

積雪寒冷地河川における水理的多様性の持続的維持を可能にする河道設計技術の開発

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 23～平 27

担当チーム：寒地河川チーム

研究担当者：船木淳悟、永多朋紀、川村里実

【要旨】

近年、十勝川水系札内川では流路の単列化や河道内植生の樹林化が進行し、これらの現象と呼応するように札内川の特徴であった礫河原が急速に消失しつつある。このような背景を受け、過去2ヶ年に亘り礫河原の再生を目的とした融雪出水規模のダム放流が試験的に実施されており、事後調査から、樹林化をもたらすヤナギ種子の定着に対しては一定の抑制効果を持つことが示された。しかし、このような河川環境の急激な変化が、水生生物の生息環境に与える影響に関しては未だ十分な知見が無く、今後、河川環境改善に向けた目標設定を行い、様々な具体的施策へと繋げるには、これを定量的に評価するための仕組み・基準が求められる。本研究では、生物量と物理量に関する詳細な現地調査をもとに、水生生物の物理場に対する選好性を明らかにし、河川環境を生物面から定量的に評価することを試みるものである。今年度は、札内川の上下流域を対象とした現地調査結果から、物理場、特に河床表層の粒度分布特性に対する選好性を「Fredle 指数」で、水理量に対する選好性を「Froude 数」を用いて表し、これらを指標とした河川生態系評価モデルを構築した。札内川を代表する底生魚を対象に解析を行った結果、選好度（Suitability Index）の空間分布は実際の生息密度をある程度良好に表現できることがわかった。また、当該指標を用いることで、セグメントの異なる上下流域に対しても同一の評価基準を用いた生息場評価が可能になることを明らかにした。

キーワード：札内川、生態系評価モデル、底生魚、礫間の空隙

1. はじめに

十勝川水系札内川では、流路の単列化や河道内植生の樹林化が進行し、かつて札内川を象徴する河川景観であった礫河原は近年急速に消失しつつある（図-1）。このような河川環境の劇的な変化を背景に、2011年から現在まで礫河原の再生を目的とした融雪出水規模のダム放流が毎年実施されてきている。これは、ダム放流量を制御することで人為的な出水を生起させ、河床の攪乱や流路の変動、または植生の更新を促すことを目指した新たな試みである。放流後に行われた事後調査から、樹林化をもたらすヤナギ種子の定着抑制効果や、流路変動の活性化による比高差の解消など一定の環境改善効果が確認されている。しかし、このようなダム放流が水生生物に与える影響に関しては未だ十分な知見がなく、今後、河川環境の改善効果を水生生物の生息環境の面からも定量的に評価することが求められる。

著者らによる過去の研究^{1),2)}では、札内川の代表的な魚種であるハナカジカ（底生魚）を対象とした調査分析から、生息密度とフルード数及び Fredle 指数との間に有意な相関を見だし、この関係を指標化

した選好曲線を用いてダム放流前後の生息環境改善効果を評価した。解析の結果、サケの産卵床評価に用いられる Fredle 指数を用いて河床表層の空隙状況を表すことで、生態系評価モデルの再現性が向上することがわかった。

しかし、解析に用いた指標は、稚魚から成魚までの全年齢群が混在したデータを元にしており、年齢や体長による選好性の違いが考慮されていなかった。一般的に、稚魚と成魚では遊泳力や生息域、捕食対象生物、繁殖活動の有無などの生態的特性が異なるため、水深や流速、底質などの物理場に対する選好性も各成長段階に応じて変化するものと考えられる。よって、生態系評価モデルの再現性を向上させるためには、このような違いを評価指標へと十分反映させる必要がある。

本研究では、まず上下流域における魚類の生息状況を把握するため、札内川下流域を対象に生物量と物理量に関する詳細な現地調査（2014年、計26箇所）を行い、上流域と中流域を対象に行った過去の調査結果（2011～2013年、計81箇所）と併せて、出現魚種や全捕獲数に占める魚種別の構成比率など

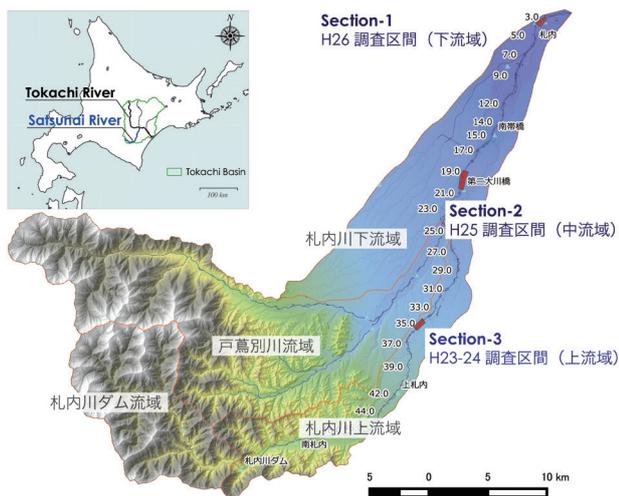


図-1 札内川上下流域の河川環境変化と現地調査区間 (2011~2014年, Section1~3)

を流域毎に整理した。また、指標種として選定したハナカジカの物理場に対する選好性をより適正に評価するため、Hasselblad法を用いた体長組成分析を行い、得られた成長式から各成長段階(稚魚・成魚)に応じた選好曲線を作成した。さらに、この評価指標を平面2次元の水理河床変動解析モデルへと組み込み、上中流域に設けた各調査区間を対象とした生息環境評価を行い、ハナカジカの物理場に対する選好性SI (Suitability Index) の空間的な分布特性の比較検証を行った。

2. 現地調査

2011~2013年は上流域のKP34.6~35.6及び中流域のKP19.0~20.6を対象とした現地調査を行い、各調査区画内における水生生物(魚類・底生昆虫)の捕獲調査と物理諸量(水深・流速・底質等)の計測を行った。2014年はさらにセグメントの異なる物理環境下での調査を行うため、調査区間を下流側へと移し、十勝川本川との合流点に近いKP3.0~4.0を対象に調査を行った。2011~2014年の過去4年間に亘って実施した上流域・中流域・下流域の各調査区間の位置関係を図-1に示す。

2.1 調査手法

本研究では札内川の上下流域を複数年に亘って継続的に調査することを想定し、調査の時期(年度・季節)や場所(河川構造・セグメント)が異なるデータを定量的に比較検証できるよう、捕獲方法や作業強度は可能な限り統一し、コロラード法を用いて一定区画内の魚類及び底生昆虫の捕獲採集を行った。各調査プロットの位置は、現地踏査を行った際、早

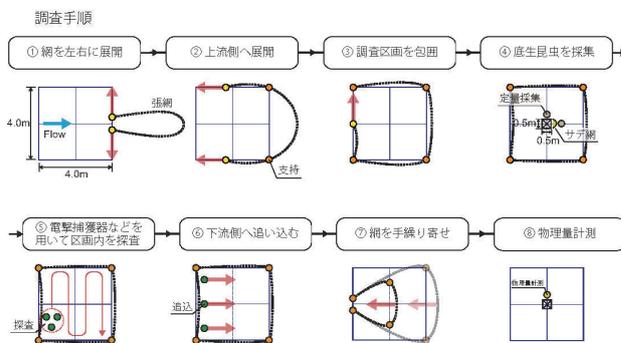
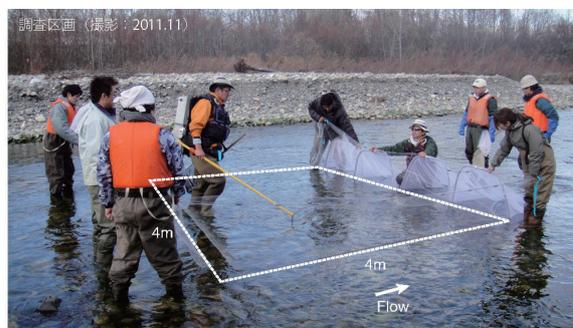


図-2 生物量と物理量の調査方法(コロラード法)

瀬、平瀬、淵、細流・2次流路、ワンド・止水域等の河川構造を目視で判断し、延長約1kmの調査区間内に存在する様々な河川環境を均等に網羅するよう、毎年1~3回の調査毎にそれぞれ10~15箇所程度の調査プロットを設定した。

魚類調査は、一区画あたりの作業強度を3人30分程度とし、4m四方の調査プロット内を張網で包囲した後、手足等を用いて河床面を十分に攪乱しながらエレクトロフィッシャーやサデ網等を用いて区画内の魚類を網羅的に採集、捕獲した魚類はその場で同定し、個体毎に計数計測(全長・体長・体重)

調査時期		流域区分	調査区画数	河床材料調査	魚類捕獲総数	魚種別捕獲総数									
年	月日					ハナカジカ	フクドジョウ	スナヤツメ	カワヤツメ	ウグイ	ニジマス	イバラトミヨ	ヤマメ	イトヨ	ギンブナ
2011	11/8	上流域	15	○	128	86	17	8	0	0	5	9	1	0	0
2012	6/13	上流域	11	○	68	35	20	3	5	0	4	1	0	0	0
	8/29	上流域	11	-	109	46	44	3	1	2	10	3	0	0	0
	12/11	上流域	11	-	50	18	4	1	8	0	9	10	0	0	0
2013	7/22	中流域	11	○	271	51	166	0	0	18	0	36	0	0	0
	9/30	中流域	11	-	301	46	141	0	1	63	0	50	0	0	0
	11/25	中流域	11	-	159	45	62	0	0	5	0	47	0	0	0
2014	9/11	下流域	13	○	581	7	170	11	16	370	0	7	0	2	1
	11/10	下流域	13	-	397	19	164	5	26	172	2	8	1	2	0
計			107		2062	353	788	31	57	630	30	171	2	4	1

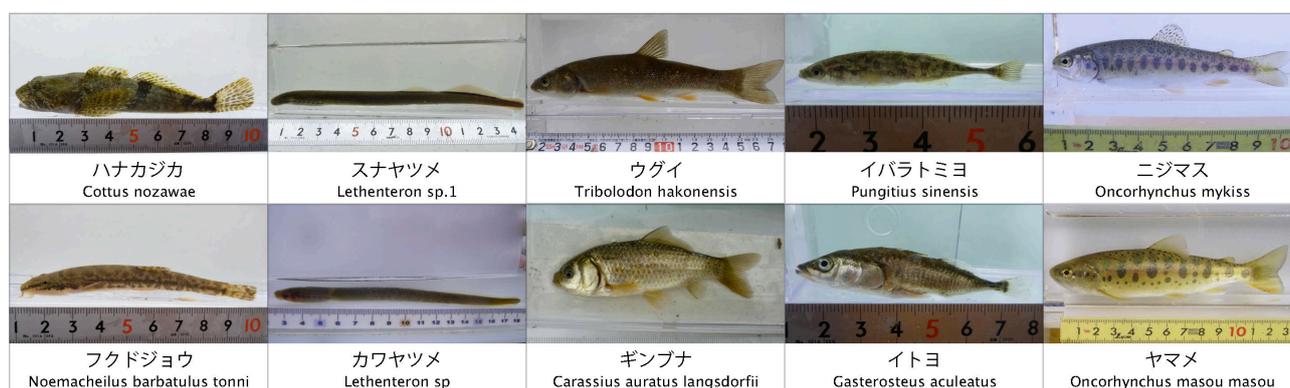


図-3 捕獲魚種（全 10 種）と魚種別捕獲総数一覧

を行った。底生昆虫は、各調査プロット内に 0.5m 四方の調査フレームを 2 箇所設置し、各調査フレーム内で表層厚 0.1m 程度の河床材料を採取、砂礫の表面に付着した底生昆虫を全数捕獲した。捕獲した底生昆虫は室内分析用に固定して持ち帰り、ソーティング・同定・計数計測等を行った。なお、底質が砂泥の場合は河床材料を濾して残留した生物を採集するものとし、計数は頭部のついている個体のみを対象とした。

物理環境調査は、各調査プロット内における水深、流速、水温、DO、河床材料の粒径のほか、横断測量による河道断面形状の計測を行った。河床材料調査は、水域における河床表層の粒度分布が底生魚の生息環境に大きな影響を持つものと考え、各調査プロットの中央付近で 0.5m 四方、表層厚 0.2~0.3m の河床材料を採取、これを 8 等分した試料の中から任意の 2 試料を選んで混合し、得られた試料をもとに粒度分布試験を行った。水生生物の捕獲採集から物理環境の計測までを含めた一区画当りの一連の作業手順を図-2 に、2011~2014 年の過去 4 年間に亘って実施した計 9 季・107 箇所における現地調査結果の概要を図-3 に示す。

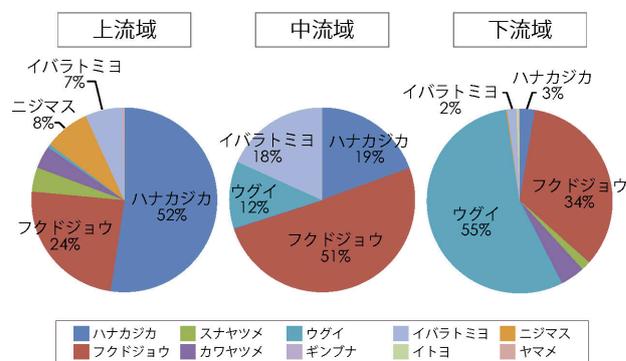


図-4 流域別の魚種構成比

2. 2 調査結果（魚類）

札内川流域を対象に行った過去 4 年間の調査では計 10 種類の魚種が確認され、中でもハナカジカ、フクドジョウ、ウグイ、イバラトミヨの 4 種が捕獲数の大部分を占める。その他の魚種では、底質に細粒径が多く含まれるような調査箇所では、スナヤツメやカワヤツメなどの泥の中に潜伏して生活するような魚種が確認されているほか、上流域の水制工周辺に形成された淵ではニジマスやヤマメなどの澄んだ水を好む魚種が見られ、下流域のワンドや溜まりで

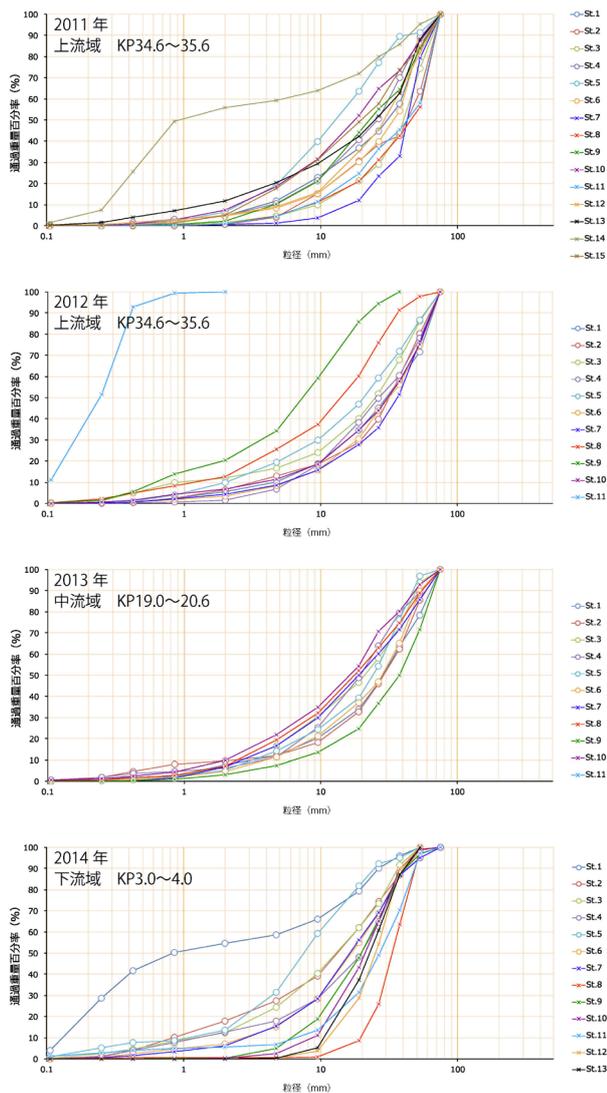


図-5 各調査年・調査プロット内の粒度分布

はイトヨやギンブナなどの止水域を好む魚種も一部確認されているが、これらは捕獲数全体に占める割合としては非常に僅かである。

図-4 は流域別の捕獲数に占める魚種構成比率を示しており、上流域・中流域では、ハナカジカ・フクドジョウの底生魚2種が捕獲数全体の70~80%を占め、特に低水路内が広く粗礫成分で覆われている上流域では、礫間の空隙を主な生息場とするハナカジカが多く生息していることがわかる。また、ハナカジカは上流域では捕獲数全体の50%以上を占める優占種であるが、中流域ではその割合は20%程度となり、下流域ではさらに数%程度にまで低下するなど、その生息密度は下流へいくほど減少する傾向が見られる。一方、フクドジョウ・ウグイの捕獲数はこれとは逆に下流へいくほど増加する傾向が見られ、特に下流域ではこの2種が捕獲数全体の約90%を占

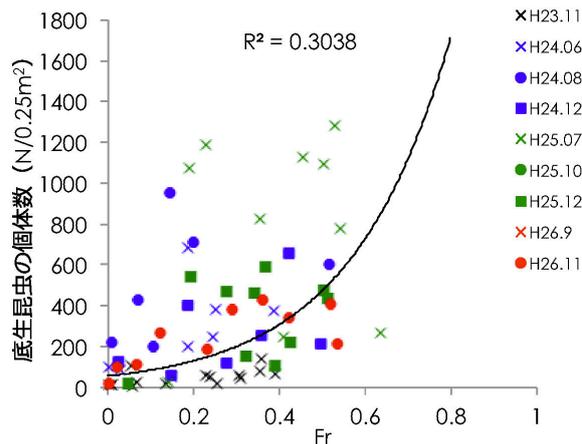


図-6 底生昆虫の捕獲数とフルード数との関係

めるほどの高い優占率を示している。ただし、ウグイに関しては、下流域での調査の際、大小様々な規模のワンドや平水時は止水域となるような2次流路内において、数十~数百匹単位で行動する稚幼魚の群れが複数箇所を確認されており、このような遊泳魚の群れを対象とした一斉捕獲の影響が捕獲数の増加として顕著に現れている。

魚類調査の結果から、捕獲魚種の構成比にはセグメントによって明瞭な違いがあることがわかる。通常、流況や河床材料などの物理環境もセグメントによって大きく異なることを鑑みれば、居住空間や採餌・繁殖・産卵環境として重要な役割を果たしている物理環境と、各魚種の生息密度との間には一定の相関性が存在するものと推察できる。一般的に、底生魚は遊泳魚に比べて生活圏が狭く、礫間の空隙に身を潜めて定位する生態を有しており、礫間の空隙は外敵から身を隠し流水から受ける外力を軽減するための待避空間として機能している。実際、現地踏査時の目視観測や河床材料調査の結果(図-5)から、上下流域の粒度分布特性には明瞭な違いが認められ、特に中下流域では浮石や沈石等で表現される礫間の空隙状況が場所によって大きく異なるため、これが底生魚の場の選択性に大きな影響を及ぼしている可能性がある。このような底生魚が有する河床材料の粒度分布に対する鋭敏な応答特性は、河床材料の粒径やそのバラツキなどを介して、底生魚の生息適地評価がある程度可能であることを示唆している。

2.3 調査結果 (底生昆虫)

図-6 は、各調査プロットにおける底生昆虫の総捕獲数とフルード数との関係を示している。現地調査の結果、底生昆虫の捕獲数は、早瀬・平瀬など、水深が浅くて比較的流れの速い水理環境下で、且つ、

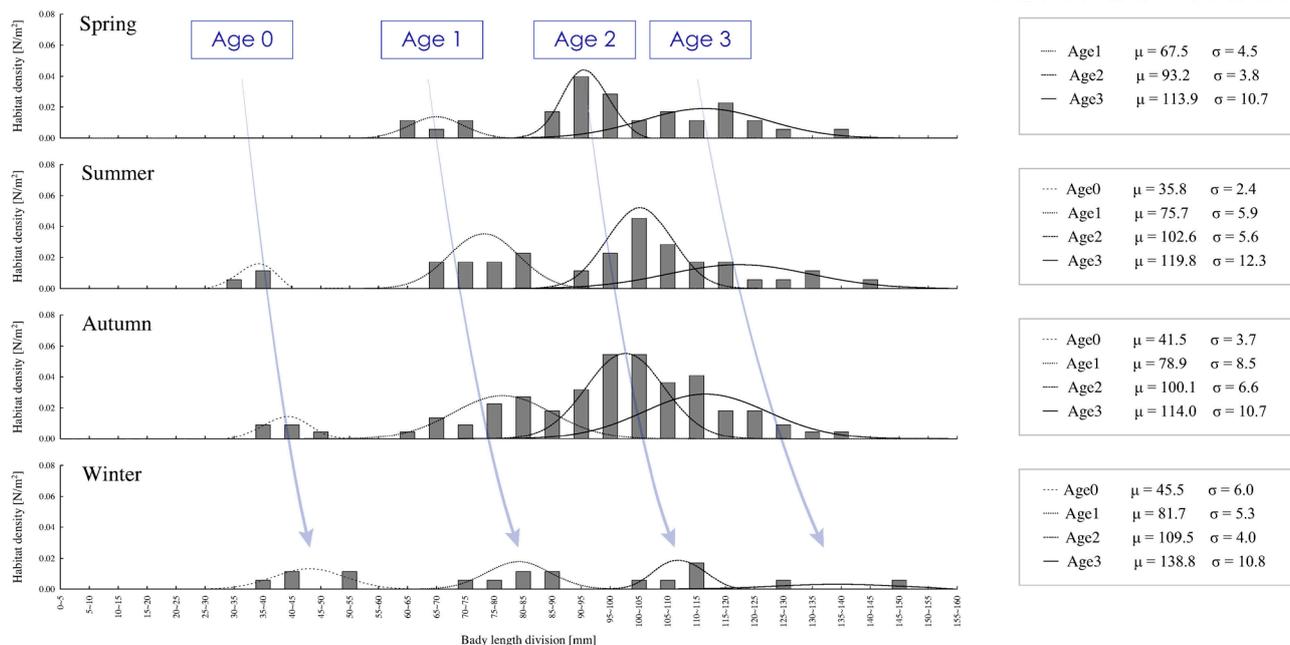


図-7 ハナカジカの季節・体長別の生息密度と体長組成分析による年齢群のモード分析

河床面がある程度粗礫化した調査プロットを中心に生息数が増加することがわかった。特にカゲロウ目やカワゲラ目など、礫表面に付着して生活を行うような昆虫は、ハナカジカなどの底生魚の捕食対象生物でもあることから、早瀬や平瀬は良好な採餌環境となっているものと考えられ、底生魚の場の選択性に何らかの影響を及ぼしている可能性が高い。一方、水深が深く流れが滞留するような止水域やワンドなどの澱みでは、底生昆虫の生息数も著しく減少し、基眼目やトビケラ目など底生魚との捕食関係に無い生物が多く確認されており、このような止水域やワンドなどは、ハナカジカの採餌環境としては不適であることが、その生息密度の低さに表れているものと推察される。

2. 4 指標種の選定

札内川流域を対象に行った過去4年間の調査では計10種類の魚種が確認され、ハナカジカ、フクドジョウ、ウグイ、イバラトミヨの4種が捕獲数の大部分を占めていた。その中でも、ハナカジカは礫河原依存性を有し、礫河原創出の取組みが行われている札内川においては、河川環境の改善効果を評価する上で有効な指標と成り得ることや、全捕獲数に占める割合（生息密度）が高く、指標を作成する上で統計的に有利であること、また、札内川に生息する水生生物の中では上位種に当り、種間競争によって他の生物からの捕食圧力を受け難いこと、さらには、

底生魚は遊泳魚に比べて行動範囲が狭く、物理場に対しては比較的明瞭な選好性を有することなどから、本研究では、ハナカジカを指標種と定め、選好曲線の作成及び数値解析を用いた生息環境評価を行う。

3. ハナカジカの生態的特性

既述の通り、稚魚と成魚では遊泳力や生息域、繁殖活動の有無などの生態的特性が異なるため、水深や流速、底質などの物理場に対する選好性も各成長段階に応じて変化するものと考えられる。よって、生態系評価モデルの再現性を向上させるためには、物理場に対する選好性を年齢別に分析し、各成長段階に応じた選好性の違いを評価指標へと反映させる必要がある。本章では、体長組成分析から得られた各年齢群の平均体長をもとにハナカジカの成長式を求め、捕獲されたハナカジカの年齢を体長から推定することを試みる。

3. 1 体長組成分析

図-7は、札内川上流域を対象に行った季節毎の調査結果で、体長 $L_t=0\sim 160\text{mm}$ の範囲を5mm間隔の体長区分に分け、体長区分毎の捕獲数（生息密度）を整理したものである。この調査結果をもとにHasselblad法を用いた体長組成分析を行った結果、図中正規分布の形で表される複数のモードが存在することがわかった。通常、自然淘汰によって各世代の個体数は徐々に減少するが、各年齢群の平均体長

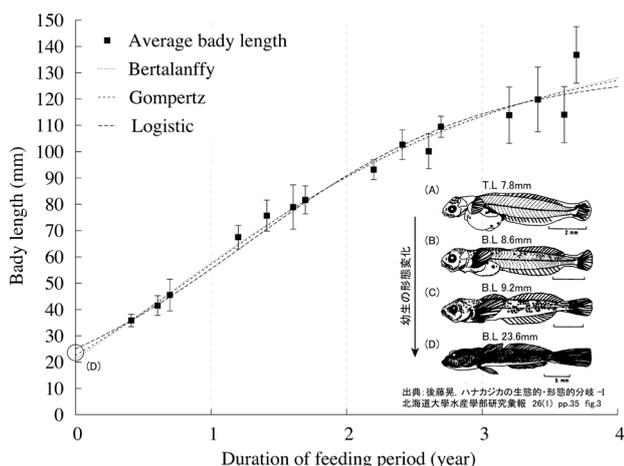


図-8 ハナカジカの成長曲線

は時間経過とともに増加する。図中 Age 0~3 に示すように、各季の調査結果には概ね 3~4 つのモードが存在し、各モードは季節的には増加傾向に遷移していることから、これらは各年に孵化したハナカジカの年齢群（世代）を表すものと考えられ、その寿命は 3~4 年程度であるものと推定される。図中右側に体長組成分析から得られた各年齢群の平均体長 μ と標準偏差 σ を示す。ここで、春期調査の際に Age 0 の年齢群が確認されなかった理由について補足する。一般的にハナカジカの孵化時期は 4~5 月頃であるとされており、6 月の春期調査の時点では、既に当該年に孵化した仔魚や稚魚も河道内に多く生息していたものと考えられる。しかし、孵化後 2~3 ヶ月程度の個体の体長は 2~3cm 程度と小さく、調査に用いた網目を通過するため捕獲できなかったものと考えられる。

3. 2 成長曲線の推定

次に、体長組成分析の結果をもとにハナカジカの成長曲線を推定する。ここでは、4 月 1 日をハナカジカの産卵日と仮定し、調査月日から推定される各年齢群の月齢と平均体長 μ との関係、水産資源の推定などに用いられる以下の 3 式を用いて近似した。上記より得られた成長曲線を図-8 に示す。

$$L_t = A(1 - Be^{-kt})^3 \quad (1)$$

$$L_t = Ae^{-Be^{-kt}} \quad (2)$$

$$L_t = \frac{A}{(1 + Be^{-kt})} \quad (3)$$

ここで、(1)式は Bertalanffy 曲線、(2)式は Gompertz 曲線、(3)式は Logistic 曲線で、 L_t は体長、 t は年齢で、係数 A、B、k の値は下表の通りである。

表-1 成長曲線の係数

成長式	A	B	k
Bertalanffy	149.2	0.477	0.565
Gompertz	142.0	1.838	0.702
Logistic	130.3	4.203	1.135

4. 選好度解析

河川環境を生物面から定量的に評価するためには、生物量と物理量とを結びつける適切な指標の選定とその精度が鍵となる。本研究では、札内川の上下流域を対象とした現地調査結果をもとに、生物量と物理量に関する単相関回帰分析を行い、水生生物の生息環境を適正に評価し得る有効な物理指標について検討を行った。

4. 1 単相関回帰分析

ハナカジカの生息密度と各種物理量との単相関回帰分析から、水深、流速、粒径の 3 つの物理量が一定程度の相関性を示す有効な物理指標として選定された。中でも上流域では水深・流速、下流域では粒径に対してそれぞれ高い相関性が認められるなど、セグメントの違いによって選好する物理指標には明確な違いが見られた。この理由として、上流域には底生魚が身を潜め得るサイズの空隙は比較的多く存在するが、下流へ行くほど河床材料を構成する細粒分の含有率が増すため、河床面が沈石状態にある箇所割合も増え、粒径に対する依存性が高まるためであると推察される。

上記 3 つの物理量について様々な組み合わせを検討した結果、水理的特性を表すフルード数 F_r と粒度分布特性を表す Fredle 指数 F_f とを分子分母に組み合わせた(4)式が、ハナカジカの生息密度に対して比較的高い相関性を示すことがわかった。式中の Fredle 指数は、代表粒径 d_{60} の大きさを、粒径加積曲線の傾きや分散度を表す標準偏差 $(d_{75}/d_{25})^{0.5}$ で除したもので、河床面の粒度分布特性を表す変数として、サケの産卵床を評価する際の指標としても用いられる。

また、評価指標に各調査区画内で捕獲されたハナカジカの平均体長 L_t を考慮し、データを年齢別 (0~3 齢) に分析することで、生息密度と評価指標との相関性が高まるとともに、無次元化によって指標の汎用性が向上することがわかった。回帰分析から得られた年齢別の選好曲線を図-9 に示す。なお、(4)式中 L_t/d_{60} が示す代表粒径と平均体長の比は、成長

段階に応じて河床材料の粒径（河床表層の空隙）に対する選好性が変化するというハナカジカの生態的特性を表すものと解釈できる。

$$X = \frac{F_r}{F_i} L_t = \frac{v}{\sqrt{gh}} \frac{L_t}{d_{60}} \sqrt{\frac{d_{75}}{d_{25}}} \quad (4)$$

ここで、X は評価指標（説明変数）、 F_r は Froude 数、 F_i は Fredle 指数、 L_t はハナカジカの平均体長、 h は水深、 v は流速、 g は重力加速度で、 d_{**} は通過重量百分率**%の粒径である。

4. 2 データの棄却条件と正規化基準

ここで、相関回帰分析を行うデータの棄却条件について述べる。本研究では、9 季・107 箇所全ての調査結果を対象に、まずは、捕獲数 0 と止水域（流速 $v=0.001\text{m/s}$ 以下）の調査データを除外し、さらに、0～3 歳の各年齢群のデータに対してそれぞれ Smirnov - Grubbs の棄却検定を行い、有意水準 5%（片側、1 回）の有意点を超える調査データを「外れ値」として棄却した。

図-9 から、各年齢群の物理場に対する選好性には大きく 2 つの傾向があり、0～1 歳の稚幼魚の段階では選好曲線は正の相関を、2～3 歳の成魚の段階では負の相関を持ち、成魚となる年齢を境に正負の傾向が変化することがわかる。この理由は以下のように解釈できる。

a) 稚幼魚（0～1 歳）

水深が浅く流れの速い水理環境は、藻類等の一次生産が活発で底生昆虫の生息密度が高い（図-6）。成長過程にあるハナカジカの稚魚にとって、捕食対象となる底生昆虫が多く生息する環境は生存競争において有利に働くことから、早瀬や平瀬などの底生昆虫の生息密度が高い水理環境を好み、Froude 数に対しては正の相関を示すものと考えられる。すなわち、稚幼魚の段階では「採餌環境」に対する選好性が優先される。

b) 成魚（2～3 歳）

ハナカジカの成魚は大礫の底部を産卵場とし、その周辺で繁殖活動を行うため、上流域で多く見られるような粗粒化した河床材料に対して高い選好性を有し、粒径が粗く粒度分布のパラツキが小さい底質環境を好むことから、Fredle 指数に対しては正の相関を示すものと考えられる。すなわち、成魚の段階では「産卵環境」に対する選好性が優先される。

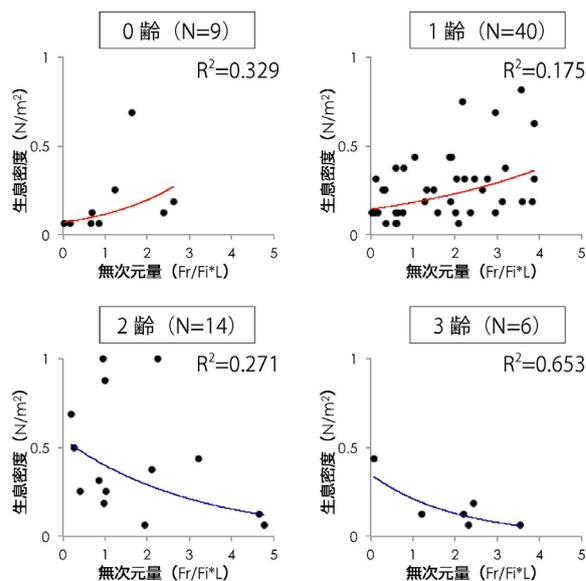


図-9 年齢別の選好曲線

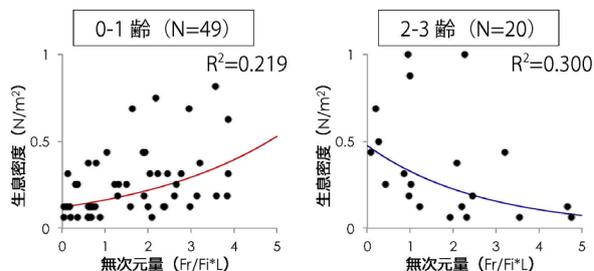


図-10 成長段階別の選好曲線

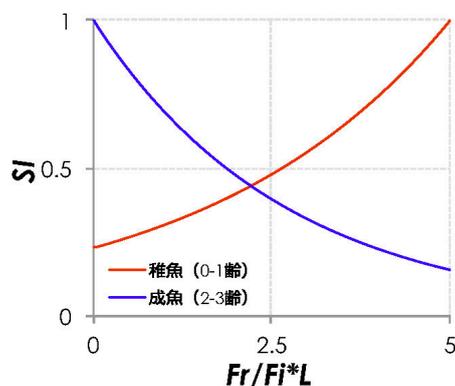


図-11 成長段階別の選好曲線（正規化後）

図-10 は、選好曲線を稚幼魚と成魚の 2 つの成長段階に分けて整理したものである。縦軸の生物量は季節やセグメントによっても変化するため、目的変数は棄却検定後の生息密度の最大値を用いて正規化し、時空間的な変化を含まない無次元量 SI へと変換する（SI: Suitability Index）。(4)式を説明変数、(5)式を目的変数とした各成長段階の選好曲線を図-11 に示す。

$$SI = ae^{bX} \quad (5)$$

ここで、SI：選好値（目的変数）、X：評価指標（説明変数）、係数 a、b の値は下表の通りである。

表-2 選好曲線の係数と決定係数

成長段階	a	b	R ²
① 稚魚 (0-1齢)	0.230	0.294	0.219
② 成魚 (2-3齢)	1.000	-0.372	0.300

5. 生態系評価モデル

次に、以上で求めたハナカジカの成長段階に応じた2種類の選好曲線を既存の水理河床変動解析モデルへと組み込み、底生魚の生息環境を評価するための数値解析モデルを構築する。

5. 1 解析モデル

本研究では、水理河床変動量の解析にフリーソフトウェア「iRIC」のソルバー「Nays2D ver4.0³⁾」を用いる。本モデルの詳細についてはここでは割愛するが、詳しくは文献⁴⁾を参照されたい。本研究で行う解析では、この平面2次元水理河床変動解析モデルにPHABSIMの手法を取り入れ、図-11に示す2つの選好曲線から、ハナカジカの物理場に対する選好度SIの空間分布を算出し、上下流区間における現地調査結果との整合性を検証する。

本研究の最大の特徴は、粒度分布特性とその変化を、生態系評価を行う際の指標として取り入れる点にあり、河床変動解析では粒度分布の時空間的变化を算出するため混合粒径下での解析を行う。混合粒径では、河床材料はある粒度分布を持って存在するため、解析上は、河床の粒径加積曲線を任意階層に分割してそれぞれの階層における流砂量を求め、それらを全て足し合わせることで総流砂量と河床変動量を算出する。その際、河床を交換層・遷移層・堆積層に分割し、交換層における粒度分布の時間変化を計算することで、混合粒径下で見られる分級現象も再現される。各階層における全掃流砂量は粒径別に拡張された以下の芦田・道上式から求める。

$$q_{bk} = 17\tau_{*k}^{\frac{3}{2}} \left(1 - \frac{\tau_{*ck}}{\tau_{*k}}\right) \left(1 - \sqrt{\frac{\tau_{*ck}}{\tau_{*k}}}\right) \sqrt{sgd_k^3} \quad (6)$$

ここで、 q_{bk} ：流線方向の全流砂量、 τ_{*k} ：k階層

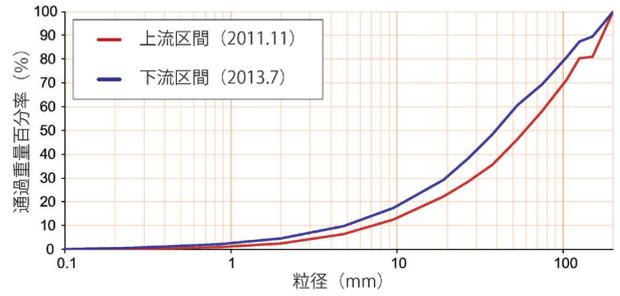


図-12 初期粒度分布（計算条件）

の粒径に作用する無次元掃流力、 τ_{*ck} ：k階層の粒径の無次元限界掃流力（岩垣の式）、 d_k ：k階層の代表粒径で、各粒径の無次元限界掃流力は遮蔽効果を考慮した以下の浅田の式（Egiazaroffの修正式）を用いて算出する。

$$\frac{\tau_{*ck}}{\tau_{*cm}} = \left[\frac{\log_{10} 23}{\log_{10} (21 d_k / d_m + 2)} \right]^2 \quad (7)$$

$$d_m = \sum_{k=1}^n p_k d_k \quad (8)$$

ここで、 τ_{*cm} ：中央粒径の無次元限界掃流力（岩垣の式）、 d_m ：中央粒径、 p_k ：河床全体に占めるk階層の粒子の割合である。

5. 2 計算条件

解析対象区間は、現地調査区間に合わせて上流域はKP34.6～35.6、中流域はKP19.0～20.6とし、上流域の初期河床形状には2011年の横断測量結果を、下流域には2013年のLP測量データを用いた。初期粒度分布には、各年の河床材料調査の結果をもとにした平均値を与え（図-12）、粗度係数は代表粒径 d_{60} をもとに、Manning-Strickler式から上流域は $n=0.031$ 、中流域は $n=0.029$ とした。流量条件は、上下流域の平水流量規模を定常流で与える（上流域：20m³/s、下流域：40m³/s）。

本研究では、現地調査から得られた場の平均的な粒度分布が支配的であるものと考え、まずは、河床材料調査の結果をもとにした平均的な粒径加積曲線を初期粒度分布として与え、次に、平水流量を定常流で一定時間（3時間）通水した際の平衡状態から、粒径加積曲線の空間分布を推定することとした。ただし、現地における実際の粒度分布は、本来、洪水時に河道が大きく変化する中で徐々に構成されていくものであり、洪水流量規模やその継続時間、また

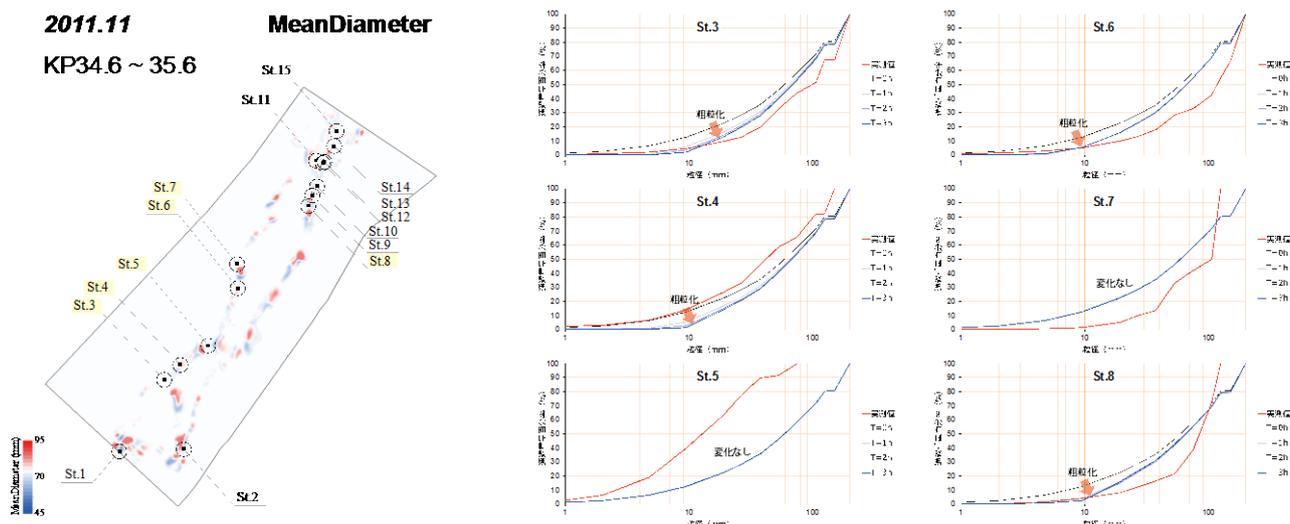


図-13 上流域：粒度分布の解析値と実測値 (KP34.6~35.6、L=1.0km、Q=20m³/s、3h 通水後)

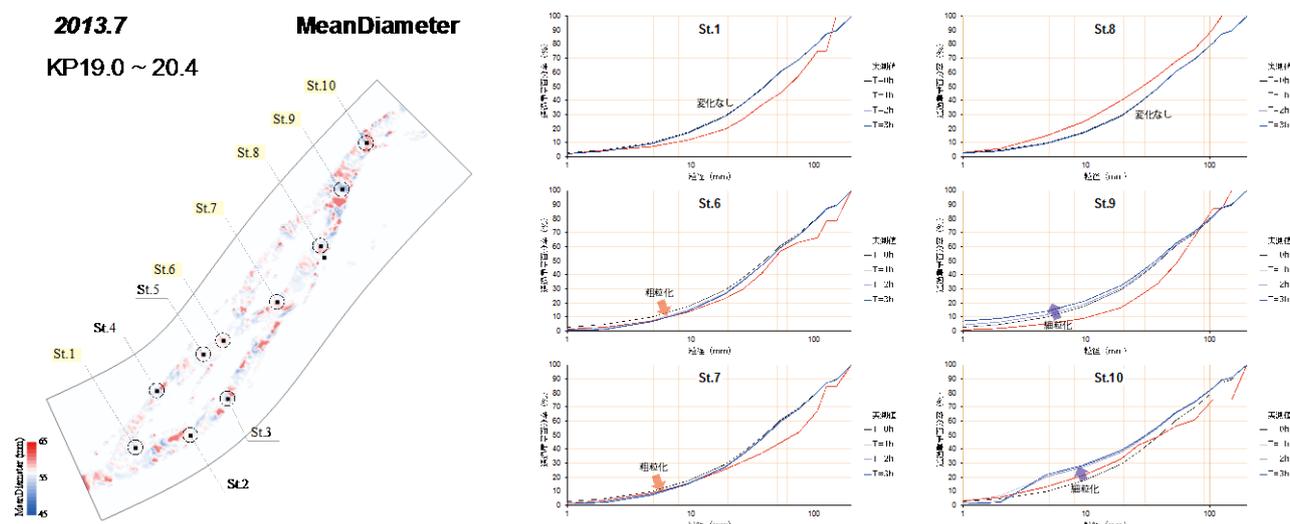


図-14 中流域：粒度分布の解析値と実測値 (KP19.0~20.4、L=1.4km、Q=40m³/s、3h 通水後)

は流量ハイドロの形状などによっても河床材料の状態は大きく異なるものと推察される。

5.3 粒度分布の解析結果

粒度分布に関して、図-13に上流域(KP34.6~35.6)、図-14に中流域(KP19.0~20.6)の解析結果をそれぞれ示す。両解析とも、通水開始から3時間程度で粒度分布は概ね平衡状態に達したと判断されたため、以降では3時間経過後の粒度分布をもとに再現性の検証を行う。図中左のコンター図は、中央粒径 d_m の時間変化量の面的分布を示しており、暖色は粗粒化の傾向、寒色は細粒化の傾向へ変化したことを意味する。また、図中右の粒径加積曲線は、左図で黄塗した6つの調査プロットにおける粒度分布の時間変化を示しており、黒線が初期粒度分布、青線が粒

度分布の解析結果を1時間毎に表示したもので、赤線は現地調査結果である。

まず、図-13の上流区間の結果を見ると、St.3、St.4、St.6、St.8は粗粒化の傾向を示しており、St.4を除けば現地調査結果に近づく方向へと変化している。一方、St.5、St.7は初期粒度分布からほとんど変化しておらず、特にSt.5に関しては現地状況とは大きく異なる結果となった。これは、平水流量規模程度では河床変動量が少ないため、粒度分布構成の変化も緩慢であり、且つ、現地で細粒化の傾向が現れるような低流速域では特に変化が生じ難いためであると考えられる。次に、図-14の下流区間の結果を見ると、

St.6、St.7では上流区間と同様に粗粒化の傾向が見られ、非常に僅かではあるが現地調査結果に近づく

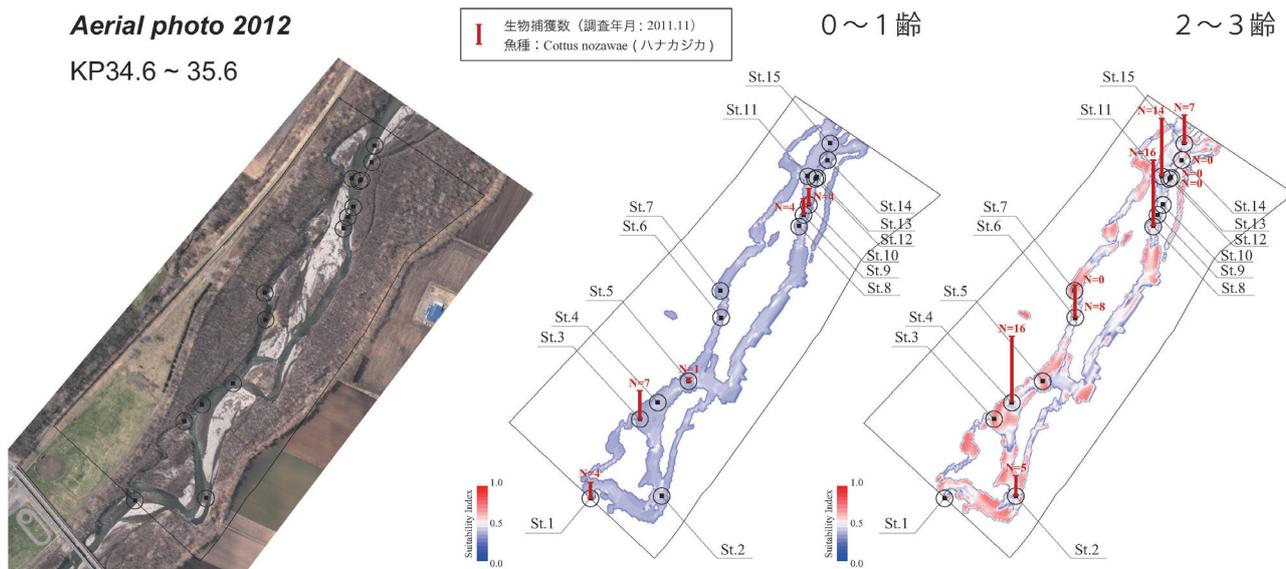


図-15 上流域：ハナカジカの生息適地評価と実際の捕獲数 (KP34.6~35.6、L=1.0km、Q=20m³/s、3h 通水後)

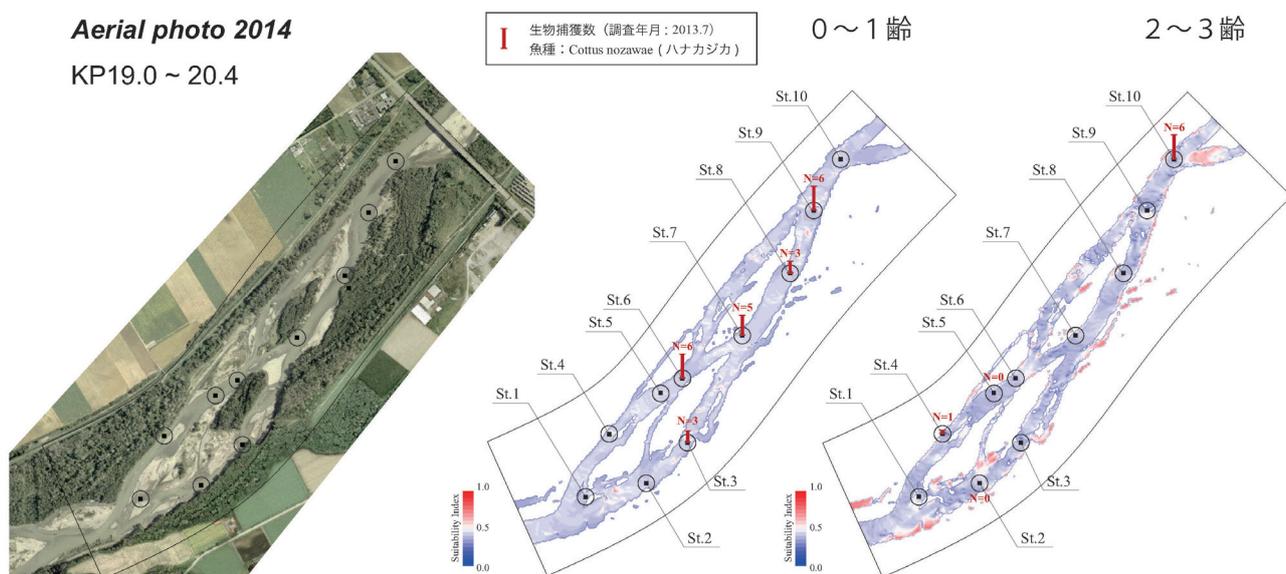


図-16 中流域：ハナカジカの生息適地評価と実際の捕獲数 (KP19.0~20.4、L=1.4km、Q=40m³/s、3h 通水後)

方向へと変化している。一方、St.9、St.10ではこれとは逆に細粒化の傾向が見られ、特にSt.9に関しては現地調査結果とは逆の方向へと変化している。中央粒径の変化からSt.9の直上流側では粗粒化が起きており、これは当該箇所から流出した細粒分がSt.9に流入したためと考えられる。

以上、混合粒径モデルを用いた粒度分布の解析結果と現地調査結果とを比較すると、両者には十分整合しない箇所も多く見られる。しかし、場の平均的な粒度分布を初期値として与えることで、粒度分布特性が大きく異なるようなセグメント間の比較を行うような場合に関しては、上述のような簡易的な手

法を用いた場合でも、ある程度妥当な評価が可能であると思われる。

5.4 選好度SIの解析結果

以上で求めた選好曲線(5)式・表-2と、前節に示した粒径加積曲線および各種水理量の解析値をもとに、ハナカジカの物理場に対する選好度(SI)の空間分布を求め、実際の生息密度との比較から上中流域への適用性を検証する。

図-15と図-16に、上流域(KP34.6~35.6)と中流域(KP19.0~20.6)の解析結果をそれぞれ示す。両解析ともに、通水開始から3時間程度で粒度分布は概ね平衡状態に達したと判断されたため、3時間経

過後の解析結果をもとに検証を行う。まず上流域に関して、0~1 歳の稚幼魚と 2~3 歳の成魚の 2 つの指標を用いた解析結果と、図中棒グラフで示す捕獲数の実測値とを比較すると、稚幼魚に対する解析結果は SI 値が全体的に低く出ており、選好度の高い領域と低い領域との違いがあまり明確ではなく、実際の捕獲数と選好度の評価結果との一致状況を十分に判断することができなかつた。一方、成魚に対する評価結果を見ると、水域全体に選好度の高い領域が広がっており、多くの調査プロットで実測値と解析値が一致していることが確認できる。

次に、中流域の解析結果について見ると、稚幼魚に対する評価結果は上流域と同様に、その一致状況を十分に判断することができないが、成魚に関しては、選好度の高い領域と低い領域はある程度明確に分かれており、早瀬や河岸付近に形成された比較的水深の浅い領域において SI 値が高く評価される傾向が見てとれる。全体的には実測値と整合する箇所も見られるが、上流域に比べて選好度の低い領域が全域に広がっており、実測値との整合性は必ずしも高いとは言えない。

ただし、セグメントの違いがハナカジカ（成魚）の場の選択性に及ぼす影響は比較的明瞭に表れており、上流域では河床面が浮石状態の粗礫成分で覆われていることによって、成魚にとって良好な産卵環境が与えられ、その結果、かなり広範囲に選好度の高い領域が広がっているものと考えられる。一方、中流域では、河床面が沈石状態となっている箇所が河道内に広く分布しているため、上流域に比べて底生魚が生息できる環境はかなり限定されており、選好度の高い領域は比較的狭い範囲に限定され、水域の大部分がハナカジカの生息にはあまり適さない環境であることがわかる。

6. 結論

以上、本研究では、上下流域における魚類の生息状況を把握するため、札内川下流域（KP3.0~4.0）を対象とした生物量と物理量に関する詳細な現地調査を行い、上流域（KP34.6~35.6）と中流域（KP19.0~20.6）を対象に行った過去の調査結果とを併せて、流域毎の出現魚種やその構成比などの特徴を整理した。また、指標種として選定したハナカジカの物理場に対する選好性をより適正に評価するため、水理量を表すフルード数と河床材料の粒度分布特性を表す Fredle 指数を用いた評価指標を作成し、体長組成

分析から得られた成長式をもとに各成長段階（稚幼魚・成魚）に応じた選好曲線を求めた。さらにこの選好曲線を平面 2 次元の水理河床変動解析モデルへと組み込んだ生態系評価モデルを構築し、上中流域に設けた各調査区間を対象とした生息環境評価を行った。

ハナカジカの物理場に対する選好度 SI (Suitability Index) の空間的な分布と実際の生息密度との比較検証を行った結果、稚幼魚に対する解析結果は SI 値が全体的に低く出るため、実測値と解析値との一致状況を十分に判断することはできなかつたが、成魚に関しては、物理環境の違いが場の選択性に明瞭な違いをもたらしており、上流域では河床面が浮石状態の粗礫成分で覆われていることによって、成魚にとって良好な産卵環境が提供されていることが解析結果からも示された。

本研究で行った解析結果の解像度と再現性に関しては、現時点では十分なものとは言えないが、セグメントの違いが底生魚の生息環境に及ぼす影響に関しては、ある程度妥当な評価結果が得られており、今回作成した評価指標を用いることで、上下流域を問わず、ある程度汎用性の高い底生魚の生息環境評価が可能であると思われる。

参考文献

- 1) 永多朋紀, 渡邊康玄, 伊藤丹: ダム放流による水生生物の生息環境改善効果の評価, 河川技術論文集 Vol.19, 477-482, 2013.
- 2) 永多朋紀, 渡邊康玄, 伊藤丹: 礫間の空隙を考慮した底生魚の生息環境評価手法, 河川技術論文集 Vol.20, 139-144, 2014.
- 3) 北海道河川財団: iRIC, <http://i-ric.org/ja/>
- 4) 清水康行: 河道平面形状の形成における河床・河岸の変動特性の相互関係について, 水工学論文集 Vol.47, 643-648, 2003.
- 5) 後藤晃: ハナカジカ *Cottus nozawae* Snyder の生態的・形態的分岐-I 産卵習性及び初期発育過程, 北海道大学水産学部研究彙報 26(1), 31-37, 1975.
- 6) 渡辺恵三, 中村太士, 加村邦茂, 山田浩之, 渡邊康玄, 土屋進: 河川改修が底生魚類の分布と生息環境におよぼす影響, 応用生態工学 Vol.4 (2), 133-146, 2001.
- 7) Frederick B. Lotspeich, Fred H. Everest: A New Method for Reporting and Interpreting Textural Composition of Spawning Gravel, Research Note RN-PNW-369, 1-13, 1981.

A STUDY ON DESIGN TECHNIQUE OF RIVER CHANNEL THAT CAPACITATE TO SUSTAINED CONSERVATION OF HYDRAULIC DIVERSITY IN THE RIVER FOR SNOW COVERAGE AND COLD REGION

Budgeted : Grants for operating expenses

General account

Research Period : FY2011-2015

Research Team : River Engineering Research Team

Author : FUNAKI Jungo

NAGATA Tomonori

KAWAMURA Satomi

Abstract : Recently, in the Satsunai River, gravel riverbeds are rapidly disappearing due to the progressing of the tree growth and channel-alignment in a single row bars in the river channel. Because of such backgrounds, the dam discharge of the pseudo-flood scale in the snow melting season was carried out experimentally for the past two years, and it was shown that the dam discharge have a certain inhibitory effect for the tree growth in the river channel. However, there is not yet enough knowledge about the influence of such a sudden change of the river environment gives in the biotope of the aquatic. Hereafter, in order to set a goal for the river environmental improvement, and connect to the concrete measures, it is necessary to make structure and a standard to evaluate it quantitatively. In this study, it is attempted to clarify the preference to the fields of the aquatic, and evaluate the river environment quantitatively from a creature side based on the field survey of biomass and physical quantity. In this year, we represent preference to the void in a Gravel of the riverbed outer layer by “Fredle Index”, and preference to the hydraulic quantity by “Froude Number” based on the field survey subject to the up and down stream section in the Satsunai River. Using these indexes, we performed preference degree analysis for the demersal fish by the river ecosystem evaluation model. As a result, it is revealed that plan distribution of “Suitability Index” represents to some extent the real habitation density. In addition, it is understood that evaluation of habitat using the same standard was enabled for the different up and down stream section of the segment by using above index.

Key words : Satsunai River, Ecosystem Evaluation Model, Demersal Fish, Void in a Gravel