

# 土砂の流下波形 (Sediment wave) を考慮した 置土による河床改善効果評価モデルの提案

EVALUATING RIVERBED IMPROVEMENT BY SEDIMENT REPLENISHMENT,  
USING A SEDIMENT WAVE MODEL

宮川幸雄<sup>1</sup>・角哲也<sup>2</sup>・竹門康弘<sup>3</sup>

Yukio MIYAGAWA, Tetsuya SUMI and Yasuhiro TAKEMON

<sup>1</sup>正会員 工修 土木研究所 水環境研究グループ 自然共生研究センター  
(〒501-6021 岐阜県各務原市川島笠田町官有地無番地)

<sup>2</sup>正会員 工博 京都大学教授 防災研究所 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

<sup>3</sup>正会員 理博 京都大学准教授 防災研究所 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

Sediment replenishment below dams is a common practice in Japan to compensate sediment deficits in downstream reaches. Although the effect depends not only on sediment volume but also on distance from the sediment replenishment point, it has never been distinguished clearly in the previous studies. We propose a method to evaluate both effects of the volume and the distance by using a sediment wave model. The model consisted of dispersing wave and translating wave values was used to calculate changes in the riverbed height and size distribution of riverbed materials in the downstream reaches of the Futase Dam. Results showed that changes in the riverbed elevation by sediment wave were milder at long range than at short range from the sediment replenishment site probably because of reduction in the dispersing wave with distance. Distinguishing the effect of the distance from that of the volume, this model would be of use for evaluation of riverbed improvement by sediment replenishment.

**Key Words :** *Sediment wave model, Bed load, Tractive force, Improvement of riverbed, Flows, One-dimensional bedload variation*

## 1. はじめに

ダム湖に土砂が堆積することで、ダムの治水能力が低下するだけでなく、下流への土砂供給量が減少し、河床の低下および粗粒化が進行する<sup>1)</sup>。この河床環境の変化は、砂州の減少等、下流河道の変化をもたらすほか、河床に付着する藻類の異常繁茂<sup>2)</sup>および細粒土砂を利用する底生動物の減少<sup>3)</sup>等、周辺の生物環境にも影響を及ぼすおそれがある。これに対し、ダム湖の堆積土砂を掘削して下流に置土し、増水時に流下させる<sup>4)</sup>ことで、ダムの貯水容量の確保だけでなく、細粒土砂が下流に供給され、河床の低下および粗粒化を抑える効果が期待されている。このとき、供給量が少ない場合は、供給した細粒土砂が流出しすぐに消失するため、河床への効果は小さくなる。一方、供給量が過剰な場合は、砂州が陸域化・固定化し樹林化が進行するおそれがある。このため、置土からの流下土砂量と置土からの距離に応じた河床変動

を予測することは河川管理において重要といえるが、評価においては、置土から流下する土砂の伝播特性を考慮する必要がある。

置土からの土砂流下に対する河床の応答には、下流数 km の範囲で予測が可能な次元河床変動計算が用いられる。過去には、三春ダム<sup>5)</sup>、長安口ダム<sup>6)</sup>等での解析事例があり、これらの河床変動は、流砂の連続式<sup>7)</sup> (式 (1)) に基づいて計算されている。

$$\frac{\partial z}{\partial t} + \frac{1}{B(1-\gamma)} \frac{\partial Bq_s}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

ここで、 $z$ : 河床高 (m),  $\gamma$ : 空隙率,  $B$ : 川幅 (m),  $q_s$ : 単位幅あたりの掃流砂量 ( $\text{m}^2/\text{s}$ ) である。このため、河床変動量は主に単位幅あたりの掃流砂量 $q_s$ で決定される。また、置土から発生する $q_s$ の伝播特性に関しては、いくつかの推定方法が開発されている<sup>8)9)</sup>。しかし、これらの計算では置土からの土砂流下量に応じた効果の違いと置土からの距離に応じた効果の違いとを分離して評価することが困難である。投入された土砂の動態について

は、「土砂の波 (Sediment wave)」として下流に流下することがLisle (2001) らの研究<sup>10)</sup>によって指摘されており、この際には土砂の「伝播」と「拡散」の組み合わせにより表現される。このSediment waveを考慮することで、波の高さから土砂量による影響の違いを、波の分布から置土からの距離による影響の違いをそれぞれ予測できると考えられる。さらに、本式はSediment waveの発生の有無を設定可能であることから、供給される土砂量が有限である置土が河床に及ぼす効果を評価するための手法として有効であると考えられる。

そこで、本研究では、置土によるSediment waveと下流の河床変動を予測する手法、およびこれらの結果から置土による河床改善効果を評価する手法を提案し、現地データを用いてその検証を行う。

## 2. 土砂の流下波形 (Sediment Wave) の概念

土砂の「伝播」とは、波が形状維持しながら下流に移動する動きを表し、「拡散」とは、波のピークが減少すると同時に裾野が上下流に広がる動きを表す<sup>10)</sup> (図-1a, b)。Lisle (2001) らは、Sediment waveを一次元の流体のエネルギー保存則、流砂の連続式、河床にはたらく掃流力の算出式、Meyer-Peter and Müllerの式を組み合わせで算出される式(2)で表している<sup>10)</sup>。

$$\frac{\partial z}{\partial t} = \frac{Kq c_f^{1/2}}{R_s(1-\gamma)} \left[ \frac{\partial^2 z}{\partial x^2} + \left( \frac{\partial}{\partial x} (1 - F_r^2) \frac{\partial h}{\partial x} \right) \right] \quad (2)$$

ここで、 $K$ : Meyer-Peter and Müllerの経験式に基づく係数 (= 8) ,  $q$ : 単位幅あたりの流量 ( $\text{m}^3/\text{m}/\text{s}$ ) ,  $c_f$ : 摩擦係数,  $R_s$ : 砂粒子の水中比重 (= 1.65) ,  $F_r$ : フルード数,  $h$ : 水深 (m) である。空隙率 $\gamma$ について、本研究では定数として既往研究<sup>11)</sup>をもとに0.3と設定した。式(2)中の  $\left[ \frac{\partial^2 z}{\partial x^2} \right]$  は波形の拡散を示す項であり、波のピークが減少すると同時に波が縦断方向に拡散することを表している (図-1a)。

本項はSediment waveの発生源からの距離により河床高の変化量が左右されることを表している。式(2)中の  $\left[ \left( \frac{\partial}{\partial x} (1 - F_r^2) \frac{\partial h}{\partial x} \right) \right]$  は波形の伝播を示す項であり、常流 ( $F_r < 1$ ) の場合は下流、射流 ( $F_r > 1$ ) の場合は上流に波が移動することを表している (図-1b)。

本項は、水理条件により河床高の変化量が左右されることを表している。

## 3. 置土地点からの Sediment wave のモデル化

### (1) 対象とするダムについて

本研究では、荒川本川の二瀬ダムの下流を対象として

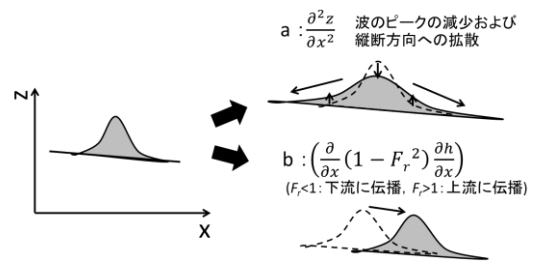
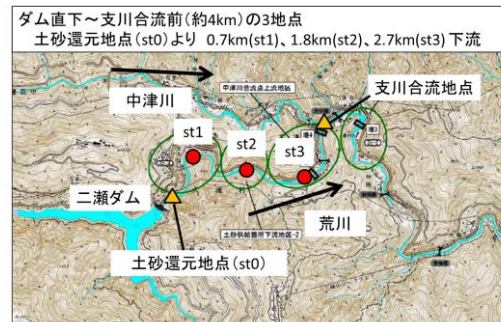


図-1 土砂の伝播・拡散の概念 (a.拡散, b.伝播)。

表-1 各観測データの測定時期の関係。

年度	前年度		今年度			
	非洪水期間 概ね10月～3月	洪水期間 概ね4月～9月	非洪水期間 概ね10月～3月	秋季	冬季	早春季
日平均流量( $\text{m}^3/\text{s}$ )の変動 (2005年度の例)						
置土の設置時期	←→					
置土の流下時期		←→				
河床材料観測時期				←→		



出典: 国土交通省 関東地方整備局 二瀬ダム土砂還元環境調査業務 報告書

図-2 二瀬ダム下流の観測地点。

検証を行った。二瀬ダムは昭和36年に運用が開始されてから約50年が経過し、ダム下流では土砂供給の減少などにより、河床低下および岩盤の露出が顕著となっている。このため、2003年度から土砂還元事業および土砂還元後のモニタリング調査が継続して実施されている。二瀬ダムの置土は、前年度の非洪水期間中 (概ね11～3月) に行われ、その年度の洪水期間中 (概ね4～10月) に流下している (表-1)。このため、年度によって流下した土砂量は異なるが、実績年平均堆積砂量 ( $79,000\text{m}^3/\text{年}$ ) の約5～20%に相当する。また、置土流下後の非洪水期間中には、河床材料調査が年1回行われている (表-1)。

検証の対象区間は、置土されている二瀬ダムの直下から、支川である中津川合流地点の約4.0kmまでとした (図-2)。この区間では、3地点で河床材料調査が行われており、以下st1～st3 (置土地点 (st0) から約0.7, 1.8, 2.7km下流) として、2003～2013年度における各地点の河床高の予測を行った (図-2)。

### (2) Sediment waveの算出方法

式(2)からSediment waveを算出するためには、時間ご

との $q$ ,  $c_f$ ,  $F_r$ ,  $h$ を算出する必要がある。 $q$ は流量および水面幅から算出可能である(式(3))。

$$q = \frac{Q}{B_w} \quad (3)$$

ここで、 $Q$ : 流量 ( $\text{m}^3/\text{s}$ )、 $B_w$ : 水面幅 (m) である。st1の流量を二瀬ダムの放流量から、st3の流量を二瀬ダム下流に位置する落合観測所の流量データから求め、st2の流量は、st1とst3の平均値とした。さらに、各地点の河道の横断面形状を河道データから同じと仮定し、流量、横断面形状および河床勾配を用いた等流計算から、各地点の水深 $h$ 、流速 $u$  (m/s) および水面幅 $B_w$ を算出した。 $c_f$ は下記の式(4)<sup>12)</sup>から河床材料に働く掃流力 $\tau$  ( $\text{kg}/\text{m}^2/\text{s}^2$ )を求め、式(5)の関係<sup>13)</sup>から算出した。

$$\tau = \rho \left( \frac{\kappa u}{\ln(10h/D_{84})} \right)^2 \quad (4)$$

$$\tau = \rho C_f u^2 \quad (5)$$

ここで、 $\rho$ : 水の密度 ( $=1000 \text{ kg}/\text{m}^3$ )、 $\kappa$ : カルマン定数 ( $=0.4$ )、 $D_{84}$ : 84%粒径 (m) である。また、 $F_r$ 数は下記の式(6)<sup>10)</sup>から算出した。

$$F_r = \frac{u}{\sqrt{gh}} \quad (6)$$

### (3) 各地点の初期河床高の設定

二瀬ダムは運用開始から50年が経過し、下流の河床低下および露岩化が著しく進んだものと考えられる。このため、2003~2013年度において、置土がない場合でも河床の低下がこれ以上進行しないものと仮定した。この仮定のもと、以下の手順により河床高の初期値(初期河床高)を算出した。はじめに、終点(中津川合流地点)の河床高 $z$ を0とし、河道データをもとに st0~st3の $z$ を設定した。次に、2004年4月~2013年12月における各地点の $z$ の時間変化を式(2)から計算し、各地点の $z$ の収束値を算出した。計算の際は、st0の $z$ の下限値を設定した。この収束値を河床の低下がこれ以上進行しない場合の $z$ として、各地点の初期河床高とした。

### (4) 置土による河床高の変化の設定

st0の $z$ を置土直下(直上が置土の最下端)における河床高とし、置土から流出した土砂が流出直後に到達し、河床高が変動する地点とした。そして、流砂の連続式(式(1))を用いてst0の $z$ の時間変化を算出した。置土から掃流砂が発生するか否かは、2mm以上の粒径が移動するかどうかで判定を行った。判定には、田中らによる移動限界粒径<sup>14)</sup>の式(式(7))を用いた。

$$D_{cri} = \left( \frac{\tau}{0.045 R_s g D_{50}^{0.6}} \right)^{2.5} \quad (7)$$

ここで、 $D_{cri}$ : 移動限界粒径 (m)、 $D_{50}$ : 50%粒径

(m) である。つまり、 $D_{cri} \geq 2\text{mm}$ のとき掃流砂が発生するものとした。そして、st0の河床は置土を構成する粒子と露岩を構成する粒子が混在した状態と仮定し、st0の $D_{50}$ は置土の粒度加積曲線および置土から最も近いst1の粒度加積曲線の平均値から設定した。また、露岩河床からの土砂流出は、露岩河床の $D_{10}$ に相当する粒子(概ね50mm以上)が動くかどうかで判定した。この粒子は大規模な洪水以外ではほとんど動かないため、st0では主に置土からの $q_s$ により $z$ の増加が生じることとなる。掃流砂が発生する場合の $q_s$ は式(8)<sup>13)</sup>により求めた。

$$q_s = \frac{Kc_f^{3/2} u^3}{R_s g} \quad (8)$$

置土の $c_f$ を求めるために必要なst0の $D_{84}$ は、 $D_{50}$ と同じ方法で設定した。ここで、 $D_{cri}$ が2mm以下の場合、増水時でも置土が完全に流下してこれ以上流下しないと現場データから判断される場合(2004、2008年度の洪水時期後半)、および大洪水により露岩河床からも土砂が流出したと考えられる場合(2007、2011年度)は、置土からの土砂供給が生じないものとした。このときのst0の $z$ は、式(2)から算出した。

st0における $z$ の変化を以上のように設定し、3.(3)で求めた初期河床高と式(2)から、2003~2013年度までのst1~st3の $z$ を過去に実施した通りで置土した場合の河床高の変化として算出した。また、全ての期間でst0からの土砂供給が生じなかったと仮定した場合(置土を行わなかったと仮定した場合)の河床高の変化も算出した。

### (5) 河床高と河床粒径 ( $D_{50}$ , $D_{84}$ ) との関係の設定

河床高の上昇は、置土からより細かな粒径の土砂が流下・堆積したことを示しており、河床表層における細粒子の割合も高くなるといえる。このため、st1~st3の河床粒径 ( $D_{50}$ ,  $D_{84}$ ) は、各地点の河床高 $z$ の上昇に応じて低下すると仮定し、減少関数(式(9))として設定した。

$$D_{50,84} = \frac{a}{z-b} + c \quad (9)$$

ここで、 $c$ は $D_{50}$ ,  $D_{84}$ の下限値として、置土の粒度加積曲線から設定した ( $D_{50}: 0.04$ ,  $D_{84}: 0.1$ )。そして、式(9)の $a$ および $b$ を現場での観測値とその観測日における3.(4)で予測された河床高 $z$ との最小2乗法から算出した。この結果、 $D_{84}: a=0.05$ ,  $b=0.13$ ,  $D_{50}: a=0.03$ ,  $b=0.13$ と設定した。そして、再度3.(4)の計算により、st0~st3の河床高 $z$ ,  $D_{84}$ および $D_{50}$ の時間変化を求めた。

### (6) 各年度および地点の河床高の比較方法

3.(1)~(5)によりst0~st3における初期からの河床高の変化量( $z$ 変化量)および河床粒径 $D_{84}$ および $D_{50}$ の時間変動をグラフ化し、各地点での比較を行った。さらに、現場で観測された $D_{84}$ および $D_{50}$ とも比較した。また、置土が行われなかった場合の $z$ 変化量も算出し、置土を实

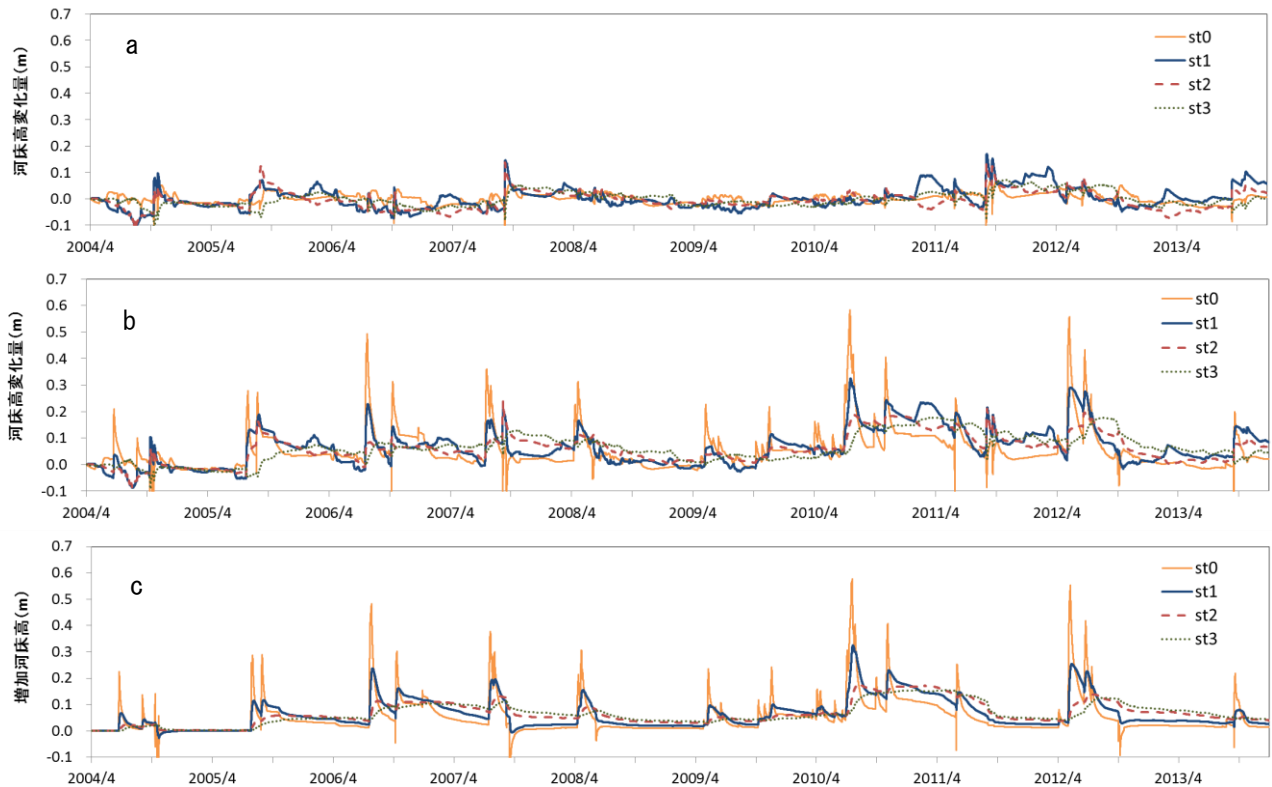


図-3 各地点におけるSediment waveを考慮したモデルによる河床高の予測結果。  
(a : 置土なしの場合, b : 置土ありの場合, c : 河床増加高 (b-a) )

施した場合と実施しなかった場合の $z$ 変化量の差 (増加河床高) を求めた。

#### 4. モデルによる予測結果

##### (1) 河床変動の予測値と現場データとの比較

置土を行わなかったと仮定した場合の $z$  (図-3a) および過去に実施した通りに置土した場合の $z$  (図-3b) を算出し、図-3bから予測した $D_{84}$ および $D_{50}$ を年1回現場で観測された値と比較した (図-4)。この結果、予測値と観測値には乖離が見られるが、年度ごとの増減傾向は概ね一致した。すなわち、2004年度では初期値とほとんど変わらないが、2004から2005年度にかけて減少 (細粒化) し、2005年度と同等の値が2007年度まで継続した後、2008年度に再び増加 (粗粒化) に転じる傾向であった。さらに、2009年度または2010年度に再び細粒化し、2011年度にやや粗粒化、2012年度以降はほとんど変わらない傾向となった。st1～st3とも概ね上記の傾向が見られたが、2009年度においては、st1のみ予測値および観測値とも前年度より減少した。

##### (2) 置土による増加河床高の予測結果

増加河床高を算出した結果、st0から遠くなるにしたがい増加河床高のピークは低下し、ピークの時期も遅くなるが、上昇している期間はより長くなる傾向であった

(図-3c)。また、2005、2006および2010年度の後半は、st0において置土が流下し増加河床高が一旦ピークとなった後、他の年度よりもゆっくり減少する傾向が見られた。このときは、st0～st3の増加河床高が置土流下前より高い状態が他の年度よりも長く続いた。この傾向については、河床改善効果の観点から、事項 (5. (2)) にて、2010と2012年度の結果を比較することで考察する。

#### 5. 置土による河床改善効果の検証

##### (1) モデルの精度の検証

$D_{84}$ および $D_{50}$ について河床高からの予測値と現場からの観測値を比較した結果、年度毎の増減傾向が概ね一致した。そこで、 $D_{84}$ および $D_{50}$ のある年度の値とその前年度の値との差を予測値および観測値でそれぞれ計算し、予測値を横軸、観測値を縦軸とした散布図をとると、プロットは右上および左下に集中するため (図-5,  $D_{84}$ ,  $D_{50}$ とも $p < 0.01$ )、予測値と観測値では、前年度との差分が増加 (粗粒化) した年度と減少 (細粒化) した年度が概ね一致するといえる。このため、モデルで算出した値は、河床が細粒化する傾向および粗粒化する傾向の予測について、高い精度を有するものと考えられる。予測値と観測値に乖離が見られた理由としては、st1周辺の河道が湾曲している点、st2周辺に砂州が形成されている点から、観測値の横断的なばらつきが大きく、一次元で計算して



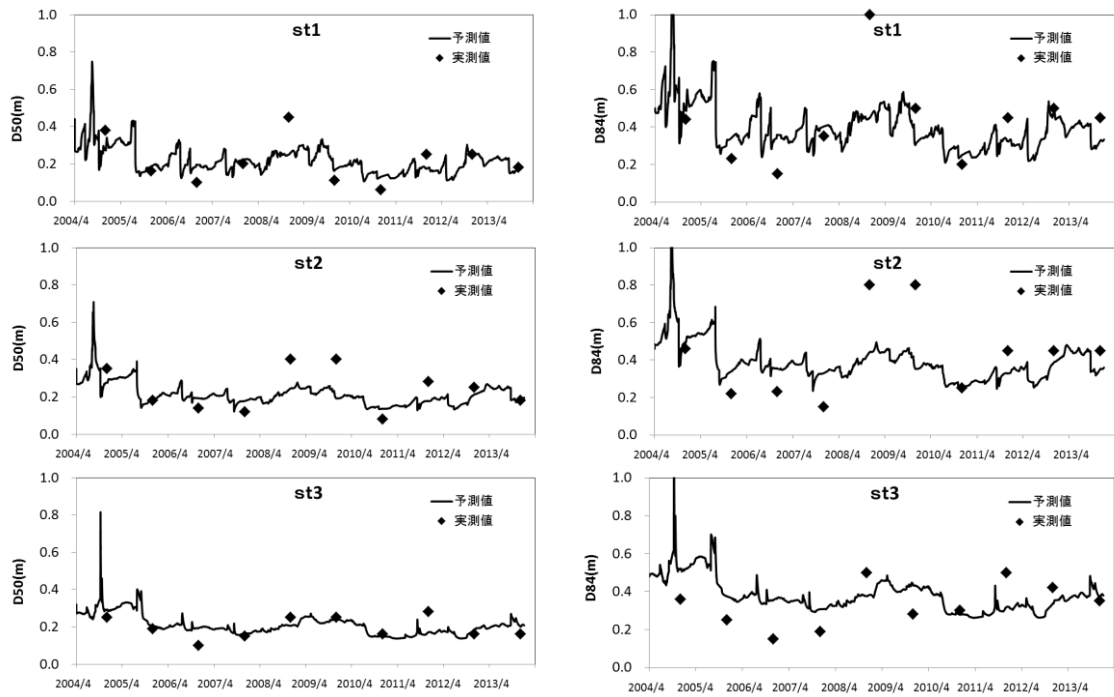


図-4 各地点における $D_{50}$ および $D_{84}$ の予測値および実測値.

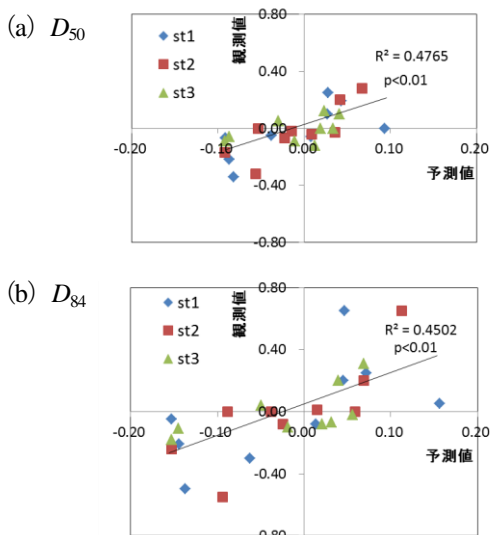


図-5  $D_{84}$ および $D_{50}$ のある年度の値とその前年度の値との差(m). (a:  $D_{50}$ , b:  $D_{84}$ )

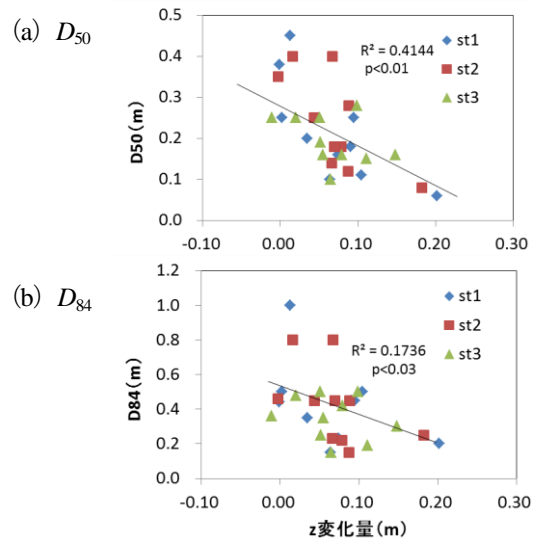


図-6 河床粒度分布観測日における $z$ 変化量と $D_{50}$ および $D_{84}$ の観測値との散布図. (a:  $D_{50}$ , b:  $D_{84}$ )

いる本式では反映されなかったためと推定される。

## (2) モデルによる置土の河床改善効果の評価

算出した増加河床高 (図-3c) から、置土による土砂還元は、ダム下流の河床の上昇を促進するものであることが示される。さらに、 $D_{84}$ および $D_{50}$ について、現場の観測値と同じ日の増加河床高 (図-3b) を散布図で比較すると、 $D_{84}$ および $D_{50}$ の観測値が低い (粒径が細かい) ほど、 $z$ 変化量も高い傾向を示す (図-6,  $D_{84}$ ,  $D_{50}$ とも  $p < 0.03$ )。このため、置土による土砂還元は、河床の上昇とともに、河床の細粒化を促進するものであることも示される。以上から、置土による増加河床高 (図-3c) を指標として、河床の上昇および細粒化を定量的に把握

し、河床の改善効果の評価することが可能といえる。

増加河床高を年度ごとに見ると、st1～st3で、2005、2006、2010年度において前年度より増加する一方、2007、2008、2011、2013年度において、前年度より減少する。また、2004、2012年度は前年度と同等であり、2009年度はst1で前年度より増加、st2、st3で前年度と同等となっている。st1～st3で増加した年度に共通する点として、置土地点 (st0) の増加河床高の0.2m以上のピークが2回発生している。さらに、2回目のピークに共通する点として、ピークからの減少がゆっくりでピーク発生前より高い数値が年度末まで継続していることが挙げられる。一方、減少した年度に共通する点として、同様のピークが1度しか発生しておらず、非洪水期間にはピークが終了

している。また、増加した年度および減少した年度のピークの大きさには特に差がなかった。このことから、置土からのSediment waveの発生回数が、河床改善効果が持続する要素として重要と考えられる。ただし、ピークが3回発生したが0.2m以下にとどまった2004年では前年度からの変化がなかったことから、ピークが一定以上の高さを有することも、河床改善効果の有無を左右すると考えられる。

st1～st3増加河床高の違いを見ると、置土から離れるほど増加が遅くピークも低い一方、ピークからの減少も遅いため、年度末にはst1とst3で増加河床高が逆転するケースも見られた。3つの地点におけるSediment waveの拡散の項を比較すると、概ねst1>st2>st3の関係となっていることから、置土から離れるほどst0から発生したSediment waveの影響が小さくなっていると考えられる。一方、伝播の項は、水理条件によって大きく数値が変動し、結果的に伝播の項との和で決定される河床高の時間変化(式(2))がst3で最も高くなる場合も見られた。

2010と2012年度は同程度の河床高から始まり同じ規模のSediment waveがともに2回発生したにもかかわらず、2010年度の増加河床高が2012年度よりも高い結果となった(図-3c)。河床高はSediment waveの伝播の項と拡散の項の和が正ならば増加、負ならば減少する(式(2))。増加河床高のピーク終了後はst0の拡散の項は負(増加河床高が減少)となる。一方、伝播の項は正となるが、 $F_r$ 数が低い場合は伝播の項の絶対値が高くなる(伝播がゆっくり進行する)ため、増加河床高が高止まりする。2010年度は2012年度と比べ、伝播の項の絶対値が高く、拡散の項の絶対値が低かったことから、伝播がゆっくり進行しピークの減少が抑えられたと考えられる。

## 6. まとめ

本研究では、Sediment waveを考慮したモデルを用いて、置土による河床の細粒化の効果予測を行った。その結果、一次元河床変動解析よりも計算の負荷が少なく、増加河床高を指標として河床の細粒化を定量的に把握し、河床改善効果を評価できることが示唆された。さらに、置土からの土砂流量はSediment waveの伝播、置土からの距離はSediment waveの拡散として、モデル上でそれぞれ評価できることが示唆された。すなわち、置土から離れるほど河床高の増減が鈍くなる傾向を定量化できると考えられる。置土による河床改善効果をSediment waveの伝播と拡散のバランスにより評価することで、河床改善効果を最大化するための置土の位置および置土量をより精緻に予測できると考えられる。今後は、本モデルで示されたSediment waveの伝播と拡散のバランスを決定づける要因を解明するため、分析を更に進める予定である。

謝辞：本研究を進めるにあたり、国土交通省関東地方整備局二瀬ダム管理所には、二瀬ダムに関する長年にわたる資料を提供いただく等、数々のご協力を頂いた。ここに記して謝意を示す。

## 参考文献

- 1) Erskine, W. D.: Downstream geomorphic impacts of large dams: the case of Glenbawn Dam, NSW, *Applied Geography*, Vol.5, pp.195-210, 1985.
- 2) 皆川朋子, 福嶋悟, 萱場祐一: ダム下流の河床付着膜の特徴とフラッシュ放流による掃流, 土木技術資料, Vol.49(8), pp.52-57, 2007.
- 3) 波多野圭亮, 竹門康弘, 池淵周一: 貯水ダムが下流域生態系へ及ぼす影響評価, 京都大学防災研究所年報, Vol.46(B), pp.851-866, 2003.
- 4) Kantoush, S. A., Sumi, T. and Kubota, A.: Geomorphic response of rivers below dams by sediment replenishment technique, *River Flow 2010*, The MIT Press, pp.1155-1163, 2010.
- 5) 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.
- 6) 武藏由育, 志宇知誠, 山下正浩, 竹林洋史, 湯城豊勝, 鎌田磨人, 赤松良久, 河口洋一, 中田泰輔: 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, 土木学会論文集B1(水工学), Vol.67(4), pp.817-822, 2011.
- 7) 中津川誠, 荒井信行, 清水康行: 現場のための水理学, 国立研究開発法人 土木研究所 寒地土木研究所, pp.35-50, 1988.
- 8) 岡部健士, 芦田和男: 流れの遷移を伴う一次元河床変動の数値解法, 土木学会論文集, Vol.434, pp.37-45, 1991.
- 9) Cui, Y., Parker, G., Braudrick, C., Dietrich, W. and Cluer, B.: Dam Removal Express Assessment Models (DREAM). Part 1: Model development and validation, *Journal of Hydraulic Research*, Vol.0, pp.1-17, 2005.
- 10) Lisle, T.E., Cui, Y., Parker, G., Pizzuto, J.E., and Dodd, A.M.: The dominance of dispersion in the evolution of bed material waves in gravel-bed rivers, *Earth Surface Processes and Landforms*, Vol.26, pp.1409-1420, 2001.
- 11) 石神孝之, 坂野章, 中西哲, 箱石憲昭: 河床材料の空隙率および交換層厚変化を考慮した河床変動モデルの開発, 河川技術論文集, Vol.21, pp.131-136, 2015.
- 12) Wilcock, P.R.: Estimating local bed shear stress from velocity observations, *Water Resources Res.*, Vol.32, pp.3361-3366, 1996.
- 13) Lisle, T.E., Pizzuto, J.E., Ikeda, H., Iseya, F. and Kodama, Y.: Evolution of a sediment wave in an experimental channel, *Water Resources Res.*, Vol.33, pp.1971-1981, 1997.
- 14) 田中規夫, 古里栄一: ダム下流礫床河川における水生昆虫動態と小型河床材料移動性の人為的土砂供給前後の変化, 土木学会論文集B1(水工学), Vol.70, pp.1327-1332, 2014.