

ダム流域における流砂・河床変動の 評価法に関する研究

A METHOD TO EVALUATE SEDIMENT TRANSPORTATION AND BED DEFORMATION IN THE DAM DRAINAGE BASIN

原田大輔¹・江頭進治¹
Daisuke HARADA and Shinji EGASHIRA

¹正会員 工博 国立研究開発法人土木研究所 水災害・リスクマネジメント国際センター(ICHARM)
(〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)

The present study proposes a method to predict sediment runoff and bed deformation in dam drainage basin. The channel model is based on a unit channel model which can easily reproduce stream channels distributed in a drainage basin. The sediment transport model includes bedload, suspended load and wash load transportation. In addition, the method involves a model to predict sediment entrainment from debris cones formed along the channel due to sediment supplies by landslides flows. Flow discharge at each unit channel is predicted by means of two methods; one is to employ observed dam discharge and the other is to employ analysis of rainfall-runoff analysis. Validity of proposed model is tested in the Hatanagi-daiichi dam basin. As a result of numerical simulation with the proposed model, sediment runoff and bed deformation are well simulated in both ways.

Key Words : Sediment runoff, Sediment transport processes, Reservoir sedimentation

1. はじめに

ダム貯水池や周辺の河道を管理する上で、流域全体の土砂動態を理解することは重要であり、流域土砂動態及び河道の流砂・河床変動を評価する手法の開発が望まれている。しかし、実際の流域の河道網は複雑である上に、時空間的に異なる場所から土砂が生産されてこれらが河道の流砂・河床変動に影響を及ぼすことから、流域土砂動態を評価することは容易ではない。そのような中でも、様々な手法及び時空間スケールで、これらを評価する試みが行われてきている^(例えば1), 2)。

本研究は、日本有数の土砂生産量を有する大井川水系の畑薙第一ダム流域において、ダム流域全体の長期的な土砂動態及び流砂・河床変動を評価する手法について検討している。当該流域は急峻な山岳に囲まれており、極めて活発な土砂輸送が生じている。また流域には多数の大規模な崩壊地があり、生産された土砂が河道に及ぼす影響についても検討する必要があると考えられる。このような流域において長期的な流砂・河床変動を安定的に

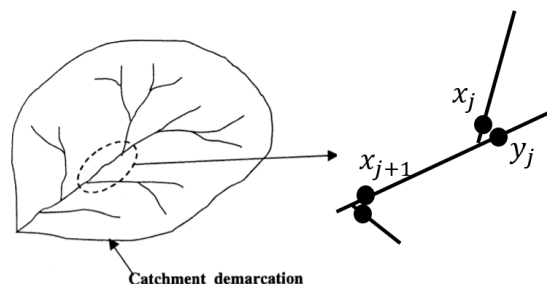


図-1 河道モデルの概念図(文献³⁾に加筆)

計算するために、本研究では江頭³⁾の合流点間を単位河道とするモデルを基に、竹林ら⁴⁾の河床材料粒度分布の評価法を用い、崩壊地沿いからの河道への土砂流入を考慮した計算手法を提案している。この手法を用いて行った計算と、実際の河道の状況及びダム堆砂量とを比較することで、手法の妥当性について検証している。

2. 土砂輸送モデル

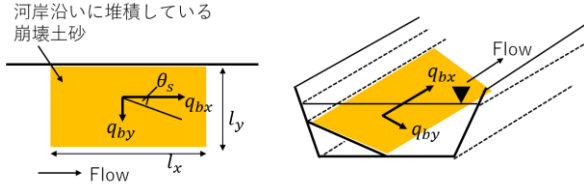


図-2 流路沿いの堆積土砂からの土砂流出について

(1) 河道モデルと流砂・河床変動の評価法

本研究で用いる土砂輸送モデルについては、江頭らの合流点間を単位河道とするモデル³⁾を基本とする。すなわち、図-1のように、上流側の合流点を含み、下流側の合流点を含まない区間を単位河道とする。単位河道を直列及び並列に配置することによって、樹枝状に分岐する河道網を表現することができる。このモデル化によって、貯留型の支配方程式を得ることができ、複雑な河道網における土砂流出予測を容易に行うことができる。

各単位河道において後述する流量 Q_j を与え、単位河道の掃流力を評価する。算出された掃流力に基づいて各単位河道で掃流砂、浮遊砂、ウォッシュロードの計算を行い、河床変動及び河床材料粒度分布の評価を行う。その手順は以下のようなものである。

掃流砂量の評価には芦田・道上式⁵⁾を用いる。浮遊砂の輸送については、以下の式により算出する。

$$\frac{\partial hc_{si}}{\partial t} = \frac{1}{BL} \{ c_{si}(x_j)Q(x_j) + c_{si}(y_j)Q(y_j) - c_{si}(x_{j+1})Q(x_{j+1}) + E_{side} \} + E_{si} - D_{si} \quad (1)$$

ここに、 $c_{si}(x_j)$ ：単位河道 j における i 粒径階の浮遊砂濃度、 $Q(x_j)$ ：単位河道 j における流量、 B ：レジーム則により与える川幅、 L ：単位河道長、 h ：水深、 E_{si} ： i 粒径階の侵食速度であり、板倉・岸の式⁶⁾を用いる、 D_{si} ： i 粒径階の堆積速度である。

ウォッシュロードについては、河床の侵食に伴ってこれらが生産されると考え、単位時間あたりに単位河道で生成されるウォッシュロードの量 Q_{sw} を以下の式により与える。

$$\left. \begin{aligned} Q_{sw} &= -(1-\lambda)LBp_w \frac{\partial z}{\partial t} \quad \left(\frac{\partial z}{\partial t} < 0 \right) \\ Q_{sw} &= 0 \quad \left(\frac{\partial z}{\partial t} \geq 0 \right) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

ここに、 λ ：空隙率、 p_w ：河床材料に含まれるウォッシュロードの割合であり、ここでは $100 \mu\text{m}$ 以下の材料をウォッシュロードとする。また、ウォッシュロードの輸送については、下記の式により評価する。

$$\frac{\partial hc_w}{\partial t} = \frac{1}{BL} \{ c_w(x_j)Q(x_j) + c_w(y_j)Q(y_j) - c_w(x_{j+1})Q(x_{j+1}) + Q_{sw} + Q_{sws} \} - D_w \quad (3)$$

ここに、 c_w ：ウォッシュロードの濃度、 D_w ：ウォッシュロードの堆積速度である。

河床位の変化については、以下の式により評価する。

$$\frac{\partial z}{\partial t} = \sum_i \frac{1}{(1-\lambda)BL} \{ Q_{bi}(x_j) + Q_{bi}(y_j) - Q_{bi}(x_{j+1}) - Q_{sw} \} - E_{si} + D_{si} + D_w \quad (4)$$

ここに、 $Q_{bi}(x_j)$ ：単位河道 j における i 粒径階の掃流砂量である。

河床位の変化に伴って、河床材料の粒度分布が変化する。その評価については、竹林らの研究と同様に、掃流砂層と堆積層との間に遷移層を介在させ、掃流砂層と遷移層における各粒径階の砂粒子の質量が保存されるよう計算を行う。

(2) 河岸沿い堆積土砂からの土砂供給

対象流域には多くの崩壊地が存在し、これらの生産土砂が土砂流下量に影響を及ぼしている可能性を無視できない。そこで、江頭ら⁷⁾を参考に、崩壊・土石流によって生産された土砂が河道沿いに堆積した場合に、これら堆積土砂からの河道への土砂供給について検討する。図-2は、流路に堆積した土砂が洪水によって侵食を受ける状況の模式図である。ここに、 l_x 、 l_y ：流下方向、横断方向の堆積土砂の長さ、 q_{bx} 、 q_{by} ：流下方向、横断方向の掃流砂量であり、以下のように定義される。

$$\begin{aligned} q_{bx} &= q_b \cos \theta_s \\ q_{by} &= q_b \sin \theta_s \end{aligned} \quad (5)$$

ここに、 θ_s ：流砂の方向と x 軸（流下方向）との角度である。 q_b は掃流砂量であり、単位河道の掃流力を用いて評価する。ただし、本来堆積物の粒度分布や堆積土砂の長さは時間的に変化していくが、著者らが現地を踏査した限りでは、堆積物は概ね安息角に近い角度で堆積しており、また供給源からは多量の土砂が供給されていると考えられた。そこで、ここでは堆積物から土砂が流出した場合でも同じ量の土砂が供給され则认为、堆積物の形状や粒度分布の変化についての計算は行わない。なお、式(6)中の θ_s については、江頭ら⁷⁾の式により、

$$\tan \theta_s = \frac{\chi i_{by}}{(1+\chi)i_{bx}}, \quad \left(\theta_s = \tan^{-1} \frac{\chi i_{by}}{(1+\chi)i_{bx}} \right) \quad (6)$$

ここに、 i_{bx} 、 i_{by} は堆積土砂表面の勾配であり、 χ については次式で表される。

$$\chi = i_{bx}/(\tan \phi - i_{bx}) \quad (7)$$

ここに、 ϕ ：砂礫の内部摩擦角である。

以上から、単位時間あたりに堆積物から流出する土砂量の総量 Q_{BS} は、以下の式により求める。

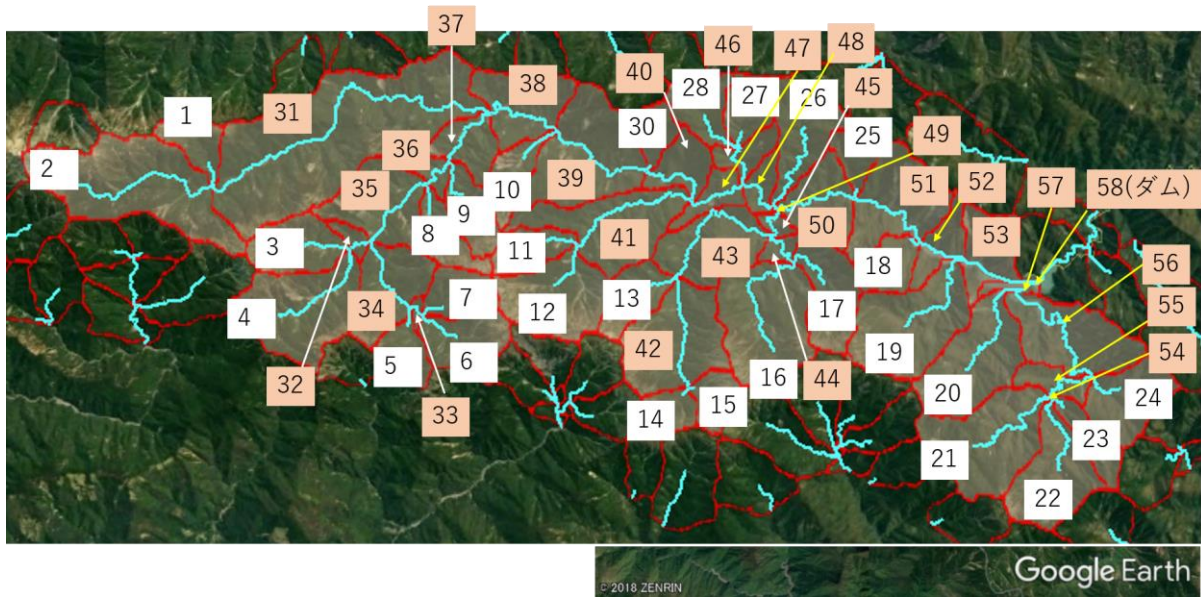


図-3 流域分割（白い番号は1次河道）（背景画像にはGoogle Earthを使用）

$$Q_{BS} = q_{bx}l_y + q_{by}l_x \quad (8)$$

堆積土砂からの浮遊砂の流出については、単位河道での総流出量を E_{side} とすると、式(1)の E_{si} を用いて、

$$E_{side} = E_{si} l_x l_y \quad (9)$$

と評価する。ただし前述したように、堆積物の粒度分布の変化の計算は行っていないことに留意する。

堆積土砂からのウォッシュロードの流出については、掃流砂の流出に伴って生じると考え、以下の式により評価する。

$$Q_{sws} = p_w Q_{BS} \quad (10)$$

ここに、 Q_{sws} ：単位時間あたりに堆積物から流出するウォッシュロードの量である。

3. 解析条件

(1) 対象流域及び流域分割

大井川の畑薙第一ダム流域を対象とする。流域面積は約326(km²)である。畑薙第一ダムは1962年に竣工し、流域内には1989年に竣工した赤石ダムが存在するが、赤石ダム流域の面積は畑薙第一ダム流域のうち14%程度であり、年間堆砂量は畑薙第一ダムの8%程度であるため、本土砂流出モデルにおいては赤石ダムを考慮しない。

河道の分割方法について、国土地理院基盤地図情報10mメッシュ数値標高モデル(DEM)⁹⁾を用いて、GISソフトウェアにより各メッシュの流向及び集水域を算出し、河道網を作成している。作成した河道網において合流点間を単位河道として流域分割を行ったものが、図-3である。流域を58に分割しており、図のうちで53, 57, 58番の河道が畑薙第一ダムの貯水池に相当する。なお、最上流部もしくは流域界に最も近い河道は、貯留土砂との関

係を考慮して勾配10°のところに配置し、これを1次河道としている。

各単位河道の川幅 B については、レジーム則により与える。

$$B = 5\sqrt{Q_1 A' / A} \quad (11)$$

ここに、 A' ：単位河道下流端での流域面積、 A ：畑薙第一ダム全体の流域面積、 Q_1 ：畑薙第一ダムでの流量である。ただし、川幅が流量によって時間的に変化すると計算結果の解釈が難しくなるため、ここでは $Q_1=500(\text{m}^3/\text{s})$ を与えて算出される川幅を用いる。

(2) 単位河道の流量の設定

各単位河道における流量の推定については、下記の2通りの方法による。

a) ダムの流量を用いた推定法

ダム地点で計測されている流量を、ダム流域に対する各小流域の流域面積比によって配分する。この方法によれば、ダムの水文データが存在する限り長期間の土砂流出計算を行うことができる。ただし、対象河道の延長が比較的長い場合には、洪水伝播に伴う遅れ時間を無視できない。そこで、各単位河道での流量を以下のように設定する。

$$Q_{x(j+1)}(t) = Q_{x(j)}(t - \tau_L) + Q_{y(j)}(t - \tau_L) + \frac{A_r}{A} Q_0(t - \tau_{sum}) \quad (12)$$

ここに、 $Q_{x(j+1)}(t)$ ： $x(j+1)$ 地点（図-1参照）における時刻 t の流量、 A_r ： $x(j)$ 又は $y(j)$ 地点から $x(j+1)$ までの間の河道が受け持つ残流域の面積、 Q_0 ：ダム流量である。 τ_L について、 $x(j)$ 又は $y(j)$ 地点から $x(j+1)$ 地点までの洪水伝播時間、すなわち遅れ時間であり、以下の式を用いる。

表-1 解析ケース一覧

Case1-1	ダム流量
Case1-2	ダム流量（河岸堆積物の流入を考慮しない）
Case1-3	ダム流量（初期河床粒度分布を変更）
Case2-1	降雨流出計算の流量
Case2-2	降雨流出計算の流量（河岸堆積物の流入を考慮しない）

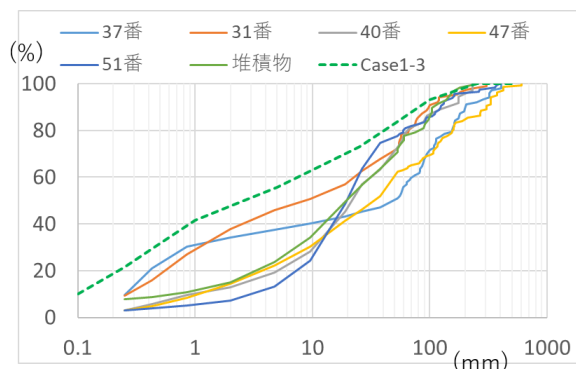


図-4 観測した土砂粒度分布（番号は図-3と対応）

$$\tau_L = L/w_L \quad (13)$$

ここに、 L ：河道長、 w_L ：洪水の伝播速度であり、Kinematic waveでこれが伝播するとして、 $w_L=5/3V$ （ V ：流速であり、マンニングの式を用いる）で与える。なお、 τ_{sum} はダム地点から $x(j+1)$ 地点までの τ_L の合計である。

b) 降雨流出解析の結果を用いる方法

対象流域で降雨流出解析を行えば、任意地点の流量を計算できるため、これを各単位河道の流量として与える。ここでは、別途研究⁹⁾により実施した、融雪を考慮した降雨流出計算の結果を用いる。ただし、流出計算では流域内の9か所でしか流量を算出していないため、ここでは各単位河道の下流側の最寄りの算出点の流量を採用し、これを流域面積比で各単位河道に配分している。

(3) 解析ケースと条件設定

ここでは上記a), b)の2通りの流量の与え方により計算を行っており、それぞれCase1, Case2とする。Case1では1962年-2016年の期間を対象として計算を行っている。期間中に対象とした出水はピーク流量が $150(\text{m}^3/\text{s})$ を超える81回であり、最も大きい出水のピーク流量は畑薙第一ダム地点で $1,980(\text{m}^3/\text{s})$ （1982年）である。Case2では2013年-2017年の流出解析結果を用い、5年分の計算を行っている。なお、解析ケースについて表-1に示す。それらの詳細は後述する。

計算の初期条件として用いた河床材料の粒度分布については、現地で画像解析とふるい分けにより求めた粒度分布を与える。これらを図-4に示す。ただし、各単位河道に最も近い観測点の粒度分布を、各単位河道の粒度分布として与える。なお、図-4中の粒度分布「堆積物」は、

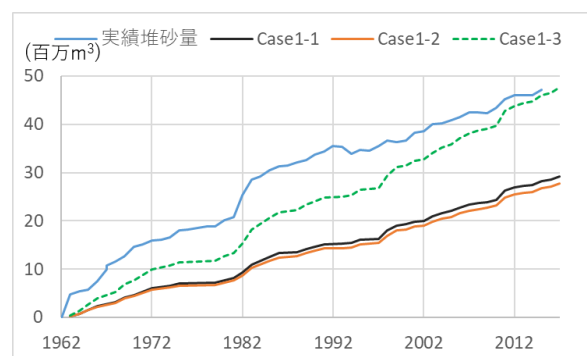


図-5 Case1の堆砂量の経年変化

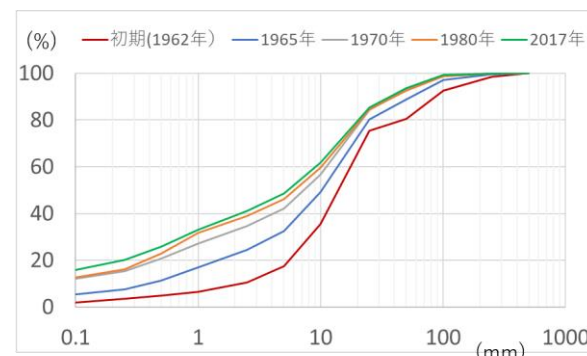


図-6 Case1-1；51番河道の粒度分布の経年変化

51番河道のすぐ側にある崩壊土砂の堆積物粒度分布を計測したものであり、河道の粒度分布と似ている点は興味深い。また、1次河道については、これが河道への主要な土砂供給源となることから、河床変動及び粒度分布変化の計算を行わない。

河岸からの土砂供給について、流域内の15箇所の主要な崩壊地堆積物を対象として航空写真から各々の堆積長 l_x を読み取っている。 l_y については、多くの堆積物が安息角に近い角度で堆積していることから、 30° でこれらが堆積していると考え、水面下の堆積物について l_y を算出している。

また、河床位の変化に伴って単位河道の河床高を変化させ、単位河道の勾配を変化させている。しかしCase1の計算は非常に長期間に及ぶ。そのため川幅の初期設定値の不連続性に起因する河床変動が生じ、非現実的な流砂が発生することがある。そのことで河床勾配が大きく変化して流砂の評価に影響を及ぼすことを避けるために、Case1の計算では単位河道の勾配を変化させない。

4. 解析結果と考察

(1) ダムの流量を用いた計算

図-5は、Case1の計算結果について、ダム堆砂量の経年変化を示したものである。Case1-2は、河岸堆積物か

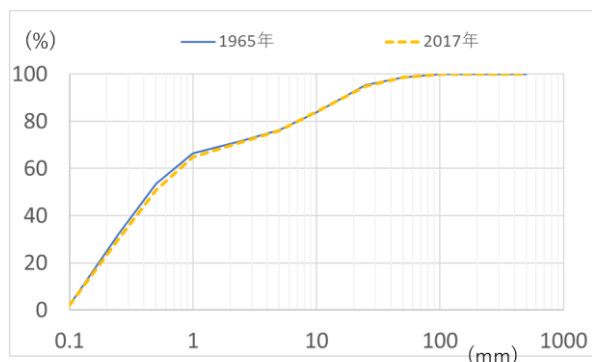


図-7 ダム堆砂土砂；粒度分布の経年変化(Case1-1)

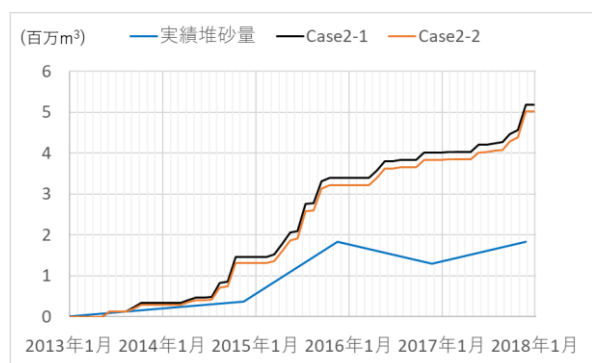


図-8 Case2の堆砂量の経年変化

らの土砂流出がダム堆砂量に及ぼす影響について検討するために、これを考慮しない場合の計算を行ったものである。Case1-1とCase1-2の差は小さいが、この差は河岸沿い堆積物の堆積長 l_x や l_y の設定に大きく依存するため、将来的にこれらの時空間的な変化も考慮できるようになれば、その影響についてより具体的に検討できると考えられる。

図-6は、Case1-1における51番河道（ダム貯水池のすぐ上流）を代表的な河道として抽出し、土砂粒度分布の経年変化を示している。計算を開始して数年以内には一定の粒度分布に収束し、それ以降大きくは変化していないことが分かる。次に、図-7にはCase1-1についてダム貯水池に計算開始後に流入した全土砂の粒度分布を示している。その粒度分布は計算期間内にほとんど変化していないことが分かる。なお、ダム貯水池に流入する土砂の内訳は、掃流砂が37.9%、浮遊砂が60.8%、ウォッシュロードが1.3%となっている。ウォッシュロードの割合が比較的小さいのは、初期河床材料の設定に起因していると共に、ウォッシュロードの代表粒径を100 μ mとしているために、堆積傾向の単位河道でウォッシュロードが堆積しがちになり、ダムに到達しにくいことが原因と考えられる。

ところで、図-5において、1982年頃以降のダム堆砂量の増加は実績とかなり似ているが、それ以前の増加量は実績堆砂量の方が顕著に多くなっている。これは、初期

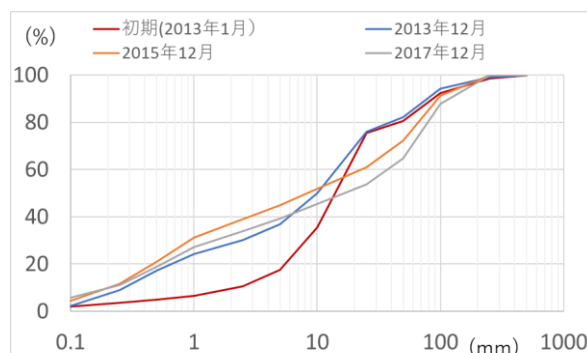


図-9 Case2-1；51番河道の粒度分布の経年変化

の河床材料粒度分布を現状の河床と同様に与えているものの、長期の計算期間内に、実際には大きな降雨イベントの後に多くの土砂流出があるため、そのことを計算で考慮できていないためと考えられる。そこで、図-4に緑点線で示す粒度分布を流域に一樣に与えて計算を行ったものがCase1-3である。その結果は図-5に示すように、最終的な堆砂量という観点では実績の堆砂量とかなり近くなっている。しかし、1982年頃以降の増加量という観点では他のケースの方が正しく予測できている。いずれにせよ、計算結果は河床材料粒度分布の影響を強く受けているため、その設定方法が予測モデルの結果にとって重要であることが分かる。

(2) 降雨流出計算結果を用いた計算

図-8は、Case2の計算結果について、ダム堆砂量の経年変化を示したものである。Case2-2は、Case1-2と同様に、河岸堆積物からの土砂流出の影響をみるために実施したケースである。同様に、Case2-1とCase2-2の差は小さい。実績堆砂量と比較すると差は開いているものの、実績堆砂量については測量精度の問題で負の値となる年もある。いずれにせよ、2015年に顕著に堆砂が進行した状況は再現することができている。

図-9は、Case2-1における51番河道の粒度分布の経年変化を示したものである。Case1-1（図-6参照）のような一方向的な変化ではないものの、2015年と2017年とを比較するとあまり変わらないことから、徐々に一定の粒度分布に収束していくものと推察される。

(3) 2つの計算手法の比較

Case1とCase2の計算において、前者では洪水の遅れ時間を考慮した上でダム流量を単純に流域配分しており、後者は降雨流出計算結果を用いているため、土砂流出の様相は少し異なっている。その一例として、57番の河道（図-3参照）よりも上流側の流域に着目する。この支川はダム湖に直接流入しており、本川の土砂と分離して堆砂量の調査が行われている。その調査結果によると、この支川がダム湖に流入する土砂に寄与している割合は平

均で約18.2%である。一方で計算結果によると、その割合は、Case1-1で13.5%、Case2-1で20.1%となっている。すなわち、Case1-1では流域面積比で流量を配分しているのに対して、実際には降雨が分布を持っているために、流出計算を行った場合の方が土砂流出量をより正確に再現できている。ただし、ダム流量データがある限り長期の土砂流出予測を行うことができるという点で前者の評価法は優れており、いずれの方法もその特徴に留意しつつ用いれば、有効な評価法となる。

5. 結論

本研究ではダム流域における流砂・河床変動を評価する手法を提案し、大井川の畑薙第一ダム流域を対象とした計算を行い、その妥当性について検討した。単位河道モデルを基本として流域分割を行い、流量の与え方についてはダム流量観測データを用いる方法と降雨流出計算結果を用いる方法の2つを提案している。前者の評価法では長期間の計算ができるという利点があるが、長期間の計算を行う場合には初期河床粒度分布の設定に特に留意する必要がある。一方、後者の評価法では流出計算を行う必要があるものの、降雨の分布や融雪の影響も考慮した土砂流出予測を行うことができている。

また、本研究では河岸沿いに堆積している崩壊土砂からの河道への流出について評価する手法を提案している。今回の計算では結果に大きな差異は見られなかったものの、将来的にこれら土砂供給の時空間分布を議論できるようになれば、生産土砂の流入を考慮した評価法へと発展させることができる。

謝辞：本研究を実施するにあたり、データ統合・解析システム(DIAS)「水課題アプリケーションの開発」の支援を受けた。また、中部電力株式会社には、各種データ提供及び現地観測の実施にご協力いただいた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 山野井一輝, 村上秀香, 藤田正治: 土砂動態モデルで表現される山地溪流における土砂流出の短・長期変動に関する研究 水工学論文集第62巻, I_943-948, 2018.
- 2) 萬矢敦啓, 江頭進治, 岩見洋一: RRIS モデルの構築と川俣ダムにおける土砂流出現象の再現. 土木学会論文集 B1 (水工学), 73.4: I_775-I_780, 2017.
- 3) 江頭進治, 松木敬: 河道貯留土砂を対象とした流出土砂の予測法, 水工学論文集, 第44 巻, pp. 735-740, 2000.
- 4) 竹林洋史: 河川中・下流域の河道地形. 日本流体力学会誌 「ながれ」, 24.1: 27-36, 2005.
- 5) 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, No..206, pp.59-69., 1972.
- 6) 板倉忠興, 岸力, 柳屋圭吾: 河床波をもつ流れの浮遊砂の研究, 第36回土木学会年次学術講演会講演概要集, II-301, 1981.
- 7) 江頭進治, 芦田和男, 金屋敷忠儀: 微細土砂の流出解析法とその適用に関する研究, 水理講演会論文集, 第25巻, pp. 481-487, 1981.
- 8) 国土地理院: 基盤地図情報, <http://www.gsi.go.jp/kiban/>
- 9) Asif, N., Koike, T., Mohamed, R., Ushiyama, T., Shrestha, M., Murai, H., Distributed hydrological modelling framework for quantitative and spatial bias correction for rainfall, snowfall, and mixed-phase precipitation using Vertical Profile of Temperature, Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2169-897X, 2019.

(2019. 4. 2受付)