

## I-17 河川生態に関する調査

研究予算：運営費交付金（治水勘定）

研究期間：平 13～平 17

担当チーム：河川生態チーム、自然共生研究センター

研究担当者：天野邦彦、村岡敬子、皆川朋子

中村圭吾、傳田正利、大石哲也

時岡利和

### 【要旨】

河川環境に関わる事業を実施するためには河川環境を科学的に把握し、その影響や効果を明らかにする必要があるが、現在、河川環境に関する知見は工学・生態学ともに不足している。そこで、本研究では、多摩川・千曲川・木津川・北川・標津川に研究地区を設定し、学際的な研究体制のもと河川生態に関する調査研究を実施している。本研究の成果として河川生態系調査方法の高度化・効率化については、木津川において河川の土砂動態を簡易に調べる手法として、流域の地質条件から簡易に調べる方法を検討した。また、千曲川を中心にリモートセンシング、レーザープロファイラなどから得られたデータを GIS 上で整理・解析し、水理モデルなどを組み合わせることにより河川の物理環境および生物環境を効率的に調査する手法を検討し、提案した。生物現存量・生物群集の特性と外的要因の関係について、多摩川においては動的環境を再現するために投入された土砂と河床付着藻類の関係について調査するとともに、ハリエンジュの拡大要因について分析した。河川生態系のモデル化の試みとして、千曲川においては、一時的水域(ワンド・タマリ)がギンブナの産卵場として機能する条件を現地調査と水理計算によりモデル化し、必要条件について提案した。さらに千曲川において、流域全体を把握する手法として GIS を用いて土地利用と流域負荷の関係および河川生態系群集に及ぼす影響を安定同位体により検討し、河川生態系を総合的に把握するモデル的検討をおこなった。

キーワード：河川生態学術調査、多摩川、木津川、千曲川、安定同位体、GIS、ハリエンジュ

### 1. 河川生態系調査方法の高度化・効率化

#### 1. 1 木津川：砂礫の起源の簡易推定の試み

##### 1. 1. 1 はじめに

木津川において流域の地質条件に基づき砂礫の由来を簡易に推定する手法について検討した。木津川は、斐伊川や矢作川とならんで日本を代表する砂河川である。この砂河川を特徴付ける砂礫としては花崗岩が風化してできた、いわゆるマサ土がある。近年、流下土砂の減少によって河床低下が進行し、これにともなって河原の粗粒化が進行している。河原はかつての砂浜のような状態から、大きな礫が河原を被覆したような状態となっている。この原因としては、河川内の砂利採取、上流部におけるダム・砂防ダムの影響、山腹工など緑化によるはげ山型荒廃地の減少などが挙げられる。この砂河川という木津川特有の環境を保全するための一助として、これら大量の砂礫の供給源、あるいは由来を知ることは重要であると考えられる。そこで、ここでは、調査区における砂礫の由来を地質的調査によって明らかに

することを試みた。

##### 1. 1. 2 木津川流域の地質的概要

調査区は上流域に、東西約 55km、南北約 50km の広い流域を有している。

この調査区上流域は、北東～東西系の断層が発達しているのが特徴で、木津川、和東川、宇陀川などは断層に起因する流路を形成している。そして、「奈良地域の地質」<sup>1)</sup>によれば、この断層系は東西圧縮応力により形成されており、北側が隆起し急斜面を形成している。つまり、断層地形の北側斜面が不安定化していることが想定される。また、調査区付近の南北方向の流路も南北系の断層に起因していると見られる。

木津川中流域の上野盆地は周辺が断層の構造的（断層運動により沈降）の盆地である。名張川上流域の室生山地には第三紀層に起因する地すべり地の発達が知られている。

調査区から上流域に分布する主な地質は、表

1.1.1 に示すとおりである。全体としては白亜紀の領家帯花崗岩類が広く分布しており、その他にジュラ紀の丹波帯堆積岩類、領家帯変成岩類も多く存在する。調査区付近の右岸には大阪層群の2次堆積である更新統段丘が存在し、上流域の上野盆地周辺には古琵琶湖層群が存在する。

調査区における砂州堆積物の礫として、存在する岩種は、調査区より上流域に分布する地質により制限され、以下の岩種（花崗岩、花崗閃緑岩、閃緑岩、ハンレイ岩、結晶片岩、片麻岩、頁岩（ジュラ紀）、砂岩（ジュラ紀、鮮新世～更新世）、チャート、ホルンフェルス（原岩は丹波帯堆積岩）、溶結凝灰岩、泥岩（鮮新世～更新世））が考えられる。

調査区周辺部にある丘陵地帯には、大阪層群由来の段丘堆積物が分布している。大阪層群は礫・砂・泥から構成され、しばしば火山灰層をともなう。含まれる礫は円礫が多いのが特徴である。調査区より東部から東南部の山間部では、丹波帯堆積岩類、領家帯変成岩類、山城花崗岩および井出南花崗岩が分布している。領家帯変成岩類は丹波帯の堆積岩を起源とした変成岩で、地域により変成の度合いが異なっている。高度の変成作用を受けている地域では、片麻岩・ミグマタイトとして分布するが、変成作用の弱い地域では、片麻岩までは変成作用の進行していない変成岩、弱変成のホルンフェルス、変チャートとして産出する。

上記地質分布域よりさらに上流域では、領家帯花崗岩類が主に分布している。北部では信楽花崗岩が分布し、南部では阿保花崗岩・柳生花崗岩が分布している。

表 1.1.1 調査区上流域に分布する主な地質

時代	地質(構成物)
第四紀完新世	沖積層 崖錐堆積物(砂礫、砂、シルト、粘土)
第四紀更新世	高・中・低位段丘堆積物(砂礫、砂、シルト、粘土)
第三紀鮮新世～第四紀更新世	大阪層群(砂礫、砂、シルト、粘土)
第三紀鮮新世	古琵琶湖層群(砂礫、砂、シルト、粘土)
第三紀中新世	室生火砕流堆積物(溶結凝灰岩) 曾爾泉層(砂岩、泥岩)
同上	阿波層群、山粕層(砂岩、泥岩、礫岩)
白亜紀	領家帯花崗岩類、塩基性岩類
同上	領家帯変成岩類
ジュラ紀	丹波帯堆積岩コンプレックス(砂岩、頁岩、チャート)

### 1. 1. 3 調査方法

調査は、既存資料調査、現地調査、室内調査の3つに分けて実施した。

既存資料調査は既存成果の活用と流域に関する地

質・砂防・河川関係の既往資料の資料収集整理を目的として実施した。集めた資料は学術論文、国土交通省近畿地方整備局関連の資料、地形・地質文献などである。

現地調査は、流域全体の踏査を実施した上で、調査区(地点①)を含む12地点を選定して行った。図1.1.1に調査地点の位置、表1.1.2に調査地点の特徴を示す。現地踏査の結果、流域全体にマサ土の分布が見られ、その由来を特定することは困難に思われた。また、礫については比較的河川ごとの特徴が見られたので、今回の調査は比較的大きい礫を中心にその由来を明らかにする調査方法とした。

サンプリング方法は、1m x 1mのコドラートをつくり、その中の礫(肉眼判定によりφ8mm以上の中礫)を収集し、四分法(採取した礫で山をつくりその4分の1だけ採取する方法)によりサンプリングの個数を減数(300-400個程度)して採取した。試料採取深さは0-0.2mの範囲である。1地点における採取ポイントは1箇所とした。調査区(地点①)については3地点で採取した。

表 1.1.2 調査地点の特徴

調査地点	地点名	特徴
①	調査区	河道より1地点、やや河道から離れた地点で2地点の計3地点で採取
②	青谷川	丹波帯のチャートが多い。大阪層群の段丘堆積物が見られる。
③	玉川	比較的土砂供給が多いと思われる東西方向から流入する河川として採取。
④	本川(木津町)	東西方向の河川流入前であり、和東川・白砂川合流後
⑤	和東川	土砂供給が大きい。層状チャートの露頭などが見られる。
⑥	白砂川	名前のとおり砂分の供給の多い川。領家帯の花崗岩、変成岩などの供給も盛ん。
⑦	本川(高山ダム下流)	大きな支川である名張川合流直後として採取
⑧	名張川	高山ダムに入る前の名張川の状況として採取
⑨	本川(上野下流)	上野盆地における3川合流後として採取
⑩	本川(上野上流)	上野盆地における3川合流前のデータとして採取
⑪	服部川	上野盆地で合流する主な支川として採取
⑫	柘植川	上野盆地で合流する主な支川として採取

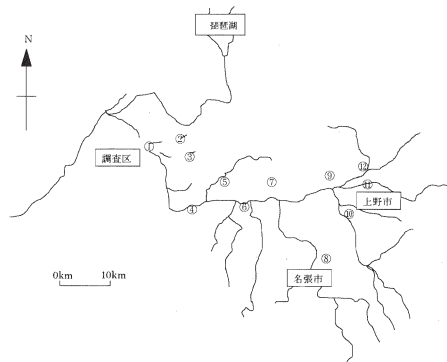


図 1.1.1 調査地点の位置

室内調査は、現地採取した資料を使って、礫の岩種判定、礫の粒径<sup>2)</sup>、礫の形状分類<sup>3)</sup>・円磨度<sup>4)</sup>、<sup>5)</sup>を調べた。これらの分析に加え、一部の資料については補足調査として、実体顕微鏡観察、偏光顕微鏡観察、花崗岩類のモード分析を実施した。礫種の区分に関しては、表 1.1.3 のように大きな区分として礫種区分 1 を設け、さらに詳細な区分として礫種区分 2 を設定した。

今回の調査は比較的大きい礫が中心であるが、各地点において細粒物についてもサンプリングを実施した。地点①-地点⑫において採取した細粒物試料のうち特に試料 1-B(地点①(調査区))、試料 6(地点⑥(白砂川))、試料 11(地点⑪(服部川))について、実体顕微鏡を用いて、構成物の定性的な観察を行った。地点⑥の白砂川および地点⑪の服部川は現地踏査によって比較的細粒分の供給が大きいと思われた河川である。採取した細粒物粒子(鉱物や岩片)の表面には、微細な粘土物質等が付着しているため、粒子の同定がしばしば困難となる。そこで観察を容易にするために、超音波洗浄器を用いて、粒子表面の粘土物質を除去するよう努めた。

表 1.1.3 礫種区分一覧表

礫種区分 1	礫種区分 2
丹波帯チャート 丹波帯岩類(その他)	丹波帯チャート
	丹波帯泥岩
	丹波帯砂質泥岩
	丹波帯砂岩
領家帯片麻岩・ミグマタイト 領家帯変チャート 領家帯変成岩類(その他)	丹波帯緑色岩
	領家帯ミグマタイト
	領家帯片麻岩
	領家帯変チャート
	領家帯泥質粘板岩
	領家帯砂質粘板岩
	領家帯泥質変成岩
ホルンフェルス	領家帯砂質・石灰質変成岩
	領家帯変形岩類
ホルンフェルス	ホルンフェルス
領家帯ハンレイ岩類	ハンレイ岩
	石英閃緑岩
	変輝緑岩
領家帯花崗岩類	城立トータル岩
	初瀬花崗閃緑岩
	須川花崗閃緑岩
	狭川花崗岩
	勝風トータル岩
	柳生・加太・信楽花崗岩類
	荒木花崗閃緑岩
	阿保花崗岩
	山城花崗岩
	大峰花崗閃緑岩
	井出南花崗岩
	木屋花崗岩
	中粒花崗岩(岩体不明)
	細粒花崗岩(岩体不明)
	優白質花崗岩
	アブライト質花崗岩
	アブライト
ペグマタイト	
花崗斑岩・石英斑岩	
脈岩類・脈類など	岩脈・斑岩・石英脈
室生火砕流堆積物	結晶質凝灰岩・凝灰岩
第三紀堆積岩	砂岩
古琵琶湖層群シルト	シルト～細粒砂層
鉱物片	石英・長石など
人工物	コンクリートなど
不明	不明

#### 1. 1. 4 調査結果および考察

##### 1) 既存資料調査結果

###### ① 収集資料概要

調査区より上流の地形・地質・崩壊地形分布・河川構造物などを把握するため既存資料の調査を実施した。収集・整理した資料の主なものを表 1.1.4 に示す。

表 1.1.4 主要な既存資料

文献名	出典
木津川上流砂防管内図	木津川上流工事事務所
淀川管内図	淀川工事事務所
木津川の砂防	木津川上流工事事務所
1/20 万近畿地方土木地質図	近畿地方土木地質図編纂委員会
地域地質研究報告 1/5 万地質図幅「奈良」	尾崎正紀・寒川 旭・宮崎一博・西岡芳晴・宮地良典・竹内圭史・田口雄作(2000)(地質調査所)
地域地質研究報告 1/5 万地質図幅「上野」	川辺孝幸・高橋祐平・小林良二・田口雄作(1996)(地質調査所)
地域地質研究報告 1/5 万地質図幅「名張」	西岡芳晴・尾崎正紀・山元孝広・川辺孝幸(1998)(地質調査所)
地域地質研究報告 1/5 万地質図幅「桜井」	西岡芳晴・尾崎正紀・寒川 旭・山元孝広・宮地良典(2001)(地質調査所)

② 流域内の崩壊地等の分布

流域内における崩壊地、土石流危険渓流域の分布を整理している資料は、木津川上流域については砂防管内図が存在するが、他地域(淀川管内)については、情報が得られなかった。

この図で土石流危険渓流域の分布についてみると、主に室生火砕流堆積物の分布域に多く見受けられる。また、花崗岩分布域については、谷底平野と山麓との境界付近に危険渓流域の分布が認められる。

③ 流域内のダムおよびその影響

堆積物の運搬に大きな影響を及ぼす河川構造物はダムである。流域のほぼ中央部には高山ダム、布目ダムがあり、流域の南部には室生ダム、青蓮寺ダム、比奈知ダムがある。

堆積物の供給・運搬の観点からみると、ダムができれば、それまでダム上流域から供給・運搬されていた礫・砂などの堆積物は、極細粒物を除いてそのほとんどがダムによって規制される。すなわち、ダムより上流のみに分布する地質の礫が、ダム下流で見つかる場合は、ダムができる以前そこに運搬されてきたものと考えなければならない。各ダムが供給を規制する地域の主な地質分布を表 1.1.5 に示す。

表 1.1.5 調査区上流のダムと規制する地質

ダム名	地質分布
布目ダム	柳生花崗岩・領家変成岩類(丹波帯堆積岩類)
室生ダム	室生火砕流堆積物
青蓮寺ダム	室生火砕流堆積物・領家変成岩類
比奈知ダム	室生火砕流堆積物・領家変成岩類・阿保花崗岩・新第三紀中新世層(山粕累層・曾爾累層)
高山ダム	柳生花崗岩・阿保花崗岩、及び室生ダム・青蓮寺ダム・比奈知ダム流域からの供給物

局所的な地質分布およびダムの位置関係からみて、ダムにもっとも規制されるのは室生火砕流堆積物であり、次に規制されるのが新第三紀中新世層の山粕累層・曾爾累層といえよう。

2) 現地・室内調査結果

礫種区分 1 による採取地点ごとの構成比を図 1.1.2 に示す。また、礫種区分 1 のなかで当該地域に広く存在している領家帯花崗岩類に関して礫種区分 2 の全体に占める構成比を図 1.1.3 に示す。

調査区①においては、丹波帯チャートおよび丹波帯岩類(チャート以外の堆積岩類)の割合が比較的多く、地点②(青谷川)、地点③(玉川)においても丹波帯チャートあるいは丹波帯岩類の割合が多い。この地点②(青谷川)では丹波帯チャート礫の割合が半数を占めるが、周辺地質状況からみて大阪層群の礫層起源である可能性が高い。

調査区①では遠方に分布する地質である領家帯ハンレイ岩類、領家帯片麻岩・ミグマタイト、室生火砕流堆積物起源の礫をわずかながら含む。室生火砕流堆積物起源の礫は、地点⑧(名張川)、地点⑩(本川(上野上流))でも認められる。礫の構成比全体をみると領家帯変チャート礫の割合は、礫の採取地点が調査区①から遠ざかるにつれて、割合が減少する。一方、領家帯片麻岩・ミグマタイトおよび領家帯ハンレイ岩類起源の礫の割合は、礫の採取地点が調査区から遠ざかるにつれて、割合が増加する。室生火砕流堆積物起源の礫が分布域を規制するダムより下流で見られることは、この礫がダム完成以前にその周辺や上流にあったことを示す。

調査区①ではわずかながら勝風トータル岩礫がみとめられ、それは地点⑥(白砂川)においても認めら

れる。

全体として支流域で採取した礫種は周辺および上流域の地質分布を反映したものとなっている。

図 1.1.3 に示した領家花崗岩類の細区分は、礫種判定の難しさ、分布の広さなどもあり各地点の礫種構成比から、調査区①との関連検討に用いるのは難しい。

地点⑫(柘植川)でみられた丹波帯チャート礫は、流域にある古琵琶湖層群の礫層由来の可能性が高い。

細粒物粒子を実体顕微鏡により調査した結果、構成する粒子として、長石、石英、黒雲母、ザクロ石、角閃石などの結晶片や岩石片が確認できる。全体としては角張った粒子が多いが、調査区①においては丸みを帯びた岩石片が目立った。全体として同様な構成物からなり、今回調査した限りでは、細粒物に関しては、大きな差が見られなかった。

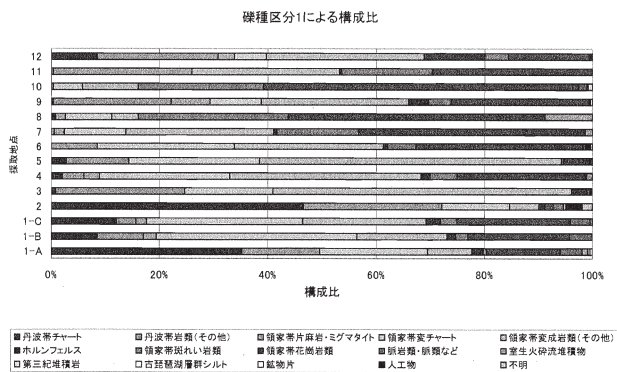


図 1.1.2 礫種区分 1 による採取地点ごとの構成比

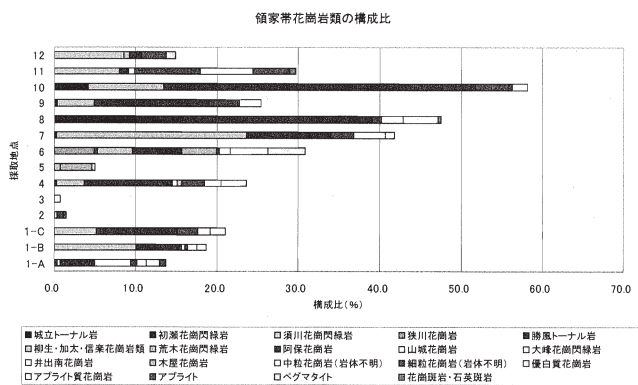


図 1.1.3 領家帯花崗岩類の礫種区分 2 の全体に占める構成比

### 3) 砂礫系統図の作成

調査区で認められた礫種のうち、地質体・岩体名が明瞭なものについての由来経路を図 1.1.4 に図示した。

ここでは第三紀層や花崗岩類のうち、細粒花崗岩などの地質体・岩体名の不明なものや、岩脈起源のものについては掲載していない。また、作成にあたっては、各地点における礫の有無を重視し、礫種の構成比率は考慮していない。すなわち調査区において、ある地質体の礫が 1 個でもあれば系統図として描かれる。

また図中には木津川およびその支流について、地質図幅などを参考に、それぞれの河川系に礫として流入する可能性の高い地質体・岩体を記号化して示した。また、大阪層群や古琵琶湖層群などの第四紀層については、分布域を簡単に示してある。これは礫の最終的な供給源(発生源)をある程度しぼり込むためである。

なお、今回の検討では、最終的な礫の供給源が 1 つの河川系に絞り込める場合は点線でその経路を示しているが、いくつもの河川系が供給源となる場合は、実線で描いたように経路の特定をしていない。また、この経路図は実際の礫の供給源(土石流発生源・崩壊地)を確認して作成していない。

調査区①の礫の中では、勝風トータル岩、および室生火砕流堆積物由来の礫については供給河川の推定が比較的容易である。勝風トータル岩は地点⑥(白砂川)の上流の安郷川水系が供給したものと考えられる。室生火砕流堆積物由来の礫は地点⑧(名張川)及び地点⑩(木津川本川上野盆地上流)の上流側の河川から供給されたものと考えられる。地点⑩の場合、供給河川は前深瀬川、または川上川である可能性が高い。地点⑧の場合は、笠間川、宇陀川、青蓮寺川及び名張川が考えられる。地質の分布状況からは地点⑧より上流の供給が特に多いと考えられる。しかしながら、地点⑧の下流には高山ダムが存在することから、名張川からの供給は考えにくいのであるが、名張川と木津川の合流部より下流の地点⑦で、室生火砕流堆積物由来の礫構成比がより上流の地点⑨よりも増加していることは、名張川から過去に供給された礫が河道内に多く残存している可能性を示唆している。

また、由来図でも明らかなように、阿保花崗岩や柳生・加太・信楽花崗岩類は、それらを供給できる河川系が多い。

丹波帯チャート(未変成)は第四紀層が分布する地域で多くなっており、大阪層群や古琵琶湖層群由来によるものが多いと考えられる(地点②, 地点⑩)。

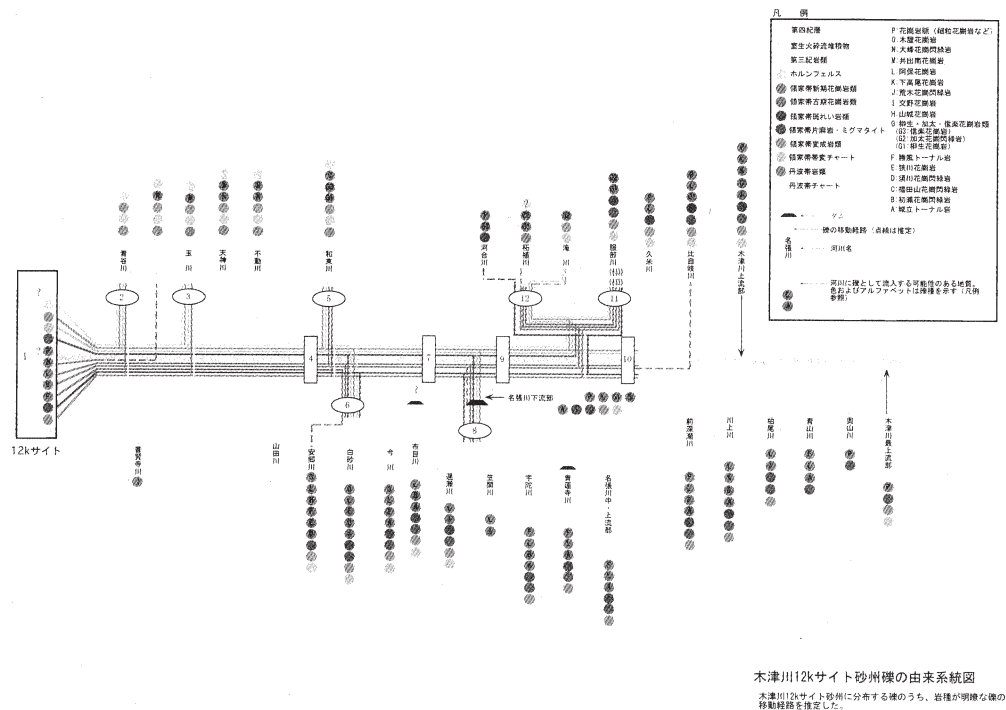


図 1.1.4 木津川の砂礫系統図

ここで、礫の構成比(図 1.1.2)を加味しながら検討する。まず、調査区①で高い構成比率で出現する丹波帯チャート礫、丹波帯岩類由来の礫については、調査区①近傍の地点②(青谷川)、地点⑥(白砂川)においてもそれらの構成比率が高く、他地点では地点⑨(上野盆地地下流)及び地点⑩(柘植川)ときわめて上流域に分布している。また、領家帯変チャート由来の礫は採取地点が調査区①に近づくにつれ増加傾向を示すが、領家帯片麻岩類・ミグマタイト、領家帯ハンレイ岩類は、調査区①に近づくにつれて減少傾向にある。支流域で実施した各地点の礫構成は、地点周辺および上流域の地質分布を反映していることから、調査区①の礫由来について次のことが可能性として言える。

調査区①における丹波帯チャート・丹波帯岩類由来の礫は、地点②ないし地点③からの供給であり、それらは大阪層群の礫層の2次堆積物である。調査区①に近づくにつれて領家帯変チャート礫の割合が増加し、調査区①に近づくにつれて領家帯片麻岩類・ミグマタイトおよび領家帯ハンレイ岩礫の割合が減少することは、供給源から調査区①までの距離が長くなればなるほどその供給量が減少し(ただし、ゼロではない)、むしろ調査区①近傍の河川からの供給の方が比較的多いということを示唆する。但し、

河川系の特定はその分布範囲からみて困難である。

### 1. 1. 5 まとめ

ここでは、木津川京田辺地区の砂礫の由来について地質学的な観点から調査した。その結果、細粒分については流域全体から供給されており、その供給源を特定することは困難であったが、比較的大きな礫についてはある程度知見が得られた。全体として、礫の主な供給源は調査区の比較的近傍であると考えられた。丹波帯チャート・丹波帯岩類由来の礫は、地点②(青谷川)ないし地点③(玉川)からの供給であり、それらは大阪層群の礫層の2次堆積物であると考えられる。勝風トーナル岩に関しては地点⑥(白砂川)からの供給と考えられる。室生火砕流堆積物由来の礫は地点⑧(名張川)及び地点⑩(木津川本川上野盆地上流)の上流側の河川から供給されたものと考えられる。

## 1. 2 GIS、分布型流出モデル、水理計算、レーザプロファイラを利用した物理環境情報の再現手法の開発

### 1. 2. 1 はじめに

河川生態系調査方法を高度化・効率化を図る場合、まず行う必要があるのは物理環境情報の定量的な調査方法の開発がである。河川生態系を構成する生物

群集は、河川の物理環境変化に適応し生息している。そのため、河川の物理環境情報を正確に表現することが可能になれば、生物群集と物理環境情報の関係性を、より正確に把握することが可能となる。

今後、物理環境調査方法として必要となる観点に「調査地と流域との関係性」、「河川微地形が持つ生態的機能評価」が挙げられる。本項では、1. 2. 1でGIS、リモートセンシング技術を利用した流域特性と河川地形の関連付け、1. 2. 2では、GIS、リモートセンシング、水理計算の併用による河道内地形と植物群落との関連付けを行い、河川生態系調査方法の手法論を取りまとめることを目的とする。

## 1. 2. 2 河川環境評価における流域特性や河川地形からの視点と新技術の適用

### 1) はじめに

河川に棲む生物は、河川が運搬する物質を直接取り込んだり、他の生物を補食することで必要な物質やエネルギーを得ており、この物質移動と食物連鎖を通して生態系が成り立っている。また、河川を流れる水自体が水域として水生生物に生息の場を提供している。このため、河川生態系から見た河川環境は、食物連鎖も含めた物質移動と、生息域としての河川の物理的特性により評価する必要があると考えられる。

しかし、生態系中には極めて複雑な相互関係が多数存在するため、その構造を全て把握し評価することは不可能と言っても良い。このため、河川における植物、動物、生態系の状況評価については、生息場の評価を通して行う手法に関する研究が多く行われている。例えば河川の中上流域では、瀬や淵といった構造的特性が生物に提供する生息域としての評価について調査する研究が多く行われており、そこに生息する生物を保全しようとする際には、まず瀬や淵と言った河川の物理的構造を保全するという考えが現在のところ支配的な様である<sup>6)</sup>。

日本の河川は一般に出水時と平水時で流量が大きく異なるため、河川の物理的構造という空間的特性と共に流量変動という時間的変動特性が生態系に与える影響も大きいと考えられ、これについて着目した研究も多く行われている。流量変動の時間的スケールとしては、1年程度のスケールから河床形状が大きく変わるような規模の出水が発生する再帰時間スケールまで種々のものが研究対象となっている。

流量変動に伴う水位変動は、河道内での冠水頻度

の多寡を縦横断方向に生じさせる。また、河床におけるせん断応力の変動は、平水時に堆積した土砂や付着藻類が出水時に剥離、流送されると言った現象を引き起こしたり<sup>7)</sup>、砂州上や高水敷上の植生分布に影響を及ぼしたりしている<sup>8) 9)</sup>。これらの観点から、流量変動も河川生態系から見て河川環境を評価する上で重要な視点である。流量変動が生態系に与える影響を評価するために必要となる冠水頻度の多寡やせん断応力分布を把握するためには、河川地形の正確な把握や流量変動に伴う流速分布などの流動特性の評価が必要となる。

以上述べたように、河川生態系を保全するために把握すべき物理的な河川環境評価の視点として、①物質移動の観点からは流域特性評価、②生息域の物理的環境や、流量変動の影響特性把握の観点からは河川地形評価や流動解析が重要な項目としてあげられる。

ここでは、上記の2つの視点から河川環境の評価を行うために、地理情報システム (GIS) 及びリモートセンシング技術の利用について議論する。流域特性情報の整理手法としてのGISの利用、河川形状や高水敷の高低を把握しリーチスケールで河川の生息場としての評価を行うためのリモートセンシング技術やGISの利用についての考察を2)、3)に述べると共に、河川の流動解析とGISの結合利用方法も含めて4)に千曲川を対象とした評価事例を紹介する。

## 2) 流域情報の把握と解析へのGIS利用

### ① 流域土地利用の解析

河川環境と流域との結びつきについて考察する際には、流域の土地利用を正確に把握する必要がある。現在、国土地理院が100mメッシュの土地利用データを提供している。GISを利用することで、次に記述するように河川の任意地点への集水域が求められ、この集水域での土地利用特性が解析可能となる他、土地利用と地形の両者を総合的に解析できることから、流域土地利用特性についての理解が行いやすくなる。

### ② 集水域特性の解析

GISの優れた機能の一つに標高情報を利用した流域界と河道網の抽出機能がある。GISでは流域地形を表すのに流域をメッシュに分割して、それぞれの平均標高と平面座標系上の位置を収納し、地形情報として整理している。この情報を利用して流域界と河道網を抽出することができる(この様にして作成された河道網は落水線と呼ばれている)。落水線の作

成方法については、すでに確立されており<sup>10)</sup>、GISソフトウェアの解析ツールとして市販もされている。このように作成された落水線は、実際の河道網とずれる可能性があるため、実際の河道網と比較して修正を行う必要があるが、落水線が修正の上作成されて流域界が一旦抽出されると、河川の任意地点における集水域をGISにより切り出すことが可能になる。流域での水循環システムに対して取排水といった人為的な影響が大きい場所では、人為的な水循環系を別途設定する必要があるが、河川の任意地点と集水域とを結びつけるこの機能を用いることで、河川環境の縦断的な変化と流域との関わりについての解析が容易に行えるようになる。

### 3) リモートセンシング技術を用いた河川情報取得

#### ① レーザープロファイラによる地形情報取得

航空機搭載レーザープロファイラの開発により、詳細な河川地形情報を面的に取得することが可能となってきた。レーザープロファイラは、レーザーパルスを連続的に地面に向けて照射することで、1パルス毎に地上測点を設定し、それぞれの測点に緯度、経度、標高の位置情報を付与する仕組みになっている<sup>11)</sup>。

レーザープロファイラで計測できる位置の精度は、水平位置精度が概ね数m(飛行高度の1/2000)、垂直位置精度が概ね15cmとされているが、実際の河川敷において地上測量により求めた地盤高との比較を行った研究<sup>11)</sup>からも、植生のない箇所では地上測量との誤差は10~20cm程度であったことが示されている。同時に植生が密生しているところでは誤差が約30~60cmであったことが報告されているが、樹木の場合は、この差が樹木の高さと概ね整合していたことが示されている<sup>11)</sup>。

レーザープロファイラによる地形測定は、面的に詳細な情報が取得できることから、堤外地における少なくとも水面上の凹凸の把握が可能になる。詳細地形が把握されることで、冠水頻度分布が算定可能になるし、魚類が産卵に使用したり、出水時に避難する場所として使用可能な地形の分布を評価することにもつながる。植生分布についても冠水頻度分布と密接に関わりがあるので、詳細な地形情報は、その遷移予測にも役立つと考えられる。

#### ② 高解像度オルソフォトによる河川情報取得

高解像度のカラーデジタルカメラが実用化されたことから、幾何補正して歪みをなくした写真地図(オルソフォト)の細密化が可能となっている。また、

デジタルデータとして取り扱えるため、レーザープロファイラにより取得した地形情報をGISを利用して重ね合わせることで、地形と地面の被覆との間の関連性について解析することが可能となるため、今後河川環境情報取得のための強力な道具となることが期待される。

### 4) 千曲川における適用事例

#### ① 流域土地利用の解析

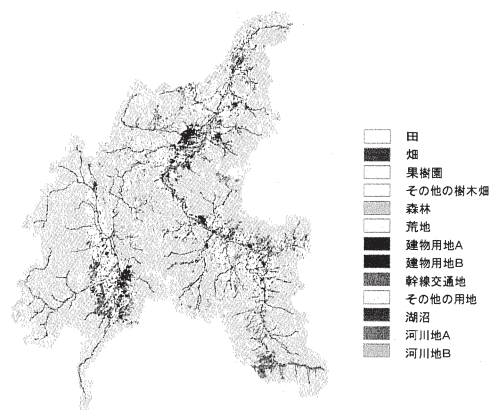


図 1.2.1 千曲川流域土地利用分布



図 1.2.2 千曲川流域土地傾斜角分布

千曲川流域を対象に、国土地理院が提供している数値地図 50m メッシュ (標高) データおよび 100m メッシュの細分区画土地利用データをGISソフトウェアにより表示した(図1.2.1)。流域の大部分(約72%)を森林が占めていること、水田面積が(9.4%)を占めることなどの定量的な評価もGISを利用することで容易に計算可能である。2. 3. 2で述べる



ように流域単位での土地利用の解析は河川水質を考える上で重要な情報を提供する。

GIS を利用することで、土地利用形態の分布と地形情報を組み合わせて考察することも容易になる。千曲川流域における標高、傾斜角度（図 1.2.2）とを比較すると長野、松本、上田、佐久盆地といったまとまった平地の他に上流部（図 1.2.2 中の右下の部分）の高標高地区に傾斜の緩い場所が存在することがわかる。土地利用分布情報（図 1.2.1 参照）と比較すると、この場所は畑地としての利用が進んでいることが示される。実際、この地域においては高原野菜の栽培が大規模に行われている。また、上述の4盆地の分布と市街地、田畑の分布とはほぼ一致しており、流域における土地利用が地形と密接に関連していることが示されている。地形を無視した土地利用改変が行われることは少ないと考えられるため、現在の土地利用と地形情報とを比較検討することで、現在の土地利用解析が行えるだけでなく、将来の土地利用変化がどのようなものになる可能性があるかについても地形情報に基づき予測することが可能と考えられる。

## ② 集水域特性の解析

2) で述べたように、落水線を作成した後は、流域内の各メッシュに落下した降水が下流に向かって流れる経路が GIS 上に展開されるため、河川の任意地点を指定すれば、そこから上流にさかのぼることができる。この機能を使用すれば、河川中の任意地点における集水域の特性を解析することが可能になる。千曲川流域についてこの手法を適用した例を図 1.2.3~5 に示す。

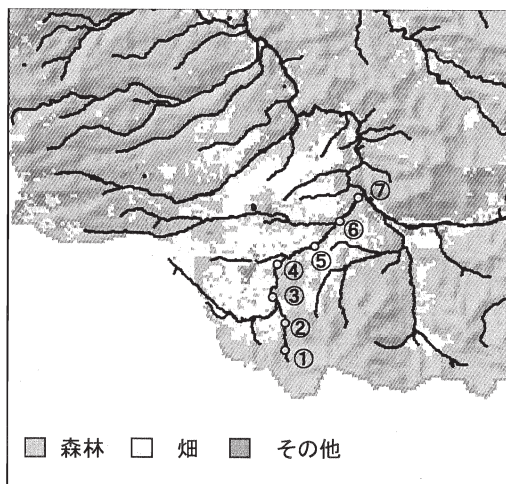


図 1.2.3 西川流域と評価地点

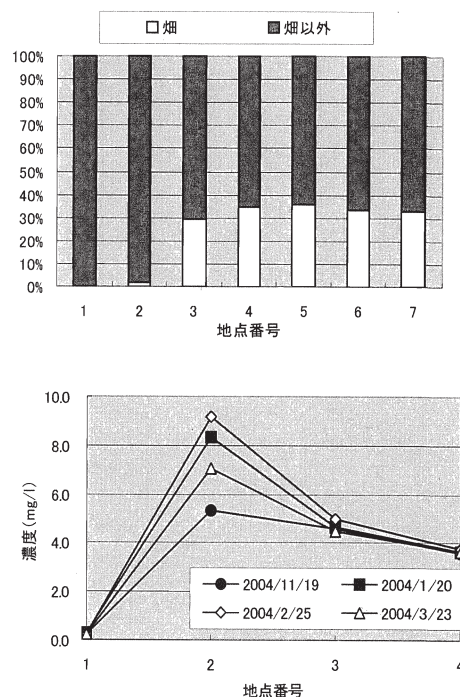


図 1.2.4 各評価地点における集水域の土地利用割合（上図）と硝酸態窒素濃度変化（下図）

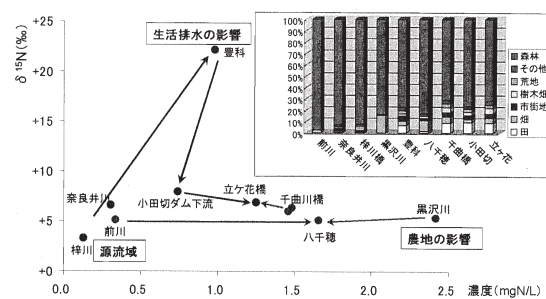


図 1.2.5 千曲川流域での硝酸態窒素濃度と安定同位体比の分布

まず、千曲川支川の一つである西川についての流域解析例を取り上げる。西川流域（図 1.2.3）では、先述のように高原野菜生産が盛んに行われており、西川の水質もこの土地利用による影響を強く受けていると考えられる。そこで、西川の上流から下流における本川との合流点までを対象に縦断的に流域土地利用と水質分布との比較を行った。西川において縦断的に合計7地点を設定し（図 1.2.3）、それぞれの地点における流域土地利用面積比率を GIS により求めた結果が図 1.2.4 に示されている。地点番号③から流域に占める野菜畑の比率が急激に増加し、3割を超えていることが示されている。これら7地点から1地点おきに合計4地点を対象に河川水を採

取し、化学肥料に多く含まれる硝酸態窒素濃度を測定した結果も図 1.2.4 に示す。硝酸態窒素濃度の急激な上昇が地点番号③より下流で認められる。畑地からの流出の影響を受けていない地点①での濃度に比べて農地からの流出の影響を受ける地点③では、硝酸態窒素濃度が一気に 30 倍の濃度にまで上昇している。ここで示されるとおり、西川における硝酸態窒素濃度変化は、土地利用変化に強く規定されていることが分かる。河川環境を考える上で、流域土地利用の評価が重要である所以である。また、このように土地利用が極端な流域を利用すれば、負荷の流出解析の精度向上が進むと考えられる。

2003年8月に硝酸態窒素濃度と共にその安定同位体比を流域内の9地点(図 1.2.1)で測定した結果を図 1.2.5 に示す。流域のほぼ全域が森林で占められている前川、奈良井川、梓橋の3地点では硝酸態窒素濃度は低レベルで、また安定同位体比も低い値を示している。西川同様に流域で高原野菜栽培が盛んに行われている黒沢川では、化学肥料由来と考えられる高濃度の硝酸態窒素が検出されているが、合成肥料に含まれる硝酸態窒素の安定同位体比は低いいため、森林からの流出成分に比べて安定同位体比は大きな違いは認められない。市街地の影響が最も大きい豊科地点では、硝酸態窒素濃度が黒沢川ほどは高くないものの、安定同位体比は+20%以上と高い値を示した。これは、この地点での硝酸態窒素の多くが、人間を含めた動物からの排泄物成分に由来していることが示されていると考えられる。河川生態系に対する影響が大きい窒素やリンなどの栄養塩類濃度の変化は、河川環境を把握する上で重要な観点であるが、河川水の栄養塩類濃度は一般的に流量変動に伴い大きく変化する。ただし、河川流量と栄養塩類濃度との関係は、負荷量と流量との単純相関で表されるL-Q式を用いた簡易な手法で取り扱われることが多く、変化の機構までを検討することはあまり行われていない。安定同位体比を水質濃度と同時に計測することで、点源負荷と考えられる生活系排水と、面源系負荷である農地からの排水が流量変動に応じて量的にどのような変化を示すかについての情報が得られると考えられる。この様な場合でも、GIS情報を援用することで、より正確な評価が可能となると考えられる。

### ③ レーザープロファイラによる地形情報取得

2004年2月に千曲川中流の上田市近郊の鼠橋地点においてレーザープロファイラによる地形情報取得

を行った。飛行速度 60m/s、対地高度約 900m、レーザー照射頻度 33,000Hz、スキャン角度 $\pm 20^\circ$ 、スキャン頻度 28Hz、平均計測密度約 1点/1m四方の設定で2回飛行を行い計測した。3つある測線について、1回目と2回目での標高値を比較すると、平均値の差がそれぞれ-5cm, 4cm, 1cm、標準偏差が 16.4cm, 14cm, 13.4cm であり、精度の高い測定が行われたことが分かる。

測定結果の陰影画像を用いて図 1.2.6 に示す。測定に関しては、発射されたレーザーパルスに対する反射のファーストパルスとラストパルスとを比較することで、地表面だけのデータ(Digital Elevation Model, DEM)と樹木や建物の頂上を含んだデータ(Digital Surface Model, DSM)の2つを作成している。

### ④ 高解像度オルソフォトによる河川情報取得

1600万画素の高解像度デジタルカメラを用いてナチュラルカラー、赤外カラーの2種類の画像を取得した。画像解像度は約 15cm で、レーザープロファイラデータの取得と同様の3測線で4.2秒のシャッター間隔で撮影を行った。図 1.2.7 に撮影された画像を示す。従来、航空写真を利用することで、砂州形状の変化や、高水敷の変化を解析し、河川環境の変化について検討する研究が行われているが<sup>12)</sup>、レーザープロファイラによる地形情報計測を同時に行うことで、より高度な河川環境情報取得が可能となる。

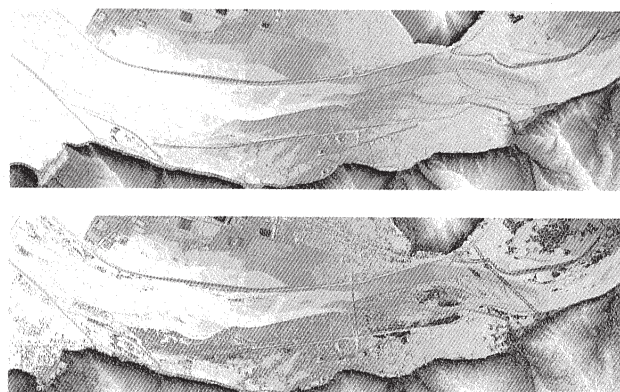


図 1.2.6 レーザープロファイラにより作成した DEM (上図) および DSM (下図) の陰影図

DEMの陰影画像(図 1.2.6)からは、高水敷の詳細な地形が読みとれると共に、河川内の砂州の形状が判読できる。陰影画像では、傾斜角の大きい場所が濃く表示されるが、デジタルカメラによる画像と比

較しながら水際域での傾斜を見ると水流が速くなる水当たり部では砂州や高水敷の傾斜が強くなる傾向が見られる。また、浅瀬の部分では、水面形状の傾斜も読みとられており、これらの情報を砂州の移動傾向の予測に利用することが可能になると考えられる他、大規模出水の前後における地形情報を比較することで、砂州の変化を定量的に比較評価できると考えられる。



図 1.2.7 高解像度デジタルカメラによるオルソフォト画像

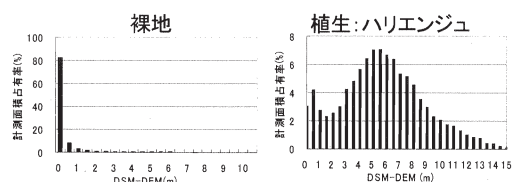


図 1.2.8 突起物の高さの頻度分布

DSM の立体画像 (図 1.2.6) を見ると、砂州上や高水敷上にハリエンジュ群落を示す凸部が見られる。裸地とハリエンジュが占めている場所の 2ヶ所で DSM と DEM の標高差の分布を調べると、裸地ではほとんど突起が認められない (DSM と DEM の標高差がない、図 1.2.8 左) のに対して、ハリエンジュが占めている場所での差は 5.5m を中心に 15m までの標高差が認められる (図 1.2.8 右)。これは、そこに繁茂するハリエンジュの樹高を反映した結果と考えられ、この情報を用いることで植生の規模や生育状況の評価が可能である。

### ⑤ 流動特性解析と地形との比較

高水敷形状の詳細情報は、出水時の流動特性解析と併せて用いることで、ワンドやタマリなど高水敷形状と相まって形成される空間の魚類に対する生態的機能の解析に使用することが可能である。2000 年 6 月 24 日に起きた大規模出水時の流速分布の再現計算結果を見ると、主流部では 2m/s 以上の流速が認められ、特に流速の速いところでは 6m/s を超える水が流下しているため、出水前に主流部にいた魚類は、そのままの場所にとどまることはほぼ不可能であったと考えられるが、ワンドなどが存在する部分の流

速は、比較的緩やかになっており、魚類が出水時の避難場所として利用可能であった可能性が示されている。

上記の解析と平行して実施した魚類調査 (本川、ワンドにおける各月平水時調査、出水時の魚類調査) の結果を分析すると、出水時の魚類調査結果は、通常時の魚類調査と異なる結果を示している。通常、本川でしか採捕できないアユがワンド内で採捕されているのが特徴的である。また、平水時にワンド内で採捕される種に関しても、出水時にワンド内で捕獲される個体サイズの方が平水時よりも大きく、本川に生息する種の個体サイズと類似した結果となっている。これらの結果は、出水時に、ワンドと本川が接続することにより、ワンド内に本川魚類で生息する魚類が一時的に移動してきていることを示唆していると考えられる。

流速分布は、河床形状、河道の縦横断形状等に規定されることから、河川の微地形 GIS と流動シミュレーションとを利用することで、出水時の待避場所となりうる地点が特定できる。魚類の待避場所等として使用される可能性が高い地点を、GIS 上に展開することで、今まであまり考慮されてこなかった、魚類にとってのハビタットとしての高水敷地形の重要性が見えてきた。GIS の高い地理情報処理能力を生かすことで、このように河川の物理環境を河川生態系からの視点で評価する手法の開発を今後進捗していきたい。

### 5) まとめ

河川生態系との係わりの中で、河川環境を評価する際に重要な要素である流域特性や河川地形を定量的に評価するための、いくつかの新しい情報処理手法の適用について、千曲川における事例を中心に述べた。河川生態系や、河川環境について評価する際には、流域からの視点、河川区域の面的な詳細地形情報、水流や水質といった情報を統合的に取り扱うことで定量的かつ客観的な評価が可能になると考えられるため、今後、これらのための技術の向上が必要である。

### 1. 2. 3 水理特性に着目した河川微地形の生態的機能評価の試み

#### 1) はじめに

河川に存在する生物は、それらが生息していく中で必要な機能を河川から得ている。河川が提供する生物生息に必要な機能の一つに、生息のための場所

の提供がある。このため、生物の生息場としての視点から河川地形を見ると、河川地形そのものが、生態的機能を有しているとも見られる。

生物の生息場を規定する河川地形については、流域スケールから、リーチスケール、さらに微細なスケールの規模での議論が提案されているが<sup>13)</sup>、河川改修を含む河川管理を行う中では、リーチスケールレベルでの微地形が持つ生物への影響を評価することに対する要求が高いと考えられる。このような規模での河川微地形は、流速分布を規定し、さらに地先レベルでの河床材料特性や、流下物の動態の平面的分布を決定することになる。また、ある流量に対する水深は地形に応じて決定されるため、リーチスケールレベルでの微地形は、水深分布を決めることになり、このため河川の流量変動に伴う攪乱の分布も、この微地形に応じたものとなると考えられる。このことは、河川の微地形が規定する水深や流速などの水理特性の分布に着目することで、リーチスケールレベルの河川微地形が有する生態的機能を評価できることを示している。本研究は、上記の視点からレーザープロファイラ、GIS といった新しい技術を利用して河川微地形が有する生態的機能の評価手法について検討を加えるものである。

リーチスケールレベルの微地形が持つこれらの特徴や、河川改修を含む河川管理のスケールとしての重要性や捉えやすさから、このスケールでの微地形が持つ生物生息場としての意味を議論した研究事例は多く存在する。特にリーチスケールレベルでの地形に着目した植物群落の消長や分布の解析などはこの好例である<sup>14) 15) 16) 17)</sup>。

これらの研究に共通する考え方として、河川微地形により駆動される出水時の河川流の流体力の分布を捉えて植物群落の破壊や微地形の変動を評価すると共に、出水後期の土砂堆積、その後の植生繁茂について評価することで、結果的に微地形と植物群落との関連性を定量的に理解しようとしている点が挙げられる。上記に挙げた研究事例以外にも河川植物群落の消長や分布に関する研究は、枚挙にいとまが無く、機構の解明について概念的には相当程度確立されていると考えられる。

しかし、蛇行を生じているような河川の微地形は3次元的であるため、実際植物群落分布は非常に複雑に入り組んでいる場合が多い。このような場所において、植物群落の消長や分布について予測するためには、非常に詳細な現地調査を行う必要がある。

定量的かつ正確な現象解明に基づく予測を行うためには、このような詳細な現地調査が不可欠であるが、数多くの現場で詳細な現地調査を行うことは、予算の限界もあり困難である。

そこで、本研究においては、最近現場においても利用されることが多くなっているレーザープロファイラにより取得可能な地盤高データ (Digital Elevation Model, 以下 DEM) を水理計算と合わせて利用することで植物群落分布に影響する出水による冠水頻度や攪乱の程度についてリーチスケールでの面的な分布を知ると共に、レーザープロファイラにより同時に取得可能な植生高の推定に利用が可能と考えられる地表高データ (Digital Surface Model, 以下 DSM) を利用して植生繁茂状況を解析することで、比較的簡易にリーチスケールにおける河川微地形と植生繁茂との関連性を評価する手法について検討を行う。

面的分布を考慮した河川微地形の生態的機能評価を行うことで、より高レベルでの河川管理が可能となると思われる。本研究は、植生分布を対象にして、河川微地形の生態的機能の一部を水理特性から評価する手法の検討を目的とするものである。

## 2) 研究方法

### ① 研究対象地域

上田市近郊で千曲川中流の鼠橋付近 (長野県埴科郡坂城町) を研究対象地域 (以下、調査地域) として取り上げた。調査地域は、下流の新潟・長野県境から 95.6~97km 区間で、流域面積 2,560km<sup>2</sup>、河道幅約 100m、河床勾配 1/200、河道両岸に築堤が行われている河道区間である。調査地域の河床は、主に礫で構成され河床波形態は複列砂州である。礫の主要構成材料は 20~200mm、 $d_{50}$ =100mm、最大粒径は 200~300mm 程度である。右岸側には本流と比高差が少なく年に複数回冠水する高水敷、左岸側には本流と比高差が約 3m 程度あり 2~3 年に 1 回程度一部が冠水する高水敷が形成されている。

### ② レーザープロファイラによる地形情報取得

2004 年 2 月および 2005 年 2 月にレーザープロファイラによる地形情報取得を行った。2004 年の調査においては、飛行速度 60m/s、対地高度約 900m、レーザー照射頻度 33,000Hz、平均計測密度約 1 点/1m 四方 (データ取得後に調節) の設定で 2 回飛行し計測した。また、平成 17 年の調査では飛行速度 60m/s、対地高度約 1,200m、レーザー照射頻度 74,800Hz、平均計測密度約 1 点/1m 四方の設定で地形情報を取得

している。測定結果に関しては、発射されたレーザーパルスに対する反射のファーストパルスとラストパルスとを比較することで、地盤高 (DEM) と樹木や建物の頂上を含んだ地表高 (DSM) の 2 つが作成される。

### ③ 画像情報取得

レーザープロファイラによる地形情報取得と同じ時期に、ナチュラルカラー画像と近赤外カラー画像を高精度デジタルカメラにより取得した。地上解像度は 16cm である。高解像度の画像を取得することで、調査地域の景観的分布 (水域、陸域の区別や、中州、高水敷の分布や植生分布) を知ることができる。また、近赤外カラー画像を取得することで、植生分布を把握することが可能である。

### ④ 水理計算による流量規模別流動の推定

調査地域の流量規模別の流況再現を行うことで、冠水域の流速を算定する目的で水理計算を行った。平水時から出水時までの幅広い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>18)</sup>を用いて定常計算を行った。

河床形状データは調査地のレーザープロファイラによる測量結果、水域内の河床高現地測量データを基に内挿し流下・横断方向ともに 6m ピッチの河床高データを整備した。計算は、上流端流量として 100m<sup>3</sup>/s から 1,000m<sup>3</sup>/s まで 100m<sup>3</sup>/s 刻み毎に増加させたものと、1,500m<sup>3</sup>/s、2,000m<sup>3</sup>/s の合計 12 ケース執り行った。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。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、 $\Delta t=0.1$  [sec] を基本とし、数値振動が発生する場合は  $\Delta t=0.05$  [sec] とした。水理計算の妥当性は、2005 年 7 月 27 日の現地調査時に 40~50m<sup>3</sup>/s の出水状態を現地観測した。現地観測の結果、冠水域は水理計算結果と良好に合致し、水理計算結果は冠水域、冠水状態を良好に再現していると考えられた。

### ⑤ 流量規模別冠水範囲の算定

上記の条件で行った水理計算結果を GIS (ESRI 社

ArcGIS Ver8.3) にインポートし、ケース毎 (流量規模別) に調査地域における冠水域を把握した。手法としては、調査地域全体をカバーする 6m×6m タイルポリゴン (以下、ポリゴン) を作成し、冠水時の水深データを格納後、各ポリゴンの水深データの平均値を算出した。次に、計算ケースごと (流量規模別) の冠水域の差 (以下、差分冠水域) を抽出した。差分冠水域は、対象とする流量ケースとその一つ上の流量ケースの差分とし、全流量ケース分抽出した。

また、設定した流量ケースの生起確率を求めるために、近傍流量観測所の 1975 年から 1998 年分までの年最大日流量を図上推定法によりプロットして流量の再帰時間を算定した<sup>19)</sup>。その後、流量観測所と鼠橋地点の流域面積比率から鼠橋地点における流量生起確率を算出した。この処理を行うことで、調査地域の冠水頻度を統計的に求めることが可能となる。

### ⑥ 植生高分布の推定と冠水頻度との比較

取得した DSM と DEM の標高差分をとることで、植生高の推定が可能である。この方法により、調査地域の中州や高水敷上に分布する植生高の分布について算出した。さらに、上記⑤で算定した差分冠水域毎に植生高分布を集計して、冠水頻度と植生高との比較を行った。また、2001 年に作成された植生図より判読したハリエンジュ群落の位置において、植生高分布と冠水頻度を比較し、繁茂が問題となっているハリエンジュがどの程度の冠水頻度を持つ区域で繁茂しているのかについて調べた。

## 3) 結果

### ① 調査地域の DEM、DSM 及びナチュラルカラー画像

調査地域において取得された地形データを陰影図として図 1.2.9 に示す。河川は右から左向きに流れている。図 1.2.9(2) の中心付近に鼠橋が確認できる。レーザープロファイラにより取得された地形データから詳細な DEM が作成されることが分かる (DEM の作成には、周辺地形を利用した平滑化を行っているため、橋の除去等が可能となっている。この際には、写真情報を考慮した手作業も含んでいる。)。DEM と DSM の陰影図を並べて比較した場合、異なって見える箇所について、明らかに人工構造物と見なせるものの他のほとんどは、植生を示していると考えられる。植生が密に生育している場所としては、図の上下に見える山地上と、河川左岸に広がる高水敷、鼠橋上流に存在する大きな中州上であることが分かる。堤内地の平野部の殆どは水田であることから、建物を除いて DEM と DSM との間には大きな差は見られな

い。

今回の研究対象とする提外地については、水面ではもちろん差が見られない。また、比高差が小さい砂州上でも DEM と DSM との間には大きな差が見られない。このことは、比高差が小さい場所ほど植被率が小さいと言う常識的な状況を反映したものと考えられる。また、図 1.2.10 は、デジタルカメラで撮影されたナチュラルカラー画像である(印刷では白黒)。



図 1.2.9(1) 調査地域の DEM の陰影画像 (2004 年 2 月取得分)



図 1.2.9(2) 調査地域の DSM の陰影画像 (2004 年 2 月取得分)



図 1.2.10 調査地域の画像 (2004 年 2 月取得分)

## ② 水理計算結果

流量を変化させた水理計算結果からは、左岸側の高水敷が冠水するためには、相当流量が増加する必要があることが示された。調査を行う直近において記録された 20 年に一度相当である  $2,000\text{m}^3/\text{s}$  流下時の流速分布を図 1.2.11 に示す。 $2,000\text{m}^3/\text{s}$  流下時には、左岸側の高水敷も殆どが冠水し、水面上に残存している部分はわずかであったことが示されている。ちなみに鼠橋上流側での残存域はラジコンの飛行場で、下流側での残存域は耕作地であることが分かっている(水没を避けるために地盤を高くしていると思われる)。しかし、左岸高水敷において鼠橋下流では、冠水はするものの高水敷を流下するには至らず、このため流速もせいぜい  $20\text{cm}/\text{s}$  程度であったことを示す結果となっている。

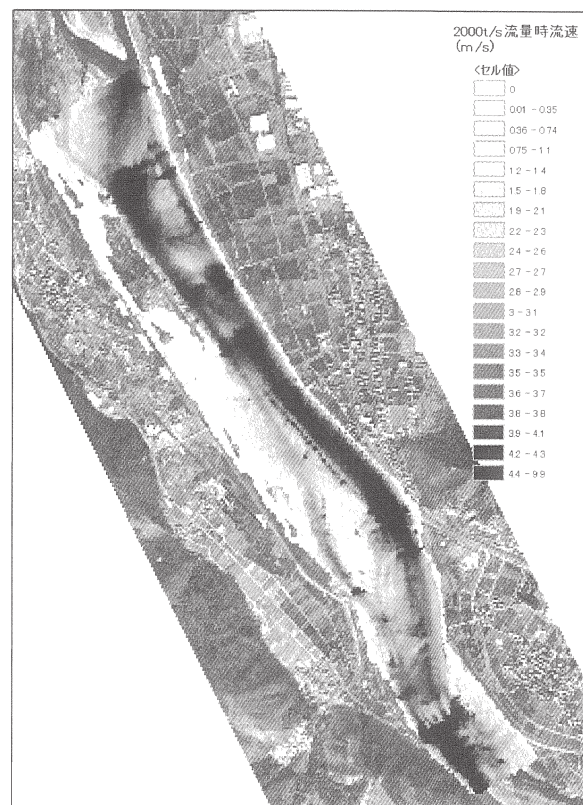


図 1.2.11  $2,000\text{m}^3/\text{s}$  流下時の流速分布

## ③ 流量規模別差分冠水域の算定

上流端での流量を変化させた計算における冠水域(図 1.2.11 参照)をナチュラルカラー画像上に重ね合わせた結果を図 1.2.12 に示す。左岸側の高水敷は、 $1,500\text{m}^3/\text{s}$  以上の流量規模に達しない限り大部分が冠水することがなく、出水による植生への影響が生じる頻度が少ないことが分かる。しかし調査地域に点在する中州や寄州では冠水頻度の分布が地形に応じて変化する結果が得られた。上述したように、冠水したとしても流速が大きくなければ、植生にかかる流体力も大きくはならないので、攪乱強度も強大なものとはならない。このため、流量規模別差分冠水域による区分は、出水による攪乱の大小を表すものと考えられ、河川微地形が有する植生の消長や分布への影響という観点からの生態的機能の区分を示していると考えられる。図 1.2.12 で、冠水頻度が低い場所と図 1.2.10、1.2.11 に見られる植生繁茂域は良く一致している。

## ④ 植生高分布の推定と冠水頻度との比較

冠水頻度(流量規模別差分冠水域)により区分された区域毎の植生高推定値(DSM-DEM)の頻度分布を示したものが図 1.2.13(図の手前が小流量)である。

頻度分布は、各区域中の植生高推定値データの総数に対して、0.5m刻みに分けた植生高推定値をもつデータがどれほどの割合で存在するかを示しており、各区域毎に、ある高さを持つ植生がどれほどの面積割合を占めているかを示すものである。

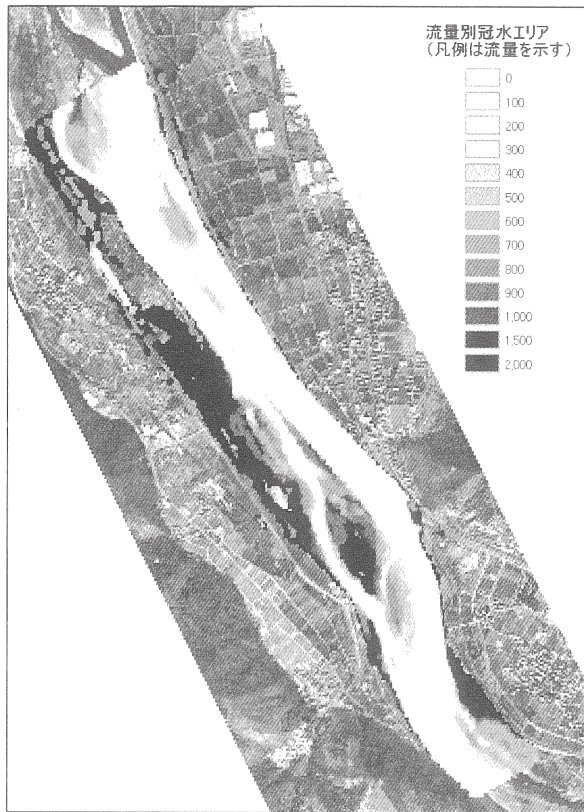


図 1.2.12 流量規模別冠水域

流量規模  $400\text{m}^3/\text{s}$  以下で冠水する区域では、植生高が  $0.5\text{m}$  未満 (ほとんどが裸地と考えられる) の面積が  $80\%$  以上を占めており、高い値をとる部分は非常に少ないことがわかる。流量規模  $400\text{m}^3/\text{s}$  以上で初めて冠水する区域では、植生高が  $0.5\text{m}$  未満の裸地的な場所の割合が冠水頻度の減少に伴って減少することが示されている。また、流量規模  $800\text{m}^3/\text{s}$  までで冠水する区域では裸地的な部分の面積割合の減少分が植生高  $3\text{m}$  以下の部分の面積割合の上昇で置き換わっているのに対して、それ以上の流量規模で冠水する区域では、植生高  $3\text{m}$  以上の部分が占める面積割合が増えている。これは、流量規模  $800\text{m}^3/\text{s}$  以上で冠水する区域では、木本類の占める面積割合が増えることを示していると考えられる。

植生図よりハリエンジュ群落の位置を判読し、冠水頻度 (流量規模別差分冠水域) 毎のハリエンジュ群落が占める面積割合と植生高分布を比較したもの

が、図 1.2.14 である。流量規模  $400\text{m}^3/\text{s}$  以下で冠水する区域ではハリエンジュ群落が占める割合は  $5\%$  以下であり、平均植生高も  $3\text{m}$  以下となっている。また、流量規模  $400\sim 800\text{m}^3/\text{s}$  で冠水する区域ではハリエンジュ群落の割合と植生高が共に増加していることが見て取れる。さらに流量規模  $800\text{m}^3/\text{s}$  以上で初めて冠水する区域ではハリエンジュ群落の占める面積が  $40\%$  程度を占め、平均植生高も  $5\text{m}$  程度となっており、安定した群落を形成する区域であることを示唆する結果となっている。

図 1.2.15 に、図 1.2.14 と同様の冠水頻度毎に分類した区域毎にハリエンジュ群落内の植生高分布を示した。植生高の最大値について見ると、流量規模  $400\text{m}^3/\text{s}$  を境にそれ以下では冠水頻度が高いほど最大値が低くなるのに対して、それ以上ではほぼ一定となることを示している。流量規模  $400\text{m}^3/\text{s}$  から  $800\text{m}^3/\text{s}$  の冠水域で最大値が変化するのは、冠水頻度が高い場所ほど、群落の破壊頻度が高く、若齢の樹木が多いことを示していると考えられる。本調査地域においては、ハリエンジュの繁茂

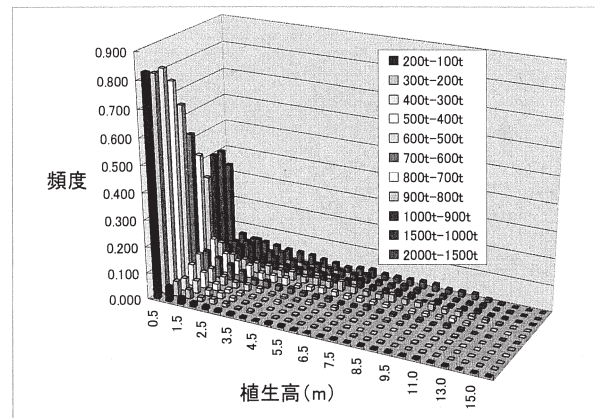


図 1.2.13 植生高分布の推定と冠水頻度との比較

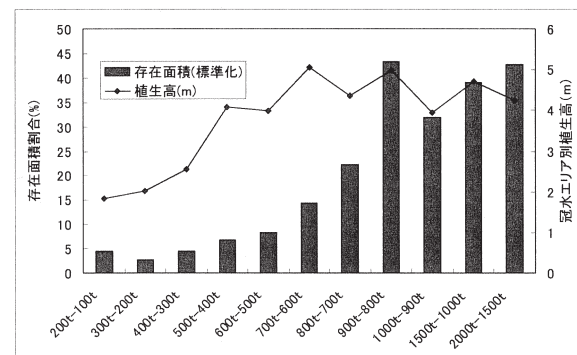


図 1.2.14 冠水頻度とハリエンジュ群落が占める面積割合及び平均植生高

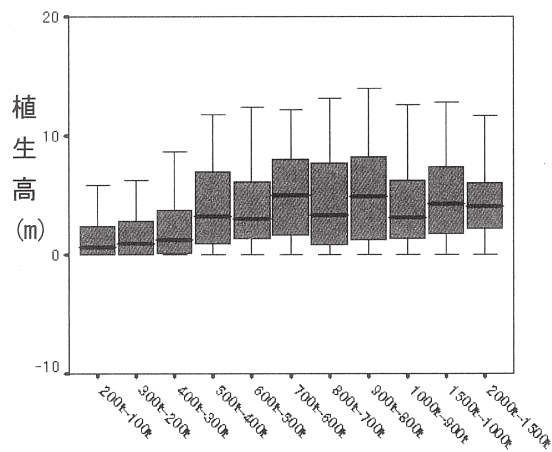


図 1.2.15 冠水頻度とハリエンジュ群落内の植生高分布

による樹林化が問題視されているが、これらの結果は、流量規模 400m<sup>3</sup>/s 以上で冠水する場所でハリエンジュによる樹林化が始まり、流量規模 800m<sup>3</sup>/s 以上で冠水する区域では安定した樹林化が起こることを示唆している。

#### 4) 考察

河川のリーチスケールで詳細な地形情報を取得し、水理計算と組み合わせて、出水による物理的攪乱の程度により河道を類型化する比較的簡易な手法を提案し、この手法によって類型化された区域毎に植生の状況を検討した結果、本調査地域においては、流量規模 400m<sup>3</sup>/s 超と 800m<sup>3</sup>/s 超で冠水する流量規模別差分冠水域において植生状況が異なることが示された。

出水の頻度分布から見ると、これらの流量を越える出水が起こる再起確率は、それぞれ2年に一度、5年に一度であり、ここで得られた結果から、調査地域周辺において、ハリエンジュの繁茂を防ぎたい箇所では流量規模 400m<sup>3</sup>/s (2年に一度) 程度で冠水する標高まで河床高を切り下げることが必要と推定される。また、800m<sup>3</sup>/s (5年に一度) 程度で冠水する標高より高い場所では、一旦ハリエンジュが侵入すると、放置しておけばその周辺地域へ広く分布することが予想される。

治水上の要請から河道の疎通能力確保のための樹林化の抑制と近年減少傾向にある砂礫河原の再生を図った高水敷の切り下げが事業として行われることが多いが、今回提案した手法を利用すれば、物理的環境が調査地域と著しく異なることのない河川区間であれば、その河川区間における河道を調査地域で得られた類型を参考にして区分することで、どの程

度の高さまで切り下げるべきかという問いに対する評価が可能になると考えられる。ただし、高水敷の切り下げは、河積の拡大による水位低下や流速の減少を招くことから、切り下げ後の状況で再度計算を行うなどして、効果についての評価を行う必要がある。

河川における植物群落の消長や分布を規定する要因として、出水による攪乱と細粒土砂分の有無が特に重要であることが指摘されている<sup>15)</sup>。その他にも種々の要因が影響することで河川植生の特徴を決定している。また、植生の状況は時間的に遷移しているため、今回提案したような簡易な方法で河川の微地形が持つ植生消長や分布への影響を評価しきれものではない。しかし、今後の河川管理においてレーザープロファイラを用いた測量が進展する可能性を考えると、詳細な地形データを取得できる利点をより活かすためにも水理計算と結合すると共に、GISの強力なデータ処理能力を利用することで、このような簡易な方法でも河床の環境についていくつかの視点から評価することが望まれる。

一旦、システムとして作成すれば、例えば今回の調査地域で河道改修を行おうとした場合、いくつかの対案(河道形状)について統計的に流量を変化させた出水時の流動計算を行うことで、冠水頻度分布の変化や、流動特性の変化が予測でき、改修後の環境変化について簡便な予測が可能となると考えられる。流動特性の変化は、植生分布だけでなく、他の水生生物の生息環境にも影響を与えるものであり、その予測は発展性を持つものであると考えられる。

これからの河川管理においては、順応的管理が重要であるが、何らかの人為的インパクトを加える際には、事前に上記のような予測を行い、事後のモニタリングを行うことで、予測精度の向上が可能となるので、予測技術とモニタリングを有機的に結合した調査が必要である。このような流れの中で、今回の検討で用いた手法は利用価値が高いと思われる。

#### 5) まとめ

レーザープロファイラにより取得された詳細地形情報と水理計算を組み合わせ、河川のリーチスケールの地形がもつ生態的意味(機能)の評価のための手順の提案を行った。今回は、植生分布と出水による攪乱との関係について地形を通して評価を行った。

#### 2. 生物現存量・生物群集の特性と外的要因との関



## 係解析および河川生態系のモデル構築

### 2. 1 多摩川永田地区における土砂投入が付着藻類に与える影響及びハリエンジュの分布拡大について

#### 2. 1. 1 土砂投入が付着藻類に与える影響 1) はじめに

多摩川 51.7～53.2km 区間（以下、永田地区とする）では、2001 年より河原の再生事業が実施されている。本事業は、河床低下に対する対策と河原の再生、及び多摩川において絶滅の危機にあるカワラノギクの保全を目的に<sup>20)</sup>、礫河原の造成が行われた。また、河原が継続的に維持できる、すなわち、かつて有していた河原が成立しうるしくみの機能を早期に回復させるため、土砂投入が実施されている<sup>21)</sup>。

ところで土砂管理については、平成 10 年 7 月に河川審議会総合土砂管理小委員会から「流砂系の総合的な土砂管理にむけて」の報告において源頭部から海岸までの一貫した総合的な土砂管理の必要性が提言され、その重要性が認識されている。天竜川や相模川等、いくつかの河川においては懇談会や委員会が設置され検討されている。この対策として現在、主にダム貯水池における適切な排砂システムの検討や、諫止された土砂を下流へと運搬、設置し、土砂の連続性を保とうとする措置（以下、土砂投入とする）が検討されている。特に後者は、早急かつ継続的な対策として今後多く実施されていくものと考えられる。多摩川永田地区での土砂投入も、土砂流送や流況が構造物等により制御されたこと等により失われた河道のシステムを修復する事例の一つとして位置づけられる。

これまで土砂投入は、ダム下流区間の河床低下、河床材料の粗粒化、これに伴い変質した生物の生育・生息環境の改善等を目的に実施されてきた<sup>22～24)</sup>。しかし、試験的・実験的段階にあり、土砂投入とハビタットや生物との応答関係について明らかにされている事例は少なく、効果の把握が困難なこと、砂の堆積等新たな課題が生じたこと等により中止されている例もある。今後、土砂投入を河道の修復技術として位置づけていくためには、事例研究や実験等により、土砂投入がハビタット、生物等へ与える影響を解明し、知見を集積していくことが必要であると考えられる。

そこで本研究では、多摩川永田地区の土砂投入を対象に、ここでは特に付着藻類に着目し、その影響について明らかにすることを目的とする。

#### 2) 方法

##### ① 対象地区と土砂投入の概要

多摩川永田地区（51.7～53.2km）を図 2. 1. 1 に示す。永田地区の河床勾配は 1/310、川幅約 300m、低水路幅 約 30m、平均年最大流量は約 600m<sup>3</sup>/s である。また、河床材料は平均粒径 35mm、90%粒径 100mm である<sup>21)</sup>。上流には小河内ダム、白丸ダム、小作堰、羽村堰があり、特に本地区の流量は、約 0.5km 上流の羽村堰（取水堰）からの放流量に規定され、洪水時を除き一定流量 2m<sup>3</sup>/s が流下している。

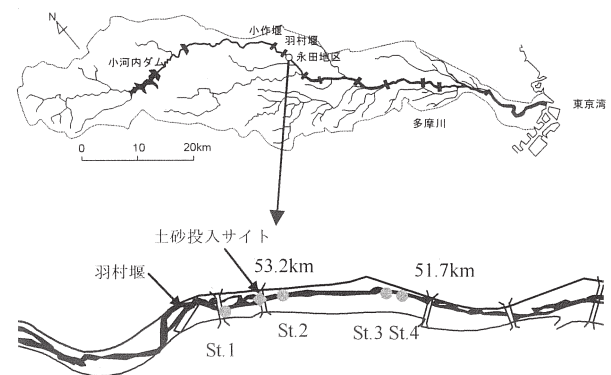


図 2. 1. 1 対象地区と調査地点

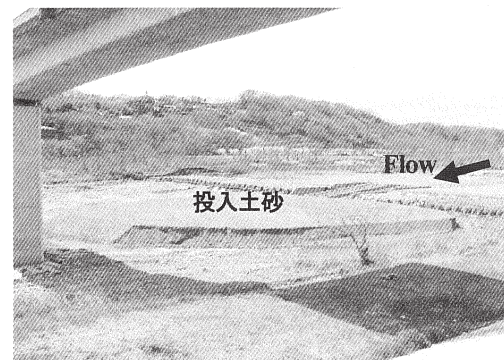


写真 2. 1. 1 投入された土砂（2003. 4. 7 撮影）

土砂投入は、約 2km 上流の小作堰に堆積した土砂を出水期前までに本区間最上流端に運搬・設置し、これが出水時の流れで削られ、運搬されることを期待し実施された<sup>21)</sup>。投入された土砂量は、2000 年 11 月～2001 年 1 月に 1,800 m<sup>3</sup>、2001 年 10 月～2002 年 3 月に 4,400 m<sup>3</sup> である。いずれも夏期までには全量が流出している。2002 年 10 月までの調査結果によると、投入した土砂の約 8 割が低水路拡幅区間とその下流に堆積し、河床上昇が生じその効果が報告されている<sup>21)</sup>。その後、2002 年 12 月～2003 年 3 月に 8,650m<sup>3</sup> の土砂が投入された（写真 2. 1. 1）。なお、投入された土砂の粒度組成は、本地区の河床材料の粒径とほぼ等しいとされる<sup>21)</sup>。

##### ② 調査方法

土砂供給サイト上流側を非影響区、下流側を影響区として調査地点を設置し、付着藻類及び流下土砂量等を比較することにより付着藻類への影響を把握した。

調査地点は、投入土砂の上流側地点 St.1 と、下流側地点 St.2、St.3、St.4 とし（図 2.1.1）、調査地点は平瀬の水深、流速がほぼ同様の地点とした。また、流砂量やその粒径は、河床からの高さ方向（鉛直方向）で異なるため、これにより付着藻類への影響が異なることが予想されたことから、St.4 では、他の地点で採取した河床材料よりも粒径が大きく、河床からの石上面までの高さが高いものを選定し、比較することとした。

調査期間は、出水期を含む 2003 年 6 月 3 日～11 月 4 日及び 2004 年 5 月 30 日～9 月 1 日とし、付着藻類の採取、流下土砂の捕捉、水深、流速、水温、水質の測定を行った。調査は、2003 年においては、出水期中の 6 月～9 月は、増水で水域に入れない日を除きほぼ週 1 回の頻度で実施し、流量が一定となった 10 月以降は、11 月 4 日に実施した。2004 年においては、週 1 回の頻度で実施した。流速は、電磁流速計（KENEK LP2100、LPT400-08P）を用い、安定した 3 つ以上のデータを取得した。水温、pH、電気伝導度（EC）は、水質計（HORIBA U-21）を用いて測定した。また、St.1 と St.3 では月 1 回の頻度で採水し、 $PO_4\text{-P}$ 、 $NH_4\text{-N}$ 、 $NO_3\text{-N}$  を分析した。

付着藻類の採取は、各地点を代表している石を 3 つ選定し、河床から石上面までの高さを測定した後、取りあげ、それぞれ石の上面に  $5\text{cm} \times 5\text{cm}$  あるいは  $5\text{cm} \times 10\text{cm}$  のコドラートを設置し、歯ブラシでこすり取り、試料とし、石長径及び短径について測定した。また、石表面にヤマトビケラ属が確認された場合には、 $10\text{cm} \times 10\text{cm}$  内の生息数を計数し、記録した。採取した試料は、冷暗所で分析室に持ち帰り、乾燥重量、クロロフィル a、フェオフィチン a を測定した。乾燥重量は、ガラス繊維濾紙（whatman GF/C、 $\phi 47\text{mm}$ ）で濾過し、濾紙を  $105^\circ\text{C}$  で 2 時間乾燥させて求めた。クロロフィル a 及びフェオフィチン a は、ガラス繊維濾紙（whatman GF/C、 $\phi 47\text{mm}$ ）上に補集した懸濁物から 90%アセトンで色素を抽出し、Lorenzen（1967）の方法で算出した。

流砂トラップは、2003 年 9 月 2 日、11 月 4 日、2004 年 2 月 20 日、5 月 29 日、9 月 3 日の計 5 回実施した。流砂は、河床面から鉛直高さ別に把握できるよう、開口部高さ  $10\text{cm} \times$  幅  $30\text{cm}$  のフレームに、長さ  $90\text{cm}$ 、

網目  $225\mu\text{m}$  のネットを取り付けた装置を河床から鉛直方向に 2 段重ねて設置し（河床面～ $10\text{cm}$ ：下層、 $10\text{cm} \sim 20\text{cm}$ ：上層）、約 5 時間経過後、これを取りあげトラップされた流砂等を採取した。なお、St.4 については河床面の凹凸が他の地点に比べて大きく設置が困難であったことから行わなかった。採取した試料には、有機物が含まれていたため、蒸留水で希釈し、硫酸  $10\text{ml}$  と過マンガン酸カリウム  $10\text{ml}$  を添加して有機物を分解し、 $100^\circ\text{C}$  で 30 分煮沸後放冷し、水酸化ナトリウムで中和した後、ふるいをういて粒度分析を行った。

投入された土砂の流下状況や河床の状況については、調査時に目視により観察し記録した。また、各地点の河床の変動については、国土交通省京浜河川事務所が実施した 2002 年 3 月及び 2004 年 2 月の縦断測量結果と服部らの 2002 年の河床変動量測定結果<sup>21)</sup>からその傾向を推測した。

### 3) 結果

#### ① 諸条件

図 2.1.2 に 2003 年、2004 年における対象区間の流量（羽村堰下流日平均放流量、東京都水道局）を示した。1 月～5 月まではほぼ  $2\text{m}^3/\text{s}$  の一定流量が流下していたが、調査期間においては、①6 月 1 日 ( $20\text{m}^3/\text{s}$ )、②6 月 25 日 ( $13\text{m}^3/\text{s}$ )、③7 月 26 日 ( $36\text{m}^3/\text{s}$ ) に小規模な出水、8 月 6 日～9 月 5 日まではやや規模が大きい出水④8 月 10 日 ( $83\text{m}^3/\text{s}$ )、⑤8 月 16 日 ( $138\text{m}^3/\text{s}$ ) を含む長期継続した増水が生じた。その後、⑥9 月 21 日 ( $79\text{m}^3/\text{s}$ ) の出水以降は、再び  $2\text{m}^3/\text{s}$  の一定流量となった。なお、出水④、出水⑤は、調布橋流量観測地点（ $57\text{km}$ ）における時間平均流量で、それぞれ  $124\text{m}^3/\text{s}$ 、 $216\text{m}^3/\text{s}$  が観測されており、図 2.1.2 に示した日平均流量より実際のピーク流量は高い。一方、2004 年においては、数度の小規模な出水を除き、ほぼ一定流量  $2\text{m}^3/\text{s}$  が流下した。なお、対象地区の流量は、 $0.5\text{km}$  上流の羽村堰によって常  $2\text{m}^3/\text{s}$  に制御されている。

表 2.1.1 に調査期間中の水温、電気伝導度、pH、 $PO_4\text{-P}$ 、 $NH_4\text{-N}$ 、 $NO_3\text{-N}$  を平均値と標準偏差で示した。水質は、各地点間で顕著な違いはなく、また、調査期間中においても変動はほとんどみられなかった。表 2.1.2 に各地点の水深、流速、石のサイズ、河床からの石上面までの高さを示した。2003 年における各地点の水深は平均値で約  $30 \sim 40\text{cm}$ 、流速は約  $100\text{cm/s}$  であり、2004 年においては、水深約  $20 \sim 30\text{cm}$ 、流速は約  $60\text{cm/s}$  であった。また、付着藻類を採取し

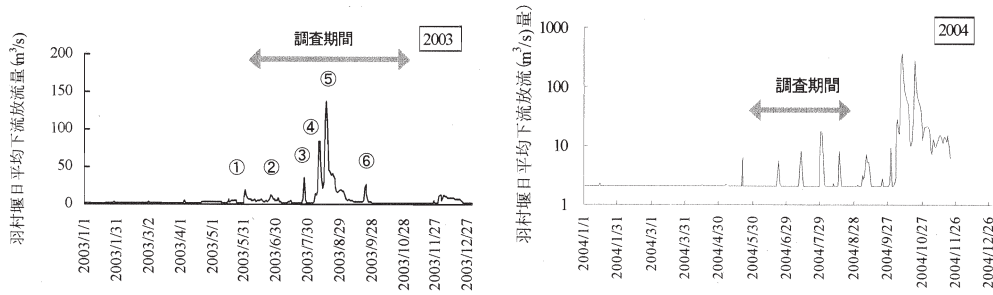


図 2.1.2 2003 年、2004 年における羽村堰下流日平均放流量

表 2.1.1 調査期間中の水温、水質（平均値±標準偏差）

項目	2003				2004			
	St.1	St.2	St.3	St.4	St.1	St.2	St.3	St.4
水温 (°C)	18.8±1.4	19.4±1.6	19.6±1.5	19.6±1.5	20.2±1.8	21.2±1.7	23.1±2.5	23.2±2.4
EC (ms/m)	10.7±0.9	10.7±0.9	11.2±1.3	11.5±0.0	11.3±0.7	11.9±0.6	12.3±0.8	12.6±0.8
pH	7.9±0.3	8.0±0.2	8.1±0.3	8.1±0.4	7.6±0.5	7.7±0.4	8.1±0.2	8.1±0.3
PO <sub>4</sub> -P(mg/l)	0.006±0.001	—	0.007±0.001	—	0.010±0.004	—	0.011±0.003	—
NH <sub>4</sub> -N(mg/l)	0.012±0.008	—	0.018±0.011	—	0.015±0.006	—	0.020±0.008	—
NO <sub>3</sub> -N(mg/l)	0.67±0.06	—	0.68±0.06	—	0.74±0.13	—	0.57±0.40	—

表 2.1.2 調査期間中の水深、流速及び採取した河床材料の粒径と河床面からの高さ

項目	2003				2004			
	St.1	St.2	St.3	St.4	St.1	St.2	St.3	St.4
水深 (m)	0.34	0.30	0.32	0.40	0.27	0.25	0.24	0.33
流速 (m/s)	1.01	1.04	1.07	1.04	0.6	0.56	0.6	0.6
粒径 長径 (m)	0.20	0.19	0.19	0.24	0.2	0.19	0.19	0.29
短径 (m)	0.15	0.13	0.13	0.18	0.14	0.16	0.13	0.21
河床面からの石の高さ (m)	0.04	0.04	0.04	0.12	0.04	0.04	0.04	0.13

た河床材料の粒径は、St.1～St.3 では長径約 20cm、St.4 ではこれよりやや大きく約 25～30cm、河床面からの高さは St.1～St.3 では約 4cm、St.4 では約 12cm であった。

## ② 土砂投入サイトからの流出状況

2003 年に設置された投入の流出状況については、調査を開始した直後の 2003 年 6 月 10 日は、土砂投入直後の 4 月 7 日（写真 2.1.1）と比較すると流路沿いの土砂が既に流出していた。その後、8 月 12 日には約 2/3 量が、⑤後の 8 月 26 日にはほぼ全量が流出した。なお、ヒアリングから出水④以前においても 3～4 割が流出していることが確認された。また、河床の状況については、6 月には平瀬においては砂が数 cm～10cm 程度堆積している区間が顕著にみられたが、8 月以降においてはそれらが減少して

いる傾向がみられた。

## ③ 附着藻類現存量 (Chl. a 量) とヤマトビケラ属の個体数の推移

図 2.1.3 に 2003 年、2004 年におけるクロロフィル a 量（平均値と標準偏差）と附着藻類を補食するヤマトビケラ属の個体数（平均値）の推移を示した。

### a) クロロフィル a 量の推移

2003 年において、クロロフィル a 量は、調査開始から出水④⑤を含む長期継続した増水後までの間、Chl.a 量の推移は、非影響区の St.1 と影響区の St.2、St.3 では大きく異なった傾向を示した。St.1 では約 100mg/m<sup>2</sup> まで増加したのに対し、St.2 と St.3 では、継続して低い値を推移していた。一方、影響区の St.4 は、St.1 と類似した傾向を示した。出水④⑤を含む長期継続した増水後には各地点において Chl.a 量が減少

し（8月26日）、これ以降、各地点でChl.a量は増加し、類似した傾向を示すようになり、11月4日には調査期間中最大値を示した。2004年においては、各地点における推移は、2003年とほぼ同様の傾向を示した。ただし、2003年よりもSt.1、St.4においては、現存量が高く、これは、2003年よりも流量が低く、約2m<sup>3</sup>/sの一定流量が流下していたためと考えられる。

#### b) ヤマトビケラ属の個体数の推移

ヤマトビケラ属の個体数は、2003年においては、7月15日あるいは7月29日まで、2004年においては、7月12日まで出現していたが、これ以降出現は認められなかった。出現個体数は、2003年よりも2004年の方が多傾向がみられた（写真2.1.2）。

#### ④ 流砂量と粒径

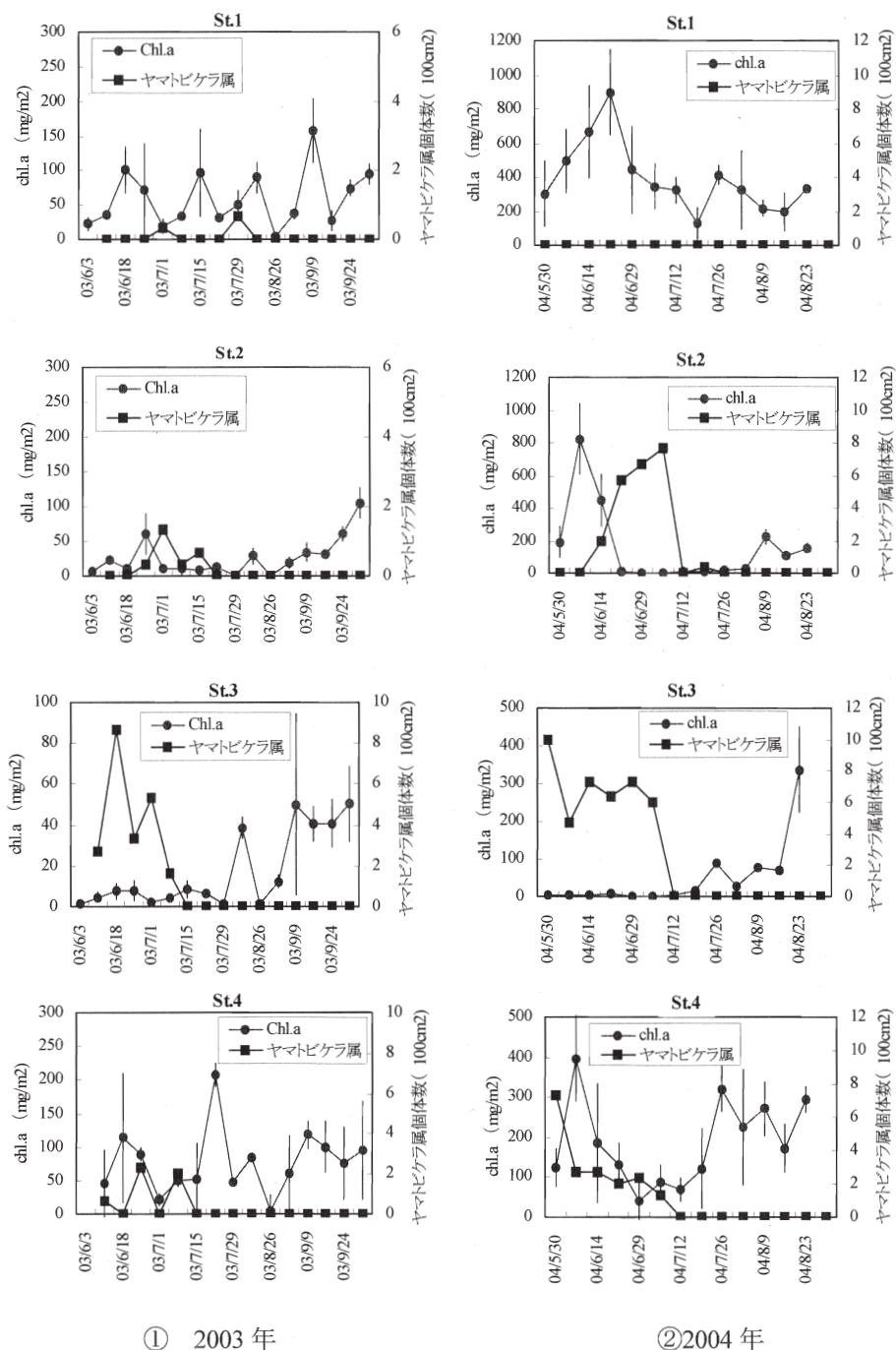


図 2.1.3 クロロフィル a 量とヤマトビケラ属個体数の推移

図 2.1.4 にトラップされた流下土砂量 (100cm<sup>2</sup>、5時間設置) を示した。なお、調査時の流量は、2003年9月2日は増水時で 18.6m<sup>3</sup>/s、これ以外は平常流量 2.1m<sup>3</sup>/s であった。流下土砂量は増水時9月2日は、平常時と比べて多く、また、平常時においては、11月が多く、これ以降は低い値を示した。また、地点別では St.1 よりも St.2、St.3 の方が多い傾向がみられた。粒径については、各地点とも細砂 (0.42~0.072mm) と粗砂 (2~0.42mm) が大半を占め、下層の方が上層よりも粒径が大きい傾向がみられた。

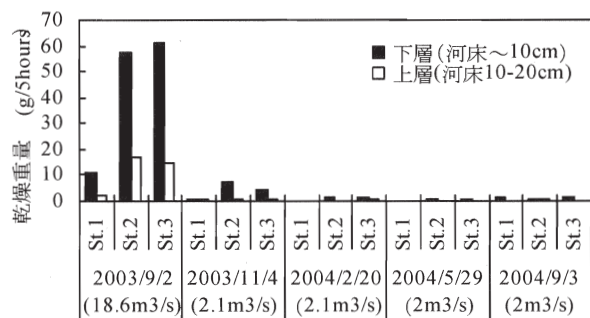


図 2.1.4 流下土砂量 (100cm<sup>2</sup>、5時間あたり)

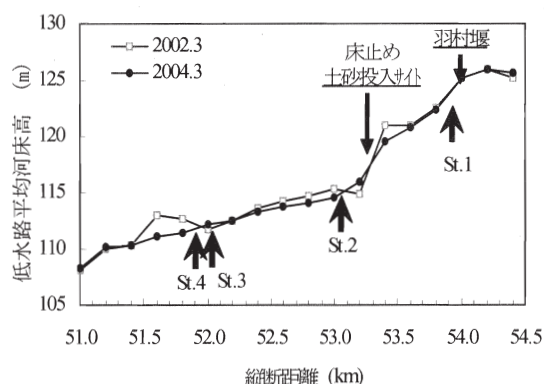


図 2.1.5 河床縦断形の変化



写真 2.1.2 付着藻類を摂食するヤマトビケラ属

### ⑤ 河床変動の傾向

図 2.1.5 に 2002 年 3 月と 2004 年 3 月に実施された縦断測量結果を示した。なお、51.6~51.8km は河

原造成前後の変化が含まれる。各調査地点における河床の変動状況を見ると、St.1 では河床がほとんど変動していないことがわかる。一方、St.2 は土砂投入サイト下流で、河床変動が顕著に生じている区間に位置し、この傾向は服部らの結果<sup>21)</sup>からもよみとれ、調査時に目視によっても観察できるものであった。St.3、St.4 は、図 2.1.5 からは読みとりができなかったため、服部らの結果<sup>21)</sup>からよみとると、2002 年には明瞭な河床変動は生じておらず、2002 年よりも出水規模が小さかった 2003 年においても同様の傾向であることが推測された。

### 4) 考察

2003 年、2004 年において付着藻類の現存量は、影響区 St.2、St.3 は、非影響区 St.1 や影響区 St.4 と比べ、低い傾向がみられた。この要因として、ヤマトビケラ属の摂食圧や、流速、流下土砂量、河床変動等の物理的な作用の関与があげられる。既往研究によっても、ヤマトビケラ属の付着藻類への摂食圧は強いことが報告されており<sup>34)</sup>、ヤマトビケラ属の個体数が確認されている期間は、摂食によって、付着藻類の現存量が低下したことが推察される。また、ヤマトビケラ属は、目視で、2~3mm 程度の小礫を巢材として用いていた。土砂投入による供給された土砂がヤマトビケラ属の個体数の増加をまねいたことが推察される。また、ヤマトビケラ属は流量が安定している条件の下で増加し、かつ、出水の影響を受けやすいため、流量の変動が大きかった 2003 年よりも、流量が安定していた 2004 年の方がより個体数が多かったことが推察された。

ヤマトビケラ属が確認されない期間 (2003 年においては 7 月 15 日あるいは 29 日以降、2004 年においては 7 月 12 日以降) において、特に 2003 年においては、出水が多く、また、流下土砂量が多かったことから、流速、流下土砂量、河床変動等の物理的な攪乱作用が付着藻類現存量に関与していたことが推察される。Biggs は、藻類の増加量は、栄養塩と光に支配され、減少量は攪乱によって支配されるとし<sup>33)</sup>、また、現存量の時間的変動について、相対的に現存量が小さく変動がない場合、頻繁な洪水、もしくは、継続的な土砂輸送によってもたらされるとしている。各地点において、栄養塩と光に違いがみられないことから、2003 年における St.2、St.3 の低い現存量の継続は、出水による攪乱 (出水時の河床変動や流砂の影響) や、平常時にみられた細砂や粗砂の流下が影響していたものと考えられる。流砂の

付着藻類への作用について、Power ほか<sup>27)</sup>は、摩擦によって現存量に影響を及ぼすことを指摘している。また、北村ほか<sup>28)</sup>、山本ほか<sup>29)</sup>の砂礫を用いた藻類除去の実験結果からも、それらに効果的に作用することが指摘されている。

影響区の St. 4 の現存量については、影響区の St. 2 や St. 3 とは異なり、むしろ非影響区の St. 1 と似た動態を示した。この要因として、St. 4 で河床付着物を採取した河床材料の粒径は他の地点よりも大きいため、石上面の高さが平均 12cm(表 2.1.3)であり、他の地点(平均 4cm)よりも高い位置にあるため、流下土砂量が少なく(図 2.1.6)、影響を受けにくい状態であったことが考えられる。河床面からの高さの違いによる影響の受けにくさについては、Biggs も、中小洪水によって砂礫が移動して剥離したとしても、その土砂移動層よりも高い位置にある大きな底質に生えた群集は生存可能であり、そうした群集はより大きな現存量へと成熟すると指摘している<sup>33)</sup>。また、ヤマトビケラ属の個体数が St. 2、St. 3 と比較し少なく、摂食圧が低かったこと、糸状緑藻が他の地点よりも多く(目視より)、摂食しにくかった事などが要因として考えられた。

以上より、多摩川永田地区における土砂投入地点下流においては、付着藻類の現存量が低く抑えられた。そのメカニズムとして、①土砂投入により小礫が供給されたことにより、これを巣材とするヤマトビケラ属の個体数が増加し、その摂食圧により、付着藻類は減少したこと、②出水時の河床変動や、出水によって流下した細粒土砂が、付着藻類に物理的に作用したことが考察された。土砂投入の付着藻類の影響は、物理的な作用という直接的な影響と、細かい河床材料が供給されたことによる底生動物相の変化を介して、影響する間接的な影響があり、これらは、流況と密接に関わっていたことが明らかになった。

##### 5) まとめと今後の課題

本研究では、土砂投入が実施されている多摩川永田地区を対象に、付着藻類への影響を明らかにするため、主に 2003 年 1 月～3 月までに投入された土砂の影響について、2003 年 6 月～11 月、2004 年 6 月～8 月に、土砂投入サイトの上流を非影響区と下流側を影響区として調査を行った。その結果、非影響区と影響区では現存量が異なり、影響区では、現存量が低くなることが明らかになり、ヤマトビケラ属の摂食、出水時の河床変動や流砂量等の物理的な作

用が関与していることが考察された。また、ヤマトビケラ属の増加は、ヤマトビケラ属の巣材となる小礫が、土砂投入により供給されたことが関与しているものと考えられた。

今回は付着藻類への影響について着目したが、課題は残る。今後、これらの課題を解明し、さらにハビタットの変化を捉えながら、底生動物群集や魚類群集への影響についても整理し、河道の修復技術としての土砂投入のあり方を検討するための知見を得ていきたいと考えている。

## 2. 1. 2 ハリエンジュの分布拡大とその要因 1) はじめに

多摩川におけるハリエンジュ (*Robinia Pseudoacacia*) は、1923 年(大正 12 年)の関東大震災における崩壊地の治山事業として、1935 年(昭和 10 年)から 1942 年(昭和 17 年)に上流の丹波山村塩の山に植林されたもので、復旧に大きく貢献した<sup>35)</sup>。しかし、現在も下流へと分布域を拡大し<sup>36)</sup>、本来の河川環境を変質させている一要因となっている。このように河道に樹木が拡大してきている河川は少なくなく、河川環境の保全及び治水上の観点から大きな課題となっている。これまで、ハリエンジュの分布、生育環境、種子分布等の植物動態<sup>37)</sup>などについては研究が行われているが、空間的かつ経時的なハリエンジュの分布拡大シナリオについて、立地や植生遷移過程を加味した検討は行われていない。これを明らかにすることは、今後、ハリエンジュへの対策を立案する際の基礎資料になるものと考えられる。

そこで本研究では、永田地区におけるハリエンジュ群落を対象に①空間的・経時的な分布拡大とその要因、②ハリエンジュ群落に至る植生遷移過程について明らかにすることを目的とする。

## 2) 方法

### ①ハリエンジュ群落の空間的・経時的分布拡大

永田地区に生育しているハリエンジュについて毎木調査を行い、樹齢を推定することで、空間的・経時的な分布状況を把握することとした。調査対象は、DBH(胸高直径:根元から高さ約 120cm の直径) 5cm 以上、または幹周り 15cm 以上の個体とし、現地では DBH を測定するとともに、生育位置について、既設の 4 級基準点と距離標を与点として測量を実施し、座標値を得た。なお、調査対象とするハリエンジュは、明らかに萌芽と判断できる個体を除き、地上部の幹を 1 個体とした。

樹齢の推定は、浅野<sup>38)</sup>が本地域のハリエンジュの胸高直径と生長錘による年輪測定 (n=199) から得た以下の回帰式を用いて算出した。

$$F(\chi) = 0.34\chi + 4.60, \quad F(\chi) : \text{推定樹齢}, \chi : \text{胸高直径 (cm)}, R^2 = 0.51$$

これらによって取得されたハリエンジュの位置、樹齢データを GIS データベース化した。

## ② ハリエンジュ群落に至る植生遷移

1977 年から 2001 年にかけて作成された 6 時期の植生図<sup>39)~44)</sup>を GIS データ化し、作成時期が連続した 2 時期の植生図をオーバーレイし、植生遷移を解析した。また、ハリエンジュの毎木データと、1977 年、1983 年、1994 年、1998 年及び 2000 年秋に調査された 5 時期の現存植生図を重ね合わせ、ハリエンジュの定着場所における植生群落の変遷を読み取り、そのパターンを類型化した。

## 3) 結果と考察

### ① ハリエンジュ群落の空間的・経時的分布拡大

DBH=5cm 以上のハリエンジュは 6,954 個体確認され、このうち、単木状個体数は 5,875 本、萌芽状個体数は 1,078 本であった。密度は 167.9 本/ha であった。なお、本地区のハリエンジュの分布については 1996 年にも実施されており、根元直径 5cm 以上が 6,126 個体確認されており<sup>37)</sup>、これらの結果とほぼ一致していた。

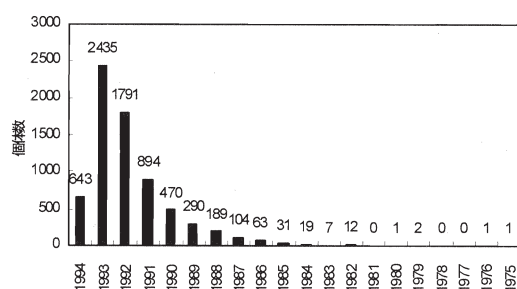


図 2.1.6 ハリエンジュの推定定着年

樹齢の推定式から得られたハリエンジュの推定定着年と個体数を図 2.1.6 に示した。ハリエンジュの最初の侵入は、1975 年であったことが推定された。その後、1981 年まで侵入数は 5 個体にすぎないが、1982 年には 12 個体が侵入し、これ以降分布が拡大し、1993 年には最も多い 2,435 個体となった。ただし、永田地区におけるハリエンジュの最初の侵入については、現地調査において、明らかに枯死しているものや倒伏しているものは対象外としているため、この中に、1975 年以前に定着し、既に老齢化し倒伏

した可能性があるが、これを特定することは難しい。なお、ハリエンジュは一般に老齢化すると折れやすく、また、30 年生程度になると根茎が腐食し、倒伏しやすくなる性質が知られている。

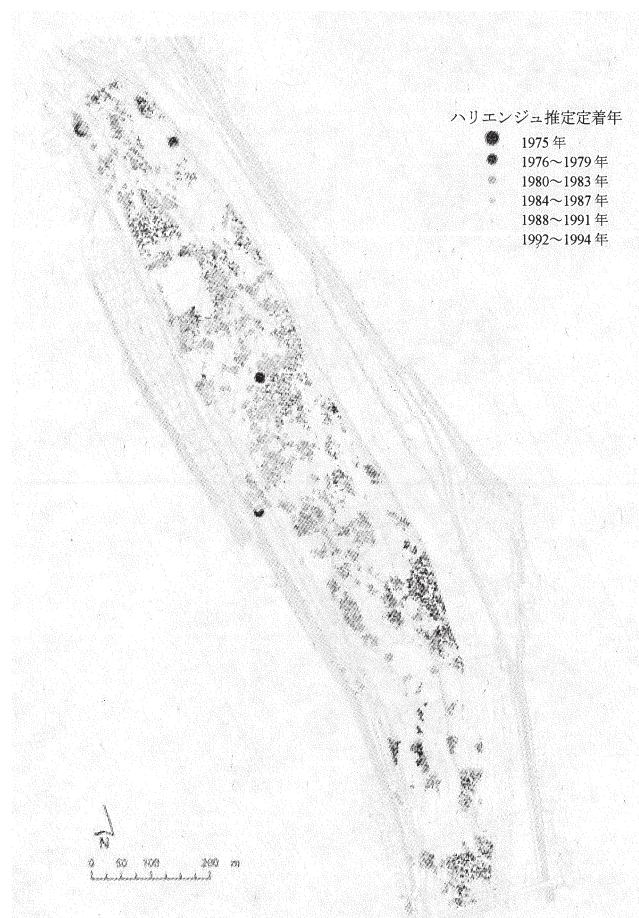


図 2.1.7 ハリエンジュの推定定着年

図 2.1.7 にハリエンジュの分布位置と推定樹齢を示した。1975 年に侵入した 1 個体と 1976 年に侵入した 1 個体は、いずれも堤防のり面に立地していることから、人為的に持ち込まれた可能性が考えられる。次に 1979 年に侵入した 2 個体と 1980 年に侵入した 1 個体は、既に侵入している個体から 100m 以上離れており、水平根による根萌芽によるものとは考えにくい。また、種子散布はほとんどが林内または林縁である<sup>37)</sup>ことから、流水により運搬された種子あるいは植物体の一部からの発生した可能性や埋土種子からの発芽などが考えられる。その後、1982 年には比較的多い 12 個体が侵入した。これらも、それ以前に定着している個体とそれほど隣接していないことから、流水による運搬が推測される。そして

これ以降、分布の拡大がはじまる。分布の拡大をみると、1980年～1983年に定着した個体は52.4～52.9kmに多く侵入し、これを中心に樹齢1984～1987年、1988年～1991年の定着した個体の分布域が存在することから、水平根による分布域の拡大が推測される。また、1992年～1994年に定着した個体は、51.7～51.8km、52.1～52.3km、53.0km地点に高密度で分布していることが特徴的である。これらは、総個体数の約70%にのぼる。

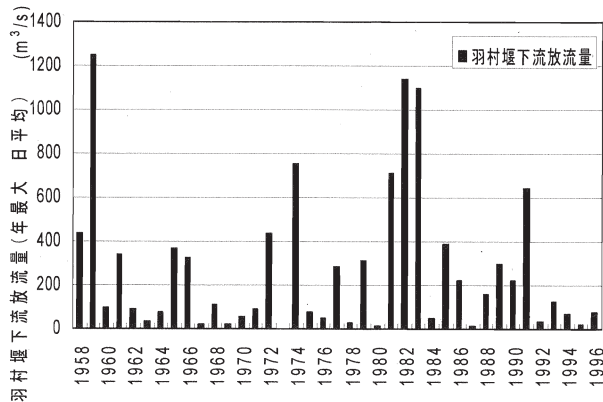


図 2.1.8 堰下流放出流量 (年最大日平均流量)



写真 2.1.3 1979年撮影空中写真



写真 2.1.4 1984年撮影空中写真

1979年、1982年の侵入の要因となったと考えられる流水による種子や植物体の運搬については、両年とも出水が生じており(図2.1.8)、これが関与している可能性が考えられる。また、埋土種子については、それ以前の1974年にも大規模な出水があり、高水敷には土砂が堆積していることから、この関与も考えられる。そこで、1979年、1984年に撮影された空中写真(写真2.1.3、4)において、洪水痕跡

がある領域と生育位置とを照らし合わせた。いずれの地点も明らかに洪水の影響を受け裸地化している領域にはない。しかし流水によって運搬された種子や植物体の一部はそのような場所ではなく、むしろごく浅く冠水する領域や冠水した領域の外縁に漂着する可能性が高いと考えられ、これを明らかにするためには、出水時の冠水域の推定や微地形との関係、種子の漂着特性について検討を行う必要がある。また、それ以前の1974年にも大規模な出水があり、高水敷には土砂が堆積していることから、埋土種子についても検討が必要である。

次に、1982年以降の分布拡大の要因についてみてみる。これまで、李ほか<sup>27)</sup>は、樹林化の最も重要な要因として表層細粒土層の堆積をあげている。李ほか<sup>45)</sup>の研究によれば、永田地区52.4km高水敷の左岸寄り部分の細粒土砂の堆積は、1981年、1982年の出水によって礫が1m程度堆積し、その後1983年に出水によってもたらされたことを示している。また、星野<sup>46)</sup>は、永田地区のハリエンジュの分布拡大には、根萌芽を発生させる水平根の有無が重要で、表層細粒土層が5cmより深く堆積することにより、その伸長が可能になることを報告している。これらの立地の変化からも1982年以降の拡大は、土砂の堆積による水平根の伸長による根萌芽からの拡大に起因したことが支持される。

以上のように、永田地区におけるハリエンジュは、1970年代後半から1980年前半の侵入をきっかけに分布が拡大したことが概ね示され、空間的・経年的な分布の拡大要因が推察できた。

## ② ハリエンジュ群落に至る植生遷移

1977年から2001年までの24年間で、ハリエンジュ群落に移行した植生タイプの面積構成を図2.1.9に示した。ハリエンジュ群落に移行した植生タイプは、「ツルヨシ群集」が25%、「ススキ群落」が24%で、約半数を占めた。次いで、「イヌコリヤナギ群集など」が12%、「オギ群集」が7%、「ヨシ群落」が6%を占めた。すなわち、ハリエンジュ群落に移行した植生タイプの多くは、ツルヨシ群落やススキ群落をはじめとするイネ科多年生草本とヤナギ低木群落であることが明らかになった。また、表2.1.3に、ハリエンジュ群落に移行した主要な植物群落の構成について示した。



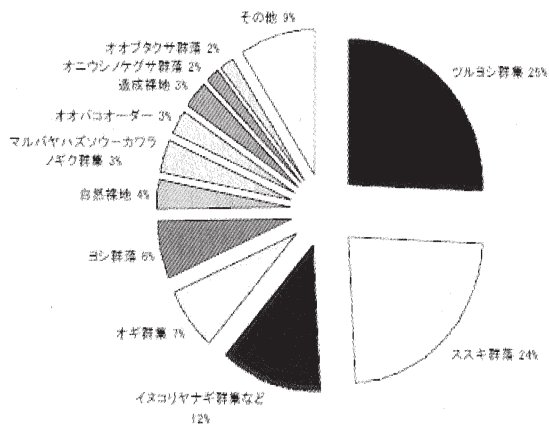


図 2.1.9 ハリエンジュ群落に移行した植生タイプ

表 2.1.3 ハリエンジュ群落に移行した主要な植物群落の構成

植生図調査年	ハリエンジュ群落の面積 (m <sup>2</sup> )	増加率	ハリエンジュ群落に移行した植物群落
1977	2,428	—	1.トダシバ群落、ススキ群落 (4,000m <sup>2</sup> ) 2.イヌコリヤナギ群落など (1,125m <sup>2</sup> ) 3.オオバコオーダー (975m <sup>2</sup> ) 4.マルバヤハズソウカワラノギク群落 (850m <sup>2</sup> ) 5.ツルヨシ群落 (850m <sup>2</sup> )
1983	9,583	1.26	1.ツルヨシ群落 (19,400m <sup>2</sup> ) 2.トダシバ群落、ススキ群落 (13,875m <sup>2</sup> ) 3.イヌコリヤナギ群落など (8,675m <sup>2</sup> ) 4.ヨシ群落 (7,575m <sup>2</sup> ) 5.自然裸地 (4,600m <sup>2</sup> )
1994	75,758	1.21	1.ツルヨシ群落 (12,625m <sup>2</sup> ) 2.トダシバ群落、ススキ群落 (9,450m <sup>2</sup> ) 3.オギ群落 (6,200m <sup>2</sup> ) 4.イヌコリヤナギ群落など (5,975m <sup>2</sup> ) 5.オニウシノケグサ群落 (1,750m <sup>2</sup> )
1998	79,989	1.01	1.トダシバ群落、ススキ群落 (4,175m <sup>2</sup> ) 2.オオブタクサ群落 (2,150m <sup>2</sup> ) 3.ツルヨシ群落 (1,625m <sup>2</sup> ) 4.イヌコリヤナギ群落など (725m <sup>2</sup> ) 5.ヨシ群落 (475m <sup>2</sup> )
2000	85,005	1.03	1.トダシバ群落、ススキ群落 (1,100m <sup>2</sup> ) 2.ツルヨシ群落 (675m <sup>2</sup> ) 3.オギ群落 (450m <sup>2</sup> ) 4.イヌコリヤナギ群落など (400m <sup>2</sup> ) 5.キネノコロメヒシバ群落 (375m <sup>2</sup> )
2001	69,109	0.81	

総計 6,953 本のハリエンジュの毎木位置と、5 時期分の現存植生図をオーバーレイした結果、ハリエンジュの生育位置の植生変遷パターンは、ハリエンジュの全本数の 30% が 22 通り、50% が 75 通り、70% が 188 通り、全体では 1,025 通りの植生変遷パターンに類型化された。表 2.1.4 に、ハリエンジュ群落に至る植生遷移パターンの一部（全体の 20%、1,390 本分）を示した。1977 年に「マルバヤハズソウカワラノギク群落」であった立地に定着しているハリエンジュが特に多く、その本数は 1,983 本で、全体の 29% に相当していた。特に、マルバヤハズソウカワラノギク群落が、「ススキ群落」、「ツルヨシ群落」、「イヌコリヤナギ群落」などを経てハリエンジュ群

落へと変遷したパターンが多い。この他、1977 年にマルバヤハズソウカワラノギク群落であった立地が直接ハリエンジュ群落に変遷したものと、「ツルヨシ群落・オギ群落」を経て「ハリエンジュ群落」に変遷したものも多い。このように、群落を形成して定着した個体が多い一方で、ハリエンジュが群落を形成することなく、1977 年に「マルバヤハズソウカワラノギク群落」であった立地が、「イヌコリヤナギ群落」、「ススキ群落」、「オギ群落」、「ツルヨシ群落」に変遷した立地に、孤立木や小規模な樹林として定着しているハリエンジュ個体も見られた。ハリエンジュが群落を形成して定着した立地と、群落を形成せずに定着している立地が生じた原因については、植生の変遷に加えて、河道内の物理的な環境特性も踏まえて検討する必要がある。これによって、外来種であるハリエンジュの分布拡大を抑制する環境条件に関して知見が得られる可能性がある。

#### 4) まとめと今後の課題

本研究は、永田地区におけるハリエンジュ群落を対象に空間的・経時的な分布拡大とその要因、ハリエンジュ群落に至る植生遷移過程について明らかにすることを目的として実施した。

毎木調査の結果、胸高直径 5cm 以上の個体は 6,953 個体確認され、概ね 1975 年から侵入が開始されたことが明らかになった。また、その後の急激なハリエンジュ群落の拡大は、1970 年代後半から 1980 年前半までの侵入した個体からの水平根、根萌芽により分布拡大であることを定量的に示した。

ハリエンジュ群落に至る植生遷移については、ススキ群落とツルヨシ群落が他の植物群落のイネ科多年生草本群落と、イヌコリヤナギなどヤナギ類低木群落及び、外来植物のオオブタクサ群落からの移行が主なものであった。また、ハリエンジュの定着場所における植物群落の変遷を読み取り、類型化したところ、1983 本 (29%) のハリエンジュは 1977 年にマルバヤハズソウカワラノギク群落であった立地に定着し、ススキ群落、ツルヨシ群落、イヌコリヤナギ群落などを経てハリエンジュ群落へと変遷したパターンが多く、その他、直接ハリエンジュ群落に変遷したものと、ツルヨシ群落・オギ群落を経てハリエンジュ群落に変遷したものも多いことを明らかにした。

表 2.1.4 ハリエンジュ生育位置における植物群落の変遷

本数	現存植生図凡例				
	1977年植生	1983年植生	1994年植生	1998年植生	2000年植生
236	マルバヤハズソウ-カワラノギク群集	トダシバ群落, ススキ群落	ハリエンジュ群落	ハリエンジュ群落	ハリエンジュ群落
198	マルバヤハズソウ-カワラノギク群集	ツルヨシ群集	ハリエンジュ群落	ハリエンジュ群落	ハリエンジュ群落
173	マルバヤハズソウ-カワラノギク群集	イヌコリヤナギ群集など	ハリエンジュ群落	ハリエンジュ群落	ハリエンジュ群落
144	ツルヨシ群集	ツルヨシ群集	オギ群落	ハリエンジュ群落	ハリエンジュ群落
129	マルバヤハズソウ-カワラノギク群集	ツルヨシ群集	オギ群落	ハリエンジュ群落	ハリエンジュ群落
125	トダシバ群落, ススキ群落	ツルヨシ群集	ハリエンジュ群落	ハリエンジュ群落	ハリエンジュ群落
112	マルバヤハズソウ-カワラノギク群集	マルバヤハズソウ-カワラノギク群集	ハリエンジュ群落	ハリエンジュ群落	ハリエンジュ群落
96	アキノエノコログサ-コセンダングサ群集	トダシバ群落, ススキ群落	ハリエンジュ群落	ハリエンジュ群落	ハリエンジュ群落
90	マルバヤハズソウ-カワラノギク群集	造成裸地(コスズメガヤ群落を含む)	ハリエンジュ群落	ハリエンジュ群落	ハリエンジュ群落
87	トダシバ群落, ススキ群落	ハリエンジュ群落	ハリエンジュ群落	ハリエンジュ群落	ハリエンジュ群落

ここでは、ハリエンジュ群落の分布拡大について、主に植物遷移過程に着目した。しかし、その立地環境である河道内微地形は、出水による侵食・堆積により変化し、さらに成立した植物が抵抗となり、細粒土砂の堆積を促進する等、流水、土砂、植物が相互に作用を及ぼしながら空間的・経時的に変化する。また、流水は、種子や植物体の一部を運搬するなど、植物の分布域を拡大させる重要な機会となる。河道内における植物動態のモデル化には、植生遷移の他に、これらを組み込むことが必要である。今後は、これらを含めた解析を行い、ハリエンジュの分布拡大を抑制する環境条件に関する知見を得ていきたい。

## 2. 2 千曲川におけるギンブナの産卵行動と外的要因との関係性分析

### 2. 2. 1 はじめに

魚類群集の多様性を維持するには、魚類群集を構成する各魚種の個体群が生活史の各段階で必要とする資源（生息場所、餌等）を必要に応じ利用できることが必要である<sup>47)48)</sup>。生活史の中でも特に産卵行動は、魚類群集の多様性及び群集を構成する個体群維持の第一段階であり極めて重要である。産卵期を迎えた魚類が産卵に適した場所（以下、産卵場）へ任意に移動し産卵できる環境づくりは河川生態系保全にとって重要な課題である。

河川に生息する魚類の一部には、産卵期に通常的生活圏から周辺環境に移動し産卵を行う種（以下、魚類）がいることが知られている。これらの種は産卵期の小中出水をきっかけに本流と一時的流域（以下、TWA とする）の間に形成された流路（以下、出水時流路）を利用し TWA へ移動し産卵をすること

が知られている。これらの魚種には、本流と TWA が接続すること、TWA 内に産卵に適した環境があることが再生産する上で極めて重要であるとされている<sup>49)51)52)</sup>。既往研究が指摘する現象は、河川生態系の保全、場の多様性の保全を考える上で重要な示唆を与えている。

これら知見を河川改修事業に反映するには、既往研究の知見に加え水理学・河川工学的な分析が必要となる。つまり、魚類の産卵行動に関する知見を水理学的な分析（出水による接続頻度、出水時流路及び TWA 周辺の流速、水深等）と関係づけて再理解し河川計画に生かしていく必要がある。

このような背景から、本研究では信濃川水系千曲川で TWA が産卵場として利用される実態をギンブナ (*Carassius auratus langsdorffii*) を指標種に現地調査を通じ評価すると同時に、出水時の本流との接続頻度、出水時の接続状態等を水理計算結果で詳細に再現し産卵行動との関係性を評価する。その後、TWA が産卵場として機能するために必要な物理条件を抽出し、TWA に産卵場としての機能を期待する場合に物理条件としてどのような点に配慮する必要があるかを提言することを目的とする。なお本論文で「産卵場」という場合にはギンブナが産卵場所として利用する場所を指すものとする。

### 2. 2. 2 研究の方法

#### 1) 調査地の概要

調査は 2005 年 5 月から 2005 年 8 月に信濃川水系千曲川で行った。本河川は流域面積 7163km<sup>2</sup>、流路延長 214km の大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。

調査地は千曲川の中流部に位置する鼠橋付近（長野県埴科郡坂城町、東経 138° 12' 4.6"、北緯 36° 25' 14.4"、以下、調査地とする）で行った。調査地の河床は、主に礫で構成され河床波形態は複列砂州である。

調査対象とした TWA は、ギンブナの移動、本流との接続頻度が異なる左岸高水敷上の TWA4 箇所と右岸河岸沿いの 1 箇所とした。左岸側の TWA は高水敷の内部にある TWA(TWA1)、左岸砂州上にある TWA2、3、4、右岸河岸沿いの TWA5 とした(図 2.2.1)。但し、TWA3 は伏流水により小規模な流路で TWA4 と接続していた。景観的にみて本調査地点では TWA1～3 はタマリ、TWA4、5 はワンドと分類できる。

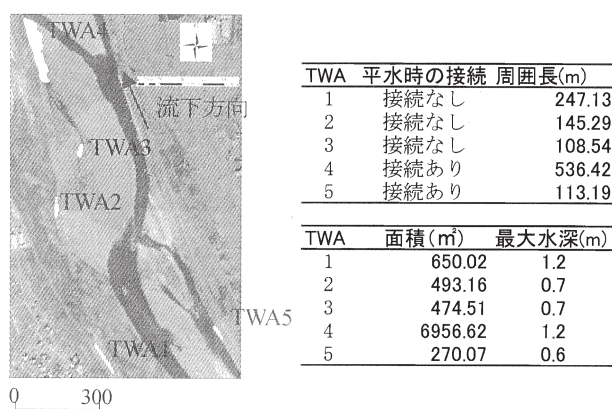


図 2.2.1 調査地の概要

千曲川流域では 2004 年 12 月から 2005 年 6 月末まで、流量変化が少なく小規模な出水も確認されなかった。調査地でも 2005 年に入ってから 6 月 30 日に初めて小規模な出水を記録し、7 月 4 日にはじめて調査地内で流量 380m<sup>3</sup>/s 程度の流量が確認された。調査地内の流量推定方法は後述する。

調査地では本流と TWA でウグイ、オイカワ、ギンブナ、アブラハヤ、ニゴイ、モツゴを主とする 10 科 24 種の魚類が確認された<sup>52)</sup>。本流ではウグイ、オイカワが優占し、TWA ではアブラハヤ、ギンブナ、トウヨシノボリ、ドジョウ、ニゴイが本流よりも多くの生息が確認された。ギンブナは本流、TWA とともに生息が多数確認されている。

## 2) 現地調査の方法

TWA の本流との接続状態、産卵基質である水際植生の状況、及び TWA 内の魚類群集、特に各魚種の

稚魚・仔魚の生育状況を把握する目的で TWA 1～5 内の出水痕跡の確認、魚類採捕調査を行った。調査日時を表 2.2.1 に示す。

表 2.2.1 調査日時と調査概要

TWA	5月27日	6月29日	7月27日	8月4日
1	○	○	○	○
2	○	○	○	○
3	○	○	○	○
4	○	○	○	○
5	○	○	-	○

○：調査実施  
-：出水のため調査実施せず

TWA と本流の接続状態は TWA 内部及び周辺部の出水痕跡、現地状況等を確認し本流との接続の有無を確認した。魚類採捕は各 TWA 内部を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、10 分間)による採捕を行った。また、各 TWA 内を調査員 2 人、タモ網(目合 3mm)で 15 分採捕調査を行った。両手法とも TWA 内で捕獲圧が均一になるように留意し採捕した。各調査日時の捕獲圧を上記の条件で統一した。採捕した魚類は持ち帰り体長、湿重量を実験室内で計測し集計した。

## 3) データ解析

### ①成長曲線の作成及び成長曲線を用いた産卵時期の推定

TWA に生息する魚類群集の内、ギンブナの産卵時期を推定するために既往研究<sup>53)</sup>からギンブナの成長曲線(ギンブナの体長と産卵からの日数の関係、以下、成長曲線)を作成した。ギンブナの産卵行動は概ね 4 月上旬<sup>53)</sup>からとされている。調査期間を考慮すると 4 月上旬に産卵した場合、最大で産卵から約 120 日間成長期間があることを考慮し、産卵から 120 日目の体長以下の個体を抽出し作成した成長曲線をもとに産卵時期を推定した。

### ②流量観測所水位データと調査地の流量の水位—流量曲線の作成と流量発生頻度の算定

調査地の流量を算定するため、最寄の流量観測所である生田流量観測所の水位データ(h)から調査地の流量(Q´)の h-Q´ 曲線を以下の手順で作成した。①2000 年～2003 年までの生田流量観測所の h-Q (但し Q は生田流量観測所の流量) 曲線を作成した。② GIS により生田流量観測所と調査地の流域面積を算出し流域面積比を算出した。③生田流量観測所の Q に流域面積比を乗じ調査地の流量 Q´ とし h-Q´ 曲

線を作成した。④その後、土木研究所が開発した分布型流出モデルの WEP モデル<sup>54)</sup>により、鼠橋地区の流量を算出しその妥当性を検証し良好な結果を得たため③で得た h-Q<sup>1</sup> 曲線を利用した。h-Q<sup>1</sup> 曲線作成後、2005 年 1 月 1 日から 8 月 4 日までの流量の発生頻度を集計し後述する水理計算結果を合わせ本流との接続頻度を算出した。

### ③水理計算による TWA の接続頻度、接続時の水理状況の推定

調査地の出水時の流況再現、本流と TWA の接続状態再現及び接続頻度の算定、出水時の TWA 及び冠水域の流速を算定する目的で調査地内の水理計算を行った。平水時から出水時までの幅広い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>55)</sup>を用いて定常計算を行った。

河床形状データは調査地のレーザープロファイラによる測量成果、水域内の河床高現地測量データを基に内挿し流下・横断方向ともに 6m ピッチの河床高データを整備した。流量データは、以下の条件を設定した。上流端流量データは、調査地周辺の流量観測データがないため定常流量 (Q=40 m<sup>3</sup>/s、50 m<sup>3</sup>/s、以降 50 m<sup>3</sup>/s 刻みで 400 m<sup>3</sup>/s まで) の流量を与えて計算した。調査地の平均流量は約 15 m<sup>3</sup>/s で 40 m<sup>3</sup>/s は平水よりも 0.5m 程度水位が上昇した状態である。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。水理計算の妥当性は、7 月 27 日の現地調査時に 40~50m<sup>3</sup>/s の出水状態を現地観測した。現地観測の結果、冠水域は水理計算結果と良好に合致し、水理計算結果は冠水域、冠水状態を良好に再現していると考えられた。

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、水深を算出し本流と一時的水域の接続時、水理状態を分析した。同時に各 TWA の位置も GIS 上に図化し TWA が出水時の水域に完全に水没した状態を本流との接続状態とし流量発生頻度と合わせ本流と TWA の接続頻度を算出した。

また、TWA 内の出水時の平均流速を算定する目的で水理計算結果を GIS で集計し、出水流量と TWA 内の平均流速の相関図を TWA ごとに作成した。

## 2. 2. 3 結果

### 1) 魚類現地調査の結果

魚類調査により、オイカワ 319 匹、ニゴイ 67 匹を含む合計 679 匹の稚魚・仔魚が確認された。ギンブナは鯉耙が 41~57 を判読でき正確な同定が出来る 29 匹のみを解析に使用した。ギンブナと類似する魚類は、解析に使用したものを除き 29 匹確認できた。

表 2.2.2 にギンブナの採捕個体数を示す。ギンブナの捕獲結果は、TWA1、TWA2~4、TWA5 で異なった。TWA1 では調査期間中ギンブナは採捕されなかった。TWA 2~4 では 7 月 27 日から採捕された。TWA 5 では 5 月 27 日に調査からギンブナが捕獲された。

表 2.2.2 ギンブナの採捕結果

TWA	5月27日		6月29日		7月27日		8月4日	
	A	B	A	B	A	B	A	B
TWA1								
TWA2					3		11	
TWA3					3	1		
TWA4					1	2		
TWA5	1		1				3	3

A: 孵化後1年未満  
B: 孵化後1年以上

図 2.2.2 に既往研究から作成した成長曲線<sup>53)</sup>、表 2.2.3 にギンブナ個体の産卵時期を示す。TWA2 で捕獲された個体は産卵後 30 日~45 日程度、産卵後 32 日程度の魚類が最も多かった。産卵時期の推定では 2005 年 7 月 1 日前後と推定された。TWA3 で捕獲された個体は産卵後 32 日から 45 日程度の体長の個体、産卵時期の推定では 2005 年 6 月 15 日前後と推定された。TWA4、5 では産卵後 1 年後及び産卵後 30~40 日程度の個体が確認された。産卵後 30~40 日程度の個体では産卵時期の推定では 2005 年 6 月 15 日前後と推定された。

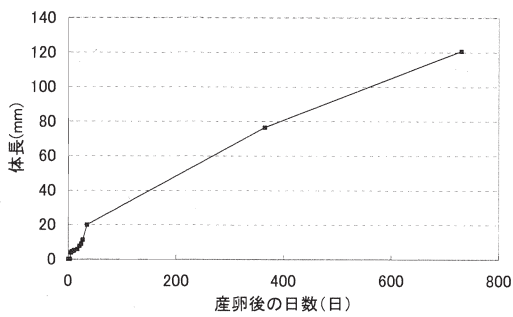


図 2.2.2 ギンブナの成長曲線

表 2.2.3 各 TWA におけるギンブナの推定産卵時期

TWA	体長(mm)	個体数	産卵推定時期	採捕日
2	16	1	2005/7/7	2005/8/4
	17	3	2005/7/6	2005/8/4
	19	1	2005/6/25	2005/7/27
	19	3	2005/7/3	2005/8/4
	24	2	2005/6/30	2005/8/4
	25	1	2005/7/1	2005/7/27
	27	1	2005/7/1	2005/7/27
	28	1	2005/6/18	2005/8/4
	29	1	2005/6/17	2005/8/4
3	27	1	2005/6/23	2005/7/27
	28	1	2005/6/10	2005/7/27
	33	1	2005/6/5	2005/7/27
4	35	1	2005/6/22	2005/8/4
5	32	2	2005/6/15	2005/8/4
	33	1	2005/6/14	2005/8/4

2) 水理計算による一時的水域の冠水状態及び接続頻度の算定結果

図 2.2.3 に各出水流量における調査地の冠水状態のうち明瞭な変化を示した出水流量である  $Q=40$ 、 $200$ 、 $350 \text{ m}^3/\text{s}$  の冠水状態を示す。 $Q=40 \text{ m}^3/\text{s}$  では TWA3 が本流と出水により接続した。左岸高水敷の低地が冠水し本流から水がせき上げにより流入する出水時流路で TWA3 付近が接続した。高水敷の冠水域内に TWA3 が完全に沈み冠水域の入り江の一部となった。 $Q=200 \text{ m}^3/\text{s}$  では流量の増加と共に出水時流路・冠水域が更に拡大し TWA2 が接続した。一方、 $Q=350 \text{ m}^3/\text{s}$  では冠水状態に大きな変化が見られる。左岸高水敷の砂州上流から本流の流れが越流し大規模な冠水域が生じ水深も  $1\text{m}$  以上の部分が増加した。その結果、TWA3、4 は冠水域の中央に水没した。一方、TWA2 は小規模な出水時流路の一部として出水時流路の河岸部に水没した形になった。水理計算結果から、 $Q=40 \text{ m}^3/\text{s}$  で TWA3 が、 $Q=200 \text{ m}^3/\text{s}$  で TWA2 が本流と接続し、TWA1 は  $Q=450 \text{ m}^3/\text{s}$  の流量では本流と接続しなかったと考えられた。

次に、表 2.2.4 に調査地の流量の算定結果から  $Q=40 \text{ m}^3/\text{s}$  及び  $Q=200 \text{ m}^3/\text{s}$  以上の回数及び TWA1~5 の接続回数及び 2005 年に初めて本流と接続したと推定される日時を示す。TWA3 は TWA2 に対し本流と出水時より頻繁に接続していたと考えられた。

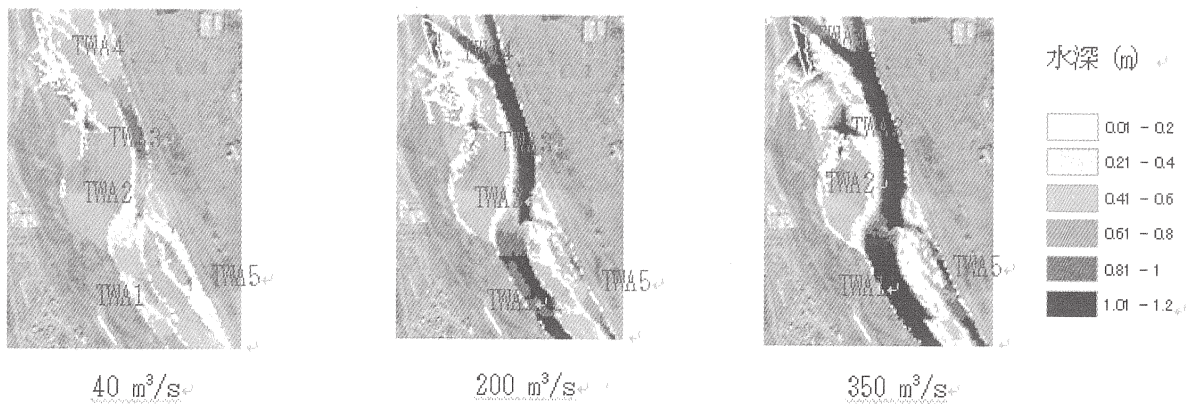


図 2.2.3 調査地の冠水状態

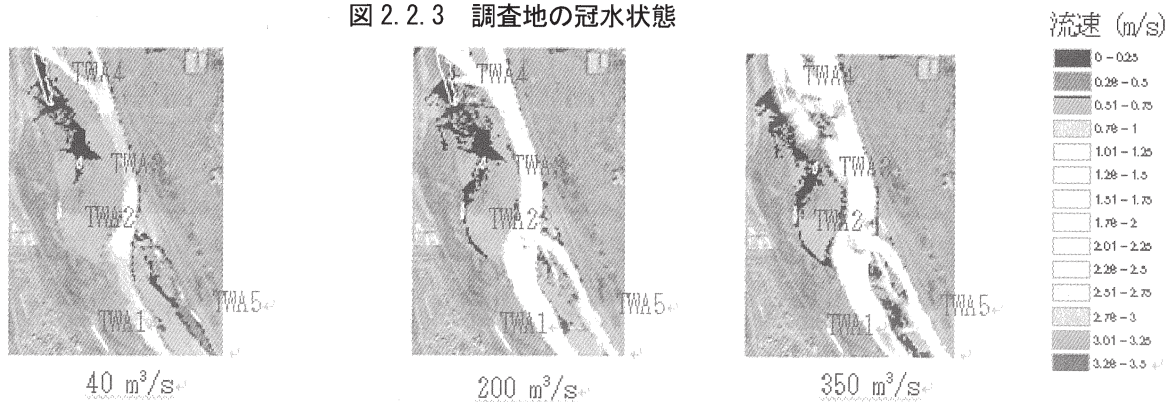


図 2.2.4 調査地の流速分布

表 2.2.4 各 TWA の接続頻度、初回の接続日時

TWA	Q	接続回数	産卵期初接続
1	1500	0	-
2	200	4	2005/7/4
3	40	30	2005/6/29
4		本流と常時接続	
5		本流と常時接続	

### 3) 水理計算による一時的水域の接続時の水理状況の算定結果

図 2.2.4 に  $Q=40, 200, 350 \text{ m}^3/\text{s}$  の冠水状態における調査地内の流速分布を示す。 $Q=40 \text{ m}^3/\text{s}$  では冠水域及び出水時流路内では流速は約  $0.25 \text{ m/s}$  以下と遅くほぼ止水域に近い状態であった。同様に TWA3 周辺でも流速は遅かった。

$Q=200 \text{ m}^3/\text{s}$  でも冠出水時の流路内、TWA3 周辺での流速は約  $0.5 \text{ m/s}$  以下と遅いが、 $Q=40 \text{ m}^3/\text{s}$  と比較して冠水域の面積が拡大し冠水域内に流速が  $0.5 \text{ m/s}$  以上の箇所が増加した。

$Q=350 \text{ m}^3/\text{s}$  では冠水域内の流速は更に増加し TWA3、4 の周辺では流速が約  $1 \text{ m/s}$  程度の流速域が増加した。

図 2.2.5 に出水流量と TWA 内の平均流速の相関図を示す。TWA ごとに異なる変化を示した。TWA4、5 は  $Q=150 \text{ m}^3/\text{s}$  以上では急速に TWA 内の平均流速が増加し  $Q=350 \text{ m}^3/\text{s}$  では約  $0.8 \text{ m/s}$  以上であった。TWA2、3 は TWA4、5 程顕著な流速の増加がなかった。流速の増加がみられた TWA2 でも  $Q=400 \text{ m}^3/\text{s}$  でないと約  $0.2 \text{ m/s}$  であった。

TWA2 は  $200 \text{ m}^3/\text{s}$  以上でも顕著な流速の増加はなく約  $0.6 \text{ m/s}$  であった。

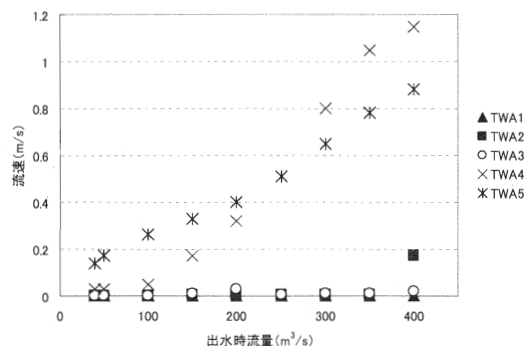


図 2.2.5 出水流量と TWA 内の平均流速の相関図

## 2.2.4 考察

### 1) TWA がギンブナの産卵場として機能するための本流との接続の重要性

ギンブナの稚魚・仔魚確認は TWA ごとに異なる変化を示し、本流との接続がある TWA の方がギンブナの稚魚・仔魚の確認数が多かった。このことは TWA の接続回数が産卵場として機能するための重要な条件であることを示し既往研究の結果と一致している。特に顕著な例は TWA 1、2、4、5 である。TWA1 では調査期間中には一度も本流との接続がなくギンブナの稚魚・仔魚の確認はなかった。TWA2 では、本流と初めて接続のあった 7 月 4 日の出水以降ギンブナの稚魚・仔魚の確認が見られる。TWA2 では接続前、ギンブナの産卵能力のある個体(以下、親個体)の確認もなく TWA 内に生息したギンブナが産卵したとは考えづらく、7 月 4 日の出水に乗じギンブナの親個体が移動し TWA2 内部で産卵したと考えることができる。一方、本流と常時接続する TWA5 ではギンブナは 5 月 27 日の調査から親個体、稚魚・仔魚のいずれかが継続的に確認されている。TWA4 でも他の TWA では採捕されることが少ない親個体が 2 個体捕獲されている。TWA4 と TWA5 の採捕結果の違いは、TWA4 は隣接する空間が流速の早い瀬であるのに対し、TWA5 周辺には低流速で水深が深いギンブナが選好しそうな空間多いためと考えられる。ギンブナの親個体が TWA5 周辺に多く生息しアクセスしやすいため多くのギンブナの稚魚・仔魚が確認されたと考えられる。

TWA4、5 は本流から常時簡易に移動できるため TWA2、3 のように出水による接続を待たず小規模な出水を契機に TWA へアクセスし産卵できるため継続的な個体の確認があったと考えられる。出水による一時的水域への移動・産卵は、ギンブナの産卵特性として広く知られている。調査地でも、1999 年～2002 年までの調査でも 5 月～6 月ギンブナが TWA へ移動し捕獲に用いた漁具や水草等の浮遊物に産卵する状況が確認されている(未発表)。つまり、ギンブナは産卵期の出水時に TWA に移動し産卵を行っているため本流と TWA の接続頻度が重要な物理環境要因となってくると考えられる。

成長曲線から推定した産卵時期と本流と TWA の接続時期の整合性が上記の説を更に強く支持する。特に顕著な整合性を示すのが、TWA2 の稚魚・仔魚の産卵時期と接続時期の関係である。TWA2 で確認された稚魚・仔魚の産卵時期は成長曲線から 7 月 4 日前後で、TWA2 が初めて本流と接続するのが 7 月 4 日であるため概ね一致し 7 月 4 日の出水時本流からギンブナが移動し TWA2 を産卵場所として利用し

たことを示す結果となっている(図 2.2.2、表 2.2.3)。

このように図 2.2.2、表 2.2.3 の結果は、TWA が産卵場として機能するためには出水による本流との接続が重要な条件であるという仮説を支持している。一時的水域の産卵場の機能を保全・復元しようとする場合一時的水域への接続頻度の設定が重要な条件になる可能性を示唆した結果となっている。

## 2) TWA がギンブナの産卵場として機能するための接続時の流速、水深の重要性

ギンブナの産卵行動に影響を与える物理環境としては、接続頻度だけでなく接続時の水理特性も重要な要素であると考えられる。本流と TWA の接続だけがギンブナの産卵行動に影響を与えると考えると 7 月 4 日の出水後 TWA4 でも稚魚・仔魚の確認個体数が増えると考えられる。しかし、TWA4 では稚魚・仔魚の確認は 1 匹と少ないのに対し TWA2 の稚魚・仔魚の確認個体数の方が TWA4 よりも多くなっている。これは、本流と TWA 接続時の水理条件が TWA2 が TWA4 よりも適していたためと考えられる。TWA2 が接続する流量 ( $Q=200\text{ m}^3/\text{s}$  以上) の場合、TWA3、4 周辺は流速が速く親個体は十分に定位することができないと考えられる。既往研究では、体長の 2~3 倍の流速までが魚類が安定して定位できるとされている<sup>56)</sup>。調査地での魚類採捕データではギンブナの体長の最大は約 150mm 程度で流速では  $0.3\text{ m/s}\sim 0.45\text{ m/s}$  程度までしか安定して定位することが出来ない。つまり TWA3、4 周辺ではギンブナの親個体は安定して産卵することが出来ない状態に近いと考えられる。また、出水時の水位増加量もギンブナ親個体の産卵行動に影響を与えると考えられる。TWA2 が接続する流量 ( $Q=200\text{ m}^3/\text{s}$  以上) の場合、TWA3、4 周辺は広大な冠水域になり、TWA3、4 は完全に水没し平水時の水面よりも出水時の水面は高くなると考えられる。ギンブナは産卵行動時の水面にある水草に産卵することが知られている<sup>57)</sup>。 $Q=200\text{ m}^3/\text{s}$  以上の接続状態の場合、平水時 TWA3、4 の水際部に生育した産卵基質である水草を見つけ産卵することが難しい状態にあったと考えられる。一方、TWA2 の周辺は出水による水位上昇が TWA3、4 と比較して少なく、流路幅が狭い出水時流路が形成され出水時流路の周縁部に TWA2 が取り込まれるため、ギンブナの親個体は出水時流路の河岸部に TWA2 の植生を見つけることが可能であったと考えられる。

このように図 2.2.4、2.2.5 の結果は、TWA が産卵場として機能するためには出水による本流との接続が重要な条件であると同時に接続時の TWA 周辺の流速、水深が産卵場として適切な条件を維持している必要があることを示唆している。一時的水域の産卵場の機能を保全・復元しようとする場合一時的水域への接続頻度の設定に加え冠水時の流況の設定(流速、水深分布)が重要な要素になる可能性を示唆した結果となっている。

## 3) TWA が産卵場として機能するための流量変動への対応の必要性

結果 2)、3) から TWA が魚類の産卵場として機能するためには、①魚類の産卵期に本流と TWA が接続すること、②本流と TWA が接続時、TWA 内及び周辺冠水域の流速が親個体が安定して定位できる流速条件であること、③TWA が著しく冠水域に水没せず、TWA 内部の水草等の産卵基質が見つけやすい条件が必要であることがわかる(以下、この 3 条件を産卵場条件とする)。TWA が産卵場条件を満たすためには、出水時、TWA の位置が冠水域の上流端(図 2.2.4 では  $Q=200\text{ m}^3/\text{s}$ ) もしくは周縁部(図 2.2.4 では  $Q=350\text{ m}^3/\text{s}$ ) であることが最適である。

しかし、河川流量は確率的に変動し魚類が産卵期に入る 4 月~7 月には様々な流量規模の出水が生じると考えられる。調査地では概ね  $40\sim 600\text{ m}^3/\text{s}$  程度の小中規模出水が生じ様々な冠水状態が生じる。どの流量の冠水状態でも産卵場条件を満たすような場所に TWA が位置していると魚類の産卵場としての機能が高いと考えられる。

上記のような観点でみると調査地の TWA2~4 は産卵場条件への対応という点で有利な配置形態になっている。TWA2~4 は、ワンド・タマリ列の配置形態を持ち TWA4、3、2 の順に本流との比高差が高くなり比高差の多様性がある。小規模な出水 ( $40\text{ m}^3/\text{s}\sim 100\text{ m}^3/\text{s}$  程度) では TWA4、3 周辺が、中規模出水 ( $200\text{ m}^3/\text{s}$ ) 以上では TWA2 周辺が産卵場の機能を担保し産卵期を通じて魚類が産卵するための物理条件の冗長性を担保していると考えられる。

激しく変動する河道内微地形の内部に人為的にワンド・タマリ列のような環境を作ることは物理環境の持続性を考えた場合困難な点が多い。ワンド・タマリ列の成立は、出水時に形成される 2 次流路の水位低下後の地形であると考えられる。つまり、治水上許される範囲で低水路が変化し、出水時に 2 次流路が生じるような河川計画が結果としてタマリ列の

ような環境を持続的に維持することを可能とし魚類にとっての産卵場機能の提供を継続させることができると考えられる。

### 2. 2. 5 今後の課題

本研究では、一時的水域 (TWA) の産卵場としての機能検証とその成立要因を概括できた。しかし、産卵期の調査が 2005 年だけと短期間である。ギンブナの場合、出水が産卵に重要な役割を果たすため各年の出水の発生特性により産卵行動が変化することが考えられるため、複数年同様の調査を行い評価を行う必要がある。

本研究ではギンブナの稚魚・仔魚の個体群動態と水理計算を用いた出水時の冠水状態の推定を組み合わせ産卵場の成立要因を分析した。しかし、ギンブナの親個体の行動観察、魚卵の産卵状態、冠水した場所の植生の有無とその種、その面積、孵化後の稚仔魚の本川への脱出の可能性等検討すべき事項は多く継続的な研究を行う必要がある。

### 2. 2. 6 まとめ

(1)信濃川水系千曲川で一時的水域 (TWA) の産卵場としての機能検証及びその物理条件についてギンブナを指標種として検証した。その結果、出水により本流と TWA が接続することが TWA の産卵場としての機能に重要な物理条件であることを魚類調査結果、ギンブナ成長曲線による成長時期の算定、水理計算結果による接続時期及び冠水状況の算定を通して定量的に評価した。

(2)本流と TWA が接続以外に、出水時の本流と TWA 間の接続状況 (TWA 内の流速、TWA 周辺部の水没状況等) が TWA の産卵場の機能に影響を与える物理条件であることが示唆された。

## 2. 3 GIS と窒素安定同位体比を用いた千曲川流域における負荷流出特性解析

### 2. 3. 1 はじめに

流域を流れる河川は降雨として流域に供給された水が様々な経路を経て集まり、やがて地表面に流れとして出現し、流路となっているものである。その際、流域に存在する様々な物質を取り込み、河川として流下する頃には多種多様な水質を形成しており、当然、河川の水質は場所によって異なり、また同一の場所でも時期によって異なっている。

近年、問題となっている水質悪化の主要因と考え

られている窒素やリン等の負荷物質も、主には人為的に流域に供給され、それが雨水や水道水に取り込まれて河川に流出し、水質を形成している。

このため、流域スケールで水質改善・管理を適切に行っていくためには、様々な場所における河川の水質とその形成要因となっている物質の供給源としての流域の空間的、時間的状況との関係を適切に評価することが必要不可欠である。

しかし、流域を記述する情報の量は膨大であり、また様々な種類の情報を含んでいる。このため、これら膨大な情報を統合的に扱うことがこれまで困難であり、流域情報の記述はこれまで定性的に行われることが多かった。このことが水質と流域状況との関係の適切な評価を妨げてきた要因の一つであるが、最近劇的に処理速度が向上しているコンピューターと GIS (地理情報システム) を利用し、膨大な情報を統合的に扱うことによって流域情報を容易に、定量的に記述できるようになってきた<sup>58)</sup>。

また、河川水質の季節変動に関してはこれまで流量と水質の単純な回帰式 (L-Q 式) を用いたもので評価されることが多かったが、水質の形成要因である流域の社会状況が季節的に変動している以上、より精度の高い評価のためには、流量変動だけでなく流域情報をも加えた解析を行っていく必要がある。

このようなことを背景として、本研究では長野県千曲川を対象として、GIS を用いた流域情報の定量化と現地での採水に基づく水質結果との比較検証を行い、流域から流出する窒素負荷量の場所的な変化、季節的な変化について評価する。また、窒素安定同位体比を併せて用いることにより、田畑からの流出負荷量の変化について定量的に評価する。

### 2. 3. 2 研究方法

#### 1) 千曲川流域の概要

千曲川は甲信・秩父の境にある甲武信岳 (標高 2,475m) を源流として、佐久、小諸、上田、長野の各盆地を貫流し、新潟県境からは信濃川と名称が変わる。流域面積は 7,163 k m<sup>2</sup> であり、含まれる市町村は 11 市、24 町、39 村、流域人口は約 150 万人である。

本研究では源流から千曲市 (旧更埴市) の千曲橋付近までの流域を研究対象としており、流域面積は 2,468 k m<sup>2</sup> である。この流域での土地利用の現況は水田 8.8%、畑 5.7% で、市街地の割合は 3.5%、森林の占める割合は 71.5% である。また、この流域の特徴



的な土地利用として、上流の川上村、南牧村の大規模レタス畑がある。この大規模レタス畑で研究対象流域における畑の面積の19.5%を占めており、この流域を西川と呼ばれる支川が貫いており、千曲川本川に大規模レタス畑の負荷を供給している(図2.3.1参照)

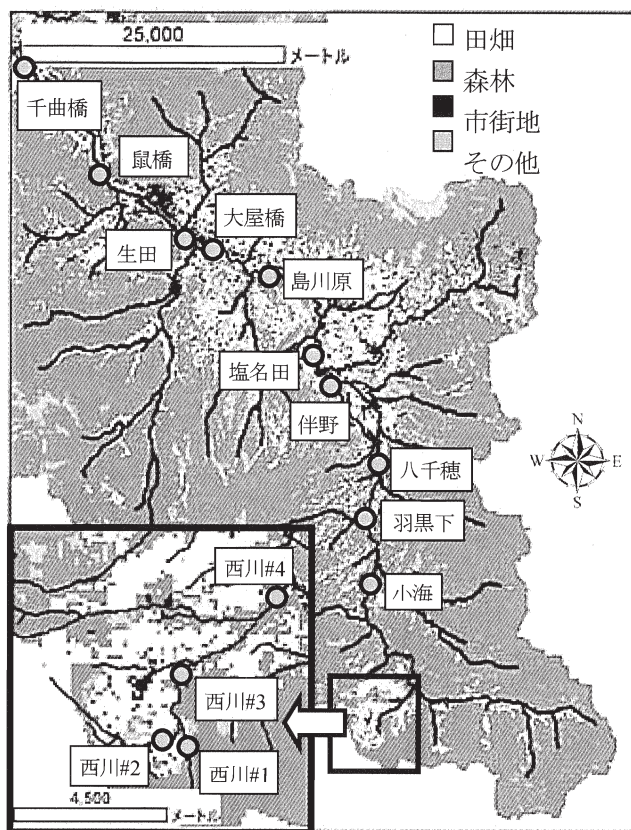


図 2.3.1 千曲川上流域と採水地点

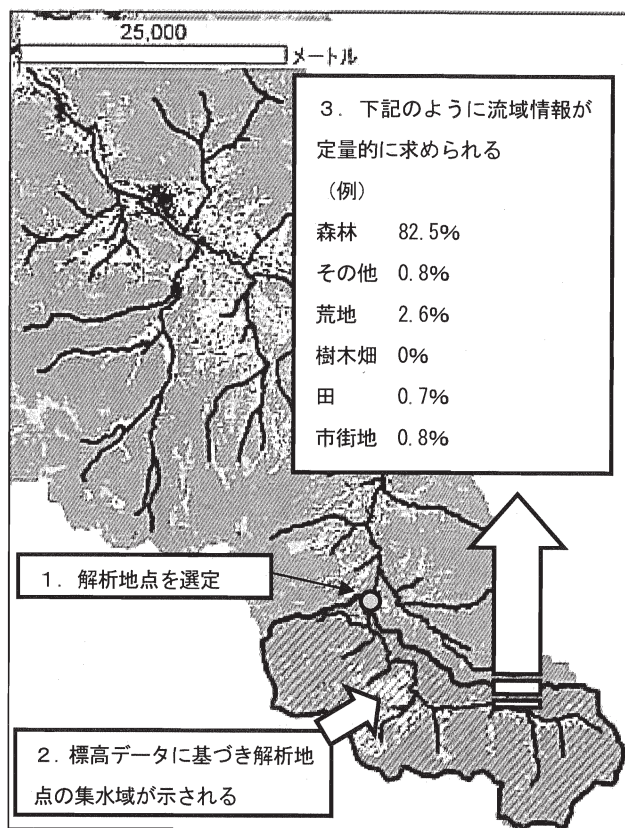


図 2.3.2 集水域解析の概要

## 2) 現地調査

図 2.3.1 に示す 14 地点において 2003 年 11 月 19 日、2004 年 1 月 19 日、2 月 25 日、3 月 23 日、4 月 23 日、5 月 24 日、6 月 30 日の 7 回に渡り採水を行い、T-N、NO<sub>3</sub>-N、NO<sub>2</sub>-N、NH<sub>4</sub>-N について分析を行った。また、同じサンプルを用いて窒素安定同位体比( $\delta^{15}\text{N}$ )の分析を行った。なお、分析は T-N、NO<sub>3</sub>-N、NO<sub>2</sub>-N、NH<sub>4</sub>-N については Bran Luebee 社の AACS-III を用いて行い、 $\delta^{15}\text{N}$  については AMCO 社の Flash EA を前処理装置として接続した、Thermo Electron 社の Delta Plus XL を用いて行った。

なお、本研究対象流域においては、畑等の面源負荷が大部分を占めていると考えられるため、現地採水にあたっては降雨による直接的影響を避け、河川の流量が安定している日に採水を行い、月の代表値として取り扱っている。

## 3) 集水域解析による流域情報の定量化

標高データを用いた GIS の優れた解析手法の一つに河川の集水域の切り出し機能がある。図 2.3.2 にこの機能を用いた集水域解析の概要を示す。この機能を利用して、河川の任意の地点における集水域を

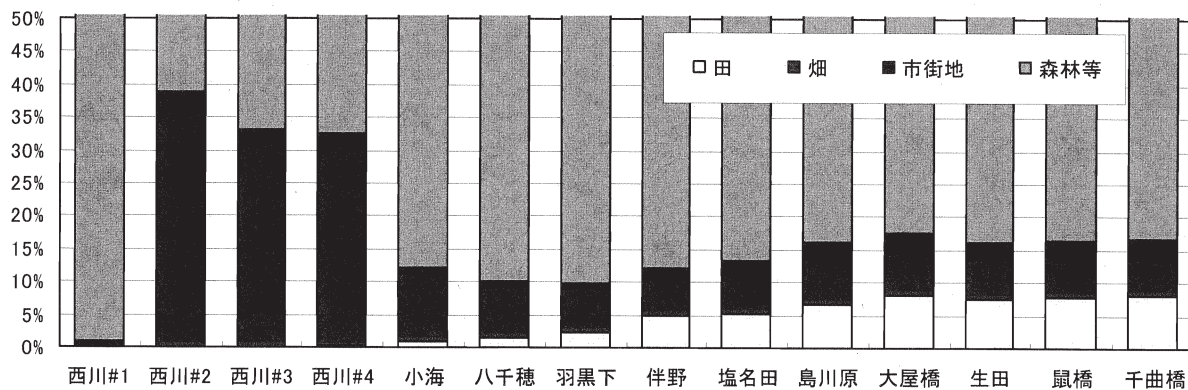


図 2.3.3 各採水地点における土地利用の割合

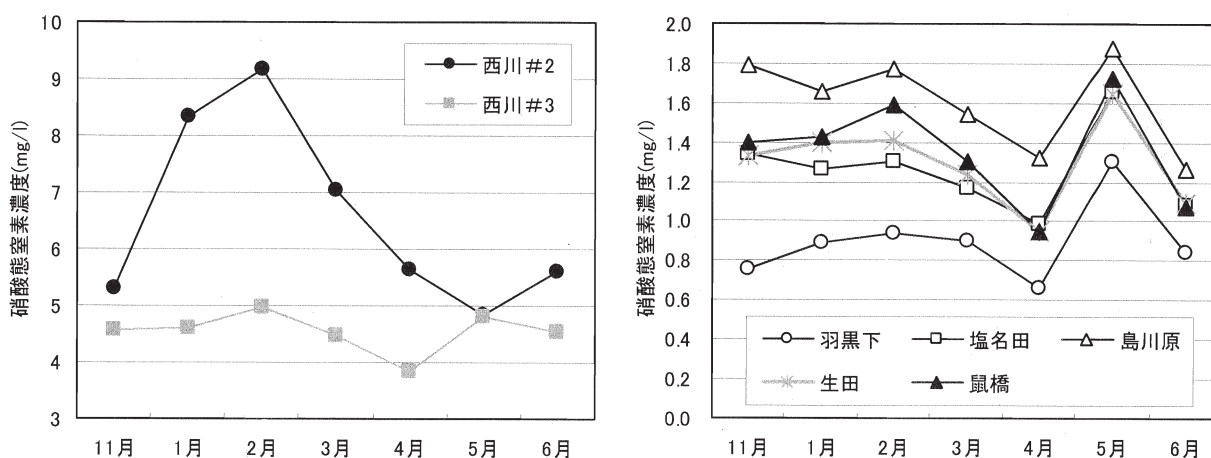


図 2.3.4 各採水地点における土地利用の割合

標高データを基に切り出し、その領域内における土地利用等の属性データを集計することによって、その集水域の特性を定量的に評価した。なお、GIS 解析は、国土地理院発行の「数値地図 50m メッシュ(標高)」と「1/10 細密土地利用メッシュ」を用いて行った。

#### 4) 河川任意地点における負荷流出解析

千曲川は全体的に濁度が低く、TN に占める NO<sub>3</sub>-N の割合が高い(約 90%)。また、下水処理水は懸濁態の窒素をほぼ取り除いた状態で排出されること、平水時における畑等面源においては NO<sub>3</sub>-N の流出が問題になりやすいこと<sup>59)</sup>から、本研究では図 2.3.1 に示す 14 地点で採取されたサンプルの分析結果の中から、NO<sub>3</sub>-N に注目し、その値と各採水地点において集水域解析により算出された土地利用状況(田、畑、市街地、森林等、の流域面積に対する割合)とを利用して負荷流出解析を行う。上記で示した土地利用状況を田畑(田+畑)、市街地(市街地)、森林等(樹木畑、荒地、森林、その他)の 3

種類にまとめると採水地点における硝酸態窒素流出負荷量 L は次式で与えられる。

$$L = L_p + L_c + L_f \quad (1)$$

ここで、L の単位は(g/s)であり、L<sub>p</sub>、L<sub>c</sub>、L<sub>f</sub>はそれぞれ採水地点における田畑、市街地、森林等からの硝酸態窒素流出負荷量である。また、L は採水地点の NO<sub>3</sub>-N 濃度 N と流量 Q の積で表せることから、(1)式は

$$L = NQ = N_p Q_p + N_c Q_c + N_f Q_f \quad (2)$$

$$Q = Q_p + Q_c + Q_f \quad (3)$$

と表せる。ここで、N と Q の単位はそれぞれ mg/l、m<sup>3</sup>/s であり、N<sub>p</sub>、N<sub>c</sub>、N<sub>f</sub>はそれぞれ採水場所における田畑、市街地、森林等由来の NO<sub>3</sub>-N 濃度であり、Q<sub>p</sub>、Q<sub>c</sub>、Q<sub>f</sub>はそれぞれ田畑、市街地、森林等からの流出量である。ここで注意点として、それぞれの N は発生場所での値ではなく、採水地点での値であり、流下に伴う変化を内包したものである。採水地点の流量 Q は「生田」における流量を千曲川河川事務所提供の平成 15 年版 H-Q 式(暫定式)より予測

し、流域面積と予測流量  $Q$  との関係から全ての採水地点における各採水日の流量を算出している。さらに、 $Q_p$  と  $Q_f$  を次式で定義した。

$$\begin{aligned} Q_p &= Q (A_p / A) \\ Q_f &= Q (A_f / A) \end{aligned} \quad (5)$$

ここで、 $A$ 、 $A_p$ 、 $A_f$  はそれぞれ集水域における総面積、田畑、森林等の面積(ha)である。

また、各採水地点における窒素安定同位体比  $I$  は次式で示されると考えられる。

$$I = (I_p L_p + I_c L_c + I_f L_f) / L \quad (6)$$

ここで、 $I$  の単位は‰であり、 $I_p$ 、 $I_c$ 、 $I_f$  はそれぞれ田畑、市街地、森林等からの流出における窒素安定同位体比である。

ここで、流域各下水処理場からの放流水の平均溶解態窒素濃度<sup>61)</sup>から、 $N_c$  は 10.96(mg/l)とし、 $N_f$  は後に示す流域のほとんどが森林で占められている「西川#1」の平均  $NO_3-N$  濃度から 0.2(mg/l)とした。また、 $I_p$  は文献の値<sup>62)</sup>と西川#2 の値から 5.0(‰)とし、 $I_c$  は下水処理場からの放流水の窒素安定同位体比<sup>60)</sup>から 19.5(‰)とし、 $I_f$  は文献の値<sup>62)</sup>と西川#1 の窒素安定同位体比の値から 2.0(‰)とした。

これら、(1)～(6)式を用いて図 2.3.1 に示す 14 地点のうち、「西川#2」、「西川#3」、「羽黒下」、「塩名田」、「島川原」、「生田」、「鼠橋」の 7 地点において窒素安定同位体比のデータが存在する 1 月～4 月の  $N_p$  を算出した。今回の検討では、田畑からの流出窒素は化学肥料由来であることから、その安定同位体比は同じ値としたが、田畑では流出濃度が異なるため、別途以下の式を用いて  $N_p$  変化についてさらに考察した。

$$N_p' = (aN_{田} + bN_{畑}) / (a + b) \quad (7)$$

ここで、 $a$ 、 $b$  はそれぞれ流域に占める水田と畑の面積割合であり、 $N_{田}$ 、 $N_{畑}$  はそれぞれ水田と畑由来の採水場所における  $NO_3-N$  濃度である。ここで、1 月～4 月の時期は水田においては非灌漑期であり、水田の浸透水中の窒素濃度は 0.02mg/l 程度であることが知られている<sup>59)</sup>。また、後に示すように「西川#2」の  $N_p$  はほぼ畑から流出したそのままの  $NO_3-N$  濃度であると考えられる。よって、 $N_{田}$  は 0.02mg/l の一定値、 $N_{畑}$  はそれぞれの月における「西川#2」の  $N_p$  を用いることとした。

## 2. 3. 3 結果

### 1) 流下に伴う土地利用の変化

図 2.3.1 に示す 14 地点において集水域解析を行い、

流下に伴う土地利用の割合の変化を算出したものを図 2.3.3 に示す。ここでは模擬的に「西川#1」を源流と考え、「西川#4」の下流で本川が合流する、という流下形態を仮定している。流域面積の 30%～40%を畑が占める西川流域を経て本川が合流して畑の面積割合が 10%程度にまで減少し、その後流下に伴い「大屋橋」まで水田と市街地の面積割合が増加し、その後は流下に伴う土地利用割合の変化が小さくなっていく様子が見て取れる。

### 2) $NO_3-N$ 濃度と土地利用の関係

図 2.3.1 に示した採水地点のうち、「西川#2」～「鼠橋」における  $NO_3-N$  濃度の値を図 2.3.4 に示す。「西川#2」の変動が大きく、他の地点と異なる傾向を示すが、他の地点における 11 月～6 月の変化は地点間で若干の相違はあるものの、11 月から 2 月にかけて微増し、2 月において一度ピークを迎えた後、2 月から 4 月にかけて減少し、5 月の時点で急増し、この期間における最大値を示した後、6 月には再び下降する。また、図 2.3.5 に流域に占める田、畑および市街地の面積合計の割合と  $NO_3-N$  濃度との関係を示す。「西川#2」の  $NO_3-N$  濃度が多少ばらついているものの、両者には高い相関が見られる。

### 3) 河川任意地点における負荷流出解析

2.3.2 の 4) において示された負荷流出解析手法によって算出された  $N_p$  の値の変化を図 2.3.6 に示す。また、図 2.3.7 に解析を行った 7 地点の 11 月～6 月の推定流量を示す。図 2.3.6 については「西川#3」において 1 月の  $N_p$  が異なる傾向を示すものの、「西川#2」で 15～25mg/l であったものが流下に伴い減少する傾向を示し、2 月→3 月→4 月とほぼ相似形のまま  $N_p$  が減少している。また、図 2.3.7 については 1 月の流量が少なく、5 月の流量がかなり大きくなっていることが分かる。また、比較のため、図 2.3.8 に図 2.3.6 と同条件における  $N_p'$  の値の変化を示す。 $N_p'$  の値は  $N_p$  と同じく流下に伴い減少する傾向を示し、2 月→3 月→4 月とほぼ相似形のまま減少する傾向を示す。

### 4) $\delta^{15}N$ と $NO_3-N$ 濃度の関係

窒素安定同位体比 ( $\delta^{15}N$ ) と窒素起源の関係については既往の研究で明らかにされており<sup>62)</sup>、それによると、降雨、土壌、化学肥料、都市排水の  $\delta^{15}N$  はそれぞれ～3‰、+4‰～+9‰、-4‰～+4‰、+10‰～+20‰、の値を示すことが知られている。これを踏まえて、図 2.3.9 に解析を行った 7 地点において窒素安定同位体比のデータが存在する 1 月～4 月の

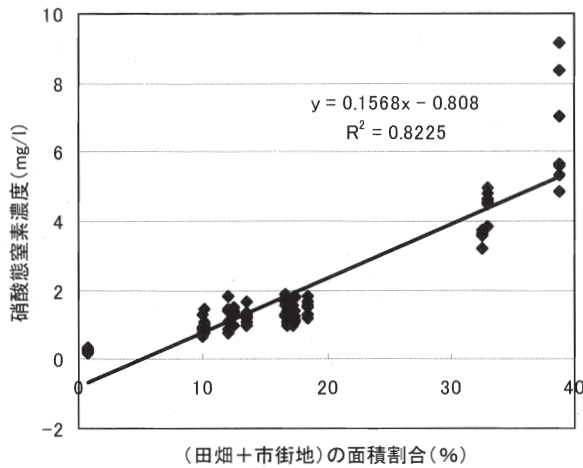


図 2.3.5 田畑+市街地の面積割合と NO<sub>3</sub>-N 濃度の関係

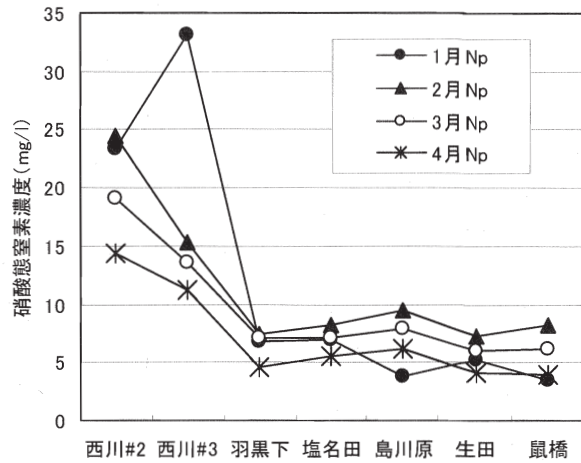


図 2.3.6 1月～4月にかけての N<sub>p</sub> の変化

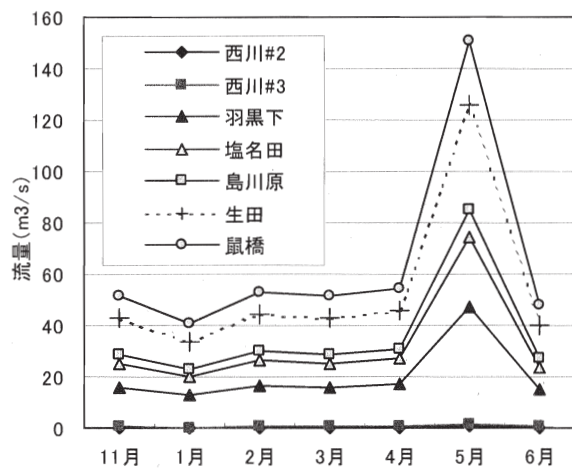


図 2.3.7 11月～6月にかけての流量の変化

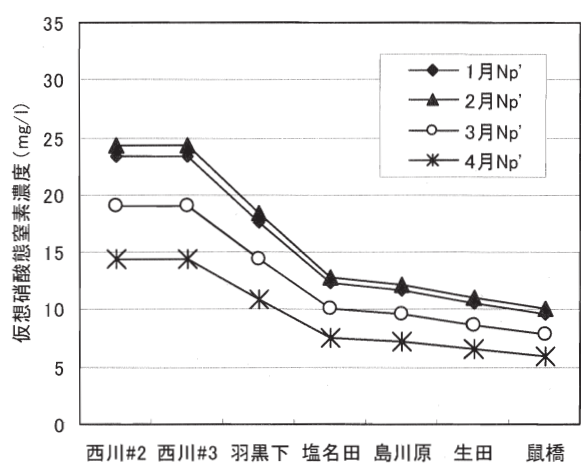


図 2.3.8 1月～4月にかけての N<sub>p</sub>' の変化

$\delta^{15}\text{N}$  と  $\text{NO}_3\text{-N}$  濃度を示す。各地点におけるプロットは矢印の向きに沿って1月→2月→3月→4月と変化しており、「西川#2」と「羽黒下」が異なる傾向を示すものの、他の地点では1月の $\delta^{15}\text{N}$ が高く、2月になると $\delta^{15}\text{N}$ が大きく減少し、2月～4月にかけて $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度が低下し、 $\delta^{15}\text{N}$ が若干上昇するという逆L字型の変化傾向を示している。また、図 2.3.3 に示した土地利用割合のグラフから、市街地の面積割合が大きい地点ほど $\delta^{15}\text{N}$ が高くなる傾向を示していることがわかる。

## 2. 3. 4 考察

### 1) GIS を用いた流域情報の定量化

図 2.3.3 に示した結果は、流下に伴い流域の土地利用の変化過程を示したものであり、本川の合流に

よる畑面積の減少や流下に伴う市街地や水田の面積割合の増加といったものは、土地利用図を見れば自ずと明らかになるものである。しかし、GISの集水域解析を用いればこれらの視覚的情報を定量的な情報として表現することができる。このように流域情報を定量的に表現することによって、より精度の高い流出負荷解析を容易に行うことができると考えられる。

### 2) 硝酸態窒素濃度と土地利用の関係

図 2.3.4 に示した結果は、田畑、市街地の面積割合が多い地点ほど  $\text{NO}_3\text{-N}$  濃度が高くなる傾向を示している。実際、図 2.3.5 に示したように田畑、市街地の面積割合と  $\text{NO}_3\text{-N}$  濃度の間には高い相関関係があり、河川の  $\text{NO}_3\text{-N}$  濃度の値には流域の土地利用状況が大きな影響を与えていることが分かる。

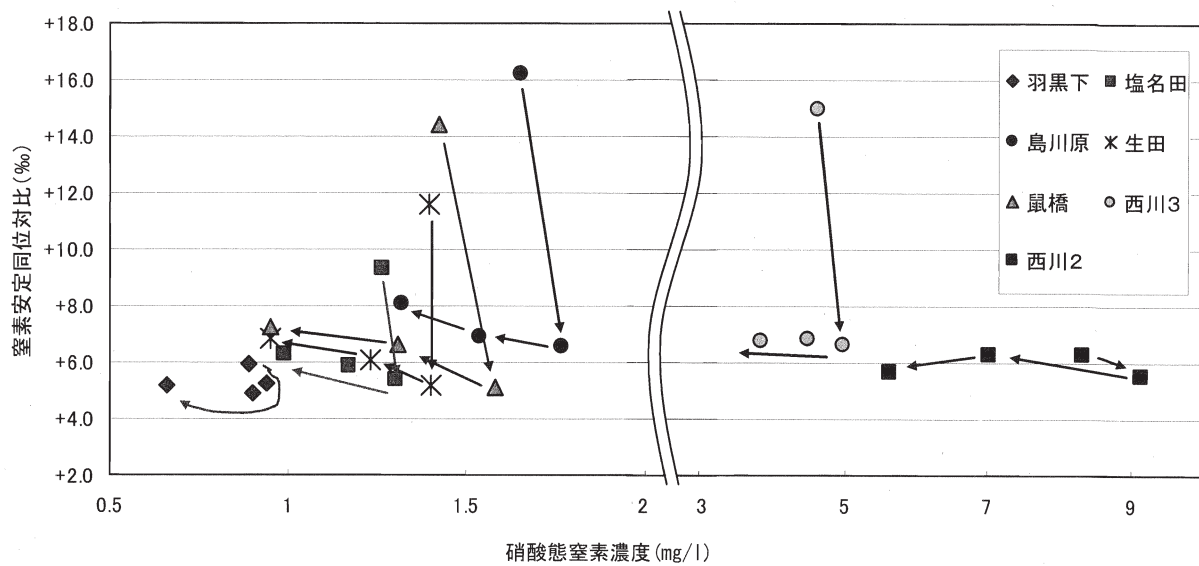


図 2.3.9  $\delta^{15}\text{N}$  と  $\text{NO}_3\text{-N}$  濃度の関係

また、「西川#2」の変動が他の地点より大きい理由として、この流域がほぼ森林と畑のみで構成されていることが考えられる。つまり、単一の負荷源としての畑の割合が多いため、畑からの流出負荷量の変化の影響を強く受けてしまい、他の地点と異なる変動傾向、変動量を示すと考えられる。また、図 2.3.7 に示すように 11 月から 2 月にかけては千曲川流域においては降雪のため雨はほとんど降らず、田畑からの流出量が少ない。しかし、2 月の採水時においては雪解け出水がおきた後であり、土壌に蓄えられていた窒素負荷が河川に流出したため、 $\text{NO}_3\text{-N}$  濃度が少し上昇したと考えられる。しかし、この間には季節的に畑に施肥がなされておらず、新たな窒素負荷の供給がないため、雪解け流出によって土壌の窒素が徐々に枯渇していったため、2 月から 4 月にかけて  $\text{NO}_3\text{-N}$  濃度が減少したものと考えられる。5 月採水時においては出水中であり、降雨によるフラッシュ効果によって土壌の窒素負荷が一気に流出し、それが原因で濃度が一時的に上昇したものと考えられる。

### 3) 河川任意地点における負荷流出解析

$N_p$  は採水地点における田畑由来の  $\text{NO}_3\text{-N}$  濃度である。よって、上流のレタス畑を貫いて流れている「西川#2」の  $N_p$  はほぼ畑から流出したそのままの  $N_p$  の値であると考えられる。実際、4 月採水時に「西川#2」の河岸における湧水の  $\text{NO}_3\text{-N}$  濃度を分析したところ 18.42(mg/l)であり、解析の妥当性を示して

いる。また、「西川#2」の  $N_p$  は図 2.3.4 に示した「西川#2」の  $\text{NO}_3\text{-N}$  濃度の値と同様の季節変動を示しており、畑の割合が多い「西川#2」においては  $N_p$  が河川の  $\text{NO}_3\text{-N}$  濃度に大きな影響を与えていることが分かる。

図 2.3.6 で  $N_p$  が上流から下流にかけて減少するが、この理由として、流下に伴う水田面積の増加が考えられる。元々水田は畑よりも施肥量が少ない上に、季節的に元肥の前であることから水田からの負荷流出量は少ない。このため、流下に伴って  $N_p$  が減少すると考えられ、これは別途検討した図 2.3.8 の  $N_p'$  の値からも分かる。しかし、下流において  $N_p'$  の値より  $N_p$  の値が小さくなる結果が得られている。これは負荷源から供給された  $\text{NO}_3\text{-N}$  が採水地点に到達するまでに付着藻類等に取り込まれたり、脱窒作用等によって減少していることによるものと考えられる。つまり、 $N_p$  を算出する際には全ての地点において「西川#2」の  $N_p$  を使用しているため、流下に伴う  $\text{NO}_3\text{-N}$  の減少を考慮しておらず、 $N_{\text{畑}}$  を過大に見積もっているためである。さらに、2 月→3 月→4 月と  $N_p$  が減少していることも図 2.3.4 に示した  $\text{NO}_3\text{-N}$  濃度の同期間における季節変動と矛盾しない。また、1 月については図 2.3.7 に示すように積雪のため田畑からの流出量は小さく、負荷量としても他の時期よりも小さかったと考えられる。このため、2 月、3 月、4 月と異なった傾向を示したと考えられる。

## 5) $\delta^{15}\text{N}$ と $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度の関係

図 2.3.9 において「西川#2」と「羽黒下」以外の地点における 1 月の  $\delta^{15}\text{N}$  が高い理由は市街地からの負荷流出の影響と考えられる。これは、市街地面積の割合が小さい「西川#2」と「羽黒下」の 1 月における  $\delta^{15}\text{N}$  の値が他の時期とほぼ同水準であることからわかる。1 月は積雪のため田畑からの流出負荷量が少なく、相対的に市街地からの流出負荷量が多くなる。しかし、雪解けと共に  $\delta^{15}\text{N}$  の低い田畑からの流出負荷量が増大し、相対的に市街地からの負荷流出量が減少するため、2 月になると  $\delta^{15}\text{N}$  が低下したと考えられる。また、2 月～4 月にかけての変化は、土壌の窒素が徐々に枯渇していくため田畑からの流出負荷量が徐々に減少し、相対的に市街地からの流出負荷量が徐々に増加していくために、 $\text{NO}_3\text{-N}$  濃度が減少し、それに伴って  $\delta^{15}\text{N}$  が上昇していると考えられる。

## 2. 3. 5 まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す。

1) 標高、土地利用等の GIS データを用いて適切な解析を行うことにより、流域情報を容易に、定量的に、客観的に表現できるようになる。

また、河川の水質に大きな影響を与えていると思われる流域の土地利用状況を定量的に表現することができるため、同じく定量的な情報である水質データとの関係を容易に評価することが可能である。

2) 河川の  $\text{NO}_3\text{-N}$  濃度は流域の土地利用状況と密接に関係していることが明らかとなった。また、千曲川における流出負荷量は降雨や流域の土地利用の社会的変化によって変化しており、GIS と  $\text{NO}_3\text{-N}$  濃度、 $\delta^{15}\text{N}$  の値を用いて田畑からの負荷流出を算出し、土地利用の変化や流下に伴う生物吸収による平面的な変化、流域の社会状況による季節的な変化について定量的に評価した。

3) 窒素安定同位体比の値は、市街地からの窒素負荷流出の割合が相対的に大きくなるほど、高くなる傾向を示し、窒素安定同位体比を用いた負荷流出解析に GIS を援用することによってより深みのある解析が可能になる。

## 参考文献

1) 尾崎正紀、寒川 旭、宮崎一博、西岡芳晴、宮地良典、竹内圭史、田口雄作:「奈良地域の地質・地域地質研究報告 (5 万分の 1 地質図幅)、162p、1 sheet、2000.

- 2) Pettijohn FJ: "Sedimentary Rocks", 3rd ed. Haper & Row, New York, 628p, 1975.
- 3) (社)地盤工学会:「土質試験の方法と解説(第1回改訂)」、902p、2000.
- 4) Wentworth CK: "A scale of grade and class terms for clastic sediments", Journal of Geology 30, pp.377-392, 1992.
- 5) Zingg, Th. : "Beitrage zur Schotteranalyse: Schweiz. Mineralog", Petrog. Mitt., 15, pp.39-140, 1935.
- 6) 玉井信行、奥田重俊、中村俊六編:「河川生態環境評価法—潜在自然概念を軸として—」、東京大学出版会、2000.
- 7) 皆川朋子、河口洋一、萱場祐一、尾澤卓思:「流量変動が河川環境に果たす役割と実験的検討—流量の増加に伴う河床付着藻類の掃流と魚類の遡上について—」、土木技術資料、vol. 44(10)、pp. 32-37、2002.
- 8) 瀬崎智之、服部敦、近藤和仁、徳田真、藤田光一、吉田昌樹:「礫河床草本植生の流出機構に関する現地調査と考察」、水工学論文集、44、pp. 825-830、2000.
- 9) 清水義彦、長田健吾、金文姫:「礫床河川における近年の洪水攪乱と植生破壊に規模に関する考察」、河川技術論文集、9、pp. 377-382、2003.
- 10) 朴珍赫、小尻利治、友杉邦雄:「流域環境評価のための GIS ベース分布型流出モデルの展開」、水文・水資源学会誌、v.16, n. 5, pp. 541-555, 2003.
- 11) 廣瀬葉子、深見和彦、金木誠:「リモートセンシングを活用した河川流域情報収集」、土木技術資料、v. 43, n. 1, pp. 14-19, 2001.
- 12) 皆川朋子、島谷幸宏:「住民による自然環境評価と情報の影響—多摩川永田地区における河原の復元に向けて—」、土木学会論文集、n.713, VII-24, pp. 115-129, 2002.
- 13) Frissell, C. A., W. J. Liss, C. E. Warren, and M. D. Hurley: "A hierarchical framework for stream classification: Viewing streams in a watershed context", Environmental Management, 10, pp.199-214, 1986.
- 14) 辻本哲郎、北村忠紀:「河床低下に及ぼす植生繁茂の影響」、水工学論文集、第 40 巻、pp. 199-204, 1996.
- 15) 藤田光一、李参熙、渡辺敏、塚原隆夫、山本晃一、望月達也:「扇状地礫床河道における安定植生域消長の機構とシミュレーション」、土木学会論文集、No.747 II -65, pp. 41-60, 2003.
- 16) 清水義彦、小葉竹重機、新船隆行、岡田理志:「礫床河川の河道内樹林化に関する一考察」、水工学論

- 文集、第43巻、pp. 971-976, 1999.
- 1 7) 服部敦、瀬崎智之、吉田昌樹:「礫床河道におけるハリエンジュ群落の出水による破壊機構と倒伏発生予測の試み」、河川技術論文集、第7巻、pp. 321-326, 2001.
- 1 8) 土木学会水理委員会、水理公式集改定委員会、水理公式集例題プログラム集編集部:「水理公式集例題プログラム集」、pp18-pp19、社団法人土木学会、2002.
- 1 9) 傳田正利、萱場祐一、島谷幸宏:「千曲川における後背水域の冠水頻度推定方法」、応用生態工学、2(1)、pp. 63-72, 1999.
- 2 0) 島谷幸宏:「多摩川永田地区の河道修復」、応用生態工学 5(2)、pp233-240, 2003.
- 2 1) 服部敦、瀬崎智之、伊藤政彦、末次忠司:「河床変動の観点で捉えた河原を支える仕組みの復元—多摩川永田地区を事例として—」、河川技術論文集 Vol.9、pp.85-90.2003.
- 2 2) 島谷幸宏・皆川朋子:「日本の扇状地河川の現状と自然環境保全の事例」、河川に自然復元に関する国際シンポジウム論文集、pp.191-196, 1998.
- 2 3) 田中蕃:「砂利投入による河床構造回復の試みとその効果」、矢作川研究 No.1、pp175-202, 1997.
- 2 4) 浅見和弘、齋藤大、三浦義征:「ダム下流の河床低下・河床構成材料の粗粒化防止策—三春ダムにおける土砂投入実験例—」、応用地質技術年報 20、pp147-155.2000.
- 2 5) 梶野健、浅見和弘、中瀧一彦、杉尾俊治、林貞行、高橋陽一:「浦田ダム下流に投入した土砂がウグイの産卵にもたらす効果について—ダム下流河川における土砂投入の効果—」、応用生態工学 Vol.6 No.1,2003.
- 2 6) 皆川朋子、清水高男、島谷幸宏:「流量変動による生物への影響に関する実験的検討」、河川技術に関する論文集 Vol.6, 2000.
- 2 7) Power, M. E., and A. J. Stewart: “Disturbance and recovery of an algal assemblage following flooding in an Oklahoma stream”, American Midland Natural Naturalist 117, pp333-345, 1987.
- 2 8) 北村忠紀、加藤万貴、田代喬、辻本哲郎:「砂利投入による付着藻類カワシオグサの剥離除去に関する実験研究」、河川技術に関する論文集 第6巻、2000.
- 2 9) 山本亮介、松梨史郎、下垣 久:「移動粒子を伴う流れの付着藻類剥離効果」、水工学論文集 Vol.47、pp1069-1074, 2003.
- 3 0) Peterson, C. G.: “Influence of flow regime on development and desiccation response of lotic diatom communities”, Ecology, 68, pp.946-954, 1987.
- 3 1) 有賀祐勝:「水界植物群落の物質生産Ⅱ—植物プランクトン—(生態学講座8)」、共立出版、1973.
- 3 2) 渡辺泰徳:「光合成研究法」、共立出版株式会社、p137, 1980.
- 3 3) Biggs J. F.: “Pattern in benthic algal of stream”, In “Algal Ecology” (Stevenson R. J , Bothwell, M. L., Lowe R.L , ed), ACADENMIC PRESS, USA: pp.31-56, 1996.
- 3 4) Hart D.D.: “Experimental study of exploitative competition in a grazing stream insect”, Oecologia, Vol.37, pp.46-52, 1987.
- 3 5) 建設省関東地方建設局京浜工事事務所・多摩川誌編集委員会:「多摩川誌」、山海堂、1986.
- 3 6) 丹野幸太:「多摩川中流域における砂礫堆固定化と植生分布の変化」、東京農工大学修士論文、1997.
- 3 7) 星野義延:「樹木の個体数と幹断面積」、多摩川の総合研究—永田地区を対象として—、河川生態学術研究会:432-436, 2000.
- 3 8) 浅野文:「河川敷の森林化と河川の安定に関する研究—多摩川中流における河川敷の森林化—」、建設省土木研究所環境部部外研究員研究発表会論文集、pp.11.1-11.6., 1996.
- 3 9) 奥田重俊、曾根伸典、藤間照子、富士堯:「多摩川河川敷現存植生図」、とうきゅう環境浄化財団、1979.
- 4 0) 曾根伸典:「多摩川河川敷現存植生図」、とうきゅう浄化環境管理財団、1983.
- 4 1) 奥田重俊、小舩聡子、島瀬頼子:「多摩川河川敷現存植生図」、とうきゅう浄化環境管理財団、1995.
- 4 2) 奥田重俊、笠原恵美:「多摩川永田橋地区現存植生図」、河川生態学術研究会多摩川研究グループ、1998.
- 4 3) 島瀬頼子:「多摩川永田地区現存植生図」、河川生態学術研究会多摩川研究グループ、2001.
- 4 4) 長岡聡子、島瀬頼子:「多摩川永田地区現存植生図(2001年春季)」、河川学術研究会多摩川研究グループ、2002.
- 4 5) 李参熙、藤田光一、塚原隆夫、渡辺俊、山本晃一、望月達也:「礫床河川の樹林化に果たす洪水と細粒土砂流送の役割」、水工学論文集第42巻、pp.433-438, 1998.
- 4 6) 星野義延:「植物動態、多摩川の総合研究—永田地区を対象として—」、河川生態学術研究会、pp.667-649.2000.

- 4 7) 辻本哲郎、田代喬、伊藤壯志:「生活圏の連結性に着目した魚類生息環境評価法の提案と河道内微地形の役割評価」、河川技術に関する論文集、Vol.6, pp167-172, 2000. 87-102, 1986.
- 4 8) 楊継東、関根雅彦、浮田正夫、今井剛:「行動モードを考慮した魚の選好性に関する実験的研究」、土木学会論文集、No636/VII-13, pp35-45, 1999.
- 4 9) 紀平肇:「淀川・楠葉ワンド群の干し上げとその再生」、淡水魚保護、pp63-66, 1989.
- 5 0) (財)河川環境管理財団大阪研究所:「わんどの機能と保全・創造～豊かな河川環境を目指して～」、pp99-103, 1999.
- 5 1) LAWRENCE C HALYK and EUGENE K.BALON:Structure and ecological production of the fish taxocene of a small floodplain system, Canadian Journal of Zoology Vol.61, pp2446-2464, 1983
- 5 2) 傳田正利、山下慎吾、尾澤卓思、島谷幸宏:「ワンドと魚類群集～ワンドの魚類群集を特徴づける現象の考察～」、日本生態学会誌、No.52, pp287-294, 2004
- 5 3) 中村守純:「日本のコイ科魚類(日本産コイ科魚類の生活史に関する研究)」、財団法人資源科学研究所、pp271-274, 1969.
- 5 4) 賈仰文、倪广恒、河原能久、末次忠司:「都市河川流域の水循環解析と雨水浸透施設の効果の評価」、水工学論文集第 44 卷、pp151-156, 2000.
- 5 5) 土木学会水理委員会編:「水理公式集」、河川編、丸善、1999.
- 5 6) 玉井信行、水野信彦、中村俊六:「河川生態環境工学 魚類生態と河川計画」、東京大学出版会、pp190-192, 1993.
- 5 7) 川那部浩哉、水野信彦:「日本の淡水魚」、山と溪谷社、pp.352-353, 1982.
- 5 8) V.Alaric Sample:「生態系管理へのリモートセンシングと GIS の活用」、フジ・テクノシステム、1999.
- 5 9) 田淵俊雄、高村義親:「集水域からの窒素・リンの流出」、東京大学出版会、1985.
- 6 0) 戸田任重、中佐錦、沖野外輝夫、川島博之:「窒素負荷発生量の変遷」、千曲川の総合研究-鼠橋地区を中心として-, pp.56-61, 2001.
- 6 1) 戸田任重、上村由加里:「流域の窒素負荷源と河床付着物の窒素安定同位体比」、千曲川の総合研究-鼠橋地区を中心として-, pp.62-70, 2001.
- 6 2) Heaton, THE. : “Isotopic studies of nitrogen pollution in the hydrosphere and atomosphere:A review”, Chemical Geology (Isotopic Geoscience Section), pp.