

山地河川における小規模ダムの上流区間の特性による礫移動の違い

MOVEMENT OF BEDLOAD PARTICLES AT UPPER AND LOWER REACHES OF A SMALL DAM IN A MOUNTAIN RIVER

小林草平¹・矢島良紀²・中西哲³・赤松史一⁴・三輪準二⁵・天野邦彦⁶

Sohei KOBAYASHI, Yoshinori YAJIMA, Satoru NAKANISHI,
Fumikazu AKAMATSU, Junji MIWA and Kunihiko AMANO

¹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)

²非会員 理修 (独) 土木研究所 河川生態チーム (同上)

³正会員 工修 (独) 土木研究所 河川生態チーム (同上)

⁴非会員 理博 (独) 土木研究所 河川生態チーム (同上)

⁵正会員 工修 (独) 土木研究所 河川生態チーム (同上)

⁶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 (〒305-0804つくば市旭1)

We investigated bedload transport of marked particles (10cm, 20cm, 30cm) after an annual flood at 5 different reaches in the upper and lower sections of Kurobe dam, in a mountain river, using a radio tracer tracking technique. Marked particles moved more frequently in the lower reaches of the dam, while none was moved at the immediately upper of the dam, where channel was very gentle and wide. The size of transported particles in each reach coincided with the maximum movable size predicted by tractive force from channel gradient, width, and discharge except in cases where huge boulders affected local flow velocity. These results support our previous prediction that transport of particles with >20cm was prevented at immediately upper reach of the dam even during larger floods. Our results also suggest that a large increase in discharge by tributaries at the dam site promote particle transport and expansion of bedrock exposure in the lower reaches of the dam.

Key Words : mountain river, channel characteristics, bedload transport, particle size, radio tracer tracking technique

1. はじめに

河道内の砂礫の減少により、河床の広い範囲で土丹や岩盤が露出している河川は少なくない(例えば、手取川白山合口堰堤の下流、多摩川JR八高線橋梁の下流、石狩川水系真駒内川)。砂礫が減少し岩盤が拵がると、砂礫間の空隙を休息場や産卵場とする多くの底生動物や魚類が減少し、生物多様性が失われることが懸念されており、生態系保全の観点から岩盤区間に砂礫を取り戻す試みが行われている事例もある¹⁾。しかし、岩盤露出が拵がるプロセスの詳細は明らかでなく、岩盤露出に対する有効な策は確立していない。

著者らは、栃木県日光市を流れる鬼怒川上流の河川区間で、河床の砂礫が減少するプロセスと底生動物に及ぼす影響について研究を行っている²⁾。対象地には1912年に竣工した堤高28.7mの黒部ダムがある。同ダムは古く

から満砂状態で、ダムを通過する土砂量は多いとみられるが、近年、ダム下流では河床における岩盤の露出箇所が増加している。著者らは、黒部ダム下流で中礫(ここでは中径10-40cmの礫を指す)の割合が、ダム上流に比べて少ないことを明らかにし²⁾、これらがダム直上で停滞している可能性を示した。また、こうした中礫の減少が、それらの間を埋めていた細砂礫の動きを活発化させ、岩盤露出の拡大を加速させていることが考えられた。

黒部ダム下流における岩盤露出、また中礫の減少について理解を深めるには、ダム上下流区間における礫動態を把握することが不可欠である。特に、出水時にダムを通過して下流へ供給される礫の大きさや量、その供給に対してダム下流から流出する割合を知る必要がある。本研究では、河道特性と移動する礫の大きさの関係を明らかにすることを目的とし、ダム上下流の異なる河道特性の区間において、特に10cm, 20cm, 30cmの礫について、移動の起こりやすさと、移動距離に関する調査を

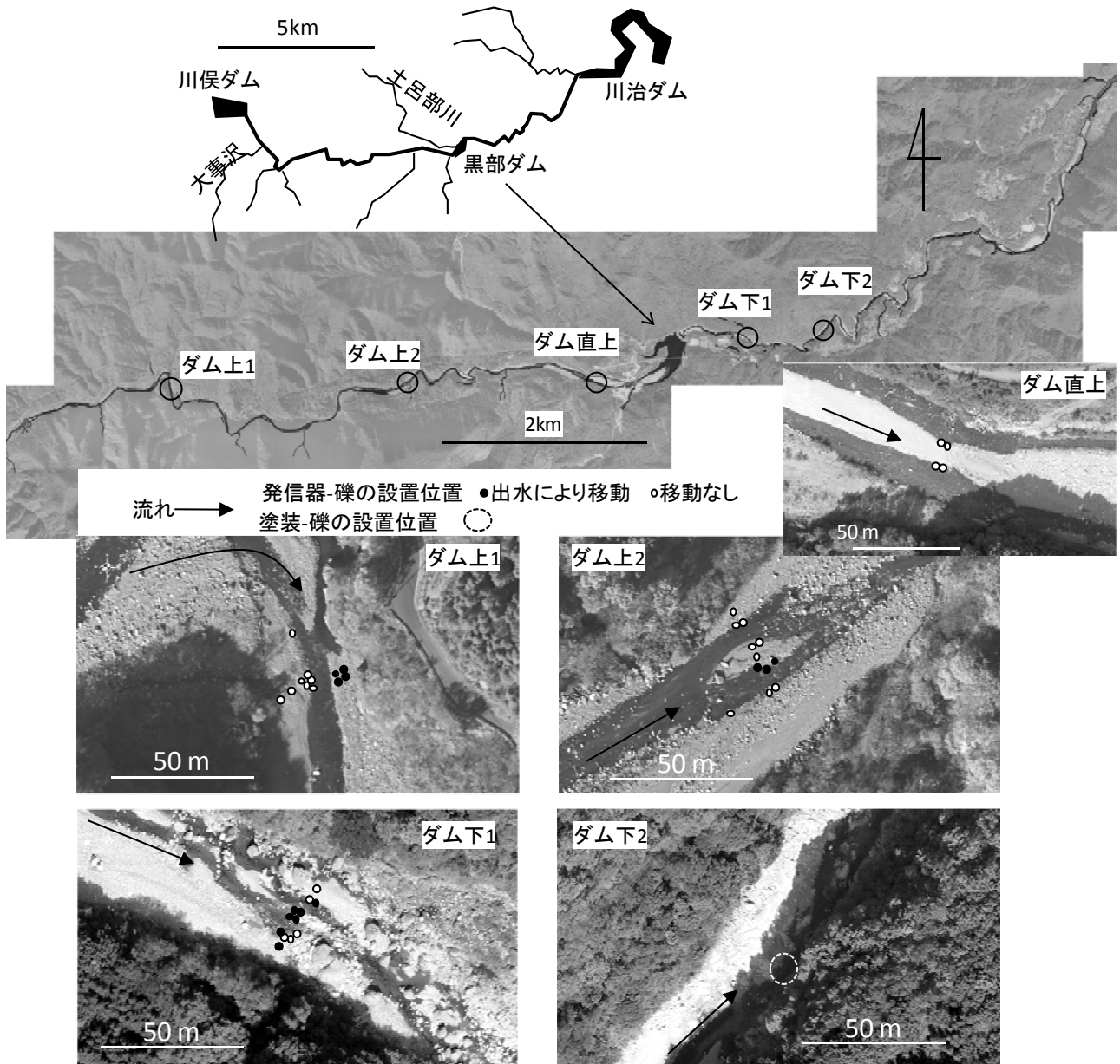


図-1 鬼怒川本川の黒部ダムの上下流付近における調査地点および各地点において標識礫を設置した位置。

行った。本報では2009年の調査結果を基に、年最大流量クラスの出水における礫移動特性を議論する。

2. 調査地と方法

調査は鬼怒川本川の北緯36度52分、東経139度36分、標高665m付近に位置する黒部ダム（東京電力管理、集水域：267.3km²）の上下流河川区間で行った（図-1）。黒部ダムから12km上流の川俣ダム（集水域：179.4km²）によって上流からの砂礫供給は遮断されているが、川俣ダムの下流3kmで合流する支川（大事沢）から砂礫が大量に供給されている。黒部ダムでは完成数年後に湛水域の大部分が土砂に埋まったとの記録があり³⁾、航空写真からも昭和初期から満砂状態が続いていることが伺える。

黒部ダムから12km下流に位置する川治ダム（集水域：323.6km²）までの区間には砂礫を供給する大きな支川はなく、川治ダムの年間堆砂量（過去20年、平均：213,000m³）の多くは黒部ダムを通過してきた土砂によるものと考えられる。黒部ダムでは出水時の流量制御は行っていないが、上流の川俣ダムは洪水調節機能があり、出水時の放流量は最大550m³/sに抑えられている。

黒部ダム上流の2地点（ダム上1, 2）、ダム直上、ダム下流の2地点（ダム下1, 2）を標識礫の投入地点とした（図-1）。ダム堤体から1.5km上流まで勾配が0.1-1.0%、河道幅が80-130mで、ダム直上の投入地点はこの上流端に位置する。ダム上流区間はダム後背の堆積効果による緩勾配域（ダムから1.5-3.5km、勾配：1.4%、河道幅：59m）と自然勾配域（ダムから>3.5km、勾配：1.8%、46m）に分けられ、それぞれの上流側に投入地点

表-1 調査地点の河道特性.

| | ダム上1 | ダム上2 | ダム直上 | ダム下1 | ダム下2 |
|-------------|------|------|------|------|------|
| 河床勾配 % | 2.11 | 1.55 | 1.03 | 1.40 | 0.96 |
| 河道幅 m | 66 | 58 | 81 | 59 | 44 |
| D_{50} mm | 120 | 120 | 80 | 106 | 40 |
| D_{84} mm | 360 | 270 | 270 | 680 | 110 |
| 岩床割合 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.41 |

を設けた. ダム下流の4.5km区間は河床勾配が1.2%, 河道幅が45mだが, 勾配や河道幅は区間内で小刻みに変わる. ダム下流の投入地点は, 礫床優占区間と岩床優占区間の上流側に位置する(それぞれダム下1, 2). 各投入地点の上下流300mの河道特性を表-1に示す.

2009年7月1日に, 低周波発信器 (TR-052, 坂田電機) を取り付けられた礫をダム上1, ダム上2, ダム直上, ダム下1に設置した. 発信器は直径46mm, 高さ51mmの円筒形で, 低周波 (8-20kHz) の発信により, 河床に埋設しても10mの距離で電波が到達する. 礫の移動時に発信が開始され発信期間は約2ヶ月である. また発信後は磁界を近接することで停止し, 再設置が可能である. 長・中・短径の相乗平均がおおよそ10cm, 20cm, 30cmの礫を現地の河原で収集し, 1つずつドリルで穴を開けて発信器を埋め込み, シリコンで封入した. 埋め込みの前後で礫の比重に大きな変化はなかった (平均値±標準誤差, 前: 2.65±0.12, 後: 2.51±0.12). ダム上1, ダム上2, ダム下1の各地点には計12個 (10cm礫: 6, 20cm礫: 4, 30cm礫: 2), ダム直上には計4個 (10cm礫: 2, 20cm礫: 2) を設置した. 各礫は水際近辺の位置に (図-1), 上面が見える程度河床に埋めて設置した. ダム下2では岩床で礫が発見しやすいと判断し, 計30個の礫 (10cm礫: 20, 20cm礫: 10) を青色油性塗料で塗装し河川内に設置した (発信器なし). ダム下2では出水で礫が流された8月の段階で, 新たに20個 (10cm礫: 8, 20cm礫: 7, 30cm礫: 5) を設置した.

礫の設置後は1ヶ月に一度発信の確認を行い, また出水時は水位低下後になるべく早く礫の発見と発信の停止を行った. 礫は探知機 (TR-047-3, 坂田電機) で探索し, 発見した礫はIDを特定し, VRS-GPS (Nikon Trimble社, GPS5800) またはオルソ化空中写真を用いて礫の位置を記録した.

また, 各地点において現地の水際に存在する50cm以上の礫20個について, 表面を部分的に塗装し, VRS-GPSにより位置座標を記録した. これらは出水後にもとの位置での存在を確認し, もとの位置にない場合, 移動があったものとみなした.

出水時の水位から, 流速とそれによる可動礫径を推定するために, ダム上2とダム下1の地点に圧力式水位計 (HOBO U-20, オンセットコンピュータ社) を設置し, 期間中の水位を10分間隔で記録した. 最大水位を用い, 断面平均流速は山地河道での有効性が示されているHeyの式⁴⁾を指数近似⁵⁾した以下の式から推定した.

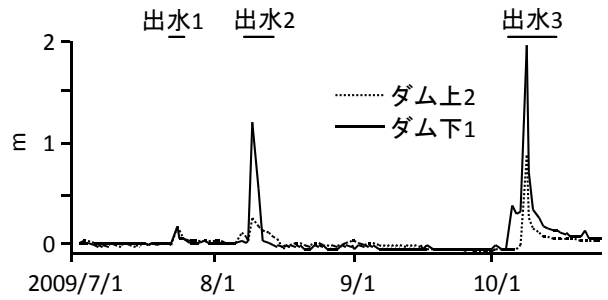


図-2 観測された水位 (m).

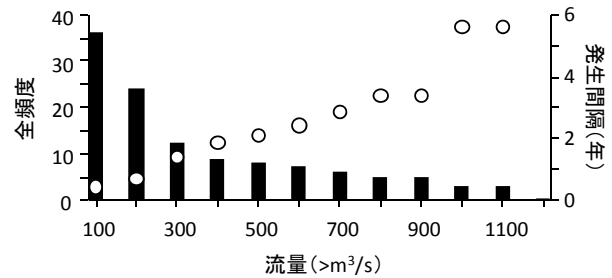


図-3 川治ダム流入量 (1993-2009年) でみた, 各出水規模の発生頻度 (■) と発生間隔 (○).

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

ここで, U は断面平均流速(m/s), h は径深(m), d_{84} は84%粒径(m), I_e はエネルギー勾配, g は重力加速度である. 米国内務省開拓局⁶⁾から提供されている礫径と移動限界速度の式を用いて可動礫径を算出した.

$$V_c = 0.155\sqrt{d}$$

ここで, V_c は移動限界速度 (m/s), d は粒径 (mm) である. 移動限界速度には断面平均流速に0.7をかけて求めた河床底面流速を用いた. ダム上2とダム下1の地点における水位, 流速, 川幅から流量を算出し, ダム上2の流量をダム上1とダム直上, ダム下1の流量をダム下2に当てはめ, それぞれの地点の川幅から水位と流速を上記式から求め, さらに可動礫径を計算した.

3. 結果

2009年7月24日, 8月10日, 10月8日に明瞭な出水があり, ダム下1でそれぞれ0.2m, 1.2m, 2.0mの水位を観測した (それぞれ出水1, 2, 3とした, 図-2). また, それぞれの出水時の川治ダムでの時間最大流入量は10 m³/s, 160m³/s, 230m³/sであった. 川治ダムの1993年から2009年の流入量データをもとにすると, 200m³/s以上の出水

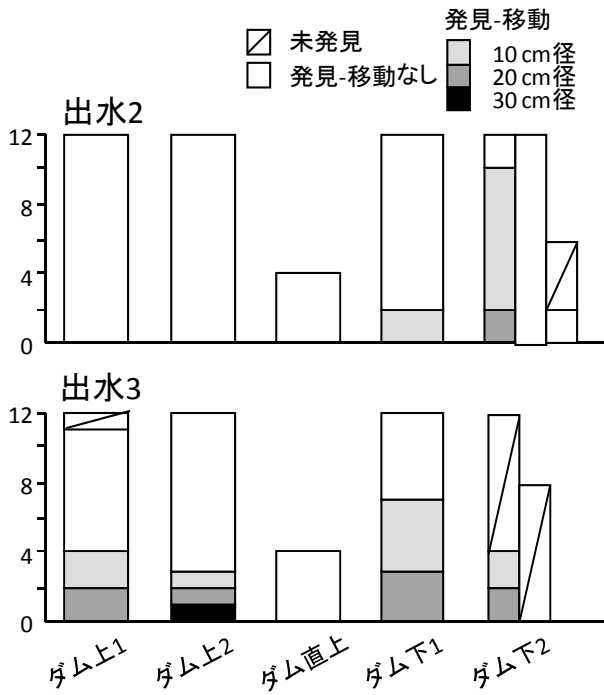


図-4 出水2と3で確認された標識礫の個数

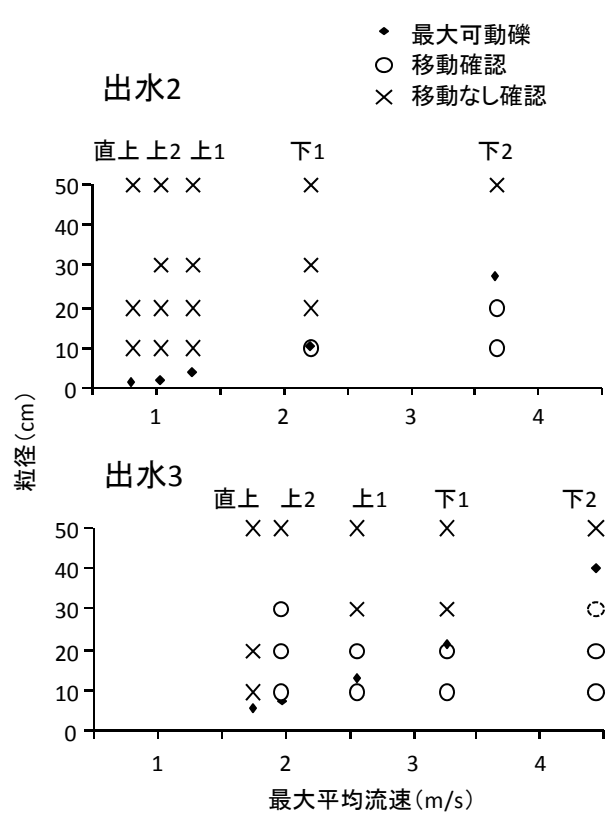


図-6 出水2と3における各地点で推定した流速と可動礫径、各礫径の実際の移動の有無。点線○は現地観察から移動したと推定されるもの。

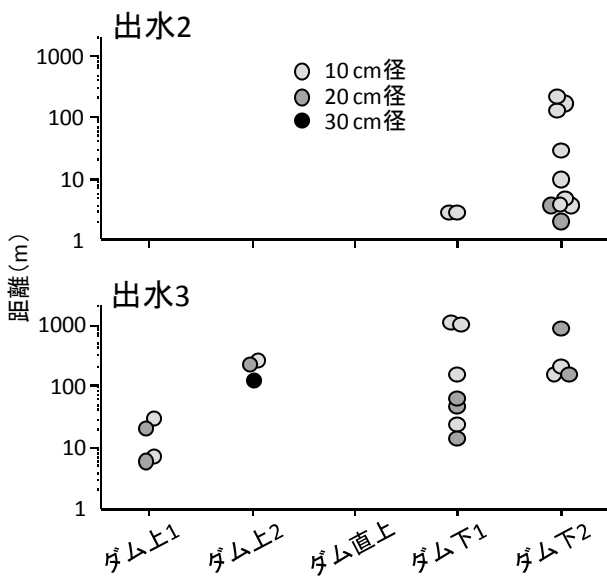


図-5 出水2と3で移動した礫の移動距離 (m)。

の発生間隔は0.7年で(図-3)、2009年は出水が小さかったことを示している。また、これらの出水時における川俣ダムでの放流量はいずれも $0.1\text{m}^3/\text{s}$ であった。したがって各地点の出水規模は川俣ダムの下流から合流する支流の数や各々からの流入量に大きく左右され、特に流域面積の大きい土呂部川および唐沢の合流点の上下流に位置するダム直上とダム下1の地点の間で流量が大きく変わったと推察される(図-1)。ダム上2とダム下1の水位データと川幅から算出した時間最大流量を比較すると、出水2で12-13倍、出水3で4-5倍の違いがあった。

礫の移動が確認できたのは出水2と3であった(図-4)。出水2で移動した発信器-礫はダム下1のみで計2個、その他は移動なしを確認した。また、ダム下2に設置した30個の塗装-礫のうち10個の移動、16個の移動なしを確認した(未発見の礫は移動の可能性大)。出水3ではより多くの礫が移動し、移動した発信器-礫は14個、未発見は1個であった(未発見だが設置場周辺の状況から出水による移動はなかったと判断)。ダム下2では新たに設置した20個のうち、移動した礫のみ4個発見した。設置位置には1つもなく、30cmを含む全礫が移動した可能性が高い。各地点で標識した水際の50cm以上の礫は1つも移動していなかった。

2つの出水ともダム直上での移動はなく、ダム上流に比べてダム下流の地点で移動率(移動礫数/設置数)も最大移動距離も大きかった(図-4、図-5)。出水2ではダム下2の10cm礫で125-210m、出水3ではダム下1の10cm礫で1050-1100m、ダム下2の20cm礫で825mが、最も大きな移動距離であった。

特にダム下1と2では、出水2と3を通して小さい礫ほど移動が多く確認され、移動距離も大きい傾向にあった。また、出水3においてダム下2では30cm礫も移動したと仮定すると、ダム下1と2では、流量が大きいときにより大きな礫が移動したことがうかがえる。

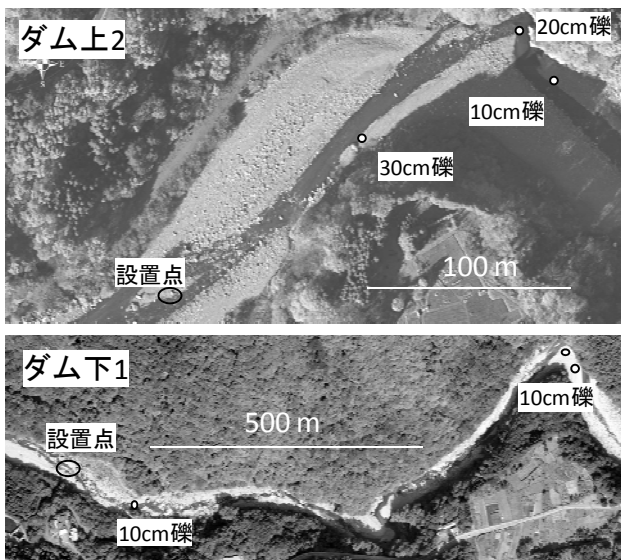


図-7 ダム上2とダム下1で、長距離移動礫の発見位置。

各地点で移動した礫の大きさを、各地点の断面平均流速に照らし合わせると、地点間の礫移動の違いは、おおよそ流速によって説明されるものであった(図-6)。すなわち、緩勾配で川幅大のダム直上では、流速が最も小さく可動礫径は10cm以下である一方、ダム下の地点では流速が大きく、可動礫径も出水3では20cm(ダム下1)や30cm(ダム下2)を上回った。ダム上1と2より勾配の緩いダム下1と2で流速が大きくなるのは流量が大きいためである。また、ダム下2がダム下1より流速が大きいには、川幅と河床粗度の小ささが関係している。

出水3のダム上1と2では、流速から予想される可動礫よりも大きい礫が移動していた(図-6)。これらの地点で移動した礫の設置場所を確認すると、特定の位置の礫が移動していた(図-1)。ダム上1では左岸側に設置した4個が移動したが、この位置は上流屈曲部で右折する流れの外側の部分である。直線的な河道区間のダム上2で移動したのは、中洲右岸側の3個で、中洲上流端に存在する巨礫(径2-3m)の15-20m下流にあたる(図-1)。

移動距離の小さい(<50m)礫が発見された場所は瀬の中で、全て河床表面近くで発見され、30cm以上河床に埋没していたものはなかった。一方、移動距離の大きい(>100m)礫が発見された場所は河道屈曲部の前後、または巨礫が形成する淵で(図-7)、30cm以上の深さで砂・砂利に埋まっているものが多かった。

4. 考察

(1) 河道特性と移動礫の関係

本研究は比較的小さい出水(年最大流量クラス)を対象としたが、ダム下流では10cm礫や20cm礫の移動が起こり、一部は1kmの移動がみられた。これに対して、ダム直上の地点では礫の移動は起こらなかった。したがっ

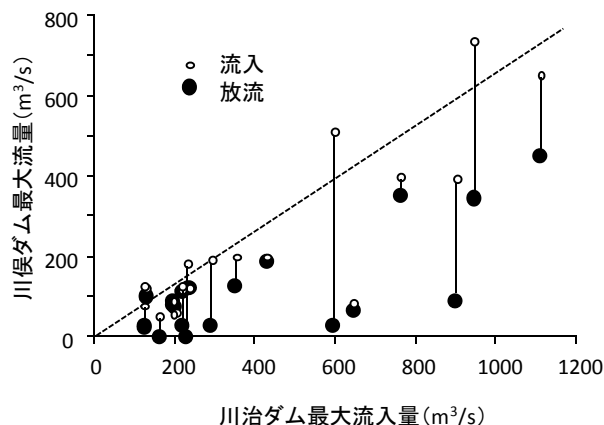


図-8 2001-2009年において川治ダムで100m³/s以上の流入時の、上流に位置する川俣ダムの放流量および流入量。

て、少なくとも出水の規模が小さい年にはダムを通過して下流へ供給される10cm以上の礫はなく、ダム下流では流出のみ生じていることが示唆された。

主に10-30cmの礫を対象に調べたが、これらの中でも移動は特に10cm礫で起こりやすかった。地点による移動した礫径の違いは、各地点における流量、勾配、川幅等から予測される流速からおおよそ説明されるものであり、20cmや30cmの礫の移動は流速が生じる河道区間では毎年のように起こっているものと考えられた。ダム上1と2では、予想以上の径の礫の移動があったが、移動した礫の設置位置から、流れの屈曲や巨石の存在により局所的に流れが集中する状況が生じ予想以上の礫が移動したと推察される。このことから、河道が直線上で巨礫が表面に少ないダム直上では、流量と河道特性に応じた礫の移動しか起こりにくく、ダム直上でもさらにダム堤体側で勾配が0.1%で川幅が100mを超える区間では、小林ら(2009)で推定したように1000m³/sの出水(発生間隔10年)でも可動径は2-17cmで、20cmを超える礫は通過しにくい可能性が示唆された。

ダム下流では、中礫が少ないことや岩盤が優占していることで、礫移動が活発になっている可能性を考えたが、今回の調査では流量や河道特性に応じた礫の移動がみられ、想定以上にダム下1と2で礫の移動が起こっている確証は得られなかった。しかし、これらの地点では一部の礫の移動距離が非常に大きく、一旦流れに乗った礫が滞留しにくい河道特性を持つ可能性がある。移動の起こりやすさとともに移動距離も併せて、ダム下流における礫の流出を評価していく必要がある。

同地点でも礫の設置位置による移動の有無や移動距離の違いが大きかった(図-4、図-5)。同様の礫追跡調査を行った多摩川下流の研究でも、年最大流量の出水規模では、礫間の移動の差が大きいことを報告している⁷⁾。本研究で10m程度の移動の礫は瀬で滞留しており、河床の凹凸に応じて礫の移動が止まったと考えられる。一方、100m以上移動した礫が滞留したのは河道の屈曲部や2-

3m巨礫の裏側にあたる淵であった。これらの移動途中にはステップ帯（50-100cmの巨礫による段差，20-30m区間）がいくつかあったが、いったん流れに載った礫に対してこうした河床の凹凸が移動を止める効果は小さかったことになる。礫の移動特性と滞留場の特徴の関係を今後も明らかにしていく必要がある。

(2) ダム上下流での流量の差と礫移動

本研究でダム下流地点における礫移動の多さの一因には、河道特性に加えて流量の違いが大きく影響していると考えられた。今回のように出水時でも川俣ダムで流量が大きく遮断される状況では、全体的に出水の規模は小さくなるが、川俣ダムより下流で合流する支流からの流入量によって、合流点の上下流の流量に大きな違いが生じうる。ダム上2とダム下1で集水域面積の違いは2.3倍であるが、流量の差は5-13倍もみられ、これらの地点の間で流入する土呂部川と唐沢からの流入によって流量に大きな開きが生じたと推察される。過去の川俣ダムと川治ダムの流量を確認すると（図-8），今回のように川俣ダムでの放流量は小さいが、川治ダムの流入量が200m³/sを超えるケースは少なくない。

黒部ダムを対象に、その下流で生じている岩盤露出の原因についてその近辺を探ってきたが、本研究より上流12kmに位置する川俣ダムでの洪水調節、集水域の支流からの流入パターンによって黒部ダムの上下流で生じる流量の差が、礫動態に重要な意味を持ちうるということが認識された。すなわち、岩盤露出のプロセスを理解する上で、すぐ上流に存在する黒部ダムだけではなく、上流の川俣ダムなど流況制御する施設や、支流との位置関係を十分に考慮する必要があると思われる。山地河川において流量データには限りがあるが、黒部ダムの上下流で生じる出水時の流量の違いの度合いと頻度を今後より明らかにし、また大きい出水時の礫の移動を見ていくことで、ダムの土砂通過量自体は多いにも関わらず岩盤露出が進行するプロセスの全体像を捉えていく必要がある。

5. 結論

- ①年最大流量クラスの水出において、黒部ダム下流では礫の移動は起こりやすいのに対して、ダム直上で礫の移動は起こらず、ダム下流では礫の流出のみ生じ岩盤露出の一端となっていることが示唆された。
- ②実際移動した礫の大きさは、流量と河道特性から推定される可動径とおおよそ一致することから、緩勾配であるダム直上では、特に局所的な流れの集中も起こりにくいため、大きな出水でも径>20cmは停滞している

可能性が支持された。

- ③ダム下流では、移動距離が1kmを超えた礫があり、一旦礫が流れに乗ると滞留しにくい可能性がある。移動距離と滞留場の評価と併せてダム下流での礫動態を理解する必要がある。
- ④本調査でのダム上流に対するダム下流での礫移動の多さには、河道特性とともに黒部ダムでの支流の流入による流量の増大が大きく影響していると推察された。川俣ダムの流量制御や支流からの流入パターンによって、黒部ダム上下流で流量の差が生じ、黒部ダム下流における礫供給に対する礫流出の度合いを高め、岩盤露出を助長している可能性がある。

謝辞：中村智幸博士には黒部ダム下流における岩盤露出の長期の変化傾向等の現地の状況についてご教示いただいた。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は河川の流量や土砂に関する情報をいただいた。福島雅紀博士には発信器礫の調査手法や研究内容にご指導いただいた。ご協力いただいたこれらの方々には厚くお礼申し上げる。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）の助成のもと行われた。

参考文献

- 1) 石山信雄, 渡辺恵三, 永山滋也, 中村太士, 剣持浩高, 高橋浩輝, 丸岡 昇, 岩瀬晴夫: 河床の岩盤化が河川性魚類の生息環境に及ぼす影響と礫河床の復元に向けた現地実験の評価, 応用生態工学, Vol.12, pp.57-69, 2009.
- 2) 小林草平, 中西 哲, 藤原正季, 矢島良紀, 赤松史一, 天野邦彦: 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, 河川技術論文集, Vol.15, pp.453-458, 2009.
- 3) 東京電力（編纂）：関東の電気事業と東京電力：電気事業の創始から東京電力50年への軌跡, 東京電力, 東京. 2002.
- 4) Hey, R. D.: Flow resistance in gravel-bed rivers, J. Hydro. Proc. ASCE, Vol. 105 No. HY4, pp.365-379, 1979.
- 5) 長谷川和義: 河川上流域の河道地形, ながれ, Vol.24, pp.15-26, 2005.
- 6) USBR: Design of small dams, US Bureau of Reclamation, Denver, CO, 1977. 土田建次, 木村 一: 版下原稿スタイルフォーマットの作成について, 土木学会論文集, No.333/II-99, pp.20-33, 1994.
- 7) 福島雅紀, 武内慶了, 箱石憲昭: 砂礫の敷設・供給速度が下流河道へ与える影響とその応答速度, 河川技術論文集, Vol.15, pp.453-458, 2009. pp.477-482.

(2010.4.8受付)