

交互砂州河床における水みちの形成過程に及ぼす 土砂供給と砂礫の分級の影響

EFFECTS OF SEDIMENT SUPPLY AND GRAIN SORTING ON LOW-WATERCOURSE FORMATION IN CHANNEL WITH ALTERNATE BARS

三輪 浩¹・大同淳之²・横川 純³

Hiroshi MIWA, Atsuyuki DAIDO and Jun YOKOGAWA

¹正会員 工博 舞鶴工業高等専門学校助教授 建設システム工学科 (〒625-8511 京都府舞鶴市白屋234)

²正会員 工博 東アジア技術事務所 (〒613-0905 京都市伏見区淀下津町129)

³正会員 伊根町役場 農林水産課 (〒626-0493 京都府与謝郡伊根町字平田493)

Effects of sediment supply and grain sorting on the formation process of low-watercourse in a straight channel with alternate bars are investigated by means of flume tests using uniform and non-uniform sediment. Results are summarized as follows: (1) The low-watercourse is shallow and unstable when the bed level does not vary by sediment supply, whereas the deep and stable low-watercourse is formed when the bed degradation progresses by no sediment supply. (2) The emerged bars in the non-uniform sediment bed are formed with grain sorting, and their upper and lower part mainly consists of coarse grains and fine grains, respectively. These emerged bars are more stable than those in the uniform sediment bed, and contribute to the stability of the low-watercourse. (3) The meandering wavelength of the low-watercourse increases considerably with progression of the bed degradation, and is about 2-3 times the mean wavelength of the alternate bars.

Key Words : *alternate bars, low-watercourse, emerged bar, riverbed degradation, sediment supply, non-uniform sediment, grain sorting*

1. 緒 言

河川には河道の形状や河床材料、流量状況等に応じて種々の河床形態が形成されるが、とくに、砂州河床は洪水時には治水が重要視され、平水時には浮州や蛇行低水路（以下、本文では水みちと呼ぶ）の形成が生物生息空間としての河道環境面において重要視される¹⁾という特性を有している。このような二面性を有する河道における土砂管理を適切に行うための着眼点の一つとして、上流からの流量や土砂供給量の変化が河道に及ぼす影響を明らかにすることが挙げられる。例えば、洪水時に発達した砂州が、平水時にどのように変動し、また、どのような過程を辿って安定化するかを明らかにすることは、治水と環境の両面に加え、ダム等による放流や排砂の制御法とも関連して、重要な課題であるといえる。また、混合砂礫河床では分級によって河床粒度が変化するため、これが河床変動に及ぼす影響も考える必要がある。本研究では、交互砂州河床における水みちの形成に着目し、これに及ぼす土砂供給条件と混合砂礫の分級の影響について検討する。

内島・早川²⁾は小流量による交互砂州の変形に伴う水みちの形成と局所洗掘の関係について考察している。湯

城ら³⁾も同様の検討を行うとともに、水みちの形成限界流量や変動特性について検討している。また、清水ら⁴⁾は交互砂州河床における水みちの形成過程を数値シミュレーションによって検討し、現地観測で見られた瀬や淵の特性等との対応について考察している。これらの研究では主として流量条件の影響に着眼点が置かれており、土砂供給条件（上流端境界条件）による河床低下の影響については必ずしも言及されていない。これらの研究に対して、道上ら⁵⁾は平坦河床からの水みちの発生・発達過程に及ぼす土砂供給の有無の影響を検討し、数値シミュレーションによって現象の再現を試みている。また、著者ら⁶⁾や寺本・辻本⁷⁾は実河川を扱う際には河道を形成した流れ場の条件とは異なる条件下での河道の応答を検討することの重要性を指摘し、その一例として交互砂州の発達・変形に及ぼす流量や土砂供給条件の影響を検討しており、この中で水みちの形成・変動に関しても若干の考察が行われている。

このように、水みちの形成やその変動に関しては、種々の観点から検討が行われているものの、交互砂州河床での水みちの形成過程に及ぼす土砂供給条件や混合砂礫の影響については得られている成果は少なく、さらに検討を深める必要がある。そこで、本研究では流量一定

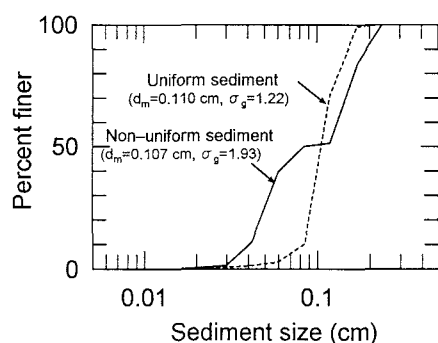


図-1 使用砂の粒度分布

の下で、給砂条件を変えた実験を行い、水みちの形成過程とその安定性に関する検討を行う。まず、河床変動過程を詳細に追跡し、浮州の発生と水みちの形成過程およびこれらに及ぼす給砂条件の影響を明確にする。ついで、淵の移動特性と水みちの蛇行波長の変化特性について考察する。なお、実験は一樣砂河床と混合砂河床を対象として行い、両河床における現象を対比することによって、これらに及ぼす混合砂の分級の影響についても言及する。

2. 実験の概要

実験には長さ12m、幅0.2mの直線可変勾配水路を用い、水路下流端に砂止め、上流端に整流装置と粗度付きの固定床を設置、その間に砂を敷き詰めて長さ11mの移動床区間を設けた。実験にはほぼ同一の平均粒径を有する一樣砂と混合砂を用いた。実験に使用した砂の粒度分布を図-1に示す。一樣砂は平均粒径 $d_m=0.110\text{cm}$ 、幾何標準偏差 $\sigma_g=1.22$ を有し、混合砂は $d_m=0.107\text{cm}$ 、 $\sigma_g=1.93$ を有する。なお、砂の比重はいずれも2.65である。

実験は、まず河床を平坦に敷き均し、河床勾配を1/60に設定、移動床部上流端で横断方向に一樣かつ連続的に給砂を行いながら通水し、交互砂州をほぼ平衡状態まで発達させた。停水直前に水面計を用いて水路縦断方向20cm間隔で水面を測定し、停水後にレーザー変位計を用いて水路横断方向1cm間隔で河床面の縦断形状を測定した。なお、水路下流端から8.35mの位置を測定の原点($x=0$)とし、そこから下流側7.95mの範囲を測定対象とした。ついで、この交互砂州を初期河床として、給砂を行う場合と行わない場合の2種類の条件下で流量を減少させて通水し、交互砂州の変形と水みちの形成過程を追跡した。なお、この時の流量は通水初期では混合砂に対しても全粒径が移動可能な量であり、村本・藤田⁸⁾の領域区分図において交互砂州領域の下限付近に位置する条件である。また、給砂を行う場合の給砂量は初期交互砂州の平均河床高を維持する量を目安に、予備実験で求めら

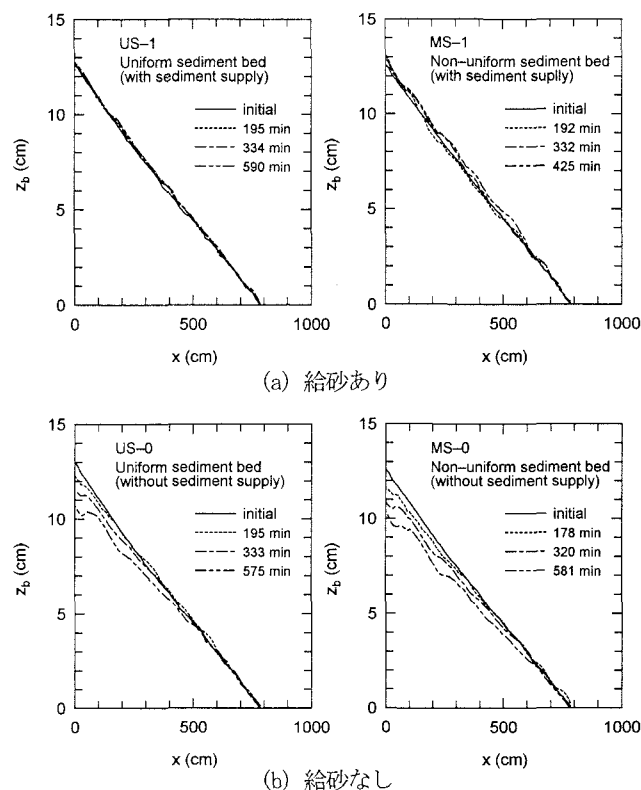


図-2 河床縦断形状の時間変化 (左：一樣砂、右：混合砂)

れた。通水中は浮州の位置と概形、淵の位置および流砂方向のスケッチを随時行うとともに、水路下流端から流出する砂を5分間隔で約1分間採取して流出砂量を測定した。所定の時刻に水面と河床面の測定を先と同様の方法で行った後、通水を再開した。実験は、給砂を行わない実験で形成される水みちがおおむね安定するまで継続することを基本に、給砂を行う実験も同程度の通水時間とした。これらの実験条件をまとめて表-1に示す。表中、「交互砂州→水みち」欄の水理量は通水開始後最初の停水時(約30分後)のもので、「無次元掃流力」欄の括弧内は無次元化に用いた砂粒子である。なお、本文では流量を減少させた実験の開始時を時間の原点($t=0$)としている。

3. 交互砂州の変形と水みちの形成過程

(1) 河床縦断形状に及ぼす給砂の影響

図-2は水みちの形成過程における横断面平均河床位の縦断形状の時間変化を示したものである。なお、河床位の基準は $x=795\text{cm}$ 地点の横断平均河床である。まず、給砂を行った場合を見ると、一樣砂河床では河床位の変化はほとんど認められない。このケースでは給砂量と下流

表-1 実験条件

河床形態		平坦河床 → 交互砂州						交互砂州 → 水みち						
Case	河床砂	流量 (cm³/sec)	給砂量 (g/min)	水深 (cm)	Froude数	無次元掃流力 (dm)	通水時間 (min)	流量 (cm³/sec)	給砂量 (g/min)	水深 (cm)	Froude数	無次元掃流力 (dm)	無次元掃流力 (d90)	通水時間 (min)
US-1	一樣砂	800	200	1.18	1.00	0.104	76	300	50	0.70	0.82	0.061	—	590
US-0		800	200	1.16	1.02	0.102	77	300	0	0.63	0.96	0.056	—	575
MS-1	混合砂	800	250	1.13	1.06	0.100	86	300	80	0.65	0.91	0.059	0.032	580
MS-0		800	250	1.07	1.15	0.097	67	300	0	0.63	0.96	0.056	0.030	581

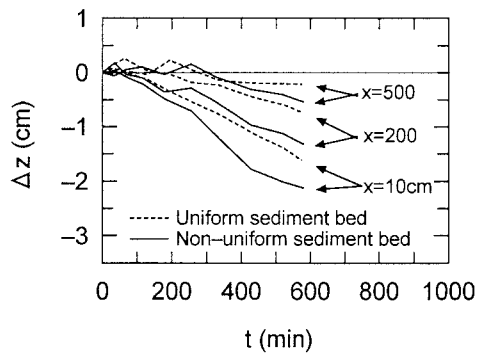


図-3 初期河床からの河床変化量の時間変化（給砂なし）

端流出砂量はほぼ釣り合っており、いわゆる動的平衡状態が保たれているといえる。一方、混合砂河床では192分では若干の河床低下、それ以降は若干の河床上昇が認められるが、全体としては初期交互砂州河床の縦断勾配を保っている。つぎに、給砂を行わなかった場合を見ると、上流から順次河床が低下し、実験の最終段階では一様砂河床では $x=500\text{cm}$ 程度まで、混合砂河床では水路下流端付近まで河床低下が及んでいる。これは、本実験では混合砂河床の流砂量が一様砂河床よりも多く、河床侵食がより活発であったことを示している。両河床における河床の低下速度を比較するため、 $x=10\text{cm}$ 、 200cm および 500cm 地点における、初期交互砂州を基準とした河床変化量の時間変化を図-3に示す。これより、河床低下は混合砂河床の方が速く進行していることがわかる。一般に、河床低下によって河床の粗粒化が進行する場合は、さらなる河床低下は抑制される。一方、本実験では粗砂は池田ら⁹が示した露出効果と減摩効果によって細砂よりも移動性に富んでおり、また、後述するように、粗砂の多くが比高の高い州上に堆積して浮州の形成に寄与する傾向にある。このため、水みち部の河床表層は相対的に細砂の割合が大きくなっており、一様砂河床に比べて侵食されやすく、河床低下速度が大きい原因になってい

ると推察される。

以上のように、本実験では、給砂を行った場合は平均的には河床低下をきたさない状態で水みちが形成され、給砂を行わなかった場合は河床低下を伴って水みちが形成されている。また、混合砂河床の場合は砂粒子の分級の影響も現れる。これらについて次節で詳細に検討する。

(2) 水みちの形成過程

図-4は一様砂河床における河床形状と流砂方向の時間変化を示したものであり、 $t=0$ は初期交互砂州形状である。河床形状は初期交互砂州の平均河床面を基準としてそこからの偏差で表されており、色が濃いほど低位である。また、実線で囲まれた部分は浮州であり、矢線は通水中のスケッチから得られた流砂の向きを示している。実験の観察によると、通水開始後、深掘れから下流側砂州の前縁に向かう流れが卓越し、河床の高い部分の流れは弱い。この卓越する流れは初期交互砂州を形成させた大流量時よりも側壁に向かう角度が大きく、この流れによる流砂の砂州前縁への堆積によって砂州は前縁を側壁側に張り出しながら発達し、波長も若干増加した。なお、この段階では河床全体がほぼ冠水しており、水みちは形成されていない。通水初期の段階ではこのような現象が給砂の有無にかかわらず見られた。さて、給砂を行った場合、交互砂州河床に起因する深掘れ部からの流砂が比高の高い州上に堆積し、通水開始後34分や67分に見られる浮州が形成される。これに伴って部分的に浅い水みちが形成されるが、浮州は水面から数粒径程度しか出ないため、水みちの水流によって侵食され易い。これによって河床が冠水すると砂州は下流へ移動し、深掘れからの流砂の州上への堆積によって再び浮州が形成、これに伴って新たな水みちが形成される。このように、浮州はかなり不安定で、絶えず発生と消滅を繰り返し、これに伴って水みちも変動する。本実験では、浮州形成に伴う水みちの河床侵食の進行よりも浮州の形成・侵食が卓

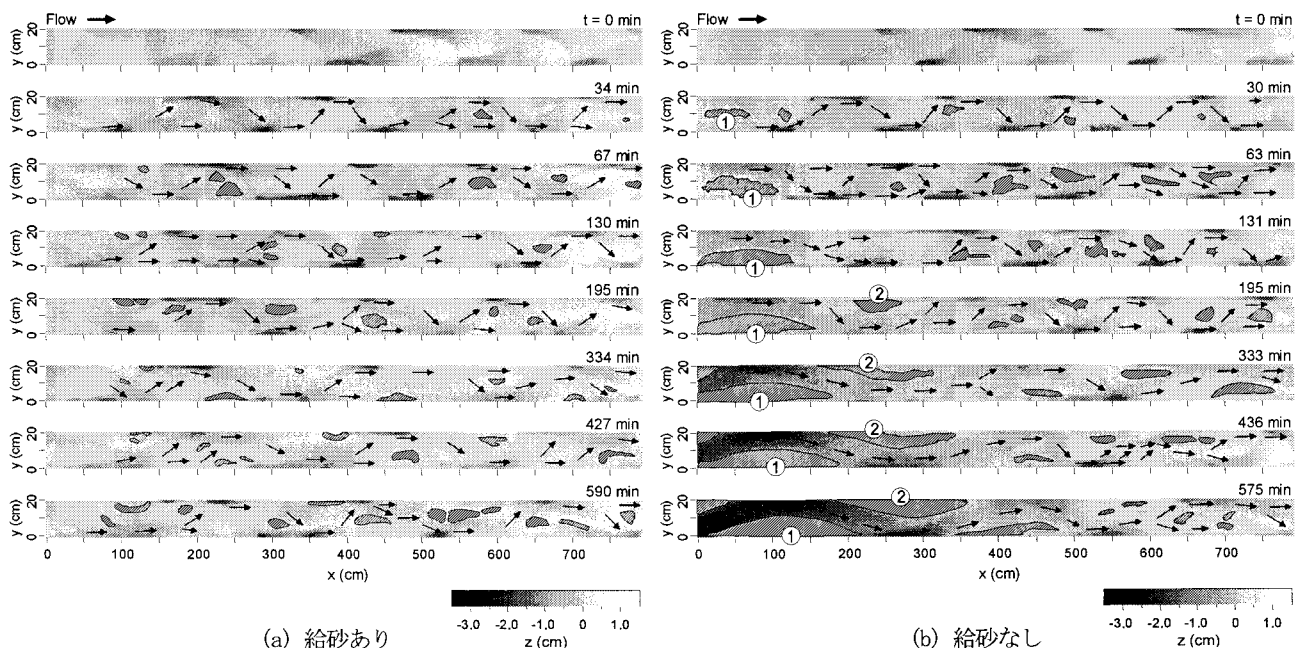


図-4 河床形状と流砂方向の時間変化（一様砂河床）

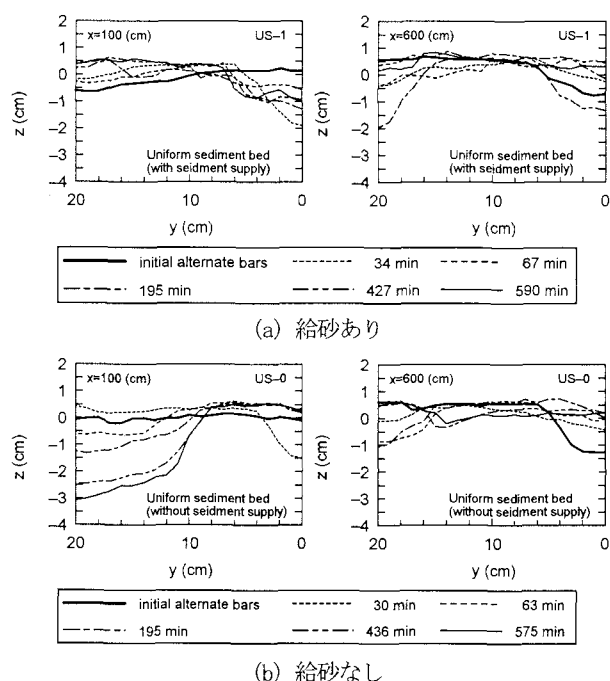


図-5 河床横断形状の時間変化（一様砂河床）

越し、水みちが変動したが、清水ら⁶⁾のシミュレーションでは水みちの河床侵食が卓越し、深掘れ部への流れの集中と相まって安定した水みちの形成が示されている。河道全体としての河床低下がない状況でのこのような水みち形成過程の相違を生む原因については今後明らかにする必要がある。一方、給砂を行わなかった場合、通水開始後30分経過時点で浮州の形成が見られ、63分時点では上流側に相対的に規模の大きい浮州①が認められる。この浮州①は上流からの河床低下に伴う左岸側への流水の集中による河床侵食によって安定している。時間の経過とともに河床低下は進行し、水みちは深く安定したものに発達する。195分には規模を増した浮州①と新たな浮州②の形成によって、明瞭な水みちが形成されている

ことがわかる。この上流側から発達した水みちは河床低下の進行に伴って安定性を増しながら順次下流に延びて行く。このような安定した水みちに対して、河床低下が及んでいない下流側では部分的に浮州が現れ、浅い水みちが形成されている。給砂を行った場合と同様、下流側の浮州はかなり不安定で、絶えず発生と消滅を繰り返し、水みちも変動している。

図-5は $x=100\text{cm}$ および 600cm 地点の河床横断形状の時間変化を示したものである。給砂を行った場合は、いずれの時刻においても側岸に深掘れ部があり、また、図-3(a)に見られるようにこれが移動しており、河床は交互砂州の特性を示していることがわかる。ただし、本ケースでは浮州が出現しており、河床全体が水没しているときの交互砂州とは必ずしも同一視できないと考えられる。すなわち、浮州が現れるまでは流水と河床の相互作用によって砂州は変形するが、浮州が現れると、これと水みちとの相互作用によって砂州は変形すると考えられる。一方、給砂を行わなかった場合は、 $x=100\text{cm}$ 地点の図から左岸側で水みちが発達する様子がわかる。なお、下流側の $x=600\text{cm}$ 地点では河床低下が及んでいないため、給砂を行った場合と同様の傾向を示している。

図-6は混合砂河床における河床形状と流砂方向の時間変化を示したものである。実験の観察では、浮州が現れるまでの砂州の変形状は給砂の有無にかかわらず一様砂河床の場合と同様であった。さて、給砂を行った場合、通水開始後32分時点で浮州の形成が見られるが、これらの浮州を含む非流砂域は比較的安定で、192分時点まで水みちの変動は抑えられている。前節で述べたように、この時点までの河床は全体に若干の低下傾向にあり、このような場合には水みちは比較的安定であるといえる。これ以降425分までは河床は全体に若干の上昇傾向にあり、砂州の移動に伴って浮州は発生と消滅を繰り返し、水みちも変動していることがわかる。なお、425分以降は先の河床上昇期に比べると水みちの変動は小さく、ま

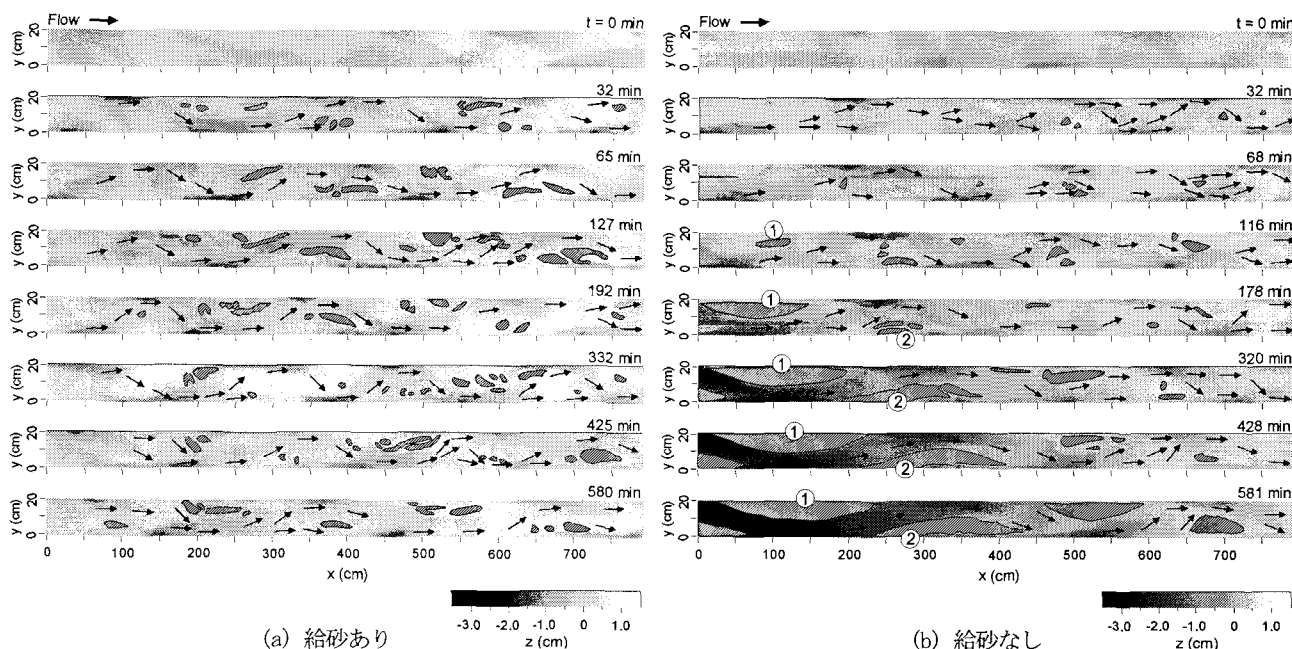


図-6 河床形状と流砂方向の時間変化（混合砂河床）

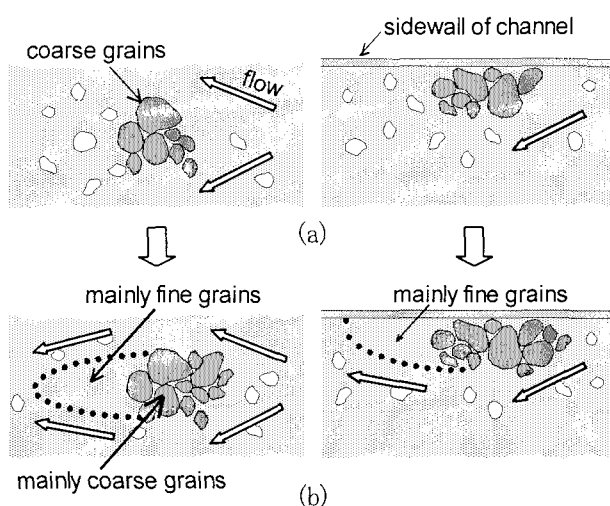


図-7 混合砂河床における浮州の形成過程

た、淵の移動量も少ない。一方、給砂を行わなかった場合も通水開始後の早い段階から浮州を含む非流砂域は比較的安定しており、水みちの変動は一樣砂河床の場合よりも抑えられている。116分時点の浮州①は河床低下に伴うものであり、この後、河床低下の下流への進行に伴って、浮州②は規模を増しながら安定化する。この時点では下流側ではまだ浮州が発生と消滅を繰り返しているが、河床低下の進行に伴って上流側から順次浮州が安定化し、水みちは一本化するようになる。本実験では混合砂河床の方が一樣砂河床よりも流砂量が多く、これが深い水みちの形成に寄与していると思われる。以上のように、河床低下によって深く、安定した水みちが形成されること、また、混合で形成される浮州は水みちの変動を抑える働きをしていることがわかる。

さて、混合砂河床で形成される水みちは河床の上昇や低下の影響を受けているものの、一樣砂河床の場合よりも全体としてその変動は抑えられている。これは浮州の形成とその安定性に起因しており、砂粒子の分級がこれらに影響を及ぼしていると考えられる。図-7は本実験での浮州の形成過程を模式的に表したものである。すなわち、場所的な掃流力の不均一によって粗砂が堆積すると、流水は粗砂の堆積帯を避けるように流れ、堆積帯は浮州化する(a)。粗砂による堆積帯の下流側周辺は掃流力が低下するため砂は堆積しやすくなるが、粗砂はこの堆積帯付近に堆積し、細砂はこれより下流側まで流送されて堆積する。これによって浮州は規模を増す(b)。また、給砂を行わなかった場合には水みちの河床侵食の進行に伴って浮州はその規模を増大させ、より安定したものに発達する。浮州の上流側に粗砂が多く堆積しているため侵食されにくく、浮州は比較的安定している。また、浮州が発生と消滅を繰り返した場合でもその周期は一樣砂河床の場合より長い傾向にあることが確認されている。以上のことより、砂粒子の分級現象は、これを伴う浮州が安定であることを介して水みちの変動抑制に寄与しているといえる。

(3) 水みちの縦断形状

図-8は河床横断方向最深河床位の縦断形状の時間変化

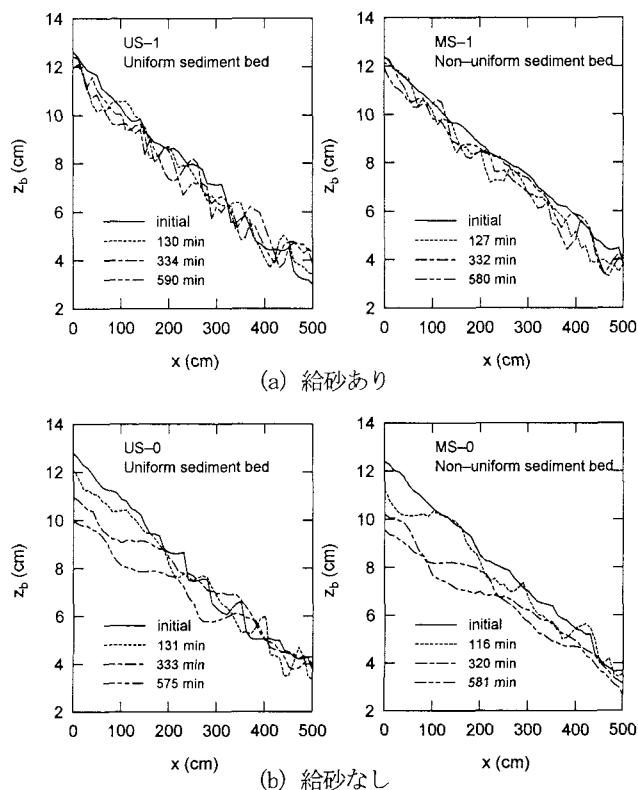


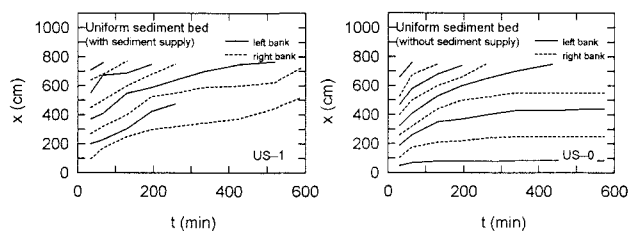
図-8 水みち縦断形状の時間変化 (左：一樣砂、右：混合砂)

を示したものである。清水ら⁴⁾は河床低下をきたさない条件下での交互砂州河床における水みち形成のシミュレーションから、水みちでは落差の大きな瀬と緩やかな勾配の淵が形成されることを示している。一方、同図(a)より、河床低下をきたさなく、水みちが変動する場合でもこのような現象が見られる。また、同図(b)より、河床低下をきたして、水みちが安定している場合はこのような現象が顕著に現れることがわかる。

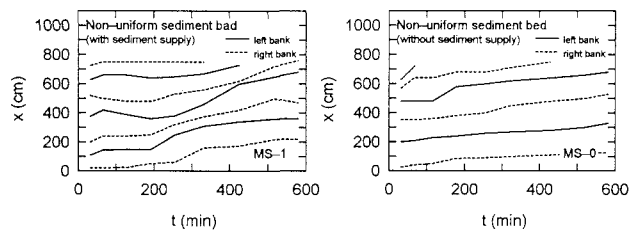
4. 淵の移動と水みちの蛇行波長の特性

図-9は通水開始後、最初の河床測定時(約30分経過後)に確認された淵のその後の移動状況を示したものである。まず、一樣砂河床の場合を見ると、給砂を行った場合はいずれの淵も移動を続けるが、給砂を行わなかった場合は上流側の淵から順次移動が停止し、固定化することがわかる。これは水みちの安定化と対応しており、淵は水みちが変動している場合は移動するが、水みちの安定化に伴って固定化するようになる。一方、混合砂河床の場合を見ると、給砂を行った場合は、通水開始から200分程度の期間では淵の移動量は少なくむしろ固定化の状態にある。これは、この期間では河床は若干の低下傾向にあり、形成された水みちは浅いものの比較的安定していたためである。しかし、その後の水みち変動の活発化に伴って淵は移動するようになる。一方、給砂を行わなかった場合は、通水開始直後から水みちは比較的安定して発達したため、とくに通水初期における淵の移動速度は一樣砂河床の場合よりも小さく抑えられている。

図-10は水みちの蛇行波長の平均値と標準偏差の時間変化を示したものである。ただし、河床低下を伴った水



(a) 一様砂河床



(b) 混合砂河床

図-9 淵の移動状況 (左: 給砂あり, 右: 給砂なし)

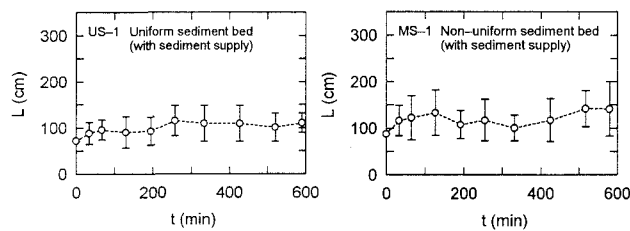
みちの蛇行波長は●記号で区別している。また、時刻0の値は初期交互砂州の平均波長である。同図より、給砂の有無にかかわらず、河床低下のない場合は通水初期の交互砂州の変形に伴って蛇行波長は増加し、その後水みちの変動に呼応して、初期交互砂州の波長の1.5～2倍程度の範囲で変動する。一方、河床低下を伴う場合の蛇行波長は水みちの形成の早い段階からかなり長く、初期交互砂州の波長の2～3倍程度である。

淵の固定化や水みちの蛇行波長は河道環境を検討する際の重要な要素であり、今後これらに対する条件の明確化等、定量的な把握が必要である。

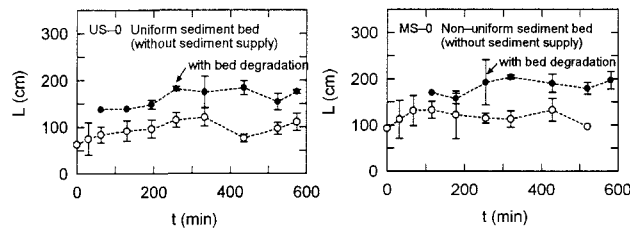
6. 結 言

本研究では、小流量時の交互砂州の変形と水みちの形成過程に及ぼす土砂供給の影響と砂粒子の分級効果について検討した。本研究で得られた結果を以下に要約する。

- (1) 砂州河床における水みちは浮州の形成をきっかけとして形成されるが、その後の状況は土砂供給の影響を強く受ける。すなわち、土砂供給によって平均河床としての河床低下がない場合は、浮州は不安定で発生と消滅を繰り返すため、水みちは浅く、変動する。これに対し、土砂供給がなく、上流から河床低下が進行する場合は、浮州は安定化し、水みちも深く、安定したものとなる。
- (2) 混合砂河床では、浮州は砂粒子の分級を伴って形成され、その上流部は粗砂が多く、下流部は細砂が多い。また、この浮州は一様砂河床よりも安定しており、水みちの変動抑制に寄与している。
- (3) 礫床河川に見られる水みちにおける落差の大きな瀬と緩やかな勾配の淵の形成は、河床低下をきたしていなく、水みちが変動している場合でも見られ、河床低下によって水みちが安定する場合はより明確に現れる。
- (4) 河床低下がない場合は淵は移動を続けるが、河床低下が進行する場合は水みちの安定化に伴って淵の移動は停止する傾向にある。
- (5) 水みちの蛇行波長は、河床低下がない区間では水みちの移動に呼応して初期交互砂州波長の1.5～2倍程度の



(a) 給砂あり



(b) 給砂なし

図-10 蛇行波長の時間変化 (左: 一様砂, 右: 混合砂)

範囲で変動するが、河床低下を伴う範囲では水みち形成の早い段階からかなり長く、2～3倍程度となる。

本研究では流量条件の影響は扱っていないが、河床材料との関係から、これも重要な視点である。とくに、混合砂の場合はその粒度構成によって流砂状況が異なり、これが水みちの形成に影響を与える可能性がある。これらの検討については今後の課題である。

謝辞：本研究は日本学術振興会科学研究費基盤研究(C) (課題番号：12650522, 研究代表者：三輪 浩) の補助を受けて行われた。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 例えば、田代 喬, 辻本哲郎：河床擾乱頻度を指標とした生息場評価による瀬・淵構造の変質に関する考察, 水工学論文集, 第46巻, pp. 1151-1156, 2002.
- 2) 内島邦秀, 早川 博：流量が減少した場合の交互砂州の変形特性, 第31回水理講演会論文集, pp. 683-688, 1987.
- 3) 湯城豊勝, 芦田和男, 江頭進治, 岡部健士：低水路の形成と変動機構, 水工学論文集, 第36巻, pp. 78-80, 1992.
- 4) 清水義彦, 長田健吾, 高梨智子：交互砂州河道における低水路形成と河岸侵食に関する数値解析, 水工学論文集, 第48巻, pp. 1027-1032, 2004.
- 5) 道上正規, 藤田正治, 日下部重幸：水みちの発生・発達過程の実験とシミュレーション, 水工学論文集, 第39巻, pp. 613-618, 1995.
- 6) 三輪 浩, 横川 純, 奥野敏也, 中澤文也：交互砂州河床の変動に及ぼす流量および給砂量の影響, 第58回土木学会年次学術講演会講演概要集Ⅱ, pp. 325-326, 2003.
- 7) 寺本敦子, 辻本哲郎：流量, 土砂流入条件が砂州の変動に及ぼす影響の一考察, 河川技術論文集, 第10巻, pp. 273-278, 2004.
- 8) 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, pp. 275-282, 1978.
- 9) 池田 宏, 伊勢屋ふじこ：混合砂れきの流送に伴う縦断的分級, 第30回水理講演会論文集, pp. 217-222, 1986.

(2004. 9. 30 受付)