

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

INTERPRETATION OF THE RIVER BED PROFILE CHANGE AT THE DOWNSTREAM OF A DAM USING AERIAL PHOTOGRAPH

時岡利和¹・傳田正利²・天野邦彦³
Toshikazu TOKIOKA, Masatoshi DENDA and Kunihiko AMANO

¹正会員 (独) 土木研究所 河川生態チーム 研究員 (〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)

²正会員 (独) 土木研究所 河川生態チーム 研究員 (同上)

³正会員 工博 (独) 土木研究所 河川生態チーム 上席研究員 (同上)

Since continuous information of the river bed degradation in the past is rare, it is hard to acquire the quantitative feature of the degradation process. Thus, in order to hindcast the degradation process in the river bed at the downstream of a dam, we estimated the past river bed elevation by using a series of aerial photographs

The river bed elevation was analyzed at the downstream of Kawamata dam completed in 1966. Due to the stop of the sediment supply to the downstream of the dam, the river bed degradation proceeded quickly at the section which is close to the dam, but the river bed rose at the further downstream section from 1966 to 1976. Large floods which occurred during 1976 to 1983 caused degradation even in the further downstream section. However, the river bed degradation stopped in around 1983 (after the dam completion), and the river bed has been stable afterwards. A final amount of river bed degradation was 2-3m. The historical change in bed profile estimated by aerial photograph helps us understand the variation process of river bed topography at the downstream of dams.

Key Words : *Aerial photograph, river bed degradation, armoring*

1. はじめに

近年、問題視され具体的な対策が望まれているダム下流河川における河床低下・粗粒化進展機構の実証的な解析事例は少ない。これは、当該河川のダム下流近傍において過去から継続的に採取された河床の情報が極端に少ないことに起因している。

ダム下流における河床低下、粗粒化に関しては以前から水路実験やモデル検証による多くの研究が行われている^{1), 2), 3), 4)}。しかし、実河川での現象は非常に複雑であるため、理論面のみでの解析には限界があり、山本⁴⁾も実河川での河床データの継続的取得の必要性を述べている。このような既往の研究成果に加え、実測データに基づいたケーススタディによるダム下流域の河床変動傾向を実証的に捉えることができれば、ダム下流域の河床低下、粗粒化の進展機構をより正確に把握できると考えられる。

実河川における過去からの継続した河床情報が存在しない場合、それを推定するための手法として本研究では

空中写真に着目した。空中写真は戦後の米軍撮影以降、継続的に撮影されており、過去からの平面的な地表状況の把握に加えて、立体視による地表面3次元情報の抽出も行うことができる。この方法で抽出された河床の3次元情報を用いて過去の河床高を推定することができれば、当該河川における河床変動の実測データを補完できる可能性がある。

このような背景から、本研究では、栃木県川俣ダム下流河川を対象区間として、過去に撮影された空中写真の収集を行い、過去の河床高の推定を行った。

本研究の目的は以下の2点である。

- ①収集された空中写真から推定された過去の河床高が、実用に耐える精度と妥当性を有するかの検証を行う。
- ②過去からの河床高の変化とダムの放流量との関係を解析することによって、対象区間における河床低下・粗粒化の進展機構を実証的に評価する。

2. 研究方法

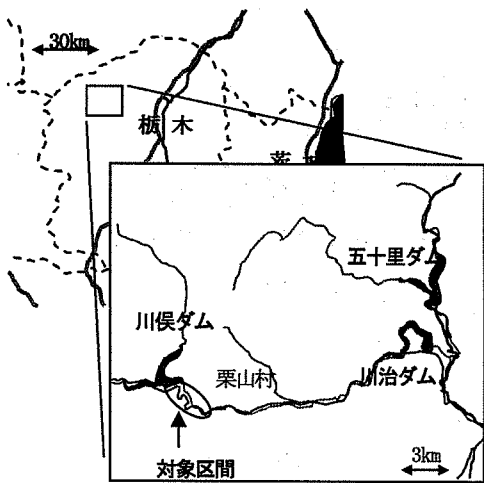


図-1 川治ダムの位置と対象区間

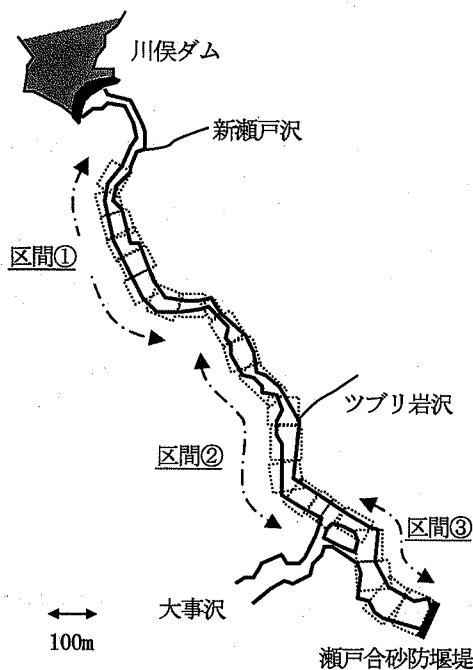


図-2 対象区間と河道分割

(1) 対象区間の概要

研究対象区間として、川俣ダム（栃木県塩谷郡栗山村大字川俣646-1）から新瀬戸砂防堰堤（1984年竣工）までの区間（以下、対象区間）を選定した（図-1）。川俣ダムは1966年に竣工したアーチ式の多目的ダムであり、鬼怒川の上流に鬼怒川改修工事の一環として計画、建設された。集水面積は174.9km²であり、総貯水容量は87,600,000m³である。以前は非灌漑期には直下流河道への放流が無く、空中写真撮影時における対象区間はほぼ無水状態であった（詳細は後ほど記述する）。対象区間における現状の平均河床勾配は1/52であり、河道幅は10～30m程度、上下流端の河床標高値はそれぞれ870m、

838mである。対象区間には新瀬戸沢（集水面積1.4km²）、ツブリ岩沢（集水面積0.8km²）、大事沢（集水面積12.9km²）の3本の支川が合流している（図-2）。

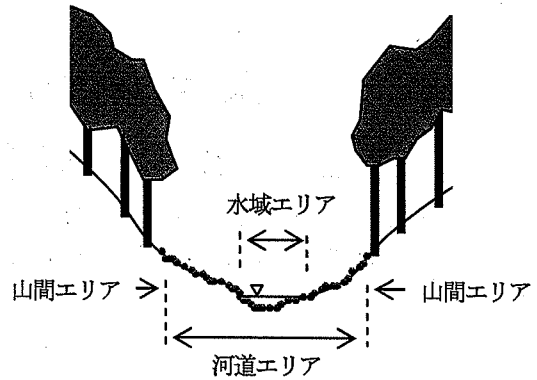


図-3 河道エリアと水域エリアのイメージ

この中で大事沢合流前後において本流河床の様子が大きく異なっており、上流からの土砂供給が少ないダム堰体から大事沢合流までの区間において、特に河床の粗粒化が顕著に起こっていると考えられる。

(2) 空中写真からの河床地形推定手法

過去の空中写真から河床地形を推定する方法を以下に示す。

- ①60%オーバーラップで撮影されている2枚の空中写真を専用図化機に設置し、立体画像を作成する。
- ②立体画像の任意の点に観測点を落とし込み、付近に存在する基準点の位置情報を元に観測点のX,Y,Z座標を読み取る。
- ③対象とする河川区間において観測点を5mメッシュで多数設定し、読み取ったX,Y,Z座標を元に河床地形のDEM（Digital Elevation Model）を作成した。

また、立体画像からの観測点位置情報（標高値）の読み取り誤差の検証を行うために、現地測量結果との比較を行った。検証を行った個所は山梨県韭崎市の釜無川中流における河原部分である。本検証個所は2005年2月に林野庁が定期空中写真撮影を行った個所であり、前日に現地測量を行って位置座標を測量した（51地点）。撮影された空中写真から51地点の標高値を読み取り、「誤差＝標高値（空中写真読み取り）－標高値（測量成果）」の演算を行うことにより誤差を算出した。

空中写真からDEMを作成する場合、河道内における水面下の河床標高は読み取ることができない。このため、水域部分における河床標高については、水面の標高として作成されることにより誤差が生じていると考えられる。そこで、空中写真から各撮影時点における河道エリア（空中写真から認識できる山間部分と礫河原部分の境界線を河道の境界線としてトレース）と水域エリア（空中写真から認識できる礫河原部分と水域部分の境界線としてトレース）の面積比を算出し、対象区間における誤差の影響を検証した。図-3に河道エリアと水域エリアのイメージを示す。

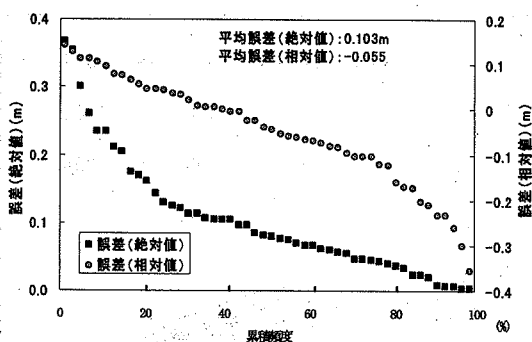


図-4 標高値読み取り誤差 (空中写真-測量成果)

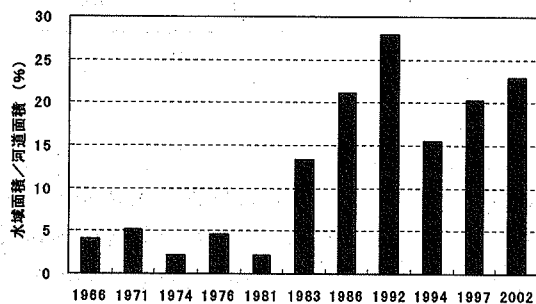


図-5 河道面積に占める水域面積の割合

(3) 対象区間における河床変動過程の推定

過去の河床地形推定に用いる空中写真は、林野庁により1966年(川俣ダム竣工年)、71年、74年、76年、81年、83年、86年、92年、94年、97年、2002年に対象区間において撮影されたものである。これらの空中写真を用いて、11ヵ年分のDEMを作成した。作成されたDEMについて、図-2に示すように、対象区間を23の河道区間に分割し、それぞれの河道区間におけるDEMを平均化することによって各河道の平均河床高を算出した。それらを用いて各撮影時点における対象区間の河床縦断面図を作成した。

作成された河床縦断面図の経年変化から対象区間を河床勾配や河床変動特性が類似している3つの区間に分類し(図-2)、各区間における平均河床高を算出した。3つの区間における各撮影時点での平均河床高と1966年時の平均河床高を比較することにより、1966年(ダム竣工年)からの河床変動量を算出した。

次に、対象区間における流量履歴と河床低下について評価するために、区間①、②について各撮影時点間における河床変動量を、同期間に川俣ダムから放流された流量と関係づけることによって評価した。流量に関しては、各撮影時点間におけるピーク放流量を抽出し、河床変動量とピーク流量との関係をプロットした。

なお、区間①、②にはダム放流量と同じ流量が流れるものとし、区間③については大事沢からの流入流量と流入土砂量の評価が困難なため検討を行わなかった。

さらに、1966年～1976年、1976年～1983年、1983年～2002年の3期間において区間①、②から流出もしくは堆積した土砂の量を算出し、各区間における土砂収支につ

いて評価した。まず空中写真から推定されたDEMを差分することによって、空隙を含む土砂体積を算出し、空隙分の体積を除くことによって土砂量とした。土砂の空隙率は過去のデータが存在しないため、一様砂の値(0.4)を適用した。

最後に、対照区間における土砂移動について粒径を考慮した形で評価するために、各流量における限界掃流力を算出し、各流量において移動する土砂の粒径(限界移動粒径)を算出した。本来であれば、限界掃流力の算出にあたっては、混合砂の移動限界式を適用すべきである。しかし、本ケースにおいては対象区間における過去の河床材料平均粒径のデータが存在しないため、平均粒径の設定しだいで無数の移動限界式が作られる。このため、根拠のある限界移動粒径の算出が難しい。よって本研究では、移動する土砂の粒径について概略を評価できること、水深、河床勾配等の復元可能なパラメータのみで解析が可能であることから、一様砂の移動限界式である岩垣式⁷⁾を適用して限界移動粒径の算出を行った。

3. 結果

(1) 空中写真からの河床地形推定手法

(a) 標高値読み取りの誤差

図-4に空中写真から読み取られた標高値と現地測量から得られた標高値の差の絶対値と相対値を降順で並び替えたものを示す。誤差の絶対値を見ると、最大値は0.367mと若干大きくなっているものの、ほとんどの観測点において0.2m以下の誤差となっており、平均誤差は0.103mである。また、誤差の相対値を見ると、実際の標高値より若干小さく読み取っている傾向があるものの、どちらかに大きく偏ることなく、概ねバランス良く誤差が散らばっていることが分かる。

(b) 対象区間の水域面積比

図-5に各撮影時点における対象区間の水域面積/河道面積を算出した結果を示す。1966年～1981年までの期間は水域面積の占める割合は非常に少ない。しかし、1983年以降は水域の割合が増え、特に1986年、1992年、1997年、2002年の水域面積割合が20%を超えている。

(2) 対象区間における河床変動過程の推定

(a) 対象区間の推定河床変動量

空中写真から読み取った標高値を基に算出した対象区間における1966年～2002年までの河床縦断面図を図-6に示す。ダム放流口～800mまでの区間(区間①)では、一貫して河床低下が起こっている。区間①の河床勾配は概ね1/30程度であり、河床変動に伴う大きな河床勾配の変化は見られない。ダムから1000m～1500mまでの区間(区間②)では1976年まで河床が上昇し、その後1983年まで大きく河床が低下しているが、1983年以降はそれほ

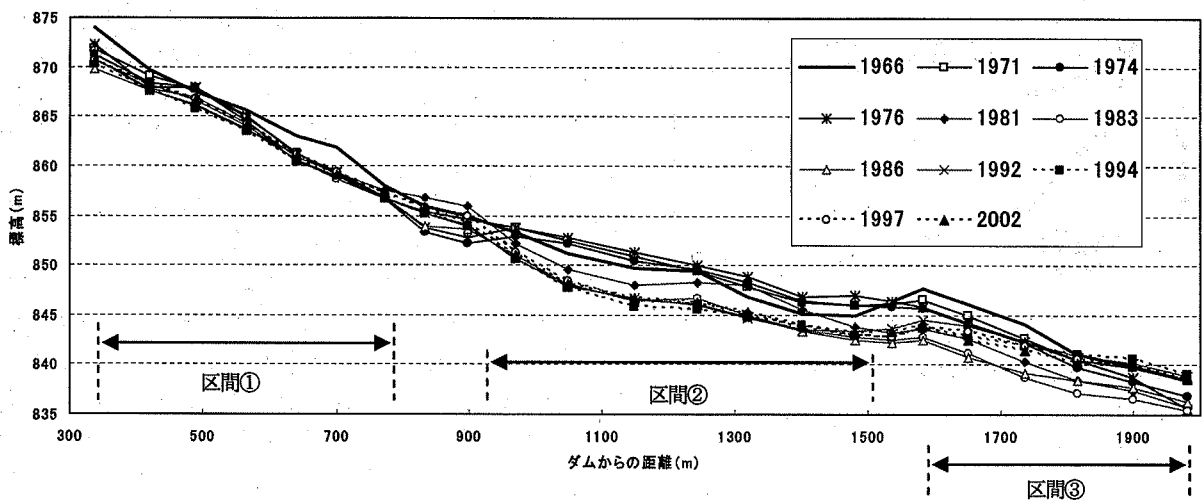


図-6 対象区間縦断面図の経年変化

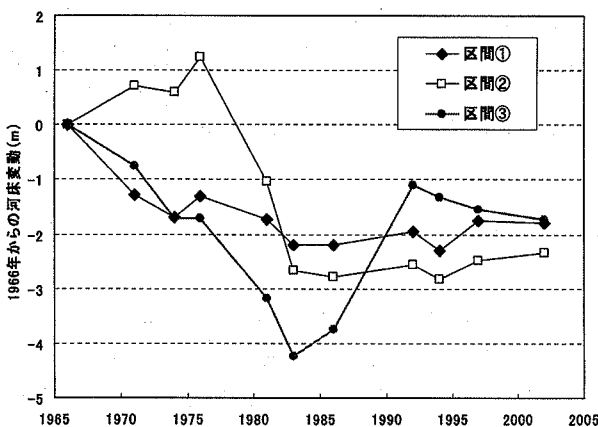


図-7 各区間における河床変動量

ど大きな河床変動は見られない。区間②の河床勾配は概ね1/83程度であり、河床変動に伴う大きな河床勾配の変化は見られない。大津沢合流後の1600m～2000mまでの区間（区間③）では、1983年まで河床が下がり続けた後、一転して1992年まで河床が上昇する。1983年までの河床勾配は概ね1/43程度で推移してきたが、その後の河床上昇に伴い、2002年には1/71まで変化した。

次に、3つの区間におけるダム竣工時（1966年）からの河床変動量を図-7に示す。区間①における1983年までの平均河床低下量は2.19mであり、1983年以降は大きな河床変動は見られない。区間②においては、1976年までの河床上昇量は約1.24mであり、その後7年間での河床低下量は3.90mである。区間③においては、1983年までの河床低下量は4.23mであり、その後、1992年までの河床上昇量は3.14mである。

(b) 流量と推定河床変動量との関係

図-8にダム竣工時（1966年）からの川俣ダム放流量ハイドログラフを示す。また、区間①、②における河床変動特性の傾向から対象期間を3つの期間に分類し、図-8に示す。すなわち、1966年～1976年を期間A、1976年～1983年を期間B、1983年～2002年を期間Cとする。また、図-9に区間①、②における各撮影期間の河床変動量と

ピーク流量との関係を示す。

1966年～1976年にかけて放流された流量ピークは $100\text{m}^3/\text{s}$ 以下である。区間①では概ね河床低下傾向となり、区間②では概ね河床上昇傾向である。1976年～1983年にかけては $250\text{m}^3/\text{s}$ 以上の流量が放流されており、区間①、②で河床低下している。1983年～1997年にかけては $100\text{m}^3/\text{s}$ 前後の流量が出ているが、河床変動量は小さい。1997年～2002年にかけては約 $250\text{m}^3/\text{s}$ の流量が出ているにも関わらず、区間①、②共に河床変動量は小さい。

(c) 移動土砂量と移動粒径の評価

図-10に区間①、②における土砂収支について示す。1966年～1976年にかけて区間①から約 13000m^3 分の土砂容量が減少し、区間②では約 22000m^3 分の土砂容量が増加している。1976年～1983年にかけては、区間①からは約 10000m^3 分の土砂容量が減少し、区間②からは約 63000m^3 分の土砂容量が減少している。1983年以降は区間①、②共に土砂容量の変化は少ない。

また、図-11に区間①、②における流量と限界移動粒径の関係を示す。1966年～1976年に3回起こった出水のピーク流量である $80\text{m}^3/\text{s}$ の流量時には区間①では約25cm以下の粒径の土砂が移動し、区間②では約12cm以下の土砂が移動することが分かる。また、1976年～1983年に起こった既往最大流量である $350\text{m}^3/\text{s}$ の流量時には区間①では約60cm以下の土砂が移動し、区間②では約29cm以下の土砂が移動することが分かる。

4. 考察

(1) 空中写真から推定された河床DEMの妥当性

空中写真から読み取られた標高値の誤差は小さく、高精度で過去の河床地形が推定されていると考えられる（図-4）。また、水面下の河床高を除いて河床DEMを作成することについては、水域面積比率の小さい1966年～1981年の期間においては問題無いと思われるものの、

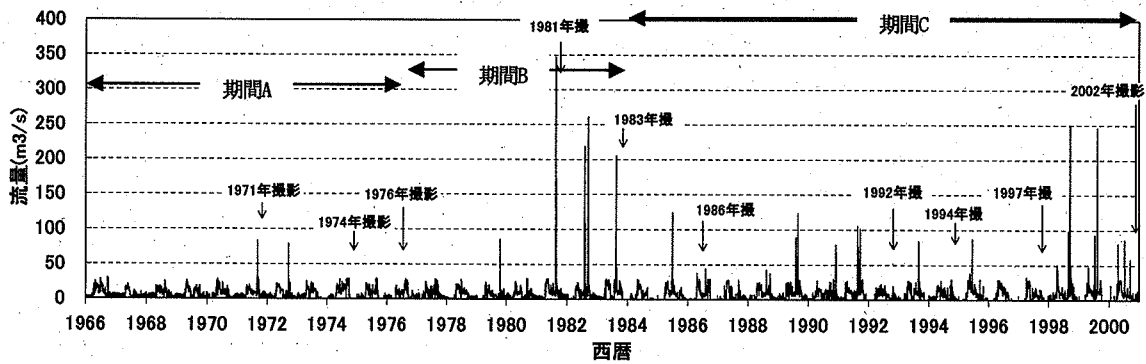


図-8 川俣ダム放流量ハイドログラフ

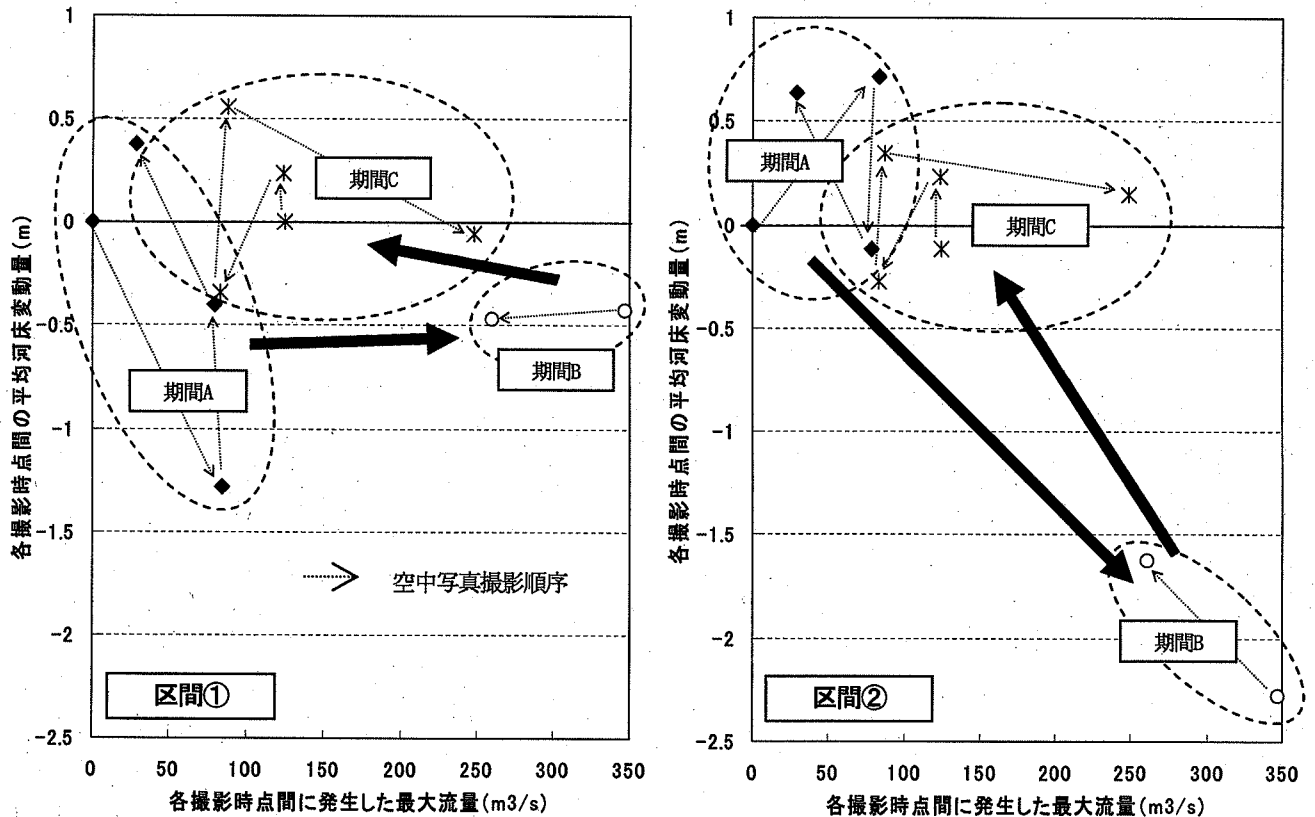


図-9 流量と河床変動の関係

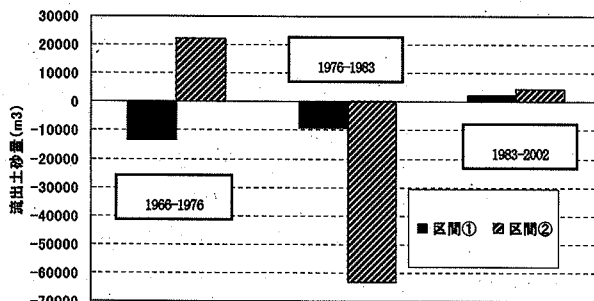


図-10 区間別土砂量収支量

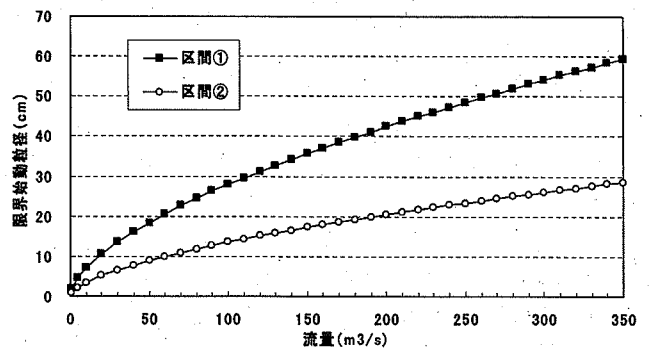


図-11 流量と区間別限界移動粒径の関係

1981年以降について作成されたDEMについては実際の河床地形と比べて13%~28%のエリアにおいて水深分の誤差を含むものである(図-5)。ただ、本研究では、対象区間における河床変動特性について、平均的な河床高

の変化から評価している。今回の誤差特性は、このような河床変動特性の傾向を大きく変えるものではないと考えられる。

(2) 川俣ダム下流における河床変動特性

河床変動特性と粗粒化の進展について期間A, 期間B, 期間Cの3期間について段階的に考察を行う。

期間Aの間は, 区間①において河床低下傾向, 区間②において河床上昇傾向である(図-6, 7, 9)。図-8に示すようにピーク流量 $80\text{m}^3/\text{s}$ 程度の出水が3度起こっている。これにより比較的河床勾配の大きい区間①から粒径 25cm 以下の土砂が流出し, 比較的河床勾配の小さい区間②から粒径 12cm 以下の土砂が流出したと考えられる(図-11)。このことから, 区間①より流入した土砂のうち, 粒径が $12\text{cm}\sim 25\text{cm}$ の土砂が区間②に堆積したものと考えられる。よって, 区間②における河床上昇を招いた土砂量約 22000m^3 (図-10)は, ほぼ粒径 $12\text{cm}\sim 25\text{cm}$ の土砂で占められていたと推測される。また, 1976年時点で区間①の河床表層は粒径 25cm 以上の土砂で構成され, 区間②の河床表層は粒径 $12\text{cm}\sim 25\text{cm}$ の土砂で構成されていたと推測される。なお, この考察が正しいとすれば, 区間①の土砂減少量が区間②の土砂増加量より多くなるはずであるが, 図-10は逆の結果を示している。この原因として, 以下の2点が考えられる。

- ・ 区間①では川幅約 20m 程度の河道に径 5m 程度の巨石が点在しており, この巨石状の標高を読み取ることで河道DEMを過大評価している。
- ・ 区間①の側岸は急勾配の崖になっており, 斜面崩落による土砂供給があった。

期間Bの間は, 区間①, ②ともに河床低下傾向である(図-6, 7, 9)。図-8に示すように既往最大である $350\text{m}^3/\text{s}$ の出水を含む大きな出水が数度起こっている。これにより区間①から粒径 60cm 以下の土砂が流出し, 区間②から粒径 29cm 以下の土砂が流出したと考えられる(図-11)。ただ, 区間①の土砂収支量が約 10000m^3 と前期間(1966年～1976年)より少ないことから(図-10), 粒径 $25\text{cm}\sim 60\text{cm}$ の土砂は区間①にはそれほど多くは存在していなかったと考えられる。区間②では前期間(1966年～1976年)に堆積した粒径 $12\text{cm}\sim 25\text{cm}$ の土砂がほぼすべてこの期間に流出し, さらに粒径 29cm 以下の土砂が流出したことにより大きく河床が低下したと考えられる(図-6, 7, 9)。また, 区間①から流入した土砂のうち, 粒径が $29\text{cm}\sim 60\text{cm}$ の土砂は区間②に堆積したと考えられるが, 先ほど示したように, その土砂量は少なく, 区間②の河床を上昇させるには至らなかったと考えられる。また, 1983年の時点で区間①の河床表層は粒径 60cm 以上の土砂で構成され, 区間②の河床表層は 29cm 以上の土砂で構成されていたと推測される。

期間Cの間は, $250\text{m}^3/\text{s}$ の出水を最大として大きな出水が何度も起こっているにも関わらず, 区間①, ②共に河床変動量はほとんど無い(図-6, 7, 9)。これは1983年の時点で河床が粗粒化し, 既往最大流量である $350\text{m}^3/\text{s}$ 以

下の出水では河床が動かなくなってしまうことが原因と考えられる。よって区間①, ②では1983年の時点で河床の粗粒化が収束し, 現在の河床と同じ状態になっていたと推測される。

5. 結論

本研究で得られた知見を以下に示す。

- 1) 空中写真からの標高値読み取り誤差は約 10cm であり, 高い精度で過去の河床DEMを再現することができる。
- 2) 川俣ダム下流ではダム竣工後約17年間で河床の粗粒化が収束し, 粒径約 $30\text{cm}\sim 60\text{cm}$ の土砂で河床が構成されていたと考えられる。最終的な河床低下量は最大 $2\sim 3\text{m}$ 程度であった。

山地河川における空中写真は林野庁によって日本全国において概ね5年毎に撮影されており, 安価なため入手が容易である上に図化機による標高値の抽出も既存の汎用化された技術を用いている。このため, ある程度の誤差を内包するものの, 特に山地河川など水域部分の少ない河道区間においては, 容易に過去からの河床変動傾向を推定しその特性について把握することができる。これまで過去の環境情報がほとんど存在しなかった個所について河床変動傾向という重要な情報を提供できるという面でこの手法は非常に有用であると考えられる。

また, 同じく過去の環境情報が存在せず, 粗粒化対策の必要性が指摘されるダム下流河川については, 水理計算を実施する際の校正データとして河床変動量のデータを使用することによって, 当該河川における粗粒化の進展機構についてモデル化することも可能であると考えられる。そのモデルを適用することによって粗粒化対策に対する効果をあらかじめ予測し, 効果的な事業を実施する可能性も提示できると考えられる。

参考文献

- 1) 中川博次, 辻本哲郎, 原稔明: 混合砂れき床面の粗粒化過程について, 京都大学防災研究所年報, 第20号B-2, pp.355-367, 1977
- 2) 平野宗夫: Armoringをともしう河床低下について, 土木学会論文報告集, 第195号, pp.55-65, 1971
- 3) Jose L. Lopez and Morco A. Falcon: Calculation of Bed Changes in Mountain Streams, J. Hydr. Engrg., Vol.125, Issue3, pp.263-270, 1999
- 4) 山本晃一: ダム下流の河床低下に関する研究, 土木研究所報告, pp.(1)-(13), 1641976
- 5) 社団法人土木学会: 水理公式集(平成11年版), p.158

(2006. 4. 6 受付)