

ダム上下流で水理条件がほぼ同様な 河道区間の河床材料比較

COMPARISON OF BED MATERIALS BETWEEN THE UPSTREAM AND
DOWNSTREAM OF DAMS ALMOST SIMILAR IN HYDRAULIC CONDITIONS

山原康嗣¹・藤田光一²・小路剛志³・富田陽子⁴・大沼克弘⁵・福田晴耕⁶・井上優⁷
Yasushi YAMAHARA, Koh-ichi FUJITA, Takeshi ORO, Yoko TOMITA,
Katsuhiko ONUMA, Seiko FUKUDA, and Yutaka INOUE

¹正会員 工修 国土交通省 国土技術政策総合研究所 環境研究部 河川環境研究室 交流研究員
(〒305-0804 茨城県つくば市大字旭1番地)

²正会員 工博 国土交通省 国土技術政策総合研究所 環境研究部 河川環境研究室 室長 (同上)

³正会員 工修 国土交通省 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 (同上)

⁴正会員 国土交通省 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)

⁵正会員 工修 国土交通省 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)

⁶正会員 元 国土交通省 国土技術政策総合研究所 環境研究部 部長 (同上)

⁷正会員 工修 応用地質株式会社 東京本社 (〒331-8688 さいたま市北区土呂町2-61-5)
(元 国土交通省 国土技術政策総合研究所 環境研究部 河川環境研究室 交流研究員)

In this research, selecting three dams whose hydraulic conditions are little difference between upstream and downstream, we made bed material surveys and analyzed hydraulic conditions at these sites. And then, we examined the movement of fine grained materials on gravel bed in the downstream of dams and the recovery process. The results show that main materials of river beds are almost same between upstream and downstream of them in water area and river bank area. On the other hand, a rate of fine grained materials in downstream close to the dams in water area is clearly less, and the recovery of the ratio is faster than that of a rate of the residual basin.

Key Words : fine grained material, bed material, armoring, effects of dam, dams on alluvial rivers

1. はじめに

近年, 我が国において, ダム貯水池の存在による下流河川の自然環境変化が注目され^{1), 2)}, 底生動物に着目した影響把握³⁾や物質動態に与えるダム貯水池の影響⁴⁾などが詳細に検討されるようになってきた。これらの研究においては, 河床材料の粗粒化が代表的な物理環境変化として取り上げられ, それと生物との関係を調べるというアプローチが主軸の1つになっている。

粗粒化現象については, 古くから移動床水理学の分野で精力的に研究が進められてきた^{例えは, 5), 6), 7)}。それらは, 日本のダムと特性の違いもあると考えられる米国などにおける大規模ダム下流の河道変化実態と現象把握の研究

成果を踏まえ, 水路実験などから機構解明やモデル化, 予測手法の開発を進めるというものである。前述の自然環境への影響を把握する研究は, そうした移動床水理学の研究が想定してきた典型的な粗粒化現象の捉え方を当てはめ, 生物への影響把握に重点を置くものであり, 個々の現場で当該ダムが起こした河道変化の実態や機構を合理的に把握するものにはなっていない。

日本のダムについては, 山本が天竜川や梓川で⁸⁾, 最近では時岡らが鬼怒川で⁹⁾粗粒化などの河道変化の実態を調べているが, 多くのダムが山間部にあり, 河道データ蓄積事例が希有で, 水系も複雑で分析しにくいことから, 情報は未だ限定的である。

以上を踏まえ, 本研究では, 日本におけるダム下流の河道変化の実態を, 前述の制約がある中でも, 極力, 土

砂水理学的観点から分析できるように把握し、ダムと自然環境変化との関係をより合理的に理解することに役立てることを目的とする。

ダムによる河道変化を実証的に明らかにするには、少なくとも、ダム建設前から供用後にかけて、ダム下流の同一区間で河道変化を営力とともに追跡するか、ダム上下流で水理条件がほぼ同じ区間の河道状況を比較することが必要であると考え、この条件をなるべく満足するような調査の組み立てを以下に行った。

2. 河床材料調査地点および調査手法

(1) 調査対象ダムの選定

調査対象ダムとして、国土交通省および水資源機構が管理する全国98ダムの中から、一級河川木津川水系名張川の比奈知ダム、青蓮寺ダム、一級河川江の川水系土師ダムの3ダムを選定した。表-1に、調査対象3ダムの諸元や河川・流域特性を示し、ダム位置図および調査対象範囲を図-1に示す。

選定では、まず、①対象ダムの上流域にダムが存在しないこと、②ダム下流で土砂還元を実施していないこと、の2条件で絞り込みを行った。さらに、③ダム上下流の水理条件（川幅、河川勾配）に大きな違いがないこと、④ダム下流ですぐには支川が合流しないこと、⑤ダム流入河川が複数ないこと、の3条件をスクリーニングの対象とした結果、上記3ダムが抽出された。

比奈知ダムは、ダム供用後7年の比較的新しいダム、青蓮寺、土師ダムは、30年以上経過したダムであり、ダム供用年数による比較も可能である。

ダムによる下流河川の河床材料や河道形状等の物理環境に影響を及ぼすファクターとして、攪乱の減少や平常時の流量の平滑化が指摘されるが、この度合いを示す指標に、[年最大放流量/年最大流入量]と平滑化指数がある¹⁰⁾。表-1にも示した3ダムの[年最大放流量/年最大流入量]は0.62~0.72と、ダムにより出水時のピーク流量は低減されている。一方、平滑化指数は、この値が大きいほど細かな流量変動がない期間がダム下流で増えていること（平滑化）を意味し、比奈知、青蓮寺ダムは30日以上で、やや平滑化傾向に傾向にあるダムと位置付けられる。土師ダムは発電取水の影響により、平滑化指数が小さくなっている。

(2) 調査地点

調査は、ダム貯水池上下流とダム下流で合流する比較的大きな支川で行った。本川の調査範囲は、貯水池上流端から上流へ概ね10kmとダム下流8~20kmとした。支川は、名張川水系（比奈知ダム、青蓮寺ダム）では、ダムから約5~7.7km下流で合流する宇陀川、江の川水系（土師ダム）ではダム貯水池上流の志路原川と下流の簸川、

表-1 調査対象ダムの概要

ダム・河川諸元	比奈知ダム	青蓮寺ダム	土師ダム
河川名	木津川水系名張川	名張川水系青蓮寺川	江の川
所在地	三重県名張市	三重県名張市	広島県安芸高田市
利用目的	F.N.W.P	F.N.A.W.P	F.N.A.W.I.P
竣工年	1999年	1970年	1974年
経過年数	7年	36年	32年
総貯水容量(千 m^3)	20,800	27,200	47,300
堤高(m)	70.5	82.0	50.0
流域面積(km^2)	75.5	100.0	307.5
年平均堆砂量(千 m^3 /年) ^{*1}	52.9	29.5	55.9
比堆砂量(m^3 /年/ km^2) ^{*1}	700.1	295.4	181.7
流域地質	凝灰岩・花崗岩・砂岩	凝灰岩・片麻岩類	花崗岩・流紋岩・砂岩
河川勾配			
(ダム上流10km平均)	1/90	1/90	1/270
(ダム下流8~20km平均)	1/170	1/210	1/400
平均年最大流量 ^{*2}			
(流入量)	250	275	445
(m^3/s)	184	189	258
平均年平水流量 ^{*2}			
(流入量)	1.6	1.7	8.2
(m^3/s)	1.6	1.9	8.0
年最大放流量/年最大流入量 ^{*3,*4}	0.65	0.72	0.62
平滑化指数(日) ^{*4}	38	49	~4

※1) 堆砂量の対象年は、各ダム竣工年から平成17年の間。

※2) 流量の対象年は、H7~H16(10年間)。ただし、比奈知ダムは、H12~H16。

※3) 各年の[年最大放流量/年最大流入量]の平均値(瞬間値)。

※4) 1年間の日流量(流入量、放流量)のうち10日間移動平均値との乖離率が10%以内となる日数を求め、放流量に対する日数から流入量の日数を差し引いた日数¹²⁾。

概ね大きいほど流量が平滑化される傾向にある。

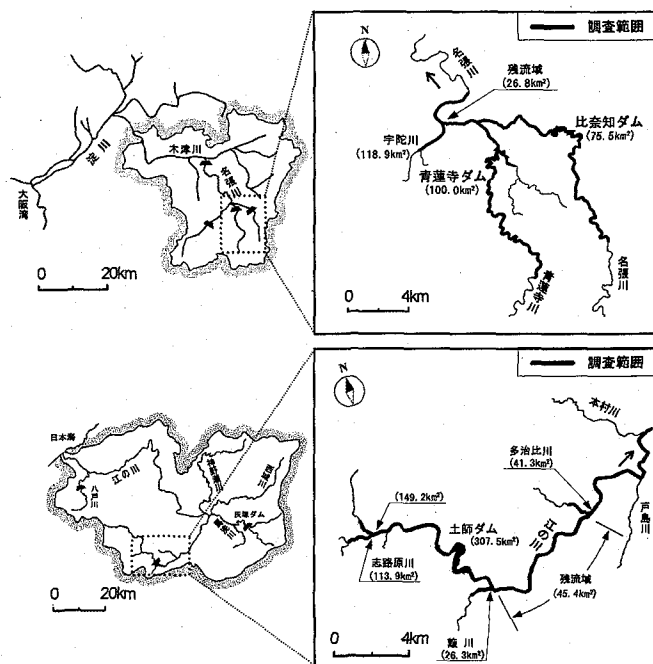


図-1 調査対象ダム位置図

多治比川を対象とした(図-1)。

調査地点の設定は、検討対象区間の河床材料の全体的な傾向の把握に十分な量のサンプリングを行うため、河川の縦断方向に概ね200mピッチとした。河川横断方向には、水域、陸域のそれぞれで行った(詳細は次項)。

(3) 調査時期

調査は、非洪水期間中の2006年2月~4月、11月~12月の2回実施した。比奈知ダムと土師ダムについて、2006年1月~2007年1月のダム流入量、放流量(時間流量)と近傍地点の日降雨量を図-2に示す。

1回目調査時の流量は、3ダムともに豊水流量程度であり、2回目調査時は名張川水系が平水から低水流量程度、江の川水系は低水流量程度であった。なお、江の川水系

では、9月中旬に土師ダムの平均年最大流量（放流）と同程度の出水があった。一方、名張川水系では、対象期間中の出水はいずれも平均年最大流量を大きく下回っていた。

(4) 調査方法

a) 河床材料

河床材料調査は、表面を対象とし、面積格子法または線格子法により¹¹⁾、水域、陸域のそれぞれで100格子となるよう設定した。

各調査区間での面積格子法、線格子法の選択は、巨石や巨礫が比較的多い名張川、青蓮寺川上流域とダム直下流は線格子法により、格子間隔1mでサンプリングを行い、河床の粒径が比較的小さい名張川下流域および江の川水系は面積格子法により、格子間隔0.25mの1m×1mコドラートを用いた。なお、微細粒子が河床面に不規則に分布している箇所の調査では、サンプリングが偏らないよう、横断方向に等間隔に、水域あるいは陸域全体をカバーするようコドラートを設置した。

b) 水域と陸域の定義とそれぞれの河床材料特性

図-3に示すように、本調査では、「水域」は平水時に水面下となる河床、「陸域」は水面上となる部分とした。

本調査による各ダム上下流代表地点の水域、陸域の粒径分布の一例を図-4に示す。粒径分布の全体的な傾向は、2mm以下の砂と30~100mm以上の礫の材料の二峰性を示している。水域では、後者の粗い材料が主で、前者は礫の隙間に入り込んでいる程度に存在する。一方、陸域は、前者が卓越し、表面のほとんどが砂で覆われている。また、陸域はツルヨシなどの植生に覆われており、砂は植生によりトラップされていると考えられる。この二峰性を示す粒径の差が大きいことも踏まえ、ここでは、前者を材料sあるいはt、後者を材料mとして考える。

ここで、材料mは、洪水の影響を全面的に受け止め、安定的に存在し、低い河床領域にある最も粗い粒径の集団、材料sは、材料mが存在する場所の両脇の高い河床部分にあり、浮遊してきた土砂を堆積させることで形成され、材料mの平均粒径よりも2オーダー以上細かい材料からなる集団、材料tは、平水時に水面下となる河床部分の一部に存在し、材料mの上に乗った材料で、一時的で不安定なことが多く、粒径がs程度あるいはさらに細かい材料の集団、と定義される¹²⁾。

図-5は、3ダムの調査結果を踏まえ、材料mの粒径を400mm、材料s or tの粒径を1.4mmに代表させて、それぞれの摩擦速度 u_* と u_*/w_0 (w_0 : 沈降速度)との関係を示したものである。ここで細線は無次元限界掃流力 $\tau_{*c} < 0.05$ の領域である。この図から、2つの粒径がこれだけ異なると、材料mが動き出すときには材料s or tは浮遊が非常に卓越し、両者の流砂形態が大きく異なることがわかる。このような2つの粒径は挙動の違いが大きすぎて有意には混合しないので、分けて扱うことが合理的である。

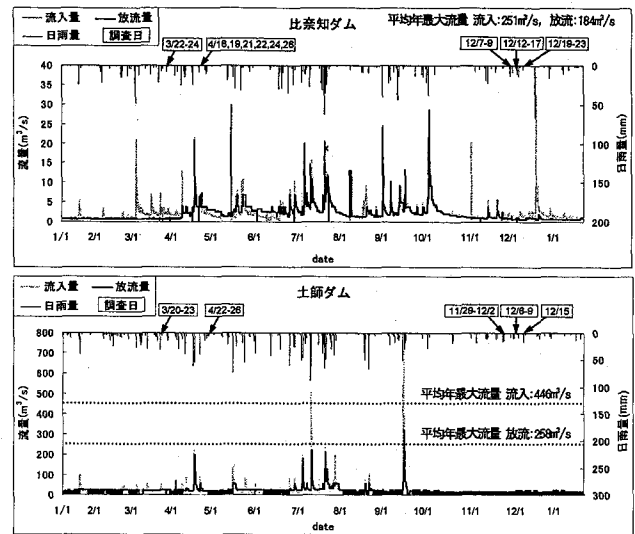


図-2 比奈知ダム・土師ダムの流入量・放流量・雨量変化図

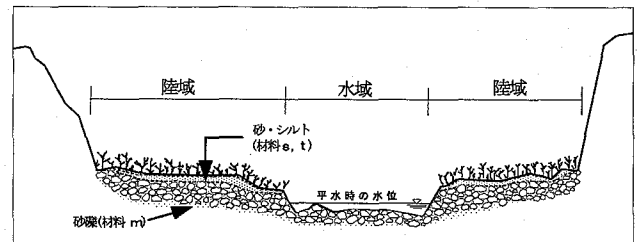


図-3 水域と陸域の説明 (横断面図)

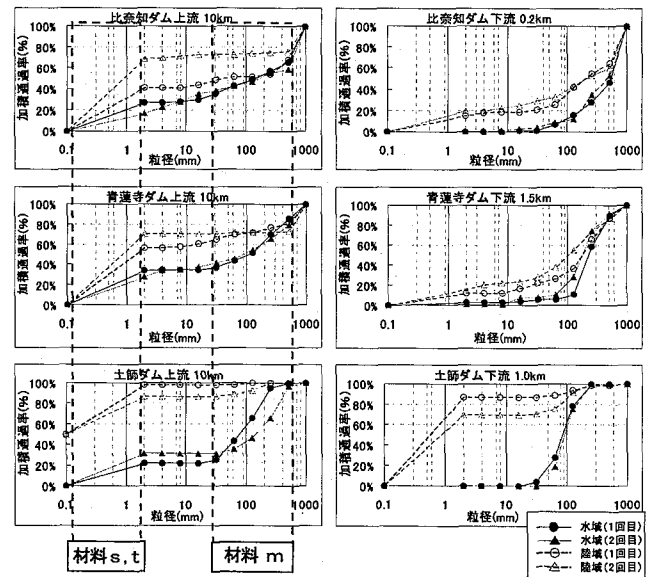


図-4 ダム上下流代表地点の粒径分布

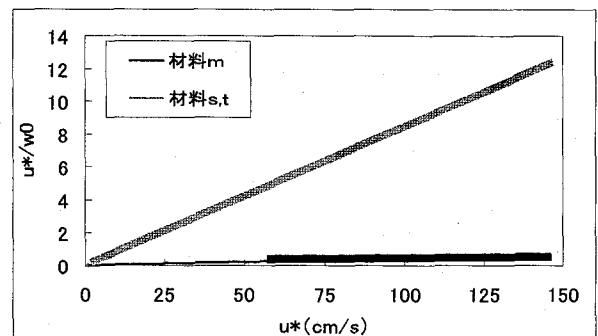


図-5 u_* と u_*/w_0 の関係図

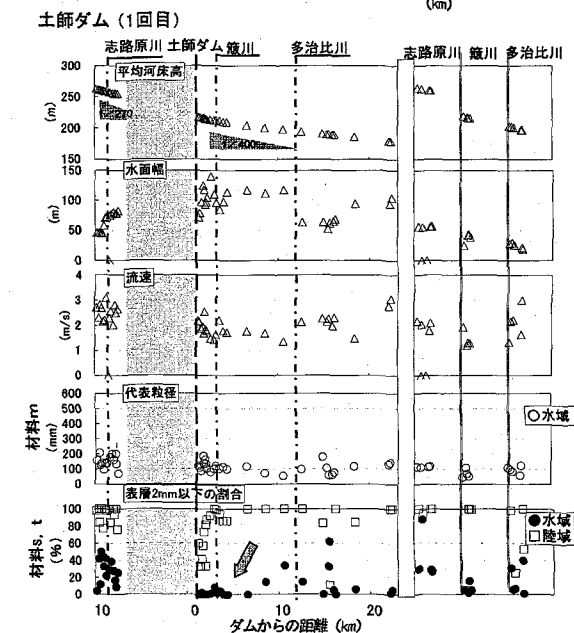
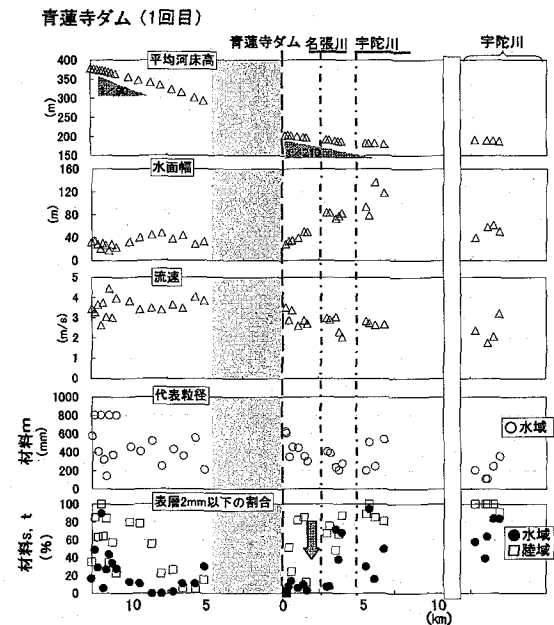
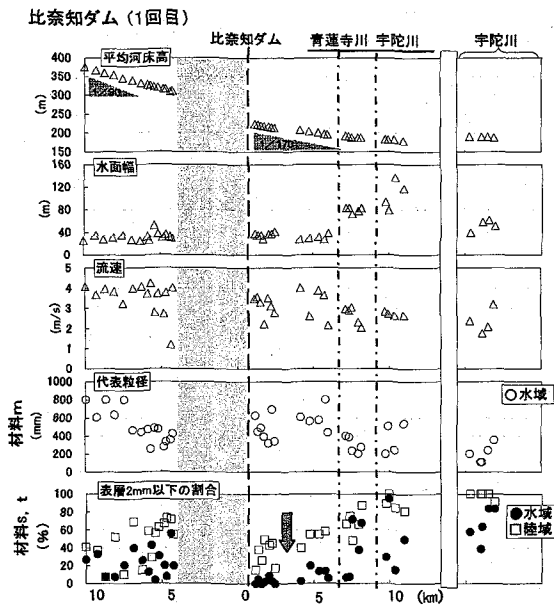


図-6 各ダムの水理量と河床材料の縦断変化 (1回目調査)

なお、これら陸域の材料sと水域の材料tは同じ起源である。こうした材料の特性を踏まえ、以降の分析では、①水域か、陸域か、②材料s or tか、材料mか、を分けて議論を進める。

c) 横断河床形状

対象区間の横断的な河床形状を把握するため、1回目調査と同時期の2006年2月～3月に、河床材料調査と同じ地点において横断測量調査を実施した。

3. 調査結果

(1) 水理量の縦断変化特性

ダム上下流の河床勾配や流速、川幅等の水理特性を把握するため、一次元不等流計算を行った。対象流量は、平成7年から平成16年までの10年間の平均年最大流量である。各地点の平均河床高、水面幅、平均流速の縦断変化をダムごとに図-6に示す。

各ダム上下流の河床勾配は、比奈知ダム1/90～1/170、青蓮寺ダム1/90～1/210、土師ダム1/270～1/400程度で、全般的に、ダム下流からやや緩い勾配となっている。水面幅、平均流速は、各水系ともに、上下流でほぼ同程度か、ダム下流で水面幅がやや広く、平均流速が若干小さくなっている。

(2) 河床材料の縦断変化特性

各ダム上下流の調査結果から、前項で説明した、①水域と陸域、②材料s or t (2mm以下の砂)と材料m (30～100mm以上の主材料)のそれぞれについて、河床材料の縦断変化の特性を整理した。図-6に、各ダムの1回目の調査結果による材料mの代表粒径と、材料s or tの河床表面での存在割合の縦断分布を、前述した水理量と合わせて示す。また、図-7に、江の川水系の2回目 (出水期後)の調査結果を同様に示す。

a) 名張川水系 (比奈知ダム、青蓮寺ダム)

水域について：材料mは、ダム上下流ともに100～800mm程度の粒径であり、大きな違いはない。材料tは、ダム上流域が20%程度の存在量であるのに対して、ダム直下流ではほとんどなく、明らかに少なくなっている (図中の矢印)。ダム直下流で減少した材料tは、下流

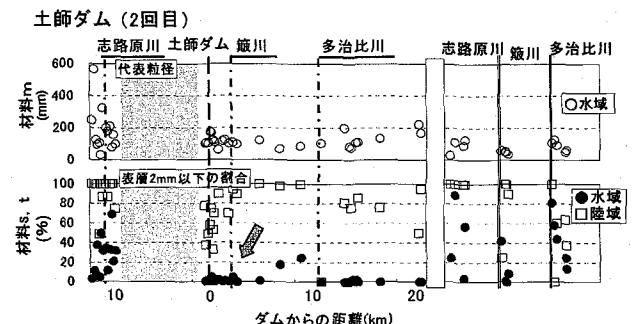


図-7 土師ダムの河床材料の縦断変化 (2回目調査)

の名張川と青蓮寺川の合流後では40～60%程度、下流支川の宇陀川の合流後は50%程度となる。これは、出水期後の2回目の調査においても同様な傾向にあった。

陸域について：材料mは、ダム上下流ともに、表層部は植生と砂層で覆われており、ほとんど存在しない。材料sは、ダム上下流で大きく変わらず50%以上を占める。

b) 江の川水系（土師ダム）

水域について：材料mは、ダム上下流ともに30～200mm程度の粒径であり、大きな違いはない。材料tは、ダム上流域が30%程度の存在量に対して、ダム直下流ではほとんどなく、急激に減少している（図中の矢印）。これは、出水期後の2回目調査でも同じ傾向にあった。ダム直下流で減少した材料tは、ダムから約2km下流の簸川合流後5～10kmにかけて回復するが、ダムから約12km下流の多治比川合流後では、1回目と2回目の調査結果に違いがある。1回目では、多治比川合流後、材料tの存在割合が回復している地点もあるが、2回目では、ダム直下と同様、材料tはほとんど存在していない。

陸域について：材料mは、名張川水系と同様、植生や細粒材料で覆われ、ほとんど存在しない。材料sは、ダム直下流1kmの区間は少ないが、ダム上下流の全体的にはほとんど変わらず、陸域の90%以上を占めている。

c) まとめ

各ダム上下流の河床材料の縦断変化特性は、3ダムとも同様な傾向となり、これらの結果を表-2にまとめた。

表-2 ダム上下流での河床材料の変化特性

	水 域	陸 域
m	大きな変化なし	そもそも表面にあまりなし
s or t	材料t： ダム直下流で減少し、その後、回復する	材料s： ダム下流で大きな変化なし

4. 考察

(1) ダム上下流で水域の材料mに大きな違いがない理由について

河床の主モードを形成する材料mは、ダム上下流でほとんど変化がなかった。表-3に、各ダム上下流の材料mの代表粒径と不等流計算による平均年最大流量時の摩擦速度から算定した無次元掃流力 τ_* を示す。なお、ダム下流の τ_* は、ダムがある場合（放流量）とダムがない場合（流入量）のそれぞれについて求めた。

この結果、調査対象とした3ダム下流の τ_* は、ダムあり、ダムなしのいずれの場合も0.05以下と小さくなっており、対象ダムの下流は、もともと安定した河床形態にあると考えられ、ダムの供用に伴う流量変化や砂礫の供給が遮断された場合においても、ダム下流の材料mの挙動に影響することはなく、河床形態が変わる可能性は

表-3 各ダム上下流の τ_* （平均年最大流量時）

	上流	下流	
		ダムあり	ダムなし
比奈知ダム	0.07	0.03	0.04
青蓮寺ダム	0.09	0.02	0.03
土師ダム	0.05	0.04	0.05

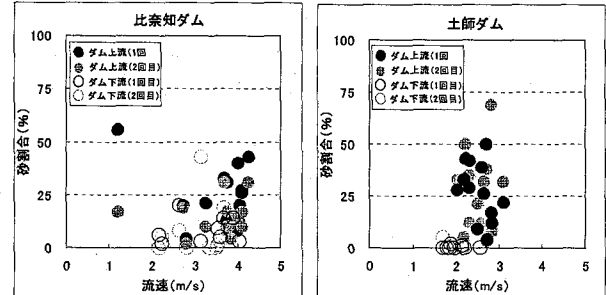


図-8 材料tの存在割合と流速との関係図

小さいと判断される。

(2) ダム直下流の水域での材料tの激減と回復について

水域の材料tは、ダム直下流で表面存在割合がほとんどなく、ダム上流に対して激減していた。全調査地点について、材料tの表面存在割合と流速との関係を図-8に示した。なお、ダム下流のデータは、支川の影響を排除するため、ダム直下から支川合流前までの本川区間に限定した。

この図から、平均年最大流量時の流速と砂の表面存在割合には、ほとんど相関がないが、比奈知ダムの場合にはむしろ流速の増大によって表面存在割合が増大する傾向さえあることがわかる。これに対して、ダム上流（塗りのある丸印）と下流（白丸）によって、明らかに砂の表面存在割合が異なる。以上から、ダムの上流か下流かの違いが砂の表面存在割合を説明する力は、水理量の違いよりもずっと大きい、すなわちダムの存在が下流の砂の表面存在割合を有意に小さくしていると判断できる。

このことは、水域の材料tである砂の出水中のフラックスと河床表面に存在する砂の割合との間に正の相関があり、ダムで砂フラックスが遮断されるので、下流の砂の表面存在割合も激減するという仮説につながる。

また材料tは、ダムから4～10km程度下流で、表面存在割合が急速に回復する。そこで図-9に、ダム下流各地点の材料tの存在割合（各ダム上流の材料tの表面存在割合の平均値で基準化）と残流域面積（ダム流域面積で基準化）の下流に向けての回復状況を比較したものを示す。この図から、砂の割合も残流域面積も下流に向けて同じように増えていくこと、しかし、後者より前者がかなり早いことがわかる。たとえば比奈知ダムでは、面積比が1以上になるのはダム直下から約8km下流の宇陀川合流後であるのに対して、砂割合比は4km程度下流で1程度、7km下流では3以上となっている。土師ダムについても、

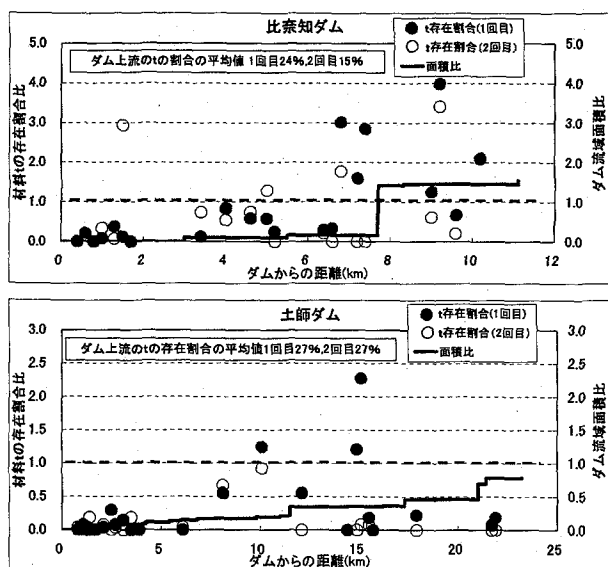


図-9 材料tの存在割合とダム流域面積比との関係図

面積比が1以上となるのはダムから約28kmの地点に対して、材料tはダムから約10kmまでに1に回復している。

こうした傾向まで上記の仮説で説明できるか、あるいはさらに多くの要因、たとえば、支川からの砂供給能力の大小、支川と本川との砂流送のタイミングのズレなどを考えるべきかなどは今後の研究課題の1つと言えよう。

5. まとめ

本研究により、ダム上下流で水理条件がほぼ同様な河道状況を持つ、比奈知ダム、青蓮寺ダム、土師ダムの上下流において河床材料の比較を行った結果、次のような結論が得られた。

- (1) 河床を構成する主材料m(礫)は、水域、陸域によらず、ダム上下流で大きな違いがないのに対し、水域の材料t(砂)の表面存在割合はダム直下流で小さい。
- (2) ダム下流の水域での材料t(砂)の表面存在割合の減少は局所的水理量の違いでは説明できず、ダムによる砂フラックス遮断のためと判断できる。
- (3) この材料tの表面存在割合の減少は、ダムから4～10km程度下流で急速に回復する。
- (4) この回復は、残流域(流域面積-ダム集水面積)の増加割合よりも早い。
- (5) 陸域での材料s(砂)の表面存在割合は、ダム上下流でほとんど変わらない。

最後に今後の課題や展開について述べる。

ダム貯水池が下流河道の自然環境に与える影響について理解を深めるには、生物だけでなく、河床材料変化を代表とする物理環境変化についても、一般的な捉え方にとどまるのではなく、日本のダムが置かれた河道・水系について、より実態に則した現象把握と分析が必要と考えられる。本研究で一部明らかになったように、ダム下流の河床材料変化は、水域・陸域や材料の種別

(m, s, t)によって、その特性が大きく異なる場合がある。その違いは、生物への影響の違いにも関係してくる可能性がある。

したがって、粗粒化についても、環境変化を検討すべき実河川での変化パターンの全体像を体系的に掴み、その上で生物とのかかわりを調べていくことが求められる。工学的予測手法についても、従来積み上げられてきた知見が適用可能な範囲と高度化が必要な部分を特定することが重要と考えられる。これについては、本研究で得た知見の範囲で考えると、1)礫床上での材料s or tの挙動の機構解明とモデル化、2)上記について、支川の存在、流量と砂供給の非定常性やタイミングのズレがもたらす影響の解明、3)通常行われる混合粒径の河床変動計算の材料m変化予測への適用性の確認、4)陸域の材料sの堆積や植生生育に関する既往予測技術^{例えば13)}の適用性検討などがあげられる。

謝辞：国土交通省木津川上流河川事務所、三次河川国道事務所、土師ダム管理所および独立行政法人水資源機構木津川ダム総合管理所からデータ提供をいただきました。ここに記し、謝意を表します。

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：ダムが河川の底生生物に与える影響、応用生態工学、Vol.2, No.2, pp.153-164, 1999.
- 3) 波多野圭亮、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.
- 4) 竹門康弘：貯水ダム下流の生態系影響とその伝播距離、土木学会水工学委員会環境水理部会シンポジウム要旨集、2006.
- 5) 平野宗夫：Armoringをともし河床低下について、土木学会論文集、第195号B, pp.55-65, 1971.
- 6) 芦田和男、道上正規：混合砂礫の流砂量と河床変動に関する研究、京都大学防災研究所年報、第14号B-2, pp.259-273, 1971.
- 7) 辻本哲郎、本橋健：混合砂礫床の粗粒化について、土木学会論文集、第417号II-13, pp.91-98, 1990.
- 8) 山本晃一：構造沖積河川学、山海堂、pp.396-398, 2004.
- 9) 時岡利和、傳田正利、天野邦彦：過去の空中写真を利用したダム下流河床変動および粗粒化の把握、河川技術論文集、第12巻, pp.235-240, 2006.
- 10) 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.
- 11) 山本晃一：急流河川の河床材料調査法と表面粒度組成、土木研究所報告、第147号, pp.1-20, 1976.
- 12) 藤田光一：河床材料の見方、土木技術資料、第40巻12号, pp.14-15, 1998.
- 13) 井上優、大沼克弘、藤田光一：流水と土砂の作用による立地条件変化に着目した植生消長の簡易計算手法の開発、河川技術論文集、第12巻, pp.31-23, 2006.

(2007.4.5受付)