

置土から生じる土砂の波が下流河床に及ぼす効果の予測方法の提案

Evaluating Riverbed Improvement by Sediment Wave of Replenished Site

宮川幸雄⁽¹⁾・角哲也・竹門康弘

Yukio MIYAGAWA⁽¹⁾, Tetsuya SUMI and Yasuhiro TAKEMON

(1) 土木研究所 水環境研究グループ 自然共生研究センター

(1) Aqua Restoration Research Center, Public Works Research Institute, Japan

Synopsis

Although an effect of sediment replenishment below dams depends not only on sediment volume but also on distance from the replenished 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. 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.

キーワード: 土砂供給, 河床改善, 一次元河床変動, 掃流力

Keywords: sediment-supply, improvement of riverbed,
one-dimensional bedload variation, tractive force

1. はじめに

ダム湖に上流から流入する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 (Erskine, 1985)。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 (皆川ら, 2007) および細粒土砂を利用する底生動物の減少 (波多野ら, 2003) 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、人工的に土砂供給を行うことで、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、流下土砂量と土砂供給地点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。日本国内では、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 (Kantoush et al., 2010) 土砂供給方法が、全国で実施されている。この置土の評価に関しても、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縦断方向の応答には、下流数kmの範囲で予測が可能な一次元河床変動計算が用いられる。過去には、三春ダム (櫻井, 2008)、長安ロダム (武蔵ら, 2011) 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 (式 (1), 中津川ら, 1988) 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), γ : 空隙率, B : 川幅 (m), q_s : 単位幅あたりの掃流砂量 (m^2/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 (岡部ら, 1991、Cui et al., 2005). 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 らの研究によって指摘されており (Lisle et al., 2001), この Sediment Wave を「伝播」と「拡散」の組み合わせにより数式化している. 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、波の縦断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. また、置土からの土砂流入により河床がどの程度細粒化したのかを予測するには、供給された土砂に対する河床表面の鉛直構造の応答を数値化する必要がある. この鉛直構造の変化は、流入する土砂のパターンだけでなく、もともとある石が形成する河床の凹凸の程度にも左右される点に留意が必要である.

そこで、本研究では、置土による Sediment Wave と下流の縦断方向および鉛直方向の河床変動を予測する手法を開発し、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 (Lisle et al., 2001) [Fig.1 a, b]. Lisle 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 (Lisle et al., 2001).

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

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 γ について、変動幅が 0.2~0.4 であることから (藤田ら, 2008)、本研究では定数として既往研究 (石神ら, 2015) 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 (Fig.1 a). 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 $\left[\left(\frac{\partial}{\partial x} (1 - F_r^2) \right) \frac{\partial h}{\partial x} \right]$ 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

(Fig.1 b). 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.

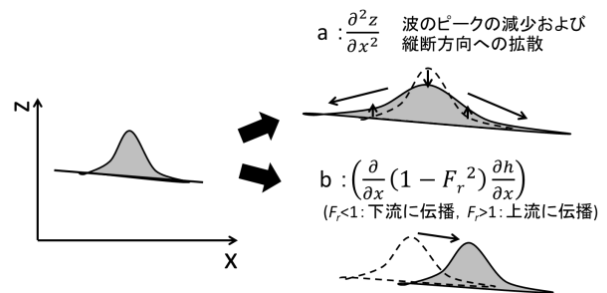


Fig.1 Concepts of (a)dispersing wave and (b)translating wave (Lisle et al., 2001)

3. 置土地点からの縦断方向における Sediment Wave のモデル化

3.1 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

Month	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3
Season	Winter		Spring			Summer			Autumn			Winter			Spring
	Dry season			Rainy season						Dry season					
Sediment placement	←→									←→					
Flushing by natural floods				• • Occurred several times • •											
Measurement of flushed sediment volume										↔					
Bed material survey											↔				

Fig.2 Annual schedule of sediment addition and field monitoring (In Japan, flooding usually occurs in the rainy season, and not in the dry season. Sediment addition or monitoring was carried out once during each period indicated by the arrows.)

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10～3月）に行われ、その年度の洪水期間中（概ね4～9月）に流下している[Fig.2]。このため、ある年度に流下した置土量（m³/year）は、前年度に置土した時期とその年度の非洪水期間が始まる時期との残土の差から推定している[Fig.2]。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（79,000m³/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[Fig.2]。

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[Fig.3]。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St.1～St.3（置土地点（St.0）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[Fig.3]。

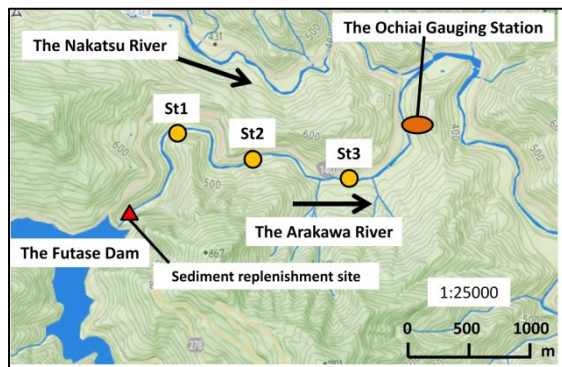


Fig.3 Map of the study area in the downstream reaches of the Futase Dam

3.2 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（m³/s）, B_w : 水面幅（m）である。St.1の流量を二瀬ダムと栃本発電ダムの放流量の和から、St.3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、St.2の流量は、St.1とSt.3の平均値とした。St.0は二瀬ダムの放流量から求めた。二瀬ダムおよび栃本発電ダムの放流量は各ダムの管理所から提供いただいたものである。このうち、栃本発電ダムの放流量は日平均データのみだが、1日の放流量はほとんど変動しないことを確認して、時間データとして利用した。また、落合観測所の流量データは、水文・水質データベースから引用したものである。

各地点（St.0～St.3）の水面幅は、二瀬ダム管理所の河道データから、河道断面を台形と仮定して、その上底を水面幅として算出した。このとき、水深およびそれによって決定される河道断面（台形面積）を求める必要がある。はじめに、St.3の水深を落合観測所のデータから求めた。次に、St.3の河道断面データから断面積を求め、水面幅と平均流速を算出した。そして、St.3の流量、水深、平均流速の比をもとに、実測データがないSt.0～St.2の水深、平均流速、水面幅を推定した。

c_f は下記の式(4)（Wilcock, 1996）から河床材料に働く掃流力 τ （kg/m²/s）を求め、式(5)の関係（Lisle et al., 1997）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、 ρ ：水の密度（=1000 kg/m³）， κ ：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) (Lisle et al., 2001) から算出した。

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

3.3 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 St.0～St.3の z を設定した。次に、St.0からの土砂供給量が0として、2004年4月から各地点の z の時間変化を式(2)を用いて2年間のスパンで計算し、各地点の z の収束値を算出した。計算の際は、St.0～St.3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。

3.4 置土による河床高の変化の設定

St.0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St.0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、田中・古里による移動限界粒径の式（式(7)）（田中・古里，2014）を用いて、置土の10%粒径である2mm以上の粒径が移動するかどうかで判定した。

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

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、St.0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、St.0の D_{50} は置土の粒度加積曲線および置土から最も近いSt.1の D_{50} 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10%粒径に相当する粒子（概ね50 mm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、St.0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) (Lisle et al., 1997) 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St.0の D_{84} は、 D_{50} と同じ方法で設定した。ここで、 D_{cri} が2 mm以下の場合には置土からの土砂供給が生じないものとした。さらに、 D_{cri} が2 mm以上でも置土が完全に流下して置土地点にストックがない場合（2004，2007，2008，2011年度で発生）は、土砂供給が生じないものとした。単位幅あたりの掃流砂量 q_s に対する置土のストックの減少量は、流心部の川幅を約5 mと仮定し、 q_s の5倍分の置土がストックから消失したと仮定した。置土が生じない場合のSt.0の z は、式(2)から算出した。

St.0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St.1～St.3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St.0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。

4. 砂面高から河床表層の粒径分布を推定する方法

本研究では、アーマー化した河床に土砂が供給された場合を想定し、そのときの河床の鉛直方向の変化について、いくつかの仮定のもと定量的に推定する方法を提案する。

はじめに、河床材料が D_{60} の単一粒径の石で構成されていると仮定した。そして、石の頂部の高さの鉛直分布は、村上らの研究をもとに、河床高を平均値とした正規分布と仮定した（村上ら，1992）[Fig.4]。このときの河床は固定床とし、河床高より上の石で形成された凹凸に砂礫が流入し、河床表面の露岩面積が変動すると設定した[Fig.4]。アーマー化した河床の D_{60} は、350～450 mm程度であり、供給する細粒子の粒径である0.016～16 mm程度と比べると1オーダー以上の大きさを有するので、流入した細粒子は概ね河床間隙に入り込み堆積すると考えられる（村上ら，1994）。また、細粒子の堆積が生じるのは河床高（固定床）より上の部分と仮定し、河床間隙中

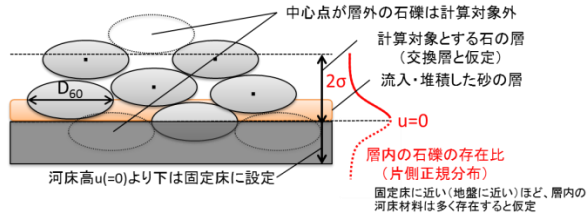


Fig.4 Images about vertical distribution of stones and sediment on riverbed

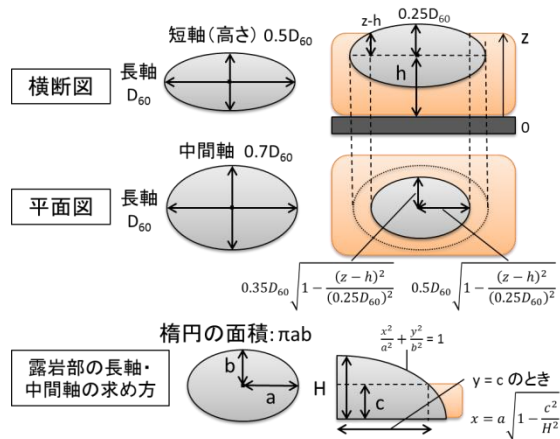


Fig.5 Method of calculating an area of exposed stone surface based on the relationship between sediment heights and exposed stone surface area on riverbed

の細粒子の堆積高を砂面高と定義する。

次に、石の凹凸に対して以下のとおり定義した。はじめに、河床高を0としたとき、ある石の中心点がある高さ h に存在する確率を、正規分布の式を用いて次のとおり設定した (式(9))。

$$P(h) = 2 * \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{h-u}{\sigma}\right)^2\right) \quad (9)$$

ここで、平均 u は河床高で0とし、分散 σ は村上らの仮定をもとに $0.3D_{60}$ とした (村上ら, 1992)。また、この石に対し砂面高が z となったとき、中心点が高さ h にあるときに、石の上面から見た露岩割合 $A(z, h)$ は、石を長軸が D_{60} 、短軸が高さの楕円体と仮定し、式(10)で設定した [Fig.5]。石礫の長軸、中間軸、短軸の比は、1:0.7:0.5と仮定した (Michikami et al., 2016)。

これらの仮定および設定のもと、砂面高が z となった場合の 1m^2 あたりの露岩面積を露岩面積割合 $R(z)$ として、式(11)で求めた。

$$z < h : A(z, h) = \pi * 0.5D_{60} * 0.35D_{60}$$

$$h < z < h + 0.25D_{60} :$$

$$A(z, h) = \pi * 0.5D_{60} * 0.35D_{60} * \left(1 - \frac{(z-h)^2}{(0.25D_{60})^2}\right)$$

$$z > h + 0.25D_{60} : A(z, h) = 0 \quad (10)$$

ここで、計算対象とする石は中心点が河床高から 2σ ($=0.6D_{60}$) にあるものとした [Fig.4]。そして、この河床高 $\sim 2\sigma$ を河床材料が入れ替わる交換層と設定した。

$$R(z) = \frac{\int_0^{0.85D_{60}} P(h) * A(z, h) dh}{\pi * 0.5D_{60} * 0.35D_{60}} \quad (11)$$

これらは河床を単一粒径と仮定した場合での設定のため、長田らの河床変動計算をもとに、河床材料を粒径ごとに区分し、各区分の石が河床高を平均値として正規分布していると仮定して、混合粒径を想定した計算を行った (長田ら, 2012)。しかし、この結果は、単一粒径の $R(z)$ とほとんど変わらなかったため、計算負荷を軽減する観点から、単一粒径と仮定した計算を行った。また、既存のモデルに本研究で設定した z と $R(z)$ との関係式を追加する際、算出された D_{50} を観測値と比較し、精度の検証を行った。

以上の仮定をもとに、3.により St.0 ~ St.3 における初期からの河床高の変化量 (z 変化量) および z 変化量から予測される河床粒径 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_{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、置土を実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。

5. モデルによる予測結果

5.1 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 [Fig.6A] および過去に実施した通りに置土した場合の z [Fig.6B] を算出し、Fig.6B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 [Fig.7]。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

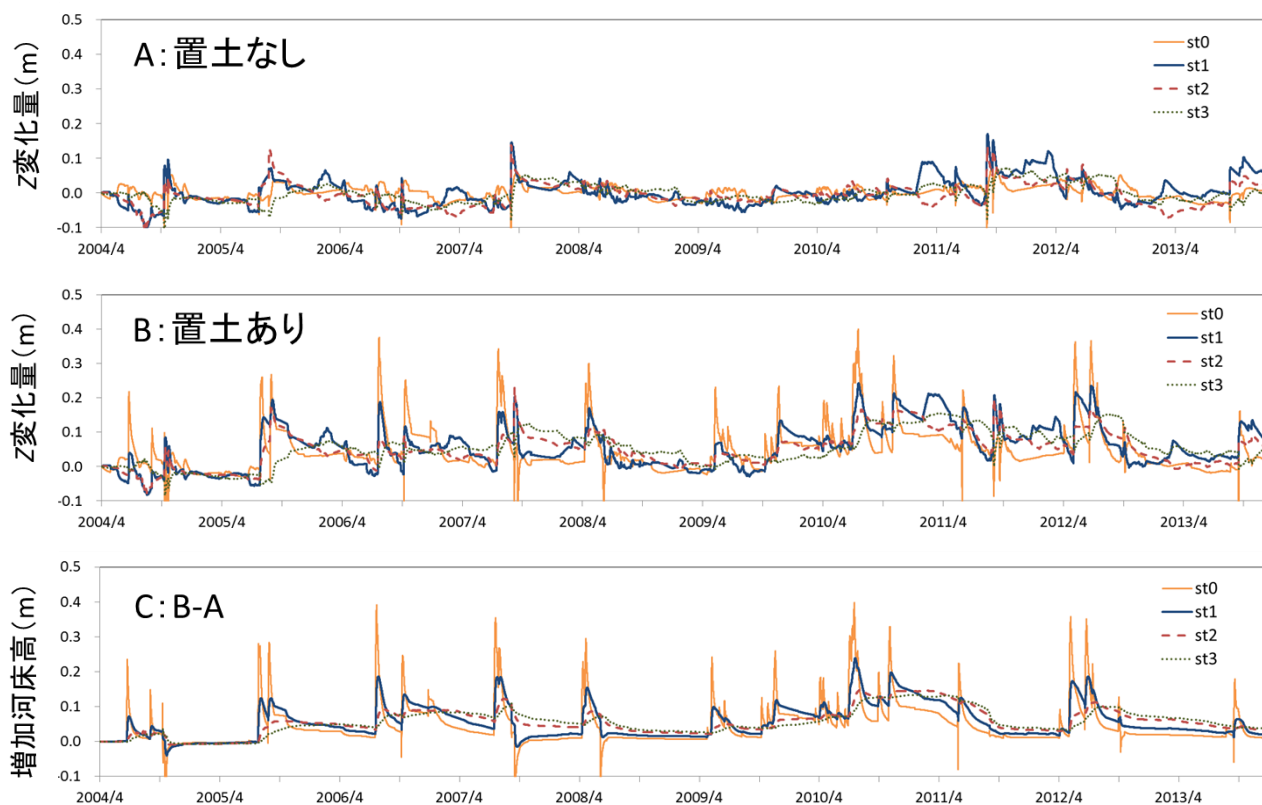


Fig. 6 Estimated sediment height from 2004 to 2013, using Sediment Wave model
(A: No sediment is replenished, B: Sediment is replenished, C: B-A)

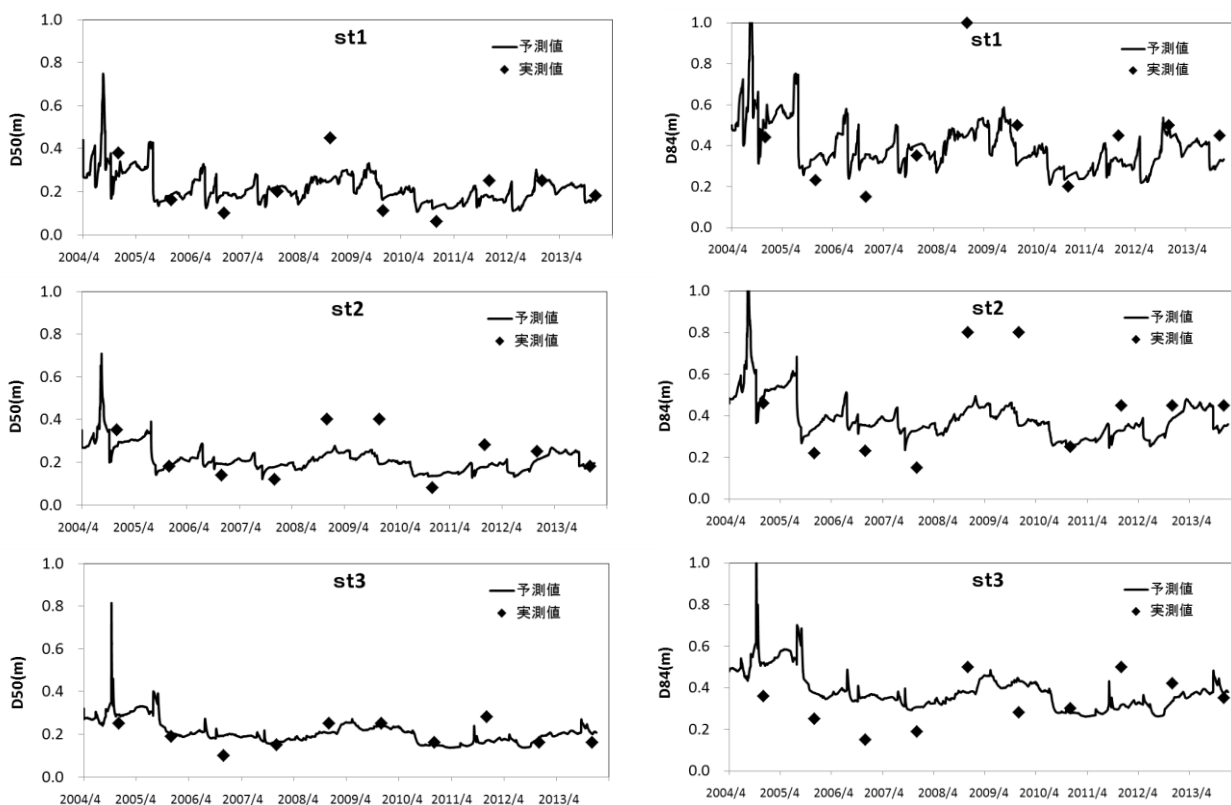


Fig. 7 Estimated values and measured values of D_{50} and D_{84} (Left side: D_{50} , Right side: D_{84})

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。St.1～St.3とも概ね上記の傾向が見られたが、2009年度においては、St.1のみ予測値および観測値とも前年度より減少した。

5.2 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、St.0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[Fig.6C]。また、2005、2006および2010年度の後半は、St.0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、St.0～St.3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。

6. 置土による河床改善効果の検証

6.1 モデルの精度の検証

砂面高 z と露岩面積割合 $R(z)$ との関係は[Fig.8]のとおりとなった。さらに、 D_{50} の計算値と観測値と比較し、キャリブレーションを行った結果、地点ごとの精度にはばらつきがあり、計算値が観測値よりも高い傾向が見られたが、両者の年変動は概ね同じ傾向となった[Fig.9a, $p < 0.01$]。そこで、 D_{50} の観測値を横軸、予測値を縦軸とした散布図をとると、年度毎の増減傾向が概ね一致した[Fig.9b, $p < 0.01$]。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、St.1周辺の河道が湾曲している点、St.2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、一次元で計算している本式では反映されなかったためと推定される。また、計算値に対し観測値の D_{50} が高い傾向となったことは、観測時は計算

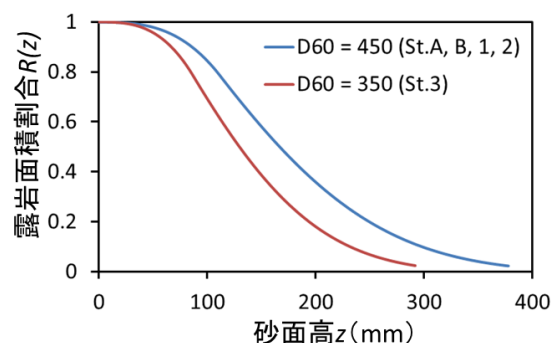


Fig. 8 Relationship between sediment height and $R(z)$

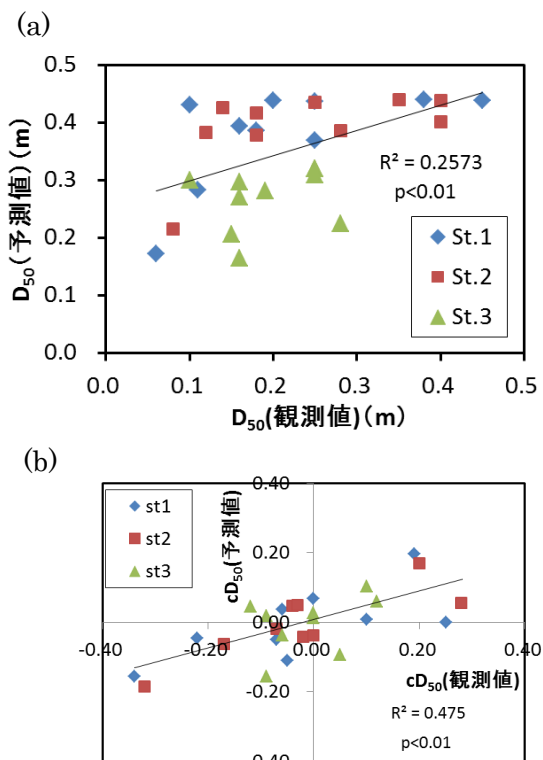


Fig. 9 Comparing measured values with estimated values of (a) D_{50} , and (b) cD_{50} ($D_{50} - D_{50}$ measured in the year before)

時より少ない砂礫量で z が上昇し河床表面の粒径分布が細粒化されていることを意味する。この理由として、本モデルは、350～450 mmの粒径のアーマ化した河床に1オーダー程細かい2～16 mm程度の粒径の土砂を供給する場合を想定しており、計算では石の間に砂礫が充填される前提である。しかし、現場で供給される土砂の一部には、砂礫以上の粒径も含まれており、一部が間隙に入らず表層に残存し、その分だけ表層の粒径が細くなった可能性がある。このような河床表面の鉛直構造を考える上での土砂のより細かな挙動の再現に関しては、今後の課題である。

6.2 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から[Fig.6C]、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といえる。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 変化量が高い傾向を示す[Fig.10, 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

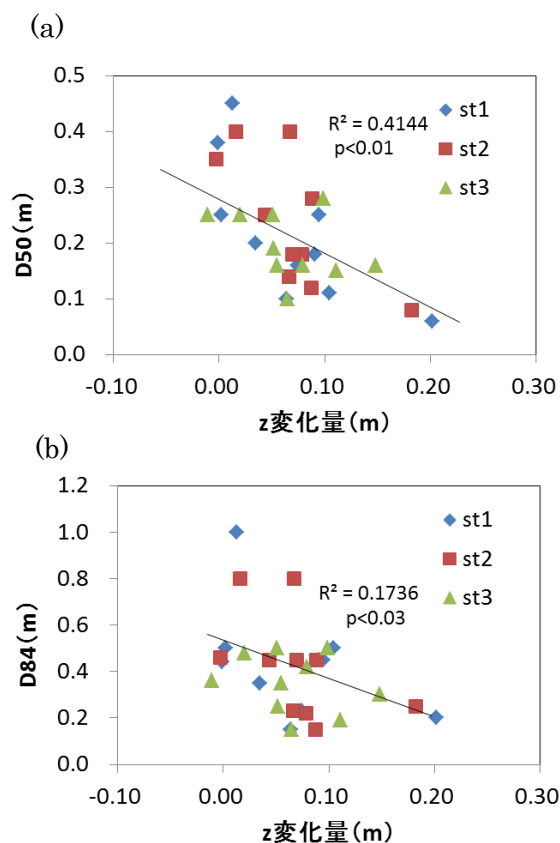


Fig. 10 Relationships between annual changes of sediment height and those of measured D_{50} and D_{84} (a: D_{50} , b: D_{84})

[Fig.6C]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、河床の改善効果を評価することが可能といえる。

St.1～St.3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St.1とSt.3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St.1 > St.2 > St.3の関係となっていることから、置土から離れるほどSt.0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。

7. まとめ

本研究では、Sediment Waveおよび河床の鉛直構造の変化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。このとき、置土からの距離はSediment waveの拡散の項により、鉛直構造の変化は露岩面積割合として、モデル上で

それぞれ評価できることが示唆された。今後は、本モデルを用いて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の予測・評価を行う予定である。

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

- 石神孝之・坂野章・中西哲・箱石憲昭 (2015) : 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.
- 岡部健士・芦田和男 (1991) : 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.
- 櫻井寿之 (2008) : 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.
- 田中規夫・古里栄一 (2014) : 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.
- 中津川誠・荒井信行・清水康行 (1988) : 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.
- 長田健吾・福岡捷二 (2012) : 石礫河川の河床変動機構と表層石礫の凹凸分布に着目した二次元河床変動解析法, 土木学会論文集B1(水工学), Vol.68(1), pp.1-20.
- 波多野圭亮・竹門康弘・池淵周一 (2003) : 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.
- 藤田正治・Sulaiman M.・Ikhsan J.・堤大三 (2008) : 河床材料の空隙率の変化を考慮した河床変動モデルとその適用, 河川技術論文集, Vol.14, pp.13-18.
- 道上正規・藤田正治・北川豊広・三村光太郎 (1994) : 空隙の大きな河床への浮遊砂の沈み込み過程と非平衡浮遊砂, 水工学論文集, Vol.38, pp.609-614.
- 皆川朋子・福嶋悟・萱場祐一 (2007) : 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.

- 武蔵由育・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 (2011): 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.
- 村上正吾・辻本哲郎・中川博次 (1992): 河床砂礫の pick-up rate 推定式について, 土木学会論文集, Vol.443(2), pp.9-16.
- Cui, Y., Parker, G., Braudrick, C., Dietrich, W. and Cluer, B. (2005): Dam Removal Express Assessment Models (DREAM). Part 1: Model development and validation, *Journal of Hydraulic Research*, Vol.0, pp.1-17.
- Erskine, W. D. (1985): Downstream geomorphic impacts of large dams: the case of Glenbawn Dam, NSW, *Applied Geography*, Vol.5, pp.195-210.
- Kantoush, S. A., Sumi, T. and Kubota, A. (2010): Geomorphic response of rivers below dams by sediment replenishment technique, *River Flow 2010*, The MIT Press, pp.1155-1163.
- Lisle, T.E., Pizzuto, J.E., Ikeda, H., Iseya, F. and Kodama, Y. (1997): Evolution of a sediment wave in an experimental channel, *Water Resources Res.*, Vol.33, pp.1971-1981.
- Lisle, T.E., Cui, Y., Parker, G., Pizzuto, J.E., and Dodd, A.M. (2001): 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.
- Michikami, T., Hagermann, A., Kadokawa, T., Yoshida, A., Shimada, A., Hasegawa, S., and Tsuchiyama, A. (2016): Fragment shapes in impact experiments ranging from cratering to catastrophic disruption, *Icarus*, Vol.264, pp.316-330.
- Wilcock, P.R. (1996): Estimating local bed shear stress from velocity observations, *Water Resources Res.*, Vol.32, pp.3361-3366.

(論文受理日 : 2017年6月13日)