

## 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ため、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

表 1.1-1 環境要因と物理環境

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・

	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。

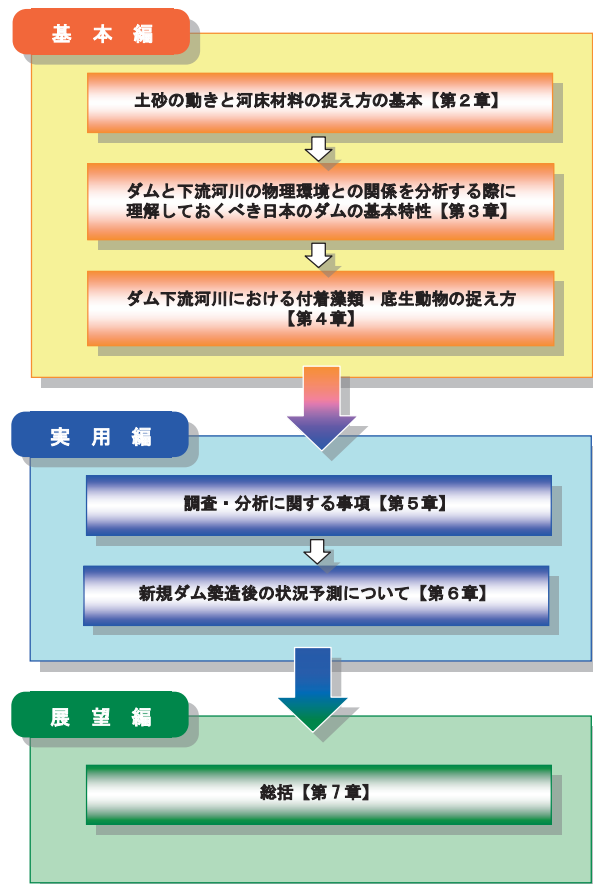
本資料は、大きく分けて、「基本編」「実用編」「展望編」という構成になっている。「基本編」では、ダムと下流河川の物理環境との関係を検討する際に知っておくべき土砂動態の基本的特性を説明する（第2章 土砂の動きと河床材料の捉え方の基本）とともに、最低限把握・理解しておくべき日本のダムの基本的特性を示している（第3章 ダムと下流河川の物理環境との関係を分析する際に理解しておくべき日本のダムの基本特性）。また、物理環境の応答に伴う生物応答について、分析事例が比較的多い付着藻類および底生動物を対象にその捉え方を説明している（第4章 ダム下流河川における付着藻類・底生動物の捉え方）。

「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・底生動物を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・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・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・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・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・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・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の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)水生生物の移動障害、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事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 Sacramento 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(Peñáz 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については米国 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 (*Ictalurus 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な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)。Bailliet 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(*Oncorhynchus 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もっと低い水温よりも更に 1°C から 1.5°C 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-Darling 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°C を選好する rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) 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°C 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、溪畔林等の繁茂状態、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(Svendensen 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 dissolved 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)水生生物の移動障害、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-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實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。そうすると、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ることが大事になる。
- 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  $10^2 \sim 10^3$  オーダー以上小さいので移動性ははるかに高く、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・Garcia(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が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、縦断方向に一樣な水理条件を作り、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、急峻な山地部の溪流的河道ではなく、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。その代表的な原因として、非常に大きな洪水により強制的に拡張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つ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
	細 礫	小 礫 (gravel)					
砂	極 粗 砂	極 粗 砂	sand	very coarse sand	2~1	2~1	— 0
	粗 砂	粗 砂		coarse sand	1~1/2	1~0.5	— 1
	中 砂	中 砂		medium sand	1/2~1/4	0.5~0.25	— 2
	細 砂	細 砂		fine sand	1/4~1/8	0.25~0.125	— 3
	微 細 砂	微 細 砂		very fine sand	1/8~1/16	0.125~0.062	— 4
シルト	粗 粒 シルト	シルト	silt	coarse silt	1/16~1/32	0.062~0.031	— 5
	中 粒 シルト			medium silt	1/32~1/64	0.031~0.016	— 6
	細 粒 シルト			fine silt	1/64~1/128	0.016~0.008	— 7
	微 細 粒 シルト			very fine silt	1/128~1/256	0.008~0.004	— 8
粘 土	粗 粒 粘 土	粘 土	clay	coarse clay	1/256~1/512	0.004~0.002	— 9
	中 粒 粘 土			medium clay	1/512~1/1024	0.002~0.001	— 10
	細 粒 粘 土			fine clay	1/1024~1/2048	0.001~0.0005	— 11
	微 細 粒 粘 土			very fine clay	1/2048~1/4096	0.0005~0.00024	

\* 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(0.005~0.001mm)、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 φ = -log<sub>2</sub>d (d:土砂粒子の大きさ(mm))