

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（自然共生）

研究担当者：萱場祐一、皆川朋子

【要旨】

本研究は、ダム下流域における生態系劣化状況の解明、土砂供給量減少に伴う指標生物とその環境要因の関係の解明、及び土砂還元の定量的な効果推定手法の確立を目的としている。平成 21 年度は、1)土砂還元を行った際に還元した細粒土砂が河床に過度に堆積することが懸念されるため、既往研究及び新たに実施した実験に基づき河床への細粒土砂の堆積に伴う底生動物、魚類の応答特性を整理した。また、2)前年度までに抽出した指標種を用いて土砂還元の効果を推定する手法を立案し、この手順を整理した。1)については、細粒土砂の堆積は魚類と比較して底生動物に顕著な影響を与える可能性が示唆されたが、細粒土砂の堆積の指標である砂被度の多寡と生物相との関係については定性的な記述に留まった。2)については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：BACI デザイン、土砂還元、細粒河床材料、砂被度

1. はじめに

近年いくつかのダムで行われ始めている「土砂還元」は、ダム下流の劣化した生態機能に対する高い修復効果を持つのではないかと期待されている¹⁾。しかし、土砂還元による修復を実現する上で、以下の課題が見られた。

- (1) 日本においてはダム下流域における生態系の劣化状況を評価した事例が少なく、土砂還元の主材料となる細粒土砂（砂・小礫等）の減少に伴う生物相の応答特性が不明である。
- (2) 上記課題のために、土砂還元を実施した際の効果の評価が困難である。

本研究では、最初に、日本では報告事例が極めて少ないダム下流域の生態系劣化状況を、矢作第 2 ダム下流、阿木川ダム下流を対象として底生動物を指標とした検討を行った。この結果、ダム下流域では、餌資源量の変化、砂、小礫の減少を要因として底生動物相が変化することを明らかにした。また、前者の要因はダム直下から流下方向に比較的短い距離で消失することが多いこと、また、後者の要因は支川合流に伴う砂・小礫の供給によって緩和されることが明らかになっている。また、細粒土砂の減少によく応答する指標種について以下の観点から抽出を行った。すなわち、(1)

なるべく多くのダム河川に適応するため、地域特性をもち、日本の自然河川では普通種として生息する当たり前の生物であること、(2)素人でも見つけやすく、調査採集が容易・安価であること、(3)水質等他の要因変化への反応と比べ、河床環境変化に対する反応が最も強いと考えられる生物であること、を条件としてヤマトビケラを指標種と設定し、土砂還元を実施した阿木川において細粒土砂の増加に伴う指標種の応答特性を評価した。

平成 21 年度は、土砂還元を実施した際の懸念される現象であり、還元した細粒土砂が河床に厚く堆積した際に生じる河川生態系の応答特性について実験を行い、河床への過度の細粒土砂堆積に伴う問題点を整理した。また、細粒土砂に応答する指標種の設定が終了したことから、土砂還元に伴う修復効果を調査・評価する具体的な手法を BACI(Before After Control Impact)デザインに基づき整理した。

2. 細粒土砂の被度と水生生物との関係

2.1. 土砂還元時の細粒土砂の被度モデル

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。

2. 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-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-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（50×50cm）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、隔日で実施した。底生動物は縦断的にランダムに4つのコドラート（25cm×25cm）を設定し、コドラート内に生息するすべての底生動物を、サーバーネット等を用いて採

表-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-1 砂投入の状況と砂の掃流状態

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-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（ $0.25 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ）とシリーズIII（ $0.1 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ）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-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

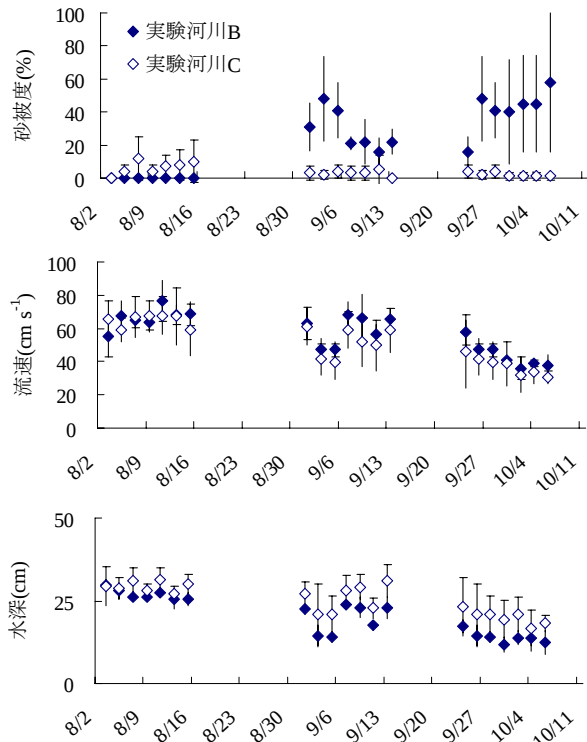


図-1 実験河川 B 及び C における砂被度（上段）、流速（中段）、水深（下段）の平均値と標準偏差

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量が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-2～4 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-3）、それ以外の種は個体数で示した（図-2、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）。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

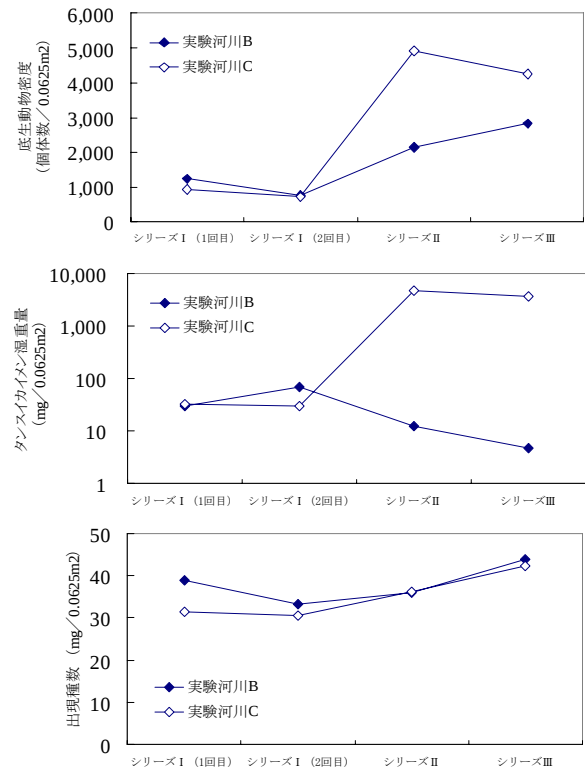


図-2（上）、3（中）、4（下）
底生動物個体数密度、
タンスイカイメン湿重量、出現種数

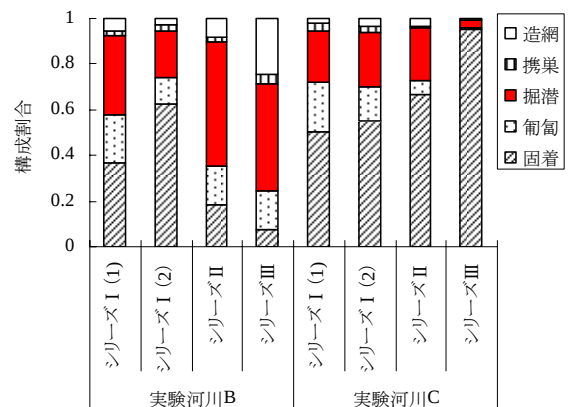


図-5 生活型別個体数構成割合

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-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-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傾向を認めることができなかった。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

表-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
イモコノボリ	1	0	0	0	0	0	0	0
ウキコリ	0	0	1	0	0	0	0	0
ウグイ	4	1	0	0	0	0	0	0
ウナギ	0	0	0	1	1	0	0	1
オイカワ	818	419	487	335	522	190	192	583
オカチハス	0	5	1	0	0	0	0	0
カネヒラ	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
シマドシヨリ類	6	3	1	0	0	25	18	99
スロモコ類	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
タイリカハナナゴ	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
コノイ	0	1	0	1	17	1	5	0
ヒカノイ	1	1	0	1	1	2	0	0
フナ属	61	11	76	10	0	3	0	0
ブルキナル	7	0	0	0	0	0	0	0
モツゴ	142	45	98	13	15	0	4	2
ヨシノボリ類	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

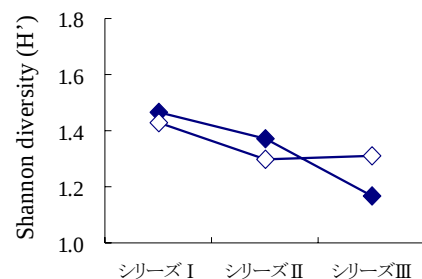


図-6 シリーズ I ~ III における多様度指数の変化

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。

2.3. 細粒土砂の被度と水生生物の応答特性

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。

3. 土砂還元の評価手法の提案

3.1. 調査デザイン

(1) 評価対象区間の捉え方

平成 18、19 年度における研究成果から、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、支川合流点から次の支川合流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を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²⁾

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-7(A)）。このため、別途コントロール区を設定し、事前・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-7(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

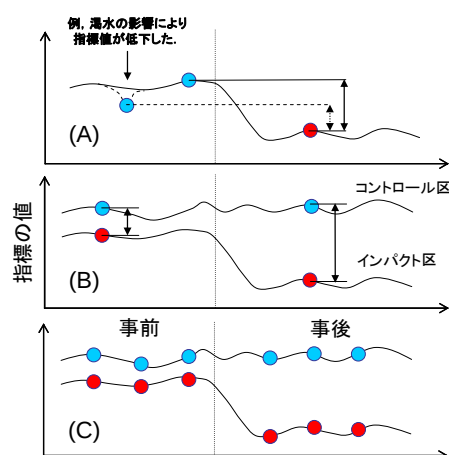


図-7 インパクト区とコントロール区の空間配置

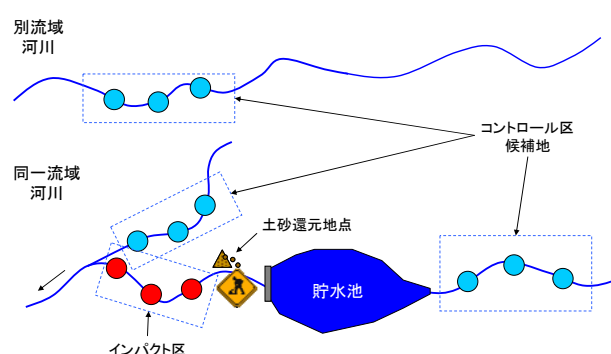


図-8 インパクト区とコントロール区の空間配置

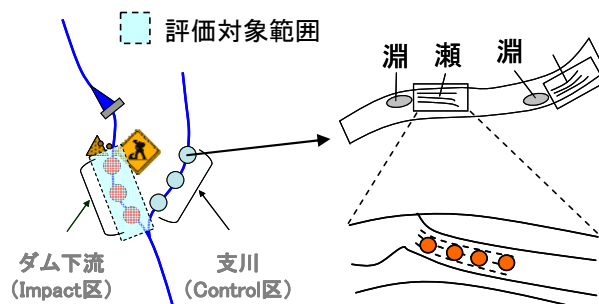


図-9 調査サイトとサンプリング地点の設定の考え方

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-7(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度指数の低下、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－8）。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－9）。

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。

3. 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。

3. 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³⁾。

(1) 指標種調査

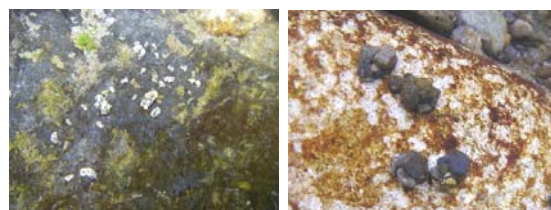
設定した指標種「ヤマトビケラ」の個体数を把握するため、設定したコドラート設置箇所³⁾に 50cm×50cm のコドラートを設置し、河床表層からヤマトビケラの巣を見つけ出し、その個数を計数する(写真－2)。

(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³⁾ため、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(写真－3)。

(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



写真－2 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

写真－3 物理環境調査の手順

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－3)。

3. 4. BACI デザインに基づく分析と評価

3. 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。

3. 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－3、図－10)。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、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 i) 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、ii) 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
-10(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)、i) 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)、かつ、ii) 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)、コントロール区におい
ては iii) 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-10(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-10(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
-10(4)のケース)。

表-3 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

	Control	Impact	
	T(Bef) × C	T(Bef) × I	I : T(B) × L → 有意である場合 (Pulse型) 注1)
Before	C _{I b1} C _{II b1}	I _{b1}	(1) T(Aft) × C → 有意でない注1)
2	C _{I b2} C _{II b2}	I _{b2}	① $F=V_{T(Aft)-I}/V_e$ → 有意である
3	C _{I b3} C _{II b2}	I _{b3}	② $F=V_{T(Aft)-I}/V_{T(Bef)-I}$ → 有意でない注2)
⋮	⋮	⋮	
i	C _{I ai} C _{II ai}	I _{ai}	(2) T(Aft) × C → 有意である注1)
Impact			① $F=V_{T(Aft)-I}/V_{T(Aft)-C}$ → 有意である
After			② $F=V_{T(Aft)-I}/V_{T(Bef)-I}$ → 有意である注2)
1	C _{I a1} C _{II a1}	I _{a1}	③ $F=V_{T(Aft)-C}/V_{T(Bef)-C}$ → 有意でない注2)
2	C _{I a2} C _{II a2}	I _{a2}	
3	C _{I a3} C _{II a2}	I _{a3}	II : T(B) × L → 有意でない場合 (Press型) 注1)
⋮	⋮	⋮	(3) B × C → 有意でない注1)
i	C _{I ai} C _{II ai}	I _{ai}	① $F=V_{B-C}/V_e$ → 有意である
	T(Aft) × C	T(Aft) × I	(4) B × C → 有意である注1)
	B × C	B × I	② $F=V_{B-C}/V_{B-I}$ → 有意である

注1) 残差の平均平方和に対するF値を検定統計量とする。
注2) 両側検定とする

図-10 BACI デザインにおける
データセットの例と分析の進め方

4. まとめ

本研究では、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いる。21 年度は、(1)土
砂還元時に砂が過度に堆積した場合を想定し、底生動
物と魚類の応答特性について実験結果を整理した。ま
た、(2)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。

得られた成果は以下のとおりである。

- (1) 砂被度を 60%程度まで増加させた結果、底生動
物・魚類相に変化が見られ、底生動物については
固着型の減少と掘潜型の増加、魚類については多
様度指数の低下傾向が見られた。今後は生物相の
明確な応答が生じる砂被度の閾値の検討が必要と
なる。

- (2) 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。

参考文献

- 1) 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 年
- 2) 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* , Vol.161, pp.145-178, 1992
- 3) 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

STUDY ON RESTORATION OF RIVER ECOSYSTEMS IN DOWNSTREAM REGION OF DAM BY THE SEDIMENT REPLENISHMENT

Budget : Grants for operating expenses

General account

Research Period : FY2006-2009

Research Team : Water Environment Research Group
(Aqua Restoration Research Center)

Author : **KAYABA** Yuichi

MINAGAWA Tomoko

Abstract : This study aims to clarify the degradation process of the downstream ecosystem of dams, and specify indicator species for estimating the effects of sediment replenishment on the downstream ecosystems of dams. And finally a quantitative approach for evaluating the effect of sediment replenishment will be developed. In this fiscal year, 1) we investigated the response of aquatic fauna with the excess of fine sediment deposit on stream beds because it is likely that the sediment replenishment forms fine sediment layer on the stream bed just downstream replenishment place. And 2) we showed the evaluation method for the effect of sediment replenishment based on the indicator species which was chosen until previous studies. In terms of the result of 1) it was suggested that the deposit of fine sediment has possibility to cause drastic change of macroinvertebrate fauna more than fish. The relationship the aquatic fauna and sand cover ratio, which indicates the ratio of fine sediment cover of stream beds, however, cannot be acquired in this experiment. In terms of the result 2) it was indicated that first of all we should determine objective segments for the evaluation, which were defined by the section between a replenishment place and a first confluence point with a tributary or the section between a place of confluence point with a tributary and a following confluence point, and then determined several evaluation site in the segments downstream the replenishment place. Furthermore, we explained that it was necessary to establish control sites in the other segments, for example, in tributaries based on BACI (Before After Control Impact) design, in which Two-Way Anova would be used for the evaluation of a replenishment.

Key words : BACI design, sediment replenishment, fine sediment, sand cover ratio