量（ケースAで給砂した給砂量）の3倍程度で土砂を供給し、砂州の動態の比較を行う。図-1に実験と同条件で河床低下、上昇の様子を一次元河床変動計算により求めた2時間毎の河床の結果を示す。また、実験時間は、ケースA1は2.5時間、ケースA2は2時間とした。実験中、水位、河床形状の計測を超音波式変位センサ（KEYENCE製；UD-300）、CCDレーザ変位センサ（KEYENCE製；LK-2000）を用いて行った。

表-1 実験条件

Case	流量 (l/s)	土砂供給量 ($\times 10^3\text{ l/s}$)	等流水深 (cm)	無次元掃 流力 τ_*
A	1.4	4.10	0.86	0.059

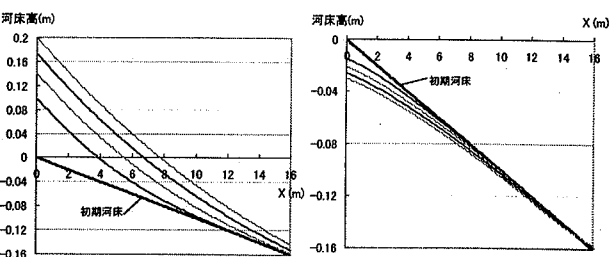


図-1 一次元河床変動計算による河床上昇と河床低下の様子

(b) 実験結果

図-2～4に実験結果から得られた河床高コンターの時間変化を示す。これらによると、実験開始から30分後にはどの実験ケースも交互砂州が形成され、最初は何れも砂州の進行速度が速いことがわかる。しかし、90分後から120分後にかけて砂州の進行速度は土砂供給量が多ければ多いほど早くなっている。特に河床低下、または河床上昇による影響が現れやすい上流側においてその傾向が強く出ている。また、形成される砂州地形としては、形状、砂州波高共に大きな違いは無い。図-5に $Y=5\text{ cm}$ 縦断面での高低差に代表させた砂州波高の時間変化を示すと、土砂供給量が多いほど若干波高の発達が早い、特に顕著な波高の変化は見られなかった。

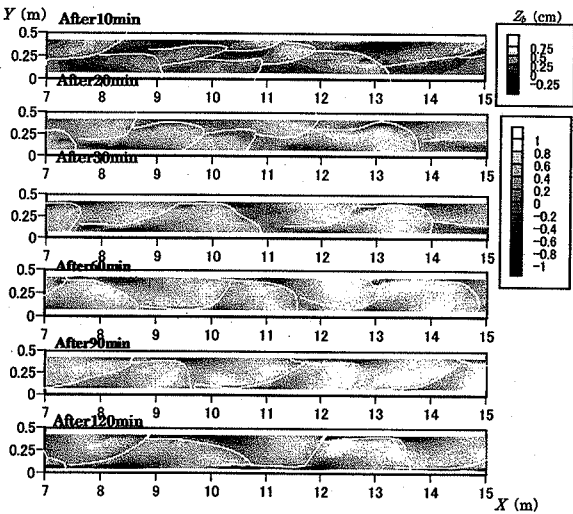


図-2 ケースAにおける河床時間変化

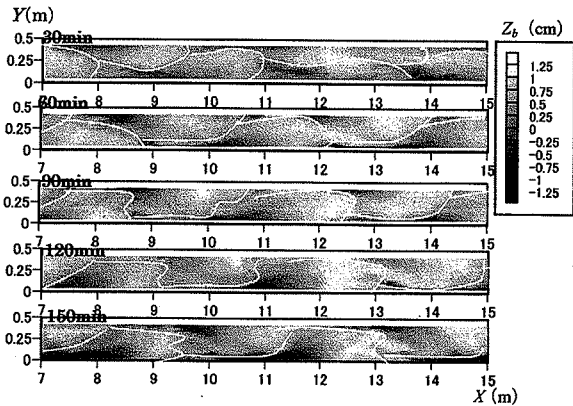


図-3 ケースA1における河床時間変化

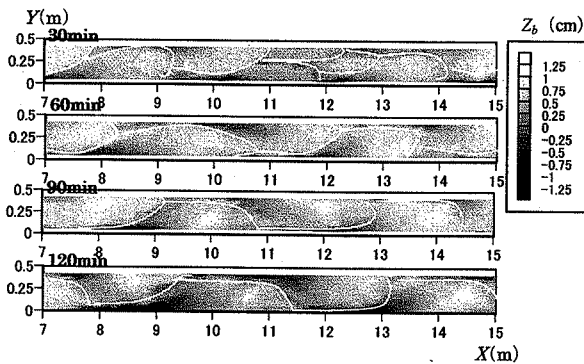


図-4 ケースA2における河床時間変化

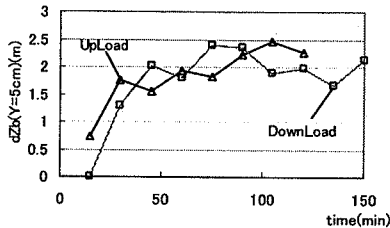


図-5 Y=5cm 縦断面における高低差時間変化

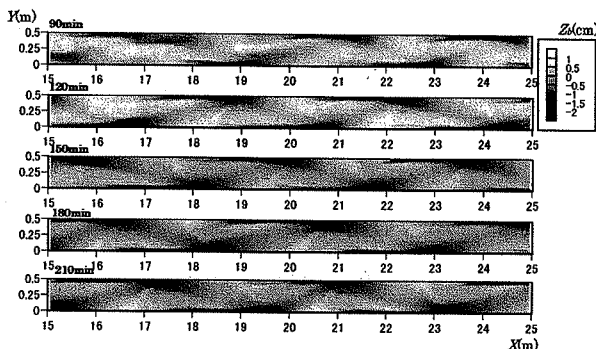


図-6 ケースAでの河床時間変化 (数値解析結果)

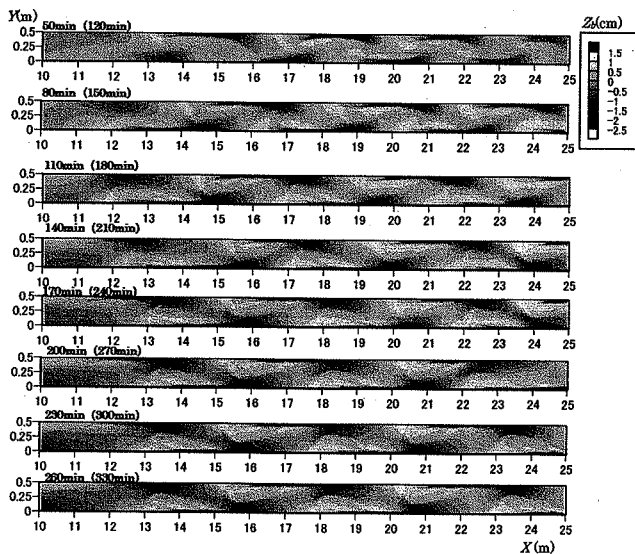


図-7 ケースA1での河床時間変化 (数値解析結果)
(数値解析経過時間 (河床低下から開始からの経過時間))

(2) 数値解析による土砂供給量の違いによる砂州動態の違いの検討

(a) 数値解析条件

次に、実験と同条件で数値解析による検討を行った。

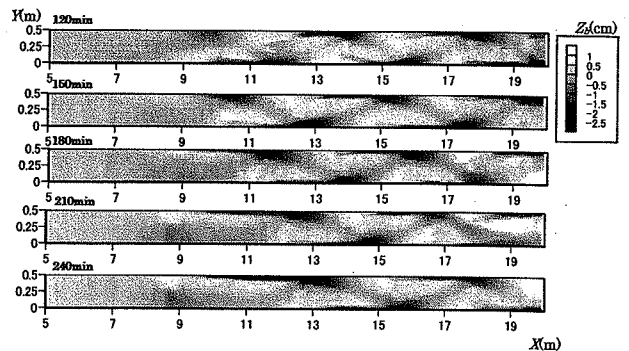


図-8 ケースA2での河床時間変化 (数値解析結果)

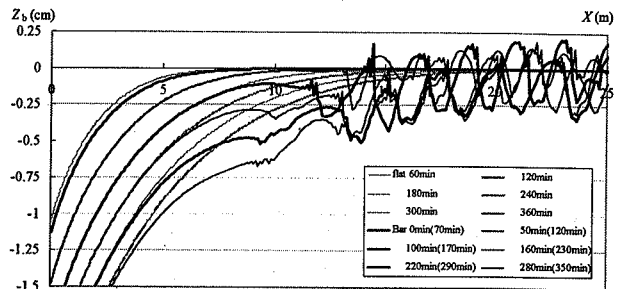


図-9 ケースA1における横断方向平均河床の初期河床からの変化量時間変化 (数値解析結果)

数値解析における砂州の形成手法では、これまで著者ら¹⁰⁾が提案してきた計算手法を用いる。これは、上流で与える流入流量に空間的 (横断方向) かつ時間的に平均が0、分散が単位幅流量の1%程度となる正規乱数を用いた微小擾乱を与え、かつ、初期河床に分散が河床材料粒径の1%程度となる正規乱数を用いた微小擾乱を与える方法である。この手法においては、上流端に砂州が形成されない助走区間、計算開始から砂州が発達し始めるまでの助走時間が存在するが、上流端の助走区間は10m程度、助走時間は70分程度である。なお、ケースA1においては、河床低下の影響を砂州が形成される区間により早く伝播させるため、70分間河床低下させた河床を用いて計算を開始させている。

(b) 数値解析による砂州の動態

計算結果を図-6~8に示す。これによると、実験結果と同様に土砂供給条件により砂州の進行速度に大きな違いがあることが分かる。ケースA1では、実験より長時間計算を進めることにより時間経過と共に滞筋部分に集中して河床低下が進んでいることが分かる。図-9に平坦河床時と砂州形成河床時の平均河床変化量時間変化を同時に示すと、砂州形成河道の方がより河床低下が下流に伝播していくことがわかる。これは、上述の滞筋部分に集中して河床低下が伝播していることが原因となっており、このことにより砂州の固定化が進んでいると言える。ケースA2においては、砂州の進行が早く、深掘れ部は埋まることなく、その進行速度も速い。

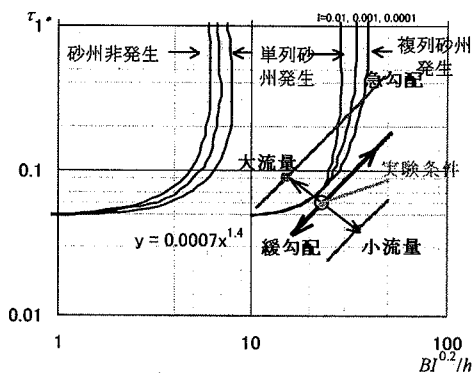


図-10 砂州の領域区分図(黒木・岸¹³⁾の引用と勾配、流量による領域の移動

(3) 土砂供給量と砂州動態に関する考察

土砂供給量の増加、減少による河床低下、河床上昇、その伝播速度に関する研究は、これまでに、芦田¹¹⁾、Gessler¹²⁾らのものがあるが、これらはどれも一次的に平均河床で議論したものである。砂州形成河道における河床低下現象の検討には、長田⁹⁾のものがあり、供給土砂を減少させた場合には、上流から周期性を決めた擾乱を与え砂州を形成させる数値解析手法によって検討を行い、河床低下により砂州は間延びし波高が低くなることを示している。しかし、長田⁹⁾の用いた数値解析手法は、初期に与えた擾乱の条件で現象を規定してしまう可能性があり¹⁰⁾、また、条件によっては必ずしも同じ傾向を呈する結果を得られないことが本実験、数値解析結果からも分かる。

本研究における実験、数値解析の結果から、一定流量通水のもと、土砂供給量の増減により砂州の進行速度が大きく変化したことがわかった。供給土砂がある場合には、砂州の進行が速くなり、砂州は速く発達する。それに対し、供給土砂がない場合には、砂州の進行は遅くなる。しかし、このような現象は、本実験ケースのみで見られた可能性もあり、必ずしも一般的な現象であるとは言えない。

河床低下及び河床上昇は、既往の研究にもあるように上流から河道の勾配を変化させることから、勾配の変化が砂州形成河道にどのような現象を引き起こすかを考える。

図-10に黒木・岸¹³⁾の領域区分図を示し、勾配が変化することにより形成される砂州の条件の変化を示す。本実験ケースの場合は、この図に示すように勾配が緩くなると複列砂州の発生領域内を動きながら徐々に土砂が動きにくくなることが分かる。逆に勾配が急になると、複列砂州の発生領域内で土砂が活発に動く条件になることがわかる。図中に引いた直線は、勾配が1.4となっており、勾配のみの増減による黒木・岸による砂州の領域区分図内の変化方向はどの条件においてもこの勾配で変化していく(Manning-Stricklerの式および摩擦速度の定義式により算出)。そのため、無次元掃流力が大きい条

件から勾配が緩くなっていくような条件では、(i) 複列砂州から単列砂州の発生領域に移行する場合、(ii) 単列砂州の発生領域から砂州非発生領域に移行する場合、(iii) 複列砂州や単列砂州の発生領域から砂が動きにくくなる場合が存在すると考えられる。そのため、勾配が緩くなるような河床低下現象は、移動限界を越さずに砂州非発生領域に移行する場合のみ砂州の消滅が起こり、そうでない場合は、形成された砂州の進行を遅くしながら徐々に滞筋に流れを集中させ、砂州を固定化または単列化していくような現象となる可能性が高いと考えられる。また、勾配が急になるような河床上昇現象は、砂州発生領域から非発生領域に向かうことは無く、砂州の進行を活発にし、変化した条件に見合う砂州形状に変化させる傾向にあると言える。

本検討は、一定流量通水条件であくまで河床低下や上昇時に勾配のみが変化していくという仮定に基づいており、河床材料の変化(アーマー化など)が伴う場合や河床低下途中で基盤が露出し河床低下が停止してしまう場合には当てはまらない。基盤が露出してしまうような条件下では、上流から河床材料が不足し形成されていた砂州が流下し消滅してしまうし、アーマー化を伴うと一部の河床が動かなくなり異なった現象になる可能性が高い。

3. 小流量通水及びその時の土砂供給量が砂州動態に果たす役割

河道では様々な流量や土砂量が流れ、河床形状を変化させる。上流からの土砂供給は必ずしも流量と河道条件によって決まる平衡土砂量とはならず、供給土砂量が流入流量と河道条件に見合う値になっていない場合が多いことが予測される。

前章では、砂州を形成する流量を一定で流し続け、砂州形成時の土砂供給量を平衡土砂量より変化させることによって土砂供給量が砂州形成に及ぼす影響を検討した。その結果から得られた現象の検討により、近年ダム下流河道で起こっている滞筋の固定化及び砂州の固定化については土砂供給の減少がこのような河道の安定化を引き起こしていることを明確にした。

砂州形成流量の土砂供給量を変化させる検討では、土砂供給が流量に見合っている場合、またはそれよりも多い場合、砂州の形成が早くなると結論づけられた。しかし、それでは、ダム建設以降に手取川で観察された複列砂州の単列化現象や木津川での交互砂州の明確化を考えた場合、ダム建設以前にそれらの現象が観察されなかったことが説明できない。そのため、本章では、砂州の形成過程で流量を半減した流量を3回流し、その小流量時の供給土砂量の有無が砂州地形の変化に及ぼす影響を検討し、これを通して、流量とその流量時の供給土砂量をあわせて考えることの河床形状予測に対する重要性を示す。

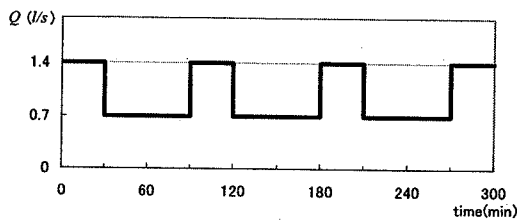


図-11 流量パターン

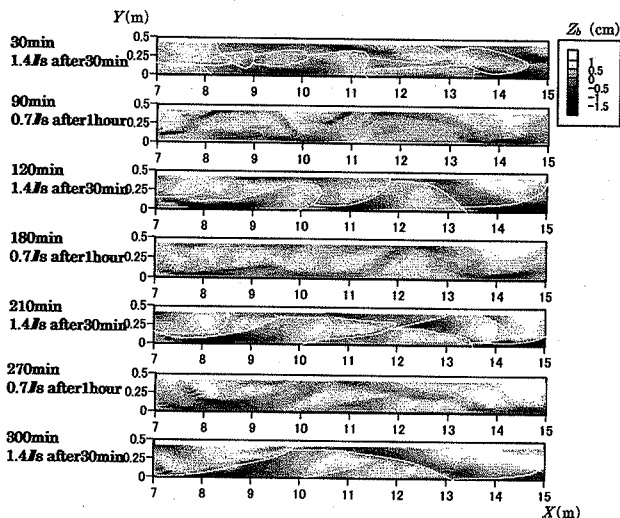


図-12 ケースADにおける河床高時間変化

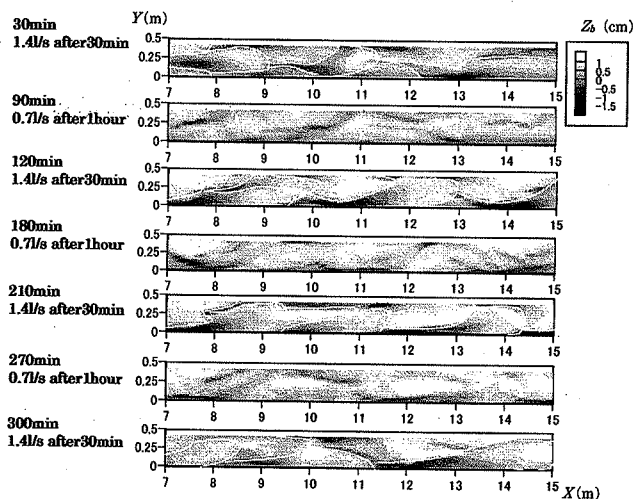


図-13 ケースAUにおける河床高時間変化

(1) 移動床実験による小流量の役割の検討

(a) 実験条件

実験条件、計測事項は、前章のものと同様であり、流量、土砂供給量のみを変化させる。図-11に示すように流量を1.4 l/s、0.7 l/sの2段階で変化させ、それぞれ30分間、1時間の通水時間をもって、一定流量を繰り返し通水する。流量1.4 l/sは、黒木・岸¹³⁾の線形不安定解析を行うと単列砂州の発生領域にあり、前章で行った実験により、一定流量通水時には通水初期に複列砂州と単列砂州が混在した河床が現れた後、単列砂州河床へ速い段階で遷移することがわかっている。流量0.7 l/sは、全幅で流れた際にはぎりぎり砂が動く流量でモード3程度の複列砂

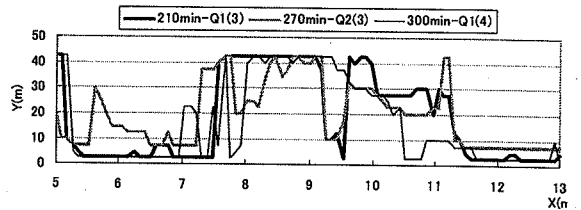
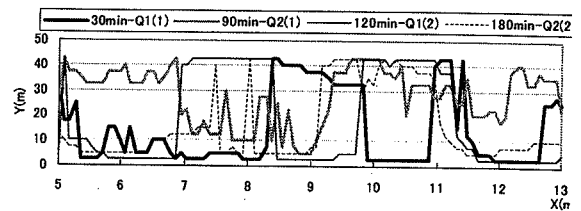


図-14 ケースADにおける滞筋の変動

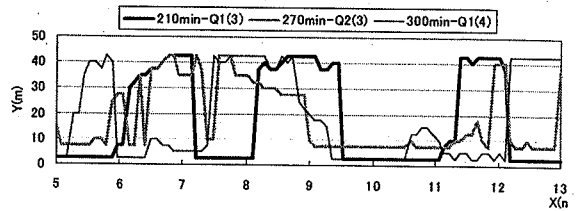
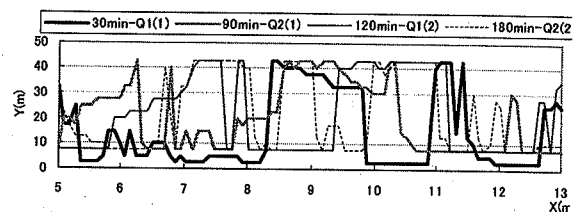


図-15 ケースAUにおける滞筋の変動

州の発生領域に位置する条件となっている。実験で与える給砂量は、表-2のように変化させて与える。

表-2 土砂供給条件

ケース	大流量 Q_1 (l/s)	大流量時の土砂供給量 Q_{b1} (*10 ³ l/s)	小流量 Q_2 (l/s)	小流量時の土砂供給量 Q_{b2} (*10 ⁴ l/s)
AD	1.4	4.10	0.7	0.0
AU	1.4	4.10	0.7	1.87

(b) 実験結果と考察

(a) Q_2 の役割

実験結果から得られる河床高コンターを図-12, 13に示す。これらの図で流量1.4 l/s通水後の地形と流量0.7 l/s通水後の地形を見ると、土砂供給の有無に関わらず、砂州の深げれ部を埋め戻していることがわかる。また、給砂を行ったケースAUについては、砂州形状が次々と変化していくことが分かる。

これらの図を詳しく見ると、流量 Q_1 により形成された砂州地形の波高が低く、流量 Q_2 により全体を変化させることが可能な時間帯（一回目の通水後、段階1とする）と、そうでない時間帯、つまり流量 Q_1 により形成された砂州地形の波高が高くなり、流量 Q_2 が砂州地形の一部しか変化させることができない時間帯（段階2とする）が

あることがわかる。段階1では流量 Q_2 で決まる砂州形状への遷移する方向へ現象が進む。そして、段階2では、流量 Q_1 により形成された砂州地形に沿って、多少地形を変化させながら流路を決定する現象が見られる。段階2では特に砂州地形の深掘れ部が埋め戻される。

以上の結果から、砂州の形成、変化過程で他の流量が流れることは、砂州波高を増大させるのか、減少させるのか形成している砂州地形の発達段階と小流量の関係で決まると言える。

(b) 供給土砂の役割

流量 Q_2 時の給砂の役割としては、流量 Q_2 時の砂の動きを活発にすることと、流量 Q_2 通水時に流路中のどこかに堆積した砂が流量 Q_1 通水時の土砂供給源となる二つの側面がある。

供給土砂を変化させたケースAD、AUを比較する。河床高コンター（図-12、13）によると、河床高の高低差が大きくなった後は、流量 Q_2 時深掘れ部の埋め戻しが見られ、洗掘部を埋め戻す現象は流量 Q_2 時の給砂量に関わらず（ケースAD、AU共に）起こっているのがわかる。また、図-14、15に示す横断方向の最深部発生位置からケースAUでは低い流量 Q_2 時にも供給土砂を与えることで、地形の変化が活発になっている一方で、ケースADでは最初活発な変化が見られるが徐々に流量 Q_2 時の河床の変動が安定に向かっていることがわかる。ケースADでは流量 Q_2 の二回目通水後から、砂州波長の大きな交互砂州と流路が上流から形成されていくのに対し、ケースAUでは、三回目の流量 Q_2 通水後にもモード2と見られる砂州が流路の上流側（ $X=6-12\text{m}$ ）に形成されており、横断方向最深部の発生位置は安定せずに上流側で特に変動している。

こうした結果から、砂州を形成に大きく関わる流量以下の流量 Q_2 時の土砂供給が、流路全体の安定性に大きく関わる事が明らかになった。

4. 結論

本論文で検討した結果により、土砂供給条件は河床の安定性、砂州地形の形成に大きく関わってくることがわかった。

一定流量通水時の砂州地形形成状況については、供給土砂量の有無により大きく砂州の進行状況が異なる。供給土砂がある場合には、砂州の進行が速くなり、砂州は速く発達する。それに対し、供給土砂がない場合には、砂州の進行は遅くなり滞筋の固定化につながる。

また、砂州を形成する流量とそれ以下の流量が交互に来る状況を設定すると、小流量時の土砂供給により砂州河床の安定性が変化した。発達した砂州地形上に流れる流量が、形成されている砂州を埋め戻す働きがある場合、供給土砂量の有無に関わらず埋め戻し現象が起こる。小流量時の土砂供給が多い場合には、河床の乱れた状況が

続き、土砂供給がない場合には、河床が落ち着き大きな交互砂州が形成される。

両者の状況を考えると、河道変遷等を論じる際には流量の変動、各流量時の土砂供給条件を考えることが非常に重要な視点となる。また、砂州形成時の土砂供給量によつては、砂州の動きが活発になり深掘れ部の進行が速く河岸侵食を引き起こす可能性があり、そのためにも、流量と土砂供給条件を見積もることが重要な課題となることがわかった。本研究では、第3章で流量を2段階に変化させて通水した時の河道動態の検討を行った。小流量を砂州形成流量の半分とし、その時にも土砂移動がある条件での検討を行ったが、場合によっては、形成している砂州を活発に動かす条件、または、一部のみでしか変化しない条件となる。こういった条件は、形成されている砂州と流量に左右され、供給土砂の役割も変化する可能性がある。こういったそれぞれの条件下での状況を定量的に把握することが今後の課題である。

参考文献

- 1) 辻本哲郎, 村上陽子, 安井辰弥: 出水による破壊機会の減少による河道内樹林化, 水工学論文集, 土木学会, 第45巻, pp.1105-1110, 2001.
- 2) A. Teramoto, S. Nakamura and T. Tsujimoto: Bank erosion with bar migration, *Proc. of International Symposium on Disaster Mitigation & Basin-wide Water Management*, pp.229-237, 2003.
- 3) 林泰造, 尾崎幸男, 大西光陽: 中規模河床形態の発生機構について, 第26回水理講演会論文集, pp.17-24, 1982.
- 4) 藤田裕一郎, 村本嘉雄, 堀池周二: 交互砂州の発達過程に関する研究, 京都防災研年報, 第24号B-2, pp.411-431, 1981.
- 5) 黒木幹男, 石井千万太郎, 板倉忠興: 砂州波高に関する理論的研究, 水工学論文集, 第36巻, pp.1-6, 土木学会, 1992.
- 6) 長田信寿, 村本嘉雄, 内倉嘉彦, 細田尚, 矢部昌之, 高田保彦, 岩田通明: 各種河道条件下における交互砂州の挙動について, 水工学論文集第43巻, pp.743-748, 1999.
- 7) 内島邦秀, 早川博: 流量が減少した場合の変形特性, 第31回水理講演会論文集, pp.683-688, 1987.
- 8) 桑村貴志, 渡邊康玄: 幅広水路における非定常流下での砂州形成実験, 水工学論文集第47巻, pp.625-630, 2003.
- 9) 三輪浩, 大同淳之, 横川純: 流量変化に伴う交互砂州の発達・変形, 水工学論文集第47巻, pp.619-624, 2003.
- 10) 寺本敦子, 辻本哲郎: 砂州の形成過程に関する数値計算手法, 応用力学論文集, 第7巻, 土木学会, pp.975-982, 2003.
- 11) 芦田和男: 河床変動に対する境界条件の影響, 土木学会第25回年次学術講演会講演概要集, 第2部, pp. 263-266, 1969.
- 12) Gessler, J.: Agradation and degradation, *River Mechanics*, edited by H. W. Shen, Chapter 8, Water Resources Publications, USA, 1971.
- 13) 黒木幹男, 岸力: 中規模河床形態の領域区分に関する理論的研究, 土木学会論文報告集, 第342号, pp. 87-96, 1984.

(2004. 4. 7受付)