

## I-11-1 河川環境の保全と復元に向けての河床環境の指標化に関する研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平15～平17

担当チーム：河川生態チーム

研究担当者：天野邦彦，傳田正利，時岡利和

### 【要旨】

本研究課題では、河川中流域とダム下流河川を研究対象としている。河川中流域の対象は長野県千曲川中流域であり、対象河川における瀬淵構造の流れ場特性とそこに生息する水生昆虫の関係を評価した。その結果、瀬淵の流れ場特性は河川微地形の影響を強く受けており、そこに生息する水生昆虫の種組成、バイオマスに大きな影響を与えていることが明らかとなった。ダム下流河川の対象は栃木県川俣ダム下流河川であり、対象河川における粗粒化特性の把握を試みると共に、場所による水生生物の分布特性について調査した。その結果、過去からの粗粒化特性の把握が可能となると共に、ダム下流域における水生生物の分布にも明確な差が見られた。

### 1. はじめに

河川生態系の保全・復元に対する社会的関心の高まりをうけて、河川事業を行う際にも河川生態系に配慮した事業を行う必要がある。河川の生態系は河川の微地形が作る流れ場と密接に関係していると考えられており、治水・利水を主な目的とした河道改修事業を行う際にも河川生態系に配慮した河道形状にすることによって、河川生態系に影響を与えない、もしくは改善する事業を行うことができると考えられる。

河川生態系にとって良好な河川微地形の代表的な事例として瀬淵構造が挙げられる。河道改修事業を行う際は、治水安全度に影響を及ぼさない範囲でこのような河川の瀬淵構造を保全、もしくは創出するような計画を立てることが望ましい。しかし、河川の瀬淵構造と河川生態系の関係については詳細には解明されておらず、河道改修による地形変化が河川生態系に及ぼす影響について定量的に予測することは難しい。そこで、本研究では長野県千曲川中流域を対象として瀬淵の物理環境、生物環境調査を行い、瀬淵の地形とそれが形成する流れ場、そこに生息する生物との関係を評価した。それにより、瀬淵の生態的機能評価を行うことを第1の目的とする。

また、近年ダム下流河川の粗粒化現象が河川生態系に与える影響が注目されており<sup>1)</sup>、具体的な対策が望まれている。粗粒化現象は、ダムによる上流からの土砂供給がストップすることによる河床低下と土砂の分級現象により引き起こされることが分かっているが<sup>2),3)</sup>、各対象河川における具体的な粗粒化進展機構は明

らかになっていない。これは、対象河川におけるダム竣工時からの継続的な河床データがほとんど存在しないことが原因と考えられる。そこで本研究では過去の河床情報を推測する手法として空中写真を利用し、過去の河床標高の再現を行った。この手法により再現された過去の河床標高を元に、ダム竣工時からの河床低下・粗粒化特性の推測を行うことを第2の目的とする。さらに、実際に粗粒化が起こっているダム下流河川において水生生物の分布調査を行い、ダム下流河川における水生生物生息状況の把握を行うことを第3の目的とする。

### 2. 研究方法

#### 2-1. 千曲川中流における調査

図-1に示す、長野県上田市にある千曲川鼠橋地区における瀬淵で2004年2月末に調査を行った。本河川は流域面積7163km<sup>2</sup>、流路延長214kmの大河川であり甲武信ヶ岳（標高2475m）から長野盆地を流下し新潟県境に入り信濃川と名前を変える。瀬淵の調査を行う際に問題となるのは、水深が深く立入ることができない淵における調査が難しいことである。そこで本研究では、淵においても調査が可能となるように、以下の手順で調査エリアを作成した。

①図-2に示す鼠橋地区における1組の瀬淵を調査エリアとして選定した。

②調査エリア上流に盛土を設置し、下流の河床を掘削することによって調査エリアの水位を下げた。

この様に作成された調査エリアにおいて以下に示す調査を行い、瀬淵の生態的機能評価を試みた。



図-1 調査位置 (千曲川鼠橋地区)

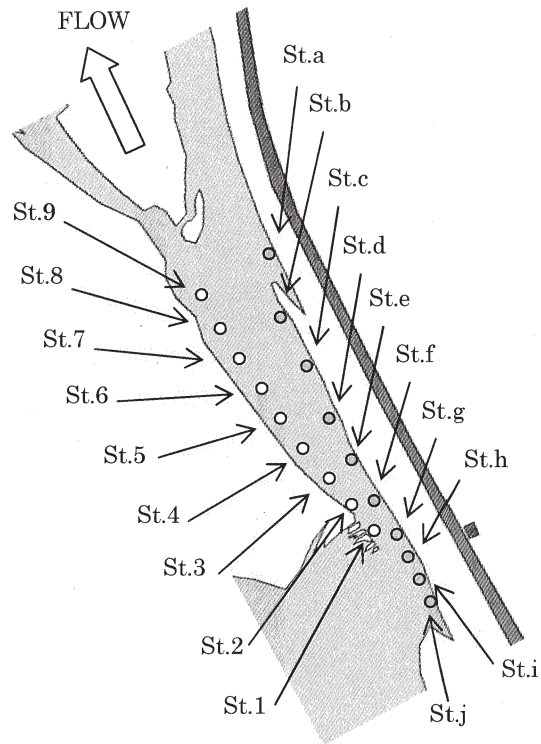


図-3 水生昆虫採取地点 (調査エリア拡大)

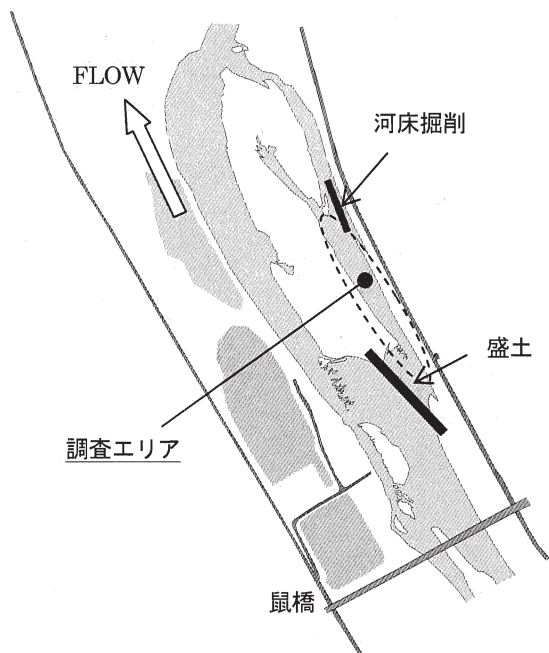


図-2 鼠橋地区における調査エリア

### 2-1-1. 河川微地形と流れ場特性の関係

水位が下がった調査エリア内において地形測量を行い、調査エリア河床形状データを作成した。作成した河床形状データを用いて、調査エリア内の水理計算を行った。様々な流量を条件として計算を行うことから、

一般座標系の使用が可能で、水際部の境界条件の自由度が高く一般座標系を用いた平面2次元流解析プログラム<sup>4)</sup>を用いて定常計算を行った。

上流端流量は調査時期とほぼ同じ流量である 30t/s と若干流量の増加した 70t/s で計算をおこなった。下流端水位データの整備に関しては、上流端から与える流量に対応して Manning 式による等流水深を下流端水位として設定した。初期水位データの整備は、各計算横断面において Manning 式による等流水深を初期水位条件として設定した。等流公式におけるエネルギー勾配  $I_e$  は、対象横断面の上下流断面（流下方向に±6m）の最深河床勾配とした。逆勾配が生じている区間では、計算区間全体の最深河床勾配である 1/227 を与えた。Manning の粗度係数  $n$ （以下、 $n$ ）については、一般的な河床粗度として良く使用される数値である  $n=0.032$  とした。計算時間ステップ  $\Delta t$  は、 $\Delta t=0.1[\text{sec}]$  を基本とし、数値振動が発生する場合は  $\Delta t=0.05[\text{sec}]$  とした。

上記の条件で算出した水理計算結果を GIS (ESRI 社, ArcGIS Ver.9) を用いて図化し空間分析ツール (ESRI 社, Spatial Analyst) を用いて 10m グリッドの流速、水深分布を算出した。

### 2-1-2. 河川微地形と水生生物との関係

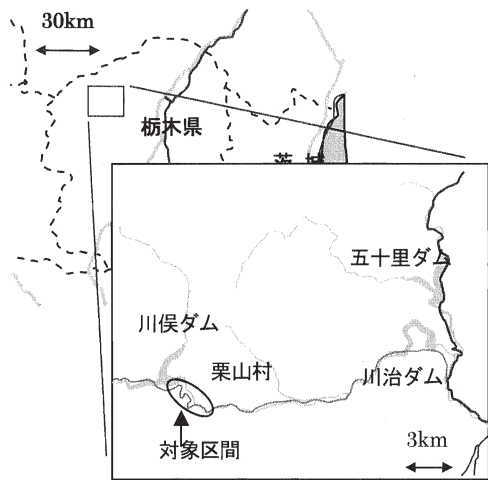


図-4 川治ダムの位置と対象区間

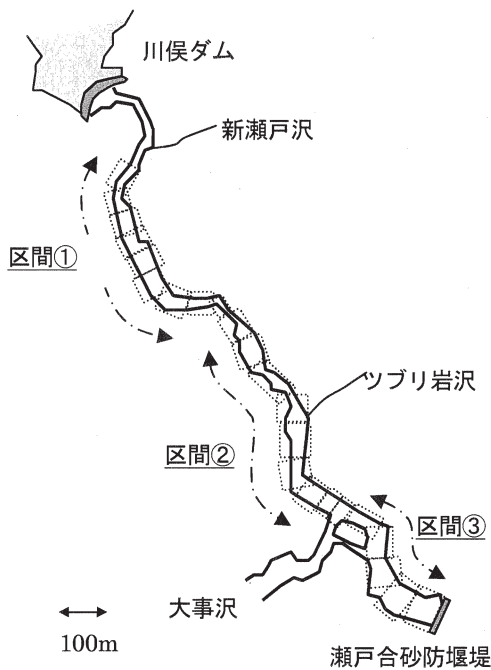


図-5 対象区間と河道分割

図-3 に示す地点 (11 地点) において水生昆虫の採取を行った。このうち、St.1~St.9 については 25cm×25cm のサーバーネットを用いて採取し、採取した水生昆虫について個体数計測、重量計測、種同定を行った。また、St.a~St.J については 50cm×50cm の枠内におけるヒゲナガワカトビケラのみを採取し、個体数計測、重量計測を行った。

また、St.1~St.9 付近の河床に堆積している細かい粒径の泥の堆積厚を測定すると共に、堆積土を採取し、

強熱減量、粒径分布を測定した。

得られた結果を流速分布の計算結果と重ね合わせ、瀬淵の流速分布とそこに堆積する土砂の特性、水生昆虫の生息状況の関係を評価した。

## 2-2. 川俣ダム下流における調査

ダム下流河川における検討は、図-4 に示す川俣ダム下流河川を対象として行った。川俣ダムは 1966 年に竣工したアーチ式の多目的ダムであり、鬼怒川の上流に鬼怒川改修工事の一環として計画、建設された。集水面積は 174.9km<sup>2</sup> であり、総貯水容量は 87,600,000m<sup>3</sup> である。以前は非灌漑期には直下流河道への放流が無く、空中写真撮影時における対象区間はほぼ無水状態であった。対象区間における現状の平均河床勾配は 1/52 であり、河道幅は 10~30m 程度である。

### 2-2-1. 空中写真を用いた河床変動特性把握

過去の空中写真から河床地形を推定する方法を以下に示す。

- ①60%オーバーラップで撮影されている 2 枚の空中写真を専用図化機に設置し、立体画像を作成する。
- ②立体画像の任意の点に観測点を落とし込み、付近に存在する基準点の位置情報を元に観測点の X, Y, Z 座標を読み取る。
- ③対象とする河川区間において観測点を 5m メッシュで多数設定し、読み取った X, Y, Z 座標を元に河床地形の DEM (Digital Elevation Model) を作成した。

また、立体画像からの観測点位置情報 (標高値) の読み取り誤差の検証を行うために、現地測量結果との比較を行った。検証を行った個所は山梨県韮崎市の釜無川中流における河原部分である。本検証個所は 2005 年 2 月に林野庁が定期空中写真撮影を行った個所であり、前日に現地測量を行って位置座標を測量した (51 地点)。撮影された空中写真から 51 地点の標高値を読み取り、「誤差 = 標高値 (空中写真読み取り) - 標高値 (測量成果)」の演算を行うことにより誤差を算出した。

この方法を用いて、図-5 に示す対象区間において河床高の推定を行った。用いた空中写真は、林野庁により 1966 年 (川俣ダム竣工年)、71 年、74 年、76 年、81 年、83 年、86 年、92 年、94 年、97 年、2002 年に対象区間において撮影されたものである。これらの空中写真を用いて、11 カ年分の DEM を作成した。

次に、対象区間を 23 の河道区間に分割し、それぞれの河道区間における DEM を平均化することによって各河道の平均河床高を算出した。それらを用いて各撮影時点における対象区間の河床縦断面図を作成した。作成された河床縦断面図の経年変化から対象区間を河床勾

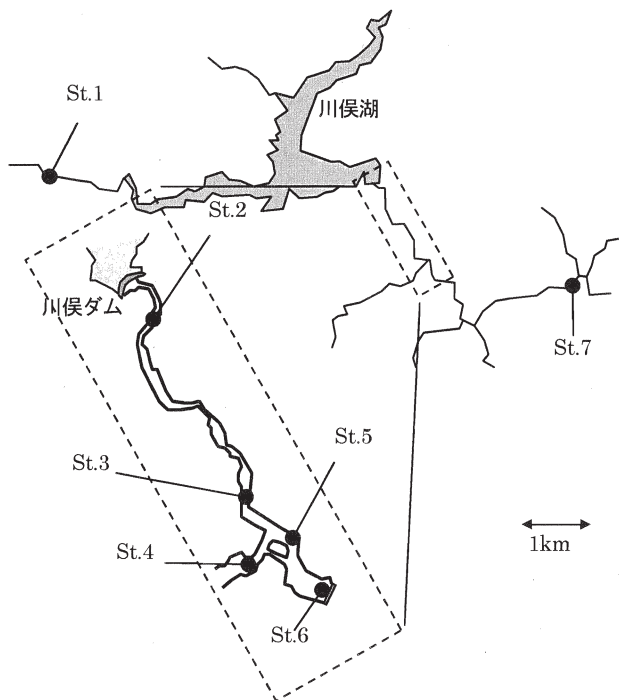


図-6 水生生物採取地点

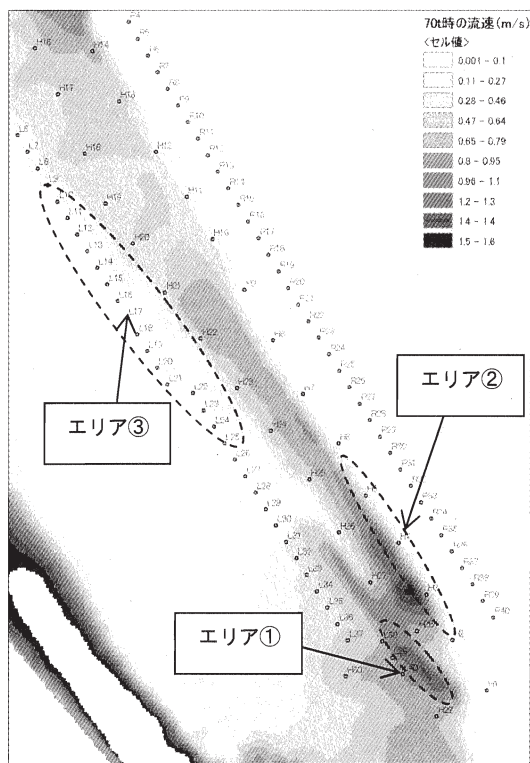


図-7 70t 流量時における流速分布

配や河床変動特性が類似している3つの区間に分類し(図-5)、各区間における平均河床高を算出した。3つ

の区間における各撮影時点での平均河床高と1966年時の平均河床高を比較することにより、1966年(ダム竣工年)からの河床変動量を算出した。

さらに、放流量と対象区間の河道形状の関係から河床変動量と土砂移動について粒径を考慮した形で評価するために、各流量における限界掃流力を算出し、各流量において移動する土砂の粒径(限界移動粒径)を算出した。本来であれば、限界掃流力の算出にあたっては、混合砂の移動限界式を適用すべきである。しかし、本ケースにおいては対象区間における過去の河床材料平均粒径のデータが存在しないため、平均粒径の設定しだいで無数の移動限界式が作られる。このため、根拠のある限界移動粒径の算出が難しい。よって本研究では、移動する土砂の粒径について概略を評価できること、水深、河床勾配等の復元可能なパラメータのみで解析が可能であることから、一様砂の移動限界式である岩垣式<sup>5)</sup>を適用して限界移動粒径の算出を行った。

### 2-2-2. ダム下流における水生生物生息分布

図-6に示す調査地点において、魚類、水生昆虫の採取を行った。調査は2004年7月、8月、9月、10月の4回行った。魚類の採捕は、エレクトリックフィッシャー(スミスルート社製、Model LR-24、出力電圧500V~900V、出力電流最大40A)を用いて各地点20分間行った。採捕された魚類について種別の個体数計測、湿重量計測を行った。また、水生昆虫の採取は、50cm×50cmのサーバーネットを用いて行い各地点2サンプル採取した。採取したサンプルについて種別の個体数計測、湿重量計測を行った。

## 3. 研究結果

### 3-1. 河川微地形と流れ場特性の関係

図-7に調査エリアにおける流速分布の計算結果を示す。計算結果は流速の違いを明確に表すため、70t/s流量時の結果を示している。調査エリア上流側の瀬では1m/s程度の流速が出ており(エリア①)、調査エリア上流側の右岸側(エリア②)は水当り部となっており、岸付近でも50cm/s程度の早い流速になっていることが分かる。また、調査エリア下流側の淵では流速は遅くなっており(20cm/s程度)、淵の左岸側(砂州側)では0~15cm/s程度の遅い流速のエリアが岸から10m程度の広い範囲で存在していることが分かる(エリア③)。

### 3-2. 河川微地形と水生生物との関係

図-8に調査エリア右岸側におけるヒゲナガカワト

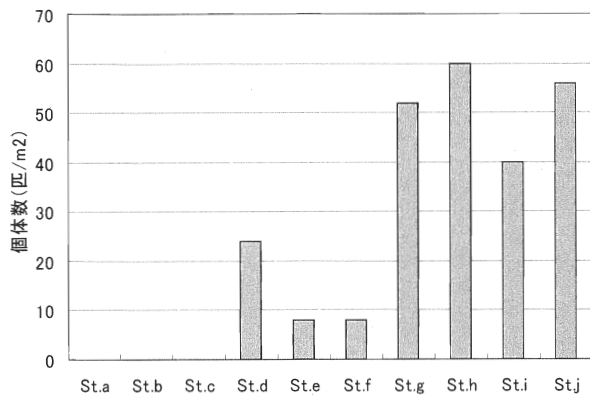


図-8 右岸側におけるヒゲナガカワトビケラの個体数

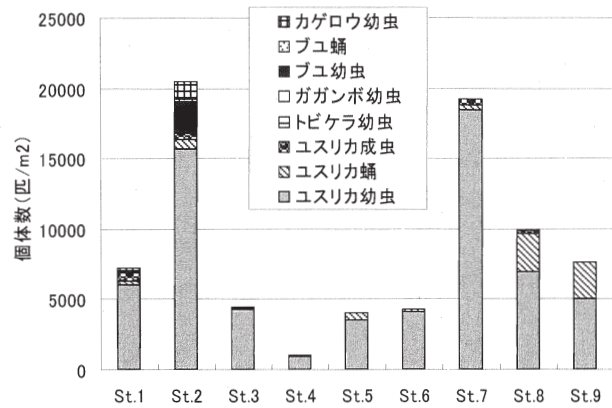


図-10 砂州側における水生昆虫個体数

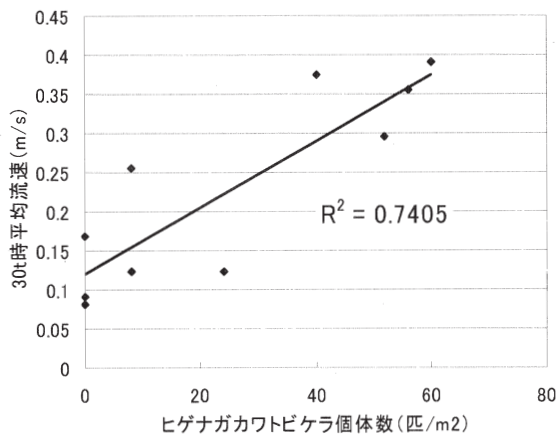


図-9 右岸側におけるヒゲナガカワトビケラ個体数と流速 (30t/s) の関係

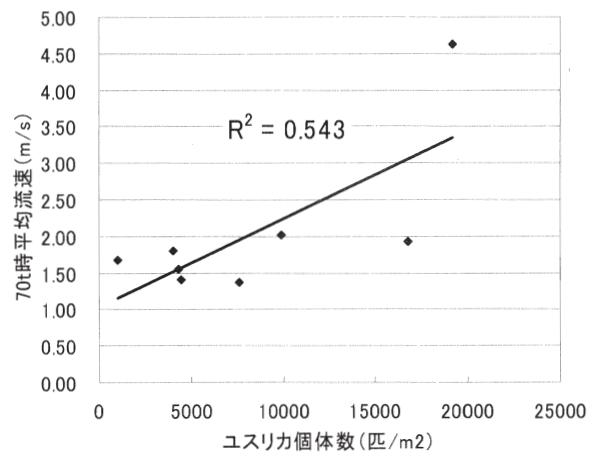


図-11 砂州側におけるユスリカ個体数と流速 (30t/s) の関係

ビケラの個体数 (m<sup>2</sup> 換算) を示す。結果を見ると、調査エリア上流側の瀬に近い部分では個体数が多く、淵に近づくにつれて個体数が減少する傾向にあることが分かる。次に、流速とヒゲナガカワトビケラの個体数の関係を図-9 に示す。流速が早くなるほどヒゲナガカワトビケラの個体数が増える傾向を示していることがわかる。ヒゲナガカワトビケラは造網性の水生昆虫であり、流下してくる有機物を餌として取り込んでいる。よって、流速の早い場所ほど餌の取り込みに有利であり、そのため個体数と流速の相関が高かったと考えられる。

次に、図-10 に砂州側における水生昆虫の種別個体数 (m<sup>2</sup> 換算) を示す。調査エリア上流の瀬に近い部分では St.2 で種数、個体数共に多くなっており、St.1 についても種数が比較的多い。一方、淵に近くなると種数が大幅に減り、ほぼユスリカのみで占められる。個体数については多い地点と少ない地点があり、St.1

～St.9 にかけて流速との明確な相関は見られなかった。ただし、図-11 に示すように、河床堆積物の強熱減量とユスリカの個体数には若干の相関が見られた。ユスリカは湖沼などの底泥に代表されるような嫌気的な環境を好む種が多く<sup>6)</sup>、有機物の含有量が比較的多い淵の砂州側縁部に多く生息していたと考えられる。

図-12 に砂州側堆積土砂の平均粒径、強熱減量、堆積土厚を示す。結果を見ると、淵の砂州側において粒径の細かい (平均粒径 0.1mm～0.3mm) 土砂が多く堆積していることが分かる。また、同エリアにおいて強熱減量の値も他の場所より高くなっていることから、この場所には有機物を多く含む細かい土砂が堆積しているものと考えられる。また、図-7 に示した流速分布の結果から、このエリア付近は比較的流速の遅い箇所であり、別途計算した結果から水深も比較的浅い (10cm～30cm)。このため、上流から流れてきた細かい土砂や粒子状有機物が河床に沈降し易く、下流に流されにく

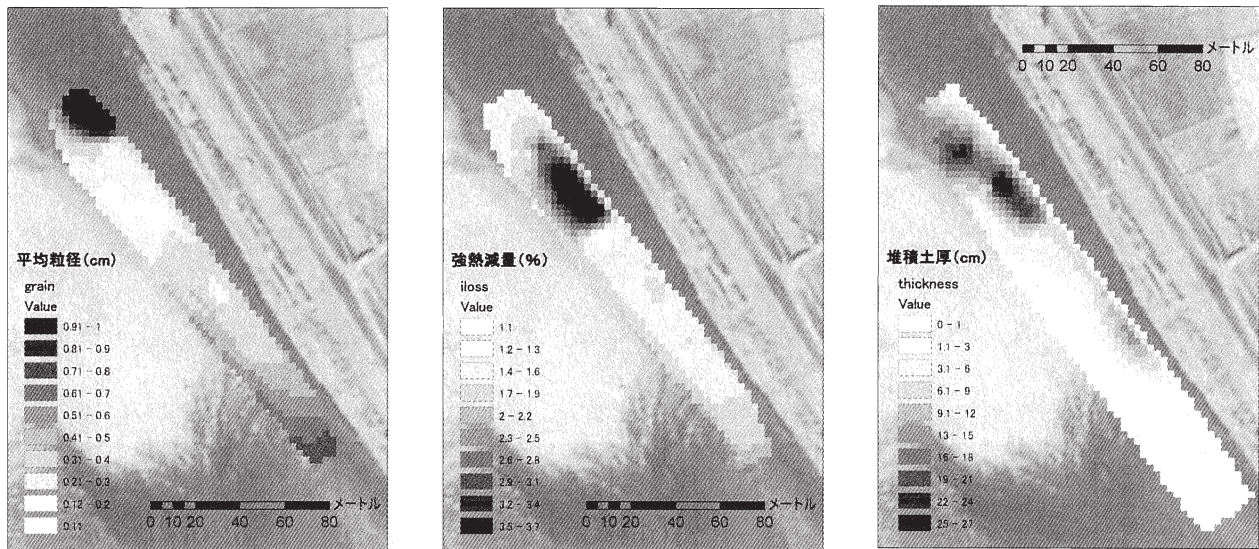


図-12 砂州側堆積土砂の平均粒径、強熱減量、堆積土厚

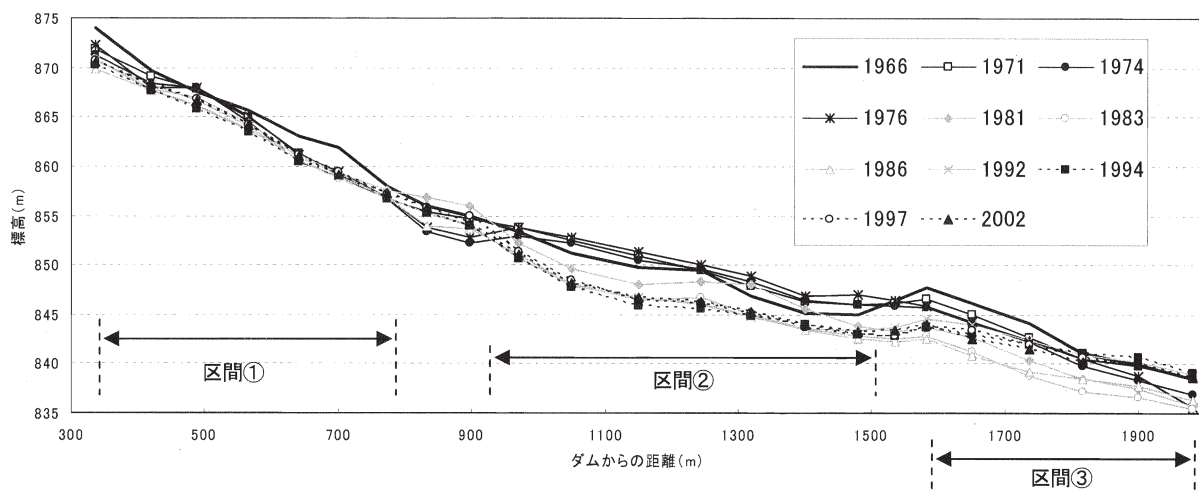


図-14 対象区間縦断面図の経年変化

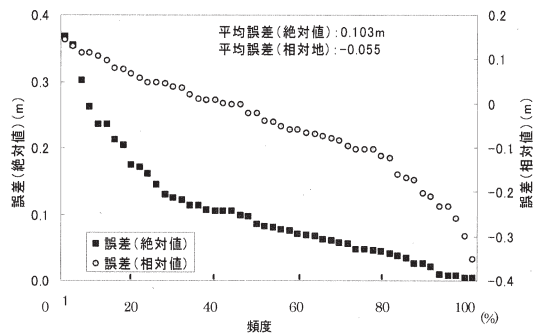


図-13 標高値読み取り誤差 (空中写真-測量成果)

いため、このような細かい土砂が堆積したものと考えられる。このエリアは土砂の平均粒径が非常に細かく、有機物を多く含んでいることから、比較的嫌氣的な河床環境になっていると考えられる。

### 3-3. 空中写真を用いた河床変動特性把握

図-13 に空中写真から読み取られた標高値と現地測量から得られた標高値の差の絶対値と相対値を降順で並び替えたものを示す。誤差の絶対値を見ると、最大値は 0.367m と若干大きくなっているものの、ほとんどの観測点において 0.2m 以下の誤差となっており、平均誤差は 0.103m である。また、誤差の相対値を見ると、実際の標高値より若干小さく読み取っている傾向があるものの、どちらかに大きく偏ることがなく、概ねバランス良く誤差が散らばっていることが分かる。

次に、空中写真から読み取った標高値を基に算出した対象区間 (図-5) における 1966 年～2002 年までの河床縦断面図を図-14 に示す。ダム放流口～800m までの区間 (区間①) では、一貫して河床低下が起こって

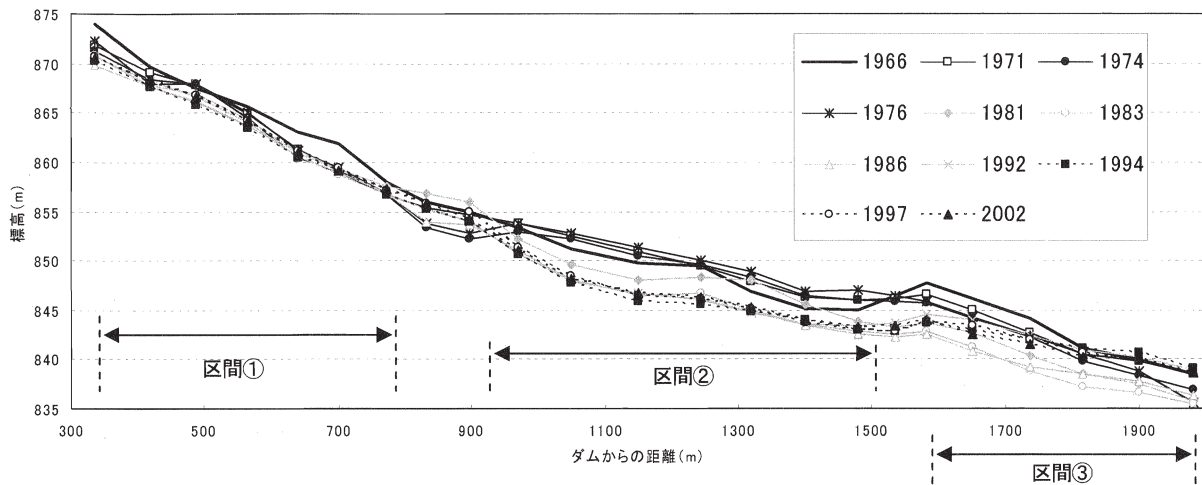


図-14 対象区間縦断面図の経年変化

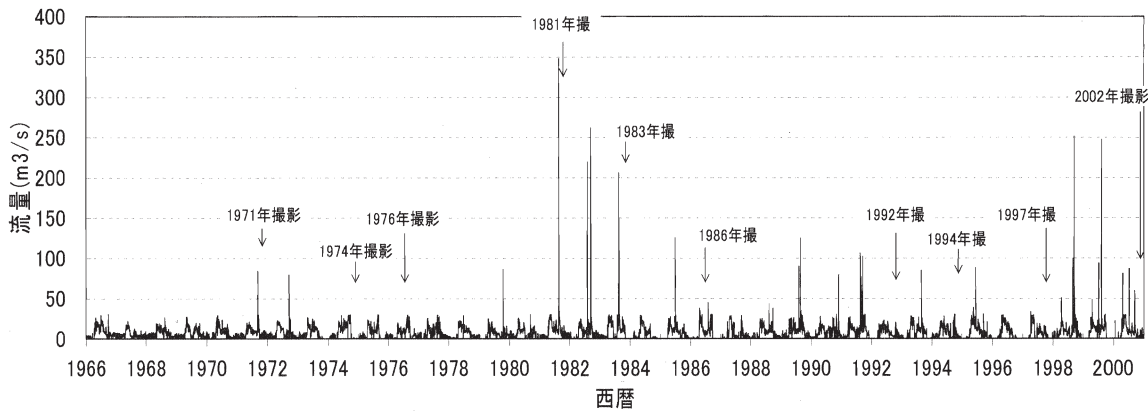


図-16 川俣ダム放流量ハイドログラフ

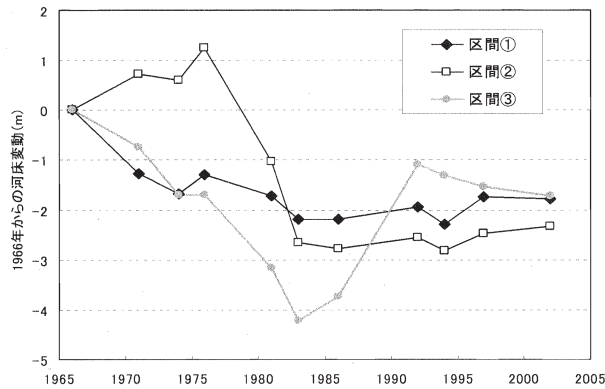


図-15 各区間における河床変動量

る。区間①の河床勾配は概ね 1/30 程度であり、河床変動に伴う大きな河床勾配の変化は見られない。ダムから 1000m～1500m までの区間（区間②）では 1976 年まで河床が上昇し、その後 1983 年まで大きく河床が低下しているが、1983 年以降はそれほど大きな河床変動

は見られない。区間②の河床勾配は概ね 1/83 程度であり、河床変動に伴う大きな河床勾配の変化は見られない。川俣ダム下流の最初の支川である大事沢合流後の 1600m～2000m までの区間（区間③）では、1983 年まで河床が下がり続けた後、一転して 1992 年まで河床が上昇する。1983 年までの河床勾配は概ね 1/43 程度で推移してきたが、その後の河床上昇に伴い、2002 年には 1/71 まで変化した。

次に、3つの区間におけるダム竣工時（1966年）からの河床変動量を図-15に示す。区間①における1983年までの平均河床低下量は2.19mであり、1983年以降は大きな河床変動は見られない。区間②においては、1976年までの河床上昇量は約1.24mであり、その後7年間での河床低下量は3.90mである。区間③においては、1983年までの河床低下量は4.23mであり、その後、1992年までの河床上昇量は3.14mである。

次に、図-16に川俣ダム放流量ハイドログラフを示し、

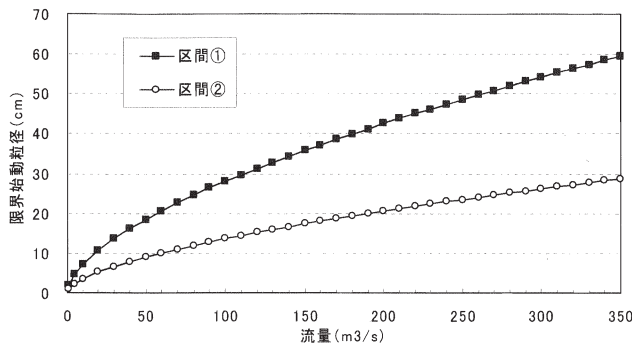


図-17 流量と区間別限界移動粒径の関係

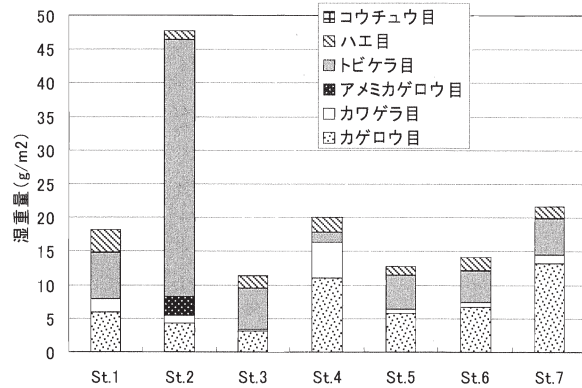


図-19 目別水生昆虫採取結果 (4回合計)

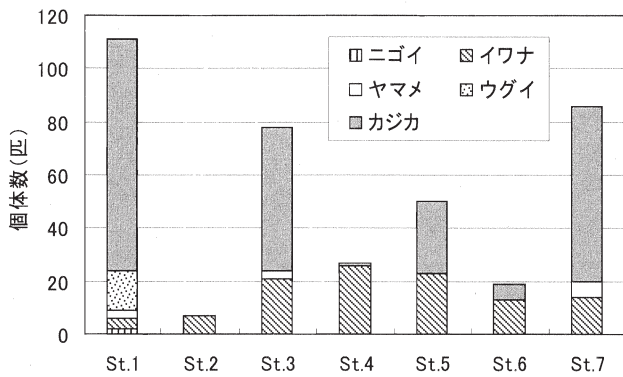


図-18 魚類採捕結果 (4回合計)

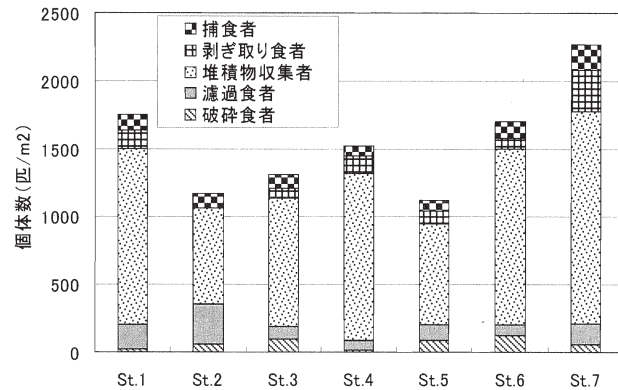


図-20 摂食機能別水生昆虫採取結果 (4回合計)

図-17 に区間①, ②における流量と限界移動粒径の関係を示す。1966年～1976年に3回起こった出水のピーク流量である  $80\text{m}^3/\text{s}$  の流量時には区間①では約  $25\text{cm}$  以下の粒径の土砂が移動し、区間②では約  $12\text{cm}$  以下の土砂が移動することが分かる。また、1976年～1983年に起こった既往最大流量である  $350\text{m}^3/\text{s}$  の流量時には区間①では約  $60\text{cm}$  以下の土砂が移動し、区間②では約  $29\text{cm}$  以下の土砂が移動することが分かる。

これらの結果から、河床変動特性と粗粒化の進展について1966年～1976年、1976年～1983年、1983年～2002年の3期間について段階的に考察を行う。

1966年～1976年の間は、区間①において河床低下傾向、区間②において河床上昇傾向である(図-14, 15)。図-16に示すようにピーク流量  $80\text{m}^3/\text{s}$  程度の出水が3度起きている。これにより比較的河床勾配の大きい区間①から粒径  $25\text{cm}$  以下の土砂が流出し、比較的河床勾配の小さい区間②から粒径  $12\text{cm}$  以下の土砂が流出したと考えられる(図-17)。このことから、区間①より流入した土砂のうち、粒径が  $12\text{cm} \sim 25\text{cm}$  の土砂が区間②に堆積したものと考えられる。また、1976年時点で区間①の河床表層は粒径  $25\text{cm}$  以上の土砂で構成され、

区間②の河床表層は粒径  $12\text{cm} \sim 25\text{cm}$  の土砂で構成されていたと推測される。

1976年～1983年の間は、区間①, ②ともに河床低下傾向である(図-14, 15)。図-15に示すように既往最大である  $350\text{m}^3/\text{s}$  の出水を含む大きな出水が数度起きている。これにより区間①から粒径  $60\text{cm}$  以下の土砂が流出し、区間②から粒径  $29\text{cm}$  以下の土砂が流出したと考えられる(図-17)。区間②では前期間(1966年～1976年)に堆積した粒径  $12\text{cm} \sim 25\text{cm}$  の土砂がほぼすべてこの期間に流出し、さらに粒径  $29\text{cm}$  以下の土砂が流出したことにより大きく河床が低下したと考えられる(図-14, 15)。また、1983年の時点で区間①の河床表層は粒径  $60\text{cm}$  以上の土砂で構成され、区間②の河床表層は  $29\text{cm}$  以上の土砂で構成されていたと推測される。

1983年～2002年の間は、 $250\text{m}^3/\text{s}$  の出水を最大として大きな出水が何度も起きているにも関わらず、区間①, ②共に河床変動量はほとんど無い(図-14, 15)。



これは 1983 年の時点で河床が粗粒化し、既往最大流量である  $350\text{m}^3/\text{s}$  以下の出水では河床が動かなくなってしまったことが原因と考えられる。よって区間①、②では 1983 年の時点で河床の粗粒化が収束し、現在の河床と同じ状態になっていたと推測される。

### 3-4. ダム下流における水生生物生息分布

図-18 に川俣ダム上流、および下流における魚類の採捕結果を示す。ダム上流である St.1 では個体数、種数共に多く、ダムの影響を受けていないことが結果にも明確に現れている。ダム直下流の St.2 では 4 回の調査でもイワナのみ採取されており、個体数も全調査地点の中で最も少ない。これは St.2 がダムの影響を強く受けており、魚類にとって移動が難しく、生息しにくい場所であることを示していると思われる。St.4 も種数、個体数ともに少ない結果となった。この場所は支川であり、急勾配で水面幅が狭く (5m 以下)、魚類が生息できるエリアが極めて少なかったと考えられる。それゆえ、岩陰の流れが滞留している個所にわずかにイワナが生息しているのみであった。また、St.6 でも他の地点とくらべて個体数が少ない結果となった、この場所は瀬戸合砂防堰堤の直上流であり (図-5, 6)、下流から魚類が移動してくることは不可能である。それゆえ、個体数が少なかったと考えられる。St.3,5,7 については、イワナ、カジカがほとんどを占め、個体数も比較的多い。St.7 はダムから 5km 以上下流であり、ダムの影響はかなり緩和されていると考えられる。St.3,5 については、ダムの影響を多少は受けつつも、魚類の生息に適した環境が比較的多く残っているとされる。

次に、図-19 に川俣ダム上流、および下流における水生昆虫の採取結果を示す。結果は目別の湿重量の割合として示している。結果を見ると、St.2 におけるトビケラ目の湿重量が非常に多い。この理由として、①流量の変動が少なくなることから、巢を張る礫のための礫が流されにくくなること、②砂の流入が減り、礫の間に生息場所が多く確保しやすくなること、③ダム湖内からプランクトンやデトリタスが供給され、餌が確保しやすくなること、が考えられる。また、st.1,4 においては、カワゲラ目の湿重量が比較的多くなっている。本地点で出現したカワゲラはミドリカワゲラ科に属する種類であり、浮き石や砂が適度にある山地溪流で普通に見られる種類である。よって、ダムの影響を受けていない st.1,4 において多く見られたと考えられる。

さらに、各地点で採取された水生昆虫を摂食機能で

分類し、その個体数の割合を図-20 に示す。ヒゲナガカワトビケラ、シマトビケラに代表される濾過食者の割合が St.2 で多くなっているのは先ほど示した結果と同じ理由であると思われる。また、全ての地点において堆積物収集者の割合が最も多くなっている。川俣ダム上・下流は山地河川であり、河川の栄養塩濃度がそれほど高くなく、日射量も比較的少ないことから河床の付着藻類の量は中流河川に比べて少ないと思われる。一方、山地河川であるゆえに、河道の両岸には山地が広がっており、落ち葉などの陸上有機物の供給量は非常に多いと思われる。よって、これら陸上の有機物が河川に供給され、河床に溜まることにより、堆積物収集者にとって生息しやすい環境になっていると考えられる。

### 4. まとめ

本研究では、大河川の中流域とダム下流河川において物理環境の評価とそこに生息する水生生物との関係性を評価した。その結果、以下のことが明らかとなった。

- 1) 河川中流域における瀬淵構造は、その河床地形ゆえに多様な流れ場を形成し、多様な河床環境が形成される。また、それぞれの河床環境に適した様々な生物が生息することにより、多様性のある豊かな河川生態系が形成されていると考えられる。
- 2) 川俣ダム下流ではダム竣工後約 17 年間で河床の粗粒化が収束し、粒径約 30cm~60cm の土砂で河床が構成されていたと考えられる。最終的な河床低下量は最大 2~3m 程度であった。
- 3) 過去からの環境情報が全く存在しないダム下流河川において、空中写真を用いて河床変動特性を推定することが可能となり、事業影響評価等に有用な情報を提供できる可能性がある。
- 4) 川俣ダム直下流ではダムの影響を強くうけ、魚類の個体数が少なかった。また、他の地点と比べてトビケラ目の割合が多く、こちらもダム直下流特有の傾向を示した。摂食機能群については、全地点において堆積物収集者の割合が多く、陸上からの有機物の供給が多いことを示していると考えられた。

### 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(2), pp.153-164, 1999
- 2) 中川博次, 辻本哲郎, 原稔明: 混合砂れき床面の粗粒化過程について, 京都大学防災研究所年報, 第20号B-2, pp.355-367, 1977
  - 3) 平野宗夫: Armoringをともなう河床低下について, 土木学会論文報告集, 第195号, pp.55-65, 1971
  - 4) 土木学会水理委員会編: 水理公式集, 河川編, 丸善, 1999
  - 5) 社団法人土木学会: 水理公式集(平成11年版), pp.89
  - 6) 近藤繁生, 平林公男, 岩熊敏夫, 上野隆平: ユスリカの世界, p7, 2001