

13.10 土砂還元によるダム下流域の生態系修復に関する研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 18～平 21

担当チーム：水環境研究グループ

研究担当者：萱場祐一、片野泉、皆川朋子

【要旨】

本研究ではダム下流域における河川生態系の劣化を抑制することを目的として実施される土砂還元の効果を定量的に評価する手法を確立することを目的として、1)～3)の項目について研究を実施した。1)ダム下流域における生態系劣化状況を、底生動物群集を対象として明らかにする。また、底生動物群集と環境要因との関係解明に基づき 2)土砂供給量減少に伴う指標生物を抽出する。最終的に 3)土砂還元の定量的な効果推定手法を確立する。以下に結果を示す。1)ダム下流の地点では、細粒河床材料の減少・粗粒化が顕著に見られたが、ダム下流で流入する支川合流後は、支川により細粒河床材料が再供給されて粗粒化が改善していた。また、ダム下流の底生動物群集は、個体数の著しい増加にもかかわらず群集の種多様性は低かったのに対し、支川流入後の底生動物群集はタクサ数の増加により種多様性の増加がみられた。細粒河床材料と、流下物量・組成に関する因子の 2 つは、底生動物の群集変化に強く関わっている可能性があることが示された。2)なるべく多くのダム河川に適用できる普通種であること、見付けやすく調査が容易・安価であること、河床に強く依存して生息することなどの条件から、携巢型・掘潜型の底生動物を候補として GLMM による解析を行った。この結果、ヤマトビケラが最も指標として有用であることが示された。3)ダム直下から支川合流地点、支川合流地点間を評価対象のセグメントと捉えて、評価対象となるセグメントを選定し、対象セグメント内の土砂還元地点下流においてインパクトサイトを設置すること、また、BACI(Before After Control Impact)デザインに基づきコントロールサイトを支川等に設置する必要性を述べた。また、二元配置の分散分析に基づき土砂還元効果を推定する手法について述べた。

キーワード：土砂還元、ダム下流、河川生態系、細粒土砂、底生動物

1. はじめに

日本の国土には、およそ 2700 基のハイダム（堤高 15m 以上のダムと定義する）が存在し、これは世界第 4 位のハイダム数、世界第 3 位のハイダム密度である。しかし、数多くのハイダムが存在するにもかかわらず、日本のハイダム下流の物理環境や生態系機能にどのような変化が見られるのか、それを検証した研究はほとんどない¹⁾。いっぽう海外、とりわけ北米・ヨーロッパにおいては、貯水ダム（ハイダムの中でも大型のものと定義する）は、河川縦断方向における流量・水温・土砂量・流下物量などの変動パターンを変えるため、下流の物理環境や、生物相などの生態系機能に影響を与えることが数多く報告されてきている²⁾。しかし、これら既往研究の多くは河川勾配・流量変動が緩やかな大陸性の河川で行われてきているため、海外のダム河川での事例をそのまま日本のダム河川に適用することは難しい。なぜなら日本の河川は、島国であるが故に勾配が大きく、かつ温帯モンスーン気候であるため、流況の季節的变化が大きいという、大

陸性河川とは異なる特徴を持つからである³⁾。河川環境に対する影響をいかに低減させるかが大きな課題となっている今日、日本における貯水ダム下流域の物理環境・生態系機能の劣化状況を客観的に把握し、適当な修復手法を評価・提案することは急務であるといえる。

日本の多くの貯水ダムでは、ダム貯水池に溜まった堆積土砂対策として、浚渫した土砂をダム下流に仮置きする「土砂還元」が行われている。また、貯水ダム下流域で劣化した付着藻類は、漁業資源であるアユの餌として重要であることから、この質的改善を目指した土砂還元も、近年いくつかのダムで試験的に行われている。このような土砂還元事業の、下流生態系に影響を及ぼすメカニズムとしての本質は「土砂の再供給」であると考えられる。海外での既往研究によると、このような土砂の再供給（例えば、ダム下流域における支川の流入や、本川の河岸崩落等による土砂供給）は、貯水ダム下流域で顕著にみられる河床粗粒化を改善し、河川生物のハビタットを改善することで、ダム

下流域の生態機能を回復させる可能性があるといわれている⁴⁾。よって、近年実施されている土砂還元事業も、これに準じた河川環境修復効果を持つと予測される。しかし、前述のように日本のダム下流域の劣化状況が未解明であることから、土砂還元の生態系修復効果の評価は不十分であり、効果的な土砂還元手法もまた、未確立な状況にある。

そこで本研究では、(1)日本における貯水ダム下流域生態系の劣化状況を集中的に調査することにより、どのような生物がどのような要因により減少・増加しているかを、野外河川における現地調査で明らかにすること、(2)土砂供給量の減少を客観的に計測できる物理環境要因と、土砂供給量の減少を適切に反映する生物タクサを抽出し、土砂還元の指標種を選定すること、そして、土砂還元を行う際の評価手法を確立すること、の3点を目的としている。

2. ダム下流域における生態の劣化状況の解明

2.1. 調査地概要と方法

調査地として、岐阜県恵那市にある阿木川ダム（木曾川水系・阿木川）周辺を設定した（図 2.1）。阿木川ダムは、1990 年に竣工したロックフィルタイプの多目的ダム（用途：洪水調節、上水道用水、工業用水、不特定用水）で、その流域面積は約 81.8 km² であり、ダム湖である阿木川湖の湛水面積は約 1.58 km²、平均貯水量は 4.8×10⁷ m³ となっている。阿木川ダムは、水質保全対策として選択取水等の設備が整えられているダムで、2002 年–2005 年における平均的な流況からみると、5 月から 10 月までの期間は降雨・水需要に合わせて頻繁に流量を上げるため流況は変動的であり、11 月から翌年 4 月までは、平均流量 1.3 m³・s⁻¹ の安定した流況を保っており、流況としては日本中部以西の典型的な貯水ダムであるといえる。

阿木川流程には、阿木川ダムから約 2.8km 下流地点において、支川である飯沼川が流入している。この飯沼川の流域面積は流域面積 23.9km² なので、流域面積で換算した本川に対する支川の流入比（支川／本川）は約 0.3 となり、飯沼川は中規模程度の支川であると考えられる。本川である阿木川がダムによる人為的な流況改変を受け一方、支川である飯沼川は全体として自然流況が保たれている。また、阿木川・飯沼川の地質は共に風化花崗岩であるため、砂を多く運ぶ川であると考えられ、支川による土砂の再供給が予想される。

この阿木川流程に 3 調査区・12 地点（UD:ダム上

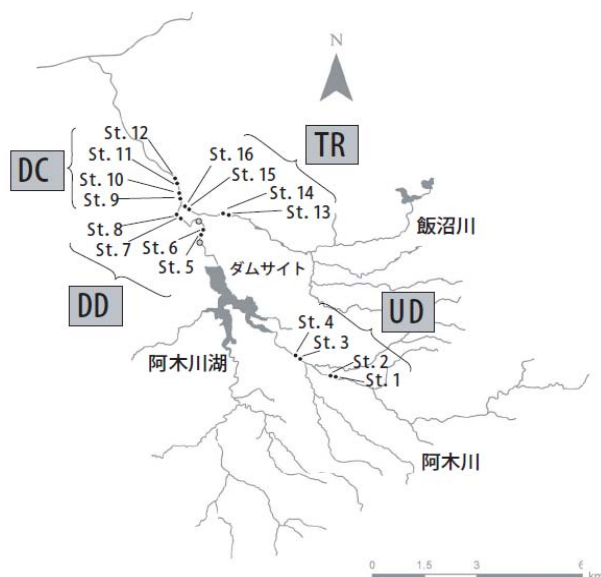


図 2.1 調査地地図：数字は調査地点番号を、アルファベットは設定した4つの調査区を示す。UD:ダム上流域 (Sts. 1-4)、DD:ダム下流・支川合流前 (Sts. 5-8)、DC:ダム下流・支川合流後 (Sts. 9-12)、TR:支川 (Sts. 13-16)。灰色の●は、土砂還元地点を表す。

流 4 地点、DD:ダム下流・支川流入前 4 地点、DC:ダム下流・支川流入後 4 地点)、支川である飯沼川流程に 1 調査区 (TR:支川 4 地点) を設け、流況の安定している時期に相当する 3 月中旬に、物理環境調査・生物 (底生動物) 採集を行った。物理環境調査では、各調査地点の平瀬においてコドラートを設定し (50×50 cm²、 $n = 3$)、可能な限り網羅した環境要因 (水温、溶存酸素量、電気伝導度、水深、流速、河床材料割合、底質粗度、掃流砂量、濁度、付着藻類現存量、堆積 POM (粒状有機物) 量、流下 POM 量等) を測定した。環境要因の測定後、同コドラート内の底生動物は 0.25 mm-mesh サーバネットを用いて全て採集した。底生動物はすみやかにホルマリン固定した後、実験室へ持ち帰り、可能な限り下位レベルまで同定・分類した。その後、個体数・タクサ数を測定し、加えて多様性指数 H' を計算し、それらを各調査地点で比較した。

2.2. 結果と考察

測定した環境要因のうち、代表的な要因について調査区ごとに比較した結果を図 2.2 に示す。水温は流程に沿った変化が見られ、選択取水設備による効果が現れていることが確認できた (深層取水を行うダムで多く報告されているような、ダム下流での水温低下は見られなかった)。しかし、細粒河床材料割合と、掃流砂量はダム下流 (DD) で顕著な減少を示した。これらの減少は支川合流後 (DC)には、ダム上流側 (UD)

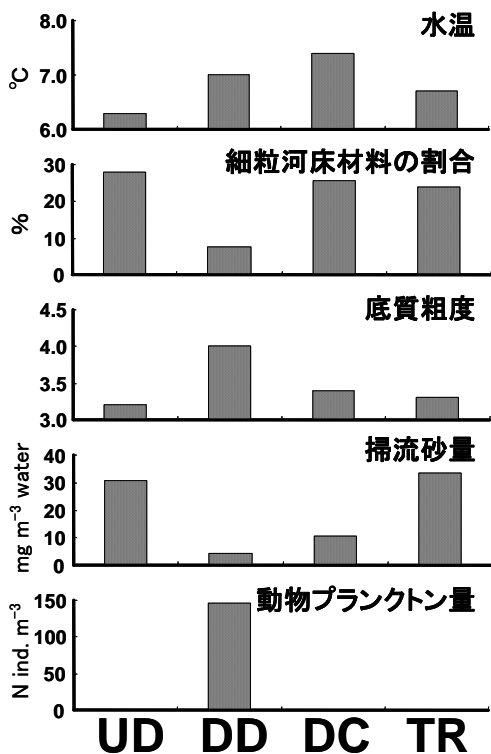


図 2.2 各環境因子の変動パターン：水温、細粒河床材料の割合、底質粗度、掃流砂量、動物プランクトン量についてのみ示す。

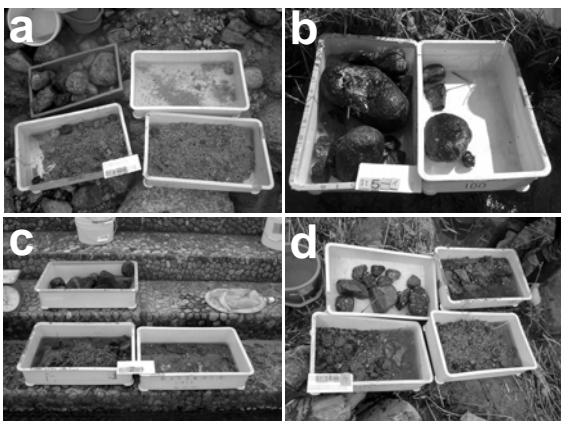


図 2.3 各調査区で採集された河床材料：複数のバット（縦横約 62×43 cm）全内容物が、0.25m²コドラート内から採集された全河床材料である。
a:UD (St. 4)、b:DD (St. 5)、c:DC (St. 12)、d:TR (St. 14)

または支川 (TR)と同じレベルへと戻る方向で、増加傾向にあった (図 2.3 に、各調査区のコドラートから採集された河床材料を示す。細粒河床材料がほとんど採集されていないのは DD のみであることがわかる)。底質粗度もこの結果を反映し、ダム下流では粗粒化が著しかったのに対し、支川合流後は、ダム上流側・支

川と同レベルまで粗粒化が改善されていた。一方、底生動物のろ過者にとって栄養価の高い重要な餌資源と考えられる動物プランクトン量は、ダムの下流 (DD)においてのみ顕著な増加を示したが、それ以外の調査区ではほとんど見られなかった。水深・流速・付着藻類現存量といった環境因子に関しても同様で、ダム下流においてのみ水深は大きく、流速は小さく、付着藻類現存量が多い傾向が見られた。その他の測定環境要因、溶存酸素、電気伝導度、濁度、堆積 POM 量については、河床生態系の機能に大きく影響するような、意味のある顕著な変化を調査区間で示しているとは認められなかった。

各調査地点で採集された底生動物の個体数とタクサ数の結果を、図 2.4 に示す。採集された底生動物は、トータル 172 タクサ 233、934 個体のにぼる。底生動物の個体数は、ダム下流の St.5-8 (DD) において顕著な増加を示した。しかしタクサ数には、ダム下流地点において個体数で見られたような顕著な増加は認められず、上流から下流に向かって徐々に増加する傾向があった。すなわち、ダム下流においてはある特定のタクサのみ (複数) が顕著に優占していることが考えられる。実際に多様性指数 H' を計算したところ、支川 (TR) や支川合流後 (DC) に比べ、ダム下流の H' は低い値を示していた。この結果から、ダム下流においては群集の種多様性が減少しているが、この減少した多様性は、支川の合流によって改善される (多様性が増加する) ことが示された。

各調査区の底生動物群集において、優占していたタクサは次の通りである (ここでは、各群集の上位優占種から累積していき、その群集の 80% 程度の個体数を占めるに至るまでのタクサを優占タクサと定義した)。エユシカ亜科やフバコガメは各調査区で共通して優占していた。それ以外の優占タクサは、ダム上流 (UD) ではカ^ナハコヒメミズ・ヤムシカ亜科・トゲマダラカゲロ

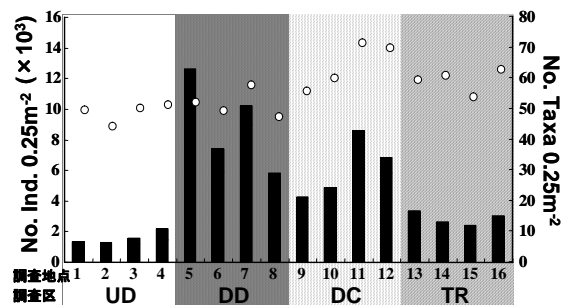


図 2.4 採集された底生動物の個体数とタクサ数：0.25m² コドラート内の、底生動物個体数 (黒棒) とタクサ数 (白丸) を調査地点ごとに示す。

リ属・ヤマトビケ属までが、ダム上流群集の 82%を占めていた。同様に、ダム下流 (DD)ではアカダラガク・ミズミズ亜科、シロビケ属、ヒシカガク属が 79%を、支川合流後 (DC)ではキイカガク・ミズミズ亜科・ウバガガンボ属・センチュウ・ヒシカガク属・ヤマトビケ属が 77%を、支川 (TR)ではミズミズ亜科・カハコヒミズ・トゲマダラガク属・ヤマトビケ属・ヒシカガク属が群集の 73%を占めていた。これら優占種を生活型⁵⁾で区分してみると、ダム上流域や支川では、細粒河床材料を生息場や巢材として利用するカハコヒミズ・ヤマトビケ属などの掘潜型・携巢型のタクサが特徴的であるが、ダム下流においてはこれら掘潜型・携巢型タクサの優占は全く見られない。代わってダム下流で優占するのはアカダラガク・ミズミズ亜科、シロビケ属などの匍匐型・造網型タクサであり、これらは摂食機能群では過食者や堆積物食者に相当する^{6)、7)}。また、支川合流後の群集は、匍匐型・造網型に加え、携巢型も優占する群集となる。このような底生動物の変化は、環境要因の変化に対応していると考えられる。すなわち生活型の変化は、河床における細粒河床材料の割合を反映しており、摂食機能群の変化は、流下プランクトン量や付着藻類現存量など、餌資源の有無・量を反映していると考えられる。

このような底生動物群集の変化に影響を強く与えていると考えられる環境因子は、多変量解析を用いて推定することができる。この結果からは、とりわけ細粒土砂量に関する因子（河床材料における小礫割合、底質粗度）と河川水中の流下物量（とくにプランクトン量）に関する因子の、あわせて2因子が各調査区の底生動物群集の違いを説明するのに重要な要因であることが示唆された。

海外の既往研究では、ダムの下流域では細粒河床材料が著しく減少し、粗粒化が顕著にみられるが、支川による細粒河床材料の再供給により、支川流入後は粗粒化が改善されるといわれている⁸⁾。阿木川ダム周辺における本研究も、支川による細粒河床材料の再供給の機能が、ダム下流域の粗粒化を効果的に改善していることを明らかにした。本研究の支川である飯沼川は、阿木川ダムの 2.8km 下流で流入する支川であり、支川流入後に初めて粗粒化の改善が見られたことから、河床材料に関しては、少なくともダムの下流約 3km 程度まではダムの影響が及ぶものと考えられる。また、阿木川に対する飯沼川の規模は 0.3 であることから、本川に対し 3 割程度の規模をもつ支川であれば、本川の粗粒化を十分に改善する効果を持つことが示唆さ

れた。

2.3. まとめ

ダム河川流程における物理環境の変化と底生動物群集の変化を把握することを目的として、阿木川ダム周辺における集中的な野外調査を行った。その結果、(1)多くの物理環境因子の中でも、細粒河床材料に関する因子（ダム下流では細粒分が減少し粗粒化が起こる）と、流下物量・組成に関する因子（ダム下では、流下プランクトン量が増える）の2つは、ダムにより相対的に大きな改変を受ける因子であるだけでなく、後述する底生動物群集の変化に強く関わっている可能性があること、(2)支川流入による細粒河床材料の再供給は、ダム下流における粗粒化を効果的に改善すること、が明らかとなった。また、(3)底生動物群集は、ダム・支川流入それぞれの影響を受け、「掘潜型・携巢型」優占群集から「匍匐型・造網型」優占群集へ、さらに「匍匐型・造網型・携巢型」優占群集へと変化することが示された。これらの結果から、阿木川ダム下流の河床環境・生態機能の劣化状況は、主として河床材料・流下物量の改変に原因を帰していると考えられるが、これらの改変は、支川流入による細粒河床材料の再供給などを通して、改善傾向にあると考えられる。

しかし、本研究で対象とした阿木川・飯沼川は、地質が主に風化花崗岩であるため、砂を多く運ぶ特徴を持つ砂河川である。よって、本研究で見られた、河床材料を介する物理環境・生態系修復効果は、砂河川だったからこそ顕著であったのかもしれない。平成 18 年度の結果を、日本におけるダム河川流程の生態系劣化状況の把握、または支川の物理環境・生態系修復効果の把握などへと一般化するためには、砂河川ではないダム河川での野外調査や、規模・流入距離の異なる支川を持つダム河川での野外調査を通し、複数のダム河川調査で得られた結果を比較検討することが重要であろう。よって、平成 19 年度以降は、このようなダム河川間での比較を目指して、さらに野外調査を進めていく必要がある。

ダム下流における支川流入とは、土砂の常時の再供給であるといえる。これに対し、土砂還元とは土砂の一時的な再供給である。阿木川ダム周辺での調査結果から、常時の土砂再供給は（単位時間あたりの供給量はわずかであっても）十分な生態系修復効果を持っている可能性が示唆された。このことから、土砂還元事業に効果的な生態系修復効果を持たせるためには、供給期間やその回数、タイミングなどを十分に考慮する

必要があることが示唆された。

3. 土砂供給量の多寡に伴う底生動物群集の変化

3.1. 調査地概要と方法

調査地として、岐阜県恵那市にある阿木川ダム（木曾川水系・阿木川）周辺を設定した（図 2.1）。阿木川ダムでは、阿木川ダムから約 2.8km 下流地点において、支川である飯沼川が流入しており、支川による土砂の再供給があることが報告されている⁹⁾。また、阿木川ダムでは、平成 17 年度を第一回目として、試験的に年 1 回の土砂還元事業が行われてきており、平成 17 年度の土砂還元量は、ダム下流 2 地点で合計 1200m³である（図 2.1）。土砂は、安定して河川低水位が保たれている初春（2 月末）に左岸側高水敷に設置されるが（写真 3.1）、実際に土砂が下流へと流下・還元されるのは、河川流量が増加する 4 月末以降を待たねばならない。（阿木川ダム放流量記録から、平成 17 年度における土砂流下・還元は、5-6 月の高水時であると考えられる）。還元土砂の粒度分布は D₅₀ が



写真 3.1 土砂還元の状況：St. 5 の 100m 上流での土砂還元の様子。高水敷に設置されている。

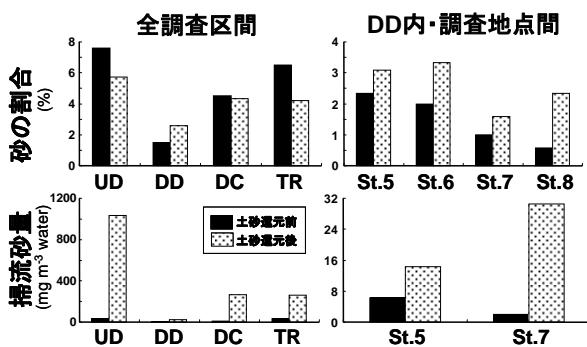


図 3.1 河床に占める砂の割合 (%) と掃流砂量：それぞれ、全調査区間 (UD, DD, DC, TR) での比較と、DD 内調査地点間 (Sts. 5, 6, 7, 8) での比較を示す。

1.4mm（極粗粒砂）であり、砂が主たる材料となっていた。

この阿木川流程に 3 調査区・12 地点（UD:ダム上流 4 地点、DD:ダム下流・支川流入前 4 地点、DC:ダム下流・支川流入後 4 地点）、支川である飯沼川流程に 1 調査区（TR:支川 4 地点）を設けた。DD には 2 つの土砂還元地点があり、それぞれは St.5 の約 100m 上流、St.7 の約 800m 上流に位置している。平成 19 年度は、これら調査区において還元土砂流下前の平成 17 年 3 月中旬（流量 1.3 m³・s⁻¹・流況安定期、本研究では「土砂還元前」と定義する）と還元土砂流下後の平成 17 年 8 月下旬（流量 3.1 m³・s⁻¹・流況変動期、同様に「土砂還元後」と定義）に物理環境調査・生物（底生動物）採集を行った結果を更に解析し、土砂還元効果を抽出した。物理環境調査では、各調査地点の平瀬においてコドラートを設定し（50×50 cm²、*n*=3）、河床材料割合を主として、可能な限り網羅した環境要因を測定した。また、掃流砂を主とする流下物量についても測定した。これら環境要因の測定後、同コドラート内の底生動物は 0.25 mm-mesh サーバネットを用いて全て採集した。底生動物はすみやかにホルマリン固定した後実験室へ持ち帰り、可能な限り細かいレベルまで同定・分類し、個体数・タクサ数を測定して後の群集解析に用いた。

3.2. 結果と考察

測定した環境要因のうち、河床材料割合・掃流砂量以外の要因については、土砂還元前後で違いは見られるものの、調査区（ダム上流・ダム下流など）間での違いの方が大きく、相対的に土砂還元の影響は小さいと考えられた。よってここでは、土砂還元前後で顕著な違いの見られた河床材料・掃流砂量についての結果を述べる。昨年度の報告⁹⁾と同様、各調査区の各河床材料割合（巨礫から砂までを対象とする）を比較した場合、土砂還元前後の両時期ともに、ダム下流（DD）で細粒河床材料が少なくなり、支川合流後にその回復が見られることが分かった。

これを更に詳しく検討するため、土砂還元前のダム下流（DD）において、河床に占める被度がきわめて小さかった河床材料である砂に着目し、土砂還元前後の各調査区間、および土砂還元地点のある DD 内調査地点間において、河床に占める砂の割合・掃流砂量の比較を行った（図 3.1）。その結果、土砂還元前後ともに、全河床材料に占める砂の割合 (%) は、ダム下流（DD）において最も小さい値を示し、ダム下流と、ダム上流（UD）・支川（TR）の間には有意な差が認められた。

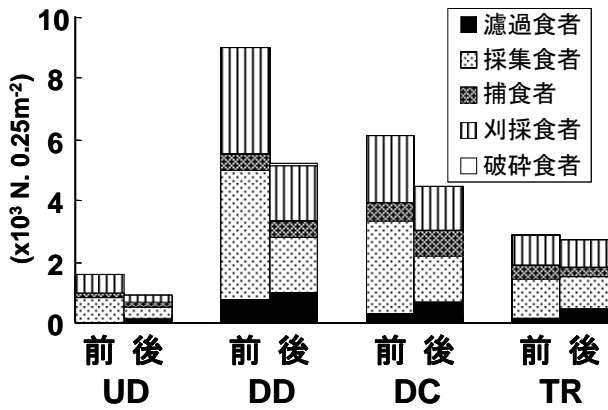


図 3.2 調査区における底生動物密度と機能摂食群の内訳

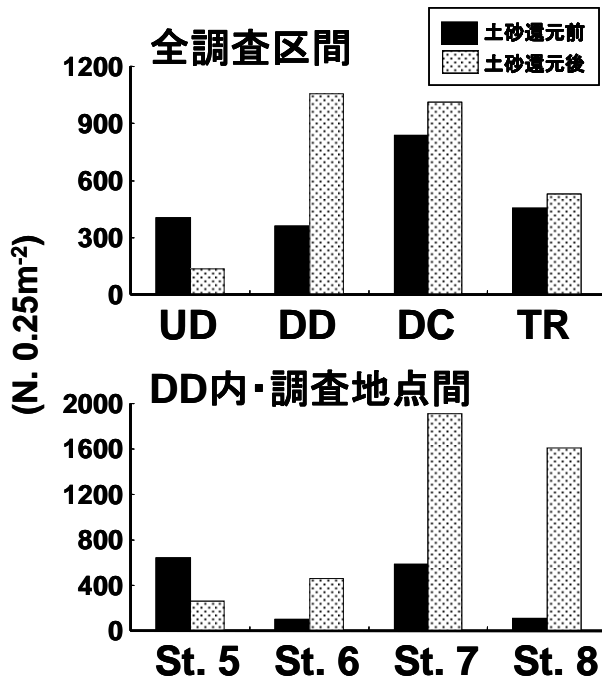


図 3.3 細粒河床材料利用タクサの全個体数

しかし、ダム下流以外の3地点、すなわちダム上流 (UD)・支川合流後 (DC)・支川 (TR)では、土砂還元前後で砂の割合が減少しているにもかかわらず (これは、流量の増加 ($1.3 \rightarrow 3.1 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) を反映したものと考えられる)、ダム下流においてのみ、砂割合の増加が認められた (しかしこの増加具合は、ダム上流・支川・支川合流後と同レベルになる程度ではなかった)。また、DD内調査地点間で比較すると、全地点ともに土砂還元前後で砂の割合の有意な増加が認められた。一方、掃流砂量は、調査区・DD内調査地点の全てにおいて、土砂還元前後で有意な増加が認められた。ただし、全ての調査区で増加が見られることから、これは土砂還元事業とは関係なく、両時期の流量の違いによるものと考えられる。

採集された底生動物のタクサ数は、土砂還元前後共

に、下流にいくに従い増加する傾向が見られ、タクサ数に土砂還元の影響は殆ど見られなかった。底生動物密度は、土砂還元前後で有意に減少し、ダム下流 (DD)での有意な密度増加は両時期ともに見られた (図 3.2)。よって、密度に関する変化は、土砂還元が影響したと考えるよりは、調査季節の違いによるものと考えの方が妥当であるだろう。機能摂食群についても同様で、土砂還元前後において大きな違いは認められなかった。

各調査区の底生動物群集において、個体数上位5位まで優占するタクサ (本報告では、これを優占タクサと呼ぶ) 相は、土砂還元前後で変化を見せた。エユヅカ亜科は、両時期・全調査区で共通して優占していた。また、時期ごとに、フガコガメ (3月) およびユヅカ亜科 (8月) は、全調査地点で共通して優占していたが、これは土砂還元とは関係なく、季節的な変化であると考えられる。調査区ごとにみても、両時期で共通して優占するタクサとして、ダム上流 (UD)ではカガハコヒミズ、ダム下流 (DD)ではカマシトビケラがあげられる。支川合流後 (DC)および支川 (TR)では、両時期に共通して優占するタクサは上記エユヅカ亜科以外に認められなかった。

ところで、底生動物を生活型で分けた場合、何らかの形で細粒河床材料 (砂・小礫等) を利用するタクサ (掘潜型および携巢型⁵⁾) が存在する。本研究で採集された底生動物の中にもこれらは認めることができ、土砂還元前の3月には、全170タクサ中37タクサが、土砂還元後の8月には、全149タクサ中33タクサが、これら「細粒河床材料利用タクサ」であった。また、優占タクサの中にも細粒河床材料利用タクサは認められた。ダム上流 (土砂還元前後共に) および土砂還元前の支川で見られたカガハコヒミズ (自由掘潜型)、土砂還元前の支川合流後で見られたヒトビケラ (滑り掘潜型)、土砂還元後のダム下流・支川合流後・支川で見られたヤトビケラ属 (携巢型) である。注目すべきは、土砂還元前のダム下流においては、優占タクサ内にこれら細粒河床材料利用タクサが認められなかったのに対し、土砂還元後のダム下流にはヤトビケラ属が認められ、しかも第1位の優占順位であったことである。ヤトビケラ属は、主たる巢材として極粗粒砂 (粒径 $1 \sim 2 \text{ mm}$: 片野・未発表データ) をゆるく綴った携巢を持ち、匍匐移動して付着藻類を摂食する藻類食者であり、著者らの知る限り、ダム下流において優占したという報告はこれまでにない。底生動物相の変化は、環境要因の変化に対応していると考えられ、細粒河床

材料利用タクサのダム下流における個体数増加は、土砂還元による影響である可能性は大きいと考えられる。

そこで、調査区間および DD 内調査地点間における、細粒河床材料利用タクサの合計個体数を土砂還元前後で比較した (図 3.3)。調査区間で比較した場合、ダム上流を除く 3 調査区では、土砂還元後に細粒利用タクサ数が増加しており、その中でもダム下流の増加傾向が極めて大きいことが分かる。また、ダム下流の調査地点間を比較した場合、St.5 を除く 3 地点で土砂還元後に細粒利用タクサが増加する傾向があり、ダム下流では土砂還元前後で細粒利用タクサ数が有意に増加するという結果が得られた。

St.5 において、土砂還元前後で細粒利用タクサ数が増えなかった (しかしこの減少傾向は有意ではない) 原因は、本研究では検証不能である。ただし、8 月という時期が、実際の還元土砂流下時期 (5~6 月) と離れていたため、わずかに 100m 上流に土砂が還元された St.5 からは還元土砂が既に流失・減少しつつあった可能性があり、これが細粒利用タクサ増加がみられない原因となったかもしれない。実際に、河床材料に占める砂の割合をみても、St.5 は St.6 と比べわずかに減少している。(また、実際、DD 内調査地点別に優占種を見た場合、Sts.6、7、8 ではヤトビケラ属が優占タクサであるのに(それぞれ 4 位、1 位、2 位)、St.5 ではヤトビケラ属 (14 位) および他の細粒利用タクサは優占タクサとなっていなかった。) それに比べ、St.7 と 8 は、上流 800m に設置された還元土砂だけでなく、St.5 の上流 100m (St.7 の 1.4km 上流にあたる) に設置された還元土砂の両方の影響を受けている。還元された土砂の流下・伝播距離や時間が明らかになっていない現在の時点ではあくまで推測に過ぎないが、8 月の調査時点では、Sts.5、6 よりも Sts.7、8 の方が、土砂還元の影響が大きかったのではないだろうか。

3.3. まとめ

実際に土砂還元が行なわれているダムを対象に、土砂還元前後の物理環境・生物相の変化を集中的に調査することでその効果を検討し、以下の 3 点を結果として得た。(1)ダム下流における河床材料の顕著な粗粒化については、土砂還元後に砂の割合が増加するなど、ある程度の改善が見られた。しかし、土砂還元によると考えられるこの改善度合いは、ダム上流および支川と同レベルになる程度ではなく、支川合流による改善度合いの方が大きいことが示された。(2)土砂還元の

影響を受け、ダム下流の底生動物群集は土砂還元前後で変化した。掘潜型・携巢型の生活型を持つ、細粒河床材料利用タクサ (ヤトビケラ属など) は、土砂還元後のダム下流において有意に増加し、優占種となることが明らかとなった。また、還元地点の 1km 程度下流では、土砂還元の効果はある程度の期間 (2 ヶ月間) 持続する可能性があるが、還元地点直下では 2 ヶ月後には効果は薄れている可能性があることが示唆された。(3)土砂還元が底生動物に与える影響を評価する場合、個体数やタクサ数等の比較的粗い指標を用いただけでは、土砂還元が底生動物に何らかの影響を与えているとは考えにくい。底生動物の生活型などを考慮し、還元土砂を利用すると考えられるタクサを絞り込み、そのタクサを指標として扱うことが必要と考えられる。

これらの結果から、河床粗粒化・底生動物相の改変等に代表されるダム下流生態系の劣化は、土砂還元事業によってある程度改善されることが客観的に検証されたといえる。よって、土砂還元事業は、ダム貯水池に溜まった堆積土砂対策としてだけではなく、近年急務となっているダム下流の河川生態系機能の改善に大きな役割を果たすだろうことが予測された。しかしその一方で、本研究は、年 1 回の土砂還元事業の効果は一時的なものであり、継続的な土砂の再供給をもたらす支川流入による改善効果には及ばないことが示唆された。土砂還元事業に効果的な生態系修復効果を持たせるためには、継続的な土砂供給が重要であると考えられた。更に、適正な供給量・供給頻度について十分に考慮すべきであることが示唆された。

4. 細粒土砂に関する指標種の抽出

4.1. 調査地概要と方法

調査地として、蓮ダム、比奈知ダム、安濃ダム (三重県)、室生ダム、上津ダム (奈良県)、犬上川ダム、永源寺ダム (滋賀県) の 7 ダム河川を設定した (図

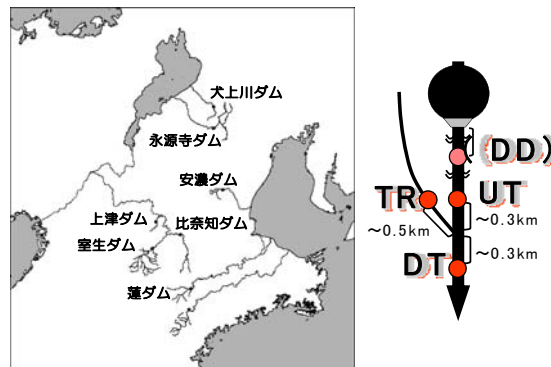


図 4.1 調査ダム河川と調査地点

4.1)。各ダム河川は、ダム下流数キロメートル以内に流入する支川を持ち、その流入前後において河床の細粒土砂量が変化することが予測されたので、調査地点を流入口周辺に設定した。すなわち、支川流入の上流地点（UT: upstream of tributary confluence）、支川流入の下流地点（DT: downstream of tributary confluence）、支川（TR: tributary）の3つである。また、ダムから1km以上下流に下って初めて最初の支川が流入する蓮ダム、比奈知ダム、上津ダム、犬上川ダムの4ダムにおいては、UTにおいてダムの影響が軽減している可能性があるため、ダム直下（DD: downstream of dam）も調査地点に加えた。

調査は3月末～4月中旬までの間に行い、各調査地点で河床環境測定と底生動物採集の両方を行った。25×25cmのコドラートを3箇所設定し、各コドラートでは、水深流速、河床材料割合（巨礫・大礫・中礫・小礫・砂）、底質粗度の測定を行った。0.25mm-meshサーバネットを使用し、コドラート内底生動物をすべて採集した。採集物はホルマリン固定した後に実験室に持ち帰り、ソーティングの後に可能な限り細かいレベルまで同定、個体数を測定して、後の解析に用いた。

解析は、河床に存在する細粒河床材料の量に対し、生息密度が良く反応する種を抽出し、それらから土砂影響を予測できるモデルを構築することを目的とした。過去の文献などから、細粒河床材料を利用して生活していると考えられる種（生活型が掘潜型・携巣型に分類されるもの⁵⁾）を目的変数に、また、低質粗度・砂被度・小礫被度（%）を説明変数（平均=0、SD=1に標準化）とした、一般化線形混合モデル（GLMM）を用いて、予測式を構築した。GLMMとは、ランダム効果と固定効果の混合モデルであり、ランダム効果としてランダム切片や傾きを扱うことができる。GLMMはポアソン分布を誤差分布として用い、7ダム間および、UT・DTなどサイト間の効果を、階層性のあるランダム切片とした。これにより、複数ダムでの様々な生息場所における、ある程度一般的な土砂の影響を考慮することができると考えられる。固定効果として砂割合、小礫割合、底質粗度の各要因を組み込んだ。

予備的に、負の二項分布モデルやGLM、ランダム効果1つのモデルなども検討したが、GLMMを用いた場合にAIC（赤池情報量基準）が最小となったため、GLMMを採用することとした。例えば、ヤマトビケラ科を例にあげると、ダムと調査地の効果を考慮したGLMMではうまく予測できているが、ランダム効果

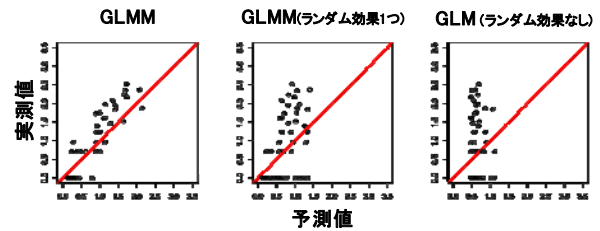


図 4.2 ヤマトビケラ科に対する各モデルの予測値と実測値の関係：GLMM（ランダム効果1つ）はランダム効果としてダム間の違いを含めている。

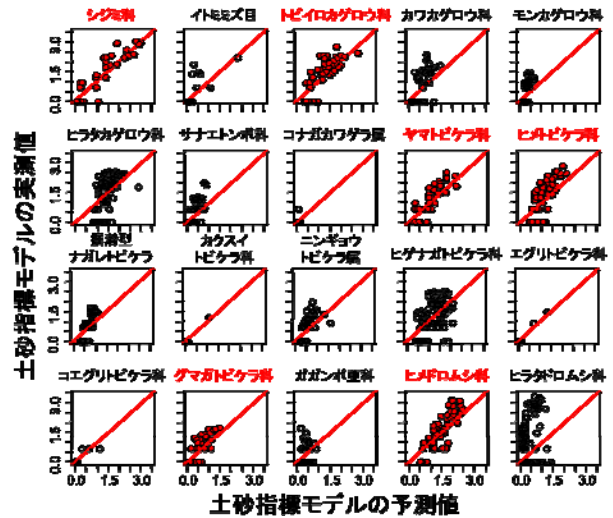


図 4.3 GLMM で構築された土砂指標種モデルの予測と実測値の関係：色丸で示された種は、当てはまりがよい種類を示す。

1つのGLMMやGLMでは土砂環境要因によってヤマトビケラの個体数がうまく予測できていないことがわかる（図4.2）。このことは複数ダムでの結果をまとめる際に、GLMMなどのランダム効果を考慮したモデルを検討する必要があることを示唆している。

4.2. 結果と考察

GLMMで構築したモデルの結果、トビケラ・二枚貝・甲虫など多くの分類群の種が、土砂指標モデルとよくフィットし、指標種となる可能性があることが示唆された（図4.3）。その中でも色丸で示された、小礫や砂などの中に潜って生息するシジミ科、トビイロカゲロウ科、ヒメドロマシ科、また、砂を巣材として用いるヤマトビケラ科、ヒメトビケラ科、グマガトビケラ科の各種類では $R^2 > 0.7$ となり、河床に存在する細粒河床材料の量によって、その種の生息密度（分布）をよく説明できることが明らかとなった。これら6種の底生動物は、河床に存在する細粒河床材料の指標として扱える可能性が高い。そこで、実際にこれら6種

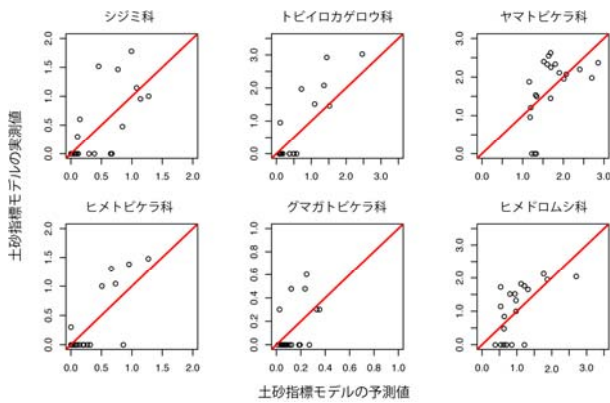


図 4.4 阿木川、矢作川でのデータを用いた GLMM で構築された土砂指標種モデルの予測と実測値の関係



図 4.5 ヤマトビケラ (右) とその携巣 (左) : 携巣を脱がせた状態で撮影。通常は体全体が巢の中にある。バーは 1 mm

が指標となりうるかどうかを、これまで我々が河床環境と底生動物の調査を併せて行ってきた中部地方のダム河川 2 つ (阿木川ダム¹⁰⁾ および矢作第 2 ダム¹¹⁾) においても GLMM を用いて検証した。その結果、6 種ともが土砂指標モデルと有意によくフィットしたことから (図 4.4)、これら 6 種の底生動物が細粒河床材料に関する指標種となりうる事が示された。

しかしここで指標種選定の条件として「見付けやすく調査が容易であること」が重要である。このため河床を掘り返さなければ発見できない掘潜型のシジミやヒメドロムシよりも、河床表面に生息する携巣型のほうが、見つけやすいという条件をより満たしていると考えられる。また、その携巣型の中でも比較的大きなサイズの携巣を持つヤマトビケラは、礫表面に分布していることが多いため非常に見つけやすい。そのため、ヤマトビケラは細粒河床材料に関する指標種として最も適していると考えられる。

そもそも、ヤマトビケラ科は自然河川に広く分布する普通種で、どのような川にも普通に見ることができる (図 4.5)。しかしその一方で、ダム下流においては、生息密度が非常に小さくなる事が報告されている種でもある¹²⁾。この種は主たる巢材として極粗粒砂 (粒径 1~2mm : 片野未発表データ) を用いることから、生息場所にはある程度の細粒河床材料が存在していることが必要であると考えられる。一方で、ヤマトビケラは付着藻類を強力に摂食する藻類食者であり、付着藻類がよく生える安定した大礫や巨礫などの

大きな河床材料も生息場所として必要であると考えられる (細粒河床材料だけの河床では、餌である付着藻類が不足するが多いと考えられる)。すなわち、ヤマトビケラが普通に生息する状態は、河床に細粒から粗粒までの河床材料が適度に揃う状態を指標していると想定できる。加えて、阿木川ダム下流での土砂還元前後で、ダム下流の底生動物相を調査した結果、土砂還元前にはダム下流においてほとんど生息していなかったヤマトビケラが、土砂還元後には第 1 位の優占種として生息するようになった (表 4.1)¹³⁾。このことから、ヤマトビケラは土砂還元による細粒河床材料の増加に対し顕著に反応する種であり、指標種として有用であることがうかがえる。

4.3. まとめ

土砂還元による細粒河床材料の増加を適切に指標化できる指標種を抽出することを目的として、近畿地方の複数のダム河川において野外調査および解析を行った。なるべく多くのダム河川に適応できる普通種であること、見付けやすく調査が容易・安価であること、河床に強く依存して生息することなどの条件から、携巣型・掘潜型の底生動物を候補として挙げ、各種の生息密度を目的変数に、河床の細粒河床材料を説明変数とした GLMM による解析を行った結果、ヤマトビケラが最も指標種として有用であることが示された。平成 20 年度の成果からは、土砂還元による効果的な生態系機能修復効果を持たせるため、ヤマトビケラの生息密度を指標として、還元土砂量や還元頻度などを十分に検討すべきであることが示唆された。ただし、解析方法の特性により、ヤマトビケラ密度と細粒河床材料量の具体的な数値の一致を明示的に示すまでは至っていない。底生動物の中でヤマトビケラは指標種として最も有用ではあるが、実際の指標種として扱うには、今後新たなモデルを組むなどの手法により、あるヤマトビケラ密度が、どの程度の細粒河床材料量を意味しているのかを明示的に示せるようにする必要がある。これは、今後の課題となると考えられる。

5. 細粒土砂の被度と水生生物との関係

表 4.1 阿木川ダムでの土砂還元前後における底生動物優占種 : 還元前は 3 月中旬、還元後は 8 月中旬の個体数ベースデータを示す。

	土砂還元前	土砂還元後
1位	エリュスリカ亜科	ヤマトビケラ
2位	アカマダラカゲロウ	マダラカゲロウ属
3位	フタバコカゲロウ	エリュスリカ亜科

5.1. 土砂還元時の砂被度の上昇と水生生物の応答

土砂還元地点から流出した還元土砂は当該地点の水理量に応じて下流に流下する。既往の土砂還元を見ると、還元土砂は下流河床に過度に堆積することはなく、砂被度（河床に存在する砂の面積存在率）が著しく上昇することはなかった。従って、本研究でも土砂還元に伴う修復効果を砂被度の僅かな上昇を念頭に置き、指標生物の抽出を行ってきた。しかし、土砂還元をより多くのダムで実施した際には、還元土砂が下流河床に堆積し、砂被度が著しく上昇する可能性もある。以上から、今年度は砂被度上昇時の応答について既往の研究、及び実験河川を用いた実験結果に基づき知見を整理し、土砂還元によるダム下流域の生態系修復効果の評価に資する。

5.2. 実験河川を用いた細粒土砂の供給実験

(1) 実験方法

実験は平成21年8月3日から10月7日の間に実験河川B、Cの上流区間（長さ100m）を用いて行った。この区間の河床は大礫・巨礫が優占し、細粒土砂の割合が少なく、ダム下流の河床状態と類似している。

実験は3つのシリーズから構成される（表5.1）。シリーズIは大礫・巨礫の優占する河床を対象とし8月3日～8月16日に、シリーズII及びIIIは、実験河川Bにのみ細粒土砂（本実験では中砂）を供給し、細粒土砂の被度が高い実験河川Bと大礫・巨礫の優占する実験河川Cを対象として9月1日～9月14日（シリーズII）、9月24日～10月10日（シリーズIII）に行った。流量はシリーズIとIIでは $0.25\text{ m}^3\text{ s}^{-1}$ 、シリーズIIIは $0.1\text{ m}^3\text{ s}^{-1}$ を基本として両河川の上流端に設置してある転倒ゲートから供給した。シリーズII及びIIIにおける土砂供給はそれぞれ8月18日、9月16日に行い、それぞれ 80 m^3 、 27 m^3 の細粒土砂（中砂）を実験河川Bの実験区間上流に設置してある土砂供給区間（長さ50m）に重機を用いて敷設した（写真5.1）。敷設した土砂は転倒ゲートから供給される流水により掃流され、下流の実験区間へと輸送される仕組みとなっている。

大礫・巨礫が優占する河床と細粒土砂が優占する河床において底生動物、魚類相を比較し、細粒土砂の被度が著しく上昇した場合の水生生物の応答を評価するため、物理環境調査（細粒土砂の被度調査、水深・流速の測定）、底生動物調査、魚類調査を実施した。物理環境調査は実験区間に任意に5箇所のコドラート

（ $50\times 50\text{ cm}$ ）を設置し、各コドラートにおける細粒土砂の被度、コドラート中心点における流速・水深の測

定を行った。調査は各シリーズにおいて7回、隔日で行った。底生動物は縦断的にランダムに4つのコドラート（ $25\text{ cm}\times 25\text{ cm}$ ）を設定し、コドラート内に生息するすべての底生動物を、サーバネット等を用いて採集し、ホルマリンで固定した後、可能な限り種レベルまで同定し、個体数及び湿重量を計測した。魚類調査は実験区間の上流端と下流端を網で仕切った後、電気ショッカーを用いて実験区間の下流から上流に向か

表 5.1 実験条件

実験概要	シリーズ I	シリーズ II	シリーズ III
実験期間	8/3～8/16	9/1～9/14	9/24～10/10
実験流量	$0.25(\text{m}^3\text{s}^{-1})$	$0.25(\text{m}^3\text{s}^{-1})$	$0.1(\text{m}^3\text{s}^{-1})$
実験条件	実験河川B 実験河川C	礫優占 礫優占	砂優占 礫優占
物理環境調査	8/3, 8/5, 8/7, 8/9, 8/11, 8/13, 8/15	9/1, 9/3, 9/5, 9/7, 9/9, 9/11, 9/13	9/24, 9/26, 9/28, 9/30, 10/2, 10/4, 10/6
底生動物調査	8/3, 8/15	9/13	10/6
魚類調査	8/3, 8/16	9/14	10/10



写真 5.1 砂投入の状況と砂の掃流状態

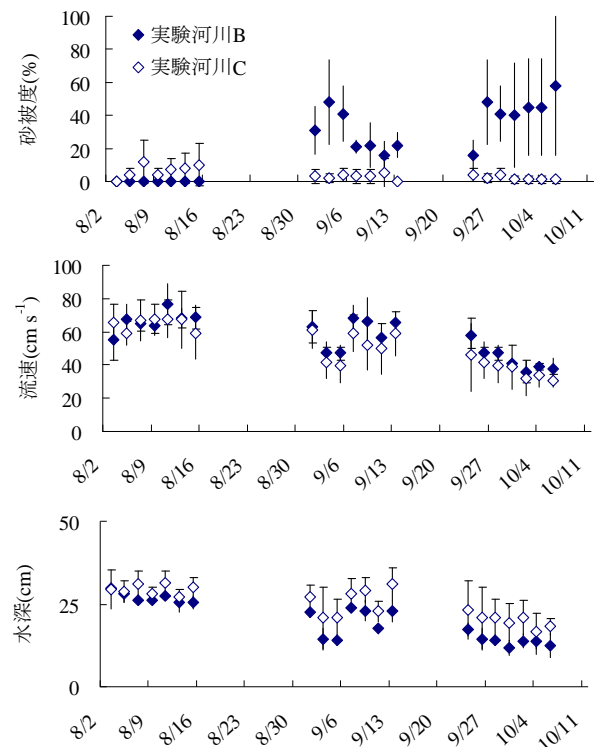


図 5.1 実験河川B及びCにおける砂被度（上段）、流速（中段）、水深（下段）の平均値と標準偏差

って3回採捕を実施した。採捕した魚類は魚種を同定し、3回の採捕が終了した段階で、実験区に再度放流した。底生動物、魚類調査はシリーズIにおいて2回、シリーズII、IIIにおいて各1回実施した。

(2) 物理環境調査結果

最初に砂被度の時間変化を示す(図 5.1)。土砂供給を実施する前のシリーズIにおける砂被度は10%以下で推移したが、実験河川Bに砂供給を行ったシリーズIIではB河川の砂被度が上昇し20~40%程度となった。また、引き続き砂供給を行ったシリーズIIIでは40~50%で推移し、砂供給に伴う砂被度の著しい上昇が確認できた。両シリーズにおける砂被度は平均的に異なり、また、同一シリーズ内においても砂被度は一定に維持されていなかった。これは、シリーズII(0.25 m³s⁻¹)とシリーズIII(0.1 m³s⁻¹)における流量に差があったこと、また、供給土砂量を時間的に一定に制御できなかったことに起因している。特に、シリーズIIは流量が相対的に大きかったため、シリーズIIの実験途上において供給土砂が枯渇・減少し、砂被度が低下した可能性が高い。実験時間中の流速と水深を見ると(図 5.1)、流速はシリーズIで同程度を示すが、シリーズIIでは砂供給を行った実験河川Bにおいて相対的に高く、シリーズIIIでは流量減少に伴う流速の減少が見られたが、流速は実験河川Bにおいて相対的に高い状態が維持された。水深はシリーズIでは同程度だが、シリーズIIでは砂供給の無かった実験河川Cにおいて高く、シリーズIIIでは流量減少に伴う水深の減少が見られたが、実験河川Cにおいて相対的に水深が高い状態は維持された。これは、砂供給に伴う砂被度の増加により河床粗度が減少し、実験河川Bにおける流速の増加と水深の減少が生じた結果と考えられる。なお、シリーズII、IIIにおいて時間的に水理量に変化するのは実験河川に水を供給する新境川における流量の増減の影響である。

(3) 底生動物調査結果

底生動物は98種が確認され、タンスイカイメン科、サンカクアタマウズムシ科、ユスリカ科(ナガレユスリカ属、ツヤユスリカ属、ヌカユスリカ属等)、コガタシマトビケラ属が優占した。図 5.2~5.4 に底生動物密度、種数の変化を示す。ただし、底生動物密度については、個体数の計数が困難な種で、密度が大きかったタンスイカイメン科は湿重量で示し(図 5.3)、それ以外の種は個体数で示した(図 5.2、5.4)。クラバ科及びチャミドロコケムシについても湿重量で計測されたが、出現頻度や密度が小さかったため、ここでは割

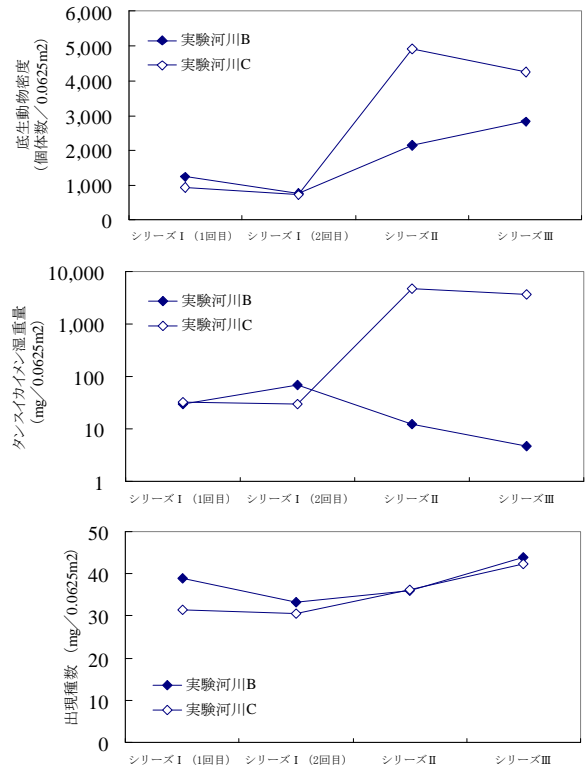


図 5.2 (上)、3 (中)、4 (下)
底生動物個体数密度、
タンスイカイメン湿重量、出現種数

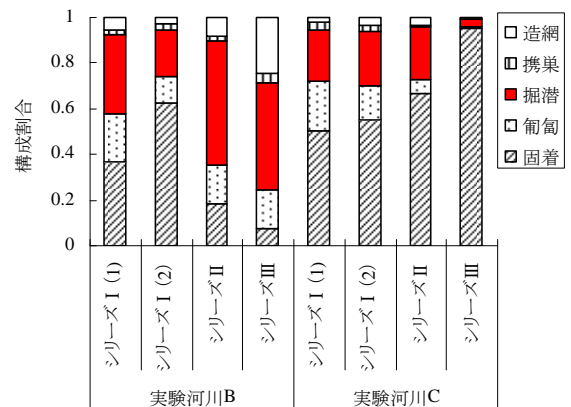


図 5.5 生活型別個体数構成割合

愛した。

底生動物密度は、細粒土砂供給前のシリーズI(1)(2)においては、実験河川B、C間に違いはみられないが、供給後のシリーズII、IIIでは違いがみられ、実験河川Cでは、タンスイカイメン科及びその他の密度が増加したのに対して、土砂供給を行った実験河川Bでは、タンスイカイメン科は減少し、その他の密度についても実験河川Cより小さかった。また、種数は両河川で違いはみられないが、生活型で群集を区分すると実験

河川Bではタンスイカイメン科の減少を反映し、固着型の割合が減少し、また、掘潜型（主にツヤユスリカ属及びナガレユスリカ属）が増加した（図 5.5）。固着型はダム直下流に多く出現することで知られるが、砂被度の上昇は固着型の底生動物の減少に寄与するようである。また、掘潜型は細かい河床材料に潜り込む、あるいは、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ため細かい河床材料の存在や量が生息密度に関与していることが知られている。砂被度上昇は生息場の増加を介して掘潜型の底生動物の増加に寄与しているものと考えられた。

今回の実験は、土砂供給から約 50 日後までの経過を捉えたものであるが、土砂供給後、底生動物は速やかに応答し、ダム直下で多く見られる固着型の減少、掘潜型の増加が確認できた。

(4) 魚類調査結果

砂被度に対する魚類調査結果を示す（表 5.2）。魚種数を見ると、シリーズ I における実験河川 B の 18、実験河川 C の 16 種類であるのに対して、シリーズ III では両河川とも 9 種類に魚種数が減少した。従って、魚類相の変化は砂被度の増加に伴う影響よりも季節要因に伴う影響がより大きいことが理解できる。魚種の増減を見ると、シリーズ I において優占していたオイカワ、モツゴ、ヨシノボリ類、タモロコ、フナ属の内、シリーズ II では両河川においてフナ属、モツゴの減少が確認され、シリーズ III においても個体数の回復は見られなかった。また、ヨシノボリはシリーズ II、III において増加する傾向を示した。一方、カマツカはシリーズ II において実験河川 B のみで増加し、シリーズ III では実験河川 C でも個体数の増加が確認できた。以上から、シリーズ I において優占した魚種の多くは季節要因により減少したと考えられるが、唯一砂河床を好むカマツカだけは実験河川 B において増加する傾向を示し、砂被度上昇に伴う魚類の応答と考えられた。また、砂被度の増加に伴い河床間隙の減少の影響を受けると考えられたヨシノボリ類に顕著な減少が見られなかった。

次に多様度指数（H'）の変化を見ると（図 5.6）、実験河川 C はシリーズ I の 2 回目の調査から 1.2~1.3 程度で推移したが、実験河川 B はシリーズ I では 1.5 程度、シリーズ II では 1.4 程度、シリーズ III では 1.2 程度となり、実験河川 C とは異なり減少する傾向を示した。

このように、魚種別の個体数増減は砂被度の変化に季節要因が加わったためカマツカ以外の魚種の明確な

表 5.2 各シリーズにおける推定魚類個体数

魚種	シリーズ I				シリーズ II		シリーズ III	
	8月3日		8月16日		9月16日		10月13日	
	B河川	C河川	B河川	C河川	B河川	C河川	B河川	C河川
アユ	1	5	2	4	4	4	0	0
イモヅクノサゴ	1	0	0	0	0	0	0	0
ウグイ	0	0	1	0	0	0	0	0
ウグイ	4	1	0	0	0	0	0	0
ウキ	0	0	0	1	1	0	0	1
オイカワ	818	419	487	335	522	190	192	583
オオカバ	0	5	1	0	0	0	0	0
カサギ	51	20	0	0	0	3	3	0
カマツカ	6	77	10	29	116	11	96	63
コイ	12	1	3	0	0	0	0	0
シマシマヨリ類	6	3	1	0	0	25	18	99
スモモ類	1	0	0	0	0	0	0	0
スシマドシヨリ	0	0	0	2	0	0	0	0
ゼゼラ	0	0	1	0	0	0	1	0
タイリカハナカゴ	4	0	6	0	0	0	0	0
タモロコ	119	96	134	48	152	57	47	139
ドジョウ	8	8	7	1	1	5	0	24
ナマス	3	4	0	2	0	3	0	1
コイ	0	1	0	1	17	1	5	0
ヒメ類	1	1	0	1	1	2	0	0
フナ属	61	11	76	10	0	3	0	0
ブルキール	7	0	0	0	0	0	0	0
モッコ	142	45	98	13	15	0	4	2
ヨシボリ類	98	133	135	278	273	324	565	729
確認魚種数	18	16	14	14	10	12	9	9
個体数合計	1,343	846	976	739	1,112	640	940	1,650

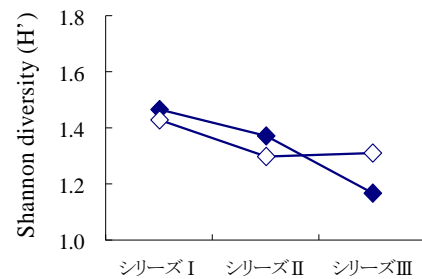


図 5.6 シリーズ I~III における多様度指数の変

傾向を認めることができなかつた。しかし、多様度指数を見ると、実験河川 C における多様度指数が同程度で推移するのに対し、実験河川 B ではシリーズ毎に減少する傾向が見られた、また、シリーズ II と比較してシリーズ III において砂被度が上昇していることから砂被度の増加が 40~50% のレンジに達すると砂河床に好適な種の増加・不適な種の減少が生じ、多様度指数が減少する可能性がある。

5.3. まとめ

砂被度が上昇した場合の底生動物と魚類の応答に関する実験河川における実験結果を説明した。底生動物については掘潜型の増加が見られ、これらの結果は事例報告に留まり、底生動物及び魚類の生息が困難となる閾値の設定については引き続き同様の検討を行う必要がある。

6. 土砂還元の評価手法の提案

6.1. 調査デザイン

(1) 評価対象区間の捉え方

今までの研究成果から、ダム下流の支川合流点下流においては支川からの土砂供給が生態系の劣化を抑制することが示されている。本研究は最初に合流する支川の効果のみを扱っているが、本川に対する土砂供給量は支川合流に伴い不連続的に増加していくことを考えると、ダム下流の影響は支川合流により段階的に緩和される可能性が高い。以上から本研究では、ダム直下から最初の支川合流地点まで、もしくは、支川合流地点から次の支川合流地点までを一つのセグメントとして捉え、ダムによる生態系の劣化と土砂還元の効果の評価するための一つの空間単位と捉える。

土砂還元を実施する際には、土砂還元箇所が位置するセグメントを最初の評価対象とし、必要に応じて順次下流のセグメントを評価対象区間として選定する。ただし、支川合流によりダム下流の生態系劣化の程度が緩和されていくこと、流速・水深・河床材料といった環境要因そのものが変化する可能性があること、更に、水質汚濁負荷の流入等のようにその他の人為的インパクトを受ける可能性があることから、土砂還元の効果の検出は下流のセグメントになると難しくなることに留意する。

(2) BACI デザインに基づく調査デザイン¹⁴⁾

土砂還元の影響を受ける「インパクト区」とした場合、土砂還元実施前後のインパクト区における事前・事後比較は、土砂還元効果を評価する上で重要な情報となる。しかし、ある地点の事前・事後比較は、人為的インパクト以外の要因に伴う影響、自然現象が本来有している時間変動の影響を受ける可能性があり、これを回避するための調査デザインが求められる。具体的な回避方法として以下の2つが考えられる。

- ① 対象とするインパクト以外の要因を除去するためインパクト区とは別にコントロール区を設定し、2つの区間の事前・事後の比較、すなわち、Before After Control Impact (以下、BACI) デザインとする。
- ② 現象の時間的な変動に伴う影響を除去するため、時間的に繰り返しを取る。

BACI デザインは自然環境に対する人為的な影響の抽出を目的とした調査デザインである。インパクト区の変化は対象とする人為的インパクト以外の要因（例えば、気温変動、洪水・渇水等によって変化するため、インパクト区のみによる事前・事後調査ではインパクト以外の要因を除去できないため可能性が高い（図 6.1(A)）。このため、別途コントロール区を設定し、事

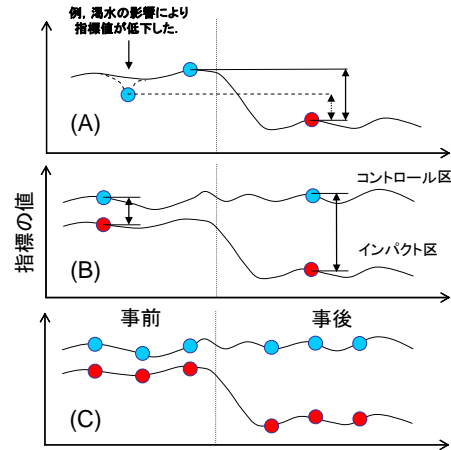


図 6.1 インパクト区とコントロール区の空間配置

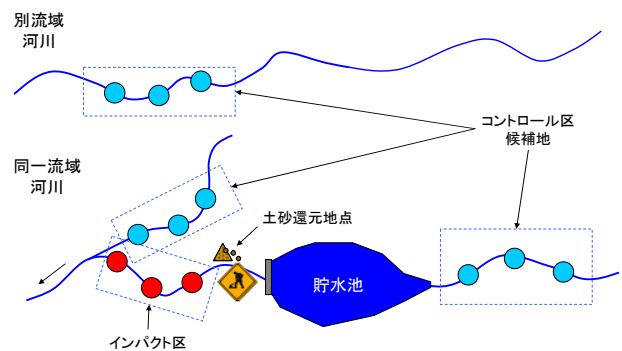


図 6.2 インパクト区とコントロール区の空間配置

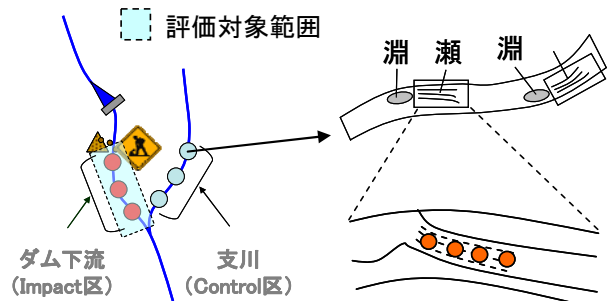


図 6.3 調査サイトとサンプリング地点の設定の考え

前・事後における両区の差異の変化からインパクトの影響を評価することが求められる（図 6.1(B)）。この際、時間的な変動の影響を除去するために、インパクト区とコントロール区における調査を同期させて、時間的な繰り返しが取れるようなデザインとすることが望ましい（図 6.1(C)）。

コントロール区の設定はダムの影響が小さく、ダムの影響が無かった時期のインパクト区における物理特性（河川規模、河床勾配、河床材料の粒径、溪畔林の鬱閉度等）、生物群集と類似している区間に設定すると、効果の検出だけでなく、インパクト区とコントロール区の指標の乖離度（例えば、両区の生息密度の差異）

の意味を理解しやすくなる。この際のコントロール区はリフェレンス区としての意味を有し、土砂還元を実施する際の基準となる。ただし、どのようにコントロール区を設定しても、インパクト区とコントロール区における生物群集は同一とはならないため、コントロール区の指標値そのものが目標とならない点に留意する必要がある。また、コントロール区の砂被度が著しく高い場合には、この状態に近づけることにより多様性指数の低下、有用魚種の減少等の問題が生じる可能性があることに留意する。

コントロール区は支川やダム上流域に設定することが多いが、同一流域内において適切なコントロール区が見つからない場合には隣接する他の流域においてコントロール区を設定する(図 6.2)。また、土砂還元の効果は土砂還元地点からの距離によって効果が異なる可能性が高いため、一つのセグメントに複数区設定すると良い(図 6.3)。

インパクト区、コントロール区の設定が終了したら、次に調査サイトとサンプリング地点の設定を行う。調査サイトは瀬に設定し、一つの調査サイトに 3~4 のサンプリング地点を設けて空間的な繰り返しを取る。

6.2. 調査時期及び調査回数

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、流況の安定している時期に実施する。

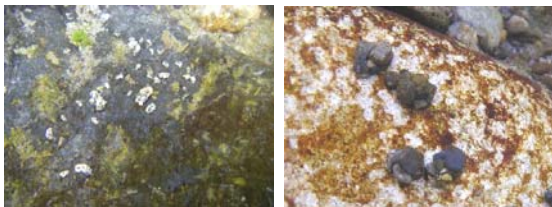


写真 6.1 ヤマトビケラの素材の状況



水深の測定

流速の測定

河床材料割合の観察

写真 6.2 物理環境調査の手順

6.3. 調査方法

コドラートにおける調査は指標種調査、流速・水深調査、河床材料の測定、の順番で実施する¹⁵⁾。

(1) 指標種調査

設定した指標種「ヤマトビケラ」の個体数を把握するため、設定したコドラート設置箇所に 50cm×50cm のコドラートを設置し、河床表層からヤマトビケラの巣を見つけこれを計数する(写真 6.1)。

(2) 流速・水深の測定

コドラートの 4 隅において流速(6 割水深)と水深の測定を行う。水深は時間変動が大きいので、最低でも 3 回実施し、その平均値として整理する。4 隅の流速・水深は平均値として表し、当該コドラートの値とする。

(3) 河床材料調査

河床材料調査においては粒径別の河床材料の面積占有率を明らかにするため、コドラート内の河床材料を巨礫、大礫、小礫、砂に区分し、それぞれの面積占有率を百分率で測定する。測定に際しては、コドラートを 25cm×25cm の区画に 4 等分し、それぞれにおいて面積占有率を測定し、これを合計すると測定が容易になるだけでなく、測定精度が上昇する(写真 6.2)。

6.4. BACI デザインに基づく分析と評価

6.4.1. 物理環境調査結果の整理

測定した物理環境調査結果については、河床材料、流速、水深土砂還元前後におけるインパクト区、コントロール区における平均値と標準偏差を算出し、サイト間における平均値の差を確認する。他のサイトと比較して平均値が著しく大きい、もしくは、小さい場合、また、標準偏差が大きい場合には、指標種の生息可能域を外れたサンプリング地点を含む可能性がある。この場合は、当該サンプリング地点における指標種の調査結果を確認し、指標種の個体数等の値が外れ値になっている場合は当該データを除外する等の措置が必要である。

6.4.2. 土砂還元効果の評価

土砂還元の効果は時間(事前・事後)、インパクト区とコントロール区を要因とする分散分析によって行う。この場合、事前・事後で土砂還元の効果が現れるのはインパクト区のみであるが、その場合、時間的に限定された効果として現れるか(Pulse 型)、比較的長い期間に渡り効果が維持されるか(Press 型)かによって効果の検出方法が異なる(表 6.1、図 6.4)。Press 型の効果が検出された場合には土砂還元に伴い供給された細粒土砂が対象区間に長期間留まったことを意味し、

表 6.1 BACI デザインに基づく分散分析表

変動要因	自由度	平均平方和
土砂還元前後	=B	1 $V_{Before-After}$
時期間	=T(B)	2(t-1) $V_{T(B)}$
サイト間	=L	(l-1) V_L
インパクト区とコントロール区	=I	1 V_{I-C}
コントロール区内	=C	(l-2) V_{AC}
B × L	(l-1)	V_{B-L}
B × I	1	V_{B-I}
B × L	(l-2)	V_{B-L}
T(B) × L	2(t-1)(l-1)	$V_{T(B)-L}$
T(Bef) × L	(t-1)(l-1)	$V_{T(Bef)-L}$
T(Bef) × I	(t-1)	$V_{T(Bef)-I}$
T(Bef) × C	(t-1)(l-2)	$V_{T(Bef)-C}$
T(Aft) × L	(t-1)(l-1)	$V_{T(Aft)-L}$
T(Aft) × I	(t-1)	$V_{T(Aft)-I}$
T(Aft) × C	(t-1)(l-2)	$V_{T(Aft)-C}$
残差	2lt(m-1)	V_e

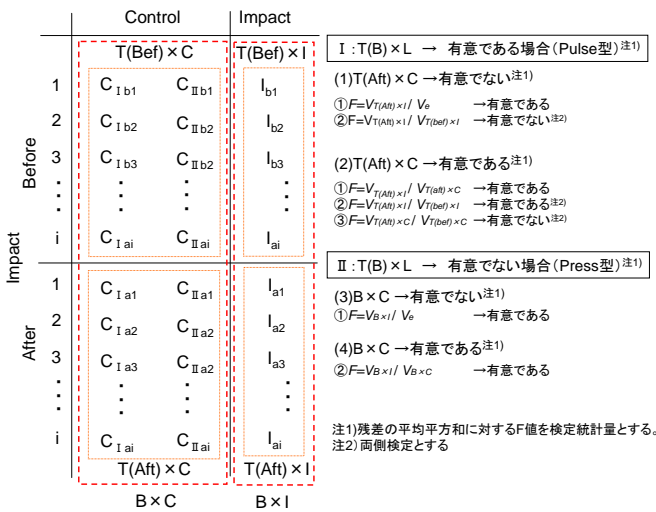


図 6.4 BACI デザインにおけるデータセットの例と分析の進め方

土砂還元が効果的であったことを示すが、Pulse 型として検出される場合には、細粒土砂が洪水等によって流出し、効果が短期間しか維持されなかったことを意味する。この場合、土砂還元の量、頻度に課題があると捉え、土砂還元手法を再検討することが必要となる。

(1) Pulse 型のケース

土砂還元に伴い指標種の個体数等がある一時期のみ上昇する場合は、事前・事後 (B) × インパクト区・コントロール区 (L) の交互作用 (B×L) は認められないことが多い。このため、インパクト区における事前・事後のそれぞれについて時間経過に伴う交互作用 (T(Aft)×I) を算出し、土砂還元効果を検出する。この場合は、T(Aft)×C の交互作用の有無により検出方法は 2 つに区分される。(1)コントロール区においてインパクト後の経過時間に関する交互作用が認められない場合には ($F=V_{T(Aft)-C} / V_e$ が有意でない)、インパクト

区における①インパクト後の経過時間に関する交互作用が認められ ($F=V_{T(Aft)-I} / V_e$ が有意)、かつ、②インパクト前の経過時間に対する交互作用に対するインパクト後の交互作用が大きい ($F=V_{T(Aft)-I} / V_{T(Bef)-I}$ が有意) 場合に、土砂還元の効果を認めることができる (図 6.4(1)のケース)。一方、(2)コントロール区においてインパクト後の経過時間に関する交互作用が認められる場合には ($F=V_{T(Aft)-C} / V_e$ が有意)、①インパクト区におけるインパクト後の経過時間に対する交互作用がコントロール区のインパクト後の交互作用に対して大きく ($F=V_{T(Aft)-I} / V_{T(Aft)-C}$ が有意)、②インパクト区におけるインパクト後の経過時間に対する交互作用がインパクト前の経過時間に対する交互作用大きく ($F=V_{T(Aft)-I} / V_{T(Bef)-I}$ が有意)、③コントロール区におけるインパクト後の経過時間に対する交互作用に対するインパクト前の交互作用が大きい ($F=V_{T(Aft)-C} / V_{T(Bef)-C}$ が有意) 場合に、土砂還元の効果を認めることができる (図 6.4 (2)のケース)。

(2) Press 型の場合

土砂還元の効果が長期間維持され、指標種の個体数増加が長期間安定している場合には、T(B)×L すなわちインパクト前後における経過時間に対するコントロール区、インパクト区の交互作用は認められないことが多いため、B×L から土砂還元の効果を検出する。この場合は、B×C の交互作用の有無により検出方法は 2 つに区分される。(3) B×C が有意でない ($F=V_{B-C} / V_e$ が有意) 場合には B×I が有意であれば ($F=V_{B-I} / V_e$ が有意) 土砂還元の効果を有意と認めることができる (図 6.4(3)のケース)。(4)B×C が有意な場合には、B×C に対して B×I が大きければ ($F=V_{B-I} / V_{B-C}$ が有意) 土砂還元の効果を有意と認めることができる (図 6.4(3)のケース)。

6.5. まとめ

土砂還元効果の定量的な評価推定手法を確立することを目的として、BACI デザインに基づき土砂還元を実施した際の効果の評価手法を Pulse 型、Press 型に区分して概説した。BACI デザインに基づく土砂還元評価手法を整理し、調査から効果推定に至るプロセスを明示した。本手法を適用することで、土砂還元の効果だけでなく、効果の継続時間の判定が可能となる。

7. おわりに

本研究ではダム下流域における河川生態系の劣化を抑制することを目的として実施される土砂還元の効果を定量的に評価する手法を確立することを目的

として、1)~3)の項目について研究を実施する。1)ダム下流域における生態系劣化状況を、底生動物群集を対象として明らかにする。また、底生動物群集と環境要因との関係解明に基づき 2)土砂供給量減少に伴う指標生物を抽出する。最終的に 3)土砂還元の定量的な効果推定手法を確立する。以下に結果を示す。1)ダム下流の地点では、細粒河床材料の減少・粗粒化が顕著に見られたが、ダム下流で流入する支川合流後は、支川により細粒河床材料が再供給されて粗粒化が改善していた。また、ダム下流の底生動物群集は、個体数の著しい増加にもかかわらず群集の種多様性は低かったのに対し、支川流入後の底生動物群集はタクサ数の増加により種多様性の増加がみられた。細粒河床材料と、流下物量・組成に関する因子の2つは、底生動物の群集変化に強く関わっている可能性があることが示された。2)なるべく多くのダム河川に適応できる普通種であること、見付けやすく調査が容易・安価であること、河床に強く依存して生息することなどの条件から、携巣型・掘潜型の底生動物を候補として GLMM による解析を行った。この結果、ヤマトビケラが最も指標として有用であることが示された。3)ダム直下から支川合流地点、支川合流地点間を評価対象のセグメントと捉えて、評価対象となるセグメントを選定し、対象セグメント内の土砂還元地点下流においてインパクトサイトを設置すること、また、BACI(Before After Control Impact)デザインに基づきコントロールサイトを支川等に設置する必要性を述べた。また、二元配置の分散分析に基づき土砂還元効果を推定する手法について述べた。

参考文献

- 1) 谷田一三、竹門康弘：ダムが河川の底生動物へ与える影響、応用生態工学、2、pp.153-164、1999
- 2) Poff NL, Hart DD: How dams vary and why it matters for the emerging science of dam removal, *Bioscience*, 52, pp.659-668, 2002
- 3) Yoshimura C, Omura C, Furumai H, Tockner K: Present state of rivers and streams in Japan, *River research and Applications*, 21, pp.93-112, 2005
- 4) Ward JV, Stanford JA: The serial discontinuity concept of river ecosystems, In: *Dynamics of lotic ecosystems*, Fortaine TH., Bartell SM (eds.), Ann Arbor Science Publications, pp.29-42, 1983
- 5) 竹門康弘：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、2005
- 6) Merritt RW, Cummins KW: An introduction to the aquatic insects of North America, third edition, Kendall/Hunt publishing Co., Dubuque, 1996
- 7) 河合禎次、谷田一三：日本産水生昆虫：科・属・種への検索、東海大学出版会、2005
- 8) Stevens LE, Shannon JP, Blinn DW: Colorado river benthic ecology in Grand Canyon, Arizona, USA: dam, tributary and geomorphological influences, *Regulated rivers: research & management*, 13, pp.129-149, 1997
- 9) 萱場祐一、片野泉、皆川朋子：土砂還元によるダム下流域の生態系修復に関する研究、2006年度土木研究所重点プロジェクト報告書、pp.633-638、2007
- 10) Katano I, Negishi JN, Minagawa T, Doi H, Kawaguchi Y, and Kayaba Y: Longitudinal macroinvertebrate organization over contrasting discontinuities: effects of a dam and a tributary, *Journal of North American Benthological Society*, 28, pp.331-351, 2009
- 11) Takao A, Kawaguchi Y, Minagawa T, Kayaba Y: 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, 2008
- 12) Wootton JT, Parker MS, and Power ME: Effects of disturbance on river food webs, *Science*, 273, pp.1558-1561, 1996
- 13) 萱場祐一、片野泉、皆川朋子：土砂還元によるダム下流域の生態系修復に関する研究、2007年度土木研究所重点プロジェクト報告書、2008
- 14) Underwood A. J. : Beyond BACI: the detection of environmental impacts on populations in the real, but variable, world, *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 161, pp.145-178, 1992
- 15) 国土交通省国土技術政策総合研究所・独立行政法人土木研究所：ダムと下流河川の物理環境との関係についての捉え方ー下流河川の生物・生態系との関係把握に向けてー。国土交通省国土技術政策総合研究所資料第521号・独立行政法人土木研究所第4140号、2009年2月