

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、前田俊一、川村里実

【要旨】

近年、全国各地で流路の固定化や河道内植生の樹林化が進行しており、生物の生息環境の悪化が懸念されている。河川環境に配慮した適切な河道管理を行うためには、このような河道の変化が生物に及ぼす影響を可能な限り定量的に評価して事業の必要性を判断した上で、河川環境改善に向けた目標設定を行い、具体的な対策を行う必要がある。本研究では、Fredle 指数や Froude 数等から構成される水生生物の物理場に対する選好性を表す無次元指標を開発し、この指標を用いた河川環境を評価する解析モデルを構築した。その上で、十勝川水系札内川を代表する底生魚を対象に解析を行った結果、札内川の上流から下流までの広い範囲において、選好度の空間分布が実際の生息密度をある程度良好に表現することができ、河川の広い範囲で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示した。また、構築した解析モデルの実際の事業への活用方法を示しつつ、この解析モデルを用いて、現在札内川で実施されている札内川ダムの中規模フラッシュ放流が上記底生魚の生息環境に及ぼす影響の将来予測を行った結果、フラッシュ放流を今後とも継続すれば、底生魚の生息環境を維持・保全でき得ることを示した。

キーワード：札内川、生態系評価モデル、底生魚、礫間の空隙、中規模フラッシュ放流

1. はじめに

近年、全国各地で流路の固定化や河道内植生の樹林化が進行しており、生物の生息環境の悪化が懸念されている。河川環境に配慮した適切な河道管理を行うためには、このような河道の変化が生物相に与える影響を定量的に把握し、影響の程度に応じた対策を行う必要がある。

例えば、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によって、札内川を象徴する河川景観であった礫河原が近年急速に消失しつつある（図-1）。このため、2012 年から礫河原の再生を目的とした札内川ダムの「中規模フラッシュ放流」（河床や河川形状、河原等の一部の陸域に形態変化が生じる程度の攪乱を与えることで河川環境の改善を図ることを目的としたダム放流のこと。以降、「中規模フラッシュ放流」のことを単に「フラッシュ放流」と記載。）が毎年実施されている。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取組である。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、主流路の切替り、主流路と旧流路の比高差の減少など一定の環境改善効果が確認された。しかし、



図-1 札内川上下流域の河川環境変化

フラッシュ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、事業の実施に伴う環境改善効果を図る上では、水生生物の生息環境を定量的に評価する手法が求められる。

河川環境を生物面から評価するためには、水面下に生息する水生生物の生息状況を広範囲に把握する必要があるが、生物量を直接観測するには多大な労力が必要で、また観測できる範囲も非常に限られる。そのため、現実的には、対象区間内の複数の調査箇所取得された生物量と河道の物理量の相関関係を

もとに、対象区間の生物量を推定するとともに、生物量の多寡から河川環境の良し悪しを評価することとなる。よって、水生生物の生息環境を適正に評価するためには、生物量と河道の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。

河川生態系を評価する手法としては、PHABSIMが一般的によく用いられるが、指標となる選好曲線は、水深・流速等の局所的な物理量との相関関係から直接指標化される場合が多く、限られた地点の調査データでは評価できる範囲が限定され、広域且つ空間的に連続した流れ場全体を適正に評価することが困難であった。また、同一河川であっても上下流域では流れ場の特性が異なるため、流域全体へ適用可能な生態系評価モデルを構築するためには、用いられる評価指標により高い汎用性が求められる。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り、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ため、水生生物の生息環境を適正に評価するためには、このような違いを評価指標へと十分に反映させる必要がある。

本研究では、水生生物の物理場に対する選好性やその生態的特性を把握するため、札内川流域を対象に水生生物の生息密度や河道内物理量に関する詳細な現地調査を行い、出現魚種や全捕獲数に占める魚種別の構成比率などを上・中・下流域ごとに整理した。また、得られた調査結果をもとに、札内川を代表する魚種であるハナカジカの生息密度と河道内物理量との単相関回帰分析を行い、ハナカジカの生息環境を評価し得る有効な物理指標を求めた。相関回帰分析では、河道内物理量として水深、流速、河床材料の粒径などの単一変数や、空間的な特性を含まないフルード数、水深粒径比、無次元掃流力などの複数変数を組合せた無次元量のほか、河床材料の空隙状況を表す Fredle 指数や魚類の体長・重量などを様々に組合せ、生息密度に対してより高い相関性を示す変数の組み合わせについて検討を行った。また、物理場に対する選好性をより適正に評価するため、体長別の生息数をもとに、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）における選好曲線を作成し、これを既存の平面 2 次元河床変動解析モデルへと組み込むことで、ハナカジカの生息環境を評価するための「河川生態系評価モデル」を構築した。さらに、このモデルを用いて、札内川の上・中・下流域に設け

た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を把握するとともに、札内川ダムのフラッシュ放流が河川環境に与える影響を、水生生物の生息環境の面から定量的に評価することを試みた。また、河道の水理的多様性を持続的に維持し、水生生物の生息環境を保全・再生するために、開発した解析モデルの実際の事業への活用方法を示した。

2. 現地調査

水生生物は、種によって季節・生活史に応じた生息適地を持つものと考えられ、調査の時期や場所によっては捕獲数に大きな差異が生じることも想定される。よって、調査箇所を選定にあたっては、目視により判断された瀬淵等の主要な河川構造（ハビタット）のほか、細流・止水域などの特殊な環境も含め、河道内に存在する様々な水理条件を有する箇所を複数選定した。また、水生生物の生息状況の季節的な変化を捉えるため、調査時期は各季節を網羅するよう春期・夏期・秋期・冬期の 4 季に分けて行い、調査時の流況はいずれも低水～平水流量規模（上札内観測所 KP41.8 : Q=5～20 m³/s 程度）で実施した。現地調査は、2011～2012 年は上流域の KP34.6～35.6 の延長 1.0km 区間を、2013 年は戸蔭別川の合流点下流側に位置する中流域の KP19.0～20.6 の延長 1.6km 区間を対象とし、各調査区画内における魚類と底生昆虫の捕獲調査と水深・流速・底質等の計測を行った。また、2014 年はさらに異なる物理環境下での調査を行うため、調査区間を札内川の下流端へと移し、十勝川本川との合流点に近い KP3.0～4.0 の延長 1.0km 区間を対象に行った。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-2 に示す。

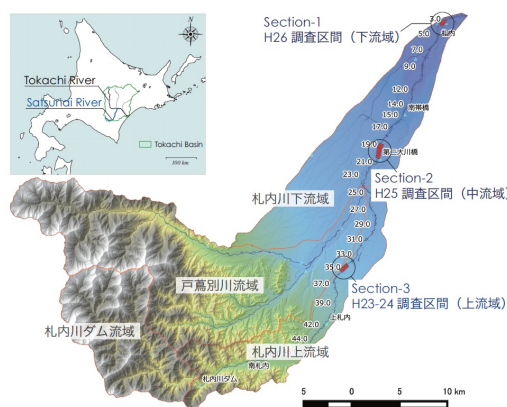


図-2 現地調査区間 (2011～2014 年, Section1～3)

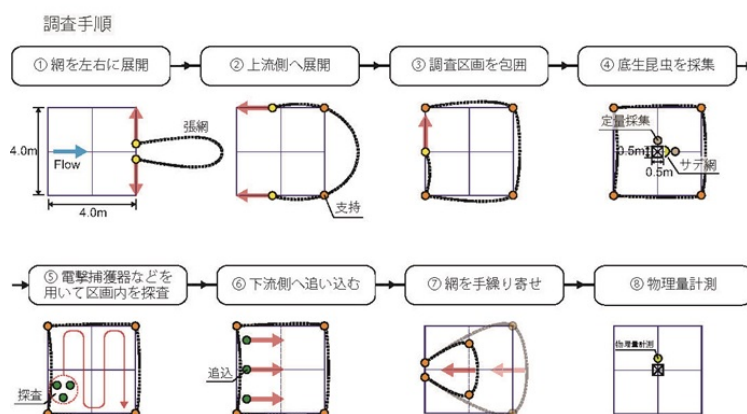
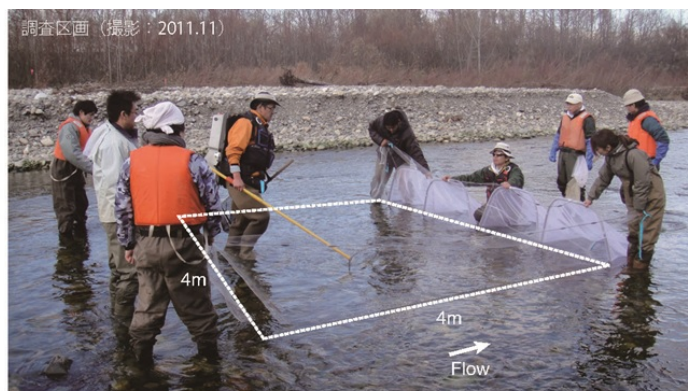


図-3 生物量と物理量の調査方法 (コドラート法)

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

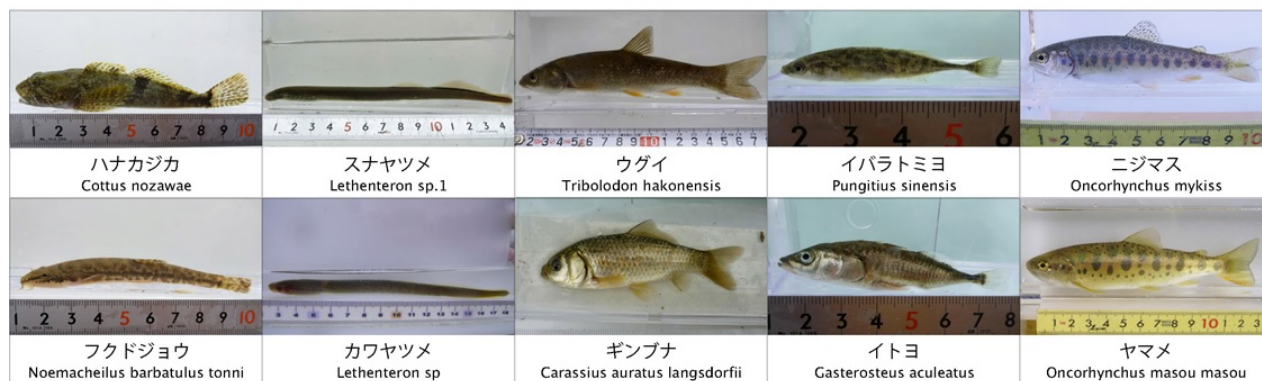


図-4 捕獲魚種 (全 10 種) と魚種別捕獲総数一覧

2. 1 調査手法

本研究では札内川の上・中・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(調査年・季節)や場所(河川構造・ハビタット)が異なるデータを定量的に比較できるよう、捕獲方法や作業強度は可能な限り統一し、コドラート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。各調査プロット的位置は、現地踏査を行った際、早瀬、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、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11~15箇所の調査プロットを現地に設定した。

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囲った後、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した。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)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し、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-3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-4に示す。

2. 2 調査箇所の物理環境

2011年の秋期調査時に確認された代表的なハビタット区分の物理環境を以下に要約する。早瀬は表面流速が高く、河床面には粗粒化の傾向が強く見られ、礫表面には藻類の付着がほとんど見られない。

平瀬の流速は0.5m/s程度で、底質はやや粗粒化の傾向があり、表面には藻類の付着が見られる。一方、淵や止水域は水深が深く流速はほとんど無い。淵の河床材料は砂礫質で死滅した藻類が多く付着しており、止水域では細泥が厚く堆積し、平水時はほぼ主流から隔離された環境にある。細流の流速は平瀬同等で0.5m/s程度、底質には細粒土砂を多く含み、湧水箇所も多く見られる。上流域の調査箇所として選定した代表的なハビタットの物理環境を図-5に示す。

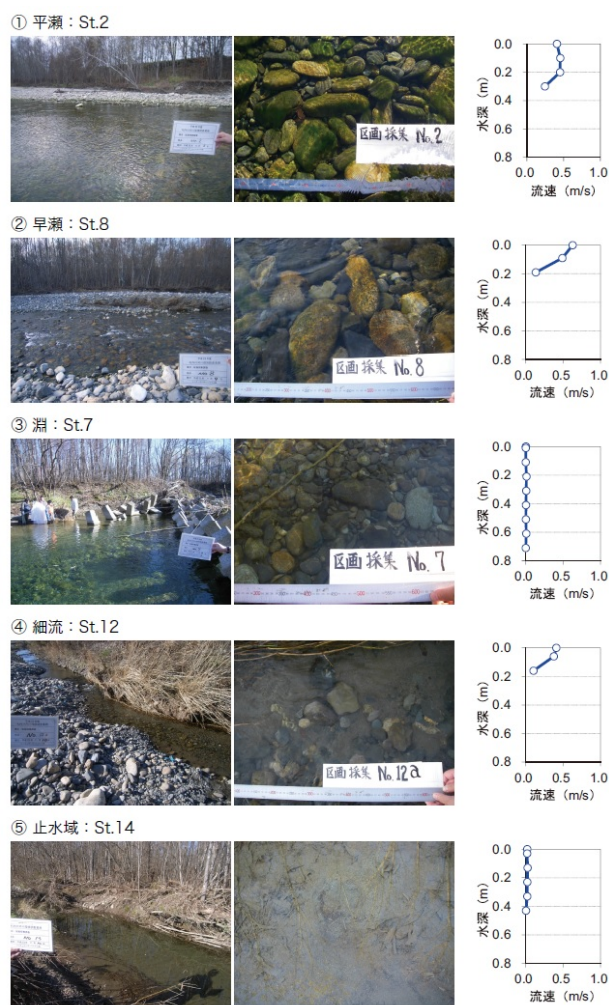


図-5 札内川上流域の代表的な河川構造(ハビタット)

a) ハビタット区分の妥当性検証

水生生物の物理場に対する選好性を検証する前に、まず、視覚的に判断されたハビタット区分の妥当性を物理的な側面から検証する。野上ら¹⁾の研究では、Frは水深と河床材料の粒径(h/d_{84})及び水面勾配(i_w)によって規定され、このFrから河川構造を定量的に区分できることが示されている。ここではこの手法に倣い、2011年の秋期調査を対象に、視覚的に判

断されたハビタット区分の妥当性を物理的な側面から検証する。札内川が急流河川であることを考慮し、河床抵抗には式 (1) で表される Hey の式を用い、実測の物理量 h 、 d_{84} 、 i_w を式 (2) へと代入することで、勾配等の地形特性を考慮した Fr_2 を求める。なお、下式の i_e は i_w で代用する。

$$\frac{1}{\sqrt{C_f}} = 5.75 \log \frac{11.16h}{3.5d_{84}} \quad (1)$$

$$Fr_2 = \frac{\sqrt{i_e}}{\sqrt{C_f}} = \sqrt{i_e} \left[5.75 \log \frac{11.16h}{3.5d_{84}} \right] \quad (2)$$

ここで C_f : 河床摩擦係数である。次に、この Fr_2 を、実測の水深・流速から求めた Fr_1 に適合させるため、最小自乗法を用いて係数を調整する。調整式を式 (3) に、 Fr の適合状況を図-6 に示す。図から、両者は高い適合性を持つことがわかる。

$$Fr_2 = \sqrt{i_e} \left[7.45 \log \frac{11.16h}{3.5d_{84}} \right] \quad (3)$$

図-7 は、調査プロット 48 箇所をそれぞれプロットしたもので、点線と実線が、式 (3) を用いて推定した瀬淵の境界 Fr である。図から、当該調査区間では、早瀬と平瀬は $Fr=0.25$ 、平瀬と淵は $Fr=0.08$ 付近にハビタットの境界があるものと判断できる。図-8 は、この結果を一般的な水深-流速図で示したものであるが、この図からも、現地で視覚的に判断された瀬淵等のハビタット区分は概ね妥当であると言える。

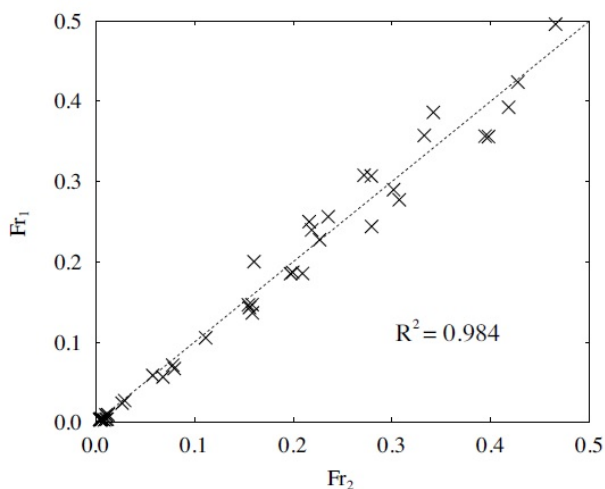


図-6 Fr の適合状況

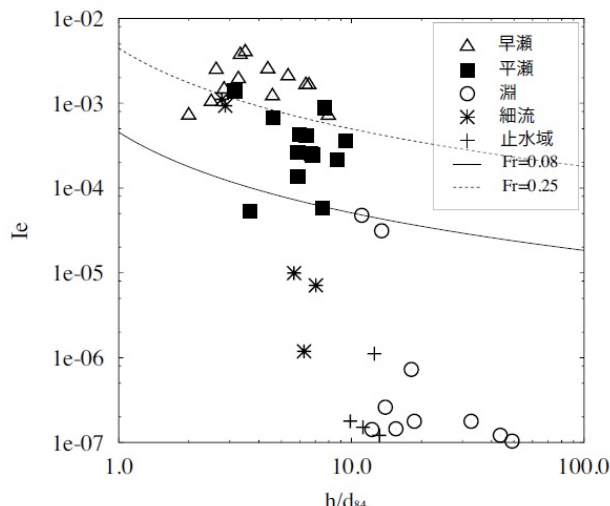


図-7 境界フルード数の推定

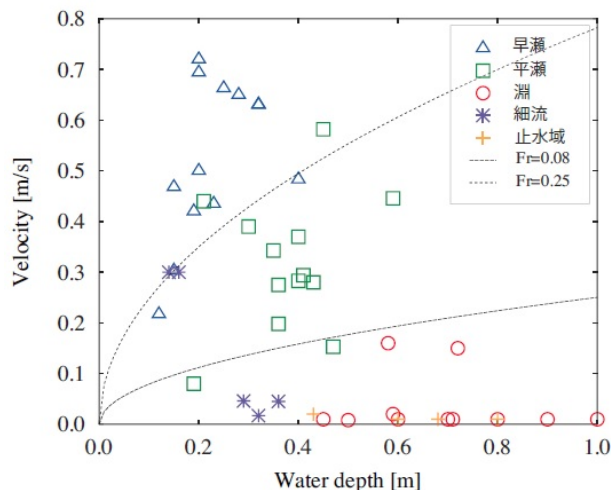


図-8 調査プロットのハビタット区分

2. 3 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、底質に細粒分が多く含まれるような調査箇所においては、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や、下流域のワンドや溜まりではイトヨやギンブナなどの止水域を好む魚種も確認されているが、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)。

a) 流域別の魚種構成比と生息密度

図-9 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%

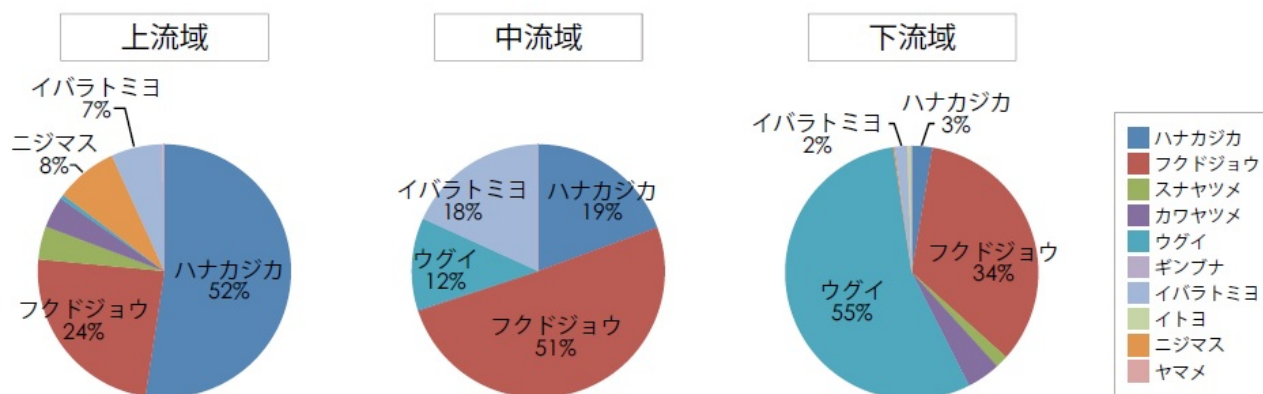


図-9 流域別の魚種構成比

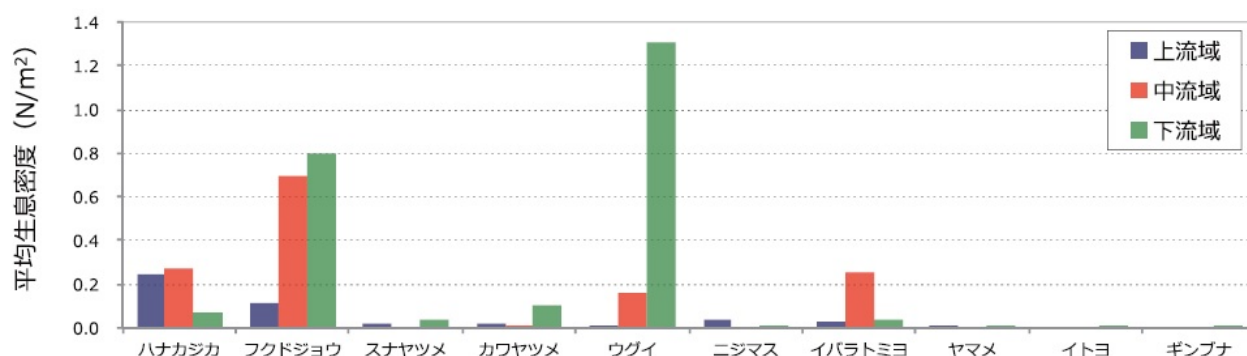


図-10 流域別の魚種生息密度

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低下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次水路内において、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(図-10)。

魚類調査の結果から、捕獲魚種の構成比は上下流域の違いによって明瞭に異なることがわかる。通常、流況や河床材料などの物理環境も上下流域の違い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-11)から、上・中・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。

b) 底生魚のハビタットに対する選好性と季節的変化

ここで、上流域の優占種であるハナカジカ、フクドジョウの底生魚2種に関して、物理場(ハビタット)に対する選好性の違いと、生息場の季節的な変化を検証する。図-12は、2011年に実施した秋期調

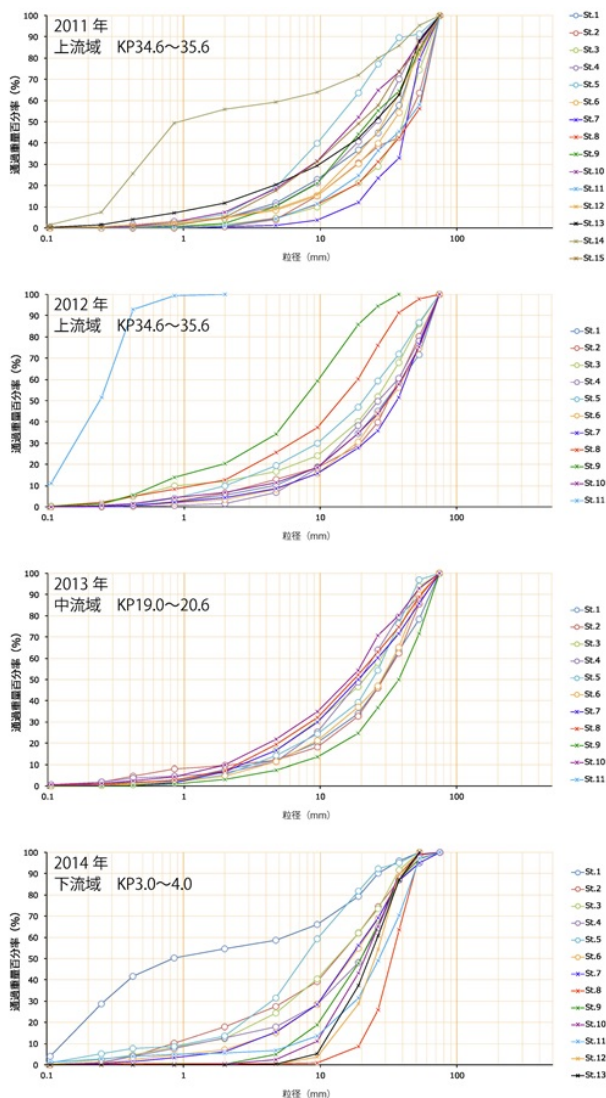


図-11 各調査年・調査プロット内の粒度分布
(2011~2014年)

査の結果で、上段が河川構造区分、下段が各季節に対する捕獲数の頻度分布を示している。上段のグラフから明らかのように、ハナカジカ・フクドジョウのみならず、全魚種の累計値でも、淵<平瀬<早瀬の順に生息密度は上昇する傾向があり、物理場に対する明瞭な選好性が認められる。また、細流に関しては、通年的に生息密度が高く、特に春期・冬期はその割合が大きく増加している。下段中央のグラフからハナカジカの季節的な生息場の違いをみると、春期は細流を主な生息場とし、夏期~秋期にかけて、早瀬・平瀬へと徐々に生息場を変化させていることがわかる。これは、水温の低い厳冬期は主流以外を生息場とし、春先、水温の上昇とともに産卵・繁殖・採餌活動を活発化させ、河道内全域へと移動・分散する生態を持つためであると考えられる。

2. 4 調査結果 (底生昆虫)

図-13 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、なお且つ、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ある。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

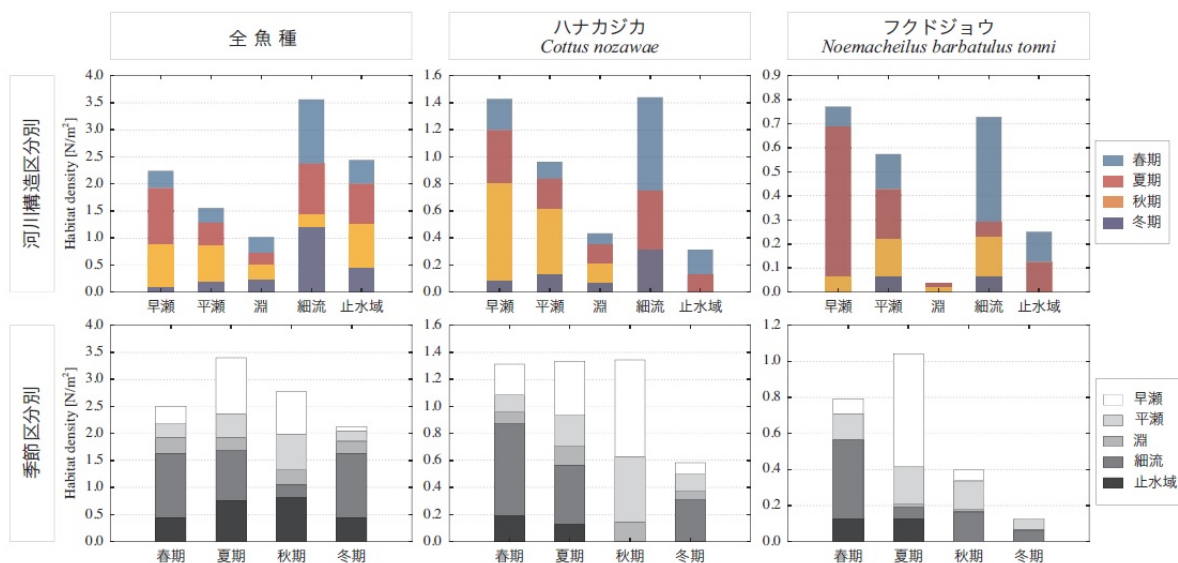


図-12 河川構造・季節別生息密度

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現れたものと推察される。

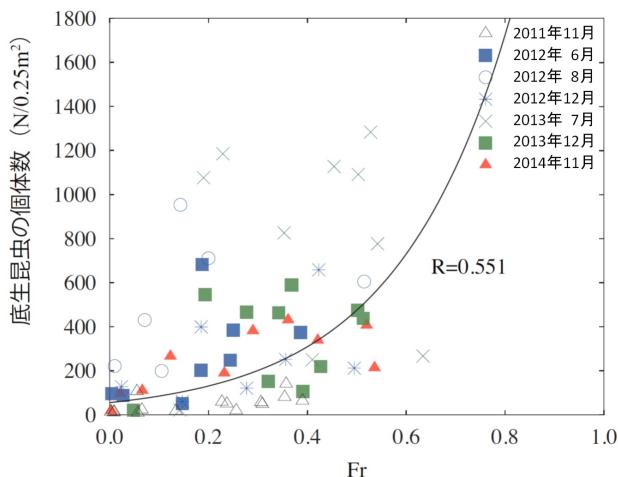


図-13 底生昆虫の捕獲数とフルード数の関係

2. 5 指標種の選定

既述の通り、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、全捕獲数に占める割合（生息密度）が高く、生物量と河道の物理量とを結びつける指標を作成する上で統計的に有利であること、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、また、

底生魚は一般的に遊泳魚に比べて行動範囲が狭く、魚類調査の結果から物理場に対しては比較的明瞭な選好性を有することが示唆されたこと、さらには、礫河原再生の取組みが行われている札内川において、ハナカジカは河川環境の改善効果を評価する上で有効な指標となる可能性の高いことなどから、本研究では以降、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が、調査データは稚魚から成魚までの全年齢群が混在した状態にある。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ことから、ここでは、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-14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。通常、各世代の個体数は自然淘汰によって徐々に減少するが、各年齢群の平均

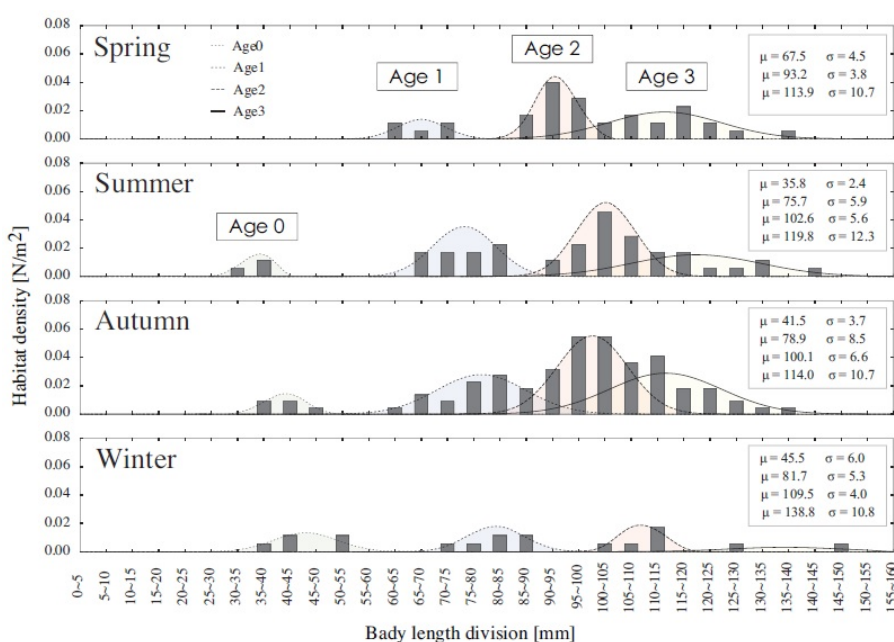


図-14 ハナカジカの季節・体長別の生息密度と年齢群のモード分析結果

体長は時間経過とともに増加する。体長組成が複数のモード（正規分布）を持ち、それが季節的に体長を増加させる方向に推移している場合、それが各年に孵化した年齢群を示すものと言える。Hasselblad法を用いて体長組成を分析した結果、ハナカジカの体長組成には正規分布の形で表される複数のモードが存在し、図中 Age 0~3 に示すように、各モードは季節的な増加傾向を有することから、これらは各年に孵化したハナカジカの年齢群（世代）を示すものと考えられ、モードの数から、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

ここでは、ハナカジカの孵化時期が 4~5 月頃であることから、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た各年齢群の月齢と体長組成分析から得られた平均体長 μ との関係をもとに、水産資源の推定などに用いられる式 (4)~(6) を用いてハナカジカの成長曲線を推定する。図-15 に示す点群は、体長組成分析から得られた平均体長 μ と標準偏差 σ をもとに、ハナカジカの各成長段階をプロットしたもので、曲線群は式 (4)~(6) を用いた成長曲線の解析結果である。3 式の結果には大きな違いはなく、概ね点群を網羅する曲線が得られている。この結果から、ハナカジカの平均的な個体の成長過程は、まず、孵化後 1 年で体長 5cm 程度の稚魚にまで成長し、その後 2~3 年の期間を経て体長 10cm 前後の成魚となり、繁殖・産卵を終えた 3~4 年後には死滅するものと推察される。なお、この成長曲線には雌雄差は考慮されていない。

$$L_t = A(1 - Be^{-kt})^3 \quad (4)$$

$$L_t = Ae^{-Be^{-kt}} \quad (5)$$

$$L_t = \frac{A}{(1 + Be^{-kt})} \quad (6)$$

ここで、式 (4) は Bertalanffy 曲線、式 (5) は Gompertz 曲線、式 (6) 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。

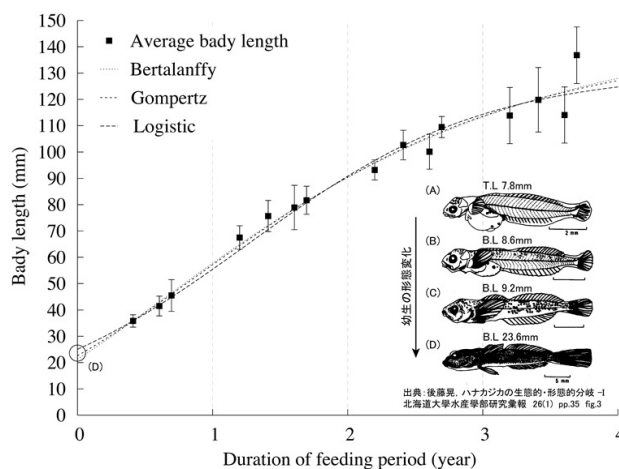


図-15 ハナカジカの成長曲線

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・中・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、上・中・下流域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 Fr と粒度分布特性を表す Fredle 指数 Fi とを分子分母に組み合わせた式 (7) 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 (Fredle Index²⁾) 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 $\sqrt{d_{75}/d_{25}}$ 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-16 に示す。なお、式 (7) 中 L_t/d_{60} で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ハナカジカの生態的特性を表すものと解釈できる。

$$X = \frac{Fr}{Fi} L_t = \frac{v}{\sqrt{gh}} \frac{L_t}{d_{60}} \sqrt{\frac{d_{75}}{d_{25}}} \quad (7)$$

ここで、 X は評価指標 (説明変数)、 Fr は Froude 数、 Fi 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 齢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-16 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 齢の稚魚の段階では選好曲線は正の相関を、2~3 齢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) 稚魚 (0~1 齢)

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。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 齢)

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バ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-17 は、選好曲線を稚魚と成魚の 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場所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 (Suitability Index) へと変換する。式 (7) を説明変数、式 (8) を目的変数とした各成長段階の選好曲線を図-18 に示す。

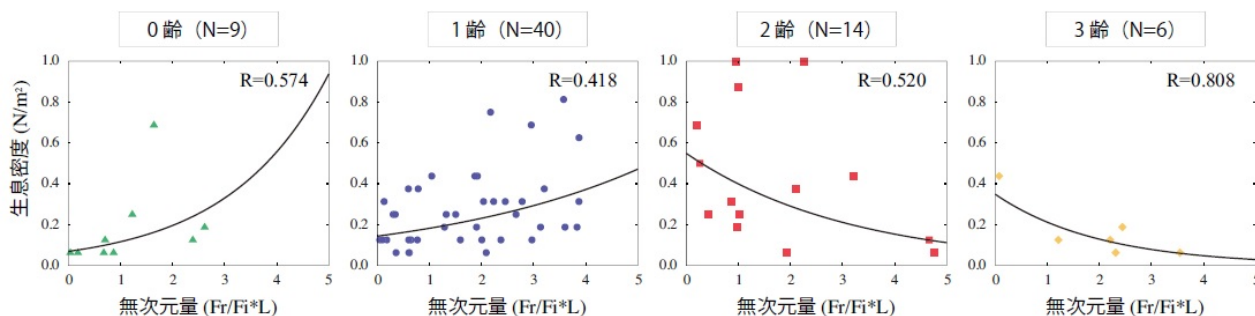


図-16 年齢別の選好曲線 (説明変数: $Fr/Fi * L$)

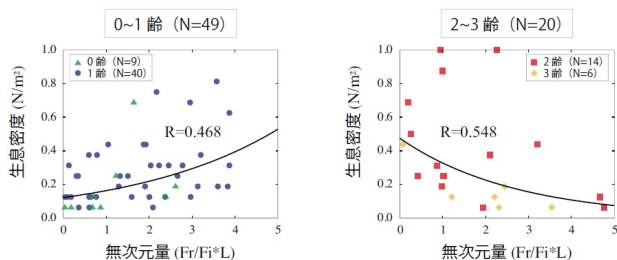


図-17 成長段階別の選好曲線 (説明変数: $Fr/Fi*L$)

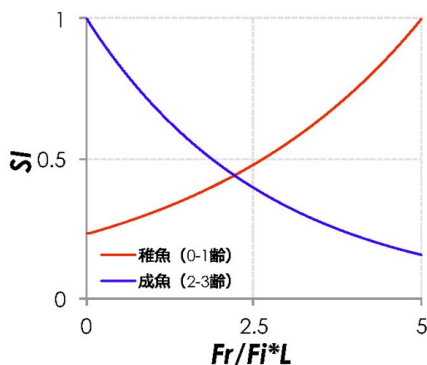


図-18 成長段階別の選好曲線 (正規化後)

$$SI = ae^{bX} \quad (8)$$

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

本節での解析には、北海道河川財団より無償提供されている「iRIC³⁾」とそのソルバー「Nays2D ver.4.0³⁾」を用い、この平面 2 次元河床変動解析モデルに図-18 に示す 2 つの選好曲線を組み込むことで、札内川流域におけるハナカジカの物理場に対する選好度 (SI 値) の空間分布を求め、現地調査結果との整合性を検証する。本解析の最大の特徴は、生態系評価

を行う際の指標として粒度分布特性を取り入れる点にあり、河床変動解析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行う。混合粒径モデルでは、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が再現される。各階層における全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。

$$q_{bk} = 17\tau_{*k}^{\frac{3}{2}} \left(1 - \frac{\tau_{*ck}}{\tau_{*k}}\right) \left(1 - \sqrt{\frac{\tau_{*ck}}{\tau_{*k}}}\right) \sqrt{sgd_k^3} \quad (9)$$

ここで、 q_{bk} : 流線方向の全流砂量、 τ_{*k} : k 階層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、 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。

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

$$d_m = \sum_{k=1}^n p_k d_k \quad (11)$$

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、下流域は KP3.0~4.0 とし、初期河床形状には、各調査区間で計測した横断測量結果を用いた。初期粒度分布には、各年の河床材料調査の結果から得られた平均的な粒度分布を与え (図-19)、粗度係数は代表粒径 d_{60} をもとに、Manning-Strickler 式から上流域は $n=0.027$ 、中流域は $n=0.026$ 、下流域は $n=0.025$ とした。流量条件は、上・中・下流域に位置する各観測所の 2013 年 4 月~12 月における平均流量を定常で与えた (上流域: $20\text{m}^3/\text{s}$ 、中下流域: $40\text{m}^3/\text{s}$)。

ここでは、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

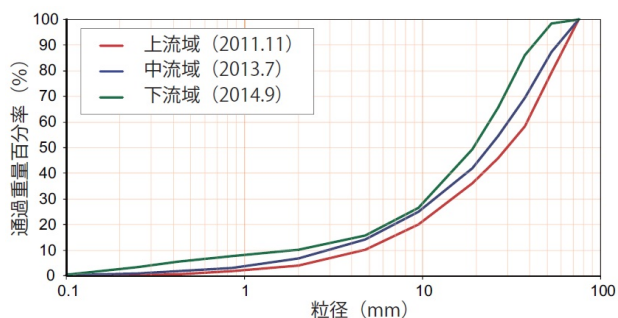


図-19 初期粒度分布 (計算条件)

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、平均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。生態系評価モデルの精度向上には、このような粒度分布の時空間的变化の推定精度も大きな課題の一つである。

5. 3 粒度分布の解析結果

ここで、上述の簡易的な手法を用いて得られた粒度分布の再現性を検証する。図-20 に上流域 (KP34.6~35.6)、図-21 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

分布をもとにその再現性を検証した。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-20 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-21 の中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。

混合粒径モデルを用いた粒度分布の解析結果と現

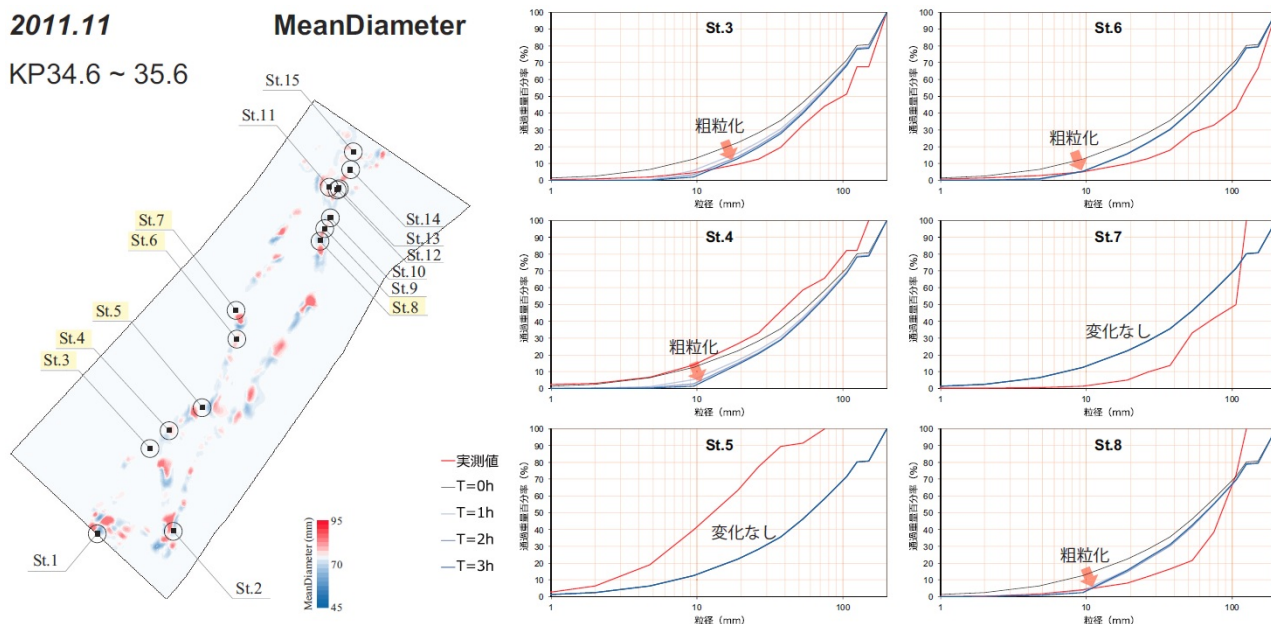


図-20 粒度分布の解析値と実測値 (上流域 : KP34.6~35.6, L=1.0km, Q=20m³/s)

2013.7

KP19.0 ~ 20.6

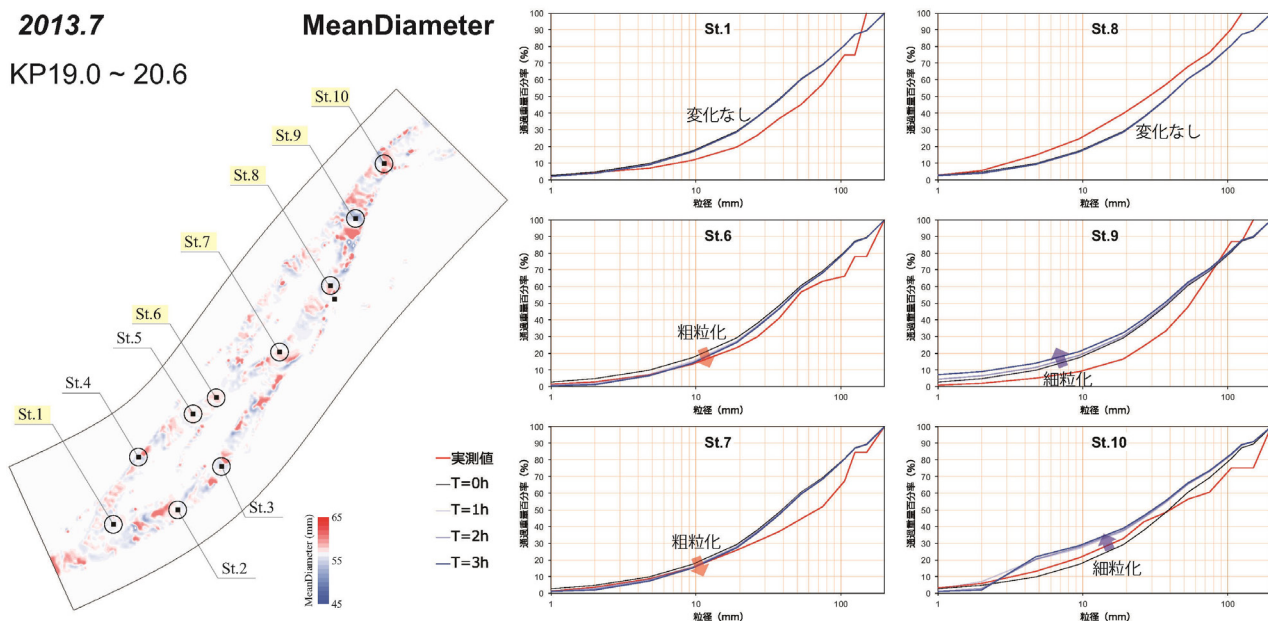


図-21 粒度分布の解析値と実測値（中流域：KP19.0~20.6, L=1.6km, Q=40m³/s）

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上下流域といった違いに関しては、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 年齢別の生息適地評価

以上で求めた選好曲線と各種水理量や粒度分布の解析結果をもとに、ハナカジカの物理場に対する選好度（SI：Suitability Index）の空間分布と、SIを計算区間内で面積積分した重み付き利用可能面積

（WUA：Weighted Usable Area）を求め、実際の捕獲数との比較から本解析モデルの実河川への適用性を検証する。

図-22、図-23及び図-24に、上流域（Section-3：KP34.6~35.6）、中流域（Section-2：KP19.0~20.6）及び下流域（Section-1：KP3.0~4.0）の解析結果を示す。試行解析の結果、通水開始から概ね3時間程度で粒度分布は平衡状態に達すると判断されたことから、以降では、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、稚魚と成魚の2つの指標を用いた解析結果と、図中棒グラフで示す

Section-3

KP34.6 ~ 35.6

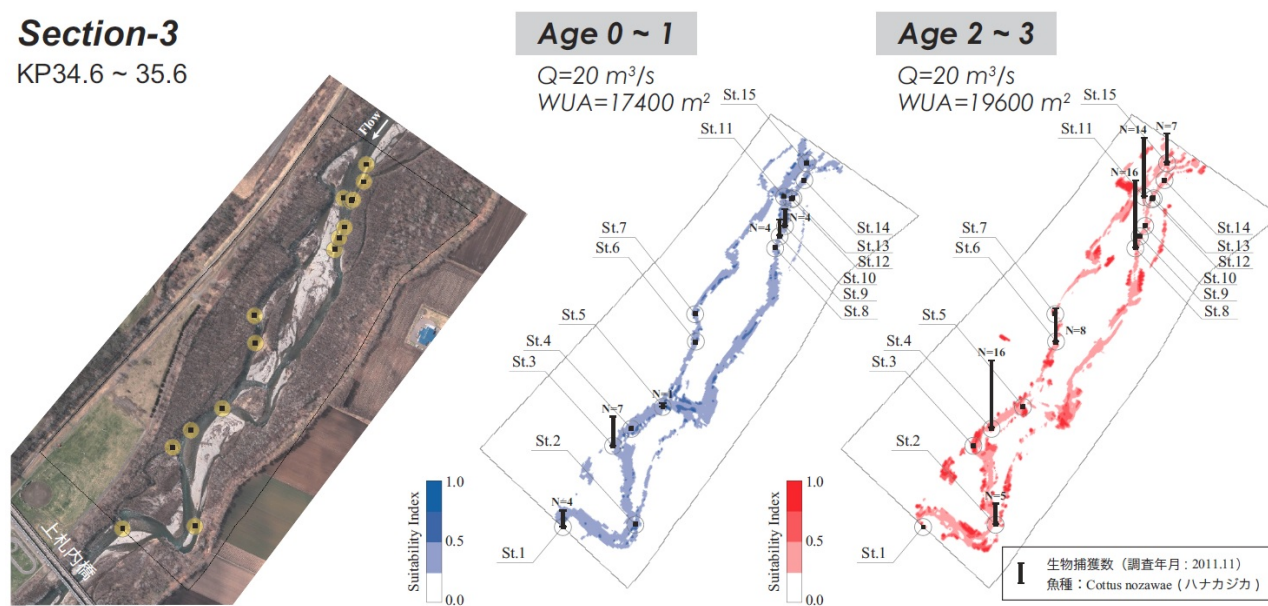


図-22 選好度の空間分布と実捕獲数（上流域：KP34.6~35.6, L=1.0km, Q=20m³/s）

Section-2

KP19.0 ~ 20.6

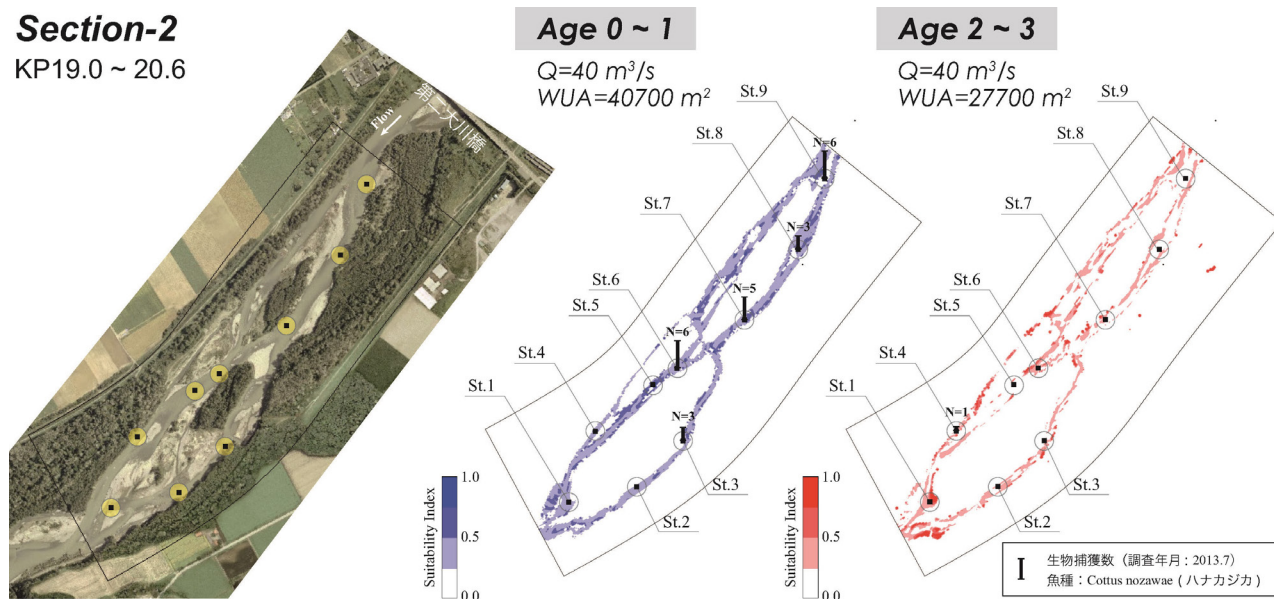


図-23 選好度の空間分布と実捕獲数（中流域：KP19.0~20.6, L=1.6km, Q=40m³/s）

Section-1

KP3.0 ~ 4.0

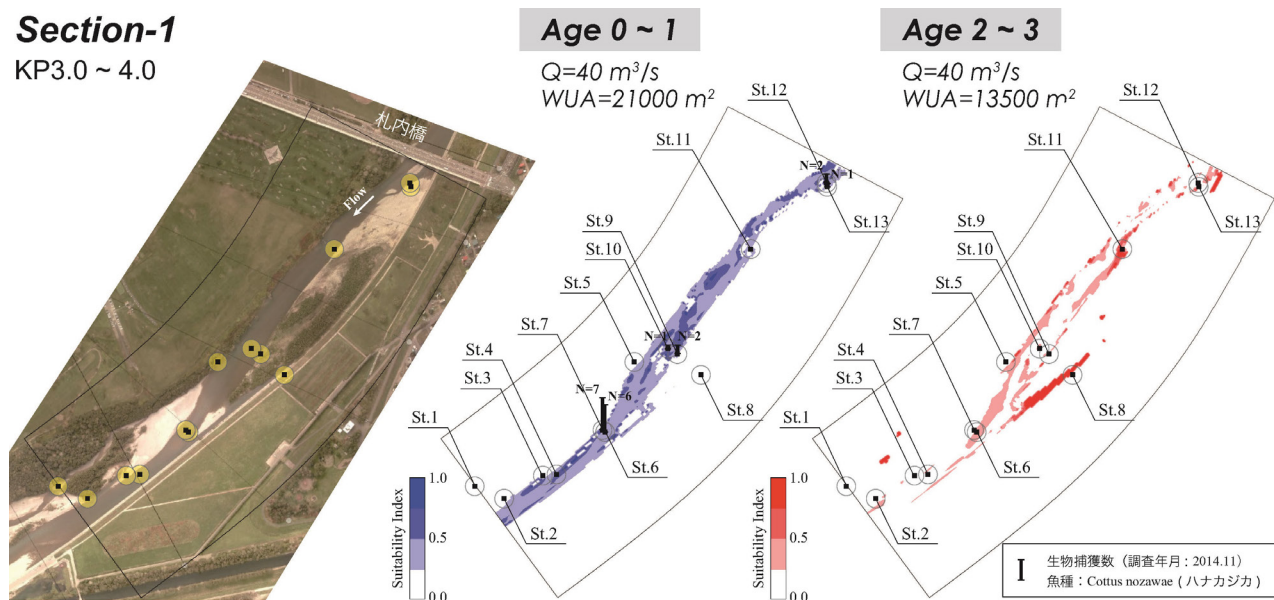


図-24 選好度の空間分布と実捕獲数（下流域：KP3.0~4.0, L=1.0km, Q=40m³/s）

捕獲数の実測値とを比較すると、稚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はあまり明確でなく、この解析結果からは、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できない。一方、成魚に対する評価結果は、局所的な値で見ると実測値と解析値は必ずしも一致するとは言えないが、解析結果は、水域全体に選好度の高い領域が広がっており、ハナカジカの生息密度の高い領域が広く分布する上流域の特徴が良く再現されている。次に、中下流域の解析結果について見ると、稚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できないが、成魚に対する評価結果は、選好度の高い領域と低い領域がある程度明確に分かれ、解析区間全体では選好度の低い領域が広く分布するなど、中下流域における実際の捕獲状況と良く整合する結果が得られている。

上流域と中下流域でハナカジカの成魚の場の選択性に明瞭な違いが見られるのは、上流域は河床面が浮石状態の粗礫成分で覆われているため、成魚にとって重要な産卵環境や生息場となり得る空隙が比較的多く存在するが、中下流域では下流へ行くほど河

床材料に含まれる細粒分の含有率が高くなるため、河床面が沈石状態にある箇所が河道内に広く分布するようになり、底生魚の生息や産卵に適した環境が少なくなるためと考えられる。解析ではこのような粒度分布特性や流況をもたらす河道地形の影響により、上流域では広範囲に選好度の高い領域が現れる一方、中下流域では選好度の高い領域は狭い範囲に限定されるため、水域の大部分がハナカジカの生息には適さない環境として評価されたものと考えられる。

6. 生態系評価モデルの実際の事業への活用

前章までにおいて、無次元量を用いて物理場に対するハナカジカの選好性を指標化し、これを平面 2 次元河床変動解析モデルに組み込んだ生態系評価モデルにより、河川の上流から下流までの広範囲を一つの指標を用いて、ハナカジカの生息分布を定量的に評価できることを示した。このモデルを用いれば、対象とした生物の生息に適しているかどうかという観点から河川環境を評価することが可能となる。したがって、何らかの事業の実施により河道の物理場の変化が想定される場合、将来の河床変動予測計算を取り込んだ生態系評価モデルを用いて、現在と将来の両方の河川環境を予測・評価すれば、事業による河川環境改善の効果を定量的に示すことが可能となる。

札内川では 2012 年より礫河原の再生を目的とした札内川ダムのフラッシュ放流が実施されており、フラッシュ放流と旧流路の流入部の堆積土砂の掘削除去を組み合わせることにより、旧流路の回復や、主流路の切替り、礫河原の面積の維持ないしは微増等の一定の環境改善効果が確認されている⁴⁾。礫河原の再生は、カラバタ等々の礫河原依存種に良い影響をもたらすことは明らかであるが、ハナカジカに代表される水生生物への影響については明らかとなっていない。そこで、本章では生態系評価モデルを用いて、モデルケースとして札内川ダムのフラッシュ放流の効果をハナカジカの生息環境の改善という観点から評価した事例を紹介するとともに、生態系評価モデルの一般的な実際の事業への活用方法を示す。

6. 1 解析目標設定から事業実施後までの流れ

生態系評価モデルを活用した事業の検討から事業実施後のモニタリングに至るまでの具体的な流れは図-25 のとおりである。環境改善の評価基準として

の目標の設定は後述のように WUA の目標値を決めることに他ならない。現在の WUA の値は、WUA の目標値よりもよりの小さいはずなので、事業実施後 WUA が目標値をクリアーするような具体のメニュー（河道地形の人為的改変をもたらす具体の工事等）を複数検討し、河床変動計算で事業実施後の河道地形を予測した上で WUA を算出する。その後、各案の環境改善効果（WUA の大小）や治水や利水、河川利用、将来における維持管理の容易さ等の事業実施に伴い発生するメリット・デメリットを総合的に判断し、事業計画を決定する。なお、各案を比較した上で適当な案が残らなかった場合は、目標設定や事業計画案の作成に戻り再度検討をやり直すことになる。事業実施中もしくは事業実施後には、物理場の変化に対する生物の応答には未解明な点が多いため、適宜モニタリング・評価を行い、それを事業の改善や維持管理等に反映させる等、順応的管理を念頭に事業を進める必要がある。

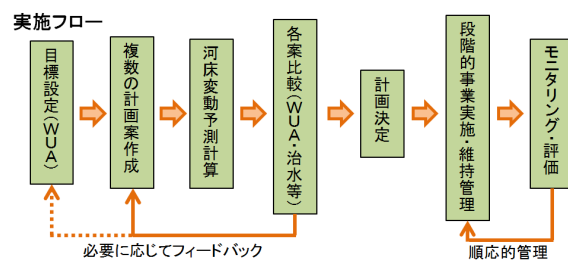


図-25 生態系評価モデルの活用の流れ

6. 2 目標設定（環境改善の評価基準）

河川環境の改善を目指す事業では、環境の劣化が（あまり）進んでいない過去のある時点での河川環境を目指すべき姿として目標設定することが一般的であり、実際の自然再生事業でもそのような目標設定を行っているところが多い。本研究で開発した生態系評価モデルを活用する場合は、目標とする過去のある時点における事業対象区間の WUA を目標値として設定することとなる。環境改善目標を数値で示すことのできる点が、本モデルを活用することの大きなメリットの一つである。

前述のように、現在の WUA は目標値となる過去のある時点での WUA よりも小さい値となっているはずなので、WUA が目標値をクリアーするような具体の事業メニュー（河道地形の人為的改変をもたらす具体の工事等）を検討することになるが、事業区間の延長が長く、全区間で必要なデータを取得し、河床変動計算や WUA の算定を行うことが現実的ではない場合は、代表的な区間を抽出して、その区間

で目標値となる WUA を設定して検討を進める方法もある。以下、目標設定の際の評価基準となる WUA の算出においてポイントとなる幾つかの事項を具体的に述べる。

a) 河道地形のデータ

生態系評価モデルを活用して WUA を算定する場合に、河道地形のデータは必須である。現在の河道地形のデータは直近の測量成果を活用するなり、あらためて測量を行って取得すればよい。事業実施後の河道地形のデータは、現在の河道地形に事業実施による人為的な地形の改変を加味して河床変動予測計算を行えば一定の精度で予測することが可能である。問題となることが多いのは、目標として設定した過去のある時点での河道地形の十分なデータが無い場合である。国の管理する区間では多くの場合、半世紀ほど前の測量データでも存在するが、測量のピッチが必要とするピッチよりも粗い場合が考えら

れる他、地方自治体の管理する区間では、昔の測量データが存在しないということも十分あり得る。そのような場合はある仮定の下で河床変動計算を駆使して過去の河道地形を想定したり、目標とする環境に近い状態のリファレンスサイトの WUA を参考にする等の方法が考えられるが、その一例として、札内川で 1960 年代以前の河道を想定して、WUA を試みに算出した事例を後述する。

b) 水生生物のデータ

本研究ではハナカジカを対象に検討を進めたが、どの水生生物を指標種として選定するにせよ、物理場に対する当該生物の選好性を指標化することによって、河道の物理場の情報を WUA に変換する必要がある。目標として設定した過去のある時点での生物調査のデータはまず存在しないが、過去、現在及び将来において、物理場に対する指標種の選好性は変わらないと考えられるため、必要に応じて事業対

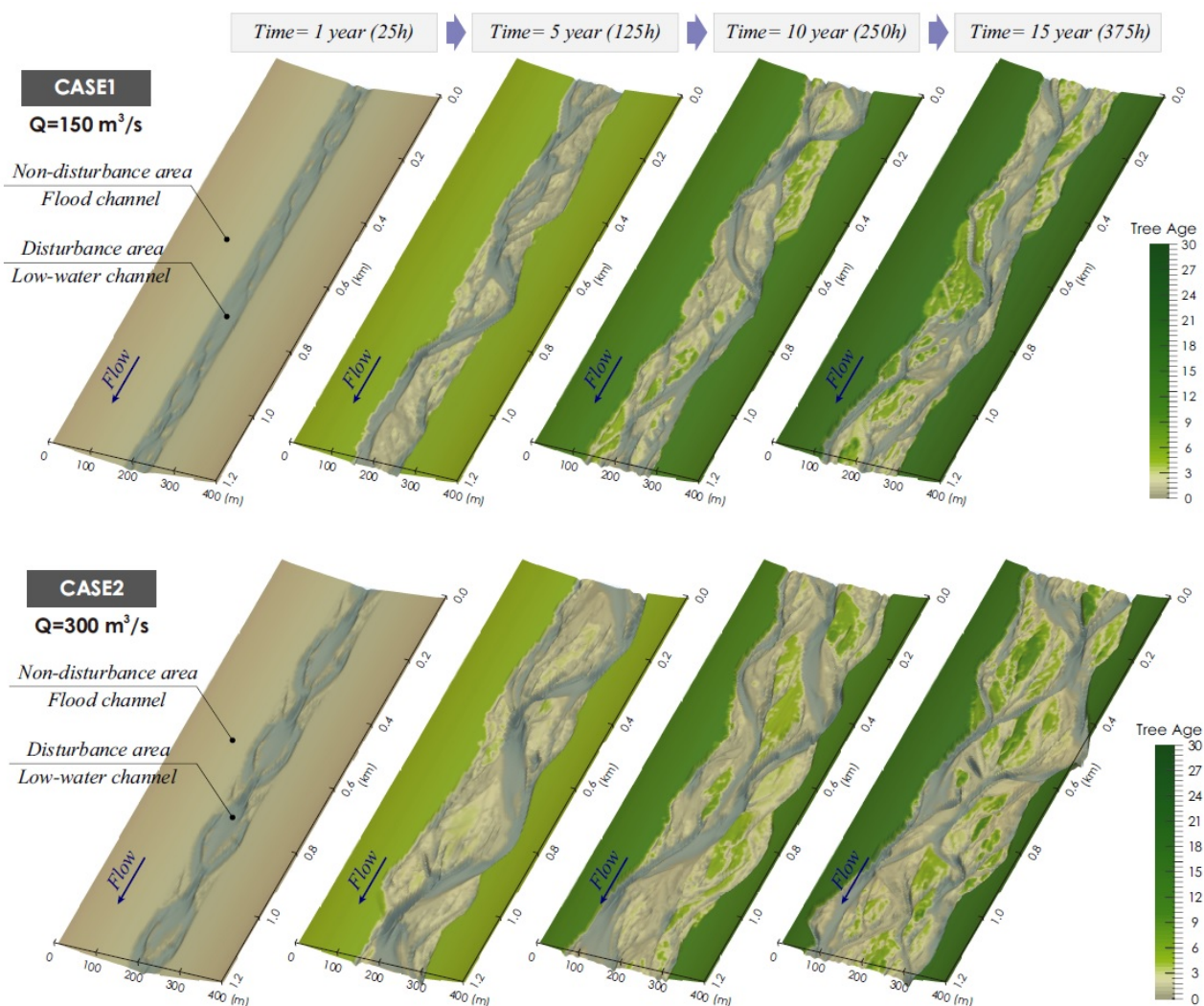


図-26 植生動態解析結果（上段：CASE1，下段：CASE2）

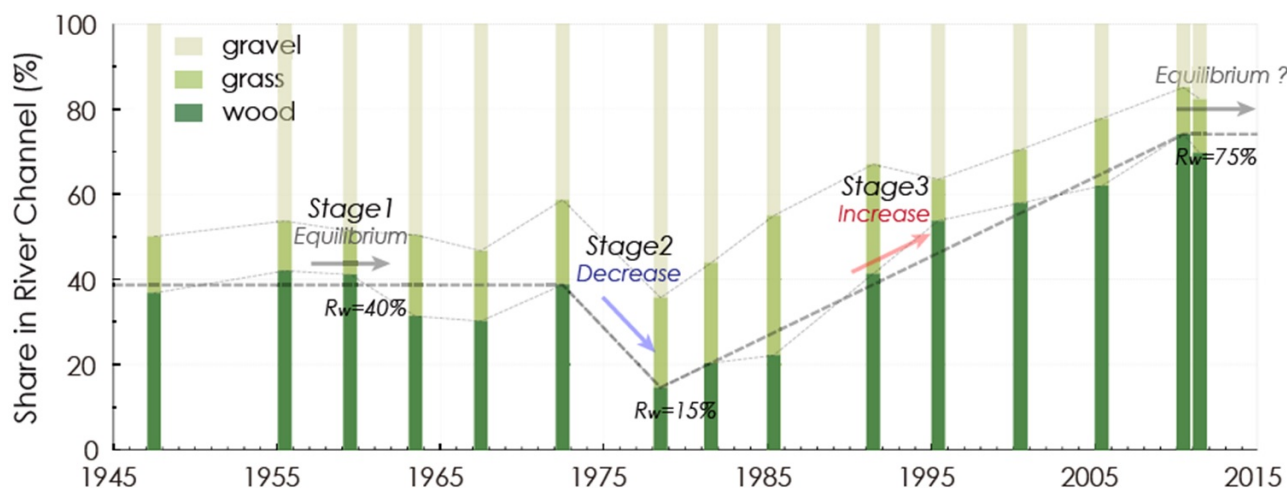


図-27 礫河原・草地・河畔林の河道内占有率（札内川上流域）

象としている河川で生物調査を行って必要なデータを収集したり、既存文献を参考にするなどして指標種の物理場に対する選好性を定式化すればよい。

6. 3 札内川における環境改善の目標設定手法

ここでは、環境改善の目標設定手法の一例として、札内川の過去の河道状況を数値計算によって想定した上で、改善目標値となる WUA を試みに計算した例を紹介する。

札内川において自然状態に近い河川環境が残されていた 1960 年代以前は、まだ水生生物に関する調査が十分に行われていない時代であり、当時札内川に生息していた水生生物の種数や生息密度などの記録は存在しない。また、河道地形に関する調査は最も古いもので 1960 年代の横断測量が残されているが、計測間隔 200m の横断データでは解像度が粗く、札内川のような多列化した流路網を有する河道地形を十分に復元することができない。そこで、ここでは、永多ら⁵⁾による植生動態解析の結果として得られた札内川のモデル河道の河床変動解析結果を活用する。植生動態解析の詳細については参考文献を参照されたいが、図-26 の CASE1 は、流量 $Q=150\text{m}^3/\text{s}$ の条件下で形成された河道地形で、融雪出水規模が小さくなり樹林化率(河畔林の河道内占有率)が 75% 程度となった現在の河道状況を表している。また、CASE2 は、流量 $Q=300\text{m}^3/\text{s}$ の条件下で形成された河道地形で、融雪出水規模が大きく、樹林化率が 40% 程度で平衡状態を保っていた 1960 年代以前の河道状況を表している。植生動態解析から得られたそれぞれのモデル河道の樹林化率が実際の札内川の樹林化率と概ね一致していることから、河道地形に関してもある程度の再現性を有するものと推察できるこ

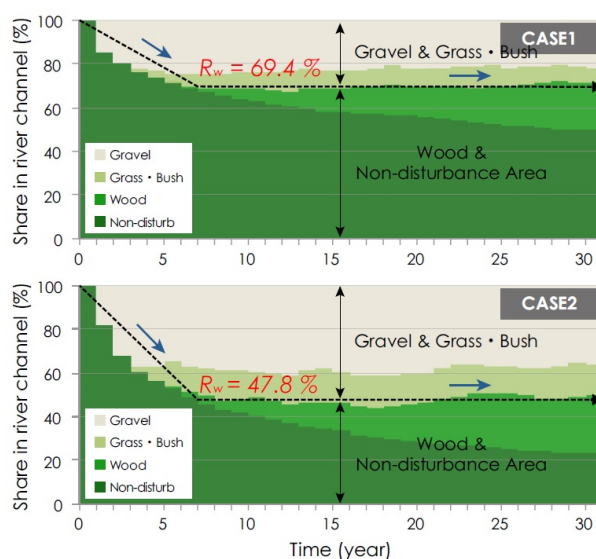


図-28 河畔林の河道内占有率の経年変化（計算結果）

とが当該解析結果を活用する根拠である(図-27,28)。なお、図-28 中の Gravel (礫河原) の中には河川水面の面積も含まれていることに注意されたい。

ここでは、これらの解析から得られた河道地形をもとに過去と現在の水理量の平面的な分布を推定し、それぞれの河道状況における WUA の変化を定量的に算出することを試みた。

植生動態解析から得られた CASE1 と CASE2 の河道地形を対象に前述の無次元指標を用いてハナカジカの生息環境評価を行い、得られた WUA の変遷過程を各成長段階別に整理した結果を図-29 に示す。なお、両ケースにおける生息環境評価は初期河道形状以外の計算条件は全て同一で、解析区間の延長は 1.2km、川幅は 0.4km で、計算領域の総面積は 0.48km^2 である。CASE1 は前述のように流量 $Q=150\text{m}^3/\text{s}$ の条件下で形成された河道地形を対象

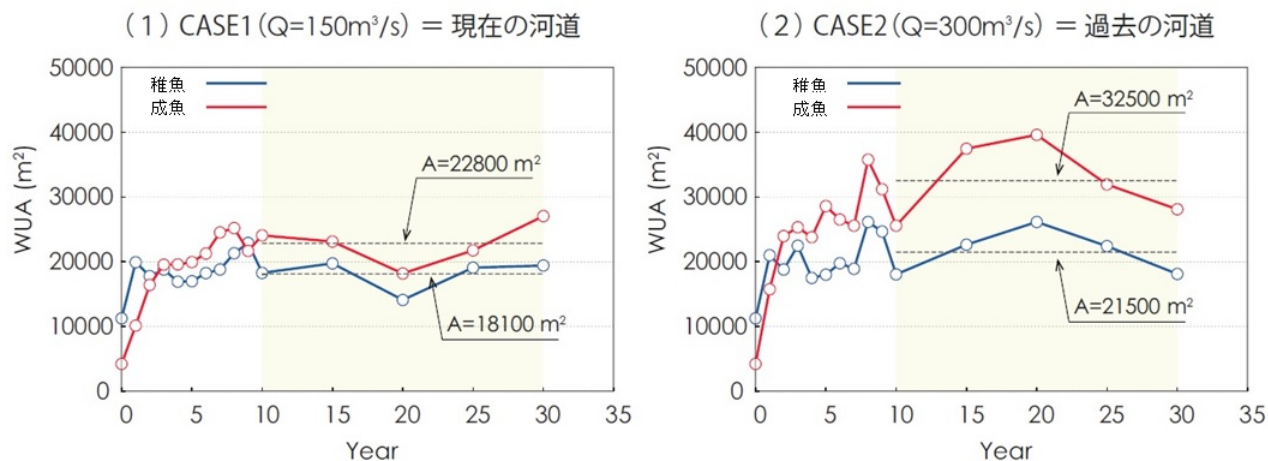


図-29 現在と過去の河道に対するWUAの解析結果 (Q=20 m³/s, d₆₀=37.8mm)

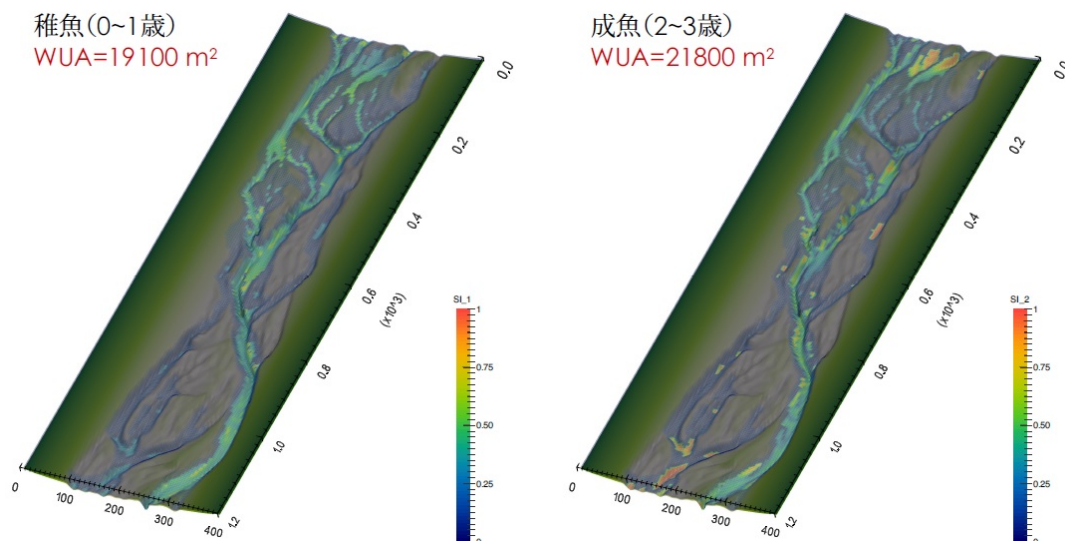


図-30 CASE1 : 現在の河道に対する WUA の解析結果の一例 (Q=20m³/s)

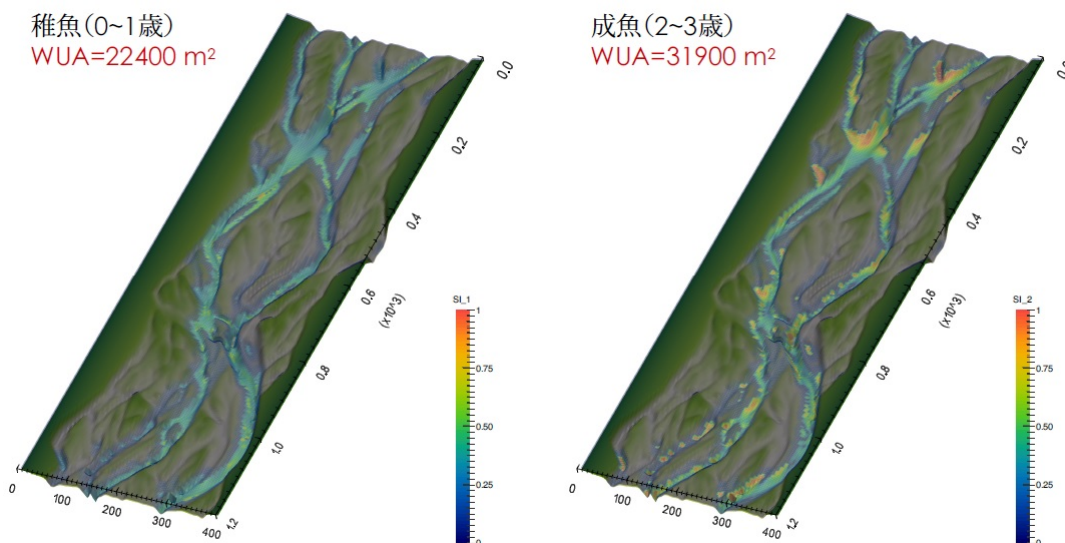


図-31 CASE2 : 過去の河道に対する WUA の解析結果の一例 (Q=20m³/s)

とした WUA の算出結果であり、現在の河道状況を想定したものである。一方、CASE2 は流量 $Q=300\text{m}^3/\text{s}$ の条件下で形成された河道地形を対象とした WUA の算出結果であり、過去の河道状況を想定したものである。図中点線は、樹林化率が概ね平衡状態に達した 10 年目以降の WUA の平均値で、過去と現在の河川環境をこの値を用いて比較すると、現在の河川環境は過去に比べ、ハナカジカの生息に適した水域の面積が約 15~30%程度減少したことがわかる。図-30 及び図-31 は 25 年目の河道地形に対する評価結果であるが、両者を比較すると、過去の河道では多列化した流路内に水生生物の生息域となる水域が広範囲に形成されており、これが WUA の違いをもたらしたことがわかる。ここで、仮に 1960 年代以前の札内川上流域の河川環境を目標と定めるならば、河道延長 1.2km、川幅 0.4km、流量 $20\text{m}^3/\text{s}$ の条件下では、ハナカジカの成魚を対象とした WUA は $A=32500\text{m}^2$ 程度が目標値となる。なお、実際の札内川の礫河原再生事業では、1960 年代以前の河道を目標としているわけではない。

6. 4 フラッシュ放流による河川環境改善効果

ここでは、事業による河川環境改善効果を定量的に算定した一例として、札内川特有の礫河原の再生を目的に実施されている札内川ダムのフラッシュ放流（最大放流量 $120\text{m}^3/\text{s}$ 程度）を取り上げる。

国土交通省北海道開発局帯広開発建設部では、自然再生実施計画書⁴⁾に事業実施箇所として記載されている旧流路において、その引き込み部に堆積した河岸の土砂を平水位程度で掘削し、フラッシュ放流により流量の増えた河川水を旧流路にスムーズに流入させることで、旧流路沿いに河床攪乱を発生させて旧流路を維持するとともに、フラッシュ放流によって冠水した区域でオノエヤナギ等の種子や実生を流亡させることで樹林化の抑制をはかっている。これにより、フラッシュ放流よりも規模の大きな洪水が発生した場合に旧流路沿い等の樹木の大規模な流亡や複列流路の流路変動を生じさせて礫河原の保全・再生を行うこととしている。基本的には、毎年のフラッシュ放流で現状を維持しつつ、フラッシュ放流よりも規模の大きな出水が発生した場合に、礫河原面積の増加（＝樹林面積の減少）を目指すという方針である。実際に、フラッシュ放流を実施以降、旧流路の幾つかが再生した他、主流路と旧流路の切替りも発生している。また、礫河原の面積については、フラッシュ放流以前は減少傾向であったものが、

現状維持ないしは微増となっており、一定の環境改善効果が確認されている。

ここでの検討としては、まず、融雪出水+フラッシュ放流（フラッシュ放流有り）と融雪出水のみ（フラッシュ放流無し）の 2 ケースのハイドログラフを与えて河床変動計算によりそれぞれの河道形状の変化を推定し、次に、形成された両ケースの河道地形に対してハナカジカの生息環境評価を行い、フラッシュ放流の有無が WUA に及ぼす影響を検証した。ただし、既検討により上記のフラッシュ放流有りの場合の河床変動計算結果があるため、本研究ではその結果を活用するとともに、あらためてフラッシュ放流無しの場合の河床変動計算を今回実施している。

河床変動計算の詳細は省略するが、計算区間は札内川上流域の一部である KP41~KP43 の 2km、初期の河床地形は上述の旧流路引き込み部の堆積土砂の掘削を行った後の地形、計算期間は 20 年相当とし、流量条件は上述のようにフラッシュ放流有り（20 回の平均的な融雪出水+20 回のフラッシュ放流）とフラッシュ放流無し（20 回の平均的な融雪出水のみ）の 2 ケースである。インプットする流量の条件として、夏~秋に発生する洪水が含まれていないことに留意されたい。フラッシュ放流有りの計算ケースでは、主流路の切替りが時折発生し、複列流路が良好に維持されるという結果となっている（図-32-1,2）。一方で、図示はしていないが、フラッシュ放流無しの計算ケースでは、主流路の切替りは発生せず、流路が固定化する計算結果となっている。

図-33 に上記両ケースの WUA の解析結果を示す。図においてフラッシュ放流実施後 15 年の WUA を示した理由は、図-32-2 において、主流路の切替りの生じた 2 箇所の流路が再度元の主流路へと切替ったタイミングがそれぞれ 15 年目と 16 年目であったことから、河道地形の変化としては 15 年程度を追跡すれば概ね十分であろうと考えたからである。図-33 は、フラッシュ放流を継続的に実施すれば、ハナカジカの生息環境を維持・保全でき、フラッシュ放流を実施しなければ、その生息環境は悪化していくことを示すとともに、毎年のフラッシュ放流が水面よりも上の礫河原面積の維持だけでなく、水面下のハナカジカの生息環境の維持にも貢献していることを示している。

なお、今回の河床変動計算には前述のように夏水による大規模な河道攪乱による河道地形の変化は考慮されていない。したがって、この解析結果は、フ

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

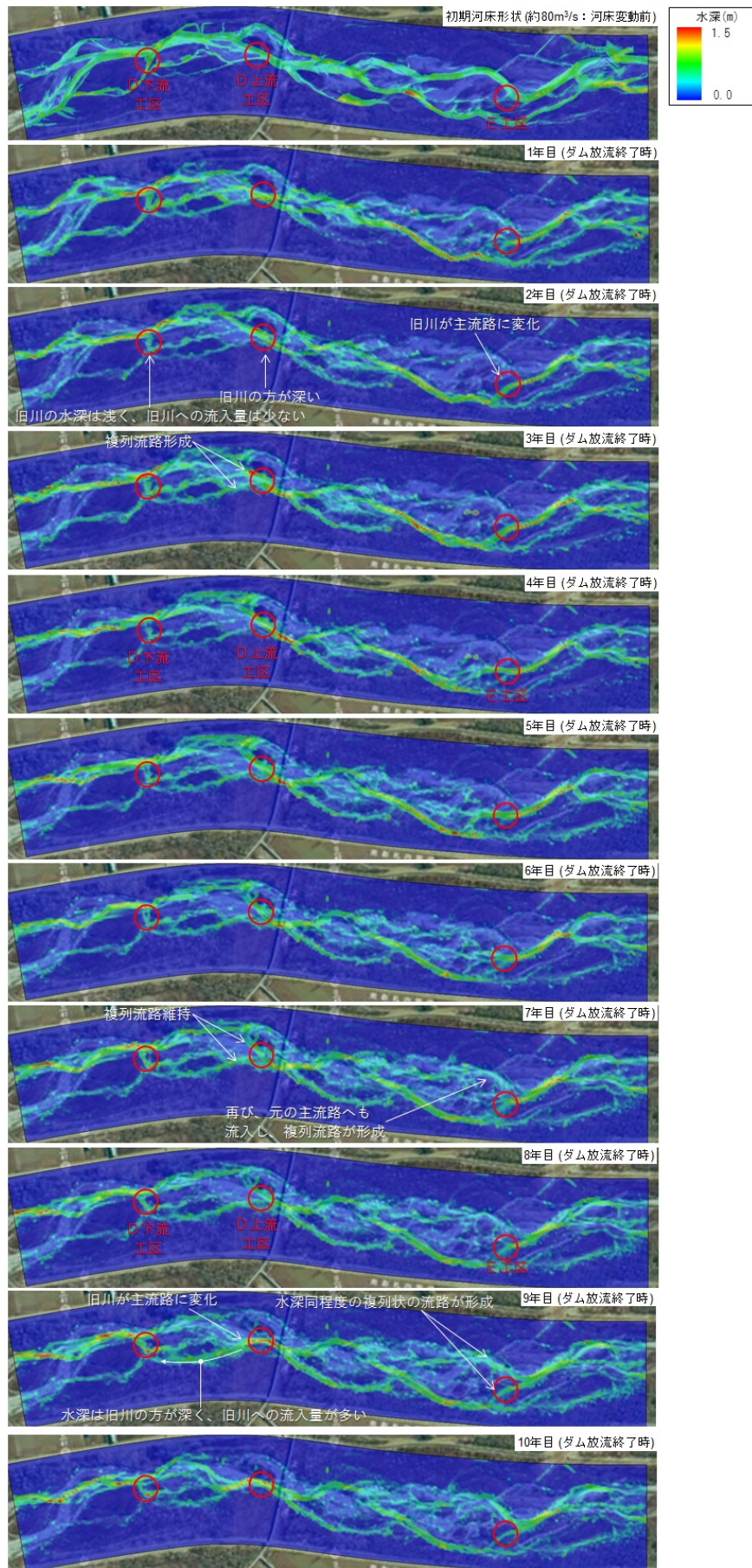


図-32-1 水深分布図 (KP41~KP43 フラッシュ放流有り 初期河床~10年目まで)

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

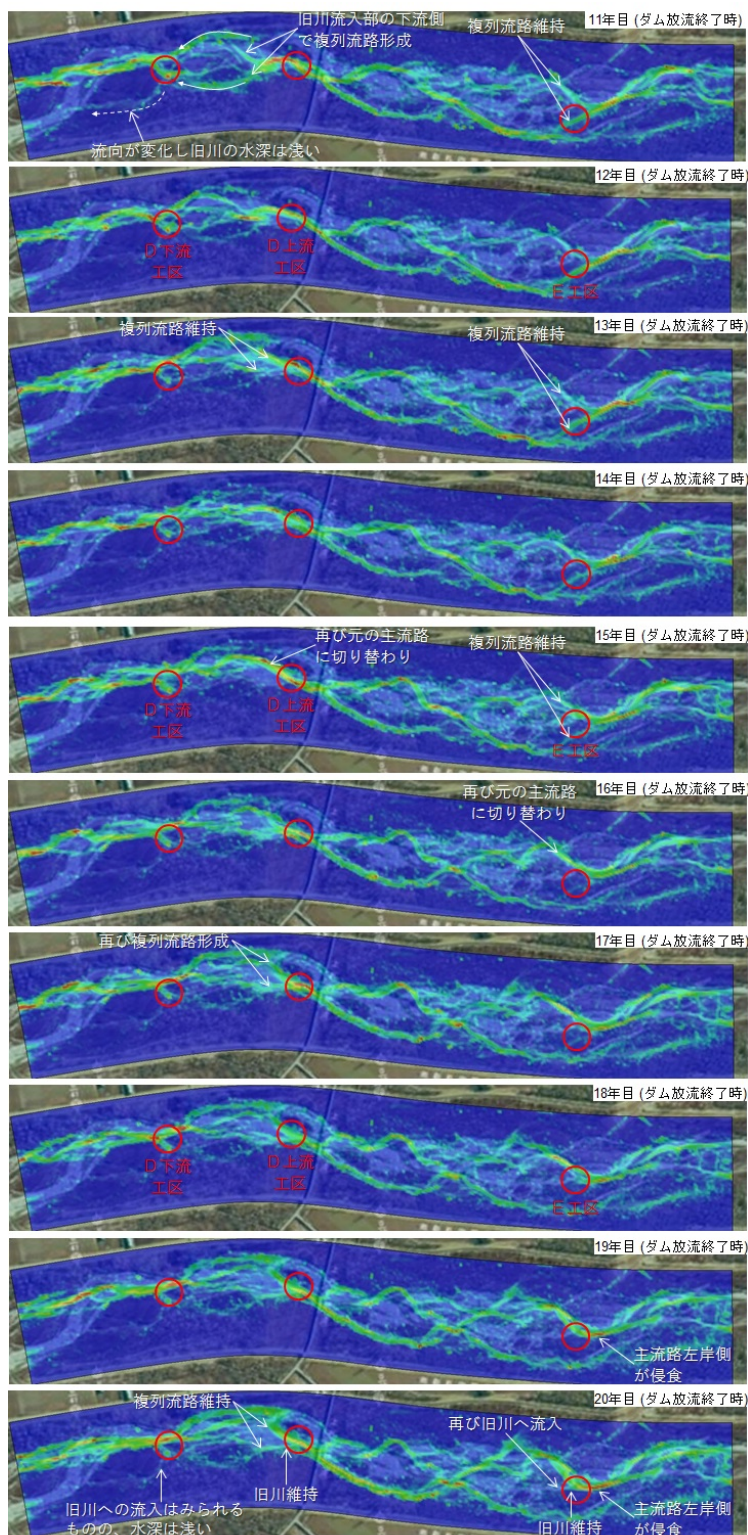


図-32-2 水深分布図 (KP41~KP43) フラッシュ放流有り 11年目~20年目まで

ラッシュ放流よりも規模の大きな出水が発生した場合に、礫河原再生事業での想定どおりに礫河原の面積が増加すれば、ハナカジカの生息環境も合わせて改善されるのではないかという期待を抱かせるものになっている。

7. 結論

本研究では、札内川流域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・中・下流域ごとの出現魚種やその構成比、底生魚の生態的特

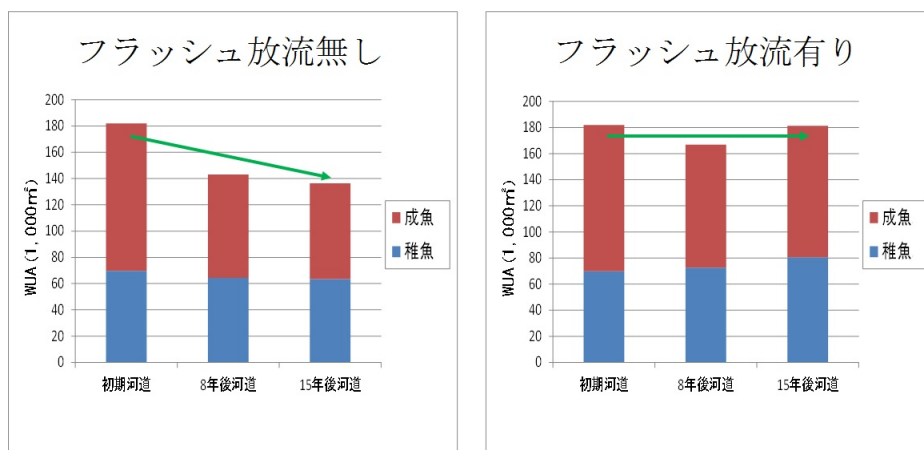


図-33 フラッシュ放流の効果 (KP41~KP43)

性などを整理した。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 指数を用いた無次元の評価指標を作成し、体長組成分析から得られた成長式をもとに各成長段階（稚魚・成魚）に応じた選好曲線を求めた。その上で、この選好曲線を平面 2 次元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・下流域に設けた各調査区間を対象とした底生魚の生息環境評価を行った。さらに、本モデルの実際の事業への活用方法を示しつつ、WUA を用いてダムフラッシュ放流がもたらす環境改善効果を定量的に評価する手法について示した。

選好度解析の結果、評価指標を年齢別に区分することで、生息密度 (SI 値) と物理環境変数 (フルード数、Fredle 指数) との相関性が高まり、底生魚が有する物理場に対する選好性をより適正に評価できることがわかった。また、この指標を生態系評価モデルへ組み込むことで年齢に応じた生息適地評価が可能となった。さらに、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、稚魚に対する解析結果は SI 値が全体的に低く、実測値と解析値の一致状況を明確に判断することができなかったが、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示唆された。解析結果の解像度と再現性に関しては、まだ十分なものとは言えないが、上・中・下流域における物理環境の違いが、底生魚の生息環境に与える影響に関してはある程度妥当な評価が可

能であり、フルード数や河床材料の粒度分布特性を組み合わせた無次元量を評価指標とすることで、流れ場の特性が大きく異なる上・中・下流域に対しても、同一の評価基準を用いた底生魚の生息環境評価が可能になることを示した。また、粒度分布の時空間的变化の再現性には課題は残るが、評価する場の平均的な粒度分布を与えることで、ある程度の再現性を持った生息環境評価が可能であることを示した。さらに、ダムのフラッシュ放流がもたらす底生魚の生息環境改善効果を WUA を用いて評価した結果、年 1 回のダム放流を継続的に実施すれば、ハナカジカの生息環境を維持・保全でき得ることを示した。

参考文献

- 1) 野上毅、渡邊康玄、中津川誠：急流河川における河床地形の定量的区分、水工学論文集、第 47 巻、pp.245-250、2003
- 2) Frederick B. Lotspeich、Fred H. Everest：A New Method for Reporting and Interpreting Textural Composition of Spawning Gravel、Research Note RN-PNW-369、pp.1-11、1981.
- 3) iRIC ホームページ：<http://i-ric.org/ja/>
- 4) 札内川技術検討会：http://www.ob.hkd.mlit.go.jp/hp/kakusyu/satsunai_kentoukai/index.html
- 5) 永多朋紀、渡邊 康玄、清水 康行、井上 卓也、船木 淳悟：礫床河川における河道変化と植生動態に関する研究、土木学会論文集 B1 (水工学) Vol.72 No.4 I_1081-I_1086、2016.
- 6) 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、北海道大學水産學部研究彙報 26(1)、pp.31-37、1975.
- 7) 永多朋紀：融雪出水を有する扇状地河川における水理

的多様性の定量評価に関する研究、北見工業大学博士論文、
2016.

STUDY ON A CHANNEL DESIGN TECHNIQUE THAT FACILITATES SUSTAINABLE HYDRAULIC DIVERSITY AT RIVERS IN COLD, SNOWY REGIONS

Budget: Grants for operating expenses
General account

Research Period: FY2011-2015

Research Team: River Engineering Research Team

Author: FUNAKI Jungo

MAEDA Shunichi

KAWAMURA Satomi

Abstract: Recently concerns have arisen regarding habitat deterioration resulting from the fixing of river thalwegs and the overgrowth of trees in river channels. To manage rivers with an eye to conservation/restoration of the river environment, the following need to be done: 1) quantitative evaluation of the effects of such changes in channels on organisms, 2) judging of the necessity of river restoration works, 3) setting of targets to improve the river environment and 4) implementation of measures.

In this study, we made a river ecosystem evaluation model that adopts our newly developed non-dimensional indicator comprising the Fredle Index and the Froude number. The indicator expresses aquatic organisms' preferences for certain river physical conditions. We took demersal fish that inhabit the Satsunai River in the Tokachi River System as the object of study and analyzed the relationship between the spatial distribution of the fish's preferences and their habitation density. It was found that the former closely expresses the latter in a wide range of the Satsunai River, from the upper reaches to the lower reaches. Consequently, it was proved that the river environment at each location can be evaluated from the viewpoint of demersal fish-friendliness by the single criterion.

In addition, as an example of application of the proposed evaluation model, we assessed the effects of flushing discharge (artificial flood) from the Satsunai Dam on the habitation environment of demersal fish. The ongoing repetition of flushing discharge is expected to maintain and preserve the demersal fish habitation environment for the future.

Key words: Satsunai River, ecosystem evaluation model, demersal fish, voids in gravel, flushing discharge