国土技術政策総合研究所資料
第 521 号　　2009 年 2 月
土 木 研 究 所 資 料
第 4140 号　　2009 年 2 月

ダムと下流河川の物理環境との関係についての捉え方
―下流河川の生物・生態系との関係把握に向けて―

国土技術政策総合研究所　環境研究部
藤田　光一・冨田　陽子*・大沼　克弘・原野　崇・小路　剛志**・伊藤　嘉奈子・山原　康嗣

土木研究所　水環境研究グループ　自然共生センター
萱場　祐一

概　要

本資料は，下流河川の物理環境とダムとの関係を検討する際の基本的な捉え方を，現時点での知見に基づき，技術的課題も含め包括的にとりまとめたものである．その内容は，土砂動態の基本的特性，日本のダムの基本的特性，物理環境の変化に対する生物応答の捉え方，ダムと下流河川の物理環境や生物との関係を把握するための調査・分析・予測からなる．本資料では，物理環境に関わる要因の中でも，河道形状、河床材料、流況（主に掃流力など土砂流送や河道形成を司る営力という観点からの）、土砂流送を，また，生物応答については，付着藻類と底生動物を中心的に取り上げている．対象としているのは，一定規模（国土交通省および水資源機構によって管理されるダム程度）以上の貯水池を常時持つダムとその下流河川である．本資料は，当該分野の技術状況の現状確認，実務に使える技術の調達，技術的課題と研究開発の方向性の把握を行うのに有用である．

キーワード：ダム貯水池，河川の物理環境，下流への影響，土砂流送，河床変動，河床材料，粗粒化，流況調整，堆砂，ハビタット，利水，治水，河川環境，河川生態系，底生動物，付着藻類

国土技術政策総合研究所　環境研究部
(独)土木研究所　水環境研究センター　自然共生センター
*　国土技術政策総合研究所　危機管理技術研究センター
**　近畿地方整備局企画部

Technical Note of NILIM
No.521 February 2009
Technical Note of PWRI
No.4140 February 2009

A fundamental approach for assessing the downstream effects of a high dam on river characteristics: in order to recognize the change in aquatic organisms and stream ecosystem

Environment Department, National Institute for Land and Infrastructure Management
Koh-ichi FUJITA, Yoko TOMITA*, Katsuhiro OONUMA, Takashi Harano,
Takeshi ORO**, Kanako ITO and Yasushi YAMAHARA

Aqua Restoration Research Center, Water Environment Research Group, Public Works Research Institute
Yuichi Kayaba

Synopsis

This note presents a comprehensive framework for assessing the downstream effects of a high dam on the physical environment which is characterized by river morphology, bed material and texture, flow regime to govern fluvial processes, sediment transport and so on. Dams with permanent reservoirs as large as those managed by MLIT and the Japan Water Agency are targeted in the note. Its contents are 1) fundamental characteristics of macroscopic sediment movement, 2) facts on high dams and reservoirs in Japan to be shared, 3) fundamental knowledge on characteristics of benthic invertebrates and periphyton downstream of a dam reservoir, 4) methods of survey, observation, analyses and prediction on the alteration of downstream characteristics. Furthermore, in order to obtain a perspective for recognizing the change in aquatic organisms and stream ecosystem, possible responses of benthic invertebrates and periphyton to various changes of the physical environment are discussed. Since this research field is still in progress, the authors refer to relevant technical problems to be tackled further as much as possible, instead of regarding the note as a complete technical guideline. This note is useful for determining technical levels to be applied for, obtaining practical tools for each case of dam impact assessment or restoration design, and identifying the orientation of technical development in this field.

Key Words :

Dams in Japan, physical environment of a river, downstream effect, sediment transport, river-bed variation, bed-material, armoring, flow regulation, dam sedimentation, habitat, water resources development, flood disaster mitigation, river environment, river ecosystem, benthic macroinvertebrates, attached algae

---

Environment Department , National Institute for Land and Infrastructure Management
Aqua Restoration Research Center, Research Group, Pablic Works Research Institute
* Reseach Center for Disaster Risk Management, National Institute for Land and Infrastructure Management
** Planning Department, Kinki Regional Development Bureau, Ministry of Land, Infrastrucure, Transport and Tourism

目　次

1. 本資料の性格と位置づけ 1-1
1.1 「捉え方」の基本スタンス 1-1
1.2 ダムと下流河川にかかわるインパクトーレスポンスの概観と検討対象の重点化 .. 1-5
1.3 ダム下流での環境要因の変化が生物に及ぼしうる影響に関する研究のレビュー .. 1-7
1.4 ダム貯水池による下流物理環境の変化に関する研究動向 1-13
1.5 調査対象範囲について 1-21
1.6 本資料で用いる粒径の分類と呼称 1-21

[基本編]

2. 土砂の動きと河床材料の捉え方の基本 2-1
2.1 はじめに 2-1
2.2 河床材料の見方 2-1
2.2.1 河道横断面内（あるいはリーチスケール内と言ってもよい）での河床材料の分類 2-2
2.2.2 河床材料の縦断的変化 2-4
【トピックス】河床材料の調査結果をどのように見るかについて 2-8
2.3 沖積河川に供給される土砂 2-9
2.4 流砂系という観点からの土砂輸送形態の捉え方 2-11
2.5 「粒径集団」「有効粒径集団」という捉え方 2-14
2.5.1 沖積河道形成の捉え方 2-14
2.5.2 「有効粒径集団」の説明 2-14
2.6 基本事項を実際の検討にどう反映させるか 2-17
2.6.1 「混合型・通過型」「材料 m、s、t」の区分 2-17
2.6.2 計算等における上流からの供給土砂の与え方 2-17
2.7 山地河道の特性 2-19
2.7.1 山地河道特有の性質を理解する上で重要と考えられるポイント 2-20
＜参考＞山地斜面からの直接的な土砂供給と輸送 2-24
2.7.2 調査・分析の体系化への含意 2-26

3. ダムと下流河川の物理環境との関係を分析する際に理解しておくべき日本のダムの基本特性 .. 3-1
3.1 ダム貯水池がその地点において河川に為す基本的作用について 3-1
3.1.1 ダム地点で生じる現象 3-1
3.1.2 ダム下流河川の物理環境との関係の捉え方 3-1
3.1.3 下流河川における直接的作用との混同について 3-2
3.2 変換装置としてのダムの基本特性（流量と土砂について） 3-3
3.2.1 流量の変化 3-3
3.2.2 季節による違いについて 3-9
3.2.3 土砂供給の変化 3-11
3.3 ダム地点での変換が下流にどのように伝播していくかを考える上でのいくつかの重要事項 3-17
3.3.1 ダム集水域面積割合に関する河川水系マップ 3-17

3.3.2 ダムー下流河道関係を大局的に把握する手法 3-24
3.3.3 ダムによる土砂の扞止と下流河道との関係の捉え方 3-32
3.3.4 河川水系における直接的作用 3-35
＜参考＞規模の大きい支川の流入が河川の物理環境に与えうる影響の見方 3-39

4. ダム下流河川における付着藻類・底生動物の捉え方 4-1
4.1 ダム下流における影響範囲の捉え方 4-1
4.1.1 空間的な影響の広がりを考える 4-1
4.1.2 時間的な影響の伝搬を考える 4-2
【トピックス】河川連続体仮説 4-4
【トピックス】中規模攪乱仮説 4-5
【トピックス】水生生物の餌の種類を覚えよう 4-6
4.2 ダム下流における人為的インパクトと水生生物の応答 4-7
4.3 流況および土砂供給量の変化と付着藻類・底生動物の応答 4-11
4.3.1 流況・土砂供給量の捉え方 4-11
4.3.2 付着藻類の応答メカニズム 4-12
【トピックス】付着藻類の生活（付着）型 4-17
【トピックス】フラッシュ放流による付着藻類の剥離 4-18
【トピックス】アユの摂餌が河床付着物に及ぼす影響 4-20
4.3.3 底生動物の応答メカニズム 4-21
【トピックス】底生動物の摂食機能群（正確には機能的摂食群）と生活型を理解する 4-25
【トピックス】ダム上下流における底生動物群集の特徴 4-27

[実用編]
5. 調査・分析に関する事項 5-1
5.1 調査目的を踏まえた調査計画・デザインの重要性 5-1
5.2 インパクトーレスポンスを把握するための調査デザイン 5-4
5.2.1 調査デザインの基本ーBACI デザイン 5-4
5.2.2 デザインの組み立て方 5-6
5.2.3 まとめー効果的な実態調査に向けて 5-11
5.3 河道の物理環境を検討するための調査に関する事項ー調査の道具箱 1 5-12
5.3.1 流域・水系の視点からの調査 5-14
【トピックス】土砂発生の可能性とその推定 5-18
【トピックス】現地での確認におけるその他の留意事項 5-20
5.3.2 河道の調査 5-21
【トピックス】面積格子法による調査の例 5-28
【トピックス】砂州の形成、階段状河床の形成 5-38
5.3.3 外力（流量・土砂流送量）に関する調査 5-48
5.4 付着藻類、底生動物の実態調査に関する事項—調査の道具箱 2 5-54
5.4.1 調査体系 5-54
5.4.2 調査の流れ 5-56
5.4.3 調査と分析 5-62
5.4.4 解析方法と結果の示し方 5-73

5.5 既設ダムを対象にした実態分析の例－調査計画・デザインの重要性の理解のために... 5-80
5.5.1 ダム供用後の河川における河床材料の分析（既設ダムの事例から）..... 5-80
5.5.2 既設ダムにおける付着藻類・底生動物の実態分析について（CI デザイン） 5-88

6. 新規ダム築造後の状況予測について 6-1
6.1 本章の基本スタンス 6-1
6.2 河床材料の動き方の一次分析..... 6-3
6.2.1 一次分析の概要..... 6-3
6.2.2 材料ｍの動き方..... 6-4
6.2.3 材料ｓ、ｔの動き方..... 6-11
6.2.4 河道状況変化に関する仮説（現象シナリオ）の吟味..... 6-15
6.3 河道状況変化予測の道具立てと使い方..... 6-19
6.3.1 ダム－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..... 6-19
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..... 6-22
6.3.3 種々の予測手法..... 6-28
6.4 生物変化予測の見通し 6-41
6.4.1 基本的な考え方..... 6-41
6.4.2 変化予測に対する視点..... 6-41
6.4.3 想定される付着藻類と底生動物の応答例..... 6-42

[展望編]
7. 総括 7-1

参考文献 1

1. 本資料の性格と位置づけ

1.1 「捉え方」の基本スタンス

本資料は、下流河川の物理環境とダムとの関係を検討する際の基本的な捉え方を示すものである。ここでいう「物理環境」は、生物の生息・生育に深く関係する各物理的要素およびそれらの相互作用の状況を指し、本資料では河道形状、河床材料、流況（主に掃流力など土砂流送や河道形成を司る営力という観点からの）、土砂流送を中心に据える（表 1.1-1 参照）。本資料で対象としたのは、一定規模（国土交通省および水資源機構によって管理されるダム程度）の貯水池を常時持つダムとその下流河川である。したがって、一時的にしか水をためないダム（洪水調節専用ダム（流水型ダム））や一部の発電ダムのように洪水時にゲートを開けて流水状態にして多くの土砂を下流に流すタイプのダムは対象外としている。ただし、本資料は、ダム下流河川の物理環境に関する基本的な捉え方を示しているので、流水型ダムのような新しいタイプのダムについて下流河川の物理環境との関係を検討する際にも知っておくべき基礎的知見を含んでいる。

本資料が扱う分野の科学的・技術的知見は、確立された体系的技術として実務向けに提示するには、未だ十分なレベルになく、様々な研究や技術開発が現在も活発に行われている発展途上の状況である。このことを踏まえ、本資料の作成においては以下に示すねらいを設定している。

①不十分な点があっても、それを明示しつつ現時点での知見としてまとめ、それにより、「関係する人に見てもらい、指摘を受け、議論し、修正すべきところを修正し、逐次改良を図っていく」という環境づくりに資する。

②同時に、現場実務への現時点でのアドバイスおよび参考としても活用する。すなわち、有効な知見は、その適用範囲の理解と合わせて極力現場実務において使えるようにする。

③ダム下流河川の物理環境とダムとの関係を捉えるための基本的枠組みを示し、物理環境の応答に伴う生物応答の検討を活発化する。

④生物応答の検討が行いやすい一部の生物（付着藻類と底生動物）を取り上げ、ダムによる物理環境の応答とそれに伴う生物応答とを関係づける記述を試み、最終目標である、ダムと下流河川の生物・

表 1.1-1 環境要因と物理環境

	環境要因		本資料で主に扱う物理環境
	直接的 *1	間接的 *2	
流況	●		●（洪水時営力）
土砂供給	●		●（土砂流送）
濁度	●		
水質	●		
水温	●		
餌資源	●		
連続性	●		
河道形状・地形		●	●
河床材料・底質		●	●

*1：ダムが直接的に影響を及ぼしうる環境要因

*2：ダムが間接的に（*1 の変化を介して）影響を及ぼしうる環境要因

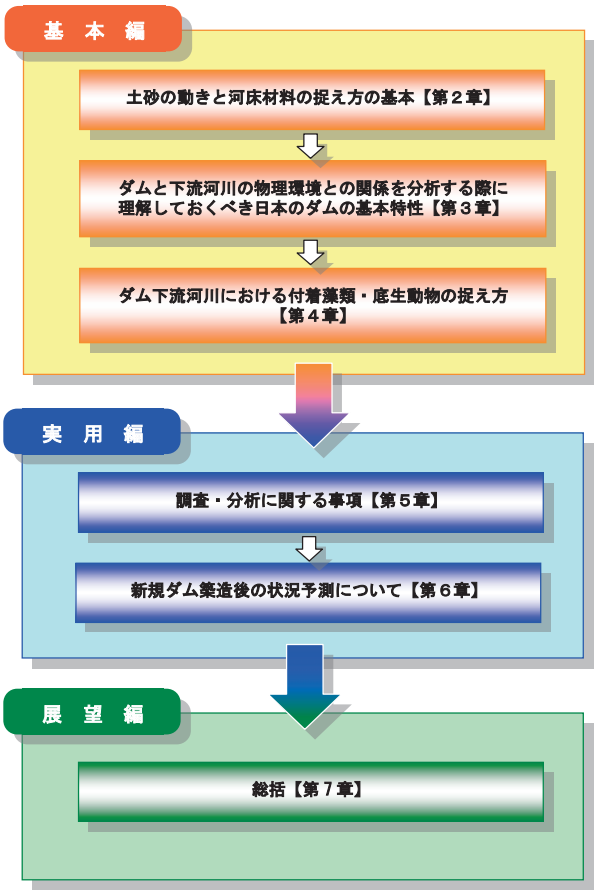
生態系との関係把握に向けての技術的展望を得る。

⑤現状では未確立で、早期に開発すべき技術や獲得すべき知見等に触れ、課題解決に向けての研究開発の活発化に資する。

本資料は、大きく分けて、**「基本編」「実用編」「展望編」**という構成になっている。**「基本編」**では、ダムと下流河川の物理環境との関係を検討する際に知っておくべき土砂動態の基本的特性を説明する（第２章　土砂の動きと河床材料の捉え方の基本）とともに、最低限把握・理解しておくべき日本のダムの基本的特性を示している（第３章　ダムと下流河川の物理環境との関係を分析する際に理解しておくべき日本のダムの基本特性）。また、物理環境の応答に伴う生物応答について、分析事例が比較的多い付着藻類および底生動物を対象にその捉え方を説明している（第４章　ダム下流河川における付着藻類・底生動物の捉え方）。

「実用編」では、ダムと下流河川の物理環境や生物との関係を把握するための調査・分析・予測などの方法について説明している（第５章　調査・分析に関する事項／第６章　新規ダム築造後の状況予測について）。

「展望編」（第７章　総括）では、ダムと下流河川の物理環境との関係や、物理環境の応答に伴う生物応答を把握していく上での課題と展望を、またこれらを評価や施策実践につなげていく上での課題と展望について述べている。



本資料は、通常の技術ガイドラインと違って、検討の全体フローを提示し、それに沿って検討方法を過不足なく示すというスタイルにはなっていない。それは、本資料の中では最もガイドライン的な色彩の強い実用編において端的に現れる。通常のガイドラインであれば、扱うべき現象を明示し、それを分析・予測するためのツールを示すのに対し、ここでは、現象にかかわるシナリオの有力候補群と、分析・予測に役立つ可能性のあるツール群が示されているだけで、どのシナリオを対象とし、どのツールを選択するかの判断については、支援情報が示されているのみである。これは、冒頭に述べたように、ダムと下流河川の物理環境ひいては生物・生態系との関係について、包括的な現象シナリオを描くに足る知見が集まっていないことに加えて、起こりうる現象

のパターンが多様であることによる。このため、第５章や第６章では、そうしたシナリオ自体を、検討を通じて個々に柔軟に設定することを想定した内容になっている。対象とするダムや河川・流域等の条件によっては、提示された現象に関するシナリオ群およびツール群では足りず、調査検討を行う者がそれらを独自に構築、発掘することも必要になる。その際には新たな技術的情報を取り入れることも当然求められる。

以上の点で本資料は、通常の技術ガイドラインに比べ使いにくい面がある。その一方、本技術分野は、A：概ね確立された技術的内容、B：現象シナリオと予測法の有力な候補はあるが十分な実証がまだなされていないもの、C：現象解釈について初歩的な検討がなされているにとどまるもの、が混在し、しかもこれらが研究開発や実態把握の進展とともにダイナミックに動きうる状況にある。こうした中で、全てが確立されるまで検討を先延ばしするのではなく、その時点で手に入る種々の知見を最大限に活用して物事の判断の質を着実に高めていくことが大事との立場から見れば、上記のスタイルは一定の合理性を持つものと考えられる。少なくとも、現象のシナリオと予測手法を無理に固定化し、たとえば一次元河床変動計算が意味のあるツールにならない場合もあるのに、現象が河床変動に関わるものであるからと機械的にそうした計算を行うようなことは避けることができる。本資料を活用する際には、このような特徴を十分踏まえておくことが重要である。

最後に、本資料で生物的側面を扱う際の基本スタンスを以下に説明する。表題に示すとおり、本資料の基本ターゲットは物理環境である。しかし同時に、ダムによる物理環境の応答とそれに伴う生物応答とを関係づける記述を試み、ダムと下流河川の生物・生態系との関係把握に向けての技術的突破口を提示することも目指しており、このため、限定的ではあるが、生物に関する現象を取り上げている。ここで、生物の中で付着藻類・底生動物に対象を絞ったのは以下の理由による。

① 既往の研究事例が多くインパクトーレスポンスに関する知見が蓄積されている。
② 移動能力が魚類と比較して小さく、その場の環境特性を反映する。
③ 生態系の中で付着藻類は重要なエネルギー基盤となり、底生動物・魚類の餌資源として重要である。
④ 付着藻類を含む河床付着膜の状態は、景観・レクリエーション、アユの餌資源として重要であり、かつ付着藻類の諸特性との関係が比較的明瞭である。
⑤ 底生動物は生活史・餌のタイプが多様であり、ダム下流で生じる様々な環境要因の変化に応じて群集構造が変化する。
⑥ 底生動物はエネルギー基盤とより上位の栄養段階にある生物との中間的な栄養段階にあり、底生動物が生態系の変化を知るための手がかりとなる可能性がある。

本資料におけるこれらを指標とした生物相の応答に関する整理には、以下の点において限界・課題があることを予め示しておく。

① 陸域の生物相の応答は評価対象外となっている。ただし、陸域の植生消長について簡易な予測手法を取り上げている（6.3.3 参照）。

② 水域の生物相の応答を考えた場合、付着藻類と底生動物に対象を絞っているために、これらに関する食物連鎖を介した上位生物（例えば、魚類）への影響については分析が可能だが、直接的環境要因（ダムが直接的に影響を及ぼしうる環境要因）の変化→生息場の物理環境変化→上位生物への直接的影響、については対象外となる（例えば、水深が低下して魚類の生息そのものが困難になるケース)。

③ 付着藻類・底生動物については、現在までのところ調査が瀬の流心部に限定されていることが一般的であるため、瀬以外で起きる現象を評価できない。

④ 底生動物についてはダム堤体の出現に伴う連続性の遮断は環境要因の変化として取り上げられていない。

⑤ 付着藻類・底生動物について記載された主要経路は一般化されていない場合がある。また、観察レベルで得られた知見もかなり含まれている。

生物に関しては、以上の趣旨をよく踏まえた上で本資料を用いる必要がある。特に、「限界・課題」は本資料における生物相への応答に関する適用範囲そのものであり、よく理解して本資料を活用しなければならない。

1.2 ダムと下流河川にかかわるインパクトーレスポンスの概観と検討対象の重点化

ダム下流におけるインパクトーレスポンスとしては大きく、

①ダムが直接的に影響を及ぼしうる環境要因の変化を介した生物の応答

②その環境要因の変化により生じる生息・生育場などの環境要因の変化（ダムが間接的に及ぼす影響）を介した生物の応答

③生物の応答を介した他の生物の更なる応答

④生物の応答を介した環境要因の更なる変化

という４つの経路が想定される。全てのインパクトーレスポンス系の中で、最初のきっかけは①や②を介した経路であり、それが始まった後③、④へ波及していく。したがって、インパクトーレスポンスの関係の実態を明らかにし、今後の予測・評価に結びつけて行くためには、まず①、②における「直接的環境要因の変化→生物応答」「直接的環境要因の変化→生息・生育場など間接的環境要因の変化－生物応答」についてのメカニズムを既往の知見に基づき解明していくこと（直接的、間接的環境要因については表 1.1-1 を参照されたい)、また、この結果に基づき、環境要因の変化予測についての精度向上を図り、将来的には生物応答の予測可能性を拡げていくことが必要である。

ダム下流のインパクトーレスポンスを考える際に考慮すべき直接的環境要因としては、流況、土砂、水温、水質（濁質を含む)、餌資源、連続性に分けることができる。これら直接的環境要因の変化に対する生物相の応答（①）については近年内外において研究が進みつつある。環境要因の変化が生物に及ぼす影響は、直接的に生物相に影響を及ぼす経路だけでなく、直接的環境要因の変化が河床低下・河床構成材料の変化等生息場の改変を介して生物相に影響を及ぼす間接経路（②)、生物相互関係を介して（③)、もしくは、生物から環境要因への働きかけを介して（④）再度生物相に影響する経路も有している。

ダム下流における河川生態系の変化を扱った論文をレビューすると、インパクト（環境要因の変化）からレスポンス（生物の応答）に至るまでの経路を分析した数多くの報告が見られる。しかし、各経路の因果関係は個別のダムを事例的に分析した結果として示されており、流域やダムの特性を踏まえた汎用性のある知見として整理されていない（詳細は、1.3（魚類)、４章（付着藻類、底生動物）に記載)。したがって、全ての経路を対象として生物の応答を予測する汎用的な技術を提示することは現段階では難しい状況にある。そこで、本資料では問題解決を図る端緒として、ダム下流河川の物理環境の変化を大局的に予測する手法を提示し、この手法に基づく水生生物の応答を捉えるための基本的枠組みを示すことを試みた。

具体的には、流況および土砂（供給・流送）を対象とし、これらの要因が改変された場合の生物相の応答を定性的に評価し得るアプローチの提示を行う。ここで、流況および土砂（供給・流送）はダムの目的上改変が不可避である場合が多く、また、改変に伴う生物への影響は直接的な経路だけでなく、河床形状や河床構成材料等生息場

所の変化を介した間接的な経路を考慮することが必要となる。間接的経路に依拠して変化する河床形状や河床構成材料は、水生生物の生息場所の基盤を形成する。そして、上述のように、間接的環境要因変化に伴う生物応答は、直接的環境要因変化に比較して知見の蓄積が少ない。以上から、流況・土砂は水生生物の応答を予測・評価するための最も基本的な要因であり、かつダム下流河川における生物・生態系に関する研究においても重要な位置づけをなすと捉えることができる。

生物の応答については、前述のように、研究例が多くインパクトーレスポンスの関係について多くの知見が存在すること、また、移動性が低くその場の環境変化に対する応答性が良いこと、定量的なデータの取得が可能なことから、付着藻類と底生動物を対象とし、主として流況・土砂との関連性を念頭に置いた取りまとめを行う。

こうして、日本のダム下流で頻出する現象を把握し、その主要経路をダムと河川の諸特性との関連から意識し、分析の道具を整えておくことは、今後の下流河川の生物相の応答の予測に必要なだけでなく、既存ダムの実態把握を行う際の効率的な調査計画の立案にも重要な視点となるだろう。ただし、我々が感知し得ないダム下流現象がある可能性も否定できない。既に明らかになっている現象に焦点を絞り実態把握・予測・評価を行うことは重要だが、我々が知覚できる生物相の応答には常に限界があると言う謙虚な姿勢を保ち、より広範な視点を持って下流河川に目配りすることも必要である。

ここで、「河床形状あるいは河床構成材料の変化」に着目することが重要である理由を、ダムが下流河道に与える物理的影響から再度確認しておく。ダムが供用されることにより、下流河道に生じる可能性のある影響としては、「流況の変化」と「土砂供給量の変化」が考えられる。流況の変化としては、出水時における流量変化（ピーク流量の低減、出水頻度の低下、出水時期・タイミングの変化など）と、平常時における流況変化が考えられる。また土砂供給量の変化としては、ダム堤体により土砂移動が扞止されることによる下流への土砂流送量の遮断・低減がある。これらは、程度の差はあっても、河床形状の変化や河床構成材料の変化など何らかの物理環境変化を起こす可能性がある。こうした物理環境の変化は、生物の生息・生育場の変化につながる可能性がある。少なくとも、河床形状、河床表面の構成材料、植物などの立地条件としての河床特性（攪乱頻度を含む）にどのような変化が起こるかの予測は、最低限必要な事項と考えられ、そこに焦点を当てることの優先度は高いと判断できよう。

ダムによって下流の流況や土砂流送が変化する場合に起こりうる河床形状や河床構成材料の変化は、従来、日本においてもダム下流域の生物・生態系を考える上で重要とされてきた。にもかかわらず、現場の実態に基づく研究例は意外に少ない。このため現在においても、なお、断片的な知見を各人がばらばらに引用あるいは想定しながらダムの影響を論じる状況から十分には脱し得ていないと考えられる。たとえば、ダムはその設置場所で土砂を貯めるので、ダム下流でこれまでに生じた河床低下や粗粒化は専らダムが原因であるとの紋切り型の議論がよくなされる。しかし、ダムによる流量変化には様々なパターンがあり（3.2 参照）、また、物理環境変化は、下流河川の

元々の特性や、下流で合流する支川の影響度によっても大きく変わりうる(3.3 参照)。このことから、「河床構成材料の粗粒化」や「河床低下」だけを最初から想定するのではなく、様々なパターン・程度のレスポンスがあり得ることを考慮すること、ダム下流河道の物理環境変化を支配しうる要因をダム以外も含め総合的にとらえて、個々の河川区間でどのような変化が起こりうるかを実態に即して検討していくというスタンスを取ることが肝要である（6.2、6.3 参照)。

また、ダム下流の河床変動や河床材料の予測には様々なレベルがあり、その手法について解決すべき課題も多く残っている。調査・分析に必要な労力も小さくない。したがって、物理環境変化予測→生物変化予測というように一方向的に技術開発を進めるのは適当でなく、生物の生息生育状況の変化に関する検討を物理環境変化の予測手法の検討に随時フィードバックさせることも重要である。本資料が提供する情報は、そのようなフィードバックための土台を物理環境検討の側から示すという位置づけも兼ねている。

1.3 ダム下流での環境要因の変化が生物に及ぼしうる影響に関する研究のレビュー

Poff・Hart(2002)はダム貯水池の存在が河川生態系に及ぼす影響を検討する際に考慮すべき主要な要因として、1)土砂供給量の減少、2)エネルギー基盤の変化、3)流況の変化、4)水温の変化、5)水生生物の移動阻害、の 5 つを挙げている。ここで、エネルギー基盤は餌資源の質・量に関する内容を意味し、上流から流下する落葉等の粒状有機物がダム貯水池でトラップされ、代わりに、貯水池で生産された植物・動物プランクトンが下流河川に放流され、落葉等の粒状有機物に依存する底生生物がプランクトンに依存する底生動物に置き換わるケースが実例として挙げられる。ここに示された 5 つの要素には「濁り」、「水質」に関する要素が含まれていないが、実務上は濁りや水質（例えば、栄養塩類、溶存酸素等）が問題となる場合もあるので、この要因を加え、ダム下流における環境要因の変化と生物相の応答との関連性を整理する。環境要因の変化と生物相の応答については、今まで、数多くの研究が個別のダムを対象に実施され、多くの知見が集積されている。特に、海外では日本と比較して研究報告が多い。また、要因別に見ると、流況そして水温の改変に対する生物応答についての研究報告が他と比較して多く、洪水流量の減少、平常時の流量の多寡、季節的な流況の変化、水温の低下等が生物に及ぼす影響を明かにしている。

４章において付着藻類、底生動物の各要因に対する応答特性を整理するので、ここでは魚類を対象として要因の変化に対する応答を整理する。

1) 土砂供給量の減少に対する応答

ダム下流域における土砂供給量の減少は河床低下に伴う瀬・淵構造、水際構造等の生息場所の構造の変化そして河床材料の粗粒化を引き起こす場合があることが知られている。しかし、1.4 でも述べるように、土砂供給量減少に伴う生息場所構造の応答特性や河床材料の応答は単純ではなく、状況によって様々なパターンが起こりうる。ここで

は、物理環境変化への生物応答の代表例をわかりやすく示すという目的にしたがい、河床の粗粒化が生じた場合に絞って魚類の応答を整理する。

粗粒化に伴う魚類の応答に関する研究報告は内外において少ないが、北米ではサケ科魚類の産卵に及ぼす影響について研究が散見され参考になる。一般に、サケ科魚類の産卵は瀬頭で行われ、雌が産卵床を掘り返すことが必要となる。産卵時にサケ科魚類が動かすことが可能な河床材料は平均粒径で 15mm（小型のマス類）から 50mm（大型のサケ類）と言われることから(Kondlof・Wolman 1993)、河床の粗粒化はダム下流域におけるサケ科魚類の再生産を困難にする可能性が高い。事実、米国の Sacrament River には、かつて chinook salmon(*Oncorhynchus tshawytscha*)が高密度で産卵する場所があったが、河床掘削と Shasta Dam からの土砂供給量減少に伴い河床が粗粒化し、産卵場所が消失したことが報告されている(Parfitt・Buer 1980)。

2) エネルギー基盤の変化に対する応答

貯水池内での栄養塩の枯渇、下流への濁水の供給は、貯水池下流における付着藻類の一次生産力を低下させ、底生動物群衆及びこれらを餌資源とする魚類に影響を及ぼす可能性がある(Osmundson et al. 2002)。一方、貯水池内部で生産されたプランクトンは下流での餌資源供給量を増大させて、場合によっては魚類に好適な環境を提供する。例えば、米国の Gavins Point Dam からのプランクトンの流下はダム下流に生息する American Paddlefish(*Polyodon spathula*)に重要な餌資源を供給することが示されている(Boehmer 1973)。また、旧チェコスロバキア Vire River Valley Reservoir における植物、動物プランクトン等の Svratka River への流下量増大は、生息する魚類のすべてのサイズ・年級群に対して餌資源として寄与することが示されている(Peňáz et al 1968)。

貯水池からの餌資源供給やダム下流域における一次生産力は変化しないが、流況等他の要因が変化することによって魚類群集に供給される餌資源が変化する場合もある。例えば、人工洪水に伴うサケ科魚類に対する餌資源供給を調査した例によると、2 回の人工洪水実験時における全流下物量に対する底生動物の流下量の割合は 0.006%から 0.013%、0.010%に増加し、流下物を餌資源として利用するサケ科魚類がこの変化に応答したことが示されている（ただし、他の魚種は当該魚種が本来有している昼間と夜間の周期性を維持した）(Mundie 1974)。

3) 流況の変化に対する応答

流況の変化が河川に及ぼす影響を系統的に論じた”The natural flow regime paradigm”では(Poff et al. 1997)、流況を以下の要素に分割し、河川生態系の応答との関係を論じている。①規模(magnitude)：ある期間に発生する流量の大きさ、②頻度(frequency)：ある規模の流量が対象期間内に発生する頻度、③期間(duration)：特定の状況（例えば、氾濫原が冠水する）が生じる期間、④タイミング(timing or predictability)：ある規模の流量が発生する時期で、対象とする時間スケール（例えば、1 日、1 年）において周期的に当該規模の流量が発生することが重要となる、⑤変化率(rate of change)：ある時間内に変化する流量（水位）の大きさ。

以下に流況の改変に伴う魚類の応答を①～⑤の要素と関連付けて紹介するが、実際の流況の改変では幾つかの要素が複合的に変化する。このため、要素と魚類の応答との関連付けは、流況の改変－魚類の応答との関係から見て最も関連が深いと判断された要素を対象として示した。

「①規模」については洪水のように規模の大きな流量の改変、平常時の流量の増減に分けることができるだろう。平常時の流量の改変は長期化する場合が多く「③期間」の要素とも関連する場合が多い。魚類群集への影響は流速、水深、濁度等を介した直接的な経路だけでなく、魚類の餌資源となる付着藻類や底生動物の増減を介した間接的な影響が考えられる。

洪水時の流量の改変に対する応答ついては米国Colorado Riverにおける報告が見られる。この例では、春季の融雪出水に伴う河床材料の移動が河床上に堆積しているシルト、砂の除去に寄与していたが、ダムによる流況制御の結果、河床材料が移動する流量の回帰年が1.3～2.7年から2.7～13.5年（区間によって値が異なるため差がある）と長くなり、シルト・砂の堆積が進んだ。この結果、付着藻類・底生動物の生息密度が減少し、これらを餌資源とするColorado Pikeminnow(*Ptychocheilus lucius*)が影響を受けたことが示されている(Osmundson et al. 2002)。なお、極端に規模が大きい洪水や渇水は生残率を低下させて、生活史、行動の両面で環境適応を促し、場合によっては選択圧として働いて進化を支える要素となるため(Lytle・Poff 2004)、流量改変に伴う影響は長期的に評価をしていく必要があるだろう。

平常時の流量の改変については、流速等の物理環境（直接的経路）、餌資源（間接的経路）を介した魚類群集の応答例をそれぞれ紹介しよう。滝里ダムの運用に伴う流量減少の例は物理環境の変化を介した応答例と捉えることができる。この例では、下流河川の緩流域と抽水植物帯が増加し、この結果、このような環境を選好するイバラトミヨの生息個体数が増大したことが報告されている（佐川ほか 2004）。一方、米国のConowingo Dam下流で夏季における最小流量を増加させた例では、流量の増加に伴い、魚類の餌資源となる底生動物が増加して、white perch (Morone american)、yellow perch (Perca flavescens)、channel catfish (*lctalurus punctatus*)の肥満度が増加し、white perchの成長速度が増加したことが示されている(Weisberg・Burton 1993)。

「②頻度」・「⑤変化率の改変」については水力発電の運用に伴う流量の短期的変動に対する応答を調べた報告が多く見られる。一般的に、急激な流量の増加は、産卵床の破壊、仔稚魚を中心とした生息魚類の流失、産卵行動の抑制を引き起こし、魚類群集に影響を及ぼす可能性がある(Petts 1984)。スペインのRio Tera川にあるValparaiso Reservoirでは水力発電の短期的な流量制御のためダム下流からコイ科魚類が消失し、サケ科魚類の当歳魚が優占したことが示されている(Garcia de Jalon et al. 1994)。ただし、著者は同論文の中で他のケースでは逆の現象が起きていることを引用し、下流河川における魚類群集の変化を一般化することの難しさに言及している。また、米国Glen Canyonダム下流のコロラド川の水位は一日で2～3m変化し、この結果在来種が減少し、外来種に変化しつつあること(Holden・Stalnaker 1975)、この理由として、Colorado River

本川の環境の短期的変動に伴い在来種の産卵が支川に限定されること、仔稚魚の多くは本川で生息できないことが挙げられている(Holden・Crist 1979)。

「⑤変化率の改変」については、水位の急激な減少に伴い魚類が河床間隙・淵に取り残される現象(fish stranding)が報告され、取り残しに影響を与える要因との関係解明が進んでいる。例えば、未成魚を対象として河床間隙と淵における水位低下時の取り残しを明らかにした実験では、淵については魚類の生息密度、水位低下速度等と関係が見られたが、河床間隙への取り残しの有無は要因との関係性が見られなかったことが報告されている(Irvine et al. 2009)。

「④タイミング」については、流量増加と魚類の遡上行動との関係について多くの研究が行われ、特定の季節に定期的に発生する洪水の生態的役割の解明が進んできている。Hynes (1970)は移動性の高い魚類が流量の増加（水位の上昇）によって上流への移動を開始し、放流が一定の場合は移動が抑制されることが示したが、一方で、人工的な放流は自然降雨による増水と比較してその効果が小さいこと(Hayes 1953)、遡上の刺激を提供するのは流量の変化ではなく溶存している物質濃度の変化であり、貯水池からの人工的な流量の増加は魚類の移動に対して自然増水と同様の効果を有していないことが示されている(Alabster 1970)。このような、流量の増加に伴う魚類の移動は、その後に産卵行動を伴うことが多い(Paugy 2002)。Baillyet al. (2008)は流量の増加と産卵との関係を調べ、流量増加後の産卵行動は魚類の生活スタイル（移動距離の長さ、対外受精・体内受精、卵を保護するか・しないか）によって異なり、移動性が中・体外受精・卵無保護のタイプの魚種は、移動性大、体外受精・卵保護タイプ、移動性低・体内受精・卵保護のタイプと比較して流量の影響が相対的に小さいことを示している。洪水の季節性を改変した場合の応答例に関する研究は少ないが、変化に伴い食物網全体が変質する事例が間接的な影響として示されている。例えば、流量制御により冬季から夏季に洪水時季が変化した場合には、捕食に抵抗性のある無脊椎動物が増加し、steelhead trout(*Oncorhyncus mykiss*)の未成魚の成長率が低下したことが報告されている(Wootton et al. 1996)。

このように、洪水の季節性の改変は魚類の生息に影響を及ぼす可能性が示されてはいるが、影響の程度は同一時期に洪水が規則的に発生する下流域（特に、氾濫原を有するセグメント）においてより大きく、氾濫原的環境を有しない上流域では影響が相対的に小さいと考えられている点に留意する必要があるだろう(Petts 1996)。

4) 水温の変化に対する応答

水温は、筋肉の収縮速度、代謝速度を制限することによって遊泳、餌生物の捕獲、餌資源の同化に影響し、結果として魚類の生残、成長、産卵、胚の発達を支配する。このためダム下流における水温の改変は場合によっては魚類の生息に強く影響を及ぼす可能性がある(Petts 1984)。例えば、種固有の水温の閾値よりも高いもしくは低い状態が長期間継続すると、上記理由によってストレスが増大し、致死率が上昇することが知られている(Saltveit 1990)。特に、このような状況は特定の狭い水温域に依存する魚種にとってより深刻であり、最悪の場合は個体群の消失を引き起こす可能性がある

(Trautman・Gartman 1974)。次に、水温が低下する場合と上昇する場合に分けて具体的な研究報告を見てみよう。

冷水放流に伴う具体的影響については幾つかの報告が見られる。例えば、米国のCenter Hill Dam 下流の Caney Fork River では、Polyodon sp.の成魚はかなり長期にわたって河道に生息することが確認されるが、卵および仔魚は確認されない。これは、貯水池からの放流水は、産卵期に Polyodon sp.の仔魚が採捕できる箇所の最も低い水温よりも更に 1℃から 1.5℃低いことが理由と考えられている(Pasch et al. 1980)。また、南オーストラリアの Murray-Dariling 流域では、過去 80 年で多くの淡水魚が個体数、生息範囲の両面で減少してきているが、生息場所の破壊、分断化、外来生物等幾に加えて、水温低下に伴う魚卵の致死率の増加も一因と考えられている(Lugg 2000)。また、冷水放流が種間関係を介して魚類群集に影響を及ぼすケースも確認されている。例えば、12～14℃を選好する rainbow trout (*Oncorhyhus mukiss*)や brown trout (*Salmo trutta*)が導入されたオーストラリアの河川では、種間関係（餌資源・生息場所を巡る競争、捕食－被食関係）の変化により在来種である Galaxid species（南半球に生息するサケ科魚類）の個体数が減少していると言われている（Environmental Protection Agency 2004)。また、このような水温の低下は河川における一次生産力を低下（付着藻類の生長速度の低下）させ、藻類食の魚類への直接的影響もしくは藻類食の底生動物の生息密度の低下を介して間接的に魚類の生息に影響を与える可能性もある。

水温の上昇に関する研究は多く見られない。一般に、魚類を含む生物の代謝と摂食速度には強い正の相関はあることが示されているが(Wootton 1995)、代謝速度の上昇は、孵化までの期間を短くし、成長と生残率を維持するために必要な餌資源の質、量に対する要求量を増加させて成長速度を押し上げる可能性がある。また、冷水性の生物が下流河川に生息する場合には、低水温に依存する狭温性生物の選好値を越えれば当該種の減少を引き起こす可能性がある。例えば、英国 Wimbleball Lake 下流の Haddeo River では、流量制御の結果ダム下流の平均水温が上昇し、流量制御しない河川と比較して brown trout(*Salmo trutta*)の孵化が 57 日早まり、年末までに体重が 67%増加する可能性が示されている(Walling・Webb 1993)。また、米国ミシガン州の表流水取水を行う幾つかの小規模ダムを対象にした調査結果では、水温の低かった下流河川において最大で 5℃以上の水温上昇が確認され、brown trout (*Salmo trutta*)、brook trout(*Salvelinus fontinalis*)、slimy sculpintp(*Cottus bairdi*)といった幾つかの冷水性魚類の生息密度が減少したこと、生息魚種の総数は増加したことが示されている(Lessard・Hayes 2003)。

ところで、このような水温変化の空間的な影響範囲は、流量、放流水温、大気温、ダムの標高や水系内での位置、河川の規模、支川の流入状況、渓畔林等の繁茂状態、河床や河道地形、地下水の状況等の要因によって変化する(Ward 1985 ; Palmer・O'keeffe 1989 ; Storey・Cowley 1997 ; Poff・Hart 2002)。ダムの集水面積が小さく、ダム直下下流方向に集水面積が急速に増加する場合（支川が多く流入する場合）、日射が抑制されない場合には水温は比較的早く回復すると考えられるが、その反対の条件下では回復には相当の距離を必要とする。例えば、Glen Canyon Dam からの冷水放流は、下流に相対

的に暖水を供給する支川が存在しないこと、また、河道が峡谷内にあり日射が抑制されるため、冷水区間が長く続くことが報告されている(Holden・Stalnaker 1975)。また、オーストラリアの南東部における幾つかの主要河川でも同様の理由で貯水池からの冷水放流が下流数百 km に対して影響を及ぼすことが報告されている(Preece・Jones 2002)。

5) 分断化に対する応答

分断化は魚類の移動への影響を介して個体群の構造に影響を与えると予想されるが、今まで実施されてきた調査・研究の多くは分断化の影響を適切に評価できる調査デザインとなっていないことが多く(Svendsen et al. 2004)、その実態を明確に解明した研究報告は少ない。研究のアプローチとしては、以下に示すように個々の個体を追跡する方法に加え、広い空間スケールを対象としてダムの有無による群集構造の差異から分断化の影響を評価する方法がある。

個々の個体を追跡した事例としては Gosset et al. (2006)の研究がある。この研究ではダムによる分断化が著しいスペイン Bidasoa 川においてラジオテレメトリーを用いて brown trout(*Salmo trutta*)の行動を追跡し、個体が一旦支川に遡上すると、当該支川の環境の良否に拘わらず他の支川への遡上を試みないこと、また、支川に遡上しても支川が低流量であること、そして、支川にダムが存在することにより上流への移動が困難になることを示し、分断化に伴い本川への遡上が制限され、生息場所として好適とは言えない支川に依存している状況を明らかにしている。一方、福島(2005)は、既存情報に基づき分断化の影響の評価に成功している。この研究では、北海道全域においてダム下流の淡水魚の種数を評価し、時代の推移と共にダム下流地点において確認種数がそれ以外の地点と比較して有意に低下することを示している。また、ダムの魚道の有無と魚種との関係を見るとサクラマスは魚道のないダム上流でのみ採捕数が減少し、ハゼ科、カジカ科魚類、スジエビ等の小型で遊泳力に乏しい生物は魚道の有無に拘わらず生息が確認されなくなることを示し、分断化に伴う水生生物全体の変化を明らかにしている。

6) 水質の変化に対する応答

水質の変化として注視すべき項目としては pH、濁度、溶存酸素濃度、栄養塩濃度、有機物濃度、アンモニア等が想定される。これら水質の変化は自然条件下では想定されにくい生理的なストレスを引き起こし、下流河川の水生生物の生息に影響を及ぼす可能性がある。なお、栄養塩濃度の変化、プランクトンの増加（指標としては BOD の増加）は「1)エネルギー基盤」の項を参照してほしい。

上記水質項目の中で、溶存酸素濃度・濁度と魚類の生息については研究が散見される。溶存酸素濃度については深層放流に伴う溶存酸素濃度の低下が懸念されるが、ダム直下流における溶存酸素濃度は再曝気により急速に回復するため、酸素レベルの低下に伴う魚類への影響は局所的である可能性が高い(Petts 1984)。一方、ダムの洪水吐からの放流水により形成される過飽和溶存酸素水(high total dissoived gas supersaturation : TDGS)は魚体の組織内の間隙にガスバブルを形成し、病気に対する感染率、捕食の増加、成長や遊泳能力の低下、ガス病(Gas Bubble disease:GBD)に伴う血管や心臓の閉塞を引き

起こすことが報告されている(Dawley・Ebel 1975)。ただし、TDGS が問題となったとする報告は内外ともに少なく、その実態はあまり明らかになっていない。

濁度については低濃度の濁りが長時間継続する「濁水の長期化」が懸念されるケースが多い（外国では高濁度の河川が低濁度になる問題が懸念される場合がある)。低濃度の濁りは直接的・間接的な経路を介して魚類に影響を及ぼす可能性がある。いずれの経路についても研究報告は少なく影響は明確でないが、直接的経路については濁度の変化が魚類の捕食－被食関係に影響する点について幾つかの研究が見られる(Johnson・Hines 1999 ; Bonner・Wilde 2002)。例えば、近年米国等において絶滅が懸念される white sturgeon(*Acipenser transmontanus*)の仔魚を捕食魚である prickly sculpin(*Cottus asper*)と異なる濁度下で同所させると、濁度の増加に従い捕食圧が低下することが報告されている(Gadomski・Parsley 2005)。このような研究報告は濁水の長期化を背景として実施されていないが、濁度変化が捕食－被食関係に影響を及ぼすという点は、濁度が増加した際の魚類の応答を考える際にも有効な情報となるだろう。

間接的な経路に関する研究については更に研究事例が少なく、その実態は明らかでない。想定される影響としては、濁度増加に伴う河床付着物への無機物の取り込みと餌資源としての質の低下、河床まで到達する光量減少と一次生産力の減少等があり、いずれも付着藻類を餌資源とする魚類への影響が懸念される。しかし、実河川において、濁度の増加と一次生産の低下との関連を示す具体的なデータの収集は技術的に難しい点が多く（例えば、村上 2002 が参考になる)、実態解明には更なる研究が必要となる。

以上、1)土砂供給量の減少、2)エネルギー基盤の変化、3)流況の変化、4)水温の変化、5)水生生物の移動阻害、6)水質の変化、を対象として魚類の応答についての知見を整理してきた。ここで紹介できたのは研究全体の一部であり、実際にはより多くの研究報告が存在する。また、4 章で説明するようにダム下流における付着藻類、底生動物に関しても数多くの報告が行われている。これらの論文を読むと、総説以外の研究報告は個別のダムを対象として個々の要素と生物相の変化を記載し、その因果関係を考察するスタイルを採っており、ダム下流域における生態系の評価技術、予測技術にまで発展を遂げた研究はあまり見られないようである。今後は、個別のダムを対象とした研究を積み重ねるだけでなく、流域・河川・ダムの特性に基づきダム下流におけるインパクトーレスポンスを適切に評価する技術、予測する技術の確立が必要となる。

1.4　ダム貯水池による下流物理環境の変化に関する研究動向

近年、日本においても、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（辻本 1999 ; 谷田・竹門 1999)、底生動物に着目した影響把握（波多野ほか 2005）や物質動態に与えるダム貯水池の影響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(正確には河床構成主材料(2.2 で説明する材料 m)に関する)、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(たとえば;平野 1971;芦田・道上 1971;辻本・本橋 1990)。それらは、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。下流自然環境へのダム影響を把握する上記の研究には、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そのまま当てはめた上で、生物への影響把握に主眼を置くものが少なくない。しかし、ダム下流の個々の現場で当該ダムがどのような河道変化を起こしたかについて、実態や機構を合理的かつ丁寧に把握するものには必ずしもなっていない。

粗粒化という最も典型的と思われている現象についてさえ、河川工学的な事例研究が日本において十分には行われてこなかった理由の一つとして、ダムが下流河道に与えて来た影響を厳密に実証的な方法で分析することが実際上意外に難しかったことがあげられる。山本(2004)は天竜川や梓川で、最近では時岡ほか(2006)が鬼怒川で粗粒化などの河道変化の実態を明らかにしている。これらは、分析しやすい対象の選択や既往資料の分析法の工夫を通じて過去からの河道地形や河床材料変化を追跡できた事例である。しかし、多くのダムが山間部にあり、そうした場所は河川管理の主対象となっていないことが多く、河道データの蓄積が希有であることから、過去からの変化を追うことにより分析が可能となるケース(いわゆる調査分析の BA デザイン;5.2 に詳述)は限定的である。そうなると、ダム影響が無い場所とある場所について現時点(事後)の河道状況を把握・比較する手法(いわゆる調査分析の CI デザイン;5.2 に詳述)を採ることになる。しかし、ダムによる河道変化を河川工学的観点から厳密に調べるために、ダム影響がある場所(インパクト区)の比較対照区間(コントロール区)を選ぶのはかなり難しい。

たとえば著者らの一部(山原ほか 2007)は、ダムによる河道変化を事後データだけから厳密に明らかにするには、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、この条件を満足するサイトを抽出する作業を行った。具体的には、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 ダムを取り上げ、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(軽微なものは除く)を実施していないこと、の 2 条件で絞り込みを行い、次に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 条件を概ね満足するダムを抽出した。その結果、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 ダムだけが残った。これらのダムの上下流の河道比較を分析した結果は 5.5.1 で紹介している。

この作業過程が示すように、ダム貯水池が下流河道に与える影響を事後データだけから実証的に厳密に把握できるケース、いわば理想的なコントロール区を設定できる場合は極めて限定的である。だからといって、上記の 5 条件を吟味せず、対象ダム近傍で上流にダムの無い支川であることだけをもって、あるいは本川上流であることだ

けをもって、さらにはダムから下流に離れていることだけをもって無理に理想的コントロール区とみなしてしまうことは、上記の目的からは明らかに必要な精緻さを欠くと言える。こうした状況を踏まえると、次のようなポイントが重要になってくる。

a)理想的なコントロール区を設定できる場合には、事後調査から、[ダム貯水池の存在→下流河道の変化、生物応答]の関係を当該事例について一気に明らかにできる可能性がある。当該ダム貯水池の存在が下流にもたらす影響について、直接的な検討が可能となる。その意味で、a)が可能となるケースは貴重である。ただし、そのようなケースは極めて限定的である。

b)理想的なコントロール区が持つべき条件をいくつか欠いたコントロール区を設定せざるを得ない場合、[ダム貯水池の存在→下流河道の変化、生物応答]の関係を一気に事例分析することは一般に不適切となる。この場合、コントロール区とインパクト区の差異のうち、どの部分がダム貯水池の存在によるもので、どの部分がそれ以外によるものかを、コントロール区の性質や支配的な現象についての考察を踏まえて、個々に丁寧に仕分けする必要がある。その上で、ダム貯水池と下流河道の変化、さらには生物応答との関係について分析していく。

c)上記 b)で必要となる仕分けを行うためにも、また a)も b)も事例研究の範疇であり、一般化・体系化という点で壁があることから、コントロール区とインパクト区の比較だけに頼るのではなく、[ダム貯水池→下流河道変化]、[ダム貯水池→生物応答]、[下流河道変化→生物応答]の関係について、これらを支配する現象の理解と考察、モデルなどを介したその定量的、定性的記述を組み合わせていくことが大事になる。

d)上記 a)のケースが少ないことを踏まえ、新しいダム貯水池について、その設置前後にまたがる適切なデータ収集を今後積極的に行っていくことが重要である。

さて、以上のうち b)c)においては、現象理解やそのモデルによる記述、分析が重要になる。以下に、ダム貯水池による下流河道の変化にかかわる現象について、研究の現状と課題を述べる。前述のように、従来から粗粒化のメカニズムやそのモデル化については（厳密には河床構成主材料に関して；2.2 で説明する材料 m）、多くの研究が蓄積されており、これらは、混合粒径の河床変動計算を通じて、実務における技術判断にも反映されている（たとえば、土木学会 1999）。その一方で、ダム下流河道は山地部河道であることが多く、そこでは、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混合粒径材料とは異なり、主河床構成材料の粒度分布の幅が沖積河川よりかなり広く、平面的不均一性が大きく、巨礫（表 1.6-1 の粒径階参照）が混じることも珍しくなく、さらには噛み合わせ効果も考えられるという特性がある（山地部河道の特性については 2.7 で詳述している）。こうした状況においては流砂や河床変動を記述する従来の枠組みを修正・改良する必要がある、という観点からの研究が最近行われている。

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（表 1.6-1 参照）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いるおり、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。藤田正治ほか（2008）は、非常に広い粒度分布を持つ河床の変動を記述する際には、たとえば、相対的に細粒の材料だけが抜け出す、あるいはそうした材料だけが河床を覆うような場合に表層河床の空隙率が大きく変化することとなり、空隙率が不変として河床変動を行う従来の計算法では不十分であることを指摘し、空隙率の変化を考慮した河床変動モデルを提案している。長田・福岡（2008）は、巨石の露出による河床安定機構（形状抵抗の発揮）や空隙空間の形成を表現することを重視し、河床表面にある各粒径の高さを計算することを組み込んだ河床変動解析法を提案している。これらはいずれも、非常に幅広い粒度を持つ河床特有の現象を織り込んだ河床変動計算を試みたものである。

河床構成主材料（2.2 で説明する材料 m）である礫（山地河道ではふつう中礫～巨礫）に対して、微細砂～中砂は 10^2～10^3 オーダー以上小さいので移動性がはるかに高く、その他の条件も相まって、一般には微細砂～中砂の巨視的挙動は山地河道区間を通過するだけの「通過型」とみなすことができる（通過型についての詳細な説明は 2.4 でなされている）。これらが、水域において礫床を覆うことはなく、せいぜい礫間を埋めるように存在するだけである。したがって、山地部河道において、微細砂～中砂が流下能力に有意に影響するような河床変動を起こすことは水域については一般にないと考えて良い。しかし、生物の生息・生育場という観点から見ると、礫間の砂がどの程度の高さで存在しているかは、重要な特性量となりうる。5.5.2 に詳述するが、Takao et al.（2008）は、山地部河道の河床礫間に存在する砂の量が底生動物相と有意な相関を示すことを、ダム下流河道の支川合流前後および支川との比較に基づき明らかにしている。著者らの一部（山原ほか 2007）は、前述のように、水理条件があまり変わらないダム上下流の河床材料を比較し、主材料である礫の粒径に有意な違いがないのに対して、その礫径よりも二桁以上粒径の小さい砂の河床面での存在状況には有意な差があり、下流側では礫間に存在する砂の割合が大幅に減っている事例を見出している。さらに、ダム貯水池から下流に土砂を流す土砂管理においては（Sumi 2003 ; 岡野 2004）、少なくとも量的には砂粒径以下が主対象になることが多く、砂を流した先の河床状況変化が想定される。こうしたことから、生物との関係を考慮する場合には、河床変動という意味で有意な変化を河道にもたらさないとしても、山地部の礫床河道における砂の挙動は重要な現象の１つとなりうる。米国では、礫床への細粒土砂の過度な堆積（”Fines pollution”、 “gravels polluted with fines ”）は土砂水理学が取り組むべき課題とされている（ASCE Task Committee 1992; Parker 2008）。この認識はかなり前からなされており、その背景、詳細については後述する。

Einstein(1968)は、空隙を持つ礫床への浮遊細粒土砂の沈み込みについて実験を行い、沈み込みによる浮遊土砂濃度の減少を表現する簡単な式を導いている。Alonso・

Mendoza(1992)は、礫床上を流れる浮遊土砂の底面付近濃度が、砂床河川における浮遊土砂濃度の計算法を用いることで表せることを確認している。芦田･藤田（1986a;1986b）は、礫間からの細砂の巻き上がりに関する現象を詳細に調べ、礫による遮蔽効果と河床表層での砂の存在割合や砂面高さを考慮した浮遊砂量算定式を提示している。道上ほか（1994）は、この知見を用いて礫層への砂の沈み込みと堆積過程を実験的に調べ、計算により再現しており、また Huang･García（2000）は礫床への浮遊砂による充填状況・速度を簡便に予測する手法を解析的に導いている。粒径が大きく異なる礫･砂の挙動の取り扱いは流砂系管理においても重要と認識されるようになり（辻本･藤田 2004）、前述の「粒径集団の通過型･混合型の区分」（藤田 2000）や「（礫床上を流れる砂などの）オーバーパッシングロード」（江頭ほか 2000）という捉え方が提示され、これに基づき、より実態に即した計算法･分析法などが検討されている。泉・パーカー（1995）は、礫床河道内の側岸部に堆積する細砂の挙動について、上流から供給された細砂の礫間への充填、充填された細砂の巻き上げというプロセスに着目した基本的解析を行っている。関根ほかは（関根・矢島 2005；関根・林 2007）、砂の礫間への充填およびその巻き上げのプロセスと、礫による河床変動の両方を一緒に扱うことが重要との考えから、芦田･藤田による浮遊砂量式（芦田･藤田 1986a; 1986b）を組み込んだ礫･シルト充填河床モデルを構築し、流路変動や河床変動などの計算を行っている。これは、礫とシルトの２粒径に単純化されているものの、幅広い粒径を持つ河床の変動解析を従来の交換層の概念に頼らず、より実態に即して行おうとするものであり、前述の新しい河床変動解析の試み（長田・福岡（2008）；藤田正治ほか（2008））と力点の置き所は異なるものの、同系列の試みの嚆矢と言える。著者らの一部（藤田光一ほか 2008）は、大礫床表面への浮遊砂の部分的（礫間への）堆積に関して礫間の砂面高予測に耐える定量的知見が共通して重要になっていると考え、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った実験を行っている。ここでは、実際の山地部河道に近い条件を設定し、流量を一定として、縦断方向に一様な水理条件を作り、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べ、砂面高予測のための基本情報を得ている。

以上からわかるように、体系的な技術には至っていないものの、粒度分布が非常に幅広いこと、水深や河床変動のスケールに比して大きな粒径が存在すること、粒径によって流砂形態や移動性が大きく異なること（全く異なる流砂形態が共存すること）、という特徴をより合理的に反映させる方法を見いだす研究が活発に行われている。ただし、実際の山地部河道に適用し、その技術的有用性を確認・検討するまでには至っておらず、こうした研究成果を実務に橋渡しし、その結果をフィードバックして、実務に耐える技術に仕上げていくことも大事である。「橋渡し」に際しては、検討に必要な現場河川の情報を準備することが、手法の有効性検討と同等に重要となる。なお、従来の混合粒径の河床変動計算を平面二次元で行い、生物への影響検討を意識して物理環境変化に関する技術判断を行おうとする検討が、現場ニーズ先行で行われている。

このような方法による検討の有効性や適用限界を明確にしていくことも合わせて求められている。

さて、ダムが下流河道に及ぼす様々な影響の実態を調べた事例研究は米国に多い。代表的なものとして、Williams･Wolman（1984）が、 コロラド川、ミズーリ川など１５の沖積河川に造られた２１ダムの建設前後の河道変化について行った分析がある。分析対象は、流量（平均日流量、平均年最大流量）、土砂流送量（浮遊砂）、河床高、河床縦断形、河床材料、川幅、植生などであり、河道変化の実態が多面的に把握されている。この分析は、ダム建設前後にわたる営力や河道に関する諸情報の経年変化分析に基づかれており、典型的な BA デザインに依拠する研究事例である（流量についてはコントロール観測点も設定している）。また、ここで分析されている河道変化は総じて明瞭である。こうしたことの背景には、米国のダムと河川にしばしば見られる特徴や状況、すなわち 1) 大規模な貯水池を持つダムではあるが、急峻な山地部の渓流的河道ではなく、開けた地形に建設され、流域および河川の規模も大きく、その上、勾配 1/2000 以下が含まれるなど比較的緩勾配河川が多く、砂床河川まで含まれること、2) 下流における平均年最大流量の減少率が大きいこと（平均で 6 割減少、9 割に達するものもある）、3) ダム下流で有力な支川が入るまでに距離を要すること（Williams･Wolman（1984）の分析では、ダム下流でダム建設前の土砂流送量に近づくのに、ダム地点から数百 km ～千 km 以上も下流に行く必要があるケースに言及している）、4) ダム建設時点が古く、にもかかわらずその相当前からデータが蓄積されているケースがあるなど、ダム建設前後の河道変化を長い期間にわたり追跡できる状況を一定数見出しうること、などがあげられる。以上からは、既設ダムについて BA デザインに基づく分析を行うことがデータの制約から困難で、多くの場合 CI デザインに頼らざるを得ない前述の日本の状況との違いがよく理解できよう。ただし、米国においても、個々のケースの検討となると、建設前後の比較やコントロール区の設定が難しい事例が出てきて、ダム影響を分析するための戦略、特に複数のアプローチを組み合わせることの重要性が指摘されている（Braatne et al. 2008）。Meade･Parker（1985）は、浮遊砂観測データに基づき、ミズーリ川における浮遊砂フラックスの縦断変化を分析し、上流から下流に向かって漸増していたフラックス（年間総浮遊砂量）が各ダム地点でほとんど 0 になるまで急減することを、わかりやすい図化表現（ダム建設前後の土砂流送マップ）とともに明らかにしている。Uda et al.（1995）は、コロラド川とミズーリ川にある代表的なダムについて、ダム堆砂とその粒度分布、下流の河床変動に関するデータを収集･整理して、ダム周辺のマクロな土砂収支分析を行い、ダム竣工後にダム下流で生じた河床低下量がダム貯水池に堆積した土砂量の一部に過ぎないことを示している。

河道の樹林化、安定化やそれを伴う川幅縮小は、外観からも容易に判別できるわかりやすい河道変化であり、米国の河川においてもだいぶ前から注目されている。その代表的原因として、非常に大きな洪水により強制的に拡幅された後の応答とともに、治水・利水・発電などを目的とした上流のダム建設による流量と土砂供給の変化があると言われ、後者は前述の実態分析（Williams･Wolman 1984）においても詳細に取り上

げられている。さらに後者については、上流ダム建設がもたらした河道変化がその河川の元々の自然環境を看過できない程度まで改変させたととらえ（例えば、裸地の減少、在来植物種の健全な更新システムの劣化）、それを軽減するための措置を科学的な現象理解を踏まえて施すことが自然環境再生の鍵であるという考え方の起点になっている場合が少なくなく、このような流れに沿って多くの研究が 90 年代以降活発に行われるようになった（たとえば、Petts 1984; Collier et al. 1996; Auble et al. 1994; Johnson 1994; Scott et al. 1995; Friedman et al. 1998）。こうした動きにも、米国のダム貯水池に関する前述の特徴が関係していると考えられ、特に、多くのダムで高水から低水にわたる流況を大きく制御していること、その影響がダム下流で長く続くことが重要と考えられる。日本においても同様の観察および課題が指摘されるようになっている（萱場・島谷 1995；李ほか 1996）。ただし日本の場合は、３章で述べるように、多くのダムが山地部にあり、ダム直下は別にしても沖積平野まで下ってくると、その影響が薄れることの方が多いので、上記のような河道変化をダムによる流量および土砂制御と直接結びつける捉え方が適切とは限らない。沖積扇状地河道で観察された顕著な樹林化にしても、藤田ほか（2003）が明らかにしたように、樹林化区間を含む当該河道セグメントに対する様々な直接的インパクトの積み重ねが主因であった多摩川永田地区のような事例もある。

山本（2004）は、ダムの作用を含む様々な人為インパクトに対する日本の河道の応答に関して、諸事例を分析し再構成して組み立てるという方法で、外形的なインパクトの種類と河道変化を直接関係づけるのではなく、各河道セグメントの平均年最大流量の増減、河床構成主材料の供給量の増減が河道特性を規定する諸量（川幅、水深、河床勾配、河床材料など）をどう変えるかについて、応答の方向を一般的かつ体系的に示している。このような河道形成システムにまで遡ったアプローチは本質的かつ実質的であり、定性的な表現とはいえ、インパクト－応答の全体像を掴むのに役立つ。Grant et al.（2003）は、縦軸にダムより上流での土砂供給量に対するダムから下流対象地点までの土砂供給量の比をとり、横軸に、土砂流送を起こす流量の発生頻度のダム建設に伴う変化率（ダム建設前に対する建設後の比）をとり、これら２つの無次元量の組み合わせから、ダムが下流河川に与える影響を流域地質の観点から検討する基本的枠組みを提示している。このような大局的な分析の道具が、個々の現象を記述・予測する方法とは別に今後重要になっていくと考えられる。

前述の背景から、ダムによる下流河道の変化が明瞭である事例が多い米国において、それがもたらす自然環境上の課題を解消・軽減するための対策について、比較的わかりやすい技術政策的議論がなされている。たとえば、ダムによる流況制御により出水流量が大幅に減る一方、支川から引き続き、あるいは流域の開発によって従前以上に細粒土砂が供給される場合、これら２つの要因が組み合わさって、礫の間隙に細粒土砂が増えすぎ、あるいは礫床面を覆うようになり、産卵場としての機能が著しく劣化するなど、水生生物の成長・繁殖を支える礫河床本来の機能が失われることなどが問題視されている（Reiser 1998）。この課題への対策の有力な手段となっているのがダム

からのフラッシュ放流であり、ダムによる流況制御によって礫床上や礫間に堆積しやすくなった細粒土砂をフラッシュする必要が認識され、フラッシュ放流のやり方を決めるための方法が 1970 年代から提案・検討されてきた（Milhous 1982; Milhous 1998）。ここでは、フラッシュのターゲットとなる土砂粒径について、移動限界無次元掃流力を拡張した比較的簡単な水理的取り扱いにより必要流量などを決めるという実務的方法が主流となっているようである。Kondolf･Wilcock（1996）、Wilcock et al.（1996）はフラッシュ放流のあり方を様々な角度から検討し、種々の目標設定・計画・デザインの枠組みを提案している。そして、礫の過度な流失をもたらさない範囲で礫間の細粒土砂を効率的に流し去る流量の与え方など、複数の目的や満足すべき条件にバランス良く配慮したフラッシュ放流を、移動限界無次元掃流力を拡張した水理的取り扱いや、現地で得られた流量～流砂量関係を基本に、淵による砂のトラップ効果や表層礫の攪乱効果を平易な形で考慮した表層細粒土砂の収支計算に基づき定める方法を検討している。ダムによる下流礫床河道への影響には、粗粒化だけではなく、ダムからの礫の供給状況と洪水流量の減少度合に応じて種々のパターンがあることが Milhous（1982）によって整理されている。

生物との関係を意識しつつも、河道の物理環境を直接的再生指標として設定し、ダムからの放流のあり方を検討するというアプローチは、米国の多くのフィールドでなされており、そのもっとも大がかりな技術的・科学的取り組みが、コロラド川グランド・キャニオン区間におけるグレン・キャニオンダムからの放流実験（例えば、Webb, R. H. et al. (eds.) 1999）であろう。環境再生の重要な目標の１つとして、ダム下流での減退が顕著な砂州（側岸に接して形成される固定砂州であり、この区間の環境上重要な基盤としての役割を果たす）の再生を設定し、1996 年、2004 年、2008 年の 3 回にわたって、大規模な放流実験が行われた。そこでは、ダム下流の支川から河道に供給され、蓄積している土砂をフラッシュ放流が巻き上げて、砂州を再形成することを期待している。当然のことながら、ダムが無かった時に比べて、圧倒的に少ない砂供給量の下で、いかに効率的に砂州再形成を起こすのか、起こせるのかがポイントとなっているようである。

日本においては、ダムの弾力的管理に基づくフラッシュ放流試験が 1997 年から各現場で行われており、並行して、その科学的・技術的検討もなされている（角ほか 1998）。日本の場合は、前述のように、ダムによる下流河道への影響が必ずしも明瞭でない、あるいは明確にされていない場合も少なくないので、フラッシュ放流をダムにより劣化した自然環境の（部分的）再生策と位置づけるならば、フラッシュ放流による河道や生物の変化の把握と共に、ダム自体が下流河道と生物に与えた影響を把握し、両者の関係からフラッシュ放流のあり方を検討することが必要になってくる。

さて、以上に見てきた研究動向から、ダム貯水池が下流河道に与える影響についての研究には、大きく次の３つの流れがあると言えそうである。第一は、1. 3 で述べたような生物そのものに関する研究である。第二は、物理環境や河川地形、河道景観という切り口からの研究である。第三は、土砂水理学を土台にしたアプローチである。1 番

目が環境影響の評価・予測に最終的に必要となる基本事項を扱うことは言うまでもない。ただし、生物を対象にしていることから、現象把握やプロセス理解、予測は容易ではなく、1.3 で述べたように、情報の蓄積や得られた個々の知見を体系化するのに時間がかかるという課題もある。2 番目は、必ずしも生物を直接的に対象とするものではないが、生物への影響に密接に関係する環境要因を包括的に表現でき、河川のシステムとも深い関わりを持つので、施策立案・評価のベースにしやすいという面がある。3 番目は、正確な現象理解や施策評価に役立ちうるツールとしての重きをなすと言える。なお、これら３つに、さらに水質や物質動態からのアプローチが加わる。それぞれのアプローチ単独で問題解決にまで到達することは難しく、これらのアプローチを、それぞれの特長を活かす形で、対象や状況に応じて適切に組み合わせていくこと、特にその組み合わせ方の戦略が重要である。

1.5 調査対象範囲について

「ダム事業における環境影響評価の考え方」（河川事業環境影響評価研究会編集 平成 12 年 3 月）においては、水環境の調査予測範囲を考える際に、流域面積がダム集水面積のおよそ 3 倍になる地点を一つの目安として示している。下流河川の物理環境変化についても、これを参考とすることが考えられる。ただし、土砂の本支川からの供給は、流量と比べて、地質や地形特性によって流域面積との対応関係が大幅にずれる可能性があり、また、物理環境変化の出やすさが河道各区間の河道特性に左右される度合いも大きい。調査予測範囲の設定にあたっては、これらのことを把握した上で、当該水系の土砂動態の特性を適切に考慮する必要がある（「3.3　ダム地点での変換が下流にどのように伝播していくかを考える上でのいくつかの重要事項」も参考にする）。

生物の応答については植物、付着藻類、底生動物、魚類といった対象生物の違いによって環境要因の変化に対する生物相の応答は異なると考えられる。現段階では、これらの知見に乏しく調査予測範囲を一般化し、範囲を明確にすることは困難である。従って、従来の水環境の目安（ダム集水面積のおよそ 3 倍）に加えて対象生物のダム下流での応答特性について既往の文献等を考慮し、具体的な範囲を個々に設定していく必要がある。「4.1　ダム下流における影響範囲の捉え方」で、生物に関する影響範囲の考え方を述べているので、あわせて参照されたい。

1.6 本資料で用いる粒径の分類と呼称

本資料において粒径の分類と呼称については表 1.6-1 にしたがっている。表中で、左から二列目における中礫と細礫の境界（4mm）と三列目における中礫と小礫の境界（16mm）だけがずれているので留意されたい。本資料では、中礫区分を厳密にする必要があるときのみ、「中礫（■mm～）」と記し、それ以外の場合には「中礫」とだけ記している。

本資料で「礫」と呼ぶときは、特に断らない限り、2mm 以上の粒径の材料を指す。したがって、これには細礫あるいは小礫から巨礫までを含みうる。なお、日本におい

ては、河床構成主材料が礫である場合、小礫あるいは細礫の割合が小さいことが多い。したがって、本資料で礫と言うときは、多くの場合、中礫（16mm～）以上と考えて差し支えない。

河道の物理環境を河川工学的視点から調査する場合と生物との関係を重点に調べる場合とで、粒径の分類・呼称について異なる尺度が用いられてしまうと、同じ現場を調査したにもかかわらず、互いの結果の比較や統合に際して大きな障害となり、河道特性の解釈や分析に大きな不効率を招く恐れがあるので、極力同じ尺度を採用するか、少なくとも、両者の関係が簡単につくようにしておくことが必須である。さらにその上で、河川工学的調査と生物の生息・生育場に関する調査自体の統合化を図っていくことも重要である。同じ河床という場を対象にしているのであるから、河川工学、生物というような分野毎の縦割りの発想にとらわれず、調査計画の策定を表 1.6-1 に示す共通の尺度を用いつつ統合的に検討することがもっと行われて良いはずである。本資料の 5 章において、5.3 では主として河川工学的視点から河道の物理環境を、 5.4 では付着藻類と底生動物との関係を重視して河道の物理環境を調査する方法を説明している。これら 2 つの節において、粒径の分類・呼称について 表 1.6-1 に示す共通の尺度が用いられている。

表 1.6-1　粒径の分類と呼称（河村 1982、 Cummins 1962）

日本で使用されている名称*		Udden-wentworth scale**	AGUの分類		粒径範囲(mm)		φ尺度***
巨　礫	巨　礫	巨　礫	boulders	very large boulders large boulders medium boulders small boulders		4096～2048 2048～1024 1024～ 512 512～ 256	— -11 — -10 — -9 — -8
玉　石	大　礫	大　礫	cobbles	large cobbles small cobbles		256～128 128～ 64	— -7 — -6
砂　利	中　礫 (pebbles)	中　礫 (pebble)	gravel	very coarse gravel coarse gravel medium gravel fine gravel very fine gravel		64～32 32～16 16～ 8 8～ 4 4～ 2	— -5 — -4 — -3 — -2 — -1
		小　礫 (gravel)					
	細　礫						
砂	極　粗　砂 粗　砂 中　砂 細　砂 微　細　砂	極　粗　砂 粗　砂 中　砂 細　砂 微　細　砂	sand	very coarse sand coarse sand medium sand fine sand very fine sand	2～1 1～1/2 1/2～1/4 1/4～1/8 1/8～1/16	2～1 1～0.5 0.5～0.25 0.25～0.125 0.125～0.062	— 0 — 1 — 2 — 3 — 4
シ ル ト	粗 粒 シ ル ト 中 粒 シ ル ト 細 粒 シ ル ト 微 細 粒 シ ル ト	シ　ル　ト	silt	coarse silt medium silt fine silt very fine silt	1/16～1/32 1/32～1/64 1/64～1/128 1/128～1/256	0.062～0.031 0.031～0.016 0.016～0.008 0.008～0.004	— 5 — 6 — 7 — 8
粘　土	粗 粒 粘 土 中 粒 粘 土 細 粒 粘 土 微 細 粒 粘 土	粘　土	clay	coarse clay medium clay fine clay very fine clay	1/256～1/512 1/512～1/1024 1/1024～1/2048 1/2048～1/4096	0.004～0.002 0.002～0.001 0.001～0.0005 0.0005～0.00024	— 9 — 10 — 11

* 主として河川工学の分野で使用されている．土質工学の分野では，礫(2.0mm以上)，粗砂(2.0～0.42mm)，細砂(0.42～0.074mm)，シルト(0.074～0.005mm)，粘土(0.005～001mm)，コロイド(0.001mm以下)として分類している．

** 元々は地質学の分野で使用されていたが，Cummins(1962)が河川生態学の分野に採用した．

*** φ尺度　$\phi = -\log_2 d$　(d:土砂粒子の大きさ(mm))

2. 土砂の動きと河床材料の捉え方の基本

2.1 はじめに

ダムと下流河川の物理環境との関係を考えるに当たっては、ダムの存在により土砂動態がどのように変わりうるかを理解しておくことが重要である。そのためには、ダムがない時の、そもそもの土砂動態の全体像をあらかじめ把握しておかなければならない。ここでは、本資料の目的に即したスケール・解像度での土砂動態のとらえ方を重視して、水系全体での土砂の動きを大局的に把握することを主眼に、1)河床材料についての「材料 m、材料 s、材料 t」の区分、2)「粒径集団」の考え方、3)「通過型」、「混合型」の河床材料の区分、の３つを軸に説明していく。以下の 2.6 までの内容は、藤田による整理法をベースにしている（藤田 2000；Fujita 2008)。

2.2 河床材料の見方

河床材料は縦断的にも横断的にも深さ方向にも大きく変化する。ある特定の河床材料に着目して調査、分析を行うときには、対象とする河床材料がどのように堆積し、どのような働きを持つかを大まかに“イメージ”し、自分が着目した材料の土砂動態全体の中で位置づけを理解しておくことが大切である。このイメージの作り方について、次のような見方が参考になる。

2.2.1 河道横断面内（あるいはリーチスケール内と言ってもよい）での河床材料の分類（藤田(1998)）

河床表面を見ながら、川を横断方向に何度か歩いてみると、非常におおざっぱに言って、3種類の土砂集団に分けられそうに思うことが多い。1つは、流れを頻繁に受けそうな低い河床領域にある、最も粗い粒径の集団である。これを材料m(Main 材料)とここでは呼ぶ。次は、材料 m が存在する場所の脇の高い河床部分にあるもので、材料mの平均粒径よりも1オーダー以上粒径が細かい材料からなる集団である。これを材料s(Sub 材料)と呼ぼう。最後は、平水時に水面下となる河床部分の一部に存在するもので、材料 m の上に（多くの場合薄く）乗った材料であり、粒径は材料 s 程度あるいはさらに細かい（粒状有機物もこれに含めて考え得る）ことさえある。これを材料t(transient 材料)とおく。

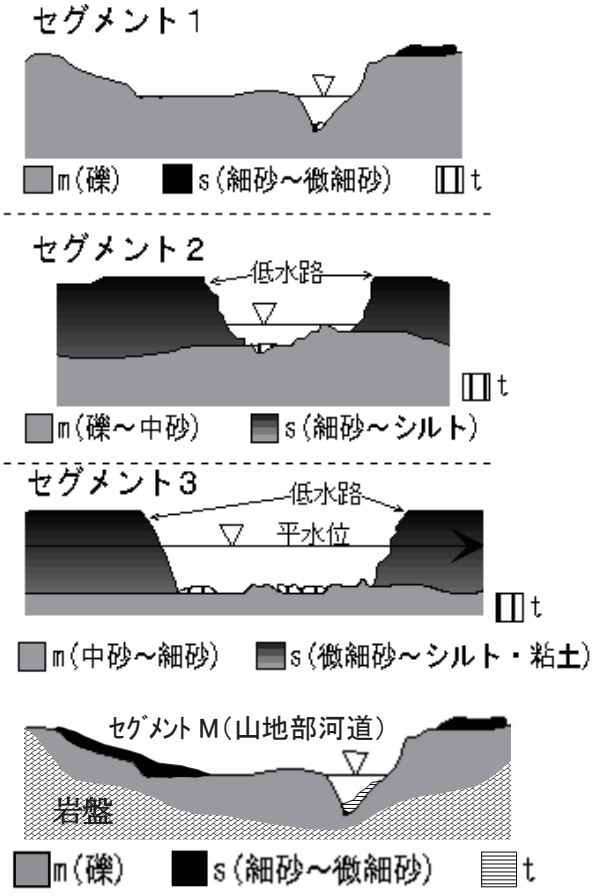


図 2.2-1 河道横断面内（リーチスケール内と言っても良い）（藤田 1998）での河床材料の分類

この材料m、材料s、材料tの横断面内での存在パターンは、山本による河道セグメント分類の区分（山本(1994)；建設省河川局監修日本河川協会編（1997)）ごとに異なる。河道セグメントとは、縦断方向に河道の特性（河床材料、横断形状、勾配、洪水時水理量など）がほぼ一様な区間を指し、多くの沖積河川は、いくつかの河道セグメントが接続して形成されていると見ることができ、河道特性理解の基本単位となる。図 2.2-1 に、材料 m、s、t の横断面内の存在パターンを模式化して描いてみた。

セグメント1では、河岸部を含め大部分を材料 m が占め、一般に材料 s は、見られないか、ごく薄く堆積しているに過ぎない。それがセグメント2になると、低水路の川底と高水敷の深い部分は材料 m であるが、低水路河岸と高水敷は材料 s で占められる。セグメント1でも2でも、材料tの存在は淵の底など限定された範囲にとどまり、全然見られない場合もある。セグメント3では、材料 m と s の存在パターンはセグメント2の場合と大きくは変わらないが、材料 t が空間的にも時間的にもより存在しやすくなる。セグメント M では礫層下の岩の存在が重要になる場合が出てくる。なお、セグメント M の特性については 2.7 に詳述しているので参照されたい。

材料 m は河床材料の“主役”と言える。材料 m は、安定的に存在し、河道の骨格である縦断形状や砂州形状、低水路の粗度係数、構造物の設計に必須の深掘れ深、ハビタットの評価に重要な瀬・淵の形態などを規定する。「河床材料」と言えば自動的に材料 m を指すことが多い。河道特性調査で整理される粒径（建設省河川局監修日本河川協会編（1997)）や、河床変動計算を行う際の河床材料粒径には、材料 m のものを用いる。

材料 m を調べるとき、サンプリング地点を河道状況に応じて適切に決めることは容易でない。通常は、一定間隔で機械的行ったサンプリングの読みとりから始めると良い（建設省河川局監修日本河川協会編（1997)）。河道セグメントごとに、得られた全ての粒度曲線を書き込むと、狭いバンドに集中する曲線群が見えてくるはずであり、これを材料 m の代表的な粒度曲線とする。ただし、サンプリングが機械的なだけに、分布の中に材料 t や s が混じることがある。しかし、材料 t や s の粒度曲線は明らかに材料 m からはずれるので（それだけを検体とした場合)、あるいは二峰性粒度分布における細粒側の粒度となって現れるので（それを含み全体の粒度曲線で表した場合)、そのデータを選別あるいは排除することは比較的やさしい（これも含めて平均などしてはいけない)。ただし、セグメント 3 の一部区間やある条件下では、材料 t が材料 m と同等に優勢か材料 m を凌駕しているように見えることもある。そのような場合には、２つの異なるバンドに集中する粒度曲線群（m と t に対応）のどちらを主役とするかについて、慎重に判断しなければならない。なお、河床材料の調査結果の読み方については、本節 2.2 末尾のトピックスも参照されたい。

材料 s は材料 m の“相手役”と言える。主流路の脇で、浮遊してきた細粒土砂を堆積させることで材料 s からなる河床ができる。材料 s はセグメント 2 と 3 では高水敷の本体を構成するまでになる。ここでの材料 s の情報は、低水路河岸の侵食形態・速度の予測や護岸の必要性の判断、水制などによる材料 s の堆積促進効果の判断、低水路川幅拡幅後の土砂堆積による川幅縮小の推定などに必要となる。また材料 s は、粒度の面でも場所的にも植生繁茂に好ましい条件を持つので、密生した植生を持つことが一般的である。図 2.2-1 に示したように、セグメント 1 での材料 s の堆積は、あっても一般に薄い。しかしそこでは、材料 m である礫が露出している場所に比べ植物がずっと繁茂しやすい。植物繁茂を分析する際にも、材料 s の調査は重要である。

材料 t は河床材料の“端役”と言える。材料 t の存在は、一時的で不安定なことが多く、ちょっとした出水があるとフラッシュされ、あるいは増減する。そういう意味で材料 t は、材料 m、s のような“本格的な”河床材料とは呼べない。しかし、材料 m が一時的にせよ部分的にせよ材料 t に覆われることは、ハビタット構造の変化として重要であり、平水が長く続くときの物質循環にも影響を与える。さらに、流域の変状による供給土砂の変化が材料 t の挙動にいち早く現れることも考えられる。こうしたことから、今後の水環境管理において材料 t の重要性が増すことが考えられる。材料 t に関する調査としては、粒度のほかに、存在範囲とそのタイミングが重要である。粒状有機物の堆積もこのカテゴリーに入りうる。

なお、山本（2004）は、粒度分布の特性に基づき、河床材料を A、B、C という３つの集団に分ける捉え方を堆積学から紹介している。ここで、河床材料の主モードは A 集団、それより粒径の大きいものは C 集団、細かいものは B 集団と呼ばれる。この A、B、C 集団の分け方と今まで述べてきた材料 m、s、t の区分は以下のような関係を持つ。A、B、C 集団という捉え方は、いずれも材料 m に関するものである。したがって、A、B、C 集団は主材料 m の動き方を分析する際に用いることになる。なお B 集団については、材料 s や材料 t の一部（多くの場合、粗い部分）を含む場合がある（ほとんど含まない場合もある）。このため、B 集団は、粒径範囲という意味においては、材料 s や t と重なる場合があり、その際には、B 集団を材料 s や t の分析に一部関係づけることも可能になる。

2.2.2 河床材料の縦断的変化

最初に、材料 m について述べる（藤田ほか 1998）。日本の代表的河川の各河道セグメントについて、河床材料の代表的粒径 d_{rs}（１つのセグメント内の 60%粒径 d_{60} の平均値）と代表的河床勾配 I_{bs}（１つのセグメント内の河床勾配 I_b の平均値）との関係を整理すると、次の２つのパターンに分けることができる。１つは、図 2.2-2 a)に示すように、１つの河川内のすべての河道セグメントが［d_{rs}≧15mm、I_{bs}≧1/1500］のグループ（以後 G セグメントと呼ぶ）、［d_{rs}≦1mm、I_{bs}≦1/2000］のグループ（以後 S セグメントと呼ぶ）、［d_{rs}＝1～3mm 前後、 I_{bs}＝1/1000 前後］のグループ（以後 S’セグメントと呼ぶ）のいずれかに入る河川である。もう１つは、図 2.2-2 b)に示すように、１つの河川内の河道セグメントの中で G、S、S’のいずれのグループにも入らない中間的なセグメントを１つ以上持つ河川である。前者のうち S あるいは S’セグメントを持つ河川をタイプ A 河川、G セグメントしか持たない河川をタイプ B 河川と呼び、後者をタイプ C 河川と呼ぶことにする。なお、S’セグメントを持つのは流域の大部分に花崗岩風化物を持つ河川である。なお、山本による河道セグメント分類（山本 1994；建設省河川局監修日本河川協会編 1997）におけるセグメント 1 とセグメント 2-1 が G セグメントに、セグメント 2-2 とセグメント 3 が S セグメントに対応する。

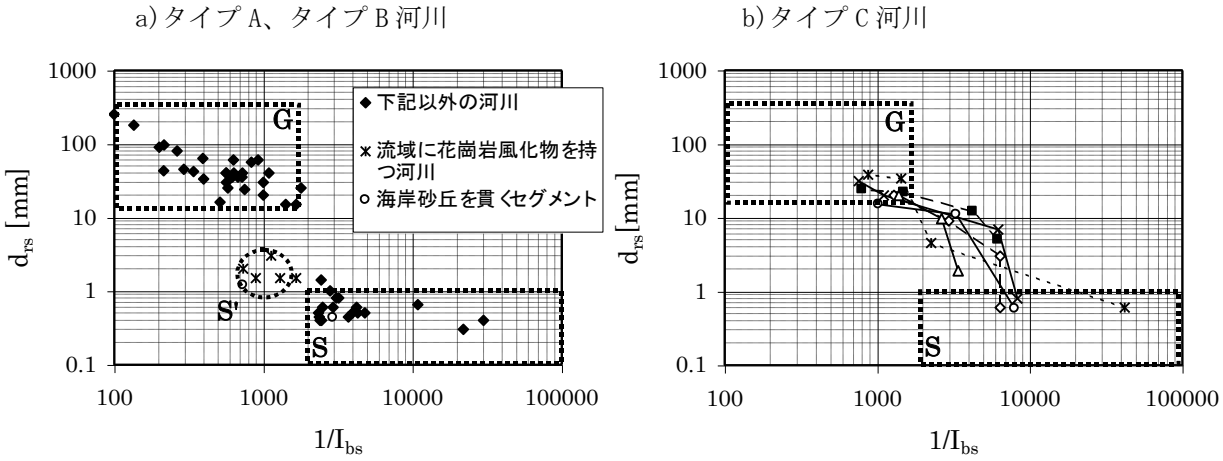


図 2.2-2　河道セグメントの河床勾配と河床材料粒径との関係

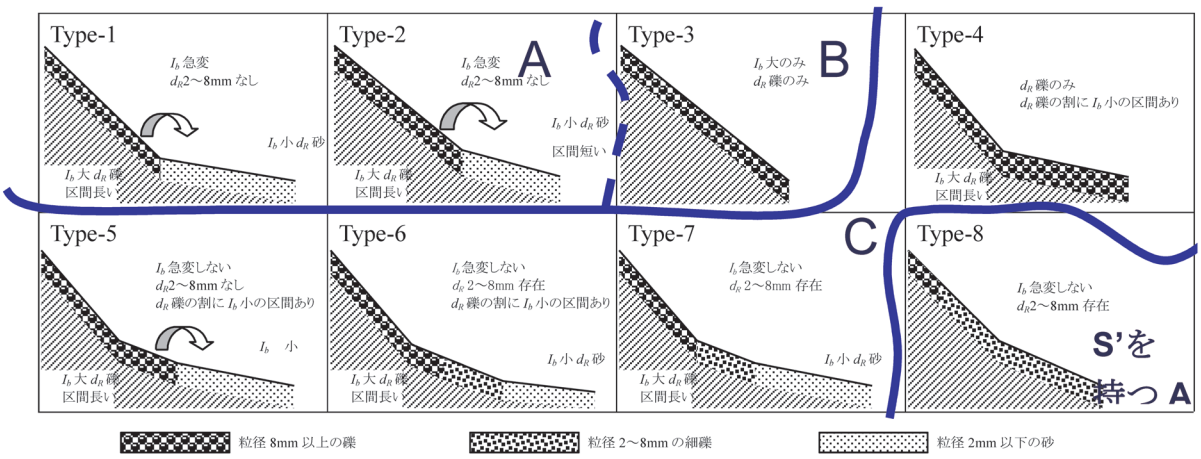


図 2.2-3　タイプ A、B、C の細分類（松尾ほか 1999）

タイプ A 河川のほとんどは、G セグメントの下流に S セグメントが接続するパターン、すなわち急勾配砂利河道から緩勾配砂河道に急変する縦断形を持ち、縦断形に明確な勾配急変点がある。またタイプ A 河川は、規模の大きい沖積平野を持つことが多い。一方、表中のタイプ C に属する河川は、大きな沖積平野を持たないことが多く、また、沖積河道区間に支川を多く持つ。タイプ C 河川は、数多くのセグメントを経て河床勾配と粒径が減少する縦断形を持ち、タイプ A 河川ほど大きな勾配急変がない場合が多い。このタイプ ABC の分類をさらに細分すると図 2.2-3 のようになる（松尾ほか 1999）。

図 2.2-2 からわかるように、タイプ A 河川では、G セグメントに分類される上流河道区間と S セグメントに分類される下流河道区間で河床材料粒径が大きく異なる。このため、上流河道区間の河床には、下流河道区間で河床材料となる粒径成分がわずかしか存在しない。

材料 s、材料 t の縦断変化については、材料 m に比べ調査事例が少なく、体系的な分析はまだなされていない。いくつかの調査事例（李ほか 1999、1998；藤田ほか 1996；宇多ほか 1997）からつかむことができる傾向を試行的に表示して、上記の材料 m の特性と合わせたのが表 2.2-1 である。この表から、流砂系における土砂動態の全体像をつかむためのポイントをいくつか指摘できる。

第一は、従来河床材料調査の対象となっていた材料 m は、重要ではあるが沖積河道を構成する材料の一部に過ぎず、これだけに限定しないで材料 s、t を含めて河道を構成する材料を幅広くとらえておくことの重要性である。第二は、河床材料の粒径が縦断方向に大きく変化することが一般的なので、当該セグメントの材料だけに着目するのでなく、当該河川を構成するセグメント全てにおける河床材料の存在状況を把握しておくことの重要性である。第三は、粒径が異なる（互いの粒径範囲が重ならない）材料の組み合わせが多いことに着目することである。たとえば、材料 m と材料 s、t の粒径はすべての河道セグメントで互いに異なり、また、材料 m だけで見ても、G セグメントと S セグメントの粒径は異なる。

粒径の異なる材料間では流砂系における動態のパターンが異なっていると見ることができ、表 2.2-1 のような整理から、同じような動き方をする粒径の集団について当たりをつけておくことは重要である。表 2.2-1 からは、沖積河道を構成する材料の全体像をとらえる上で、少なくとも礫以上、中砂程度、微細砂以下という３つ粒径集団を考える必要があると言えそうである。さらに、場合によっては、粒状有機物を入れる必要があるかもしれない。

なお、表には、海岸部・沿岸部も形だけ加えている（★印）。河川から供給される土砂の海岸地形などへの寄与が有意な河川・海岸を対象にする場合には、海岸部の材料について同様の整理をする必要がある。たとえば、海岸・沿岸の構成材料が直近の河道セグメントの材料 m なのか、材料 s に対応するものか、もっと細粒なのかなどの区別は、河川～沿岸間の流砂系を考える際の基本情報となる。このような整理は、海岸と河川の材料の粒度曲線を重ねて表示するだけでも相当程度進む。そのわかりやすい例の１つが図 2.5-2 に示されているのであわせて参照されたい。

表 2.2-1　沖積河道における河床材料の存在状況

	上流←	河道セグメント分類（カッコ内は材料 m に着目したもの）			→下流
	セグメント 1（G セグメント）	セグメント 2-1（G セグメント）	セグメント 2-2（S セグメント）	セグメント 3（S セグメント）	海岸・沿岸部 ★
材料 m（洪水が挙動を決める）	礫	礫	砂(粗砂～中砂)	砂(中砂～細砂)	
材料 s(洪水が挙動を決める。植生や横断形による流速低減効果も重要)	細砂中心(中砂～シルトが混じることも)（李ほか 1998、1999）	細砂、微細砂（シルト混じりが多い。中砂が混じることもある）（李ほか 1999）	シルト混じりの細砂および微細砂、シルト（李ほか 1998)	シルト混じり微細砂、シルト（粘土が混じることも）	
材料 t(平水時や小出水時の供給＆タイミングが大事。洪水でフラッシュされる)	中砂以下？ 含；粒状有機物	中砂以下？ 含；粒状有機物	微細砂以下？ 含；粒状有機物?	シルト以下？ 含；粒状有機物?	
海岸・沿岸にかかわる材料分類★					★

注)河川から供給される土砂が海岸・沿岸にとって重要な場合、★印の部分を入れることも大事である。海岸材料になるのは、直近（最下流）セグメントの材料 m（の一部）であることが多いが、s あるいは t の寄与が重要になる場合もあると考えられる。

【トピックス】河床材料の調査結果をどのように見るかについて

一定間隔で機械的行ったサンプリングによる河床材料調査結果を整理する状況を考える。河床材料の分析においては、2.2.1 で説明したように、材料 m、材料 s、材料 t の認識・判別が重要となる。

図-1 に示す粒径加積曲線の２つの例は、それぞれ同一セグメント区間における河床表面に関する材料調査から得られた粒度曲線を全て重ね合わせたものである。このように全て重ね合わせて１つの図に表すことで、当該区間の材料分布の全体像を掴むことができる。

材料 m は図中の緑や橙から、あるいはその両方から構成されていると見ることができる。図中の青は、湾曲部の内側に形成されている砂州や岩盤・巨礫の裏側（下流側）、堰の直上流部に分布している場合が多く、これらは材料 t に分類される、あるいは材料 s になるものと分類できる。

なお、図-1 の上段のデータにおいて、m2 は m1 に対してかけ離れて大きい。実際、山腹からの直接供給が原因であり、上流から流送されてそこにあるものとは違うと見ることができる（2.7.1 に記述している(7)(8)と関連する）。このように、材料 m の中でも、動きの特性が根本的に異なる集団を特定することが大切である。

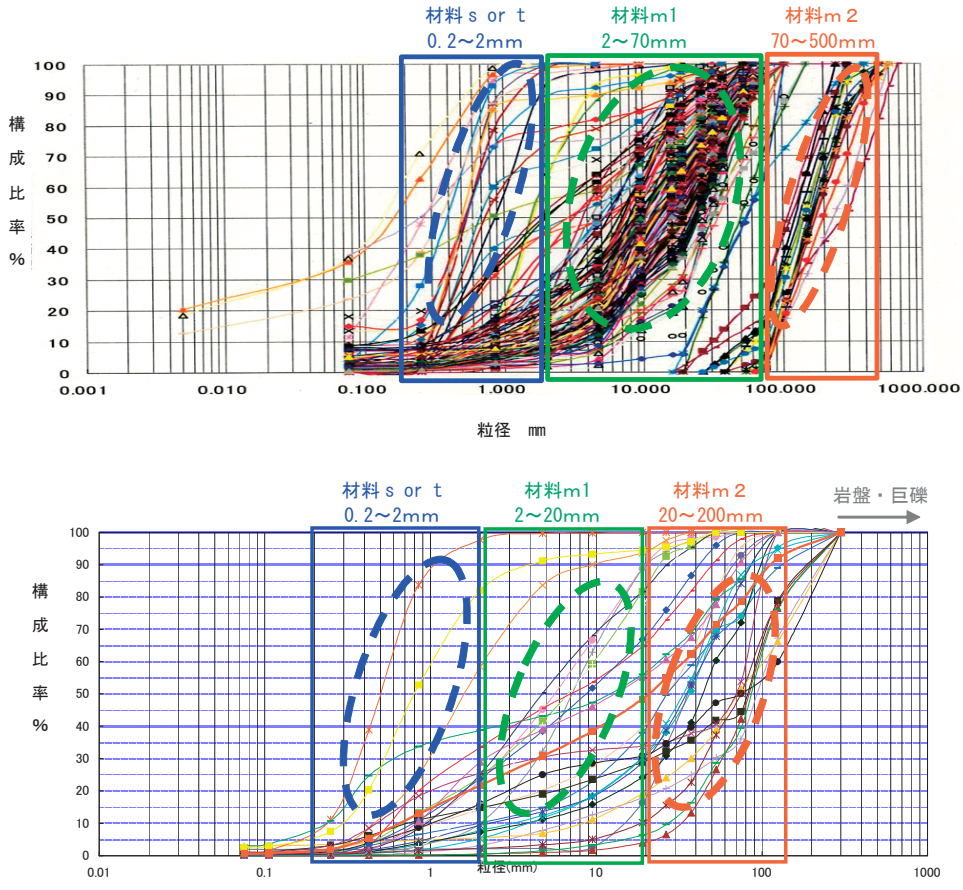


図-1　粒径加積曲線と材料 m、s、t の検討例

2.3 沖積河川に供給される土砂

沖積河道の河床材料（場合によっては海岸材料も）が土砂生産域から沖積河川への土砂供給状況を反映したものであることに間違いはないが、供給土砂と堆積した材料とが一対一の関係にあるとは限らない。沖積河川に供給される土砂を別途把握しておくことも必要である。

図 2.3-2 に、代表河川の沖積平野への土砂供給について、沖積平野の体積から求めた 1 万年程度の年平均値と（図 2.3-1 参照）、ダム堆砂量から求めた 10～30 年程度の年平均値を、比供給土砂量の形にして示す（藤田ほか 1998）。供給土砂量から比供給土砂量を求める際に用いる土砂生産域面積は、沖積平野上流端から見た流域面積としている。ここでは、供給土砂量を 1 年当たりの堆積した状態での体積（空隙を含む）で表現している。

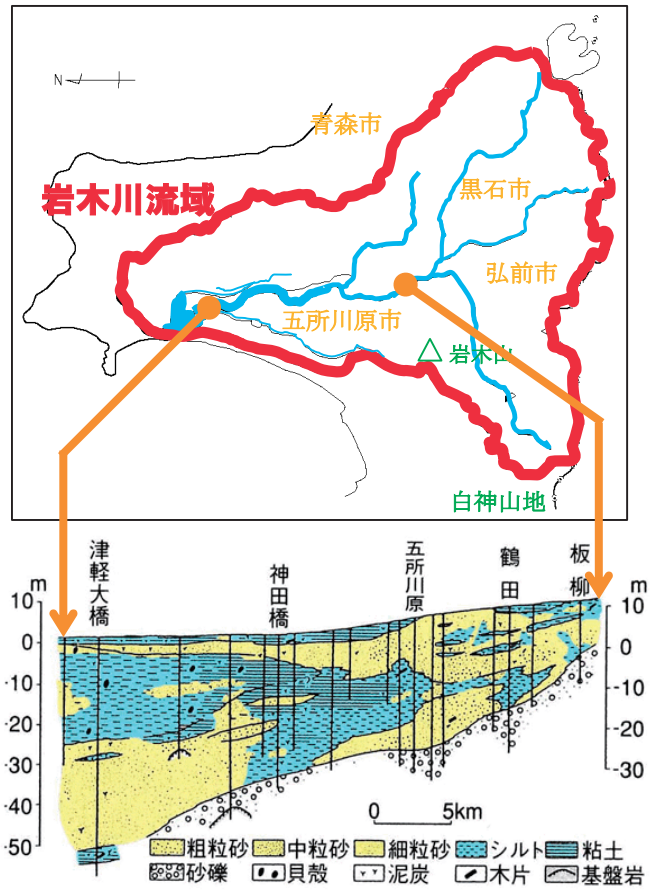


図 2.3-1 沖積平野の堆積物から長期にわたる粒径別土砂供給量を見積もるイメージ
（下の図は、村山ほか（1984）の第 4 図を一部改変）

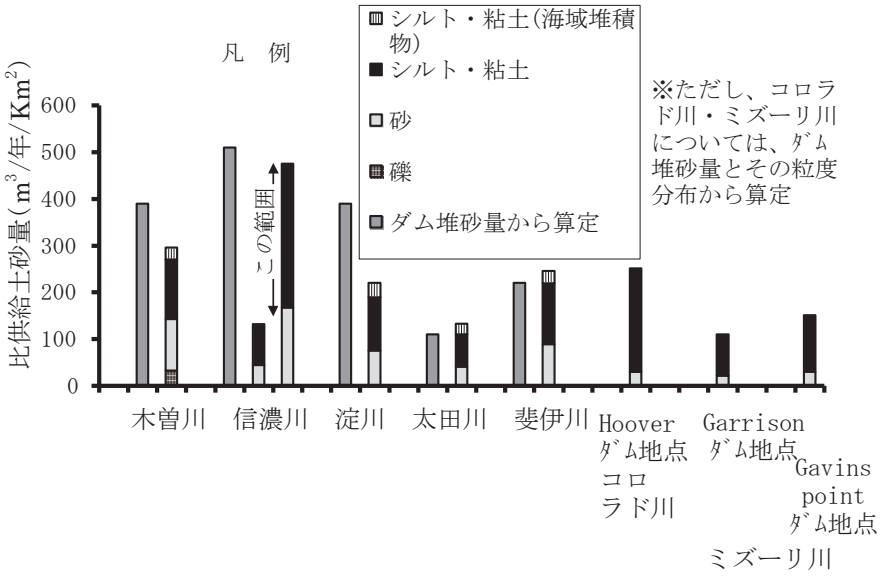


図 2.3-2 沖積平野堆積構造から調べた粒径範囲ごとの沖積河川への土砂供給量

図 2.3-2 から供給土砂の粒径について見ると、対象河川による大きな違いがなく、いずれも砂利：砂：シルト・粘土＝(0%～10%):(35%～40%):(50%～65%)程度の構成比となっている。このことは、供給土砂の大部分が砂とシルト・粘土で占められていること、特に細粒分(シルト・粘土)が多いことを示している。全供給土砂のうち細粒分が多いというこの傾向は、米国を流れるミズーリ川とコロラド川についても同様に見られる（図の右から１～３番目の棒グラフ)。

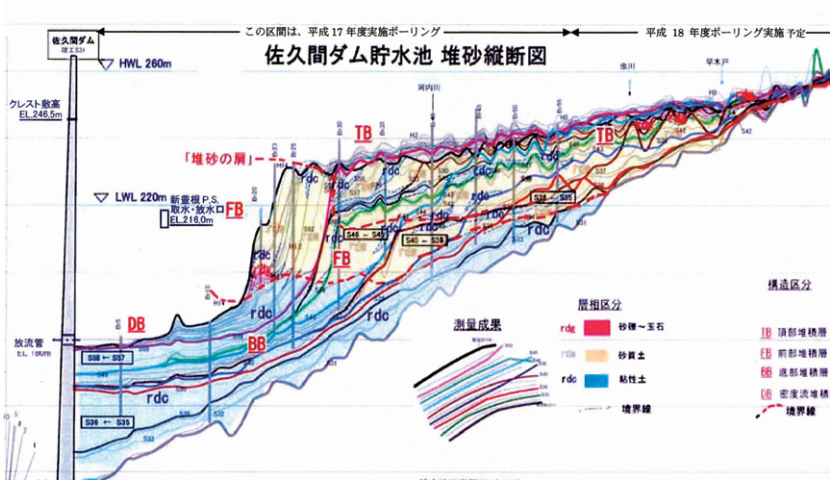


図 2.3-3　ダムに堆積した土砂の粒度構成をボーリングデータから把握した事例
（天竜川水系の佐久間ダム）（国土交通省中部地方整備局浜松河川国道事務所提供）

最近は、日本のダムについても、堆積物の量だけでなく粒度分布が調べられ、粒径別の堆積量の算定が体系的に行われるようになった（図 2.3-3 に天竜川の佐久間ダムの例を示す)。図 2.3-4 は、櫻井らによる分析結果であり（櫻井ほか 2003)、やはり、ダムに堆積する土砂の多くが砂とシルト・粘土であることがわかる。なお、ダム堆砂データについては、特に日本のダムの規模の場合、粘土など粒径の非常に小さい土砂が補足されずにある程度通過していると考えられ、実際に生産・供給される土砂分の中では、図 2.3-4 に示されるよりもさらに細粒分が多いと推定される。

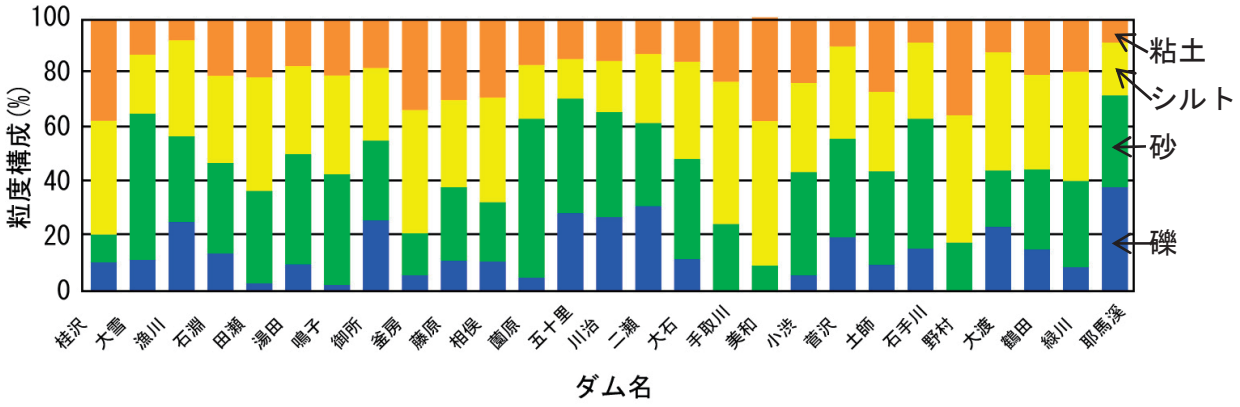


図 2.3-4　ダムの堆積した土砂の粒度構成（櫻井ほか 2003）

以上から、材料 m よりも小さい粒径成分が全供給土砂量の相当程度を占めるという特徴は、多くの河川に当てはまると言えそうである。河床材料として一般的な砂や礫に比べ、河床材料になりにくいので目立たないシルト・粘土の供給量が実は大きく、こうした細粒土砂の潜在的影響力が大きいこと、その一部が材料 s や材料 t になっていることが理解される。

2.4 流砂系という観点からの土砂輸送形態の捉え方

2.3 で述べた供給土砂（図 2.3-2 や図 2.3-4 のような）の一部あるいは全てが堆積し、2.2 で述べた河床材料（あるいは海岸材料）の存在状況（表 2.2-1 のような）が決まる。この間をつなぐのが「土砂輸送形態」である。これについては、水理的な観点から「掃流砂、浮遊砂」という流砂形態の分類がなされ、また流砂の起源に着目した分類として、「wash load、bed material load」の区別がある（土木学会水理委員会 1999）。藤田（2000）は、流砂系における非常に幅広い粒径からなる土砂の輸送を大局的にとらえるために、もう一つ、「混合型、通過型」という分類が必要になると考えている。ここでは、これを「流砂系という観点からの土砂輸送形態の分類」と呼んでいる。水理的な観点からの分類はある地点のある瞬間の土砂流送の形態に基づくものであり、流砂の起源に着目した分類は、文字通り、一出水程度の時間スケールで見た流砂の起源による分類であるのに対し、「流砂系という観点からの土砂輸送形態の分類」では、河道セグメント単位に土砂輸送をとらえ、後で述べる「粒径集団」に着目し、長期に渡る（多くの出水、平水時も含む）土砂輸送とその結果（分級、堆積、地形形成）を強く意識したものである。これらの関係を、混合型、通過型の説明とともに、表 2.4-1 にまとめて示す。

注目する粒径集団が通過型となるには、次の３条件が満足される必要がある。第１は、起こりうる水理条件すべてにおいて、当該粒径集団が材料 m と同じ流砂形態をとらないことである。具体的には、材料 m が静止の時、当該材料は掃流あるいは浮遊卓越で流送され、材料 m が掃流形態で動く時、当該材料は浮遊が卓越する状態で流送される状況になることである。第２は、このうち材料 m が動くモード下で、浮遊卓越で流送される当該材料が、材料 m の表面を覆わず、その一部（礫間など）に存在するにとどまることである。第３は、第２の条件を満たしつつ、材料 m の流送量に比べ当該粒径集団の流送量がずっと大きいことである。以上の３条件が満足されると、当該材料は、材料 m を構成する礫などの隙間を埋める程度で、材料 m と有意に混合せず、材料 m 河床の変動に寄与することはほとんど無く、さらに、当該粒径集団の流送量が縦断的に大きく変わることはない（材料 m 河床の変動量に比べ当該材料の流送量がはるかに大きいから）。結果として、当該粒径集団の流送量は、流量と概ね１対１の関係を持つことになる。なお、こうした考えの詳細は文献(藤田ほか 1998）を参照されたい。

表 2.4-1 流砂系という観点からの土砂輸送形態の分類と他の分類法との対応関係

流砂系という観点からの土砂輸送形態の分類 （ある粒径集団に対して）	従来の分類との関係	
	水理的分類 （流砂形態に着目）	一出水程度の時間スケールで見た(?)土砂起源による分類
混合型： その場所の主河床材料（材料 m）と有意に混じり合いながら輸送される。河床変動に寄与し、その分、自身の流送量も縦断的に変化する。材料 m の流送はその定義から混合型である。河床材料を起源とする。	掃流砂または浮遊砂	Bed material load
通過型： その場所の主河床材料（材料 m）と有意には混じり合わない（せいぜい材料 m の隙間を満たす程度）。材料 m にかかわる河床変動にほとんど寄与できない。その場所は基本的に“通過区間”で、自身の流送量の縦断変化は小さい。一部が材料 s、t になるが、その量は一般に全フラックスに比べればごく小さく（材料 s）、あるいは堆積が一時的（材料 t）なので、マクロにとらえて通過型に分類できる。	多くの場合、浮遊砂。小出水時、平水時には掃流砂のこともあり。	多くの場合 Wash load。 小出水時、平水時には、Bed material load のこともあり。

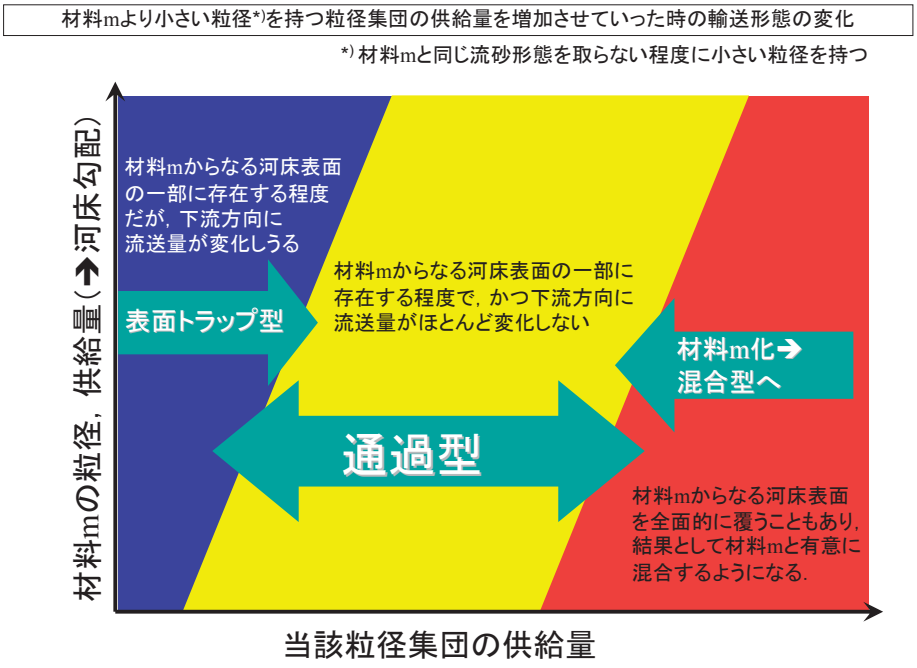


図 2.4-1 材料 m より充分小さい粒径を持つ粒径集団が通過型となるための条件を、当該粒径集団の供給量を増していった時の輸送形態変化から概念的に説明した図

図 2.4-1 は、第１の条件を満足する粒径集団の供給量を増やしていった時の輸送形態の変化を説明したものである。供給量が少ないうちは、第２の条件は満たすが第３の条件が満足されないため、供給した土砂が材料 m の表面にトラップされ、吸収される状況となる。さらに供給量が増え、トラップされる量よりも輸送量の占める割合がずっと大きくなると、第２、第３の条件とも満たされ通過型となる。さらに供給量が増えると、今度は第２の条件が満足されなくなり、材料 m の表面を当該粒径集団が覆い、さらにその上に材料 m が乗るなどの状況が起こり、当該粒径集団が混合型になっ

ていく。日本の河川の砂やシルト・粘土の供給量は、多くの場合、G セグメントにおいて通過型となる範囲にある。仮に、大規模な土砂崩壊や火山噴火等で大量の砂が供給されると、その影響を直接受ける河道区間では、図 2.4-1 の右側の領域に一時的にシフトすることが考えられる。しかし、こうした状況が常態化することは日本においては普通考えにくい。

通過型・混合型という分類は、すぐ後で述べるように、藤田らが前述のタイプ A 河川の縦断形形成と材料 m に関する縦断的分級の機構を実験的あるいは計算上理解・解明する際に非常に有用であった(藤田ほか 1998 ; 山本ほか 1993)。また Parker(1996)は、通過型とほぼ同じ意味で”throughput load”という言葉を用いており、Parker・Cui（1998）、Cui・Parker（1998）は、throughput load の概念を用いて、タイプ A 河川のように急勾配礫床区間から緩勾配砂床区間に不連続的に変化する河道について、それが見かけ上平衡状態になりうることを、沖積平野の地盤沈降速度を考慮して理論的に説明している。江頭ほか(2000)は、木津川における河床変動と河床材料の縦断分布の時間変化を長期予測する上で、淵の材料（材料 t、場所によっては材料 s に相当すると考えられる；著者らの一人（藤田）の解釈）が瀬の材料（材料 m に相当すると考えられる；著者らの一人（藤田）の解釈）と混合しないまま輸送される場合、これを便宜上“オーバーパッシングロード”（over-passing load）と呼び、この概念を予測計算に取り入れている（なお Everts(1973)は、粒子が一様粒径からなる平坦面上を、掃流形態で移動する状況を”Overpassing”として、それが起こる条件について実験的検討を行っている。この研究では、移動する粒径について平坦面をなす粒径と同程度か大きい条件を設定しており、上記の“オーバーパッシングロード”とは着眼点が違うようである)。土砂の輸送形態に関するこれら３つのとらえ方は、力点の置き方が微妙に違うものの、基本的には似ており、流砂系における土砂動態を大局的に理解する際に重要な概念になっていくと考えられる。本稿では、通過型（pass-through type）・混合型（exchange type）という呼び名を以後も用いる。

2.5 「粒径集団」「有効粒径集団」という捉え方

2.5.1 沖積河道形成の捉え方

図 2.3-2、図 2.3-4 に示したような土砂供給特性と表 2.4-1 に示した土砂輸送のとらえ方から、図 2.5-1 に示すように、沖積河川の河道セグメントの形成機構や材料 m、s、t の堆積機構をマクロに説明できる（藤田ほか 1998；藤田ほか 1996）。ここで、図 2.5-1 は、①上流から下流に向けて、礫は[表 2.4-1 の輸送形態の混合型→停止]、砂（微細砂を除く）は[通過型→混合型]という変化をたどり、礫(G)のセグメント、砂(S)のセグメントが形成されること、②砂のセグメントには、実際上、土砂生産源から主河床材料（材料 m）である砂が直接供給される形になること、③細粒土砂（細砂～シルト～粘土）は、その一部が高水敷や表層細粒土層（李ほか 1998）（材料 s へ）、河口付近（材料 t へ）の河床材料になるものの、多くが海へ流出することを示している。

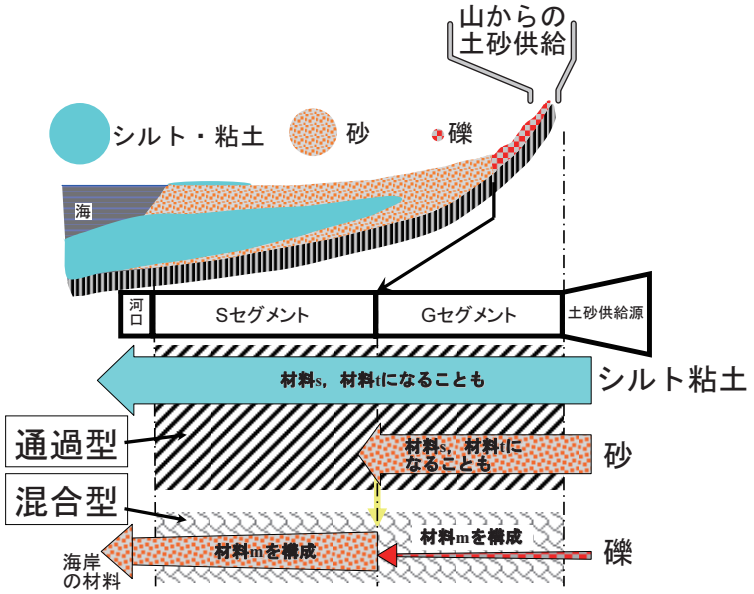


図 2.5-1 河道縦断形の形成、河床材料分級とマクロな土砂収支

2.5.2 「有効粒径集団」の説明

上記 2.5.1 に示した沖積河道形成過程における土砂動態から、以下に示す“有効粒径集団”という見方が自然に生まれる。すなわち、

① 水系内で移動する土砂は、すぐ後に説明する粒径集団によって、流送、河床材料との交換、河川地形への影響の仕方が大きく異なる（表 2.4-1、図 2.5-1、図 2.5-2）。したがって、土砂をひとくくりに扱うことは無意味である。

② 多くの場合、細粒土砂（シルト・粘土；細砂と微細砂を含む場合も多い）、砂、礫という 3 つの粒径集団ごとに土砂動態を考えることから始めるとよい。この場合、礫の動きは礫床区間(G セグメント)の河床変動を、砂の動きは砂床区間(S セグメント)の河床変動を、細粒土砂は表層細粒土層（植物繁茂に深い関

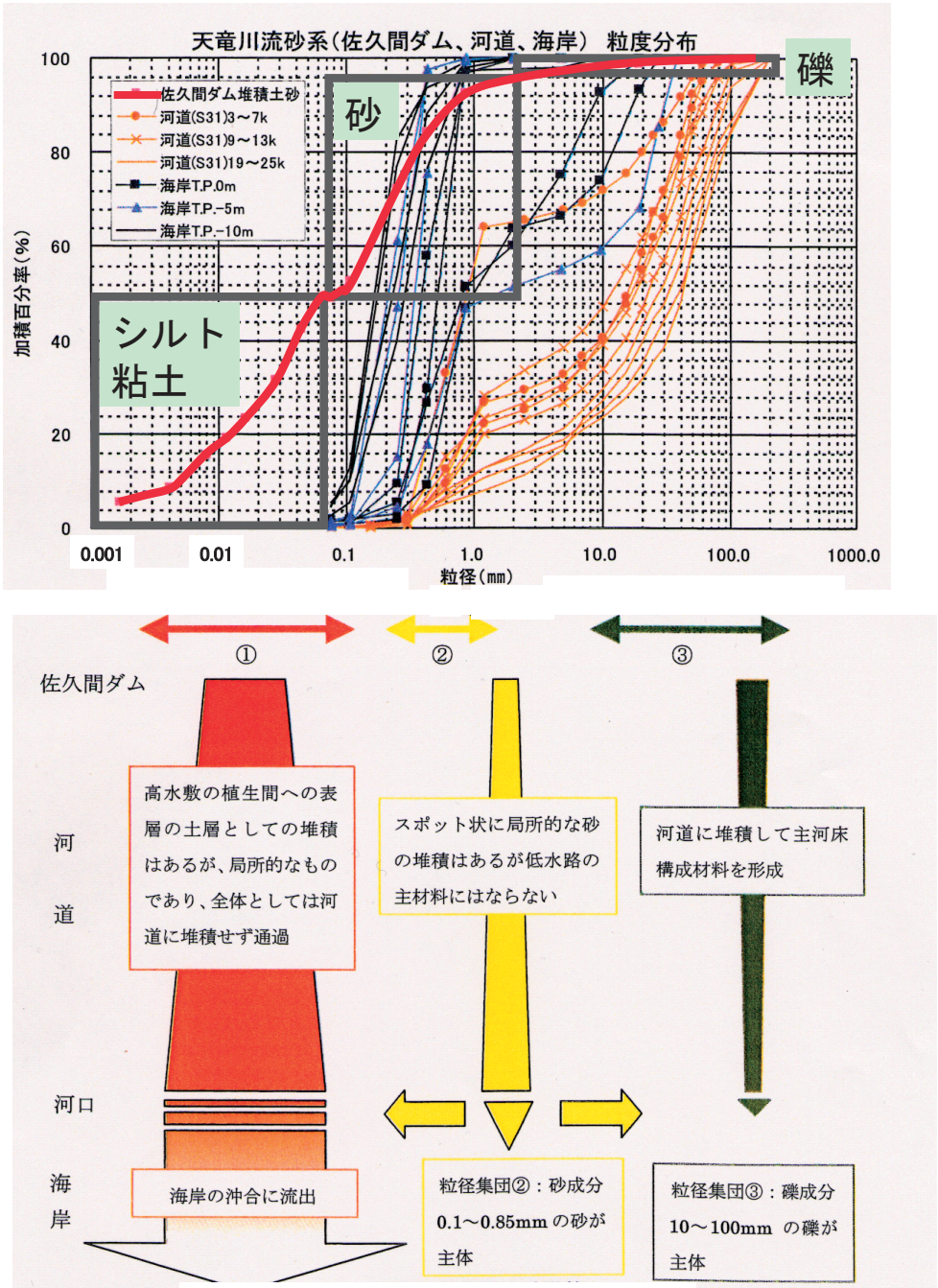


図 2.5-2 天竜川下流部の粒径集団別土砂動態の分析例。上は天竜川・佐久間ダムに堆積した土砂の全体的粒度分布（赤太線）と下流河川（オレンジ）および河口付近の海岸（青、黒）の粒度分布を示す。（海岸侵食対策と利水ダムの機能の維持・回復のための土砂管理対策検討委員会(委員長：辻本哲郎)（2004）より）

連）や河岸・高水敷の形成、河口部の超低流速域での堆積（干潟形成）、栄養塩や汚濁物質などの物質輸送（含；海への供給）を支配する（河床材料で言えば、s や t)。

③ 海岸の地形形成にとっては、最下流の河道セグメントの材料 m が重要な役割を果たしている可能性が高いが、さらに細粒の土砂が有効になる場合もある

（だから、表 2.2-1 のように、河川と海岸の材料を一緒に整理することが大事である）。

④ これら異なる現象を制御するためには、それぞれの現象を支配する粒径集団に着目して動態を追跡する必要がある。逆に、すべての粒径集団を追うことは必ずしも合理的でない。

⑤ このように「ある特定の河道変化や現象」にとって有効な粒径集団を「有効粒径集団」と定義する。

⑥ 水系環境変化に伴う河道変化を予測するには、土砂生産域の状況との関連で、各有効粒径集団の供給量を予測あるいは少なくとも想定できなければならない。

⑦ 細粒土砂と砂の沖積河川への供給量については、土砂生産域の水系内各場所の土砂移動を順次追跡するアプローチを採るよりも、土砂生産域の全体状況と供給量とをマクロに直接関係づけておくことが工学的には有用である。これには、沖積河川上流端付近での浮遊砂観測による粒径集団別浮遊砂量測定を継続して実施することが役立つと考えられる（流量 Q～着目土砂の流送量 Qs の関係把握が基本）。

⑧ 礫の沖積河川への供給量に関しては、礫の移動が細粒土砂や砂に比べ圧倒的に遅く、変化が上流から下流に順番に伝わるので、水系各場所の河床材料の移動を順次追跡するというアプローチからの検討、より実際的には対象とする G セグメントのさらに上流一定区間での河道状況変化のモニタリングが有効である。この際、土砂生産域での砂利の生産は空間的・時間的非一様性が高いと考えられるので、この非一様性が沖積河川に届くまでにどの程度均され得るかという視点が特に大事である。特に、豪雨等による大規模山腹崩壊などがもたらす突発的、大規模な土砂流出については留意が必要である（たとえば、井上ほか 2005）。

2.6 基本事項を実際の検討にどう反映させるか

2.6.1 「混合型・通過型」「材料 m、s、t」の区分

土砂に関する調査・分析・計算においては、土砂を一括して同じ手法で機械的に取り扱わず、粒径集団に分けて考え、それぞれの粒径集団の動態に適した手法を採用することが必要である。

具体的には、対象としている粒径集団が、「通過型」、「混合型」のどちらか？ そして、「材料 m」、「材料 s」、「材料 t」のうちどれに当たるかを明確にしておくこと、そして、それぞれの土砂の粒径範囲を明確にしておくことが必要である。

2.6.2 計算等における上流からの供給土砂の与え方

(1) 混合型の粒径集団について

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 s や材料 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。そのため、この材料まで含めて流砂量計算をすると、計算上は材料 s や 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てしまう。しかし、平常時に川底表面にある材料 s や 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。このため、平常時に観察されたこの割合から機械的に算定された流砂量は誤差を伴い、実態と合わない恐れがある。このようなことを避けるため、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 s や 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）全ての計算を進めた方が良い。対象河道が扇状地河川（あるいはセグメント 1）か、さらに上流のセグメント M 区間である場合､少なくとも砂以下(2mm 以下)の粒径は材料 s あるいは t と考えて良い。第一近似として、2mm 以下の河床材料を除去して計算を行うことが考えられる。

なお、この方法を適用する際には、流砂量計算の対象とする河道区間が、供給土砂量の算定に適した代表性、安定性、縦断方向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（過小、過大の両方の評価が起こりうる)。

(2) 通過型の粒径集団について

流域から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るのが適切と考えられる。

通過型、したがって材料 s あるいは t に相当する粒径集団を扱った計算を行う場合は、上記を基本とし、具体的には、 Q～Qs 関係の利用（観測データが必要)、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（堆積量をフラックスに割り戻す）（櫻井ほか 2007）などが候補になる。この際も、通過型粒

径集団の中でもどの粒径範囲を対象にしているかを常に意識しておくことが大事である。

また材料 t は土砂とは限らず、粒状有機物やリター、デトリタスなどが対象になる場合も考えられる。このような時は、上記の土砂を対象にした推定法にこだわらず、その発生起源や機構、流送タイミングの特性などに応じて、その供給量を設定する必要がある。

2.7 山地河道の特性

前節までは、基本的に沖積河川を対象に、土砂の動きと河床材料の捉え方に関する基本事項を述べてきた。一方、ダムの多くは山地部に造られ、下流河川も山地部に位置することになる。山地河川の特性を考える際にも、今まで述べてきた基本事項を理解しておくことが必要であるが、その一方で、山地河川が沖積平野を流れる河川とは異なる性質を持つことも当然なので、そこでの整備・管理を検討する際には、山地河川特有の性質をあわせて理解しておくことも不可欠となる。山地河道がそもそもどのようなものであるかがわからなければ、分析の基本的方向を誤ることにもなりかねない。

山地河道については、林学、砂防学、地形学、地質学、水理学などいくつかの学術分野の対象となり、また砂防事業が行われ、それに関わる調査と技術体系の整備がなされてきている。しかし、沖積河川区間の多くが氾濫防御のための堤防を有し、河川整備の対象とされ、日常的に管理されるのに対して、山地河道は、砂防事業区域など一部のエリアを除けば、その状況を河川管理者が継続的に把握する対象にはなってこなかった。このため、沖積河川のように一通りの河道情報が行政により蓄積され、それを調べれば全体像が概略把握できるというような状況にはない。したがって、上記の学術分野や事業の技術体系などの知見から、ダムと下流河道との関係を分析する際に理解しておくべき山地河道の基本的特性を抽出・整理しておくことがまず大事になる。

以下では、十分な体系的記述に至っておらず、項目のランダムな提示にとどまってはいるが、沖積河川とは異なる山地河道の特性の中でも重要と考えられることを抽出してみる。ここでいう山地河道は、土石流や斜面崩壊、表面侵食などが起こる場（土砂生産源）ではなく、土砂の流送が掃流・浮遊の状態で生じる程度の河床勾配に落ち着いた後の河道のことを指す。土石流や斜面崩壊、表面侵食などによる土砂の移動は、ここで扱う山地河道に供給される土砂として扱う。以下の内容は、いずれも、ダムの存在とは関係なく、山地河道が元々有している特徴に関するものである（水山 1998；池田 2001；山本 2004；長谷川 2005；村上ほか 2005；田代ほか 2007）。

なお、以下の記述は、「日本の山地河道を語る会」（開催；平成 19 年 10 月 5 日（第 1 回）、平成 19 年 11 月 21 日（第 2 回））における、参加いただいた学識者（池田　宏 氏（独立行政法人土木研究所招聘研究員）／辻本 哲郎　氏（名古屋大学教授）／山本 晃一　氏（財団法人河川環境管理財団河川環境総合研究所所長）／水山 高久　氏（京都大学教授）／長谷川 和義　氏（財団法人河川環境管理財団研究顧問）／藤田 裕一郎　氏（岐阜大学教授））からの知見・論点および総合討議の内容を参考に、国総研資料第 445 号にまとめられた内容を抜粋したものである。

2.7.1 山地河道特有の性質を理解する上で重要と考えられるポイント

(1) 流域・水系の視点、流域での地形・地質分布の視点が、分析においてより重要になる

山地部の河川は、沖積河川に比べ、より直接的に流域の地形・地質の影響を受けている。流域・水系のどの位置にダムが建設されるかが、下流河川における変化の出方を考える上で重要である。

(2) 山地河道の河床構成材料（材料 m）は、粒径分布の幅が広く、その空間的ばらつきが大きい

多くの場合、材料 m がいくつかの粒径集団からなり、場所によって主たる粒径集団が異なってくる。このため、材料 m の動き方に場所的に大きな差が生じうる。材料 m がどのような粒径集団から構成されるかを特定し、それぞれが平面的にどう分布しているかを知ることが必要になる。

(3) 岩盤が側刻、下刻、洗掘を制約する

谷底にある岩盤は洗掘、下刻を制約し、河道形状を規定する大きな要因となる。

河岸が山脚で岩盤になっているところが多い。こうした岩盤は側刻を制約し、河道の幅や流路の平面形状を規定する大きな要因となる。

(4) 未固結堆積層の厚さが有限であり、また、時間的・空間的に大きく変化しうる

場所によっては堆積層厚（以後、堆積層というときは未固結を指す）が薄く、川底に岩が露出しやすいところがある。ふだんから川底が岩になっているところもある。さらに、露出したりしなかったりするところがある。岩露出の有無で、河床変動や洗掘、土砂流送、表層河床材料の特性が大きく変わるので、上記の有限性（砂礫などが常に川底にあるとは限らないという意味で）は重要な特徴である。

(5) 洪水により作用する営力の幅が広い。頻度は小さいが大きな営力が作用しうる

沖積河川であれば、河道満杯流量以上の洪水が発生しても、氾濫原に溢れてしまい、河道に作用する営力はそこで頭打ちになる。堤防があると、流量が河道（低水路）満杯流量を超えても、洪水が堤防間にとどまるため営力の増加が続くが、低水路幅より堤間幅（堤防間距離）がずっと大きいので、営力の増大は鈍る。また堤防高を越えての営力増大はあり得ない（山本 2004）。一方、山地河道では有意な氾濫平野を持たず川幅が山脚により規定されていることが多い。この場合、水位が上昇しても川幅があまり広がらないので、流量増に伴い営力が増加し続けることになる。このため、作用する営力に明確な上限が無く、頻度は極めて小さいが非常に大きな外力が生じうると考えられる。

掃流力が増すにつれ急速に動きが活発になるという土砂流送の特性から考えて、以上のことは流路や河床構造の階層性につながりうると考えられる。すなわち、頻度は小さくても規模の大きな（カタストロフィックな）洪水が河道形状の骨格を規定し、一クラス規模の小さな洪水による河道形成作用がその上に乗って骨格に肉付けをし、という状況が多段に存在する性質である。このような階層性、履歴性が卓越する場合、沖積河川で河道形成の代表的流量としてよく用いられる「平均年最大流量」のように、１つの河道形成流量で技術検討を行うだけでは足りず、複数の代表洪水流量と対応する河道形成作用を複合的に考える必要が出てくる。

(6) 沖積河川に比べ一般に急勾配であり、射流が頻出し、水深粒径比が小さい

射流、小さな水深粒径比はともに、流れ、流砂、小規模河床波などの特性を考える上で重要な条件である。射流条件で生じる小規模河床波の一種である反砂堆は、渓流河川によく見られる階段状河床の形成機構に深く関わる。

(7) 土砂供給源が多様である。当該河川の本川上流からだけでなく、支渓流からの供給も影響力をもちやすく、また山腹からの直接的供給も起こりうる

上記に示すように土砂供給のルートが一律でないこと、また支渓流の土石流や山腹の斜面崩壊などにより供給される土砂がもともと幅広い粒度を持ちやすいことが、上記(2)の特徴が現れる理由の１つになっていると考えられる。

(8) 土砂供給が時間的、空間的に不均一に行われる。また、土砂供給の場からの距離が近く、河道がこの不均一性の影響を強く受ける

空間的不均一性については地質・地形分布などとともに上記(7)も関係する。時間的・空間的不均一性については、短時間強雨の出現特性や山腹崩壊の場所とタイミングなどが関係する。つまり、支渓流の土石流や山腹の斜面崩壊などによる土砂供給は、起こり方が突発的であり、その場所や発生のタイミングがランダムに近い特徴を持つ。(8)の特徴は、ある区間の河道特性を考える上で、土砂供給イベントとの時間的・空間的距離が重要であることを意味する。すなわち、有意な土砂供給が起こった場所との距離、そのイベントからどれくらいの時間が経っているかが分析のポイントの１つとなる。

(9) 河床材料の流送量（Bed-material load：河床起源の土砂流送量）と流量との関係が、沖積河川では概ね安定的であるのに対し、山地河道では大きく変動する

上記(8)の特徴があるため、当該区間で河床材料が流出する量と、当該区間に河床材料となる土砂が供給される量が大きく異なる場合が出てくる。[前者>>後者]の場合には、河床が低下し、ふつう河床材料は粗くなり、場合によっては岩露出にまでいたる（動きうる河床材料が枯渇した状態）。河床材料が枯渇して河床が岩ばかりとなれば、流量が増大しても河床起源の土砂流送量は０のままである。[前者<<後者]

の場合には、河床が上昇し、河床材料の堆積厚が大きくなり、ふつう河床材料は細かくなる。この状態で流量が増えれば、河床起源の流砂量も急激に増える。以上から、河床材料の粒径や堆積層厚は同一地点でも大きく変動し（(4)の特徴）、河床材料が枯渇して川底が岩だらけになってしまうこともあり、同じ流量が流れたときの河床材料の流送量も大きく変動する。１つの洪水の期間中でさえ、粒径や堆積層厚が時間的に大きく変化することがある。沖積河川まで下ってくると、上記(8)の非均一性がならされ、河床材料の変化幅が小さくなり、上記(7)の特徴が解消する（主たる土砂供給が当該河川上流に一本化されるので；ただし河岸侵食の役割については別途議論が必要かもしれない）ので、河床材料の流送量（河床起源の土砂流送量）と流量との間に概ね安定的な関係が見られるようになる。

(10) 河床材料が洪水によってほとんどあるいは全く移動しない区間が珍しくない。

沖積河川であれば、一定以上の頻度で洪水により河床材料が有意に動くことを前提にものを考えて良いが、山地河道の場合には、この前提は必ずしも成り立たない。この背景として以下のことがある。

現在の河川・流域の地形は、最終氷期以降の気候変動と海水準変動から強い影響を受けている。最終氷期には、今より気温が 5～10 度低く、海水面が 100m 以上低かった。その時代、山地では植生の後退や活発な凍結融解作用や氷河の作用によって礫の生産が盛んとなり、河川の上・中流部では礫の流送によって網状流が発達し、下流部では低い海水面に追随して河床が低下した。しかし、後氷期（最終氷期が終わった２万年前以降）になると逆のことが起こり、礫生産量が減少する一方気候温暖化により流量は増加し、河川の上・中流部は低下傾向となり、下流部では海面の上昇によって河床上昇や沖積低地や平野の形成が起こった。こうして、現在見られる河川・流域の地形は、氷期に形成された地形とそれを改変した後氷期の侵食作用の２つの面から構成されている（貝塚ほか 1985）図 2.7-1 参照)。

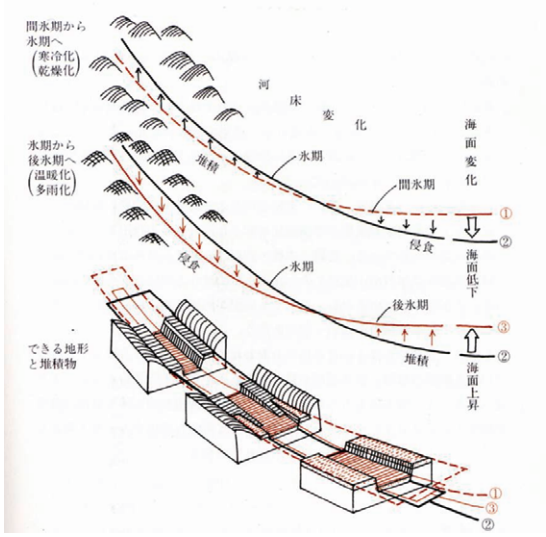


図 2.7-1 気候の変動と河床断面の変化（貝塚ほか 1985）

すなわち山地部の河道は、後氷期（２万年前から現在にかけて）、全体としては下刻傾向を基調にしていると言える。主な河床材料となる礫の枯渇が続き、河床低下と粗粒化が十分に進行し、河床材料が静的安定に至った区間や岩露出に至った区間、岩の上に礫が材料 t 的に薄くしか乗っていない（川底に礫の“残り滓”しかない）区間が珍しくないと考えられる（上記(4)と関連)。相対的に土砂生産が

活発な水系では、十分な砂礫が今でも供給され、動きの活発な堆積層が形成されているが、少なくとも、そのような場所が一般的と考えるのは適切でない。

池田（2001）は、「岩川」、「石川」という表現により、山地河道において、動きの活発な堆積層が存在する区間（石川）と、未固結の堆積層が有意には残っておらず、河床材料の動きがほとんど無い区間（岩川）を区別する見方の重要性を強調し、岩川、石川それぞれの河道形成過程、下刻・側刻作用の違いを指摘している。山本（2004）は、河道に礫層が広がっている場合の側刻作用と、礫層がない場合の下刻作用が河川地形形成に果たす役割を説明している。

以上のような特徴は、簡単な水理分析でもある程度定量的に確認できる。たとえば、山地河道について河床材料（材料 m）の動きやすさを、代表的洪水流量の下での無次元掃流力から調べると、1/10 確率の洪水流量でもほとんど動かないと判断される区間もあれば、1/3 確率でも動くと判断される区間も存在するなど、無次元掃流力の値が区間によって大きく変わる結果をしばしば得る。このような分析の重要性は 6.2.2 で改めて説明する。

ダム下流において巨礫や大礫からなり、河床材料（材料 m）が動かない状況になっていたとしても、上記のようにダム建設前からそのような区間であった可能性もあり、このようなことからも、元々の検討対象河道区間の特性を何らかの形で考慮することは、山地河道におけるダムと河道との関係分析に求められる大事なポイントの１つと言える。

(11) 河床材料として流送される過程での礫の破砕・摩耗が河床材料、土砂収支などに与える影響を、場合によっては検討する必要がある

礫の岩質やその流送状況などによっては、上記の効果を考慮した分析が必要となることが考えられる。その際には、その効果に関する定性的なシナリオを、河川技術として扱えるように定量的に分析・検証することが重要となる。土砂動態を捉える上で、土砂水理的なアプローチが依然として主軸になると考えられるが、礫粒が変形しないことを前提にした収支議論を絶対視しないことも求められる。

(12) 山体あるいは川底を構成する岩といえども、一律に不変と考えるのでなく、その変化まで考慮すると、山地河道の形成機構への理解が深まる

未固結堆積層の動きとは意味合いが異なるものの、岩の“動き”も、山地河道の河道形成過程を考える際に大事になる場合がある。“動き”の例としては、風化、河岸を構成する山脚の侵食、山腹崩壊、川底の軟岩の洗掘・侵食、山体の隆起などである。これらの動きを起こす要因としては、岩質やその組み合わせ、石川と岩川（池田 2001）の洗掘・侵食作用の違い、植物の作用・役割、気候・気象条件、岩のフレッシュさなどが考えられ、これらの影響度を把握し、対象とする河道に関わる“岩の変化”の形態、速度の評価につなげることが河川技術的には必要となる。

＜参考＞山地斜面からの直接的な土砂供給と輸送

ここでは、流域における土砂生産の場である山地斜面から河道に供給される土砂について、その仕組みを「新谷ら（新谷ほか 2006)」を引用して次に述べる。

一般に山地河川では斜面と河床が接している。沖積平野の河川では斜面と河床は離れて位置することが多い。このため、山地河川では斜面変動と河床変動の間に直接的な関係がある。斜面と河床が接したところでは、斜面変動による崩落土砂が河床に接して崖錐（土石流の場合には沖積錐）を形成する。この堆積物は洪水時に土砂として河川に入るが、河口に達するまでの時間は土砂の粒径によって極端に異なる（3.3.3 参照）

斜面変動と河床変動の関係について、大井川上流の崩壊地「赤崩」の事例がある。赤崩は、標高 1,300m～1,900m に位置し、崩壊面積は約 39ha であり、崩壊地の下には沖積錐がある（池田ほか 1993）（図 2.7-2 参照)。

地質は四万十層群の砂岩・頁岩の互層で、構造運動の影響で破砕されている。冬から春にかけて、凍結・融解により落石が崩壊地斜面から頻発し、このため植生が侵入・定着できず脆弱な岩盤が崩壊地斜面全体に露出している。

赤崩における斜面変動と河床変動との関係は次のようである。

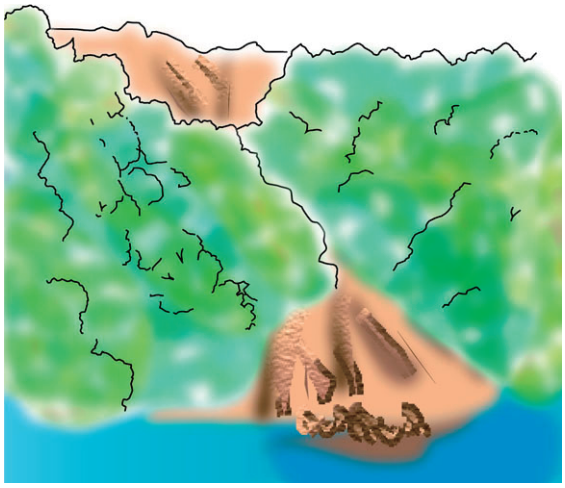


図 2.7-2 大井川上流の赤崩（池田ほか 1993）をもとにした崩壊のイメージ

凍結・融解による脆弱な岩盤斜面からの落石あるいは雨による小規模な崩落により、崩壊地基部には崖錐が発達する。

- そこに大雨が降ると、崖錐は飽和岩屑流となってゆっくり流動し、勾配約 21 度の沖積錐を形成する（池田ほか 1993)。
- 河道に張り出した沖積錐の一部は、洪水時に河道に入り土砂礫として河床変動に寄与する。

岩盤斜面→崖錐→沖積錐→河道という道筋であり、崖錐が発達していなければ土砂礫は河道には入らない。

現在の日本においては、火山活動の活発な斜面を除く山地斜面は森林で覆われているので、山地斜面における顕著な土壌侵食の問題は発生していない。しかし、森林土壌の発達は、崩壊可能物質を増大させ、土壌の高い浸透能が豪雨時に雨水の多くを地中流とすることから、一回に大きな崩壊を起こしやすくなっている。はげ山が多く土壌侵食が盛んだった明治期は、土砂の生産の頻度は高いが規模は小さいというものであったが、現在は、頻度は低いが規模は大きいというものに変化している。

一般に、上流にいくほど急傾斜の山腹斜面や支流が本川河川に直接流れ込むことが多く、下流にいくほど河川は斜面から遠ざかって平坦な沖積平野の中を流れる。すなわち、河川の上流ほど斜面や支流から一時的に集中的に土砂が供給される機会が多く、同時に、上流ほど流域面積は小さくなるので土砂を運搬するための流水量は少なくなる（＝供給された土砂量に対して流水による土砂運搬力に上限が生じる)。

一般に山地河川は礫床河川か岩盤河川である。大局的には山地河川は土砂の通過域にあるので、岩盤河川になっていたり、礫床でも堆積層がさほど厚くないことが多い。すなわち滞留土砂が少ないのが全体的な傾向である。これは流水の土砂輸送能力に比べてその場に供給される土砂量がずっと少ないのが一般的であるためで、山腹崩壊などにより一時的に土砂供給・堆積が起こっても比較的早く下流に流される（村上ほか 2005)。

山地河川では、土石流などの集合運搬により土砂が供給されることが多い。集合運搬による土砂供給が起こると河床に一時的に土砂堆積が起こるが、この土砂は順次下流に流送され、河床はもとの滞留土砂の少ない状態に戻る。洪水の土砂輸送能力がいくら高くても、運ぶべき土砂が河道に存在しないことがよくあり、河道に土砂が十分供給されてはじめて、輸送能力に見合う土砂流送が行われるというのが山地河川の特徴であるといえる。

2.7.2 調査・分析の体系化への含意

2.7.1 の内容からは、山地河道の調査・分析に際して次のようなことが重要になると思われる。

まず、流域・水系、その中での地質・地形の分布を視野に入れ、検討対象区間の“空間的位置”の意味を把握することである。スケールダウンすれば、当該区間への土砂供給源や供給ルートの特定もこれに入ってくる。

当該区間の“時間的位置”の把握も重要となる。すなわち、関係する土砂供給イベントを把握し、それと当該区間との時間的・空間的距離を調べ、これに基づき、たとえば、対象区間の河床材料に関して、供給枯渇状態か、供給過多状態か、動的平衡状態か、静的平衡状態（河床材料の動きがほとんど無い）かを把握する。河床状況が変化過程にある場合、その速度や最終到達状態、そこに至るまでの時間などを推定する。

営力に関しては、検討対象とするレンジを頻度の小さい高外力まで幅広く取り、様々なレベルの営力が起こしうる河床形成作用とその履歴性を検討する。その上で、河床が階層構造を持つかどうかを調べ、それがはっきりしている場合には、当該区間に作用しうる営力のレンジから各階層を支配する代表流量とそれがつくる河床構造を掴んでいく。

河道状況の中で特に調べる必要があるのは、河床材料の平面分布状況（複数の粒径集団の平面分布など）や、岩の位置（平面、河床下）と未固結堆積層の厚さ・材料の把握である。

礫の破砕・摩耗による変化や山体や山脚、谷底を構成する岩の変化速度については、当該河道区間の河川技術的取り扱いにおける重要性を、これらの変化速度と対象とする事象の時間スケールなどから判断することがまず必要である。

全体として、様々な定性的な情報を河川技術的取り扱いに組み込めるように整理し、定量化することが鍵となる。また、今まで述べてきたように、山地河道の特性には多くの要因が関係し、影響の仕方も多様かつ複雑で、その一方、既往の河道情報の蓄積は十分でない。このため、それら全てを高い精度で調べることは、実際に投入できる調査分析の労力から考えて実務的には困難と考えられる。したがって、山地河道の調査分析については、調査の合理化、簡略化も重要な課題となる。このためには、まず、河川技術の観点も取り込んだ山地河道の類型化が不可欠である。類型化の視点を検討する上で、2.7.1 に示したポイントも参考になろう。また、重点的に検討するべき事象を抽出するために、主要な事象について大まかに変化速度を見積もることができるようにし、河川技術的に取り扱うべき変化速度のレンジに入ってくる事象を特定しやすくすることも大事と考えられる。こうした取り組みと並行して調査、モニタリング技術の高度化を追求していくことになる。

3. ダムと下流河川の物理環境との関係を分析する際に理解しておくべき日本のダムの基本特性

3.1 ダム貯水池がその地点において河川に為す基本的作用について

3.1.1 ダム地点で生じる現象

ダムは、治水・利水（人間のより良い生活）の目的を達成するために、その地点において水を貯留し、貯留した水をコントロールして放流する。環境保全上必要な水量の確保も目的となりうる。これに伴い、ダム地点では次の変化が生じる。ただし、その変化の程度は流域の特性、ダムの規模、ダムの目的と運用などよって様々に異なる。

①流量の変化

出水時における流量の変化（ピーク流量の低減、出水頻度の低下、出水時期・タイミングの変化等）と、平常時における流量の変化（流量の平滑化、それとは逆の流量変動の付与等）がある。

②土砂供給の変化（多くの場合、大幅低減や遮断）

水を貯留し、常時貯水池を有するダムは、基本的に多くの流入土砂を貯め、貯められた土砂は自然な状態ではダム下流に移動しないので、下流への土砂の供給が大幅に低減し、場合によってはほとんど止まる。

③物質の変化

通常、河川には山地などから供給される物質が水とともに流送されている。それらの物質がダム貯水池に滞留することにより、物質フラックスが変化し、さらに物質そのものが変化して下流に出て行く場合がある。窒素やリン等の栄養塩類の滞留により植物プランクトンの生産が増大し、それがダム下流に流れる現象などはこの一例である。

④水質の変化

上記①②③により、放流される水質が変化する。物質の濃度・種類、濁度に加え、水温が有意に変化することも珍しくない。

ダムと下流河川の物理環境との関係について整理・分析している本資料は、1.1、1.2で説明したように、上記①～④のうち①と②を対象にしていることになる。

3.1.2 ダム下流河川の物理環境との関係の捉え方

ダムと下流河川の物理環境との関係を整理・分析するには、まず、上に示したようなダム地点での現象について、その実態を知っておくことが必要である。その上で、ダム地点での現象が、下流にどのように伝わり、どのような現象となって出現するのかを理解することになる（図 3.1-1参照）。「ダム地点で生じる現象」だけの分析からダムの下流影響を議論することは、ダムと下流河川の物理環境との関係の適切な理解を遠ざけることになるので避けなければならない。

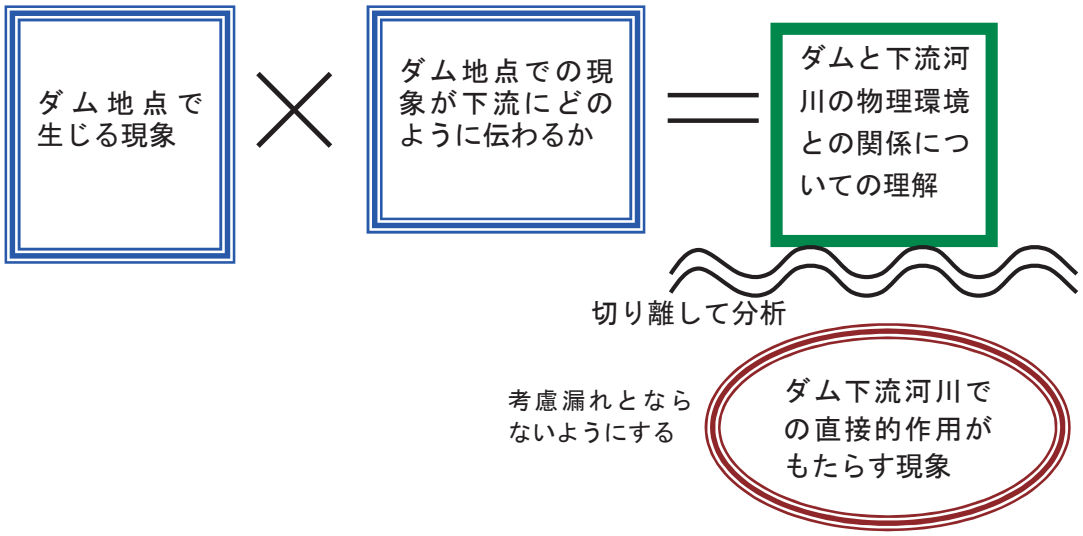


図 3.1-1　ダムと下流河川の物理環境の捉え方と留意事項

3.1.3　下流河川における直接的作用との混同について

ダムと下流河川の物理環境との関係を分析する際に、下流河川での直接的作用がもたらす現象を分離せずに含めてしまうこと、あるいはそれを考慮しないことは、やはり現象の適切な理解を遠ざけることになるので避けなければならない（図 3.1-1 参照）。

たとえば、河川からの取水は流量減少を、砂利採取はその区間で河床低下をもたらすが、いずれも上流ダム地点で生じる現象とは無関係である。ダム一般が原理的に起こしうるものと同じ種類の現象が下流河川で生じているからといって、それだけをもって短絡的にダムの存在と結びつけた解釈をしてしまうのは当然のことながら不適切であり、下流河川に直接的作用が存在する場合、それがもたらす現象を特定しつつ、ダムと下流河川の物理環境との関係を分析しなければならない。

3.2 変換装置としてのダムの基本特性（流量と土砂について）

以下に示すデータに関する出典等は国総研資料 445 号に記されているので、必要に応じ参照されたい。

3.2.1 流量の変化

ダム地点においては、ダムに課せられた本来的役割から、出水時における流量の変動に関して、また平水流況に関して、上下流で大なり小なり違いが生じる。しかし、その起こり方や程度は以下に示すように一律ではない。

(1) 出水時ピーク流量の減少（撹乱強度の減少）

治水目的を持つダムは、洪水時に下流河川の流量をダムの操作により低減させることで、下流域の洪水被害を防止・軽減する。ダム毎に操作規則があり、洪水調節を行う方式（自然調節方式、一定量放流方式、一定率一定量放流方式など）や洪水調節開始流量、具体の調節法が定められている。図 3.2-1 に、ダムによる出水時の流量調節方式の説明を示す。調節の方法はダムにより様々である。

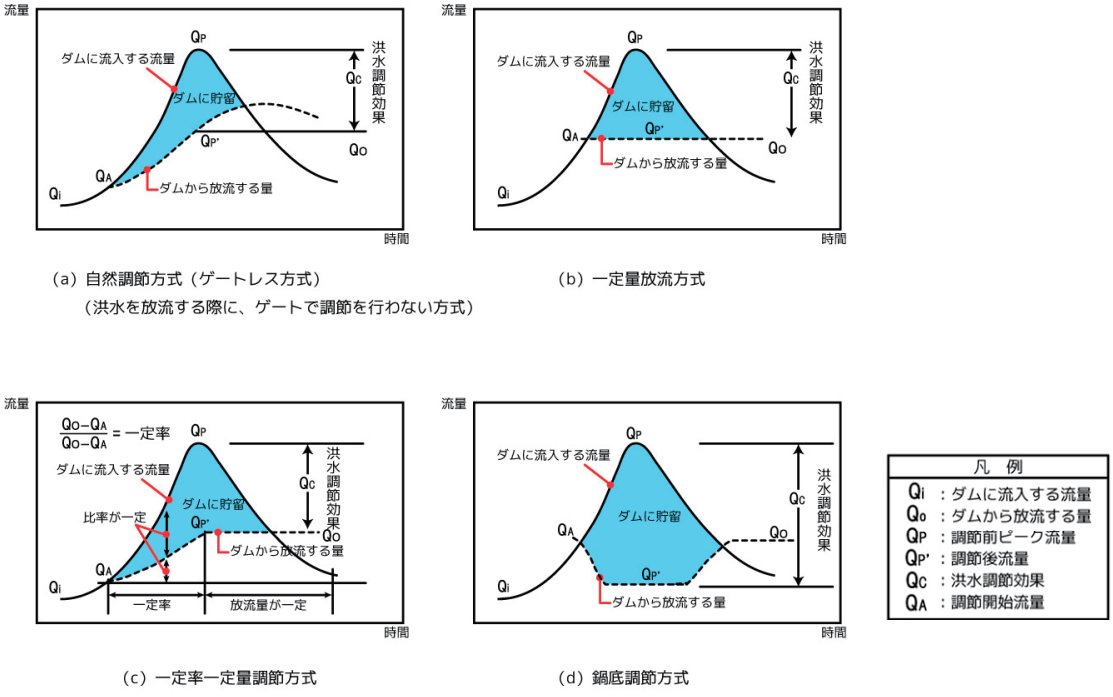


図 3.2-1 ダムによる出水時の流量調整方法

国土交通省および水資源機構が管理する既設ダム（全 98 ダム、平成 15 年度時点）のうち、平成 5 年から平成 15 年の 11 年間の流量データがそろっている 79 ダムを対象として、ダムによる出水時のピーク流量の減少の度合いが分析されている（大沼ほか 2006）。以下、その内容を紹介する。

このピーク流量の減少の度合いを示す指標として、平成 5 年から平成 15 年の 11 年間における[年最大放流量／年最大流入量（いずれも瞬間値）]の平均値を用いた結果が図 3.2-2 である。なお、新豊根ダムは揚水式発電を行っているため 2.44 と突出して高く、このグラフからは除かれている。この指標値が小さいほど撹乱強度の減少度合いが大きいことを、１に近づくほど撹乱強度の減少が小さくなることを示すことになる。ただし、河川によって、河床勾配、河川の幅、河床構成材料の粒径分布等が異なるため、流量の減少度合いだけで撹乱減少の絶対量を見積もることはできない。この点については、3.3 でさらに詳しく述べる。また、流量による重み付けをせず各年の比を単純に平均しているので、流量規模の違いがもたらしうる影響までは考慮できないことに留意されたい。図 3.2-2 によれば、年最大放流量/年最大流入量の平均値は幅広く分布しており、撹乱強度の減少度合いはダム毎に大きく異なっている。

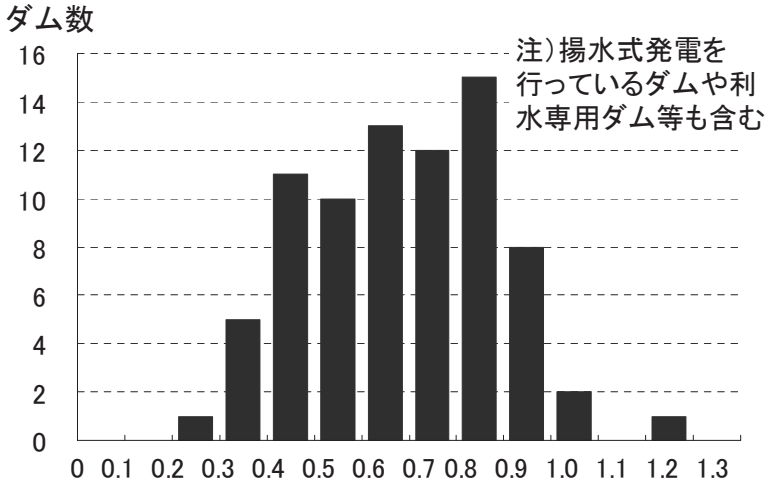


図 3.2-2　年最大放流量/年最大流入量のヒストグラム（流量は瞬間値）
最近 10 年間に生じた年最大放流量であり、計画規模の
ような大洪水のカットは含まれていない

撹乱減少の度合いが小さい指標値 0.9 以上のダムは、概ね次のいずれかに該当している。

①揚水式発電を行っている：新豊根(2.44)、矢木沢(1.27)、天ヶ瀬(0.92)

②目的に洪水調節が含まれていない：芦別(1.04)、猿谷(0.93)

③流入量が洪水調節開始流量を上回る頻度が比較的小さい：薗原(1.03)、丸山(1.00)、横山(0.95)、高山(0.92)、新宮(0.93)

④洪水調節を一定率一定量方式で行っているダムでかつ流入量の増分に対する放流量の増分の割合が大きい：大渡（0.92）、大川(0.90)

⑤流入量に対して貯水容量が小さい（高回転率）ため、ほぼ流入量と放流量が等しい：池田(0.98)

これらのうち、新豊根、矢木沢、芦別、菌原は指標値が 1.0 を上回っている。このことが治水と矛盾する流量調節を行っているわけではないことについては、国総研資料 445 号 pp.12-14 に詳述している。

次に、指標値の年最大放流量／年最大流入量の平均値が低いダム、すなわちダムによる出水時のピーク流量の低減度合いが大きいダムについては、年最大放流量の傾向として次に示すパターンがある。

①利水放流施設能力で頭打ちになる

②洪水調節開始流量程度で頭打ちになる

③洪水調節開始流量未満で放流されることが多いが、その値はまちまちである

④流入量の大小に応じて放流量が変化する

平成 5 年から平成 15 年の 11 年間のデータがそろっている 79 ダムに、2 年間以上の流量データがあるダムを加えた既設 98 ダムの[年最大放流量／年最大流入量]の平均値を全国的分布状況として図 3.2-3 に示した。このうち、1.0 以上となっているダムは、前述のとおり、①揚水式発電を行っている、②目的に洪水調節が含まれていない、③流入量が洪水調節開始流量を上回る頻度が比較的小さい、に該当するダムである。

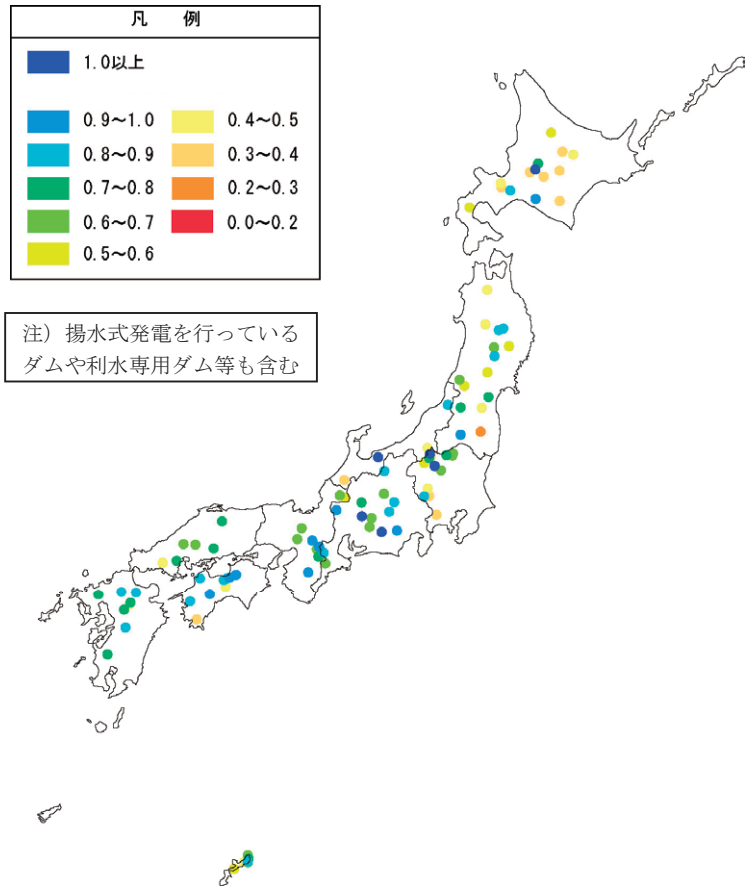


図 3.2-3　既設ダムにおける〔年最大放流量/年最大流入量〕（流量は瞬間値）

(2) 平水時の流量平滑化と短時間変動の付加

多くのダムでは洪水時の流量調節機能だけでなく、利水を目的に運用されている。利水補給を担っているダムでは、下流河川へ貯留水を適切な量・タイミングで放流し、下流河川の流量の安定化をはかり、河川から取水する農業用水、都市用水（水道用水、工業用水）の確保などを行っている。また、発電のためにもダム貯水池の水が利用される。こうした水利用により、ダム下流河川ではダムから放流する河川流量の平滑化や、逆に頻繁な変動（短時間変動）の付加が起こることがある。

このうち流量の平滑化は、維持流量の確保や都市用水等の利水を目的として放流が行われる場合に生じやすい。渇水時に行われる維持流量確保のための放流は、下流河川の極端な流量減少を緩和する効果を持つ。もう一方の短時間変動は、発電用水を目的として放流が行われる場合に生じやすい。

国土交通省及び水資源機構が管理するダムの平成 5 年から 15 年を対象として、2 ヶ年以上流量データがある 96 ダムについて、「流量平滑化指数」を算出した結果を図 3.2-5 に示す（大沼ほか 2006）。ここで「流量平滑化指数」とは次のように定義される。

ある 1 年間の日流量のうち、10 日間移動平均値との乖離率が 10%以内となる日数の平均を流入量と放流量について求める（図 3.2-4 参照）。この日数は、10 日間程度よりも小さい（たとえば数日程度の）周期を持つ流量変動成分があまり効いていない年間日数を表し、これが大きいほど、細かな流量変動が見られない期間の割合が大きいことを意味する。放流量についてのこの日数から流入量についての日数を差し引いた日数を、ダムによる流量の平滑化の度合いを示す指標すなわち流量平滑化指数とする。この指数（日数）の「＋」の数値が大きいほど、平滑化の度合いが高いことを、「－」の数字が大きいほど、変動付加の度合いが大きいことを示す。

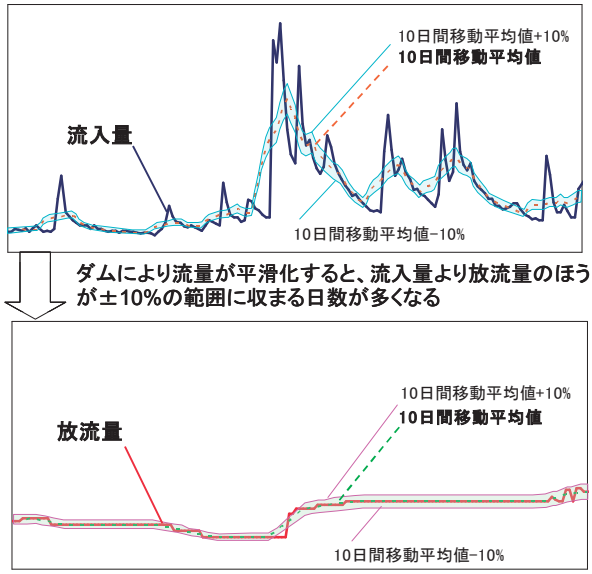


図 3.2-4 流量平滑化指数の概念説明図

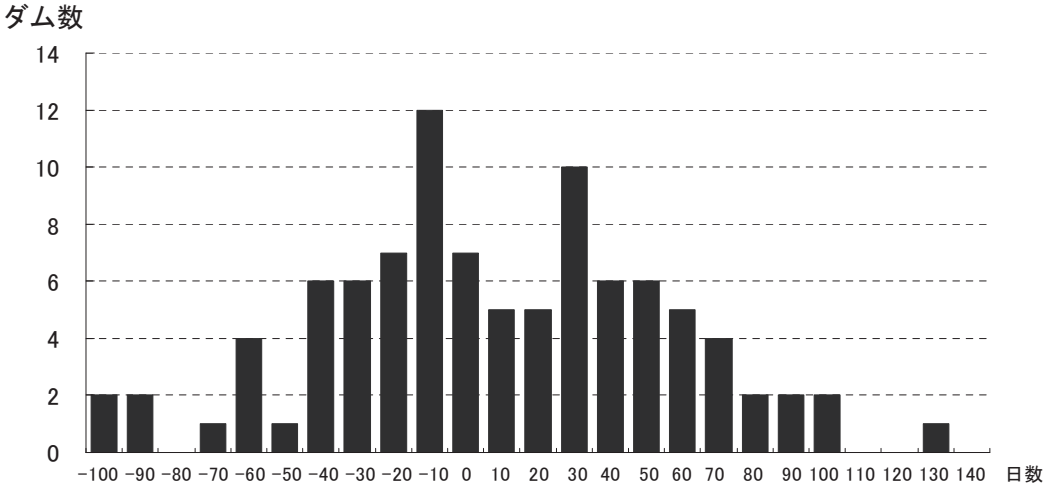


図 3.2-5　流量平滑化指数のヒストグラム（日流量に基づく）

図 3.2-5 では、流量平滑化指数が突出して大きくなっている福地ダム(247 日)、漢那ダム(240 日)を除外している。これは、ダム群とトンネルにより連結されていて、トンネルからの流入量や放流量が含まれたデータとなっているからである。さて、流量平滑化指数の中央値は、0 日より大きい＋11 日であり、全体的にはダムにより流量はやや平滑化される方向にあると言える。しかし、ヒストグラムは±100 日以上にわたり幅広く分布しており、ダムが一般に平水時の流量平滑化をもたらすと単純に言える状況ではなく、攪乱強度の減少の場合と同様、ダム毎の違いに着目することが大事であることがわかる。

＋80 日以上の上位のグループに属するものとして上から、福地と漢那（図からは除外）、富郷(140 日)、七ヶ宿(109 日)、布目(104 日)、川治(93 日)、新宮(91 日)、浦山(86 日)、阿木川(82 日)が挙げられる。これらのダムは、有効貯水容量に対する都市用水容量の占める割合が全て 50%以上になっており、流量の平滑化は都市用水のウエイトの高さと関連が深いことがうかがえる（ここで、洪水期と非洪水期の目的別容量が異なるダムについては、より期間が長い非洪水期の容量を採用している）。

一方、この指標値のマイナス値が大きいグループに属するものとして、下から、金山(-95 日)、美和(-91 日)、豊平峡(-87 日)、大雪(-86 日)、田瀬(-67 日)、川俣(-57 日)、矢木沢(-53 日)、下筌(-52 日)、九頭竜(-50 日)、薗原(-49 日)が挙げられる。これらのダムは全て目的に発電を含んでいる点で共通している。他の水利用に関係なくできる非従属発電を行う場合は特に、放流量の変動が大きくなるのは当然であり、金山、美和、大雪、田瀬、矢木沢、下筌、九頭竜は非従属発電を行っている。豊平峡、川俣、薗原は、発電を他の水利用（灌漑用水、都市用水、不特定用水）に従って行う従属発電方式をとっているダムであるが、発電以外の利水のための放流の必要がない時は、非従属発電と同様に発電需要に応じて放流することがあり、このような場合には従属発電方式のダムでも、放流量が短時間に大きく変動する。

先述のように、発電放流量は、発電需要に応じて短時間の間に変化することが多い。したがって、毎正時の平均である日放流量が安定していても、時刻流量は大幅に変化している可能性がある。さらに、発電による減水区間は流量が安定しているが、発電用水が合流後した後は変動が大きくなり、さらに支川が流入するごとに変動割合が緩和される等、下流河川の流況に与える影響は区間毎に様相が異なる。詳細に短時間の流量変動を分析するためには、時刻ごとの発電取水量データを入手し、発電用水の放流地点を把握するとともに、支川の流入地点およびその支川の流域面積等を把握する必要がある。

96 ダムの流量平滑化指数の全国的な分布状況を図 3.2-6 に示す。

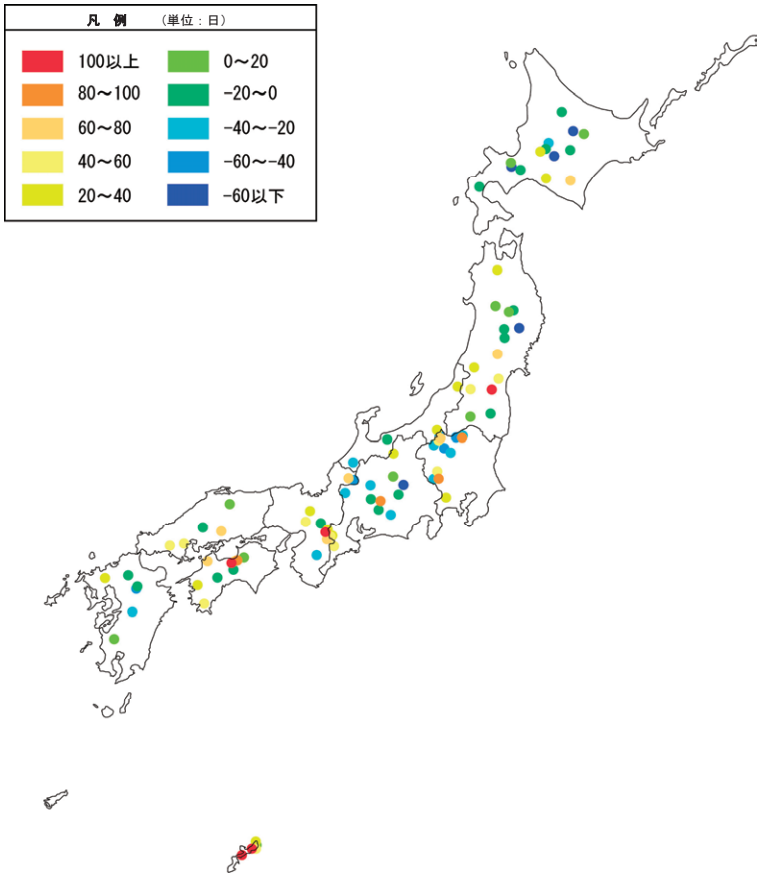


図 3.2-6　既設ダムにおける流量平滑化指数（日流量に基づく）の全国分布

3.2.2 季節による違いについて

国土交通省および水資源機構が管理する既設ダム（全 98 ダム、平成 15 年度時点）のうち、平成 5 年から平成 15 年の 11 年間の流量データがそろっている 79 ダムを対象として、平成 5 年から平成 15 年を対象に、各ダムで月別最大流入量（瞬間値）の合計値に対する月別最大放流量（瞬間値）の合計値の比を算出し、その全国平均を月別に算出した結果を図 3.2-7 に示す（大沼ほか 2006）。なお、合計値の比は、各年の最大放流量と流入量の比を流入量で重み付けして平均したことを意味する。4 月と 10 月が低く、冬と 6 月が高くなる傾向が見られる、すなわち W 形状になっている。

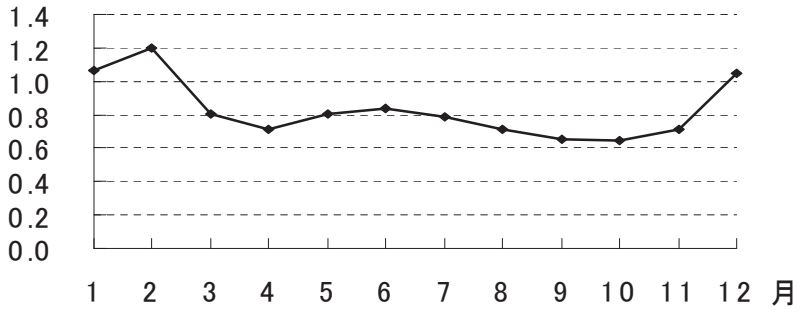


図 3.2-7 月別最大放流量の総和／月別最大流入量の総和の平均値（瞬間値ベース）

次に、平均月最大流入量と平均月最大放流量を基に、流量制御パターンについて季節別の違いも考慮して以下の 6 つに分類した。

a：季節を通して流入量と放流量の差が小さい（3～10 月の 8 ヶ月間において、平均月最大放流量/平均月最大流入量が 0.7 程度以上の月が 6 回以上、かつ 8 ヶ月の平均が 0.7 以上）。

b：3～5 月（主として融雪期）に流入量に対する放流量の減少度合いが大きい（3～5 月の 3 ヶ月間において、平均月別放流量/平均月別流入量が 0.7 未満の月が 2 回以上ある）。

c：6～7 月（主として梅雨期）に流入量に対する放流量の減少度合いが大きい（6～7 月の 2 ヶ月間において、平均月別放流量/平均月別流入量が 2 ヶ月とも 0.7 未満）。

d：8～10 月（主として台風期）に流入量に対する放流量の減少度合いが大きい（8～10 月の 3 ヶ月間において、平均月別放流量/平均月別流入量が 0.7 未満の月が 2 回以上ある）。

e：季節を通して流入量に対する放流量の減少度合いが大きい(b、c、d のいずれにも該当)。

－：その他（流入量より放流量が大きくなるものであり、揚水式発電を行っているなどのダムに該当）。

各パターンの分布状況を図 3.2-8 に示す。なお、ダムによっては、放流パターンがひとつに限定できない場合もあり、総計は整理対象ダム数より多くなっている。図中では複数の着色によりこれが分かるよう図化している。図 3.2-8 から、やはりダム毎にパターンが随分異なっていることがわかる。

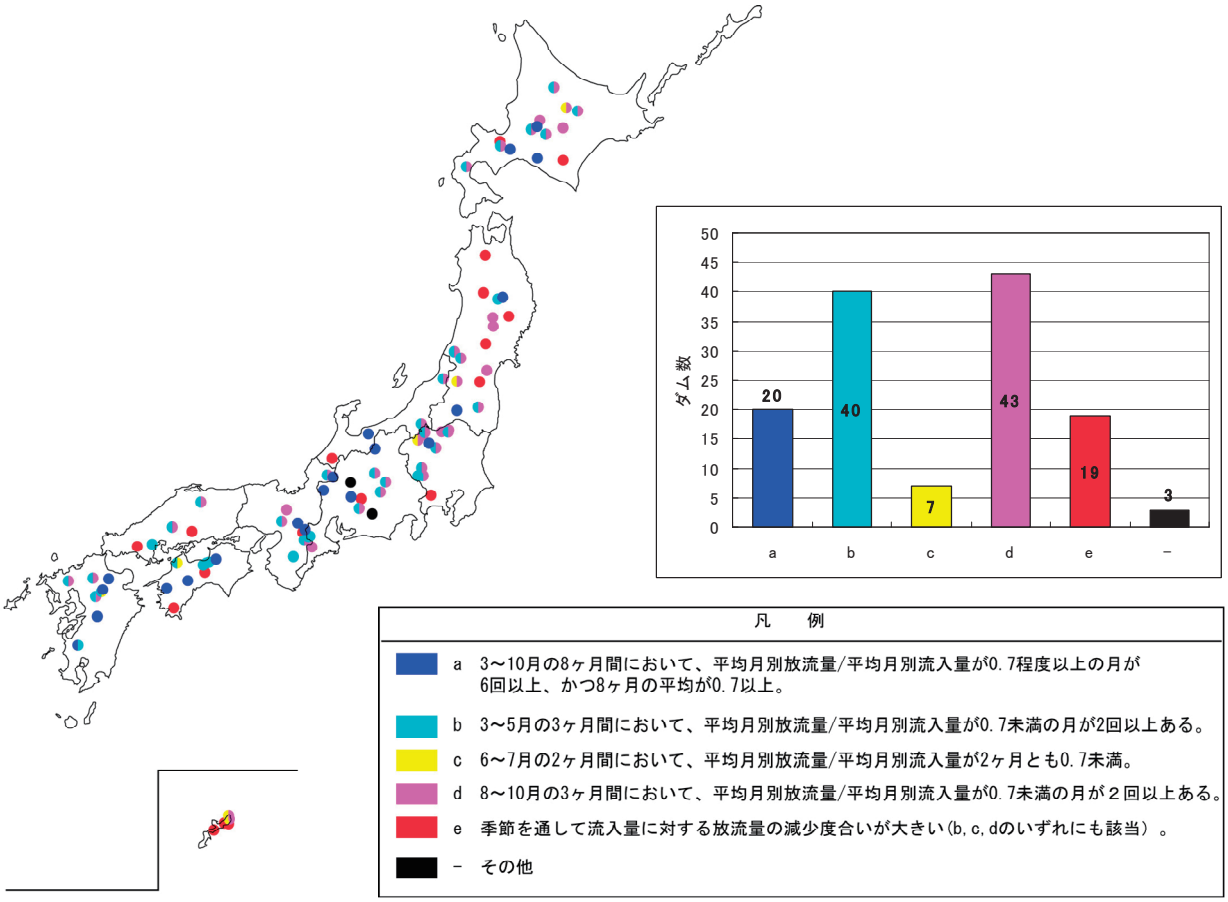


図 3.2-8　季節別の違いを考慮したダムによる流量制御パターンの分類と該当ダムの分布状況

3.2.3 土砂供給の変化

(1) ダム貯水池に堆積する土砂の量

この土砂はダムが無ければ下流に供給されていたもの、言い換えれば、ダムの存在に伴う土砂供給減少分であり、その量と粒度分布を把握することは、ダム地点で生じる現象を知る上で重要である。なお、ここで対象としている一定規模以上の貯水池を常時持つダムであっても、土砂の一部（シルト粒径以下の土砂のうち粒径の小さいもの）はダムを通過しており、ダムが流入する全ての土砂が扞止されるわけではない。しかし、河道を構成する材料に相当する粒径範囲については、その多くが扞止されると考えて良いであろう。

図 3.2-9 に、国土交通省および水資源機構が管理する既設 98 ダムのうち、実績堆砂容量が整理されている 94 ダムの実績堆砂量（平成 13 年時点）を示す。ダム貯水池に堆積する土砂量は、流域の規模、地形・地質特性、ダム貯水池の諸元や諸特性、ダム建設後の経過年数、出水の発生状況などにより異なるので、この図に示されるとおり、堆砂量がダム毎に大きく異なるのは当然である。

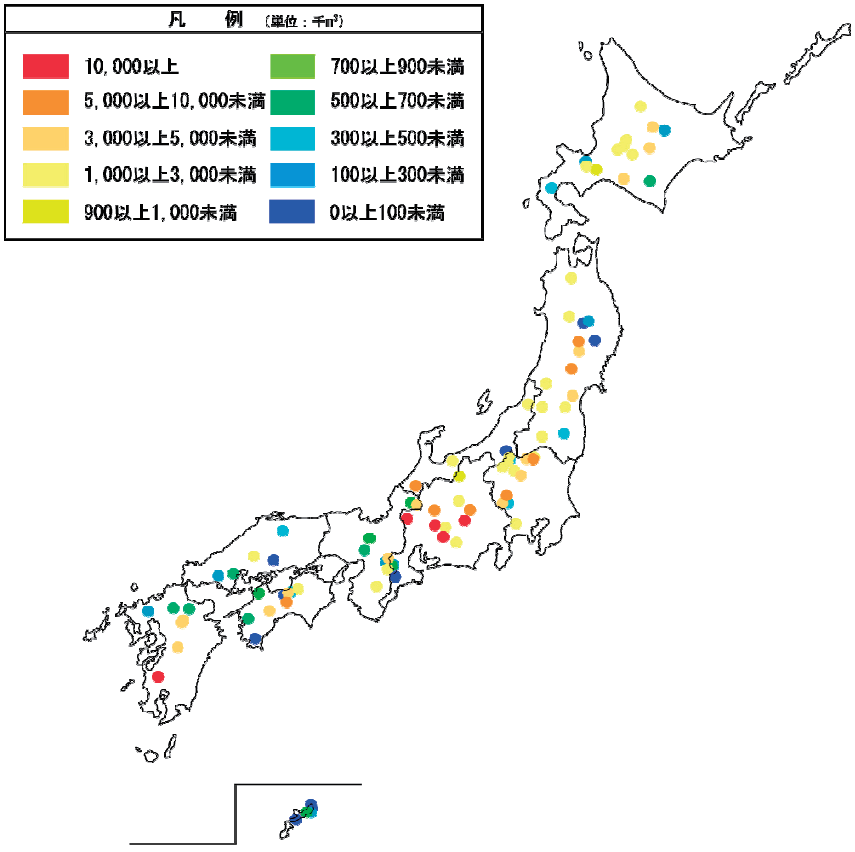


図 3.2-9　平成 13 年時点における各ダムの堆砂量

図 3.2-10 には、比堆砂量（堆砂量/流域面積/年）の形に整理したものを示す。対象とした 94 ダムにおける比堆砂量平均値はおよそ 0.78 千 m^3/km^2/年（＝mm/年）である。また、比堆砂量の形にしてもダム毎に値が大きく異なっている。

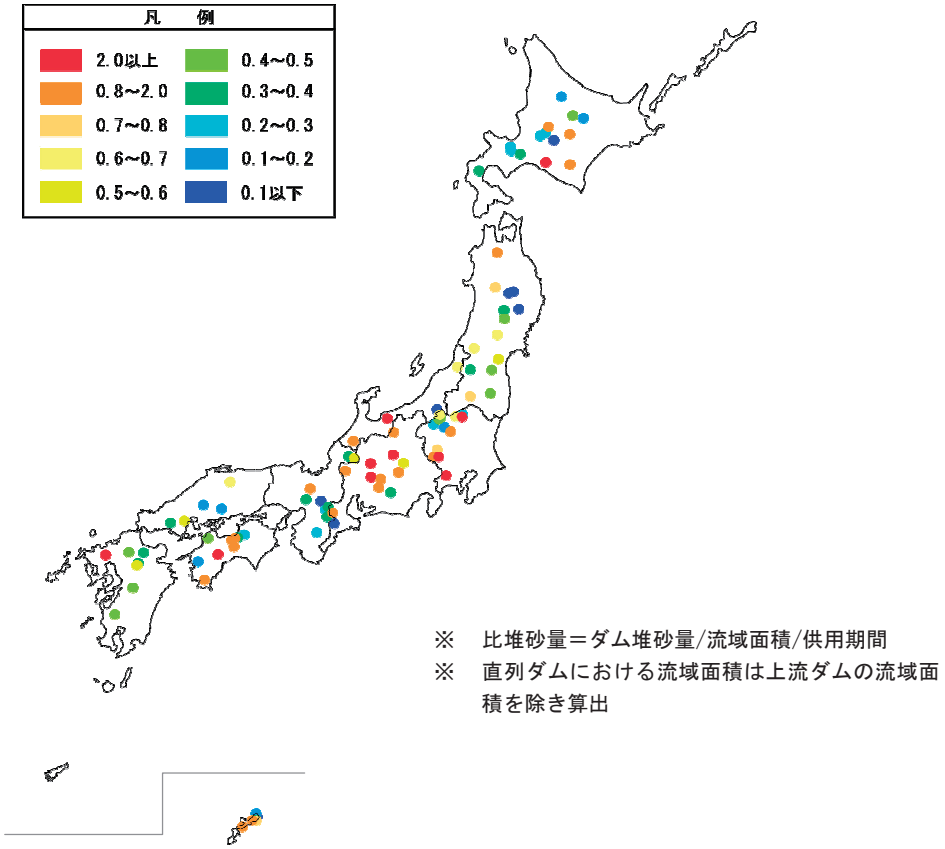
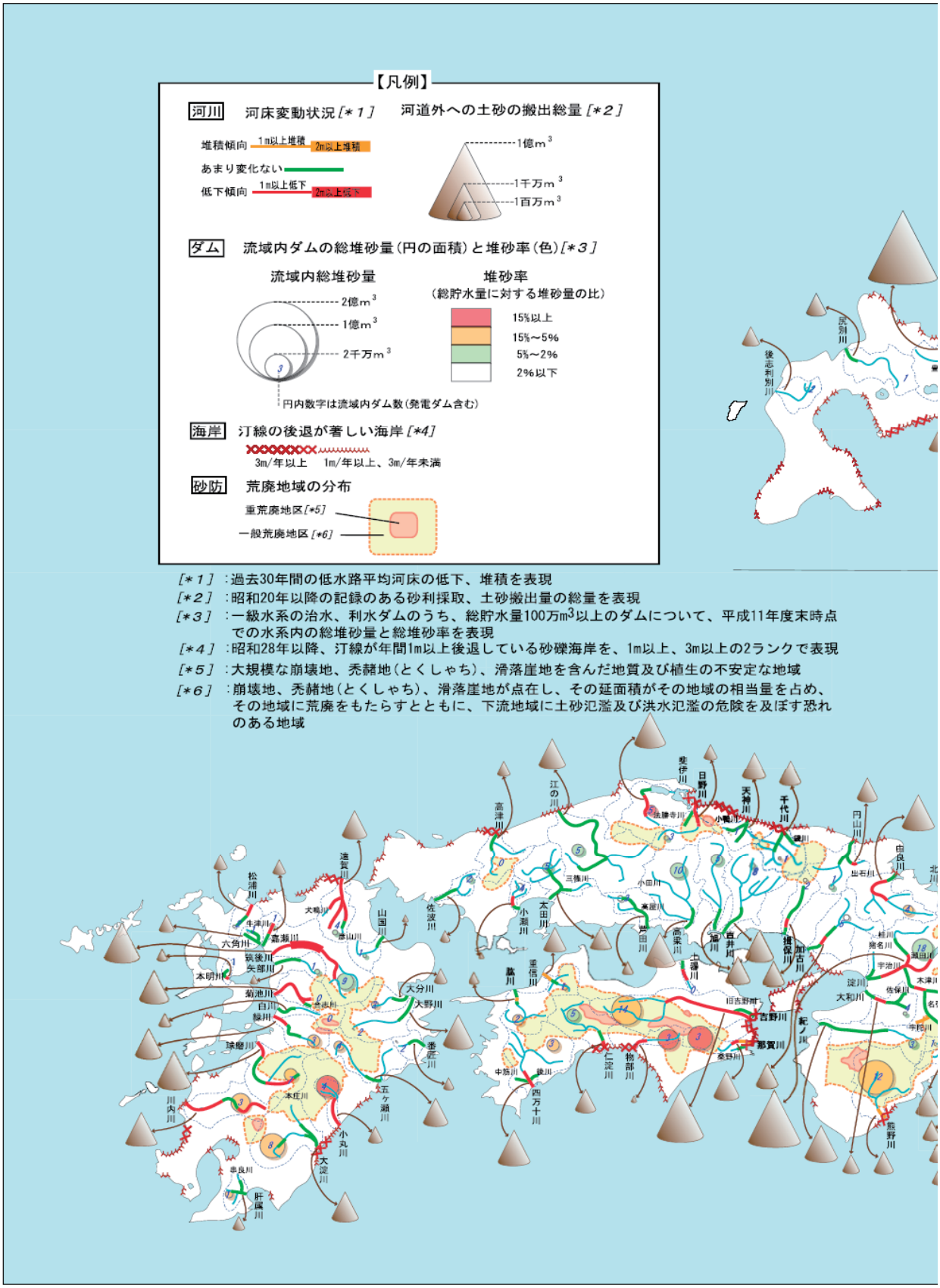


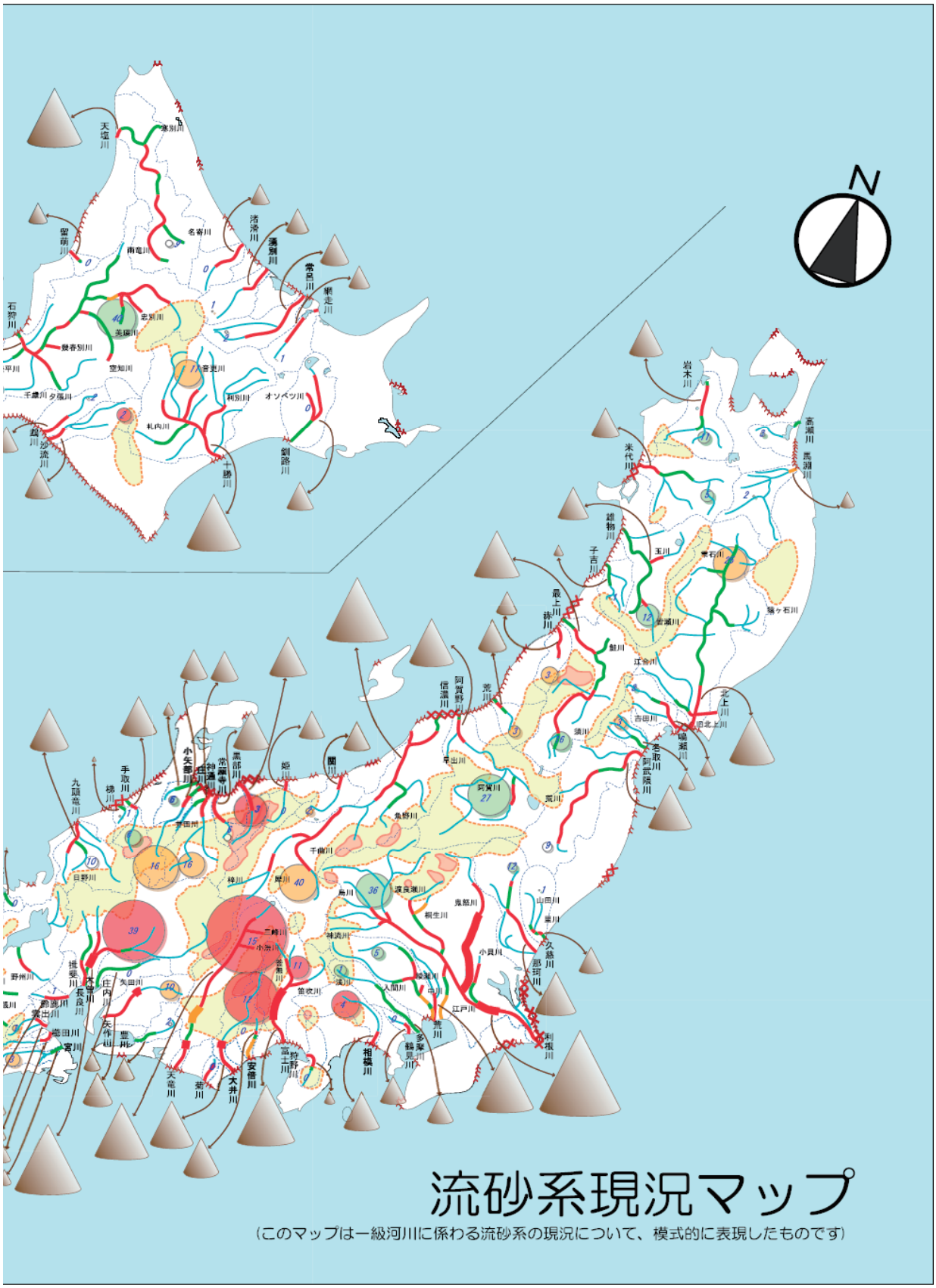
図 3.2-10　各ダムの比堆砂量（mm/年）

図 3.2-11 は、一級河川に関わる流砂系の現況特性を実測データに基づき集計し、一括して表現したもので、流砂系現況マップと呼ばれる（国土交通省 2002）。この図から、流域毎のダム総堆砂量と堆砂率を読み取ることができる。この他、水系ごとに、河道変化傾向（河床低下か河床上昇（堆積）か）、汀線の状況、河道外への土砂の搬出総量（昭和 20 年以降の記録のある砂利採取、土砂搬出のデータを集計）などが示されており、本マップは、日本の流砂系の全体状況を大局的・俯瞰的に把握するための出発点になるべき基本情報である。



[*1] ：過去30年間の低水路平均河床の低下、堆積を表現
[*2] ：昭和20年以降の記録のある砂利採取、土砂搬出量の総量を表現
[*3] ：一級水系の治水、利水ダムのうち、総貯水量100万m3以上のダムについて、平成11年度末時点での水系内の総堆砂量と総堆砂率を表現
[*4] ：昭和28年以降、汀線が年間1m以上後退している砂礫海岸を、1m以上、3m以上の2ランクで表現
[*5] ：大規模な崩壊地、禿赭地(とくしゃち)、滑落崖地を含んだ地質及び植生の不安定な地域
[*6] ：崩壊地、禿赭地(とくしゃち)、滑落崖地が点在し、その延面積がその地域の相当量を占め、その地域に荒廃をもたらすとともに、下流地域に土砂氾濫及び洪水氾濫の危険を及ぼす恐れのある地域

図 3.2-11　流砂系現況マップ



（国土交通省 2002）

(2) ダム貯水池に堆積する土砂の粒度

図 2.3-3、図 2.3-4、図 2.5-2 を参照されたい。2.3 で述べたように、ダム貯水池に堆積する土砂の多くは、シルト・粘土や砂であり、それらに比べ礫はずっと少ない。

堆積土砂の粒度分布を知ることは、量を知ることと同様に、場合によってはそれ以上に重要である。たとえば、ダムによって礫の供給量がどれだけ減少したかを見積もる際に、粒度分布を考えずに堆砂量の多くが礫であるとして分析することは、遮断された礫流送量をオーダー違いで過大評価することになる。この例からわかるように、ダムによる土砂扞止と下流河川の河道状況との関係を分析する場合、堆砂の量だけでなくその粒度分布を合わせて考慮することが必須となる。粒度分布までの表現をしなくても、礫集団、砂集団、シルト・粘土集団と言うように、いくつかの主だった粒径集団に分けて調査・分析を行うことで、現象の理解は随分正確になる。逆に、堆積した量だけで分析を進めると、かえって現象の理解を妨げることにもなりかねない。粒径集団については 2.5 で詳述しているので参照されたい。

3.3 ダム地点での変換が下流にどのように伝播していくかを考える上でのいくつかの重要事項

3.3.1 ダム集水域面積割合に関する河川水系マップ

ダム地点から河川沿いに下流に進み、流域にダムの無い支川の合流が増えてくると、一般的にはダム地点で生じた現象の河川への出方が小さくなっていく。たとえば、ダム地点でそれまで流送されていた主要な土砂が扞止されたとしても、下流で支川からの土砂供給を受けるにしたがい、ダムによる土砂供給減少の割合は減っていく。また、たとえば水温の変化があったとしても同様のことが言える。支川合流がまだないダム地点直下の河川状況と、ダム集水面積に匹敵する大きな支川（ダムの無い）が合流した後の河川状況とでは、ダムとの関係を分析する上で、その基本的な条件が異なると考えなければならない。さらに、Petts et al.(1993)によれば、ダム下流における環境影響は、ダムのない川（支川）と河畔からの物質の供給により下流方向の影響が縮小されることを指摘しており、ある地点におけるダムの影響は、その地点の集水面積に対するダム集水面積割合によって指標化できると述べている。

このような意味で、「ダム集水面積割合」という指標は、簡易であるが便利かつ重要である。

「ダム集水面積割合」とは、「ダム貯水池下流の河川のある地点についての全流域面積[A]に対する上流ダム（群）の総集水面積[A_d]（もちろん重複は排除）の占める割合[A_d/A]」を指し、ダム集水域面積割合に関する河川水系マップとして図化すると特徴がよりつかみやすくなる。この割合は、ダム直下が 1.0 であり、下流に下ってダム集水域以外の流域面積（残流域）が加わるにつれ低下し、河川延長が無限大であれば、0 に近づいていく。

もちろん、ダム貯水池の下流河川に及ぼす影響の薄まり具合が、ダム集水域面積割合に応じて決まるとは限らないので、この数字だけでダム貯水池の影響を短絡的に見積もることにはならない。しかし、マップの作成原理が単純であり、ダム集水域面積割合がダム貯水池の影響度を検討する際の有力な情報の一つにはなりうることから（この割合が小さければダム貯水池の影響が薄まっている可能性が高いと大局的には言える）、ここで取り上げている。

図 3.3-1 に全国のダム集水域面積割合に関する河川水系マップの作成例を示す（平成 15 年時点）。対象ダムは、先の 98 ダム（国土交通省および水資源機構が管理する既設ダム、平成 15 年度時点）に加え、出水時にも土砂の流下を有意に抑制すると判断できる堤高 15m 以上のダム（補助ダム・農業用ダム・発電ダム等）とした。なお、対象とした水系は、国土交通省および水資源機構が管理するダムが存在する一級河川水系とした。したがって，一級水系でも，これらのダムが無い場合には図化の対象としていない.

これによれば、水系によってマップの状況が相当に異なることがわかり、0.3 以下の青系色が目立つ水系もあれば、0.7 以上のオレンジ・赤系色が目立つ水系もある。日本の山地部は空間的にきめ細かく変化する地形特性を持つので、ダム集水面積が大

陸のダムに比べれば小さい一方、流下の過程において大小さまざまな支川が流入することになり、ダム集水面積割合が下流に向かって急激に減少する場合が少なくない。前述のように、この数字だけに頼って分析を進めることは適切でないが、この数字が示す基本的な特性を踏まえつつ分析を進めることは大事と考えられる。なお、ダム貯水池による洪水調節や平常時の水の補給においては、こうした特性を十分踏まえ、丁寧な計画・設計・運用がなされる。すなわち、所定の効果が得られるようにダム貯水池の計画・設計がなされ、必要な制御が行われ、目的としている治水・利水機能が発揮されている。

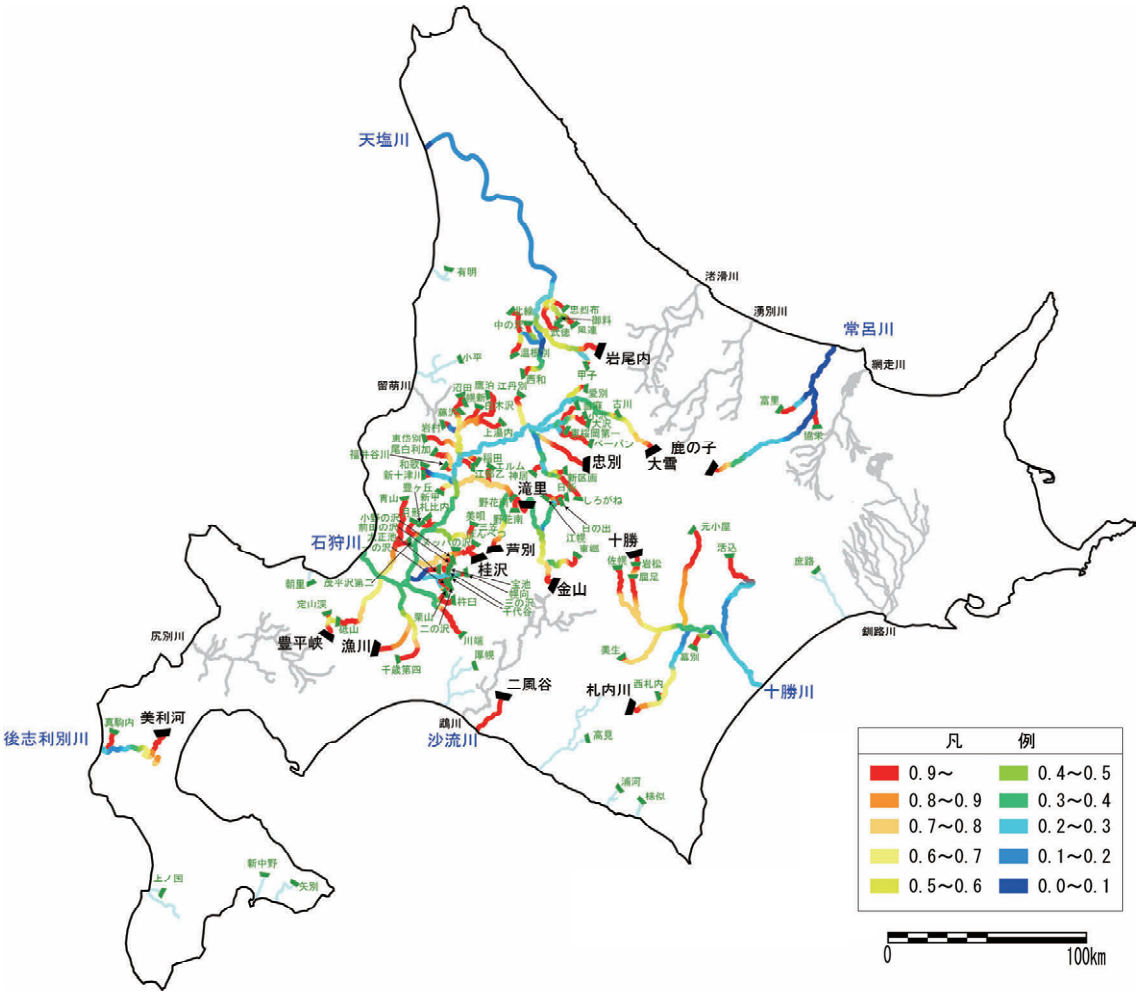


図 3.3-1 a)　ダム集水域面積割合に関する河川水系マップ（北海道地方の作成例）

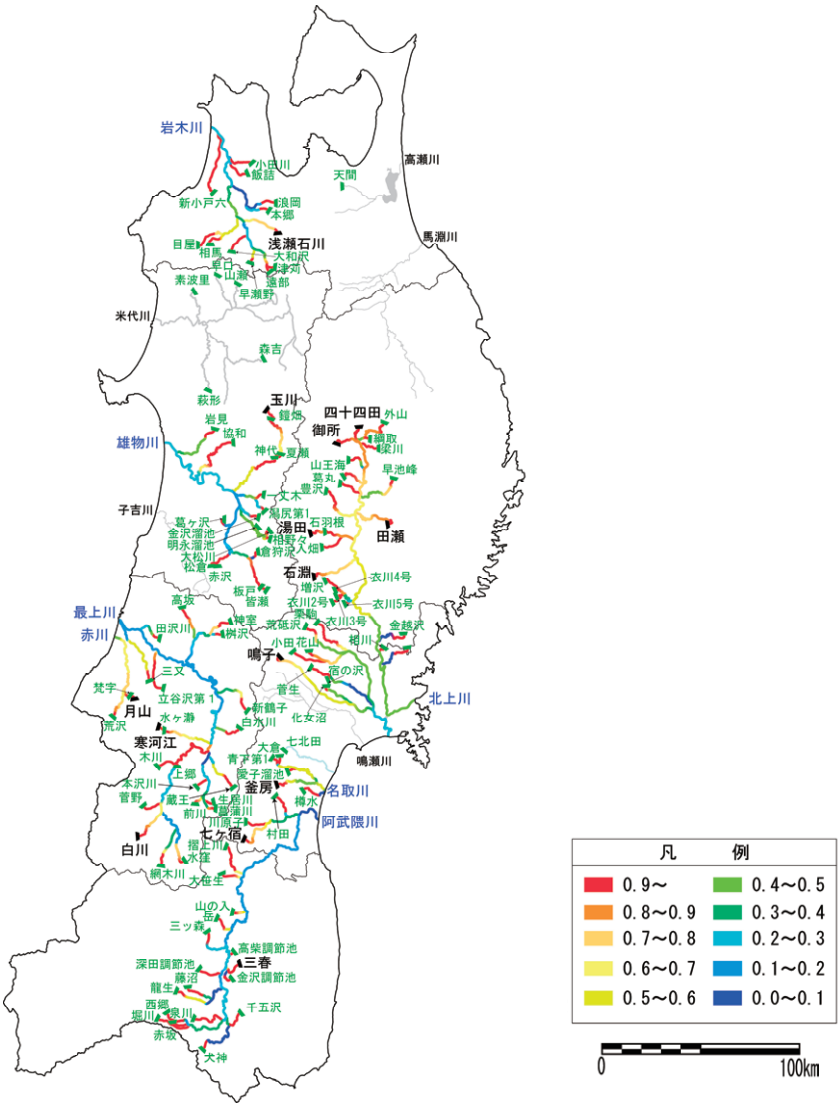


図 3.3-1 b)　ダム集水域面積割合に関する河川水系マップ（東北地方の作成例）

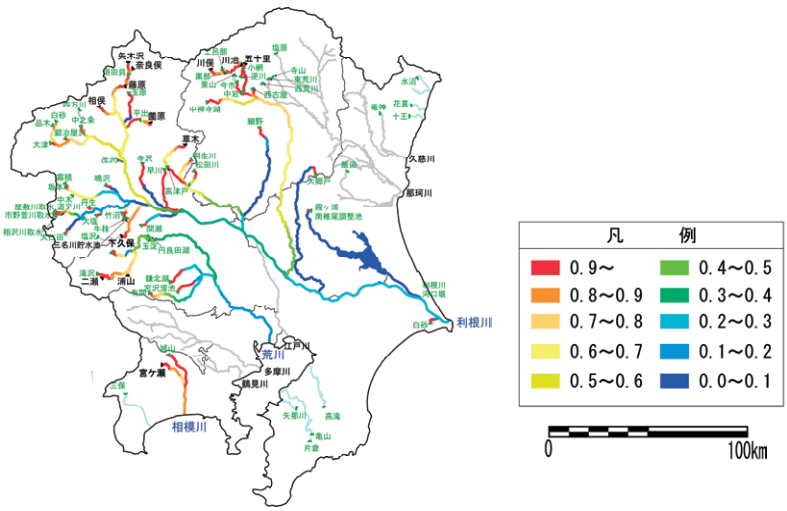


図 3.3-1 c)　ダム集水域面積割合に関する河川水系マップ（関東地方の作成例）

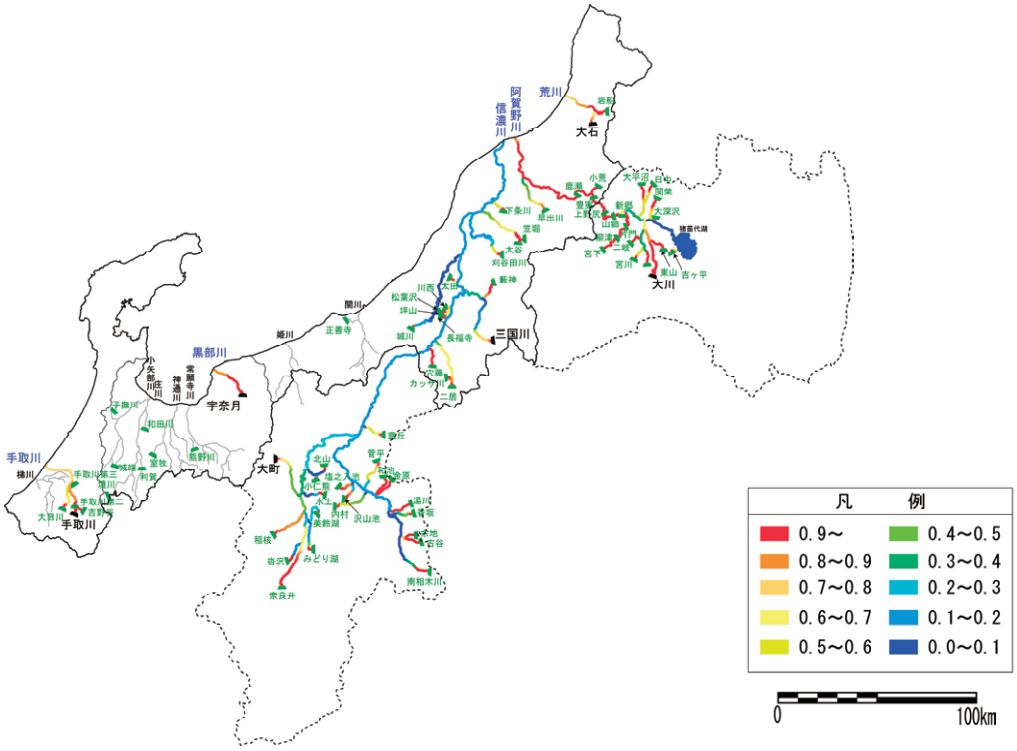


図 3.3-1 d)　ダム集水域面積割合に関する河川水系マップ（北陸地方の作成例）

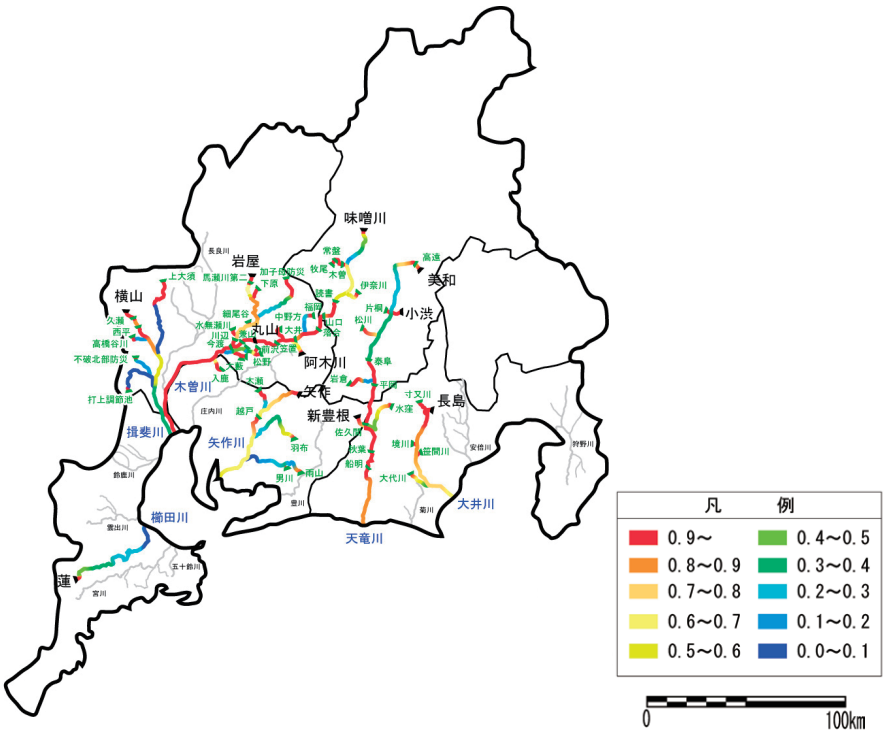


図 3.3-1 e)　ダム集水域面積割合に関する河川水系マップ（中部地方の作成例）

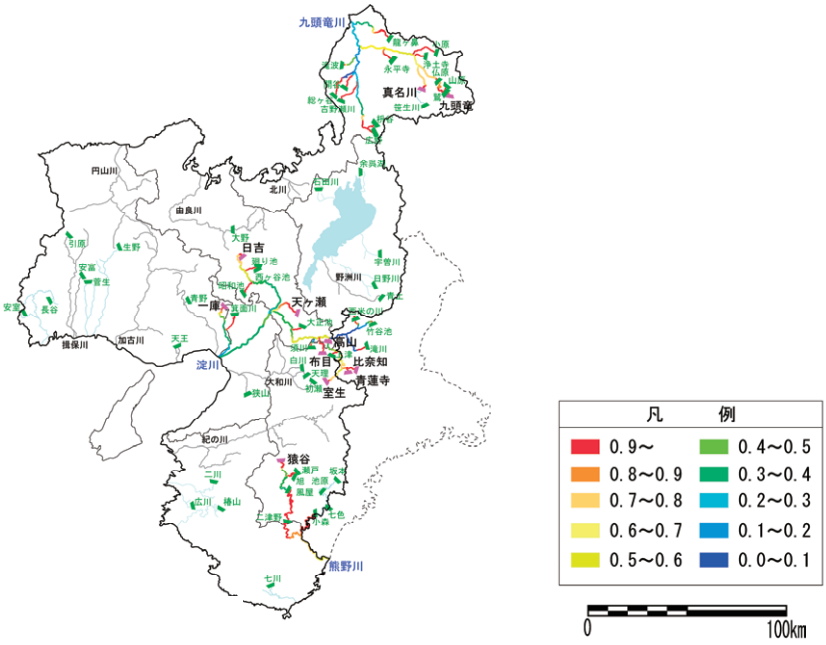


図 3.3-1 f)　ダム集水域面積割合に関する河川水系マップ（近畿地方の作成例）

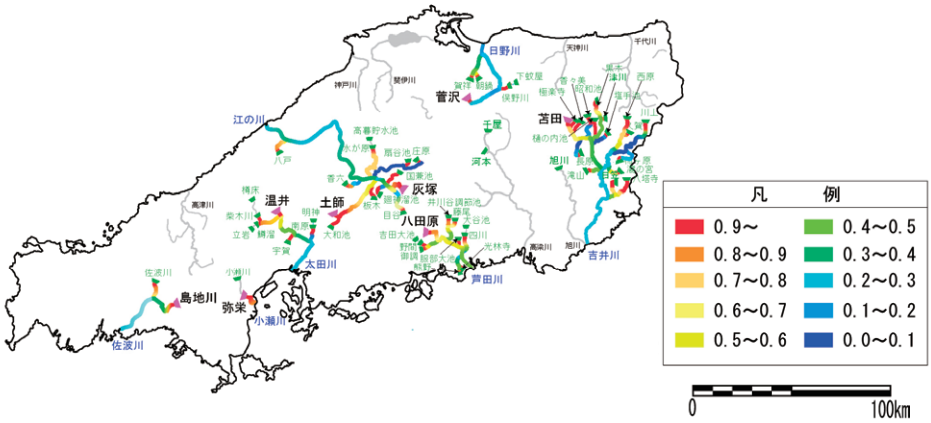


図 3.3-1 g)　ダム集水域面積割合に関する河川水系マップ（中国地方の作成例）

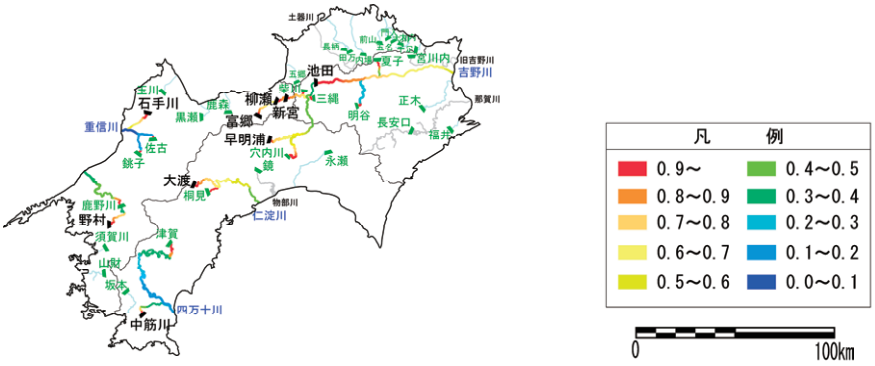


図 3.3-1 h)　ダム集水域面積割合に関する河川水系マップ（四国地方の作成例）

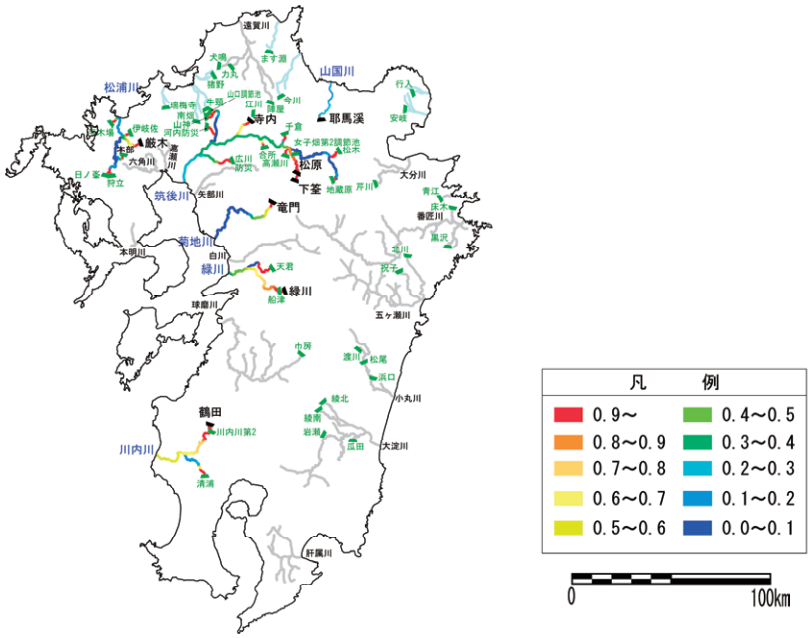


図 3.3-1 i)　ダム集水域面積割合に関する河川水系マップ（九州地方の作成例）

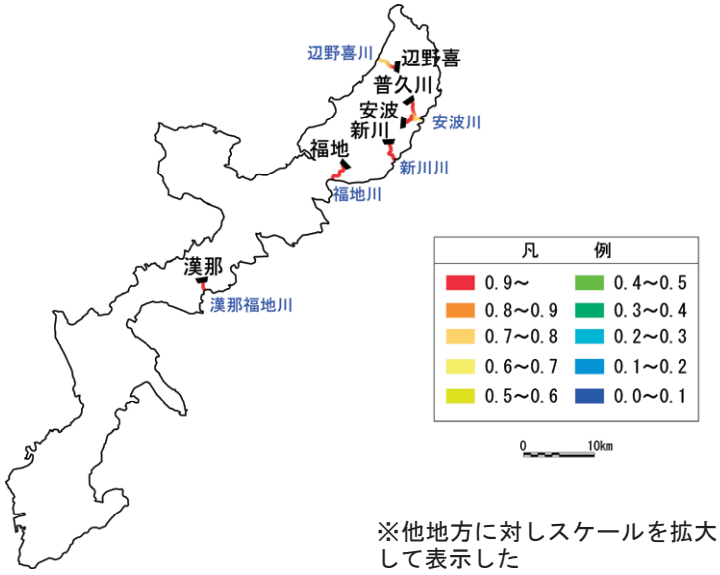


図 3.3-1 j) ダム集水域面積割合に関する河川水系マップ（沖縄地方の作成例）

3.3.2 ダム－下流河道関係を大局的に把握する手法

(1) ダムの有無に関する土砂流送比と流量比を指標にした「ダム－下流河道関係把握図」の説明

ここでは、ダム集水域面積割合に関する河川水系マップを一歩前進させ、変化が無視できる状況も含め、ダムが下流河道にどのような変化をもたらしうるかを検討する際に役立つ「ダム－下流河道関係把握図」について説明する。このような図が必要なのは、今まで述べてきたように、一口にダムといっても、その変換作用は様々であり、下流で起こりうる変化の度合いにも性質にも大きな幅があることから、まずは、当該河道区間において、どのような河道変化が起こりうるのか（起こらないことも含めて）をおおざっぱに把握する簡便な手法が有用となるからである。

「ダム－下流河道関係把握図」の基本は次のようである。（図 3.3-2 参照）縦軸には、「流量比」をとる。すなわち、ダム下流のある地点での［ダムなしの洪水流量に対するダムありの洪水流量の比］をとる。横軸には、「最小土砂流送比」をとる。すなわち、ダム下流のある地点での［ダムなしでの土砂流送量に対するダムありでの最終的な土砂流送量の比］を取る。ここで、「最小」「最終的」という言葉を加えているのは、流量と違って土砂の場合、粒径によっては、ダムによる土砂流送量減少の下流への伝播速度が非常に遅いので、すぐにはその比で流送量が減少するわけではないことを示す必要があるからである。

Grant et al.（2003）は、縦軸にダムより上流での土砂供給量に対するダムから下流対象地点までの土砂供給量の比をとり、横軸に、土砂流送を起こす流量の発生頻度のダム建設に伴う変化率（ダム建設前に対する建設後の比）をとり、これら２つの無次元量の組み合わせから、ダムが下流河川に与える影響を流域地質の観点から検討する基本的枠組みを提示している。この枠組みは、流域地質の要因が重要となる状況を見いだすことに主眼があり、また、軸として選定した変数には違いがあるものの、ダムの作用を規定する少数の重要因子を単純に表現し、下流河道のダムに対する応答を分析するための基本的方向性を得るという点で共通しており、本資料で示している方法も含め、このような大局的な分析の道具が今後重要になっていくと考えられる。

さて、縦軸、横軸を上記の定義通りにすると、その算出に労力がかかりすぎ、簡便さという主旨が失われる恐れがあるので、ここでは、それぞれを次のように簡略化した表現で代用する。まず、縦軸には次式を用いる。

$$\text{簡略化した「流量比」} = (Qout + Q_{支川}) / (Qin + Q_{支川})$$

ここで、Qout、 Qin には、それぞれ、ダム貯水池から放流される平均年最大流量とダム貯水地に流入する平均年最大流量を与える。$Q_{支川}$はダム下流河川に流入する支川からの洪水流量であり、ここでは、Qin 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。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。

次に、横軸には次式を用いる。

簡略化した「最小土砂流送比」＝1-Ad/A

ここで、Ad/A：ダム集水面積割合、である。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算定する。

いずれの簡略化も、比供給土砂量、比洪水流量が流域で一定と仮定しているので、場合によっては誤差が大きくなり、また、降雨や土砂流出に関わる流域特性の空間分布を踏まえたきめ細かな検討を行うには適さない。また、洪水規模の違いの影響も考慮できない。しかし、分析の第一歩としてダム下流河道の変化可能性を探る際には、それなりの意味があろう。必要な場合には、労力を要するが、定義に厳密に従った調査・分析・算出を行えばよい。以後の「ダム－下流河道関係把握図」の例示では、以上の主旨の下、すべて簡略化表現を用いている。

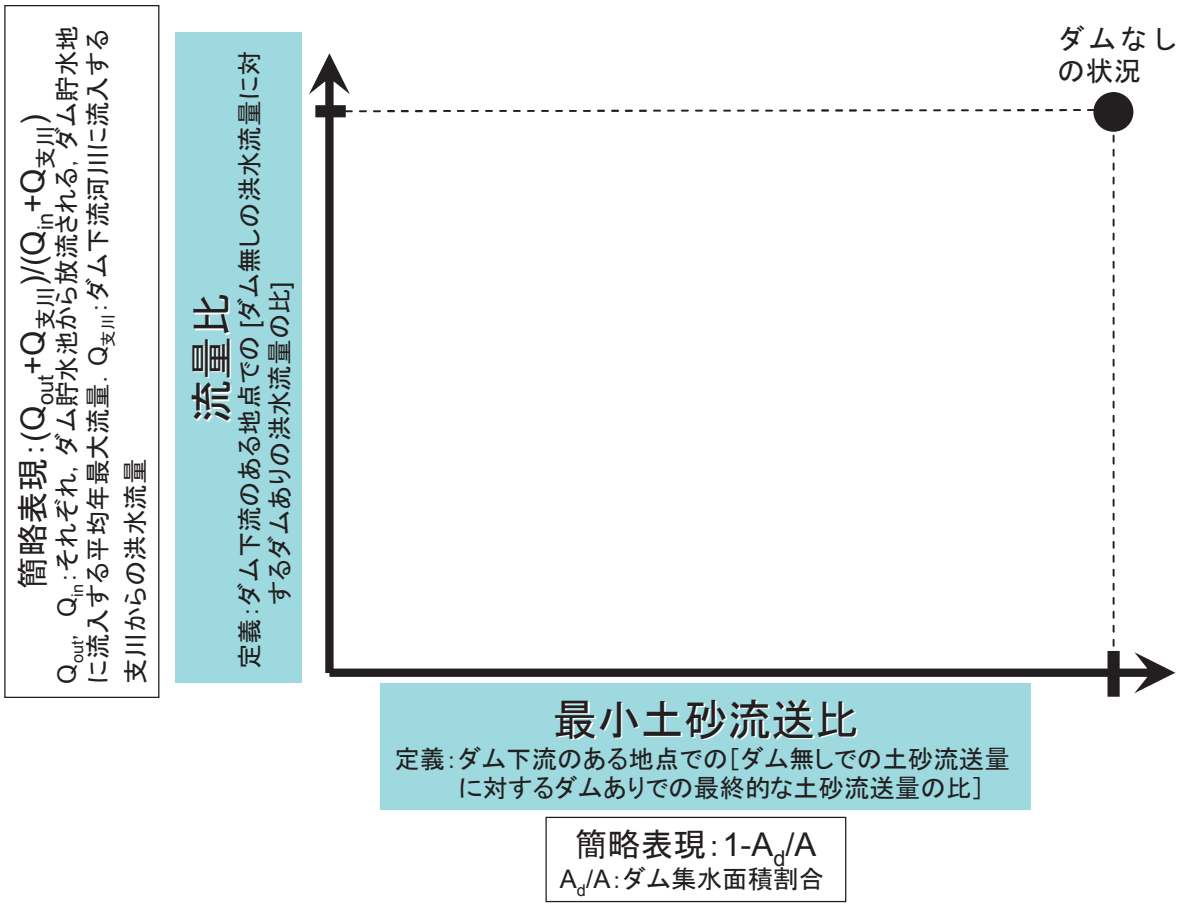


図 3.3-2　ダム－下流河道関係把握図の軸の説明

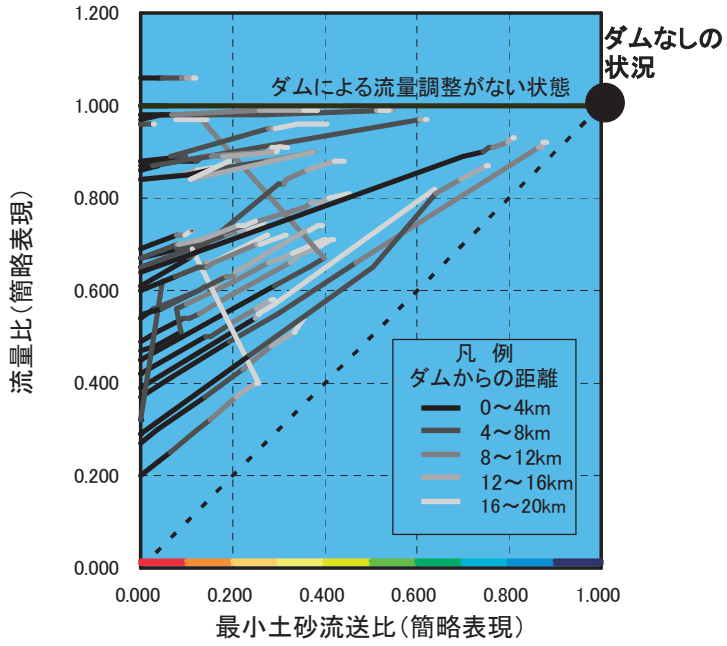


図 3.3-3　ダム－下流河道関係把握図へのプロット例

以上を縦軸、横軸に持つ図に、当該ダム貯水池から下流に向かって移動するにつれて、図上のプロット位置がどのように動くかを表現することで、「ダム－下流河道関係把握図」を用いた検討の準備が整う。その例示が図 3.3-3 である。ここで対象とした既設ダムは、上流に洪水調節を目的としたダムが存在しない直轄・水資源機構の管理ダムであり、各地方整備局あたり３ダム程度を任意に抽出したほか、近年運用を開始した３ダムも加え、計 30 ダムでの整理の結果が示されている。ダム貯水池に流入する、あるいはそこから放流される洪水流量は、1993 年～2003 年の実績流量（年最大流量）の平均値とした（ただし新規３ダムは、運用開始が 1993 年以降なので、より短い年数の平均値である）。図中にある折れ線の色は、ダム地点から下流に向け 4km ごとに 20km までを着色したものであり、薄い色ほどダムから下流に離れる。両軸の値とも簡略化した表現により算出しているので、図中の（0,0）と（1,1）を結ぶ直線より右下の領域は出現し得ない。両軸の値を厳密に算出すれば、この領域にプロットされる場合もでてくる（ただし、そのような条件を持つ水系は少ないと考えられる）。参考として、前出の「ダム集水域面積割合に関する河川水系マップ」におけるダム集水面積割合の色づけと全く同じものを横軸に併記した。

図中において、線が急に反転するのは、合流する支川または本川（支川にあるダムからスタートしている場合）の上流にある別のダムによる変化である。また、縦軸が 1.0 をわずかに超えるプロットは、中小出水では洪水調節を行わないダムであり、整理した期間には洪水調節の対象となるような規模の洪水が起きなかったケースである。

図 3.3-3 を見ると、ダム地点から下流に進むにしたがい、図上で全般に右ないし右上方向に遷移する傾向にあるものの、その遷移の速さは河川によって大きく異なっており、ダムから数 km と短い距離で右上方に移動するものもあれば、20km 下流であっても右上方に至らないものもある。これは、規模の大きな支川の合流の有無によるものである。また、ダムによって流量比が異なるため、図上の線は、(0,0) と (1,1) を結ぶ直線より左上の三角形領域において、幅広く散らばっている。

(2) 「ダム－下流河道関係把握図」を用いた簡易判定法

さて、この図の成り立ちから、図中のどの領域にプロットが来るかによって、下流河道にどのような変化が起こりうるか（あるいは有意な変化は起こらないか）について、次のようなことが概ね言える。図 3.3-4 と合わせて参照されたい。なお、以下のうち領域Ⅰ、Ⅱで起こる現象については、3.3.3 において、より詳細に記述しているので参照されたい。

＜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＞

・[領域Ⅰ：左上方]に来る場合：流量比が大きく（1 に近い）、最小土砂流送比が小さい

材料 m を構成する礫の間にある砂が比較的早く抜け出す可能性がある。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。

・[領域Ⅱ：左下方]に来る場合：流量比も、最小土砂流送比も小さい

材料 m を構成する礫の間にある砂がゆっくり抜け出す可能性がある。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。

・[領域Ⅲ：右上方]に来る場合：流量比も、最小土砂流送比も大きい（1 に近い）

砂の挙動に大きな変化は起こらない可能性が高い。材料 m を構成する礫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。

・[領域Ⅳ：右下方]に入り込む場合：流量比が小さく、最小土砂流送比がやや大きい （★ (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）

材料 m を構成する礫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。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。

＜材料 m を構成する礫の材料の挙動について＞

・[領域Ⅰ：左上方]に来る場合：流量比が大きく（1 に近い）、最小土砂流送比が小さい

次のイ、ロのどちらかの可能性がある。

ｲ) 河床材料が従前（ダム建設前）と同じであまり動かない状態が維持される。

ﾛ) 粗粒化がごくゆっくり、ゆっくり、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。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。

・[領域Ⅱ：左下方]に来る場合：流量比も、最小土砂流送比も小さい

次のイ、ロのどちらかの可能性がある。

ｲ) 河床材料が従前（ダム建設前）と同じであまり動かない状態が維持される。

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もある。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。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。

・[領域Ⅲ：右上方]に来る場合：流量比も、最小土砂流送比も大きい（1 に近い）

大きな変化は起こらない可能性が高い。

・[領域Ⅳ：右下方]に入り込む場合：流量比が小さく、最小土砂流送比がやや大きい　（★（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）

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。

＜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 セグメントのさらに下流の S セグメントを想定）＞

・[領域Ⅰ：左上方]に来る場合：流量比が大きく（1 に近い）、最小土砂流送比が小さい

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。

・[領域Ⅱ：左下方]に来る場合：流量比も、最小土砂流送比も小さい

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。

・[領域Ⅲ：右上方]に来る場合：流量比も、最小土砂流送比も大きい（1 に近い）

大きな変化は起こらない可能性が高い。河床低下が起こるにしてもごくゆっくりである可能性が高い。

・[領域Ⅳ：右下方]に入り込む場合：流量比が小さく、最小土砂流送比がやや大きい　（★（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）

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。

＜礫を材料 m とする河道区間において、材料 t としてふるまうシルト・粘土などの細粒土砂について＞

・[領域Ⅰ：左上方]に来る場合：流量比が大きく（1 に近い）、最小土砂流送比

が小さい

有意な変化が起こらない可能性が高い。

・[領域Ⅱ：左下方]に来る場合：流量比も、最小土砂流送比も小さい

有意な変化が起こらない可能性が高い。

・[領域Ⅲ：右上方]に来る場合：流量比も、最小土砂流送比も大きい（1 に近い）

有意な変化が起こらない可能性が高い。

・[領域Ⅳ：右下方]に入り込む場合：流量比が小さく、最小土砂流送比がやや大きい　（★（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）

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 を構成する礫の間に細粒土砂がたまる・詰まる可能性がある。

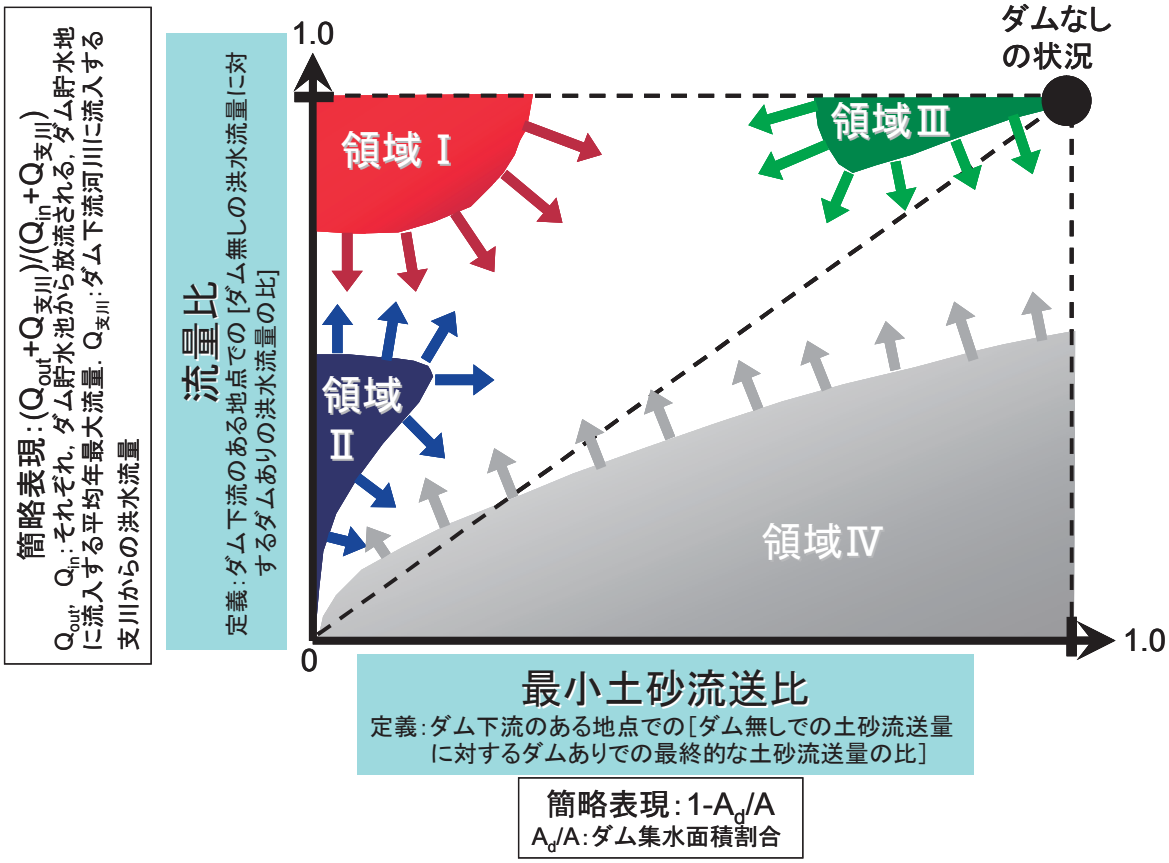


図 3.3-4　ダムー下流河道関係把握図の領域区分

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。

(3) 材料 m に関する無次元掃流力を把握できる場合に実施可能な追加判定

上記(1)、(2)で説明した「ダム－下流河道関係把握図」は、各軸の値の算定を簡略表現により行う限り、下流河道についての詳細な情報を必要としないので、作成にあまり労力を要しないという利点がある。その一方、河道に関する情報が直接的には考慮されていないので、得られる情報に制約がある。その代表は、(2)で説明した判定法において、ｲ)とﾛ)のどちらになるかがわからないことである。これは、ダムによる河床材料の動きの変化が流量変化だけに規定されるのではなく、もともと有していた動きやすさにも大きく左右されるからである。そして、河床材料の動きやすさは、洪水時に作用する無次元掃流力により表現される。

そこで、ここでは、下流河道の材料 m についての無次元掃流力を算定できる場合に、どのような追加的判定ができるようになるかを説明する。無次元掃流力を算定するには、河道形状と洪水流量に基づく摩擦速度等の計算と河床材料調査が必要となるので、「ダム－下流河道関係把握図」の作成に比べ、手数はかかる。

無次元掃流力の情報の活用法を図 3.3-5 に示す。図中の左はダム－下流河道関係把握図であり、右は縦軸を流量比から無次元掃流力に置き換えた図である。これら２つの図を並べて対比させることにより、次のような判定が可能になる。なお、ここに対象としたダムは、下流河川の河床勾配や河道幅等が整理されている 9 ダム（忠別ダム・矢作ダム・小渋ダム・阿木川ダム・比奈知ダム・青連寺ダム・苫田ダム・土師ダム・灰塚ダム）である。掃流力は等流計算により算出し、想定流量は各ダム

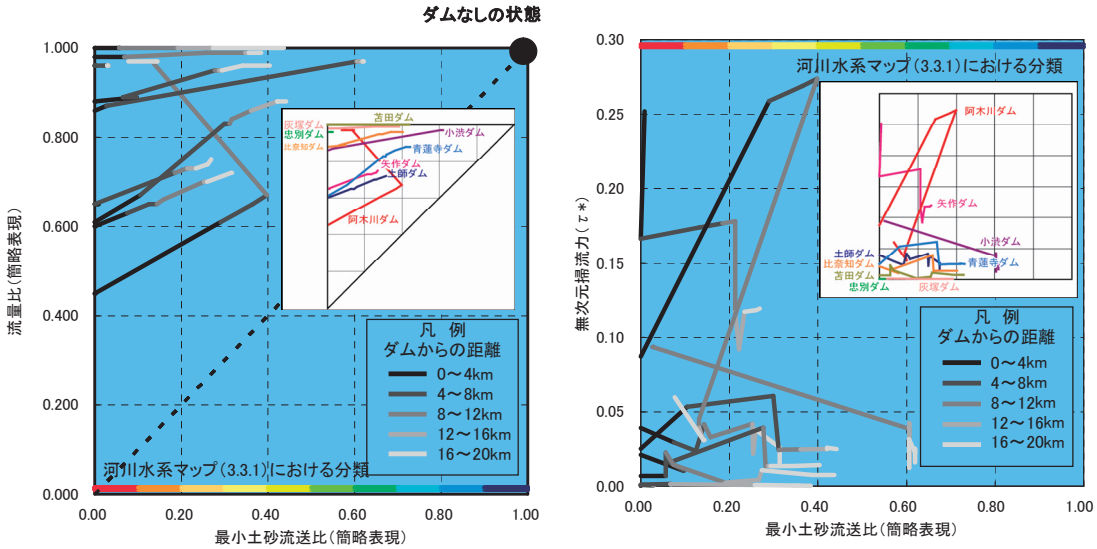


図 3.3-5 ダム－下流河道関係把握図に材料 m に関する無次元掃流力を加えて行う簡易分析

ともにダムなし条件での（あるいはダム流入量に基づく）平均年最大流量とする。無次元掃流力の意味と使い方については 6.2.2(1)を参照されたい。

比奈知ダムから 10km 程度下流までの河道範囲は、ダム－下流河道関係把握図においては領域Ⅰに入る。一方、無次元掃流力を見ると、0.05 より低い範囲にある。し

たがって、材料 m の動きがダムの有無にかかわらず鈍かったことがわかる。このことから、材料 m の挙動については、ｲ)の「河床材料が従前（ダム建設前）と同じであまり動かない状態が維持される」という追加判定を行うことになる。実際に比奈知ダム下流の河床を見ると、材料 t である砂の減少はあるものの、概して多くの区間で中礫から巨礫まで多様な粒径の材料が確認でき、材料 m に関してダム貯水池上下流で大きな差はなく、材料 m に関する粗粒化は生じていない（山原ほか 2007）。この状況については、5.5.1 で再度詳細に説明する。

一方、阿木川ダムや矢作ダムのケースでは、ダムから下流 10km 程度までの範囲について、領域Ⅰと Ⅱの境界あたりに位置するが、無次元掃流力は 0.05 よりかなり大きくなっており、これは流量比から見て、ダムあり状態を想定しても基本的には変わらない。したがって追加判定は、領域Ⅰあるいは Ⅱのﾛ)ということになる。

以上のように、情報入手に多くの手間は必要となるが、ダムー下流河道関係把握図に無次元掃流力の情報を加えることで、判定の中味が充実すると期待できる。ただし、ここで取り上げているのはあくまで簡易判定であり、種々の技術判断がこれだけで完結できるわけではない。技術判断に資する分析については、ここに記された知見をふまえつつ、さらに実用編を参照されたい。

3.3.3 ダムによる土砂の扞止と下流河道との関係の捉え方

ダムによる土砂の扞止が下流河道全体に及ぶというケース（3.3.2 の説明で言えば、下流河道全体にわたって、領域Ⅰあるいは Ⅱに属すケース）を取り上げ、起こりうる現象の基本的性質を説明し、3.3.2 の内容を補完する。あくまでダムによる土砂扞止が起こす現象のとらえ方の説明を主眼としており、領域ⅢやⅣに関わる現象は対象外であることに留意されたい。

(1) 砂集団の供給減少に着目した場合

砂は、一般に、礫に比べ水系内での動きがずっと早く、図 2.5-2、図 2.3-2～4 からわかるように供給量、したがってフラックスもはるかに大きいので、ダムなどにより供給遮断・低減が起こると、その影響は比較的早く下流に及んで、ダム下流河道の物理環境が残流域からの砂供給量に応じて決まる状態に至る可能性が高い。この考え方が 6.2.3 に反映されている。

1) 礫床区間（材料 m が礫）

この区間では砂集団は通過型なので、河床形状変化や材料 m の粒度変化は小さく、河床表面の礫間や水裏などに一時的に存在する砂（材料 t としての）の減少が起こるというパターンが考えられる。ただし、この現象については、調査研究が進められている段階である。その一例を、このあと 5.5.1，6.3.3(4) で紹介する。この変化は、礫床河道や山地部河道の河川生態系に関わる物理環境の変化につながる場合があり、その検討が必要である。また、材料 s による主流路脇の河岸への堆積速度の減少も考えられる。

2) 砂床区間（材料 m が砂）

この区間にはいると、砂集団が混合型となるので、河床低下や縦断勾配の減少が起こりうる。こうした変化が起こる場合、その変化は、より上流にある礫床区間を飛び越えて、砂床区間から起こり始めることになる。つまり、河道の変化が上流から順番に現れるとは限らないと言うことであり、この理由は「2.5.1 沖積河道形成の捉え方」、図 2.5-1 に示した各粒径集団の動き方から理解される。

ただし、こうした砂床区間の河床低下は、少数の事例（藤田ほか 1999）を除いて、必ずしも広く確認されているわけではない。この理由として、そもそも、ダムにおける砂集団の扞止による下流への変化が、河床低下を起こすレベルに至っていない、あるいは、もともと河床掘削（砂採取を含む）が卓越していて、ダムによるマクロな砂収支バランスへの影響が見えにくかった、などが考えられる（これについては 3.3.4 で再度議論する）。仮に後者が当てはまる場合、河床掘削（砂採取を含む）がなされない状態が長く続いている場合の砂床区間の砂集団収支や河床変化を注視することが大事になる。

また、材料 m が礫からなるセグメントが河口まで続く場合（砂床区間が無く、礫床区間がいきなり海に突っ込む形；図 2.2-3 のタイプ B）、砂供給減少の変化を河床

低下などで吸収するクッションを期待できないので（砂を材料 m とするセグメントが無いため）、礫床区間を通過型で流送される砂集団のフラックス減少が海岸への砂供給減少に結びつきやすいという状況を想定できる（こうした仮説に沿った分析が文献（海岸侵食対策と利水ダムの機能の維持・回復のための土砂管理対策検討委員会 2004）でなされている）。逆に言えば、「2.5.1 沖積河道形成の捉え方」、図 2.5-1 のような砂床のセグメントが存在する河川については、ダムによる砂集団の扞止の影響がまずは砂床セグメントの上流端付近に現れ、しばらくはそこからの河床低下により砂供給減少のインパクトが吸収されるので、ダムの出現がすぐに海岸への砂供給減少に結びつくことにはならないと考えられる。

このように、ダムによる土砂の扞止が海岸への砂供給の減少に至るのにも、砂集団の流送にかかわる様々なプロセスが関わることになり、またそのパターンも、ダム下流河川の特性よって大きく違ったものになりうる。こうした実態を分析しようとせず、たとえば、ダム貯水池に堆積した土砂の全量を河川から海岸への砂供給の減少量に直接結びつけるような議論を展開することは、科学的合理性とはおよそかけ離れたものである。

(2) 礫集団の供給減少に着目した場合

この場合、もっぱら礫床区間が対象となる。

礫は、砂に比べ動きがずっと遅いので、上流部でダム等による供給遮断があったとしても、それによる変化が速やかに広範囲（たとえば数十 km）に下流河道に伝わることは考えにくい。それでも、ダム地点の直下流から一定の範囲では、礫供給の遮断により種々の変化が現れる可能性がある。ただし、その出方は、常にアーマリングが起きる、あるいは河床低下が起こるというようなものではなく、流量の状況、支川合流形態、元々の河道の特性など様々な要因により様々に変わりうると考えられる。たとえば、もともと礫の動きが鈍い河道にダムができて（2.7.1 で述べているように、そのような河道は山地部では珍しくないと考えられる）、洪水流量がやや減ることで、礫の動きが大幅に減少する場合がある。このような場合には、3.3.2(2) や 3.3.3 (1) 1) に述べた砂の抜け出しは起こるかも知れないが、材料 m である礫の粗粒化や河床低下にはつながらないと考えられる。

このように、ダム下流の礫河床の変化にも様々なパターンがあることを考えなければならない。洪水調節に伴うダム下流での礫輸送能力の減少度合いの大・小（流量比で言えば小・大）、ダム下流での支川などからの礫供給の度合いの大・小（最小土砂流送比で言えば大・小）を組み合わせることで、起こりうる応答パターンを大まかに分類することができる。このうち、アーマリングや河床低下が支配的になる可能性があるのは、図 3.3-4 を用いて説明したように、流量比が大、土砂流送比が小の組み合わせの場合であり、小－小の組み合わせでは礫の動きの不活発化が（上記の例）、小－大の組み合わせでは土砂供給が活発な支川の合流点付近を中心に堆積さえ想定しうる。

礫供給遮断地点からある程度以上離れると、礫供給遮断それ自体が河床に与える影響が小さくなる可能性が考えられる。そのような場所では、ダム等による礫供給遮断よりはむしろ河道への直接的作用、特にその過去からの履歴が、現在の河床変化特性に大きな変化を及ぼしている可能性が考えられる。直接的作用の例として、礫床河道区間における河床掘削（砂利採取を含む）や横断構造物設置（特に固定構造物）、さらにはそれらの組み合わせ（服部ほか 2003）が考えられる。特に、日本の規模の大きな河川の場合、ある時期に活発に行われた砂利採取によって、河道縦断形が全体的に下がったことが、現在の河道形状にも少なからず変化を及ぼしていることが考えられる（これについても 3.3.4 で再度議論する）。

3.3.4 河川水系における直接的作用

(1) 河道外への土砂搬出（例-1）

3.2.3 で述べたように、図 3.2-11 に示した流砂系現況マップ（国土交通省 2002）から、水系ごとに、河道変化傾向（河床低下か河床上昇（堆積）か）、汀線の状況、河道外への土砂の搬出総量（昭和 20 年以降の記録のある砂利採取、土砂搬出のデータを集計）、流域内ダムの総堆砂量などを読み取ることができる。このマップは、図 3.3-6 に示すように河道・海岸に結果として生じている現象（前二者）と変化の要因になりうる現象（後二者）を両方含む。

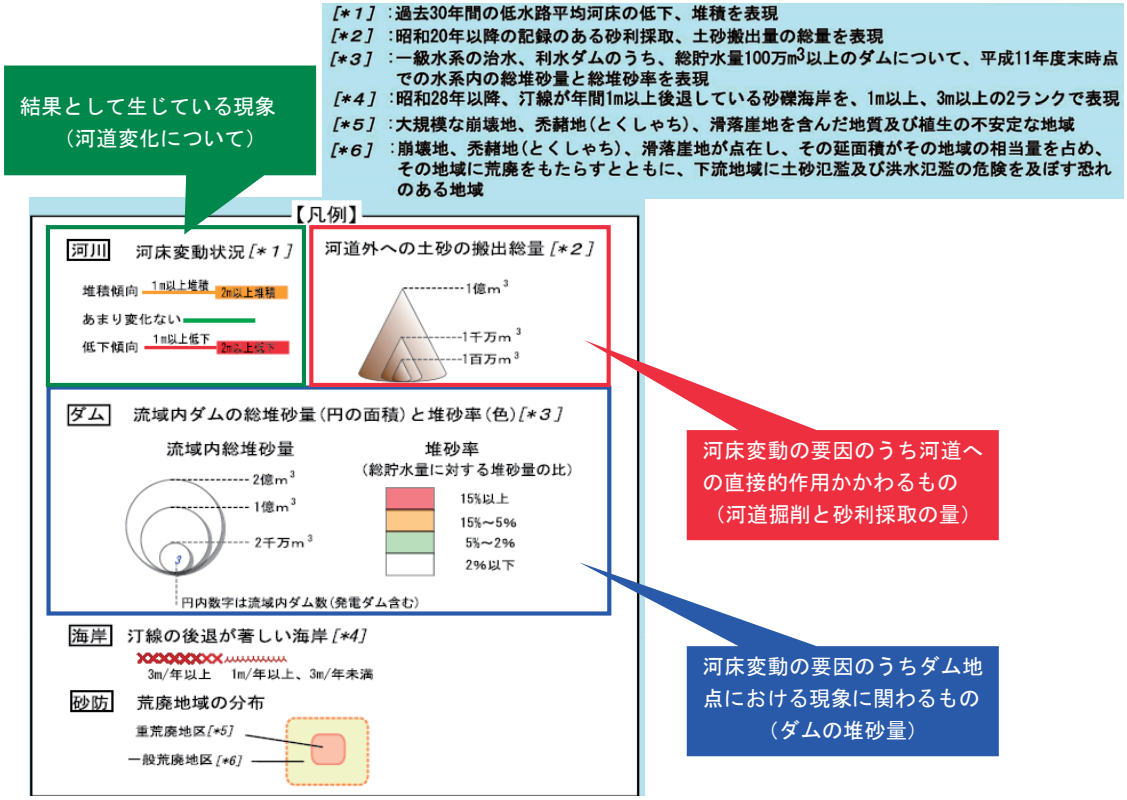


図 3.3-6 流砂系現況マップ（図 3.2-11 の凡例）

さて、図 3.2-11 から、従来言われてきたとおり、日本全体で河床低下傾向が卓越していることが明確に読み取れる。また、同図からダムに堆積した総土砂量を集計すると、およそ 11 億 8 千万 m^3 になる。これら 2 つのことから、ともすると、ダムによる土砂の扞止という要因の 1 つと河床低下という結果を単純に結びつける議論がなされることもあったが、それは不適切である。というのは、河床低下の原因を考えるに際して、少なくとも、河川における直接的作用の 1 つである「河道外への土砂搬出」を要因候補に加えなくてはならないからである。やはり図 3.2-11 から河道外への土砂搬出の総量を集計するとおよそ 11 億 3 千万 m^3 となる。言うまでもなく河道外への土砂搬出は河床低下にそのまま現れる。河川では、治水のための河道

掘削や砂利採取などにより河道外への土砂搬出が行われてきており、その総量は、この数字が示すように有意な河道変化を起こすに十分なものであった。

したがって、河床低下の要因分析を行うためには、少なくとも、ダムによる土砂扞止というダム地点で生じる現象と、河道掘削・砂利採取という河川における直接的作用の、それぞれの効き具合が考察されなければならない。図 3.3-7 は、河道外への土砂搬出総量を右端の棒グラフに、ダムの総堆砂量を左端の棒グラフに表したものである。3.2.3 (2) で説明したように、ダム貯水池に堆積する土砂はシルト・粘土～砂～礫と幅広い粒度を持つ。そこで、3.2.3 (2) で述べたこれらの割合に関する情報（礫は 5～15%、場合によってはそれ以下、砂は 30～40%程度であり、残りはシルト・粘土成分）から、ダムに堆積している土砂総量のうち礫分、砂分それぞれのオーダーを推定した。それらが、左から２、３番目（礫）、４、５番目（砂）の棒グラフである。以上の準備のもとに、図 3.3-7 から日本全体をマクロに見た場合の上記の「効き具合」の考察を行ってみる。

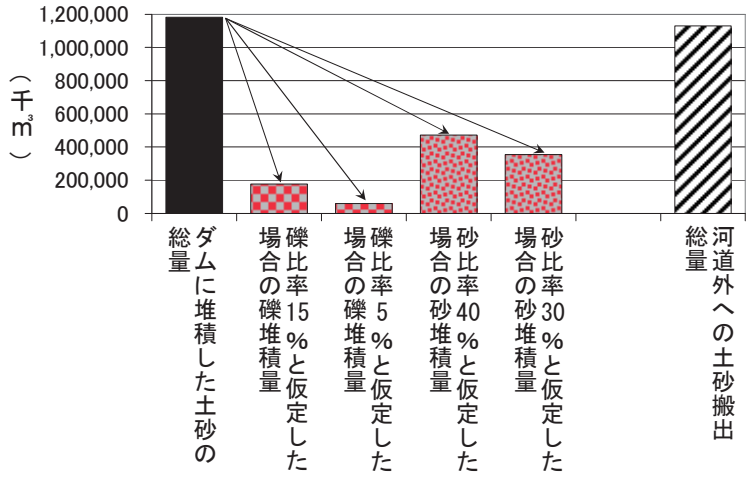


図 3.3-7　日本のダムに堆積した土砂総量と河道外への土砂搬出総量（昭和 20 年以降の記録を集計）との比較における粒径集団の考慮（流砂系現況マップを用いた集計から）

右端の棒グラフすなわち河道外に搬出されてきた土砂は、その相当量を占める砂利採取の目的から考えても、砂と礫が多くを占めると考えられる。この河道外へ搬出された土砂の半分程度が礫である仮定したとして、ダムにより扞止された礫の量は、搬出量に比べだいぶ小さいことになる（左から２番目、３番目の棒グラフ）。したがって、礫床区間の河床低下については、河道外への土砂搬出という直接的な作用が支配的と言えそうである。一方、ダムにより扞止された砂の量は、河道外へ搬出された土砂の半分程度が砂であると仮定したとして、搬出量と同オーダーの大きさを持つことになる（左から４番目、５番目の棒グラフ）。このことからは、砂については、河道外への搬出という直接的作用とダムによる砂の扞止の両方が有意に河

床低下に効いている可能性を指摘できる。なお、砂の供給減少が河床低下に実際どのような形で現れうるかについては3.3.3（1）2）に述べた通りである。

以上のように、土砂量を丸ごと比較するのでなく、着目する粒径集団（上記の場合は礫と砂それぞれ）について収支を検討していくこと、また、ダム地点で生じる現象と下流河川における直接的作用を仕分けすることが、河道変化要因の分析を大局的に誤り無く行う上で不可欠である。そうでないと、たとえばダム堆砂総量を河床低下量と単純に比較する、あるいは図 3.3-7 の左右両端の棒グラフをそのまま比較するなどの無意味な分析を行うことにつながる。以上のことから、下流河道の河床低下を把握するにあたっては、ダム堆砂量のみに着目するのではなく、河道外への土砂搬出量、ダム堆砂物の粒度構成、下流河川の河床材料の粒径集団などを総合的に勘案することが重要であることがわかる。個々の水系において問題の把握と対策の検討を行う際には、上記のマクロな分析だけでなく、より詳細な調査・分析が必要となるのは当然であるが、その際にも、下流河川における直接的作用とダム地点における現象との仕分けをきちんと行うという基本スタンスを持つことが大事である。

なお、河床高を下げ、洪水を流下させる断面を拡大することは、河道における治水対策においても最も有力な手段の１つであり、日本の多くの河川で、河床低下の結果として、治水安全度の有意な向上が見られている。したがって、河床低下については、それが制御された形で達成あるいは誘導される場合には、そのこと自体が河道改修の主目的の１つにもなる。河床低下そのものを議論する際には、このような治水上の効果も含め、総合的な観点を持つことが不可欠である。

古い時代の砂利採取については、記録よりも実際の砂利採取量が大きかった河川区間が少なくないとの指摘がある。そうだとすれば、図 3.3-7 の右端の棒グラフが幾分伸びることになり、今の河床形状に与えている河川への直接的作用（河川外への土砂搬出）の影響をより大きくとらえることになる。

(2) 河川水利用（例-2）

河川水は種々の目的に利用されており、河川の多くの地点で様々な形で取水が行われていることが一般的である。したがって、下流河川の流量の状況とダムとの関係を分析するために、そうした河川水利用（取水、排水）の状況も合わせて分析する必要がある。

図 3.3-8 に、P 川における平水時のある日の流量縦断図を示す。実績流量とは、ａダムと発電ダム群および農上工水の取排水施設群による取・排水がある場合の流量の観測値である。自然流量とは、ａダムの放流量を流入量と同じにし、さらに発電ダムによる取・排水と農上工による取・排水がない場合の流量を算定したものである。いずれも日流量に基づく。実績流量と自然流量の算出法については、国総研資料 445 号に記されているので、必要に応じ参照されたい。図によれば、ａダムから下流しばらくは、発電のためのバイパスによって実績流量が自然流量に比べ大幅に

減少する区間が断続的に現れ、その下流では発電用水の利用が終わり、実績流量が自然流量にだいぶ近づく区間が現れる。さらに下流に行くと、農業用水や工業・上水道のための取水により、再び実績流量と自然流量との隙間が大きくなる。特に灌漑期においては、こうした取水による流量減はより明瞭である。発電取水を目的に含むダム・堰堤では、河川流水を取水し、そのほぼ全量を下流の発電所地点において河川に放流する（戻す）。このため、発電取水のバイパス区間だけ河川流量が小さくなることが起こる。農業用水や工業・上水道の取水ダム・堰堤では、河川水の一部を取水するが、この水は人間の生活に供されているため、河川に全て戻されることはない。

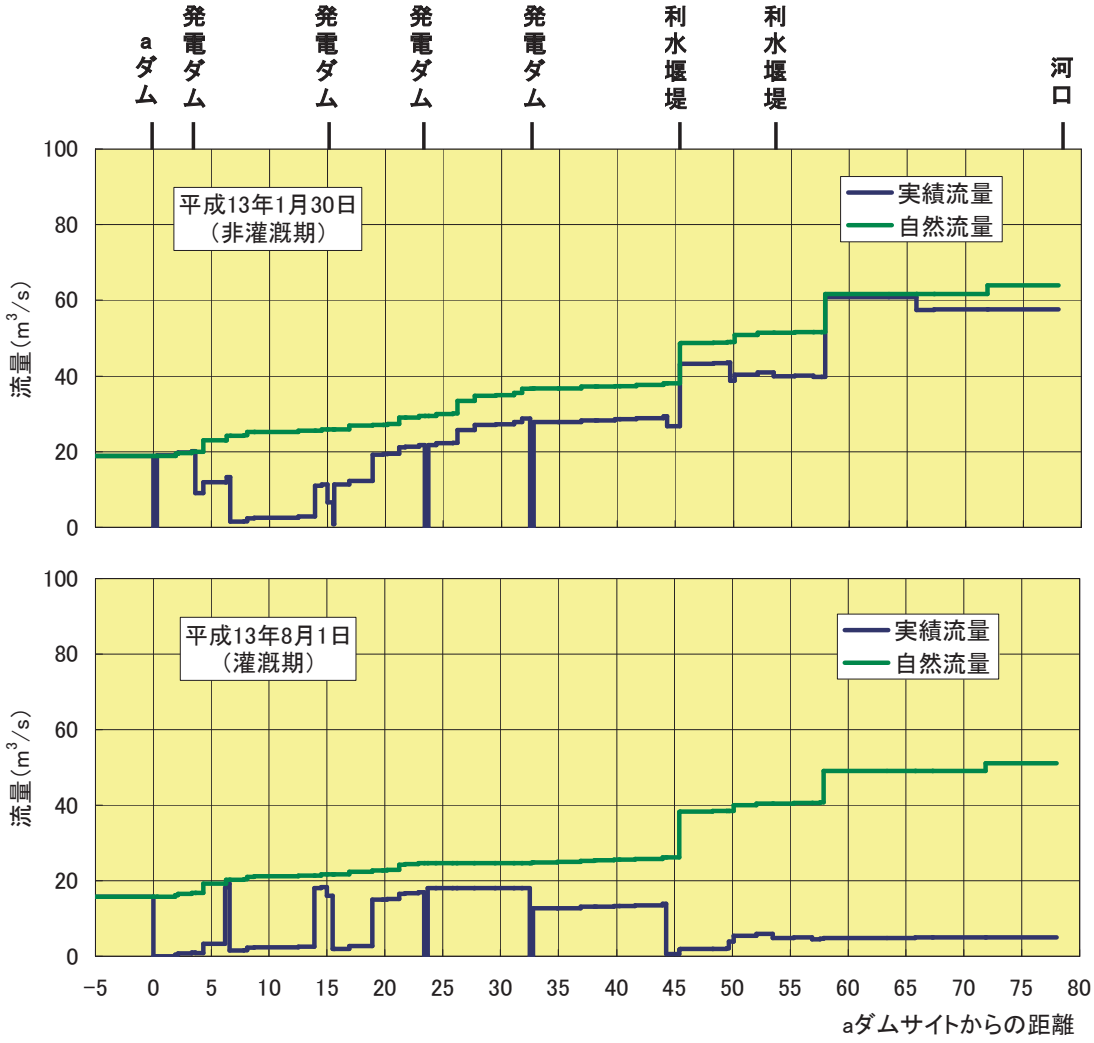


図 3.3-8　P 川における平水時の流量の河川縦断変化
（実績流量と自然流量の見積もり結果）

以上に示した事例からも明らかなように、河川からの取水は河川流量に有意な影響を及ぼす直接的作用であるから、河川流量とダムとの関係の分析においては、河

川水利用の影響をあわせて分析することが不可欠である。ダムにより渇水時の補給が可能になることが新たな水利権付与になるという関係が、ダム貯水池と河川水利用との間に一部存在するとは言え、それはあくまで水資源開発および水利権の制度上の関係であり、上流にダム貯水池があるからと言って河川流量の状況をもっぱらダム貯水池による流量制御と関係付けて分析しようとすることは、実現象を科学的に把握するという主旨からは筋違いである。

〈参考〉規模の大きい支川の流入が河川の物理環境に与えうる影響の見方

ダム直下流に規模の大きい支川が流入する河川では、一般に支川から出水時に流下する土砂により、合流点下流の河道に分布する材料はこれより上流と異なったものとなる場合がある。

本支川の土砂供給の関係については、合流点付近の河床の状態を分析することで、支川影響の強さをある程度推定できる。以下に考えられる視点を示す。なお、この分析だけでは支川の土砂供給特性を定量評価できないため、他調査・分析との組み合わせで使用する必要がある。

・分析の観点(1)　形成される砂州の形状

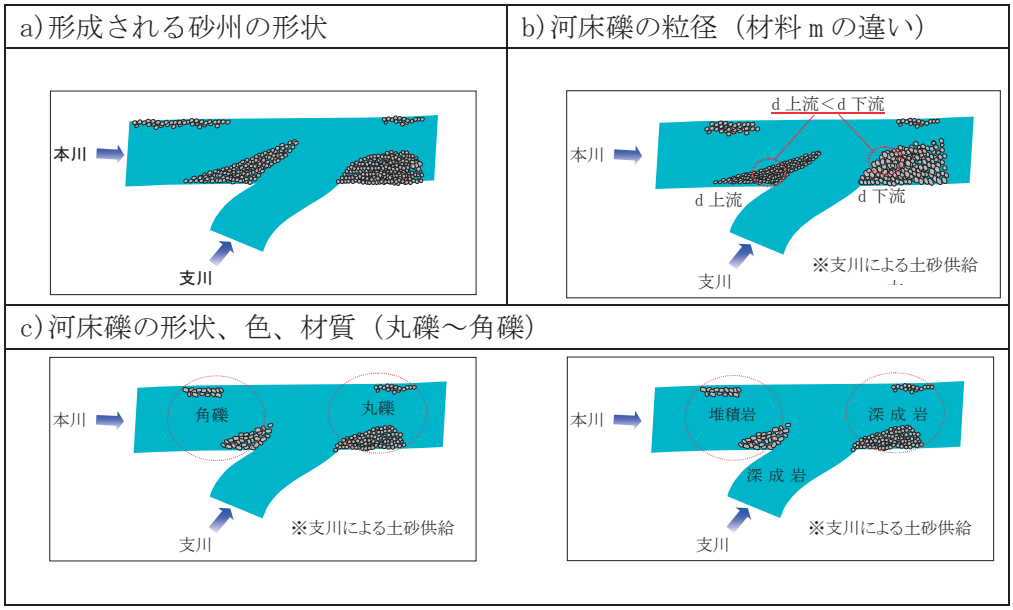
支川の流域面積が本川の支川合流点上流の流域面積に比べ大きい場合や、支川の河床勾配が本川の支川合流点上流の河床勾配に比べ急峻である場合、支川の河床に堆積物が厚く堆積している場合等では、支川からの発生土砂量が本川に比べ多い可能性がある。この場合、砂州の形状は支川合流点の上下流に広く形成される場合がある（参考図-1 a)参照)。

・分析の観点(2)　河床礫の粒径（材料 m の違い）

本川の支川合流点下流の主な河床材料（材料 m）が、本川上流の材料 m と異なっており、かつ合流する支川の材料 m と比較的類似する場合では、支川からの流入土砂が下流の材料 m の形成に支配的に働いていると考えられる。この場合、合流点上下流に形成される砂州の材料 m を見ることで､その傾向を把握できる場合がある(参考図-1 b)参照)。

・分析の観点(3)　河床礫の形状、色、材質（丸礫～角礫）

支川流域の地質性状が本川の支川合流点上流の地質性状と異なっている場合や、支川の地質の風化状況が本川の支川合流点上流の地質の風化状況より進んでいる場合等では、材料の形状（角礫・丸礫等）や質（岩質・色等）が本川の支川合流点上下流で異なる場合がある。この場合、本川の支川合流点より下流側に分布する材料との類似性から、本支川の土砂供給の関係を把握できる場合がある（参考図-1 c)参照)。

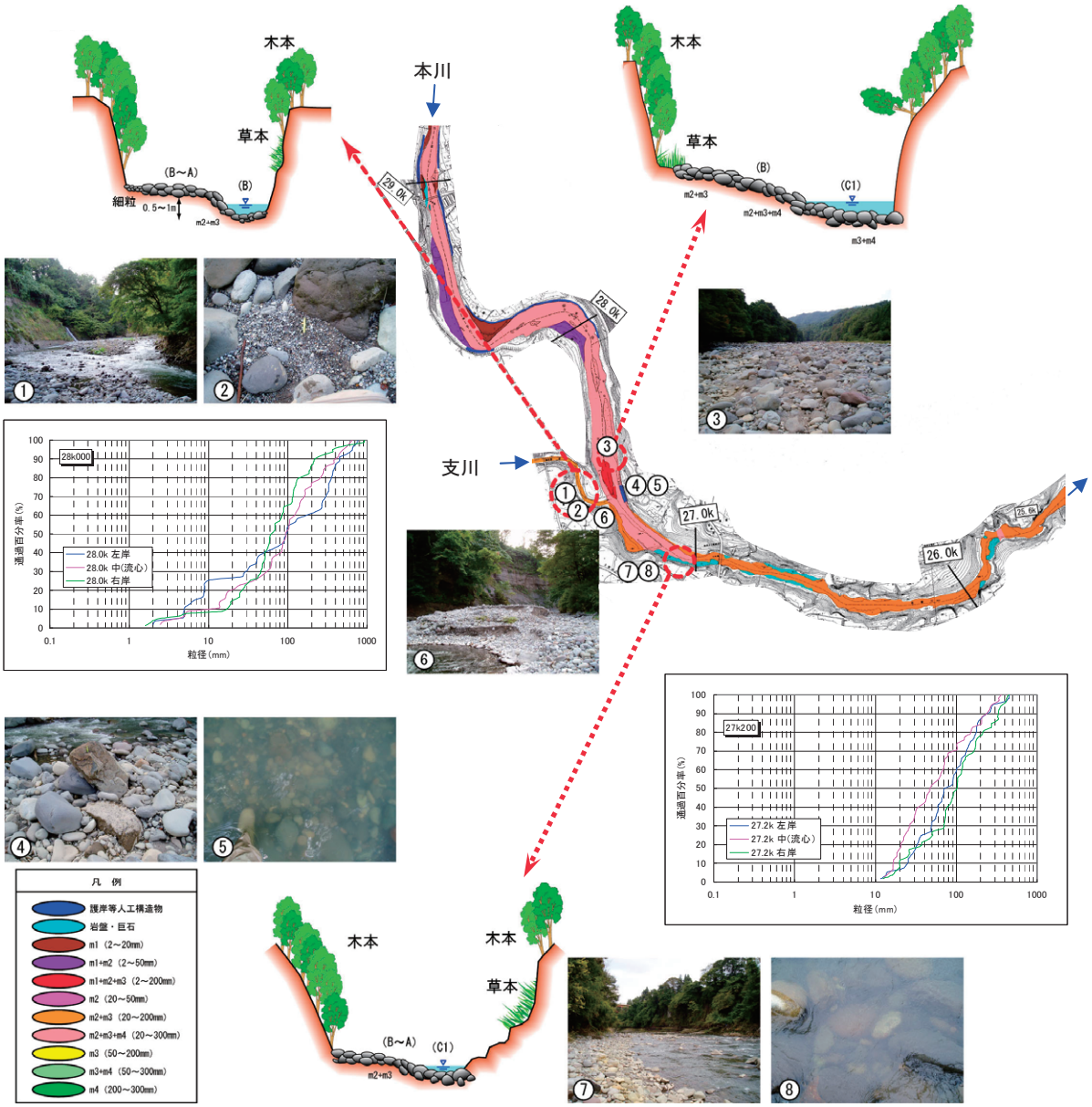


参考図-1　支川合流点における砂州の形成例

以上を踏まえ、支川合流の影響を分析するにあたっては、合流点付近の本川と支川の河床の状況や粒径分布が詳細に把握できるよう工夫する。整理例を参考図-2 に示す。

支川：河床勾配　1/100
河道幅　　20m
平均年最大流量　　80m³/ｓ
河床材料　　みお筋部 m2+m3（載り石）
砂州部　m1+m2（はまり石）

本川（支川合流地点上流）
河床勾配　1/200
河道幅　　100m
平均年最大流量　　350m³/ｓ
河床材料　　みお筋部 m3+m4（浮き石）
砂州部　m2+m3（+m4）（はまり石）



本川（支川合流地点下流）
河床勾配　1/150
河道幅　　120m
平均年最大流量　　430m³/ｓ
河床材料　　みお筋部 m2+m3（載り石）
砂州部　m2+m3（はまり石）

参考図-2　支川影響を分析するための本支川合流点付近の河道状況表示例

4. ダム下流河川における付着藻類・底生動物の捉え方

4.1 ダム下流における影響範囲の捉え方

4.1.1 空間的な影響の広がりを考える

ダム下流におけるダムの存在に伴う影響は空間的に広がりを持つことが知られている。例えば、既往研究を見るとダム下流の影響について以下の記述が見られる。

・貯留域から流出するプランクトンは下流方向に急速に減少することが知られている（Richardson ・ Mackay 1991）。

・ダム下流の影響はダムのない川（支川）と河畔からの物質の供給により下流方向への影響が縮小する。ある地点におけるダムの影響はその地点の集水面積に対するダムの集水面積の割合によって指標化できる（Petts et al. 1993）。

このように、ダム下流における影響は縦断方向に変化し、特に、支川の合流のように集水面積が急激に変化する地点の前後では、影響が合流点を境界として大きく変化する可能性がある。従って、ダム下流の影響を適切に予測・評価するためには、1 地点のみの検討では不十分であり、空間的広がりを意識しながら“影響を受けている範囲”を考えることが重要である。

ここで“影響を受けている範囲”を明確に定義したい。ダムが存在しない場合に想定される環境要因の下流方向への変化に対して、ダムが存在する場合の変化に差異があり、その結果として水生生物への影響が検出できる範囲と考えることができる（図 4.1-1）。ダムの有無による環境要因の差異があっても水生生物への影響が明確に検出されない場合には、“影響を受けている範囲”とは積極的に認められなくなる。

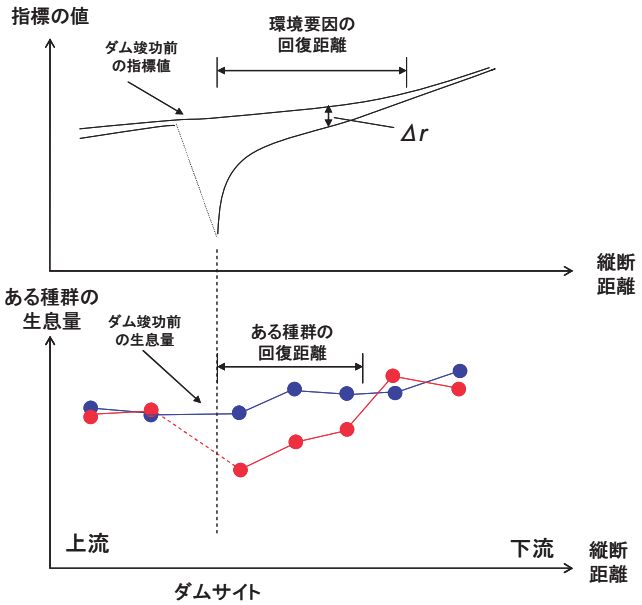


図 4.1-1 ダム下流における環境要因と水生生物の変化の概念図

なお、“影響を受けている範囲”は 3.1 と図 3.1-1、3.3 に示した内容も踏まえ、以下に示す項目によって基本的に決まってくると考えられる。

■環境要因の影響の大きさ

ダムの存在によって、ある環境要因の改変の程度が大きい場合は、小さい場合と比較してその範囲は大きくなると考えられる。例えば、放流水の水温が著しく低下している場合と比べて水温の低下が小さい場合には、下流方向への水温の回復距離も小さくなる。

■環境要因の回復特性

環境要因は、①流量、②土砂、③流水中に含まれる無機物・有機物（濁質、栄養塩類、POM・DOM、プランクトン等）、④水温、のいずれかに依拠する。支川の合流や大気・河床との交換により水・土砂、物質（栄養塩類・有機物）が添加・希釈される、物質が物理・化学的・生物学的に除去されることにより環境要因は下流方向に減衰して行く。

4.1.2 時間的な影響の伝搬を考える

もう一つ注意が必要なのは、ある環境要因の影響が下流に伝搬する速さである（図4.1-2）。ダム竣工後直ちに下流に影響が伝搬する要因がある一方で、長い時間をかけて下流に伝搬する要因もある。例えば既往の研究を見ると以下の記述が見られ、下流への伝搬特性を意識した議論が行われている。

- ダムの幾つかの効果と対応する生物相の変化は急速そして明らかだが、それら以外の効果は徐々にそして僅かである（Petts 1980）。
- 研究報告されている変化の多くは遷移段階にあり、生態系のレベルにおいて調整が行われるまでには非常に長い期間を要する。更に、幾つかのハビタットの調整、特に、河道地形の変化に関連するものは 10 年から 100 年の期間を超える可能性がある（Petts 1987）。
- ダム下流における影響は、first-order impacts（短時間でダム下流に生じる）と second-order impacts（流量・土砂供給の変化に伴う河道や氾濫原の地形変化の経過に伴い生じる）に分類できる（Brookes・Petts 1994）。

3.3.3(1)で述べた、材料 m が礫からなる河道区間における砂集団（通過型の流送形態；一部が材料 s、t になりうる）のように、粒径が小さく出水時の移動速度が大きい物質、また、平水時においても水を媒介として影響が伝達される物質がその影響に関わる場合には下流方向への伝達速度が速い。一方、3.3.3(2)で述べたように、礫からなる材料 m 自体の下流への移動は遅く、この結果として生じる瀬・淵構造の変化とその結果生じる水生生物の応答は時間がかかる。これらの現象は Brookes・Petts（1994）の“first-order impacts”と“second-order impacts”に対応するものと考えることができる。

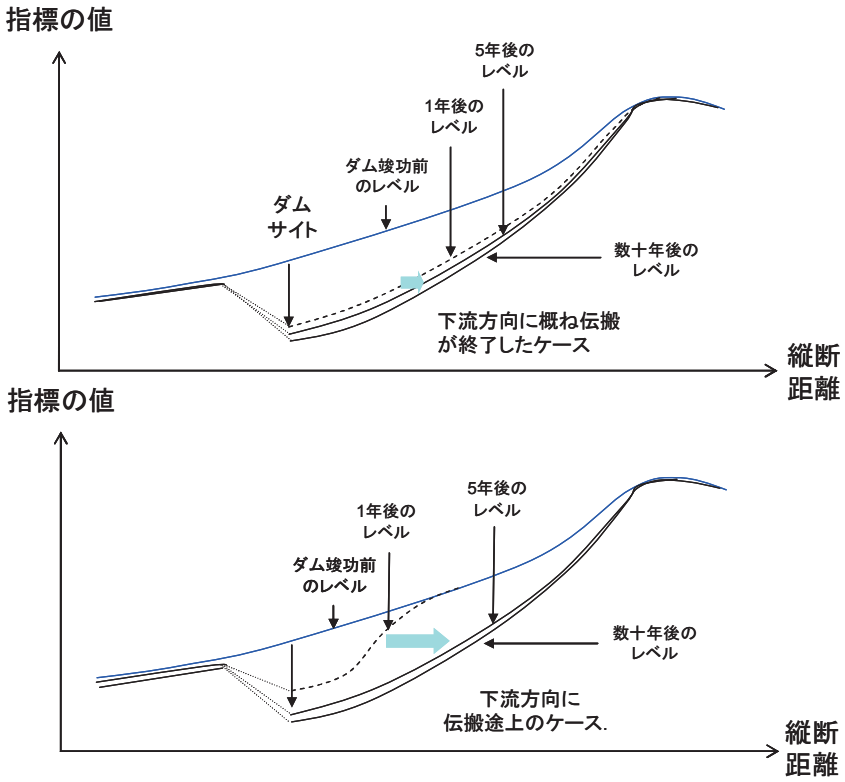


図 4.1-2　ダム下流における環境要因の下流方向への伝搬特性の例

伝搬が早いケース（上）、伝搬が遅いケース（下）を示す。
“ある地点”でのダムの影響は
“ダム竣工からの経過年数”×“要因の伝搬特性”→“水生生物への応答”
といった概念で捉える必要がある。

【トピックス】河川連続体仮説

ダムの下流域への影響を理解するためには、ダムがなく河川が上下流間断なく繋がっている理想的な状況を知る事は重要である。

Vannote et al.（1980）が提唱した「河川連続体仮説」は、川が上流から下流まで連続している場合に、底生動物の生息の変化を供給される餌との関連から明快に示した概念として現在でも多くの論文に引用されている。以下に流程を上流、中流、下流に分けて、河川連続体仮説の特徴を簡単に記す（図-1）。

【上流域】

上流は川幅が狭く、外部から流入する餌（他生的な餌資源）が生態系を支える餌起源であり、底生動物群集も落葉を餌とするシュレッダー（破砕食者）が多い。落葉等の大きな有機物（CPOM：Coarse Particulate Organic Matter、粗粒状有機物と言われる）は様々なプロセスを経て小さくなりながら、小さな有機物（FPOM：Fine Particulate Organic Matter、細粒状有機物と言われる）となり流下していく。

【中流域】

この流程になると川幅が大きくなり日射が河床まで届くようになるから付着藻類の生産が活発となり餌資源として重要な位置を占める。底生動物群集は藻を剥いで食べるグレーザー（剥取食者）が多くなる。利用されない付着藻類は河床から剥離し、CPOMもしくはFPOMとなって流下する。

【下流域】

下流域では水深が大きくなり、日射が河床まで届きにくくなるため河床に付着する藻の生産は抑制され、代わってプランクトンの生産が起こる。また、上流から流下して来る POM が餌資源として重要な位置を占める。下流域の底生動物はこれらプランクトン、POM の堆積物を集めて食べるコレクター（集積食者）が多くなる。ただし、日本の河川は流程が短く河川性のプランクトンの生産は起こりにくい。

このように、水生生物は流速、水深、底質等の物理環境だけでなく、そこに供給される餌の種類そして量に支配されながら生息している。従って、ダムによる下流域での水生生物の応答を考える際には、ダムが存在する場合・しない場合の餌供給の変化も考慮することが必要となる。

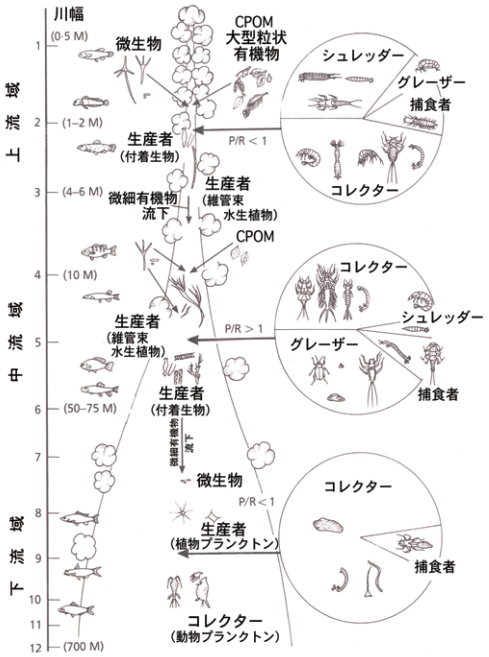


図-1　河川連続体仮説

（Vannote et al. 1980 より抜粋・改変）

注）底生動物の摂食機能群（シュレッダー等の分類群）についてはトピックスを参照

【トピックス】中規模撹乱仮説

生物多様性の維持機構として、撹乱の果たす役割は重要である。様々な生態系において、全く撹乱がない状態や、撹乱頻度が高い状態と比べ、ある程度（中程度）の撹乱状件下において種多様性が最も高まることが報告されている。Connell（1978）によって提唱されたこの考え方を「中規模撹乱仮説（Intermediate disturbance hypothesis）」と呼ぶ（図-1）。

現実的に、河川生態系における中規模撹乱仮説には、群集の遷移だけで説明するメカニズム（Connell 1978）と、生息場所の多様性変化を介するメカニズム（Resh et al. 1988；Takemon 1997）の両方が考えられる。前者は、平衡状態（遷移後期段階）の群集に対し、ある程度の撹乱が与えられると、群集遷移が前段階に引き戻されて種間競争や捕食効果がゆるみ、競争に弱い分類群でも生息できるようになって生物多様性が増すというメカニズムである。この場合、もちろん撹乱規模・頻度が大・多すぎれば、絶滅（流失）する分類群が多くなるため、与えられる撹乱は、大きすぎず小さすぎない程度であることが重要である。また後者は、中程度の撹乱（礫や砂泥が移動する程度の撹乱）が、底生動物にとって重要な瀬ー淵構造を形成維持すると考えられることから、競争などの生物間相互作用を想定せずとも、中程度の撹乱条件化において生物多様性が高まるとするメカニズムである。

中規模撹乱仮説を実証する研究の例として、Townsend et al.（1997）は、ニュージーランドのある河川流程 54 地点において、河床が動く頻度および動いた河床材料の割合を、それぞれ撹乱頻度・撹乱強度（横軸）とし、生息する昆虫種類数（縦軸）との関係を調べた（図-2）。彼らの結果は、中規模撹乱仮説によく合致することが分かる。

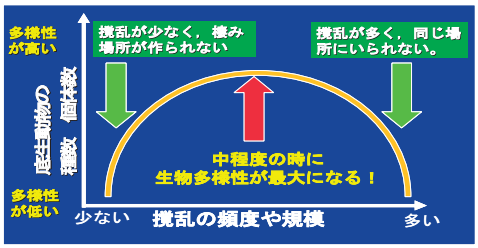


図-1 中規模撹乱仮説の考え方

ダムは、河川環境の撹乱頻度を変化させる場合がある。例えば、発電目的のダムでは、頻繁なハイドロピーキングにより撹乱を増加させ、逆に治水目的のダムでは、本来のフローレジームを平滑化させることで撹乱を減少させる場合がある（3. 2. 1 参照）。このようなダム下流に生息する生物群集の多様性は、中規模撹乱仮説では減少すると予想され、ダム下流での生物多様性減少は実際に多くのダムで報告されている（Poff・Hart 2002）。近年、いくつかのダムで行われているフラッシュ放流などの弾力的運用は、中規模撹乱仮説にのっとり自然状態の撹乱をもたらす、ダム下流への影響軽減策といえるだろう。

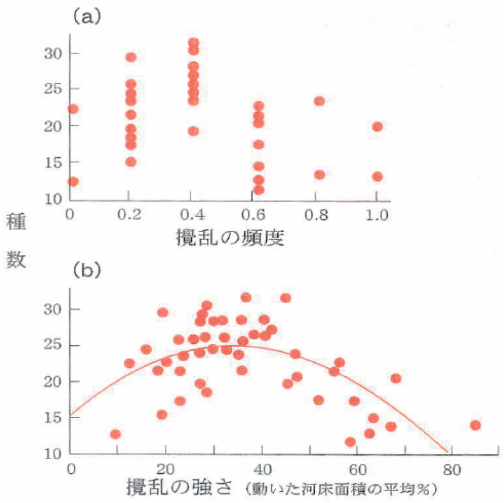


図-2 中規模撹乱仮説の実証例
（Townsend et al. 1997 より抜粋・改変）

【トピックス】水生生物の餌の種類を覚えよう

河道内に供給される餌には大きく外部から供給されるもの、河道内から供給されるものに分けられる。前者は渓畔林・山地斜面から供給される落葉・落枝、落下昆虫、後者には河床の付着藻類や抽水植物、プランクトンが挙げられる。これらの餌は流程によって供給形態が異なり、各流程を特徴付けていることはトピックス「河川連続体仮説」で説明した通りである。

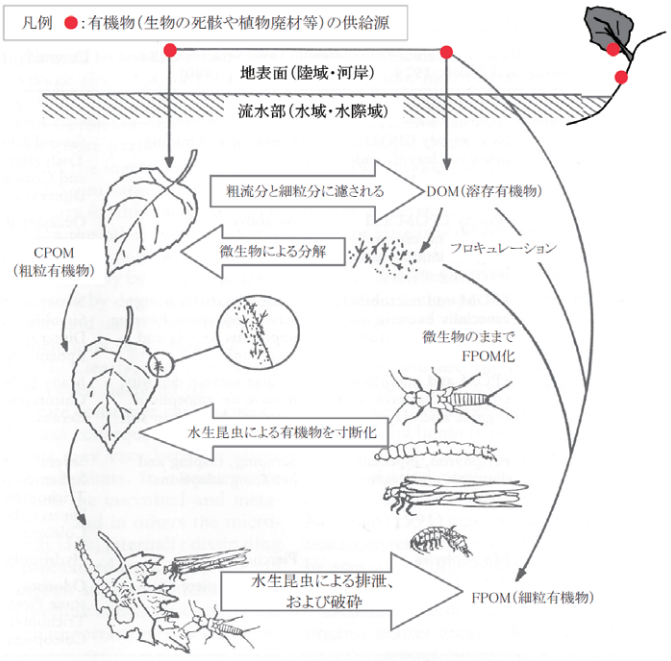


図-1　渓畔林からの落葉を起点とする食物網の例

渓畔林から流入する落葉（粗粒状有機物、CPOM：Coarse Particulate Organic Matter）は外部から流入の代表例であり（他生的エネルギー）、上流域の生態系のエネルギー基盤となっている。落葉は水中に入ると破砕食者（Shredders）によって噛み砕かれて、また、糞となり再度水域へ放出されて、より細粒な有機物（FPOM：Fine Particulate Organic Matter）と変えられるだけでなく、水中に有機物が溶出し溶存態の有機物（DOM）となった後微生物の働きにより細粒有機物（FPOM）となって、再度餌として利用されることとなる。

貯水池で生産される植物・動物プランクトンも餌として重要な資源となる。特に、動物プランクトンは高い栄養価を持つことが知られており（Richardson 1984；Mackay ・Waters 1986）、流下有機物を摂食する濾過食者にとって流下する動物プランクトンの増加は好適な環境を作り出すと考えられている。実際、既存研究でもダムだけでなく湖下流では濾過食者が増大することが指摘されているし、土木研究所が矢作川第２ダム下流で調査した結果からも、ｺｶﾞﾀｼﾏﾄﾋﾞｹﾗ属、ﾋｹﾞﾅｶﾞｶﾜﾄﾋﾞｹﾗ、ｳﾙﾏｰｼﾏﾄﾋﾞｹﾗといった濾過食者の現存量がダム下流で大きな割合を占めていることが明らかになっている(Takao et al. 2008)。

4.2 ダム下流における人為的インパクトと水生生物の応答

ダム下流の生態系の変化は本資料で扱う流況と土砂だけでなく、それ以外の幾つかの要因が複合的に関連して応答する。流況・土砂が付着藻類と底生動物に及ぼす影響については 4.3 以降に詳述するので、ここでは、ダム下流の環境要因の変化と生態系の応答を、より広い観点から概括する。

ダム下流の生態系の変化を考える場合に、ダムが直接的に影響を及ぼしうる環境要因としては、1.1、1.2 で述べたように、流況、土砂供給（結果として生じる土砂動態）、濁度、水質、水温、餌資源が挙げられる。これらの要因が水生生物に及ぼす影響を考える際には、水生生物への直接的経路、地形や底質といった生物の生息場所を介した間接的経路、そして、生物相互間の関係に伴う経路を念頭に置き、インパクト（I）－レスポンス（R）を把握することが必要となる。図 4.2-1 に、各環境要因が付着藻類、底生動物、魚類に影響を及ぼす経路を整理した。全ての経路について両者の関連性が報告されている訳ではないが、ここではダム下流のインパクトを系統的に把握・予測することを目的として、想定し得る経路を全て記載した。ダムが直接的に影響を及ぼしうる各環境要因が水生生物に直接影響する経路だけでなく、流況・土砂の改変が地形・底質の変化を介して水生生物に影響を及ぼす間接的経路が示されている。ただし、間接的経路については今のところ研究事例が極めて少なく、その詳細は明らかになっていない。ダム下流における付着藻類－底生動物－魚類間の生物相互作用を介した経路についても研究例は少なく、その実態は判然としない。しかし、ダム下流ではないが、自然河川における付着藻類の成長・質が底生動物や魚類に影響を及ぼす効果（ボトムアップ効果）、魚類が底生動物や付着藻類に影響を及ぼす効果（トップダウン効果）についての研究すなわち、図中のⒷとなっている経路については研究例が多く参考になる。従って、生物相互作用を介するダム下流の影響を検討する際には、これらの研究例を活用することが必要となるだろう。以下に環境要因と水生生物との関連する研究例を紹介する。

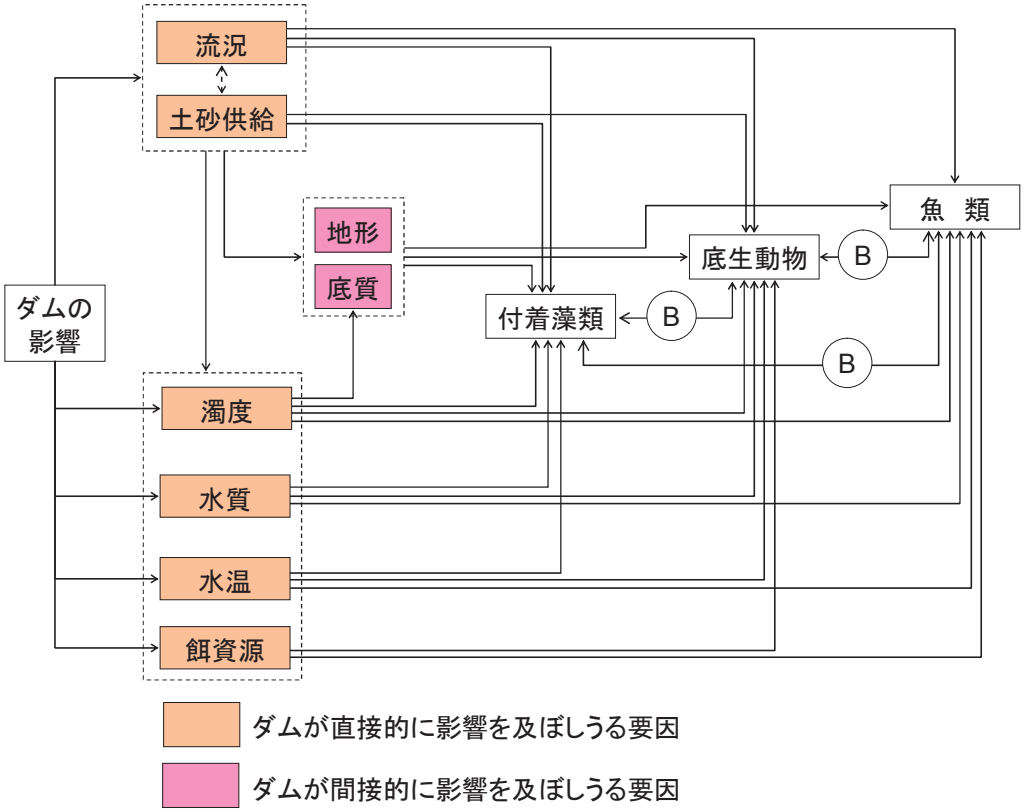


図 4.2-1　ダム下流における環境要因の変化と水生生物の応答経路の例
Ⓑは生物相互作用の経路を示す。

流況　→　水生生物　（直接的経路）

流況が水生生物に及ぼす影響についての研究例は多い。流況が与える影響としては、①出水時流量の規模・頻度の減少、②平水時流量の増減、③短期的な流量変動の増加、④季節的な流量パターンの変化、が流況改変のカテゴリーとして挙げられ、特に、②と③については底生動物の応答を中心に数多く研究が行われている。これについては「4.3　流況及び土砂供給量の変化と付着藻類・底生動物の応答」に詳細を記述した。

土砂　→　水生生物　（地形・底質の変化を介した間接的経路）

ダム下流におけるアーマー化（河床の粗粒化）、河床低下に伴う瀬・淵構造の劣化は一般的に認識されているが、これらの実態を捉え報告した論文は意外と少ない(Petts et al. 1993)。このことは、1.2でもレビューした。また、このような地形・底質変化に対する水生生物の応答についての報告も限られている。底質の変化と生物の応答については「4.3　流況及び土砂供給量の変化と付着藻類・底生動物の応答」に詳細を記述したので、そちらを参照してほしい。

水質　→　水生生物　（直接的経路）

水質が水生生物に及ぼす影響は溶存酸素濃度の低下に関する研究が散見される。例えば、米国の Tennessee River では、Tennessee Valley Authority（TVA）が 1991 年からダム下流の環境改善プログラムを実施し、放流水の溶存酸素濃度の改善を図った。この結果底生動物群集の EPT 指数が増加したことが報告されている（Bednarek・Hart 2005)。一方、豪州の Canning Dam 下流 Canning River では、下流域の流量減少に伴い有機物が河床に堆積して微生物の呼吸量が増加し、溶存酸素濃度が減少して底生動物群集が下流や止水域に見られる種群に変化したことが報告されている(Storey et al. 1991)。

水温　→　水生生物　（直接的経路）

水温が水生生物に及ぼす影響については研究例が多く、水温パターンの変化が底生動物の生活史に影響を与える可能性が指摘されている。例えば、水温の低下によって、底生動物の孵化・羽化のタイミングが遅れることが幾つかの研究で示されている（Cereghino et al. 1997 ; Pardo et al. 1998)。 特に、多化性の種と比べて生活史の長い一化性（一年に一度しか羽化しない）の生物に強く影響を与えることが示されている(Brittain・Saltveit 1989)。水温上昇の影響については、冷水性の魚類に及ぼす影響が懸念される。米国ミシガン州の 10 の小河川において表層取水に伴う夏季水温の上昇が魚類に及ぼす影響を調べた結果によると(Lessard・Hayes 2003)、下流域の平均水温は５℃以上上昇し、冷水魚、特に、Brown trout(*Salmo trutta*)、Brook trout(*Salvelinus fontinalis*)、Silmy sculpin(*Cottus cognatus*)の生息密度が低下したことが示されている。

餌資源　→　水生生物　（直接的経路）

餌資源には上流から流下する有機物と河床に繁茂する付着藻類の２つに区分できる。上流から流下する有機物のうち、プランクトン、特に動物プランクトンは、底生動物にとっての餌資源として栄養価が高いことが知られている（Richardson 1984）。そのため、湖のような自然水域の流出口下流域において、濾過食者が増加し底生動物相が変化する現象はよく知られてきたが（Richardson・Mackay 1991）、近年、ダム湖の下流でも同様の現象が起こっていることが報告されてきている。近年、ダム放流水中の上流から流下する有機物のうちダム湖内で生産されたプランクトンが下流域の底生動物相を変化させることは数多く報告されている。例えば、Takao ら（Takao et al. 2008）は矢作第 2 ダム下流の環境要因と底生動物群集を調査し、ダム下流において大きな現存量を示すｺｶﾞﾀｼﾏﾄﾋﾞｹﾗ属、ﾋｹﾞﾅｶﾞｶﾜﾄﾋﾞｹﾗおよびｳﾙﾏｰｼﾏﾄﾋﾞｹﾗといった濾過食者と流下動物プランクトン量には強い対応関係があることを示している。ダム下流域で濾過食者が増加することは、波多野ほか（2005）の近畿圏のダム群、Katano et al.（2009）の阿木川ダムの調査結果にも見られる。プランクトン以外の流下有機物については、その量が増減するといった報告よりも、流量減少により流下有機物が河床に堆積し、結果として底生動物相が変化する事例は幾つか報告されている。

一方、河道内で生産される餌資源（付着藻類）の変化が水生生物に及ぼす影響に関する研究例は多くない。以下に示す（生物相互作用を参照）Colorado River における Pikeminnow に関する研究が代表例だろう。

生物相互関係

生物相互関係にまで着目した研究例は少ないが、土砂供給量の減少が砂・小礫（小礫の内 2～4mm）を巣材とするﾔﾏﾄﾋﾞｹﾗ等の携巣性ﾄﾋﾞｹﾗ（藻類食者、後述）生息密度を低下させ、結果として付着藻類の現存量が増加する事例は比較的多く観察されている。また、Osmundson et al.（2002）は、Colorado River（コロラド川）においてダムが魚食性の絶滅危惧種 Pikeminnow（*Ptychocheilus lucius*）に及ぼす影響を調査し、ダムによる融雪出水の減少が細粒土砂のフラッシュ効果を抑制し、付着藻類と底生動物の減少、そして、その結果として Pikeminnow の餌となる魚類の生息量が低下し、Pikeminnow そのものの生息を脅かしていることを示している。

4.3 流況および土砂供給量の変化と付着藻類・底生動物の応答

4.3.1 流況・土砂供給量の捉え方

流況・土砂の変化と付着藻類・底生動物の応答を考えるために、図 4.2-1 の一部を抜き取り、応答に関連するキーワードを記入した（図 4.3-1）。流況・土砂から始まり付着藻類・底生動物に向かう→は応答経路を示す。底質の変化を介した底生動物への影響は流況と土砂が相互に関連し、これを容易に分離できないため流況・土砂を一つの要因として扱っている。また、本節で直接対象としていない魚類、有機物・細粒土砂も、流況・土砂供給の改変に伴うこれらの変化を介した付着藻類・底生動物への影響が無視できないため取り扱うこととした。

なお、流況改変については、①出水時流量の規模・頻度の減少、②平水時流量の増減、③短期的な流量変動の増加、④季節的な流量パターンの変化、が流況改変のカテゴリーとして挙げられるが、④の季節的な流量変化パターンの変化に関連する研究が比較的少ないため①～③を対象として付着藻類・底生動物の応答を捉えることとした。

次節からは付着藻類、底生動物のそれぞれについて、各経路に沿った応答のメカニズムを説明する。

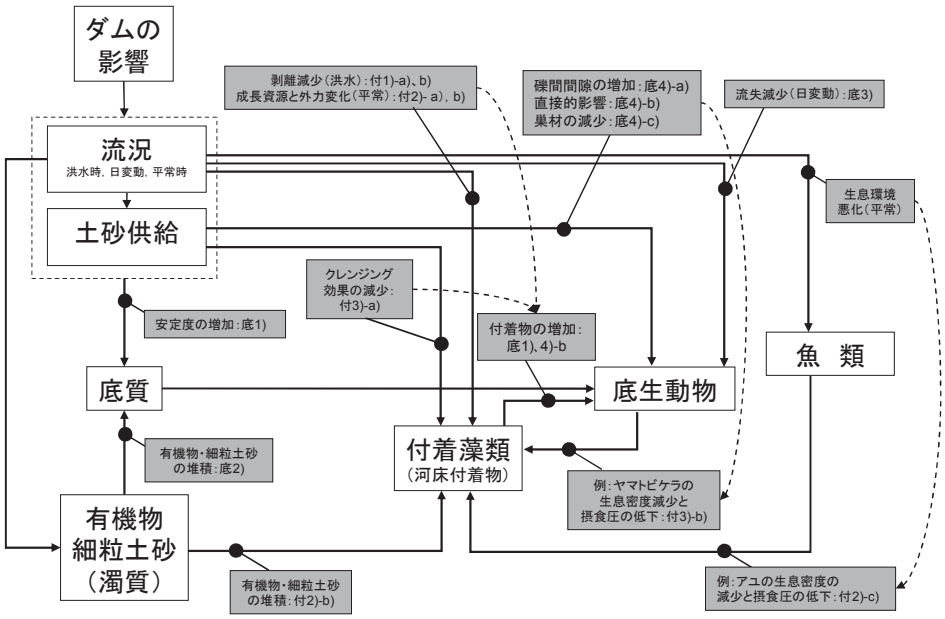


図 4.3-1　ダム下流における流況と土砂供給の変化と付着藻類・底生動物の応答経路及び具体的な応答例

図中の実線→は応答経路を示し、点線→は影響が伝搬していることを示す。「グレー枠の中身」は各要因～生物間において起こり得る現象を示し、各現象の詳細は「4.3.2」、「4.3.3」における「応答メカニズムの例」に記載してある。「グレー枠」内の、例えば、「付 1)-a)」は付着藻類の 1)a)を参照すべきことを示す。魚類は直接の対象ではないが、間接的な効果が大きいため扱った。

4.3.2 付着藻類の応答メカニズム

(1) 付着藻類の基本的事項

河床の石に付着している膜は光合成を行う付着藻類の他にバクテリア、付着藻類の死骸、流下してきた有機物・粘土やシルトといった無機物が堆積して形成されている。

後述するように付着藻類の現存量や性状は景観・レクリエーション、生物の餌資源としての価値を左右するため、これを管理するためには、付着藻類の発達プロセス・メカニズムを知ることは重要である。

図 4.3-2 は付着藻類の発達に影響する要因の概念図（Biggs 1996）を加筆・修正したものである。付着藻類の発達は大きく以下の項目に支配される。

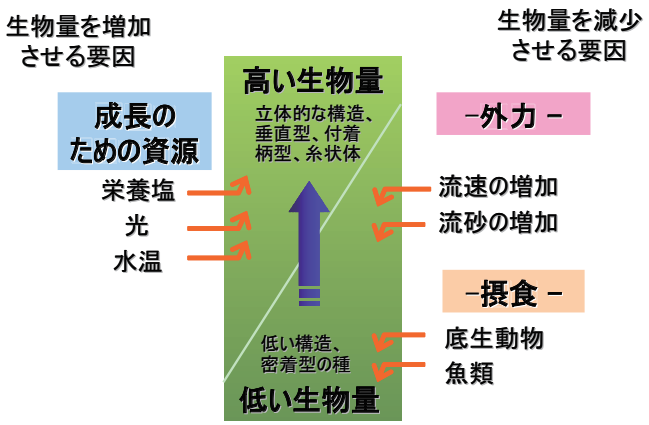


図 4.3-2 河川の付着藻類の発達を制御する要因
（Biggs 1996 の原図 を加筆・修正）

①成長のための資源：栄養塩、光、水温

②外力：流速の大小とその時間変動、流砂量の多寡等

③摂食：付着藻類を食べる底生動物や魚類の生息密度

(2) 河床付着物の発達過程

河床材料 m が移動するような規模の大きい出水が起こると、基盤上（付着藻類が繁茂する個々の河床材料）に見られる付着藻類は著しく減少する。しかし、時間の経過と共に付着藻類の光合成により河床付着物（付着藻類とそこに堆積する流下有機物・無機物を含め河床付着物と定義する。付着藻類は河床付着物を構成する一要素だが、河床環境の評価は河床付着物を対象として行われることが多い）は厚くなり、植物が草原から森林へ遷移するように、基質に平面的に密着し付着するタイプや一部で付着するタイプの藻類が優占する平面的な構造から、基質に付着した後、分泌液から形成された柄が伸びるタイプの藻類や垂直方向にのびる糸状藻類が増加した立体的な構造へと発達することが知られている（A･J･ホーン・C･R･ゴールドマン 1999）。底生動物や魚類による摂食は付着藻類の現存量を減らし、このような立体的な構造への遷移を抑制するが、摂食圧が相対的に小さければ付着物は発達してより厚くなり、流水中の有機物や無機物の堆積、バクテリアによる付着物の分解といったプロセスを経て、付着物の一部は自然に剥離して現存量は一旦低下する（図 4.3-3）。特に、現存量が 200～250mg-chl.a/m^2 に達した群落は、付着物底層への自己

遮光（膜が厚くなると膜内部へ到達する光が遮断される）、栄養塩の供給低下が生じ、下層の細胞は活性が低下し、枯死・分解して剥離しやすくなると言われている（相崎 1980）。また、この途上に出水があれば、自然剥離する前の段階で河床付着物は剥離し、現存量が低下して再度同様のプロセスを経るが、出水の規模・頻度が低下すると大型の糸状藻類（例えば、ｶﾜｼｵｸﾞｻ）が発達する場合がある。

摂食圧が相対的に小さい、出水等の攪乱規模・頻度が減少すると付着物は厚くなり、藻類群集の構造は立体的な構造へ発達するが、同じ立体構造であっても平水時の流速が小さい場合には、基質への付着力が小さい藻類からなるルーズな構造になり、流速が大きい場合には、付着力が強い藻類からなる群集になる（トピックス：フラッシュ放流による付着藻類の剥離を参照）。

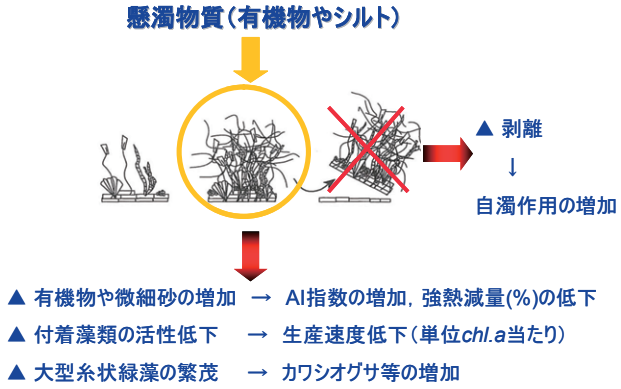


図 4.3-3 河床付着物の発達過程

(3) 流況と土砂に対する付着藻類の応答メカニズムのカテゴリー

流況と土砂が付着藻類に及ぼす影響を考える場合には、上で述べた付着藻類の発達過程を良く理解した上で、付着藻類への直接的・間接的な応答経路を整理することが必要である。ここでは、流況については「出水時流量の減少」と「平水時の流量の増減」を、土砂については「粗粒化及び供給土砂量の減少」を対象として、付着藻類の応答メカニズムを整理した。

(4) 応答メカニズムの例

1) 出水時流量減少に対する河床付着物の応答メカニズム

出水時の高い掃流力は河床付着物の減少を引き起こし、付着藻類の発達過程の初期段階に戻す効果を持つ。ただし、河床材料が移動するような規模の大きな出水（材料 m が移動するような出水）と規模の小さな出水（材料 m が移動しない出水）では効果の程度が異なる。

a) 材料 m が移動する出水の場合

剥離は材料 m が移動するような規模の出水であれば材料 m の入れ替わり（表層と下層）が生じて付着物の現存量は著しく減少する。この程度の規模の出水の減少

は付着藻類の発達過程を初期段階に引き戻す機会を減らすため、結果としてより発達の進んだ付着藻類相へと遷移する可能性が高くなる。

b) 材料 m が移動しない出水の場合

材料 m が移動しない出水であれば、流水の掃流力による剥離、材料 s や t になりうる通過型粒径集団が河床近傍を移動してクレンジングすることによる剥離が期待できる（クレンジング効果については後述）。流水の掃流力による剥離効果は、付着藻類の基盤への付着力によって異なり、それは瀬や水際といった平水時の流速と関連していることが解ってきている。すなわち、平水時の流速が大きい場所（例えば、早瀬）には基盤への付着力が強い藻類が繁茂し、高い掃流力に対しても剥離しにくいが、水際のように流速が遅い場所では基盤への付着力が弱い藻類が繁茂し、比較的小規模の出水で流出する（トピックス：フラッシュ放流による付着藻類の剥離を参照）。

現在のところこのような付着力と場との関係を定量的に評価した事例はないため、現地における場所毎の付着藻類の群集構造を見ながら出水による応答を評価していく必要がある。

2) 平水時の流量の増減に対する河床付着物の応答メカニズム

平水時の流量の増減は付着藻類が繁茂できる河床面積の拡大・縮小をもたらす、また、1)付着藻類の成長のための資源、2)外力（流速増減）、3)摂食、を介して付着藻類そのものに影響を及ぼす。ここでは、面積の増減以外の３つに着目し、その応答メカニズムを整理する。

a) 成長のための資源を介した応答

平水時の流量増減は成長に関する資源の栄養塩、光、水温のそれぞれに影響を及ぼす可能性がある。

- 栄養塩は流量の大小に拘わらずその濃度が一定の場合であっても、流量が減少し流速が低下すると河床付着物内部への栄養塩の供給量が低下し、一次生産速度が減少することが知られている。流量が増加すればその逆の現象が生じる。
- 流量の増減は水深を変化させる。付着藻類の光合成は水中を透過し河床に到達する光の強さに影響を受けるため、流量減少により水深が減少し河床まで到達する光量が大きくなると一次生産速度が増加する可能性がある。
- 流量の増減は流下時間と水深に影響を及ぼし、水体が単位時間に受ける光量は増加・減少し、結果として水温を上昇もしくは降下させる。水温は付着藻類の一次生産速度の支配要因であるため、水温変化は成長に影響を及ぼすことになる。

b) 外力（流速増減に伴う影響）

前述したように付着藻類の基盤への付着力は平水時の流速が大きい程強くなると言われている。このため、平水時の流量が減少し流速が低下すると付着力の弱い群集へと変化し、最大現存量が大きくなる傾向がある。流量が増加した場合にはこの反対の現象が起きる。また、流速が低下した場合には懸濁物質（有機物や粘土やシルトなどの微細な土砂）が沈積しやすくなる。特に微細土砂（シルト・粘土）の沈積は、遮光による付着藻類の成長阻害（Yamada・Nakamura 2002）、付着藻類群集の変化（例えば、滑走型の藻類の増加）を引き起こす。

c) 摂食を介した応答

摂食生物のうち特に魚類の生息環境は流速、水深といった水理量に影響を受けることが知られている。従って、流量の増減は生息環境の善し悪し、生息場の量を介して摂食量そして付着藻類の現存量を支配する要因として働く。底生動物もこのような影響を受ける可能性があるが、流速・水深といった物理変量のみから生息環境を評価することが難しいため現段階でその影響を勘案することは難しい。

摂食の効果については藻類食者の代表的な魚であるアユについての研究事例が多く、1日あたりの摂食量について幾つかの報告がある。例えば、石田(1964)は、アユは体重の 30〜50%に当たる藻類（湿重量）を摂餌すると報告している。アユの体重によって異なるが、この数値は一日当たりの付着藻類の生産量に匹敵する値であり、摂食生物の生息の有無によって河床付着物の発達過程が大きく異なる可能性を想像することができる。

3) 粗粒化・供給土砂量減少に対する河床付着物の応答メカニズム

ここでは、材料 m が礫からなる河道を対象に記述する。土砂供給については材料 m になるものと材料 t や s になるものを分けて考える必要がある。材料 m の供給減少は河床低下に伴う瀬・淵構造の劣化（瀬と淵が不明瞭になること）、川幅の減少といった地形変化を起こす場合があり、これらが起こる場合には、これを介した影響がダム下流域に及ぶ可能性がある。しかし、これを記述するだけの知見は現在のところ極めて少なく、付着藻類への応答を言及するには至っていない。ここでは材料 t になりうる材料（ただし、小礫など材料 m の中でも最も粒径が小さい部分も含めて考える）の供給量減少に伴う応答メカニズムを整理する。

材料 t になりうる材料の供給量減少に対する応答としては、1)出水時・平水時の双方において材料が基盤に直接衝突し、この結果河床付着物を剥離させる機会が減少するという直接的効果、そして、2)底質粗粒化（材料 t や小礫の河床からの抜け出し）により河床付着物を摂食する底生動物が減少し、河床付着物に影響する間接効果が存在する。

a) 礫床上での材料 t や小礫流送の直接効果とその応答

付着藻類が河床近傍を流下する砂・小礫によって剥がされる効果については既に幾つかの文献で報告されている（北村ほか 2000)。材料 t の流送は出水時だけでなく、平水時にも見られるケースが多い。特に、風化花崗岩流域を流下する河川ではマサが平水時も河道を流下する現象を確認できる。このような河川では平水時における剥離機会の減少も付着藻類の発達に寄与している可能性もあり、ダムの影響を受けた区間（インパクト区）とそうでない区間（コントロール区）を比較した場合の差異は大きい可能性が高い。

b) 摂食を介した間接効果とその応答

ﾔﾏﾄﾋﾞｹﾗは河床付着物を摂食する代表的な底生動物として知られている。この底生動物は河床材料中の砂・小礫（材料 m のうち細粒部分と材料 t）を巣材とし、河床材料上を匍匐・移動しながら付着物を摂食している。実際にﾔﾏﾄﾋﾞｹﾗが生息している河床面では河床付着物が厚くならないことから、その摂食圧は大きいことが理解できる（写真 4.3-1)。供給土砂量の減少はﾔﾏﾄﾋﾞｹﾗの巣材消失を介して生息密度、摂食圧を減少させるので、河床付着物の増減に影響を及ぼす可能性がある。

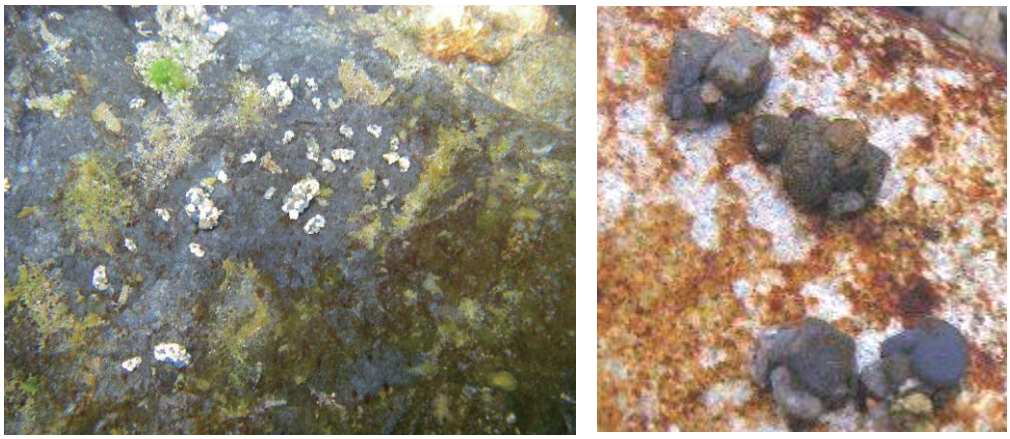


写真 4.3-1　水中の礫上のﾔﾏﾄﾋﾞｹﾗ分布と付着物の状況（左)、携巣の状態（右）

【トピックス】付着藻類の生活（付着）型

付着藻類の生活様式は、基質面を滑走するタイプや付着基質に細胞の一部を付着させるタイプなど、いくつかのタイプに分類される。生活（付着）様式は、藻類の基質への付着力を規定する一要因であるため、その場の外力（流速や流砂）や、外力に対する耐性と密接な関係にある。また、付着藻類群集の発達の過程（平面的な構造から立体的な構造へ）とも関係している。したがって、生活様式を把握することは、流況と土砂の変化に対する付着藻類の応答を捉える上で有効である。

以下に、既往文献における生活（付着）型の分類例を示す（詳細は、文献参照のこと）。

■　**渡辺（2005）**

付着性珪藻は、大きく、(1)滑走型、(2)密着型、(3)直立型、に大別され、直立型はさらに５型（単独直立型、放射直立型、樹状直立型、管内群体型、ジグザグ群体型）に細分される。なお、直立型に属する種は、被殻から分布された粘質物が伸びて、その先端に被殻が押し上げられて付着する。

■　**田中・渡辺（1990）**

・基物に水平方向に密着するタイプー密着型（基物に密着する）、滑走型（基物を滑走する）
・付着後、垂直方向へ立ち上がるタイプー直立型、直立伸長型（付着後直立方向に伸びていく）
・付着藻類群集の表面にそって水平方向に広がり、先にできた群集をシート状に被うタイプー被膜型

■　**河村(1995、1998)**

藻の付着形態を、群体形成の有無と群体の形状、粘液の分泌様式、運動性、付着力により、8 型（匍匐滑走型、匍匐固着型、直接不動型、帯状群体型、付着柄単体型、付着柄群体型、管棲群体型、糸状群体型）に分類（図-1）。

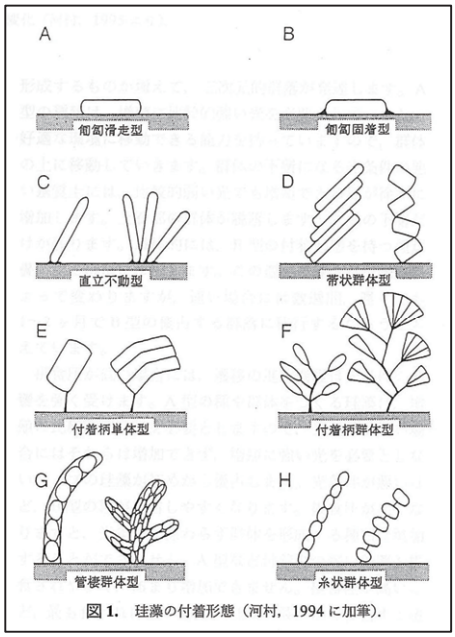


図 1.　珪藻の付着形態（河村，1994 に加筆）.

図-1　河村（1998）による付着形態型

【トピックス】フラッシュ放流による付着藻類の剥離

－剥離効果は水際、平瀬、早瀬と異なるか? （フラッシュ放流前後の調査結果から（皆川ほか 2007））－

宮ヶ瀬ダムで実施されたフラッシュ放流（平成 17 年 10 月 15 日実施、最大放流量 100m^3/s）を対象に放流前後の付着藻類調査を行った。図-1 に、放流前後の水際、平瀬、早瀬のクロロフィル a の変化と減少率を示した。水際及び平瀬では、放流により付着藻類が統計的に有意に減少し、減少率（=減少量／放流前の chl.a 量）は、それぞれ 0.8、0.4 であった。これに対し、早瀬の減少率は 0.2 であり、有意に減少していなかった。この結果を付着（生活）型と対応させてみてみよう。

表-1 に、放流前の代表的な種の生活（付着）型と出現率、及び放流による減少率を示した。水際で出現率が高かった柄伸長型の *Cymbella*、直立型の *Fragilaria*、及び滑走型の *Naviculla* は 9 割以上が掃流され、直立型の *Achnanthes* は、5〜7 割であったのに対し、平瀬や早瀬で出現率が比較的高かった糸状伸長型で、基部細胞によって付着基質に固着する藍藻 *H.janthina* は、ほとんど掃流されていなかった。なお、ここでは、生活（付着）型を表-2（田中・渡辺 1990 を参考に作成）のように分類した。図-2 は、各生活型を付着力の強さで分類し、各ユニットにおける構成を円グラフで示したものである。水際では、付着力が弱い生活様式（滑走型、直立型など）の割合が比較的高く、平瀬や早瀬では、付着力が強い生活（付着）様式の割合が水際と比べて高い。このような構成の違いが、減少率に影響したものと理解できる。ただし、河床付着物の掃流の程度は、生活（付着）様式の他に、放流前の付着物量、死滅した藻類や藻類以外の有機物量の割合、無機物量（シルト等の微細な土砂）等が影響することが報告されている（Biggs・Close 1989； Peterson・Stevenson 1992）。ここでは示していないが、これらの影響についても考慮する必要がある。

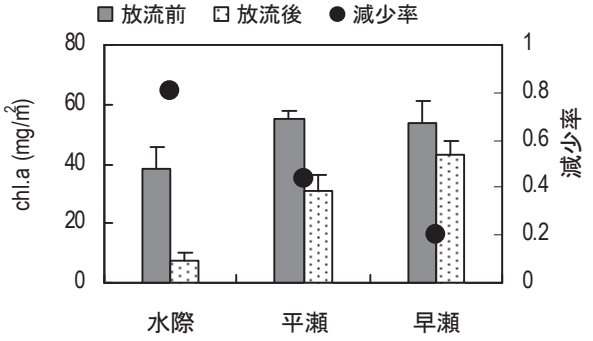


図-1　放流前後のクロロフィル a 量の変化と減少率（皆川ほか 2007）

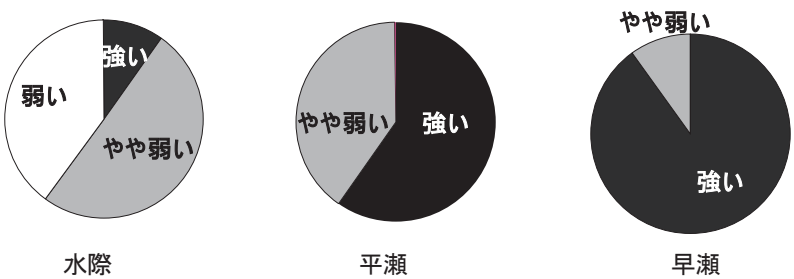


図-2　各ユニットにおける構成（生活（付着）型で付着力の強さを分類）

表−１ 放流前の代表的な藻類の生活（付着）型と出現率（%）、及び放流による減少率（皆川ほか 2007）

	生活(付着)型	水際		平瀬		早瀬	
藍藻綱		*8.9*		*15.1*		*34.7*	
Chamaesiphon sp.	直立型	4.8	(0.89)	3.7	(0.01)	1.5	(0.08)
Homoeothrix janthina 注)	糸状伸長型	4.1	(0)	11.4	(0)	33.2	(0.14)
珪藻綱		*74.6*		*83.3*		*63.9*	
Fragilaria capucina var. gracilis	直立型	1.1	(1.0)				
Fragilaria construens	直立型	2.2	(1.0)				
Cymbella lacustris	柄伸長型	13.6	(0.95)				
Cymbella trugidula	柄伸長型	4.6	(0.93)	＋			
Gomphonema clevei	柄伸長型	4.7	(0.94)	＋		＋	
Achnanthes japonica	直立型	24.5	(0.69)	75.4	(0.74)	60.7	(0.55)
Achnanthes minutissima	直立型	15.0	(0.85)	＋		1.2	(0.72)
Achnanthes pyrenaica	直立型	2.2	(0.69)	7.2	(0.74)	1.6	(0)
Navicula cryptocephala	滑走型	4.1	(0.98)				
Naviculla pseudacceptata	滑走型	1.0	(1.00)				
Naviculla subalpina	滑走型	1.5	(0.95)				
緑藻綱		*2.2*		*0.3*		*0.6*	
Ulothrix sp.	糸状伸長型			＋		＋	
Stigeoclonium sp.	〃	＋		＋		＋	
Oedogonium sp.	〃	1.4	(0.64)				

出現率は、平均値（N=3）、括弧内は減少率（平均値）を表示。
注）糸状群体を１として計数。
斜体は、藍藻綱、珪藻綱、緑藻綱の出現率合計．＋は平均値が 0.1%以下を示し、空欄は、出現していないことを示す

表−２ 付着（形態）型の分類例

	分類	
水平方向に付着するタイプ	密着型	基物に密着するタイプ
	滑走型	基物表面を滑走するタイプ
付着後、垂直方向へたちあがるタイプ	直立型	付着後、基物に一部で付着し、垂直方向に立ちあがるタイプ
付着後、垂直方向に伸長するタイプ	柄伸長型	付着後、垂直方向に、分泌液からなる柄が伸びていくタイプ
	糸状・帯状伸長型（珪藻）	付着後、垂直方向に糸状・帯状の群体を形成し、伸長するタイプ
	糸状伸長型（珪藻以外、藍藻、緑藻など）	付着後、垂直方向に糸状の群体を形成し、伸長するタイプ
水平方向に付着するタイプ	被覆型	基物表面にそって水平方向に広がり、覆うように付着するタイプ

【トピックス】アユの摂餌が河床付着物に及ぼす影響

アユは、日本の代表的な藻食性魚類である。アユの摂餌によって河床付着物の量は減少するが、質的にも影響を及ぼし、藍藻の *Homoeothrix janthina* が優占する付着藻類群集へ変化することが明らかにされている(Abe et al. 2000)。この他、アユの摂餌は、河床付着物にどのような影響を及ぼしているであろうか?

土木研究所自然共生研究センターでは、実験河川に２つの区間を設け、一定期間流水を継続して流下させた後、一方の区間にアユを放流し（実験区)、その後の河床付着物の変化を放流しない区間（対照区）と比較することによりアユの摂食効果を明らかにした。図-１は、実験区と対照区のアユ放流前後の AI（＝強熱減量／chl.a 量)、強熱減量(%)を示している。対照区では、顕著な変化がみられなかったのに対し、実験区では、放流後の AI は放流前及び対照区と比べて低く、強熱減量（%）は高く、河床付着物の状態が変化していた。河床付着物中の有機物量は、生きている藻類の他、枯死した藻類、デトリタス、細菌類を含んでおり、AI が低いほど、生きている藻類の割合が高い、フレッシュな河床付着物であると評価される。したがって、摂餌による AI の低下は、付着藻類の質的な改善を示すものと解釈される。また、河床付着物における土粒子量の増加は、付着藻類の光合成活性の低下や、アユにとっての餌資源としての価値を低下させる要因になると考えられている。したがって、摂餌による強熱減量 (%) の増加は、光合成活性や餌資源としての質の向上を示唆するものと把握される。ただし、強熱残留物（強熱後に燃え残った無機物の量）には、土粒子だけでなく、珪藻の被殻の重量が含まれている。そのため、強熱残留物量が大きい場合には、被殻の重量をそれほど考慮する必要はないが、小さい場合には、珪藻の被殻の重量が無機物量のほとんどを占める場合があるため、これを考慮する必要がある。

この他、アユを放流した実験区の付着膜は、放流してない対照区より視覚的なきれいさが感じられ、アユによる摂餌は河川景観の維持にも役割を果たしていると考えられる。生物の摂食は河床付着膜の状態を変化させる。生物が果たしている様々な役割にも留意してほしい。

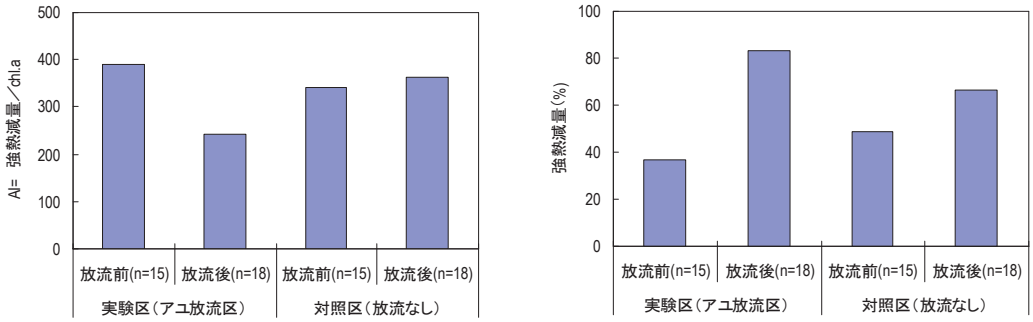


図-1　実験区及び対照区におけるアユ放流前後の AI、強熱減量（%）の変化

4.3.3 底生動物の応答メカニズム

(1) 流況と土砂に対する応答メカニズムのカテゴリー

ダム下流における底生動物への生息は流況、土砂だけでなく、餌資源、水温等様々な要因を受ける。その応答特性は底生動物の生活型、摂食機能群、生活史等によって異なってくるため、これを理解するためには、底生動物の基本的生態情報を習得し（これらの詳細についてはトピックスを参照)、その上で環境要因との関係を理解する必要がある。

ここでは、ダム下流で見られる流況・土砂に対する影響の内、流況は「出水時流量の減少」、「平水時の流量の増減」、「短期的流量変動の増加」について、土砂については「供給土砂量の減少」について現時点で考え得る応答メカニズムを整理する。

(2) 応答メカニズムの例

1) 出水時流量の減少に対する底生動物の応答メカニズム

出水時流量の規模・頻度が減少すると材料 m のうちの小粒径集団と材料 t、具体的には砂、2～4mm 程度の細礫（小礫の中でも細粒の成分）は移動しても、材料 m の主たる部分は長期間にわたって動かなくなる。更に、上流からの土砂供給量が減少すると移動しやすい小粒径集団が河床から抜け出して河床が粗粒化し、河床全体の移動機会が減少して河床の安定度が増加する。

河床の安定度は底生動物の群集に強く影響することが知られている。例えば、安定度が減少すると底生動物の生息密度が減少するだけでなく、生活型の中でも比較的移動するタイプの底生動物（匍匐型、遊泳型）が優占する群集となるだろうし、安定度が大きくなると移動しないタイプの底生動物（造網型、固着型）が増加するだろう（生活型についてはトピックスを参照)。安定度が増し、河床材料が移動しない状態が続くと、底生動物の後期遷移過程（極相）を代表する「造網型ﾄﾋﾞｹﾗ（ﾋｹﾞﾅｶﾞｶﾜﾄﾋﾞｹﾗ、ｼﾏﾄﾋﾞｹﾗ等)」が豊富な群集となることは良く知られている事実である。安定度の増減は出水時流量の増減と河床材料の粒度組成の双方に影響を受けるが、流量のみの影響を受けた場合には、本来安定度の低い、小さな河床材料から構成される河床でも安定度を増し（例えば小礫でも大礫なみの安定度を持つなど)、安定を強く好む造網型等の種群が増加するかも知れない。

また、河床材料の安定度は、河床付着物を介して底生動物に影響を与えていることが知られている。例えば、河床材料が安定すると基盤上の付着物の剥離機会を減少させるため、餌資源が豊富となり底生動物をまかなうポテンシャルが増す反面、膜が過剰に厚くなると、底生動物の生息場所の減少・餌資源としての質の悪化を引き起こし、底生動物の生息密度が減少する可能性がある（ 4)b)に再度説明あり)。

2) 平水時の流量の増減に対する底生動物の応答メカニズム

平水流量の増減は水理量（流速・水深）を変化させて、底生動物の生息可能面積に直接影響を与える他、流速の増減に伴う応答を想定する必要がある。なお、付着藻類を介した影響を想定する必要もあるが、これについては前述したので、ここでは流速の増減に伴う応答メカニズムを記述する。

流速の増減については主として流速の減少に伴う応答として整理する。

■有機物の堆積

流速の減少は流水中の有機物が河床に堆積しやすい水理環境を形成し、堆積有機物（BPOM：Benthic Particulate Organic Matter）の増加を介して底生動物群集の変化を引き起こす可能性がある。例えば、西部オーストラリアの Canning River と Canning Dam を対象として、支川合流前後の底生動物群集を調査した結果では、ダム下流で流量減少（2-6%に減少）と出水の減少（ピーク流量が 80%減少）により POM（粒状有機物）が堆積し、採集食者（Collector-gatherers）、破砕食者（Shredderes）が多くなったことが報告されている（Storey et al. 1991）

■シルト・粘土の堆積

河床へのシルト・粘土の堆積は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間隙が埋まると、底生動物のハビタットやレフュ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。

■その他

その他流速の減少に伴い水温上昇、水質の変化（DO 減少等）等の現象が生じる可能性があるが、ここでは、比較的直接的な影響の記述に留めた。影響把握・予測を行う場合には、間接的な影響を考慮することが必要となる。

※流速の増加した場合の応答について

流速が増加した場合には、上で示した現象が概ね逆転すると考えて良いだろう。流速増加を対象とした研究事例は多くないが、例えば、南アフリカの Great Fish River では流域調整河川による 500～800%の流量増加、不規則な流況の季節変化の消失により恒常的に流況が変化した。この結果、ワンドや水辺に生息する *cloeon africanum*（ﾌﾀﾊﾞｶｹﾞﾛｳ属の一種）、*Ausrocaenis capensis*（ﾋﾒｼﾛｶｹﾞﾛｳ属の一種）が減少し、河床材料として礫、速い流れを好む *Baetis harrisoni*、*Baetis glaucus*（いずれもｺｶｹﾞﾛｳ属の一種）が増加することが報告されている（O'keeffe・De Moor 1988）。

3) 流量の短期変動に伴う影響

流量の短期変動、特に急激かつ頻繁な流量増加は、多くの底生動物の流失を引き起こし（Jalon et al. 1994； Cereghino et al. 1997； Cereghino・Lavandier 1998）、底生動物の生息密度と現存量の減少を引き起こすことが知られている。例えば、フランスの Orlu 水力発電ダムの放流区との上下流で（River Oriege）でｶﾜｹﾞﾗの流下量を測定した結果によると、放流口上流における流下は主として夜間に起きるが、下流では流量の増加とともに流下量が劇的に大きくなり、生息密度の低下が確認されている（Cereghino・Lavandier 1998）。

4) 供給土砂量減少に対する底生動物の応答メカニズム

土砂供給量の減少は、 1)砂や小礫の抜け出しによる礫間間隙の増加、2)平水時における掃流砂（材料 t に当たる）の減少、3)砂・小礫の減少に伴う巣材の消失、を引き起こす可能性がある。

a) 砂や小礫の抜け出しによる礫間間隙の増加に伴う応答

礫間間隙は底生動物の生息場所として重要であり、間隙の大きさによって異なるサイズの底生動物が生息する。粒度の大きな河床材料（例えば、材料 m）は河床材料間の間隙を作りだす一方、粒度の小さな河床材料（例えば、材料 t）はこの間隙を埋めるため、礫間間隙の増加や減少が進むと底生動物群集が変化する。例えば、材料 t が過度に多いと（たとえば図 6.3-8 の「砂供給 7000mg/l」の写真のような状態）礫間間隙・礫上などの場が埋没・消失することで、その場をハビタット（生息場）として利用する底生動物（ﾄﾋﾞｲﾛｶｹﾞﾛｳ科、ｼﾏﾄﾋﾞｹﾗ科等）が減少するといわれている（ただし、1mm 以上の河床材料では、ｼﾏﾄﾋﾞｹﾗに対しての影響が無いとも報告されている）（Runde・Hallenthal 2000）。逆に材料 t が減少すると、底生動物中型のサイズ（体長 5-10mm 程度）の底生動物密度が増加すると想像される。

粗粒化に伴い礫間間隙が増加した幾つかのダム直下において見られるｱｶﾏﾀﾞﾗｶｹﾞﾛｳ増加は、この間隙率増加による生息場の拡大が関わっている可能性がある。

b) 平水時における掃流砂（材料 t に当たる）の減少に伴う応答メカニズム

平水時の掃流砂が底生動物に及ぼす影響については研究事例が少なく明確でないが、底生動物に対する影響としては２つの経路を考える必要があるだろう。

1. 直接的影響：掃流砂は直接の撹乱因子となってｶｹﾞﾛｳ類等の底生動物の流下数・密度低下の原因となることが知られている。掃流砂が減少すれば流下数が低下し、密度増加が生じる可能性がある。
2. 間接的影響：掃流砂の減少は餌となる付着藻類に対する攪乱を減少させるため、付着藻類が発達し、藻類食者に影響する。

間接的影響については、付着藻類の増加が藻類食者に必ずしも好適な環境を形成するばかりではない。例えば、付着藻類膜が適度な厚さに維持されると（過度に発達しないと）、ﾋﾗﾀｶｹﾞﾛｳ科等の滑行型（トピックス参照）の藻類食者にとって好適なハビタットとなると考えられるが、掃流砂が減少し付着物が過度に厚くなると、これら滑行型の藻類食者が減少する可能性がある。

c) 砂・小礫の減少に伴う巣材の減少に伴う応答（再掲）

ﾔﾏﾄﾋﾞｹﾗ科等の携巣性ﾄﾋﾞｹﾗは河床材料中の砂・小礫（材料 t と m の一部）を巣材とし、河床材料上を匍匐・移動しながら付着物を摂食している。巣材であるこれらの材料が消失するとﾔﾏﾄﾋﾞｹﾗの生息が困難になると予想される。実際に、ﾔﾏﾄﾋﾞｹﾗ密度の小さい場所では付着藻類の摂食圧が低下し、付着物が厚くなることが観察されている。巣材に砂・小礫の内の小粒径集団（2～4mm）を用いる携巣性ﾄﾋﾞｹﾗとしては、ﾆﾝｷﾞｮｳﾄﾋﾞｹﾗ、ｸﾞﾏｶﾞﾄﾋﾞｹﾗ、ﾀﾃﾋｹﾞﾅｶﾞﾄﾋﾞｹﾗ、ｺｴｸﾞﾘﾄﾋﾞｹﾗ等がいる。

＊ 流心部の瀬以外で可能性がある堆積砂の減少

流心部の瀬で起きる現象ではないが、土砂供給量減少に伴い凹部、巨岩の裏等に堆積砂のパッチが消失することがある。このような堆積砂は基質の不安定性・内部の低酸素量から多くの種群は生息できない。しかし、メイオファウナ（0.5mm サイズ未満の微小動物：ｲﾄﾐﾐｽﾞ、ﾕｽﾘｶ若齢幼虫等）や、特殊な呼吸行動で低酸素に対応できる（ﾓﾝｶｹﾞﾛｳ等）「掘潜型」と呼ばれる種群は、このハビタットを特異的に利用することができる。土砂供給量減少による堆積砂の減少に伴い、これらの種群の顕著な消失が観察されている。

【トピックス】底生動物の摂食機能群（正確には機能的摂食群）と生活型を理解する

各調査地点の底生動物群集を比較する場合、その群集が表す生態的情報を得るために、群集を構成する各分類群の生態型を比較する場合が多い。この生態型で代表的なものとして、その底生動物の形態や生活の仕方に着目した「生活型」、その底生動物が餌としているもの・その採餌方法に着目した「摂食型」（機能的摂食群（Functional Feeding Group）と呼ばれることが多い）がある。ここでは、この２つの生態型について説明する。

「生活型」

日本の水生昆虫については、その形態等に着目し、様々な生活形（型）概念が発達してきた。その中で現在も広く用いられている類型は津田（1962）のものであり、彼は底生動物を遊泳型、固着型、造網型、匍匐型、携巣型、掘潜型の６つに分けている。竹門（2005）はこれに更に詳しい生態情報を加味し、11 の類型に発展させた（表−１）。

表−1　生活型の特徴と代表的な分類群

大分類	小分類	特徴	代表的な分類群
遊泳型		流線形の体形をしており，泳いで生活するもの。	ｺｶｹﾞﾛｳ科，ﾁﾗｶｹﾞﾛｳ科，ﾅﾍﾞﾌﾞﾀﾑｼ科
固着型	露出固着型	基質表面上に，露出して固着しているもの。	ﾌﾞﾕ科，ｱﾐｶ科，ｶｲﾒﾝ科
	造巣固着型	基質表面上に巣を固着させ，その巣の中に生息しているもの。	ﾅｶﾞﾚｽｼﾘｶ属，ﾃﾝﾏｸｴﾘｽｼﾘｶ属，ｷﾀｶﾞﾐﾄﾋﾞｹﾗ科
	造網型	基質表面上に，採餌用の捕獲網と巣を固着させ，その巣の中に生息しているもの。	ﾋｹﾞﾅｶﾞｶﾜﾄﾋﾞｹﾗ科，ｼﾏﾄﾋﾞｹﾗ科，ｳｽﾞﾊﾞｶﾞｶﾞﾝﾎﾞ属
匍匐型	滑行型	扁平な体形で，滑らかな基質表面上を滑るようにすばやく移動するもの。	ﾋﾗｶｶｹﾞﾛｳ科，ﾋﾗｶﾄﾞﾛﾑｼ科
	粘液匍匐型	粘液に覆われた体であり，様々な基質上をゆっくりと移動するもの。	ｳｽﾞﾑｼ属，ﾏｷｶﾞｲ類
	匍匐型	よく発達した脚部で，様々な基質上を中程度のスピードで歩いて移動するもの。	ﾏﾀﾞﾗｶｹﾞﾛｳ科，ｶﾜｹﾞﾗ科，ﾅｶﾞﾚﾄﾋﾞｹﾗ科
	携巣型	様々な材料で作った携帯可能な巣を持って，ゆっくり移動するもの。	ﾋﾒﾄﾋﾞｹﾗ科，ﾔﾏﾄﾋﾞｹﾗ科，ﾆﾝｷﾞｮｳﾄﾋﾞｹﾗ科
掘潜型	滑行掘潜型	はまり石の表面を伝って細かい河床材料（砂・泥等）中に潜り込んで生活するもの。	ﾄﾋﾞｲﾛｶｹﾞﾛｳ属，ｶﾜｶｹﾞﾛｳ属
	自由掘潜型	潜り込むための基質を必要とせず，細かい河床材料に潜り込んで生活するもの。	ﾓﾝｶｹﾞﾛｳ科，ｲﾄﾐﾐｽﾞ目，ｶﾞｶﾞﾝﾎﾞ科，
	造巣掘潜型	細かい河床材料の中にチューブ状の巣を作り，その巣の中で生活するもの。	ｼﾛｲﾛｶｹﾞﾛｳ科，ﾋｹﾞﾕｽﾘｶ属，ﾕｽﾘｶ属

「機能的摂食群」

底生動物の摂食型の例として、Merritt・Cummins（1996）が、北米に生息する分類群に対して提唱した機能的摂食群が広く用いられている。竹門（2005）はこれを日本に生息する分類群に適用し、消化管分析などの情報も加味して７つの型に分類している（表−2）。

表−2　機能的摂食群の特徴と代表的な分類群

大分類	小分類	特徴	代表的な分類群
破砕食者		落葉落枝や大型植物体等の有機物を，噛み砕いたり削りとるなどして摂食するもの。	ｵﾅｼｶﾜｹﾞﾗ属，ｺｶｸﾂﾂﾄﾋﾞｹﾗ属
濾過食者		捕獲網や体の一部を使って，流れてくる細粒有機物をろ過して摂食するもの。	ｼﾏﾄﾋﾞｹﾗ科，ﾋｹﾞﾅｶﾞｶﾜﾄﾋﾞｹﾗ科
採集食者		主として，堆積した細粒有機物を摂食するもの。しかし消化管内に付着藻類が多く認められることもある。	ﾄﾋﾞｲﾛｶｹﾞﾛｳ属，ﾏﾀﾞﾗｶｹﾞﾛｳ属
刈取食者	掃き採り食者	主として付着藻類を摂食するもののうち，髭などを用い，やわらかく掃き採るように付着藻類を採集するもの。消化管内に細粒有機物が多く認められることもある。	ﾋﾗｶｶｹﾞﾛｳ属，ﾀﾆｶﾞﾜｶｹﾞﾛｳ属
	摘み取り食者	主として付着藻類を摂食するもののうち，大顎などを基質に打ちつける等して，付着藻類を根こそぎ採集するもの。	ｺｶｹﾞﾛｳ属，ﾔﾏﾄﾋﾞｹﾗ属
捕食者		生きた動物を捕らえて摂食するもの。	ﾄｹﾞﾏﾀﾞﾗｶｹﾞﾛｳ属，ｶﾐﾑﾗｶﾜｹﾞﾗ属
腐生食者		死んだ動物を摂食するもの。	ｳｽﾞﾑｼ属
寄生者		生きた動物体に寄生し，体液等を摂食するもの。	ｾﾝﾁｭｳ類，ﾔﾄﾞﾘﾕｽﾘｶ属

しかし、底生動物の消化管分析を行うと、彼らはある特定の餌を摂食するスペシャリストではなく、多くの種類の餌を摂食するジェネラリストであることが分かる。よって、機能的摂食群が、餌の種類で分類されたものではなく、採餌方法を重視した分類であることに注意する必要がある。その底生動物がどの栄養段階に属するか調べるためには、厳密には、消化管分析や安定同位体比分析を行う必要があるだろう。

底生動物は、生活型・摂食型にしたがって、それぞれ特有の底質環境・餌環境を好むと考えられる。例えば、ダム下流において粗粒化が進行すれば、堆積傾向が卓越する河床環境を好む掘潜型は減少する。また、ダム湖由来プランクトンが多く流下するダム直下では、流下有機物を好んで摂食する濾過食者が非常に高密度で生息する。

このように、底生動物の生態型を用いると、河川環境に生じた何らかの変化を端的に理解することができる。河川底生動物群集の生態学的な特徴・情報を逃さず捉え、河川環境評価に生かすことが重要である。

【トピックス】ダム上下流における底生動物群集の特徴

底生動物は移動性が低く、環境の変化を鋭敏に反映する。また、生活史が数ヶ月～数年と短いため、その間の環境を反映すると考えられる。そこで、全国において統一的な手法で実施している河川水辺の国勢調査（ダム湖版）の底生動物調査のデータを用い、流況等の物理的特性と生物の生態的特性を比較し、影響要因の推定を行った。

底生動物の種組成が最も反映される冬季に、ダム上下流で定量採集を行ったダムを抽出し、全国におけるダム上下流の比較検討を行った。

ｶｹﾞﾛｳ、ｶﾜｹﾞﾗ、ﾄﾋﾞｹﾗは属レベル、他の底生動物は科レベルで個体数を集計し、生物の出現状況の偏りから地点と生物の双方を区分する TWINSPAN（Hill 1979）を行った結果、確認された底生動物の出現傾向は、地方別に大きく区分され、その中でダムの上流地点と下流地点に区分される傾向が認められた。

ダム上流と下流での流況変化を、図-1 のように、①発電主体のダムでよくみられる平常時流量の減少により特徴づけられるパターン、②治水効果の高いダムでよくみられる洪水時のピークカットの著しさで特徴づけられるパターン、③比較的小型のダムにみられることが多い、ダムによる流況変化があまり大きくないことで特徴づけられるパターンの 3 つに分類した。

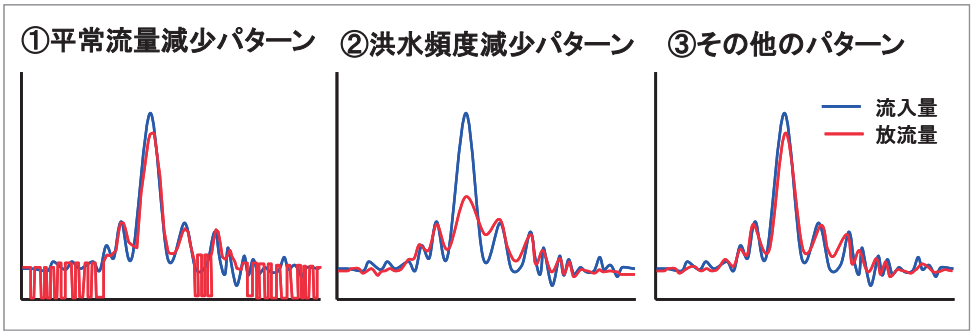
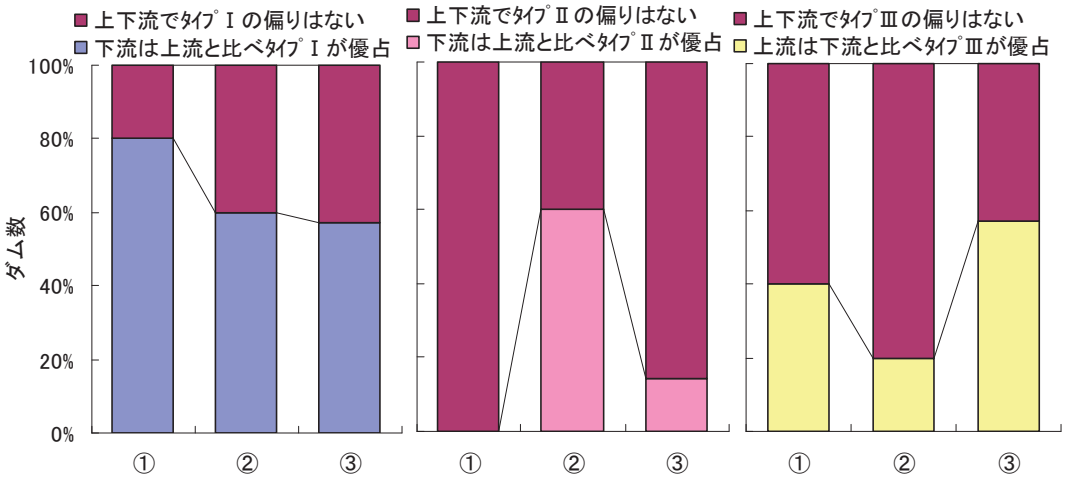


図-1　ダムの流況変化パターン

底生動物のうち「流速の遅い環境に生息する分類群（タイプⅠ）」、「礫や河床に造網する分類群（タイプⅡ）」、「潜る基質や巣材として砂が必要な分類群（タイプⅢ）」に注目して、流況のパターンごとにこれらの分類群の上下流地点での出現傾向の偏りを評価し、図-2 にまとめた。

①平常流量減少パターンでは、上流と比較し下流ではタイプⅠの底生動物が優占して出現し、緩流的環境となっている傾向が認められた。また、②洪水頻度減少パターンでは、上流と比較し下流ではタイプⅡの底生動物が優占して出現し、河床が安定的となっている傾向が認められた。③その他のパターンでは、下流と比較し上流ではタイプⅢの底生動物が優占して出現し、下流では砂が少ない状態となっている傾向が認められた。（詳細は（天野 2005）参照。）



※タイプⅠ：流速の遅い環境に生息する分類群
タイプⅡ：礫や河床に造網する分類群
タイプⅢ：潜る基質や巣材として砂が必要な分類群

図-2　指標とした分類群と流況変化との比較

5. 調査・分析に関する事項

5.1 調査目的を踏まえた調査計画・デザインの重要性

調査は、ダムと下流河川との関係についての分析、予測さらには評価を行うための基本的な作業であり、この後に述べる既設ダムを対象にした下流河道との関係分析（5.5）や新規ダム築造後の状況予測（第６章）も、その成果が土台となる。したがって、調査の計画・デザインが的確になされることは、ダムと下流河道との関係を捉える上できわめて重要なステップとなる。なお、ここで言う調査には、現場での調査・観測とともに、資料等の収集・整理、調査結果の一次分析を含むものとする。

調査の全体像を図 5.1-1 に示す。調査の全体像は、概略調査、インパクト～レスポンス関係把握のための調査、集中調査の３つに分けると掴みやすい。概略調査は、対象となる河川とその流域、ダムと貯水池などの状況を幅広く把握するものであり、残り２つのより詳細な調査の計画等を立てるための基礎情報となる。概略調査は必須ではあるが、これ自身がダムと下流河川との関係を直接明らかにするものではない。

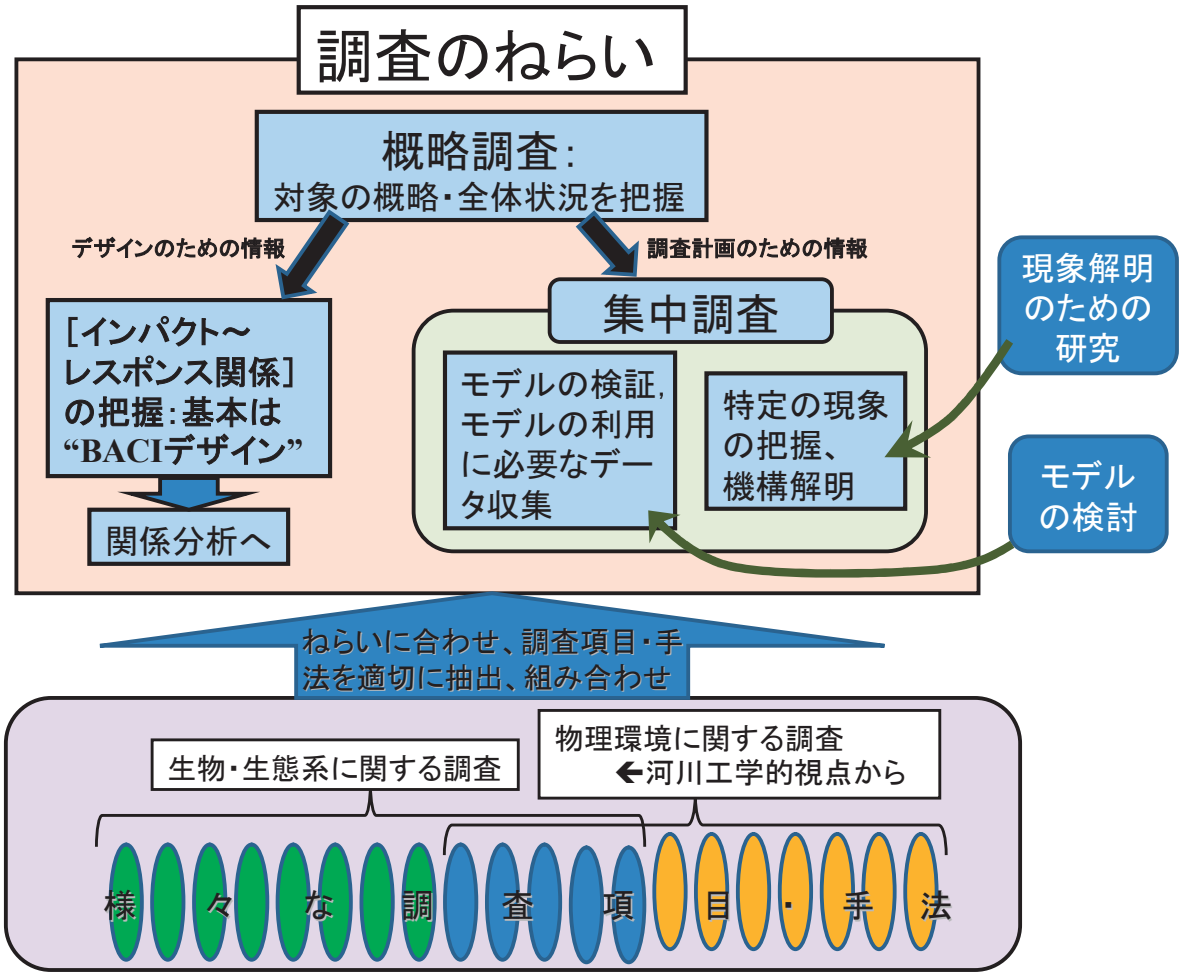


図 5.1-1 調査の種類と構成

インパクト～レスポンス関係を把握するための調査は、ダムの設置というインパクトに伴って下流河川でどのような現象がどの程度生じるかを主題とする以上、主役となるものである。すなわち、既設のダムが現在までに下流河川にどのような現象をもたらしたかを客観的に明らかにする、あるいは、これから造られるダムに関して同様のことを、将来にわたる調査（この場合モニタリングと呼んだ方が良いかもしれない）によって将来のある時点で客観的に明らかにする、というような目的に際して、インパクト～レスポンス関係を把握する調査が必須となる。この調査の目的は、因果関係を客観的・科学的に明らかにすることであるから、そのデザインは十分に練られたものでなければならない。その要諦は「BACI デザイン」に集約される。このデザインが甘いままに調査を行い、あるいは調査の制約からデザインに不十分さを残さざるを得ない場合で、その不十分さを考慮したり補完したりすることもなく、単純な考察で関係分析を行い、結論を急ぐことは不適切である。ダムと下流河川との関係を分析という目的を設定する場合には、それに合ったレベルの調査が求められることを肝に銘ずべきである。

さて、ダムと下流河川との関係については、1.1 で述べたように、まだ研究開発の発展途上であるので、モデルを用いた分析・予測・評価が広範に行える状況にはない。特に生物そのものを指標にする場合、このことは一層当てはまる。これが、実態調査を中心に因果関係を分析する［インパクト～レスポンス関係の把握］に頼ることになる所以である。しかし、特に物理環境に関しては、部分的にでもモデルという道具を用いた検討が行える可能性が比較的高い。そのような場合にモデルを有効に使うには、モデルの性質や要件、限界、使用目的を踏まえた調査が必要となってくる。また、解明すべき現象が絞られている場合に、そのターゲットと解明のアプローチに応じた調査を詳細に行う場合も出てこよう。これらを、図 5.1-1 ではまとめて「集中調査」と呼んでいる。６章で取り上げる予測では、こうした集中調査に基づくモデル適用が根幹的役割を果たす。

集中調査とその活用は、インパクト～レスポンス関係の把握ではカバーしきれない部分を補い、また調査の効率化・合理化に資するという面で、保全措置や環境再生方策を案出・評価する上で、さらに現象解明を進め研究開発を促進するという意味で、今後重要度を増していくと考えられる。すなわち、いつまでもインパクト～レスポンスの分析に頼る状況に安住してはいけないという意識も持つべきであろう。このことは、「1.4 ダム貯水池による下流物理環境の変化に関する研究動向」で述べたとおりである。

さて、今まで述べてきた大きく３つに分かれる調査をそれぞれに実施する際には、生物・生態系にかかわる調査、河川の物理環境にかかわる調査の中から、目的と状況に即して、適切な調査項目と方法、必要な場合には一次分析法を選定し、適切に組み合わせて行くことになる。生態系の調査のある部分は河川の物理環境の調査と重なってくるので、図 5.1-1 ではそのような表示にしている。この重なった部分の調査を整

合的に進めることは（無駄な重複調査の排除、それぞれの調査から得られる関連の深い情報を有機的につなげることを意識した調査デザインなど)、調査の効率化からも、また、より的確な調査成果を得るという点からも重要である（本節末尾の「河床材料・底質調査における粒径分類と呼称の統一の重要性」も合わせて参照されたい)。

以上の整理を踏まえ本章では、まず 5.2 で、ダムと下流河川との関係を捉える上で主役になる「インパクト～レスポンス関係を把握するための調査」を適切に実施する上で不可欠な BACI デザインの考え方を説明する。次に 5.3 と 5.4 で、図 5.1-1 の下の部分、すなわち河川の物理環境および生物・生態系に関する調査項目・内容・方法・一次分析の方法を示す。なお、どのような調査項目が必要になるかは、調査のねらいや対象とする河川の状況等によって大きく異なるので、すべての調査項目について、それらの相互関係や優先度を含め体系的、マニュアル的に示すことは少なくとも現時点では難しい。そこで本資料では、調査法の要諦を掴むのに適する代表的な調査項目に絞り、上記の内容を“道具箱”的に示すこととした。生物・生態系については、1 章で述べたスタンスに従い、付着藻類と底生動物に対象を限定している。最後に、5.5 において、BACI デザインの考え方にしたがって既設ダムを対象に行われた実態分析の事例を示し、BACI デザインを表面的でなく実質的に行うことが、生物・生態系に限らず、物理環境に関する分析においても同様に重要であることを理解するための助けとする。

【河床材料・底質調査における粒径分類と呼称の統一の重要性】

同じ対象について、河川工学的視点と生物・生態系を調べるという視点の両方から物理環境を調査する場合（図 5.1-1 の「調査項目・手法」の青色楕円に相当）に、それぞれの視点からの調査において、粒径の分類・呼称について異なる尺度が用いられてしまうと、同じ対象についての物理環境調査であるにもかかわらず、互いの結果の比較や統合に際して大きな障害となり、河道特性の解釈や分析に不効率を招く恐れがあるので、極力同じ尺度を採用するか、少なくとも、両者の関係が簡単につくようにしておくことが必要である。さらにその上で、河川工学的調査と生物の生息・生育場に関する調査自体の統合化を図っていくことも重要である。同じ河床という場を対象にしているのであるから、河川工学、生物というような分野毎の縦割りの発想にとらわれず、調査計画の策定を表 1.6-1 に示す共通の尺度を用いつつ統合的に検討することがもっと行われて良いはずである。本章において、5.3 では主として河川工学的視点から河道の物理環境を、5.4 では付着藻類と底生動物との関係を重視して河道の物理環境を調査する方法を説明している。これら 2 つの節において、粒径の分類・呼称について表 1.6-1 に示す共通の尺度が用いられている。（以上、1.6 の記述主旨の再掲）

5.2 インパクトーレスポンスを把握するための調査デザイン

5.2.1 調査デザインの基本－BACI デザイン

ダム下流河川でのインパクトーレスポンスを適切に捉えるには、ダム下流域だけに着目し、漫然と調査をしてもダムに伴う環境のレスポンスを捉えることはできない。レスポンスを適切に捉え、評価するためには、ダムに伴う環境変化がある区間とない区間（以下、検討区という）において調査結果を比較し、直接的、間接的環境要因と生物の生息状況の差を検出することが必要となる。ここで述べる「調査デザイン」とは“比較”を合理的に行うために検討区や検討時期を設定する方法を意味する。

さて、“比較”には大きく、

・事業前と事業後で比較する方法　　－BA(Before and After)デザイン

・影響のある場所・ない場所で比較する方法　－CI(Control and Impact)デザイン

がある。BA デザインはダム下流に検討区を設け、事前・事後で調査結果を比較する方法である。一見、この方法に基づけば変化の検出は可能のように思えるが、自然の中にある検討区は、ダムの存在以外の影響を受けるため厳密な比較とならないことが多い。

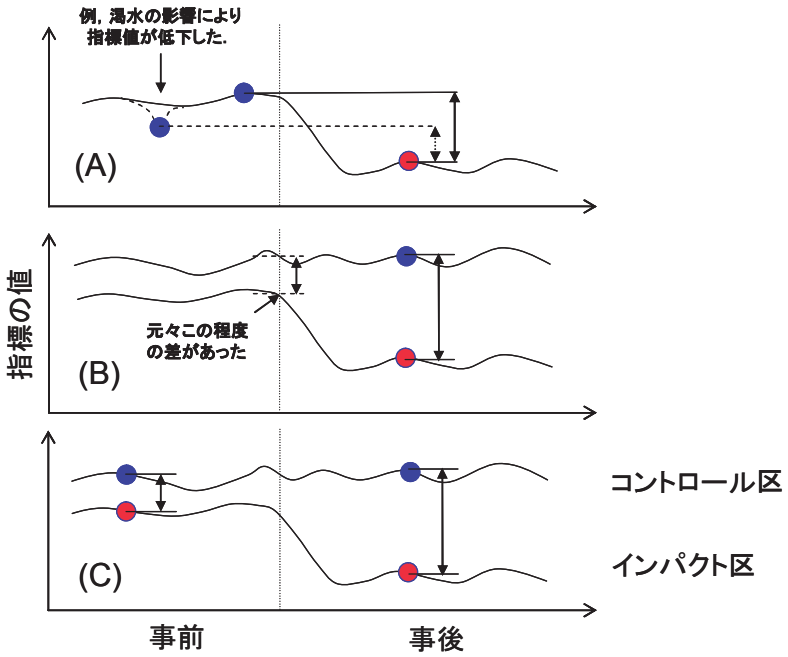


図 5.2-1　BACI デザインの説明（安田・一柳 2000）

(A)BA デザインは一見影響の評価が容易と想像されるが、実際には自然は変動する系にあり、一時期のデータに基づき事前・事後の比較を行っても、本来の影響を把握できない可能性がある。(B)CI デザインはコントロール区とインパクト区が同じ条件にあれば差を把握することができるが、実際には完全に同一なコントロール区はないため、事後で把握した差は元々の両区の差を加味したものとなる。(C)BACI デザインは事後の差から事前の差を差し引くことによりダムの影響を評価する。

例えば、事前調査を洪水直後に実施すれば、洪水攪乱の強い影響を受けた時期との比較となり、誤った結論を導くことになる（図 5.2-1 (A)）。また、CI デザインの場合、ダムサイト上流、同一流域内の支川、隣接する似通った流域内に対照区（コントロール区）を設定することになるが、インパクト区（ダム下流の検討区）とは全く同一の環境・生物相を探すことは難しく、厳密な比較とならない場合が多い（図 5.2-1 (B)）。

このような状況を回避するために推奨されるのが BACI デザインである。この手法ではインパクト区とコントロール区の双方において事前・事後の比較を行い、インパクト区とコントロール区のそもそもの差異（事前での差異）をベースとしながら、事後の差異を評価していく（図 5.2-1 (C)）。

新設ダムでこれから予測・評価を行い、竣功後にモニタリングを実施する場合には BACI デザインの採用を基本とし、既設ダムで事前データを活用できない場合には CI デザインとすることが基本となる（図 5.2-2）。後者の場合はコントロール区の設定によって影響の検出の成否が左右されることに留意することが必要である（詳細は後述）。なお、安田ら（安田・一柳 2000）の報告に詳しい。

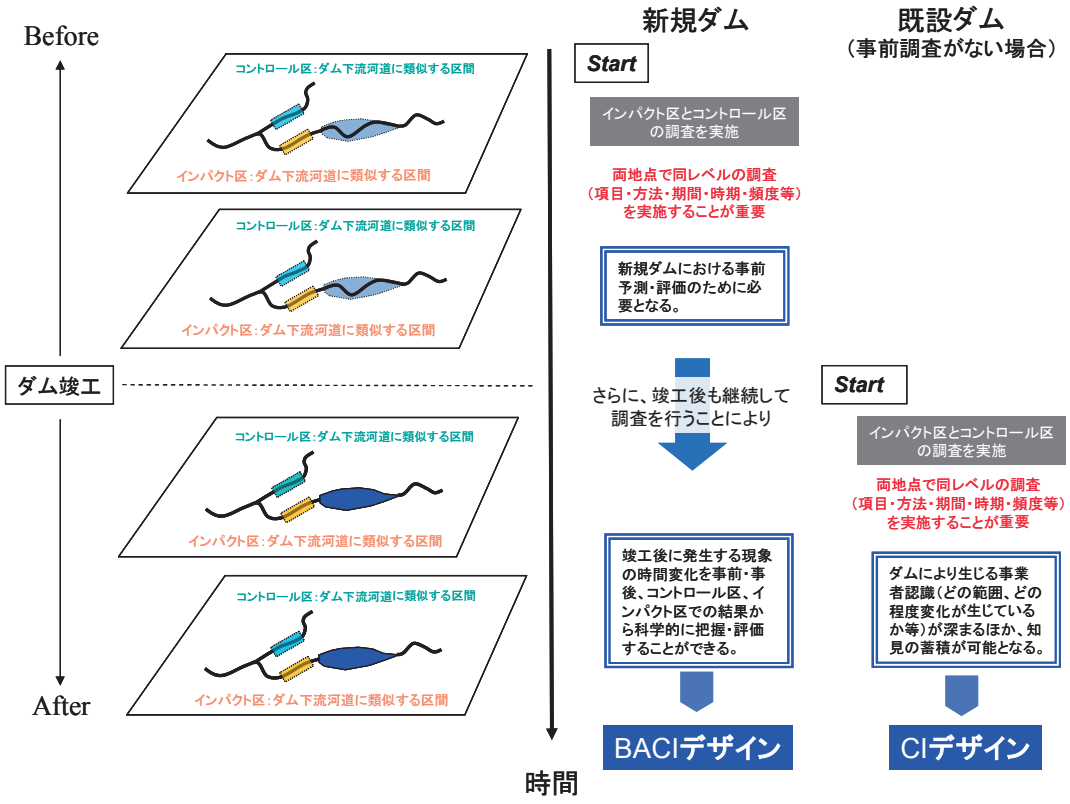


図 5.2-2　新設ダム、既設ダムにおける調査デザイン

5.2.2 デザインの組み立て方

(1) コントロール区の設定について

影響の実態を把握するためには、BA デザインを採用する場合を除けば、コントロール区の設定が不可欠である。コントロール区はダムが存在する前のインパクト区と同様の環境を有していることが必要である。このためには、川の骨格となる流域特性、河川特性が類似している区間に設定することが推奨される。具体的には流域の地質、地形、ダムの有無、河床勾配、川幅、流量、平面形状（蛇行の程度)、瀬・淵構造、キャノピー（樹冠が河道をどの程度覆っているか）の多寡等が含まれる。当然のことながら集水域に他のハイダムが存在している場合にはコントロール区の設定を避けるべきである。河道内に形成される瀬・淵構造は、このような流域～河川の特性に支配されることが多いため、まず、概略調査などを通じて得た資料等を用いて上述した特性を確認し、インパクト区と特性が類似の区間にコントロール区の候補地を設定し、次に、予備踏査によって全体的な景観を確認して、インパクト区とコントロール区があまり変わらないこと、そして、平常時の流量、瀬・淵構造、キャノピーの多寡といった生息場所の構造を確認して場所を決めると良い。

コントロール区の候補の具体例としては、同一流域内のダム湛水域上流や支川、近接する他流域の対応するセグメントが挙げられる（図 5.2-3)。

コントロール区を設定する際に、ダムが上流にないことを主たる根拠にコントロール区に選んでしまう調査デザインを時々見かけるが、このやり方は誤った結論の導出につながりうるので十分な注意が必要である。第２章で述べた山地河道の特性から理解されるように、ダムが造られる山地河道は、沖積河道と異なり、場所によってその特性が大きく異なる場合が少なくないので、上流にダムがないなどのマクロな定性的属性だけで、物理環境などがダム建設前のインパクト区と同様と判断するのは不適切である。また、たとえば、ダムの直下とそれより一定距離下流に行った地点の河道状況の比較を主な根拠に粗粒化現象の有無を判断するようなアプローチも、ダムができる前からダム建設地点付近の粒径が粗かった可能性を排除できず（このことはダム建設地点の要件から十分考えられることである)、不適切である。

こうした物理環境を対象にする場合はもちろん、生物を対象にする場合でも、以上の注意点が免除されるわけではない。なぜなら、１章や４章で説明したように、生物が物理環境の変化を介して変化するシナリオも一般的には有力だからである。したがって、物理環境、生物のどちらを扱う場合でも、ダムが無い場合のインパクト区と同等の特性をそのコントロール区が有しているかについて、目的とする因果関係分析を正当化するのに必要なレベルでの根拠付けがなされる必要があり、一般には、この根拠付けに物理環境の定量的検討も含めるべきである。すなわち、生物現象を目的としているからといって、物理環境の面でコントロール区の要件を満たしているかの検討が吟味もなく最初から甘くなってはならないのである。

そのような条件を満たすコントロール区が設定できず、いくつかの条件が満足されない区間をコントロール区とせざるを得なかった場合には、そのことを分析にお

いて適正に考慮しなければならない。以上の点の重要性については、5.5 で事例に基づいて再度説明するので参照されたい。なお、コントロール区の設定の困難さを決定的な隘路とみなす必要はなく、インパクトーレスポンス分析だけに頼らない集中調査を通じた調査・分析の重要性・有用性は既に述べたとおりである。

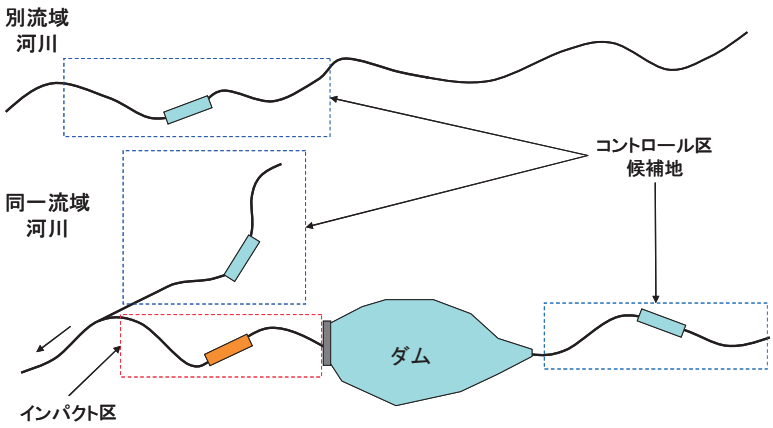


図 5.2-3　コントロール区の設定について

コントロール区は同一特性を持つ他流域河川、もしくは、ダム上流、支川に設定することになる。厳密に同一なコントロール区の設定は不可能であるが、なるべく同一に近いコントロール区を設定するために、地質、起伏量といった流域特性、流量、川幅、平面形状、河床勾配、河床材料の粒径、キャノピー（渓畔林等によって河道が被覆されているかどうか）の程度等についてインパクト区の事前状態を想定し、これに近い場所をコントロール区とすると良い。特に、事前データが取れず CI デザインとなる場合には、このプロセスはより重要になる。

(2) インパクト区の設定について

インパクト区の設定は目的によってその考え方が異なる。監視すべき漁場等影響を重点的に見るべき場所が特定されている場合には当該地点とその近傍にインパクト区を配置すれば良いが、本節の前提条件となるダム下流の変化の実態を把握する場合はダム直下から下流に向かって幾つかのインパクト区を配置する必要がある。ダム直下はダムの存在に伴う影響が最も大きい場所であることから最初のインパクト区を配置し、それより下流については、ダム下流の影響が比較的短い区間で変化していくこと、特に、支川合流地点前後で影響の程度が大きく緩和されることに留意し、支川合流地点前後にインパクト区を重点的に配置する。この配置において前後するインパクト区の距離が大きくなる場合（ダムサイトから 3km 下流までは川幅の 20 倍、それより下流は 40～50 倍を目安とすることを試案として推奨するが、今後の研究の進捗に応じて変化する可能性がある）には、適宜インパクト区を追加すると、縦断的な影響の変化を把握できるようになる。

インパクト区をどの程度下流まで設置するかについては現在のところ明確な提案ができない。あまり下流に配置すると、河床勾配やキャノピーの多寡等の河川特性そのものが変化してしまうだけでなく、他の人為的な影響も加わり対象とするダムの影響を検出することが難しくなってくるからである。

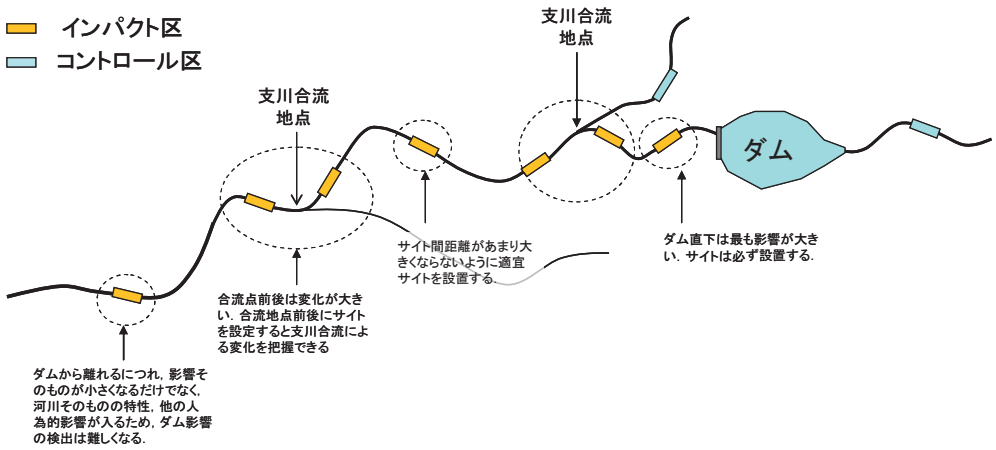


図 5.2-4 インパクト区の設定について

ダム直下に最初のインパクト区を設定し、その下流には支川合流地点前後に重点的に配置する。この配置により連続する２つのインパクト区が離れ過ぎる場合には、適宜インパクト区を追加すると良いだろう。“離れ過ぎる”を明確に定義することは現段階では難しいが、今までの土木研究所が実施した調査実績から考えると、川幅（河道幅）の 20～50 倍程度を目安にすると良いだろう（本文参照）。下流方向への影響の変化は我々が考えるよりも短い距離で生じることに留意して、インパクト区の配置を検討することが基本となる。

(3) 繰り返しをとることの重要性

1) 空間的繰り返し

同一の特性を有していると見られる生息場所を検討区間として選定し調査を行ったとしても対象区間内での生物相と生物を取り巻く環境（流速、水深等）は空間的に均一でない場合がほとんどである。統計学的に２つの検討区間で有意差を確認するためには、平均値だけでなく、個体数や湿重量、流速、水深が検討区間内でどのような分布形を示すかが情報として必要となる。このためには、検討区間内に幾つかのサンプリング地点を設けて、対象とする指標値の分布形を明らかにしなければならない。

例えば、２つの瀬を対象（図 5.2-5(左)中のサイト A、サイト B）とし、その中にコドラートを複数設置し底生動物をサンプリングすると、コドラートによって採集される底生動物の種類や量にはばらつきがある。このため、２つの瀬（サイト A とサイト B）における調査結果の比較を１サンプル（この場合、C 地点）で行うと誤った結論を導くことになる。また、幾つかのサンプリング地点を設定し、その平均値に差が見られたとしても、２つの瀬内での種類数や量のばらつきが、瀬間での平均値の差と比較して大きい場合には、サイト間での差を有意と認めることができない（図 5.2-5（右））。調査デザインを設定する際には、この点を考慮し、同一の特性を有する空間内に複数のサンプリング地点を設けることを原則としたい。

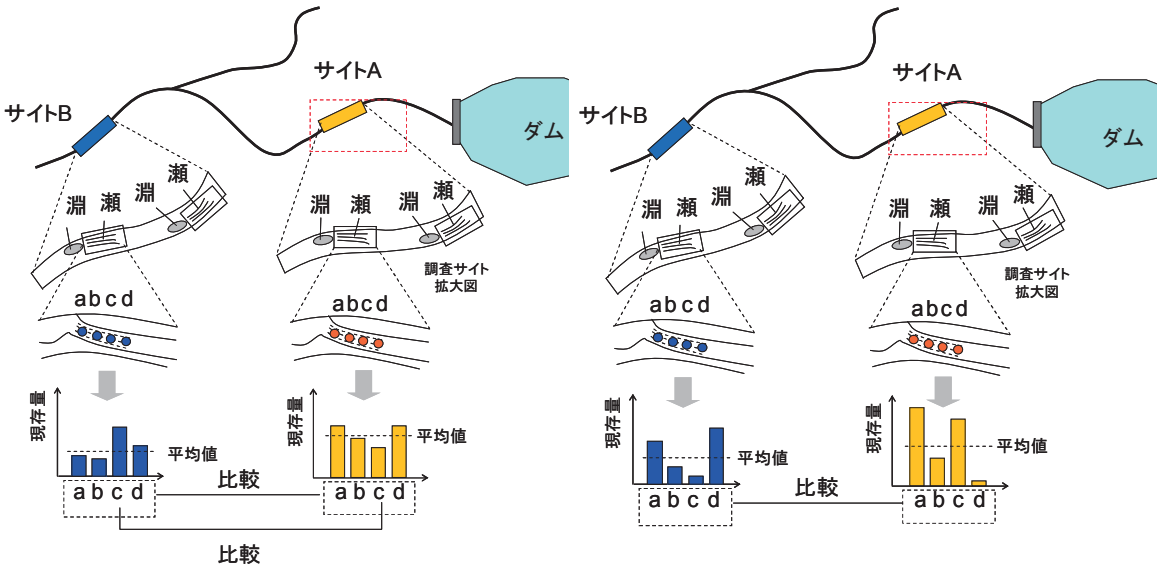


図 5.2-5 空間的反復のデザイン

２つのサイトで統計的な有意差を検出するためには、幾つかのサンプルを採取し、平均値とそのばらつきを議論する必要がある。例えば、１サンプルだけでの比較は平均値そのものの議論ができない（左）。また、幾つかのサンプルを採集しても、サイト間の差に対してサイト内でのばらつきが大きければ、確率的に有意な差があるとは認められなくなる。詳細は統計学の教科書を参考にして下さい。

2) 時間的繰り返し

自然現象は時間的にも変動するため、時間的にも繰り返しを取って各区の変動に伴う影響を受けないように努める（図 5.2-6）。時間的な変動は年変動、季節変動、日変動等様々だが、コントロール区とインパクト区において同調している変動については調査を同じ時期に行うことで(図 5.2-6（C))、この変動に伴う影響を小さくすることができる。

年変動が大きい場合には調査年について繰り返しを取り、調査時期を同期させることが必要となり（図 5.2-7 C）、季節変動が大きく、しかも、その変動特性が事前に理解できない場合には季節的な繰り返しを取り、出来る限り調査日を同期させる必要がある（図 5.2-7 B）。ただ、冬季における底生動物群集のように、流況が安定し群集に大きな変動がないと明らかな場合は、調査時期を同期させた 1 回の調査でも、影響の検出が可能な場合もある。

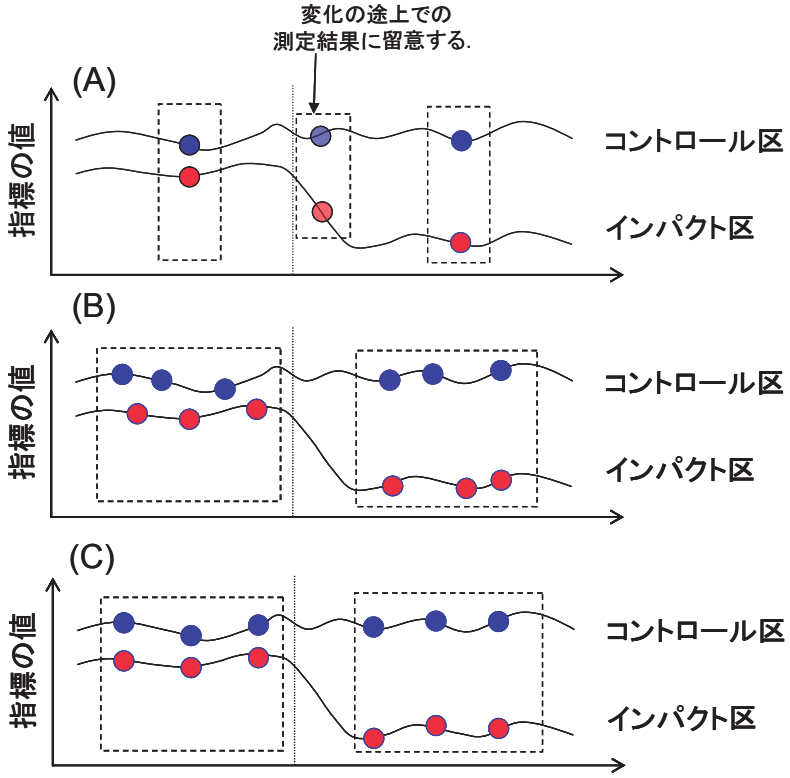


図 5.2-6 時間的反復のデザイン（安田・一柳 2000）

事前・事後 1 回のみの調査の場合、時間的に変動する現象のどの部分を把握したかが見えてこない（A)。可能なら事前・事後で時間的な繰り返しを取り、現象の変動の幅を把握したい。この場合、コントロール区とインパクト区で時間を同期させないでデータを取った場合（B)、同期させてデータを取得した場合（C）が考えられる。自然現象には年変異、季節間変異、季節内変異があり、これらが近隣で同調する場合には、調査時期を同期させれば、変異に起因する誤差を小さくすることができる。なお、インパクト区ではダムの影響が下流方向に伝搬途上である可能性もあるため（A)、注意を要する。

なお、図には示していないが、日変動が大きいと思われる現象（例えば、水温、溶存酸素濃度、流下有機物量等）については一日の中で調査時間を同期させ、かつ、繰り返しを取ることが求められる。いずれにしても、調査デザインを組み立てるときには、当該現象の変動特性をよく考えてみることが重要である。

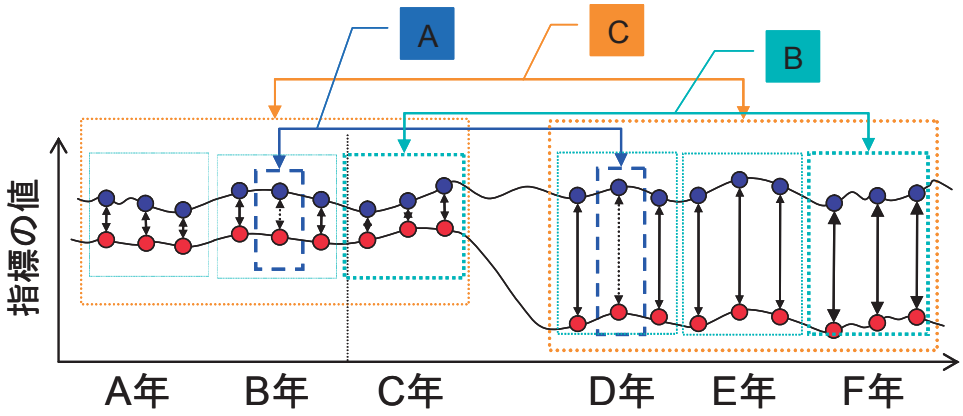


図 5.2-7　時間的反復のデザイン（その 2）

時間的な繰り返しがないと、季節変動、年変動の影響を受けてダムの存在に伴う影響を検出できない可能性がある[A]。対象とする現象の季節変動が大きく、事前にその特性が理解できない場合[B]には季節に対して繰り返しを取ることが必要となる。また、年変動がある場合には数年間の繰り返しが必要となる[C]。

5.2.3　まとめ－効果的な実態調査に向けて

以上、BACI デザインに基づくデザインについて説明してきた。実態調査を行っても、調査目的が不明確であったり、目的に沿った適切な調査デザインが設定されていなかったりすると、折角取得した膨大なデータが全て台無しになることもある。調査デザインの重要性を良く認識し、必要に応じて専門家の意見を採り入れて調査・分析のデザインを組み立てる必要がある。

5.3 河道の物理環境を検討するための調査に関する事項－調査の道具箱 1

本資料では、物理環境として、河道形状、河床材料、流況（主に掃流力など土砂流送や河道形成を司る営力という観点からの)、土砂流送を中心的に取り上げており、調査にはこれらの把握が求められる。考えられる調査事項を表 5.3-1 にまとめて示す。

調査事項は、必須となる基本的な調査、必要に応じて実施する調査（より詳細な内容を持つことが多い）に分けられる。また、本分野は今後の展開が期待されることから、新しい調査を積極的に試行していくことも重要であり、そうした意味で同表には「今後の研究開発を見据えて試行する調査」の欄も加えている。なお、この仕分けは絶対的なものでなく、調査事項選択の際の参考情報としてとらえてほしい。

表 5.3-1 物理環境の調査に関する事項一覧

				必須となる基本的な調査	必要に応じて実施する調査	今後の研究開発を見据えて試行する調査
5.3.1 流域・水系の視点からの調査	(2)本支川流域の位置・面積			●		
	(3)地質			●		
	(4)地形			●		
	(5)砂防指定区域等の状況				●	
5.3.2 河道の調査	(2)河床構成材料	1)河床構成材料の粒径（粒度分布）	b)面積格子法・線格子法	●		
			c)画像処理法		●	●
		2)河床構成材料の平面分布	a)広域的な整理・分析	●		
			b)ﾘｰﾁｽｹｰﾙの平面分布調査		●	
	(3)河川測量	2)水準測量		●		
		3)ﾚｰｻﾞｰﾌﾟﾛﾌｧｲﾗ調査			●	●
	(4)堆積層厚調査			●		●
	(5)支川の河床材料調査				●	
	(6)人為的影響の実態調査			●		
	(7)河道の歴史的変遷			●		
	(8)類似ダムにおける調査（ﾘﾌｧﾚﾝｽ情報として）				●	
5.3.3 外力（流量・土砂流送量)に関する調査	(1)出水時流量			●		
	(2)平水時流況			●		
	(3)土砂移動量調査				●	●

※記述中の番号は、以降の解説の目次番号

表 5.3-1 に示す項目のうち、「5.3.2 河道の調査」に分類される項目の多くは、現在の河川がどのような状態かを直接的に把握する情報として重要である。特に「河床構成材料」「河川測量」は基本的な情報であるため整理が必須である。「河道の歴史的変遷」については、過去の情報の蓄積状況に左右されるので、状況によって整理のレベルに差が出るのはやむを得ないが、やはり、重要な情報として扱うべきである。「堆積層厚」「本支川合流点の河床形態」は、調査法が簡単ではなく、判断にも技術力を要するので、すべてのケースについて高い精度あるいは詳細度で実施することにはならないが、これらの事項が分析や予測・評価の結果に大きく影響する場合には、やはり優先的に行うことになる（例えば堆積層の厚さがダムの影響評価に重要な要因となってくる場合など)。

表に示した各調査事項が互いに関連し、したがって一体的に調査計画を吟味すべきことにも留意してほしい。

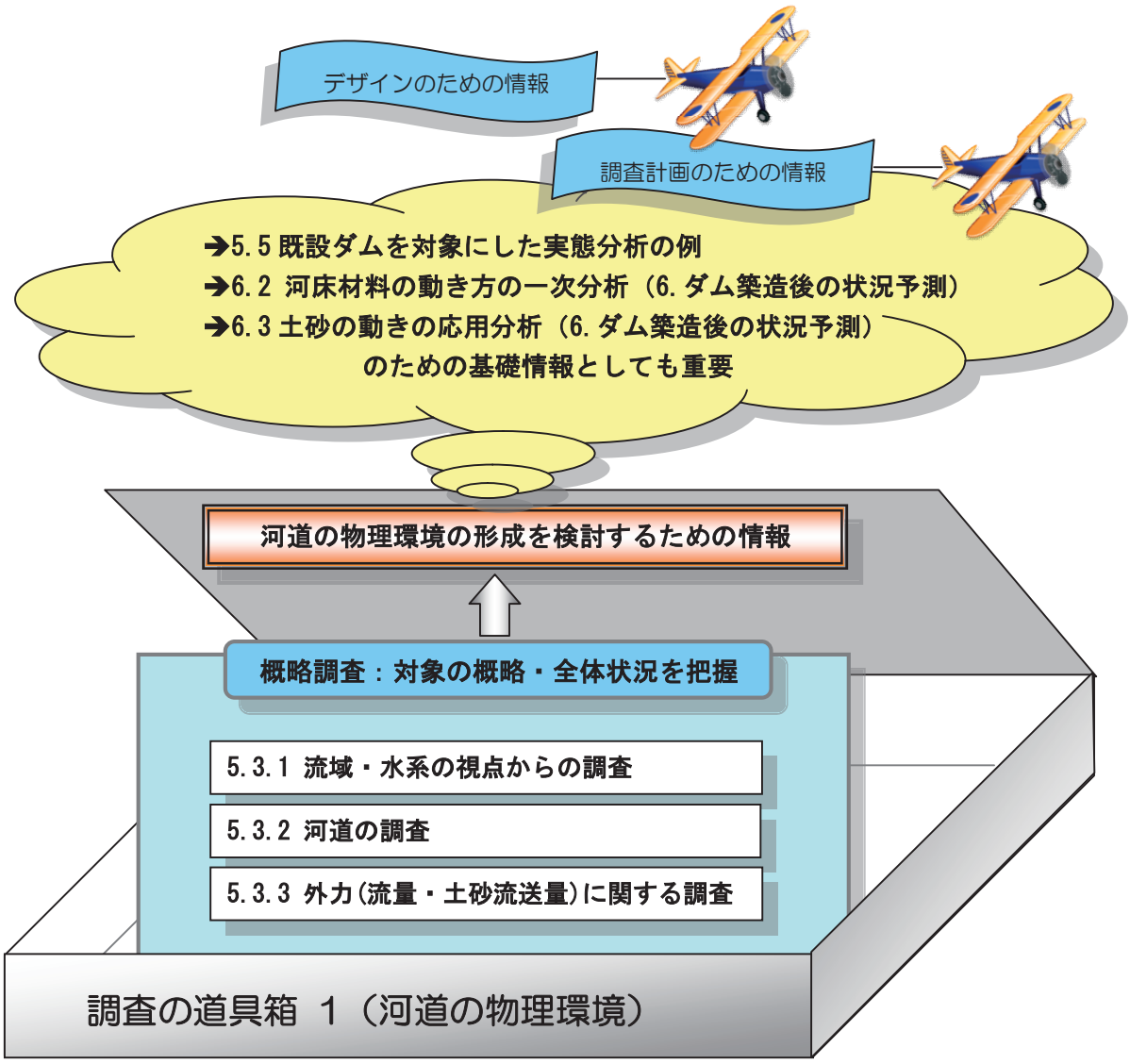


図 5.3-1　河道の物理環境調査の道具箱の全体像と分析及び関連調査の関係

5.3.1 流域・水系の視点からの調査

(1) 基本的な考え方

ダムが建設されるのは山地部であり、2.7.1 に示したとおり、山地部の河川は沖積河川に比べより直接的に流域の地形地質の影響を受けている。また、流域・水系のどの位置にダムが建設されるかが、下流河道における変化の出方を大きく左右する。しかし山地河道は、砂防事業区域など一部のエリアを除けば、その状況を河川管理者が継続的に把握する対象にはなってこなかったため、十分な情報が行政により蓄積されていない。以上のことから、ダム周辺の河川の特性を流域と水系の視点から新たに把握することが、沖積河川を対象にする場合よりもはるかに重要になる。

(2) 本支川流域の位置・面積

多くのダムは、供用によりダム上流域からの砂礫供給を遮断する。ダム直下流では、供給される砂礫がほとんどなくなることから、河床への影響は直接的なものとなる。

またこれより下流において、比較的規模の大きい支川が合流する場合、支川から砂礫が供給されることから、ダム直下流で減少した砂礫供給の一部が補給される場合がある。この復元は、支川の流入が多いほど効果が大きいことが考えられ、下流における流域面積の大きさ及びその流入位置が、物理環境が変化する区間に関係することが考えられる。このことは、前出 3.3.1 にも示したとおり、評価する地点におけるダム集水面積割合がダム貯水池の影響度を検討する際の有力な情報の一つになりうることから、以下の事項の整理を行うことが必要である。

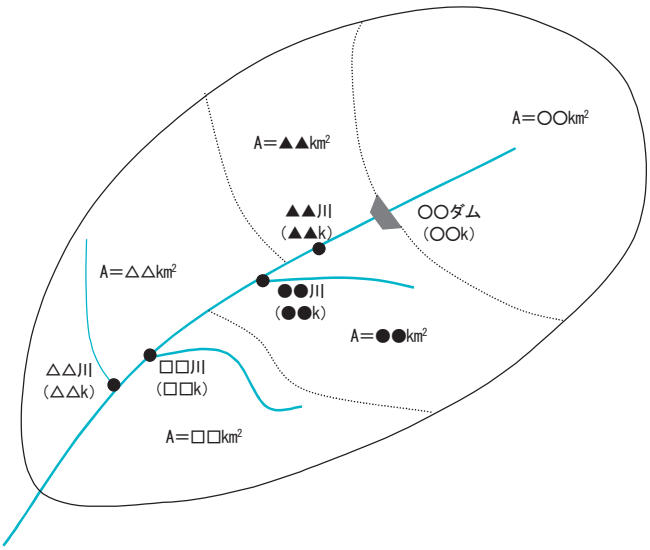


図 5.3-2 本支川流域の位置、面積

- ダム建設位置(本川ダム、支川ダム)
- 本支川合流位置(ダム直下～支川合流までの区間距離)
- 本支川の面積

(3) 地質

河川に供給される砂礫の量や質、砂礫形状やその大きさは、供給源となる流域の地質性状に関係する場合がある。河川に流下する砂礫の質や量を把握する方法の１つとして、地質構成を把握することが考えられる。

調査の視点として、「流域を構成する地質の分類」と「構成する地質の風化・崩壊状況の分類」が挙げられる。前者は発生する砂礫の成分としての質に関係し、後者は砂礫の大きさ（粒径という面から見た質）及びその量に関係する。

1) 流域を構成する地質

流域から発生する砂礫（成分としての質）に関係する情報として、以下の資料等から流域の構成地質を把握することができる。

- 土木地質図（各都道府県）（経済企画庁監修）
- メッシュ情報（国土細密数値情報）（国土地理院監修）

なお、メッシュ情報における地質の分類は、大きく以下に大分して整理されている。

- 未固結性堆積物
- 固結性堆積物
- 変成岩
- 火成岩

このうち、火成岩は「火山岩」と「深成岩」に分かれ、砂礫の発生は、後に示す風化の特性（表 5.3-2）からみて、これらの間で違いが生じている場合がある（島ほか 1994）。したがって、メッシュ情報を使用する場合は、必要に応じこの違いを土木地質図で確認する。

表 5.3-2　岩石の風化特性等（小出（1973）による岩石の風化作用の記述から西田・福田（1973）が図を作成、著者らが一部改）

岩種	粒度変化	備考	風化物（砂以下の土砂）の発生
花崗岩 閃緑岩	↗ 岩塊→礫→砂 基岩 ↘ 砂→シルト	風化層が厚く、マサになりやすい。 花崗岩よりも閃緑岩のほうが風化しやすい。 粘土分は少なく、大部分カオリン系である。 不連続粒度を示す。	大
斑れい岩	基岩→岩塊→粘土	極端に粘土化する。カオリナイト・ハロサイト、Al、Fe の酸化物が多い。	小
蛇紋岩	基岩→岩塊→粘土	極端に粘土化して吸水膨張する。	極小
石英斑岩 流紋岩	基岩→礫→砂	一般に風化しにくく、風化層は薄い。 流紋岩とされるものの中で、凝灰質なものは風化し、モンモリロナイトも少量みられる。	やや大
安山岩 玄武岩	↗ 岩塊 基岩 ↘ 岩塊→粘土	ち密なものは風化しにくいが、やや粗粒なものは細粒化する。	やや大
粘板岩 頁岩 泥岩	↗ 礫→砂→粘土 基岩 ↘ 粘土	粘板岩は礫・砂を経て粘土になるが、頁岩・泥岩は直接粘土になることが多い。 風化層は厚い。	大
砂岩	↗ 礫→砂 基岩 ↘ 砂	古生層、中生層のものは礫から砂へ、第三紀層のものは直接砂へ。	やや大
珪岩 チャート	基岩→岩塊→礫 ↘ 砂	風化しにくく、礫または砂粒として残る。風化層は薄い。	小
凝灰岩	基岩→岩塊→礫 砂→粘土	古生層、中生層のものは風化しにくいが、第三紀のものは粘土化しやすくモンモリロナイトなどの地すべり粘土になる。	大
片麻岩 結晶片岩	基岩→岩塊→礫→砂 ↘ 粘土	片理面から剥離して細粒化する。片麻岩は風化層が厚い。	大

表 5.3-3　切土法面における岩石の風化速度の目安（島ほか 1994、一部改）

風化速度	岩種・状態
はやい ↕ おそい	新第三紀層の頁岩・泥岩・砂岩など、段丘礫層、ローム、シラス、半固結状態の火山砕屑岩類
	新第三紀以前の頁岩、礫岩、圧砕岩、凝灰岩、凝灰角礫岩（集塊岩）、蛇紋岩、かんらん岩、グリーンタフ
	粘板岩、千枚岩、輝緑凝灰岩、輝緑岩、結晶片岩類
	ホルンフェルス、砂岩、深成岩類、片麻岩類、火山岩溶岩類（安山岩、玄武岩、石英安山岩、流紋岩）
	珪岩、チャート、石灰岩

2) 構成する地質の風化・崩壊状況の分類

砂礫の大きさ（粒径という面から見た質）およびその量に関係する情報を、以下の資料等から把握する。

- 表層地質図（各都道府県）（経済企画庁監修）
- 断層位置図（活断層研究会監修）
- 崩壊地の状況（国土地理院監修）（現地調査、航空写真、森林基本図等からの判読）
- 森林基本図・植生図（林野庁）

例えば表層地質図であれば、表層を構成する地質の状態を「岩体・岩片の硬さ」の観点から３段階で分類している。また岩体の軟い層（風化殻）の形成層厚を「風化殻の深度」の観点から３段階に分類している。一般には岩体の軟らかい風化殻が厚く堆積した状態の表層地質で形成される地域では、出水時において表流水とともに多くの土砂が発生する場合がある。また、このような地質の場合、河川沿いの斜面からは出水時の表流水によらない（例えば地震や人為的な行為等による）崩落土砂が発生することもあり、土砂の縦断的な分布の特徴を定性的に判断する上で有用な情報となりうる。この情報と、先の流域を構成する地質（成分としての質）を重ね合わせることで、出水時をはじめとするイベントにおいて、どのような大きさ（粒径という面から見た質）の砂礫がどの程度発生する可能性があるかについて定性的な判断に役立てることができる。

また、河川沿いの斜面における地質が安定的であり斜面崩壊を生じさせにくい地形であるかどうかなどの判断に役立てるため、現地調査や航空写真、森林基本図等を用いて、以下の観点から崩壊地の状況を整理することが考えられる。

- 斜面崩壊に伴う裸地の出現状況
- 斜面被覆の状況およびその植生の状態　等

(4) 地形

流域から供給される土砂は、前出の地質に加え、形成される地形形状に影響を受ける。土砂は、主に沢・河川を介し下流に供給されるものと、斜面崩壊その他の局所的な地形形状により縦断的に不規則に供給されるものに分けられる。前者は流域を構成する地形形状（流域勾配）に、後者は河川沿川に形成される斜面の形状や崩壊状況等に関係すると考えられる。地形形状（流域勾配）は、流域の地形の特徴を把握する上でも有用となる場合がある。

地形勾配を把握するために、以下の資料を整理する。

- 地形図（国土地理院監修）、メッシュ情報（国土細密数値情報）（国土地理院監修）

※メッシュ情報の例として以下がある。

- 地盤高

- 傾斜度（国土地理院監修）
- 起伏度（国土地理院監修）

【トピックス】土砂発生の可能性とその推定

河川に供給される砂礫の量や質、砂礫形状やその大きさは、供給源となる流域の地質性状に関係する場合がある。たとえば風化の進んだ深成岩（花崗岩等）で形成される流域や、摂理が多く入った裸地斜面などを有する流域や河道区間では、出水時において大小さまざまな粒径の礫や砂が多く発生する可能性がある。

調査にあたっては、机上でその特徴を把握した上で、現地での確認により土砂発生の可能性を推定するなどの整理を行うことが考えられる。また近年では、発生土砂量を流域の地質や地形（起伏度）、崩壊地の面積等から多重相関により算出する方法や、近傍類似ダムの実績堆砂量をもとに確率評価する方法等が提案されている（国土交通省河川局治水課・河川環境課 2005）。発生土砂量の推定を行うにあたっては、これらの方法を有効に使いながら検討することも考える。

(5) 砂防指定区域等の状況

先に示した地質や地形から見られる河川への土砂発生の可能性は、直轄または自治体が指定する「砂防指定区域」の存在や設置施設の状況からも推定できる可能性がある。

地形・地質の特性からこれまで土砂供給が多く発生する地域では、土砂災害の可能性の公開及び重点対策の実施範囲の明確化を目的とした砂防指定区域の設定がなされている。

1) 机上での確認

砂防指定状況については、土砂災害にかかるハザードマップ等で一般に公開されている場合があるので、これを対象に以下の情報を整理する。

- 砂防指定対象区域
- 砂防堰堤等の位置

なお、砂防堰堤等については比較的規模の小さいものも多く見られるため、実際には図面等で整理することが難しい。このため、現地での把握とあわせ整理することが望ましい。

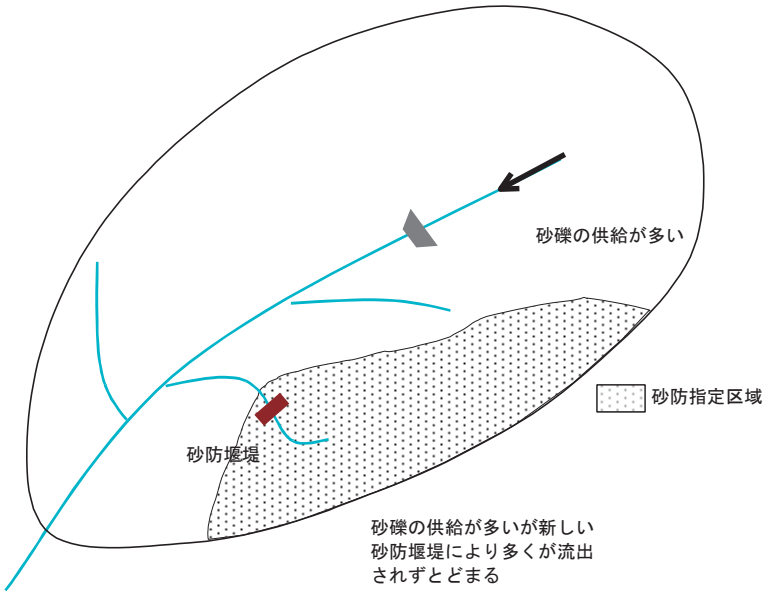


図 5.3-3 砂防指定区域の整理例

2) 現地での確認

机上で整理した砂防指定区域および設置されている砂防堰堤等の規模とその後（現在）の状況について、現地調査により把握を行う。調査内容は次頁の項目が考えられる。

- 砂防堰堤の形式および規模（高さ・幅）

・ 砂防堰堤の個数（縦断基数）

・ 砂防堰堤の上流湛水地における砂礫の堆積状況

なお、砂防堰堤のうち、近年設置例が多いスリット型構造は、コンクリート構造の堰堤とは土砂流下の観点で異なる特性を有するので、この点を考慮する。整理にあたっては、こうした堰堤の形式についても分類して整理する。

【トピックス】現地での確認におけるその他の留意事項

河川近傍に、たとえば採石場のある地域では、堆積していた砂が洪水時に河川に流入することが考えられる。平常時であっても堆積砂が河川に流入している場合もある。

砂は通過型（2.4 参照）であり、河床材料 m に与える影響は小さいが、材料 t としての局所的な砂のパッチの有無が動植物の生息に重要な要件となりえる場合においては、砂の供給源を明確にし、物理環境への影響度を把握しておく必要がある。この一例に示されるように、局所的かつ個別的事象を現地調査によって把握・確認しておくことが重要になる場合もある。



5.3.2 河道の調査

(1) 基本的な考え方

先に示した「5.3.1 流域・水系の視点からの調査」を踏まえ、現在形成されている河床の特性を縦横断的に捉える。これにより、動植物の生息場に供されている河道の物理的な環境を把握する直接的資料とする。

(2) 河床構成材料調査

1) 河床構成材料の粒径（粒度分布）

a) ダム下流河道を対象にした河床構成材料調査のポイント

2.7 の内容からわかるように、山地部にあることが多いダム周辺および下流河道の材料には、沖積平野の河川と異なる以下のような特徴がある。河床構成材料の調査は、この特徴を適切に反映できるように組み立てられなければならない。

- **特徴１**：材料 m であっても、その粒径の空間的ばらつきが大きい。材料 m がいくつかの粒径集団からなり、場所によって粒径集団が異なる。そして、同じ材料 m の中でも場所によって動きが随分異なることが起こりうる。この原因には、上流から幅広い粒径分布が供給され分級することだけでなく、支渓流からの岩石崩落など、土砂の供給源・ルートが多様なこともあげられる。

  沖積河川のように材料 m の平均的な粒度分布を求めるだけでは不十分であり、材料 m がどのような粒径集団から構成されるかを特定し、それらの粒径集団がそれぞれどのように平面的に分布しているかを知る必要がある。

- **特徴２**：場所によっては堆積層厚が薄く、すぐ岩盤になるところがある。岩盤までの厚さが小さい場合、その厚さの平面分布を把握しておく必要がある。岩盤が露出するかどうかで、河床変動および土砂流送特性も、表面の河床材料変化も、ハビタットの機能も大きく変わってくる。

b) 面積格子法・線格子法

ダム下流河川の物理環境検討では、表面の河床材料の把握を基本とする。そして、河床構成材料の調査方法は面積格子法または線格子法(建設省河川局監修 1997）を採用することを原則とする。必要に応じて、別途、通常の河床材料調査法（表層下の材料を、一定容積の分、丸ごと採取し，重量百分率で整理；以下「容積サンプリング法」と呼ぶ）を行い、表層下の河床材料の粒度分布として整理し、表面の粒度分布と比較できるようにする。

なお、その他の方法として平面採取法がある。この方法は河床表面にあるすべての石を採取することから、表層の河床材料調査法として一見優れているように見えるが、採取すべき石の定義が難しく、母集団の意味が曖昧になるという欠点を持つので、ここでは調査手法メニューとして取り上げない。

また、面積格子法または線格子法と平面採取法を 1 つの調査地点（コドラート）で併用し（たとえば、ある粒径以上を格子法で行い、それ以下を採取するなど)、2 つのデータを合わせて粒度分布を得ることは行ってはならない。これは、両者のデータの重み付けについて合理的な方法が存在せず、結果に意味を持たないからである。

ア　面積格子法

図 5.3-44 のように適当な大きさの枠を用いて、測定対象河床上の最大礫径間隔程度で糸を張り、糸の交点下の粒を採取する（真下の粒を忠実に採取する。それが礫なら礫粒を、砂なら砂粒を、シルト・粘土ならそれを採取する。礫に対象を絞っているわけでは無いので、真下が砂粒径以下なら、素直にその材料を採取すること。“石”だけを取るものと誤解して、真下が砂あるいはシルトであるにもかかわらず、すぐ横の礫粒を採取してしまうようなことはあってはならない)。枠や糸間の大きさは、河床に分布する礫の粒径から判断するものとする（少なくとも最大粒径以上)。一般には枠の大きさを 1m とし、糸間を 100mm とする場合が多い。この場合、全採取量は 100(10×10)個となり、粒径加積曲線を描くための点数としておおむね十分な数となる。なお、河床に分布する材料の粒径が大きく、1m の枠では採取量が少なくなってしまう場合は、枠の大きさを広げるなどして、試料点数を確保する必要がある。多くの河川の例では、試料点数を 100 点程度採ることで、粒径加積曲線を滑らかに描いている。

調査にあたっては、河村ほか（1970)、山本(1976)が参考になる。

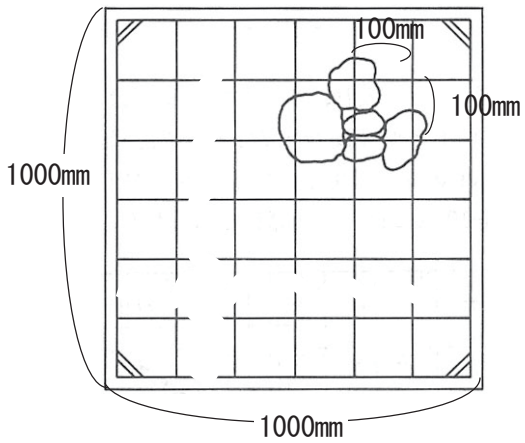


図 5.3-4　面積格子法によるサンプリング

集計にあたっては、以下の手順をとる。

（作業-1）採取した礫はノギス等で３径計測し平均粒径を算出
　　採取した砂はノギスのほか粒径が計測可能な方法で粒径を算出
　　↓
（作業-2）小さい順に並べ、粒径頻度（個数百分率）を整理

★粒径加積曲線は個数によって作成すること。すなわち、その粒径より細かい粒子の個数が全体の個数の何%かを表示する。決して重量で行ってはならない。重量で行うと、容積サンプリング法による重量百分率と原理的に差を生じ（粒径が大きい方にずれる）（山本 2004）、調査法の違い以前に、得ようとする情報の種類自体が原理的に異なってしまう。容積サンプリング法で得るものと同種の情報を、河床表面について得ようとしているので、上記の方法が必須となる。

　　↓
（作業-3）対数確率紙にプロット

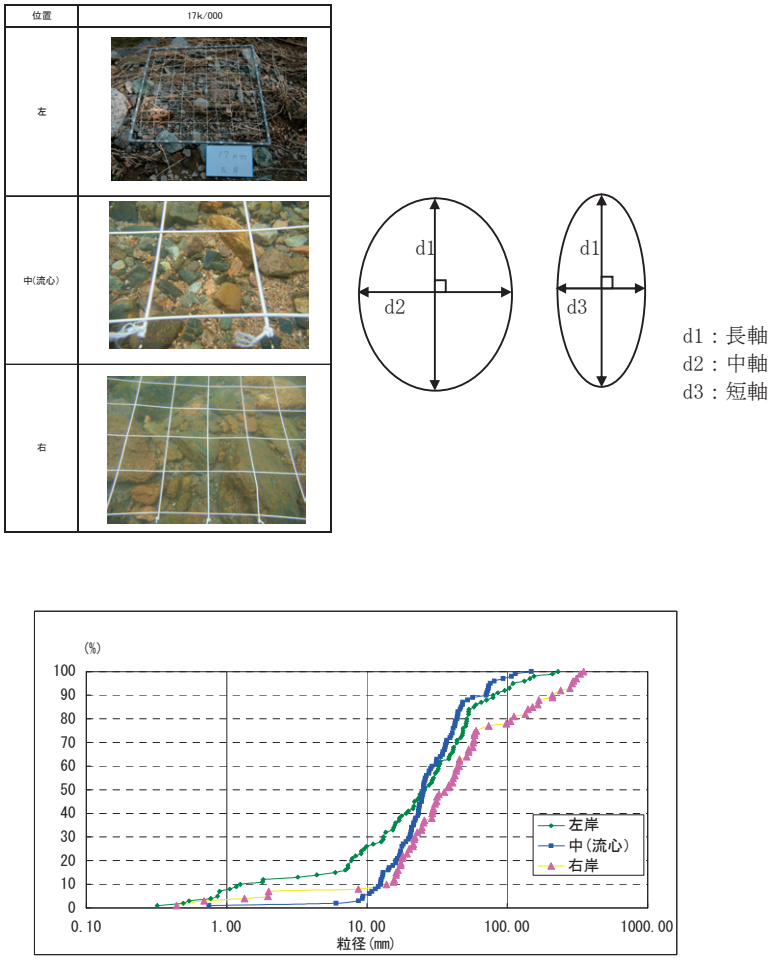


図 5.3-5　面積格子法による調査結果例

イ　線格子法

図 5.3-6 のように河床上に巻尺等で直線を張り、一定間隔（河床材料の最大径以上に設定）にマークして、その直下にある材料の粒径をはかる（真下の粒を忠実に採取する。それが礫なら礫粒を、砂なら砂粒を、シルト・粘土ならそれを採取する。礫に対象を絞っているわけでは無いので、真下が砂粒径以下なら、素直にその材料を採取すること。“石”だけを取るものと誤解して、真下が砂あるいはシルトであるにもかかわらず、すぐ横の礫粒を採取してしまうようなことはあってはならない)。巻尺の長さは、十分な粒径データ数が確保される長さとする。面積格子法の場合と同じに、重量でなく個数により粒径加積曲線を作成する。なお、河床材料の平面分布を把握するには、アの面積格子法の方が向いている。

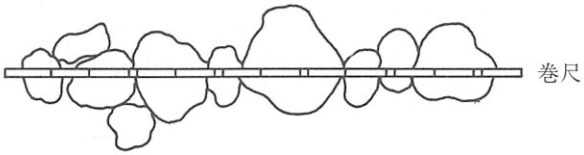


図 5.3-6　線格子法によるサンプリング

ウ　調査位置

河床構成材料の縦断方向の調査は、原則として、1km ピッチなど、一定間隔で機械的に行う。支川や沢の流入、蛇行、頻繁な勾配変化などにより河床材料が頻繁に変化する河川区間では、必要に応じ、ピッチを数百 m 毎など短めに設定する。

また横断方向の調査は、原則として右岸・流心・左岸の 3 ヶ所の材料を採取することが望ましい。河川が湾曲したり、みお筋蛇行している場合、左右岸のいずれかが存在しない場合がある。また複列化した河川では、みお筋の複数化により「左岸、みお筋、中州、みお筋、右岸」というように横断方向でそれぞれ多様な河床形態をなす場合がある。これらの場合においては横断方向の調査地点を追加（重点化）したり簡素化したりするなどの方法をとるものとする。

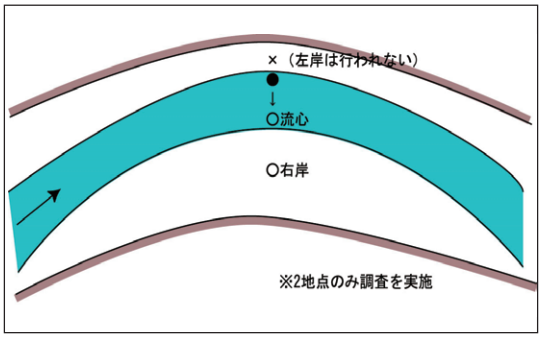


図 5.3-7　河床材料調査地点の簡素化

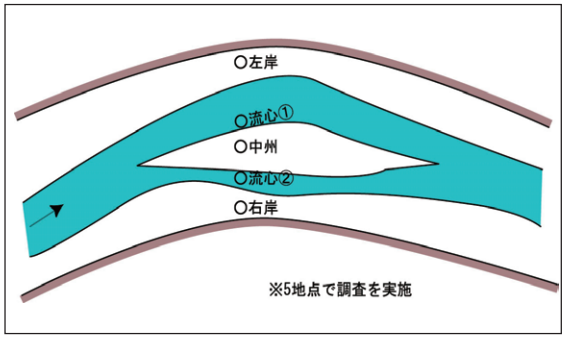


図 5.3-8　河床材料調査地点の追加

なお河川によっては、みお筋付近を除き河床が草本や樹林で覆われている（植生域の）場合がある。この場合、みお筋付近の礫露出域のみを基本に調査を行う。これは、植生域の河床表面が主に材料 s により構成されていることが多く，後述（6.2.2）する材料 m の動き方を予測するためのデータとして適切ではないことによるものである。なお、材料 s が予測上重要となる場合は、必要に応じ植生域の材料調査を追加することが望ましい（たとえば、山原ほか 2007)。

鉛直方向位置については、前述のように原則として表面の調査とする。ただし、必要に応じて、通常の河床材料調査（表層材料を剥いで、その下の河床材料を丸ごと採取して重量百分率に基づく粒度分析を実施→容積サンプリング法）を別途行い、表面とは別の粒度データとして整理する。これには、1)過去に河床材料調査を行っていて、その調査方法が通常の河床材料調査法による場合で、粒径の経年変化を把握したい場合、2)アーマリングの進行度合いなどを把握するため、表面とその下の粒度分布を比較したい場合、3)混合粒径の河床変動計算を実施するに際して、表面に加え、その下の粒度分布の情報も必要な場合、などが考えられる。

また、流心付近は水深が大きく、調査が困難な場合がある。その場合、以下の方法により粒径分布を把握する。

○ 流心付近を目視及び写真撮影し、場の粒径分布状態を確認した上で、類似の状態の場を作業のしやすい水際等で抽出し分析する。

○ 格子を当てた河床を写真撮影し、机上にて画像処理により判読し集計する（次に示す 5.3.2(2)1）c）を参照)。

［留意事項］

河床材料の調査地点を設定するにあたっては、以下に配慮する。

○ 調査地点（コドラート）は、周辺河床のうち特異な状況となっている箇所を選ばないこと

○ 面積格子や線格子を当てる場合、目視上河床を構成する材料に砂や大礫が恣意的に外されることのないよう注意すること

○ 流心付近の流れは速い場合が多い。作業には危険が伴うので、安全性には十分に注意すること

［調査位置を以上のように選定している理由について］

ここでは、表面の河床材料を大局的に把握し、ダム下流の縦断方向の変化特性をつかみ、また、当該河道区間が全体としてどのような粒径集団から構成されているか、また各粒径集団がどのような粒度分布を持っているかを把握することを目的としている。河床材料は、空間的に変化しており、前述のように山地河道ではその変化幅が特に大きい可能性が高い。そして、こうした空間分布は、流路の平面形、砂州、みお筋、瀬・淵の組み合わせなど、河床構造における相対的位置関係と深いかかわりを持つことが一般的である。このため、材料調査ポイントの空間配置を、河

床構造との関係を考慮して適切な代表性が得られるようにとるのが理想的である。しかし、こうした観点から、現場の河床構造を観察しつつ、偏らず調査ポイントを選定するには高い技術力を要し、それを標準的手法にしてしまうと、かえって、偏った材料調査点群が選定されてしまうことも考えられる。そこで、ここでは、機械的に一定間隔で位置選定を行い、多点で材料を調査し、多くの粒度分布を合わせて見ることにより、上記の目的を達成しようと考えている（5.3.2(2)1）d）を参照)。

河床構造と河床材料の平面分布との関係を踏まえた分析を目的とする場合には、5.3.2(2)2)a)で説明する河床材料の平面分布を把握する概略調査を行う。さらに精密な情報が必要となる場合は、リーチスケールにおいて河床構造がわかるような河床縦横断・平面形状の測量を行い、さらに河床材料調査を平面的にきめ細かく行うことになる（　5.3.2(2)2）b）に示すリーチスケールの平面分布調査を参照されたい)。その際においても、5.3.2(2)1）d）で述べるように、ここに示した河床材料調査の結果を整理・分析して得られる粒径集団の特性が基本情報として用いられる。

5.4.3(3)で述べる付着藻および底生動物調査の一環で行われる河床材料調査は、基本的に瀬を対象に生物との関係を分析するためのものであり、当該河道区間の河床材料の特性そのものを全体的に把握する目的は有していない。したがって、ここで述べた河床材料調査と 5.4.3(3)の生物調査の一環としての河床材料調査は、直接的には、互いに代用できるものではない。しかし、同じ河床状況に関するものであり、両方の分析結果を合わせて見ることにより、互いに補完的な情報として活用することがのぞましい。

なお、河床にある大きな礫は、河床変動特性や河床材料の移動特性を分析する上で重要であり（たとえば福岡 2008)、現場で材料を採取するのが難しいからと、それを避けるような調査を行うことは絶対にあってはならず、その意味でも、そうした調査上の制約が無く、大きな礫まで容易に測定できるという面積格子法や線格子法の特長を生かすことが大事である。

エ　調査時期と出水のタイミング

比較的大きな出水の直後では、一般に出水時に送流された多様な粒径の砂礫が一時的に堆積している場合が多い。これらは、平常時の状況や小出水等により徐々に流下し減少していく場合が多い。このため、調査時期が出水後どの程度経っているかを、分析において考慮することが必要であり、調査時期の選定においてもこのような観点からの留意が必要である。出水時における支川の土砂供給の可能性を推定する材料として、河床材料調査結果を用いるのであれば、出水直後の河床材料を分析することも有効である。

【参考】

「容積サンプリング法」、「面積格子法・線格子法」に相当する調査法は、米国ではそれぞれ bulk sample，Wolman point count sample と呼ばれる。また、平面採取法に似た方法とし

て、Klingeman surface sample がある。ただし、この方法では、表面に露出している石の最大粒径の少なくとも５倍程度の半径を持つ円を河床表面に設定し、その最大の石を取り除いた後に露出する河床深さまで、円内にある全ての材料を採取すると言うものである。平面採取法に比べ、採取する材料の範囲・深さが明確であり、石以外の細粒の土砂も採取対象になると言う長所がある。しかしそれでも、種々の粒径の石がある中で、決められた一定の深さまでの材料をきれいに採取することは実際には難しく、どの材料まで採取するかの判断に難しさ、ばらつきが残ると思われる。ちなみに、米国では、Wolman point count sample は表面の粗度の分析に適し、Klingeman surface sample は、大粒径まで動く水理条件下での土砂輸送に供される材料（いわゆる交換層の材料）の把握に適すると言われている。（Parker 2008）

なお、容積サンプリング法においては、最大粒径粒子に対して十分な量の材料を採取する必要がある。ここで対象としているような山地部河道では、巨礫が存在することが珍しくないなど最大粒径が大きいことが一般的なので、適切な丸ごと採取を行うには、狭い河道で大量の掘削を行うことになり、実際上難しい。この点においても、採取を必要としない表面の河床材料把握を基本にすることには合理性がある。それでも容積サンプリング法を選択することは構わないが、最大粒径に対して極めて不十分な量の材料しか採取しないなど手法の主旨に合わないやり方で、形だけの（活用が難しい）データを作るような態度は厳に慎むべきである。

【トピックス】面積格子法による調査の例

みお筋付近の調査を面積格子法で行う場合、その多くが水中作業となる。河川の流速が比較的緩やかであり、安全管理上調査が可能と判断された場合は、以下の方法で調査を行うことが望ましい。

【水深が膝下程度の場合】

格子点の下にある材料を正確に採取するにあたり、流水による波立ちや太陽光の乱反射を防ぐため、箱眼鏡等を用いて調査を行うなどの工夫が必要である。





水深の浅い箇所の面積格子調査

※光の反射を防ぐため箱眼鏡で格子点下の材料を確認し採取

【水深が腰高以上の場合】

ダイバーによる潜水作業により行う。調査にあたっては、ダイバーが調査可能な流速・水深であること、格子枠が浮き上がらないよう工夫することなどが必要である。





水深の深い箇所の面積格子調査

※ダイバーにより水中内で作業

なお、調査に当たっては調査員自らが河床を攪乱することがないよう配慮する必要がある。

また、調査には危険が伴う。少しでも安全管理上問題がある場合は、水中の材料と類似した場を浅瀬や水際等に求めるなど、調査を安全に行うよう十分考慮する必要がある。

c) 画像処理法

河床構成材料の調査は、作業に時間と手間がかかるほか、経済的な負担が大きいといった課題がある。また、調査結果は現況河川の分析や計画等に重要な意味をもつが、単独では「データの積み上げ」という位置づけになりがちであり、分析が後送りになりがちである。

このため、一部の河川では、河床に分布する材料を巨視的にとらえ、これをグルーピングすることで調査地点の選定を行うとともに、その地点の材料を画像処理することで調査の効率化を図っている。この方法は精度的に見てまだ検討段階であるが、考え方として紹介する。

対象区間の河床に分布する材料の粒径の撮影は、以下が実用化されている。

・衛星写真（ICONOS データ、解析限界　1m）
・セスナ、ヘリコプターによる空中写真（解析限界　飛行高度より 0.5m が可能）
・バルーン、ラジコンヘリによる空中写真（解析限界　飛行高度より 0.05m が可能）

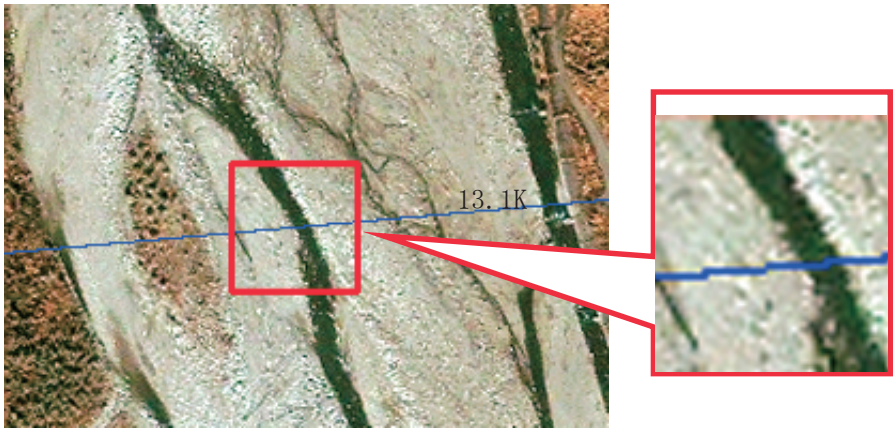


図 5.3-9 (1)　衛星写真（ICONOS）による

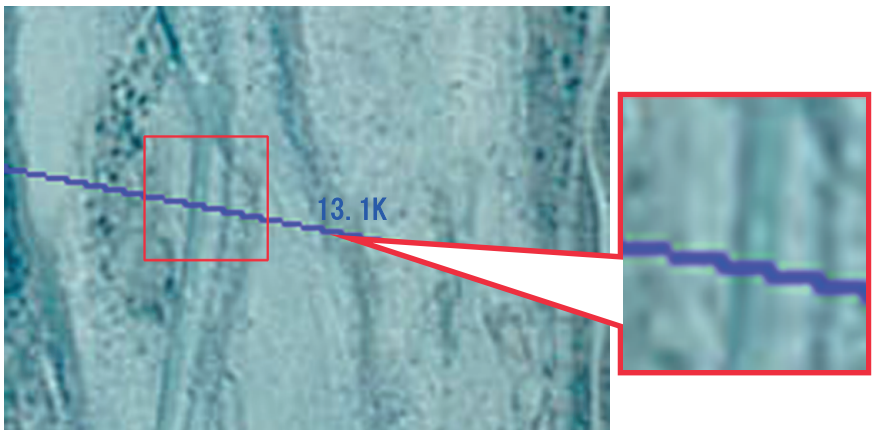


図 5.3-9 (2)　セスナ、ヘリコプターによる



図 5.3-9 (3) バルーン、ラジコンヘリによる

撮影された航空写真が高解像度の場合、この画像を用いて画面上で粒径区分を行う。具体的には、撮影された画像をゆがみ補正したうえで、材料を画面上でトレースするとともに着色する。その後にスキャニングを行い、色ごとの材料の投影面積を読み取り、直径を算出する。ここに直径は材料を正円と仮定し面積式（$A=\pi r^2$）から求める。着色する色は、スキャニングするソフトに対応したものとすることで、粒径毎の判読が可能となる（図 5.3-10 参照)。集計は面積格子法と同様、個数百分率により行う（図 5.3-5 参照)。

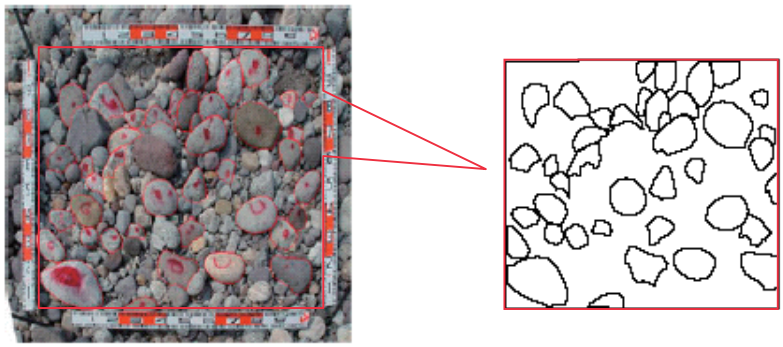


図 5.3-10 礫の画像処理による分析イメージ（山崎ほか 2007）

この方法のメリットは、画面上で粒径区分が整理できることであり、デメリットは、細粒材料に対する判定が難しい場合があることと（解像度の問題)、画面上での作業に時間を要することである。「画面上での作業に時間を要する」とは、撮影した画像にある礫の粒径をすべて計測する必要があることをさす。個別の礫の粒径を自動的に画像認識させる技術の開発が望まれる。

d) 河床構成材料の定量的分析

河床構成材料の分析においては、2.2 で説明したように、材料 m、材料 s、材料 t に分けて考えることが重要であり、分析の第一歩となる。河床材料調査から、これらの区分を行った事例を以下に示す。

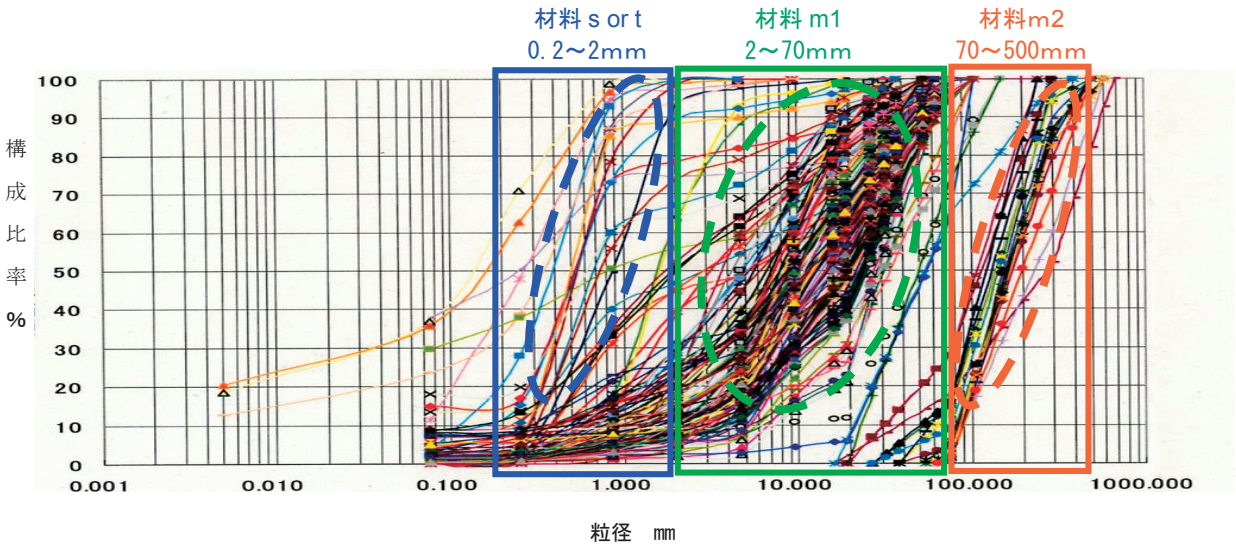


図 5.3-11 粒径加積曲線と材料 m, s, t の例１（再掲）

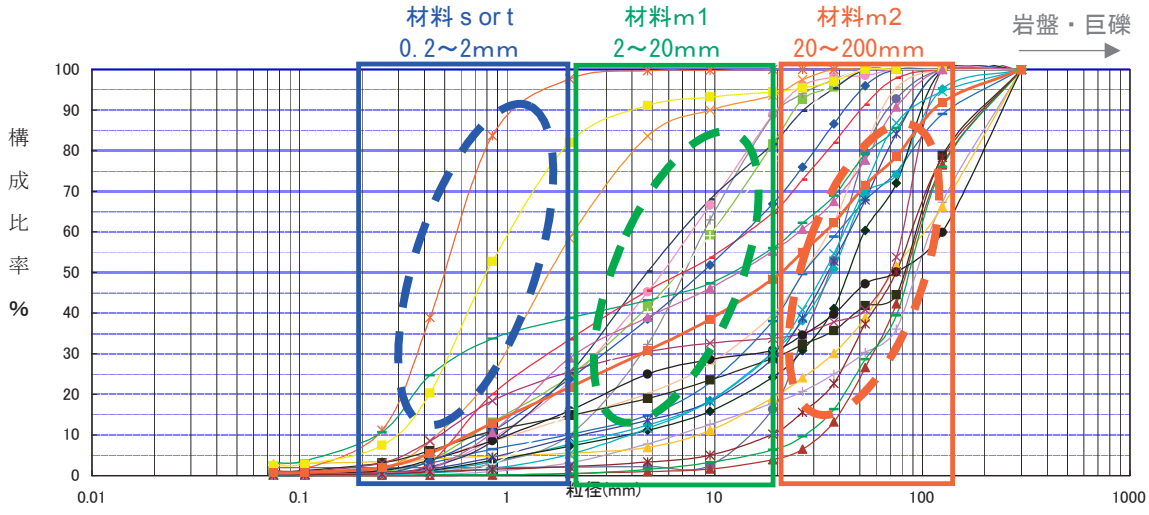


図 5.3-12 粒径加積曲線と材料 m, s, t の例２（再掲）

図 5.3-11、図 5.3-12 に示す粒径加積曲線の２つの例は、それぞれ同一セグメント区間における河床表面に関する材料調査から得られた粒度曲線を全て重ね合わせたものである。このように全て重ね合わせて１つの図に表すことで、当該区間の材料分布の全体像を掴むことができる。材料 m は図中の緑や橙から、あるいはその両方から構成されていると見ることができる。図中の青は、湾曲部の内側に形成されている砂州や岩盤・巨礫の裏側（下流側）、堰の直上流部に分布している場合が多く、これらは材料 t に分類される、あるいは材料 s になるものと分類できる。

図 5.3-1 のデータにおいて、m2 は m1 に対してかけ離れて大きい。実際、山腹からの直接供給が原因であり、上流から流送されてそこにあるものとは違うと見ることができる。このように、材料 m の中でも、動きの特性が根本的に異なる集団を特定することが大切である。

以上の整理・分析は、河床材料の特性を理解する上で極めて重要であり、また、この結果は、次項 5.3.2(2)2)で説明する河床構成材料の平面分布特性の把握に用いられる。

2) 河床構成材料の平面分布

a) 広域的な整理・分析

検討対象とする区間における河床材料の状態やこれにより形成される瀬淵の分布等を概略的に把握することを基本とする。整理・分析の項目は以下とする。調査の流れを図 5.3-13 に示す。

○ 河床構成材料の平面分布（材料 m（m1、m2、･･･）、s、t などの平面分布）
○ 浮石、はまり石等の分布
○ 瀬淵の分布

河床構成材料の平面分布には、上記に加えて、岩盤・構造物・巨礫の局所的集積など粒径集団で表せないものを入れることが必要である。特に岩の存在は、山地河道において重要な情報となるので、その分布を適切に把握することが大事である。

図 5.3-13 に示すように、ポイントでの河床材料の粒径分布の調査結果、それに基づく粒径集団の特定、その粒径集団を単位とした平面分布の把握が基本となる。これらを一方向的に１サイクル行えば満足な結果が得られるとは限らず、これら３つの要素が整合するよう、必要に応じて各調査を繰り返し、現場状況把握の精度を高めていくことが重要である。このプロセスを経ることで、当該河川区間の河床材料の成り立ちについての理解を深めることができると期待される。逆に、一通りの調査を終えた段階で、不整合があるのに平面分布を確定しまうような形式だけの調査は避けなければならない。

・河床構成材料の粒径（粒度分布）の調査（5.3.2(2)1）b)、場合によっては c)も）
　既往調査がある場合には、調査法の妥当性の確認

↓

・当該河川区間の河床を構成する粒径集団の整理・分析・特定（5.3.2(2)1）d)）

↓

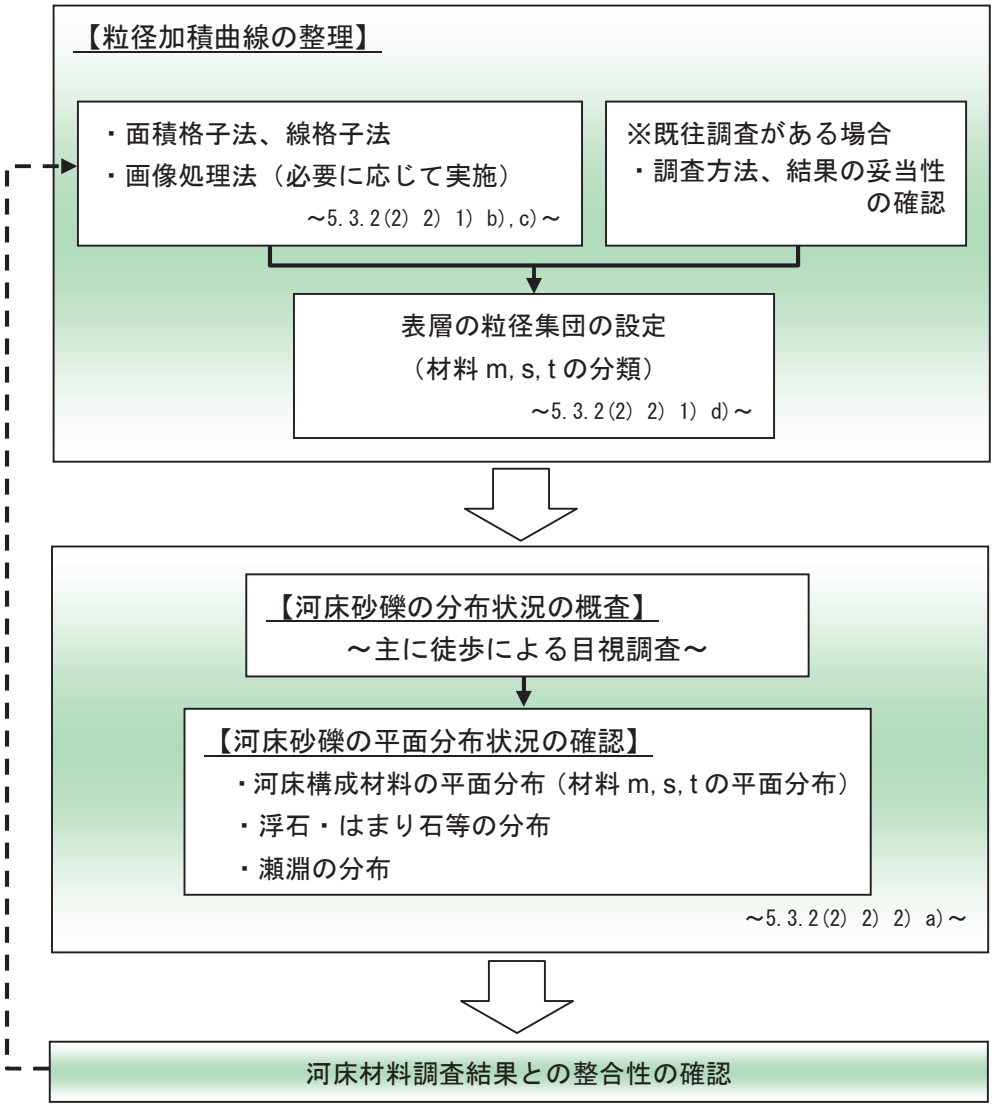
・河床砂礫の平面分布状況の概査（本項 5.3.2(2)2）a)参照）

↓

・河床砂礫の平面分布状況の把握→材料 m（m1、m2、･･･）s、t の平面分布（必須）、岩盤・構造物・粒径集団で表せないもの（必須）、浮き石・はまり石等の平面分布（必要に応じて）、瀬・淵等の河床形態の平面分布（基本的に実施）

↓

・河床材料調査結果との整合性の確認→整合性に問題があれば、必要に応じて追加調査を行い、ポイントの調査結果（粒度）と平面分布の調査結果が大局的に整合するレベルの調査に到達するようにする



図中の番号は章及び項番号

図 5.3-13　河床構成材料の平面分布調査方法

ア　浮石、はまり石等の分布（必要に応じて調べる）

浮石、はまり石の定義は図 5.3-14 に示すとおりである。その定量的な根拠は明確ではない。現地調査により、目視確認を行うなどにより整理する。調査は、図 5.3-13 における「河床砂礫の分布状況の確認」時にあわせて行うことが望ましい。

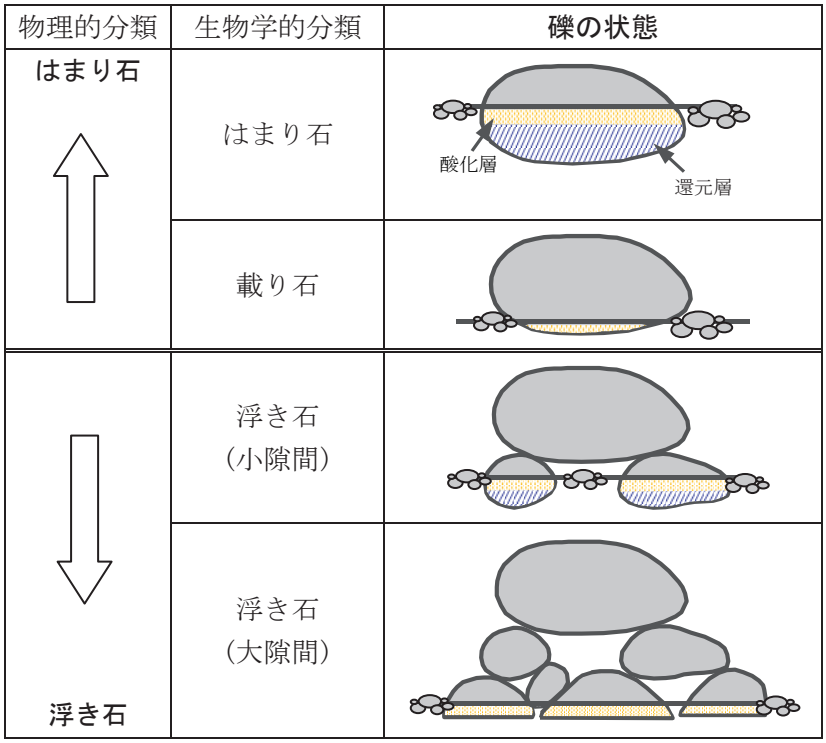


図 5.3-14　礫の状態の定義（竹門ほか 1995　一部改）

イ　瀬淵の分布（基本的に、調べておくのがよい）

瀬淵の定義は、河川生態学では一般に以下によっている場合が多い（水野・御勢 1972）。

早瀬：水深が浅く流速が早い。水面には白波が立ち河床は礫が浮石。

平瀬：水深は浅く流速は比較的早い。水面はしわのような波が立ち河床は沈み石。

淵　：水深は深く流速は緩い。水面は波立たず河床は砂で覆われていることもある。

現地調査により、目視確認を行うなどにより整理する。調査は図 5.3-13 における「河床砂礫の分布状況の確認」時にあわせて行うことが望ましい。なお、これらは観測する流量や観測者の感覚に依存する場合が多い。したがって、瀬淵の調査にあたっては、どのような状態を持ってこれを位置づけるか、事前に定義付けを行うとともに、現地においてこれが判断可能となるよう調査手法に工夫をくわえる必要がある。

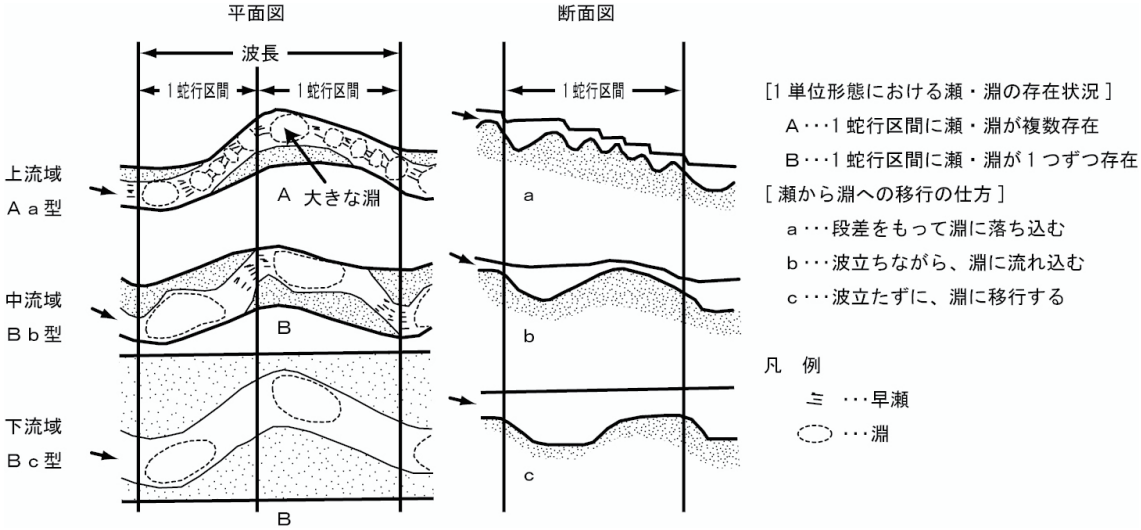


図 5.3-15　河川形態の基本的な 3 型の模式図（可児 1944　一部改）

ウ　調査結果の整理

図 5.3-16 に整理例を示す。

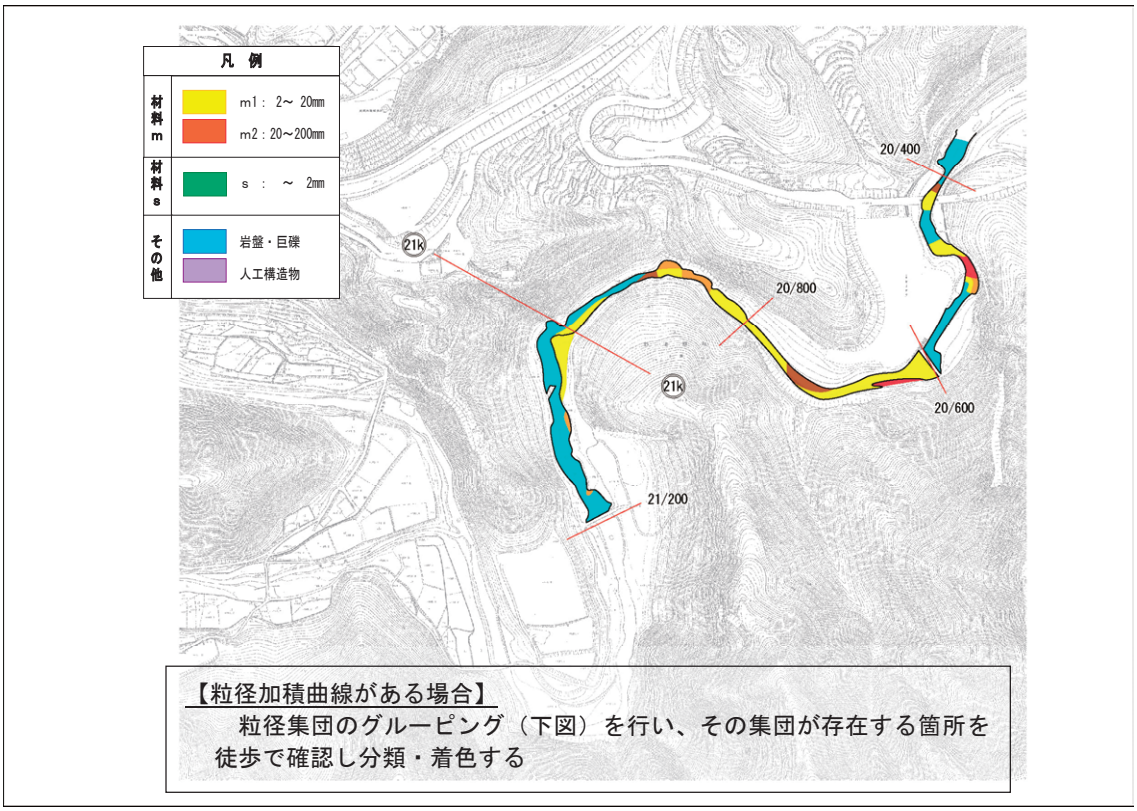


図 5.3-16 (1)　河床構成材料の平面的分布の把握（材料 m, s, t の分布）

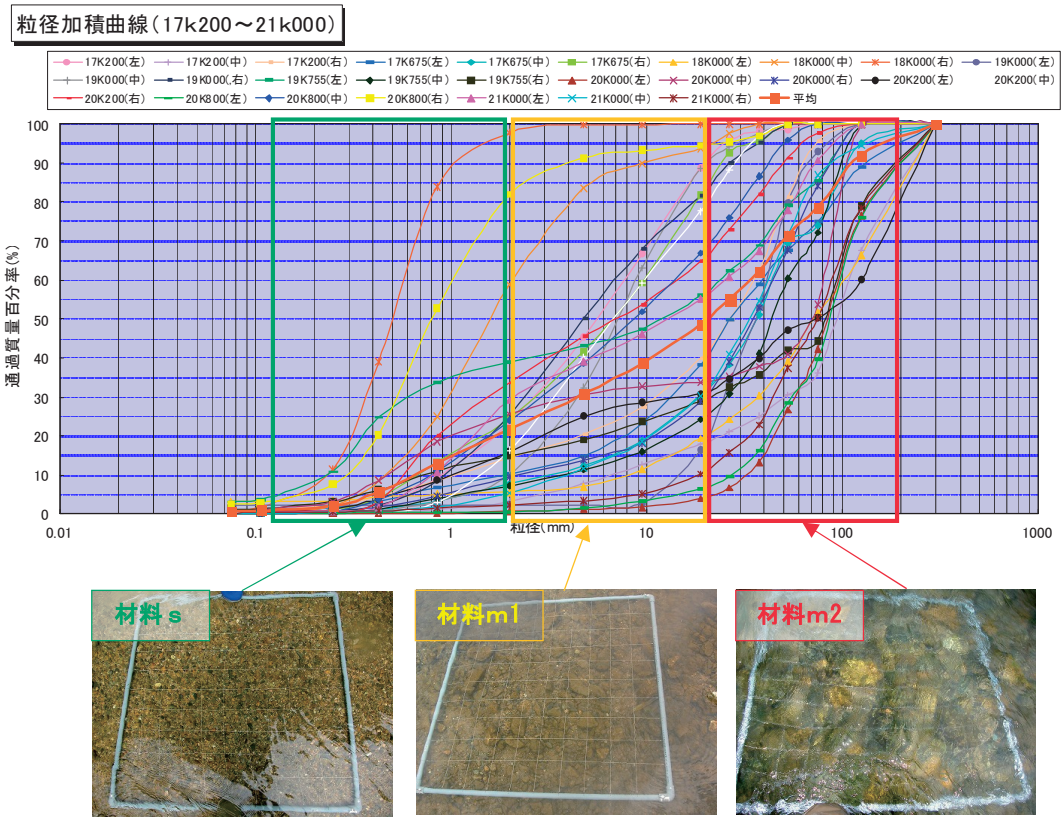


図 5.3-16 (2)　河床構成材料の粒径分布の把握（材料 m, s の分布）

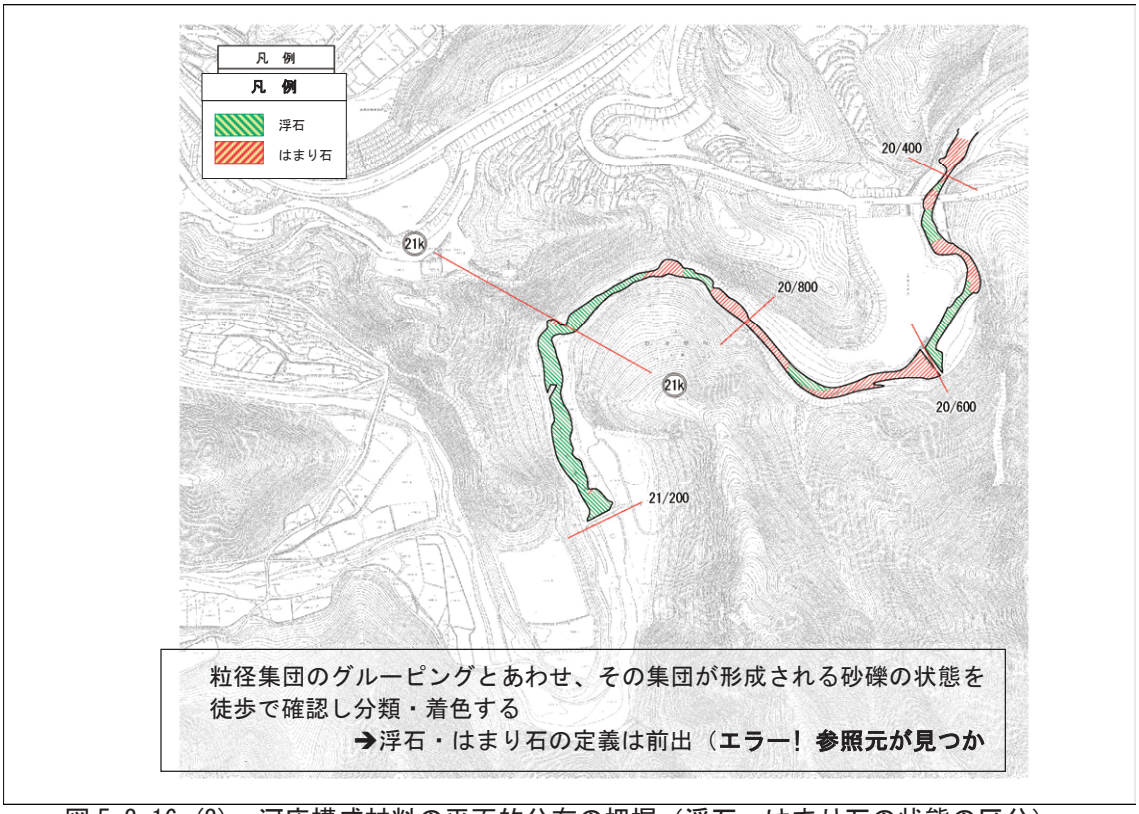


図 5.3-16 (3)　河床構成材料の平面的分布の把握（浮石・はまり石の状態の区分）

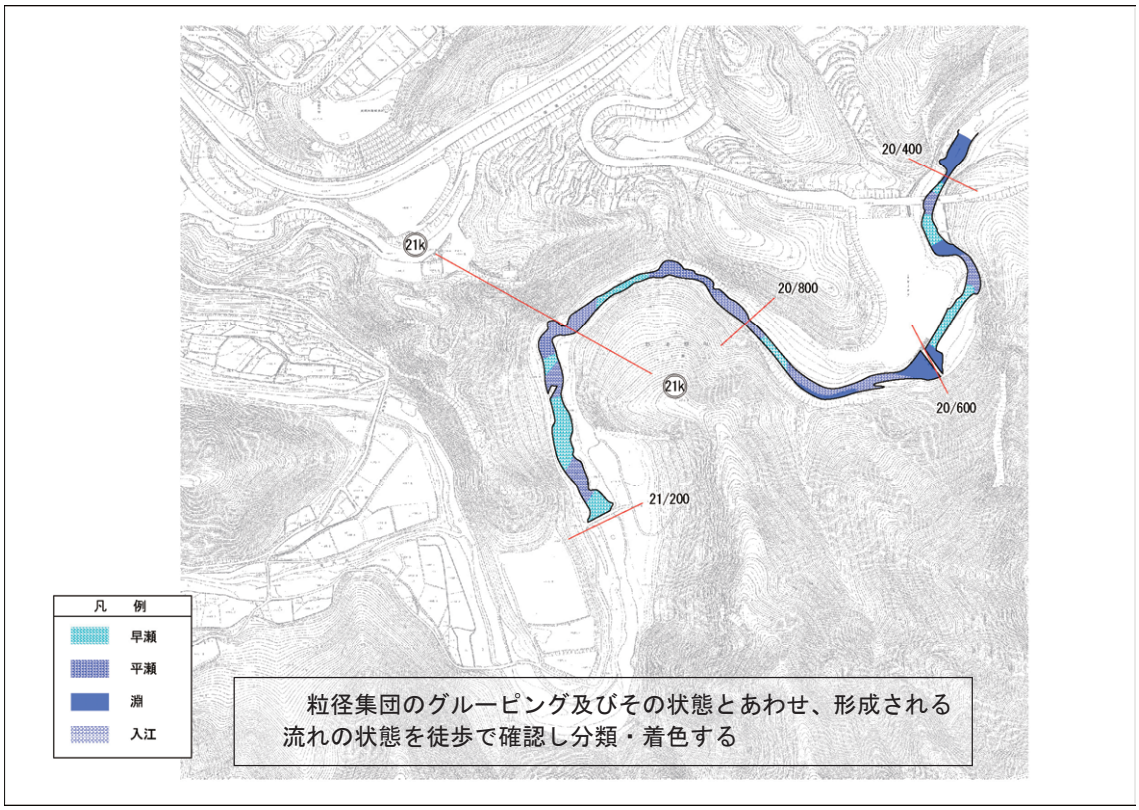


図 5.3-16 (4)　河床構成材料の平面的分布（瀬淵の形成区分）

【トピックス】砂州の形成、階段状河床の形成

一般にダムは山間部に建設される場合が多く、河川は単列砂州形状をなす場合が多い。しかし場合によっては、ダムサイト付近が複列砂州の形状をなし、みお筋が出水により大きく変化する場合もある。

単列砂州には、曲がりの平面形状によりできる固定砂州と交互砂州により形成される砂州がある。このような河川では、平瀬・早瀬・淵が縦断方向に概ね規則的に出現することが多い。

またダムは、射流が生じるような河床勾配でかつ川幅の狭い山間渓谷地に建設される場合も多い。このような河川では、大礫や巨礫が横断方向に並び、肋骨のようなステップが複数形成された階段状河床が見られる。流れは下流の比較的浅いプールに落ち込み、直後に跳水を起こす（長谷川 2005；目黒ほか 2001；滝澤ほか 1998）。

階段状河床の形成条件として、芦田ら（芦田ほか 1984）は、①河床材料が混合砂であること、②流れが射流であること、③初期河床で平均粒径以上の砂礫が移動し、分級活動が活発に起こること、④最大径の礫が移動しないこと　を指摘している。この形態は比較的強固であり、形成時の流量が大きなものほど壊れにくい。

ダムの供用により、河床の洪水流量が減少する場合には、こうした砂州や階段状河床という河床形態を形成させる作用が弱くなることから、種々の要因により乱され変形させられた場合、元の形が徐々に不鮮明になることが考えられる。あるいは、砂州を移動させる作用が弱まり、固定化することも考えられる。撹乱が小さくなり、砂州や階段状河床の固定化や砂州の樹林化といった現象が生じる可能性がある。

河床構成材料の調査や河川測量を実施するに当たっては、あわせて砂州や階段状河床の形成状況や現在の撹乱の状況を推測できるような痕跡等を把握しておくことが望ましい。

b) リーチスケールの平面分布調査（参考的例示）

ア 調査目的

例えば動植物の生息場として河床砂礫を見た場合、5.3.2(2)1)b)で示した 1km 間隔などの調査位置設定では、空間的に粗すぎ、生息場の材料 m の粒径やその面的な分布状態を正確には把握できない。このため、動植物の観点から生息場を詳細に把握する必要がある場合は、河床材料の面的な分布を、リーチやマイクロハビタットのスケールで把握する必要が出てくる。このために、調査地点や頻度を増やすなどの詳細化が必要となる。

以下に示すリーチスケールの面分布調査の参考例は、河床砂礫の平面分布の経年的変化を把握することにより、ダム下流河川の河床形態の変化特性に関する基礎資料を得ることを目的とするものである。こうした調査手法はまだ確立されておらず、試行しながらより適切な方法を見いだしていくというスタンスが求められる。

イ 調査地域

・瀬淵の 1 セット（平瀬～早瀬～淵）を把握可能とする河道長

あるいは

・支川の合流前後の変化が把握可能な河道長

ウ 調査方法

河床を 5m（横断方向）×10m（縦断方向）のメッシュに分割し、その交点に分布する砂礫の粒径分類を整理する。主な調査範囲は、洪水の影響を強く受ける領域とし、樹木が生育する箇所は除外するなどの配慮が望ましい。なお、中州や高水敷等、容易に冠水しない箇所は、省くか、横断調査ポイントを粗く設定するなど、省力化をはかる。

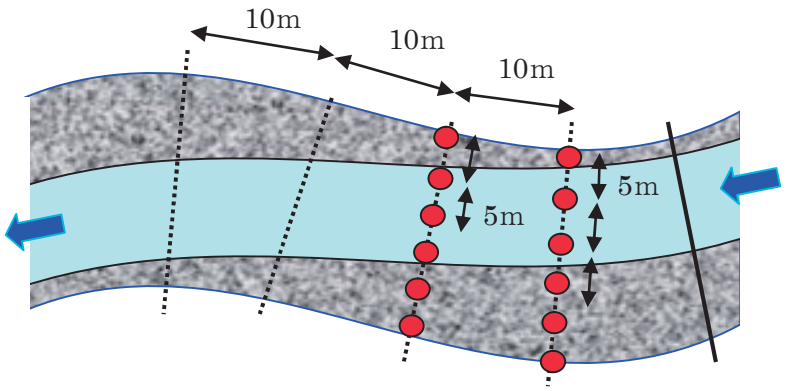


図 5.3-17　リーチスケールの面分布調査地点（例）

砂礫の粒径をあらかじめいくつかに分類しておき、それぞれの割合の平面分布状況を調査して整理する。



	砂	小礫	中礫	大礫	状態
比率（%）	10	70	20	0	はまり石



	砂	小礫	中礫	大礫	状態
比率（%）	20	30	30	20	浮石

2 mm以下（砂）
2～16 mm（小礫）
16～64 mm（中礫）
64～256 mm（大礫）

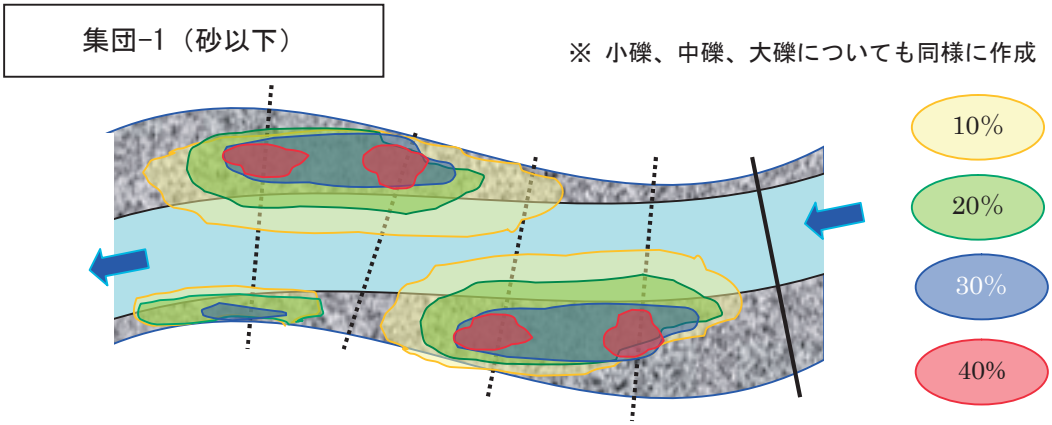


図 5.3-18　面分布調査結果の整理例

(3) 河川測量

1) 河道測量の必要性

河道に働く物理諸量を把握する上で、河道の縦横断測量成果は必須である。河道の基本諸元として、近年の河道形状（縦横断形状）を整理する。現況の分析に用いることから、至近年であることが望ましい。なお、場合によっては測量がなされた最新年が過去数ヶ年にまでさかのぼる場合がある。その際は、測量がなされた年以降、近年までに大きな洪水等による変化（被災や災害復旧による改修等を含む）が生じていないことを確認する。

また、河川管理区分から、必ずしも事業者が全ての必要調査区間における測量成果を有していない場合がある。その際は、関係する管理者（例えば都道府県など）から資料を入手するなどの対応が必要である。なお、関係する管理者も測量の成果を所有していない場合は、事業者が新たに測量を実施するなどの対応も必要である。

測量区間は「1.3　調査対象範囲について」を参照する。

たとえばダム直下流における砂礫の流送特性を把握することが必要な場合（たとえば河床変動計算を実施する場合の上流境界条件としてなど；6.3.3 参照）において、ダムサイト付近の河床勾配が縦断的に連続せず急変する場合は、ダムサイトより上流の河道の検討も必要となる。この場合には、ダムサイト上流（背水区間より上流の流水区間で上流からの土砂流送を追跡可能な区間）までの測量を実施する必要がある。

2) 水準測量

河川形状の調査は、多くの河川で定期的に実施されている水準測量を基本とする。

測量の区間距離は、河川管理等において用いられる間隔を基本とする。過去の測量成果との重ね合わせを可能にすることにも配慮する。

なお、以下の場合は測量区間の重点化・簡略化が考えられる。

【重点化】

河床構造と河床材料の平面分布との関係を踏まえた分析を目的とする場合で、精密な情報が必要となる場合は、リーチスケールにおいて河床構造がわかるような河床縦横断・平面形状の測量を詳細に行い、さらに河床材料調査を平面的にきめ細かく行う（5.3.2(2)2）b)を参照されたい）。

【簡略化】

河床形状がおよそ一様であり、関係する資料から河床勾配に大きな変曲点が無いことが明らかな河川を対象にする場合，以下の点を踏まえつつ簡略化を考える。

・過去の測量成果がある場合は、その測量線と合わせること（過去からの形状変化を分析する資料ともなるように）。
・河床形状の変化を適切に表現できること。

3) レーザープロファイラ調査

過去に測量実績が無いか不足していて、かつ社会経済的に見て定期横断測量の新規の実施が難しい河川では、LP（レーザープロファイラデータ）を用いた河川測量が用いられている（たとえば、中小河川整備状況評価手法検討国総研チーム 2006）。LP（レーザープロファイラデータ）は地表に向かってレーザーを発射し地表の高さを調べる方法である。この方法は、調査が定期測量に比べ安価で早いことから、一部の平地河川において採用されている。

この調査方法は以下の点で課題が残されている。

○ 樹林が繁茂する山間渓谷部の横断形状把握が難しいこと

○ 水面下の形状が把握できないこと（ただし山地河道では水深がさほど大きくないので、その点では有利である）。

○ 河道内植生をある程度認識できるが、その精度にばらつきがあること。

これらについては、今後一層技術開発が必要となる。

(4) 堆積層厚調査

2.7 に述べた山地河道を考える上でのポイントからもわかるように、堆積層厚は、ダムの供用による河床砂礫の変化を予測するために重要な項目である。たとえば、堆積層厚が厚く堆積している河床では、ダムの供用により材料の流出が供給を上回れば、河床は低下し材料 m が変化することが考えられる。しかし、堆積層厚が薄く堆積している場合は、河床低下は小さく材料 m はなくなり露岩化するといった現象が生じるかもしれない。

また、これらの現象を後述（6.3.3.（1））する河床変動計算により予測する場合、予測結果は堆積層厚の設定により異なることになる。

堆積層厚は、現存する横断構造物（橋梁、堰堤等）の工事におけるボーリング調査図面を基本とする。またこれらの資料が存在しない場合は新たにボーリング調査を行うことが考えられる．あるいは両岸ともに岩盤に囲まれているか、地質上同様か、といった観点から堆積層厚を簡易に推定することも検討する。

(5) 支川の河床構成材料

河川によっては、ダム下流河道とこれより下流に合流する支川の河床構成材料や土砂供給特性が異なる場合がある。たとえば支川の地形が急峻で、風化の進んだ地質により構成されていたり、河岸の土砂崩壊が著しい場合には、出水時に多くの土砂がダム下流河道に合流すると考えられる。

支川からの土砂流入が、ダム下流河川において生じる材料変化の傾向に有意な影響を持ちうると考えられる場合には、支川の河床構成材料やその発生源について整理することが望ましい。分析の観点については、第３章末尾に参考として示したので参照されたい。

河床構成材料の調査方法は、5.3.2(2)と同様である。

(6) 人為的影響の実態調査

河道は、治水上の洪水防御や利水上の安定取水、さらには河床材料の利用等を目的として改変が行われてきた。この改変は、出水等による自然の攪乱とは異なるため、場合によっては河床形状や河床構成材料が自然の作用によるものとは異なった状態になる場合が見られる。このような河川では、後に実施するダムによる河床形態の変化を分析する上で、その影響を考慮することが大事になる。このため、河川の整備履歴やこれまで受けてきた様々な人為インパクトを整理する必要がある。

対象としては以下が考えられる。

○砂防堰堤（不透過型、透過型）
○既設ダム（貯留型ダム、流水型ダム）
○利水用取水施設（農・工・上水用、発電用）
○河川改修（堤外地の掘削）

1) 砂防堰堤（不透過型・透過型）

ダム上流や支川に設置されている砂防堰堤は、現在の土砂供給特性を把握するために重要な情報であることから、以下について調査を行うことが望ましい。

○堰堤の構造
○堆砂の状況（堆積する土砂粒径、堆砂形状、堆砂量）
○堰堤上下流（いずれも流水区間）の河床材料
○砂防指定区域の状況

2) 既設ダム（貯留型ダム、流水型ダム）

対象ダムの上流に既設ダムが存在する場合、ダム供用年数にもよるが、既にその河川は既設ダムの影響を受けた河川である場合が考えられる。

既設ダムが存在する場合は、以下について調査を行うことが望ましい。

○既設ダムの建設年、供用期間
○既設ダムの洪水調節方式（計画）及び流量調節実績

○既設ダムの平常時放流量（減水区間の有無とその区間）
○既設ダムの堆砂状況➔発生土砂量及び土砂粒径の推定に重要

3) 利水用取水施設

利水用取水施設は、大きく「ダム型」と「堰堤型」に分けられる。このうちダム型は、主に農業用ダムや水力発電用ダムとして供用されており、堤高 15m 以上の貯留型構造である。ダム型は土砂を止めるという観点で見れば、基本的に前出の「2) 既設ダム」と同じインパクトであることから、ここでは、「堰堤型」を対象とし、以下に「利水堰」という。

対象ダム上下流に利水堰が存在する場合は、以下の情況について調査することが望ましい。

○利水堰の建設年、使用期間
○利水堰の構造(ゲート敷高と河床高の関係)
○利水堰の運用方法（開閉操作規定）
○湛水池の堆砂状況（湛水池河床高、堆砂量と経年変化）
○湛水池の河床材料
○湛水池上下流（いずれも流水区間）の河床材料

4) 河川改修

現在護岸施工や掘削、砂利採取などが実施されている河川では、工事により一時的に撹乱されることで出現する細粒砂礫が、材料 m 及び材料 t の空間的な広がりを誤って理解させる要因ともなりえる。このため、ダムによる変化と直接改変である護岸工事による変化を分離することを目的として、以下の調査を行うことが望ましい。

○工事範囲及びその工法（仮設工法を含む）
○過去（近年）の工事実施の有無
○土砂掘削位置及びその期間
○土砂掘削量及びその時期
○掘削した材料の粒径

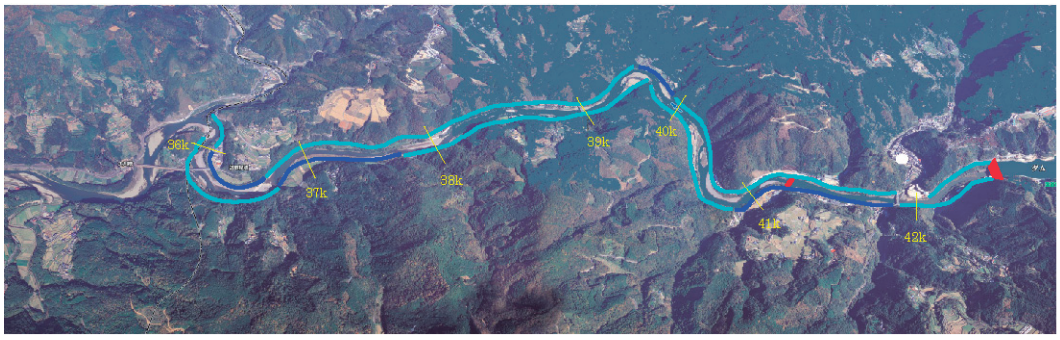


図 5.3-19 護岸の整備状況の整理例

(7) 河道の歴史的変遷

1) 過去の洪水履歴

河川においては、過去に大小さまざまな出水が繰り返し発生することにより、流量や河床構成材料に変化を及ぼし、現在に至っている。この変化を及ぼす外力として、過去にどのような出水が発生してきたか把握することを目的とし、過去の洪水履歴を整理する必要がある。ここで言う洪水履歴とは、過去に発生した洪水流量の大きさおよびその頻度、これにより発生した洪水被害の概況をさす。

a) 洪水流量

採用する流量は、各河川で観測される主要な地点の時間流量とし、これを年発生状況がわかるよう時系列に並べることにより整理する。

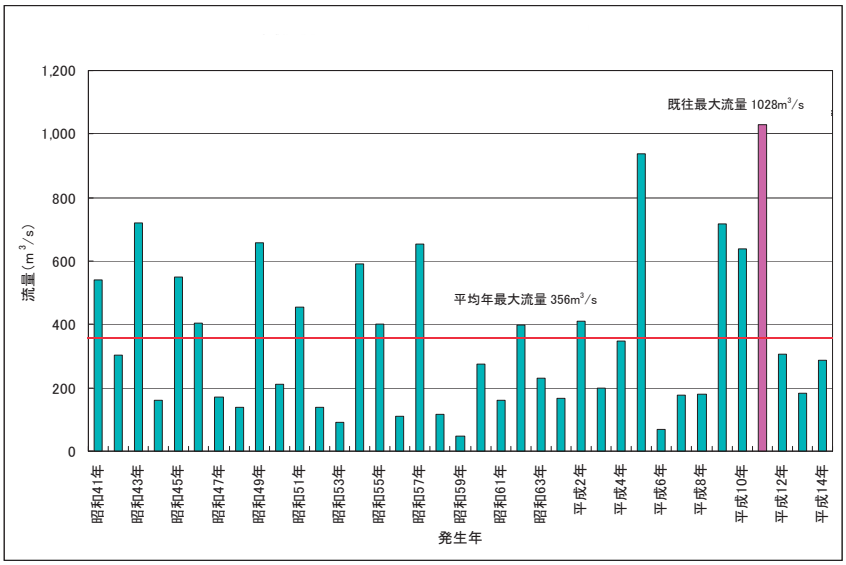


図 5.3-20 年最大流量の時系列と平均年最大流量

流量整理の単位として、時間流量を採用するのは、出水における瞬間最大値を把握することを目的としたためである。日流量は、一般に毎日の定時流量であるため、必ずしも発生流量の大きさを表したものとなりえないため、そのデータは参考程度にとどめる。なお、時間流量であっても十分にピークをつかむことができない場合において、過去から現在に渡る継続的な流量の整理が可能な場合は、より細かい観測時間単位での値（例：10 分ごとの観測値の最大値）を使用してもよいが、その際には既往の整理結果との関係に注意が必要である。

流量観測データが存在しない場合は、流出計算に基づき算出した値をもって整理せざるを得ない。

山本（1994）によれば、平均年最大流量は沖積河川において、河道のスケールや、平面形態を規定する流量として適切なものとしている。本検討で対象となる場合が多い山間河川において、上記が成り立つとは限らない。まずはこの流量や、河床に

変化をもたらす可能性のある相当流量（たとえば既往最大流量や代表的な確率規模見合い流量（1/2、1/3、1/10 等）を対象に検討を行う。

なお、洪水流量については 5.3.3 外力（流量・土砂流送量）に関する調査においても述べる。

b) 洪水被害の履歴

発生した洪水により、河川施設や堤内地にどのような被害が生じたか確認する。これは、流量データだけではわからない、河道内外の攪乱の発生状況を推定する資料に資するものである。河川施設においては、これまでの関連する検討で整理されてきた治水史や改修記録等から、被害の状況を把握することで、河道内において生じた攪乱の大小を推定する。また堤内地では、堤防溢水や破堤といった、内水被害の発生状況から、河道特に堤防等に及ぼしていたと考えられる外力を推定する資料とする。

2) 河道平面形の経年変化

平面形状は、過去の測量成果が十分蓄積されていない場合が多いことや、地形図では記述方法やスケールから河道の変化を捉えにくいことから、その変化を把握しにくいことも多い。このような場合には、国土地理院が蓄積する航空写真の重ね合わせが有効となる場合がある。国土地理院では、戦後間もない昭和 25 年以降から、およそ 5～10 年ごとに定期的な航空写真撮影を行っており、一般に購入可能である。

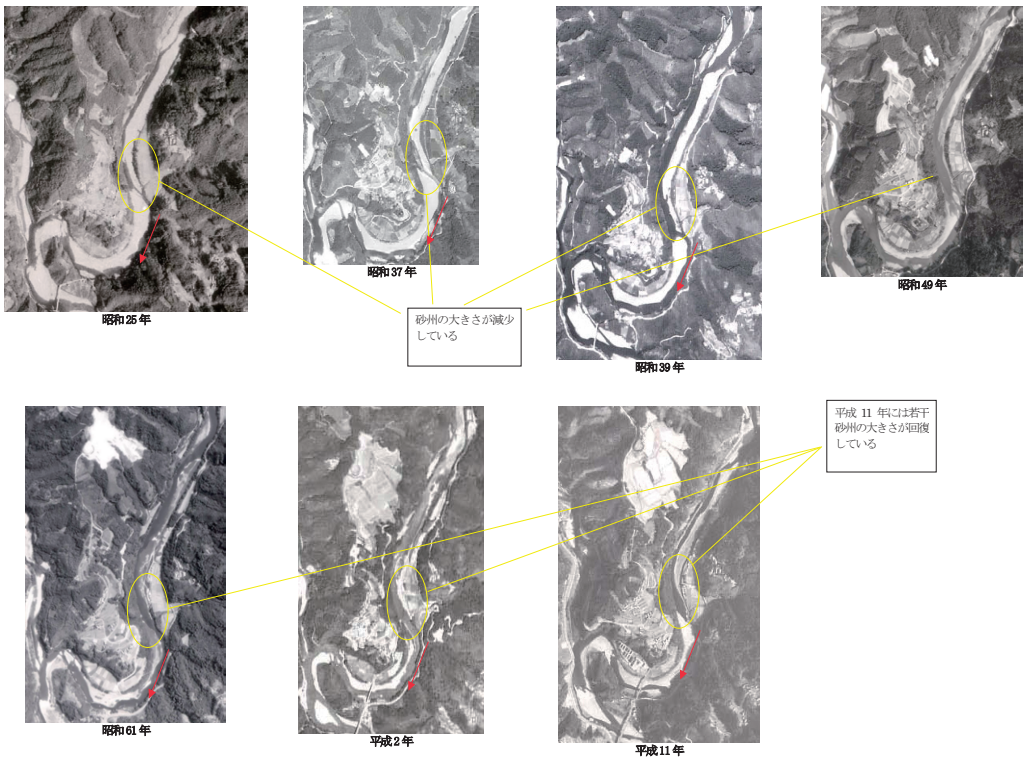


図 5.3-21 航空写真の重ね合わせ

3) 河道縦横断形の経年変化

河道平面形状の変化と同様に、河道形状の経年的な変化を把握することを目的とし、過去の縦横断測量成果の重ね合わせを行い、形状変化や河床高の変化を把握する。

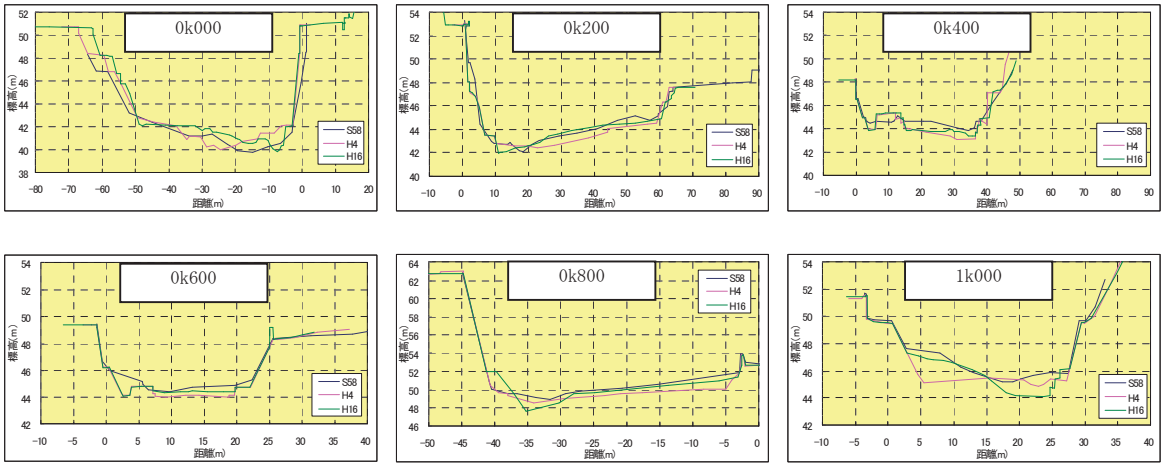


図 5.3-22 河道縦横断形状の重ね合わせ

(8) 類似ダムにおける調査（リファレンス情報として）

予測には不確実性を伴う。このため、類似ダムの下流河川において生じている現象について調査を行い、対象ダム下流河川に関する予測の補足情報とすることが考えられる。ここに類似ダムとは、以下の観点から抽出することが考えられる。

○ダム上流域の地形地質
○河川スケール（流量規模・河道幅）
○河床勾配
○ダムの運用方法（出水時洪水調節方法、平常時ダム補給量）
○ダム下流における取水堰堤等構造物の存在状況

既設ダムの下流河川において生じている現象は、以下の観点から整理する。

○ダム下流の河床構成材料の平面分布（特に細粒材料の存在割合とその分布）
○ダム下流の河床材料の縦断変化

なお、類似ダムにおけるリファレンス情報は、物理環境のみならず生物環境においても有効である。このため、生物の調査においても同様な考え方が役立つ場合が考えられる。ただし、リファレンスとする類似ダムとその下流で生じた現象との間の因果関係を正確に把握するには5.2で述べたBACIデザインに基づく調査が必要であり、その結果を当該ダムに関わる将来予測の参考にする段階でも、外力条件が同じと想定して良いかなど、種々の制約が出てくる。したがって、類似ダムの調査を組み入れる場合には、その情報への頼り方をあらかじめ吟味し、過度な活用にならないようにする必要がある。

5.3.3 外力（流量・土砂流送量）に関する調査

(1) 出水時流量

河道を形成する外力として、洪水時に発生する流量の大きさ及び発生頻度を整理する。流量は、平均年最大流量や既往最大流量、確率規模見合い流量（1/2、1/3、1/10等）を対象に検討を行う。なお、ダムの供用による、出水時流量の変化も合わせて整理する。

算出にあたっては、過去に流量観測が行われている地点を対象とした検証がなされる必要があり、河川の計画と整合した確率処理方法にて河川流況を求めることが望ましい。またこのときの各区間の流量配分は、本支川の流入状況を考慮のうえ、河川の計画と整合した考え方により設定するものとする。

1) 平均年最大流量・既往最大流量等の把握

平均年最大流量は、過去において蓄積されている基準地点またはこれに準じた地点の出水時流量の年最大値をもって算出できる。ここで重要なのは観測単位を時間とする点である。河川流量は、大きく平常時流量（日流量）と出水時流量（時間流量）に別れる。このうち出水時流量は、降雨見合いで不定期に調査される流量であり、1 日の 24 の時間流量を平均化した流量もしくは 1 日のうち決められた時間に観測された（例えば 10 時等）流量ではないことに注意が必要である。

また、観測期間に生じた最大流量もあわせて整理する。流量単位は平均年最大流量と同様に時間流量とする。

対象期間は長いほうが望ましい。なお、近年の気象変化に鑑み、特に至近年の雨量を考慮できるよう配慮が必要である。特に近年発生した、出水被害を伴うような確率規模の大きい降雨については、これを対象に加える必要がある。

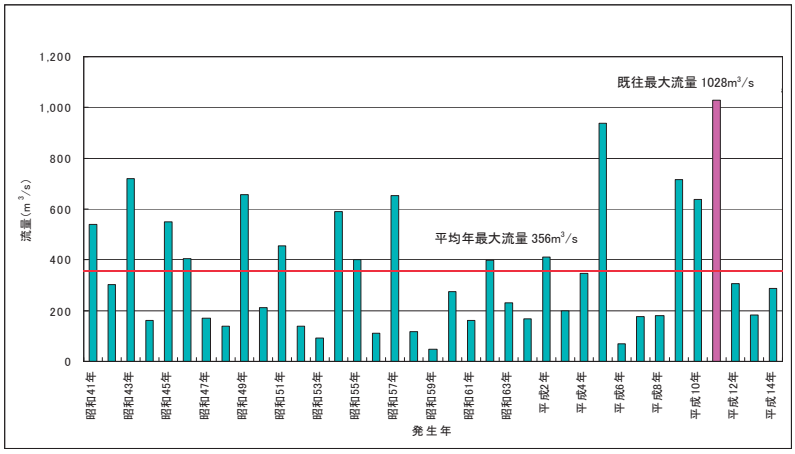


図 5.3-23 平均年最大流量の整理例

2) 確率規模別流量の算出

確率規模別流量は、以下の方法が考えられる。

○ 年最大雨量をもとに確率処理を行い、基本洪水降雨波形を確率雨量見合いにより引き伸ばし設定し、これをもとに流出計算を行うことで設定する方法

○ 年最大流量を確率処理することにより設定する方法

上記は、対象ダムのある河川における河川整備基本方針や河川整備計画をもとに設定すべきであり、既存計画との整合が図られるよう留意する。

表 5.3-4 確率規模別流量算出例

確率規模	[redacted]ダム			[redacted]			[redacted]合流点		
	ダムなし (m^3/s)	ダムあり (m^3/s)	洪水調節 (m^3/s)	ダムなし (m^3/s)	ダムあり (m^3/s)	洪水調節 (m^3/s)	ダムなし (m^3/s)	ダムあり (m^3/s)	洪水調節 (m^3/s)
W=1/2	170	90	80	360	260	100	380	280	100
W=1/5	290	140	150	610	460	150	620	480	140
W=1/10	360	160	200	780	580	200	800	610	190
W=1/30	480	190	290	1030	750	280	1070	790	280
W=1/50	530	200	330	1150	830	320	1200	880	320
W=1/70	570	200	370	1220	880	340	1280	940	340
W=1/100	610	210	400	1300	930	370	1370	1000	370

※確率処理：雨量確率による（昭和〇年～平成〇年の 41 ヵ年）
※流出波形：昭和 51 年 9 月型洪水（ダム計画における対象降雨）
※流出計算手法：貯留関数

3) 流量配分の方法

掃流力を算出するために実施する不等流計算（後述、6.2.2 参照）では、河道の各区間において流量設定が必要である。流量配分は、当該河川の河川整備計画等で設定されるものを利用することを基本にする。なお、ダムが建設される付近の流量配分が河川整備計画等で設定されていない場合は、河川流域の流出計算モデル（例えば貯留関数等）における流域分割をもとに、流量配分を設定する。

4) ダム供用後の確率規模別流量の算出

ダム供用後における下流河川の流量は、ダムの操作方法に依存する。ダムの操作方法にしたがって、ダム供用後の流量を代表的確率規模について計算し、供用前と比較できるようにする（表 5.3-4 参照）。既存資料に当該データがあれば、それを活用する。

(2) 平水時流況

4.3.3 の内容からもわかるように、平常時における流水外力を把握することも場合によっては必要となる。平常時流量は、利水計画等で検討されている、ダム下流河川における各流量（豊水流量、平水流量、低水流量、渇水流量）を、供用前と供用後について整理する。

(3) 土砂移動量調査

1) 調査に当たっての基本的視点

土砂流送が観測できれば、最も直接的な土砂移動に関する情報を得ることになり、有用である。しかし、長年にわたる多くの研究者・技術者の取り組みにもかかわらず、現場での観測そのものが依然難しく、あるいは大きな労力を伴う。また、土砂移動の全容をつかむには一定規模以上の出水イベントを（できれば複数）待つ必要があり、これには長い期間を要する可能性が高い。このことから土砂観測は、調査の主役には位置づけにくいのが実情である。このため、たとえば2.6.2で述べたように、流砂量計算やダム堆砂実績データを用いる方法により土砂移動量を間接的に推定することが、より実際的な方法として選択されることが多い。

しかし、土砂観測という方法を最初から選択肢に入れないのはやはり不適切であり、土砂観測の必要性、重要性、有効なデータが得られる可能性を常に吟味し、状況によって土砂観測を選択するというスタンスを持ち続けることが大事である。

藤田(2003）は、土砂観測戦略を検討する上での参考として、「流送土砂調査の基本的視点」を以下のようにまとめている。

a) 土砂観測戦略の重要性

土砂流送は広範かつ複雑であり、相当の労力を注ぎ込んでも、その全容を把握することは未だ容易でない。それだけに、次に示すようなポイントを踏まえて、流送土砂調査の“計画”を事前に十分吟味するとともに、調査において種々の課題が生じた時点で計画にフィードバックをかけることを通じ、労力に見合った成果が得られるよう工夫することが重要である。

b) 対象とする粒径集団とそれが起こす河床変動（あるいは現象）の明確化

何を把握したいのか、対象を絞り込むことはすべての基本である。このためにも、目的の再確認と、それまでに行われた調査結果の吟味や予備調査が大事になる。

c) 対象とする現象の時間的・空間的広がり具合の特定

リーチスケール（川幅の数倍程度）の河道区間あるいは１つの河道セグメント内の土砂流送現象を把握する場合と、流砂系の土砂動態を把握する場合とでは、調査のスタンスが異なってくる（→空間的広がりの視点)。また、洪水中のある瞬間あるいは一洪水中の土砂流送を把握する場合と、数年あるいはもっと長い期間の土砂流送を把握する場合とでは、やはり調査スタンスを変える必要が出てくる（時間的広がりの視点)。時間的・空間的広がりが小さいほど土砂流送量観測も含めて詳細な調査が可能になり、土砂流送のミクロな現象を対象にすることができる。一方、それが大きくなると、土砂流送をマクロにとらえる視点から調査地点や項目の取捨選択を適切に行うことが重要になる。

d) ポイントb)c)を踏まえた適切な流砂量観測の実施

流砂量（土砂フラックス）の観測は流送土砂調査の中核をなす。一方、これには多くの労力を伴い、適切な方法で行わないと大きな誤差を伴ったり無意味なデータになる場合も少なくない。それだけに、ポイントb)c)および対象土砂（粒径集団）の輸送形態から、どの場所で、いつ、どの粒径集団を対象に、どのような手法で流砂量（土砂フラックス）を観測するか、事前に十分吟味することが大切である。

流砂量観測については特に掃流砂観測が難しく（あるいは大がかりな装置を必要とし）、一方、浮遊砂あるいはWash loadの形態で輸送される土砂は、採水という比較的易しい手法で観測できる。特にWash loadは流水断面内の土砂濃度の均一性が高く、表面付近の採水でもフラックス把握が可能な場合が多い。浮遊砂を観測する場合、土砂濃度と流速の鉛直分布の観測が必要となるため、機器を水中に入れることになる。流速が早い山地河川では、この作業が難しく、浮遊砂観測の隘路となりやすい。

調査の主旨に合致する範囲内で、より容易な流砂観測手法の適用箇所を増やし、掃流砂観測は限られた地点で行えば済むよう観測箇所を配置することなども、調査計画における実際的な工夫の一つである。

e) 水理量（土砂流送を起こす外力）の把握

水理量（流速、掃流力、流量、水位、水深など）を把握する必要性は次のことから来る。すなわち、対象とする現象の空間的・時間的広がり（ポイントc)）が大きく、そのすべてに渡って流砂観測を行うことが不可能な場合である。このような時は、各観測地点における水理量と流砂量との関係についての情報を用い（既知または新しく作る）、水理量の観測結果から流砂量を推定し、流砂量の直接観測への補完的データとする。一般に、水理量の観測の方が流砂観測よりも簡単なので、このようなことが行われる。

なお、通過型の土砂を扱う場合、その場所の河床に作用する力にかかわる水理量および河床材料と土砂フラックスとの対応関係は薄くなるので、水理量からの土砂フラックスの推定においては、このことに留意が必要である。

2) 各種の流砂観測装置の選定について

最近、国土技術政策総合研究所は、「健全な流砂系の構築」に向けて、土砂移動モニタリング技術についての検討を行い（国土技術政策総合研究所 2007）、以下の５つの機器について精度検証を行い、適用範囲を調べ図 5.3-24 のように選定手法を提示している。山地部においては流速5m/sの場所が少なくないこと、礫粒径が大きいことから、機器を流水中に沈める作業および掃流形態で輸送される材料mの流送量観測がより難しくなると考えられる。しかし、選定の考え方については参考になりうるものであり、必要に応じて本報告書を参照されたい（http://www.nilim.go.jp/lab/bcg/siryou/kpr/prn0016pdf/kp0016007.pdf）。なお、ここで

取り上げた手法とは別に、ウォッシュロードを対象にした（鉛直濃度分布がほぼ一様を想定できる）バケツ等による表面採水は簡便で実用的であり、有力な手法として位置づけられる。ただし、表面採水を、鉛直濃度分布が一様でない浮遊砂の観測にまで適用することは避けなければならない。

ア　河川水採取器

浮遊砂観測に使用する流砂量観測装置である。形状は円筒形で、鉛直翼および水平翼により流水中で安定させる構造になっている。蓋閉塞用ワイヤーロープにより瞬時に栓を閉めるため、流水をそのまま採取できる。また、固定用ワイヤーロープを調整することで任意の水深で採取可能である。1 回の採取容量は 3.5 リットルである。

観測時にワイヤーの使用が可能な条件（観測地点に車両・重機が駐車もしくは固定式ウィンチを設置可能）で使用できる。

イ　簡易式採水器Ｂ型

浮遊砂観測に使用する流砂量観測装置である。採水速度を流水の動水圧のみで支配するように工夫してあり、排気口の先端の位置を上下させることにより採水速度を調整できる。高流速の場合は重錘を取り付け安定させる。1 回の採取容量は 1.1 リットルである。

重錘使用時は重機が必要になる。

ウ　自吸式ポンプ

浮遊砂観測に使用する流砂量観測装置である。自給式ポンプ採水器を用いて、ポンプ吸込口から延びるホースを固定した棒を流水中に挿入し採取した水をポンプ吐出口に接続したホースから採水ビンなどの容器にいれる。安価であるが、ポンプの吸込速度を流れの速度を常に一致させることが求められることから、観測地点が限定される。人力により作業を行うため、水際で安全に作業が行える護岸などに観測箇所が限られる。

エ　土研式掃流砂採取器Ⅱ型

掃流砂観測に使用する流砂量観測装置である。装置を流水中に前後の扉を開けた状態で採取器を河床に着床させ、ロープを引いて扉を閉じる。流速にもよるが、広範囲の粒径の採取が可能である。観測には装置を吊り上げる重機が必要である。

オ　金網式掃流砂採取器

掃流砂観測に使用する流砂量観測装置である。採取する箱の部分の 1 箇所が完全に閉口しており、それ以外は網目状になっている。閉口している部分を上流側に向け、流水中に河床に着床させ採取する。

観測には装置を吊り上げる重機が必要である。

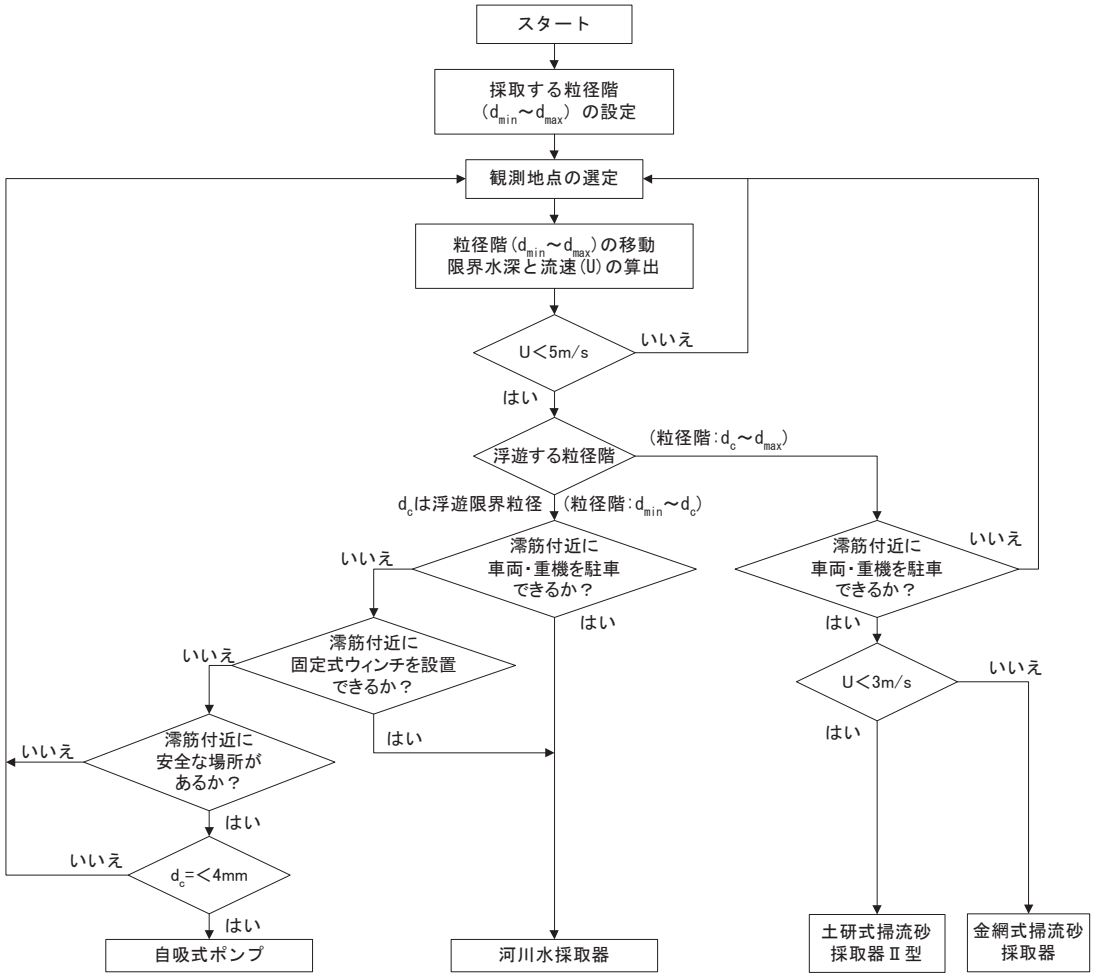


図 5.3-24　流砂量観測機器の選定フロー（国土技術政策総合研究所 2007 より）

5.4 付着藻類、底生動物の実態調査に関する事項—調査の道具箱 2

5.4.1 調査体系

付着藻類、底生動物の実態を把握するためには、調査目的に応じた調査デザインに従いデータを収集し、これを分析・解析していくことが必要となる。ただし、ダムの存在が付着藻類、底生動物相を変化させるプロセスを明確にするためには、ダムの存在により影響を受ける直接的、間接的な環境要因に関する情報も同時に収集し、両者の関係性を解析することが重要なアプローチとなる。

表 5.4-1 に調査に関する事項の分類例を示す。

表 5.4-1 付着藻類・底生動物の調査に関する事項一覧

5.4.3 調査と分析	(2)ｻｲﾄ別調査		a)流量
			b)河床勾配、川幅、水面幅
			c)水温
			d)水質
			e)流下有機物、動物ﾌﾟﾗﾝｸﾄﾝ調査
			f)植物ﾌﾟﾗﾝｸﾄﾝ調査
			g)流下土砂量調査
	(3)ｻﾝﾌﾟﾘﾝｸﾞ調査	2)環境変量調査	a)水深・流速
			b)河床構成材料
			c)堆積物採取
			d)開空度把握
		3)付着藻類調査	
		4)底生動物調査	

※記述中の番号は、以降の解説の目次番号

ダムの存在に伴い直接改変される環境要因としては、流況、土砂供給、濁度、水質、水温、餌資源の供給があり、これらの直接的改変は河道地形の変化そして河床の構造や河床上の堆積物の状態を変化させる。従って、これらの直接的な環境要因によって改変される二次的要因を間接的な環境要因として取り扱うこととする。

ところで、環境要因は時間的・空間的に変化する。このため、ある地点、ある時間で収集したデータ（既存資料から収集したデータも含む）は当該環境要因の全体の特性を示さないことに留意する必要がある。調査デザインを検討する際には、対象とする環境要因の時空間的な特性をよく理解することが重要であり、例えば、日較差が大きく、流下に従い急速に変化する要因（例えば、水温）と時間的に安定し、その空間配置も大きく変化しない要因（例えば、河道地形）では、調査デザインが異なる可能性を指摘しておく。なお、本資料では、この点を鑑み、既存資料や現地調査から得られる直接的、間接的環境要因を表す指標値を環境変量とし、環境要因と区別して用いることとする。

ダム下流域における付着藻類・底生動物は幾つかの環境要因が複合的に作用し、変化する場合が多い。また、インパクト区における事前・事後比較、インパクト区とコントロール区の比較を行う場合、想定している環境要因以外の要因に差異があり、生

物相の変化に影響する場合もある。従って、ある特定の要因のみが生物相を変化させていると想定される場合であっても、生物相が変化する経路を幅広に捉え、対応する環境要因に関連する環境変量の収集と生物相との対応を見るべきである。例えば、フラッシュ放流・土砂還元等は操作する要因が限られているが、この場合であっても流況、土砂に関する調査は勿論、他の環境要因が変化する可能性を排除せず、関連しそうな環境要因の収集を前提とした調査計画を立案することを推奨する。

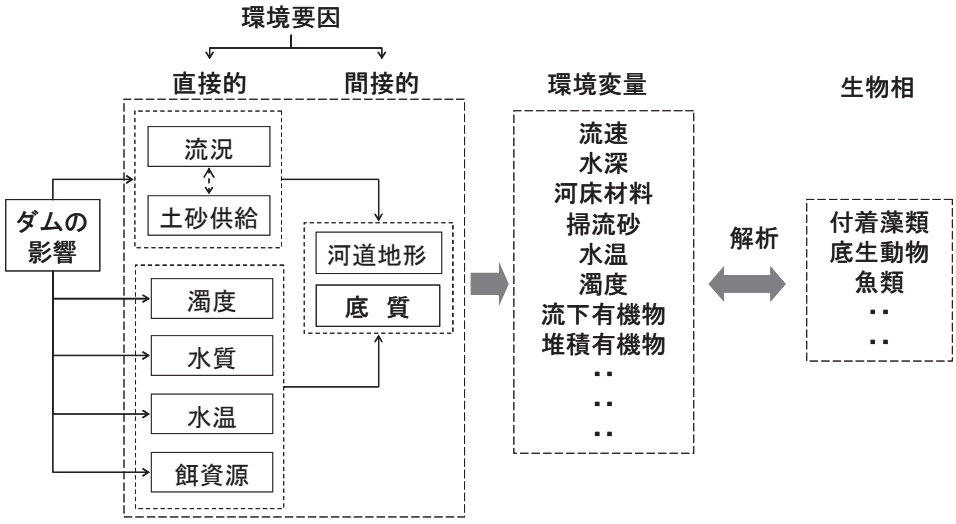


図 5.4-1 インパクトーレスポンスを抽出する調査体系

ところで、ここから述べる調査に関する幾つかの“道具”はダム下流域における付着藻類、底生動物相を対象とし、インパクトーレスポンス系を明らかにすることを目的としたものであり、生態系を網羅的に把握することを目的としていない。従って、魚類等移動性が高く、その場の環境要因のみに支配されない生物についてはデザインを修正する必要があるだろう。また、付着藻類・底生動物を指標とするため、検討区の設定を“瀬”の部分に限定している。付着藻類・底生動物の双方もしくはいずれかのレスポンスは、流況、土砂、底質、水温、水質、餌資源に応答するため、これらの環境要因の変化をある程度検出することができる。しかし、地形変化、例えば、瀬・淵構造・水際構造の変化や河道全体の植被の変化についてはその影響を検出できない。ダム下流全域において影響を面的に把握するためには、別途異なる調査体系を適用する必要がある。これには、異なる特性を持つ種々の河道内ユニットごとに、環境要因変化とそれを介した生物応答を追跡し、さらにはユニット間の相互作用も考慮し、それらを総合するというような方法が考えられる。検討区の設定を瀬の部分に限定したここでの調査は、もっとも影響を分析しやすい種類のユニットについてまず[ダムー環境要因ー生物応答]の関係を掴むというアプローチと位置づけられ、今後、河道を構成する複数のユニットについて総合的に検討を行う方法に展開する際にも参考になると期待される。

5.4.2 調査の流れ

調査フローを示す点線内は 5.2、5.4.3、5.4.4 に詳述したので、ここでは、この部分を除く各プロセスについて次頁より詳述する。また、5.4.3 内フローのサイト別、サンプリング地点別調査は 5.4.3 に詳細フローを添付したので参考にしてほしい。

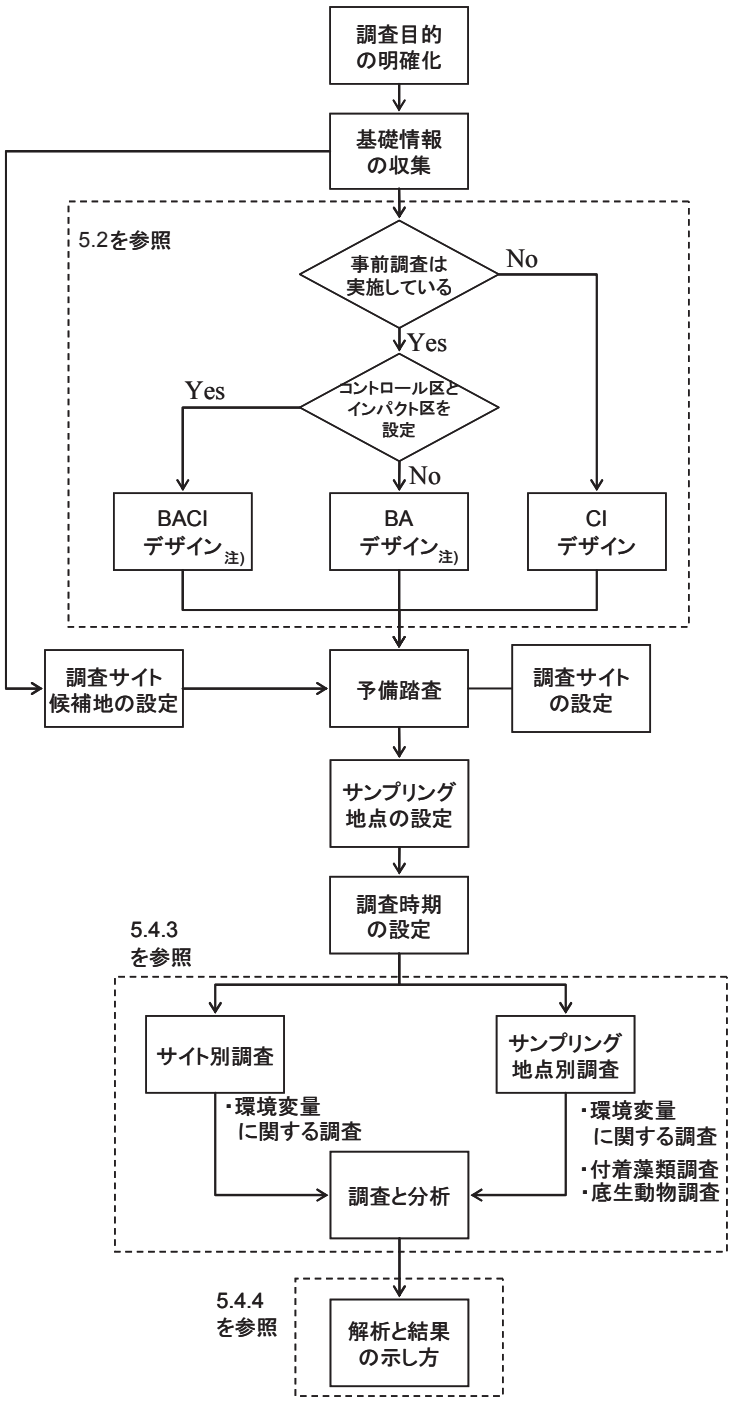


図 5.4-2 調査フローチャート

(1) 調査目的の設定

本資料では、ダム竣工に伴う下流河道のインパクトーレスポンスの把握を主目的としているが、より具体的な目的を設定できる場合には、目的に沿った調査デザインを設定し、コストの削減、精度の高い結果を得られる場合がある。従って、調査デザインを立案にする前に、一旦立ち止まり“何を明らかにすべきか”を明確にすることが重要となる。具体的な目的例としては、

1. 新設ダムにおける下流のレスポンスの程度・範囲を予測したい。
2. 既設ダムにおけるレスポンスの程度・範囲を把握したい。
3. 既設ダムにおける重要地点（アユの漁業）へのレスポンスとその環境要因を知りたい。
4. 既設ダムにおける影響軽減対策（フラッシュ放流、土砂還元）の効果を把握する。

等が考えられる。本資料ではダム竣工に伴うレスポンスの空間的範囲を明確にすることを念頭に置いた説明をするため上記 1、2 は以下に述べる調査デザインで目的を達成できるが、3、4 はインパクト区、コントロール区の設定、事前・事後の考え方に違いがあるので、調査体系を再考することが必要になる。

(2) 調査デザインを選定する。

既設ダムで事前データがない場合であれば CI デザイン、事前データの取得がある場合、取得が可能な場合には BACI デザインを前提としたい。ただし、事前データを取得した場合においてコントロール区の設定が難しい場合には BA デザインを軸とした調査デザインとなる場合もある。なお、これらのデザインについては 5.2 に詳述したので、参照してほしい。

(3) 基礎情報の収集

基礎情報として以下の①～⑥を収集する。この中で①から⑤については 5.3「河道の物理環境調査」で情報を収集・整理している内容である。「河道の物理環境調査」と「生物群集・生態系調査」は相互に関連していることを意識し、「生物群集・生態系調査」においても「河道の物理環境調査」における情報を活用する。

① 流域・水系に関する情報：本支川流域の位置・面積
② 土砂供給量に関する情報：地質・地形、堆砂量及び砂防指定区間の状況
③ 流量に関する情報：出水時・平常時流量
④ 河道環境に関する情報：河川測量結果、瀬・淵の分布
⑤ 河床構成材料に関する情報：本川、支川の河床構成材料の縦断分布
⑥ 水環境に関する情報：流入放流水における水質、水温、濁度等に関するデータ

(4) 調査サイト候補地の設定

(1)調査目的、(2)調査デザインに沿って、(3)で収集した基礎情報に基づき、インパクト区、コントロール区のそれぞれについて調査サイト候補地を設定する。最終的なサイトの絞り込みは予備踏査に基づき決定するので、この段階では(3)で得られている流域スケール、河道区間スケールに関する情報を活用し、候補地を数カ所設定する。候補地設定のポイントは以下のとおりである。

① コントロール区のサイトは、インパクト区における環境条件と似通っている区間に設定する（既設ダムの場合はインパクト区におけるダム影響を受ける以前の状態を想定する必要がある)。具体的には以下に示す項目について具体的検討を行い、類似性をチェックする。

・ 流域スケールに関する項目：流域の地質、流域面積
・ 河道区間スケールに関する項目：平均河床勾配、河道幅、平面形状

② インパクト区はダム下流に設置するが、支川の合流によってダム下流の影響は緩和される場合が多いこと、また、ダムの影響が下流方向に急速に変化することから、ダムの直下近傍に最初のインパクト区のサイトを設定する。

③ ダム影響の下流方向への範囲を知るためには、インパクト区を下流方向に幾つか設けることが必要となる。支川合流前後では環境変量、生物相の変化が著しい可能性が高いため、支川合流点の前後には重点的に調査サイトを設定すると良い。合流点がない場合には一定の間隔を置いてサイトを設定することになるが、サイト間距離が大きくなると、河川特性がそのものの違いによって環境要因、生物相が異なるため注意する。

(5) 予備踏査

調査サイト、サンプリング地点の設定のため予備踏査を行う。予備踏査では(4)で設定したサイト候補地を中心に現況把握を行うが、河道に沿っての移動が可能な場合にはサイト候補地を含むより広範な区間を踏査し、付着藻類、底生動物、環境要因の状況を観察することを推奨する。

予備踏査では以下に示す項目を勘案し、サイトの絞り込みを行っていく。

① 検討対象区間における代表性

調査サイトは検討対象区間（例えば、インパクト区としての「ダムの直下流区間」、「支川合流後区間」、コントロール区としての「支川区間」等）を代表している必要がある。具体的には、サイトの河道幅、河床勾配、瀬・淵の状況（流速・水深・河床材料)、瀬の河床構成材料の状況、キャノピー（河畔林の樹冠が河道をどの程度覆っているか）の程度、付着藻類、底生動物の生息状況を確認し、以上の要素が検討対象区間の平均的な状況であることを確認する。

② アクセスの容易さ

サイトまでのアクセスが安全かどうかは調査員の安全の確保だけでなく、収集資料の運搬の可否、調査コストと調査精度に関わる重大な要素である。他の条件が満たされてもアクセスが困難に感じられる場合には、サイトの設定を断念することも必要となる。

③ サンプリング地点の設定の難易

瀬の面積が小さい場合、流速・水深が大きい場合には一つの瀬内に必要なサンプリング地点数の確保が困難になる場合がある。従って、予備踏査時にはサイト流心部まで踏査し、具体的なサンプリング地点を想定して（ペグ等で印を付けると良い）必要地点数が確保できるかどうかの確認を行う＜詳細は(6)を参照＞。また、必要に応じて流速・水深・河床材料の粒径を把握して、各サンプリング地点でこれらの環境変量に著しい差異がないことを確認しておくと良い。

④ サイトの区間長

２つの瀬にサンプリング地点を設定する場合が多いため、当該サイトの区間長は瀬と淵の組み合わせが２セット確保できることが望ましい（図 5.2-5）。なお、理由は(6)を参照のこと。

(6) サンプリング地点の設定

各区内の瀬にサンプリング地点を配置する。付着藻類・底生動物群集そして環境変量には空間的変動があるため、変動の幅を小さくするため、サンプリング地点は流心部に配置し、必ず繰り返し（最低 3 箇所、可能であれば 4 箇所）を確保する（図 5.4-5）。設定に際しては予備踏査の結果に基づき、河床材料の採取、環境変量調査が可能かどうかを再度確認する（前述したように流速、水深、河床材料のいずれかが大きい場合には調査が不可能となる）。底生動物のコドラートを設置する場所が確定したら（後述するように 50cm×50cm のコドラートを用いる）、4 隅の 1 箇所にペグ等を打ち目印にすると良い。付着藻類の採取地点はこのコドラート近傍に設定するので、底生動物のコドラートさえ確定すれば調査の実施が可能となる。なお、調査ポイントの設定は現地調査を行う前日等現地調査と併せて実施すると良い。

また、同一区内であっても瀬によって群集組成、環境変量が大きく異なる可能性があるため（例えば、瀬の局所的な勾配、河床材料の大きさによって変化する）、調査に余裕があれば同一サイト内のもう一つの瀬にも同様にサンプリング地点を設定するとより信頼できるデータの取得が可能となる（図 5.4-3）。

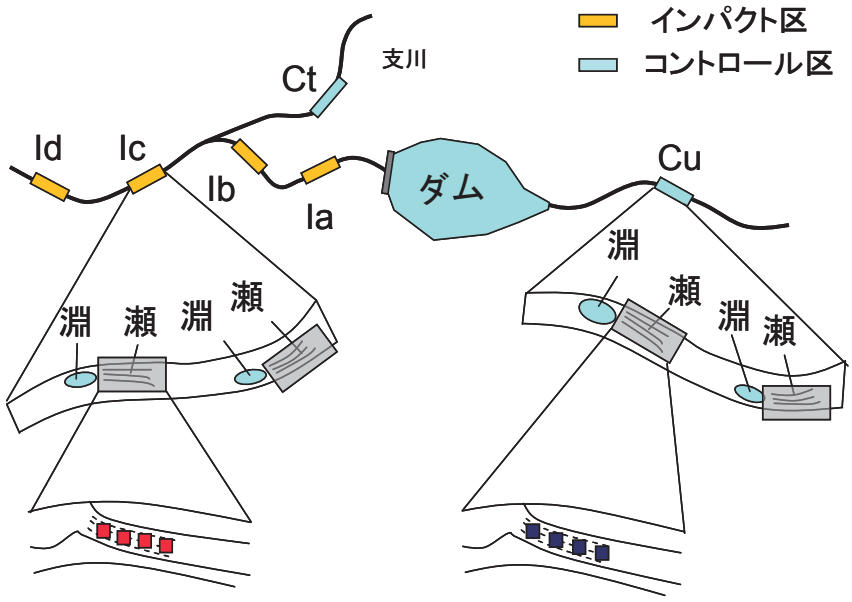


図 5.4-3　サンプリング地点の空間配置

ここでは、インパクト区、コントロール区とも 2 つの瀬が入る程度の長さとして設定している。サンプリング地点は瀬の流心とし、最低でも 3 箇所、可能なら 4 箇所のサンプリング地点を確保する。また、調査対象とする瀬をもう一つ設け、同様にサンプリング地点を設定するとより信頼度の高いデータの取得が可能となる。

(7)　調査時期の設定

1)　付着藻類の調査時期

- 調査回数は年 2 回もしくは 1 回とする。
- 冬季と夏季に実施する。実施する時期は、ダムからの放流量（流況）を考慮し、台風等出水後（大規模な放流後）は避け、なるべく流況の安定している時期に実施する。
- アユの餌資源としての質・量を評価したい場合には、夏季から秋季に複数回実施することが望ましい。
- 底生動物の摂食は河床付着膜の影響要因となるため、底生動物の調査も併せて実施することが望ましい。その場合 2 つの調査は同時期に行い、環境要因に関する調査も併せて行うこと。

2)　底生動物に関する調査

- 調査回数は年 2 回もしくは 1 回とする。
- 年 1 回の場合は冬季(12～3 月）に行うことがのぞましい（夏季の水生昆虫は，体サイズの小さい個体が多く精度の高い同定が困難と予想されるため)。また、利水目的を含むダムでは、冬季は流況が安定することが多く、ダムとしての影響が顕著である時期に調査を行うことになる。

- 年 2 回調査が可能な場合には、冬季と夏季とする。ただし、夏季の調査は、台風等出水後（大規模な放流後）は避け、なるべく流況の安定している時期に実施する。
- 底生動物の調査実施時には併せて付着藻類の調査も実施すること。2 つの調査は同時期に行い、環境要因に関する調査も併せて行うこと。
- 環境要因についても上記と併せて調査を実施する。
- 調査は連続して行い、できるだけ短期間で終了させることを基本とする。

5.4.3 調査と分析

(1) 概要

調査はサイト別調査とサンプリング地点別調査がある。サイト別調査は一つのサイト内で環境変量の空間的変化が小さい項目について実施する調査である。具体的には各サイトの流量、水質、流下有機物（POM)、流下動物・植物プランクトン、流下土砂量、対象区間の河床勾配が対象となる。サンプリング地点別調査は一つのサイト内において空間的差異が見られる項目が対象となり付着藻類、底生動物の採集に加えて、各地点の流速、水深、河床材料の粒径、河床における堆積有機物、開空度、光量子量が対象となる。以下にサイト別、サンプリング地点別調査の方法を述べる。

(2) サイト別調査

サイト別調査フローを示した（図 5.4-4)。サイト別調査は対象サイトにおける環境変量の取得を目的とした調査であり、流下有機物、動物・植物プランクトン、流下土砂量、流量測定、測量が測定項目となる。サイト別調査は付着藻類、底生動物への影響を避けるためサンプリング地点別調査終了後に実施する。以下に各調査項目を記す。

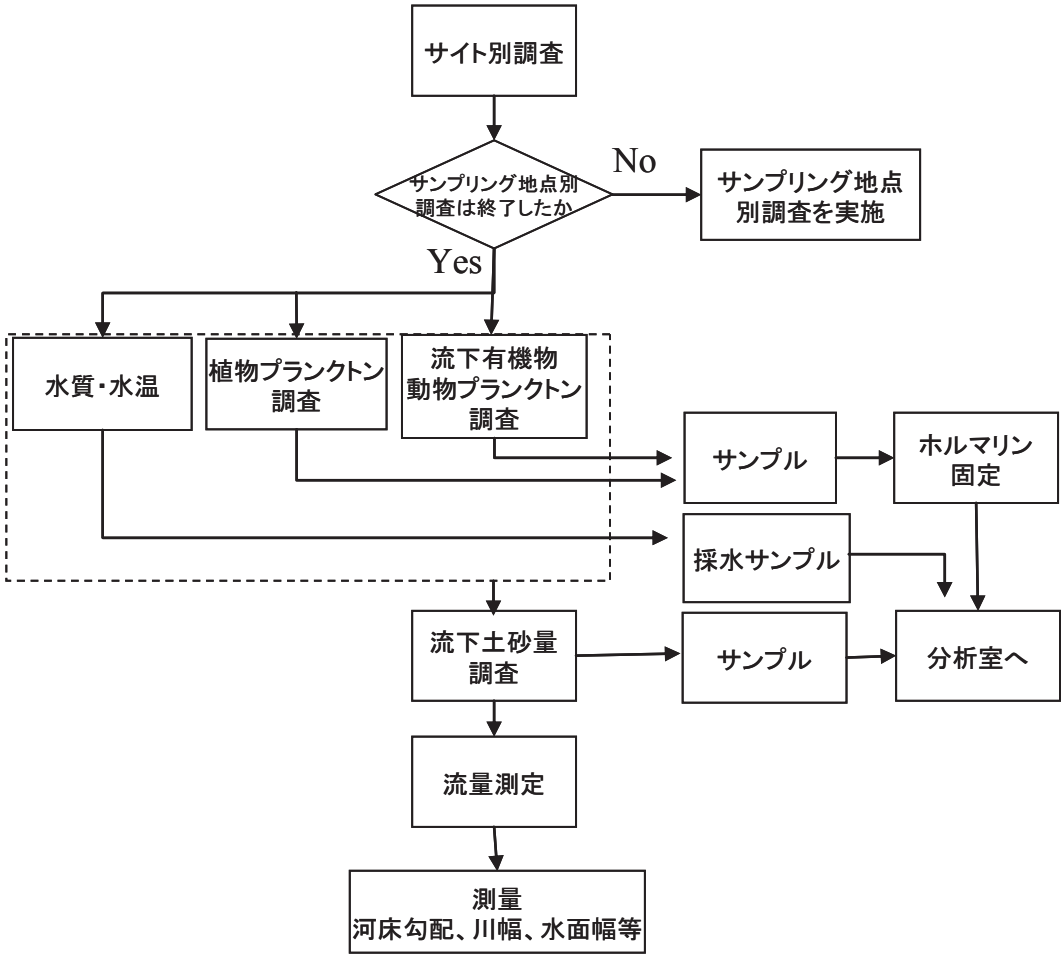


図 5.4-4 調査フローチャート B（サイト別調査）

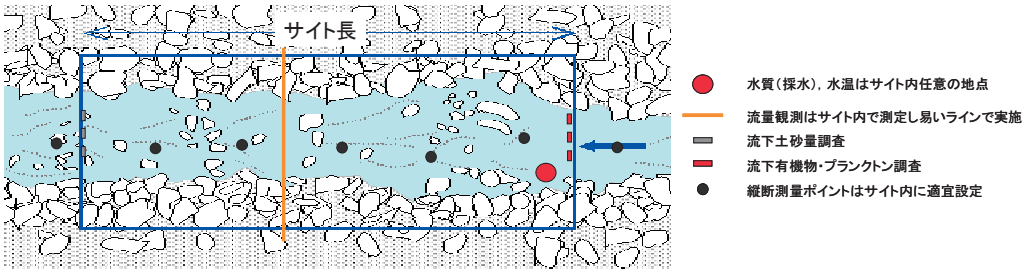


図 5.4-5　調査サイト内での各想定項目の測定位置等

実際の調査位置は現場の状況を見て測定しやすい箇所を適宜選定する。

a)　流量

各サイト内において流量観測し易い断面で測定する。

b)　河床勾配、川幅、水面幅

各サイトの縦断・横断測量を実施し、河床勾配、川幅、水面幅を測定する。川幅、水面幅は、横断側線を 3 側線設定し、測定する。

c)　水温

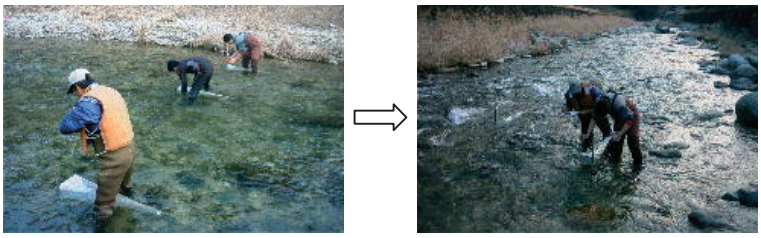
ロガー式の小型自記水温計を設置し長期データを収集すると良い。不可能な場合に全サイトで同一の時間帯にデータを取得できるよう工夫する。

d)　水質

濁度、T-P、T-N、PO_4-P、NO_2-N、NO_3-N、NH_4-N、TOC、DO、EC、SS、VSS、chl.a、etc が対象となる。日変動が大きな項目については水温同様長期データの取得が望ましい。

e)　流下有機物・動物プランクトン調査（写真 5.4-1）

流下物量の日内変動を考慮し、調査は早朝(6～8 時)、正午(11～13 時)、夕暮れ(17～18 時)、真夜中(23～24 時)の各 1 回、計 4 回実施することを基本とする。調査対象地点の上流端にドリフトネット（25cm×25cm（大きさは任意）、目合い 0.25mm）3 基を河川流心で河川横断方向に横並びに設置して、流下する有機物(流下有機物)、動物プランクトン、底生動物を採取する。ドリフトネットは、枠の高さ 25cm のうち水面下に 22cm を水没させて約 20～30 分間設置する。なお、設置時間は、ネットの目詰まりの程度により増減させる。設置中に水没しているドリフトネットの間口の中央(水深 11cm)で、設置直後、設置後 15 分、回収直前の流速を測定する。採取するサンプルは、ネットごとに 1 検体とし、500mL クリアビンに保存後、5%ホルマリンで固定して分析室へ持ち帰り、ソーティング後、動物プランクトン、底生動物、流下有機物 POM（FPOM：0.25mm 以上 1mm 未満、CPOM：1mm）に分類する。



ドリフトネットの設置　　流速の測定

写真 5.4-1　作業状況（流下物調査）

※ ドリフトネット設置時や流速測定時には土砂の巻き上げに注意すること。
※ 目詰まりによりネットを回収する場合は、設置時間を記録する。

f) 植物プランクトン調査

水質調査と同一場所において表層水を採水(植物プランクトン 2～5L ポリ 1 本)する。植物プランクトンはホルマリンで固定(2%)し、分析室へ持ち帰り、植物プランクトンの同定、計数を行う。

g) 流下土砂量調査（写真 5.4-2）

調査サイト下流側（流下物採取調査の影響が及ばないように配慮）に掃流砂トラップ（例えば、25cm×25cm（大きさは任意)、目合い 0.25mm）を 3 つ、河川横断方向に横並びに 1 時間程度設置して、掃流砂を採取する。なお、設置時間は、目詰まりの程度により増減させる。流下土砂トラップは、両端にステンレス杭などで河床に密着させ固定する。また、各トラップの間口の中央で設置直後、設置後約 30 分、回収直前に流速を測定する。採取したサンプルは、流下土砂トラップ 1 つを 1 検体とし、分析室へ持ち帰る。



設置作業　　設置状況　　回収作業

写真 5.4-2　流下土砂量調査

(3) サンプリング地点別調査

1) 調査フロー

サンプリング地点別調査のフローを示す（図 5.4-6）。

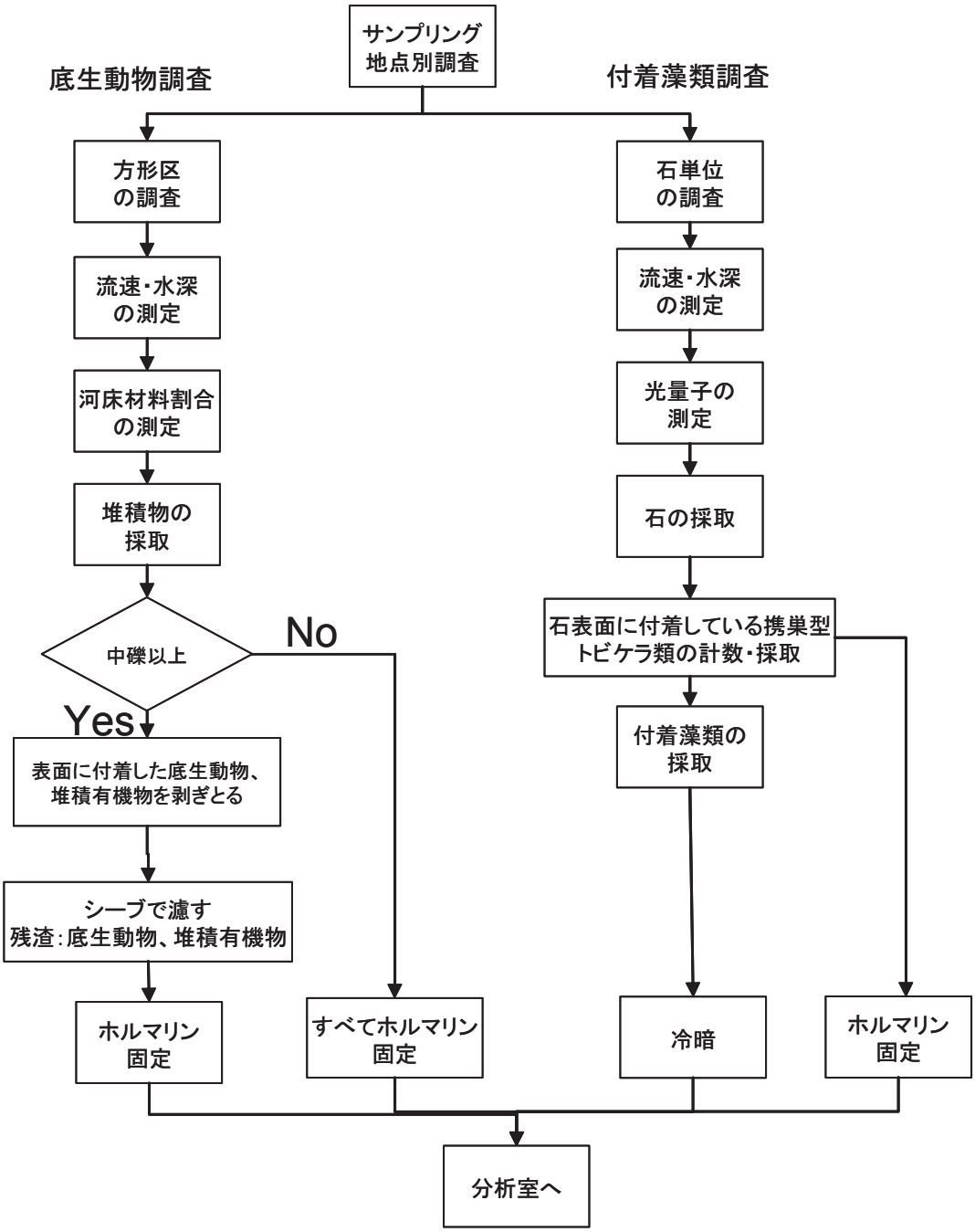


図 5.4-6 調査フローチャート B（サンプリング地点別調査のフロー）

サンプリング地点は石単位調査区、方形区調査区のそれぞれのサンプリング地点を、サイト内の流心部において流速・水深・河床材料が似通った地点に設定する（図 5.4-7）。詳細は 5.4.3(3)3)、5.4.3(3)4)を参照してほしい。

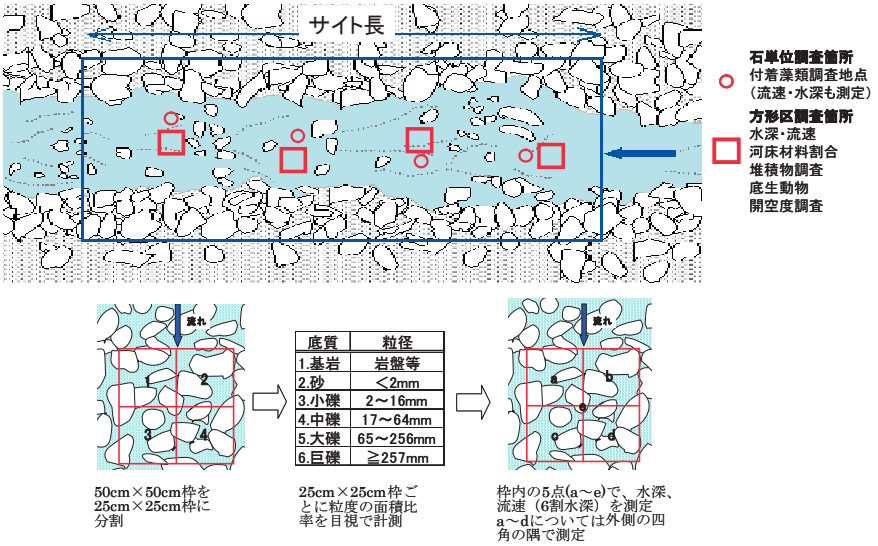


図 5.4-7　サンプリング地点の配置状況

方形区は流心部に設定する。それぞれ流速・水深・河床材料が同程度の場所に設定する。付着藻類の調査を行う“石単位調査区”は方形区に隣接し、方形区と水深・流速、河床付着膜の状態が類似した地点に設定する。

2)　環境変量調査

a)　水深・流速（写真 5.4-3 参照）

50cm×50cm の方形区の四隅と中心の 5 点の水深、流速（6 割水深）を計測する。

b)　河床構成材料（図 5.4-7、写真 5.4-3 参照）

a)の後、箱めがね等を用いて、方形区内の河床を鉛直方向に写真撮影した後、方形区を 25cm×25cm の 4 つの方形枠に区切り、それぞれ方形枠内の底質の優占粒径を１：基岩、２：砂（＜2mm）、３：小礫(2-16mm)、４：中礫(17-64mm)、５：大礫(65-256mm)、６：巨礫(≧257mm)の 6 段階で区分し、面積に占める割合を 5%単位で目視により読みとり記録する。



水深の測定　　流速の測定　　河床材料割合の観察

写真 5.4-3　水深・流速・河床材料の調査

c) 堆積物採取（底生動物と堆積有機物（BPOM））

現場にて、コドラート直下にサーバーネット（50cm×50cm 枠、0.25mm メッシュ）を用い、河床材料ごと堆積物（底生動物を含む）を採取（深さ約 20cm）する。

※ 詳細は 5.4.3(3)4)を参照のこと。

d) 開空度把握

各サンプリング地点において水面に近い位置から、魚眼レンズを用いて開空度把握のための写真撮影を行う。なお、撮影にあたっては、コンパス等を用いて北が写真の上方向になるよう統一する。

3) 付着藻類調査

a) 現地調査からサンプル処理まで

天候、気温、水温、水質（簡易水質測定器を使用する。項目は濁度、pH、電気伝導度等）を測定し、調査時刻を記録する。

底生動物等を採取した方形区近傍で、方形区の水理量や河床付着膜の状態が同程度の地点から 2 個（最低でも 1 個）の石（φ15～20cm 程度）を選定する。（各石について、水深、河床面からの石の突出の程度、流速（6 割水深及び底層（石上 1cm 程度））、光量子密度（水面直上、水面直下、6 割水深、川底）を測定する（※1)。なお、光量子密度測定時には天候、雲量等についても記録し、なるべく測定地点が雲等で陰になっていないときに測定を行うものとする。

その後、選定した石を採取し、石上面に付着物を採取するためのコドラート（5cm×5cm、付着物が少ない場合は 5cm×10cm）を記し、スケールを置き、写真を撮影する（サンプル名がわかるよう工夫する)。また、石表面（上面や側面）に付着藻類を摂食する携巣型ﾄﾋﾞｹﾗ類（ﾔﾏﾄﾋﾞｹﾗやﾆﾝｷﾞｮｳﾄﾋﾞｹﾗ等）の生息が確認された場合には、石上面 10cm×10cm 内の個体数を計数した後採取し、5%ホルマリンで固定し持ち帰る（※2)。

携巣型ﾄﾋﾞｹﾗ類を採取後、コドラート内(5cm×5cm あるいは 5×10cm)の付着物をブラシで擦り落とし、蒸留水で洗い採取する。なお、付着物にｶﾞｶﾞﾝﾎﾞの巣（膜）が含まれている場合、その旨記録しておく（場合によっては、膜の数を計数したり、分析時にサンプルに含まれる膜や底生動物を除去する等の対応が必要になる)。また、肉眼で糸状緑藻の繁茂が確認された場合にはその状況を記録しておく。

付着物採取後、石のサイズ（縦、横、高さ）を測定する。

採取したサンプルは直ちに冷暗条件（アイスボックス内など）で保管し、速やかに分析室に運搬する。

※ 1：光量子密度を測定しておくと、光合成速度に関わる日射が河床にどれくらい届いているかを定量的に評価することができる（例えば、濁度が高い場合、河床に届く日射量の減衰が大きくなる）。

※ 2：固定し持ち帰った底生動物は、必要に応じて同定等を行う。



写真 5.4-4　作業状況（付着藻類調査）



写真 5.4-5　光量子計（左）と光量子の測定状況（右）

b) 分析

以下の分析を行う。

■クロロフィルａ、フェオフィチン

試料の一部をガラス繊維ろ紙で濾過し、90%アセトン溶液で抽出し、クロロフィル a 及びフェオフィチン（死滅した付着藻類の目安となる）を単波長吸光光度法により測定する。また、あわせて 3 波長吸光光度法を併用し、chl.*a*、chl.*b*、chl.*c* を測定しておくとよい（※）。ただし、より精度の高い測定が求められる場合には、高速液体クロマトグラフ法を用いることが望ましい。

（※）：クロロフィルには、chl.*a*、*b*、*c*、*d* の 4 種類があり、chl.*a* は、すべての藻類に含まれ、chl.*b* は、緑藻や緑虫類、chl.*c* は、珪藻、黄色鞭毛藻、渦鞭毛藻類、chl.*d* は、紅藻類に含まれ、藍藻類は chl.*a* 以外を含まない。したがって、緑藻に含まれる chl.*b* や珪藻に含まれる chl.*c* 等、含まれる色素の違いを利用することにより、藻類群を構成する緑藻や珪藻の割合をある程度示すことができる。

■乾燥重量、強熱減量

試料の一部を、ガラス繊維ろ紙で濾過した後、60℃で 24 時間乾燥させ、乾燥重量を測定する。その後、マッフル炉で 550℃、2 時間燃焼させた後、再度重量を測定し、強熱減量を算出する。強熱減量は有機物量の目安となり、燃焼せずに残った残留物は無機物量（微細土砂、珪藻の殻も含まれる）の目安となる。

■藻類の同定・計数

ホルムアルデヒド溶液を約 5%容量になるように加えて保存した試料の一部を、顕微鏡（600 倍）を用いて、種レベルあるいは属レベルで、少なくとも 400 個以上同定し、各種の細胞数を計数する。同定は、基本的に生細胞を対象とするが、珪藻など、同定が困難な場合は、処理を行い、プレパラートを作成して行う。なお、すべての試料について藻類の同定・計数を行うことが困難な場合は、サイトで採取した試料を同じ割合で混合させ 1 サンプルとして分析する。

4) 底生動物調査

a) 現地調査からサンプル処理まで（図 5.4-6 参照）

① サーバーネット（50cm×50cm 枠、0.25mm～0.5mm メッシュ）を用い、方形枠内の底生動物及び堆積有機物を河床材料ごと採取する（深さ約 20cm）。

② 採取した試料のうち、中礫以上の礫表面に付着している堆積有機物と底生動物を、タワシ等を用いて洗い落とし（底生動物を潰さないように注意する）、これをサーバーネットと同メッシュサイズのふるい（シーブ）で濾し、残渣をホルマリンで固定し、分析室に運搬する。

③ 巨礫・大礫・中礫以外の試料（底生動物、堆積有機物を含んだままの小礫（17mm～）以下の河床材料）については、ホルマリンで固定し分析室に運搬する。

④ 採取後の、河床コドラート内の状況を、箱眼鏡等を用いて撮影する。

b) 分析方法（図 5.4-8、図 5.4-9 参照）

分析室では、上記 a-②中礫以上の河床材料から洗い落したサブサンプル、および a-③小礫以下の河床材料サブサンプル（底生動物・堆積有機物が混じっている）について以下の作業を行う。

a2 中礫以上の河床材料から洗い落したサブサンプル

① 1mm メッシュと 0.25（または 0.5）mm メッシュのシーブを重ねて濾す。
② 1mm メッシュ上の残渣から、すべての底生動物をソーティングし、底生動物は同定、カウントする（個体数①）。ソーティング残渣は強熱減量を測定する（BCPOM①）。
③ 0.25（または 0.5）mm メッシュ状の残渣は分割器を用いて適宜分割（2^n）する。
④ 分割後のサンプル（$1/2^n$ 量）からすべての底生動物をソーティングし、底生動物は同定、カウントする（個体数②）。ソーティング残渣は強熱減量を測定する（BFPOM①）。

a3 小礫以下の河床材料サブサンプル（底生動物・堆積有機物が混じっている）

⑤ 1mm メッシュと 0.25（または 0.5）mm メッシュのシーブを重ねて濾す。
⑥ 1mm メッシュ上の残渣から、すべての底生動物をソーティングし、底生動物は同定、カウントする（個体数③）。ソーティング残渣は強熱減量を測定する（BCPOM②）。
⑦ 0.25（または 0.5）mm メッシュ状の残渣は分割器を用いて適宜分割（2^n）する。
⑧ 分割後のサンプル（$1/2^n$ 量）からすべての底生動物をソーティングし、底生動物は同定、カウントする（個体数②）。ソーティング残渣は強熱減量を測定する（BFPOM②）。

分析後、1 サンプル中の個体数、BCPOM 量、BFPOM 量は以下の計算で得られる。

個体数＝個体数①＋2^n・個体数②＋個体数③＋2^n・個体数④

BCPOM 量＝BCPOM①＋BCPOM②

BFPOM 量＝2^n・BFPOM①＋2^n・BFPOM②

なお、種の同定、湿重量の測定に際しては以下に留意する。

同定精度：可能な限り細かいレベルまで同定を行う（ｶｹﾞﾛｳ、ｶﾜｹﾞﾗ、ﾄﾋﾞｹﾗに関しては生態学的な基礎情報も多いことから、属・種レベルまでの同定が

望ましい)。ただし、同定が不確かなタクサに関しては、無理に同定せずその上のレベルで同定を止めるように指示すること。

湿重量：生物量を比較する際に有用であるので、可能であれば測定するのが望ましい。

指標種：現時点では、どのタクサが指標種となるか統一した見解がない。ある種だけの計測では不十分であろう。群集内の生活型・摂食機能群等、全体のバランスを見ることのほうが有用であると考える。

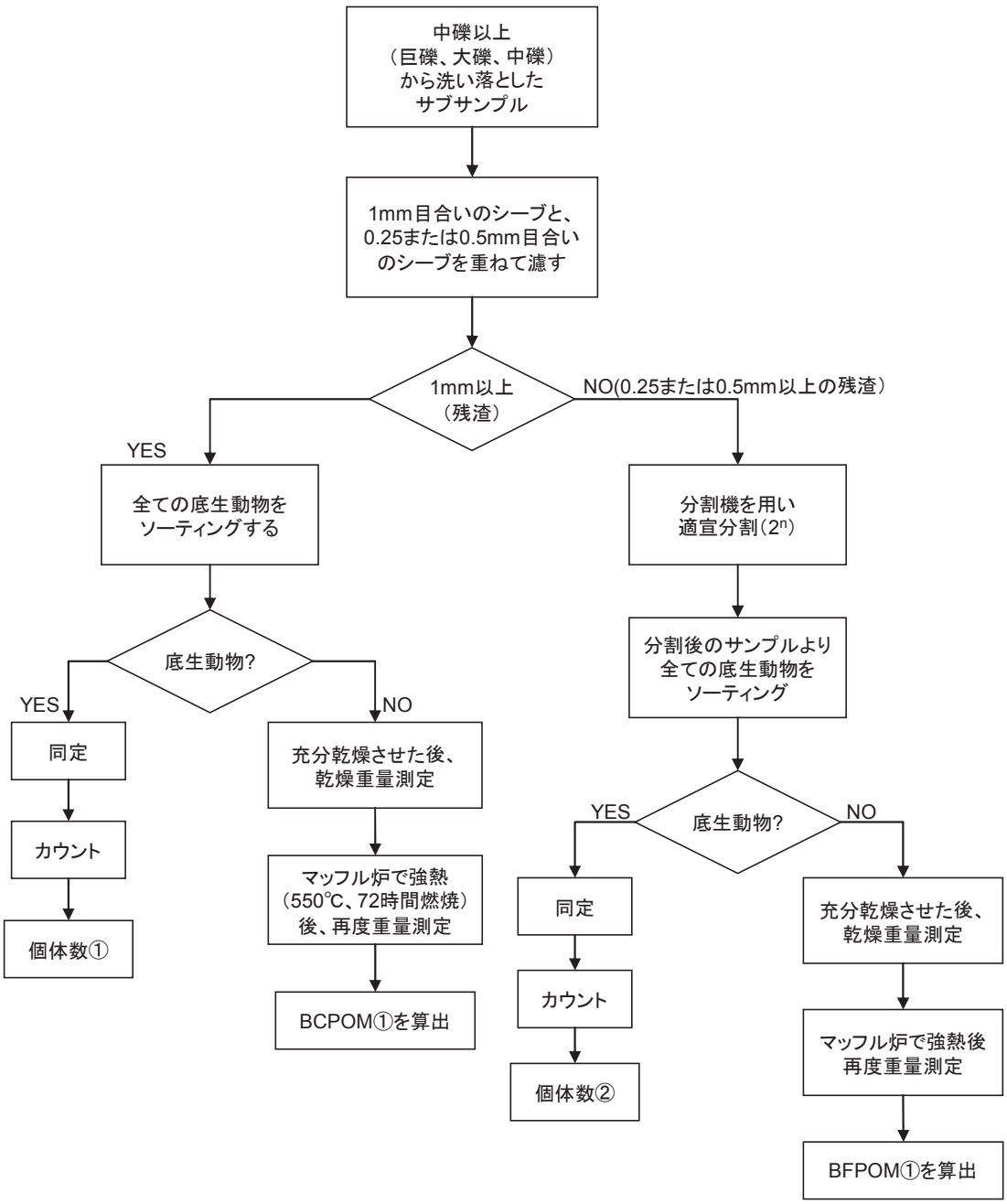


図 5.4-8　調査フローチャート C-1（分析室でのフロー）

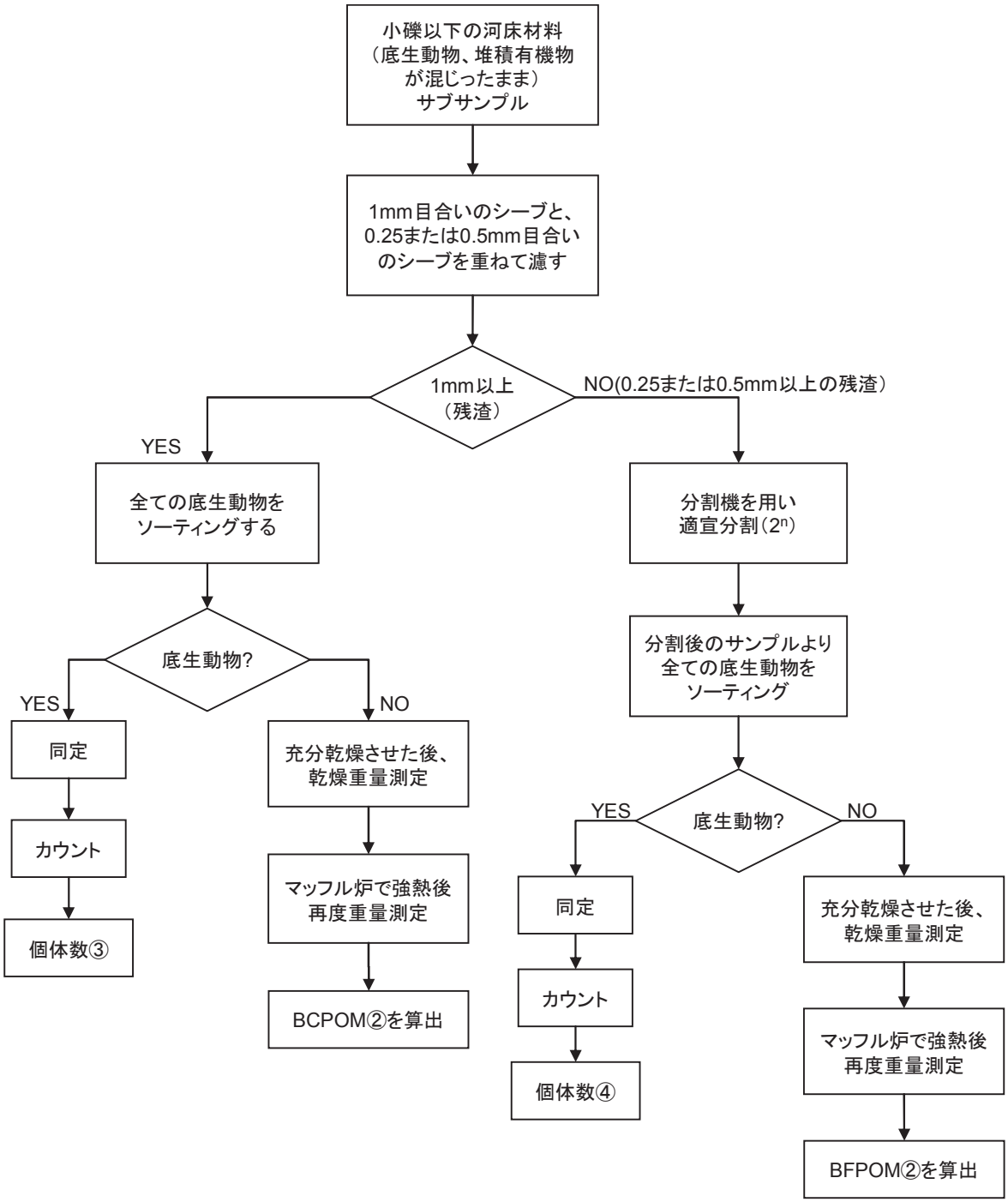


図 5.4-9　調査フローチャート C-2（分析室でのフロー）

5.4.4 解析方法と結果の示し方

(1) 解析方法

解析では各サイト間の環境変量、付着藻類、底生動物の差異を明らかにすることを最初の目標とする。次に、差異が見られた場合には、環境変量と付着藻類・底生動物との関係を明らかにすることを目標とする。以下にその内容をステップ別に示す。

1) ステップ 1

環境変量、付着藻類、底生動物について以下の項目について整理する。

a) 環境変量について

- サイト別に各環境変量値の平均値と標準偏差を算出し一覧表を作成する(表 5.4-2)。なお、本表は参考例であり、全ての環境変量を掲載していないので注意してほしい。
- ダム直下、合流点上流、下流がインパクトサイト、支川がコントロールサイトに該当する。
- 出水時流量の規模や頻度も各サイトの環境変量として取り扱う場合もあるが、ここでは、平水時の環境要因のみを扱い、変量として示した。

表 5.4-2 環境要因の一覧表の例（平均値±標準偏差）

	調査サイト			
環境変量	ダム直下	合流点上流	合流点下流	支川
水深(cm)	32.56 ± 1.68	····	30.18 ± 2.34	30.80 ± 2.98
流速(cm s^{-1})	48.80 ± 6.10	····	41.20 ± 3.91	52.10 ± 4.43
河床材料(表層)		····		
砂(%)	0.00 ± 0.00	····	1.02 ± 0.47	3.49 ± 0.85
小礫 (%)	2.10 ± 0.99	····	5.54 ± 1.24	9.61 ± 1.31
		～		
巨礫 (%)	53.10 ± 11.18	····	28.40 ± 5.25	21.11 ± 8.38
掃流砂 (mg m^{-3})	1.40 ± 0.36	····	6.50 ± 0.68	27.00 ± 10.16
流下 FPOM		····		
流下CPOM		····		
動プランクトン(mg m^{-3})	4.90 ± 2.52	····	2.40 ± 1.00	0.00 ± 0.00
		～		
河床のChlorophyll a (mg m^{-2})	4.50 ± 0.56	····	7.00 ± 3.84	12.00 ± 5.76
堆積FPOM (g m^{-2})		····		
堆積CPOM (g m^{-2})	4.68 ± 0.71	····	5.35 ± 1.01	2.60 ± 0.23

＊ 河床材料は表層の面積割合を示す。

b) 付着藻類について

サイト別に以下の項目について平均値と標準偏差を算出する（表 5.4-3）。なお、各出力のイメージは底生動物と概ね同じであるから、表 5.4-4、表 5.4-5 を参考にしてほしい。

- 乾燥重量、強熱減量、無機物量（＝乾燥重量－強熱減量）、強熱減量(%)
- クロロフィル a、フェオフィチン、それらの割合など（例 ; クロロフィル a／（クロロフィル a＋フェオフィチン）
- AI（Autotrophic Index）＝強熱減量／クロロフィル a
- サイト別出現タクサ一覧表（出現タクサ数、細胞数）の作成
- サイト別優占タクサの比較表（出現頻度 1～5 位）の作成

c) 底生動物について

- サイト別出現タクサ一覧表（個体数、湿重量）の作成（表 5.4-4）
- サイト別出現タクサ数、生息個体数密度の作成
- サイト別優占タクサの比較表（出現頻度 1～5 位）の作成（個体数・湿重量）（表 5.4-5）
- サイト別の多様度指数、均衡度、EPT 指数等 （下記参照）
- 多様度指数(diversity index)とは、ある生物群集内の多様性を示す数値尺度のことであり、いくつかの種類がある。現在、最も一般的に使われているのは、Shannon-Wiener の多様性指数(*H'*)であり、以下の式で求められる。

$H' = -\Sigma(p_i \times \log_2 p_i)$

（ただし、p_i : i 番目の種類の個体数が総個体数に占める割合）

- 均衡度(Evenness、*E*)とは、ある生物群集の複雑さを表す数値尺度のことであり、0 から 1 の値をとる。群集を構成する種が全て同数で出現する場合、その群集の均衡度は 1 となる。

$E = H' / \ln S$

（ただし、*S* : その群集に出現する種数）

- EPT 指数（% EPT）とは、ある河川底生動物群集の総個体数に占める、ｶｹﾞﾛｳ類（Ephemeroptera)・ｶﾜｹﾞﾗ類（Plecoptera)・ﾄﾋﾞｹﾗ類（Trichoptera)の合計個体数の割合（%）のことであり、その群集が採集された地点の水質の健全度や瀬・淵などの河川環境の多様性を表す指標として用いられる。豊かな種類数は河川の良好さをある程度示すものと考えられる。

$\%\ \mathrm{EPT} = 100 \times (E + P + T) / N$

（ただし、*E*:ｶｹﾞﾛｳ類個体数、*P*:ｶﾜｹﾞﾗ類個体数、*T* : ﾄﾋﾞｹﾗ類個体数、*N*: 底生動物総個体数）

2) ステップ 2：環境変量、付着藻類、底生動物のサイト間差異を検出する

得られた各指標（以下にその例を示す）に対してサイト間の分散分析（ANOVA）を用いて比較を行い、多重比較により差異を検出する。なお、BA デザイン、CI デザイン、BACI デザインによって、空間的・時間的な繰り返しの違いで解析手法が異なってくるので注意する。これらの解析手法の違いについては（佐川ほか 2004）が詳しい。

分散分析・多重比較の具体的方法については一般的な書籍に掲載されているので（統計ソフトが添付されていることが多い)、活用すると良いだろう。

3) ステップ 3：高度な環境解析について

以上までの解析は「エクセル統計」等の汎用ソフトで対応可能であるが、より高度な環境解析は、解析に関する専門知識、付着藻類・底生動物の生理・生態に関する知識、専門の統計ソフトが必要となる。従って、ステップ 3 以降の解析については、専門機関との連携により行うことを勧める。

具体的に解析内容をイメージしてもらうため、底生動物について解析例を示した。

- 底生動物の摂食機能群（FFG)、生活型の解析・・・その地点の環境をあらわす状況証拠として、どのような環境に適した生物がどれだけの割合で生息するか、調査地点ごとに比較する。
- 底生動物の群集解析・・・生息する生物群集がどう変化するのか、群集解析を行って類似度を比較することで検証する。
- 環境変量と底生動物の相関・・・多変量解析（CCA など）を行い、各地点の環境と底生動物の変化を関連付けて説明する。

表 5.4-3 サイト別 付着物 結果

	ダム下流		合流点上流		合流点下流		支川	
	St.1	St.2	St.3	st.4	St.5	St.6	St.7	St.8
乾燥重量(g/m^2)	7.8±1.9	8.4±5.2	135.7±84.9	31.4±30.8	3.0±1.3	2.5±0.5	2.6±3.6	0.4±0.1
強熱減量(g/m^2)	1.8±0.7	2.2±1.7	11.7±4.4	7.9±6.7	0.3±0.1	0.3±0.2	0.3±0.1	0.1±0.0
chl.a (mg/m^2)	21.5±3.1	24.1±8.9	78.9±21.4	75.63±49.2	6.6±2.4	4.6±1.4	3.1±1.5	1.8±0.4
フェオフィチン (mg/m	6.5±0.5	7.0±2.4	31.4±8.9	22.7±25.1	1.4±0.5	1.5±0.5	1.6±0.4	1.4±0.1
・・・・	・・・・							
AI	365±40	347±69	1613±612	606±340	413±114	661±231	573±469	226±87

表 5.4-4　サイト別底生動物出現タクサー覧表（個体数、湿重量）（紙面の関係上一部省略して示している）

No.	門	綱	目	科	学名	和名 / 調査地点 / 分析項目	ダム上流1 個体数	ダム上流1 湿重量	ダム上流2 個体数	ダム上流2 湿重量	ダム下流1 個体数	ダム下流1 湿重量	ダム下流2 個体数	ダム下流2 湿重量	支川合流後1 個体数	支川合流後1 湿重量	支川合流後2 個体数	支川合流後2 湿重量	支川1 個体数	支川1 湿重量	支川2 個体数	支川2 湿重量
1	海綿動物	普通ｶｲﾒﾝ	ﾓﾝﾖｳｶｲﾒﾝ	ﾓﾝﾖｳｶｲﾒﾝ	*Eunapius fragilis* (gemmule)	ｴｿｳｶｲﾒﾝ(芽球)											*	+				
2	刺胞動物	ﾋﾄﾞﾛ虫	花ｸﾗｹﾞ	ﾋﾄﾞﾗ	*Hydridae* gen. sp.	ﾋﾄﾞﾗ科					*	150.4										
3	扁形動物	ｳｽﾞﾑｼ	ｳｽﾞﾑｼ	ﾔﾏｶﾄﾞﾔﾏｳｽﾞﾑｼ	*Dugesia japonica*	ﾔﾏｶﾄﾞｳｽﾞﾑｼ	8	+	28	22.4	288	166.4	192	38.4	256	67.2	96	83.2	48	25.6	32	6.4
4	線形動物	不明	不明	不明	NEMERTINEA	紐形動物門					96	+	32	+								
5	線形動物	不明	不明	不明	NEMATODA	線形動物門			16	+	64	+	608	44.8	96	+						
6	軟体動物	ﾏｲﾏｲ	ﾓﾉｱﾗｶﾞｲ	ﾓﾉｱﾗｶﾞｲ	*Physa acuta*	ﾓﾉｱﾗｶﾞｲ			20	0.4												
7				ﾋﾒﾓﾉｱﾗｶﾞｲ	*Gyraulus* sp.	ﾋﾒﾓﾉｱﾗｶﾞｲ属																
8		ﾆﾏｲｶﾞｲ	ﾏﾒｶﾞｲ	ｼｼﾞﾐ	*Corbicula* sp.	ｼｼﾞﾐ属			4	+			416	70.4	192	+	160	+				
9				ﾏﾒｼﾝｼﾞﾐ	*Pisidium* sp.	ﾏﾒｼﾝｼﾞﾐ属																
10	環形動物	ﾐﾐｽﾞ	ｲﾄﾐﾐｽﾞ	ｲﾄﾐﾐｽﾞ	Haplotaxidae gen. sp.	ｲﾄﾐﾐｽﾞ科																
11			ﾋﾙﾐﾐｽﾞ	ﾋﾙﾐﾐｽﾞ	Enchytraeidae gen. sp.	ﾋﾙﾐﾐｽﾞ科									32	+						
12				ﾐｽﾞﾐﾐｽﾞ	*Nais bretscheri*	ﾆﾎﾝﾋﾞｾﾞﾐﾐｽﾞ	8	+														
13					*Nais* sp.	ﾋﾞｾﾞﾐﾐｽﾞ属	368	24.8	496	51.6	512	+	32	+	416	+	224	+	32	+	640	6.4
～																						
17				不明	TUBIFICIDA Fam. gen. sp.	ｲﾄﾐﾐｽﾞ目	24	+	4	+							32	+	32	+		
18			ｲﾄﾐﾐｽﾞ	ﾐﾐｽﾞ	Lumbricidae gen. sp.	ﾐﾐｽﾞ科					32	96.0										
19				不明	LUMBRICIDA Fam. gen. sp.	ﾐﾐｽﾞ目																
20		ﾌﾅｱｼｶﾀｶﾞ	ﾌﾅｱｼｶﾞﾀﾒ	ﾌﾅｱｼﾐｽﾞ	*Antyllosoma* sp.	ﾌﾅｱｼﾐｽﾞ属																
21	節足動物	ﾀｷﾞ	ﾀﾞﾆ	不明	ACARINA Fam. gen. sp.	ﾀﾞﾆ目	256	1.6	64	0.4	288	3.2	1,472	4.0	2,048	99.2	1,184	60.8	432	28.8	1,504	70.4
22		昆虫	ｶﾄﾞﾝﾎﾞｳ	ﾄﾋﾞｲﾛｶﾄﾞﾝﾎﾞｳ	*Chrorotrepes altioculus*	ﾋﾒﾄﾋﾞｲﾛｶﾄﾞﾝﾎﾞｳ			16	+			576	147.2	832	236.8	480	172.8	16	+	128	+
23					*Paraleptophlebia* sp.	ﾋﾒﾄﾋﾞｲﾛｶﾄﾞﾝﾎﾞｳ属					64	+												
24			ｳﾂｶﾞﾛｶﾄﾞﾝﾎﾞｳ		*Potamanthus formosus*	ｳﾁﾔﾏｳﾂｶﾞﾛｶﾄﾞﾝﾎﾞｳ					160	+											
25			ﾓﾝｶｶﾞﾛｶﾄﾞﾝﾎﾞｳ		*Ephemera strigata*	ﾓﾝｶｶﾞﾛｶﾄﾞﾝﾎﾞｳ																
26					*Ephemera* sp.	ﾓﾝｶｶﾞﾛｶﾄﾞﾝﾎﾞｳ属	16	0.8					384	249.6	288	153.6	64	22.4	32	22.4	96	+
27			ｷﾚｱｼｶﾄﾞﾝﾎﾞｳ		*Cinygma* sp.	ｷﾚｱｼｶﾄﾞﾝﾎﾞｳ属					576	73.6	64	+	800	108.8			16	+	32	+
28			ﾏﾀﾞﾗｶﾄﾞﾝﾎﾞｳ		*Cinygmula* sp.	ﾏﾀﾞﾗｶﾄﾞﾝﾎﾞｳ属	64	1.6	28	0.4									64	1.6		
～																						
34				ｺｶﾄﾞﾝﾎﾞｳ	*Acentrella gnom*	ﾆﾎﾝﾋﾞｾﾞｺｶﾄﾞﾝﾎﾞｳ																
35					*Acentrella sibirica*	ﾋﾒｺｶﾄﾞﾝﾎﾞｳﾓﾄﾞｷ																
～																						
50			ｱｶｶﾞﾐﾄﾞﾝﾎﾞｳ		*Isonychia japonica*	ｱｶｶﾞﾐﾄﾞﾝﾎﾞｳ																
51			ﾋﾗｶﾄﾞﾝﾎﾞｳ		*Ecdyonurus* sp.	ﾋﾒﾋﾗｶﾄﾞﾝﾎﾞｳ属																
52					*Epeorus latifolium*	ﾕﾒｴｿﾋﾗｶﾄﾞﾝﾎﾞｳ																
53					*Epeorus* sp.	ｴｿﾋﾗｶﾄﾞﾝﾎﾞｳ属													32	+	192	6.4
54					*Rhithrogena* sp.	ｴｿﾋﾗｶﾄﾞﾝﾎﾞｳ属	8	+														
55		ﾄﾝﾎﾞ	ｻﾅｴﾄﾝﾎﾞ		*Gomphidae* gen. sp.	ｻﾅｴﾄﾝﾎﾞ科			20	+									32	1.6		
56			ﾄﾝﾎﾞ		*Libellulidae* gen. sp.	ﾄﾝﾎﾞ科																
57		ｶｶﾒｶﾞﾗ	ｶｶﾒｶﾞﾗ		*Leuctridae* gen. sp.	ｶｸﾒｶﾞﾗ科																
58			ｵﾅｼｶﾜｶﾞﾗ		*Amphinemura* sp.	ﾌﾀｽｼｶﾜｶﾞﾗ属			16	+									16	17.6		
59					*Nemoura* sp.	ｵﾅｼｶﾜｶﾞﾗ属																
60			ｸﾛｽﾞｶﾜｶﾞﾗ		*Peltoperlidae* gen. sp.	ｸﾛｽﾞｶﾜｶﾞﾗ科																
61			ｶﾜｹﾞﾗ		*Kamimuria tibialis*	ｶﾜﾑﾗｶﾜｹﾞﾗ																
62					*Neoperla* sp.	ﾌﾀｽｼﾒｶﾜｹﾞﾗ属					64	38.4	192	73.6					48	3.2	32	16.0
63					*Paragnetina* sp.	ｱｶｶﾜｶﾜｹﾞﾗ属																
64					*Perlidae* gen. sp.	ｶﾜｹﾞﾗ科			4	+	32	9.6			160	57.6	32	+				
65		ｶﾒﾑｼ	ｶﾒﾑｼﾞｶﾒﾑｼ		*Hebrus nipponicus*	ｶﾒﾑｼﾞｶﾒﾑｼ																
66			ﾄﾋﾞｹﾗ	ｼﾏﾄﾋﾞｹﾗ	*Cheumatopsyche* sp.	ﾋﾞﾀﾞﾗﾝﾏﾄﾋﾞｹﾗ属									32	+			16	3.2	32	+
67					*Hydropsyche setensis*	ｵｵﾏﾀﾞﾗﾝﾄﾋﾞｹﾗ																
～																						
70			ｵｵﾄﾋﾞｹﾗ		*Dolophilodes* sp.	ｵｵｶﾞﾘﾄﾋﾞｹﾗ属													16	8.0		
71			ｲﾁﾄﾋﾞｹﾗ		*Plectrocnemia* sp.	ｲﾁﾏｲﾘﾄﾋﾞｹﾗ属																
72			ｸﾛﾌﾞﾄﾋﾞｹﾗ		*Psychomyia* sp.	ﾏﾒﾌﾞﾄﾋﾞｹﾗ属	40	6.4	116	30.0					192	134.4	96	+	32	1.6	288	57.6
73			ﾋﾒﾌﾟﾁﾌﾞﾁﾄﾋﾞｹﾗ		*Stenopsyche* sp.	ﾋﾒﾌﾟﾁﾌﾞﾁﾄﾋﾞｹﾗ属							768	105.6	480	150.4	64	+			64	12.8
74			ﾔﾏﾄﾋﾞｹﾗ		*Glossosoma* sp.	ﾔﾏﾄﾋﾞｹﾗ属	152	5.6	52	4.8	256	70.4	5,248	1,264.0	4,448	742.4	768	124.8	688	126.4	992	236.8
75			ｳﾄﾄﾋﾞｹﾗ		*Hydroptila* sp.	ｳﾄﾄﾋﾞｹﾗ属					800	16.0					32	+			96	12.8
76					*Stactobia* sp.	ﾋﾒﾄﾋﾞｹﾗ属																
77			ｶﾗﾚﾄﾋﾞｹﾗ		*Rhyacophila kawamuze*	ｶﾜﾑﾗﾋﾒﾚﾄﾋﾞｹﾗ																
78					*Rhyacophila yamamekensis*	ﾔﾏﾒｹﾋﾒﾚﾄﾋﾞｹﾗ							64	+								
79					*Rhyacophila* sp.	ﾋﾒﾚﾄﾋﾞｹﾗ属	48	2.4	4	+	32	6.4	128	9.6	64	38.4	96	35.2	32	3.2	32	22.4
80			ﾐｽﾞﾄﾋﾞｹﾗ		*Micrasema hamasensis*	ﾊﾏｶﾜﾐｽﾞﾄﾋﾞｹﾗ																
81					*Micrasema* sp.	ﾐｽﾞﾄﾋﾞｹﾗ属			16	+			32	+								
82			ｺﾏﾄﾋﾞｹﾗ		*Goera* sp.	ﾋﾒｺﾏﾄﾋﾞｹﾗ属																
83			ｹﾌﾗﾄﾋﾞｹﾗ		*Lepidostoma* sp.	ｹﾌﾄﾋﾞｹﾗ属	56	6.4	4	1.6	32	+			32	+			48	4.8	32	+
84			ﾋﾒﾌﾞﾁﾄﾋﾞｹﾗ		*Onoeitis* sp.	ﾏﾙﾄﾋﾞｹﾗ属																
85					*Setodes* sp.	ｾﾄﾄﾋﾞｹﾗ属																
86					*Trichosetodes japonicus*	ﾆﾎﾝﾄﾋﾞｹﾗ																
87					*Leptoceridae* gen. sp.	ﾋﾒﾌﾞｶﾞﾗﾄﾋﾞｹﾗ科																
88			ｶﾄﾋﾞｹﾗ		*Gumaga* sp.	ﾌﾞﾏｶﾞﾄﾋﾞｹﾗ属							32	+							32	+
89		ﾊｴ	ｶﾁﾕｳﾕｳ		*Antocha* sp.	ｶｽﾐﾕｳﾕｳ属	264	116.8	52	22.8	192	83.2	32	+	288	220.8	352	368.0	432	134.4	512	35.2
90					*Pilaria* sp.	ﾋﾒｶﾁ属	8	1.6														
91					*Tipulidae* gen. sp.	ﾌﾞﾕｳｶ科																
92			ｱﾐｶ		*Blepharicera* sp.	ﾕｶｱｼﾐｽﾞ属																
93					*Blephariceridae* gen. sp.	ｱﾐｽﾞ科																
94			ｸﾛｶﾀ		*Atrichopogon* sp.	ﾌﾄﾋｺﾞﾏﾕﾑ属															32	+
95					*Ceratopogonidae* gen. sp.	ｸﾛﾊﾞｴ科							64	+	64	+						
96			ﾆｾﾓﾉ		*Tanypodinae* gen. sp.	ﾃﾞﾝｽﾞﾐ亜科	136	40.8	52	14.0	64	6.4	160	3.2	96	+	288	67.2	64	22.4		
97					*Boreoheptagyia* sp.	ｷﾀﾆｽﾄﾗ属																
～																						
123					*Culicinae* gen. sp.	ｶﾁ亜科					4	1.6										
124			ｱﾌﾞ		*Simulium* sp.	ｱﾐﾏﾀﾞﾌﾞﾕ属	8	+			24	5.2							16	+		
125				ﾌﾄｱｼﾅｶﾞﾊﾞｴ	*Dolichopodidae* gen. sp.	ﾌﾄｱｼﾅｶﾞﾊﾞｴ科	16	5.6	4	+												
126				ｵﾄﾞﾘﾊﾞｴ	*Empididae* gen. sp.	ｵﾄﾞﾘﾊﾞｴ科	88	8.0	16	2.4									16	3.2		
127				不明	DIPTERA Fam. gen. sp.	ﾊｴ目	8	+														
128		ﾂﾉﾄﾝﾎﾞ		ﾀﾞﾙﾏﾂﾉﾄﾝﾎﾞ	*Ochthebius hasegawai*	ﾋﾒﾂﾉﾀﾞﾙﾏﾂﾉﾄﾝﾎﾞ																
129			ﾐｽﾞﾑｼ		*Hydrophilidae* gen. sp.	ﾀﾞﾙﾏ科																
130			ﾐｿﾞﾏﾙﾋﾒﾋﾗﾀﾑｼ		*Grouvellinus nitidus*	ﾋﾒﾐｿﾞﾏﾙﾋﾗﾀﾑｼ																
131					*Optioservus nitidus*	ﾋﾒﾐｿﾋﾗﾀﾑｼ			4	3.2												
～																						
139				ﾋﾒﾌﾄﾞﾙﾏﾑｼ	*Ectaetia* sp.	ﾋﾒﾌﾞｶﾞﾀﾋﾒﾌﾄﾞﾙﾏ属			4	+												
140					*Eubrianax* sp.	ﾏﾙﾋﾗﾄﾞﾙﾏ属					32	+										
141					*Mataeopsephus japonicus*	ﾋﾒﾌﾄﾞﾙﾏﾑｼ							64	+			256	9.6				
142					*Psephenoides japonicus*	ﾏﾙﾋﾞﾌﾄﾞﾙﾏﾑｼ					608	12.8	224	+	64	+						
143	触手動物	ｺｹﾑｼ	被喉	ｴｿｺｹﾑｼ	*Lophopodella carteri* (statoblast)	ｴｿｺｹﾑｼ(休芽)					*	9.6										
					合計個体数（個体/㎡）、湿重量（mg/㎡）		2,312	329.6	2,232	268.0	10,528	1,545.6	18,560	3,271.2	22,048	3,171.2	13,472	2,438.4	5,504	835.2	17,600	1,878.4
					合計種類数		38		43		37		42		42		35		48		46	

＊ダム上流と支川の２つにコントロールサイトを設けた例。表 5.4-2 と調査デザインが異なるので注意する。

表 5.4-5　サイト別優占タクサの比較表

調査区	優占順位	分類群	密度			機能摂食群
ダム上流	1	ｴﾘﾕｽﾘｶ亜科	473.2	±	115.4	CG, SC
	2	ｺﾋﾒﾐﾐｽﾞ	291.4	±	14.1	CG
	3	ﾌﾀﾊﾞｺｶｹﾞﾛｳ	215.3	±	0.9	CG, SC
	4	ﾔﾏﾕｽﾘｶ亜科	98.5	±	19.0	CG, SC
	5	ﾄｹﾞﾏﾀﾞﾗｶｹﾞﾛｳ属	72.6	±	1.3	PR
ダム下流	1	ｴﾘﾕｽﾘｶ亜科	3474.6	±	799.5	CG, SC
	2	ｱｶﾏﾀﾞﾗｶｹﾞﾛｳ	1564.8	±	31.2	CG, SC
	3	ﾌﾀﾊﾞｺｶｹﾞﾛｳ	1032.3	±	19.7	CG, SC
	4	ﾐｽﾞﾐﾐｽﾞ科	367.2	±	1.5	CG
	5	ｳﾙﾏｰｼﾏﾄﾋﾞｹﾗ	239.8	±	292.3	CF
支川合流後	1	ｴﾘﾕｽﾘｶ亜科	2144.3	±	854.8	CG, SC
	2	ﾌﾀﾊﾞｺｶｹﾞﾛｳ	665.7	±	9.5	CG, SC
	3	ﾋﾒﾄﾋﾞｲﾛｶｹﾞﾛｳ	567.7	±	45.8	CG, SC
	4	ﾐｽﾞﾐﾐｽﾞ科	501.3	±	1.3	CG
	5	ｳｽﾊﾞｶﾞｶﾞﾝﾎﾞ属	231.8	±	65.3	CG
支川	1	ｴﾘﾕｽﾘｶ亜科	761.3	±	231.0	CG, SC
	2	ﾌﾀﾊﾞｺｶｹﾞﾛｳ	291.9	±	46.2	CG, SC
	3	ﾐｽﾞﾐﾐｽﾞ科	254.2	±	276.0	CG
	4	ｺﾋﾒﾐﾐｽﾞ	215.2	±	391.8	CG
	5	ﾄｹﾞﾏﾀﾞﾗｶｹﾞﾛｳ属	175.4	±	67.7	PR

表 5.4-4 から各サイトの優占種群を整理した。摂食機能群の説明は 4 章のトピックスを参照。

(2) 解析結果の評価方法

以上のプロセスにより、調査サイトがダム下流の流程に沿って配置されていれば、

＊環境変量、付着藻類相・底生動物群集の下流方向への変化を明らかにする。

＊付着藻類・底生動物を指標として下流方向への影響範囲を明らかにする。

＊付着藻類・底生動物の変化を環境変量との関連性から考察し、変化を引き起こした環境要因を特定する。

ことがある程度可能となるだろう。ただし、環境要因の特定はあくまでも仮説のレベルであり、本当に特定した環境要因が付着藻類・底生動物に影響を与えているか否かは、仮説を検証する操作実験等が必要となる。

ところで、ダムの影響範囲やその程度が特定できたとしても、それが許容し得る範囲内かどうかは別途異なった評価軸を必要とする。どのような評価軸を設定するかは、該当する地域の自然的、社会的、歴史的背景により異なり、ここで一般化することは困難だが、付着藻類についてはアユの餌資源、景観・レクリエーションといった観点から評価する際の参考値が設定されているので、紹介しよう。

■親水活動、景観的な観点からの評価

表 5.4-6 に、河床付着物量に対する親水利用や視覚的な観点からの基準や許容値に関する既往研究を整理した。

表 5.4-6 親水利用や視覚的な観点からの基準や許容値

項目	項目	値
親水・リクリエーション利用の基準値（ニュージーランド環境省が河川局に推奨）（New Zealand Ministry for the Environment 1992）	糸状藻類（被覆率）	＜40%
	chl.*a*	＜100mg/m^2
	強熱減量	＜40g/m^2
親水・リクリエーション利用の許容値（Nordin 1985）	chl.*a*	＜50mg/m^2
許容できない付着物量（Horner et al. 1983）	chl.*a*	＞100-150 mg/m^2
	糸状藻類（被覆率）	＞20%
視覚的に許容される河床付着物量（自然共生研究センター（皆川ほか 2005、2006）	乾燥重量	＜10g/m^2
	強熱減量	＜5g/m^2
	chl.*a*	＜20mg/m^2
きれいと感じる河床付着物の目安（平山ほか 1994）	乾燥重量	＜15g/m^2
	強熱減量	＜5g/m^2
	chl.*a*	＜30mg/m^2

また、透視度や水生生物の生息状況など、河川の水質を従来の水質指標より分かりやすく評価するという観点から、「河川水質の新しい指標」（国土交通省河川局 2005）がまとめられている。

■アユの餌資源としての評価

アユの餌資源としての評価の参考として、全国内水面漁業協同組合連合会による「魚をほどよく放流するための手引き」（1992）から抜粋し示す。

・アユは灰分 80%程度の藻類でも利用することができるが、正常に生育するためには 50%以下が望ましい（村上ほか 1989）。

・灰分（強熱残留物／乾燥重量）が 60％以下であれば、肥満度が低下することがないと考えられている（大分県内水面漁業試験場 1989）

・河川が増水すると付着藻の剥離をもたらすが、藻類量は速やかに回復して増水があった時から 10 日以内に最高値に達し、藻類が回復した時は好漁となる（村上ほか 1989）。

以上のように、特に細粒土砂の沈積はアユの餌資源としての質にとってはマイナス要因になると考えられている。

この他、糸状緑藻もマイナス要因となることが指摘されており、ｶﾜｼｵｸﾞｻ*Cladophora glomerat* については、アユの後腸でも消化されないことから、成長阻害となる可能性が指摘されている（内田 2002）。

5.5 既設ダムを対象にした実態分析の例－調査計画・デザインの重要性の理解のために

本節では、5.2 に示した BACI デザインの基本を踏まえ、5.3 や 5.4 に示した調査項目・方法を適切に抽出し組み合わせて行った調査結果に基づき、ダムと下流河道状況との関係の何らかの側面について分析した事例を示し、調査・分析の組み立てに関する具体イメージをつかむための情報とする。

5.5.1 ダム供用後の河川における河床材料の分析（既設ダムの事例から）

(1)供用後十～数十年が経過したダム（物理環境変化を対象にした CI デザイン）

ダムの供用に伴い下流河川の表層河床材料がどのように変化したのか（あるいは変化していないのか）を調べることを目的に、その直上流、直下流河川の河道・水理条件があまり変わらないダム貯水池を選定し、上下流の河床材料を比較・整理した事例（山原ほか 2007）の概要を以下に示し、3.3.2、3.3.3 で説明した捉え方のイメージを深めるのに役立てる。

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（BA デザイン）、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（CI デザイン）が必要である。そして、上流にダムが無いことだけをもってコントロール区を設定してしまうことが不適切であることは 5.2.2(1)に述べたとおりである。本分析事例では、河床材料の分析を目的としていることから、コントロール区の設定に当たって、水理条件がインパクト区と概ね同じであることを確認しなくてはならない。逆に、こうした手続きを経ないコントロール区の設定は、信頼度の高い分析をもたらさない。

具体的には、以下のような検討を行っている（1.2 の研究紹介の再掲）。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、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ている。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 条件を用いてスクリーニングを行っている。その結果、 3 ダムが抽出された。以下に紹介するのは、こうして選定された３つのダムのうちの二つである。

調査時点（2006 年 2～4 月）においてダム供用後 30 年以上経過した土師ダムと 10 年未満の比奈知ダムを対象に、それぞれのダム上下流の水理･河道条件とそこでの河床材料が調べられ、両ダムに共通することが次のようにまとめられている。図 5.5-1 には、平均河床高、水面幅、流速、材料 m の代表粒径、水域の材料 t と陸域の材料 s の表面存在割合それぞれの河川縦断沿いの変化が示されており、あわせて参照され

たい。なお材料 m、s、t の説明は 2.2 を参照されたい。また調査区間における材料 m、s、t の存在状況の概要は図 5.5-1 中の下方に図示されている。

- 河床を構成する主材料 m（礫）の粒径は、ダム上下流で大きな違いがない。
- 水域の材料 t （砂）の表面存在割合は、ダム直下流で明らかに小さくなっている（図中の太矢印で示した部分）。
- 水域の材料 t（砂）のダム直下流で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。この回復の程度は、[残流域（流域面積－ダム集水面積）/ダム集水面積]の回復よりも早い。
- 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。なお、陸域は、ツルヨシなどの植生に覆われている。

これらの結果は、ダム下流の表層河床材料について、材料 m はダムにより変化しないか、変化が小さく、一方、水域の材料 t はダムにより一定区間で有意に減少することを示していると見ることができる。これらの結果は、また、材料 m、s、t や陸域・水域の違いによって、ダムによる河床材料変化の有無や起こり方が大きく異なる事例と言える。そして、ここで現れた河床材料の状況は、3.3.2、3.3.3 で説明した捉え方に沿った解釈により少なくとも定性的には説明可能と考えられる。

ここで紹介したのは 1 つの事例に過ぎず、この結果を、ダム下流の河床材料の一般的応答特性とすることは、もちろんできない。材料 m に粗粒化や流失などの有意な変化が生じているとの分析事例もある（たとえば山本 2004；時岡ほか 2006）。大事なことは、ダム下流であれば同じような現象が起こるとの前提をとるのではなく、ダムによる河道変化の有無や変化状況を個々に実証的に明らかにしていき、その上で、ダムと下流河道との関係の全体像について分析していくことである。その際には、たとえば、対象ダムの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（BA (Before and After)デザイン）、あるいは、水理・河道条件がほぼ同じ区間が当該ダムの直上下流に存在する場合の河道状況を上下流比較する（CI(Control and Impact)デザイン、上に紹介した例）、さらに、両方を合わせる（BACI デザイン）など、当該ダムとその下流河川の河道状況との関係を分析できるような調査の組み立てを行うことが肝要である。1.2 で述べたように、既設ダムについて、コントロール区に求められる条件をすべて満足する場所を見出すことは一般に難しい。あるべきコントロール区を設定できない多くの場合、そうした難しさを踏まえた上で、CI デザインに基づく分析を無理に行うのではなく、現在ふつうに投入できる土砂水理学的知見のレベルに見合う科学的合理性をもって調査・分析を行うというスタンスが重要であることは、1.4 で述べた通りである。

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。上で述べたように、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、４章で説明したように、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、ダム下流の河道状況についても、ステレオタイプの粗粒化にとらわれることなく、実河川での変化パターンを個々に実証的に掴み、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できる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。

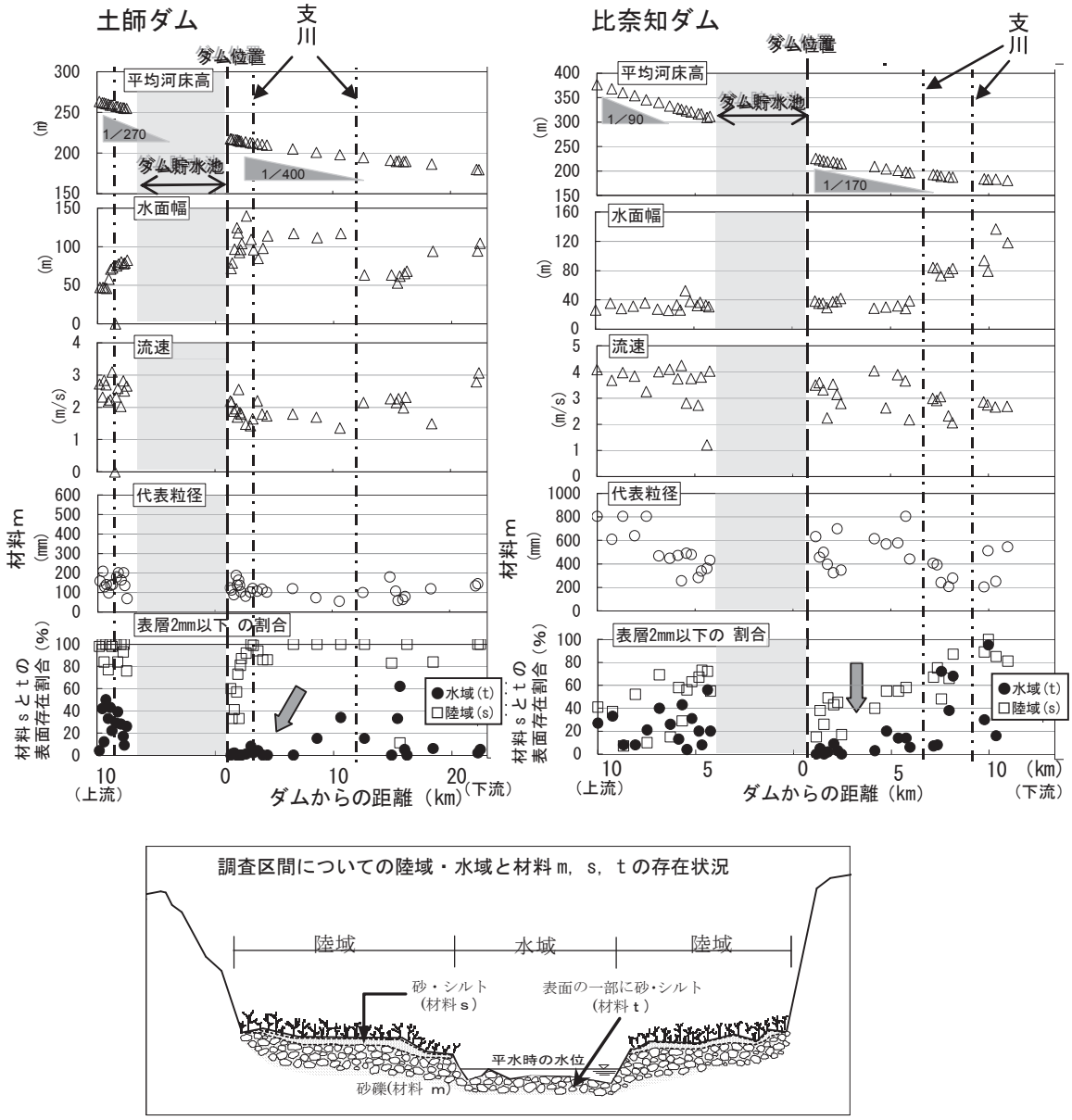


図 5.5-1　河道・水理条件が似ている河川区間を直上下流に持つダム貯水池についての河床材料の上下流比較の例

（右方向が下流向き：流速、水面幅は平均年最大流量時のもの：最下段の材料ｓ（陸域）、ｔ（水域）については、粒径 2㎜　以下の材料が表面に存在する面積割合で表示）

(2) 供用後間もないダム（物理環境変化を対象にしたBAデザイン）

先に示した供用後十～数十年が経過したダムの下流では、水域の材料 t（砂）の表面存在割合が減少していた。この材料の変化が、ダムの供用によりどのような過程を経て生じるのか確認するための調査が、供用後間もない３つのダムでBAデザインを基本に実施されている。以下その概要を、調査デザインに力点を置いて説明する。

調査対象とした３つのダムは、それぞれ以下の特徴を持つ。dダムは、扇状地の上流部に建設されており、土砂の供給や流量の復元が期待できる規模を有する支川はダム下流およそ15km程度まで見られない。河道は直線的であり、堆積層は厚く河床には大礫から小礫まで多様な粒径の材料が交互砂州を形成している。eダムは、ダム下流約1km付近に支川が合流しており、左右に大きく湾曲している。河床には中礫～大礫が浮石または載り石の状態で分布しており、試験湛水前において、河床表面に砂はほとんどない。fダムは、ダム下流約3km付近に支川が合流しており、左右に大きく湾曲している。河床材料は極粗砂や小礫、中礫からなり，巨礫や岩盤が露出したり浅い位置に存在する.

1) dダムの例

図 5.5-2 にdダムにおける試験湛水開始前（平成17年）、試験湛水開始後（平成18年）、及び供用後（平成19年）の粒径加積曲線（いずれもダム地点から下流5km区間に設定された4測線×横断方向約3点の表面材料の平均）の変化を示した。これによれば、2mm以下の砂等の材料の構成比率が20%から5%まで減少している。またこの区間のうちダム下流約2km地点における表面材料の平面分布の変化を図5.5-3に示す。砂州の形状が経年的に大きくは変化していない中で、みお筋では砂の分布域や構成割合が減少している一方、比高の高いところでは変化が小さいことがわかる。

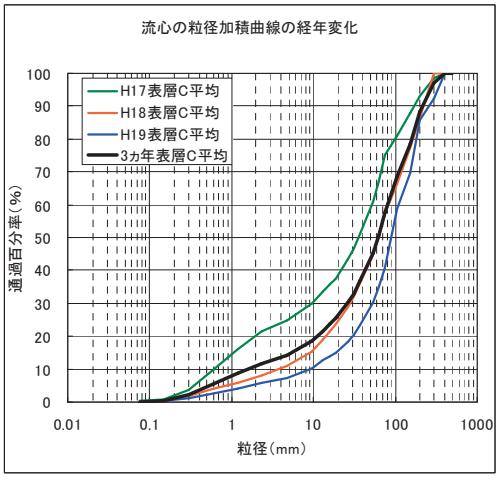


図 5.5-2 dダム下流5km区間における表面の河床材料

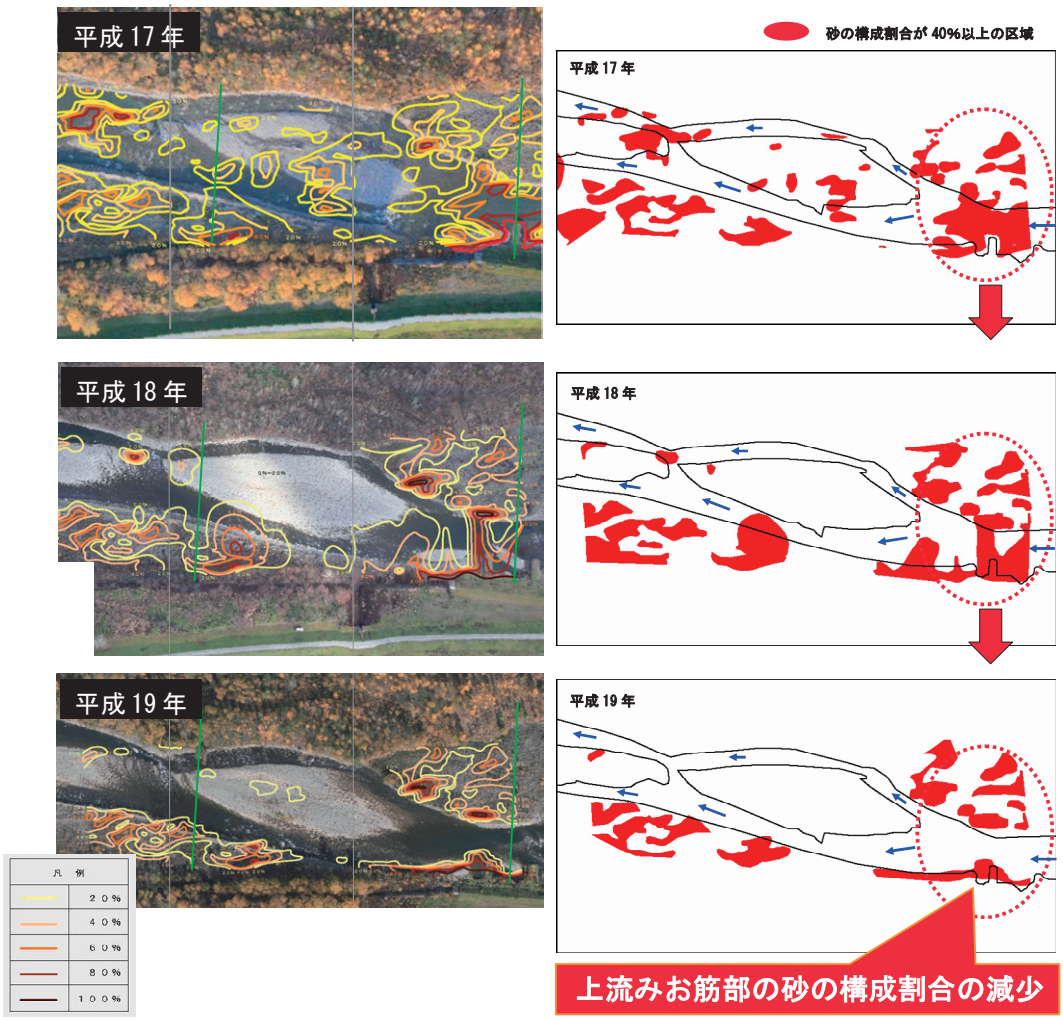


図 5.5-3 d ダム下流 2km 付近における砂泥（2mm 以下）の河床表面存在割合の変化

材料の変化を比較した期間のうち、平成 17 年は転流工を通じて上流から土砂が流下しているが、平成 18 年・19 年はともに土砂のほとんどを止めている。したがって、土砂収支上礫や砂の流下は減少しているはずであり、前出の砂の構成比率の減少の要因として、ダムの供用がまず考えられる。流入する支川はダムから約 15km 下流となる。この間、河床材料を有意に供給しえる河川や沢は存在しないことから、土砂の主たる供給源は d ダム上流に限定される。対象とした平成 17 年から 19 年の間には、平均年最大流量（ダム地点約 200m^3/s）相当の放流が 1 回発生している（日流量の時系列については図 5.5-4 参照）。この流量は、図 5.5-3 にある砂州域を冠水させる流量に相当する。この流量の継続時間は 3 時間程度であったため、砂州を十分には攪乱し得なかったと考えられる。さらに、平成 19 年は夏期において出水がほとんど発生していないため、河道内の攪乱はより限定的なものであったと考えられる。

これらが背景となって、みお筋の位置が大きくは動かない状態で、規模の小さな出水や平常時流量等において繰り返し流れの影響を受け続けたため、砂等がみお筋のみ減少したとの説明が浮かび上がってくる。

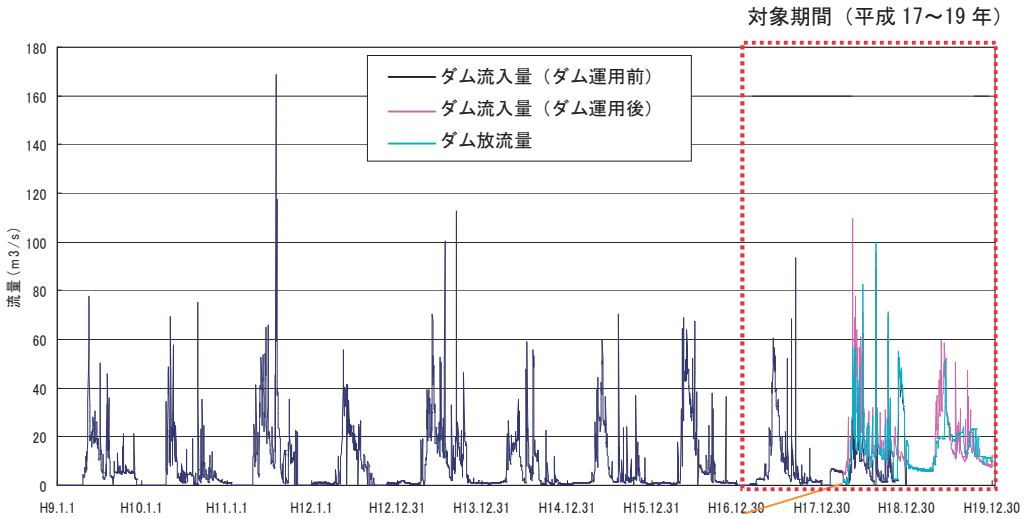


図 5.5-4　調査期間内に発生した出水の概要（流量は日流量）

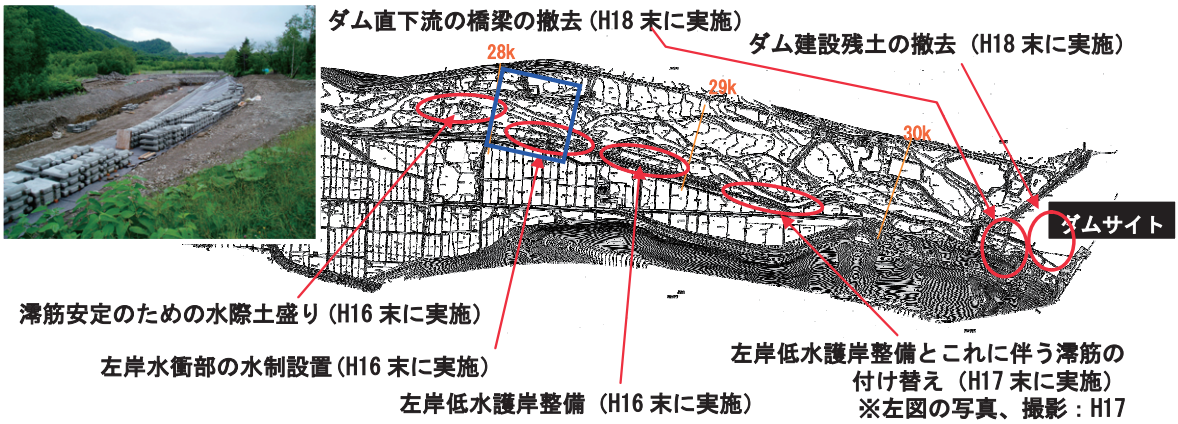


図 5.5-5　調査期間中における関連工事の状況
□は図 5.5-3 の調査地点

一方、平成 17 年は、ダム及び関連工事が実施されている最中であり（その概要を図 5.5-5 に示す）、工事に伴う土砂が多く発生していた。このことは、今回の比較において初期段階とした平成 17 年の河床材料が、自然の状態より多くの砂等の材料で構成されていたとも考えられ、前出に示した砂等の減少傾向は、場合によっては自然の状態に復元する過程であった可能性もまだ少し残る。

以上のように、d ダムで見られたみお筋の砂等の減少の要因として、ダムによる土砂の扞止が有力であるが、他の要因による可能性もまだ考えられ、的確なモニタリングをさらに続けるとともに、詳細な分析を行う必要がある。

2) e ダム・f ダム

図 5.5-6 に e ダムにおける試験湛水開始前（平成 17 年)、試験湛水開始後（平成 18 年)、及び供用後（平成 19 年）の粒径加積曲線（いずれもダム下流およそ 3km の縦横断方向計 15 測点の表面材料の平均）の変化を示す。これによれば、観測を開始した平成 17 年から 18 年までの間で 2mm 以下の砂等の材料の構成比率がほとんど見られなかったが、平成 19 年には 10%程度まで増加した。

また、図 5.5-7 に f ダムにおける試験湛水時（平成 17 年）及び供用後（平成 18 年、19 年）の粒径加積曲線（いずれもダム下流およそ 3km 区間の縦横断方向計 15 測点の表面材料の平均）の変化を示す。これによれば、観測を開始した平成 17 年から 19 年までの間に 2mm 以下の砂等の材料の構成比率が 20～30%増加した。

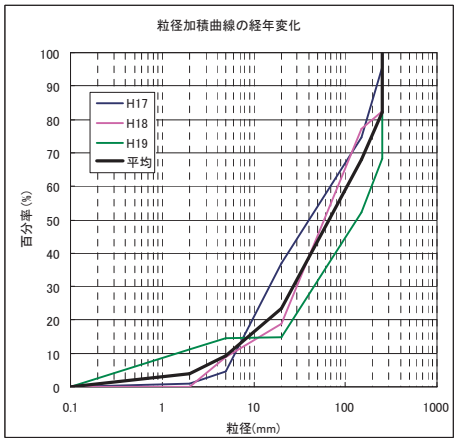


図 5.5-6 e ダム下流 3km 区間における表面の河床材料

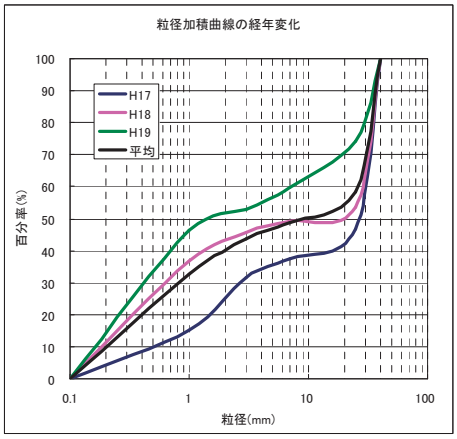


図 5.5-7 f ダム下流 3km 区間における表面の河床材料合の変化

ダムの供用によりダム上流から流下する砂等の材料の多くは、平成 17 年における e ダムを除き、すでに流下していない。ダム下流において流入する支川からは、砂等の材料の供給がある。したがって、支川が主な砂供給源となっている可能性が考えられる。対象とした期間は、d ダムと同様、夏期の降雨が少なく洪水調節を目的としたダム放流を行なっていない。このため、下流河川の攪乱頻度および規模は低下していると考えられる。

以上を考えれば、e ダム及び f ダムにおいて砂等の材料の構成割合が増加した主な理由は、「出水が発生しなかったこと」に加え、「支川から材料が供給されたこと」が考えられる。しかし、支川からどの程度の砂等の材料がどのタイミングで供給されたか、など現段階では明らかになっていない点が多いので、現段階ではあくまでも「仮説」の域を出ない。

3) きちんとした調査デザインに基づく継続的な調査の重要性

ここで紹介した三事例は、いずれも確定的な分析を行うにはまだ早すぎる段階である。また、BA デザインとしては、ダム完成前の調査期間・密度が少なすぎるという課題があるかもしれない。それでも、いくつかの有益な情報が得られつつあることが分かる。現時点で結果が確定していないことが問題なのではない。BA デザインに基づいて、このような計画的な調査をさらに継続し、科学的な分析に必須の情報を漏れなく蓄積していくことで、ダムと下流河川の物理環境との関係について意味のある知見を得ていく道筋に乗っていることが重要なのである。分析目的が達成されるように“仕掛け”られた調査を実施することが肝要であり、いくら長い期間調査を行っても、元々の調査デザインが目的と整合していない場合には、良い結果が得られないことを肝に銘ずべきである。このことは、たとえば、何かのインパクトを与える前の調査が無いまま、インパクト後の調査を積み重ね、インパクトの影響をそれだけから明らかにしようとする状況を想起すれば容易に理解できる。

5.5.2 既設ダムにおける付着藻類・底生動物の実態分析について（CI デザイン）

(1) 調査のポイント

ここでは、既設ダムの分析事例として中部地方の j ダム下流（集水面積 504.5 km^2、竣工 1970 年)において底生動物の生息と環境要因との関連性の把握を目的として実施した調査結果を紹介しよう。この事例では、底生動物の生息に関係する幾つかの環境要因に関するデータ（環境変量）を収集し、ダムによる土砂供給量の多寡と河床材料の組成の変化が底生動物に及ぼす影響を明確にしている。特に、ダム下流に流入する支川 B 川（ダム直下から 0.8km で合流、集水面積 89.5 km^2）からの土砂供給がダム直下に見られる底生動物相の回復に寄与する傾向が見られる点は興味深い。ダム下流における調査イメージを掴んで頂ければ幸いである。

(2) 調査デザイン

本調査は既設ダムの下流河道における底生動物相の変化とその要因との関係がダム下流方向にどのように変化するかを明かにすることを目的として行った。特に、ダム下流における支川流入が下流方向への変化をどの程度緩和するかが調査の主要な目的であった。

本調査は既設ダムを対象としたものであり、事前調査が行われていないことから、コントロール区を設定し、インパクト区との比較により変化の抽出を試みた（CI デザイン)。コントロール区の設定に当たっては、ダム貯水池上流にもサイト候補地を設定し予備踏査を行ったが、平成 12 年に発生した恵南豪雨に伴う土砂流出により河床に材料 s あるいは t が堆積し、河床材料の粒度組成がダム下流で合流する B 川と著しく異なったためコントロール区の設定を見送った。

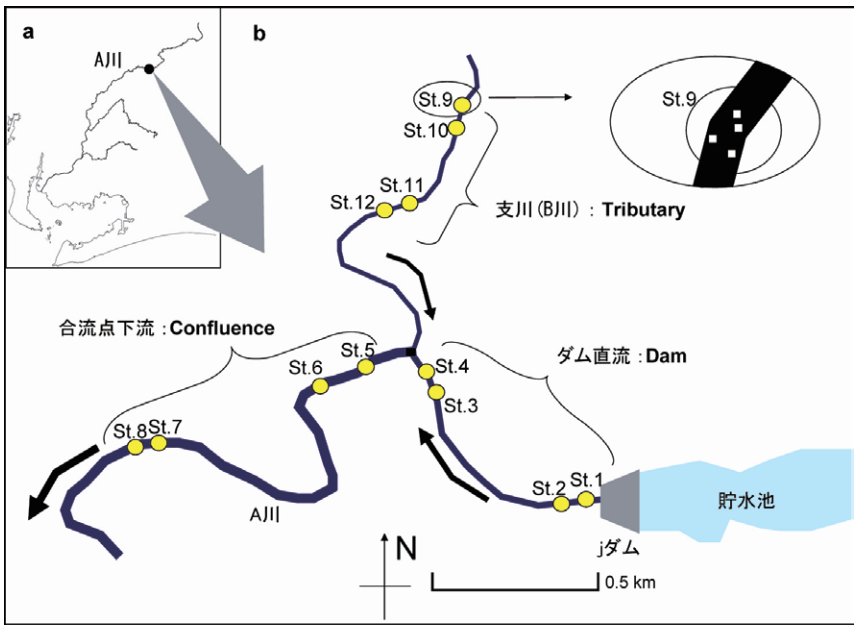


図 5.5-8 調査サイトの設定状況

ダム直流、合流点下流がインパクト区、支川がコントロール区

各調査サイトは2つの調査ステーションから構成され、例えば、St.1 と St.2 がダム直下流のサイト、St.5 と St.6 が支川合流後のサイトとなっている。これは 5.4 で説明したように 1 サイト内に 2 つの瀬を設定し、瀬間のデータのばらつきの程度を明確にし、統計的な処理をし易くすることを意図した。インパクト区としてダム直下流に2サイト（St.1・St.2）、支川合流前後に2サイト（St.3・St.4、St.5・St.6）を設定し、コントロール区として支川に 2 つのサイト（St.9・St.10、St.11・St.12）、合計 6 つのサイトを設定した。また、各調査サイト内の瀬を対象とし各瀬にランダムに 4 つのサンプリング地点を設けた。

(3) 調査結果の概要

1) 各サイトにおける環境変量の特徴を把握する

まず、環境変量の一覧表を作成してみよう（表 5.5-1）。5.4.3 で説明した環境変量を全て扱っていないが、底生動物の生息に関わる代表的な変量は網羅されている。サイト別に各変量の平均値と標準偏差を示し、最右欄には一元配置分散分析結果を示している。また、解析結果で平均値に有意差（$P<0.05$）が認められる場合には多重比較を行い差が認められるサイトを明示した。各変量の添字に”a”、”ab”等の文字があり、同一文字が添えられていない場合はサイト間に差があることを示している。例えば、河床材料の「小礫」は、「ダム直下流」と「支川」では差が見られるが、支川合流点下流は”ab”であり、「ダム直下流」の”a”、「支川」の”b”と同一文字が含まれるため有意差は認められない。このプロセスから、どの環境変量に差が見られるか、そして、差が見られるサイトが明確となり、ダム下流における環境要因を具体的に明らかにすることができる。

表 5.5-1 各サイトの環境変量と分散分析結果

	サイト			一元配置分散分析	
環境変量	ダム直下流	支川合流点下流	支川	*F*	*p*
水深 (cm)	34.85 ± 1.68	30.18 ± 2.34	31.53 ± 2.98	0.95	0.42
流速 (cm s^{-1})	49.79 ± 6.10	41.75 ± 3.91	57.40 ± 4.43	2.73	0.08
河床材料					
砂(%)	0.00 ± 0.00 a	1.02 ± 0.47 b	3.49 ± 0.85 b	15.41	**<0.01**
小礫(%)	2.10 ± 0.99 a	5.54 ± 1.24 ab	9.61 ± 1.31 b	9.31	**<0.01**
中礫 (%)	10.05 ± 3.13	10.97 ± 1.75	16.20 ± 2.87	1.59	0.26
大礫 (%)	32.60 ± 7.59	53.20 ± 3.01	49.59 ± 5.09	3.97	0.06
巨礫 (%)	55.26 ± 11.18	29.28 ± 5.25	21.11 ± 8.38	3.63	0.07
掃流砂 (mg m^{-3})	1.52 ± 0.36 a	6.90 ± 0.68 b	29.83 ± 10.16 c	37.82	**<0.01**
流下細粒状有機物					
動物プランクトン (mg m^{-3})	5.22 ± 2.52 a	2.42 ± 1.00 a	0.00 ± 0.00 b	13.05	**<0.01**
残渣(mg m^{-3})	3.53 ± 1.88	5.14 ± 2.53	6.50 ± 1.36	1.54	0.25
流下粗粒状有機物(mg m^{-3})	1.31 ± 0.57	13.41 ± 3.52	26.18 ± 7.59	4.70	0.04
河床のchl-a(mg m^{-2})	5.00 ± 0.56	7.88 ± 3.84	13.54 ± 5.76	0.27	0.77
堆積細粒状有機物 (g m^{-2})	0.71 ± 0.07 a	0.76 ± 0.08 a	0.34 ± 0.02 b	13.95	**<0.01**
堆積粗粒状有機物(g m^{-2})	4.68 ± 0.71	5.35 ± 1.01	2.60 ± 0.23	3.69	0.07

ただし、統計的な有意差は一つの目安であることに注意しよう。有意水準が 0.05 を上回っても、当該変量の空間・時間的な変動が大きく差が出にくい場合がある。また、逆に時空間的に変動が極めて小さい場合には有意差が認められても生態的には意味のない場合もある（例えば、水深 50cm と 55cm で差が認められる場合等）。

j ダムの調査では、調査サイト間で差が認められた環境変量は、砂、小礫の割合、掃流砂量、流下動物プランクトン量（主にｿﾞｳﾐｼﾞﾝｺ）及び堆積細粒状有機物量（B-FPOM 量）であった。これらの差異を視覚化し理解しやすくしてみよう（図 5.5-99(A)、(B)）。河床材料の粒径別面積占有率を見ると、ダム直下流では砂や小礫の抜け出しが生じ、巨石の割合が大きく、粗粒化傾向を確認できる。また、掃流砂量はダム下流では小さく、支川では大きいこと、流下動物プランクトン量は支川では見られず、ダム下流で大きいこと、河床に堆積する細粒状有機物（B-FPOM）の量が支川で小さいことが理解できる。

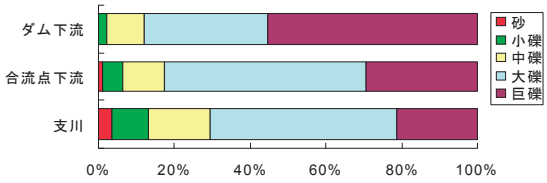


図 5.5-9（A） 表層河床材料の面積占有率

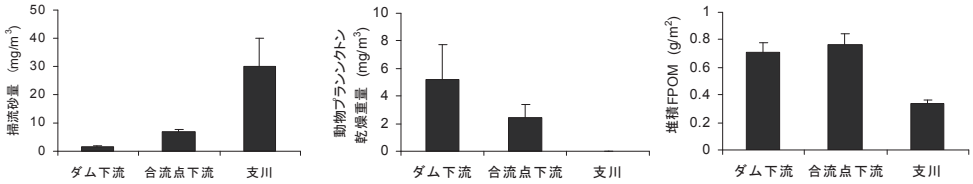


図 5.5-99(B) 掃流砂量（左）、流下動物プランクトン量（中央）、堆積細粒状有機物量（右）（平均値及び標準偏差）

2) 各サイトにおける底生動物相の特徴

底生動物のデータ整理においても、5.4.4 で示したようにサイト別のタクサ一覧表を作成し、その後各サイトにおける底生動物相の特徴を把握するため優占 5 位までのタクサ（分類群）とそれらの「生活型（底生動物の形態や生活の仕方による分類」及び「摂食機能群（底生動物の餌の種類や摂餌方法に着目した分類）」（表 5.5-2）、各調査区の出現タクサ数、総個体数、Simpson の均衡度（図 5.5-810）、各摂食機能群の割合（現存量）（図 5.5-11）を整理するとよい。本調査では、ダム下流の底生動物相の特徴として、出現タクサ数は少なく、Simpson の均衡度が小さいこと（一部のタクサの現存量が大きい）、生活型では造網型（石面に流下有機物を捕らえる網と巣を造り生息する）や固着型（石面に固着あるいは巣を固着させその中に生息する）、摂食機能群では濾過食者や堆積物食者の現存量が大きいことが理解できる（生活型、摂食機能群の詳細は 4.3.3 トピックス参照のこと）。一方、支川や合流

点下流では、匍匐型（石面を歩いて移動する）、刈取食者（石面の付着藻類を摂食する）や捕食者（生きた動物を摂食する）が優占し、ダム下流とは異なる底生動物相となった。特に支川優占 1 位、合流点下流優占 3 位のﾔﾏﾄﾋﾞｹﾗ属（刈取食者）は、ダム下流では優占種として確認されなかった種である。

表 5.5-2　優占タクサとそれらの「生活型」と「摂食機能群」

調査区	順位	タクサ	生活型*1	摂食機能群*2
ダム下流	1	ヒゲナガカワトビゲラ	造網型	濾過食者
	2	ウスバヒメガガンボ属	固着型	堆積物食者
	3	ウルマーシマトビケラ	造網型	濾過食者
	4	アシマダラブユ属	固着型	濾過食者
	5	コガタシマドビケラ属	造網型	濾過食者
合流点下流	1	ヒゲナガカワトビゲラ	造網型	濾過食者
	2	チャバネヒゲナガカワトビ	造網型	濾過食者
	3	ヤマトビケラ属	匍匐型	刈取食者
	4	ナカハラシマトビケラ	造網型	濾過食者
	5	ウルマーシマトビケラ	造網型	濾過食者
支川	1	ヤマトビケラ属	携巣型	刈取食者
	2	ナミヒラタカゲロウ	匍匐型	刈取食者
	3	カミムラカワゲラ	匍匐型	捕食者
	4	ヒゲナガカワトビゲラ	造網型	濾過食者
	5	オオマダラカゲロウ	匍匐型	補食者

*1　底生動物の形態や生活の仕方に着目した分類（津田　1962）
*2　底生動物の餌や摂餌方法に着目した分類（Merritt & Cummins 1996）

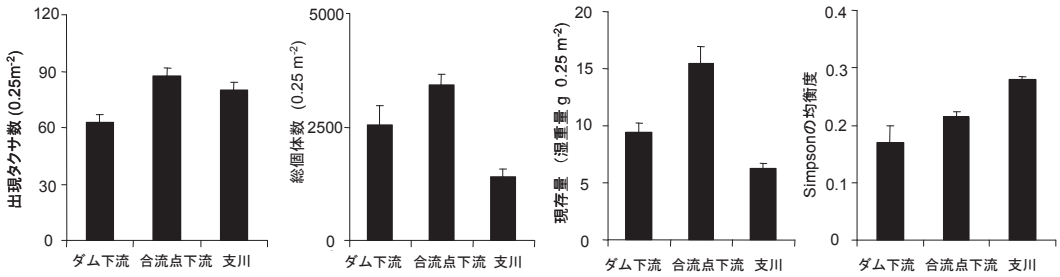


図 5.5-10　各調査区の底生動物の出現タクサ数、総個体数、現存量、Simpson の均衡度
（平均値及び標準偏差）

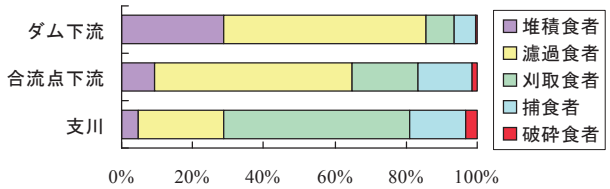


図 5.5-81　各摂食機能群の割合

3) 底生動物相と環境要因との関連性の把握

ここまで行ってきた解析は 5.4.4 で説明したステップ 1 と 2 に相当するが、ここまで行った基本的な解析からだけでも、ダム下流における底生動物相の特徴と環境要因との関連性がぼんやりと理解できることが実感できただろう。例えば、底生動物相を見ると、ダム直下では出現タクサ数が少なく、均衡度が低下し、造網型・固着型、濾過食者・堆積物食者が多かった。一方、支川における出現タクサ数と均衡度は逆の傾向を示し、刈取食者・捕食者、携巣型・匍匐型が多く、合流点下流ではその中間的な群集構造を示していた。また、環境変量についてはダム下流では砂、小礫、掃流砂量が少なく、流下動物プランクトン、堆積している細粒状有機物(B-FPOM)が多く、支川ではその逆の傾向が見られた。造網型が流下動物プランクトンを濾過し、堆積物食者が細粒状有機物(B-FPOM)を摂食すること、固着型が巨礫表面上に巣をつくり生息すること、携巣型のﾔﾏﾄﾋﾞｹﾗが砂や小礫を巣材として利用すること等各タクサ固有の生態を知っていれば、以上で整理した結果から、ダム下流における底生動物相の変化とその要因をある程度理解することが可能となる。

5.4.4 で説明したステップ 3 はより高度な解析手法を適用し、①生物の群集構造からサイト間の関係性を解析する。更に、②群集構造と環境変量との関連性を明確にする、ことを目的として行われることが多い。

表 5.5-3　2 元指標種分析（TWINSPAN；Two-way Indicator Species Analysis）の結果

（数値は現存量を示し、数値が大きい程現存量が大きい）

図 5.5-8 の各 st に 4 つのサンプリング地点を設けているため 12st×4 サンプリング地点で合計 48 のサンプリング地点から構成される。解析の結果、種群・サンプリング地点はそれぞれ 4 つのグループに分割された。サンプリング地点別に見ると支川＋支川合流後、ダム下流で分割され、次に、前者は支川サイトと支川合流後サイトに、後者は更に 2 つに分割された。ダム下 2 はダムサイトから遠方に位置する地点から構成され、ダム直下から流下するに従い群集構造が変化していることが理解できる。

| ｻｲﾄ名 | | 支川 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 支川合流後 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | ダム下2 | | | | ダム下1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 分類ﾚﾍﾞﾙ |
|---|---|---

本事例では、2 元指標種分析（TWINSPAN; Two-way Indicator Species Analysis）により、各サンプルの底生動物群集構造からサイト間の類似度を解析している（表 5.5-3）。また、底生動物群集と環境変量との関連性については、群集の類似度を非計量的多次元尺度構成法（NMS; Non-metric Multidimensional Scaling）で解析し、NMS スコアと環境変量との相関分析を実施している（図 5.5-412）。

2 元指標種分析の結果を見ると（表 5.5-3）、合流点下流の底生動物相は支川に類似し、ダム直下流の底生動物相は支川及び支川合流後と異なっていることが理解できる。また、ダム直下流は 2 つに分割され（ダム下 1 とダム下 2）、ダムサイトからより遠いサンプリング地点が比較的類似するグループとなっている。以上の結果はダム直下流から比較的短い区間で底生動物相が変化すること、そして、支川が底生動物相の回復に寄与していることを示すものであり極めて興味深い。なお、本調査の後に実施した r ダムの下流でも同様の結果が得られている。

非計量的多次元尺度構成法の解析では 2 次元平面図上に環境変量のベクトル、サンプリング地点、種群がそれぞれプロットされ、類似度から見たサンプリング地点や種群の相対関係、環境変量とサンプリング地点、種群との相関関係を理解することが可能となる（図 5.5-82）。本図から、3 つのサイトに河床材料の粒度組成、動物プランクトンの流下量及び堆積細粒状有機物量（B-FPOM）の違いが調査サイト間の底生動物相の違いを説明する主な因子であることが解る。ダム下流で優占した固着型のｳｽﾊﾞﾋﾒｶﾞｶﾞﾝﾎﾞ属、ｱｼﾏﾀﾞﾗﾌﾞﾕ属などは、大きな礫に好んで生息すると言われている。ダム下流におけるこれらの増加には、巨礫の割合が大きいことが関与していると考えられる。一方、支川や合流点下流で優占したﾔﾏﾄﾋﾞｹﾗ属は、河床表面の砂を口から吐いた絹糸で固め巣を造り、これを携巣しながら移動し、礫表面の付着藻類を摂食する。常に巣を補修し続ける必要があるため、その生息には粒径 2mm 以下の砂が必要であるとされている。砂がみられないダム下流ではその生息が阻害され、支川合流後は、支川からの供給土砂によって砂が増加し、生息が可能になったものと考えられる。これらの種群は、巨礫の割合の増加や砂分の抜け出しなどの河床材料の粒度組成の変化を示す指標種となり得ると考えて良いだろう。また、ダム下流で優占した濾過食者は、流下動物プランクトン量との間に強い対応関係がみられ、ダム湖で増殖した動物プランクトンの流下が、有機物を摂食する濾過食者の餌環境を有利にしたと考えられている。堆積物食者については、それらの餌となる B-FPOM 量と対応関係が見られる点に注目してほしい。

4) 今後の課題と留意点

生物相の変化は幾つかの環境要因の変化が複合的に作用した結果として引き起こされる。今回のケースでは、土砂供給量の減少、動物プランクトンの増大などに起因しダム直下の底生動物相が変化していた。ただし、2 元指標種分析からダム直下流においては比較的短い距離で底生動物相が変化したこと、そして、支川合流によって底生動物相が支川に類似した群集構造を示したことから、環境要因と生物相

との関連性は流下方向にきめ細かく評価する必要があることが理解できる。特に、相対的に小さい集水面積（本ケースでは本川に対しておよそ 20%の集水面積）の支川流入であっても、底質の改善と底生動物相の回復に寄与する可能性が確認できたことから、支川合流に伴う土砂供給量の増加を今後適切に評価することが必要になろう。このことは、5.5.1(1)で述べたダム下流における砂の表面存在割合の回復に関する知見とも対応しており、興味深い。また、ヤマトビケラ属等の刈取食者の減少が付着藻類相を変化させることは既に数多く報告されている。今後これらの生物相互関係を加味し、土砂供給量減少の影響を生態系の変化として捉えていくことも必要になるだろう。

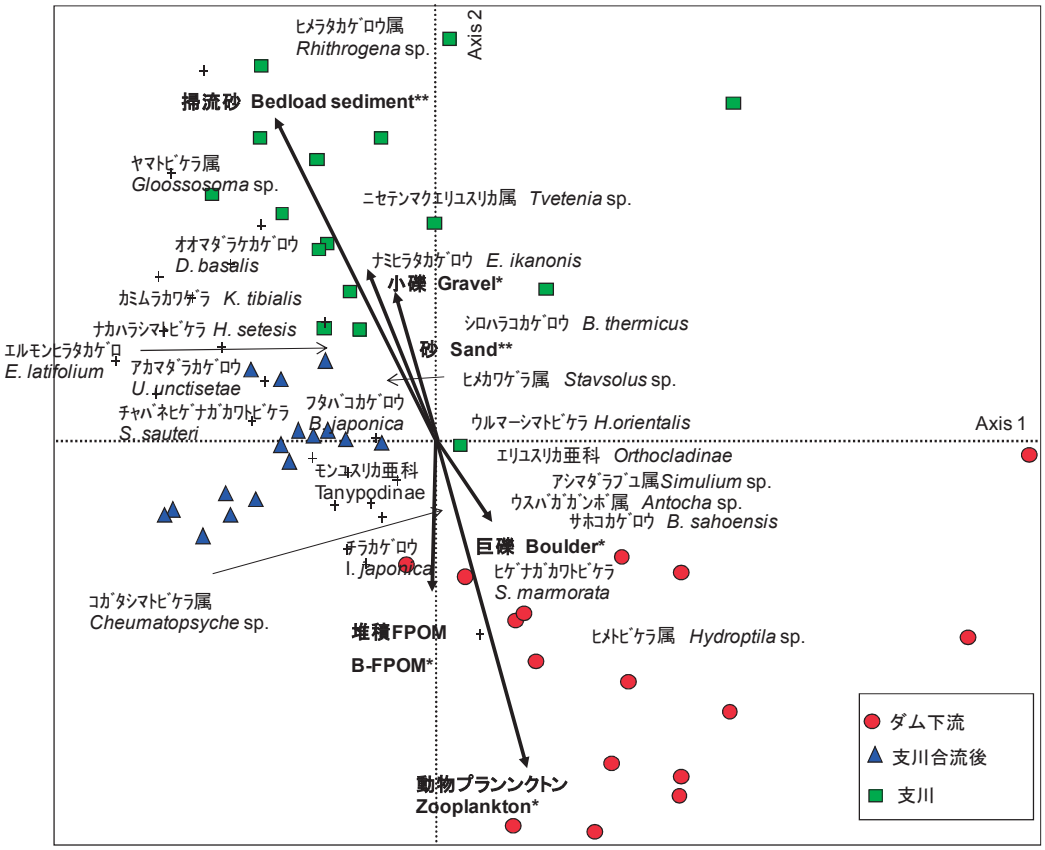


図 5.5-9　非計量的多次元尺度構成法による解析結果

3 つのサイトはそれぞれまとまって分布していること、ダム直下は動物プランクトン、巨礫、堆積細粒状有機物が、支川は掃流砂、砂、小礫がその場を特徴付けていることが理解できる。支川合流後のサイトは両サイトの中間的位置に分布する点が興味深い

ところで、以上、本事例で用いたツールはそれぞれ確立した手法であり、汎用性も高い。しかし、これらの手法が適用できる前提には、明確な目的と目的に沿った調査デザインの組み立て、精度の高い調査・分析があることを忘れてはならない。多くの既存調査を見ると、「コントロール区が設定していない」、「インパクト区の設定数が少ない」、「サンプリングを 1 地点で行っている」、「対象とする環境変量の

項目が少なすぎる」といった問題が見られ、以上に示した解析の実施が困難である場合が少なくない。以上の問題点を改善するためには、調査デザインの検討にかかる時間や調査そのもののコストが増大するといった課題も生じるが、問題を抱えたままの調査からは何の知見も得られない、即ち、実施する意味のない調査であることを強く意識することが必要である。

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ちうる。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に対象を絞り、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な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）の予測を主に取り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。

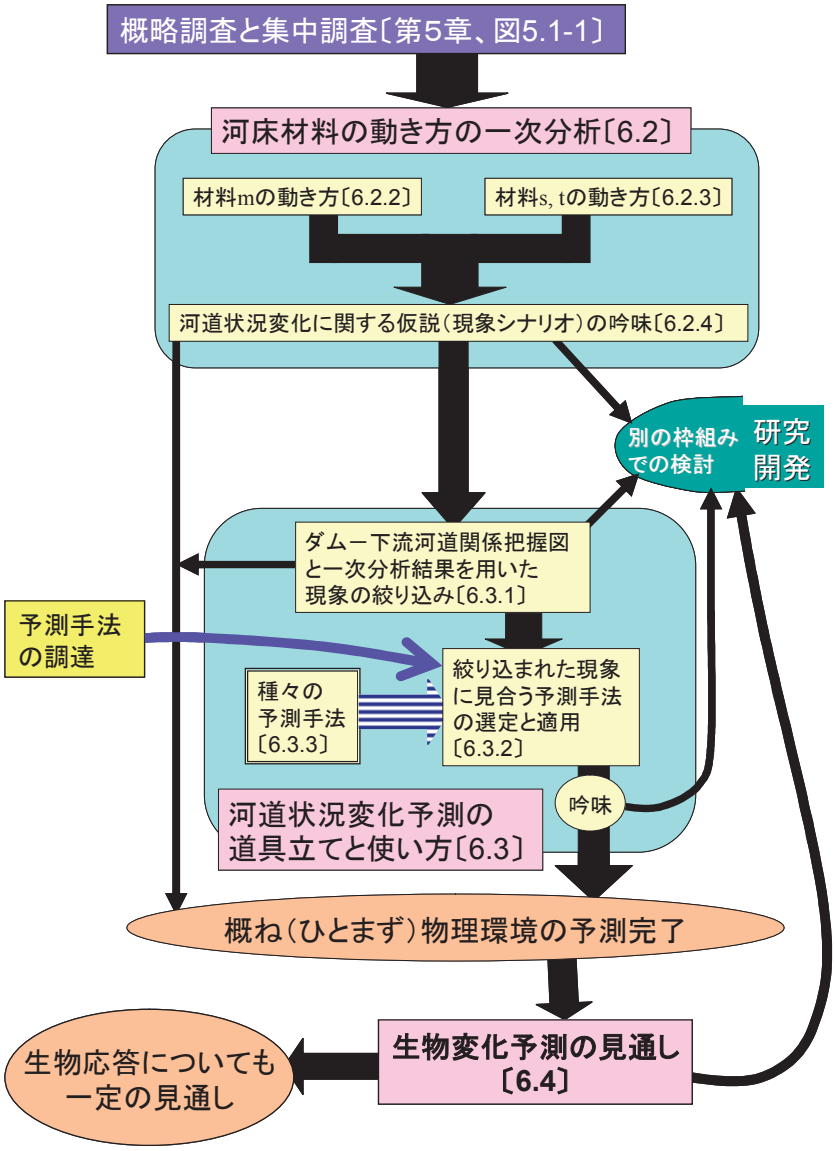


図 6.1-1　第 6 章で扱う予測の全体像

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τ_*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。

$$\tau = \rho u_*^2 \qquad (6.2\text{-}1)$$

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

ここで、τ：掃流力、ρ：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℃）。

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

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、

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

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}：河床全体のではなく，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。

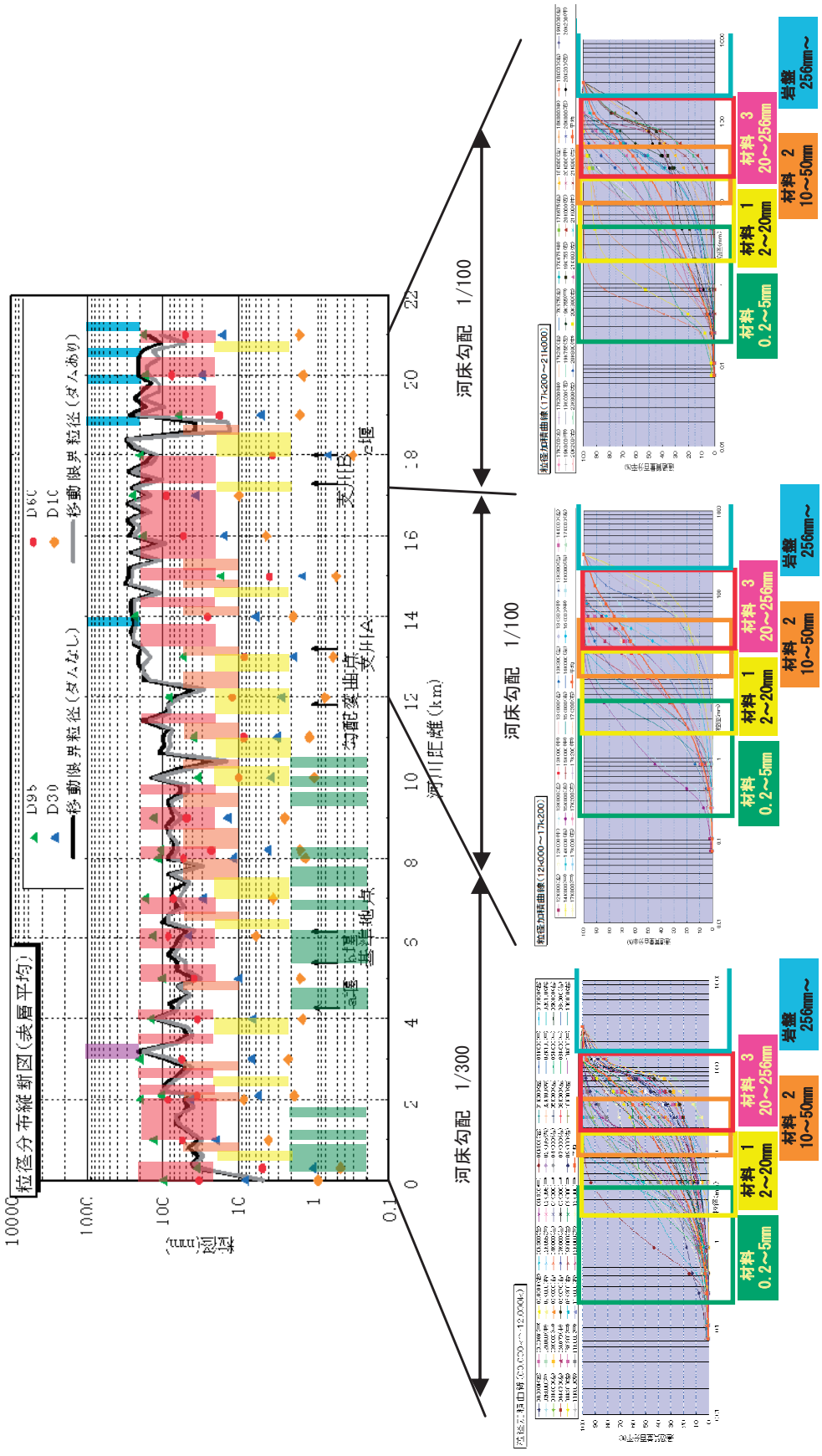


図 6.2-1 粒径集団の粒径レンジと移動限界粒径との比較分析
（平均年最大流量を対象とした比較例）

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出てくる。

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。

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

(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 τ_{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 τ_{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。

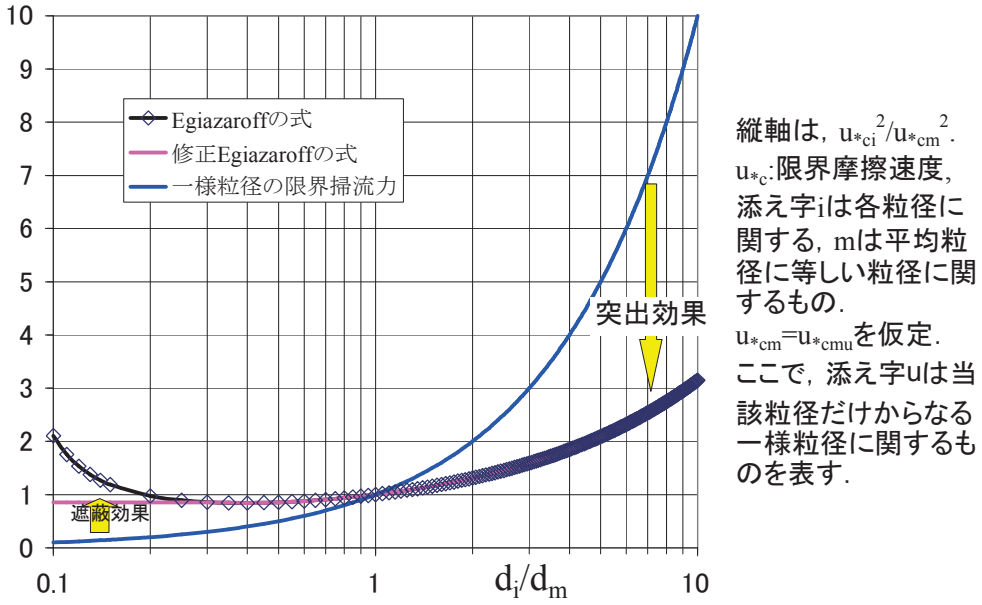


図 6.2-2　移動限界摩擦速度についての岩垣の式と修正エギアザロフの式との比較

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性を把握することが、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ので（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、ダムによる土砂扞止の影響が材料 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（平舘ほか 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。

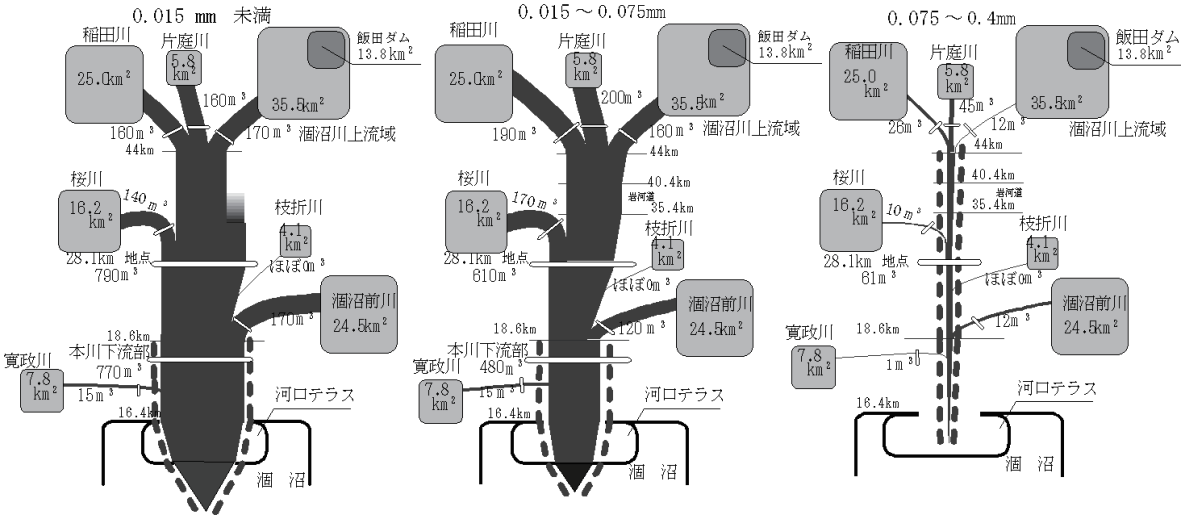


図 6.2-2 水系土砂動態マップの作成例（涸沼川流砂系：1998 年 9 月 16 日洪水による総移動量）
河道の太さが土砂移動量に対応。河道を跨ぐ白線は観測点であり、傍らに土砂通過量が示されている。混合型で輸送される区間のみ、河道の横に点線を付している。サブ流域を表す四角内の数字は土砂生産源の面積である。このようなマップを描くことによって、どのサブ流域がどの粒径集団の供給を主に担っているかの把握、河口テラスを構成している粒径集団とその先の湖底の底質を構成している粒径集団の特定、たとえばダム貯水池建造などのインパクトがどの粒径集団にどのような影響を与えるか？　そしてそれが河床変動や海岸侵食に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

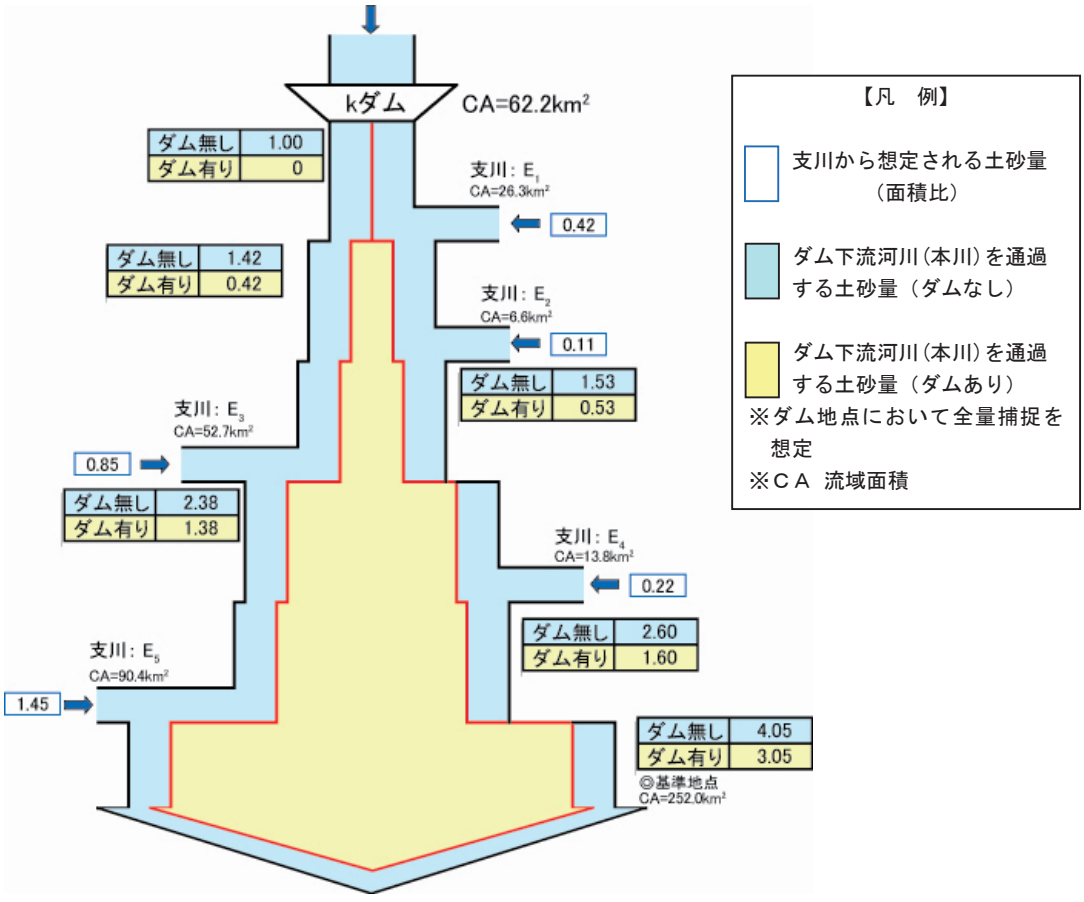


図 6.2-3　砂集団の水系土砂動態マップの作成イメージ（分析例-1）
（ダム地点でのダム無し時の砂流送量を１として表示）

(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出てくる。

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ので、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。

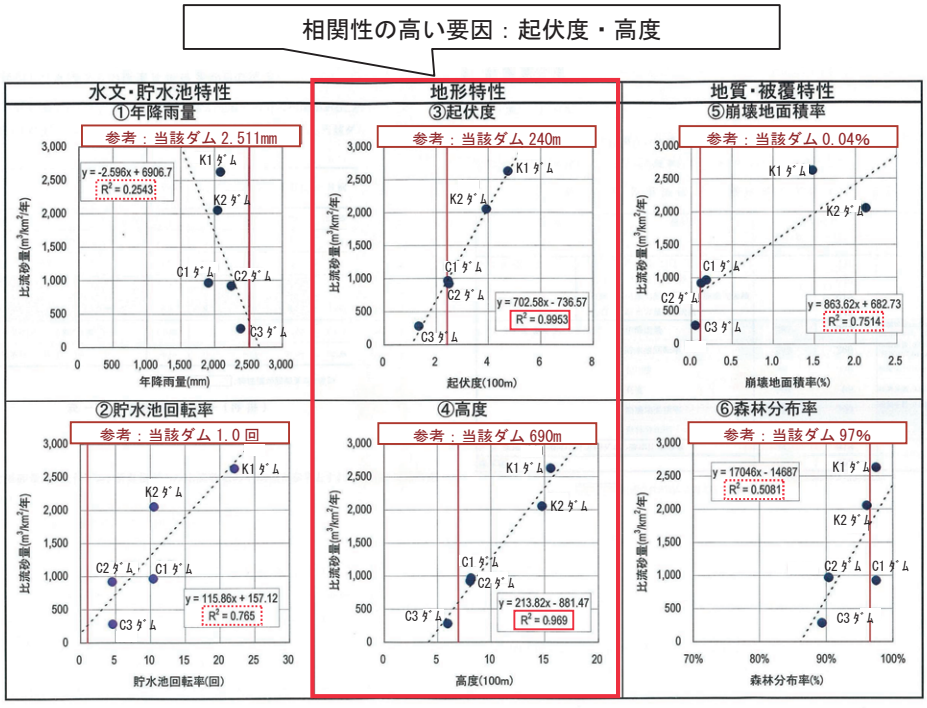
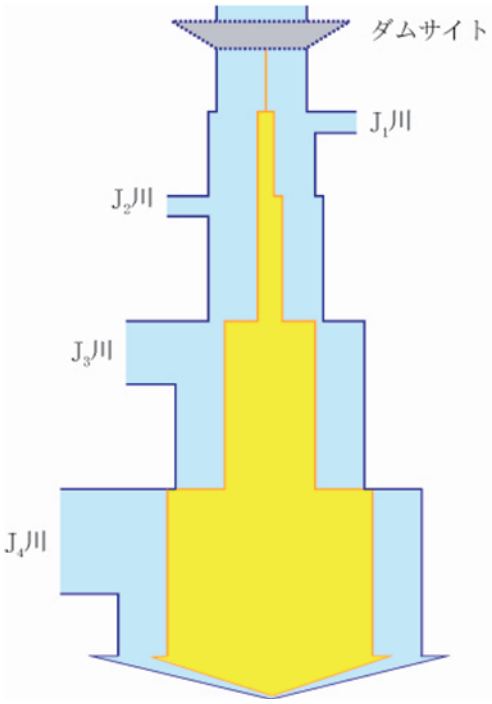


図 6.2-4 類似ダムにおける土砂発生要因と発生量の関係の分析イメージ
（全粒径の土砂量）



河川	支川流出土砂量 ×10³m³/100年	本川通過土砂量 ×10³m³/100年
ダムサイト		5,823
		0
J1川	1,142	6,965
		1,142
J2川	674	7,639
		1,816
J3川	4,518	12,158
		6,334
J4川	7,131	19,289
		13,466

ﾀﾞﾑ下流河川(本川)を通過する土砂量（ﾀﾞﾑなし）
ﾀﾞﾑ下流河川(本川)を通過する土砂慮（ﾀﾞﾑあり）
※支川土砂量は、比堆砂量～起伏度、高度式により算出される発生土砂量のうち小さい値をもって設定

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“レール”に頼り切るのでなく）、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？
- ○ 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ため、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見なせる。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 は岩の上にところ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いくだけである」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部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 500m^3/s（1120➔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に判断し、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－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－下流河道関係把握図を用い、ダム－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－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行っている。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。このことの具体例は以下である。

「ダム－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－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 Qin と放流量 Qout）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、Qin 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、$(Qout+Q_{支川})/(Qin+Q_{支川})$ 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。

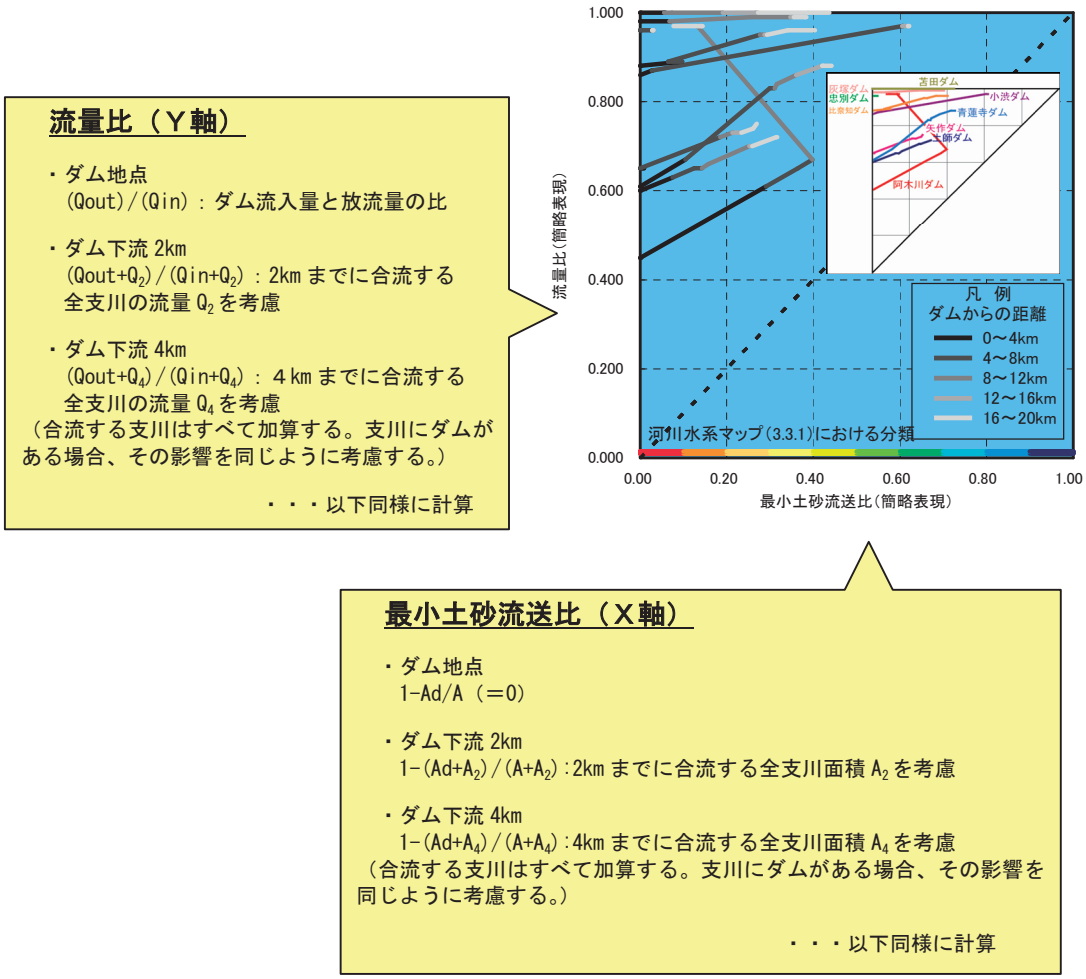


図 6.3-1　ダム－下流河道関係把握図へのプロット

【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－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。

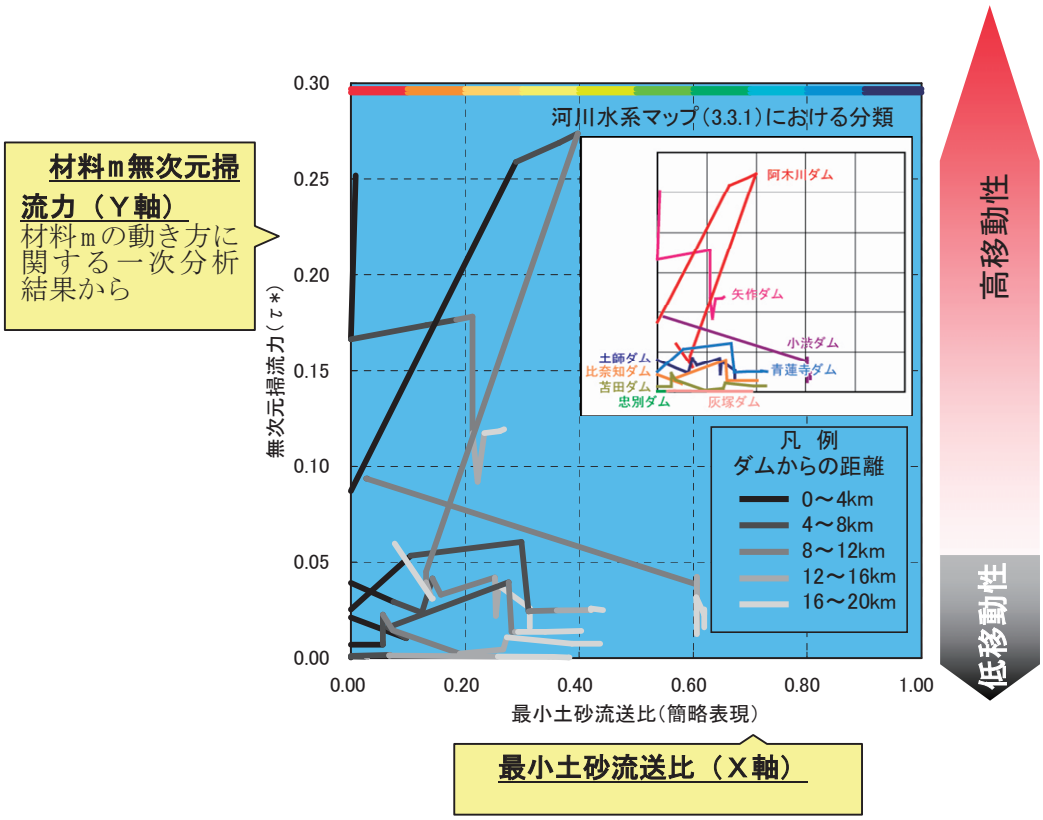


図 6.3-2　最小土砂流送比～材料ｍ無次元掃流力図（ダム無し状態を想定して算定）の作成

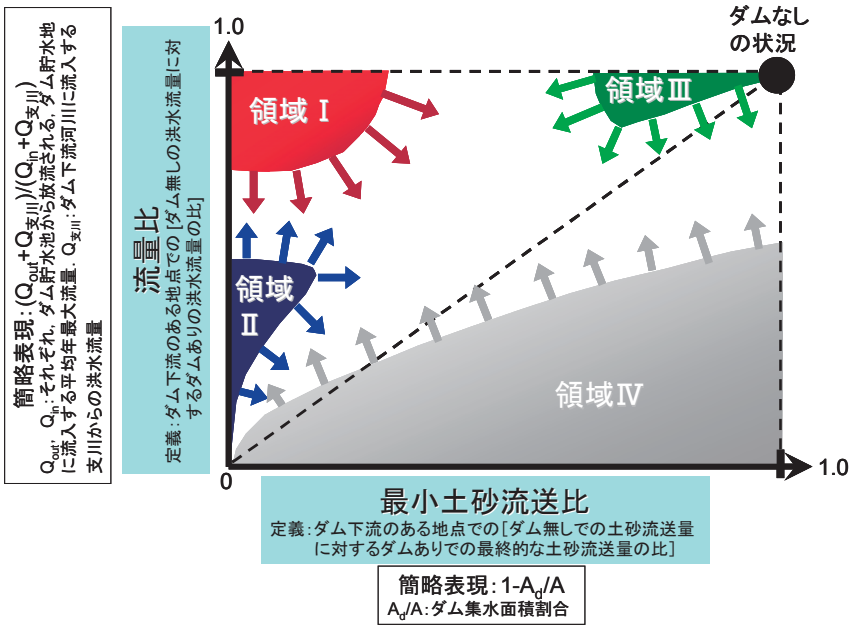


図 6.3-3　ダム－下流河道関係把握図の領域区分（図 3.3-4 の再掲）

・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の方針に基づくものである。表 c)の活用に際しては、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、などがあろう。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出てくる場合もある。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　a)物理環境の応答

	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S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としてふるまうシルト・粘土などの細粒土砂について（セグメントMやセグメント1を想定）
領域Ⅰ（左上方）	・材料mを構成する礫の間にある砂が比較的早く抜け出す可能性がある． ・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．	イ）低移動性	・河床材料が従前（ダム建設前）と同じであまり動かない状態が維持される．	・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．	・有意な変化が起こらない可能性が高い．
		ロ）高移動性	・粗粒化がごくゆっくり，ゆっくり，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． ・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 ・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		
領域Ⅱ（左下方）	・材料mを構成する礫の間にある砂がゆっくり抜け出す可能性がある． ・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．	イ）低移動性	・河床材料が従前（ダム建設前）と同じであまり動かない状態が維持される．	・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．	・有意な変化が起こらない可能性が高い．
		ロ）高移動性	・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もある．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． ・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		
領域Ⅲ（右上方）	・砂の挙動に大きな変化は起こらない可能性が高い． ・材料mを構成する礫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．	・大きな変化は起こらない可能性が高い．		・大きな変化は起こらない可能性が高い． ・河床低下が起こるにしてもごくゆっくりである可能性が高い．	・有意な変化が起こらない可能性が高い．
領域Ⅳ（右下方）	・材料mを構成する礫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． ・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．	・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．		・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．	・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を構成する礫の間に細粒土砂がたまる可能性がある．
	マイクロハビタット 陸域植生	リーチ （マイクロハビタット）		セグメント （リーチ）	マイクロハビタット

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	・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。 ・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。 ・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。	⇨	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高い。また、付着物の堆積、砂分の減少によりﾋﾗﾀｶｶﾞﾛｳ、ﾔﾏﾄﾋﾞｹﾗ等刈取食者の生息が困難となり摂食圧も期待できない。なお、ｱﾕ、ｵｲｶﾜ等の摂食圧はこれ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、厚みが増すとﾋﾗﾀｶｶﾞﾛｳ等の滑行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ことから、移動性の低い造網型のﾄﾋﾞｹﾗが増加する可能性が高い。
	ロ） 高移動性	・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。 ・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粗粒化し、移動頻度は「低い」状態へと推移する。 ・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。	⇨	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が移動しなくなるため材料mの転倒に伴う付着物の剥離も生じない。このため、河床付着物の現存量は増加し、有機物・細粒土砂が堆積して付着物の質が悪化する可能性が高い。付着物の堆積、砂分の減少によりﾋﾗﾀｶｶﾞﾛｳ、ﾔﾏﾄﾋﾞｹﾗ等刈取食者の生息が困難となるため摂食圧による河床付着物の低下も期待できない。なお、ｱﾕ、ｵｲｶﾜ等の摂食圧はこれ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。 脚注＊	巨礫が河床表面に露出するため、ここに固着型のｱｼﾏﾀﾞﾗﾌﾞﾕ、ｳｽﾊﾞｶﾞｶﾞﾝﾎﾞ、ｼﾏﾄﾋﾞｹﾗ等が増加する可能性が高い。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、礫間間隙にﾋｹﾞﾅｶﾞｶﾜﾄﾋﾞｹﾗ科などの造網型ﾄﾋﾞｹﾗが増加する可能性が高い。 脚注＊
領域Ⅱ（左下方）↓流量変化大	イ） 低移動性	・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。 ・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。このため、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。 ・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。	⇨	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高い。ただし、材料mの間隙に砂が残っている間はﾔﾏﾄﾋﾞｹﾗが生息し、摂食に伴う河床付着物の減少が期待できる。なお、ｱﾕ、ｵｲｶﾜ等の摂食圧はこれ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、厚みが増すとﾋﾗﾀｶｶﾞﾛｳ等の滑行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ことから、移動性の低い造網型のﾄﾋﾞｹﾗが増加する可能性が高い。また、表層もしくは表層下に砂が残存する場合にはｼｼﾞﾐ、ｶﾜｶｹﾞﾛｳが増加する場合がある。
	ロ） 高移動性	・土砂供給量は極めて少なく、洪水時の流水により攪乱の程度も減少する。 ・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。 ・砂はゆっくりと減少し、河床表層から砂が減少する。	⇨	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高い。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ﾏﾄﾋﾞｹﾗ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ﾏﾄﾋﾞｹﾗ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、ｱﾕ、ｵｲｶﾜ等の摂食圧はこれ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、露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Ⅲ（右上方）		・土砂供給量・流量、土砂及び流水による攪乱の程度に大きな変化は生じない。 ・河床材料mの移動頻度、粒度組成に大きな変化は生じない。 ・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。	⇨	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、攪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、攪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）		・残流域から過剰に土砂が供給される。 ・河床材料m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。 ・砂が材料m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。	⇨	材料m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mの露出面積が小さくなると付着藻類が繁茂できる面積が減少して現存量が低下する。また、堆積した砂が平常時に移動する状況下では摩耗により現存量が更に低下する。これらの減少は当該区間の餌資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**	砂の堆積が著しく、材料mの間隙が埋まりすぎると河床表面、表層下に生息する底生動物の種類、現存量が低下もしくは消失する。一方、砂を生息場所とするｲﾄﾐﾐｽﾞ、ﾓﾝｶﾞｹﾞﾛｳ等掘潜型の底生動物が増加する。 脚注**

**領域Ⅳ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間隙が埋まると、底生動物のハビタットやレフュ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＋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S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としてふるまうシルト・粘土などの細粒土砂について（セグメントMやセグメント1を想定）
領域Ⅰ（左上方）	・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． ・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． A_3 C_2 D_3	イ）低移動性	・河床材料が従前（ダム建設前）と同じであまり動かない状態が維持される． ●	・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． A_1	・有意な変化が起こらない可能性が高い． ● C_2
		ロ）高移動性	・粗粒化がごくゆっくり，ゆっくり，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． ・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． ・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． A_1 B_{2-3} C_2		
領域Ⅱ（左下方）	・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． ・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． A_3 C_2 D_3	イ）低移動性	・河床材料が従前（ダム建設前）と同じであまり動かない状態が維持される． ●	・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． A_2	・有意な変化が起こらない可能性が高い． ● C_2
		ロ）高移動性	・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もある．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． ・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． ● A_2 B_{2-3} C_1		
領域Ⅲ（右上方）	・砂の挙動に大きな変化は起こらない可能性が高い． ・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． ●	・大きな変化は起こらない可能性が高い． ●		・大きな変化は起こらない可能性が高い． ・河床低下が起こるにしてもごくゆっくりである可能性が高い． ●	・有意な変化が起こらない可能性が高い． ●
領域Ⅳ（右下方）	・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． ・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． A_2 C_2 D_3	・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． A_2 B_2		・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． A_2	・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． A_{2-3} C_2 D_3
	マイクロハビタット 陸域植生	リーチ （マイクロハビタット）		セグメント （リーチ）	マイクロハビタット

A	一次元の混合粒径河床変動計算
B	混合粒径平面河床変動計算
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）

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、河道の縦断的変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場合が多く、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で、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しうる手法である。

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、ハビタットの変質を招く場合がある。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。

Ⓐ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、Ⓑ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Ⓐの段階とする。

Ⓑ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。Ⓐ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。

Ⓒ表層細粒土層厚の堆積と安定植生域の形成

上記Ⓑ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。

Ⓓ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 を参照されたい。

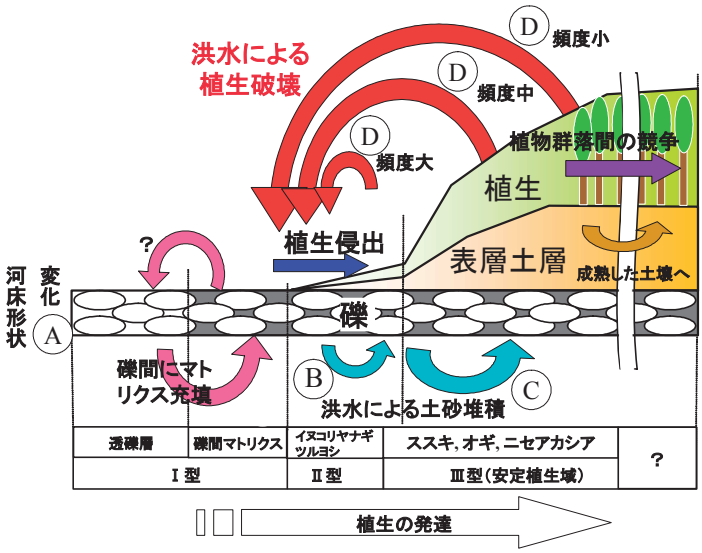


図 6.3-4 河川における植生消長のプロセス

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Ⓐの特徴を有する植物および裸地をⅠ型、Ⓑの特徴を有する植物をⅡ型、Ⓒ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 Dc や経過年数 Tpr)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

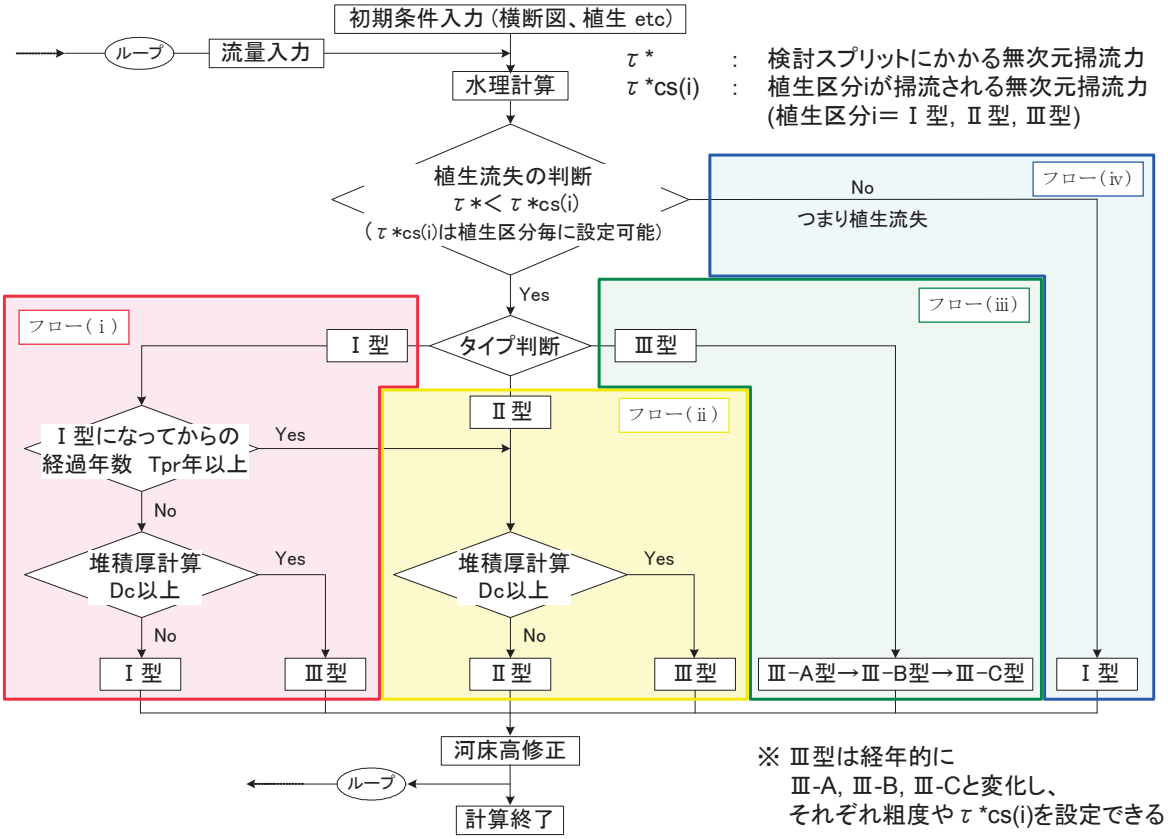


図 6.3-5 本ソフトにおける計算フローの概略

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、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＝αQ で算出している。本ソフトでは α に任意の値を入力できる。ここで α 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。

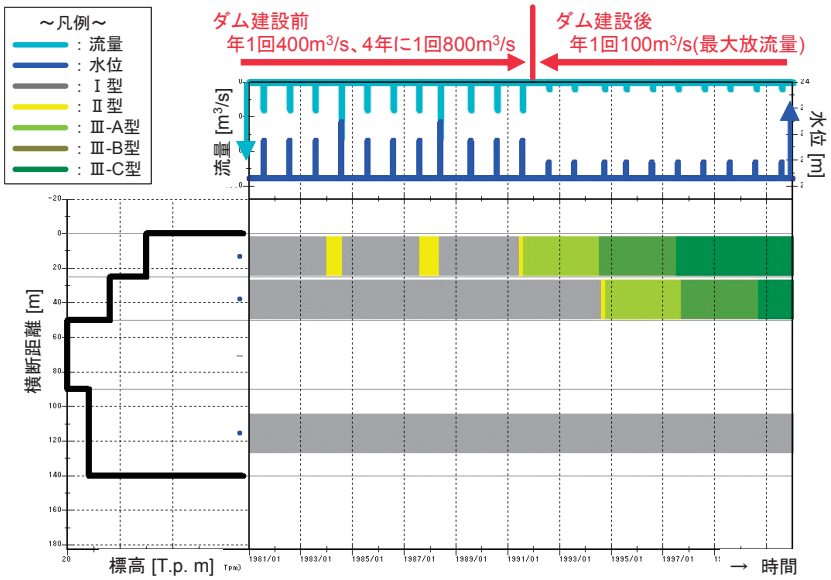


図 6.3-6　シミュレーション結果の例

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。

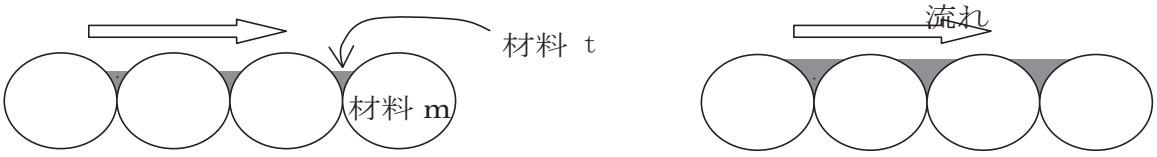
- セグメント 1 あるいはより上流を前提としているため、セグメント 2 より下流については、別のメカニズムを持ち込む必要がある。
- 河床変動は組み込まれていないため、横断形状の変化が大きい場合は、設定した横断形状をその都度入れ替えて計算を行う必要がある。
- 準二次元等流計算であるため、横断図測線上にある窪地等の局所的に比高の低い部分を低い水路部分と見なしてしまい、現実よりも掃流されやすい計算をしてしまうことがある。

(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 10^2～10^3 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

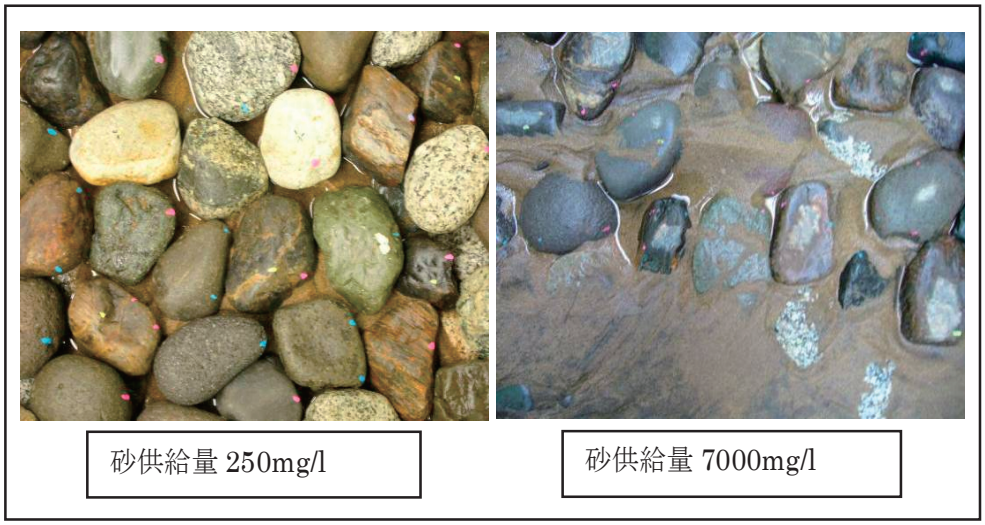


図 6.3-8　砂供給量（砂濃度換算で表現）の増大に伴う礫間の砂面積増加状況の例
（同じ流量の下、右は左の 28 倍の砂供給量を与えている）

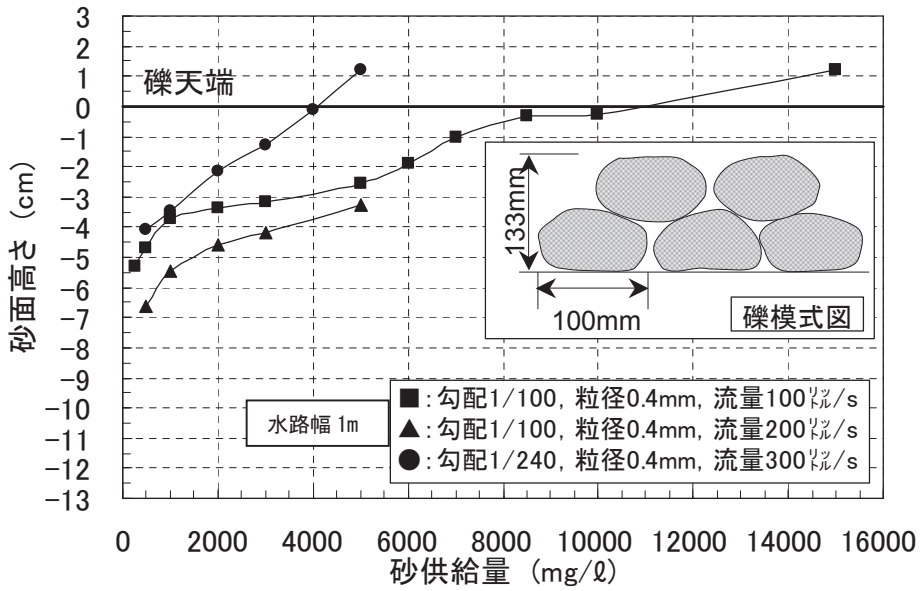


図 6.3-9　砂供給量(砂濃度換算で表現)と砂面高さの関係の例

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と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)の計算法を一歩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 $C(=Q_s/Q) \sim Q$

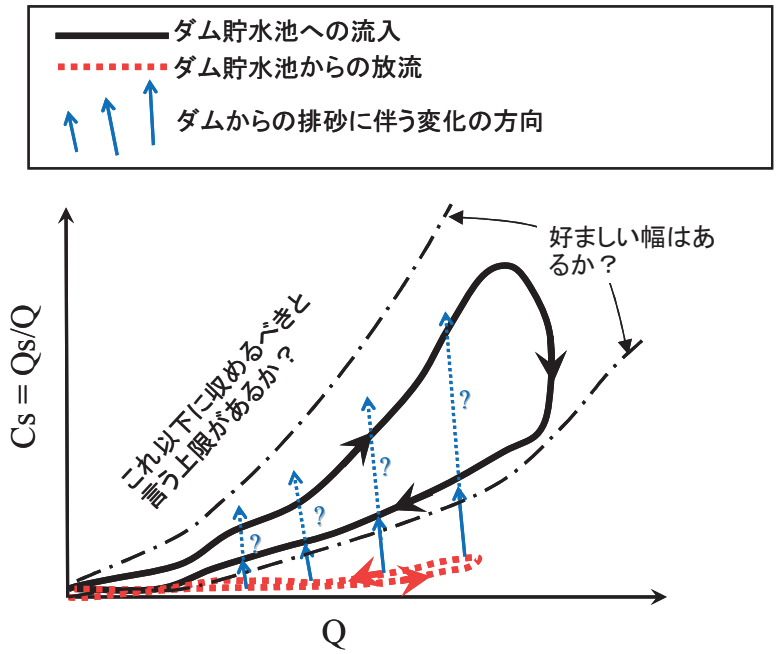


図 6.3-10　C(=Q_s/Q)～Q 関係設定の重要性についての説明

関係）の利用が基本となる。Q～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向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～Q 関係が元に戻る方向と言っても、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～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 $Q～Q_s$ 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、最小土砂流送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、最小土砂流送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・最小土砂流送比を軸に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 つのカテゴリーの中で領域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、ﾔﾏﾄﾋﾞｹﾗ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耗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、巨礫上にはｳｽﾊﾞｶﾞｶﾞﾝﾎﾞ、ｱｼﾏﾀﾞﾗﾌﾞﾕが営巣し、表層及び表層下では大型の造網型ﾄﾋﾞｹﾗであるﾋｹﾞﾅｶﾞｶﾜﾄﾋﾞｹﾗが増加するが、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ｹﾞﾅｶﾞｶﾜﾄﾋﾞ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ﾀｶｹﾞﾛｳ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ﾋﾞｹﾗ、掘潜型のｶﾜｶｹﾞﾛｳ、ｼｼﾞ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、ｲﾄﾐﾐｽﾞ、ﾓﾝｶﾞｹﾞﾛｳ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。

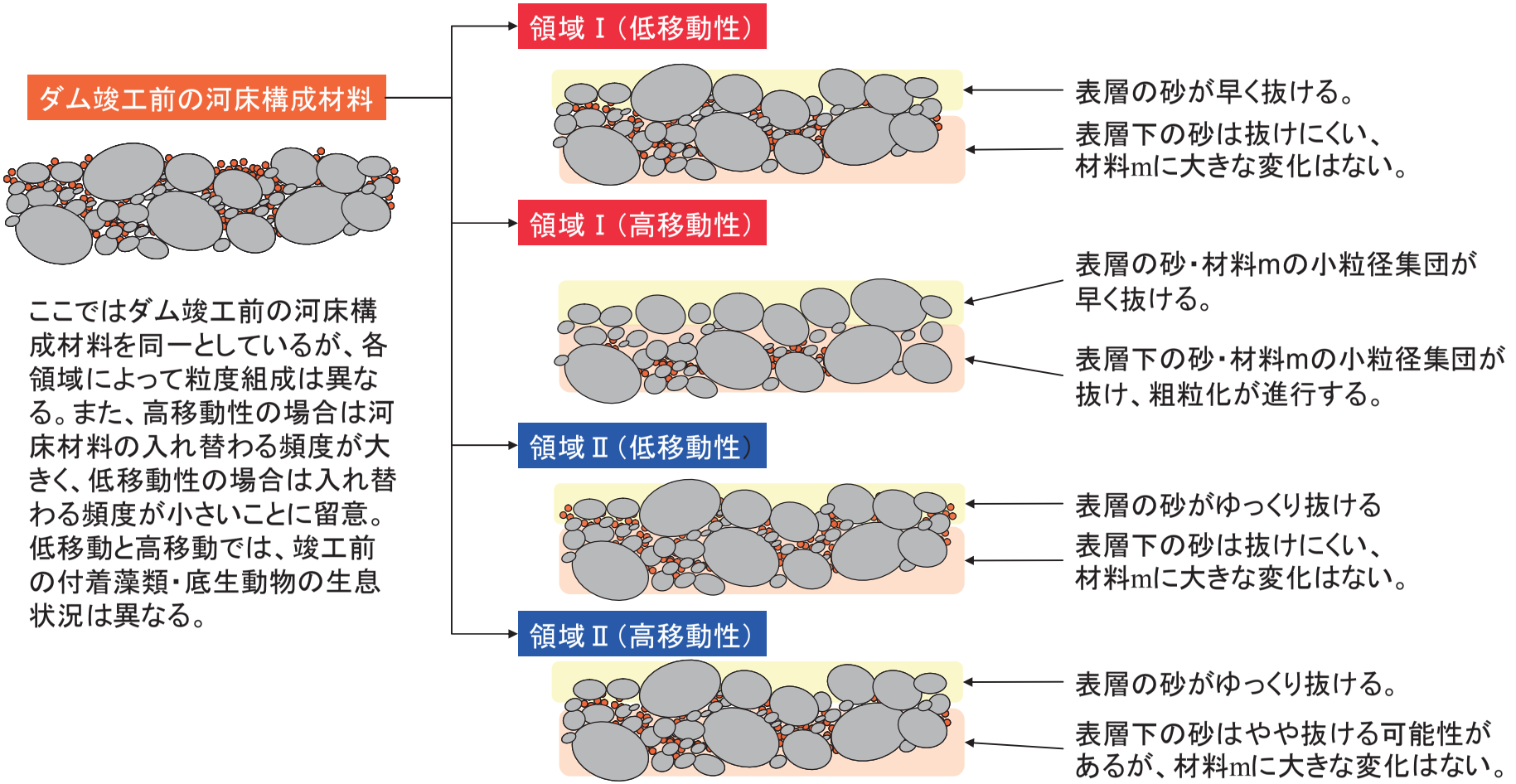


図 6.4-1　流況に対する河床間隙の構造の概念図

7.　総括

6 章までの内容を踏まえ、本技術分野の今後の展開の方向性と課題を述べ、総括とする。

ダム上下流を含む山地部河道の情報不足への対応

1.4 でも述べたように、山地部の河道の多くが、堤防を有する区間で行われるようなレベルの河川管理の対象となってこなかったことから、新たなダム貯水池の築造が行われるなどの一部の区間を除き、河道形状や河床材料などの根幹的情報についても大幅に不足している。このことが、十分な現状診断を行う上での課題となってきた。

3.3.2 や 6 章に示した方法を用いることで、ダム下流河川の置かれた状況を客観的かつ総体的に把握することがある程度可能になった。こうした分析手法が即適用できるようにデザインされた調査を行うことで、山地部河道の情報収集の体系化や効率化が図られると期待できる。

水系を視野に入れた診断に向けて

山地部河道の情報収集・整理・分析を、たとえば「水系内のどの区間がどの領域（図 6.3-3）に属するか？　そのことが、ダム貯水池に対する物理環境の応答と生物の応答という観点で何を意味するか？」を理解することに役立てていく。そのような取り組みを重ねることで、水系全体を見据えて河川環境の現状を診断するという考え方が具体化し、定着していく。そのような展開が期待される。

新しいダム貯水池の築造に対する下流の河川環境の応答予測の必要性は今まで同様重要であるが、同時に、既設ダム下流の河川環境を何らかの形で客観的に評価し、環境再生などの施策実施の必要性や優先度の判断を行うことも今後大事になる。このような検討に際しては、新規ダム貯水池のアセスメントの場合と違って対象河道が最初から決まっているわけではないので、断片的な情報をやりくりするだけでは足りず、水系全体の評価を多少粗いやり方であっても行い、河川水系全体の中での各河道区間の位置づけを把握することが求められる。

環境再生の方策検討に役立つ技術体系への展開

以上のような現状把握・診断は、環境再生方策の技術検討と結びつけられることで、その意義を高める。仮に何らかの形で現状の河道状況について評価がなされ、ある場所について環境再生の必要性が高いと判断されたときに、再生のための種々の手法の有効性を、評価を行ったのと基本的に同じ手法を用いて検討する。すなわち、ある再生手段の適用により、河道状況の評価がどう変わるかを調べることで、方策の良し悪しを吟味する。

このような手順を取ることで、調査が、現状把握・評価のためだけでなく、再生方策の具体的指針を与えるという役割を併せ持つこととなる。現状把握→評価→対策の吟味という検討が、一貫した技術的スタンスのもとで行われるようになる。

環境管理目標になり、操作対象にもなる、わかりやすい指標の設定と活用に向けて

ここで、流量や着目する粒径集団フラックスなど、河川環境の状況を包括的かつ水系スケールで規定する可能性の高い基本量について、河道状況との関連づけが定量的にで

きるようになれば、環境再生の方策検討を進める上での有力な実務的手段となる。たとえば、「流量およびその変動パターンと材料 t になり得る細粒土砂フラックスの組み合わせが、礫間の細粒土砂（材料 t）の堆積具合とどのような関係を持つかを定量評価し、さらにその堆積具合がたとえば底生動物や付着藻類にどのような影響を持つかを推定する」などの内容を想定できる。こうした検討が広がれば、生物応答まで視野に入れた再生方策の検討を、「これらの指標について、確保すべき数値を場所ごとに、時間（タイミング）ごとに決めていく」というような比較的わかりやすい形で行えるようになる。「フラッシュ」の意味や意義をさらに合理的に議論することも可能になると期待される。

このような関係づけは、着目する河道区間において、環境上達成すべき状態を確保するために必要な、あるいは逆に、環境上避けるべき状態の出現を起こさせないための目標数値の提示につながっていく可能性がある。

そして、そうした指標の河道各区間での現れ方が、ダム等を含む水系内の種々の施設の操作と密接に関係しているのであれば、施設の機能や操作に関して環境管理上のスペックを明確な形で提示することにもつながる。自然環境の評価を限られた指標の数値で行うことの難しさや限界は言うまでもないが、一方で、環境管理を合理的に進めていくために、ある程度割り切ってこうした指標やスペックを活用していくことも求められよう。この際には、数値に頼ることの問題点を理解した上での使いこなしがポイントとなる。

供給土砂の把握を通じた“山地河道システム”の理解

さて、山地部河道においては、2.7 で述べたように、土砂生産源が近接していて、河道が土砂供給状況からの影響を受けやすい。そして、土砂供給自体の時間的・空間的変動性が高い。それでも「混合型」の粒径集団であれば、そうした土砂供給の影響が河床に現れるので、少なくとも洪水などの事象の後に河床状況から土砂生産に関する解釈を行うことはある程度可能と考えられる。しかし「通過型」の粒径集団については、その供給状況が材料 t に現れる程度なので、事後の河床から供給状況を推定するのは相対的に難しい。「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（6.3.3(4)）が生まれるのもこうしたことからである。このため、通過型がわずかに置いていく材料 t などの通過型粒径集団にかかわる環境管理が対象になる場合には、冒頭に述べた平水時の河道状況の把握とともに、普段は見えない洪水中の通過型土砂の供給状況を、流量ハイドロとの関係で押さえておくことが重要になる。このことによって、物理環境の“形成システム”の理解に近づくことができる。

改良されたモデル、開発されたモデルを試す機会の確保に向けて

1.4 や 6 章でもふれたように、山地河道の条件を強く意識した土砂水理的観点からの研究が進展しつつある。非常に幅の広い粒度分布からなる河床の挙動であったり、大きく異なる流砂形態が共存したり、時空間的に複雑に混在する場の状況を把握する手法など、少なくともミクロレベルでは、あるいは原理的には従来のモデルに対し優位性を主張できる技術ができつつある。おそらくここで重要なことは、そうしたモデルを実際の山地部河道に適用して、その有効性を現場ベースではっきりさせるとともに、課題を把

握し改良につなげていく機会を提供することであろう。山地河道の条件を実験室で作り出すことが容易でないことからも、このことが理解される。

そのためには、全般的な河道状態を把握しマクロ診断につなげる前述の調査とは異なり、図 5. 1-1 の「集中調査」を行うというスタンスで、場所を限定しつつ高密度に観測や調査を行い、モデルの有効性検討が可能となるようなデータセットを用意することが求められる。

以上のような検討の対象としては、物理環境について、材料 m の動態と河床形状、材料 t の動態、これらと土砂供給との関係把握が考えられる。また、河床環境形成における材料 m、材料 t それぞれの動きの役割、さらにはそれらの相互作用の役割などを解明していくことなども興味深い。

生物応答を包括的に調べるための、よくデザインされた実物実験という方向

生物応答についても、モデルという手法が適用できる局面が少しずつ増えていくと予想される。本資料で取り上げた付着藻類の消長、底生動物の変化などをまずは対象にしていくことが考えられる。その一方で、生物に関わる現象は、物理環境に比べてモデル化や予測が難しいことも事実であり、フィールドでの現象把握と分析に頼るべき局面は今後も多いと考えられる。そうした分析が科学的に意味を持つことが重要であることから、5 章において調査法の要件について詳述した。しかし、BACI デザインを実河川に適用することの難しさからわかるように、自然現象の観察と分析だけから評価や判断に資する情報を得ることは容易でない。こうしたことを踏まえると、フィールドでのコントロールされた実験により、より明確な形で、必要な答えを見つけていくというアプローチも有力になるかもしれない。

たとえば、礫の流送が活発になることが河川水域の生物・生態系にどのような影響をもたらすかを明らかにしたい場合に、礫の流送が有意に活発となる条件を河床のある範囲で人工的に作り出し、それに対する生物応答を調べるというような方法である。材料 t の多寡の影響についても、同じようなアプローチが考えられる。人為的に河床条件を作り出すこと自体の環境影響について十分な検討を行う必要があることは当然である。3 章で述べたように、日本においては、ダム貯水池が下流河川の環境を規定する度合いが、大陸の大規模ダムに比べて総じて小さく、様々な要因の影響を受けやすいという特徴が見られる一方、河道の規模が小さく、また、人為的に河道の条件を作り出す機会や手段が潜在的には比較的多いという状況がある。こうしたことを踏まえると、よく考えられたフィールド実験というアプローチの有用性にもっと着目して良いかもしれない。

水系を賢くコントロールする技術体系

ダム貯水池は大きく見れば、水系において、水と土砂を制御する極めて有用・有力な装置である。その活用を、河川の自然環境の管理にまで広げていくというのが、今後求められる基本スタンスであろう。また、排砂技術の開発が盛んとなり、土砂を下流に還元する取り組みも増えつつある。流水型ダムは、水と土砂を制御する新たなタイプの装置の出現と見ることができる。これらの新たな “道具”も必要に応じて活用しながら、私たちの生活を支え、流域を取り巻く長期的な自然環境変化にも対応し、水系の自然環

境の保全や再生を行っていくという視点から、水系を賢くコントロールするための技術体系を確立していくことが望まれる。

[参考文献]

第 1 章

芦田和男・道上正規（1971）：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

芦田和男・藤田正治（1986a）：河床粒子の浮遊機構とそのモデル化、土木学会論文集、第 375 号/Ⅱ-6、pp.79-88

芦田和男・藤田正治（1986b）：平衡および非平衡浮遊砂量算定の確率モデル、土木学会論文集、第 375 号/Ⅱ-6、pp.107-116

泉典洋・パーカーゲーリー（1995）：礫床河道内に堆積する細砂について、水工学論文集、第 39 巻、pp.665-670

江頭進治・金海・竹林洋史・池田晶・永田徹（2000）：木津川下流域の河床変動と土砂収支、水工学論文集、第 44 巻、pp.777-782

岡野眞久・菊井幹男・石田裕哉・角哲也（2004）：ダム貯水池堆砂とそのダム下流河川還元についての研究、河川技術論文集、第 10 巻、pp.191-196

萱場祐一・島谷幸宏（1995）：扇状地河川における地被状態の長期変化とその要因に関する基礎的研究、河道の水理と河川環境シンポジウム論文集、土木学会水理委員会基礎水理部会、建設省土木研究所、pp.191-196

河村三郎（1982）：土砂水理学、森北出版、pp.3

佐川志朗・中森達・秋葉健司・張裕平・近藤智・渡辺雅俊 (2004) ：滝里ダム運用が下流河川の物理環境および水生生物に与える影響、応用生態工学、7、pp.65-80

角哲也・塚原千明・柏井条介（1998）：ダムによる河川流況の変化とフラッシュ放流に関する考察、ダム技術、No.143、 pp.40-51

関根正人・矢島英明（2005）：礫・シルト充填河床モデルを用いた植生を伴う流路の変動解析、水工学論文集、第 49 巻、pp.991-996

関根正人・林将宏（2007）：礫・シルト充填河床モデルを用いた礫河道の準二次元河床変動解析、水工学論文集、第 51 巻、pp.973-978

谷田一三・竹門康弘（1999）：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

辻本哲郎・本橋健（1990）：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

辻本哲郎（1999）：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

辻本哲郎・藤田光一（2004）：流砂系管理に向けての学術・技術の展開の方向、河川技術論文集、第 10 巻、pp.13-18

時岡利和・傳田正利・天野邦彦（2006）：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

土木学会水理委員会（1999）：水理公式集[平成 11 年版]、土木学会、第２編「河川編」、第５章

長田健吾・福岡捷二（2008）：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

波多野圭亮・竹門康弘・池淵周一（2005）：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

平野宗夫（1971）：Armoring をともなう河床低下について、土木学会論文集、第 195 号 B、pp.55-65

福岡捷二（2008）：石礫河川の移動床水理の諸問題と解決への道筋、土木学会水工学委員会・海岸工学委員会、水工学シリーズ、08-A-1

福島路生 (2005)：ダムによる流域分断と淡水魚の多様性低下－北海道全域での過去半世紀のデータから言えること－、日本生態学会誌、55、pp.349-357

藤田光一（2000）：流砂系における土砂動態のとらえ方と広域土砂動態制御への展望、土木学会、2000 年

度（第 36 回）水工学に関する夏期研修会、B-4-1～4-15
藤田光一・李参熙・渡辺敏・塚原隆夫・山本晃一・望月達也（2003）：扇状地礫床河道における安定植生域消長の機構とシミュレーション、土木学会論文集、No.747／Ⅱ-65
藤田光一・山原康嗣・冨田陽子・伊藤嘉奈子・小路剛志（2008）：大礫床表面における砂の堆積状況と浮遊砂量との関係についての実験的研究、水工学論文集、第 52 巻、pp.547-552
藤田正治・Sulaiman, M.・ Ikhsan, J.・堤大三（2008）：河床材料の空隙率の変化を考慮した河床変動モデルとその適用、河川技術論文集、第 14 巻、pp.13-18
道上正規・藤田正治・北川豊広・三村光太郎（1994）：空隙の大きな河床への浮遊砂の沈み込み過程と非平衡浮遊砂、水工学論文集、第 38 巻、pp.609-614
村上哲生 (2002) ：ダム堆砂排砂が河川の一次生産に及ぼす影響、第 11 期プロ・ナトゥーラ・ファンド研究助成報告書、pp.17-19
山原康嗣・藤田光一・小路剛志・富田陽子・大沼克弘・福田晴耕・井上優（2007）：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、河川技術論文集、第 13 巻、pp.147-152
山本晃一（2004）：構造沖積河川学、山海堂、pp.396-398、pp.419-423
李参熙・山本晃一・島谷幸宏・萱場祐一（1996）：多摩川扇状地河道部の河道内植生分布の変化とその変化要因との関連性、土木学会環境システム研究論文集、Vol.24、pp.26-33
Alabster, D.S. (1970): River flow and upstream movement and catch of migratory salmonids, Journal of Fisheries Biology, 2, pp.1-13
Alonso, C. V. and Mendoza, C. (1992): Near-bed sediment concentration in gravel-bedded streams, Water Resources Research, Vol.28, No.9, pp.2459-2468
ASCE Task Committee on Sediment Transport and Aquatic Habitats (1992): Sediment and aquatic habitat in river systems, ASCE, J. Hydraulic Engineering, Vol.118, No.5, pp.669-685
Auble, G.T., Friedman, J.M. and Scott, M.L. (1994): Relating riparian vegetation to present and future streamflows, Ecological Applications, Vol.4, No.3, pp.544-554
Baily, D., Agostinho, A.A. and Suzuki, H.I. (2008): Influence of the flood regime on the reproduction of fish species with different reproductive strategies in the Cuiba River, Upper Pantanal, Brazil, River Research and Applications, 24, pp.1218-1229
Boehmer, R.K. (1973): Ages, length, and weights of paddlefish caught in Gavins Point Dam tailwaters, Nebraska, Proceeding of the South Dakota Academy of Science, 52, pp.104-146
Bonner, T.H. and Wilde, G.R. (2002): Effects of turbidity on prey consumption by prairie stream fishes, Transactions of the American Fisheries Society, 131, pp.1203-1208
Braatne, J. H., Rood, S. B., Goater, L. A. and Blair, C. L. (2008): Analyzing the impacts of dams on riparian ecosystems: a review of research strategies and their relevance to the Snake River through Hells Canyon, Environmental Management, Vol.41, No.2, pp.267-281
Collier, M., Webb, R. H. and Schmidt, J. C. (1996): Dams and rivers −Primer on the downstream effects of dams, U.S. Geological Survey, Circular 1126
Cummins, K. W. (1962): An evaluation of some techniques for the collection and analysis of benthic samples with special emphasis on lotic water. American Midnald Naturalist, 67, pp.477-504
Dawley, E.M. and Ebel, W.J. (1975): Effects of various concentrations of dissolved atomospheric fas on juvenile Chincook salmon and steelhead trout, Fishery Bulletin, 68, pp.1-11
Einstein, H. A. (1968): Deposition of suspended particles in a gravel bed, ASCE, J. the Hydraulics Division, Vol.94, No.HY5, pp.1197-1205
Environemntal Protection Agency (2004): Cold water discharges from impundments and impacts on aquatic biota, EPA Victoria Publication SR3

Friedman, J. M., Osterkamp, W. R., Scott, M. L. and Auble, G. T. (1998): Downstream effects of dams on channel geometry and bottom land vegetation: regional patterns in the Great Plains, Wetlands, Vol.18, no.4, pp.619-633

Garcia de Jalon, D., Sanchez, P. and Camargo, J.A. (1994) Downstream effects of a new hydropower impoundment on macrophyte, macroinvertebrate and fish communities, Regulated Rivers: Research & Management, 9, pp.253-261

Gadomski, D.M. and Parsley, M.J. (2005): Effects of turbidity, light anc cover on predation of white sturgeon larvae by prickly sculpins, Transactions of the American Fisheries Society, 134, pp.369-374

Gosset, C., Rivers, J. and Labonne, J. (2006): Effect of habitat fragmentation on spawning migration of brown trout (Salmo trutta L.), Ecology of Freshwater Fish, 15, pp.247-254

Grant G. E., Schmidt J. C., Lewis S. L. (2003): A geological framework for interpreting downstream effects of dams on rivers, A Unique River, Water Science and Application 7, American Geophysical Union, Washington, D.C., pp.209-225

Hayes, F.R. (1953) : Artificial freshets and other factors controlling the ascent and population of Atlantic Salmon in the La Have River, Nova Scotia, Bulletin of the Fisheries Research Board of Canada, pp.99:47

Holden, P.B., and Crist, L.W. (1979): Documentation of changes in the macroinvertebrate and fish populations in the Green River due to inlet modification of Flaming Gorge Dam, Bio/West, Logan, Utah, USA, PR-16-2

Holden, P.B. and Stalnaker, C.B. (1975): Distribution and abundance of maintenance fishes of the middle and upper Colorado River basin, 1967-1973, Transactions of the American Fisheries Society, 104, pp.217-31

Huang, X. and García, M. H. (2000): Pollution of gravel spawning grounds by deposition of suspended sediment, ASCE, J. Environmental Engineering, Vol.126, No.10, pp.963-967

Hynes, H.B.N. (1970): The ecology of running waters, Liverpool University Press, Liverpool, England, UK:xxiv+555Pp., illustr

Irvine, L.I., Oussoren, T., Baxter, S.J. and Schmidt, D.C. (2009): The effects of flow reduction rates on fish stranding in British Columbia, Canada. River Research and Applications, 25, pp.405-415

Johnson, J. E. and Hines, R. T. (1999): Effect of suspended sediment on vulnerability of young razorback suckers to predation, Transactions of the American Fisheries Society, 128, pp.648-655

Johnson, W.C. (1994): Woodland expansion in the Platte River, Nebraska: patterns and causes, Ecological Monographs, Vol.64, No.1, pp.45-84

Kondolf, G.M. and Wolman, M.G. (1993): The sizes of salmonid spawning gravels, Water Resources Research, 29, pp.2275-2285

Kondolf, G. M. and Wilcock, P. R. (1996): The flushing flow problem: Defining and evaluating objectives, Water Resources Research, Vol.32, No.8, pp.2589-2599

Lessard, J.L. and Hayes, B.H. (2003): Effects of elaveted water temperature on fish and macroinvertebrate communities below small dams, River Research and Applicationcs, 19, pp.721-732

Lugg, A. (2000) Eternal winter in our rivers: Addressing the issue of cold water pollution, NSW Fisheries, Unpublished

Lytle, D.A. and Poff, N.L. (2004): Adaptation to natural flow regimes, Trends in Ecology and Evolution, 19, pp.94-100

Meade, R. H. and Parker, R. S. (1985): Sediment in rivers of the United States, in National Water Summary 1984, U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 2275, pp. 49-60

Milhous, R. T. (1998): Numerical modeling of flushing flows in gravel-bed rivers, Gravel-bed rivers in the environment (Klingeman, P. C. et al.; eds.), Water Resources Publications, LLC, Chap.25, pp.579-608

Milhous, R. T. (1982): Effects of sediment transport and flow regulation on the ecology of gravel-bed rivers, Gravel-bed rivers − Fluvial processes, engineering and management (Hey, R. D. et al.; eds.), Jon Wiley & Sons,

Chap.29, pp.819-842

Mundie, J.H. (1974): Optimization of the salmonid nursery stream, Journal of the Fisheries Research Board of Canada, 31, pp.1827-1837

Osmundson, D.B., Ryel, R.J., Lamarra, V.L. and Pitlick, J. (2002): Flow-sediment-biota relations: Implications for river regulation effects on native fish abundance, Ecological Applications, 12, pp.1719-1739

Palmer, R.W. and O'keeffe, J.H. (1989): Temperature characteristics of an impounded river, Archives of Hydrobiologia, 1, pp.471-485

Parker, G. (2008): Transport of gravel and sediment mixtures, in Sedimentation engineering − processes, measurements, modeling, and practice (García, M. H.; eds.), ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No.110, Chap.3, pp.236-237

Parfitt, D. and Buer, K. (1980): Upper Sacrament River spawning gravel study, California Department of Water Resources, Northern Division, Red Bluff

Pasch, R.W., Hackney, P.A., and Holbrook, J.A.II (1980): Ecology of paddlefish in Old Hickory Reservior, Tennessee, with emphasis on first-year life history, Transaction of the American Fishreis Society, 109, pp.157-167.

Paugy, D. (2002): Reproductive strategies of fishes in a tropical temporary stream of the Upper Senegal basin: Baoule River in Mali, Aquatic Living Resources, 15, pp.25-35

Peňáz, M., Kubícek, F., Marvan, P., and Zelinka, M. (1968): Influence of the Vir River Valley Reservoir on the hydorbiological and ichthyological conditions in the River Svratka, Acta Scientiarum naturalium Academiae Scientiarum bohemoslovavae-Brno, 2, pp.1-60

Petts, G.E. (1984): Impounded Rivers: Perspective for ecological management, John Wiley & Sons, New York.

Petts, G.E. (1996): Sustaining the ecological integrity on large floodplain rivers, In: Anderson, M.G., Walling, D.E. and Bates, B.D. (eds), Floodplain Processes, John Wiley & Sons, Chichester, pp.535-551

Poff, N.L., Allan, J.D., Bain, M.B., Karr, J.R.., Prestegaard, K.L., Richter, B.D., Sparks, R.E. and Stromberg, J.C. (1997): The natural flow regime, A paradigm for river conservation and restoration, BioScience, 47, pp.769-784

Poff, N.L. and Hart, D.D. (2002): How dams vary and why it matters for the emerging science of dam removal, Bioscience, 52, pp.659-668

Preece, R. and Jones, H. (2002): The effect of Keept Dam on the temperatture regime of the Nampi River, Australia, River Reserch and dApplications, 18, pp.397-414

Reiser, D. W. (1998): Sediment in gravel bed rivers: ecological and biological considerations, Gravel-bed rivers in the environment (Klingeman, P. C. et al.; eds.), Water Resources Publications, LLC, Chap.10, pp.199-228

Saltveit, S.J. (1990): Effects of decreased temperature on growth and smoltification of juvenile Atlantic salmon (*salmo salar*) and brown trout (*Salmo salar*) in Norwegian regulated river, Regulated Rivers. Research & Management, 5, pp.295-303

Scott, M. L., Friedman, J. M. and Auble, G. T. (1995): Fluvial process and the establishment of bottomland trees, Geomorphology, Vol. 14(4), pp.327-339

Storney, R.G. and Cowley, D.R. (1997): Recovery of three New Zealand rural streams as they pass through native forest remnants, Hydrobiologia, 353, pp.63-75

Sumi, T. (2003): Reservoir sedimentation management in Japan, the 3rd World Water Forum Session Report on "Challenges to the sedimentation management for reservoir sustainability", pp.207-227

Svendsen, J.C. Koed,A. and Aarestrup, K. (2004): Factors influencing the spawning migration of female anadromous brown trout, Journal of Fish Biology, 64, pp.528-540

Takao, A., Kawaguchi, Y., Minagawa, T., and Kayaba, Y. and Morimoto, Y. (2008): The relationships between benthic macroinvertebrates and biotic and abiotic environmental characteristics downstream of the Yahagi Dam, central Japan, and the state change caused by inflow from a tributary, River Research and Applications 24, pp. 580

−597
Trautman, M.B. and Gartman, D.K. (1974): Re-evolution of the effects of manmade modification on Gordon Creek between 1887 & 1973 and especially as regards fish fauna. Ohio Journal of Science, 74, pp.162-173
Uda, T., Parker, R.S., Meade, R.H., Moody, J.A., Jacobson, R.B., Fujita, K. and Hattori, A. (1995): Potential fluvial geomorphic responses to global climate change and human modifications of rivers, the Third PWRI-USGS Workshop on Hydrology, Water Resources and global Climate Change, Technical Memorandum of PWRI, No.3373, pp.45-93, 1995
Walling, D.E. and Webb, B.W. (1993): Temporal variablity in the impact of river regulation on thermal regime and some biological implications, Freshwater Biology, 29, pp.167-182
Ward, J.V. (1985): Thermal characteristics of running waters, Hydorbiologia, 235, pp.31-46
Webb, R. H., Schmidt, J. C., Marzolf, G. R. and Valdez, R. A. (eds.) (1999): The Controlled flood in Grand Canyon, American Geophysical Union Geophysical Monograph, Vol.110
Weisberg, S.B. and Burton, W.H. (1993): Enhancement of fish feeding and growth after an increase in minimum flow below the Conowingo Dam, North American Journal of Fisheries Management, 13, pp.103-109
Wilcock, P. R., Kondolf, G. M., Mathews, W. V. G. and Barta, A. F. (1996): Specification of sediment maintenance flows for a large gravel-bed river, Water Resources Research, Vol.32, No. 9, pp.2911-2921
Williams, G.P. and Wolman, M.G. (1984): Downstream effects of dams on alluvial rivers, USGS Professional Paper 1286, pp.1-83
Wootton, J.T., Parker, M.S. and Power, M.E. (1996): Effects of disturbance of river food webs, Science, 273, pp.1558-1561

第２章

新谷融・黒木幹男（2006）：流域学辞典−人間による川と大地の変貌―、北海道大学出版、p66-83
池田宏・伊勢屋ふじ子・小玉芳敬（1993）：大井川上流の沖積錘における岩屑の流動・堆積・筑波大学農林技術センター演習林報告、9、pp.149-173
池田宏（2001）：地形を見る目、古今書院、pp.132
井上公夫・森俊勇・伊藤達平・我部山佳久（2005）：1892 年に四国東部で発生した高磯山と保勢の天然ダムの決壊と災害、砂防学会誌、第 58 巻、第 4 号、pp.3-12
宇多高明・望月達也・藤田光一・平林桂・佐々木克也・服部敦・藤井政人・深谷渉・平舘治（1997）：洪水流を受けた時の多自然型河岸防御工・粘性土・植生の挙動　ー洪水に対する安定性・耐侵食性を判断するためにー、土木研究所資料、第 3489 号
江頭進治・金海生・竹林洋史・池田晶・永田徹（2000）：木津川下流域の河床変動と土砂収支、土木学会水工学論文集、第 44 巻、pp.777-782
海岸浸食対策と利水ダムの機能の維持・回復のための土砂管理対策検討委員会資料（委員長：辻本哲郎）（2004）：河川と海岸が一体となった総合的な土砂管理対策のための基本的な手法
貝塚爽平・成瀬洋・太田陽子（1985）：日本の自然 4ー日本の平野と海岸、岩波新書、pp.135
建設省河川局監修、日本河川協会編（1997）：改訂新版建設省河川砂防技術基準(案)同解説(調査編)、技報堂出版、9 章、14 章
国土技術政策総合研究所環境研究部河川環境研究室（2008）：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・分析ー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ー、国土技術政策総合研究所資料、第 445 号
櫻井寿之・柏井条介・大黒真希（2003）：ダム貯水池の堆砂形態、土木技術資料、第 45 巻、3 号、pp.56-61
櫻井寿之・箱石憲昭・柏井条介（2007）：粒径を考慮した貯水池堆砂の予測手法、土木技術資料、第 49−1、

pp.42-47
田代喬・佐藤圭輔・中村直斗・登立公平・辻本哲郎（2007）：流域の地質構造・地形特性に着目した河川景観の階層性の分析、河川技術論文集、第 13 巻、pp.279-284
土木学会水理委員会（1999）：水理公式集、土木学会、第 2 編「河川編」
長谷川和義（2005）：河川上流域の河道地形、ながれ 24、pp.15-26
藤田光一・宇多高明・Moody, J. A.・藤井政人（1996）：ウォッシュロードの堆積による高水敷の形成と川幅縮小、土木学会論文集、No.551/Ⅱ−37、 pp.47-62
藤田光一（1998）：河床材料の見方、土木技術資料、第 40 巻、12 号
藤田光一・山本晃一・赤堀安宏（1998）：勾配・河床材料の急変点を持つ沖積河道縦断形の形成機構と縦断形変化予測、土木学会論文集、No.600/Ⅱ−44、pp.37-50
藤田光一（2000）：流砂系における土砂動態のとらえ方と広域土砂動態制御への展望，2000 年度（第 36 回）水工学に関する夏期研修会，土木学会水理委員会・海岸工学委員会，B−4
松尾和巳・藤田光一・小藪剛史（1999）：河道縦断形と河床材料縦断変化についての全国分類、土木学会第 54 回年次学術講演会、Ⅱ−165、pp.47-62
水山高久（1998）：姫川の大規模土砂流出と土砂管理、河川、11 月号、pp.8-13
村上泰啓・中津川誠・高田賢一（2005）：豪雨による斜面崩壊で生産された土砂量の推定と河道における動態、土木学会水工学論文集、第 49 巻、pp.1081-1086
村山磐・松本秀明・宮城豊彦（1984）：津軽平野の沖積層およびその周辺の地形、東北学院大学東北文化研究所紀要、第 16 巻、pp.200-206
山本晃一・藤田光一・赤堀安宏（1993）：沖積河道縦断形の形成機構に関する研究、土木研究所資料、第 3164 号
山本晃一（1994）：沖積河川学、山海堂、pp.1-16
山本晃一（2004）：構造沖積河川学、pp.132-137、pp.446-447、pp.307-310
李参熙・藤田光一・塚原隆夫・渡辺敏・山本晃一・望月達也（1998）：礫床河川の樹林化に果たす洪水と細粒土砂流送の役割、土木学会水工学論文集、第 42 巻、pp.433-438
李参熙・山本晃一・望月達也・藤田光一・塚原隆夫・渡辺敏（1999）：扇状地礫床河道における安定植生域の形成機構に関する研究、土木研究所資料、第 3622 号
Cui, Y. and Parker, G. (1998): The arrested gravel front: stable gravel-sand transitions in rivers, Part 2: General numerical solution, Journal of Hydraulic Research, Vol.36, No.2, pp.159-182
Fujita, K. (2008): How is the gap between the concept and practice of integrated sediment management bridged?, Proceedings of the Fourth International Conference on Scour and Erosion 2008, Keynote-3, pp.41-62
Parker, G. (1996): Gravel-bed channel instability, Issues and Directions in Hydraulics, Nakato & Ettema (eds), Balkema, Rotterdam, pp.115-133
Parker, G. and Cui, Y. (1998): The arrested gravel front: stable gravel-sand transitions in rivers, Part 1: Simplified analytical solution, J. Hydraulic Research, Vol.36, No.1, pp.75-100
Everts, C. H. (1973): Particle overpassing on flat granular boundaries, ASCE, J. Waterways, Harbors and Coastal Engineering Division, Vol.99, No.WW4, pp.425-438

第 3 章

大沼克弘・藤田光一・井上優（2006）：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
海岸浸食対策と利水ダムの機能の維持・回復のための土砂管理対策検討委員会資料（委員長：辻本哲郎）（2004）：河川と海岸が一体となった総合的な土砂管理対策のための基本的な手法
国土技術政策総合研究所環境研究部河川環境研究室（2008）：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
国土交通省資料（2002）：流砂系現況マップ、平成 14 年 4 月
服部敦・瀬崎智之・伊藤政彦・末次忠司（2003）：河床変動の観点で捉えた河原を支える仕組みの復元―多摩川永田地区を事例として―、河川技術論文集、土木学会水工学委員会河川部会、第 9 巻、pp.85-90
藤田光一・平舘治・服部敦・山内芳朗・加藤信行（1999）：　水系土砂動態マップの作成と利用―涸沼川と江合川の事例から―、土木技術資料、Vol.41、No.7、pp42-47
山原康嗣・藤田光一・小路剛志・冨田陽子・大沼克弘・福田晴耕・井上優（2007）：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、河川技術論文集、第 13 巻、pp.147-152
Grant G. E., Schmidt J. C., Lewis S. L. (2003): A geological framework for interpreting downstream effects of dams on rivers, A Unique River, Water Science and Application 7, American Geophysical Union, Washington, DC., pp.209–225
Petts, G., Armitage, P. and Castella, E. (1993): Physical habitat changes and macroinvertebrate response to river regulation: The River Rede, UK, Regulated Rivers: Research & Management, Vol.8, pp.167-178

第４章

相崎守弘（1980）：富栄養化河川における付着微生物群集の発達にともなう現存量および光合成量の変化、Japan Journal of Limnology、41(4)、pp. 225-234
天野邦彦(2005)：ダム事業による生物・生態系への影響予測評価の高度化について、河川、No. 713、pp. 18-23
石田力三（1964）：アユの摂餌率、消化率、及び摂餌行動に関する 2、3 の実験、生理生態 12、pp. 100-105
河村和彦（1995）：付着珪藻群落の変動機構、月刊海洋 27(10)、pp. 591-596
河村和彦(1998)：付着珪藻－その生態と付着生物群集における役割、SESSILE ORGANISMS 15(1)、pp. 15-22
北村忠紀・加藤万貴・田代喬・辻本哲郎（2000）：砂利投入による付着藻類カワシオグサの剥離除去に関する実験的研究、河川技術に関する論文集、Vol. 6、pp. 125-130
竹門康弘（2005）：底生動物の生活型と摂食機能群による河川生態系評価、日本生態学会誌 55、pp. 189-197
田中志穂子・渡辺仁治（1990）：日本の清浄河川における代表的付着藻類 Homoeothrix janthina-Achnanthes japonica 群集の形成過程、藻類、No. 38、pp. 167-177
津田松苗（1962）：水生昆虫学、北隆館
羽田野主亮・竹門康弘・池淵周一（2005）：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 48（B）、pp. 919-933
皆川朋子・福嶋悟・萱場祐一（2007）：ダム下流の河床付着膜の特徴とフラッシュ放流による掃流、土木技術資料 49-8、pp. 52-57
渡辺仁治編著（2005）：淡水珪藻生態図鑑－群集解析に基づく汚濁指数 DAIpo，pH 耐性能－、内田老鶴圃
A・J・ホーン、C・R・ゴールドマン（手塚泰彦訳）（1999）：陸水学、京都大学出版
Abe S. and Katano O. and Nagumo T. and Tanaka J. （2000）: Grazing effects of ayu, Plecoglossus altivelis, on the species composition of benthic algal communities in the Kiso River, Diatom 16, pp.37-43
Biggs, B. J. F.（1996）: Patterns in benthic algae of streams, Algal Ecology: Freshwater Benthic, Ecosystems (eds. Stevenson, R. J. Bothwell, M. L. and Lowe, R. L.), Academic Press, San Diego pp.31-56
Biggs, B. J. F. and Close, M. E. （1989）:　Peryphiton biomass dynamics in gravel bed rivers: the relative effects of flows and nutrients、 Freshwater Biology、22、pp.209-231
Brookes, A. P.Calow and Petts, G. E. (edt.)(1994): River channel change, The rivers handbook, Vol.2, Wiley & Sons, UK, pp.55-75
Brittain, J. E. and Saltveit, S. J.（1989）: A review of the effect of river regulation on mayflies (Ephemeroptera), Regulated Rivers, Research and Management 3, pp.191-204

Bednarek, A. and Hart, D. D.（2005）: Modifying dam operations to restore rivers, Ecological responses to Tennessee River dam mitigation, Ecological Applications, Vol.15, No.3, pp.997-1008

Cereghino, R. and Boutet, T. and Lavandier, P.（1997）: Abundance, biomass, life history and growth of six Trichoptera species under natural and hydropeaking conditions with hypolimnetic releases in a Pyrenean stream, Archiv für Hydrobiologie, Vol.138, pp.307-328

Cereghino, R. and Lavandier, P.（1998）: Influence of hydropeaking on the distribution and larval development of the Plecoptera from a mountain stream, Regulated Rivers, Research & Management 14, pp.297-309

Connell J. H.（1978）: Diversity in Tropical Rain Forests and Coral Reefs, Science, Vol. 199, no.4335, pp.1302-1310

Hill, M. O. (1979): TWINSPAN: A FORTRAN program for arranging multivariate date in an ordered two-way table by classification of the individuals and attributes, Department of Ecology and Systematics, Cornell University, Ithaca, NY

Jalon, D. G. and Sanchez, P. and Camargo, J. A.（1994）: Downstream effects of a new hydropower impoundment on macrophyte, macroinvertebrate and fish communities, Regulated Rivers, Research and Management 9, pp.253-261

Katano I. and Negishi JN. and Minagawa T. and Doi H. and Kawaguchi Y. and Kayaba Y. (2009): Longitudinal macroinvertebrate organization contrasting discontinuities: effects of a dam and a tributary, Journal of the American Benthological Society 28, in press

Lessard, J. L. and Hayes, D. B.（2003）: Effects of elevated water temperature on fish and macroinvertebrate communities below small dams, River Research and Applications, Vol.19, pp.721-732

Mackay, R. J. and Waters, T. F.（1986）: Effects of Small Impoundments on Hydropsychid Caddisfly Production In Valley Creek, Minnesota, Ecology, Vol.67, No.6, pp.1680-1686

Merritt, R. W. and Cummins, K. W. (eds)（1996）: An Introduction to the Aquatic insects of North America, 3rd Ed, Kendall/Hunt Publishing Co. Dubuque, IA

Osmundson, D. B. and Ryel, R. J. and Lamarra, V. L. and Pitlick, J.（2002）: Flow-sediment-biota relations: Implications for river regulation effects on native fish abundance, Ecological Applications, 12(6), pp.1719-1739

O'keeffe, J. H. and De Moor, F. C.（1988）: Changes in the physico-chemistry and benthic invertebrates of the great fish river, South Africa, following an interbasin transfer of water, Regulated Rivers: Research and Management 2, pp.39-55

Pardo, I. and Campbell, I. C. and Brittain, J. E.（1998）: Influence of dam operation on mayfly assemblage structure and life histories in two south-eastern Australian streams, Regulated Rivers: Research and Management 14, pp.285-295

Petts, G. E.（1987）: Time-scales for ecological change in regulated rivers, （eds. J. F. Craig and J. B. Kemper）, Regulated Streams: Advances in Ecology, Plenum Press, New York, pp.257-266

Petts, G. E.（1980）: Long-Term Consequences of Upstream Impoundment, Environmental Conservation, Vol.7, No.4, pp.325-332

Petts, G. E. and Armitage, P. and Castella, E.（1993）: Physical habitat changes and macroinvertebrate response to river regulation, The river Rede, UK, Regulated Rivers: Research & Management 8, pp.167-178

Peterson, C. G. and Stevenson, R. J.（1992）: Resistance and resilience of lotic algal communities: importance of disturbance timing and current, Ecology, Vol.73, No.4, pp.1445-1461

Poff, N.L. and Hart, D.D. (2002): How dams vary and why it matters for the emerging science of dam removal, Bioscience, 52, pp.659-668

Richardson, J. S.（1984）: Effects of seston quality on the growth of a lake-outlet filter feeder, Oikos, Vol.43, pp.386-390

Richardson, J. S. and Mackay, R. J.（1991）: Lake outlets and the distribution of filter feeders : an assessment of hypotheses, Oikos Vol.62, pp.370-380

Resh, V. H and Brown, A.V and Covich, A. P. and Gurtz, M. E. and Li, H. W. and Minshall, G. W. and Reice, S. R. and Sheldon, A. L. and Wallace, J. B. and Wissmar, R. C（1988）: The Role of Disturbance in Stream Ecology, Journal of the North American Benthological Society, Vol. 7, No. 4, pp.433-455

Runde JM and Hellenthal RA. (2000): Behavioral responces of Hydropsyche sparna (Trichoptera: Hydropsychidae) and related species to deposited bedload sediment, Environmental Entomology, 29, pp.704-709

Storey, A. W. and Edward, D. H. and Gazey, P.（1991）: Recovery of aquatic macroinvertebrate assemblages downstream of the Canning Dam, Western Australia, Regulated Rivers: Research & Management 6, pp.213-224

Takao, Y. and Kawaguchi, Y. and Minagawa, T. and Kayaba, Y.（2008）: The relationships between benthic macroinvertertbrates and biotic and abiotic environmental characteristics downstream of the Yahagi Dam, centre Japan, and the state change caused by inflow a tributary, River Research and Applications 24, pp.580–597

Takemon, Y.（1997）: Management of biodiversity in aquatic ecosystems: dynamic aspects of habitat complexity in stream ecosystems In: (ed. by T. Abe, S. Levin, and M. Higashi) Biodiversity, An Ecological Perspective, Springer, pp.259-275

Townsend, C. R. and Scarsbrook, M. R. and Doledec, S.（1997）: The intermediate disturbance hypothesis, refugia and biodiversity in streams, Limnology and Oceanography 42, pp.938-949

Vannote, R. L. and Minshall, G. W. and Cummins, K. W. and Sedell, J. R. and Cushing, C. H.（1980）: The river continuum concept, Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Science, 37, pp.130-137

Yamada, H. and Nakamura, F.（2002）: Effect of fine sediment deposition and channel works on periphyton biomass in the Makomanai River, northern Japan, River Research and Applications, Vol.18, pp.481-493

第５章

芦田和男・江頭進治・安藤尚美（1984）：階段状河床形の形成機構と形状特性に関する研究、第 28 回水理講演会論文集、pp. 743-749

内田朝子（2002）：矢作川中流域におけるアユの消化管内容物、矢作川研究 No. 6、pp. 5-20

大分県内水面漁業試験場（1989）：付着藻類の増殖量からみたアユの資源生態の研究、アユ放流研究部会報告 11、pp. 41-55

建設省河川局監修、日本河川協会編（1997）：改訂新版建設省河川砂防技術基準(案)同解説(調査編)、技報堂出版、pp. 292-293

河村三郎・小沢功一（1970）：山地河川における河床材料のサンプリング方法と粒度分布、土木学会誌、第 55 巻 12 号

小出博（1973）：日本の国土（上）自然と開発、東京大学出版会、pp. 59-64

国土技術政策総合研究所（2007）：健全な水循環系・流砂系の構築に関する研究、プロジェクト研究報告、第 16 号、pp. 29-35

国土交通省河川局治水課・河川環境課（2005）：ダム堆砂量推定の手引き(案)

国土交通省河川局（2005）：河川水質の新しい指標について、新聞記者発表、
（http://www.mlit.go.jp/river/press/200501_06/050330-1/050330-1.html）

佐川志朗・中森達・秋葉健司・張裕平・近藤智・渡辺雅俊（2004）：滝里ダム運用が下流河川の物理環境および水生生物に与える影響、応用生態工学 7(1)、pp. 65-80

櫻井寿之・箱石憲昭・柏井条介(2007)：粒径を考慮した貯水池堆砂の予測手法、土木技術資料 49-1、pp. 42-47

島博保・奥園誠之・今村遼平（1994）：土木技術者のための現地踏査、鹿島出版会

全国内水面漁業協同組合連合会（1992）：魚をほどよく放流するための手引き～魚類適正放流量定量化調査報告書

竜澤宏昌・林日出喜・長谷川和義（1998）：渓流河川における河床砂礫の混合特性と階段状河床形の形成

特性、水工学論文集、第 42 巻、pp. 1075-1080
竹門康弘・谷田一三・玉置昭夫・向井宏・川端善一郎（1995）：棲み場所の生態学、平凡社
津田松苗（1962）：水生昆虫学、北隆館
中小河川整備状況評価手法検討国総研チーム(2006)：中小河川の治水安全度を早急に把握せよ、国総研アニュアルレポート 2006、国土技術政策総合研究所、pp. 12-15
（http://www.nilim.go.jp/lab/bcg/siryou/2006annual/annual004.pdf）
時岡利和・傳田正利・天野邦彦（2006）：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
西田一彦・福田護（1973）：岩石の風化残積土の工学的性質、地質学と土質工学の境界領域の問題点、土質工学会関西支部
長谷川和義（2005）：河川上流域の河道地形、流れ 24、pp. 15-26
平山公明・今岡正美・平山けい子・坪田成正・原田研哉（1994）：水質のきれいさの視覚的な判断要因に関する検討､土木学会第 52 回年次次学術講演会、Ⅶ-44、pp. 88-89
福岡捷二（2008）：石礫河川の移動床水理の諸問題と解決への道筋、土木学会水工学委員会・海岸工学委員会、水工学シリーズ、08-A-1
藤田光一(分担執筆)(2003)：流送土砂の観測、地球環境調査計測辞典、フジテクノシステム、第２巻、 陸域編② 第７編、pp79-83
古川晴男編（1944）：昆虫（上）、渓流性昆虫の生態（可児藤吉）、研究社
水野信彦・御勢久右衛門（1972）：河川の生態学、築地書館
皆川朋子・福嶋悟・萱場祐一（2006）：河床付着物の視覚的評価－河川流量管理にむけて－、土木技術資料 48-3、pp. 58-63
村上恭祥・林　譲二・加藤友久（1989）：魚を育む豊かな流れ～河川生物資源保全流量調査報告書～、全国内水面漁業協同組合連合会、pp. 158-209
目黒嗣樹・長谷川和義・大塚剛史・竜澤宏昌（2001）：山地河川に見られる大・中・小規模共存河床形態の再現実験、水工学論文集、第 45 巻、pp. 733-738
安田成夫・一柳英隆（2000）：自然環境に対する人為影響を検出するための調査デザイン、平成 12 年度ダム水源地環境技術研究所所報、pp. 100-109
山﨑憲人・寺沢直樹・福岡捷二（2007）：巨石を含む広い礫径分布を有する礫床河川における粒度分布調査手法、河川技術論文集、第 13 巻、pp. 141-146
山原康嗣・藤田光一・小路剛志・冨田陽子・大沼克弘・福田晴耕・井上優（2007）：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、河川技術論文集、Vol. 13、pp. 147-152
山本晃一(1976)：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
山本晃一（1994）：沖積河川学、山海堂
山本晃一（2004）：構造沖積河川学、山海堂、pp. 74-77, pp. 396-398
Horner, P. R. and Welch, E. B. and Veenstra, R. B.（1983）: Development of nuisance periphytic algae in laboratory streams in relation to enrichment and velocity, Periphyton of freshwater ecosystems, pp.122-134
Merritt, R. W. and Cummins, K. W. (eds)（1996）: An Introduction to the Aquatic insects of North America, 3rd Ed, Kendall/Hunt Publishing Co. Dubuque, IA
New Zealand Ministry for the Environment（1992）: Water Quality Guidelines No.1, "Guidelines for the control of Undesirable Biological Growths in Water.", New Zealand Ministry for the Environment, Wellington
Nordin, R. N.（1985）: "Water Quality　Criteria for Nutrient and Algae (Technical Appendix) " Water Quality Unit, Resource Quality Section, Water Management　Branch, British Columbia Ministry for the Environment, Victoria
Parker, G. (2008): Transport of gravel and sediment mixtures, in Sedimentation engineering − processes, measurements, modeling, and practice (García, M. H.; eds.), ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No.110, Chap.3, pp.177-178

第６章

芦田和男, 藤田正治（1986a）: 河床粒子の浮遊機構とそのモデル化, 土木学会論文集、第 375 号/Ⅱ-6、pp.79-88
芦田和男，藤田正治（1986b）：平衡および非平衡浮遊砂量算定の確率モデル、土木学会論文集、第 375 号/Ⅱ-6、pp.107-116
芦田和男，道上正 （1972）：移動床流れの抵抗と掃流砂量に関する基礎的研究、土木学会論文報告集、第 206 号、pp. 59-69
池田宏（2001）：地形を見る目、古今書院、pp. 132.
井上優・大沼克弘・藤田光一（2006）：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モデルの簡易計算手法の開発、河川技術論文集、第 12 巻、pp. 31-36
岩垣雄一（1956）：限界掃流力に関する基礎的研修（Ⅰ）、限界掃流力の流体力学的研究、土木学会論文集、第 41 号、pp. 1-21
建設省河川局監修、日本河川協会編（1997）：改訂新版建設省河川砂防技術基準(案)同解説(調査編)、技報堂出版、pp. 131-138、pp. 275-283
国土交通省河川局治水課・河川環境課（2005）：ダム堆砂量推定の手引き(案)
櫻井寿之・箱石憲昭・柏井条介(2007)：粒径を考慮した貯水池堆砂の予測手法、土木技術資料 49-1、pp. 42-47
土木学会水理委員会（1999）：水理公式集[平成 11 年版]、pp. 87-92、pp. 159、pp. 174-176
平舘治・藤田光一・工藤啓・松尾和巳・坂野章・服部敦・瀬崎智之・二村貴幸・近藤和仁・徳田真・小薮剛史・李参熙（1999）：細粒土砂に関する涸沼川の水系土砂動態マップ、土木学会年次学術講演会講演概要集第２部、vol. 54、pp. 328-329
福岡捷二（2008）：石礫河川の移動床水理の諸問題と解決への道筋、土木学会水工学委員会・海岸工学委員会、水工学シリーズ、08-A-1
藤田光一，李参熙，渡辺敏，塚原隆夫，山本晃一，望月達也（2003）：扇状地礫床河道における安定植生域消長の機構とシミュレーション．土木学会論文集，No.747／Ⅱ-65，pp. 41-60
藤田光一・山原康嗣・冨田陽子・伊藤嘉奈子・小路剛志（2008）：大礫床表面における砂の堆積状況と浮遊砂量との関係についての実験的研究、水工学論文集、第 52 巻，pp. 547-552
山本晃一，藤田光一，平林桂，小澤宏二，池内覚（1992）：一次元河床変動計算の改良、土木研究所資料、第 3099 号
山本晃一（2004）：構造沖積河川学、山海堂、pp. 58-59
Egiazaroff, I. V. (1965): Calculation of nonuniform sediment concentrations, J. Hydraulics Division, ASCE, Vol.91, HY4, pp.225-247.
Fujita, K. (2008): How is the gap between the concept and practice of integrated sediment management bridged?, Proceedings of the Fourth International Conference on Scour and Erosion 2008, Keynote-3, pp.41-62

本国総研資料作成の際に使用した基礎資料の収集・整理等を担当した方々は以下の通りです（敬称略）。

船橋昇治、五十嵐宗博、名波義昭、白井明夫、早川淳、滑川和臣、西浦和幸、佐藤寿、岩城安英（以上、財団法人ダム水源地環境整備センター：担当時点）、関根秀明、千葉武生、柏原聡、野元正隆、菊池有由美