

礫間の空隙を考慮した底生魚の生息環境評価手法

A Method of a Demersal Fish Habitat Evaluation Based on the Void in a Gravel

永多 朋紀¹・渡邊 康玄²・伊藤 丹³
Tomonori NAGATA, Yasuharu WATANABE and Akashi ITO

¹正会員 独立行政法人 寒地土木研究所 寒地河川チーム (〒 062-7602 札幌市豊平区平岸 1 条 3 丁目)

²正会員 工博 北見工業大学 社会環境工学科 (〒 090-8507 北見市公園町 165 番地)

³正会員 国土交通省 北海道開発局 留萌開発建設部 (〒 077-8501 留萌市寿町 1 丁目 68 番地)

In the Satsunai River, many groins have been built as countermeasures of stabilizing the water channels for the purpose of flood control. But recently, gravel riverbeds are rapidly disappearing because of the said countermeasures. Stabilization of channels might simplify the hydraulic characteristics and deteriorate habitat conditions of water species, therefore immediate countermeasures are being required. In this study, I investigate quantity of creature and physics. In addition, I analyze findings and make the index that used a quantity of no dimension. Furthermore, I apply this index in an ecosystem evaluation model and evaluate the influence that dam discharge gave to river environment from a respect of habitation environment.

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

1. 序論

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その特徴であった礫河原が急速に消失しつつある(図-1)。このような背景のもと、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きた。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、河床の攪乱と植生の更新を促すことを目指した新たな試みである。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が示された。一方、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、河川環境の改善効果を量るためには、これを定量的に評価する手法が求められる。

著者らが昨年行った研究¹⁾では、ハナカジカの生息密度とフルード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評価を行った。しかし、指標として用いた選好曲線は上流域を対象に行った調査結果をもとにしており、下流域への適用性に関しては課題が残る。セグメントが異なると水生生物の生息環境として重要な河床面の状態が大きく異なるため、流域全体に適用可能な汎用性の高い評価モデルの構築には、底生魚が有する粒度分布特性に対する選好性の違いを評価指標へと反映させる必要がある。

本研究では、上下流域における水生生物の生息状況や物理環境の違いを把握するため、札内川の下流域を

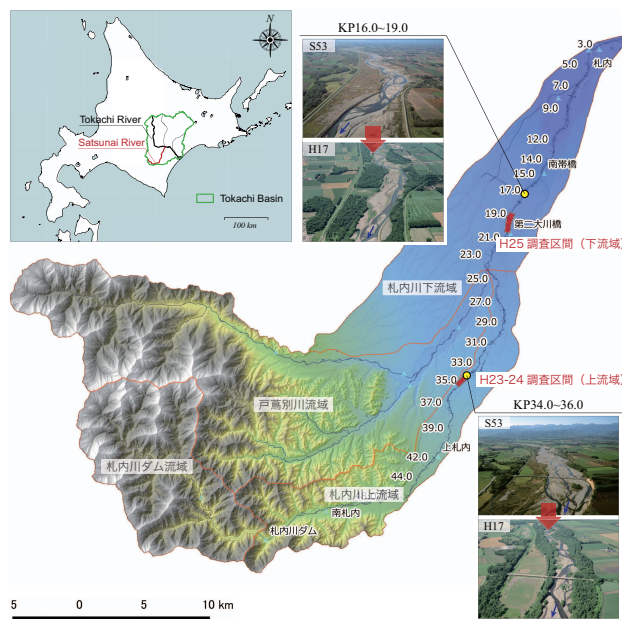


図-1 札内川流域の河川環境変化および現地調査箇所

対象とした現地調査を行い、過年度までに行った上流域の調査結果と併せて両者の違いを整理するとともに、その要因について考察を行った。また、上下流域に設けた各調査区間を対象に、数値解析を用いた生息環境評価を行い、ハナカジカの物理場(特に河床表層の粒度分布)に対する選好度の空間的分布と実際の生息密度との比較から、上下流全体でより高い再現性を示す評価指標(Suitability Index)について検討を行った。

表-1 現地調査概要 (2011～2013 年, 計 7 回 81 区画)

year	month	流域区分	調査区画数	早瀬	平瀬	淵	河床材調査	魚類捕獲数	底生魚捕獲数	
									ハナカジカ	フクドジョウ
2011	11	上流	15	4	4	4	15	128	86	17
2012	6	上流	11	3	3	3	11	68	35	20
	8	上流	11	3	3	3	—	109	46	44
	12	上流	11	3	3	3	—	50	18	4
2013	7	下流	11	6	3	1	10	271	51	168
	10	下流	11	6	3	1	—	301	46	141
	12	下流	11	6	3	1	—	159	45	67
合計			81	31	22	16	36	1086	327	461

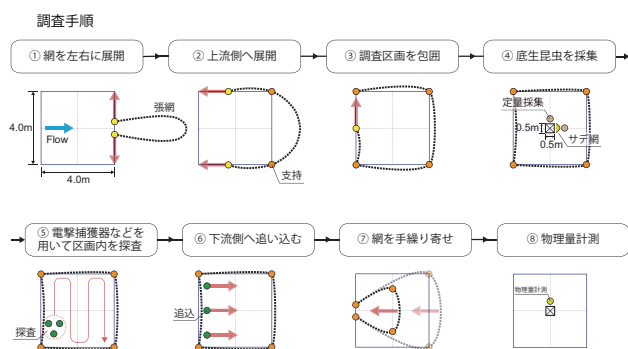
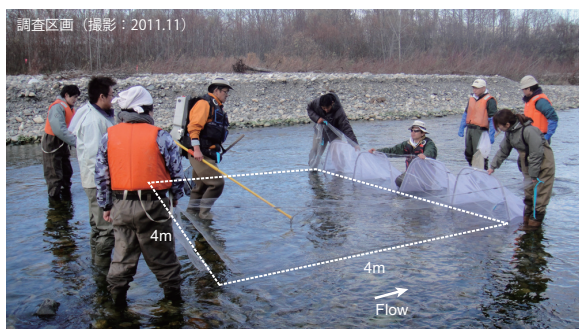


図-2 区画調査手法 (4m 四方の区画採集)

2. 現地調査

2011～2012 年は札内川の上流域 (KP34.6～35.6) を対象に、水生生物の捕獲調査と調査箇所における各種物理量の計測を行った。これに加え、2013 年は調査区間を下流域 (KP19.0～20.6) へと移し、セグメントの異なる物理環境下において 3 季・計 3 回の現地調査を実施した。現地調査箇所を図-1 に、過去 3 年間・計 7 回に亘る現地調査の概要を表-1 に示す。

(1) 調査手法

生物調査は、調査の時期や箇所が異なるデータを定量的に比較するため、捕獲方法及び作業強度は可能な限り統一し、コドラード法 (区画法) により一定区画内の魚類及び底生生物の捕獲採集を行った。魚類調査では、一区画あたりの作業強度を 3 人 30 分とし、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した。物理環境調査では、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、横断測量等による河道形状の計測を行った。河床材料調査では、水面域における河床表層の粒度分布が底生魚の生息環境

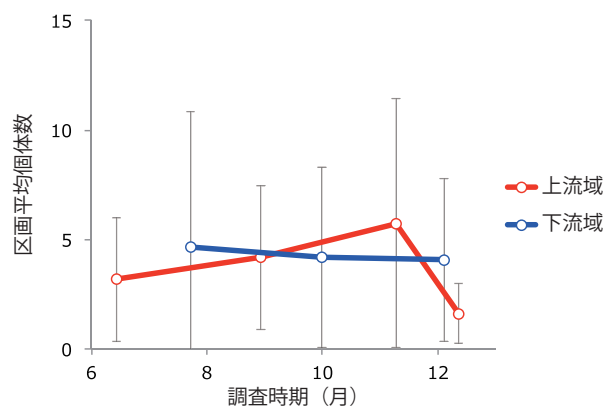


図-3 区画平均個体数の季節変化 (ハナカジカ)

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、ふるい分け試験を行った。

水生生物の捕獲採集と物理環境の計測を含めた一区画あたりの作業手順を図-2 に示す。

(2) 調査結果 (下流域)

調査の結果、下流域は上流域と比べてフクドジョウの優占率が極めて高く、ハナカジカ (上流域の優占種) の約 2～3 倍の生息密度を有していた。ハナカジカの区画平均個体数は、1 区画 (16m²) あたり 5 個体程度で推移しており、季節的な変動は僅かで、上下流の違いによる有意な差異は認められない (図-3)。また、図中の誤差範囲 (標準偏差) が示すように、上下流ともに各調査プロットの捕獲量には非常に大きなバラツキが見られる。これは、河道内に存在する様々な物理環境を広く網羅するよう各調査プロットの位置を選定しているため、瀬淵等に代表される物理環境の違いが生息密度の違いとして現れたものと捉えられる。

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、礫間の空隙は、外敵から身を隠し流水から受ける外力を回避するための居住空間として機能する。現地踏査時の目視観測や河床材料調査から、上下流域の粒度分布特性には明瞭な違いが認められ (図-4)、特に下流域では、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っており、これが底生魚の場の選択性に強く影響しているものと推察された。このような河床材料の粒度構成に対する鋭敏な応答特性は、物理量を介した生息適地評価の可能性を示唆するものである。

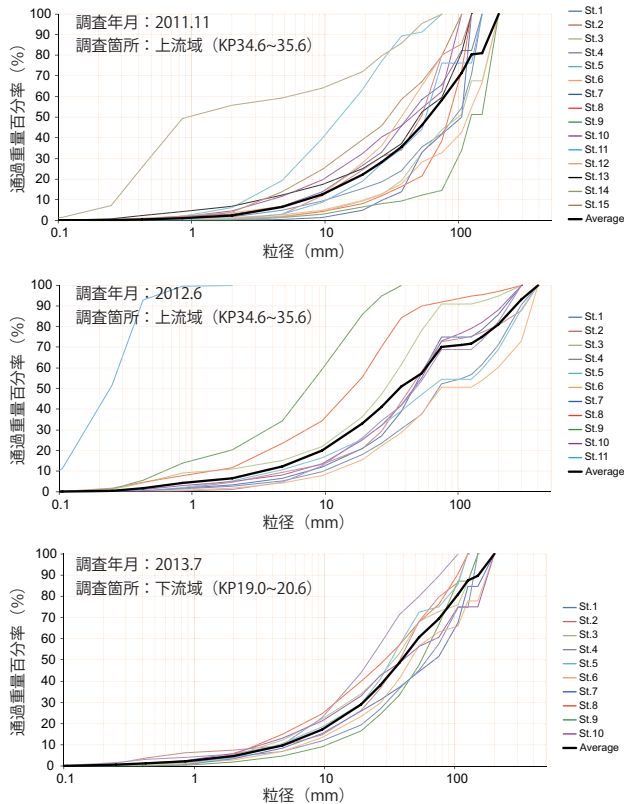


図-4 各調査プロットの粒度分布 (2011~2013 年, 上下流域間)

3. 選好度解析

河川環境を生物面から評価するためには、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。

(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、上流域は水深・流速に対する相関性が高く、下流域は粒径に対する相関性が高いなど、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の割合が上昇し、粒径に対する依存性が高まるためであると考えられる。

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、代表的な無次元量 (Fr , τ_*) と粒度分布特性の組み合わせで表される (1), (2) 式が比較的高い相関性を示すことがわかった。式中、河床面の粒度分布特性は、代表粒径 d_{60} の大きさと、粒径加積曲線の傾きや分散度を示す標準偏差 $\sqrt{d_{75}/d_{25}}$ または曲率半径 U_c' で表される。なお、(2) 式に示す代表粒径を標準偏差で除した値は Fredle 指数 (Fi) とも呼ばれ、サケの産卵床を評価する際の指標としても用いられる。

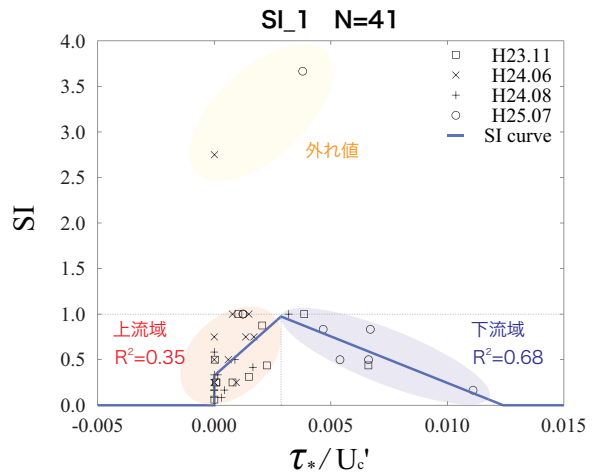


図-5 正規化後の選好曲線 (説明変数: τ_*/U_c')

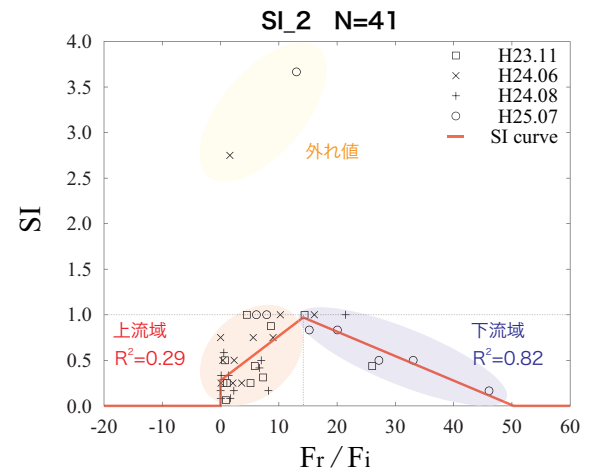


図-6 正規化後の選好曲線 (説明変数: Fr/Fi)

$$\frac{\tau_*}{U_c'} = \frac{v^2}{6.8^2 sgh^{\frac{1}{3}}} \frac{1}{d_{60}^{\frac{2}{3}}} \frac{d_{10}d_{60}}{d_{30}^2} \quad (1)$$

$$\frac{Fr}{Fi} = \frac{v}{\sqrt{gh}} \frac{1}{d_{60}} \sqrt{\frac{d_{75}}{d_{25}}} \quad (2)$$

ここで、 Fr :フルード数、 Fi :fredle 指数 (m)、 τ_* :無次元掃流力、 U_c' :粒径加積曲線の曲率半径、 v :水深 (m)、 h :流速 (m/s)、 s :砂粒子の水中比重、 g :重力加速度 (m/s^2)、 d_* :各通過重量百分率における粒径 (m) である。

(2) データ棄却条件と正規化基準

相関回帰分析では、河床材料調査が行われた時期近傍の4期 (2011.11, 2012.6, 2012.8, 2013.7) を対象に、それぞれ捕獲数0と高水敷上の調査プロットを除く全てのデータに対して Smirnov - Grubbs の棄却検定を行い、有意水準1% (片側, 1回) の有意点を越えた調査プロットを「外れ値」と判定し棄却する。生物量は季節やセグメントによっても変化するため、棄却検定後のデータに対して各調査時期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 (Suitability Index) へと変換する。(1), (2) 式を説明変数、正規化後のハナカジカの生息密度を目的変数とした選好曲線を図-5、図-6に示す。

4. 生態系評価モデル

次に、以上で求めた2種類の選好曲線を水理河床変動解析モデルへと組み込み、底生魚の生息環境評価を行うための数値解析モデルを構築する。

(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 ver4.0²⁾」を用いた。本モデルの詳細については文献³⁾を参照されたい。本解析では、この平面2次元水理河床変動解析モデルにPHABSIMの手法を組み合わせ、図-5および図-6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)の空間的分布をそれぞれ算出し、上下流区間における現地調査結果との整合性を比較検証する。

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の指標として取り入れる点にある。そのため、河床変動解析では粒度分布の時空間的变化を算出する必要がある。混合粒径下では、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、まず河床の粒径加積曲線をk階層に分割し、それぞれの階層における流砂量を算出、それらを全て足し合わせ総流砂量および河床変動量を求める。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、混合粒径下におけ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。

$$q_{bk} = 17\tau_{*k}^{1.5} \left(1 - \frac{\tau_{*ck}}{\tau_{*k}}\right) \left(1 - \sqrt{\frac{\tau_{*ck}}{\tau_{*k}}}\right) \sqrt{sgd_k^3} \quad (3)$$

ここで、 q_{bk} ：流線方向の全流砂量 (m^2/s)、 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(岩垣の式)、 d_k ：k階層の代表粒径(m)である。

また、各粒径の無次元限界掃流力の算定には遮蔽効果を考慮した浅田の式(Egiazaroffの修正式)を用いる。

$$\frac{\tau_{*ck}}{\tau_{*cm}} = \left(\frac{\log_{10} 23}{\log_{10} \left(21 \frac{d_k}{d_m} + 2 \right)} \right)^2 \quad (4)$$

$$d_m = \sum_{k=1}^n p_k d_k \quad (5)$$

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(m)、 p_k ：河床全体に占めるk階層の粒子の割合である。

(2) 計算条件

解析対象区間は、現地調査区間(上流域：KP34.6～35.6、下流域：KP19.0～20.6)と同一とし、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(提供：北海道開発局)を用い

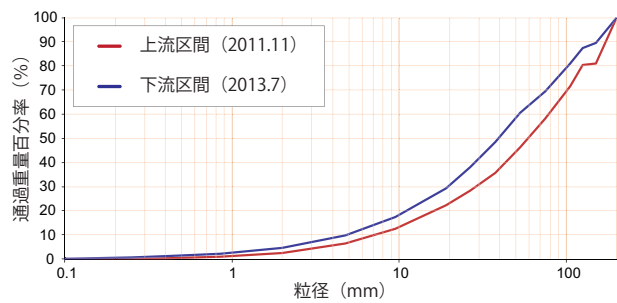


図-7 上下流区間の初期粒度分布(計算入力値)

る。初期粒度分布は、各年の河床材料調査の結果からその平均値を与え(図-7)、粗度係数は代表粒径 d_{60} をもとに、Manning-Strickler式から上流域： $n=0.031$ 、下流域： $n=0.029$ とした。流量条件は、両区間の平水流量規模(上流域： $20m^3/s$ 、下流域： $40m^3/s$)を定常流で与える。

本研究では、初期粒度分布として両区間の平均的な粒径加積曲線を与え、平水流量を定常流で一定時間通水した際の平衡状態をもとに、その空間的分布を推定することとした。しかし、現地における実際の粒度分布は、本来、洪水時など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によっても河床材料の状態は大きく異なるものと考えられる。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、上述のような簡易的な手法を用いて粒度分布の再現性を検証するが、今後、生態系評価モデルの精度向上には、粒度分布の時空間的变化の推定も重要且つ大きな課題である。

(3) 解析結果(粒度分布)

図-8、図-9は、それぞれ上流区間(KP34.6～35.6)、下流区間(KP19.0～20.6)を対象に行った粒度分布の解析結果である。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 の時間変化量を面的に示したもので、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で、青線が粒度分布の解析結果を1時間毎に表示したもの、赤線は現地調査結果である。

まず、図-8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、なお且つ、現地で細粒化の傾向が現れるような低流速域では特に

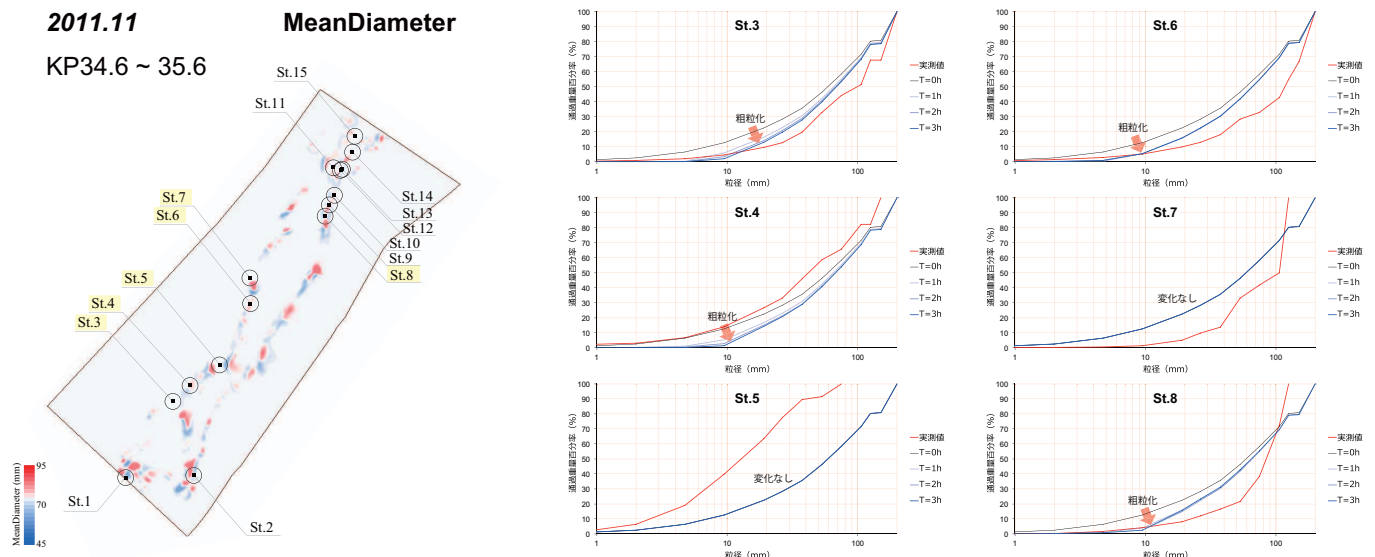


図-8 上流区間：粒度分布の解析値と実測値 (KP34.6~35.6, L=1.0km, $Q=20m^3/s$, 3 時間通水後)

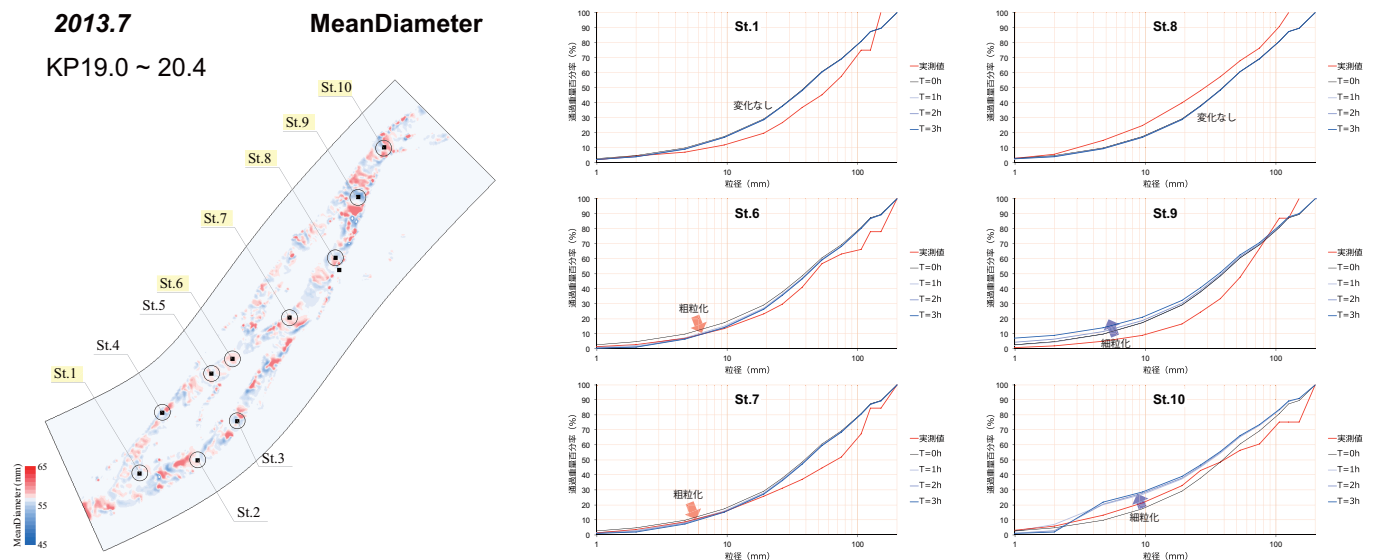


図-9 下流区間：粒度分布の解析値と実測値 (KP19.0~20.6, L=1.6km, $Q=40m^3/s$, 3 時間通水後)

変化が生じ難いためであると考えられる。

次に、図-9 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、この箇所から流出した細粒分が St.9 に流入したことがこの要因と考えられる。

以上、混合粒径モデルによる粒度分布特性の再現性に関しては、既述の通りその時空間的变化の推定に多くの課題があり、現地調査結果と十分整合しない部分も多い。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の違いに対しては、ある程度妥当性を持った生息環境評価とセグメント間の比較は可能であると思われる。

(4) 解析結果（選好度の空間分布）

以上で求めた 2 つの選好曲線 (1), (2) 式と、前節に示した粒径加積曲線の空間分布の推定結果および各種水理量の解析結果から、ハナカジカの物理場に対する選好度 (SI) の空間分布を求め、実際の生息密度との比較から上下流域間への適用性を検証する。

図-10 に上流域の解析結果を、図-11 に下流域の解析結果を示す。まず上流域に関して、SI-1 (τ_*/U_c) と SI-2 (Fr/F_i) の 2 つの指標で解析結果を比較すると、SI-1 では捕獲数と選好度の評価が一致しない箇所が多く存在する一方、SI-2 では多くの調査プロットで高い整合性を有し、SI-1 に比べて空間的に連続した評価が可能であることがわかる。また、この傾向は下流域に関しても同様であり、SI-2 を用いた解析結果がより高い整合性を示している。以上、フルード数を Fredle 指数で除した指標 (SI-2) を用いることで、上下流域を問わず一定の再現性を持った生息場評価が可能になる。

Aerial photo 2012

KP34.6 ~ 35.6

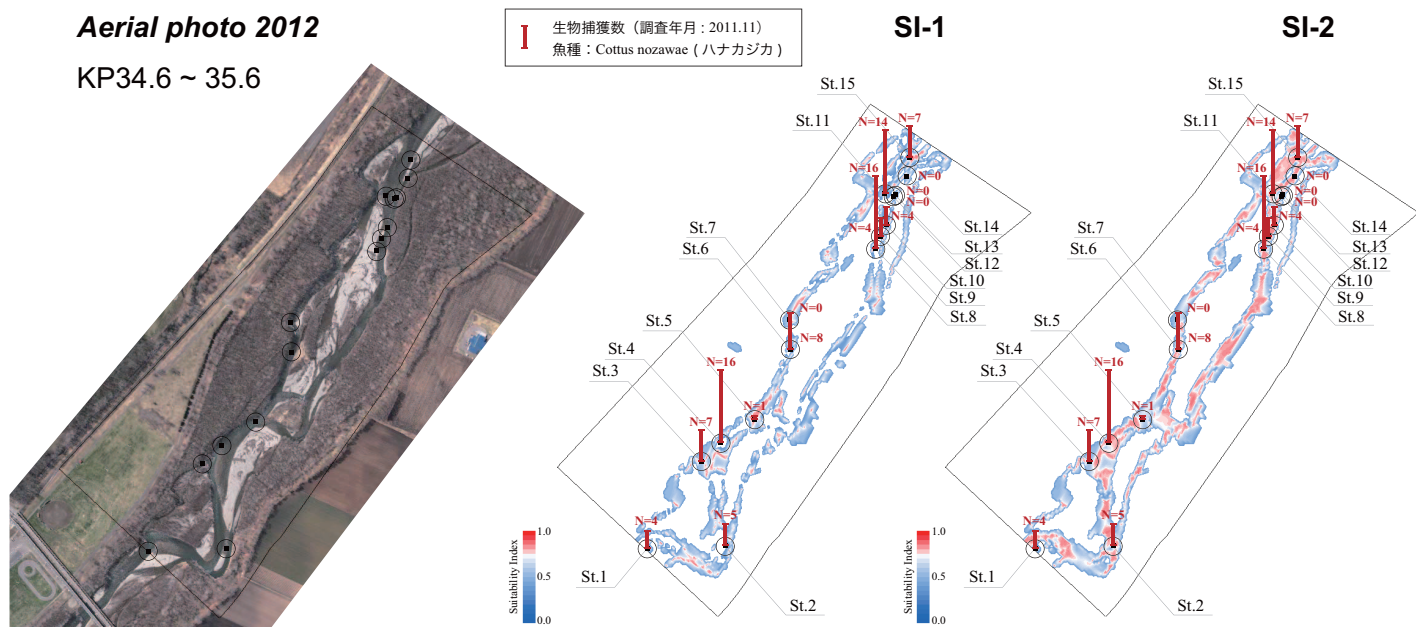


図-10 上流区間：ハナカジカの生息適地評価と実際の捕獲数 (KP34.6~35.6, L=1.0km, Q=20m³/s, 3 時間通水後)

Aerial photo 2014

KP19.0 ~ 20.4

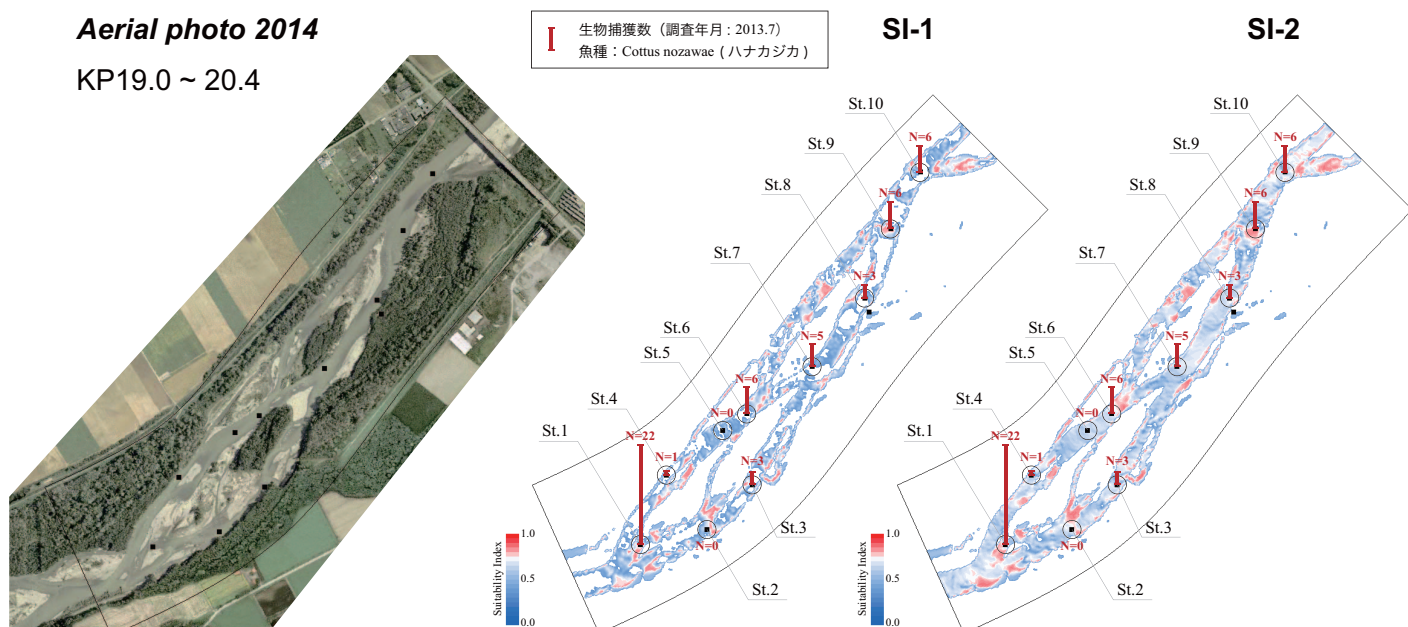


図-11 下流区間：ハナカジカの生息適地評価と実際の捕獲数 (KP19.0~20.6, L=1.6km, Q=40m³/s, 3 時間通水後)

5. 結論

以上、本研究では、札内川を代表する底生魚の一種であるハナカジカを対象に、生物量と物理量に関する現地調査結果を分析し、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 指数を用いて表し、これを指標へと組み込むことで、河川生態系評価モデルの再現性が向上することを示した。また、これにより、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ある程度可能になることを明らかにした。さらに、粒度分布の時空間的変化の再現性にはまだ課題は残るが、評価する「場」の平均的な粒度分布を与えることで、一定の程度の再現性を持った生息場評価が可能になることを示した。

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) 北海道河川財団: iRIC, <http://i-ric.org/ja/>
- 3) 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.
- 4) 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), 31-37, 1975.

(2014. 4. 3 受付)