

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：伊藤丹、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

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顕在化しており、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（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あることが示された。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上では、これを定量的に評価していく必要がある。

著者らが昨年行った研究では、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、上流域を対象とした調査結果をもとにしたものであり、下流域への適用性に関しては

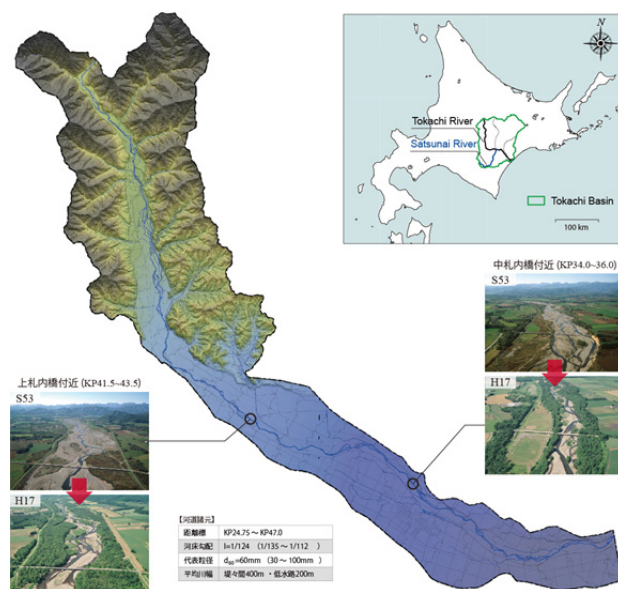


図-1 札内川上流域の河川環境変化と調査区間
(KP34.6～35.6)

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も大きく異なるため、流域全体に適用可能な汎用性の高い評価モデルを構

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	中流	11	6	3	1	10	271	51	168
	10	中流	11	6	3	1	-	301	46	141
	12	中流	11	6	3	1	-	159	45	67
合計			81	31	22	16	36	1086	327	461

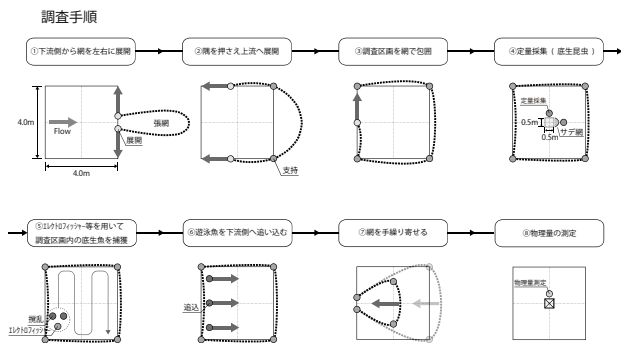


図-2 区画調査手法 (4m四方の区画採集)

築するには、底生魚が持つ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、まず、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、札内川の下流域を対象とした現地調査を行った。また、この調査結果をもとに上下流域で見られる生物量と物理量の違いを整理しその要因について考察を行った。さらに、数値解析を用いて上下流域の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（特に河床表層の粒度分布）に対する選好度の空間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。

2. 現地調査

2011~2012年は札内川上流域 (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定量計測を行った。これに加え、2013年は調査区間を中流域 (KP19.0~20.4) 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。調査結果の整理に際し、上流域との対比やデータ解析を容易にするため、調査手法および手順は過去の調査と同様のやり方で行った。過去3年間、計7回に亘る現地調査の概要を表-1に示す。

2.1 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一斉採集を行った。一区画あたりの作業強度は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、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する。また、札内川は礫床河川であるため、礫間に潜む底生魚も限無く捕獲できるように、調査時は手足等を用いて河床面の攪乱を行っている。物理環境は、横断測量による河道断面形状の計測と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、調査区間 (L=1.4 km) 内に計8箇所の自記水位計を設置し水位の自動観測を行った。魚類、底生生物および物理環境の測定を含めた一区画あたりの作業手順を図-2に示す。

2.2 調査結果 (中流域)

調査結果を比較すると、上流域と比べフクドジョウの優占率が極めて高く、上流域では優占種であったハナカジカの約2~3倍の生息密度を有することが確認された。ハナカジカの区画平均個体数の季節的变化を見ると、季節的な変動量は小さいが、平均

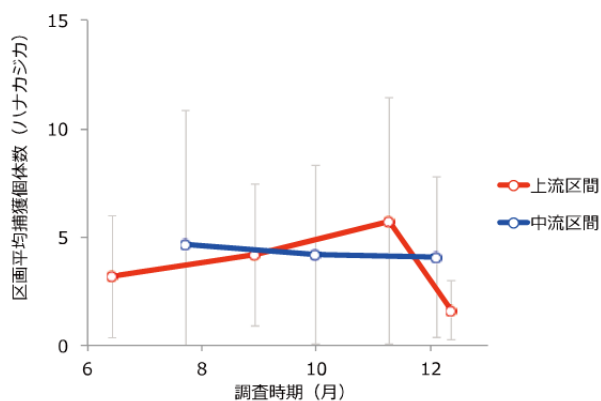


図-3 区画平均個体数の季節的变化 (ハナカジカ)

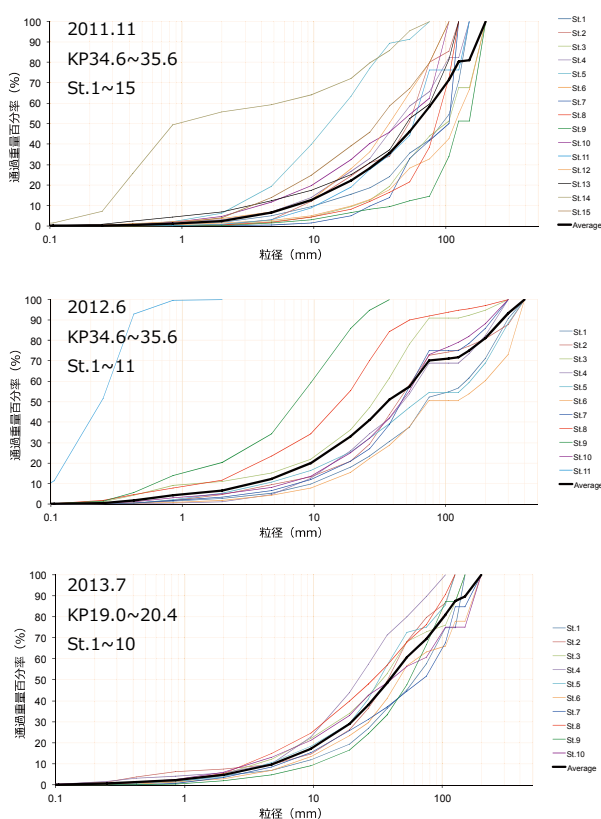


図-4 各調査プロットの粒度分布 (上下流域)

的には1区画 (16 m²) 当り5個体程度と上流域と同様の生息密度であった (図-3)。また、上下流域に共通した事象として、各調査プロット間の捕獲量には非常に大きなバラツキが生じた。これは、河道内における様々な物理環境を等しく網羅するよう調査箇所を選定しているためで、瀬淵等に代表される河川構造区分の違いが生息密度に多大な影響を及ぼしているものと考えられる。

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持つ。そのため、水量のみならず河床面の砂礫構成に対する依存性が高く、これが明瞭な選好性となって調査結果に現れたものと推察できる。現地状況からも、セグメントの異なる上下流域では水生生物の生息場として重要な河床表面付近の粒度分布が大きく異なっており (図-4)、浮石や沈石等で表現される礫間の空隙状況の違いが、底生魚の物理場に対する選好性に大きな影響を及ぼしていることは明らかである。翻せば、これは定量的観測が可能な物理環境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とも言える。

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、札内川上流域と中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う。

3.1 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、上流域に関しては、水深・流速に対する相関性が高く、中流域は粒径に対する相関性が突出して高いなど、セグメントの違いによって選好する物理指標には明瞭な違いが見られた。この理由として、上流域では底生魚が身を潜め得る程度の空隙は至る箇所に存在するが、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ことで、河床面が沈石状態にある箇所の水面域に占める割合が上昇す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した。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の程度を示す標準偏差 $\sqrt{d_{75}/d_{25}}$ および曲率半径 U'_c で表す。なお、(2)式に示すように、標準偏差と代表粒径の組み合わせは Fredle 指数とも呼ばれ、サケの産卵床評価では河床の空隙状況を表す指標として用いられる。

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

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

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/s²)、 d_* ：各通過重量百分率における粒径(m)である。

3. 2 データ棄却条件と正規化基準

解析に用いるデータは、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)を対象とし、捕獲数0と高水敷上の調査プロットを除き、さらにSmirnov-Grubbsの棄却検定を行い、有意水準1.0%(片側、1回)の有意点を超える捕獲数を記録した調査プロットを「外れ値」と判定し棄却する。既に述べたように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調査時期毎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、正規化した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、現地調査結果との比較から上下流域への適用性を検証するための数値解析モデルを構築する。

4. 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 ver4.0¹⁾」を用いた。本モデルの詳細については文献²⁾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)の空間分布をそれぞれ求め、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

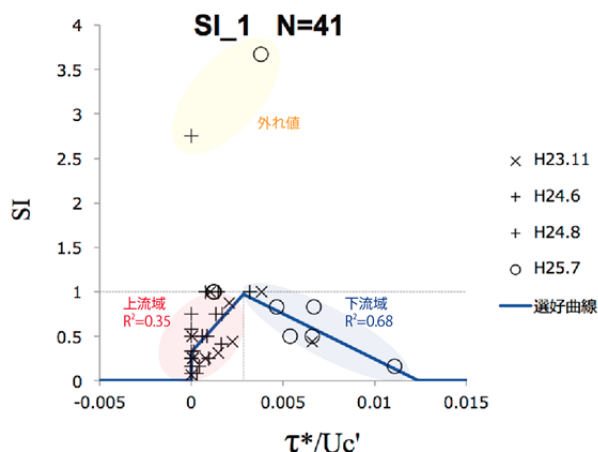


図-5 基準化後の選好曲線 (説明変数： τ_*/U_c')

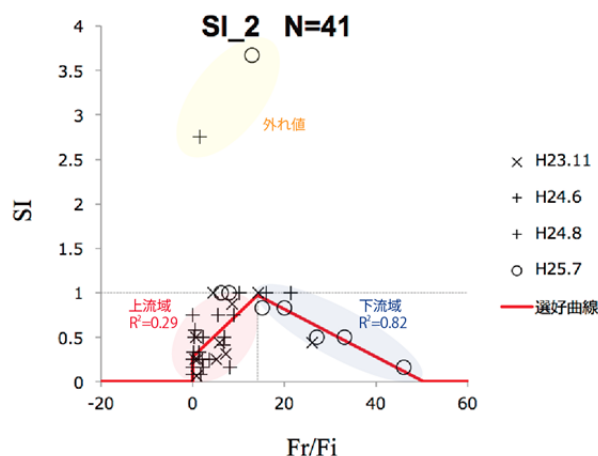


図-6 基準化後の選好曲線 (説明変数： Fr/Fi)

はある粒度分布を持って存在するため、この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ることで総流砂量および河床変動量が算出できる。また、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が再現される。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(m²/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。

3. 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、中流域：KP19.0 ~ 20.4) 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、中流域には 2013 年の LP 測量データ (北海道開発局提供) を用いる。初期粒度分布は、各年の河床材料調査結果の平均値を与え (図-7)、粗度係数はこの粒度分布から得られた代表粒径 d_{60} をもとに、Manning-Strickler 式から上流域： $n=0.031$ 、中流域： $n=0.029$ とした。流量は、両区間における平水流量規模 (上流域： $20 \text{ m}^3/\text{s}$ 、下流域： $40 \text{ m}^3/\text{s}$) を定常流で与え、当該流量条件下におけるハナカジカの生息環境を面的に評価する。

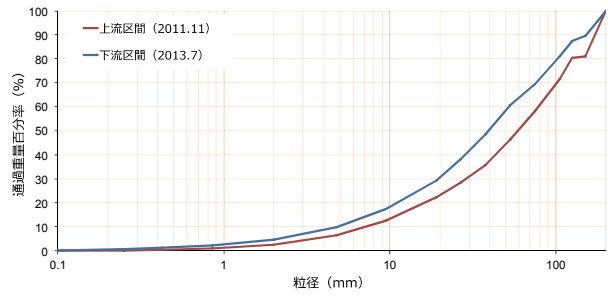


図-7 上下流区間の平均粒度分布 (初期粒度分布：計算入力値)

本研究では、初期粒度分布として両区間の河床材料調査結果の平均値を与え、平水流量規模を定常流で一定時間通水した際の平衡状態をもとに、両区間における粒度分布特性の空間分布を推定することとした。しかし、現地の粒度分布は、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、その流量規模や継続時間、または定常・非定常の違いによっても河床材料の状態は大きく異なるものと思われる。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その再現性を検証するが、今後、粒度分布特性を指標とした生態系評価の精度向上には、この点は重要且つ大きな課題である。

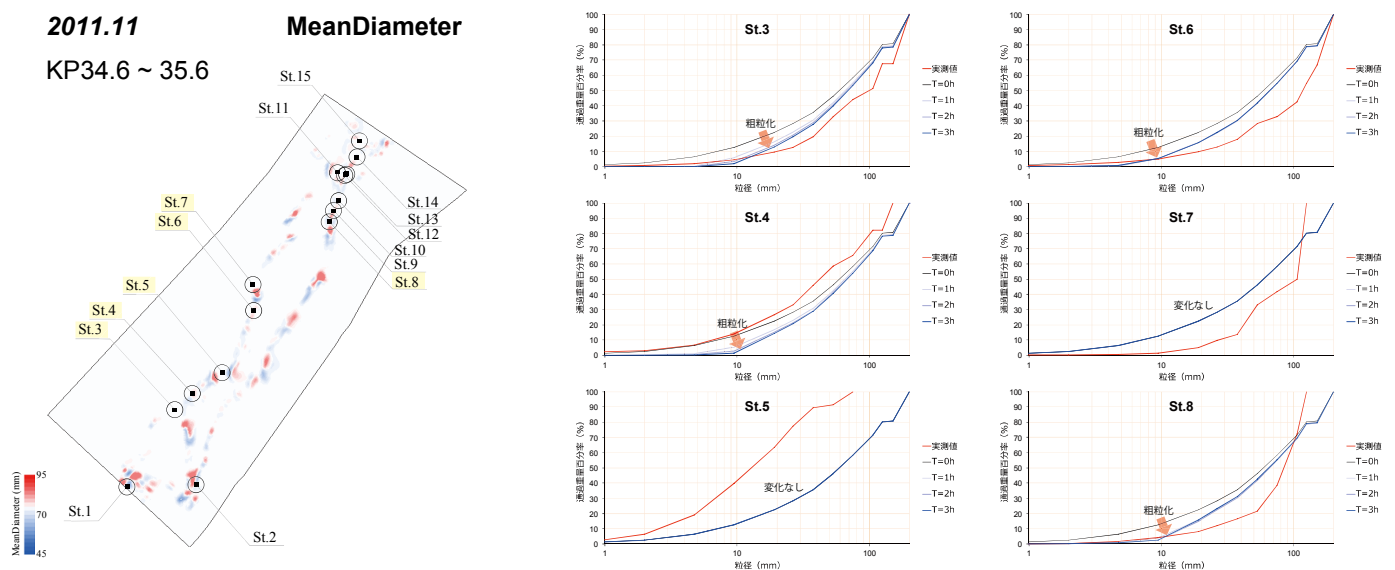


図-8 上流区間：粒度分布の解析値と実測値 (KP34.6 ~ 35.6、 $L=1.0 \text{ km}$ 、 $Q=20 \text{ m}^3/\text{s}$ 、3h 通水後)

3. 3 計算結果（粒度分布）

図-8 に上流域（KP34.6～35.6）の粒度分布の解析結果を、図-9 に中流域（KP19.0～20.4）の粒度分布の解析結果を示す。両区間の解析では、ともに概ね通水3時間程度で平衡状態に達したと判断されたため、経過時間 $T=3h$ の結果をもとに以下評価を行うものとする。

図中左のコンター図は中央粒径 d_m の面的な変化量を示しており、暖色は粗粒化傾向、寒色は細粒化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 の上流域の結果を見ると、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 では初期粒度分布からほとんど変化しておらず、特に St.5 に関しては現地調査結果とは全く異なる粒度分布となった。これは前節で述べたように、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、現地で細粒化の傾向が現れるような低流速領域では特に変化が現れ難いためであると考えられる。

次に、図-9 の中流域の結果を見ると、St.5、St.7 では上流域と同様に粗粒化の傾向が見られ、現地調査結果へと漸近している。St.9、St.10 を見ると、これとは逆に細粒化の傾向が見られ、特に St.9 に関しては調査結果とは逆の方向

へと変化している。中央粒径の平面図を見ると、St.9 の直上流側で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 に流入したためであると考えられる。

以上、粒度分布特性の再現性に関しては、既に述べたように多くの課題は残されているが、現地調査結果をもとにした場の平均的な粒度分布を初期値として与えることで、ある程度は妥当性のある粒度分布曲線とその空間分布を推定することは可能であると思われる。

3. 4 計算結果（選好度の空間分布）

以上で求めた2種類の選好曲線(1)、(2)式と、前節に示した粒度分布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、現地調査結果との比較から上下流区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 に中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 / Fi) 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 の方ではほぼ全ての調査プロットで高い整合性を持つことがわかる。また、SI-2 は SI-1 に比べて空間を連続的に評価できることがわかる。また、この傾向は中流域に関しても共通し、SI-2 の方がより高い整合性を示していることから、フルード数を Fredle 指数で除した指標 (SI-2) により、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。

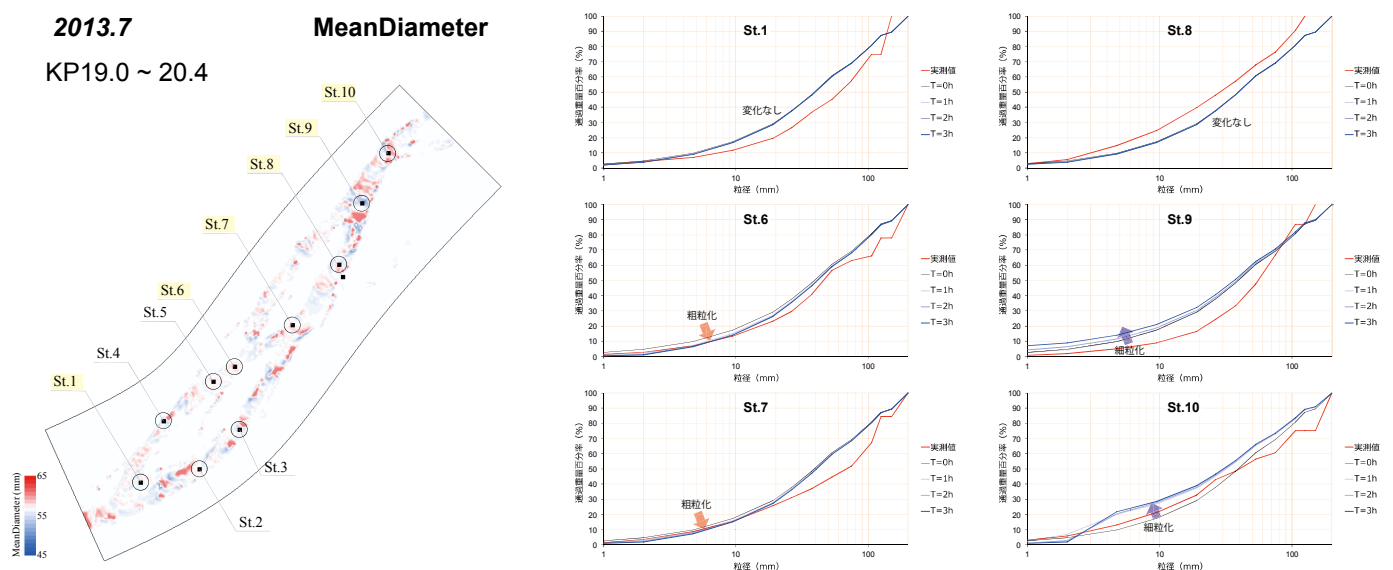


図-9 下流区間：粒度分布の解析値と実測値 (KP19.0～20.4、L=1.4km、Q=40m³/s、3h 通水後)

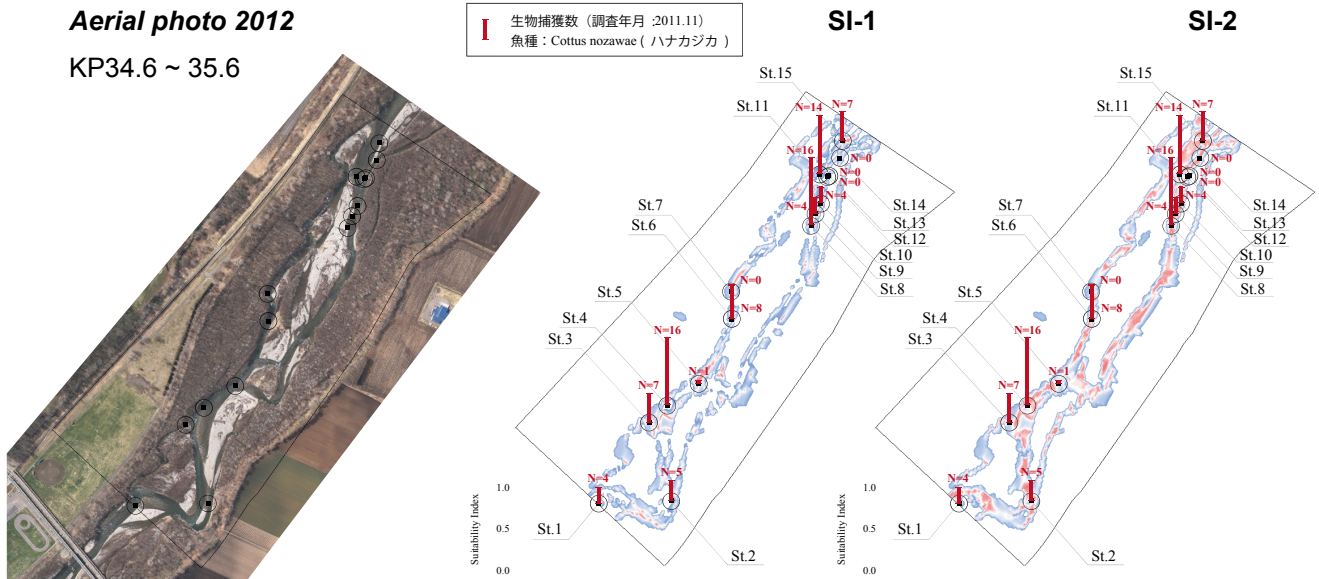


図-10 上流区間：ハナカジカの生息適地評価と実際の捕獲数 (KP34.6~35.6、L=1.0km、Q=20m³/s、3h 通水後)

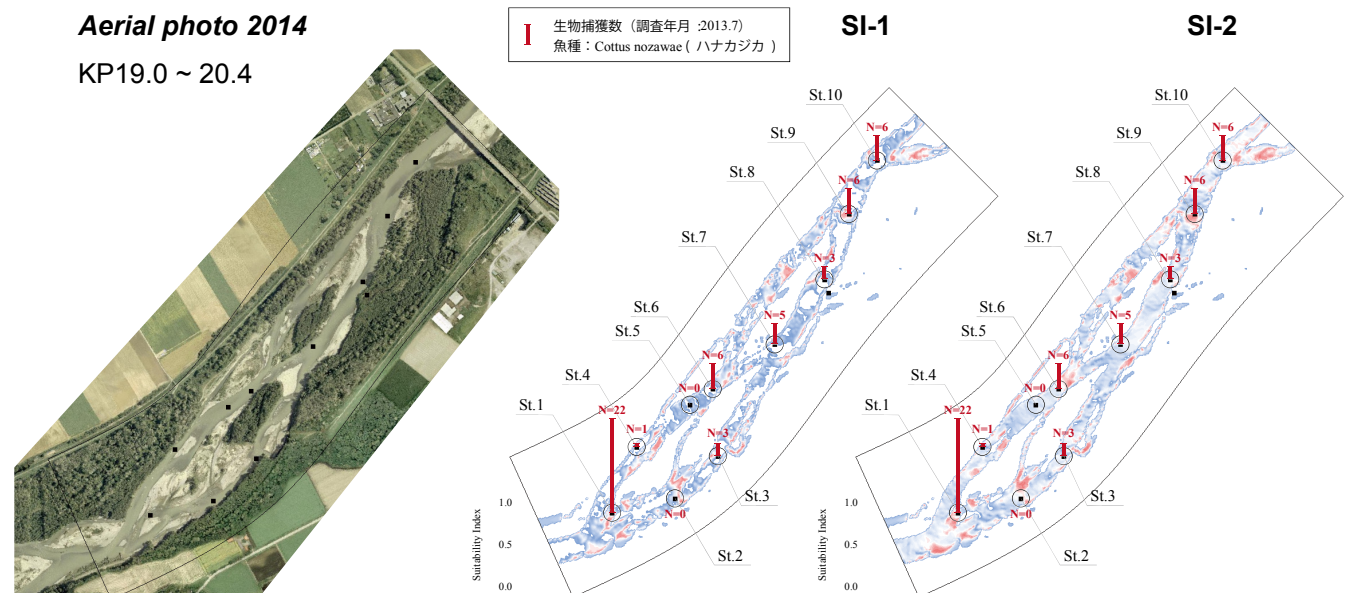


図-11 下流区間：ハナカジカの生息適地評価と実際の捕獲数 (KP19.0~20.4、L=1.4km、Q=40m³/s、3h 通水後)

5. まとめ

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、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变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、ある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) 北海道河川財団：iRIC, <http://i-ric.org/ja/>
- 2) 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，第 47 巻，pp.643-648，2003.
- 3) 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.
- 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，北海道大学水産学部研究彙報，26(1)，pp.31-37，1975.

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 : ITO Akashi

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