

# ダム上下流における河床材料の縦断分布と変化パターンに関する分析

LONGITUDINAL RIVERBED MATERIAL PROPERTY CHANGE AT THE DOWNSTREAM OF DAMS AND ANALYSIS OF ITS PATTERNS

遠藤希実<sup>1</sup>・天野邦彦<sup>2</sup>・原野崇<sup>3</sup>・伊藤嘉奈子<sup>4</sup>

Maremi ENDOU, Kunihiko AMANO, Takashi HARANO and Kanako ITOU

<sup>1</sup>正会員 工修 国土技術政策総合研究所 環境研究部 河川環境研究室 研究官  
(〒305-0804 茨城県つくば市旭1番地)

<sup>2</sup>正会員 博(工) 国土技術政策総合研究所 環境研究部 河川環境研究室長(同上)

<sup>3</sup>正会員 工修 国土技術政策総合研究所 環境研究部 河川環境研究室 主任研究官(同上)

<sup>4</sup>正会員 工修 近畿地方整備局 淀川河川事務所 管理課  
(〒573-1191 大阪府枚方市新町2-2-10)

Little past progress has been made in the evaluation of the impact of dams on the environments of the rivers downstream from the dams, because the impact manifestation mechanisms are complex and the impacts themselves are not easy to abstract. We have conducted field survey to investigate the change in river bed between upstream and downstream of 15 dams. Riverbed material seems coarser at any immediately downstream sites due to the trap of sediment behind dams; however, downward grain size change pattern was different among rivers. So then we applied the statistical analysis to its patterns and classified 15 dams into six groups. And we evaluated their feature by comparing it with the calculated grain size which is estimated from the shear velocity.

**Key Words :** *impact of dam, riverbed material, armoring, statistical analysis.*

## 1. はじめに

ダム建設に伴う流量や流砂量の変化がダム下流の河川環境に及ぼす影響については、これまでも多くの研究<sup>1)</sup><sup>2)</sup>がなされているが、その影響をより強く受けると考えられるダム直下流区間は山間部であるため、一般的に河道形状、河床材料、生物調査等の既存資料が少ないとともに、各調査が個別に実施されることも多く、それらの相互関係を勘案した縦断的な分析や複数ダムを対象にした同一観点による評価を行うことが困難である。ダム建設が下流の河川環境に及ぼす影響の評価方法については、流砂量や流況の変化に伴う物理基盤の変化やそれらに対する生物応答といった様々な観点から研究がなされており、例えば、山原<sup>3)</sup>はダム下流における縦断的な細粒土砂の存在割合について調査し、ダム直下流において砂の存在割合は急激に低下するものの、支川からの土砂供給が少なくてもダムから4~5km程度下流で急速に回復することを示した。また、大沼<sup>4)</sup>はダム建設に伴う流

況変化について出水による攪乱の減少や平時時流量の平滑化、季節ごとの流況変化パターンに着目し、[年最大放流量/年最大流入量]や平滑化指数による評価を行っている。また、波田野<sup>5)</sup>はダム直下地点と上流にダムの無い河川における底生動物群集を比較し、物理環境構造の変化に伴い生物多様性が低下することを示した。しかしながらダムによる下流河川への環境影響評価は、その影響発現機構が、ダムによる土砂供給量の低下や流量変化等に伴う河道地形の変化などの直接的な影響、ならびにそれらの変化に追隨して間接的に発生する生物生息環境の質の変化など複合的であることから、各河川の土砂供給量や降雨特性などの地域性を考慮する必要がある。そのため、本研究では生物生息環境の基盤であるとともに、ダム上下流に作用する物理量の応答結果でもある河床材料に着目し、現況におけるダム上下流環境の実態を把握するとともに、その変化パターンを分類することにより、ダムの建設に伴い下流の物理環境が縦断的に受ける影響を評価することを主目的とした。

表-1 分析対象ダムおよびダム上下流河川の諸元

ダム・河川諸元	豊平峡ダム	大雷ダム	鹿ノ子ダム	美利河ダム	忠別ダム	四十四田ダム	御所ダム	二瀬ダム	蓮ダム	九頭竜ダム	石手川ダム	野村ダム	中筋川ダム	敷木ダム	竜門ダム	
地方	北海道	北海道	北海道	北海道	北海道	東北	東北	関東	中部	近畿	四国	四国	四国	九州	九州	
目的	FWP	F.N.A.W.P	F.N.A.W	F.N.A.P	F.N.A.W.P	F.P	F.N.W.P	F.N.P	F.N.W.P	F.P	F.A.W	F.A.W	F.N.A.W.J	F.N.W.I.P	F.N.A.J	
竣工年	1973	1975	1983	1992	2006	1968	1981	1961	1991	1968	1973	1981	1998	1987	2001	
経過年数※1	36	34	26	17	3	41	28	48	18	41	36	28	11	22	8	
流域面積 (km <sup>2</sup> )	134	292	124	115	239	1196	635	170	81	185	73	168	21	34	27	
平均年最大流入量 (m <sup>3</sup> /s)	212	161	45	234	201	535	769	335	377	701	84	346	133	105	126	
平均年最大放流量 (m <sup>3</sup> /s)	86	52	13	115	41	354	607	249	257	266	69	276	42	48	83	
洪水調節開始流量 (m <sup>3</sup> /s)	80	50	20	100	100	400	500	500	200	270	300	300	50	80	100	
洪水カット率	0.59	0.68	0.70	0.51	0.80	0.34	0.21	0.26	0.32	0.62	0.18	0.20	0.68	0.55	0.34	
比堆砂量 (千m <sup>3</sup> /km <sup>2</sup> /年)※2	0.25	0.17	0.10	0.31	0.54	0.20	0.28	0.59	0.27	0.53	0.43	0.16	0.06	0.32	0.17	
河床勾配	ダム上流	1/26	1/68	1/66	1/51	1/55	1/342	1/128	1/29	1/16	1/41	1/49	1/231	1/62	1/24	1/17
	ダム下流	1/65	1/79	1/97	1/372	1/129	1/369	1/338	1/83	1/49	1/113	1/66	1/392	1/192	1/70	1/32
セグメント区分	ダム上流	M	1	1	M	M	1	1	M	M	M	1	1	M	M	
	ダム下流	1	1	1	1	1	1	1	M	1	1	1	1	1	1	
河床材料※3 D10	ダム上流	33.1±14	14.6±2.6	11.9±2.1	6.9±4.1	8.4±1.1	13.7±5.2	7.1±3.3	9.9±4.7	8.3±1.8	83.2±39.4	2.5±1.1	15±11.3	12.1±2.6	5±6.5	26.6±9
	ダム下流	20.1±5	14.3±3.1	30±4.3	8.6±1.6	11.5±1.6	12±4.1	11±6.3	9.6±3.4	13.8±5.3	116±53.8	7.2±7.5	13.6±9.7	15.4±7.9	16.5±11.6	34.2±38.7
河床材料 D30	ダム上流	62.5±23.3	23.5±2.7	22.4±2.9	13.8±4.7	13.2±1.5	26.7±7.9	25.9±10	16.3±6	17.7±5.9	130.2±54.6	12.3±11.4	35.9±29	23.5±8.2	42.5±25.3	45.3±14.2
	ダム下流	40.1±11.4	24.4±4	42.9±3.9	15.3±2.7	17.4±2.3	25.4±5.8	38.1±16.7	17.5±4.5	36.7±14	186.1±78.8	34.3±37.1	54.3±45.2	24.3±15.4	43±24.7	58.4±46.6
河床材料 D60	ダム上流	134.7±45.8	39.2±4.5	40.7±5.8	23.8±6.7	22.9±2.5	51±14.7	82.6±28.5	26.3±7.5	46.3±23.8	189.5±74.1	60.6±77.6	72.4±58.1	58.4±44	138.7±47.9	82.8±23.5
	ダム下流	91.8±34.5	42.5±6	62±6.6	27.4±4.1	26.9±3.7	49.1±9.9	92±27	30.4±7.1	84.1±32.8	257.9±102.8	114.7±87.2	119.7±104.3	43.9±40.3	92.9±53.8	112.6±51.8
河床材料 D90	ダム上流	296.5±111.7	72.7±6.3	86.7±16.6	48.5±8.7	62.6±7.3	123.7±35.8	202.5±59.2	45.5±9.5	148.8±20.6	253±92.8	186.1±184	157.6±117.9	149.1±120.7	447.1±104.1	164.2±47.8
	ダム下流	248.6±65.8	84.8±13.7	108.6±10.7	55.8±12.4	50.6±9.2	97.2±18.7	197.9±29.7	52±12.1	222.3±101.8	336.9±127.7	294.8±185.9	211.8±159	82.6±79.7	196.7±105.1	256.5±115.4
ダム下流区間における 最下流地点のダム流域面積比	1.67	1.99	2.53	2.04	1.45	1.01	1.05	1.28	2.12	3.25	1.35	1.29	1.71	1.56	1.72	

※1 当該ダム竣工から現地調査の前年となる2008年までの経過年数

※2 2008年での当該ダム堆砂量をダム流域面積および経過年数で除した値を比堆砂量とした

※3 ダム上流または、ダム下流 (ダム直下地点およびダム下流区間) にて計測された河床材料の平均値±標準偏差

## 2. 研究方法

本研究では、ダム上下流の物理環境の縦断的な変化を把握するため、ダム周辺環境をダム上流区間、ダム直下地点、ダム下流区間に区分し、以下に示す現地調査及びデータ分析を行った。なお、ダム上流区間は貯水池による背水の影響を受けない順流域を対象に貯水池上流から概ね5kmの区間を基本としており、ダム直下地点は当該ダム下流にて大きな支川が流入しない区間に設定している。また、ダム下流区間は、ダム直下地点の下流において順次支川が合流し、支川合流後の集水域面積がダム流域面積(A)の2倍程度となるまでの区間を基本として設定した。ただし、本川に建設されたダムの場合など、流域面積が大きい場合、下流河川においてその集水域面積が、ダム流域面積の2倍(2A)となる地点がダムサイトから遠く離れすぎの場合や、逆にダムサイト近傍で本川など集水域面積が大きな河川に合流するため、ダム流域面積比が2Aより大きくなる場合があることからダム下流区間最下流地点における集水域面積のダム流域面積に対する比は1.01~3.25Aとなった。

### (1) 現地調査

ダム上下流の縦断的な環境変化を把握することを目的に支川合流点や河川横断工作物などを図面等で確認し、調査位置を設定した。また、調査地点等はGPSより位置座標を取得しGISを用いて整理した。なお、現地調査の時期は各ダムによって異なるが、出水期の終了した概ね2009年の秋期から翌2010年の春期にかけて行った。

#### a) 河川横断測量

ダム上流区間及びダム直下地点から下流5kmを対象に概ね200m間隔で河川横断測量を実施した。また、下流5km以降のダム下流区間については、河床材料が横断的に比較的均質であると考えられる河道の直線部や、支川合流に伴い河床材料が変質すると予想された支川合流後の地点を対象に適宜実施した。なお、河川横断測量の測量範囲は堤間内を原則としているが、山間部において峡谷となり、河岸陸上部までの測量が困難な場合は、河道内の低水路部に限定して地盤高を取得した。また、山間部では近傍に公共水準点が無い場合が多く、基準となる地盤高が不明な場合は、GPS位置座標を基に数値地盤地図の地盤高等を代用し、河川縦断方向の相対的な高低差を把握した。

#### b) 河床材料調査

河川横断測量と同測線上の低水路部から河床表層材料を採取し、粒径および個数を計測した。計測方法としては、基本的に面積格子法を用いた。しかし、河床材料の粒径が大きく、面積格子法による実施が困難な場合は線格子法を用いた。なお、河床材料調査にあたっては河川横断方向における河床材料の空間的な不均一性を考慮し、低水路内を左右岸、流心に3分割し、それぞれから採取した河床材料個数百分率の平均値を用いることとした。

### (2) データ分析

#### a) 水理量の縦断変化

表-1に本研究において分析対象としたダムおよびダム上下流の諸元を示す。表-1に示す15ダムの現地調査成果を用いてダム上下流河道のGISデータを作成するとともに、管理記録に基づき当該ダムにおける平均年最大流入量および平均年最大放流量を算出し、上下流河道に生

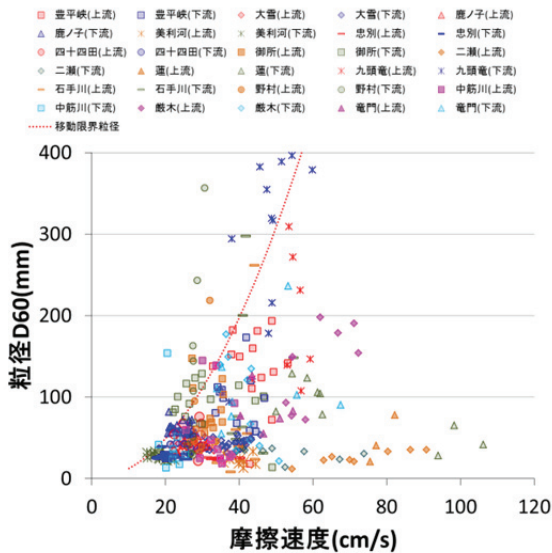


図-1 各ダム代表粒徑 $D_{60}$ と摩擦速度

起する摩擦速度等の水理量の計算を行った。しかし、水理計算にあたりダム上下流では流量観測所が少なく、各現地調査地点の正確な流量を把握することが困難であった。このため、GISを用いた解析により各調査地点における集水域面積を算出し、これらにダム平均年最大流入量をダム流域面積で除して求めた比流量を乗ずることで、各調査地点における流量とした。また、水理計算手法については、調査対象地点が山間部であるとともにダム上下流における縦断的な物理環境変化を把握することを目的としていることから、等流計算により簡易的に行うこととした。

なお、ダムによって粒徑が多様であるため、粗度係数は Manning-Strickler の式<sup>6)</sup>を用いて断面毎の代表粒徑 $D_{60}$ から算出して与えた。さらに出水時の土砂動態を簡便に評価するため、岩垣の式<sup>7)</sup>を用いて移動限界粒徑を算出するとともに、ダムの影響が最も強く表れると想定されるダム直下流地点の代表粒徑 $D_{60}$ と移動限界粒徑の相関性について検討した。

計算に使用した平均年最大流入量および平均年最大放流量は、国土交通省が公開しているダム諸量データベースから統計期間1999～2008年のデータを抽出して使用した。

### b) 河床材料の縦断変化

ダム下流区間の河床材料は、ダム上流区間と比較した場合に、ダム直下地点では、上流からの土砂供給が抑制されるために粗粒化が生じると考えられるが、支川合流に伴う残流域からの土砂供給によって段階的にこの影響が緩和されると考えた。上流区間と比較したときのダム直下地点およびその下流区間におけるこれら影響を評価するために、河道に直接的に作用する流水の影響を指標する物理量と考えられるダム上下流区間の摩擦速度の中央値の変化率 ( $\Delta U^*$ )、河道への流水の作用に対する河道応答結果を指標すると考えられる河床材料 $D_{60}$ の中央

表-2 主成分分析に用いた3指標

河道に直接作用する物理量	摩擦速度の変化率 $\Delta U^*$
物理量に対する河道応答	河床材料の変化率 $\Delta D_{60}$
流域からの土砂供給量	比堆砂量

値の変化率 ( $\Delta D_{60}$ ) および流域からの土砂供給量である比堆砂量を指標(表-2)としてダム下流における河床材料の変化パターンを類型化を行った。なお、各ダムによって調査範囲や地点数が異なるため、類型化にあたってはダム下流区間1.5Aまでの調査地点成果を扱うものとし、3指標を主成分分析により得点化し、主成分得点をクラスター分析した。ただし、九頭竜ダムは、石徹白川合流によりダム直下地点の流域面積が1.86Aと急激に増加するため、ダム下流区間3.0Aまでの調査地点成果を扱った。なお、石徹白川には1968年から電力ダム群が供用されており、石徹白川からの土砂供給は少ないと想定される。

### c) 水理計算結果に基づく代表粒徑の評価

ダム直下地点の河床材料は、支川合流による土砂供給が無いために著しく粗粒化し、a)で導いたダム直下地点の代表粒徑と移動限界粒徑の間に相関が高い回帰式が得られると考えられる。しかし、下流へと進むにつれて、残流域からの土砂供給により、粗粒化は徐々に解消される。このため、ダム直下地点で成立した上記回帰式を用いて移動限界粒徑から推定した代表粒徑は、下流へと行くにつれて現地測定値と異なることが予想される。そこでダム直下における移動限界粒徑 $D_c$ と現地調査で得られた代表粒徑 $D_{60}$ の相関をとることで求めた回帰式(式(1))によって規定される計算粒徑 $D_{60cal}$ と現地調査から取得した代表粒徑 $D_{60}$ の比によって粗粒化度合いの評価を行った。

$$D_{60cal} = 0.8266 D_c + 13.422 \quad (1)$$

ここでは $D_{60cal}$ ：計算粒徑、 $D_c$ ：移動限界粒徑とする。

## 3. 結果

### (1) ダム上下流に作用する水理量と代表粒徑

#### a) ダム上下流の代表粒徑と移動限界粒徑の関係

図-1は各ダム上下流にて得られた河床材料の代表粒徑 $D_{60}$ と水理計算から算出した各調査地点における平均年最大流量時の摩擦速度を2次元平面上にプロットしたものである。図中の曲線は、摩擦速度に対応した移動限界粒徑を岩垣の式より算出した値であり、野村ダムや九頭竜ダム、御所ダム下流の一部調査地点を除いて概ね移動限界粒徑以下となっている。

#### b) ダム直下地点の代表粒徑と移動限界粒徑の相関

上述のようにダム上流区間およびダム下流区間では、代表粒徑 $D_{60}$ と移動限界粒徑との差が大きく、土砂供給

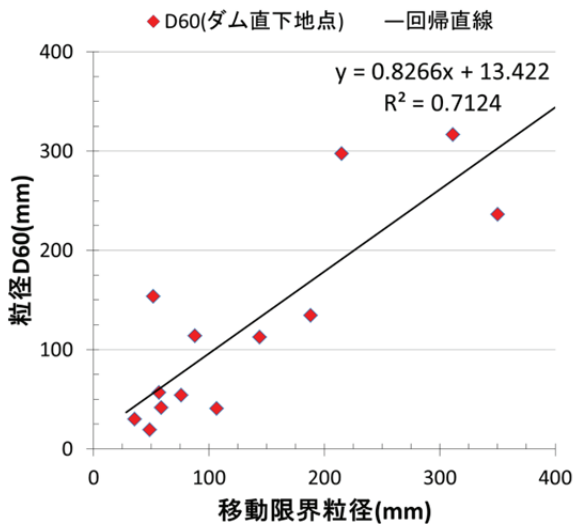


図-2 ダム直下地点の粒径D<sub>60</sub>と移動限界粒径

による粗粒化の緩和効果が考えられた。ダム直下地点では、ダムによる流砂の捕捉により、上流から砂以上の粒径成分が流下しにくいことから、ダムの影響を最も強く受けていると考えられる。また、上流からの土砂供給が少ないことから、河床材料の粒径は、作用する最大の掃流力に規定される可能性が高いと考えられる。そこで、この地点における代表粒径D<sub>60</sub>と移動限界粒径を2次元平面上にプロットして比較した(図-2)。

ダム直下地点のみを抽出した場合、R<sup>2</sup>=0.71と高い相関が認められた。(ダム上下流の全調査地点で算出した代表粒径と移動限界粒径の決定係数：R<sup>2</sup>=0.26, ダム上流地点のみ：R<sup>2</sup>=0.21, ダム下流のみ：R<sup>2</sup>=0.31) なお、ダム直下地点の使用データは、ダム直下地点において土砂還元事業を実施している二瀬ダムおよび蓮ダムは使用データから除いた。また、ダム直下地点の調査地点が支川合流部と重なり一時的な川幅拡張に伴う流砂形態の変化や支川からの土砂供給など河床材料への影響が考えられた九頭竜ダムは、ダム直下地点に近い下流側の調査データを使用した。

### (2) ダム下流河床材料に着目した変化パターンの類型化

ダム上下流の摩擦速度の変化率ΔU\*, 河床材料の変化量ΔD<sub>60</sub>, 比堆砂量を指標に主成分分析を行った結果を表-3に示す。主成分分析の結果、主成分3の固有値が1以下となったため、固有値が1以上である2つの主成分の主成分得点について、15ダムの値を2次元平面上にプロットした結果を図-3に示す。

なお、図中のプロットの色は基準化した主成分得点についてクラスター解析を行い、C1~C6の6つに類型化した結果を示している。C1は豊平峡ダム、四十四田ダム、御所ダム、竜門ダム、中筋川ダムが分類された。C1は御所ダム及び竜門ダムのΔD<sub>60</sub>が1.0を超えるものの、他3ダムの平均ではΔD<sub>60</sub>が0.8となり、ダム下流区間の粒径が上流区間に比べて小さいグループである。C2は美利

表-3 3指標による主成分分析結果

固有値表			
主成分	固有値	寄与率	累積寄与率
1	1.311	43.71%	43.71%
2	1.226	40.87%	84.58%
3	0.463	15.42%	100.00%

主成分負荷量			
変数	主成分1	主成分2	主成分3
ΔD <sub>60</sub>	0.57	0.72	-0.39
ΔU*	0.91	-0.09	0.41
比堆砂量	-0.40	0.83	0.38

C1 : 豊平峡    C1 : 四十四田    C1 : 御所    C1 : 竜門  
 C1 : 中筋川    C2 : 美利河    C2 : 巖木    C3 : 大雪  
 C3 : 鹿ノ子    C4 : 忠別    C4 : 二瀬    C5 : 九頭竜  
 C6 : 蓮    C6 : 野村    C6 : 石手川

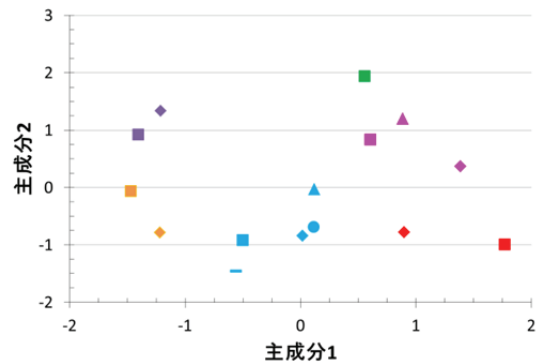


図-3 土砂動態に着目したダム下流区間の類型化

河ダムと巖木ダムが分類され、ダム上流区間の摩擦速度が下流区間に比べて大きいグループである。C3は大雪ダム、鹿ノ子ダムが分類され、上下流の河床勾配が概ね一定であり、ダム上流区間の粒径が下流区間に比べてやや小さいグループである。また、C3は比堆砂量が15ダムの平均0.29 km<sup>3</sup>/km<sup>2</sup>/年に比べて大雪ダムが0.17 km<sup>3</sup>/km<sup>2</sup>/年、鹿ノ子ダムが0.1 km<sup>3</sup>/km<sup>2</sup>/年と少ないグループである。C4は忠別ダムと二瀬ダムが分類され、比堆砂量が忠別ダム0.54 km<sup>3</sup>/km<sup>2</sup>/年、二瀬ダム0.59 km<sup>3</sup>/km<sup>2</sup>/年と各グループの中で最も大きい。また、ΔU\*の平均が0.62とダム上流区間の摩擦速度が下流区間に比べて大きいグループである。C5の九頭竜ダムとC6の蓮ダム、野村ダム、石手川ダムは概ね同様の特徴を有しており、4ダムの平均的なΔD<sub>60</sub>が2.23とダム下流区間の粒径が上流区間の2倍を超えるグループである。また、九頭竜ダムはC6の3ダム(平均0.29 km<sup>3</sup>/km<sup>2</sup>/年)に比べて比堆砂量が0.53 km<sup>3</sup>/km<sup>2</sup>/年と大きいため別類型となっている。

### (3) ダム上下流区間における粒径比

図-4に各ダムのダム上流区間および、ダム流域面積比1.5A(九頭竜ダムは3.0A)以内におけるダム下流区間の調査地点について、式(1)から求めた計算粒径D<sub>60cal</sub>と調査結果から求めた代表粒径D<sub>60</sub>から算出した粒径比(代表粒径D<sub>60</sub>/計算粒径D<sub>60cal</sub>)をボックスプロットにて示す。なお、ボックスの上端、または下端は、各ダムの上下流区間において算出された粒径比の第3四分位、第1四分位

図-4 ダム上流区間および下流区間の粒径比

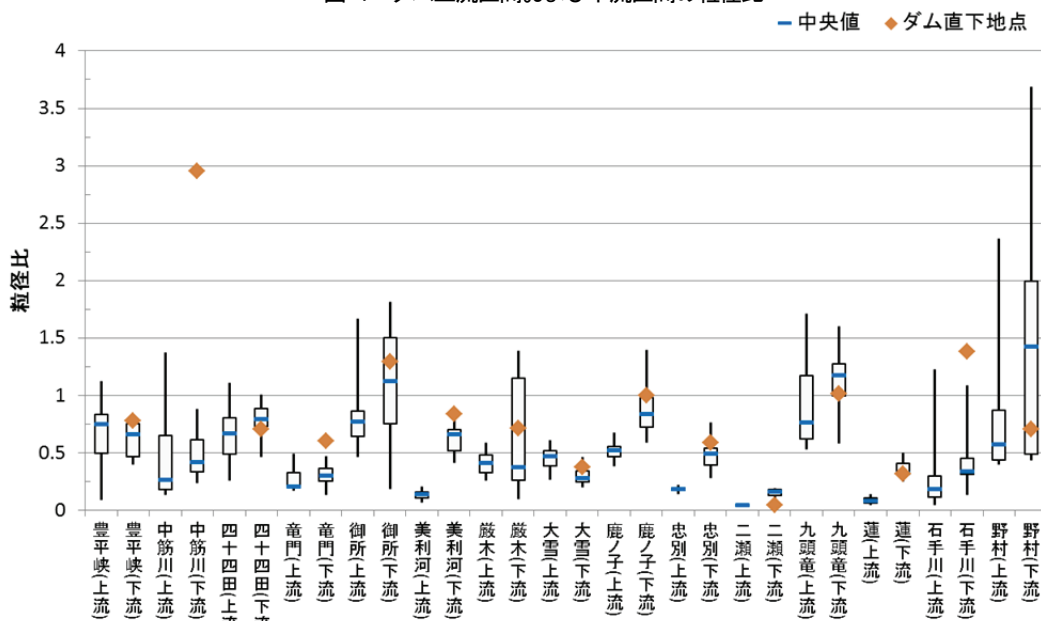


表-4 各ダムの粒径比およびダム類型化に用いた指標値

ダム名	豊平峡	中筋川	四十四田	竜門	御所	美利河	巖木	大雪	鹿ノ子	忠別	二瀬	九頭竜	蓮	石手川	野村																	
区間	上流	下流	上流	下流	上流	下流	上流	下流	上流	下流	上流	下流	上流	下流	上流	下流																
粒径比	最大値	1.12	0.78	1.38	0.89	1.11	1.01	0.49	0.47	1.67	1.81	0.21	0.85	0.59	1.39	0.61	0.46	0.67	1.40	0.22	0.76	0.06	0.19	1.71	1.60	0.14	0.50	1.23	1.09	2.36	3.69	
	第3四分位	0.84	0.75	0.65	0.62	0.80	0.89	0.33	0.37	0.86	1.51	0.16	0.71	0.48	1.15	0.52	0.34	0.56	0.98	0.20	0.54	0.05	0.19	1.17	1.27	0.11	0.41	0.30	0.45	0.87	2.00	
	中央値	0.75	0.66	0.27	0.42	0.67	0.80	0.21	0.30	0.77	1.12	0.14	0.66	0.41	0.38	0.47	0.28	0.52	0.84	0.19	0.50	0.04	0.16	0.76	1.18	0.08	0.33	0.18	0.34	0.58	1.43	
	第1四分位	0.50	0.47	0.18	0.34	0.49	0.73	0.21	0.25	0.65	0.75	0.11	0.52	0.33	0.26	0.39	0.25	0.47	0.73	0.18	0.39	0.04	0.13	0.63	1.00	0.06	0.32	0.11	0.31	0.44	0.49	
	最小値	0.09	0.40	0.13	0.24	0.26	0.47	0.17	0.14	0.47	0.18	0.07	0.41	0.26	0.10	0.27	0.20	0.38	0.59	0.14	0.28	0.04	0.09	0.53	0.58	0.04	0.25	0.05	0.13	0.40	0.44	
	ダム直下地点	-	0.78	-	2.95	-	0.71	-	0.60	-	1.29	-	0.84	-	0.71	-	0.38	-	1.00	-	0.59	-	0.04	-	1.02	-	0.32	-	1.38	-	0.71	
類型区分	C1				C2				C3				C4		C5		C6															
類型化に用いた指標	$\Delta D_{60}$		0.63		0.83		0.95		1.22		1.38		1.11		0.44		1.07		1.45		1.14		1.35		2.30		2.26		2.02		2.33	
	$\Delta U^*$		0.81		0.85		0.87		0.82		0.85		0.46		0.68		1.34		0.96		0.60		0.64		0.92		0.79		1.02		0.95	
	比堆砂量		0.25		0.06		0.20		0.17		0.28		0.31		0.32		0.17		0.10		0.54		0.59		0.53		0.27		0.43		0.16	
データ数	13	6	11	8	12	11	5	5	13	15	12	12	8	9	11	16	9	22	6	24	8	4	7	6	3	5	8	7	8	9		

を表している。粒径比は1.0に近いほど粗粒化の度合いがダム直下地点の河床材料に近いことを意味しており、変動はあるものの御所ダム、九頭竜ダム、野村ダムのダム下流区間を除き、概ね中央値が1以下になっている。また、ダム直下地点（図中◆）の粒径比は、ダム下流区間における値のうち概ね第3四分位以上にあり、ダム直下地点は粒径が大きく、下流にかけて粒径が小さくなることが示唆された。

#### 4. 考察

##### (1) ダム上下流における現地河床材料と移動限界粒径

図-1に示したようにダム上下流区間において調査した現地河床材料の代表粒径 $D_{60}$ と岩垣の式により算出した移動限界粒径は、各ダムにおいて適合度が低く、特にダム上流区間において低い結果となった。これには本研究にて調査対象としたダム上下流区間は、河床勾配が $I=1/16\sim 1/392$ と急勾配であるとともに粒径も大きく、一様粒径を対象とした岩垣の式の適用範囲の課題もあるが、ダム直下地点のみを対象とした場合は代表粒径 $D_{60}$ と移動限界粒径に高い相関がみられたことから、粒径比 $D_{60}/D_{60cal}$ が小さい箇所では、土砂供給による細粒土砂の

堆積が生じていると考えられる。

本研究で算出した水理量は、等流計算による簡易計算であるが、平均年最大流量程度の出水によってダム上下流の河道に生起する摩擦速度は大きく、砂分などの移動は恒常的に起こっていると考えられる。これは山地河道の河床勾配が急であるとともに、河道が拘束されており、河道幅が狭いためである。このため日本のダムにおいては、洪水調節による攪乱頻度や程度の減少はあっても、ダム下流での粗粒化抑制に効くほどのものではなく、土砂貯留による影響が卓越していると考えられる。

##### (2) ダム下流区間における河床材料の変化パターン

ダム建設に伴う物理環境の変化について、15ダムを対象に、 $\Delta U^*$ を整理したところ、大雪ダム(1.34)と石手川ダム(1.02)を除いて1.0以下となり、ダム下流区間の摩擦速度は上流区間に比べて小さくなっていったが、 $\Delta D_{60}$ はC1に分類された豊平峡ダム(0.63)、四十四田ダム(0.95)、中筋川ダム(0.83)、およびC2に分類された巖木ダム(0.44)以外は1.0以上となり、ダム下流区間の河床材料は上流区間に比べて大きくなっていった。

河道に生起する摩擦速度は、土砂動態の規定因子であるため、摩擦速度の低減は、河床材料にとって粗粒化を緩和する方向に作用すると考えられたが、現地調査にて

得られた河床材料からはそのような傾向が見受けられなかった。そこで $\Delta D_{60}$ および $\Delta U^*$ 、比堆砂量の3指標による類型結果と水理計算による移動限界粒径を指標とした粒径比 $D_{60}/D_{60cal}$ による分析結果をふまえ、ダム下流区間の河床材料に着目した変化パターンについて整理する。

3指標によって類型化されたグループのうち、C1（豊平峡ダム、四十四田ダム、御所ダム、竜門ダム、中筋川ダム）は、 $\Delta D_{60}$ が1.0以下となるダムを多く含んでおり、ダム下流区間の河床材料も上流区間に比べて小さかった。これは、直感的にはC1における $\Delta U^*$ の平均値が0.8とダム下流区間の摩擦速度が上流区間に比べて小さかったためと考えられた。しかし、代表粒径と移動限界粒径の関係（図-1）では、ほぼ全ての調査地点にて代表粒径 $D_{60}$ を動かさうる摩擦速度が発生しており、残流域からの土砂供給等、洪水による掃流以外の要因によって河床材料が規定されていることが示唆された。

C3（大雪ダム、鹿ノ子ダム）は、ダム上下流区間において河床勾配の変化が少ないグループであり、C3のみ $\Delta U^*$ の平均値が1.15とダム下流区間の摩擦速度が大きくなっている。C4（忠別ダム、二瀬ダム）は、比堆砂量の平均値が $0.57 \text{ km}^3/\text{km}^2/\text{年}$ と大きい。 $\Delta U^*$ の平均値は0.62とダム下流区間の摩擦速度がダム上流区間に比べて小さくなるグループである。 $\Delta D_{60}$ の平均値は1.24とダム下流区間の粒径が上流区間に比べてやや大きくなっている。ただし、忠別ダム下流区間の粒径比 $D_{60}/D_{60cal}$ は、概ね0.5となっており、平均年最大流量程度の出水時には、現地調査にて確認された代表粒径 $D_{60}$ の2倍以上の粒径を動かさうる水理量が発生していることになる。2006年に竣工した忠別ダムは、本研究の調査時点までに大きな出水を経験していないため、今後の出水によりさらに粗粒化する可能性がある。また、二瀬ダムは、2003年からダム下流への置き砂試験を実施しており、二瀬ダム下流区間の粒径比 $D_{60}/D_{60cal}$ が0.2以下と著しく小さいことから、置き砂試験による細粒分の土砂供給の影響が考えられた。

比堆砂量の多いC5（九頭竜ダム）やC6（蓮ダム、野村ダム、石手川ダム）は、 $\Delta U^*$ の4ダム平均値が0.92とダム上下流区間の摩擦速度が同程度である。 $\Delta D_{60}$ の平均値は2.23であり、ダム下流区間の粒径が著しく大きい。このため、C5、C6は、ダム建設に伴う土砂抑制の影響が大きく、ダム下流区間において顕著な粗粒化が生じていると想定した。しかし、4ダムの粒径比 $D_{60}/D_{60cal}$ は、九頭竜ダムおよび野村ダム下流区間において中央値が1.0を越えるものの、蓮ダムや石手川ダムの中央値は0.5を下回った。

上記のようにダム下流区間における摩擦速度の増減は、ダムによる洪水調節のほか、河道幅や河床勾配に影響を受けることが示唆された。特に山地河道においては河道が拘束されていることから河床勾配の影響が大きいと考えられ、本研究にて対象にした15ダムにおいても、四十四田ダム、大雪ダム、鹿ノ子ダム、石手川ダムを除いて、

ダム下流区間の河床勾配が上流区間の0.5倍程度に緩和されていた。ダム下流区間の河床勾配が、上流区間に比べて緩くなる河川においては、流砂が遮断されていないダム建設以前の河床材料は、現時点において確認される河床材料よりもさらに粒径が小さかったと想定される。

ダムによる下流河床への影響を検討する際には、ダム建設前後の下流河床状態を比較する必要がある。このため、単純に現況のダム上下流河床状態を比較するだけでは不十分であり、ダム下流の河川環境を評価するにあたっては、現地調査による継続的なモニタリングだけでなく、水理計算などによる定量的な環境影響評価が必要であることが示唆された。

## 5. まとめ

現地調査成果を基に水理計算を行い、ダム上下流の土砂動態を把握するとともに、河床材料の縦断的な変化パターンについて、統計的手法による類型化を行った。また、ダム直下地点の代表粒径と移動限界粒径の回帰式を作成し、ダム上下流における粗粒化の程度を評価した。

さらに類型化したダムグループの特徴と粗粒化の程度を比較することにより、洪水中に実際に生起したと考えられる影響について評価した。

**謝辞：**本研究の実施にあたり、全国の河川管理者およびダム管理者にご協力いただきました。また、現地調査成果のデータ整理に関しては、(財)ダム水源地環境整備センター 大杉主任研究員にご協力いただきました。記して感謝いたします。

## 参考文献

- 1) 辻本哲郎：ダムが河川の物理的環境に与える影響—河川工学及び水理学的視点から—、応用生態工学、Vol.2, No.2, pp.103-112, 1999.
- 2) 谷田一三、竹門康弘：ダムが河川の底生動物に与える影響、応用生態工学、Vol.2, No.2, pp.153-164, 1999.
- 3) 山原康嗣、藤田光一、小路剛志、富田陽子、大沼克弘、福田晴耕、井上優：ダム下流で水理条件がほぼ同様な河道区間の河床材料比較、河川技術論文集、第13巻, pp.147-152, 2007.
- 4) 大沼克弘、藤田光一、井上優：ダムによる流量変化の特性分析、河川技術論文集、第12巻, pp.241-246, 2006.
- 5) 波田野圭亮、竹門康弘、池淵周一：貯水ダム下流の環境変化と底生動物群集の様式、京都大学防災研究所年報、第48号B, pp.919-933, 2005.
- 6) 社団法人全国防災協会：設計流速の算定に関する参考資料、美しい山河を守る災害復旧基本方針, pp.参I-3, 2006.
- 7) 岩垣雄一：限界掃流力に関する基礎的研究、土木学会論文集、第41号, pp.1-21, 1956.

(2011. 9. 30受付)