

河床攪乱指標を用いたダム建設影響の評価手法の提案

Proposal of Evaluation Method of Dam Construction Impact Using Riverbed Disturbance Indices

波多野圭亮⁽¹⁾・竹門康弘・角哲也

Keisuke HATANO⁽¹⁾, Yasuhiro TAKEMON and Tetsuya SUMI

(1) 独立行政法人水資源機構

(1) Incorporated Administrative Agency Japan Water Agency

Synopsis

At the downstream of the dam, we are working on improvement of flow and sediment dynamics such as flush discharge and sediment reduction. However, flush discharge has not been done from the viewpoint of whether it is the scale that contributes to the increase of the riverbed disturbance accompanying the movement of riverbed material. In addition, the size and amount of the sediment loading to the increase in the degree of riverbed disturbance are unknown.

In this study, we examined indices to evaluate the degree of riverbed disturbance and proposed a method of setting goals for countermeasures to improve flow and sediment dynamics. As a result, the riverbed disturbance level was divided into two stages with the planned high water discharge of the dam as the boundary, and the coarse grainization indices and the riverbed disturbance indices were shown.

キーワード: ダム下流, 河床攪乱指標, フラッシュ放流, 土砂還元, 履歴的評価, 粗粒化ポテンシャル

Keywords: downstream of dams, riverbed disturbance indices, flush discharge, sediment supply, historical changes, potential coarsening of riverbed material

1. 背景と目的

河川に貯水ダムが建設されるとダム下流ではダム建設前に比べて流況と流砂の変化が生じる。流況の変化の特にピーク流量の低下, 及び, 物理環境の変化のうち特に粗粒化(アーマー化), また, 河床低下による河床勾配の低下により, ダム下流の河床攪乱程度は低下する。この変化は河川生態系へ影響し, その中でも河川の物理環境に大きく種組成に影響される底生動物群集に影響している(谷田・竹門1999)。

このような中, ダム下流においてはフラッシュ放流や土砂還元など流況・土砂動態改善の取り組みが実施されているが, 国土交通省・水資源機構にお

ける実施ダムは拡大していない。また, 実施ダムにおいても, 河床攪乱程度の増大に寄与する置土粒径や量に着目し, また, 河道構造の基盤となり, 底生動物に重要な $\phi 10\sim 30\text{cm}$ の中礫以上の河床材(小林ほか2011)を置土しているダムは多くない。また, フラッシュ放流についても, 土砂の移動を伴う河床攪乱程度の増大に寄与する規模であるかどうかといった視点でなされていない場合が多い。

以上から, ダム下流における河床攪乱程度の増大に有効な流況・土砂動態改善対策の実施のためには, 河床攪乱程度を客観的に示す指標が必要である。本研究では, ダム下流で有効な河床攪乱指標を検討し, 評価手法と改善対策の目標設定手法を提案する。

2. 方法

ダム流入量の規模に応じて流量変化の程度に違いが生じ、動く河床材の粒径成分が異なることから、まず、河床攪乱の規模に応じた指標の使い分けについて検討する。次に、河床攪乱レベルに応じた河床攪乱指標と粗粒化指標についてダム下流のモニタリング結果等から検証し、ダム建設影響の評価手法を提示する。そのうえで、流況・土砂動態改善対策の目標設定手法について提案する。

対象としたダムは、ダム下流で土砂還元を実施しており、後述3.3で用いる近年の航空写真（国土地理院，1,200dpi）が入手でき、砂礫砂州のある国土交通省・水資源機構の管理するダムとしTable1に示した。

比奈知ダムについては、管理開始直後1999年から2016年までの河床材の粒度分析データを用いた。

Table 1 Outline of dams for this study

Dam	Date of starting managem ent (aerial photos)	Purpose	Basin area (km ²)	Planned high water Qin (m ³ /s)	Planned maximum Qout (m ³ /s)
Miharu	1998.4 (1975.11, 2014.7)	F.N.A.W.I	226.4	700	100
Managawa	1979.4 (1961.9, 2014.11)	F.N.P.	223.7	2,700	500
Ootaki	2013.4 (in Fig.6)	F.N.W.I.P	258	5,400	2,700
Shimokubo	1969.4 (1960.12, 2016.11)	F.N.W.I.P	322.9	2,000	800
Murou	1974.4 (1970.5, 2011.10)	F.N.W	136	730	300
Urayama	1999.4 (1974.12, 2007.10)	F.N.W.P	51.6	1,000	170
Hinachi	1999.4 (1975.3, 2011.11)	F.N.W.P	75.5	925	300
Tomisato	2001.4 (1975.11, 2015.9)	F.W.I.P	108.6	1,850	300

3. 結果

本章では、河床攪乱の規模に応じた指標の使い分けと評価手法の提案したうえで、河床攪乱レベルに応じた河床攪乱指標の有効性についてダム下流のモニタリング結果等から検証した結果、また、それらを用いた流況・土砂動態改善対策の目標設定手法を提案する。

3.1 河床攪乱レベルの設定と指標の使い分け

ダム下流において河床攪乱を決定づける河川流量の規模については、ダムの洪水調節機能により影響を受ける規模と、ダムが建設されてからもその影響を受けない規模のものが存在する。すなわち、ダムの計画高水流量（生起確率100年程度）以下の流入量においては放流量はダムの計画最大放流量として制限される規模と、それ以上の規模の出水があった場合などに放流量を流入量に近づける異常洪水時防災操作（ただし書き操作）となる規模である。以上のように、ダム建設影響を評価する上で重要となる河床攪乱指標については、ダムの計画高水流量以下である河床攪乱レベル1とそれ以上のレベル2の2段階に分けて考えることができる。

河床攪乱レベルに影響を受ける河床材粒径についても2段階で考えることができる。この境界値の粒径については、いくつかのダムの下流0.5kmから3.5kmまでの0.5km毎の側線での計画高水流量における移動限界粒径を式(1)と(2)より算出した結果（Fig.1）から大礫と巨礫の境界値である250mmとした。

$$u_* = \sqrt{gRi_e} \quad (1)$$

$$u_{*c}^2 = 80.9d \quad (2)$$

u_* ：摩擦速度（ cm/s^2 ）， g ：重力加速度（ 980cm/s^2 ）， R ：径深（ cm ）， i_e ：エネルギー勾配， u_{*c} ：限界摩擦速度（ cm/s^2 ）， d ：粒径（ cm ）

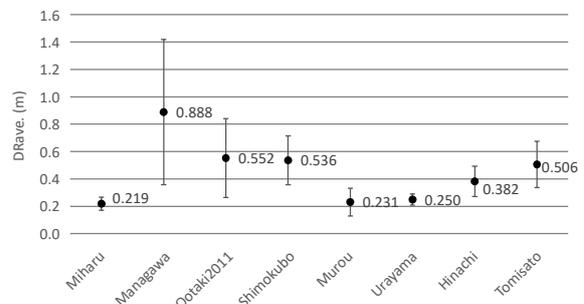


Fig. 1 Movable particle sizes of planned high water discharge at the downstream of dams.

ダム建設影響の評価手法として、Fig.2に示す縦軸に粗粒化指標、横軸に河床攪乱指標を用いて、その履歴的な変化から評価する手法を提案する。

河床攪乱レベル1における履歴的評価図の各軸の指標については、粗粒化指標は粒度分析より代表粒径である D_{60} 、河床攪乱指標は式(3)で示される無次元掃流力が考えられる。図中aからeで示すダム事業開始前から管理開始後の各事業・管理段階において、Fig.3、Table2で示す履歴的な変化が考えられる。

河床攪乱レベル2における履歴的評価図の各軸の指標について、まず、粗粒化指標は移動する粒径が $\phi 250\text{mm}$ 以上の巨礫以上となることから、その存在割合や平均粒径が粗粒化の最大値に対してどの程度になっているかを示す指標が有効と考えられる。ここで、粗粒化の最大値としては想定しうる最大流量における移動限界粒径が考えられ、それを粗粒化ポテンシャル D_{Rmax} と定義した。河川横断側線上において、この粗粒化ポテンシャルに対する巨礫以上の河床材平均粒径 D_{Rave} とその存在割合を示す指標として、式(4)で示される粗粒化指標 RoR を定義した。想定しうる最大流量（想定最大流量）については、「浸水想定作成等のための想定最大外力の設定手法」（平成27年7月国土交通省水管理・国土保全局）に示されているとおり、生起確率1000年規模程度の降雨により生じるものとなる。想定最大流量は岩井法（岩井ほか1970）より推定した。また、河床攪乱指標は経験出水の生起確率年とした。

河床攪乱レベル2における各指標の履歴的な変化については、Fig.2に示すとおり、ダム影響がない場合には、大規模出水により粗粒化するものの、ある程度の出水規模を超えると斜面崩壊などにより土砂生産が大きくなり細粒化へ転じると考えられる。これはダムがある場合でも土砂動態改善対策の程度が大規模であればこのような変動を示すと考えられる。また、ダム影響により土砂供給がない状態あるいは土砂動態改善対策の程度が小規模で十分でない場合は粗粒化ポテンシャルへ近づくと考えられる。

$$\tau^* = \frac{RI_b}{sD_{60}} \quad (3)$$

R:径深(m), I_b :河床勾配, s:河床材料の水中比重(1.65), D_{60} :河床材料の60%粒径(m)

$$\text{Ratio of Rocks (RoR)} = \frac{D_{Rave}}{D_{Rmax}} \times \frac{\sum D}{L} \quad (4)$$

D_{Rave} :河床材の平均粒径, D_{Rmax} :河床材の最大粒径 (ただし $D_{Rave}/D_{Rmax} \leq 1$), $\sum D$:巨礫以上の河床材粒径の合計値, L:測線延長(すべてm)

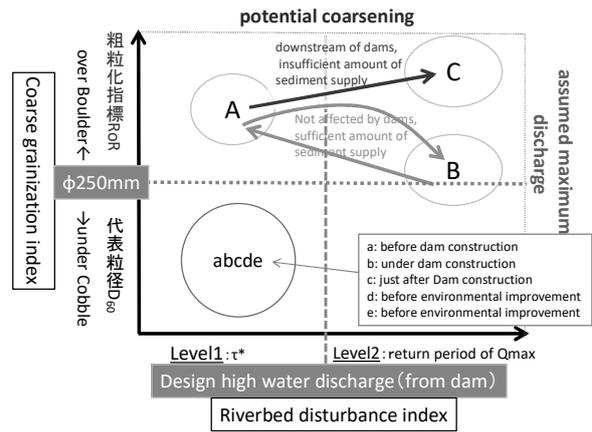


Fig. 2 Conceptual diagram of historical changes in riverbed materials through disturbances with and without dam impact. Vertical and horizontal axis indicates the bed material particle size and bed disturbance indices in dam downstream, respectively.

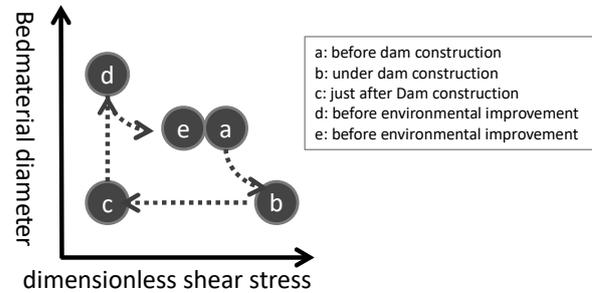


Fig. 3 Conceptual chart of historical changes in riverbed environment before, during and after dam construction. Q of stage-a,b is planned high water discharge. Q of stage-c,d,e is planned maximum discharge from a dam.

Table 2 Explanation of historical changes in Fig.3

Stage	Horizontal axis: τ^*	Vertical axis: D_{60}
a→b	Increase: No change in flow rate, Temporary increase of sediment load due to landform modification works	Fine-grained: Temporary increase of sediment load due to landform modification works
b→c	Decrease: Reduction of the flow rate, Interruption of sediment supply	No change: fine riverbed materials remain for a while
c→d	No change	Coarsening: fine bed material is swept away
d→e	Increase by sediment supply	Fine-grained by sediment supply

3.2 河床攪乱レベル1におけるダム建設影響の評価と目標設定手法

(1) 河床攪乱レベル1の履歴的評価図の検証

河床攪乱レベル1における河床攪乱指標の無次元掃流力 τ^* と河床材粒径 D_{60} との履歴的評価図については、比奈知ダムの長期モニタリング結果から検証した。その結果、Fig.4に示すとおり、ダム管理開始直後から、土砂還元を開始前とその後までの段階c、d、eまでの履歴については、Fig.3の想定図と同様の変化を示したことから、各軸の有効性が一部で示された。

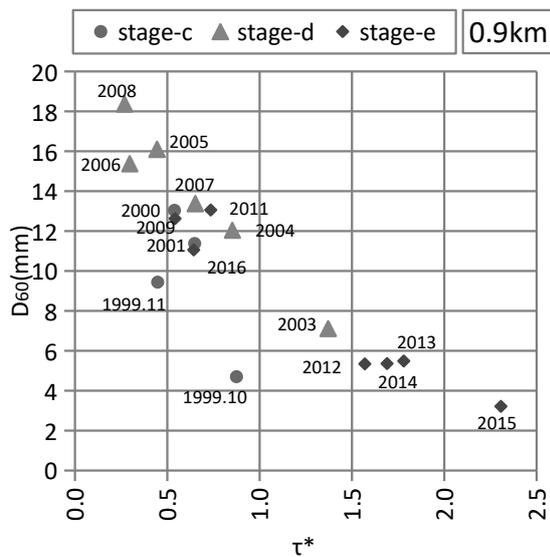


Fig. 4 Historical changes in riverbed environment at the downstream of Hinachi Dam.

(2) 流況・土砂動態改善対策の目標設定手法の提案

ダム下流においてダム建設工事開始前の状態aの調査データがある場合はほとんどないことから、目標となる河床材粒径については、底生動物群集の健全性から求めることが考えられる。底生動物群集は特に河床材粒径に依存する（小林ほか2011）ことから、その健全性指標と河床材粒径との関係はFig.5の左に示す履歴的評価図（Table2に解説）が考えられる。Fig.5を用いて、次の手順により、目標となる河床材粒径が設定できる。

- 手順1. 底生動物群集の健全性目標値（ある程度の幅がある）を設定（上流や支川などダムの影響のない対照地点のデータを設定）
- 手順2. この時の最適な河床材粒径を目標値として設定（ある程度の幅がある）
- 手順3. この粒径においてダム計画最大放流量時に無次元掃流力が十分増大するかを確認する。これ

は河床材粒径が小さくなれば大きくなるはずである。

ここで、フラッシュ放流などの流況改善対策を実施している場合には、目標設定された河床材粒径とフラッシュ放流量における無次元掃流力が手順3で算出した無次元掃流力にどの程度近づくのかを確認することで、その有効性を確認できる。このとき、無次元掃流力が増大しない場合は、河床材粒径を小さくするなどの対応が考えられる。

また、ダム建設前の状態aがわかっている場合、その河床材粒径を第1目標とすればよいが、流量がダムにより制限されていることから、同じ河床材粒径で同じ無次元掃流力が得られることは考えられない。

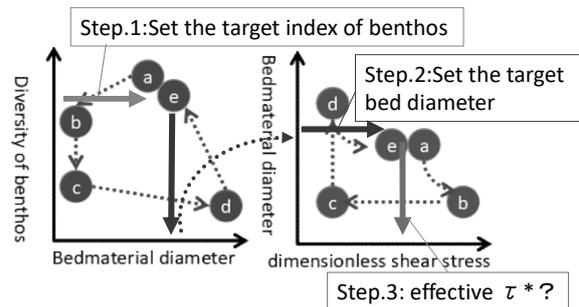


Fig. 5 A method of setting goals for effective river bed disturbance by using historical changes in riverbed environment at the downstream of a dam.

Table 3 Explanation of historical changes in the diversity of benthos and bedmaterial diameter.

Stage	Horizontal axis: D_{60}	Vertical axis :benthos
a→b	Fine-grained: Temporary increase of sediment load due to landform modification works	degradation
b→c	No change: fine riverbed materials remain for a while	degradation
c→d	Coarsening: fine bed material is swept away	degradation
d→e	Fine-grained by sediment supply	recovery

3.3 河床攪乱レベル2におけるダム建設影響の評価と目標設定手法

河床攪乱レベル2における河床攪乱指標である経験出水の生起確率年と粗粒化指標RoRとの履歴的評価図の検証については、大滝ダム下流の航空写真(図中の数字が暦年を示す)から求めた粗粒化指標を用いて示した(Fig.6)。ダム建設前は粗粒化指標が増大せず、大きな出水ではFig.2で示した想定図どおり細粒化方向に移動しており、ダム建設後には建設前より小さな出水においても粗粒化方向に移動している。また、Table1で示したダムのうち建設前の経験出水の流量がわかったダムの履歴的評価図を示したFig.7より、いずれもダム建設後に建設前より小さな出水においてもRoRの上昇を示した。以上から、河床攪乱レベル2の経験出水ではないものの、これらの指標を用いた履歴的評価手法の有効性が一部示された。

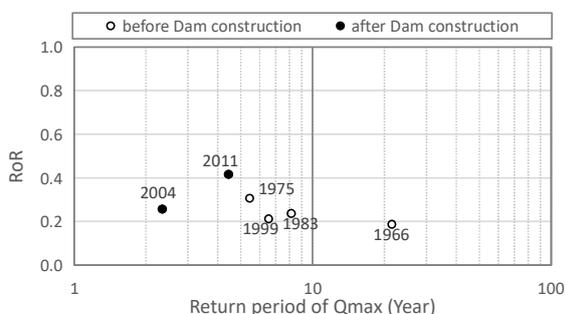


Fig. 6 Historical changes in riverbed environment at the downstream of Ootaki Dam.

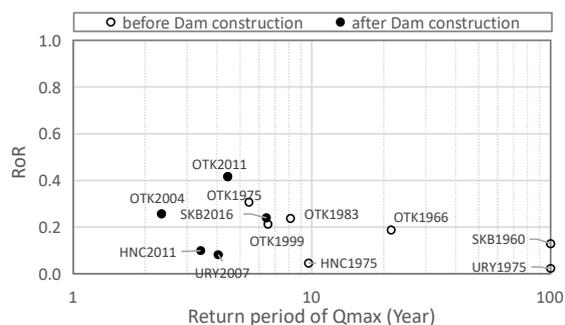


Fig. 7 Historical changes in riverbed environment at the downstream of Ootaki Dam (OTK), Shimokubo Dam (SKB), Urayama Dam (URY) and Hinachi Dam (HNC).

流況・土砂動態改善対策においては、RoRをダム建設前程度に戻すことが目標となりうる。RoRを粒径の大小を示す第1項(D_{ave}/D_{max})と巨礫割合を示す第2項($\Sigma DR/L$)に分けて考えることで、改善対策の質と量にアプローチできるといえる。過去の粗粒化程度がわかり目標となりうる場合、その過去の位置

を目標として設定できる(Fig.8)。また、過去の粗粒化程度が不明または目標とならない場合には、目標となりうる対照地点の位置を目標として設定できる。

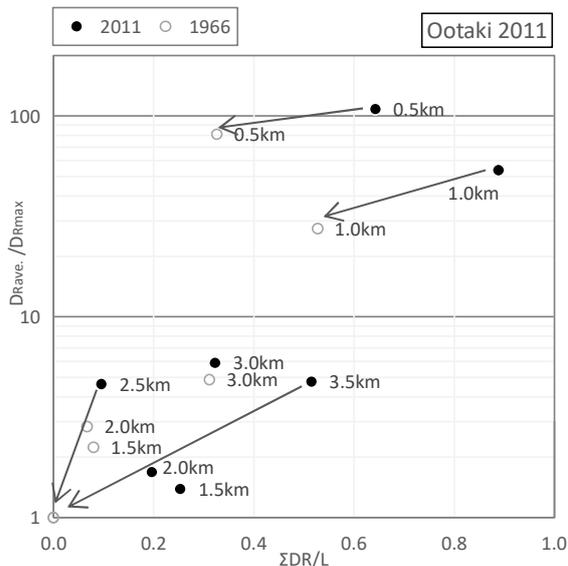


Fig. 8 A method of setting goals for effective riverbed disturbance by using historical changes of RoR's paragraph in riverbed environment at the downstream of a dam.

4. 結論

本研究の結論を以下に述べる。

- ・河床攪乱レベルに応じたダム建設影響の履歴的評価手法を提案した。レベル境界値はダム計画最大放流量に着目し、その前後2段階を設定した。併せて、粗粒化指標の対象について、レベル2においては河床材粒径 $\phi 250\text{mm}$ 以上に着目することを提案した。
- ・河床攪乱レベル1における河床攪乱指標として代表粒径 D_{60} と無次元掃流力 τ^* を用いた履歴的評価手法及びそれらを用いた改善対策の評価・実施手法と有効性確認手法を提案した。
- ・河床攪乱レベル2において粗粒化ポテンシャルを定義し、それを用いた粗粒化指標RoRと経験出水の生起確率年を用いた履歴的評価手法及び目標設定手法を提案した。

謝辞

本研究で用いた長期に渡る貴重なデータを提供いただいた、国土交通省近畿地方整備局の川ダム統合管理事務所、独立行政法人水資源機構木津川ダム総合管理所比奈知ダム管理所の方々を中心に感謝する。

参考文献

- 岩井重久・石黒政儀（1970）：「応用水文統計学」，森北出版，pp.73-80.
- 小林草平・中西哲・天野邦彦（2011）：山地河川の小規模ダム下流における砂礫の減少と底生動物群集，陸水学雑誌，Vol.72，No.1，pp.1-18.
- 谷田一三・竹門康弘（1999）：底生動物に与えるダムの影響，応用生態工学，応用生態工学研究会，Vol.2，No.2，pp.153-164.
- 「浸水想定（洪水，内水）の作成等のための想定最大外力の設定手法」，国土交通省水管理・国土保全局，2015年7月.

（論文受理日：2019年6月17日）