

河川中流部における魚類の生息分布と その評価法について

-荒川水系小畔川を例にして-

HABITAT DISTRIBUTION AND ESTIMATION FOR FISH IN MID-RIVER -APPLICATION TO THE KOAZE-RIVER-

庄司 崇¹・福井 吉孝²・青木 宗之³
Takashi SHOJI, Yoshitaka FUKUI, Muneyuku AOKI

¹学生会員 東洋大学大学院 工学研究科土木工学専攻 (〒350-8585 埼玉県川越市鯨井 2100)

²正会員 工博 東洋大学 工学部 環境建設学科教授 (〒350-8585 埼玉県川越市鯨井 2100)

³学生会員 東洋大学大学院 工学研究科土木工学専攻 (〒350-8585 埼玉県川越市鯨井 2100)

The Phabsim System has been criticized for the theoretical foundation by many researchers. But because this system is consisted of simple equations, it is used as estimation technique of fresh-water fish habitat. Therefore in this paper Phabsim System improved by authors is used for the estimation of a fresh-water fish habitat in Koaze River. In the improved system, the idea of the Gaussian function for the suitability criteria (HSC) is adopted. To calculate the water flow phenomenon, a 2-D shallow water equation is employed. For the numerical approach, the FEM(finite element method) is used. For the spatial discretization, the Galerkin finite element procedure is applied. At first water depth, velocity is computed. Next, the fresh-water fish habitat by Phabsim system is evaluated by using the result of FEM and data on sight. From the comparison between the results of computation and the real distribution of habitat, it is clear that this analysis is available for the estimation of fresh-water fish habitat.

Key Words : *Phabsim System, Fresh-Water Fish Habitat, Habitat Suitability Crirteria, Finite Element Method*

1. はじめに

近年川の果たす機能として、治水・利水のみならず河川環境も河川の計画の際に考慮に入れなければならない項目となっている。本研究の対象河川である荒川水系小畔川流域の住民に対して行ったアンケートでも、生活雑排水対策に力を入れる、過去に生息していた河川生物を呼び戻す等の要望があがっている。一方埼玉県¹⁾は、今後更に進む流域の市街化を見据え、汚濁負荷の一層の削減を図り、魚釣りや水辺での遊びが楽しめる澄んだ流れを持つ川造りを目標とし、そのために河川の自浄能力、親水性、景観の保全を図って河川を整備する施策を打ち出している。それらの施策が実行されたなら、安定した流量の維持と共に、ウグイ、メダカなどの魚類が生息する環境の保全・再生が実現する。そのような生息環境を実現させるためには、河川の現況を把握しておく必要がある。そこで本研究は小畔川中流部の現況の把握に努めると共に、どのような魚がどのようなところに生息可能かを予測する手法、つまり生息場評価法を提案する。

2. 本研究のねらい

生息場評価手法の一つである Phabsim System (物理環境シミュレーションシステム) では、水深、流速、河床材料等の河川特性をそれぞれ独立変数とし、適正基準値(HSC)を与え、それらを乗じて重み付き利用可能面積(WUA)を求めている。この方法は、算定に用いる各項の物理的意義、選定理由等に対しての明確な裏づけに欠けるという指摘を受けている。しかし、簡便な手法であるという利点もあり、本研究ではその利点を考慮し、解析に使用する。多くの研究者達は Phabsim System の最重要部分である生息場適性基準(HSC)の作成方法、評価方法の研究に力を入れている。本研究においてもこの部分を重要視し、先ず中村²⁾によって提唱された第一種適性基準(HSC1)を用いて評価を行なった。その後精度を高めるため、改良を加え現地調査に基づいた第三種生息場適性基準(HSC3)を作成して、Phabsim System の出力値である重み付き利用可能面積(WUA)を算出した。本論文は、この改良した手法の有効性を示す事を狙いとしている。

3. 対象河川概要及び調査

(1)対象河川概要

本研究で扱う小畔川は、埼玉県西部を流れる中規模の河川で越辺川と合流して直ぐ入間川に合流する。水源は同じく埼玉県に位置する宮沢湖で、河川延長 14.14km、河床勾配 1/750～1/170 であり流域面積は上流部 37.4km²、下流 9.2km²である。
小畔川では、昭和 53 年代から多自然型河川改修が行なわれ、流域では、様々な工法による施工例を見る事ができる。現在、上流部の改修が進められている。

(2)現地調査

a)魚類について

魚類の捕獲、水理量、河道状況を調査するにあたり、

小畔川の下流部の精進場橋下流 100m と上流 200m の約 300m 区間を調査対象とした。調査地点は、図-1 に示す通り下流域から A,B,・・・O の 15 測点としている。また、調査方法は石川、中村ら³⁾の方法を参考にして行なった。
本調査では、対象河川である小畔川において魚類の個体数を調査する為に、捕獲道具は投網を用いた。捕獲は小畔川に精通している経験者に依頼をし、広範囲に渡り生息している魚を捕獲し、魚種毎に捕獲場所と捕獲数を記録した。表-1 の結果からオイカワ(*Zacco platypus*)が最も高い個体数を占めており、次いでウグイ(*Tribolodon hakonensis*)となっている。なお、調査は魚の動きの活発な時期、即ち 2002 年 5 月 14 日、2003 年 7 月 2 日、9 月 10 の 3 回行なった。また、天候は全て晴れである。なお、冬季にも調査を行なったが投網にかかったのは合計 0 匹であった。

表-1 小畔川における魚種毎の魚類捕獲調査結果一覧
(α：オイカワ、β：ウグイ、γ：ニゴイ、δ：モツゴ、ε：アユ、ζ：カマツカ、η：コイ)

年/月/日	2002/5/14				2003/7/2						2003/9/10					
Pt/魚種	α	β	γ	δ	α	β	γ	δ	ε	ζ	α	β	γ	δ	ζ	η
A	27	1	0	0	22	30	12	0	0	0	12	0	0	0	4	0
B	10	1	0	0	24	3	20	0	0	0	1	0	0	0	3	0
C	0	4	3	0	14	13	20	0	0	0	3	0	0	0	2	0
D	4	0	0	0	12	1	0	0	0	1	4	1	0	0	0	0
E	27	0	0	0	11	0	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0
F	8	0	0	0	11	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
G	5	0	0	0	7	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
H	5	0	0	0	11	0	1	0	0	0	22	7	6	0	4	0
I	0	0	0	0	4	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
J	0	1	2	0	12	0	1	0	0	0	10	1	0	0	0	0
K	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	20	6	4	0	3	0
L	13	1	0	0	3	1	0	0	1	0	10	0	5	2	4	0
M	5	0	0	1	2	1	0	0	0	0	27	5	0	0	0	0
N	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	11	0	0	0	0	0
O	32	4	0	0	8	2	16	1	0	3	26	5	6	0	0	0
合計	137	13	5	1	144	54	79	1	1	4	146	25	21	2	21	1

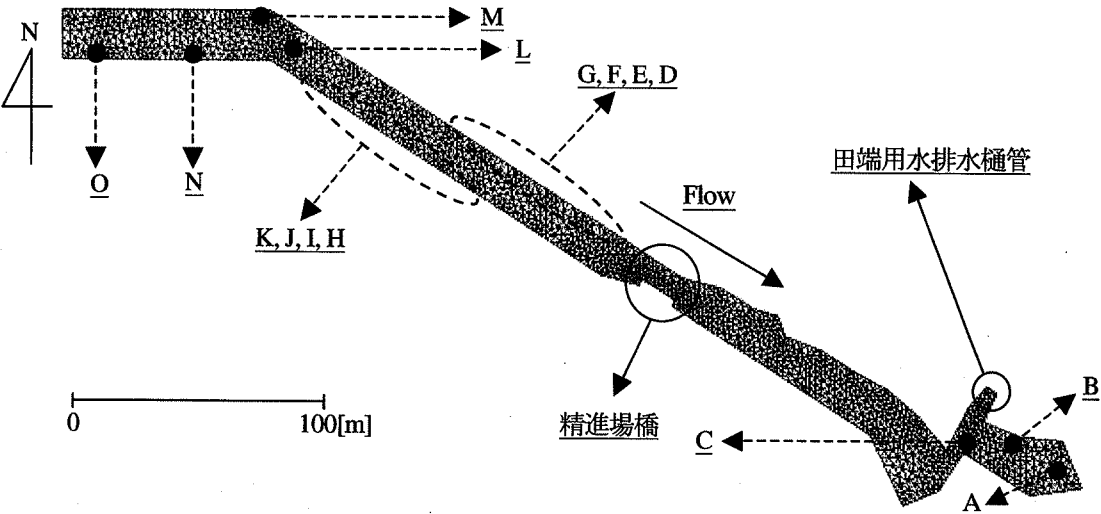


図-1 小畔川における現地調査ポイント概要図

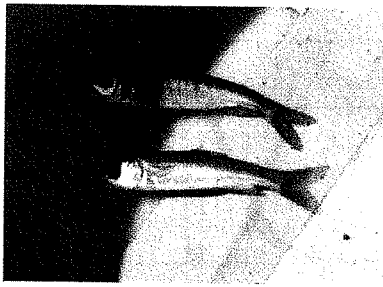


図-2 小畔川で生息が確認されたオイカワ(上), ウグイ(下)

小畔川は比較的水深が浅く、形状も単純な河川である。河岸は、コンクリートで護岸改修をしている部分もあるが、ほとんどがマコモのような水生植物が繁殖した河岸である。調査に用いた投網は半径1.80m、目の粗さ7.0×7.0mm、打ち込み時の最大面積は10.174m²である。この投網で捕獲した魚類の年度毎の結果(魚類の個体数)を表-1と図-3,4に示す。いずれの調査結果も魚の体長は50.0mm以上のものを捕獲対象とした。また本調査の結果から、1)総個体数の多かった魚種である。2)比較的住み分けがはっきりしている。3)指標生物と指定されている魚種である。以上1)~3)の理由からオイカワとウグイの2種を本研究の対象魚として選出した。その対象魚であるオイカワとウグイを図-2に示す。

b) 水理量について

本調査での調査項目は河岸の状況、流速、水深、河床材料、魚類の個体数である。測定した項目は魚類の特性を表現する為のデータとして記録した。測定方法は図-1に示したポイントA~Oに関して下流から上流へ向かい、河川横断面を左岸から2.0m間隔で測定した。

流速には2次元電磁流速計、水深には箱尺を使用した。また、河床材料は簡単な粒度分布試験から平均粒径D₅₀を使用した。その結果、D₅₀を総測点に対して平均したところD₅₀=11.80mmとなり、対象区間内では中礫が大部分を占める結果が得られた。

4. Phabsim Systemによる解析

(1) 水理量解析(有限要素法)

a) 基礎方程式

河川における流速、水深を求める為に2次元の浅水長波方程式を使用した。その基礎方程式を以下に示す。

$$\dot{u}_i + u_j u_{i,j} + g \eta_{,i} - \nu(u_{i,j} + u_{j,i})_{,j} + f u_i = 0 \quad (3)$$

$$\dot{\eta} + \{(h + \eta)u_{,j}\}_{,j} = 0 \quad (4)$$

ここに、式(3)は運動方程式、式(4)は連続式、 u_i :水平流速、 η :水位変動量、 h :平均水深、 g :重力加速度である。

b) 有限要素方程式

空間方向の離散化には Galerkin 法を使い、時間方向の離散化には2次精度である Crank-Nicolson 法を用いた。その結果導出された有限要素方程式を以下に示す。

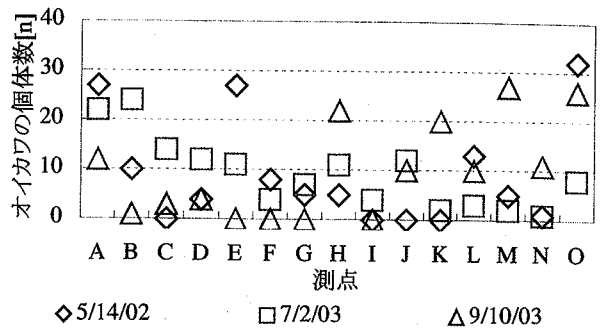


図-3 オイカワの調査年毎の個体数比較図

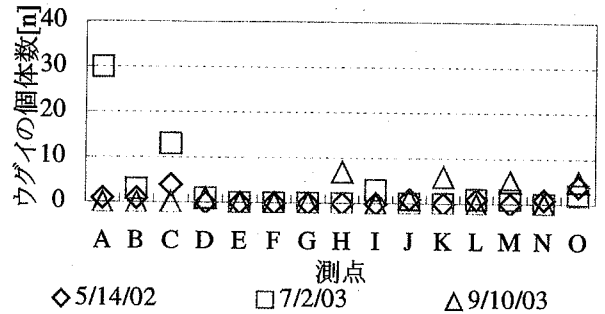


図-4 ウグイの調査年毎の個体数比較図

$$M\dot{u}_i + \bar{u}_j S_j u_i + g S_j \eta + \nu(H_{jj} u_i + H_{ji} u_j) + f M u_i = 0, \quad (5)$$

$$M\dot{\eta} + \bar{u}_i S_i h + \bar{u}_i S_i \eta + (\bar{h} + \bar{\eta}) S_i u_i = 0, \quad (6)$$

$$M = \int_{\Omega} \Phi_{\alpha} \Phi_{\beta} d\Omega, \quad S_i = \int_{\Omega} \Phi_{\alpha} \Phi_{\beta,i} d\Omega,$$

$$S_j = \int_{\Omega} \Phi_{\alpha} \Phi_{\beta,j} d\Omega, \quad H_{ii} = \int_{\Omega} \Phi_{\alpha,i} \Phi_{\beta,i} d\Omega,$$

$$H_{ij} = \int_{\Omega} \Phi_{\alpha,i} \Phi_{\beta,j} d\Omega, \quad H_{jj} = \int_{\Omega} \Phi_{\alpha,j} \Phi_{\beta,j} d\Omega.$$

(5), (6)式を解いてメッシュ毎の水深、流速が得られる。

(2) 魚類生息場評価(Phabsim System)

流量 Q における対象種 s に対する重み付き利用可能面積 $WUA_{Q,s}$ は

$$WUA_{Q,s} = \sum_{i=1}^n (A_{i,Q})(CSI_{i,Q,s}) \quad (7)$$

ここに、 $A_{i,Q}$: 流量 Q のときの要素 i における水表面積、 $CSI_{i,Q,s}$: 流量 Q の時の対象種 s に対する要素 i における合成適性値を表す。

$$CSI = (SI_d)(SI_v)(SI_{ci}) \quad (8)$$

ここに、 SI_d : 各要素の水深に関する適性値、 SI_v : 各要素の流速に関する適性値、 SI_{ci} : 河道指標(河床材料)に関する適性値を表す。

(3) 生息場適性基準(HSC)

Phabsim Systemにおいて、魚類の生息場を評価する為にはまず十分に魚の特性を把握しておく必要がある。その特性とは水理量に対して解析対象となる魚の適性値を定める事²³⁾に始まる。その適性値とは、ここでは

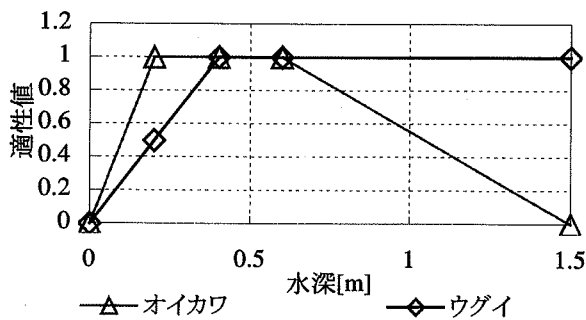


図-5 水深に対する既往の第一種生息場適性基準(HSC1)

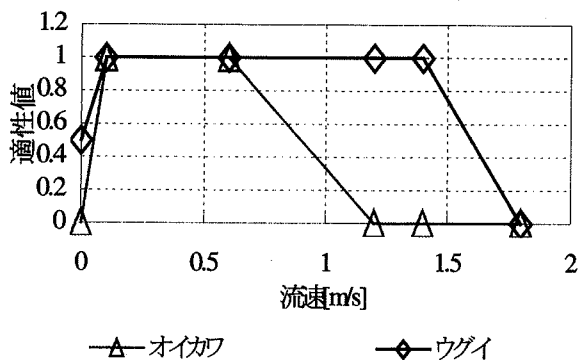


図-6 流速に対する既往の第一種生息場適性基準(HSC1)

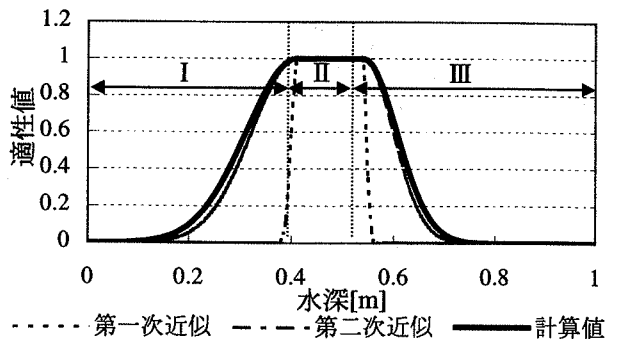


図-7 パラメータ変化に対する適性値の応答例

表-2 解析に使用した流速, 水深に対するパラメータ

parameter	Water Depth		Velocity	
	C_{d1}	C_{dIII}	C_{vI}	C_{vIII}
ウグイ	0.01108	0.01026	0.24571	0.14492
オイカワ	0.35020	1.25115	0.36308	0.00021

$$\begin{aligned}
 f(d)_I &= \exp[-C_{d1} \cdot (d - \mu_1)^2] & \text{at } 0.0 \leq d < \mu_1 & \quad (9) \\
 f(d)_{II} &= 1.0 & \text{at } \mu_1 \leq d \leq \mu_{III} & \quad (10) \\
 f(d)_{III} &= \exp[-C_{dIII} \cdot (d - \mu_{III})^2] & \text{at } \mu_{III} < d \leq 1.0 & \quad (11) \\
 f(v)_I &= \exp[-C_{vI} \cdot (v - \mu_1)^2] & \text{at } 0.0 \leq v < \mu_1 & \quad (12) \\
 f(v)_{II} &= 1.0 & \text{at } \mu_1 \leq v \leq \mu_{III} & \quad (13) \\
 f(v)_{III} &= \exp[-C_{vIII} \cdot (v - \mu_{III})^2] & \text{at } \mu_{III} < v \leq 1.8 & \quad (14)
 \end{aligned}$$

(8)式におけるSIである。生息場適正基準(HSC)には、第一種から第三種までの基準があり、以下にそれらの概略を示す。

a) 第一種適正基準(HSC1)

文献あるいは専門家の意見に基づき作成された基準。

b) 第二種適正基準(HSC2)

河川内で観察された魚類の(利用)頻度分布に基づいて作成された基準。

c) 第三種適正基準(HSC3)

環境的な偏りに対する補正を行なった頻度分布に基づいて作成された基準。

これより以下は、第一種から第三種までの適正基準をHSC1, HSC2, HSC3と書く事とする。参考の為に中村¹⁾らの研究から一般化されたHSC1を図-5, 6に示す。また、本解析において従来のHSCが小畔川で適用可能か否かを判断し、改善する必要があると十分な検討のうえで新たなHSCを作成する。そこで、現地調査から得られた各水理量、魚類の個体数が判断の基準となる。

中村²⁾のHSC1では魚の特性を直線で表現している。実用上、直線で表現する事が出来れば非常に簡便であるが、常にこの様な表現が高精度の結果を生むとは限らない。また、HSC1で使用する適性値1の範囲は常に対象河川に対応できるとは限らない。そこで、新たにHSCを作成する為に、Gauss関数を変形した(9)から(14)式を使用しGore⁴⁾らの考えを参考にしてHSC3を作成した。以下にその変形した式を示す。図-7はその適用例を示すものである。

ここに、 $f(d), f(v)$ ：水深、流速に対する適性値、 C ：定数、 μ ：水深、流速に対する適正範囲の最大、最小値である。添え字I, II, IIIは領域I, II, IIIを表現する。これら(9)~(14)式を使用し、汎用的なHSC3を作成する簡単なアルゴリズムを提案した。以下にそのアルゴリズムを示す。また、計算されたパラメータを表-2に示す。

1. 最適領域(II)の決定。(捕獲された個体数が最も多かった地点での数の80%以上であれば、適性値 $SI=1.0$ を与える)。
2. 最適領域以外(I, III)では、個体数と水理量(水深、流速)の関係をGauss関数を援用して、最小二乗法によって求める。(第一次近似)なお、関数 $f(d)$ と $f(v)$ に関して、Gauss関数の変曲点を求めておく。
3. I, III領域の水深、流速、および適性値に対する平均値を求め、それらの交点を新たな近似曲線の変曲点と定める。(第二次近似)
4. 現地調査から得たオイカワとウグイの総個体数の比(ratio)を求める。
5. 第二次近似で得られた $C_{d1}, C_{dIII}, C_{vI}, C_{vIII}$ を用いてI, II, III領域に対する(9)~(14)式の演算を行なう。
6. 関数 $f(d), f(v)$ から計算されたWUAがratioに対して収束するかどうか行なう。
7. 誤差基準を $(e = |ratio - WUA|)$ と定め、 $e < \varepsilon$ となれば計算終了。その他ならば、 $C^{(i)} = C^{(i-1)} - \Delta p$ (Δp ：勾配増分量)とし、再度5から収束計算を行なう。なお、 $\varepsilon = 1E-03$ とする。

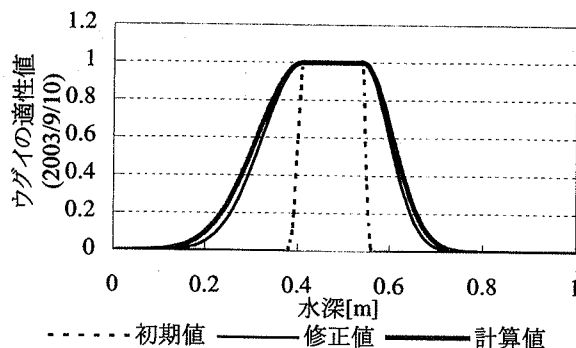


図-8 水深に対するウグイの生息場適性基準(HSC3)

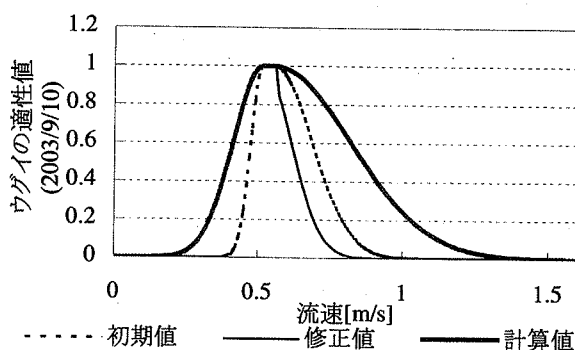


図-9 流速に対するウグイの生息場適性基準(HSC3)

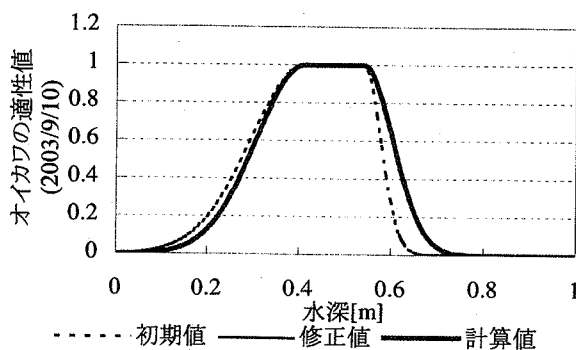


図-10 水深に対するオイカワの生息場適性基準(HSC3)

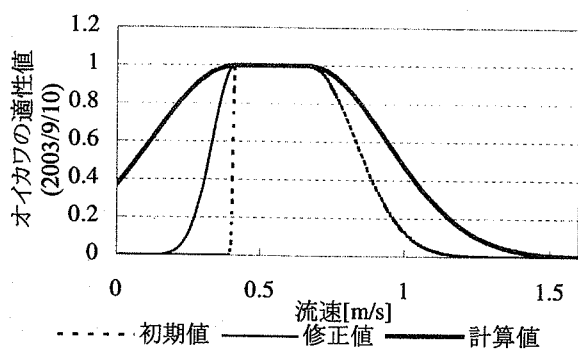


図-11 流速に対するオイカワの生息場適性基準(HSC3)

現地調査の結果から、河床材料について簡単な粒度分布試験を行なった結果、図-12 のように平均粒径 D_{50} が 11.80mm となり瀬を構成する様な中礫の存在が判る。この結果より、河床状態に対する適性値は、対象区間内において1として与えた。なお、河道を概観するとこの対象区間は、淀みや淵はあまり見られなかった。

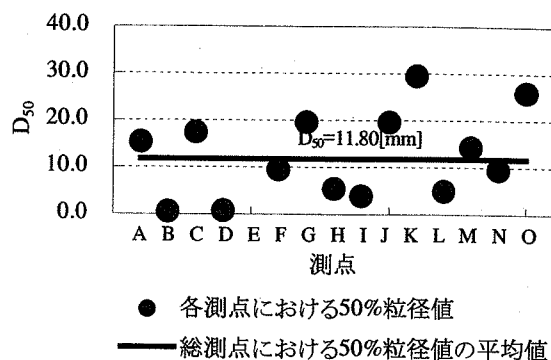


図-12 対象区間内における縦断方向河床材料分布

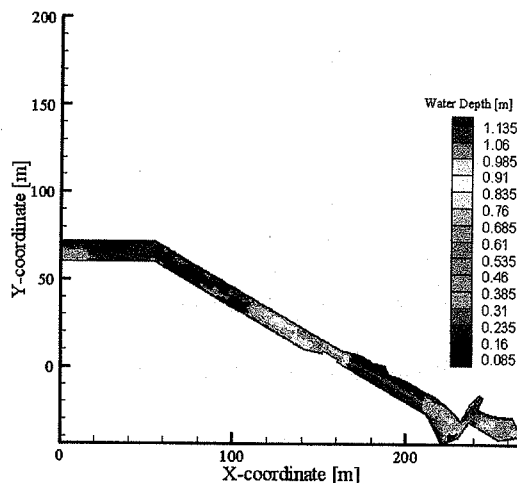


図-13 小畔川水深分布図(対象区間: 約 300m)

5. 数値解析例

本研究では、水利計算を行なう為に対象河川である小畔川についてデローニ三角形分割法を用いた。そして、対象区間内を有限要素メッシュに分割した。総節点数は 1596、総要素数は 2652 である。要素分割をする際に、対象魚の個体に対して評価が過大になり過ぎないように須藤、道上⁵⁾の考えに基づき、三角形要素の面積は平均で 1.2 m^2 と設定している。また、現地調査の結果から対象区間の水深分布を図-13 のように示す。①流入口の川幅は 11.897m、②田端用水排水樋管での水路幅は 3.138m である。また、Phabsim System 適用区間は約 300m としている。また、魚類の生息場評価を行なう際には、図-5, 6、図-8~11 に示すようなオイカワとウグイの HSC3 を用いた。

6. 結果・考察

(1) 各流量についてのオイカワとウグイの WUA 比較

小畔川の正常流量は 0.5 m^3/s である。そこで図-14 から正常流量時のオイカワとウグイの WUA を比較したところ、オイカワは WUA=27.0%、ウグイは WUA=4.0% を示した。HSC3 作成の計算終了条件をオイカワの総個体数とウグイの総個体数の比として計算した結果、個体数調査結果で得られたオイカワとウグイの個体数

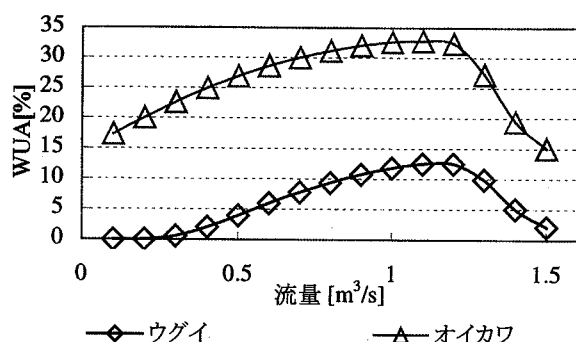


図-14 各流量に対するオイカワとウグイのWUAの評価

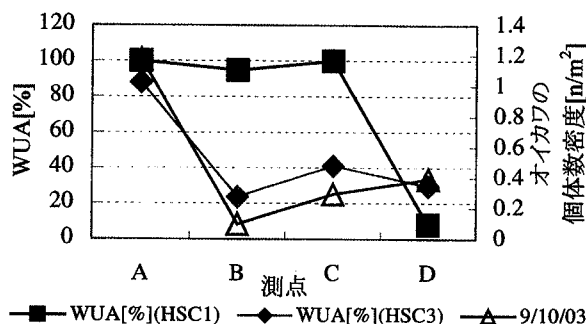


図-15 最大投網面積におけるWUA[m²]-個体数密度関係図(測点A-D, 対象魚:オイカワ)

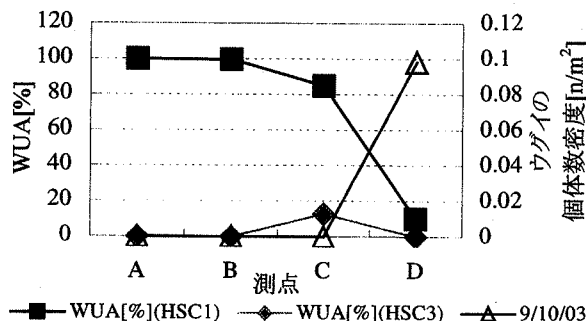


図-16 最大投網面積におけるWUA[m²]-個体数密度関係図(測点A-D, 対象魚:ウグイ)

の比率とほぼ同様の値を得ることが出来た。また、常にオイカワのWUAがウグイを上回るという傾向は計算結果からも見る事が出来た。また、オイカワは流量1.1m³/s時に最大WUA=32.8%をとる。それに対して、ウグイは流量1.2m³/sに最大WUA=12.5%を示した。この結果からも魚種によってWUA曲線の極値が異なる。つまり魚種毎に生息環境は大きく違う事が判る。

(2) Biomass (生物個体数) の検証及び計算アルゴリズムの妥当性

魚の個体数を現実的に考える為、そして提案した計算アルゴリズムに沿って算出したHSC3の妥当性を評価する為に Mathur⁶⁾らの考えに基づき、最大投網面積に対するWUA計算値と、最大投網面積に対する個体数

を算出し、その関係図を作成した。図-15, 16はオイカワとウグイのHSC1, HSC3を使用したWUA計算値と各対象魚の個体数密度の結果である。HSC3を作成する条件として、2003年9月10日に捕獲された対象魚の個体数比で収束させたところHSC1使用時よりHSC3使用時のほうが強い相関を持つ結果を得た。しかし、ウグイに関して見るとサンプル数の少なさからかオイカワほどの強い相関は得られなかった。

7. まとめ

Phabsim Systemの適用により小畔川における魚類の実態の一部を明らかに出来た。今後は、より正確なHSCの作成とともに評価値を具体的な個体数に結び付けていく必要がある。

謝辞：本研究は、宇野州行、星貴志両君(当時東洋大学学生)の多大な助力によって遂行することができた。また現地での魚類の生息実態調査には安斉巖氏(川越市在住)に協力を仰いだ。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 埼玉県：地域(水域)別プラン、埼玉県ホームページ <http://www.pref.saitama.jp/A09/BG00/webplan/10koaze.pdf>, 2004/02/27
- 2) アメリカ合衆国内務省・国立生物研究所(テリーフドゥル・中村俊六訳): IFIM 入門, 財団法人リバーフロントセンター, 1999.
- 3) 石川雅朗, 中村俊六, 築坂正美, 東信行, 中村緩朗: 河川における魚類生息場評価(IFIM適用)のための基礎調査, 木更津工業専門学校紀要, 第29号, pp22-32, 1996.
- 4) James A. Gore and Robert D. Judy Jr.: Predictive Models of Benthic Macroinvertebrate Density for Use in Instream Flow Studies and Regulated Flow Management, Can. J. Fish. Aquat. Sci., Vol.38, pp1363-1370, 1981.
- 5) 須藤達美, 永瀬恭一, 道上正規: PHABSIMを用いた淡水魚類生息場評価に関するケーススタディ, 水工学論文集, 第44巻, pp1203-1208, 2000.
- 6) Dilip Mathur, William H. Bason, Edmund J. Purdy, Jr. and Carl A. Silver: A critique of the Instream Flow Incremental Methodology, Can. J. Fish Aquat. Sci., Vol.42, pp825-830, 1985.
- 7) James A. Gore and Jhon M. Nestler: Instream Flow Studies In Perspective, Regulated Rivers, Research and Management, Vol2,, 93-101, 1998..
- 8) 砂田憲吾, 熊木朋子, 川村和也: 河川の流況特性による魚類の生息適性のマクロな評価に関する検討, 水工学論文集, 第47巻, pp1123-1128, 2003.
- 9) 砂田憲吾, 川村和也: 河道の物理的多様性と生息魚類の多様性に関する基礎的研究, 河川技術論文集, 第9巻, pp415-420, 2003.
- 10) 佐々木学, 知花武佳, 辻本哲郎: 砂水際に形成される生息場の物理特性に関する研究, 河川技術論文集, 第9巻, pp469-474, 2003.
- 11) 知花武佳, 玉井信行: 瀬一淵の質に着目した生息環境評価法の提案, 河川技術論文集, 第8巻, pp79-84, 2002.

(2004. 4. 7受付)