

## 6. 新規ダム築造後の状況予測について

### 6.1 本章の基本スタンス

本章では、新規ダム建設に当たって、ダム建設後、下流河川の物理環境がどのように変化するかを予測し、最終的な目標である生物応答の予測を行うための基本情報を得るための手法を扱う。この内容は、既設のダムについて、現時点以降、下流河川の物理環境がどのように変化していくかを予測することにも、また、現在までの変化の要因分析にも役立つ。ダム下流の土砂動態を変える方策を検討する際の技術検討基盤ともなりうる。なお、ここで言う「変化の予測」には、変化の有無の予測を含む。本章の全体像を図 6.1-1 に示す。

物理環境の変化を受けて生物がどのように応答するかについては、底生動物と付着藻類を対象を絞り、4章や5章において基本的な捉え方や分析の考え方・枠組みを述べた。しかし、物理環境の予測結果が与えられて生物応答を定量的かつ包括的に予測するレベルになるには、さらに多くの検討が必要な状況にある。このため本章は、物理環境に関する予測を主対象とし、生物応答の予測までを一体的に検討するような内容とはなっていない。それでも、物理環境の予測結果は、起こりうる生物応答の検討に様々な形で役立つ。このことを具体的に示すために、「6.4 生物変化予測の見通し」において、やはり底生動物や付着藻類を軸に、物理環境の変化と生物応答とのつなげ方について見通しを述べ、物理環境と生物応答の一体的予測に向けての突破口をとるような情報の提示を試みる。

物理環境の中で、本章では、河道状況すなわち河床形状と河床材料の変化の有無、変化する場合にはその変化状況に焦点を当てている。生物の応答を考える上で対象とすべき物理環境の構成要因としては、この他に流量・流況（高水、平水）、掃流力などがある。これらは、ダムの計画に連動して設定、検討されるものであり（流量・流況）、あるいは現地河道データを取れば容易に計算できるものである（掃流力）。そこで、これらについては、必要に応じて別途整理され、与えられ、適宜検討に用いられるものとし、本章では、技術的に新たな整理が必要な河道状況（河床形状と河床材料）の予測を主に扱うこととしている。なお、場合によっては、陸域の植生消長も河道状況に含めて取り扱う。

なお、河床形状と河床材料の予測についても、山地河川特有の複雑さもあいまって、次節以降で述べるように、今後さらに検討すべき不確定な部分がある。本章で提示する分析手法も、このことを考慮したものになっている。本章の内容を利用する際には、この点に十分留意されたい。

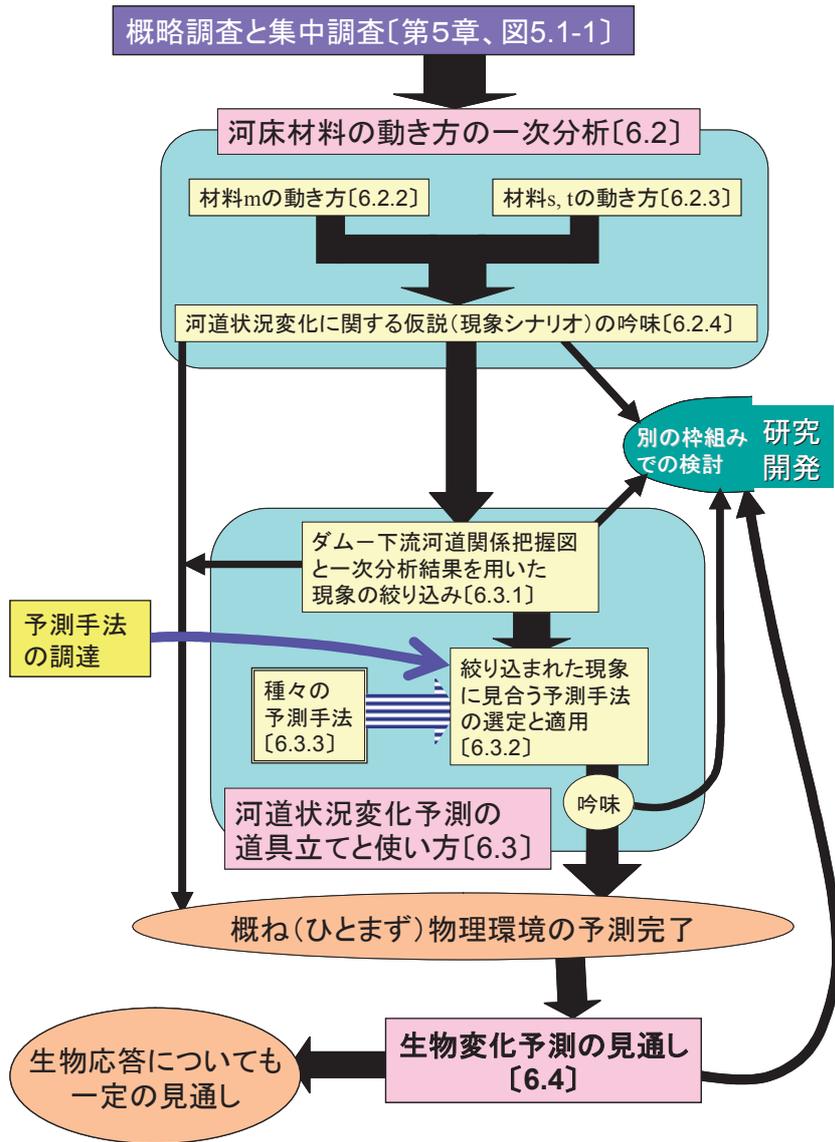


図 6.1-1 第6章で扱う予測の全体像

## 6.2 河床材料の動き方の一次分析

### 6.2.1 一次分析の概要

本節では、対象とするダム下流河道について、材料  $m$  (2.2.1 参照) と材料  $s$ 、 $t$  の動き方を比較的簡便な手法により把握する。これにより、起こりうる河道状況変化のシナリオを絞り込み、次節 6.3 で述べる河道状況変化の予測を行うかどうかの判断、行う際のツールの選択やその適用の方向性の検討を行うための準備を整える。図 6.1-1 を再び参照されたい。

材料  $m$  に関する分析においては、ダム建設前と建設後の洪水流況をそれぞれ与え、しかし、いずれについても河床形状や河床材料にはダム建設前のデータを用い、無次元掃流力  $\tau_*$  に代表される水理量を用いて河床材料の動きやすさを把握する。ダムの建設によって河床材料や形状が変わる場合が考えられるが、この分析では建設前と同じ河床材料と形状を設定している (→インパクト作用後、初期の変化の度合・方向からの判断)。一方、材料  $s$ 、 $t$  に関する分析では、材料  $s$ 、 $t$  になりうる粒径集団の動態について、ダム建設後に最終的に到達するであろう水系内のフラックス分布だけを扱っている (→インパクト作用後、最終的に現れる土砂動態からの判断)。

いずれにしても、ここでの分析は河道状況の予測に十分には踏み込んでおらず、それが「一次分析」と呼んでいる理由である。しかし、この分析により、ダム建設に伴う河道状況の変化の方向性や度合いについて、簡便に有用な情報を得ることができ、その成果は 6.2.4 や 6.3.1 で活かされる。

以上により、起こりうる現象を吟味する中で (6.2.4、6.3.1)、想定される現象が比較的単純な場合や、求められる予測の精度がそれほど高くない場合には、「一次分析」の結果だけで、実務に資する判断が可能となる場合もある。そうはならず 6.3.2 と 6.3.3 で述べる予測を行う必要が出てくることもある。想定される現象を 6.3.3 に示された手法のいずれによっても扱えず、予測手法を新たに調達する必要が出てくる場合も考えられる。さらには、本章で提示した検討の枠組みでは対応できず、別の枠組みでの検討あるいは研究開発が必要との結論が出てくる場合もあろう。いずれにしても、1.1 で述べたように、本分野が発展途上であることを踏まえ、状況に応じて、その時点での最も適切な手法を柔軟に選択・活用していくというスタンス、また、予測手法の限界を十分踏まえた結果の利用を行っていくことが肝要である。

## 6.2.2 材料mの動き方

## (1) 掃流力計算に基づく動きやすさの分析

河床に働く掃流力は、以下により算出される。

$$\tau = \rho u_*^2 \quad (6.2-1)$$

$$u_* = \sqrt{ghi} \quad (6.2-2)$$

ここで、 $\tau$ ：掃流力、 $\rho$ ：水の密度、 $u_*$ ：摩擦速度、 $g$ ：重力加速度、 $h$ ：平均水深、 $i$ ：エネルギー勾配

掃流力は現況河道形状に基づく不等流計算または等流計算により算出する。その際、流量には、平均年最大流量や既往最大流量等といった河道形成や河道状況変化を考える上で重要な代表的洪水流量を用いる。通常、規模の異なる複数の流量を設定する。

その他の水理諸量（粗度係数、出発水位）は、現況を基本とする。なお、対象とする河川は山地部にあることが多く、調査・観測・水理解析・河道計画検討があまり行われておらず、粗度係数など水理諸量の設定に必要な情報がない場合が多い。その際は、河道の状態を踏まえ、河川砂防技術基準（案）（建設省河川局 1997）や水理公式集（土木学会 1999）等に示されている値を採用することが考えられる。

算出された掃流力がどの大きさの礫まで動かすことが可能かについて、掃流力と移動限界粒径との関係から分析する。この際、河床材料には、やはり現況のデータを用いる。方法を以下に示す。

## 1) 一様粒径の限界掃流力計算に基づく方法

## a) 適用する状況

材料 m の粒径範囲が比較的狭く、その平均粒径 ( $d_{60}$ ) に当たる粒子の動き方で材料 m の動きやすさが大局的に把握できると考えられる場合。あるいは、材料 m の粒径範囲は広いが、それをいくつかの粒径集団に分けて扱うことができ ( $m_1$ 、 $m_2$ 、 $m_3$  など)、各粒径集団の動きやすさは、それぞれの平均粒径に当たる粒子の動き方を見ることで大局的に把握できると考えられる場合 (2.7.1 や 5.3.2 で述べたように、山地部河道ではこのような取り扱いが可能な場合が多いと考えられる)。

## b) 計算方法

岩垣の式など、一様粒径を対象にした限界掃流力の計算法を用いて、摩擦速度あるいは掃流力から、移動限界粒径（動きうる粒径の最大）を計算する。岩垣 (1956) は、限界掃流力（摩擦速度）と粒径との関係を以下に示している（水温 20℃）。

$$\left. \begin{aligned} 0.303 \leq d &\Rightarrow u_{*c}^2 = 80.9d \\ 0.118 \leq d \leq 0.303 &\Rightarrow u_{*c}^2 = 134.6d^{31/22} \\ 0.0565 \leq d \leq 0.118 &\Rightarrow u_{*c}^2 = 55d \\ 0.0065 \leq d \leq 0.0565 &\Rightarrow u_{*c}^2 = 8.41d^{11/32} \\ d \leq 0.0065 &\Rightarrow u_{*c}^2 = 226d \end{aligned} \right\} (6.2-3)$$

ここに粒径  $d$  : cm、移動限界摩擦速度  $u_{*c}$  : cm/s。ふつうダム下流河道の材料  $m$  は礫なので、上式の一番上を用いればよい。あるいは、

$$\text{無次元限界掃流力 } \tau_{*c} = \frac{u_{*c}^2}{sgd} = 0.05 \quad (6.2-4)$$

の関係から摩擦速度と移動限界粒径との関係を求めても良い。

### c) 分析すること

ダムの供用に伴う流量変化が、河床に分布する材料  $m$  の流送特性をどの程度変化させる可能性があるか分析する。このために、図 6.2-1 のように計算結果を図化する。ここで、各地点の粒径集団分布は、たとえば、5.3.2(2)2)において示した河床構成材料の平面分布により整理する。この粒径集団の粒径レンジを、移動限界粒径の線と比較すると、河床縦断のどの位置でどの粒径集団が移動するか、あるいは動かないかを概略整理することができる。

この整理に際して、粒径集団の動きの有無は、まずは当該粒径集団の平均粒径 ( $d_{60}$  : 河床全体ではなく、着目する粒径集団についての) と移動限界粒径との比較により行う。これは、平均粒径に当たる粒子が動く状況では、当該粒径集団の動きが相当明瞭になると考えてのことである。その上で、当該粒径集団を構成する粒径の中で、どの粒径まで動くかというような詳細な分析を行いたい場合は、次項 2) で説明する混合粒径の限界掃流力計算に基づく方法を適用する。

図 6.2-1 からは、材料  $m3$  の粒径集団の動きやすさが、12km 付近を境に、明らかに変わることが読み取れる。すなわち、平均年最大流量規模の洪水時に、上流では動きがあり、下流では、動くか動かないかギリギリであること (材料  $m3$  の粒径集団の平均粒径付近に移動限界粒径の線が来る)、この特性はダムの有無であまり変わらないことがわかる。このような動きやすさに関する大局的な情報は、この先、詳細な分析や予測の方針を立てる上で重要である。

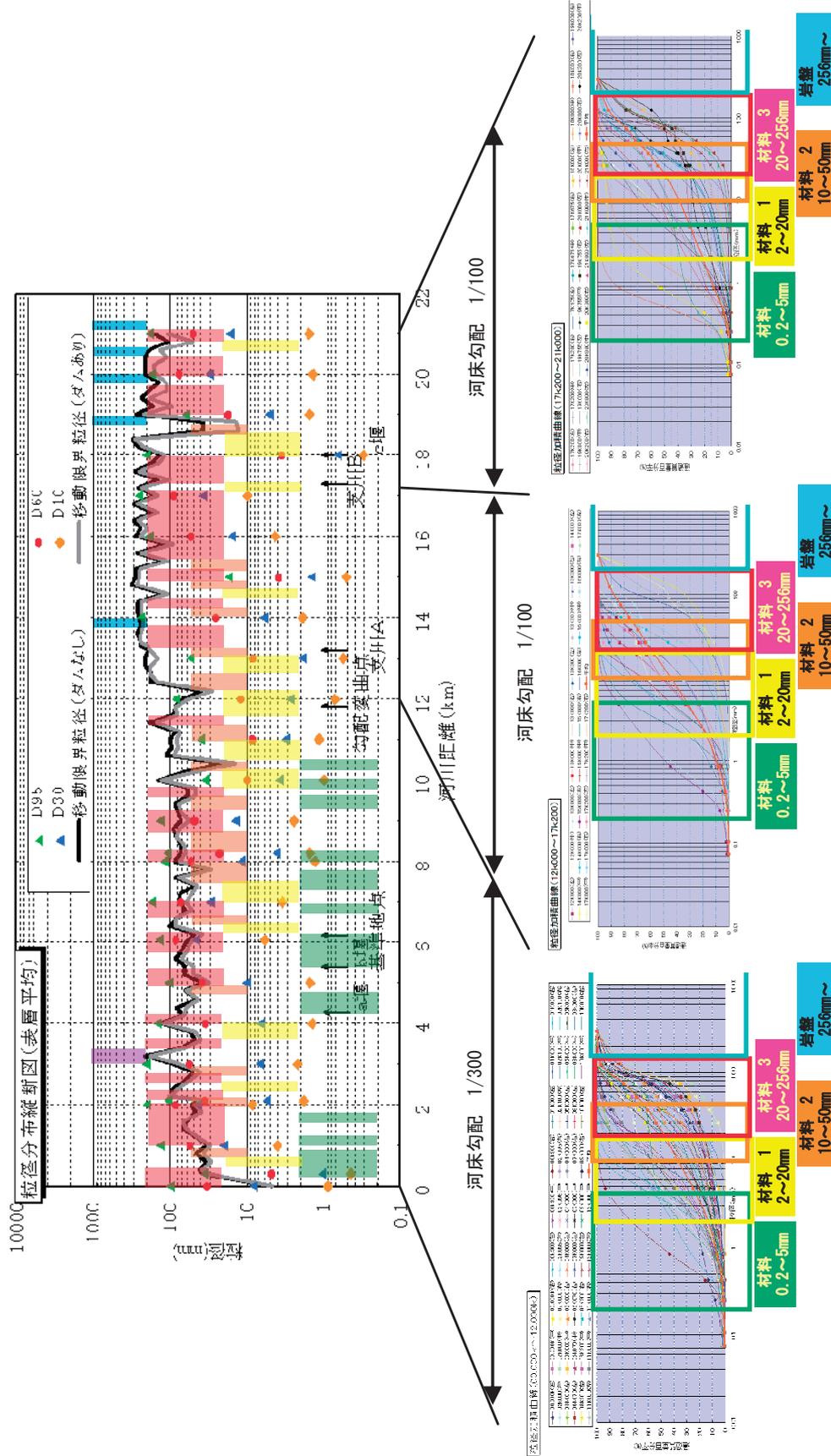


図 6.2-1 粒径集団の粒径レンジと移動限界粒径との比較分析  
(平均年最大流量を対象とした比較例)

## 2) 混合粒径の限界掃流力計算に基づく方法

## a) 適用する状況

混合粒径である河床材料の粒径毎の動きやすさを把握したい場合（例えば、30%粒径や90%粒径などが動くかどうかなど）、一様粒径の限界掃流力計算法では、様々な粒径が存在することによる効果（遮蔽効果や突出効果など）を考慮できないので、この2)による方法を採用する必要がある。

## b) 計算方法

修正エギアザロフの式を用いる。混合粒径における移動限界粒径の評価法は、エギアザロフ（1965）とそれを修正した芦田・道上（1972）により、次のように導かれている。

$$\left. \begin{aligned} \frac{d_i}{d_m} \geq 0.4; \frac{\tau_{ci}}{\tau_{cm}} &= \frac{\tau_{*ci}}{\tau_{*cm}} \cdot \frac{d_i}{d_m} = \frac{d_i}{d_m} \left( \frac{\log_{10} 19}{\log_{10} 19 (d_i/d_m)} \right)^2 \\ \frac{d_i}{d_m} \leq 0.4; \frac{\tau_{ci}}{\tau_{cm}} &= \frac{\tau_{*ci}}{\tau_{*cm}} \cdot \frac{d_i}{d_m} = 0.85 \end{aligned} \right\} (6.2-5)$$

(6.2-5)式に、(6.2-1)式と(6.2-3)式あるいは(6.2-4)式により求めた平均粒径 $d_m$ に当たる粒子に関する限界掃流力 $\tau_{cm}$ を代入することにより、粒径 $d_i$ の砂礫に関する限界掃流力 $\tau_{ci}$ を導くことができる。移動限界摩擦速度について岩垣の式と（修正）エギアザロフの式を比較すると、図6.2-2のようになる。 $d_i/d_m$ が大きい場合（対象粒径 $d_i$ が平均粒径 $d_m$ より大きい場合）は「一様粒径の計算法（岩垣の式）>エギアザロフの式」となり、逆に $d_i/d_m$ が小さい場合（対象粒径が平均粒径より小さい場合）は「岩垣の式<エギアザロフの式」となる。この図より、岩垣の式など、一様粒径を対象にした限界掃流力の計算法では、小粒径についての大粒径による遮蔽効果、大粒径についての突出効果がともに評価されないことがわかる。

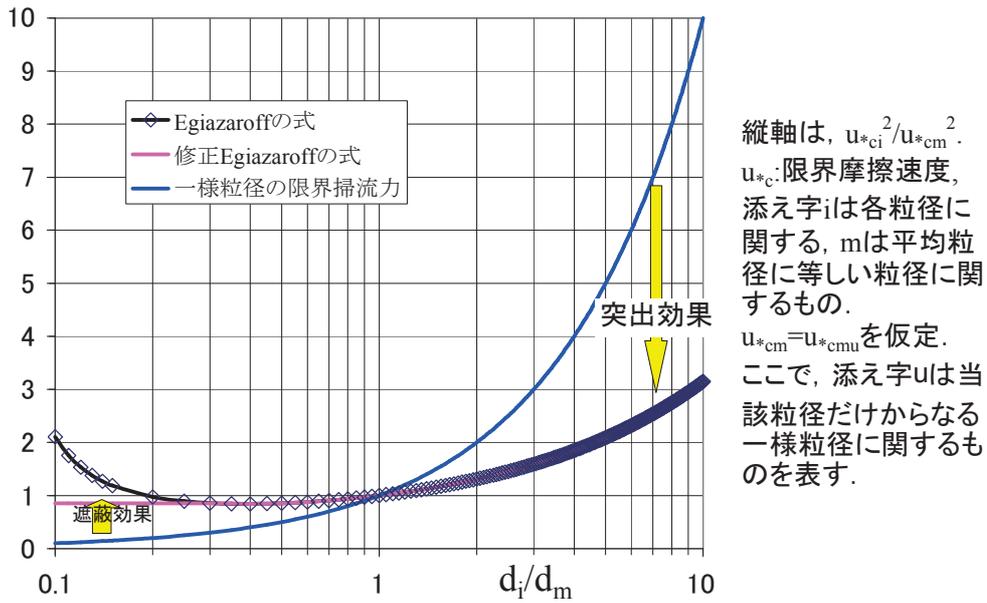


図 6.2-2 移動限界摩擦速度についての岩垣の式と修正エギアザロフの式との比較

c) 分析すること

着目する地点に関して、河床材料あるいは着目する粒径集団を対象に、粒径毎の移動限界摩擦速度を算出し、それと作用する摩擦速度の大小関係から、どの粒径が動くか（動かないか）を把握する。修正エギアザロフの式においても、粒径の増大とともに限界摩擦速度が単調に増加する傾向は変わらないので（図 6.2-2）、この分析から動きうる最大粒径を把握することになる。

3) それぞれの方法を適用するにあたっての留意点

上記 1) の一様粒径を対象にした計算法を用いる方法の精度は、ある粒径集団の平均粒径に等しい砂礫に関する移動限界摩擦速度が、岩垣の式など一様粒径を対象にした手法によりどの程度精度良く表されるかにかかっている。多くの水理検討では、両者が等しいものとして計算が行われる（水理公式集（土木学会 1999））。山本(2004) は、実験結果に基づき、アーマー化される過程にある平坦床の場合、混合粒径中の平均粒径に等しい粒子に関する移動限界摩擦速度が、その粒径だけからなる材料の移動限界摩擦速度より小さくなる場合があること、そのずれが3割程度に達する場合があることを示している。以上から、1) の計算法は、この程度の精度であることを理解して、目安を得るための簡易手法として使う分には概ね妥当と考えられる。ただし、粒度分布によってはさらに大きなずれが生じる可能性を否定できず、分析を厳密なものとするには、この点についてのさらなる検討が必要である。

上記 2) の混合粒径を対象にした計算法を用いる方法は、遮蔽効果や突出効果を考慮しているので、1) の方法に比較して常に精度が良いように見えるが、必ずしもそうではない。福岡(2008)は、石礫河川と砂礫河川の違い（石礫河川は砂礫河川に

比べ大礫や巨礫も含む粒径幅の広い材料で構成される河川のことを意味する)に着目し、実河川に設けられた実大実験水路での観察に基づき、山地部河道や急流河川の河道など、実河川で粒度分布が広い河床材料に関しては、材料中の特に大きな石が河床の安定化に重要な役割を果たしており、この効果は砂礫河川で適用できる(修正)エギアザロフの式の考え方だけでは表現できない可能性があるとの見方を提示している。多くの室内実験で対象となってきたような比較的粒度分布の狭い十分混合された粒度を対象にする場合は別として、山地部河道では珍しくない、巨礫が混じり、非常に幅が広く、空間的不均一性も高く、さらには噛み合わせ効果も考えられる河床材料を対象にするのであれば、粒径集団の空間分布を考慮しつつ 1)の方法で簡易な分析を行った方が、現時点においては、形式上厳密な分析を行うよりも実質的な結果をもたらすことも考えられる。いずれにしても、現状の混合粒径の捉え方に不十分な点がありうることを理解した上で、方法の選択と解釈を行うこと、混合粒径についてのより実態に合った捉え方に関する研究開発を注視していくことが大事である。

## (2) 支川の材料 m 供給ポテンシャルの分析

ダムの供用に伴い、ダム直下流では材料 m の供給が遮断される。一方、途中に支川が合流すると、砂礫が供給されることになり、ダム地点での材料 m の供給遮断による河床材料の変化が縦断的にみて緩やかとなることが考えられる。この状況は、流入する支川の流域面積や支川における土砂を運搬する力(掃流力)の大小および支川流域の地形や地質性状により異なることが考えられる。このため、ダム下流河川に合流する支川の特徴を把握することが、下流河川の河道状況を予測するために重要となる場合がある。

以下に支川からダム下流河川に供給される砂礫の状況を簡易に分析する方法について概説する。

### 【合流点近くの代表区間における支川掃流力の把握】

- ・ 支川流域の出水時流量を整理する。支川流量の実測値が存在する場合はこれによるが、実測が行われていない場合は流量観測が実施されている本川の流量から流域面積比により推定するという簡易法の適用を考える。
- ・ 合流点付近の支川の河道条件(河床勾配・川幅など)を把握・整理する。支川の河川測量が実施されている場合はこの結果を利用する。
- ・ 上記の出水時流量および河道条件をもとに水理計算により支川の掃流力を算出する。

### 【支川に存在する砂礫の分析】

- ・ 合流点付近の代表区間において、支川河床に存在する砂礫の粒径分布を把握・整理する。河床構成材料調査が実施されている場合はこの結果を使用する。

- ・ 流域の地質性状と、結果として支川河道に存在する砂礫の粒径、過去からの河床砂礫の存在状況の変遷等から、支川において発生する砂礫の質（粒径）および量について定性的に分析する。

【支川から本川に供給される砂礫の質・量の検討】

- ・ 支川の掃流力と支川に存在する砂礫の粒度分布から、本川に供給される可能性のある砂礫の質（粒径）および量を流砂量式から計算する。

検討にあたっては、上記の「代表区間」を適切に設定すること（特異な箇所を含まず、流砂量計算からの供給量推定に大きな齟齬がないこと）が大事である。

なお、河川測量および河床構成材料の調査においては、以下に留意する。

※河川測量

- ・ 測量方法は通常の測量業務において行われる調査を基本とするが、経済上難しい場合は簡易測量でもよい。
- ・ 測量区間は支川の地形的状況を代表する区間。
- ・ 測量地点（測線）は河床に働く掃流力を算出可能とするよう最低3断面以上。
- ・ 測量時期は出水や土砂崩壊等といったイベントの発生時期を考慮し設定。

※河床構成材料

- ・ 調査方法は面積格子法及び線格子法を基本とする。写真による画像解析でもよい（本川調査地点との比較ができることが条件）。
- ・ 材料採取地点は、支川の河床構成材料を代表する地点とし2地点以上（測量断面区間内）。
- ・ 調査時期は出水や土砂崩壊等といったイベントの発生時期を考慮し設定。

また、優先的に調査対象とすべき河川として、以下を考慮する必要がある。

※相対的に多くの流量が流入する河川

※河床勾配が急峻であり砂礫供給能力が高いと思われる河川

※特に崩壊地を多く有する河川

### 6.2.3 材料 s、t の動き方

材料 s、t の存在状況そのものを予測するのは容易ではなく、一次分析にはなじまない（その方法の一部は 6.3.3 で扱う）、ここでは、材料 s、t になりうる、材料 m よりはるかに細粒の粒径集団の動態を扱う。2章で述べたように、主材料である m と材料 s、t になりうる粒径集団とは同じ流砂形態を取らず、後者はふつう「通過型」として流送される。ダム地点を含む水系内での当該粒径集団のフラックスを大局的におさえることが、材料 s、t の挙動を把握する上での基礎情報となる。

着目している粒径集団の流送が通過型であることから、ダムによる土砂扨止の影響が材料 m に比べずっと早く水系全体に行き渡ると考えられる。このことから、変化の初期過程に着目した材料 m の一次分析とは逆に、ここでの一次分析においては、ダム建設後に最終的に到達するであろう水系内フラックスだけに着目するという簡略化アプローチを採る。

フラックスは、図 6.2-2 に示すような「水系土砂動態マップ」によりわかりやすく図示することができる（平館ほか 1999）。以上から、材料 s、t の動き方に関する一次分析は、材料 s、t になりうる通過型の粒径集団に関する土砂動態マップを、ダムの影響が行き渡った状況を想定して描くことに帰着する。

以下に、マップ作成の方法を紹介する。対象粒径集団は、材料 s、t のうち何に重点を置くかで変わってくる。ふつう、まず砂集団が対象になるので、以下の説明は砂集団について行っている。シルト・粘土集団を対象にする場合でも、基本的に同じ方法が適用できる。

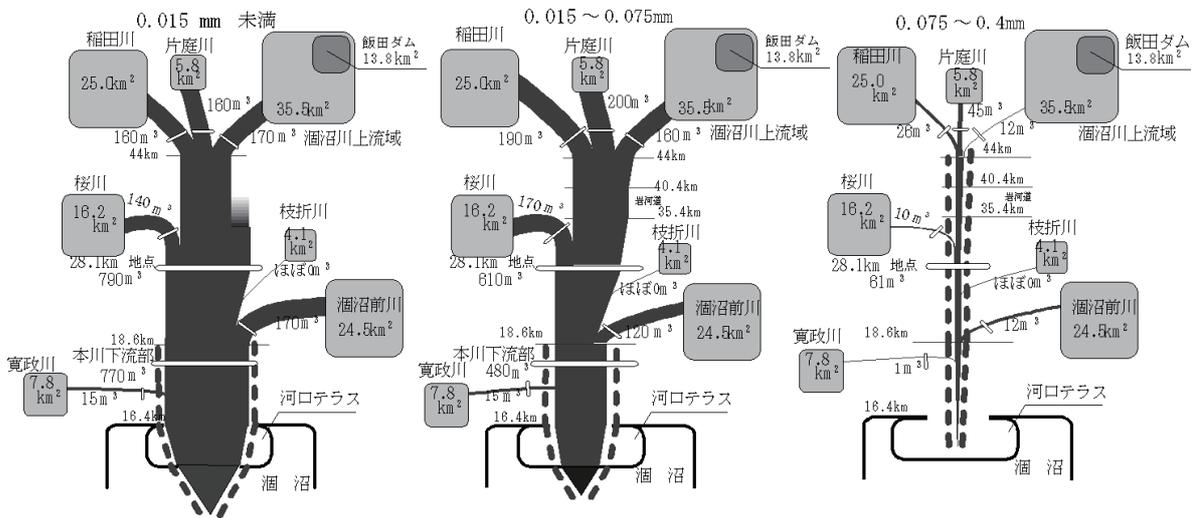


図 6.2-2 水系土砂動態マップの作成例（酒沼川流砂系：1998年9月16日洪水による総移動量）  
 河道の太さが土砂移動量に対応。河道を跨ぐ白線は観測点であり、傍らに土砂通過量が示されている。混合型で輸送される区間のみ、河道の横に点線を付している。サブ流域を表す四角内の数字は土砂生産源の面積である。このようなマップを描くことによって、どのサブ流域がどの粒径集団の供給を主に担っているかの把握、河口テラスを構成している粒径集団とその先の湖底の底質を構成している粒径集団の特定、たとえばダム貯水池建造などのインパクトがどの粒径集団にどのような影響を与えるか？そしてそれが河床変動や海岸侵食に現れるものか、そうでないか、などの大局的な診断を的確に下すことができる。

## (1) 流域面積比からフラックスを推定する方法（分析例-1）

砂の動態について、一次近似として、流域面積比から、その供給量を推定することが考えられる。すなわち、砂の供給量が流域面積に比例するものと仮定し、面積比見合いで砂の収支を推定する方法である。作成例を図 6.2-3 に示す。このときの前提条件として、

- ・ 流域内の地形形状や地質性状はダム集水域を含む本支川でおよそ均一
- ・ 破砕帯や断層等地質が不連続になる等の要因がない
- ・ 通過型の土砂の連続性を変化させるダム等が存在しない
- ・ 供給土砂に占める砂の構成比率が全川に渡り均一
- ・ 流域に生じる降雨（外力）も流域内においておよそ均一
- ・ 流域内の河道における人為改変もすべて同程度

があげられる。

この方法は、分析に当たって流域の平面図しか必要としないという手軽さがあることから、上記の条件が厳密に成立しない河川においても、この方法でマップを簡易に作成することで一次近似的な情報を得ることができ、有用となる場合が多い。

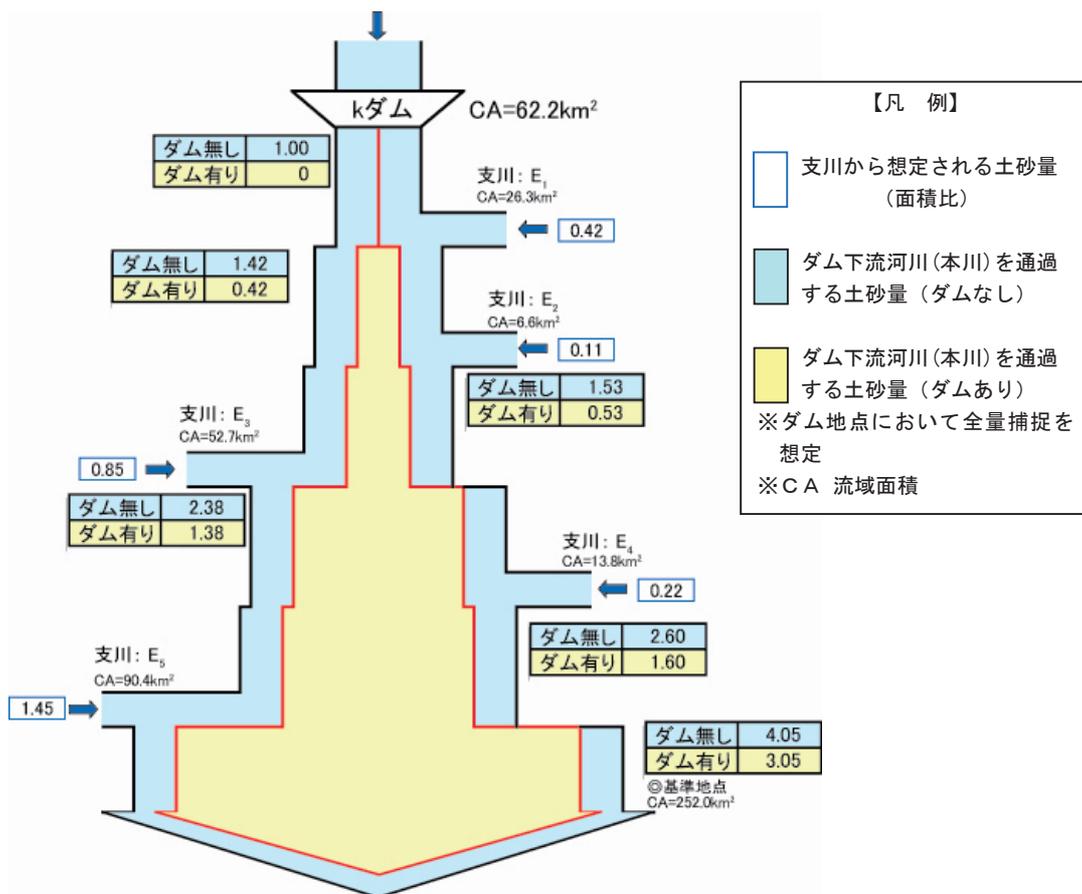


図 6.2-3 砂集団の水系土砂動態マップの作成イメージ（分析例-1）  
（ダム地点でのダム無し時の砂流送量を1として表示）

(2) 流域面積比に地形・地質等を加味してフラックスを推定する方法（分析例-2）

一般に砂の供給量は、流域面積や地形、地質および外力となる降雨（流量）などにより決定され、必ずしも流域面積に比例しない。本支川の当該粒径集団フラックスをもう少し精度良く推定する必要がある場合には、流域面積以外の要因も考慮する必要がある。

この場合の検討方法として、既設の類似ダムにおける実績堆砂量と、土砂を発生させる流域の各種要因の関係を単相関により関数化し、相関性の高い式をもって比堆砂量を推定する簡易的方法が考えられる（たとえば国土交通省河川局治水課・河川環境課 2005）。支川流域の流出土砂量は、推定した関数が適用可能と仮定する。ここに類似ダムとは、ダムや貯水池の規模・地形・地質を基本とする流域特性が当該ダム及びその流域と類似するダムを指す。また各種要因としては、「水文・貯水池特性」「地形特性」「地質・被覆特性」が考えられる。

まず、当該ダム及び流域の近傍に供用されている既設ダムを抽出し、類似性を確認する。次に類似ダム（複数ダム）における実績堆砂量から比堆砂量を算出するとともに、各種要因との関係を関数化し、相関性の良い要因を抽出する（図 6.2-4）。これにより算出された関数に、支川における要因を代入することで、支川流域単位の発生土砂量を推定する（図 6.2-5）。当該ダム下流の本支川フラックスは、支川流域単位の発生土砂量を下流方向に合計することで算出する（図 6.2-5）。ここでは砂のフラックスを対象にしているため、全流出土砂に占める砂の割合を何らかの方法で推定あるいは設定し、それを掛けて砂のフラックスとする。

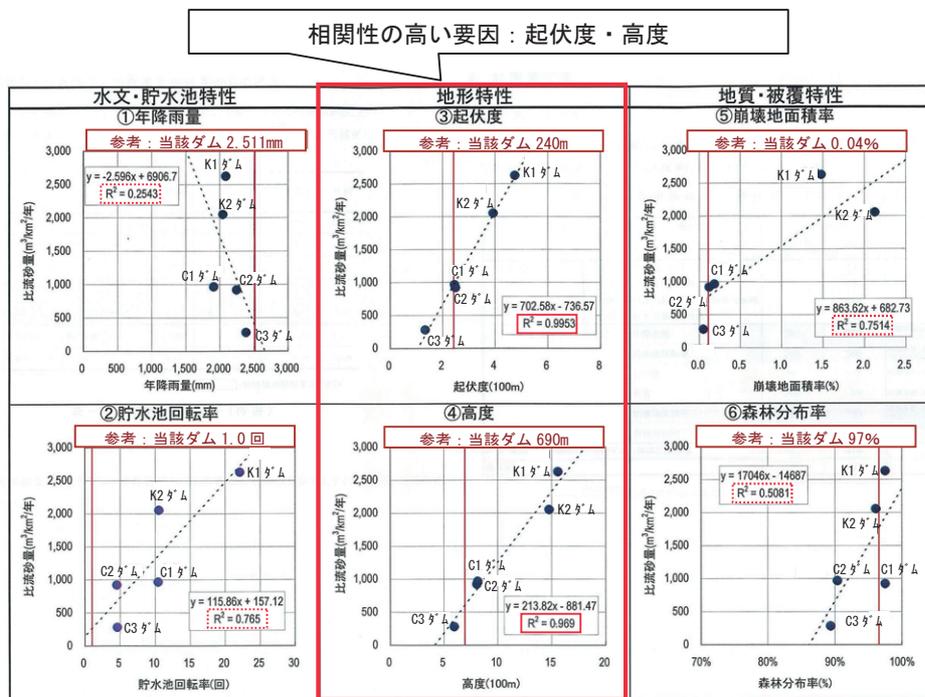


図 6.2-4 類似ダムにおける土砂発生要因と発生量の関係の分析イメージ（全粒径の土砂量）

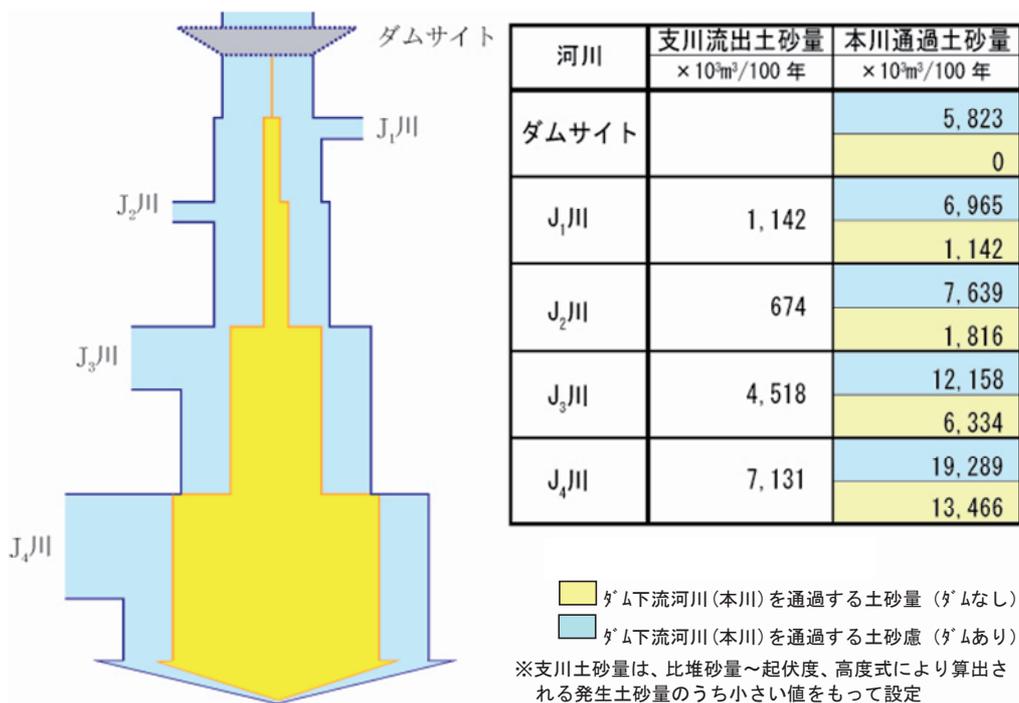


図 6.2-5 砂集団の水系土砂動態マップの作成イメージ (分析例-2)  
 (100年間の全土砂流送量で表示。砂についてのマップにするには、砂流送量の比率を掛ける)

## 6.2.4 河道状況変化に関する仮説（現象シナリオ）の吟味

5.3.2 に示した調査から得られる河道に関する情報と、6.2.2 と 6.2.3 から得られる情報から、一次分析のレベルであっても、対象とする河道に起こりうる現象について、あるいは現在の河床がどのような特徴をもって形成されていると解釈できるかについて、ある程度の仮説やシナリオを設定することができる。予測に直結する現象の絞り込みを体系的に行う方法は次節 6.3 に不完全ながら用意されているが、そこに進む前に（そのような“ルール”に頼り切るのではなく）、得られた情報から素直に何が言えるか、言えないかを吟味しておくことは、6.3 の準備としても、また予測を大局的に見て適切なものとする上でも重要である。そのような検討を通じて、新たに取り上げるべき事象や特徴等の発見、課題の抽出にもつながると期待される（図 6.1-1 参照）。

この吟味は、以上の主旨から、基本的に対象に応じて個々に進めることになるが、それでも、以下のような切り口が有用となる場合が多い。

## a) 材料 m の動きやすさ

- 材料 m に属する粒径集団の洪水時の動きやすさはどうか？ ほとんど動かないか、ある程度の頻度で動くか？ これが縦断的に変わる場合、その縦断的配置はどうなっているか（どの区間で動きが鈍く、どの区間で活発に動くか）？
- 材料 m が動きうる区間において、動き出す洪水規模はいかほどか？ 平均年最大流量のレベルか？ それよりかなり低い頻度か？
- 上記が、ダムによる流量調節でどう変わるか、あるいはあまり変わらないか？
- 材料 m がほとんど動かず静的安定状態（「岩川」的）と見なせる区間があるか？

## b) 材料 m 流送が河道縦断形とその変化を規定する度合

- 材料 m がほとんど動かず静的安定状態（「岩川」的）と見ることができると、材料 m の流送が河床変動を起こすという状況にないと言えるか？
- 材料 m の動きやすさの縦断分布が流送量の縦断分布の特徴を定性的に表すとしたとき、それは現在の河道縦断形を概ね説明するか？ それとも、説明できず、「材料 m の動きやすさの縦断分布が流送量の縦断分布の特徴を定性的に表す」とした仮定が成り立たないと考えるべきか？

[例] 河道縦断形が上に凸であり、上記の仮定に則ると、材料 m の流送量が下流に向けて有意に増加することになるが、それに見合うような河床低下は生じておらず、縦断形は概ね安定していると思なせる。このことから、「実質的に河床直下の岩の形で縦断形が決まっており、材料 m は岩の上にとりどころ一時的に薄く乗っているだけで、上流から供給された材料 m は転がるように下流に向けて通過して行くだけである」という仮説の方が有力である。

- 材料 m のすぐ下に岩が位置しており、少しの河床低下が露岩につながり、したがって有意な河床低下は起こらない状況か？ それとも、材料 m の堆積層

が厚く、材料 m 流送量の縦断分布によっては、有意な河床低下が起こりうる状況か？

c) 材料 m の場所的不均一性

- 材料 m の粒度が場所的に大きく異なり、材料 m が複数の粒径集団に分かれ、それぞれが空間的に異なる分布を示している状況か？ このことが、材料 m の動態や河床変化特性を大きく規定する状況か？ それとも、材料 m は平面的に概ね一様か？

[例] 材料 m が2つの粒径集団からなり、そのうちの小さい方の粒径集団は 1/3 規模の洪水から動き出すのに対して、大きい方は 1/50 規模の洪水によっても動くことがない。また、大きい方の粒径集団は、縦断的に所々に存在し、その存在位置はランダムに見える。以上から、大きい方の粒径集団は、山腹から直に供給された岩の残滓であり、動きがほとんど無いことから、帯工的な機能を有し、活発な動きを持つ小さい方の粒径集団がそこを乗り越えて通過するという動態を持つ。

d) 支川等の影響度

- 支川からの材料 m の供給は活発で、本川の材料 m 流送に対し一定の影響力を持ちそうか、そうでないか？
- 材料 s、t になりうる粒径集団の支川からの供給によって、材料 s、t になりうる粒径集団のダムによる扞止の影響が下流に向けて早く緩和される状況か、そうでないか？
- 山腹からの材料 m や材料 s、t の供給は有意か？

e) 河道へのインパクトに関する履歴の影響度

- 河川内の横断構造物（既設のダムや堰を含む）は、現在の河床に有意な影響を及ぼしているか？ そうでない場合、元々影響度が小さかったのか、それとも、一時期影響が大きくなり、再び小さくなるというような経過を辿ったのか？

[例] 砂防ダムによって、一時期材料 m の供給が扞止されたが、ある年数が経過して満砂状態となり、一定の減少や細粒化を伴うものの、再び材料 m の供給が始まり、現在に至っている。

- 自然の大きなイベント（大洪水や大崩壊など）が現在の河床に影響を残しているようなことがあるか？ 河道掘削など河道への直接インパクトの影響残存はどうか？

[例] 当該区間直上流で数年前に大規模な山腹崩壊があり、大量の砂礫が流入し、河床が 3-5m 上昇し、また河床材料が細かくなった。上流からの大量の砂礫供給は終息したので、今後、徐々に河床が低下し、表面の河床材料が粗くなっていくと推定される。いずれにしても当該河道区間は、今後しばらくは、こうした大きな変化の過程にあるとみなせる。

これらの切り口は2.7.1で述べた山地河道の特性と密接に関わるものである。石川と岩川という山地河道を理解する上で重要な区分も（池田 2001）、一次分析を踏まえて材料 m の動きやすさを見ることで、ある程度明らかになる。簡易な調査・分析から明らかにできることは少なくなく、そのメリットを最大限生かすことは、本資料が扱う分野を実務に資する技術として充実させていくという観点から重要である。

以下に、吟味がどのようなものになるかについてイメージを掴めるように、現況の河道の成り立ちについての分析と、ダムにより河道状況がどう変わりうるかについての分析の例を示す。

### **[現況分析の例]**

#### **【山間渓谷部を流れる川】**

##### **[情報の整理]**

i ダム下流の L 川は、そのほとんどが渓谷区間であり、多くの区間が露岩した状態となっている。河床には、部分的ではあるが多様な粒径の礫が分布している。

河道には、部分的に過去、河床低下した痕跡が見られる。

河道には、平均年最大流量時に 40cm 前後の粒径の礫を動かしえる営力が働いており、河床に分布する砂礫のほとんどが活発に動く可能性がある。

当該区間には支川の流入がなく、砂礫の供給は基本的に上流からの流下か、もしくは斜面からの岩盤の崩落によるものである。

##### **【現況河道の形成にかかわるシナリオ（仮説）の吟味】**

i ダム下流の L 川の河床形態は、上流からの砂礫の流入と流出のバランスとは無関係に、基本的に岩により現在の河床が維持されている可能性がある。

すなわち河床高は、露岩部の上に砂礫が薄く堆積し、現在の高さが維持されていると考えられる。なお、岩盤の裏側や河積の局所的な拡大が見られる区間では、堆積層が比較的厚く堆積している。上流に砂防堰堤や発電取水堰堤が過去に設置されているために、これらの影響を受けて過去一時期、河床高が若干低下して現在に至った可能性がある。

**【将来予測の例】****【山間渓谷部を流れる川】****【情報の整理】**

i ダムの供用により、出水時のピーク流量は平均年最大流量時に  $500\text{m}^3/\text{s}$  ( $1120 \rightarrow 620$ : ダムサイト地点) 低減される。しかし、流量の低減に伴う掃流力の低下があっても、河道にある 40cm 前後の粒径の礫を動かしえる力が引き続き働く。したがって河床に分布する砂礫のほとんどが現況と変わらず動く可能性がある。

当該区間には支川の流入がないため、土砂供給のほとんどが遮断される。

**【将来河道の変化にかかわるシナリオ（仮説）の吟味】**

i ダム下流の L 川の河床形態は、上流等からの砂礫の流入が遮断される一方で掃流力はダムの有無にかかわらず大きいため、結果として、河床砂礫の多くが流出し、一定範囲で河床が露岩化する可能性がある。なお、岩盤の裏側や河積の局部的な拡大が見られる区間に分布する砂礫は、ゆっくりと減少して行く可能性がある。岩盤上に薄くのった砂礫の挙動には未解明な点が多いので、これらの程度の予測は難しく、継続したモニタリングが必要である。

河床高は、露岩部の上に砂礫が薄く堆積し現在の高さが維持されていると考えられるため、大きな変化は生じない。

この種のシナリオを組み立てることによって、どのような追加調査が必要か、どのような詳細分析をどのような手法で行うべきか、それらの有効性ととも判断し、必要に応じて 6.3 の予測作業につなげていく。

### 6.3 河道状況変化予測の道具立てと使い方

#### 6.3.1 ダムー下流河道関係把握図と一次分析結果を用いた現象の絞り込み

3.3.2において、ダムー下流河道関係把握図を用い、ダムー下流河道関係を大局的に把握する手法を説明した。また、一次分析を経ていれば、6.2で説明したように、材料  $m$  に関する動きやすさが無次元掃流力（あるいは摩擦速度と限界摩擦速度との相対関係）から既に把握できているはずである。そこで、ここでは、ダムー下流河道関係把握図を用いた簡易判定法（3.3.2(2)参照）と追加判定（3.3.2(3)参照）に基づき、予測の対象とする現象を絞り込むこととする。以下その手順を説明する。3.3.2も合わせて参照されたい。

なお、ここでは、手順化を優先させ、絞り込みを割り切っている。この手順に入る前に、6.2.4で説明したように、対象としている河川の現象について素直に吟味しておくことが必要であり、それを行っておくことで、手順に従って得た結果から機械的に判断するのではなく、その意味や信頼度、限界も加味して判断を行うことを可能すると期待される。このこと具体例は以下である。

「ダムー下流河道関係把握図」は、材料  $m$  の存在を前提にしており、また、材料  $m$  の供給や、材料  $s$ 、 $t$  になりうる材料の供給が概ね山地流域面積に対応していることを前提にしている。したがって、露岩等により材料  $m$  が存在しない場所が広範囲に出現する状況や、土砂供給が局所的・突発的に行われ、それが卓越する場合などには、以下の手順は有効性を失う。「把握図」利用のそもそもの妥当性を判断するためにも、6.2.4で説明したような対象河道の吟味を予め行っておくことが重要なのである。

#### [ステップ-1] ダムー下流河道関係把握図へのプロット

- ①ダム下流河川のある地点から見た全流域面積  $A$  とダム集水面積  $Ad$  を整理し、1から両者の比（ダム集水面積/全流域面積： $Ad/A$ ）を減じた値（ $1-Ad/A$ ）を算出する（すなわち残流域面積比）。この作業をダムから下流の一定距離毎に実施する。ダム下流で合流する支川にもダム貯水池がある場合には、そのダム貯水池の作用（ $Ad$ ）を同じ方法で考慮する。
- ②ダム地点における平均年最大流量（流入量  $Q_{in}$  と放流量  $Q_{out}$ ）を整理する。ダム地点からダム下流のある地点までに流入する支川の洪水流量  $Q_{支川}$  を整理する。 $Q_{支川}$  は、 $Q_{in}$  とダム集水域面積から算出されるダム地点での比洪水流量にダム下流の残流域面積（ダム集水面積を除いた流域面積）を掛けて求める。  
これらから、 $(Q_{out}+Q_{支川})/(Q_{in}+Q_{支川})$  を算出する。この作業をダムから下流の一定距離毎に実施する。ダム下流で合流する支川にもダム貯水池がある場合には、そのダム貯水池の作用を同じ方法で考慮して、分子の  $Q_{支川}$  は支川ダムありの条件で、分母の  $Q_{支川}$  は支川ダム無しの条件で、それぞれ算定する。する。
- ③上記①で算出した値を最小土砂流送比として X 軸にプロットし、上記②で算出した値を流量比として Y 軸にプロットする。図 6.3-1 参照。

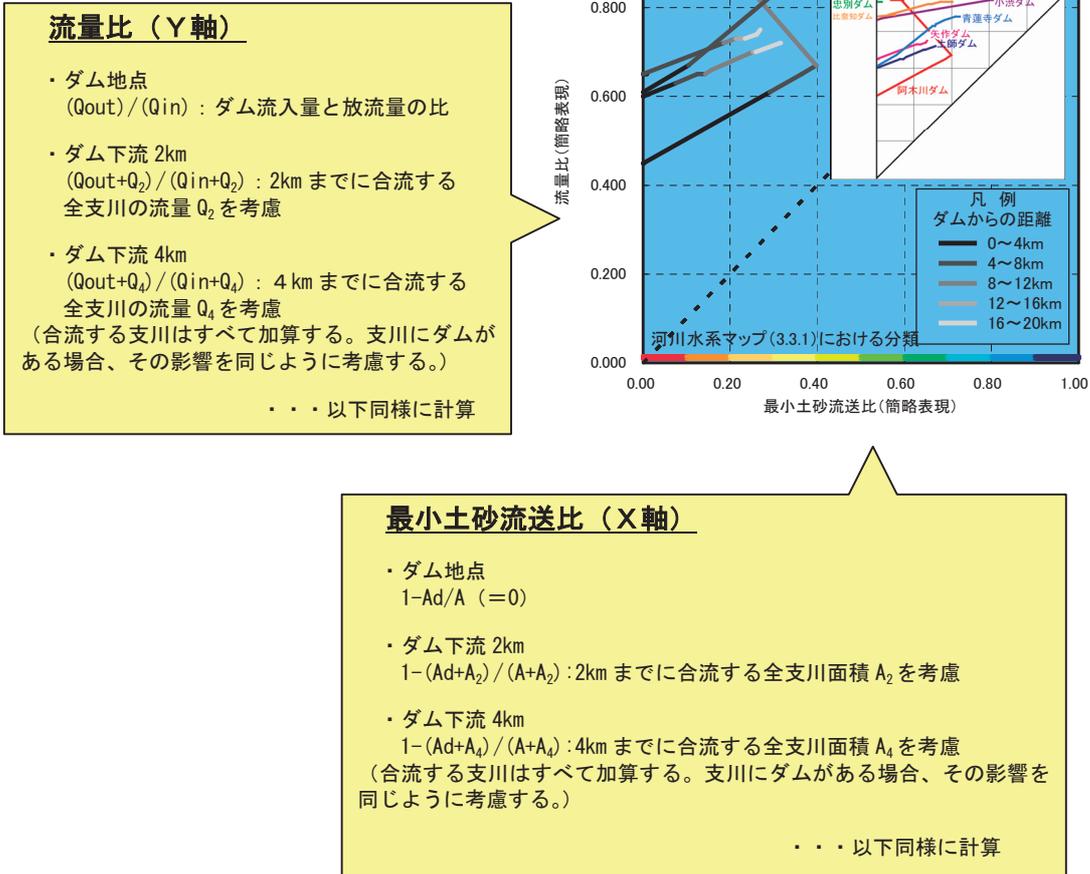


図 6.3-1 ダムー下流河道関係把握図へのプロット

**【ステップ-2】 最小土砂流送比～材料 m 無次元掃流力図の作成**

- ① 最小土砂流送比の算出はステップ 1 と同様。
- ② 材料 m の動き方に関する一次分析 (6.2.2(1)) の結果から、ダム下流の河川の各点における平均年最大流量時 (当該ダムが無い状態を想定。ダム流入量に基づいた算定でもよい) の材料 m に関する無次元掃流力を算出する。
- ③ 上記①を最小土砂流送比として X 軸にプロットし、上記②を材料 m 無次元掃流力として Y 軸にプロットする。図 6.3-2 参照。

**【ステップ-3】 領域の判別**

- ①プロットしたダムー下流河道関係把握図から、図 6.3-3 に従い、対象河道区間が I ~IV のどの領域に属するか、どの領域に近いかを判別する。
- ②最小土砂流送比～材料 m 無次元掃流力図から、対象河道区間の材料 m に関する無次元掃流力が 0.05 を下回る場合に「低移動性」と判別し、0.05 をかなり上回る場合に「高移動性」と判別する。図 6.3-2 参照。

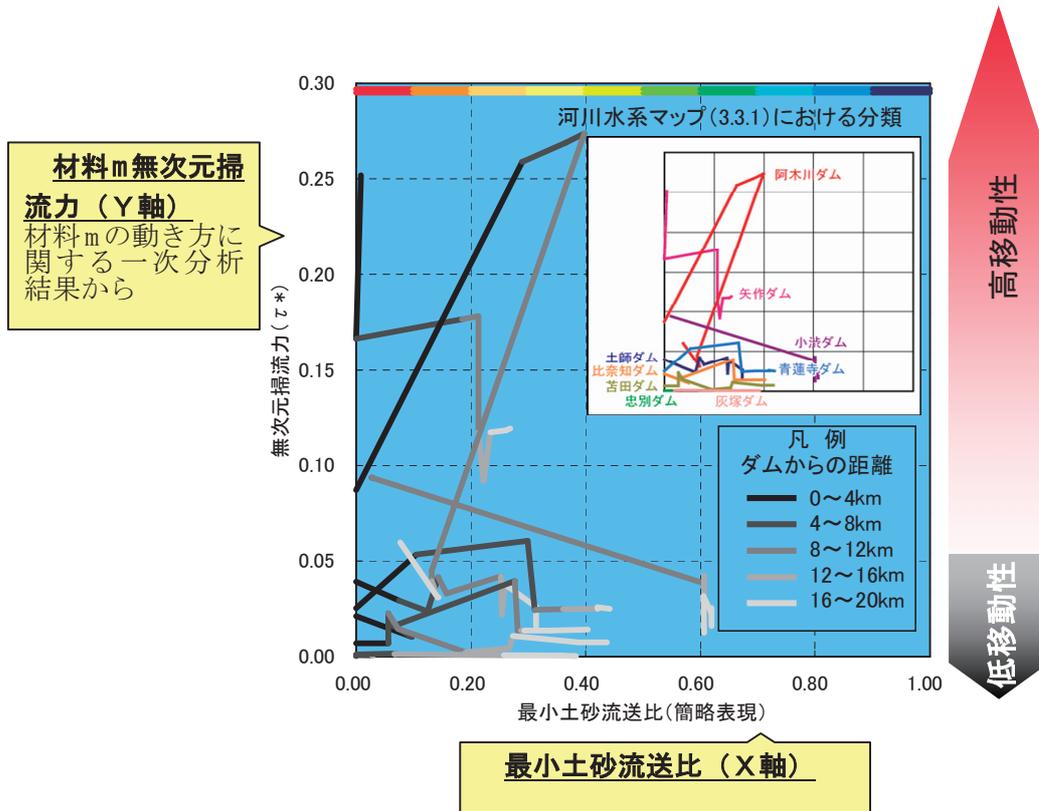


図 6.3-2 最小土砂流送比～材料 m 無次元掃流力図（ダム無し状態を想定して算定）の作成

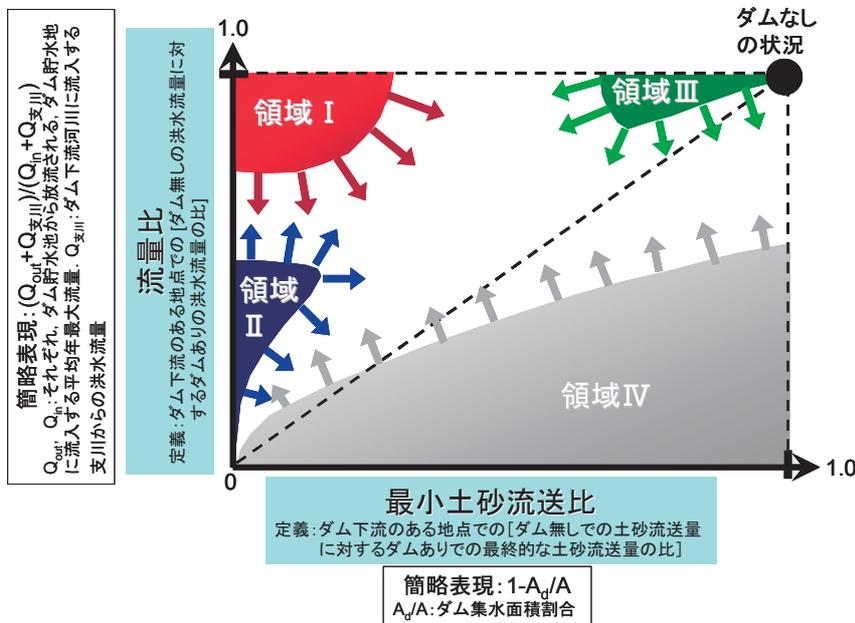


図 6.3-3 ダム一下流河道関係把握図の領域区分（図 3.3-4 の再掲）

- ・領域 I：流量比が大きく（1 に近い）、最小土砂流送比が小さい／
- ・領域 II：流量比も、最小土砂流送比も小さい／
- ・領域 III：流量比も、最小土砂流送比も大きい（1 に近い）／
- ・領域 IV：流量比が小さく、最小土砂流送比がやや大きい。

★領域区分は明確に分かれるものではなく、境界は状況によって移動しうる。また複数の領域の中間的な性質を持つ場合もあり得る。こうしたことを図中では矢印群で表現している。★なお、(0,0) と (1,1) を結ぶ直線より右下側のプロットは、簡略表現により軸の値を計算した場合は、理論上出てこない。

### 6.3.2 絞り込まれた現象に見合う予測手法の選定と適用

表 6.3-1 を用いて、当該河道区間についてどのような現象を想定するかについて当たりをつける。

表 6.3-1 a) は、判別された領域ごとに、ダム建設後の下流河道の状況について、どのようなことが想定できるかについてまとめたものである。ここでの記述は物理環境に関するものである。

同表 b) は、a) の記述に加えて、どのような生物応答が考えられるかについて、現時点で可能な範囲でコメントを試みたものである。ただし、b) においては、a) で取り上げた物理環境の応答の全ては対象とせず、a) の左から 1、2 列目を中心とし、一部 4 列目の応答を取り上げた。すなわち、材料 m が巨礫～小礫からなる河道における材料 m と材料 s、t の挙動に関わる応答に対して考えられる生物応答を記述している。

同表 c) は、a) の記述に加えて、その物理環境の応答をどのような方法で予測できるかについて現時点での限界もあわせて記述したものである。その内容を 6.3.3 で概説している。

まず、表 6.3-1 a) から、想定すべき物理環境の応答を特定する。次に、この物理環境の応答を踏まえ、また、同表 b) から可能性のある生物応答に関する予備考察を行い、予測の必要性やその要件等を検討する。予測が必要となった場合には、同表 c) を参考に、適用する予測手法を選択する。6.3.3 にある予測手法の概説も参考にする。

なお、同表 c) で扱う予測手法は物理環境に関するもののみである。これは、生物応答を予測する手法をまとめて提示できるほど検討が進んでいないからである。しかし、近年の研究の進展から、物理環境の応答とともに生じる生物応答について定量的な知見が蓄積されてきている。そこで、生物応答の予測に関して現時点で知っておくべき有用な情報を、同表を踏まえつつ、6.4 で掘り下げて記述した。生物予測に踏み込む際に重要となるので参照されたい。また、c) を見ればわかるように、物理環境の応答に関する予測手法についても、使える可能性があるものから、技術開発の範疇に入り、技術判断に使えるかどうかの確認が現段階でできていないものまで、幅広く取り上げている。これは、1.1 で述べたように、本技術分野が発展過程にあることを踏まえ、実務的情報だけでなく、技術の限界・課題点と今後の開発の方向性を合わせて提示しようとする方針に基づくものである。表 c) の活用には、このことに留意されたい。

6.3.1 の説明においては、手順をわかりやすく示すために、条件の設定に幅がある中で代表的な設定法のみを取り上げている。ここで示した道具をより有効に使いこなすために、こうした設定を修正することも状況に応じ考えていく。たとえば、洪水外力を平均年最大流量だけでなく規模の大きい洪水についても設定すること、あるいは平水時の流量も加えること、さらには、流量比や最小土砂流送比の算定をより実態に即した方法（流出計算や土砂観測など）を用いて行うこと、その際、支川等からの土砂の出方と流量増減のタイミングを粒径集団毎に丁寧に見ていくこと、材料 m の動きやすさを代表粒径 ( $d_{60}$  など) に関してだけでなく、 $d_{90}$  など別の粒径についても見ていく、などがある。また、領域区分は明確に分かれるものではなく、境界は状況に

よって移動しうる。また複数の領域の中間的な性質を持つ場合もあり得る。さらに、ダムからの距離が重要な因子の1つとなり、この距離が現象出現に要する時間や現象の程度を大きく規定する可能性があるので、表 6.3-1 の内容にダムからの距離というファクターを加味する必要がある場合もある。これにより、たとえば、表中の「ごくゆっくり」「ゆっくり」「比較的早く」のどれが妥当かを吟味することができる。

手順の根幹を理解しつつ、実際の問題に適用しながら臨機応変に手順を修正していくことをいとわないというスタンスが大事である。



表 6.3-1 想定される現象の絞り込みと予測手法の選定 b) 物理環境の応答への生物応答にかかわる含意 (1/2)

ダム竣工後の 流量変化 パターン	竣工前の河床移動性 (元々河床が動きやす かったかどうかの指 標)	河床材料の移動の程度、河床構成材料の変化 (このセグメントでは材料m→巨礫~小礫、 材料s→砂)		付着藻類 (文中では付着藻類、堆積有機物・無機物を含む付着物を議 論するため河床付着物として表現する)	底生動物
領域 I (左上方) ↓ 流量変化小	イ) 低移動性	<ul style="list-style-type: none"> <li>土砂供給量は極めて少ないが、洪水時の流水による攪乱の程度は維持される。</li> <li>竣工後も河床材料mの移動頻度は「低い」まま維持されるため、材料mの粒度組成は大きく変化しない。ただし、小礫等の小粒径集団が表層から減少する可能性がある。</li> <li>砂は早く抜け、河床表層及び表層下に砂が見られなくなる。</li> </ul>	↑	洪水時の流水作用により河床付着物はある程度剥離するが、砂によるクレンジング、材料mの移動に伴う付着物の剥離が期待できないため河床付着物の現存量は増加し、有機物・微細土砂が堆積して付着物の質は悪化する可能性がある。また、付着物の堆積、砂分の減少により餌食圧も期待できない。なお、餌食者の生息が困難となり餌食圧はこれらによって変化するので別途考慮する必要がある。	河床付着物の現存量が増加し、厚みが増すとワカゲ等の滑り型の底生動物が減少する。流量変化は小さいが元々河床の攪乱頻度が低いこと、表層下から砂、小礫の抜け出しが少ないうえ、移動性の低い造網型のヒカリガが増加する可能性がある。
	ロ) 高移動性	<ul style="list-style-type: none"> <li>土砂供給量は極めて少ないが、洪水時の流水による攪乱の程度は維持される。</li> <li>材料mは当初移動し、表層及び表層下から材料mの小粒径集団粗粒化が抜け落ちて推移する。</li> <li>移動頻度は「低い」状態へと推移する。</li> <li>砂は急速に抜け落ち、河床表層及び表層下において砂は見られなくなる。</li> </ul>	↑	洪水時の流水作用により河床付着物はある程度剥離するが、砂による摩耗効果は期待できない。また、粗粒化が進行すると材料mが移動しなくなり、河床付着物の現存量は増加し、有機物・微細土砂が堆積して付着物の質が悪化する可能性がある。付着物の堆積、砂分の減少により餌食圧も期待できない。なお、餌食者の生息が困難となるため餌食圧による河床付着物の低下も期待できない。なお、餌食者の生息環境の良否によって変化するので別途考慮する必要がある。	巨礫が河床表面に露出するため、ここに固着型のワカゲ、ユ、ウヅ、カサゴ、ヤドヒゲ等が増加する可能性がある。また、流量変化が小さいため粗粒化が進行し、河床の攪乱頻度が低下して、隙間隙間にヒカリガなどの造網型ヒカリガが増加する可能性がある。
領域 II (左下方) ↓ 流量変化大	イ) 低移動性	<ul style="list-style-type: none"> <li>土砂供給量は極めて少なく、洪水時の流水による攪乱の程度も減少する。</li> <li>材料mの移動頻度は「低い」まま維持されるが、更に「低い」状態へと変化するため、表層及び表層下の材料mの粒度組成に大きな変化は生じない。</li> <li>砂は非常にゆっくりと減少し、河床表層から砂が減少する。</li> </ul>	↑	洪水時の流水作用による河床付着物の剥離は領域 I と比較して期待できなくなる。また、砂による摩耗効果、材料mの移動に伴う付着物の剥離も期待できないため河床付着物の現存量は増加し、有機物・微細土砂が堆積して付着物の質は悪化する可能性がある。ただし、材料mの間隙に砂が残っている間はヤドヒゲが生息し、摂食に伴う河床付着物の減少が期待できる。なお、餌食等の摂食圧はこれららの生息環境の良否によって変化するので別途考慮する必要がある。	河床付着物の現存量が増加し、厚みが増すとワカゲ等の滑り型の底生動物が減少する。流量変化は小さいが元々河床の攪乱頻度が低いこと、表層下から砂、小礫の抜け出しが少ないうえ、移動性の低い造網型のヒカリガが増加する可能性がある。また、表層もしくは表層下に砂が残存する場合にはシジミ、カサゴ等が増加する可能性がある。
	ロ) 高移動性	<ul style="list-style-type: none"> <li>土砂供給量は極めて少なく、洪水時の流水による攪乱の程度も減少する。</li> <li>材料mの移動頻度は「高い」から「低い」に変化する。このため、材料mの粒度組成は大きく変化しないが、小礫等の小粒径集団が抜け落ちる可能性がある。</li> <li>砂はゆっくりと減少し、河床表層から砂が減少する。</li> </ul>	↑	洪水時の流水作用による河床付着物の剥離は領域 I と比較して期待できなくなる。また、砂による摩耗、材料mの移動に伴う付着物の剥離も期待できないため河床付着物の現存量は増加し、有機物・微細土砂が堆積して付着物の質は悪化する可能性がある。竣工直後(具体的な期間は洪水の頻度による)は材料mの間隙に砂が残りヤドヒゲの生息と摂食に伴う河床付着物の減少が期待できるが、砂が抜け落ちるとヤドヒゲの生息が困難となり、摂食による付着物の減少が期待できなくなる。なお、餌食等の摂食圧はこれららの生息環境の良否によって変化するので別途考慮する必要がある。	領域 II のイ) 低移動性とほぼ同じ応答となる。

\*領域 I ロ) において、礫岩化が生じる場合には、河床の場の性質が大きく変わることになり、付着藻類・底生動物の両方に負の影響を有意に与えらるると考えられる。

表 6.3-1 想定される現象の絞り込みと予測手法の選定 b) 物理環境の応答への生物応答にかかわる含意 (2/2)

ダム竣工後の 流量変化 パターン	竣工前の河床移動性 (元々河床が動きやす かったかどうかの指 標)	河床材料の移動の程度、河床構成材料の変化 (このセグメントでは材料 <sub>m</sub> →巨礫～小礫、 材料 <sub>s</sub> →砂)	(文中では付着藻類、堆積有機物・無機物を含む付着物を議 論するため河床付着物として表現する)	底生動物
領域III (右上方)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・土砂供給量・流量、土砂及び流水による擾 乱の程度に大きな変化は生じない。</li> <li>・河床材料<sub>m</sub>の移動頻度、粒度組成に大きな 変化は生じない。</li> <li>・砂の供給量に大きな変化は生じない、河床 表層に見られた砂の抜け落ちはあまり生じな い。</li> </ul>		領域IIIの位置によって付着藻類への応答は相当変化すると考 えられるが、ダム竣工前と比較して河床構成材料、擾乱の程 度が小さければ、河床付着物に大きな変化は生じないだろ う。	領域IIIの位置によって底生動物への応答は相当変化すると考 えられる。ダム竣工前と比較して対象サイトの河床構成材 料、擾乱の程度が同じなら底生動物相に大きな変化は生じな いだろう。
	領域IV (右下方)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・残流域から過剰に土砂が供給される。</li> <li>・河床材料<sub>m</sub>が堆積し、局所的に堆積し河床 上昇が生じる可能性がある。</li> <li>・砂が材料<sub>m</sub>の間に増加し、場合によっては 河床表層を砂が覆う場合がある。</li> </ul>		材料 <sub>m</sub> が局所的に堆積する、もしくは、砂が比較的広い範囲 に堆積するケースが想定される。砂の堆積により材料 <sub>m</sub> の露 出面積が小さくなると付着藻類が繁茂できなくなる。これら 状況下では材料 <sub>m</sub> の供給源の供給量減少を引き起こし、付着藻類に依 存する上位の栄養段階に位置する生物の生息に影響する。 脚注**

\*\*領域IIIにおいて、泥分の堆積が想定される場合には、これらが無機物量の多い河床付着物を形成し、付着藻類を摂食する底生動物だけでなく底生動物全般について負の影響を与え、生息密度を下げる可能性がある。  
シルトが堆積して基質上の細かい間隙や基質間隙が埋まると、底生動物のハビタットやレフュージアの損失に繋がる。また、底生動物自身や餌がシルトによって覆われる不利益もあるだろう。

表 6.3-1 想定される現象の絞り込みと予測手法の選定 c) 物理環境の応答十対応する予測手法

	礫を材料mとする河道区間において、材料tやsと してふるまう砂について (セグメントMやセグメント1を想定)	材料mを構成する礫の挙動について (セグメントMやセグメント1を想定)	材料mを構成する砂の挙動について (ダムが置かれるセグメントM、その下流のGセグ メント(セグメント1, 2-1)のさらに下流のセグメ ントを想定)	礫を材料mとする河道区間において、材料tとして ふるまう砂について (セグメントMやセグメント1を想定)
領域Ⅰ (左上方)	<ul style="list-style-type: none"> <li>材料mを構成する礫や石の間にある砂が比較的早く抜け出す可能性がある。</li> <li>植生域に材料sとして堆積している砂が抜け出す可能性がある。</li> </ul> <p>A3 C2 D3</p>	<p>イ) 河床材料が従前(ダム建設前)と同じであり動かない状態が維持される。</p> <p>ロ) 粗粒化がごくゆっくり、ゆっくりにあるいは比較的早く進行する。ある程度あるいは若干の河床低下を伴う可能性もある。粗粒化が進んだ場合、材料mの動きの活性度が低下する。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>河床低下が起こる場合、堆積層が薄いと露岩化が起こる可能性がある。</li> <li>場合によっては河床形態が固定化あるいは不鮮明になる可能性がある。</li> </ul> <p>A1 B2-3 C2</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Sセグメント内の上流から河床低下が進行する可能性がある。</li> </ul> <p>A1</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>有意な変化が起こらない可能性が高い。</li> </ul> <p>C2</p>
領域Ⅱ (左下方)	<ul style="list-style-type: none"> <li>材料mを構成する礫や石の間にある砂がゆっくり抜け出す可能性がある。</li> <li>植生域に材料sとして堆積している砂がごくゆっくり抜け出す可能性がある。</li> </ul> <p>A3 C2 D3</p>	<p>イ) 河床材料が従前(ダム建設前)と同じであり動かない状態が維持される。</p> <p>ロ) 従前(ダム建設前)はそこそこ動いていた河床材料の動きがやや鈍くなり、この際粗粒化を伴う可能性はある。場合によってはほとんど動かなくなる(この場合、粗粒化は伴わない)。いずれにしても、材料mの動きの活性度が低下する。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>場合によっては河床形態が固定化あるいは不鮮明になる場合がある。</li> </ul> <p>A2 B2-3 C1</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Sセグメント内の上流から河床低下がゆっくり進行する可能性がある。</li> </ul> <p>A2</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>有意な変化が起こらない可能性が高い。</li> </ul> <p>C2</p>
領域Ⅲ (右上方)	<ul style="list-style-type: none"> <li>砂の挙動に大きな変化は起こらない可能性が高い。</li> <li>材料mを構成する礫や石の間にある砂が抜け出すとしても、ごくゆっくりである可能性が高い。</li> </ul> <p>C2</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>大きな変化は起こらない可能性が高い。</li> </ul> <p>A2 B2-3</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>大きな変化は起こらない可能性が高い。</li> <li>河床低下が起こるにともくゆっくりである可能性が高い。</li> </ul> <p>C2</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>有意な変化が起こらない可能性が高い。</li> </ul> <p>C2</p>
領域Ⅳ (右下方)	<ul style="list-style-type: none"> <li>材料mを構成する礫や石の間にある砂の量が少し、場合によっては相当増える可能性がある。</li> <li>極端な条件では、砂が河床を覆う場所が出てくる可能性がある。</li> </ul> <p>A2 C2 D3</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>材料mの堆積により河床が(支川合流部などを中心に)局所的に、あるいは一定範囲で)上昇する可能性がある。</li> </ul> <p>A2 B2</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>多くの砂を供給する支川の合流点付近を中心に、堆積により河床が上昇する可能性がある。</li> </ul> <p>A2</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>縦軸の値が0の近傍にまで極端に下がる場合、一時的に、あるいは相当期間、材料mを構成する礫や石の間に細粒土砂がたまる可能性がある。</li> </ul> <p>A2-3 C2 D3</p>

マイクロロハビタット 陸域植生	リーチ (マイクロロハビタット)	セグメント (リーチ)	マイクロロハビタット						
A 一次元の混合粗粒河床変動計算									
B 混合粗粒平面河床変動計算									
C 植生消長シミュレーション									
D 礫間にある砂の抜け出しに関する一次元計算									
● 一次分析(だけから判断する)									
<table border="1"> <tr> <td>添え字1</td> <td>技術判断に使える可能性がある</td> </tr> <tr> <td>添え字2</td> <td>技術判断に使える可能性が少しある</td> </tr> <tr> <td>添え字3</td> <td>技術開発という点で試行する価値はあるが、技術判断に使えるかどうかの確認は不十分である</td> </tr> </table>				添え字1	技術判断に使える可能性がある	添え字2	技術判断に使える可能性が少しある	添え字3	技術開発という点で試行する価値はあるが、技術判断に使えるかどうかの確認は不十分である
添え字1	技術判断に使える可能性がある								
添え字2	技術判断に使える可能性が少しある								
添え字3	技術開発という点で試行する価値はあるが、技術判断に使えるかどうかの確認は不十分である								

### 6.3.3 種々の予測手法

#### (1) 一次元の混合粒径河床変動計算

横断面内で水理量や河床材料が一様であると仮定し、水理量と土砂流送量の縦断方向（流れ方向）変化を計算し、各地点での粒径ごとの土砂収支から河床高および河床材料の時間変化を得る。掃流砂・浮遊砂に関する流砂量式に基づいて粒径毎に土砂流送量が計算され、交換層の考え方と修正エギアザロフ式等により多様な粒径の混合状態を考慮する。詳しくは水理公式集（土木学会水理委員会 1999）や河川砂防技術基準（建設省河川局 1997）などを参照されたい。山本ほか（1992）は、1次元河床変動計算について実務的な観点から課題を整理し、いくつかの改良方法を示している。

以下に、参考として、計算法の適用にかかわる実務的課題と対応の考え方について述べる。以下に共通しているのは、現地調査結果をそのまま用いて機械的に計算を行い、結果を100%信じて技術判断を行うのではなく、現地河道の情報に関する不十分さ、計算法の限界、技術判断すべき内容を踏まえて、計算法の適用の仕方（条件設定、計算結果の解釈）を個々に吟味するというスタンスの重要性である。

#### 1) 材料 m の動態に伴う河床変化を主対象とする場合の粒径範囲の設定

材料 m の動態に伴う河床変化を対象にする場合は、2.6.2(1)で述べたように、河床材料のうち主構成材料（材料 m）の粒度分布に基づく流砂量計算から供給土砂を与えることを基本にするのが適切と考えられる。

川底であっても、河床表面には、材料 t に相当するものを多少（ふつう1割以下だが幅がある）含んでいることが多い。この材料まで含めて流砂量計算をすると、確かに計算上は、材料 t に相当する、したがって通過型にあたる土砂の供給量が計算される。しかし、平常時に川底表面にある材料 t の割合が、出水中にそのまま維持される根拠が無く、それらの割合が時間的に有意に変動する可能性を否定できない。加えて、礫間に存在する材料 t の挙動は、通常の河床変動計算では必ずしもうまく表現することができない（このことは6.3.3(4)で説明する）。このため、平常時に観察された河床表面での存在割合を用いて通常の流砂量計算によって算定した材料 t の流砂量は誤差を伴い、それを計算区間上流端での供給土砂量として与えた河床変動計算は実態と合わない結果をもたらす可能性がある。材料 t は材料 m に比べずっと流送されやすいので、多くの場合、こうしたやり方で材料 t になりうる土砂集団を計算に機械的に加えても結果に大きな影響を与えないと考えられるが、この点をいちいち確認するのは面倒である。このような面倒を避けるため、混合型、したがって材料 m の流送や河床変動の計算をする場合、最初から、材料 t、したがって通過型に当たる粒径範囲を除去して（それらが無かったものとして、残りの材料を100%として粒径加積曲線を再配分する）、供給土砂量の設定を含む全ての計算を進めた方が良く、解釈や整理もしやすい。

材料  $t$  の挙動を追跡したい場合には、供給量の与え方も含め、それに見合った方法をとることが必要になる。この点については 6.3.3(4) に後述する。

## 2) 計算区間上流端からの材料 $m$ 供給の与え方

計算区間の上流端において、実測に基づき、上記 1) に述べた粒径範囲で材料  $m$  の粒度分布を設定し（固定）、河床変動計算で算出された水理量から材料  $m$  の流砂量を逐次算出し、境界条件として与える（2.6.2(1) 参照）。

計算区間の上流端付近の河道が、供給土砂量の算定に適した代表性、安定性、縦断方向の一様性を持つかどうか吟味することが必要である。そうでない場合には、算定の精度が大幅に低下する可能性が出てくる。特に、山地部河道の場合、河道の縦断的变化が大きい場合がよく見られるので、供給土砂算出の根拠となる河道条件の設定を慎重に行う必要がある。また、一見礫で覆われた河床でも、岩の上に一時的薄く乗っているだけで、洪水時には相当程度露岩する場合、上記の代表性、安定性が無いことになり、やはり、誤差が大きくなる。供給土砂の設定に適した上流端の選定が難しい場合、また、土砂供給の与え方やその調整の意味を明確にしておきたい場合などには、計算区間の上流端付近での土砂流送を平均的に表現する縦断方向一様河道を、上流端周辺の河道状況を踏まえて“樋”のように設定し、上記 2) と同じ方法で粒度分布を与え、そこでの流量と流砂量の関係を算定し上流端の境界条件とするという方法も考えられる。

## 3) 検証方法

モデルの検証に用いるデータには以下があり、これらが整理されている期間を対象に検証計算を行うことをまず考える。

- ・河床高（過去の横断測量結果）
- ・河床構成材料（過去の粒径加積曲線）

しかし、山地部河道では、既往調査結果が存在しないか、非常に少ない場合も多くあり、そのような場合には通常の検証は不可能となる。その場合は、たとえば河川が長年にわたり平衡状態にあると仮定し、河床高や河床構成材料が大きく変化しないことをもって土砂供給量設定の妥当性を判断するなど、ある程度想定を交えた技術判断をせざるを得ない。この際には、河道において流れや土砂の移動を変化させるような人為的改変や自然インパクトの影響が現河道に残っていないことを確認しておく必要がある。

過去に有意な河床変動が起こっていることがわかっていて、しかし、それについての詳細なデータが存在しない場合には、上記の想定を採ることもできず、検証を行うことはさらに難しくなる。このような場合には、計算条件を変えて過去から現在にいたる河道変化を計算し、現在の計算結果については実測と合うようにして、計算された複数の河道変化経路と過去の河道に関する断片的な情報とを照らし合わせ、各経路の再現度合いについて感触を得た上で、同様に計算条件を変えて行っ

た将来計算結果を比較して、総合的な技術判断（どの計算条件で行った結果をどの程度重視して判断を行うかの判断を含む）を行うというやり方が考えられる。この場合は、検証というよりも、現象展開のシナリオ検討ということになる。

なお、計算に際しては、河床高や河床構成材料の変化の把握に加え、土砂収支を確認するため土砂フラックの縦断分布をチェックするなど、計算の中味もふくめ、その妥当性や信頼性を吟味することが大事である。このことは、当該区間の河道特性を理解する助けにもなる。

#### 4) 予測計算

予測計算は、ダムがある場合とない場合の両方のケースを対象に実施し、ダムによる将来変化を明らかにする。なお予測期間としては、100年程度を設定することが多い。

#### 5) 岩の位置設定

今まで述べてきたように、山地部河道は河床下の浅いところに岩が存在するケースが多く、これが河床変化に大きな影響を与えうるので、露岩の範囲や、河床下のどの深さに岩が存在しているかを適切に設定し、計算に反映させることが重要である。

#### 6) 計算結果の吟味

1次元河床変動計算からは、河床低下・上昇、岩露出の可能性や露出範囲、表層河床材料の粒径変化が出てくる。ダムの有無のよってこれらがどう変わるかを知ること、ダム影響の有無やその度合いの予測につなげていく。

以上述べてきたように、山地部河道の河床変動計算については、不確定要素が多くなるので、判断を行う際には、計算結果をそのまま前提にするのではなく、こうした不確定性に起因する幅を考慮することが肝要である。

### (2) 混合粒径平面河床変動計算

混合粒径平面河床変動計算は、流れを二次元（平面）あるいは三次元的に計算し、そこから得られる水理量を用いて縦横断方向の掃流砂量・浮遊砂量を算出し、平面的な河床高の変化や河床材料の変化を計算する。混合粒径の考慮の方法は基本的に一次元の河床変動計算の場合と同じである。

一次元の河床変動計算では、砂州形状や砂州に伴う瀬と淵の状況の変化、砂州の各位置や淵・瀬の表層河床材料の変化を知ることができないので、これらの予測が重要となる場合に、平面河床変動計算の適用が検討されることになる。原理的には、生物の生育・生息場の変化予測を行う上で、一次元河床変動計算よりもはるかに有用で直接的な物理環境情報をもたらさうる手法である。

ただし、混合粒径の平面河床変動計算については、現場ニーズ先行で適用事例が出てきているが、山地部河道のような場でどの程度実現象を再現しうるか、工学的

予測手法としてどこまで有効かについて、まだ十分な検討実績の積み上げがない状況である。また、礫間に存在する材料 t の挙動など、流砂の表現について課題を持つ事象については、1次元計算を平面計算にしたとしても課題が解決されるわけではない。階段状河床形状の再現も、現状の技術では難しいと考えられる。

生物応答の予測にとって極めて有用な情報をもたらすポテンシャルがあるだけに、ここで取り上げた技術検討に資する手法として練り上げていくことが強く期待される。

### (3) 植生消長シミュレーション

#### 1) 植生消長の捉え方

河道内の樹林化は、環境面では動物にとって重要な生息場をもたらす反面、礫河原の減少・消失につながり、ハビタットの劣化を招く場合がある。また、治水面では洪水疎通能力の低下等の懸念材料になる。環境・治水の両面から、植生消長の予測は重要である。

多摩川のセグメント1区間を対象とした研究から、植生消長のサイクルを洪水および土砂流送と関連付けて図 6.3-4 のように捉える考え方が提案されている（藤田ほか 2003）。この研究成果に基づき、井上ほか(2006) が植生消長シミュレーション手法を提案している。この手法は、扇状地河道を対象に開発されたものであるが、その原理から、山地部河道への適用もある程度可能と考えられるので、以下に紹介する。シミュレーションの対象は陸域となる。植生消長を司る各過程は以下の通りである。

#### ① 礫床裸地の形成と維持

洪水により有意な河床変動が起こり、前と異なる形状を持つ河床が形成される。河床表面は礫床で裸地である。河原のような厳しい環境に生育出来るが、②で述べるほど密生せず、表層細粒土砂（材料 s）の堆積に寄与しないような植生の生育までを①の段階とする。

#### ② パイオニア的植物の繁茂

河床が変動するような出水のない状態が一定期間経過すると、裸地の礫床面に、立地条件の変化をほとんど伴わず発芽・定着できる植物が先駆的に繁茂する。これをここではパイオニア的植物と呼ぶ。①で想定している植物とは異なり、ツルヨシ等のように、表層細粒土砂の堆積に寄与する程度に密生する植物を想定している。

#### ③ 表層細粒土層厚の堆積と安定植生域の形成

上記②の植生が群落を破壊されない程度の出水を何度か経験するうちに、礫床上に細粒土砂が堆積する（表層細粒土層）。材料 s の堆積である。これにより、細粒土層を必要とする植物（多摩川の例では、オギやハリエンジュなど）が生育できるようになり、安定植生域が形成される。

#### ④ 洪水による植物の流失

基盤を形成する主材料が有意に動く規模の出水が生じると、植生が流失し裸地に戻る。

以上の過程には、出水による植生の流失や植生による細粒土砂の堆積といった物理的要因と、種子の散布や定着といった生物的要因が絡んでいる。このうち、物理的要因に着目し、出水による植生の流失、植生による細粒土砂の堆積促進とそれに伴う立地環境の変化による植生消長に焦点を絞ったシミュレーションソフトの開発が行われている。詳細は [http://www.nilim.go.jp/lab/dbg/jpn/kakan\\_veg.htm](http://www.nilim.go.jp/lab/dbg/jpn/kakan_veg.htm) を参照されたい。

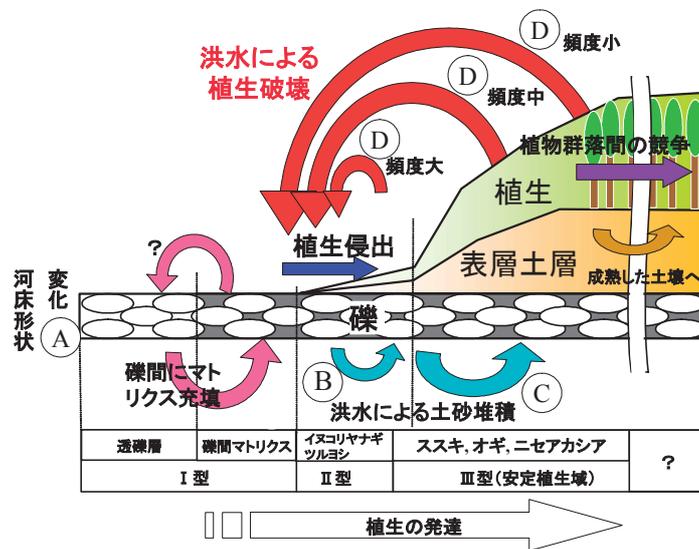


図 6.3-4 河川における植生消長のプロセス

## 2) 植生区分の考え方と計算フロー

このソフトでは図 6.3-4 の過程(A)の特徴を有する植物および裸地を I 型、(B)の特徴を有する植物を II 型、(C)の特徴を有する植物を III 型としている。

本ソフトの計算フローを図 6.3-5 に示す。初期の横断河床形状、流量時系列、粗度係数、代表粒径、植生流失 ( $\tau_{*cs}(i)$ )・移行(細粒土砂厚  $D_c$  や経過年数  $T_{pr}$ ) の条件等を入力する。粗度係数と代表粒径は、横断面内での任意の位置で分割した河床部分毎に設定する(分割された各河床部分を以下“スプリット”と呼ぶ)。また、粗度係数は植生の型に応じて変化させる。水理計算は準二次元等流計算で行い、植生消長や細粒土砂の材料  $s$  としての堆積はスプリット毎に計算する。

植生の流失は無次元掃流力で判断する。水理解析の結果、植生区分毎に設定した  $\tau_{*cs}(i)$  を上回る無次元掃流力が働いた場合、I 型が維持されるか、II 型や III 型から I 型に移行する(フロー(iv))。なお、有意な河床高変化がある場合には、横断形状を

入れ替えることとする（本ソフトでは、河床形状変化については、実績あるいは計算等により、条件として外から与える）。

$\tau_{*cs}(i)$ を下回った場合は次の通りである。出水前の植生が I 型であった場合は、I 型になってからの経過年数を検討する。Tpr 年以上経過していれば II 型に移行する。Tpr 年以下であっても、出水によって細粒土砂が厚さ Dc 以上堆積すれば III 型に移行する(フロー(i))。出水前の植生が II 型であった場合、出水によって堆積した細粒

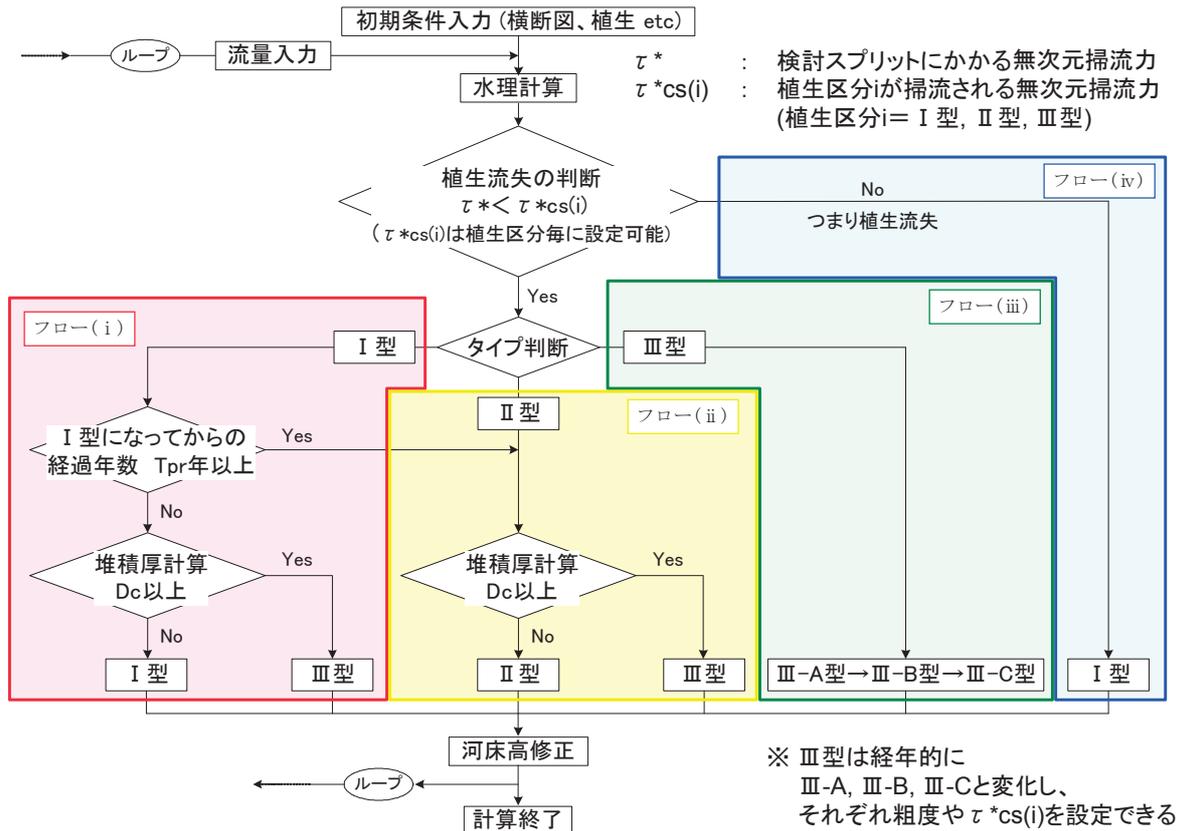


図 6.3-5 本ソフトにおける計算フローの概略

土砂厚が Dc 以上になれば III 型に移行する(フロー(ii))。II 型から III 型への移行に時間のファクターは考えていないので、細粒土砂が Dc 以上堆積しない限り、II 型が持続することとなる。出水前の植生が III 型であった場合は III 型が維持される。なお、本ソフトでは III 型の中での変化にも対応できるように、III 型を 3 つに細分している(フロー(iii))。これは経過年数のみで移行するとしている。例えば、まず草本が侵入し、ある年数を経て低木に移行し、さらにある年数を経て高木に移行する過程が想定される。それぞれを III-A 型、III-B 型、III-C 型とする。

### 3) 定数等の設定における注意点

#### 【流量】

日流量ではピーク流量を捉えられないため、出水時の流量については、時刻データで与える。

## 【ウォッシュロード濃度】

材料  $s$  として堆積する材料の元となる土砂（概ねウォッシュロードに対応）の体積濃度  $C[m^3/m^3]$  は洪水流量  $Q[m^3/s]$  に比例するとして  $C=\alpha Q$  で算出している。本ソフトでは  $\alpha$  に任意の値を入力できる。ここで  $\alpha$  は流域からの細粒土砂供給の活性度を表す係数であり、現地調査結果等を踏まえて適宜決定する。

## 【代表粒径】

材料  $m$  に関するものである。無次元掃流力で植生の流失を判断するため、シミュレーション結果への影響が大きい。現地調査結果等に基づき適切に設定する。

## 【流失限界無次元掃流力】

これも結果への影響が大きいパラメータである。0.05 を基本に、現地状況等に応じて適宜修正して与える。

## 【該当する植生】

I～III型に該当する植物は、現地調査結果から得られた生育環境の特徴や文献などによる知見から適宜決定する。

## 4) 本ソフトの使用例

上流ダム建設による河道内植生の変化を予測する。仮想ケースとして、ダムの洪水調節によって出水規模が小さくなった場合を設定した。出水規模以外の条件は変わらないものとした。

ダム建設前 : 年1回  $400m^3/s$  の出水+4年に1回  $800 m^3/s$  の出水

ダム建設後 : 洪水調節により最大  $100 m^3/s$  の放流

シミュレーション結果例を図 6.3-6 に示す。このケースでは、ダム建設前は4年に1回生じる  $800 m^3/s$  の出水で裸地が維持されている。しかし、ダム建設後は比高の低い右岸側では裸地が維持されているものの、左岸側では掃流力が低下し、安定植生域に移行すると予測された。

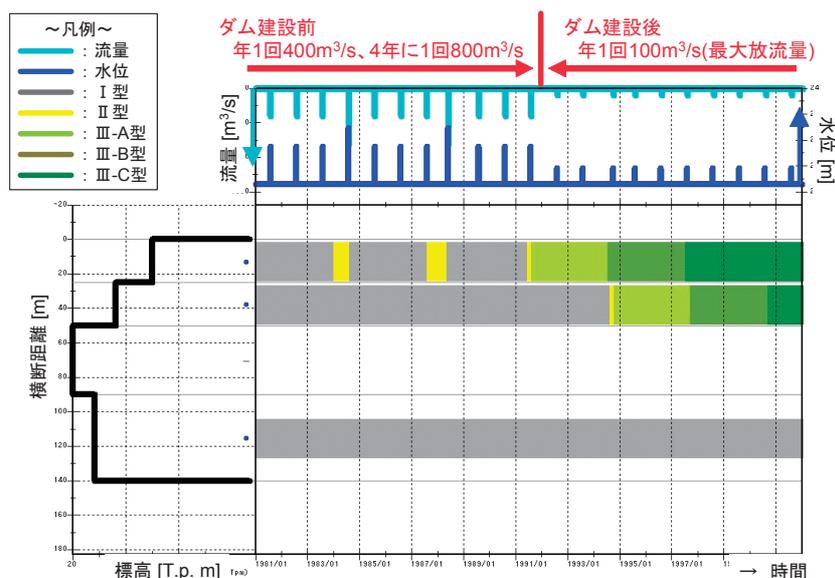


図 6.3-6 シミュレーション結果の例

実際にはダムにより出水時の細粒土砂が沈降し、ウォッシュロード濃度が低下し、安定植生域への移行が遅れることも考えられる。チューニングを適切に行うことでダム建設後の河道内植生の消長を推定したり、樹林化等の原因分析の精度が向上したりすると期待される。

#### 5) ソフトの適用範囲

本ソフトでは植生を 3 区分で表現しているため、群落の予測には至っていない。また、河川の作用や植生の立地条件からのみのアプローチであり、生物的要因を直接考慮していないという限界がある。しかし、裸地が維持されるのか？ 草本が密生するのか？ あるいは樹林化するのか？ という大まかな傾向予測を行えるだけでも、河川管理を行う上で有意義であると考えられる。

従来の植生消長の予測方法は、出水・冠水の生起確率から 1 つの河床部分について 1 つの植生生育状態を予測するという“静的手法”であったが、本ソフトを使用することで、変化の再現・予測を経時的に行うことができ、より実態に近い現象予測やシナリオ検討が行えるというメリットがある。入力する流量を自在に設定できるため、既設ダムについては実際の流況を入力し、ダム建設後に生じた河道内の植生消長と出水の関連性について、より詳細な検討を行うことが出来る。建設中・既設ダムともに、今後生起が想定される流量を入力することで、裸地・草地・樹林化の推移を予測することが出来る。

ただし、将来予測を行う場合には、与える流況(出水の規模やタイミング)に計算結果が影響されるため、得られた結果の解釈に工夫が必要である。すなわち、様々な設定条件の下で得られる植物消長や裸地河原の消長の時間変化パターン群から、

総合的な予測や判断、さらには課題把握とモニタリング戦略策定を行うという“使いこなし”が必要となる。

なお、本ソフトの使用にあたっては、次の点について注意を必要とする。

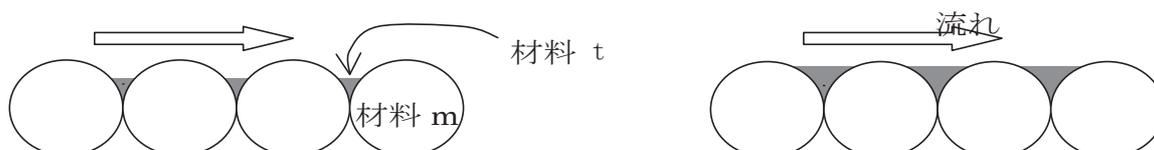
- ・セグメント1あるいはより上流を前提としているため、セグメント2より下流については、別のメカニズムを持ち込む必要がある。
- ・河床変動は組み込まれていないため、横断形状の変化が大きい場合は、設定した横断形状をその都度入れ替えて計算を行う必要がある。
- ・準二次元等流計算であるため、横断図測線上にある窪地等の局所的に比高の低い部分を低い水路部分と見なしてしまい、現実よりも掃流されやすい計算をしてしまうことがある。

#### (4) 礫間にある砂の抜け出し・充填に関する一次元計算に向けて（材料 t になりうる粒径集団の礫床河道における動態に関する計算について）

材料 m は山地部河道ではふつう中礫～巨礫であり、一方、材料 t になりうる粒径集団は微細砂～中砂あるいはさらに細粒であるから、両者の粒径比は  $10^2 \sim 10^3$  に達する。このため、両者の移動性は大きく異なり、材料 t の動態は河床形状にはほとんど影響せず、また、水域において礫床を全面的に覆うことはなく、せいぜい礫間の一部を埋めるように存在することがふつうであることは、2.4 の通過型の説明のところで述べた。しかし、1.4 や 5.5.2 で説明したように、生物との関係を考慮する場合には、山地部の礫床河道における材料 t の挙動は重要な現象の1つとなりうる。ダムからの排砂など土砂管理により一時的にでも自然状態と大きく異なる砂流送状態になる状況を想定すべき場合には、礫床上での材料 t の挙動の幅が通常より広がることも考えられ、その予測の重要性は増す。こうした認識の下、材料 t の挙動を計算する技術の方向について述べる。なお以下では、議論をわかりやすくするため礫が動かない状況を想定し、また材料 t になりうる粒径集団を砂（細砂～中砂）とする。

##### 1) 大礫の間に存在する砂の状況について

著者らの一部（藤田ら 2008）は、図 6.3-7 に示すように、動かない大礫床上を、それより  $10^2$  オーダー小さい粒径の砂が浮遊卓越状態で通過する状況に焦点を絞り、流量一定で、縦断方向に一様な水理条件とし、砂の流送に関しても平衡状態を作るという実験条件の下、浮遊砂量と大礫間に堆積する砂面高さとの関係を実験的に調



同じ水理量で、砂流送量が小さい場合(左)と大きい場合(右)

図 6.3-7 礫間にある砂の抜け出し・充填のイメージ

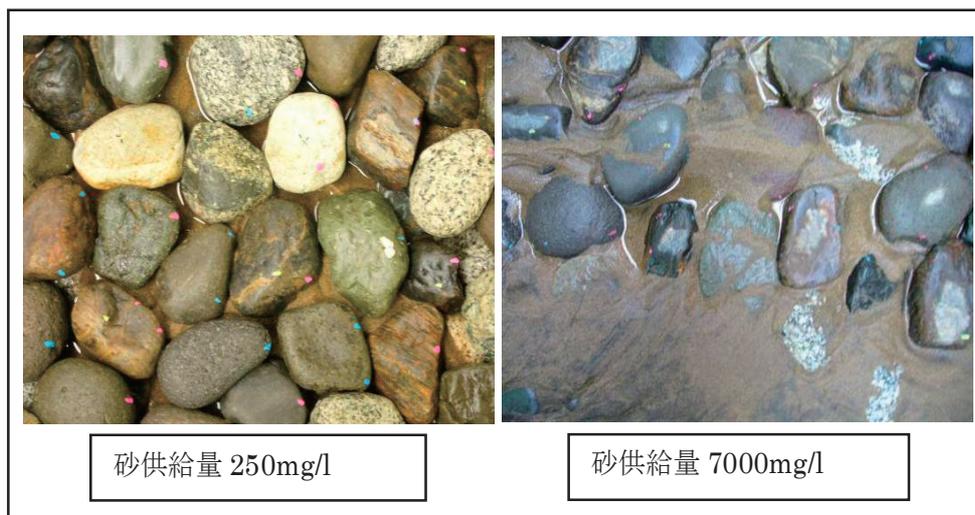


図 6.3-8 砂供給量（砂濃度換算で表現）の増大に伴う礫間の砂面積増加状況の例  
（同じ流量の下、右は左の28倍の砂供給量を与えている）

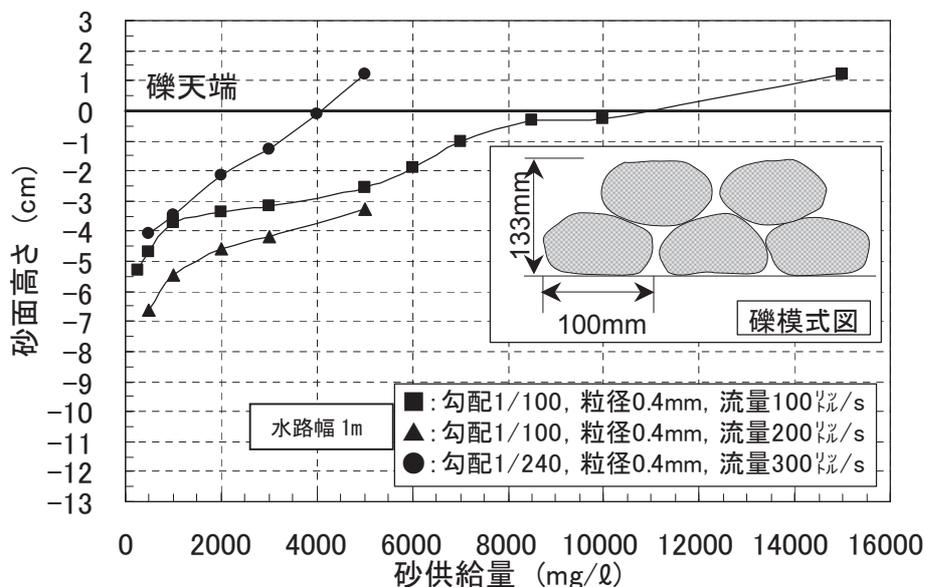


図 6.3-9 砂供給量（砂濃度換算で表現）と砂面高さの関係の例

べている。一定の砂供給量の下で平衡状態になった後の砂の堆積状況の例を図 6.3-8 に示す。また、平衡状態での砂の堆積高と砂供給量との関係の例を図 6.3-9 に示す。

これらからわかるように、大礫間の砂の堆積高は、流送させる浮遊砂濃度の増加に伴い、礫の間を埋める砂の被覆面積が増加し、砂面高が上昇する。砂流送量が流量に対して極端に大きくなると（通常の山地河道では起こりえないレベル）、図 6.3-8 の右側の写真にあるように、礫間が砂で埋め尽くされる状況となり、さらに砂流送量が増すと、礫床を砂が覆う状態となる。逆に、砂流送量が減少すれば、平衡状態での砂面高は下がり、砂の被覆割合が減少する状況（≒砂の抜け出し）となる。図

6.3-8 で言えば、左の状態にシフトすることになる。砂の供給量と堆積高さとの関係は、砂供給条件の変化に対する河床表面状態の応答を簡潔に表す基本特性として重要である。

以上の現象は次のように水理的に説明できる。浮遊砂量が多くなると、河床面付近の砂濃度が高くなり、河床への（ひいては礫間への）砂の沈降フラックスが多くなる。新たな平衡状態となるために、これに釣り合うような砂の巻き上げ量の増が必要となり、砂面高が上がる。というのは、砂面高が上がると、礫の遮蔽効果の減少と、砂の巻き上げが起こる砂面積の増という二重の効果で、巻き上げ量が増加するからである。

## 2) 計算適用の方向性

### a) 一次元の混合粒径河床変動計算の有効性

材料  $t$  になりうる粒径集団（砂）を含む粒径範囲で標記の河床変動計算を行えば、河床における砂の存在状況が計算できる。しかし、交換層の概念が適用できる流砂現象と、図 6.3-7～図 6.3-9 に示したような流砂現象とはだいぶ異なるので、礫間の砂の存在状況まで精度良く表すことは期待できない。交換層に砂が過度に混じるような架空の結果を生むことも条件によっては起こり得る。したがって標記計算法は、河床表面付近で砂がどのくらい多くなるかの目安、すなわち、表層における砂の存在割合の大小、礫床表面を砂が完全に覆う可能性の大小について、定性的な判断を下す際の参考情報を提供する程度のもので捉えるのが妥当であろう。

### b) 礫間にある砂の抜け出し・充填に関する一次元計算

上記 a) の計算法を一步実態に近づけるものとして、以下のような方法が考えられる。

- ① （礫間の）砂面高を媒介変数として、図 6.3-9 に示したような礫間の砂の挙動に関する基本特性を、河床に作用する全摩擦速度と砂の巻き上げ速度との関係式に表す。
- ② 砂面高と河床の相当粗度との関係を表す。
- ③ 一次元の浮遊砂流の計算式に上記①と②を組み込み、流れと砂供給量に関する境界条件（所与）の下で、浮遊砂濃度と砂面高を計算する。

以上においては①の関係式の構築が鍵となる。1.2 で述べたように、これについては芦田・藤田（1986a;1986b）の研究が基本的な枠組みを提供している。ただし、ここで扱っている山地河道に近い水理条件・河床条件・礫形状で、また想定される砂面高の幅において、ハビタット予測に耐える精度で砂面高計算を行うために、関係の捉え方に修正を加えることも必要に応じて検討する。

こうした計算を行うことで、砂面高の時間的・空間的（縦断）変化をある程度の精度で予測することが可能になると期待される。

### c) 材料 $t$ の供給条件の与え方

これについては、2.6.2(2) で述べたように、通過型の粒径集団に適した方法をとる。すなわち、流域から材料  $t$  になりうる粒径集団がウォッシュロード的に与えられることを前提にした手法を用い、具体的には  $Q \sim Q_s$  関係（あるいは  $C(=Q_s/Q) \sim Q$

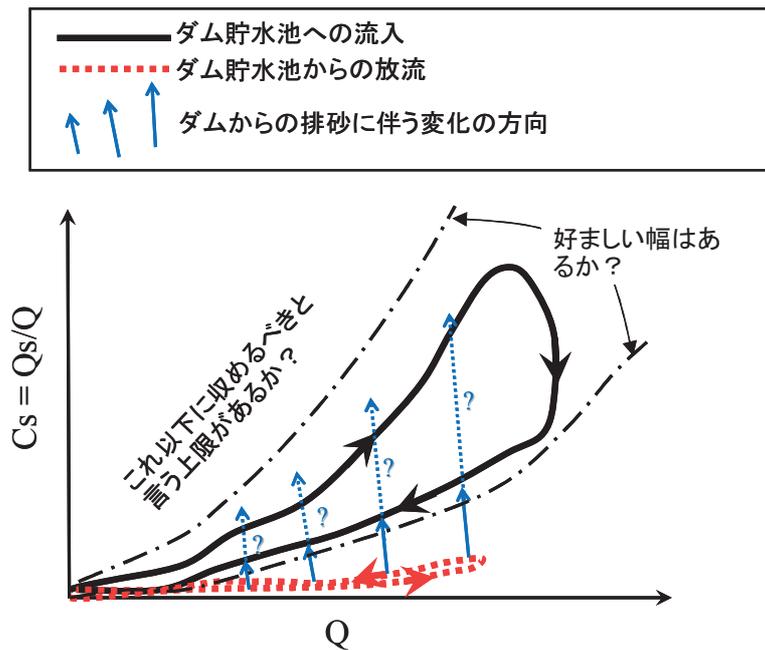


図 6.3-10  $C(=Q_s/Q) \sim Q$  関係設定の重要性についての説明

関係)の利用が基本となる。 $Q \sim Q_s$ 関係は、流砂観測データに基づき設定するのが理屈の上では最も望ましい。ただし流砂観測は、5.3.3(3)で述べたように、大きな労力を伴い、その実施状況によってデータの質に大きな差が出てくる。このため、一定期間に供給される(た)土砂総量を何らかの方法で求め(6.2.3(2)で例示したような流域地質を加味した推定式、ダム堆砂量推定式、ダム堆砂実績データの利用など)、そこから着目している各粒径集団の量を求め(あるいは推定し)、それをフラックスに割り戻す(櫻井ほか 2007)などの代替法の適用も考え、目的に見合った精度の確保を図る。

土砂供給条件の設定は、物理環境変化の予測・評価において重きをなす。そのことを説明するために図 6.3-10 の例示を用いる(Fujita 2008)。ダム地点での材料  $t$  になりうる粒径集団のフラックスを考える。図中で黒実線はダムが無い場合の関係を表し、ダム貯水池完成後は図中の赤破線のように供給フラックスが大幅に減るはずである。ダムからの当該粒径集団を含む土砂の排出は、赤破線になっていた供給条件を青矢印の方向に戻すことを意味する。ここで、たとえば、次のような問いを設定できる。

- 1) 「基本的に黒実線の方角に戻すだけであるから、排砂によって大きな課題は生じない。むしろ、物理環境の再生になる」と判断して良いか?
- 2) ダムによる流量調整が加わり、また、大局的には  $C \sim Q$  関係が元に戻る方角と言っても、元の関係のレンジから若干逸脱する場合も考えられる。これらのことが課題をもたらさないか?
- 3) 環境保全や再生という点で好ましいあるいは目指すべき  $C \sim Q$  関係の幅(レンジ)はあるか(環境仕様)?

4) 逆に、C~Q 関係に、河川環境の保全という観点で忌避すべき領域はあるか？

以上のような問いに具体的に答えるには、いくつかの異なる C~Q 関係を供給条件として与えて、上記 b) のような計算によりダム下流で礫間の砂面高がどう応答するかを把握し、それを、たとえば 5.5.2 に示したような物理環境と生物生息状況との関係に照らし合わせて検討を行う、というようなことが求められる。

このように、C~Q 関係あるいは Q~Q<sub>s</sub> 関係の設定は、物理環境に関する予測・評価を行う全体手順の中でも重要なステップになると考えられる。

#### d) その他

上記 b) に示したような計算法の先には、材料 t の挙動に関する平面 2 次元計算への展開、礫も動くモードへの展開、平水時に掃流形態で材料 t が動く状態への展開、瀬と淵などの河床形状が材料 t の挙動に与える影響の考慮などがある。いずれも、しかし、相当の技術的検討を要すると考えられる。まずは上記 b) に示した計算法の確立が先決であろう。上記 b) の計算だけでも、実務的な技術判断が相当程度可能になると期待される。

また、こうした計算法を用い、出水流量ハイドロと材料 t の供給量との関係についての実態把握を行い、その上で、礫間の砂面高の時間変化が材料 t 供給のタイミングにどのように規定されているかを明らかにすることは、我々が平常時に見ている材料 t の存在状況がいつ・どのような段階で主に決まっているのか？ という問いを考える上で重要な情報を提供するものと期待される。

以上のような技術研究を進めるに当たっては、実験室で再現することが部分的にしかできない現象を扱っていることから、技術開発に資するレベルで現場河川の情報を取得することが重要となる。

## 6.4 生物変化予測の見通し

### 6.4.1 基本的な考え方

4章、5章で示したように、ダムの存在により変化する環境要因は様々な経路を経て生物相に変化を及ぼす。生物相の応答を精確に予測するためには、考えられる経路を全て対象とする必要があるが、流況・土砂供給量・濁度・水質・水温・餌資源量等全ての要因を対象とした経路の設定と生物相の応答を考えることは、経路の組み合わせが数多く存在すること、また、各経路の応答予測を行うための知見が不十分でありことから現実的ではない。そこで、ここでは流量・土砂の変化とそれに伴う河床構成材料の変化に着目し、付着藻類・底生動物を対象とした応答特性を整理して見よう。河床構成材料の予測については6.3に示した現象の絞り込みの結果を用い、ここで得られた、各領域別に生物相がどのように応答するかを例示することとする。

なお、他の要因に対する応答を予測する際には、本章で例示する結果を参考にしながら4章で示した各環境要因と付着藻類・底生動物との関係性を考慮して下流域における応答特性を明らかにしていくことになる。

### 6.4.2 変化予測に対する視点

#### (1) 流量・土砂に関する前提条件

流量・土砂を対象とした予測とするが、ここでは6.3に示した現象の絞り込みの結果より得られた各領域に対する付着藻類・底生動物の応答を例示するため、以下を前提として検討を行った。

- 対象とするセグメントはセグメントMとセグメント1(2.2.2参照)とする。
- 流量・土砂供給量以外の他の環境要因が変化しない。
- 流量については平均年最大流量をベースに整理をしているため、
  - ・ 平常時の流量の変化は対象とせず、ダム竣工前後で概ね同程度の流量が平常時流下している。
  - ・ 流量の時間的な変動、例えば、季節的な流量変動パターンは対象としない。
- 土砂については最小土砂流送比をベースに整理をしているため、
  - ・ 材料mとして巨礫から小礫、材料tとして砂を念頭に置く。
  - ・ 材料mと材料tの供給比は同一である。

#### (2) 変化予測に関する視点

流量・土砂供給量の変化に対する付着藻類・底生動物の応答を予測するが、ここでは流量・土砂の直接的改変に伴う直接的影響と河床構成材料の変化を介した間接的影響の2つを対象として予測を行う。より具体的には、以下の2点を考慮する。

■無次元掃流力及び最小土砂送流比に基づく直接的影響の検討

- ・ 無次元掃流力の大小に基づきダム新設後の材料 m の移動頻度を、最小土砂送流比に基づく河床材料の供給の多寡から付着藻類、底生動物に対する直接的攪乱を検討する。

■流量比の変化・無次元掃流力に基づく河床構成材料の変化と間接的影響の検討

- ・ 流量比・無次元掃流力、最小土砂送流比との関連から材料 m の挙動を評価し、材料 m の変化に対する底生動物相の応答を検討する。
- ・ 材料 m の間隙内に存在する材料 t の抜けだしの程度から底生動物相への応答とそれに伴う付着藻類への間接的影響を評価する。

### (3) 下流方向への“変化”と領域区分の考え方

一次分析では横軸、縦軸にダム直下から下流方向への変化が表現されているため、ダム下流方向への応答の変化は対象地点がどの領域に属するかである程度評価できる。ただし、一次分析における領域は4区分しかなく、ダム下流における空間的な変化をきめ細かく評価できる手法とはなっていない。「5.5.2 既設ダムにおける付着藻類・底生動物の実態分析」で示したように環境要因と生物相はダム直下から下流方向に急速に変化するため、同一領域に区分された場合においても当該領域内で環境要因、生物相が有意に変化することもあり得るので注意が必要である。今後、既設・新設ダムのデータに基づき領域区分の具体的な閾値の設定と各領域区分内における応答特性の精度向上を図る必要がある。このことは、6.3.2において、「ダムからの距離が重要な因子となる」として、この因子を表6.3-1の吟味に加味する必要があると述べたことと関連する。

#### 6.4.3 想定される付着藻類と底生動物の応答例

##### (1) 方法

ここでは、ダム下流における付着藻類と底生動物の応答例を「6.3 河道状況予測の道具立てと使い方」における領域区分に対応する形で付着藻類と底生動物の応答を整理する。4章に応答に関する基本的知見を、5章に実事例を示したが、これらの知見は各領域に対する応答を予測するのに十分な状況にはない。従って、ここで示した整理例はあくまでも仮説のレベルであり、今後検証を行い、改善を図るとともに、より定量的な視点から応答特性を整理する必要がある。

「6.3 河道状況予測の道具立てと使い方」では流量比・最小土砂送流比を軸に4つの領域に区分され、更に、河床材料の移動性という観点から領域ⅠとⅡは2つのサブ領域に区分されている。ここでは、これらの合計6つの領域について付着藻類と底生動物の応答特性を例示するが、付着藻類、底生動物の応答は多様であり、全ての応答を整理することは不可能なことから、付着藻類については主として現存量の変化に有機物と微細土砂の堆積を、底生動物については表層（礫の表面）と表層

下（表面の材料  $m$  を取り去った下の層）を対象とし、既往の研究等を参考にして応答例を記載した。

今後、付着藻類の付着力の剥離と掃流力との関係、剥離後の回復過程、河床表層の材料  $t$ （砂）の多寡と底生動物との関係等環境要因と水生生物との関係を明らかにし、次項(2)にあるようなマイクロスケールでの物理環境予測精度を向上させ、ダム直下から任意の距離における応答特性の予測手法を開発する必要がある。

以下、表 6.3-1 b) を再度参照されたい。合わせて、同表の a)、c) も参照されたい。

## (2) 応答例

上記 6 つのカテゴリの中で領域Ⅲは流量比、最小土砂流送比が 1 に近く、ダム竣工前後で河床構成材料、攪乱の程度は大きく変化しないと考えられる。また、領域Ⅳは流量に対して土砂供給が過剰な場合であり、この場合は河床の局所的な上昇、材料  $m$  上への砂の過剰な堆積が生じる可能性がある。このように領域ⅢとⅣは河床の変化をイメージしやすいが、領域ⅠとⅡはそれぞれサブ領域を持ち、その変化をイメージすることが難しい。図 6.4-1 に領域ⅠとⅡについて河床の状況を概念的に示した。概念図では河床表層と表層下における材料  $m$  と砂の状況を図示と伴に、その特徴を説明した。また、各領域に対する付着藻類と底生動物の応答例については、表 6.3-1 b) を再度参照されたい。

領域ⅠとⅡの河床を見ると、領域Ⅰでは表層、表層下で差異が見られ「高移動性」の領域では表層及び表層下から砂、材料  $m$  の小粒径集団が抜け出し粗粒化が進んでいる。一方、「低移動性」では表層下において抜け出しが見られるが、小粒径集団は残存し、河床構成材料の組成が大きく異なることが理解できる。領域Ⅱは「高移動性」と「低移動性」において表層において砂が抜け出す期間が異なるが、表層及び表層下の河床構成材料に大きな変化は生じない。従って、長期的に見ればほぼ同様の河床構成材料へと変化していくものと予想される。次に、以上の河床構成材料の変化に攪乱の程度の変化の視点を加えて付着藻類及び底生動物の応答を考えてみよう。

付着藻類については現存量の多寡そしてその性状が予測の対象となる（詳細は「5.4.4 解析方法と結果の示し方」を参照のこと）。領域Ⅰ、Ⅱは砂の供給がなく、また、材料  $m$  も移動機会も減少するため砂による摩耗、主材料の転倒による付着藻類及び無機物・堆積有機物（以後、河床付着物）の剥離が生じにくくなる。また、4章トピックスで紹介したように流水による剥離の効果は長期間持続しないことから、攪乱による付着藻類の現存量低下は生じにくいと考えられる。一方、摂食生物による現存量の低下には領域により差異が生じる可能性がある。領域Ⅱにおいては流量比が小さく、河床表層もしくは表層下に残存する砂の抜け落ちが抑制されて、ヤドリケ等の生息と付着藻類の摂食が期待できる可能性がある。領域Ⅲのケースでは流量比、最小土砂掃流比が 1 に近く、河床付着物に大きな変化は生じない可能性が高い。阿木川ダム下流で実施した支川合流に伴う付着藻類相の変化を見ると（この

場合、支川規模が小さく領域Ⅲと判定できない可能性がある)、5.5.2 で示した支川合流に伴う底生動物相の回復で見られた現象と同様の変化が同付着藻類相においても確認されている。領域Ⅳは材料 m、砂の堆積が生じる領域となる。付着藻類にとっては安定した基盤の存在が生育にとって重要な要素となる。従って、砂が礫面を覆うと付着藻類が安定的に繁茂できる面積が減少する他、砂が移動した場合には摩擦による剥離が生じ現存量自体も低下することになる。

底生動物については優占種の変化が予測の対象となる。領域ⅠとⅡの中では河床表層、表層下の河床構成材料が大きく変化する点において領域Ⅰロ) のケースが、最も特徴的である。このケースでは表層及び表層下から砂、小礫が抜け出し、表層では粗粒化が進行し、表層下では材料 m の間隙を占める材料が減少して空隙が大きくなる。また、粗粒化の進行に伴い河床の移動機会が減少し、より安定的な環境へと推移していく。巨礫が河床に露出する景観を呈し、巨礫上にはウサガガソ、アマガラブユが営巣し、表層及び表層下では大型の造網型トビケラであるヒゲナカトビケラが増加するが、表層及び表層下から砂、小礫が消失すると網を張る空間が減少してヒゲナカトビケラが減少する可能性がある。このケース以外の領域ⅠとⅡは比較的類似した応答を示すと考えられる。表層は河床付着物の現存量が増加するためヒラカゲト等滑行型の底生動物が減少すると考えられる。また、表層及び表層下における砂や小礫の残存の程度によって底生動物相に影響を与える可能性がある。具体的には、領域Ⅰのイ)、領域Ⅱは河床の材料 m の移動機会が少ないため、表層からは砂の抜けだしはあるが表層下では砂及び小礫が残存する可能性が高い。このため、これらの材料を巣材とするヤマトビケラ、掘潜型のカカゲト、ジミ等が生息する可能性がある。領域Ⅲでは付着藻類同様顕著な変化が生じない可能性が高いが、変化の程度は領域Ⅲの中において差があり、支川から供給される土砂・流量の多寡に影響を受けると考えられる。領域Ⅳで砂が礫面を覆う場合には、礫河床に生息していた底生動物は減少し、トミズ、モカゲト等掘潜型の底生動物が増加すると考えられる。

以上、付着藻類と底生動物の応答特性例を示したが、実際の生物相を見ると、これらの特徴は不明瞭である場合、全く異なる特徴が見られる場合があるだろう。特に、餌資源の質・量の変化、水温の変化等他の要因が著しく変化する場合には、河床構成材料や攪乱の多寡の影響が相対的に小さくなる可能性もあり、前述した特徴が見えにくくなる可能性が高い。

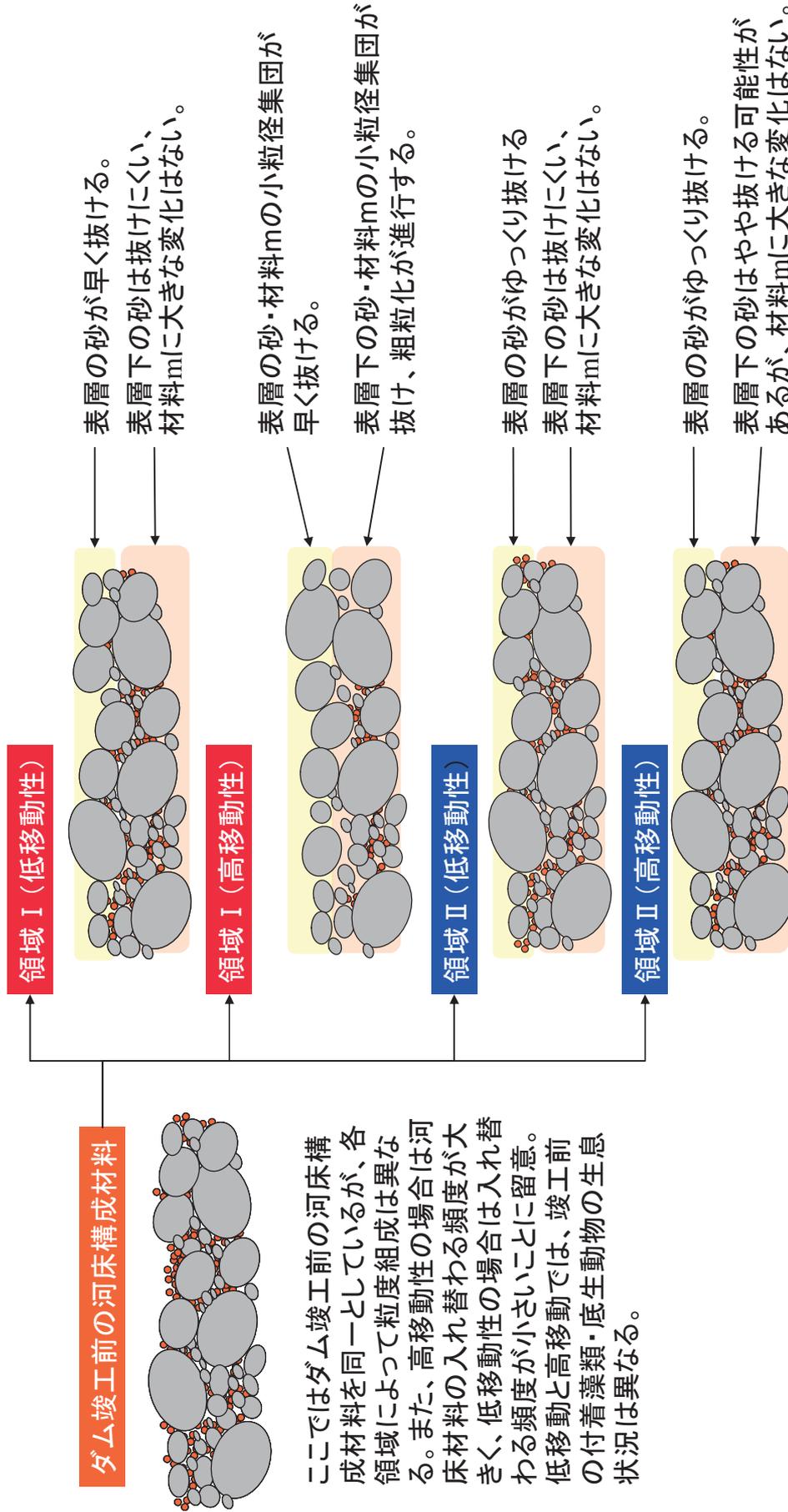


図 6.4-1 流況に対する河床間隙の構造の概念図