

置土された土砂の流下過程の 数値解析モデルの構築と実河川における適用

DEVELOPMENT OF NUMERICAL MODEL ON TRANSPORT PROCESS OF REPLENISHED SEDIMENT AND ITS APPLICATION

武藏 由育¹・志宇知 誠²・山下 正浩³・竹林 洋史⁴

湯城 豊勝⁵・鎌田 磨人⁶・赤松 良久⁷・河口 洋一⁸・中田 泰輔⁹

Yoshiiku MUSASHI, Makoto SHIUCHI, Masahiro YAMASHITA, Hiroshi TAKEBAYASHI,
Toyokatsu YUKI, Mahito KAMATA, Yoshihisa AKAMATSU, Yoichi KAWAGUCHI and Yasusuke NAKATA

¹正会員 農修 八千代エンジニアリング株式会社 水工部 (〒161-8575 東京都新宿区西落合2-18-12)

²非会員 工 国土交通省 那賀川河川事務所 管理課 (〒774-0011 阿南市領家町室ノ内390)

³正会員 国土交通省 那賀川河川事務所 調査・品質確保課 (〒774-0011 阿南市領家町室ノ内390)

⁴正会員 博士(工学) 京都大学准教授 防災研究所 (〒612-8235 京都市伏見区横大路下三栖東ノ口)

⁵正会員 博士(工学) 阿南工業高等専門学校教授 建設システム工学科 (〒774-0017 阿南市見能林町青木265)

⁶正会員 学博 徳島大学教授 工学部建設工学科 (〒770-8506 徳島市南常三島町2-1)

⁷正会員 博士(工学) 山口大学准教授 工学部社会建設工学科 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台2-16-1)

⁸正会員 学博 徳島大学准教授 工学部建設工学科 (〒770-8506 徳島市南常三島町2-1)

⁹正会員 工修 八千代エンジニアリング株式会社 環境計画部 (〒161-8575 東京都新宿区西落合2-18-12)

As a method of countermeasure to bed degradation and armoring phenomena of bed material in the downstream area of dam reservoirs, sediment augmentation has been carried out in many Japanese rivers. However, the effect of sediment augmentation on the bed elevation, sediment size and habitat in the downstream reach of the sediment augmentation has not been studied well because of the small amount of the replenished sediment. In this study, one dimensional bed deformation analysis is developed to simulate the sediment transport process of the replenished sediment in the Nakagawa, Tokushima. Here, the Japanese largest scale sediment augmentation has been performed in the Nakagawa.

The results show that the developed model is able to simulate the sediment transport process from sediment augmentation. Furthermore, sediment deposition areas of each sediment size class are simulated. The coarse sediment is transported only within 3-4km. On the other hand, the fine material is transported to the downstream area from 10km to 20km. As a result, bed material from 4km becomes finer more than that near the replenished sediment area.

Key Words : *sediment augmentation, bed deformation analysis, numerical simulation, non-uniform sediment, rigid bed*

1. はじめに

ダムへの堆砂によって、下流への土砂供給が減少することによる下流河川における河床低下、河床材料の粗粒化などへの対策として、ダムに堆積した土砂の掘削土砂をダム下流河道へ置土し、洪水時に流下させる土砂還元の実施事例が近年増加している。

土砂還元を実施する上では、下流河川における治水安全度の確保と生物の生息環境や物理環境の変化に配慮しつつ、河床位および河床材料の粒度を回復することが必要となるために、置土の流下過程と下流の河床高や粒度の変化を河床変動解析等により予測する手法の確立が必要とされているとともに、置土した土砂の洪水時の動態に関する知見の集積が急務となっている。

実際の置土の流下過程に関する解析事例は、植木ら(2006)による多摩川における事例¹⁾、菊池ら(2007)による

矢作ダムにおける事例²⁾、佐々木ら(2008)および櫻井(2008)による三春ダムにおける事例³⁾、⁴⁾などがある。これらの事例では置土地点からの土砂の流出現象を主に扱っており、流出した土砂の流下・堆積による下流河道の変化の状況を把握するまでには至っていない。これは、現段階で実施されている土砂還元の多くが試験的な実施に限られており、下流河道の河床変動を捉えるほどの土砂量を置土するに至っていないためと考えられる。

置土の形状により土砂の流下量をコントロールする方法の検討では、置土した土砂の平面形状の変化を予測するための平面2次元河床変動解析モデルが必要である。また、下流河道の変化についても、河原や瀬・淵の形状など平面的な地形および粒度の変化の把握が必要である。

一方で、土砂還元による変化は長期的かつ広範囲に把握する必要があり、2次元解析では計算負荷が大きく長期かつ広範囲の河道を対象に解析を行うのは困難である。

従って、本研究では、図-1に示すように置土地点と置土による河床位と河床材料の粒度の回復効果の評価地点は2次元解析、置土地点～評価地点は1次元解析を適用した解析モデルを構築し、全国でも最大規模の置土を実施している徳島県・那賀川における事例を対象として、置土地点からの土砂の流出、下流河道における土砂の流下・堆積状況の数値シミュレーションを行い、解析モデルの再現性について検討するとともに、置土した土砂の洪水時の動態について検討している。

本論文では、これらの研究のうち、1次元河床変動解析による、置土から流出した土砂が河道を流下する過程の数値シミュレーションについて、那賀川における置土事例を対象に再現計算を行い、再現性を確認するとともに、解析結果から得られる情報について考察を行った結果について示す。

2. 解析モデルの構築

(1) 解析モデル

本研究で用いる1次元河床変動解析には、将来、数十年の長期予測が実施できるように流れの計算に不等流計算を用いた1次元河床変動解析モデル⁵⁾を用いた。

解析モデルの基礎式は以下の通りである。

$$\frac{d}{dx} \left(\frac{1}{2g} \frac{Q^2}{A^2} \right) + \frac{dH}{dx} + i_e = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial A_z}{\partial t} + \frac{1}{(1-\lambda)} \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left(\sum_k (B \cdot q_{Bk}) \right) + B \cdot \sum_k (c_{sbek} - c_{sbk}) w_k \right\} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial c_{sk} A}{\partial t} + \frac{\partial c_{sk} Q}{\partial x} = B \cdot (c_{sbek} - c_{sbk}) \cdot w_k \quad (3)$$

ここに、 x ：河道流下方向の座標、 t ：時刻、 Q ：流量、 A ：流下断面積、 H ：水位、 A_z ：堆積土砂の断面積、 λ ：空隙率、 B ：河床幅、 g ：重力加速度、 i_e ：エネルギー勾配であり、マニング則により評価した。また、 k は粒径階を示す添え字、 \sum は全粒径の和を示しており、各粒径階について w_k ：沈降速度、 q_{Bk} ：掃流砂量、 c_{sk} ：水深平均浮遊砂濃度、 c_{sbk} ：河床基準面における浮遊砂濃度、 c_{sbek} ：河床基準面における平衡浮遊砂濃度である。

河床材料の粒度分布は、図-2に示すように鉛直方向に交換層と堆積層を想定し、以下に示す粒径階ごとの連続式^{6)・7)}により交換層における粒径階 k の存在率 f_{bk} を算出した。

$\partial A_z / \partial t \geq 0$ の場合 (河床上昇時)

$$\frac{\partial f_{bk} A_b}{\partial t} + f_{bk} \frac{\partial A_z}{\partial t} + \frac{1}{(1-\lambda)} \left\{ \frac{\partial (B \cdot q_{Bk})}{\partial x} + B \cdot (c_{sbek} - c_{sbk}) w_k \right\} = 0 \quad (4)$$

$\partial A_z / \partial t < 0$ の場合 (河床低下時)

$$\frac{\partial f_{dk} A_b}{\partial t} + f_{bk} \frac{\partial A_z}{\partial t} + \frac{1}{(1-\lambda)} \left\{ \frac{\partial (B \cdot q_{Bk})}{\partial x} + B \cdot (c_{sbek} - c_{sbk}) w_k \right\} = 0 \quad (5)$$

交換層厚 δ は河床材料の最大粒径程度を想定し25cmに設定し、各堆積層の厚さ E_i が25cmを超えると層の数が增加するように設定した。また、解析対象河道は概ね露岩していることから、初期の全層厚 E_i は基本的に0とし、河原などが存在する断面についてはそれらの断面積、川

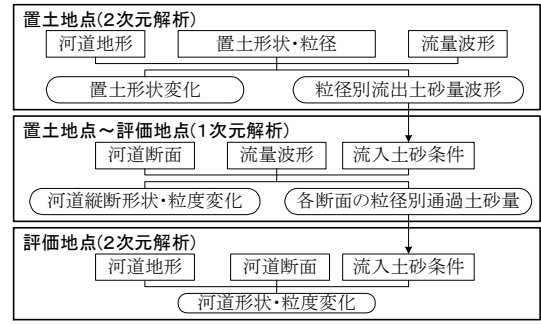


図-1 解析モデルの概念図

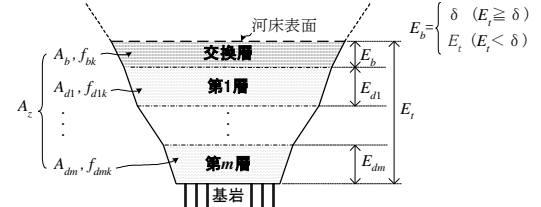


図-2 交換層の概念図

口ダム貯水池内は堆砂の断面積が、解析モデル上の堆積断面積に等しくなるように全層厚 E_i を与えた。

掃流砂量は、芦田・道上式⁸⁾、基準面高さにおける平衡浮遊砂濃度については、Lane&Kalinske式⁹⁾を用い、それぞれ式(6)、式(7)に示すように算出した。

$$q_{Bk} = 17 \frac{u_{*c}^3}{sg} \left(1 - \frac{u_{*ck}}{u_*} \right) \left(1 - \frac{u_{*ek}}{u_*} \right) \cdot f_{bk} \cdot r_b \quad (6)$$

$$c_{sbek} = 5.55 \cdot (0.5 \cdot u_* / w_k \cdot \exp(-w_k / u_*))^{0.61} \cdot f_{bk} \cdot r_b \quad (7)$$

ここに、 u_* ：摩擦速度、 u_{*c} ：限界摩擦速度、 u_{*e} ：限界摩擦速度、 s ：土粒子の水中重量である。また、 r_b は土砂の堆積厚 E_i が減少し、設定された交換層厚 δ よりも小さくなった場合に流砂量を減少させるパラメータであり、以下のように表される¹⁰⁾。

$$r_b = \begin{cases} 1 & (E_i \geq \delta) \\ E_i / \delta & (E_i < \delta) \end{cases} \quad (8)$$

式(6)および式(7)において、右辺に r_b を乗じているのは、従来各粒径の存在率 f_{bk} を乗じるのと同様に、露岩河床の河床材料の存在率の減少による、平衡流砂量および平衡浮遊砂濃度の減少を評価するためであり、移動しない大粒径として、露岩を扱っていることと同様になる。

置土が必要とされている河川の多くは、供給土砂量の不足により、河床の一部から岩が露出していることが多い。那賀川においても、鷺敷地区に代表されるように、岩が河床から露出している。従来、このような場での土砂の伝播は、岩露出域に流れ込んだ土砂が即座に下流の移動床域に到達するような取り扱いが多くなされていたが、本研究では、岩露出域の土砂の伝播プロセスを表現するために、上記のようなパラメータを導入した。

3. 解析モデルの実河川への適用

(1) 解析対象現象の概要

a) 那賀川における置土の概要

那賀川では、長安口ダムからの掘削土砂を下流へ置土している。平成3年度から平成18年度までは徳島県により、年2,000~24,000m³の置土が実施されてきた。平成19年度から

は国土交通省により実施され、置土量が増加されている。

平成20年度には55,700m³が設置された。しかし、置土が流下する規模の出水が無く、平成21年度に合計159,900m³の置土が設置された状態で、平成21年8月9日～10日に台風9号による出水が生じ、置土量増加以降、初めての置土流下となった。

図-3に平成21年台風9号による出水時に、置土が設置されていた地点を示す。長安ロダム下流には、逆調整池であり比較的越流頂の低い川口ダムが存在しており、川口ダムより上流の2地点(小浜橋上流地点、桜谷地点)、下流の2地点(川口ダム下流地点、朝生地点)で置土が実施されている。

平成21年台風9号出水時の置土量は表-1に示す通りである。川口ダムより上流の小浜橋上流地点は54,700m³、川口ダムより下流の朝生地点では83,100m³であり、特に置土の規模が大きい地点となっている。

平成21年台風9号出水前の各地点の置土の粒度分布を図-4に示す。那賀川における置土では、長安ロダム下流に位置する川口ダムの堆砂が増加しないように配慮するため、川口ダムの上流に置土する土砂の粒度と川口ダムの下流に置土する土砂の粒度を変えている。つまり、川口ダムを通過しにくい大粒径を含む材料Aと、含まない材料Bに区分し、川口ダム上流には材料Bを置土している。このように、日本の多くの河川で見られるように、ダムが連続している河川では、下流側に存在するダムの機能に配慮し置土の粒度を設定する必要がある。

b) 検証対象出水の発生状況

平成21年台風9号による出水は、8月9日～10日にかけて発生した。朝生置土地点より5km下流に位置する和食流量観測所における出水時の流量(10分間隔)を図-5に示す。9日18:30に3,140m³/sの1回目のピークが発生し、10日10:20に5,750m³/sの2回目のピークが発生する2山の出水となっている。

c) 置土の流下状況

台風9号出水後の地形測量より、表-1に示すように、約16万m³設置されていた置土の流下量は約12万m³であった。

d) 下流河道の変化の状況

流下した置土が下流河道の河床材料、河床形状、生物環境の変化にどのような影響を与えるかについては、いまだ十分な知見が得られていない。そこで、那賀川では

置土によるこれらの変化の状況を確認するモニタリング調査を実施している。

置土流下による河道の変化は、置土地点から下流へ離れるほど小さくなるものと考えられる。従って、河道の変化を確認するためのモニタリング調査地点(以降、評価地点)は、図-3に示すように、縦断的に位置を変化させた8地点が配置されている。これは、置土量が多い小浜橋上流地点および朝生地点からの流出土砂の影響の流下方向の変化を把握するためである。

モニタリング調査項目は表-2に示す通りであり、本検討ではこの調査から得られる情報を対象とした。

8箇所の評価地点におけるモニタリング調査では、出水前後の50mピッチの横断測量により河床形状の変化を確認するとともに、河床材料マップ作成による河床材料の平均粒径の変化が確認されている。また、出水後に顕著に堆積した場所の土砂を採取して粒度分布を測定し、

表-1 台風9号出水時の置土の設置・残留・流下量

| | 小浜橋上流 | 桜谷 | 川口ダム下流 | 朝生 | 合計 |
|-----|--------|--------|--------|--------|---------|
| 設置量 | 54,700 | 3,900 | 18,200 | 83,100 | 159,900 |
| 残留量 | 7,100 | 0 | 6,700 | 26,500 | 40,300 |
| 流下量 | 47,600 | 3,900 | 11,500 | 56,600 | 119,600 |
| 流下率 | 87.0% | 100.0% | 63.2% | 68.1% | 74.8% |

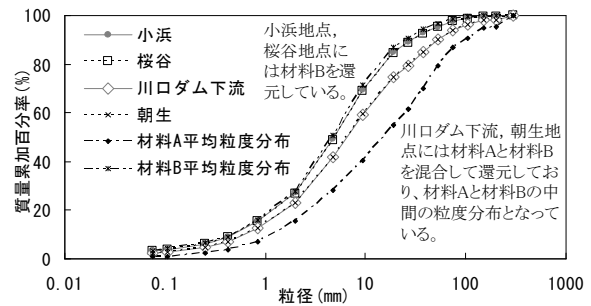


図-4 置土の粒度分布

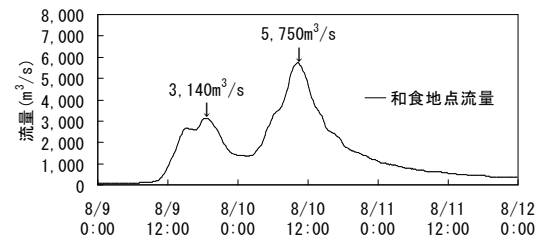


図-5 平成21年台風9号出水時の水位・流量

注：和食地点流量は、平成21年の水位・流量曲線が未確定のため、近年の大規模出水発生年(平成16年)の水位・流量曲線を用いた推定値である。

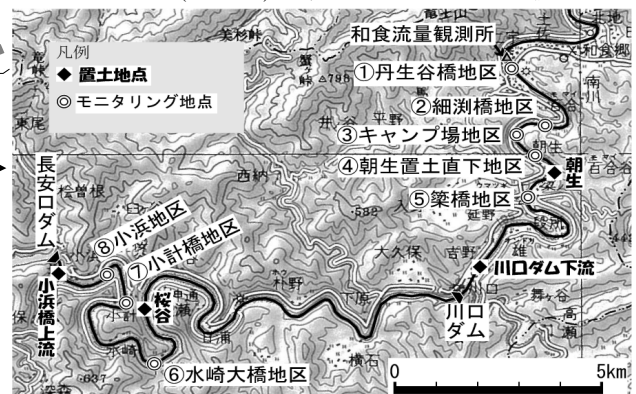
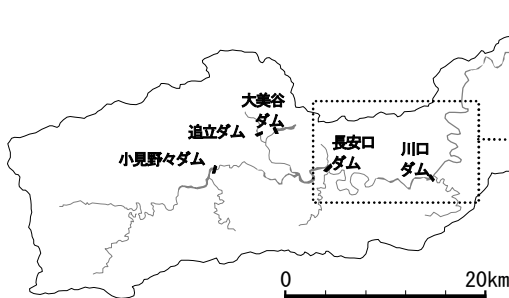


図-3 那賀川における置土地点とモニタリング地点の位置図

還元土砂の粒度分布との比較から置土による土砂の堆積であることを確認している。

河床材料マップは図-6に示すように、粒径を7区分するとともに、材料の混在状況を記録している。

図-7に評価地点において確認された河床材料変化の1例を示す。この図に示す範囲は流下方向に約400m、横断方向に約50m程度の限られた範囲であるにもかかわらず、置土の堆積のしかたは様ではなく、分級された土砂の堆積箇所が散在している。また、全体的に河床材料は細粒化しているが、調査地点下流域の方が細粒分の堆積が多いことがわかる。これは、後で示す1次元河床変動解析結果から推察すると、粗い粒径よりも細かい粒径の方が置土地点よりも下流域に輸送され、堆積することによるものと考えられる。

8箇所の評価地点における河道の地形測量による河床変動量と、河床材料マップ作成による土砂の堆積状況および河床材料の変化状況のモニタリング調査結果から確認された河道の変化状況をまとめると図-8に示すようになる。

図-8に示すように、平成21年台風9号出水による、小浜置土地点からの流出土砂の顕著な堆積範囲は小浜地区～小計橋地区であり、朝生置土地点からの流出土砂の顕著な堆積範囲は朝生置土直下地区～細淵橋地区であった。

これらの結果より、1出水により河床形状および河床材料に顕著な変化が確認された範囲は置土地点から約3km程度の範囲であり、これより下流へ置土による顕著な変化が伝播するためには、複数回の出水により、土砂が下流へ移動するとともに、継続的な置土が必要と考えられる。

(2) 流下土砂移動状況の再現計算

置土された土砂の流下過程に関する1次元解析は、置土地点で実施した平面2次元河床変動解析から得られた粒径別流出土砂量を置土地点における供給土砂量として与えるとともに、支川からの流入土砂量を、支川河道形状と支川河道の粒度分布をもとにした平衡流砂量により与えた。

置土地点からの流出土砂量は、土砂還元地点の河道が露岩していることから、縦断方向20m、横断方向5m程度の河床地形の2次元メッシュデータを固定床とし、その上に置土高さを図-3の粒度分布の移動床として与え、一般座標系のTVDマッコーマック法による平面2次元河床変動解析¹¹⁾を行い、表-3および図-9に示すように置土の流下量および出水前後の置土形状変化の再現性を確認した上で用いた。

平衡流砂量を算出する際の支川流量条件および流れ計算の流量条件は、川口ダム流入量と和食地点流量の10分間隔の観測値を用い、図-10に示すように流域面積配分で各時刻の流量を設定した。また、川口ダム地点に貯水位の10分間隔観測値を与え、下流端には等流水深を与えた。

置土による流砂量の変化を抽出するため、置土あり・なしの2通りについて計算を行い、流砂量の差分から置土による流砂量および河床変動量の変化を抽出した。

表-2 モニタリング調査項目

| 対象 | 項目 | 内容 |
|-------------|-----------|--|
| 置土地点 | 横断測量 | 流下前後の置土形状変化を測量 |
| 評価地点 8地点 | 横断測量 | 50mピッチで河床形状を測量 |
| | 河床材料マップ作成 | 現地踏査での目視により、河床材料の平均粒径の平面分布図作成。水中は、水中ビデオカメラにより撮影。 |
| | 粒度分布 | 顕著な地形変化地点の粒度分布調査。 |
| | 環境調査 | 魚類・底生動物・藻類・景観撮影等 |

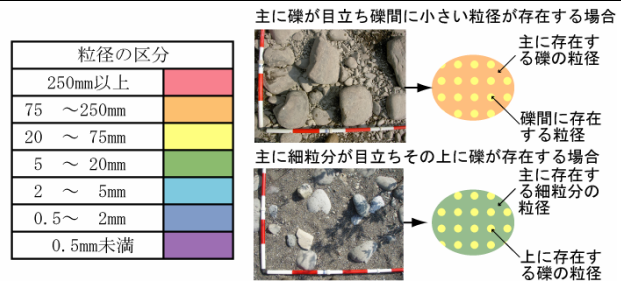


図-6 河床材料の区分と河床材料マップにおける表現方法

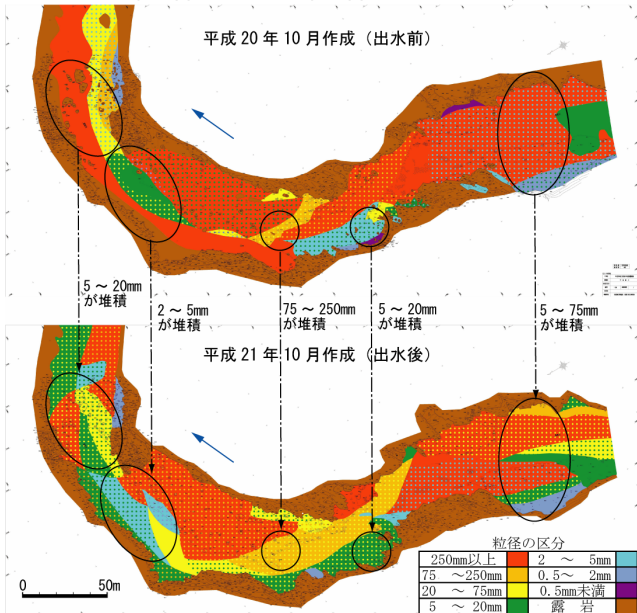


図-7 評価地点において確認された変化の1例(小浜地区)

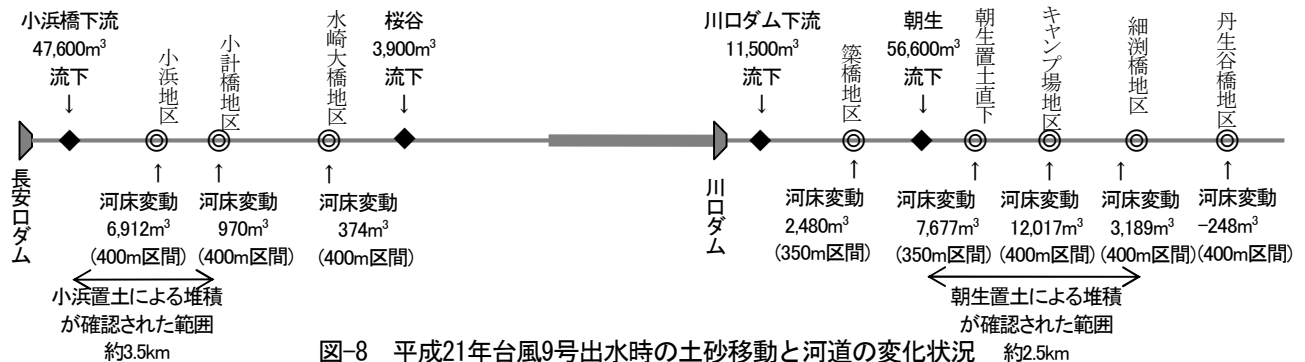


図-8 平成21年台風9号出水時の土砂移動と河道の変化状況 約2.5km

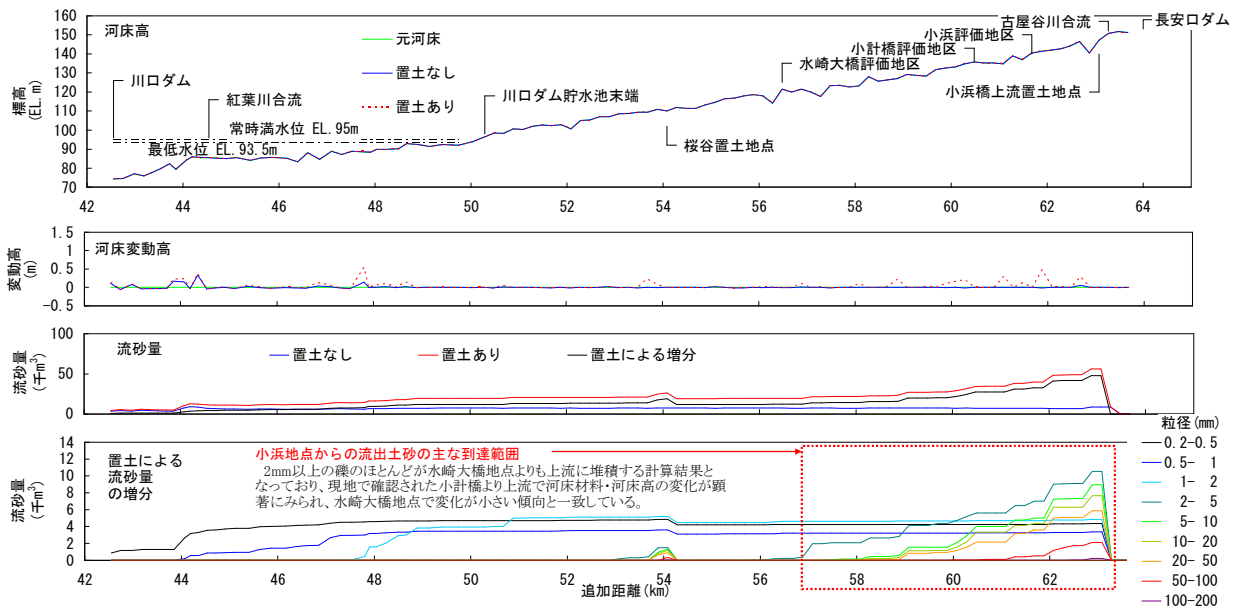


図-11 河床高と流砂量の変化の解析結果(長安口ダム～川口ダム)

(3) 考察

解析結果から得られた河床高と流砂量の変化を図-11 および図-12に示す。計算結果による置土の堆積範囲は、図-8に示したモニタリング調査により土砂の堆積が確認された範囲と概ね一致する結果となった。

また、測量により把握された評価地点の河床変動量と解析結果の河床変動量を比較すると図-13に示すようになる。両者の河床変動量に差が見られるものの、評価地区ごとの河床変動の多寡の傾向がほぼ再現される結果となった。しかし、当然ながら実際の土砂の堆積状況は横断方向の偏りがあり、図-7に示すように横断方向の分級が顕著である。1次元河床変動解析では、このような現象の再現が出来ないこと、岩塊などの存在による河幅の局所的な変化の影響が再現できないことなどの限界がある点は注意が必要である。

また、本研究の対象河道は、図-7に示したように粒径の大きい礫分で構成されている。このような石礫河川では、巨石等による静的な河床安定機構により、砂礫河川で使われてきた従来の動的平衡を想定した流砂量式や浮遊砂濃度式の適用に問題点があることから、福岡・長田らは河床材料の静的平衡を組み込んだ解析モデルを提案している¹²⁾。また、関根らは従来の浮遊砂浮上量の推定式を礫床に適用する際の問題を指摘し、礫間に細粒土砂が充填される機構を考慮して浮遊砂浮上量を求めるモデルを提案している¹³⁾。

本研究で適用した解析モデルは、長期に亘る置土による影響の将来予測に用いることを前提としており、汎用性と解析に関する負荷の軽減を重視し、これらに示された点は考慮せず、従来広く用いられている平衡流砂量、平衡浮遊砂濃度により解析している。

以上に示したように、1次元解析であること、掃流砂の非平衡性や礫間からの詳細な浮遊砂の浮上機構を考慮したモデルとなっていないことによる解析精度の限界は

表-3 置土流下量実績と計算結果の比較 (単位: m³)

| | 小浜橋上流 | 桜谷 | 川口ダム下流 | 朝生 |
|-------|--------|-------|--------|--------|
| 実績流下量 | 47,600 | 3,900 | 11,500 | 56,600 |
| 計算結果 | 48,000 | 3,600 | 10,900 | 56,300 |

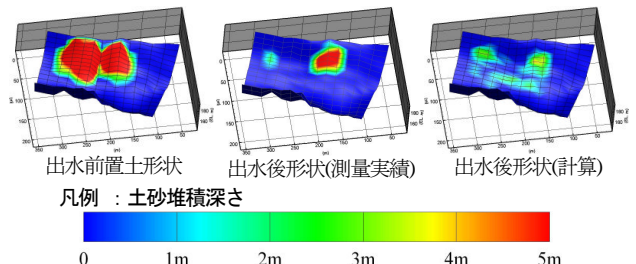


図-9 置土形状変化実績と計算結果の比較例(小浜橋上流)

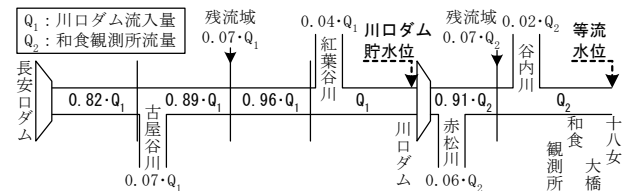


図-10 1次元河床変動解析に用いた流量配分

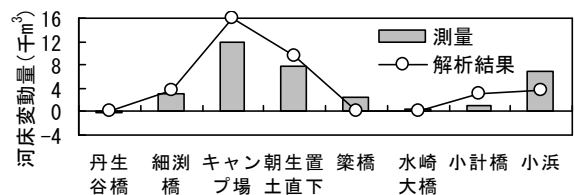


図-13 評価地区河床変動量の測量結果と解析結果の比較

あるものの、置土された土砂の到達範囲については概ね再現することが可能であった。

図-9および図-10に示した置土による流砂量の増分からは、粒径別ごとに土砂の到達範囲が大きく異なっていることが確認できる。50mm～100mmの礫分は置土地点から1～3km下流の範囲で堆積する結果となっている。また、2mm以上の礫分は置土地点から3～5kmの範囲で堆積している。このように、粒径が大きく、移動しにくい礫分により河床位を早

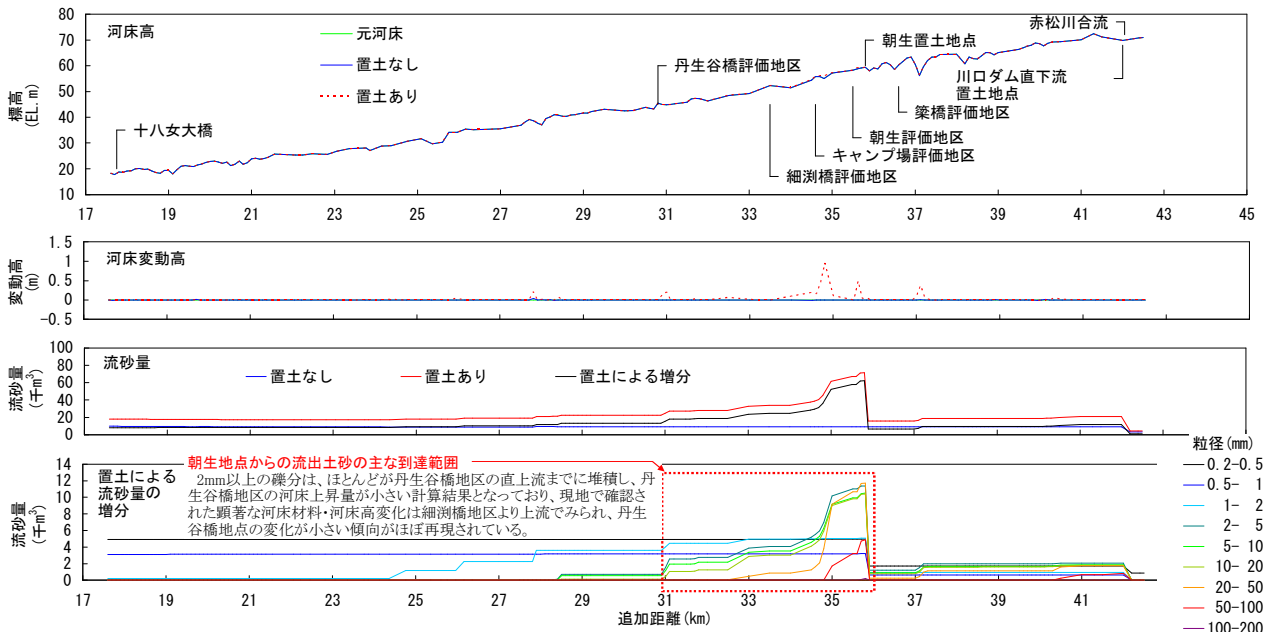


図-12 河床高と流砂量の変化の解析結果(川口ダム～十八女大橋)

期に回復するためには、目的とする地点の直上流域に置土する必要があるものと考えられる。2mm未満の砂分は移動距離が長く、小浜地点から流出したものは川口ダム貯水池まで到達し、朝生地点から流出したものは今回計算対象とした範囲よりも下流まで到達する結果となっている。

以上に示したような粒径別の到達範囲の違いから、河床位の上昇は置土地点直下流部において顕著に表れているが、河床材料の細粒化はさらに下流でも発生し得るものと考えられる。また、これらの結果より、置土を実施するときは、その量だけでなく、どのような粒度の土砂を用いて置土を実施するかという点が非常に重要であることがわかる。さらに、置土が下流の河床形状や河床材料の粒度の変化を通して生物の生息場に与える影響を検討する場合は、河床材料を混合砂として扱わなければ評価が難しいことが予想される。

4. おわりに

本論文では、置土から流出した土砂が河道を流下する過程を1次元河床変動解析によりシミュレーションするモデルの構築を行い、実河川における置土の事例を対象とした再現計算により、モデルによる再現性を確認するとともに、解析結果から得られる情報について考察を行った。

本論文における1次元河床変動解析を用いた再現計算により、実河川の置土による流出土砂の堆積特性を概ね再現することができた。また、粒径別の土砂の到達範囲の違いについて明らかにできることから、置土による下流河道の河床位や河床材料の粒度分布の変化の発生位置や堆積粒径を予測し、置土計画を立案するための重要なツールになると考えられる。

ただし、本検討で再現対象とした置土地点下流河道の河床変動状況は、8箇所でのモニタリング地点におけるものであり、河道全体の土砂収支について確認できていないため、より詳細なデータ収集を行った上で、解析モデルの粒径別

土砂収支の再現状況を確認することが今後の課題である。

参考文献

- 1) 植木真生, 福島雅紀, 山下武宣: 河道掘削及び砂礫の敷設供給に対する河床の応答, 河川技術論文集, 第12巻, pp.415-420, 2006
- 2) 菊池英明, 小出武文, 小林信昭, 末次忠司, 岡野真久: 長期排砂対策を考慮したダム下流土砂還元試験と影響調査に関する提案, 河川技術論文集, 第13巻, pp.69-74, 2007
- 3) 佐々木崇憲, 櫻井寿之, 箱石憲昭: 三春ダム直下流における置土侵食の平面2次元河床変動解析, 土木学会第63回年次学術講演会講演概要集, pp.253-254, 2008
- 4) 櫻井寿之: 置土の侵食過程と流送過程の数値計算, 置土シンポジウム, pp.59-66, 2008
- 5) 道上正規, 藤田正治, 前田真吾: 非平衡浮遊砂を考慮した急勾配水路における貯水池堆砂の計算法, 水工学論文集, 第34巻, pp.367-372, 1990
- 6) 平野宗夫: Armoringを伴う河床低下について, 土木学会論文集, 第195号, pp.55-65, 1971
- 7) 櫻井寿之, 鎌田昌行, 柏井条介, 鈴木伴征: 混合粒径河床変動モデルによる貯水池堆砂・排砂現象の再現, ダム工学, Vol.16, No.1, pp.30-40, 2006
- 8) 芦田和男, 道上正規: 移動床流れの抵抗と掃流砂量に関する基礎的研究, 土木学会論文報告集, 第206巻, pp.59-69, 1972
- 9) Lane, E. W. and Kalinske, A. A.: Engineering calculation of suspended sediment, Trans. A.G.U., 22, 1941
- 10) Hiroshi Takebayashi, Shinji Egashira and Haiseng Jin: Effect of sediment sorting on geomorphologic characteristics of alternate bars, Proc. 27th Congress of IAHR, Theme B, pp. 1433-1438, 1997.
- 11) 竹林洋史: 河川中・下流域の河道地形, ながれ, 第24巻, 第1号, pp. 27-36, 2005.
- 12) 長田健吾, 福岡捷二: 石礫河川の土砂移動機構に着目した1次元河床変動解析法の開発, 水工学論文集, 第52巻, pp.625-630, 2008
- 13) 関根正人: 礫・シルト充填河床モデルを用いた礫河道の準2次元河床変動解析, 水工学論文集, 第51巻, pp.973-978, 2007