

# 山地河道のダム下流における 河床露盤化と河床材料特性

## BEDROCK EXPOSURE AND GRAIN PROPERTIES AT THE DOWNSTREAM OF A SMALL DAM IN A MOUNTAIN STREAM

小林草平<sup>1</sup>・中西哲<sup>2</sup>・藤原正季<sup>3</sup>・矢島良紀<sup>4</sup>・赤松史一<sup>5</sup>・天野邦彦<sup>6</sup>  
Sohei KOBAYASHI, Satoru NAKANISHI, Masaki FUJIWARA, Yoshinori YAJIMA,  
Fumikazu AKAMATSU, Kunihiko AMANO

<sup>1</sup>非会員 農博(独) 土木研究所 河川生態チーム (〒305-8516つくば市南原1-6)

<sup>2</sup>正会員 工修(独) 土木研究所 河川生態チーム (同上)

<sup>3</sup>正会員 工修(株) ウエスコ兵庫支社 環境調査課 (〒651-0092神戸市中央区生田町2-2-2)

<sup>4</sup>非会員 理修(独) 土木研究所 河川生態チーム (〒305-8516つくば市南原1-6)

<sup>5</sup>非会員 理博(独) 土木研究所 河川生態チーム (同上)

<sup>6</sup>正会員 工博 国土交通省国土技術政策総合研究所 河川環境研究室 室長 (〒305-0804つくば市旭1)

We investigated bedrock exposure and grain size properties at downstream and upstream sections of a small dam in mountain segments of Kinu river, Tochigi Prefecture. Total length of exposed bedrock in channels was 37% in the downstream section, whereas no exposed bedrock in the upstream section. Two kinds of survey (pool-riffle scale descriptions of main material, line-grid-measurements of grain size) both revealed that in the downstream section middle-sized stones (from 128 mm to 512 mm) were largely depleted and size distribution was bimodal. Smaller stones (<64 mm) appear to be mainly passed through the dam, and larger stones (>514 mm) are likely to be remained in the channel after the past storm events. Middle-sized stones are essential components of habitat of benthic organisms, and their depletion may reduce retention of smaller stones and accelerate bedrock exposure in the channel.

**Key Words :** *mountain stream, dam, bedrock exposure, bed materials, cobbles, boulders, selective transport*

### 1. はじめに

栃木県日光市をながれる鬼怒川上流の、川治ダムと川俣ダムに挟まれた約15km区間の中程に、大正元年

(1912年)に建設された黒部ダムという発電用の小規模ダムがある。この黒部ダムを境界に上下流で河川の景観が大きく異なっている；上流区間は、川俣ダムの下流に位置はするものの、支川の合流により河床には土砂が豊富に存在し、大きな交互砂州が発達している一方で、下流区間では、岩盤が露出した河床が至るところに見られ、また砂州は小規模なものに限られている。岩盤露出の原因として、黒部ダムによる土砂停滞が真っ先に考えられやすい。しかし、黒部ダムでは遅くとも昭和初期には満砂し、出水時にはダムゲートが開放され土砂が通過すること、ダム下流区間には礫が不安定に堆積した(最近堆積したと思われる)小規模砂州が多数見られること、さらに下流に位置する川治ダムでは年間平均200千m<sup>3</sup>の堆

砂量(その6割以上が砂礫<sup>1)</sup>)があることから、黒部ダムで大きく土砂停滞していることは考えにくい。

河床土砂量の低下や岩盤露出は、ダムを上流に持つ多くの山地河道で生じうる問題と考えられる。河床の土砂量が減少し岩盤箇所が増加すると、砂州の礫構造が保つ水や有機物の滞留機能が低下し、水生昆虫を始めとする底生動物や魚類の生息場や産卵場が劣化するなど、河川生態系に負の影響を招くことが大いに予想される。しかしながら、岩盤露出に至る過程、生態系への影響に関する知見は少なく、岩盤河床の今後の行方や、岩盤露出の進行に対する制御・対処方法はこれまでほとんど検討されていない。

ダム下流で岩盤が露出する原因の1つとして、土砂が上流から供給されても滞留せずに通過しやすい河道特性や河床材料特性を持つことが考えられる。例えば、巨石は、流体場における抵抗・粗度要因としてはたつき、河床の安定性や土砂の滞留に重要な役割を持つと考えられており<sup>2)</sup>、こうした要素の欠落は土砂滞留の低下を招き

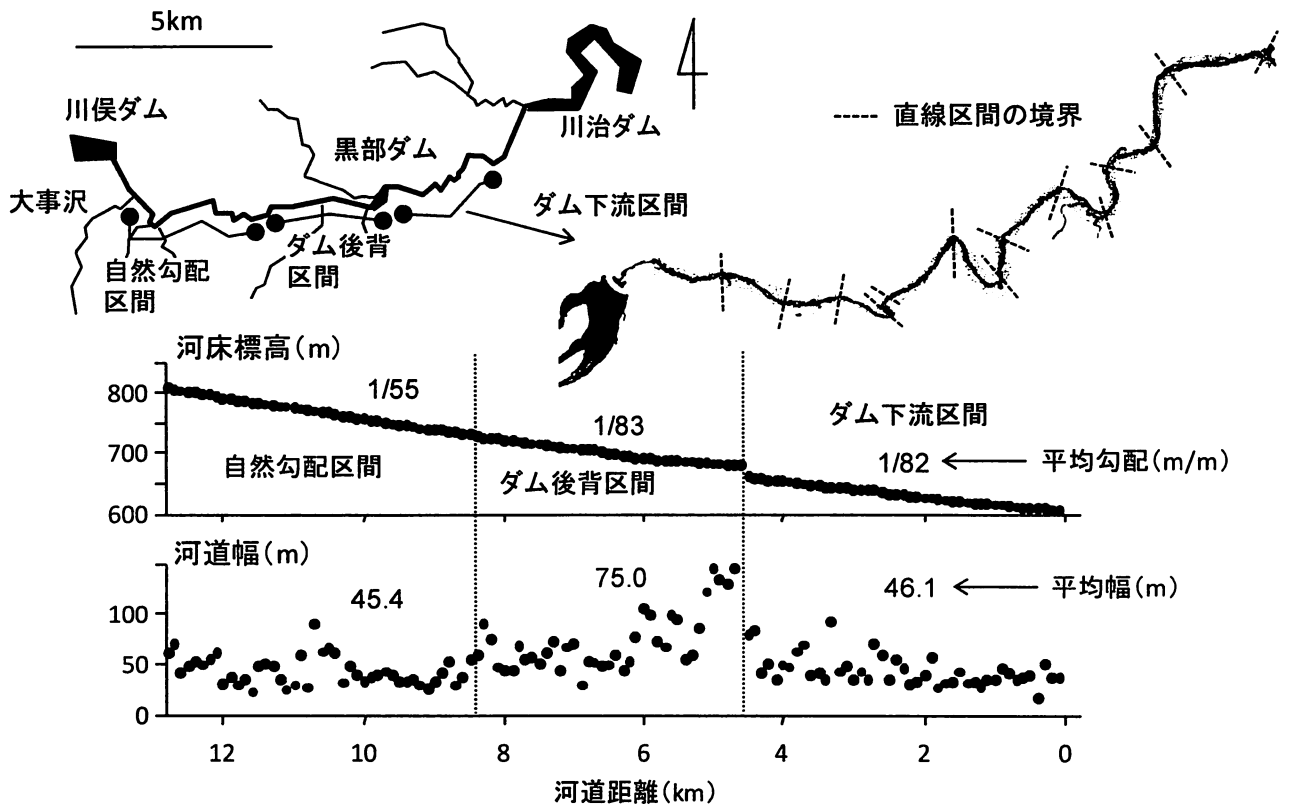


図-1 黒部ダム上下流の3区間、ダム下流区間の直線区間の分割、河床標高と河道幅

うる。岩盤露出の原因や過程を理解する上で、河道特性や河床材料特性を把握することは重要である。

鬼怒川黒部ダム下流における岩盤露出の機構とその影響について理解を深めるため、本研究ではダム上下流の比較をもとに、ダム下流における岩盤の露出度、露出箇所の特徴、河床礫の粒径特性を明らかにする。

## 2. 調査地と調査手法

### (1) 調査地概要

黒部ダムは鬼怒川本川の北緯36度52分、東経139度36分、標高665m付近に位置する。上流の川俣ダム堤体まで約11km、また下流の川治ダムの湛水域まで約5kmの河道区間がある(図-1)。黒部ダムは1912年に水力発電用に作られた国内初のコンクリート式ダムで(東京電力管理)、平水時の流量は制御されているが(0.17m<sup>3</sup>/sの維持流量)洪水を制御する機能はない。小規模であるこのダムでは(堤高:28.7m、湛水面積:8.0ha、総貯水容量:236千m<sup>3</sup>)土砂が満砂またはそれに近い状態で、航空写真からこの状態は遅くとも1940年代から続いていることが分かっている。

上流の川俣ダムは、1966年完成の洪水調節、農業用水供給、発電用のダムである(堤高:117m、総貯水容量:87,600千m<sup>3</sup>)。洪水時の放流量は最大350m<sup>3</sup>/sに抑えられている。ダム直下流は、細かい砂礫が欠落し粗礫化

が激しいが<sup>3)</sup>、下流3km付近における大事沢(おおごとさわ)の合流後は豊富に土砂が見られる。大事沢合流地点から300m下流には1983年建設の瀬戸合砂防堰堤があるが、既に満砂状態である。比較的大きな支川は他にもあるが、本川の土砂供給源としての働きは比較的小さいとみられる。

一方、黒部ダムから下流の川治ダムに至るまでには大きな支川はない。したがって、川治ダムは年間で7-665千m<sup>3</sup>(平均:213千)の流入土砂があるが、そのほとんどは黒部ダムを通過してきた土砂と考えられる。

本研究では本川を下流から、①ダム下流区間、②ダム後背区間、③自然勾配区間に区分した(図-1)。ダム下流区間は、川治ダム湛水域2km上流から黒部ダム付近までの約4.5km区間である。ダム後背区間は、黒部ダムの土砂堆砂により河床上昇がみられ河道幅の広い約3.8km区間である。自然勾配区間は、ダム堆砂による河床上昇が及んでない約4.1km区間である。ダム後背区間の特にダム直上1.5kmで特に河床勾配が小さく河道幅が大きい(図-1)。自然勾配区間では河床勾配は下流2区間よりやや大きい、河道幅はダム下流区間とほぼ同じである。

### (2) 瀬淵単位の河床主材料調査

2008年7月から10月の平水時に、3区間において瀬淵を単位とした河床主材料の調査を行った。この調査は、瀬淵スケールで変化する河床材料の空間的変異を踏まえて3区間の河床材料を把握し、また区間内での岩盤の位置

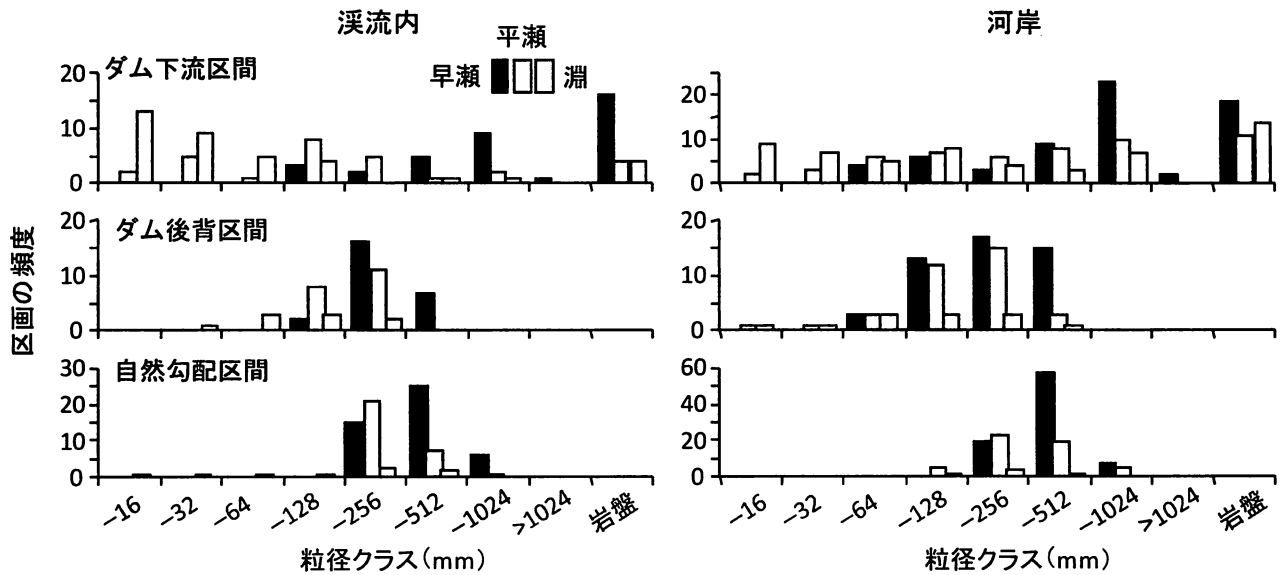


図-2 瀬淵単位の河床主材料の頻度分布

を把握することを目的に行った。

河川内を下流から順々に早瀬（水面勾配が大きく、水面に白波が立つ流れ、比較的浅い）、平瀬（白波は立たないが波立つ流れ）、淵（水面勾配と水面の波立ちがほとんどない、比較的深い）に視覚的に区画分けした。各区画の位置はレーザー距離計とデジタルコンパス（レーザーテクノロジー社製Impulse200、MapStar、測定誤差：<0.05m）を用いて測量し、これをもとに各区画の長さおよび傾斜を求めた。

各区画において流心、右岸、左岸の河床主材料を特定した。ここで主材料とは河床表面の骨格をなす礫で、各区画において半径5mを見渡し、大きい粒径群に含まれる礫を適当に3-5個選び、それぞれ中径を測定し、それらの平均値を各区画の代表値とした。ただし、まばらに存在する（河床表面の数%程度の）最大級の礫は除外した。また区画内でもなお河床材料の空間的変異が大きい場合は（淵でそのような傾向にある）、区画内で面積的に最も優占する河床材料がみられる位置で測定した。

### (3) 50m区単位の線格子法による粒径分布調査

2008年12月の平水時に、河川縦断方向50mを調査単位とした線格子法による粒径分布の調査を行った。ダム下流区間で14、ダム後背区間で13、自然勾配区間で12の調査区を設定した。50m調査区を2つから3つ連続的に並べて1つの瀬淵の範囲をカバーするようにした。この2-3の50m調査区からなるセットは、各区間においてなるべく間隔が均等になるように配置した。

各調査区では兩岸の水際に50mロープを張り、1mおきにロープ真下にある礫を拾い上げ、合計で100の礫の中径を測定した（mm単位、2mm以下の砂は2mmと記録）。ロープの真下が岩盤や前測定と同一の巨礫にあたった場合、測定を1m先にずらした。動かすことのできない礫

は、見える範囲での中径を記録した。

(2)の河床主材料の調査手法は、限られた時間のなかで、長い河道区間をカバーできることが利点であるが、礫の選定に主観が入りやすいことが問題点である。一方、線格子法はランダムな標本抽出であるため粒径調査で推奨されているが<sup>4)</sup>、全区間をカバーするには多くの時間を要する。本研究では、2つの調査手法の利点を活かして区間全体の粒径特性を把握する。河床主材料の手法と線格子法で得られた粒径値の比較を行い、河床主材料の手法で得られた粒径値の妥当性を検証した。

### (4) 出水時の可動礫サイズの推定

可動礫サイズを推定するために必要な流れの抵抗則には、山地河道での有効性が示されているHeyの式<sup>5)</sup>を採用した。計算の簡便化のため、長谷川<sup>6)</sup>と同様に以下の指数近似を行っている。

$$\frac{U}{\sqrt{gRl_e}} = 6.5 \left( \frac{R}{3.5d_{84}} \right)^{\frac{1}{4}}$$

ここで、 $U$ は断面平均流速(m/s)、 $R$ は径深(m)、 $d_{84}$ は84%粒径(m)、 $l_e$ はエネルギー勾配、 $g$ は重力加速度。

出水時に動きうる礫サイズは、岩垣の公式を用いて計算した。

$$U_{*c}^2 = 80.9d$$

ここで $U_{*c}$ は摩擦速度(m/s)、 $d$ は粒径(m)である。

100m区ごとに、河床勾配と河道幅（図-1）からHeyの式より摩擦速度を算定し、岩垣式に代入し最大の可動礫サイズを推定した。流量は川治ダム1984-2006のデータに基づき、1000m<sup>3</sup>/s（回帰年8-10）、500m<sup>3</sup>/s（回帰年4-5）、200m<sup>3</sup>/s（回帰年1-2）の3つを用いた。

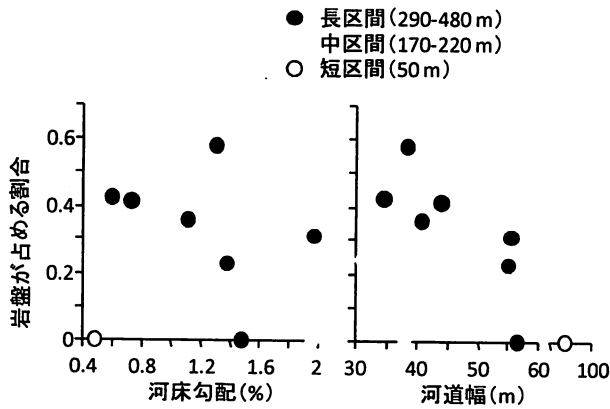


図-3 直線区間の河床勾配、河道幅と岩盤の割合の関係

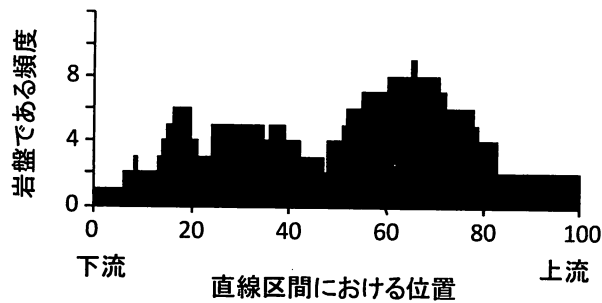


図-4 直線区間の中の位置と岩盤露出の頻度

### 3. 結果

#### (1) 瀬淵単位の河床主材料

ダム下流区間では36早瀬、28平瀬、37淵、ダム後背区間では25早瀬、19平瀬、9淵、自然勾配区間では46早瀬、29平瀬、9淵が特定された。ダム下流区間では上流2区間に比べて、淵の頻度が多い。

図-2に溪流内・河岸別に、早瀬・平瀬・淵の主材料の粒径頻度を示す。溪流内の全頻度は調べた区画数で、河岸の全頻度はその2倍(右岸、左岸)である。3区間とも早瀬、平瀬、淵の順に粒径は大きかった。ダム下流区間では溪流内と河岸の両方において、早瀬で512-1024mmの頻度が高いこと、平瀬や淵で<64mmの頻度が高いことが特徴である。ダム後背区間の早瀬と平瀬は64-256mmに、自然勾配区間の早瀬と平瀬は128-512mmに分布が集中した。

#### (2) 岩盤が露出している箇所の特徴

ダム下流区間において、溪流内または両岸が岩盤である区画の総距離は、区間全体の37%であった。溪流内では岩盤の頻度が高いのは早瀬であるが、河岸では平瀬や淵でも岩盤の頻度が高かった(図-2)。ダム下流区間では長い平瀬や淵が多く、区画の頻度と長さを加味すると、全岩盤の36%は早瀬、27%は平瀬、37%は淵であった。

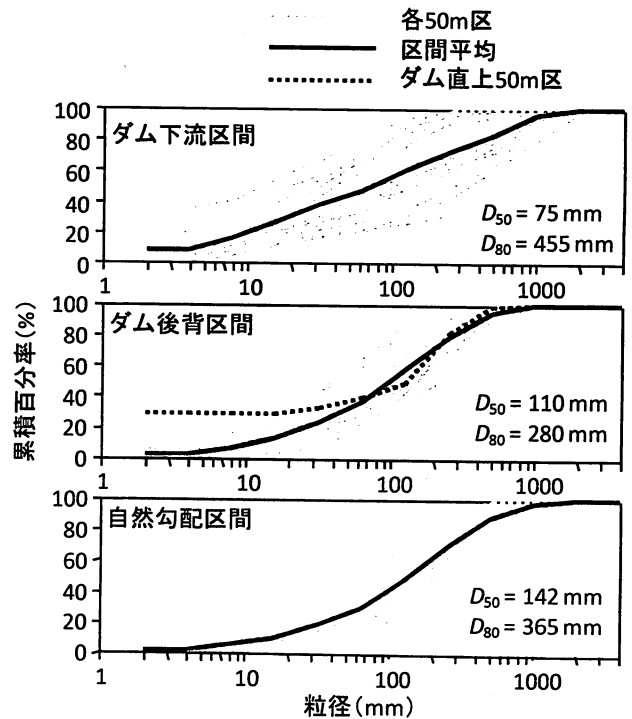


図-5 3区間における粒度分布

ダム後背区間と自然勾配区間では、岩盤の区画はなかった。

ダム下流区間を、河道の迂曲点を境界に14の直線区間に分け(図-1)、各直線区間において岩盤である区画の長さの割合を求めたところ、区間によって0-70%のばらつきがあった。図-3に直線区間の河床勾配または河道幅と岩盤割合の関係を示す(直線区間により全区間距離が大きく異なるので、短・中・長距離区間に分けている)。河床勾配や河道幅と岩盤割合に、特に明瞭な関係は見られず、勾配が大きくても岩盤が少ない区間は少なかった。

直線区間内における岩盤露出の位置を検討するため、各直線区間において最下流を0、最上流を100とした直線上に、岩盤である区画の位置に頻度を与え、全14直線区間を合計し、直線区間内の岩盤の頻度分布を求めた(図-4)。直線上の16-39と52-79にあたる位置のほとんどで頻度が5以上で、0-13と84-100の位置では頻度が2以下であった。これは直線区間の上下流端付近よりも中程の2箇所を中心に、岩盤が露出していることが多いことを示している。

#### (3) 50m区単位の線格子による粒径分布

3区間における累積粒径曲線を図-5に示す。ダム下流区間では、128mm以下が大部分を占める調査区、2mmから512mmまでほぼ均等に分布する調査区、256mm以上に分布が集中する調査区と、調査区によるばらつきが大きかった。これに対して、ダム後背区間と自然勾配区間では、64-512mmに分布が集中する区間が多かった。

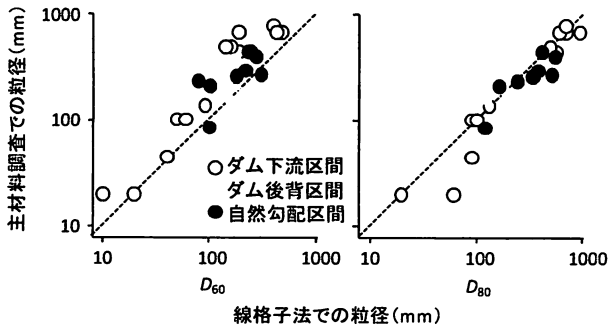


図-6 主材料調査と線格子法の粒径の比較

なお、ダム後背区間におけるダム直上区とは、ダム湛水域上流端に当たる場所で、2mm以下と128-512mmに分布が集中していた。

区間ごとに平均の粒径分布をみると、 $D_{50}$ は上流の区間ほど大きい、 $D_{80}$ はダム下流区間で最も大きかった。ダム下流区間では2mm以下から512mm以上までほぼ均等に分布する一方、ダム後背区間と自然勾配区間では64-512mmの礫が多かった。

#### (4) 2つの調査手法の粒径の対応

50m調査区と位置が対応している瀬淵の区画を抜き出し、主材料調査と線格子法で得られた粒径値の関係を検証した(図-6)。線格子法で得られた $D_{60}$ と主材料を比較すると、比較的強い関係はあるものの、主材料の粒径がより大きい値を示す場合が多かった。 $D_{80}$ と主材料はより強い関係性がみられ、2つの手法で粒径はほぼ同等かもしくは主材料の方がやや小さい値であった。このことは主材料調査で得た粒径は、実際の $D_{60}$ から $D_{80}$ の礫を表し信頼性が高いことを示している。

#### (5) 出水時の可動粒径

出水時に動く最大粒径は自然勾配区間で大きく、ほとんどの100区間で $200\text{m}^3/\text{s}$ (回帰年1-2年)の出水ならば128mm以上、 $1000\text{m}^3/\text{s}$ の出水ならば512mm以上であった(図-7)。これに対して、ダム後背区間では、特にダム直上から1.5kmから下流にかけて可動粒径は大きく低下し、 $1000\text{m}^3/\text{s}$ (回帰年8-10年)の出水であっても可動礫は128mm以下であった。

### 4. 考察

#### (1) ダム下流における岩盤箇所の特徴

黒部ダム下流の4.5km区間では、全体の37%で岩盤が露出していた。岩盤露出はダム下流区間の全域にわたって点在し(上流側に集中しているわけではなく)、直線区間ごとに岩盤の割合は大きく異なった。直線区間の河床勾配や河道幅と岩盤割合に明瞭な関係は見られないことから(図-3)、岩盤の露出のしやすさは単純に河道区

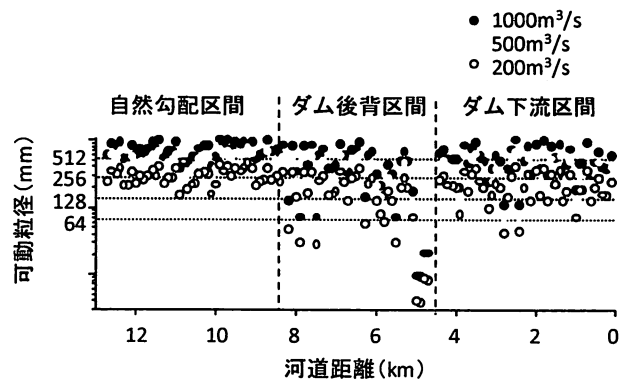


図-7 出水時における可動粒径

間スケールの勾配と幅で決まる水力により左右されているわけではないと考えられる。一方、直線区間において岩盤露出は特定の位置に集中していた。直線区間の上下流端は迂曲点で、出水時に相対的に流れが弱まり土砂が溜まりやすいのに対し、区間中程は流速が増加し岩盤が露出しやすいのは容易に想像される。直線区間の中央付近で岩盤露出がやや少なかったが、直線区間によって流れが側岸にぶつかる位置、また縦断方向に落差が生じている位置であり、河道の迂曲点と同じく、出水時に土砂が滞留しやすい場所であるかもしれない。これは記載的な結果であるが、岩盤上で土砂堆積が可能な場所を考える際に重要な知見と考えられる。岩盤の露出箇所をより理解するには、河道の2次元的な水の流れを、巨石等の粗度要素の空間分布パターンを踏まえ検討する必要がある。

#### (2) ダム下流における河床粒径特性

本研究では2つの粒径調査から、ダム上下流による粒径分布の違いが明らかとなった。ダム下流における河床礫の大きな特徴の1つは、ダム上流で粒径分布の中心である128-512mm(本稿では以降中礫と呼ぶ)が相対的に少なく、128mm以下(以降細砂礫)と512mm以上(以降巨礫)が目立つことである(図-2)。中礫が少ない理由として、黒部ダムで土砂は通過しているものの、その多くは細砂礫であり、大きい礫の多くはダムで停滞していることが考えられる。ダム直上1.5kmの緩い勾配と広い川幅では、10年に一度の大きな出水でも大きな礫が通過しにくいことが示唆された(図-7)。また、ダム直上で砂とともに中礫が多いことも(図-5)、中礫がダム上流で停滞していることを支持している。一方、中礫は細砂礫に比べてダム下流で滞留しにくい可能性も考えられる。中礫がダムを通過するような出水規模の場合、ダム下流に運ばれてもそのまま通過し、水位が下がる時点で動いている細砂礫の方が滞留しやすいことは大いに考えられる。礫の粒径と供給・滞留の問題は、出水中の礫の動きに注目し今後明らかにしていく必要がある。

ダム下流は巨礫が多くみられたが、これらは過去の出

水で運ばれなかった残存礫と思われる。巨礫もダムを通過していないとすると、今後の大規模な出水や巨石の滞留機構（インプリケーション等）の解除によって、ダム下流で巨礫も少なくなる可能性がある。

ダム下流におけるもう1つの特徴は、場所によって粒径分布が大きく異なることである（図-2、7）。これはダム上流では縦断形状が比較的なめらかで早瀬・平瀬が多いのに対して、ダム下流では急勾配の早瀬と緩勾配の淵によって縦断形状の変化が大きく、このことが粒径分布の空間的変異をもたらす1つの理由と考えられる。ダム下流における土砂量の少なさが、地形等を通して粒径分布の空間的不均一性に関与しているものと考えられる。

### (3) ダム下流における河床材料特性の意義

ダム下流において中礫が少ないことは、他の礫の滞留・移動にも影響している可能性がある。例えば、遮蔽物として働いていた中礫がなくなると、それらの間を埋めていた細砂礫の動きが活発化することが考えられる。また、巨礫は大きな粗度要素となり滞留を促すが、中礫が少ない状況では、細砂礫は巨礫の間に詰まらず滞留しにくくなる可能性がある。巨礫の間の礫がなくなるとは、巨礫自体を動きやすくする原因ともなりうる。

河川生態系で重要な役割を果たしている底生生物（付着藻類、水生昆虫、底生魚等）の多さや種構成は河床材料と密接な関係にある<sup>7)</sup>。岩盤では一般的に特定の種類しか生息できず、本調査地でも岩盤における底生動物は特定種が増加する時期を除いて現存量が少ない（未発表データ）。また、小礫や巨礫よりも中礫の瀬において底生動物の現存量や種数が高いことも分かっており（未発表データ）、下流における中礫の減少は底生動物の現存量や多様性の低下を招く可能性は大きい。

一方、粒径の空間的変異に注目した場合、ダム下流はダム上流に比べて多様な環境があると見ることもできる。岩盤が今後さらに増加することは、河床間隙を利用するあらゆる生物の生息場が減少することを意味するが、現時点におけるこうした粒径の空間的変異が生物にどのような意味を持つのか明らかにすることも生態系を考慮した土砂管理を考える上で重要と考える。

## 5. 結論

本研究では瀬淵単位の河床主材料調査と50m調査区単位の線格子法による粒径調査をもとに、黒部ダム下流において以下のことを明らかにした。

1) ダム下流での岩盤露出は約37%で、河道直線区間における特定の位置に岩盤露出は集中していた。

2) ダム上流で粒径分布の中心は中礫（128-512mm）だが、ダム下流では相対的に中礫が少なく、細砂礫（<128mm）と巨礫（>512mm）がより多かった。

3) ダム下流では粒径分布は場所ごとに大きく異なった。本研究の結果は、ダム下流で一般に知られる粗礫化<sup>1)</sup>とは明らかに異なる粒径パターンである。これらは治水用の大きなダムを主に対象としていることを考えると、本研究の結果は、土砂が通過しやすい小規模ダムで生じる現象とも考えられる。山地河道に多数存在する既に満砂状態の砂防堰堤や小ダムの下流において、黒部ダム下流と似たような現象が生じている、または今後生じる可能性がある。

謝辞：土砂・流量のデータ提供や、調査や情報収集にご協力いただいた、中村智幸氏、栗山村漁協、栃木県日光土木事務所、国土交通省日光砂防事務所、国土交通省鬼怒川ダム統合管理事務所、東京電力株式会社の方に感謝の意を表す。この研究は科学研究費補助金（課題名：河川における生息場の形成・維持に働く土砂流出様式の解明）、科学技術振興調整費（課題名：伊勢湾流域圏の自然共生型環境管理技術開発）の助成のもと行われた。

### 参考文献

- 1) 藤田光一、富田陽子、大沼克弘、小路剛志、伊藤嘉奈子、山原康嗣：日本におけるダムと下流河川の物理環境との関係についての整理・分析—ダムと下流河川の自然環境に関する議論の共通基盤づくりの一助として—、国土技術政策総合研究所資料、第445号、pp.1-58、2008。
- 2) 長田健吾、福岡捷二：石礫河川の土砂移動機構に着目した1次元河床変動解析法の開発、水工学論文集、第52巻、pp.625-630、2008。
- 3) 時岡利和、傳田正利、天野邦彦：過去の航空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。
- 4) 山本晃一：急流河川の河床材料調査手法と表面粒度特性、土木研究所報告、第147号、pp.1-20、1974。
- 5) Hey, R. D.: Flow resistance in gravel-bed rivers, J. Hydro. Proc. ASCE, Vol. 105 No. HY4, pp.365-379, 1979。
- 6) 長谷川和義：河川上流域の河道地形、ながれ、第24号、15-26、2005。
- 7) Williams, D. D., Mundy J. E.: substrate size selection by stream invertebrates and the influence of sand, Limnol. Oceanogr., 23 (5), pp.1030-1033, 1978。
- 8) 谷田一三、竹門康弘：ダムが河川の底生動物へ与える影響、応用生態工学、2(2)、pp.153-164、1999。

(2009.4.9受付)