

平成 22 年 6 月 15 日現在

研究種目：基盤研究（C）  
 研究期間：2007～2009  
 課題番号：19560521  
 研究課題名（和文） ダム下流河道への仮置き土砂供給による低水路の変動と砂礫の分級効果に関する研究  
 研究課題名（英文） Low-Flow Channel Variation and Effects of Grain Sorting due to Sediment Augmentation  
 研究代表者  
 三輪 浩（MIWA HIROSHI）  
 舞鶴工業高等専門学校・建設システム工学科・准教授  
 研究者番号：70190832

研究成果の概要（和文）：ダム下流の河床低下や流路の固定化対策として、置き土砂による土砂供給法がある。本研究では、主として置き土砂の設置位置（瀬、淵）と粒度構成（一様砂、混合砂）が置き土砂の侵食・流送と下流河道に及ぼす影響について検討した。その結果、瀬への設置は侵食効率が低いこと、置き土砂による河床上昇は流路変動を引き起こすこと、混合砂の方が侵食されやすいが、流路の変動性は一様砂河床に比べて低いこと、等を明らかにした。また、置き土砂の側岸侵食モデルを導入した平面 2 次元河床変動計算法を提示し、実験結果の再現性について検討した。

研究成果の概要（英文）：A sediment replenishment technology has been developed which involves the conveyance of part of the sediments excavated and/or dredged from reservoirs to the river below the corresponding dam. This technology has been implemented on a trial basis in several dam. However, this technique is in the development stage because there are many unknown factors. Therefore, systematic investigations are necessary in order to enable practical implementation and management of this technology. In this study, the effects of the location of replenished sediment on sediment flushing and on control of degradation are investigated by means of flume experiments and two-dimensional numerical simulations. The effects of grain size distribution (uniform and non-uniform sediments) on them are also discussed. The flushing process of replenishment sediments were investigated first, and then its effect on river bed degradation was analyzed.

## 交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	2,400,000	720,000	3,120,000
2008年度	600,000	180,000	780,000
2009年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：河川工学，土砂水理学，土木環境システム

科研費の分科・細目：土木工学・水工学

キーワード：低水路，河床低下，流路変動，混合砂礫，分級，置き土砂，側岸侵食，平面二次元河床変動計算

## 1. 研究開始当初の背景

ダム建設等の人為的インパクトは河道を著しく変化させることが多く、とくにダムの

下流では、流量調節による年最大流量の減少と流況の平準化、土砂供給量の減少と質（粒度）の変化によって、河床低下と流路の固定

化、滯筋の深掘れ、河道内樹林化等が進行している。これらの問題に対応するためには、ダム下流河川における水量と土砂量の供給を確保する必要がある。その一環として、河道内に置き土砂を行ってダムからの放流や中小洪水によってフラッシュさせる方法は効果的な土砂供給法であると考えられる。この方法は比較的小規模なため土砂供給の範囲制御が容易であり、生物生息環境の改善にも効果が期待される。しかし、この方法は体系化されておらず、客観的な指標がないのが現状であり、置き土砂の設置位置や量および放流量との関連、置き土の流送に伴う下流への影響等、系統的な検討が必要である。

近年、置き土砂の侵食と流送特性に関して、実験と数値計算による基礎的な検討も行われているが、まだ研究の緒についた段階である。したがって、様々な観点から検討を深める必要がある。また、これまでの研究は置き土砂の侵食と流送に着目したものが多く、置き土砂供給の下流河道への影響についてはあまり検討されていない。置き土砂による土砂供給に伴う河道の変動特性を検討することは効果的な土砂還元法を検討するためだけでなく、瀬・淵構造の維持・確保等の生物生息空間の改善にも役立つと考えられる。また、対象河道は河川の中・上流域であるため、混合砂礫の影響も検討する必要がある。

## 2. 研究の目的

本研究は、ダム下流の河床低下対策としての置き土砂の侵食・流送過程と、低水路変動への影響を詳細に検討するとともに、これに及ぼす混合砂礫の効果を明らかにし、置き土砂による河川回復手法に関する基礎的な知見を得ることを目的とする。研究の主眼は、置き土砂の侵食・流送過程と、これに及ぼす置き土砂の設置位置や質（粒度）の影響を明らかにすること、置き土砂による河床上昇効果とこれが低水路の変動（平面線形、滯筋、低水路深さ）に及ぼす影響を明らかにすること、さらに、これらに及ぼす混合砂礫の分級効果を明らかにすることにある。このため、以下の4点について検討する。

- (1) 置き土砂の設置方法が、置き土砂の侵食と流送過程に及ぼす影響（一様砂礫河床）
- (2) 置き土砂の質（粒度）および設置方法が、侵食と流送過程および砂礫の分級に及ぼす影響（混合砂礫河床）
- (3) 上記の検討に付随した、河床低下抑制効果と低水路の変動および砂礫の分級効果
- (4) 置き土砂の侵食・流送および低水路の変動過程を再現するシミュレーションモデルの構築とその検証

## 3. 研究の方法

本研究は水路実験と数値シミュレーションからなる。以下にそれぞれの概要を示す。

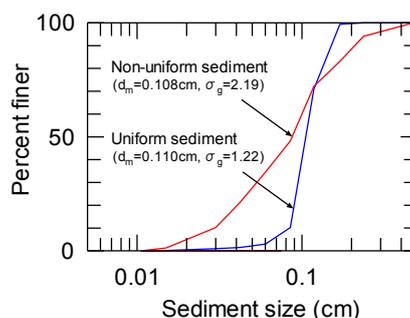


図-1 使用砂の粒度分布

### (1) 水路実験の概要

#### ①移動床実験

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、上流端に粗度付きの固定床を設置、その間に土砂を敷き詰めて長さ11mの移動床区間を設けた。また、実験にはほぼ同一の平均粒径を有する一様砂と混合砂を用いた。これらの粒度分布を図-1に示す。一様砂は平均粒径 $d_m=0.110\text{cm}$ 、幾何標準偏差 $\sigma_g=1.22$ を有し、混合砂は $d_m=0.108\text{cm}$ 、 $\sigma_g=2.19$ 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、土砂供給を行いながら流量 $Q_w=800\text{cm}^3/\text{s}$ の下で通水し、交互砂州をほぼ平衡状態まで発達させた。ついで、ダム下流河川を想定し、流量を減少かつ土砂供給を行わずに通水して河床低下を伴う低水路を形成させた。なお、このとき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とした。停水直前に接触式水面計を用いて水面を測定し、停水後にレーザー変位計を用いて河床面を測定した。その後、この低水路を初期河床( $t=0$ )とし、置き土砂を行うとともに流量を増加させて土砂供給を行わずに通水、置き土砂の侵食・流送と低水路の変動過程を追跡した。

置き土砂は図-2に示すような2種類の位置(白い部分)を設定した。Type Aは流心に近く、流れが比較的速い瀬付近への設置を想定したものであり、Type Bは流れが比較的遅い淵付近への設置を想定したものである。置き土砂の寸法記号を図-2と図-3に示す。長さLは水みち蛇行波長の1/4、幅Wは低水路幅の1/2を基本とし、置き土砂の上面は浮州のそれに一致させた。実寸法はおよそ $L=100\text{cm}$ 、 $W=5\text{cm}$ 、 $H=3\sim 4\text{cm}$ 程度である。また、置き土砂にはその流送状況を確認できるように青色の着色砂を混入した。なお、置き土砂は河床砂と同じものを用いた。

置き土砂を侵食・流送させるための流量は、低水路形成時よりも多く、かつ置き土砂が水没しない量( $400\text{cm}^3/\text{s}$ )とした。通水中は、置き土砂の侵食・流送状況と低水路の変動状況を把握するために、流れ場のスケッチ(河床の概形、置き土砂の形状、浮州の位置と概形

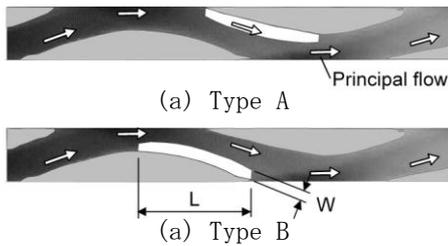


図-2 置き土砂の設置位置(平面形状)

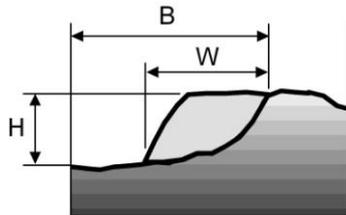


図-3 置き土砂の横断形状

および流砂方向)を随時行うとともに、水路下流端から流出する土砂を5分間隔で約1分間採取して流出土砂量を測定した。また、約10分ごとに水面と河床面の測定を先と同様の方法で行った。一つの実験はこれらを3回繰り返し、約30分間の変化を追跡した。なお、置き土砂の効果を明確にするため、置き土砂を行わない実験も実施した。

#### ②固定床実験

移動床の実験手順で形成された低水路を速乾性の接着剤とニス塗布によって固定化し、固定床の低水路を作成した。置き土砂の諸元、水路勾配、流量、実験方法等は移動床実験に準じた方法で実施した。

#### (2) 数値シミュレーションの概要

流れの基礎式は、デカルト座標系で示される水深平均された平面二次元流れの支配方程式を一般座標系に変換して用いた。底面せん断力は流線方向の底面近傍流速と流線の曲率を考慮した法線方向の底面近傍流速から、流線とx軸のなす角を考慮して求めた。また、乱流応力についてはゼロ方程式モデルを採用した。一方、河床変動については、流砂の連続式中の流線方向および法線方向の流砂量式として、それぞれMeyer-Peter & Müllerの式と長谷川の式を用いた。また、混合砂河床での粒度分布の変化の扱いには平野の方法を用い、固定床での流動層厚と流砂量評価はParkerの方法を用いた。

基礎式の離散化は有限体積法を用いて行い、移流項の離散化にはTVD-MacCormack法、時間積分にはEuler陽解法を用いた。また、変数配置はスタッガードスキームとした。計算では上流端で流量を与え、下流端では実験で得られた水位を与えた。本計算では陸域と水域が変動する現象を扱うため、これらの境界の判定と流れの計算の取り扱いに注意が必要である。本研究では、水深が河床材料の

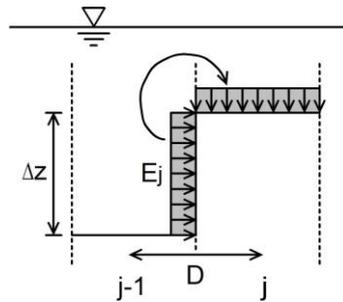


図-4 側岸侵食速度の取り扱いの例

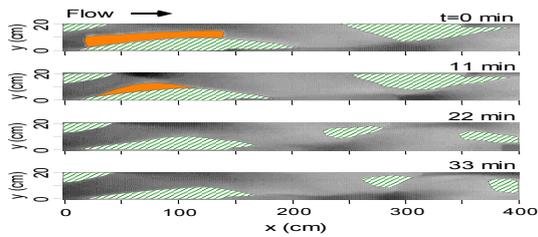
平均粒径以下となったときは、運動方程式中の圧力項とせん断力項のみを計算し、陸地境界を横切る流量フラックスを算出した。

実験の観察によると、置き土砂の侵食形態は、流水が当たる置き土砂上流面の侵食および流水と接する置き土砂下部の洗掘とこれに伴う上部のオーバーハングの崩落による側岸侵食であった。さらに、Type Aでは置き土砂によって左岸側に偏倚した流れが置き土砂を通過して拡がる際に、置き土砂の下流部を侵食することが確認された。これらのことから、側岸には相対的に大きな掃流力が作用し、活発な側岸侵食が生じていると考えられる。そこで、図-4に示すような取り扱いによって側岸侵食速度 $E_j$ を河床変動計算に取り入れることとした。すなわち、隣接する2つの計算点の河床位の差が $\Delta z$ であるとき、河床位の高い方の河床侵食速度に側岸侵食分を隣接点間の勾配 $\Delta z/D$ に応じて付加するものである。側岸侵食速度の算定には芦田らの式を用い、側岸に働くせん断力は両計算点の底面せん断力の平均値を用いた。なお、計算時間ステップ毎に道上らの方法に従って、水中安息角によるすべり面補正を行った。

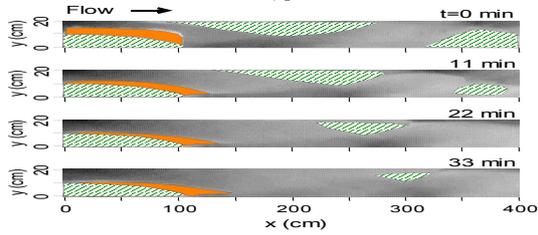
#### 4. 研究成果

##### (1) 置き土砂の侵食・流送性状

置き土砂の侵食性の観点からは流れの速い場所への設置が有効であり、また、全ての砂粒子が移動可能な条件であれば一樣砂よりも混合砂の方が侵食は活発である。なお、置き土砂によって水みちが効果的に埋め戻されると水みちは変動する可能性がある。図-5は、一樣砂河床(移動床)における河床形状と置き土砂の侵食・流送状況の推移を示したものである。Type Aは流心に近く流れが速い瀬に置かれているため、22min時点で既に全ての置き土砂が侵食されている。一方、Type Bでは流れが比較的遅い淵に設置されているため侵食の進行が遅く、11min以降はほとんど侵食が進んでいない。同様の傾向は混合砂河床においても認められた。一樣砂よりも混合砂の置き土砂の方が侵食は活発なのは、流れが緩やかな場所でも細砂は移動しやすく、細砂の抜け出しによって相対的に露出した粗砂が移動、これらが繰り返されること



(a) Type A



(b) Type B

図-5 河床形状と置き土砂の侵食状況の推移

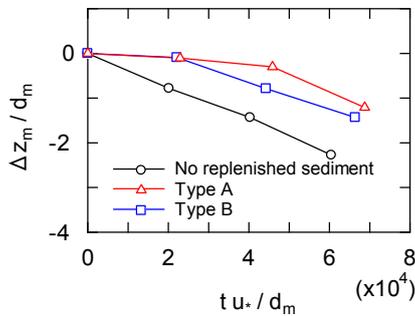


図-6 河床変動量の時間変化

によって置き土砂の侵食が効率的に行われるためである。ただし、この傾向は置き土砂の粒度構成の影響を受けるため、今後、この点に着目した検討が必要である。

固定床においても置き土砂の侵食性状は移動床と同様の傾向を示す。なお、混合砂の置き土の侵食後の流送については、粗砂は露出効果によって高移動性を示すが、細砂は遮蔽効果によって低移動性を示す。

置き土砂の侵食性からは、瀬などの流れの速い場所への設置が効果的であり、短時間で置き土砂を侵食、流送させることができる。逆に、淵などの流れの遅い場所への設置は長期間にわたって残留する可能性がある。

(2) 置き土砂による河床低下の改善効果

置き土砂は河床低下を抑制する効果がある。とくに、瀬に設置した場合は、より高い抑制効果を示す。図-6は、一様砂河床（移動床）における置き土砂の下流2m区間（流水の一蛇行長に相当）の河床変動量の時間変化を示したものである。置き土砂を行わないと河床低下が進行するが、置き土砂を行うと河床低下の遅延効果が現れる。また、混合砂河床では効果的な置き土砂の侵食と水みちの埋め戻しによって、早い段階で河床低下の抑制効果が現れることがわかった。ただし、時間が経過すると急速に河床低下が進行するの

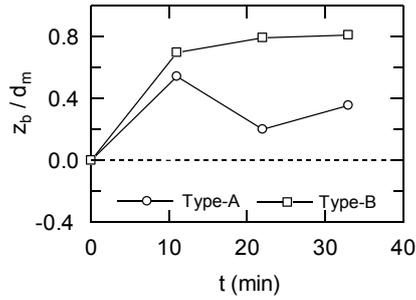
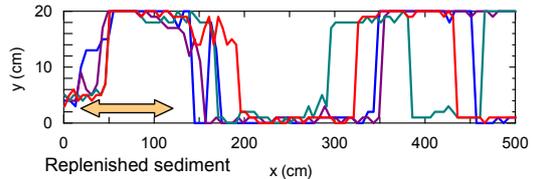
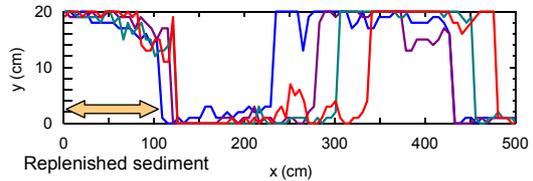


図-7 河床上昇量の時間変化



(a) Type A



(b) Type B



図-8 滞筋の時間変化

で、河床低下抑制効果の維持のためには継続的な置き土砂設置とモニタリングが必要であることもわかった。

図-7は固定床における一様砂の置き土砂下流2m区間の河床上昇量の時間変化を示したものである。両タイプとも河床上昇が見られ、河床低下の改善に寄与している。Type Aの効果が相対的に低いのは、置き土砂が高効率に侵食・流送され、多くの土砂がここで対象としている2m区間よりも下流に流送されたためである。Type Bの河床上昇は、侵食・流送効率が相対的に低く、結果として置き土砂下流域への堆積が持続したことに起因している。一方、混合砂ではType Aにおいて河床上昇が見られるが、Type Bではほとんど見られなかった。これは、置き土砂の侵食が進まず下流への土砂供給が少なかったためである。以上のことから、侵食効率では瀬などの流れの速い場所への設置が効果的ではあるが、河床上昇効果としては淵などへの設置の方が狭い範囲での河床上昇は期待できる。ただし、混合砂の場合は全粒径階の土砂が移動可能な流量条件が必要であることがわかった。

(3) 置き土砂による低水路の変動と砂礫の分級効果

置き土砂の設置によって水の流れや流砂方向が変化するとともに、侵食・流送された土砂の下流への供給によって低水路が変動

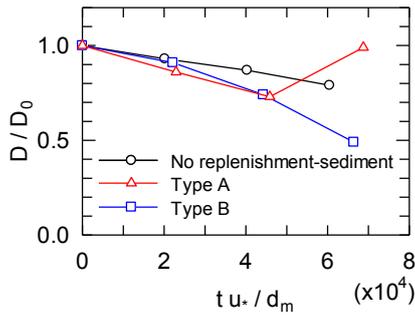


図-9 水みち深さの時間変化

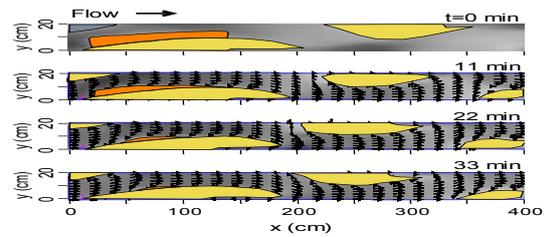
する。したがって、効果的な置き土砂は低水路の変動を促進させる効果がある。図-8は一樣砂河床（移動床）における滞筋の時間変化を示したものである。いずれのタイプでも置き土砂の侵食・流送による水みちの埋め戻しと水みち幅の拡大に伴う砂州の発達等に起因して滞筋が変動していることがわかる。とくに、Type Aでは滞筋が上下流方向に変動しており、また置き土砂の下流域にも滞筋の変動が認められ、Type Bよりも相対的に活発であるといえる。本実験の結果だけで置き土砂の侵食効率との関係を論じることはできないが、置き土砂の設置は水みちの変動促進につながる可能性を示唆している。

一方、混合砂河床では両タイプとも置き土砂の侵食・流送による滞筋の変動は一樣砂河床よりも抑制されることがわかった。これは低水路形成時の分級作用によって浮州の上流側に粗砂が集中し、流れに対して安定であることに起因している。ただし、流量増加や流れの集中によって浮州が不安定な状態になると水みちが変動する可能性は十分にある。ただし、このような状況を呈する条件については今後の検討課題として残された。

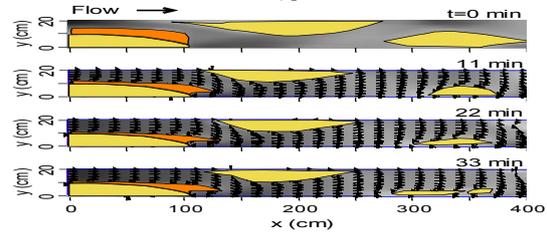
置き土砂は水みちの深さにも影響を及ぼし、効果的な置き土砂の侵食が水みちの埋め戻しに寄与、結果として水みち深さを減少させる。なお、これは置き土砂を継続的に行うことによって維持することができる。図-9は、置き土砂下流2m区間の水みち深さの平均値の時間変化を示したものである。水みち深さの減少は、主として置き土砂の侵食・流送による水みちの埋め戻しと浮州の侵食・規模縮小によるものであるが、置き土砂の侵食効率が大きく、早い段階で置き土砂が流送されたType Aでは実験終了時には水みち深さが増加に転じている。このような現象は水みちの固定化につながるため好ましくない。一方、置き土砂の侵食・流送効果が低いType Bは下流への土砂供給が相対的に抑えられるものの、下流浮州の侵食・規模縮小が水みち深さの減少に寄与しているといえる。

#### (4) 数値シミュレーションの実施と検証

図-10は置き土砂の侵食と低水路の変動過程に関する計算結果である。Type Aの方が短



(a) Type A



(b) Type B

図-10 置き土砂の侵食と河床形状(計算結果)

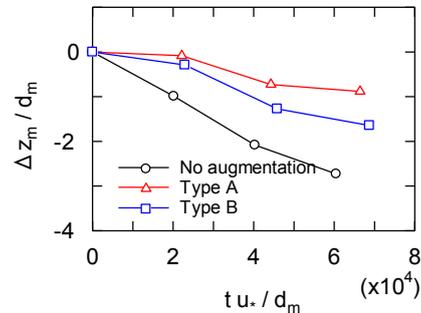


図-11 河床変動量の時間変化(計算結果)

時間で侵食されており、Type Bではかなりの置き土砂が残留していることがわかる。これらの傾向は実験結果（図-5）と同様であり、本シミュレーションにおける側岸侵食速度の導入が効果的に作用しているといえる。なお、側岸侵食速度を導入しない場合は河床洗掘が卓越する結果となった。混合砂に対しても同様の現象を再現することができた。ただし、置き土砂と河床材料の粒度が異なる場合の計算は開発段階にある。

図-11は置き土砂下流の河床変動量の時間変化を示している。実験で得られた置き土を設置することによる河床低下の遅延効果（図-6）が再現されており、シミュレーションによって遅延時間や低下量の予測が可能であるといえる。混合砂に対しても河床低下の遅延効果の再現性は良好であった。

図-12は滞筋の時間変化を示したものである。実験（図-7）では両タイプとも置き土砂下流で滞筋が変動し、とくにType Aの方が相対的に活発であった。しかし、計算結果は必ずしもこのような傾向を再現できていない。これは、置き土砂による低水路河床の埋め戻しよりも洗掘が卓越しているためで、流砂量の平面分布やその算定精度について検討する必要がある。混合砂河床では低水路は安定であるために滞筋の変動はほとんどなく、シ

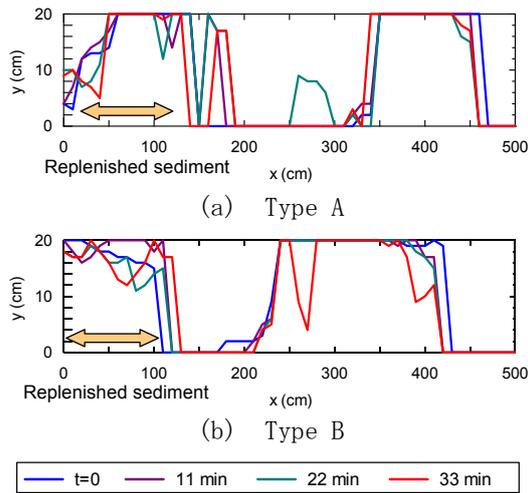


図-12 滞筋の時間変化（計算結果）

ミュレーションも同様の傾向を示した。

図-13は水みち深さの時間変化を示している。置き土砂を行わない場合の水みち深さは増加し、置き土砂を行った場合は顕著な変化は見られない。これらは実験の傾向とは異なっているが、置き土砂を行えば水みち深さの増大を抑制できることは計算結果でも示されており、実験結果と共通している。実験の傾向と異なった原因は③と共通していると考えている。

固定床に関するシミュレーションについては、置き土砂の侵食過程と河床上昇効果は実験の現象をおおむね再現することができた。しかし、固定床上での混合砂礫の流送過程は現象の再現性が低く、今後の課題である。

本研究によって置き土砂による土砂供給の効果と河道への影響に関する基礎的な知見を得ることができた。とくに、河床低下の遅延効果を示したことは、実河川での置き土のタイミングを検討するための情報となりうると考えられる。本研究で対象とした現象は限定的ではあるが、シミュレーションによって比較的容易に種々の条件下での現象を再現できる目途が立った。今後はシミュレーション精度の向上を図るとともに、現地実験との比較を行う必要がある。

## 5. 主な発表論文等（研究代表者には下線）

〔雑誌論文〕（計2件）

- ① 三輪 浩，大同淳之，竹下洋平，高橋拓士：置き土砂の侵食・流送と水みち変動への影響，査読有，土木学会水工学論文集，第53巻，2009，pp. 763-768.
- ② Miwa, H.，Daido, A.，Yuasa, Y. and Fujita, H.：Low-waterway variation due to change of water and sediment supply conditions, Proc. of the 8th International Conference on Hydro-Science and Engineering, 査読無, Vol. VIII/CD-ROM, 2008.

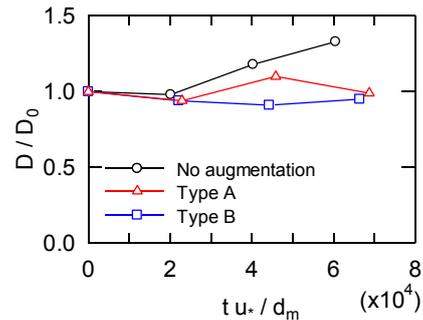


図-13 水みち深さの時間変化（計算結果）

〔学会発表〕（計3件）

- ① 竹下洋平，三輪 浩，村上榮作，山田達也：固定化した水みちにおける仮置き土砂の侵食・流送過程と河床低下の改善効果，平成21年度土木学会関西支部年次学術講演会，2009年5月23日，神戸工業高等専門学校。
- ② 竹下洋平，三輪 浩，高橋拓士，高橋剛：仮置き土砂が河床低下の抑制と水みちの変動に及ぼす影響，平成20年度土木学会関西支部年次学術講演会講演会，2008年5月24日，近畿大学。
- ③ 三輪 浩，高橋拓士，竹下洋平，工原剛正：仮置き土砂の侵食・流送による低水路の変動特性，第62回土木学会年次学術講演会講演会，2007年9月12日，広島大学。

〔その他〕

- ① Miwa, H.：Effects of sediment supply on low-flow channel formation, and its variation due to sediment augmentation, Environmental Hydrology and Hydraulic Engineering seminar, Invited Lecture, Apr. 16, 2010, University of Illinois.
- ② 三輪 浩：置き土による土砂供給と水みちへの影響，砂防オープンゼミ，2009年7月11日，京都大学。
- ③ Miwa, H.：Effect of sediment supply conditions on low-waterway formation, International Seminar for hydrological studies on carbon and nutrient, Nov. 26, 2007, University of Hyogo.
- ④ 三輪 浩：仮置き土砂供給による低水路の変動特性，「河川構造物等に作用する流体力と流れ」研究分科会，2007年11月2日，京都大学穂高砂防観測所。

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

三輪 浩 (MIWA HIROSHI)

舞鶴工業高等専門学校・建設システム工学科・准教授

研究者番号：70190832