

潜在自然型河川における魚道評価へのIFIMの適用

Application of IFIM to Evaluation of Fishways in River-Restoration Projects

辻本哲郎¹・永禮 大²・堀川紀子³

Tetsuro TSUJIMOTO, Ohki NAGARE and Noriko HORIKAWA

1. はじめに

近年、河川管理、整備を治水・利水・環境（親水、生態環境保全）の3つの機能を等しく向上させるという立場で進めることを理念としつつある。これが持続的発展（sustainable development）のかなう唯一の方法で、これを成し遂げるひとつの方向性として潜在的自然河川という考え方¹⁾が新しい川づくりの概念としてクローズアップしてきたように思われる。すなわち河川がそれぞれの区間であるいは水系一貫して持つ固有の河川形態や生息環境、生態系（潜在的自然）を重要視しながら河川整備を行っていかうとするものである。魚類生息環境についてこうした考え方を適用すると、魚類も河川形態、河相に応じて生息しまた往来しているが、さまざまな横断構造物でそれが少なからず疎害されている。魚道はその改善策である。こうした観点での魚道はさまざまな魚種のさまざまな生態（たとえば必要な遡上行動、洪水後の帰還）にたいして有効でなければならない。本研究では、とくに魚道がさまざまな魚種にたいし、また流況に応じて（生態活動とのかかわりでの利用時期との関係）機能しているかどうかについて検討した。ここでは、従来実際にはもっと広い範囲での河道区間の生息環境評価に使われているIFIM²⁾（Instream Flow Incremental Methodology）を用いて、魚道設計を評価することを試みた。

2. 潜在自然型河川

河川環境管理・整備の理念は河川の多機能の確保とは言え、各機能の向上のための施策はトレードオフを生じることが多く、調和の取れた妥協（compromise）が重要であると考えられる。その中で多自然型川づくりが注目された。初期にあっては自然や自然に近い材料を用いた工法によるものであったのが、次第に自然の河川を意識した川づくり（自然の材料や過程を利用したり自然の生態を確保する）へと深化した。しかしながら、「自然」の指標が明確でなく、様々な問題を露呈した。たとえば自然が唯一残った山地河道または溪流景観（河相）の低平地河川での模倣や、本来種が貧相である扇状地河川で「種の多様性」をねらったビオトープの創造などは誤った「自然」である。山地河川、扇状地河川、沖積地河川などの河道区間それぞれ固有の勾配、河床材料、流速さらには植生と強い相関があり、また河道ユニット（淵と瀬、交互砂州など）で特徴づけられ固有の生息環境（habitat）を提供している。このように相関関係の均質な河道区間をここで「セグメント」と定義する。山本³⁾が用いたセグメントという表現はこれに近い概念であるがここではより細かく分類する。このようにセグメントごとに固有の相関関係が成立している状況にこそ河川の望ましい姿を見ることができる^{4)、5)}（宇多らによる利根川など⁶⁾の河道特性と植物群落の相関についての表などもこ

キーワード：魚類生息環境、魚道、生息環境水理学、河川水理学

¹ 金沢大学助教授 工学部土木建設工学科（〒920 金沢市小立野2-40-20）

² 金沢大学大学院修士課程 工学研究科土木建設工学専攻

³ （株）建設技術研究所 東京支社河川本部技術第三部

の例である）。玉井¹⁾はこれを「潜在型自然河川」と呼んでいる。現在、人為インパクトでこのセグメントに固有の相関関係が変質しているところが散見され、その改善がまず図られるべきだろう⁵⁾。

表1 セグメントの例（未完成）

セグメント	勾配	河床材料	河道形成単位	植生	魚類
溪流					イワナ・・・
山地河川					
河岸段丘形成河川					
扇状地河川 (1)	1/100-1/400	数cm-数10cm	交互砂州	ツルヨシ・・・	アユ・・・
扇状地河川 (2)	1/400-1/1000	数mm-数cm	交互砂州	ツルヨシ・・・	アユ・・・
沖積地河川	1/2000-				
感潮河川					

3. 魚類生息環境としてみた河川と魚道

魚類生息環境という観点から河川整備・管理を治水，利水，環境の3つの側面から見たのが表2である。魚道設計において基本的に配慮されるべきことがらである。

表2 魚類生息環境整備

洪水時の安全性	洪水時の生息環境の場と機能の保全
資源としての利用	水産資源の確保／魚類生息への水配分
環境機能の確保	親水機能（さかなのいる川，フィッシング）
	生態環境保全

多機能を持続的に保持していくうえで望まれる「潜在型自然河川」としての整備において，すなわちセグメントと生息魚類の相関を変質させないことが魚道設置の一つの意義である。魚道の設置の意義の最も重要なのはこの観点である。

河川環境の新しい概念のなかでは河川を「多様な生物の持続的生息環境」として捉えるが，これは人間の居住環境の快適さのみならず安全性にもかかわるものである。「持続的」というのは，それぞれの種の世代交代を確保することである。このなかで河川の縦断往來を確保する意味での魚道の必要性や種のあいだの共生を確保するため多様な種への対応が認識される。魚道の意義はその点にあり，そしてそれゆえ，もはや従来のように単一もしくは少数の種を対象とするものでない。

このように魚類生息環境を考えるうえで，さかなは下表のような要因で分類される。こうした分類によりさかなのそれぞれの生活・行動様式に生息場が想定できる。もともと，固有の河相にそれが具備されていて，そのため固有の種が生息したり，生活ステージの一部にそれを使っていた。

表3 さかなの分類要因

生活様式	習性による移動，食餌，産卵，休息，洪水時の避難その他
行動様式	遊泳，匍行
サイズ	体長，体高
形態（シルエット）	紡錘型
餌	植物 動物
遊泳能力	巡航速度，突進速度

魚類生息環境には2つの捉え方がある。1つはいくつかの生活様式の生息場が適宜組み合わせられた環境で，

もうひとつはそれぞれの生活様式に対する個別の生息場をさす場合である。個別の生息場の典型例は魚道で前者の意味での生息環境が堰などで分断されていて遡河、降河が妨げられているのを助けるパーツである。このような個々のパーツとしての生息環境の条件は水理条件、物理条件に対応付けをうまくできれば設計対象となりうる。

魚道を設計するときの第1の手順は、対象となる河川の河道特性と魚類生息調査である。たとえば図1は浅野川（石川県）の魚類調査結果⁷⁾を整理したもので、こうした表整理によってセグメント分割の重要性、河川横断構造物の生息環境分断性状が認められる。

次に対象魚種を選定するわけであるが、その条件としては、

- (1) その種の持続的生息において回遊（遡上・降下）を必要とするもの、
- (2) 水産資源確保対象種（必要な回遊）、
- (3) 対象とする構造物の位置がセグメント境界にある場合の上流のセグメントの種（洪水時に降下を余儀なくされたのを帰還させる）、
- (4) 対象とする構造物がセグメントを分断する場合、そのセグメント固有の種（セグメント内の行動範囲を狭めない）

をあげることができる（逆にその他の種は対象とされない）。いずれにせよ、多様な種を対象とせねばならず、この点が従来型の魚道の設計と大きく異なるポイントである。

生物学的には多様な種であっても、河川水理学との関連からすれば、生息環境（セグメント）による分類、回遊魚の降河、溯河、両側遊泳魚への区分（その時期の区分を含む）、ほかに遊泳魚、底生魚の区分、サイズでの区分（必要ならばシルエット）による分類となろう。さらに、それぞれに生息環境特性は異なろうが、魚道というむしろ緊急的な利用空間を現段階の水理制御で対応するならば、種として遊泳魚か底生魚かの区分とサイズによる区分でいまのところ充分であろう（表3参照）。言い方を換えれば、それに応じた代表種を対象魚と考えることが考えられる。

従来は対象魚種、サイズに対して経験的に推定された「突進速度」を越えない流速と「充分な」水深を対象流量（一般には低水時の少ない流量で設計される）に対して確保するように魚道が選定され、また設計される。魚類の形式はこれまで多く提案されてはいるが、とくに適切な流速は魚種、サイズに依存するので、従来の多くの形式では多様な種、サイズにわたって対応するのは難しい場合が多い。流量についても種によって魚道利用時期が異なるため、単に豊・平・低・渇水量のように超過確率で整理された流況でなく、365日の流量時系列（川の365日⁸⁾）で見るべきである⁹⁾。

多様な種や利用時期の相違を考慮した魚道を考えるには、魚道としての流路が多様な水理条件を同時に提供しなければならない。基本的には水深と流速の組み合わせの多様な流路が必要となる。

4. 魚道評価の方法論

生息場の評価の方法論としてIFIM（Instream Flow Incremental Methodology²⁾）が注目を浴びている。これを要約すると以下の通りである。まず、生息場を評価する指標、たとえば流速、水深、底質（cover）に対す

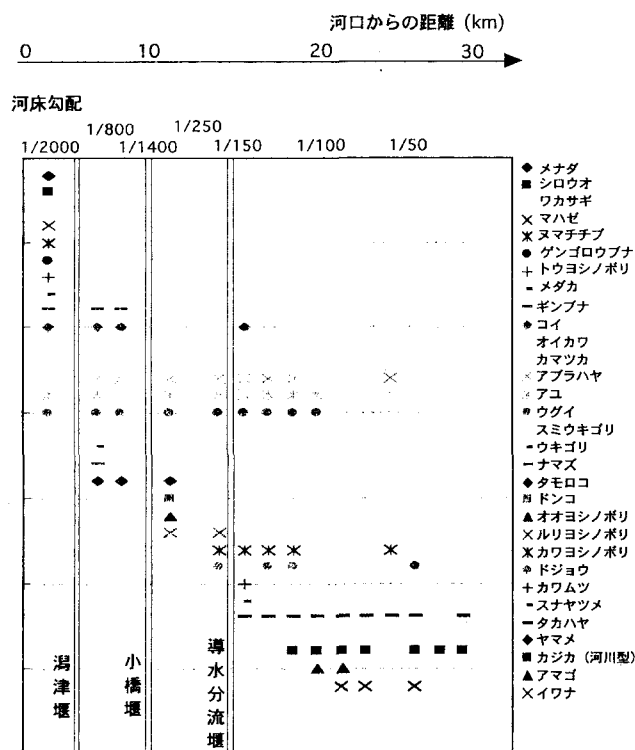


図1 浅野川の河道特性と魚類の生息

る生息場としての評価値（HSI: habitat suitability index, 0~1の値で評価される）の関数形を経験的にあるいは調査によって得る。いまこれを $\eta_j(\xi_j)$ で表す。ここで j は指標の種類、 ξ_j はその指標のとり値を表す。各指標から得られる評価の総合は簡単にしばしばその積によって表す。

対象とする河道区間において流量 Q が与えられれば（たとえば水理計算によって）河道区間の微小面積 ΔA_k の領域ごとに各指標の空間分布が知られ（ ξ_{jk} ），それに応じた評価値 η_{jk} が推定される。このとき、この河道全体の評価値 Ξ は次式で与えられる（原論文では式(1)の分母（河道総面積）で除してはず、評価値は面積の次元を持ちWUA: weighted usable areaと呼ばれる。ここでは総面積で除し、河道区間全体で0~1の値として評価されるように改めた）。 ξ_{jk} が流量 Q の関数であるから η_{jk} さらには Ξ も流量 Q の関数となる。

$$\Xi(Q) = \frac{\sum_k \left(\prod_j \eta_{jk} \right) \Delta A_k}{\sum_k \Delta A_k} \quad (1)$$

流量が変わることによって評価値がどう変化するかに着目しているのがIncremental Methodologyである。さらに流況（流量時系列）を評価値（あるいはWUA）の時系列に変換し、対象とする種について重要な時期において生息場評価値が高くなる状況を高く評価する。すなわちこの方法論で、生息場として適切に、しかも他の河川機能も考え併せて河道内流量を決めようとしているものと考えられる。

魚道は単一機能（主として遡河活動の扶助）のハビタートであるが、多様な種への対応から、こうした手法の応用が望まれる。とくに魚道は縦断方向に均質（ストリーム型はもちろん、プール型も通路として考えれば均質）で流水断面に着目して議論できる（魚道上下流の条件や途中の休息条件などはここでは考慮しない）。この場合の指標は水深と流速（簡単のため水深平均をとる）で、魚道内流れが解析されれば流量ごとに魚道の各レーン ΔB_k での流速 U_k 、水深 h_k が計算される。

一方、評価曲線 $\eta_u(U)$ 、 $\eta_h(h)$ はかならずしも habitat suitability indexでなく通路としての魚道（スムーズに通過させる）としての評価値（suitability index as fishway）曲線であるべきである。従来の経験などから $\eta_u(U)$ は魚の「突進速度」 U_e 及び「巡航速度」 U_N をパラメータとする曲線であり、 $\eta_h(h)$ は魚の体高をパラメータとしよう。図1にはそのイメージ図が描かれている。図中 α, β は定数である（ $0 < \alpha < 1, \beta > 1$ ）。魚の突進速度 U_e 、巡航速度 U_N とも体長 L_f と強い相関がありしており、また体高 H_f はシルエットが同じ種であれば体長と比例するので、評価曲線はいずれも体長をパラメータとするものと考えてよいだろう。

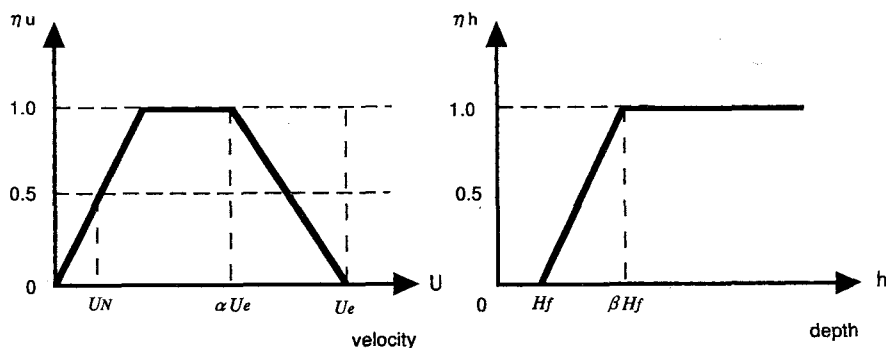


図2 最も簡単にモデル化された評価値曲線

これらが想定できれば、魚道の評価値 Ξ_f （0~1）～流量曲線が次式で計算される。

$$\Xi_f(Q) = \frac{\sum_k (\eta_{FUK} \cdot \eta_{Fhk}) \Delta B_k}{\sum_k \Delta B_k} \quad (2)$$

$\Xi_f(Q)$ が得られれば、流況 $Q(t)$ （ t : 時間）に応じて評価値の時系列 $\Xi_f(t)$ が描ける。魚道が機能を発揮することへの期待度 γ は時期（季節）によって異なり、これも0~1の値をとるように設定する（ $\gamma(t)$ ）。 $\gamma(t)$ の作成は種（生態的特徴）ごとに行なわれる。たとえば溯河・降河の必要な種についてはその時期に対応させて、溯河の場合、降河では小さい値でよいし、構造物でセグメントが分断された場合の上流側の種についてはかなり

高い値，遊泳領域の確保といった観点ではもう少し小さい値などとランク付けする．このとき，年間を通しての評価点 Φ は次の式で計算され，魚類の種・サイズごとに異なる．

$$\Phi = \frac{\int_0^T \Xi_f(Q) \cdot \gamma(t) dt}{\int_0^T \gamma(t) dt} \quad (3)$$

ここで T は1年間を表す．分母を T にしていらないのは期待される時期，期待される限度で降下を発揮する場合を基準（1.0）と考えるためである．

魚道の設計を変えれば（代替案ごとに） $\Xi_f \sim Q$ 曲線は変化し，魚類の種・サイズごとの評価点 Φ も変化する．それらの平均評価の高いものが魚道として評価が高いのか，それぞれの種に対する評価のばらつきの小さいものを高く評価すべきかについては今のところ判断基準が充分でなく，ここでは総合評価には言及しない．

5. 魚道の設計と評価の手順

これまで述べたように新しい考え方での魚道は断面内で多様な水理条件を提供する流路であることが必要である．ここでは水深が横断方向に変化する簡単な例として三角形断面の粗石付斜路を例に設計・評価の手順を述べる．この場合粗石の等価砂粗度 k_s と横断勾配 i_b を設計変数となる（図4参照）．

5. 1 魚道内の流れの解析

まず魚道内の流れを解析，与えられた流量に対して水深，流速流速の空間分布を知る必要がある．

簡単な粗石付き斜路と言えども複雑な粗石配置周りの流れを水理計算で推定することは難しい．写真1は福井県魚見川に設置されている粗石（直径25cm程度）付斜路（幅3.0m，長さ15m，縦・横断勾配1/15）式試験魚道で，一部のレーンで粗石をはずして速い・遅いをつけてある．こうした試験魚道で水理計測したものを単純化された水理計算と併用すればよいだろう．ここでの流路の水理計算についての基礎式は，

$$\rho g i_B V_s = \frac{1}{2} C_D \rho U_r^2 A_s + C_f \rho U^2 A_B + \frac{\Delta U_L}{\Delta B} \rho v_L A_{SL} + \frac{\Delta U_R}{\Delta B} \rho v_L A_{SR} \quad (4)$$

とした．ここに， i_B ：路床勾配， ρ ：水の密度， V_s ：粗石の抵抗力を規定する代表流速（粗石が水没したときは表面流と粗石層固有流速の相乗平均とした）， V_s ：魚道の計算対象区間レーンの水の体積（粗石部分は除外）， A_s ：粗石による遮蔽面積（水没部分の流下方向に直角な断面への投影面積）の合計， A_B ：粗石に覆われない路床の面積， $\Delta U_L, \Delta U_R, A_{SL}, A_{SR}$ ：各レーンの流速の左右隣レーン流速との差及び各レーンの左右隣レーンとの境界面の対象区間での面積， C_D ：粗石の抗力係数， C_f ：路床の摩擦抵抗係数（Manningの粗度係数を

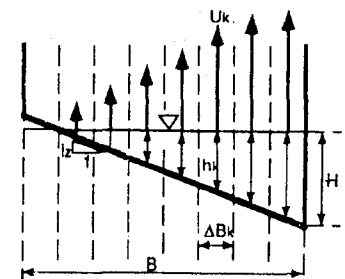


図4 粗石付き斜路断面

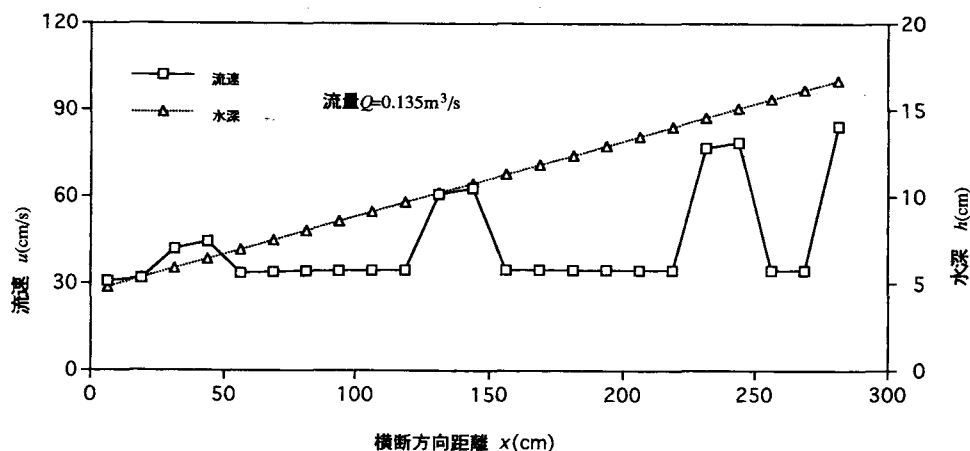


図3 粗石付き斜路内の流速，水深分布の計算例

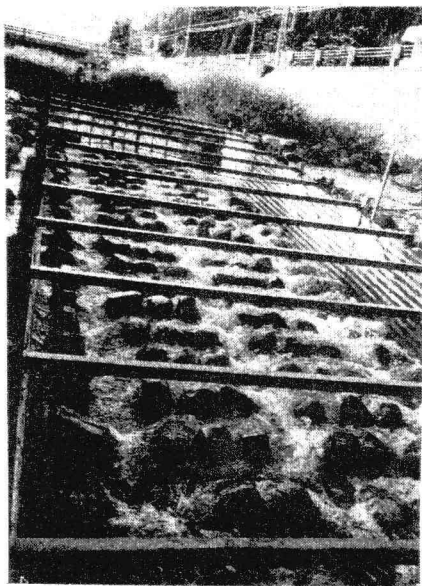


写真1 魚見川試験魚道

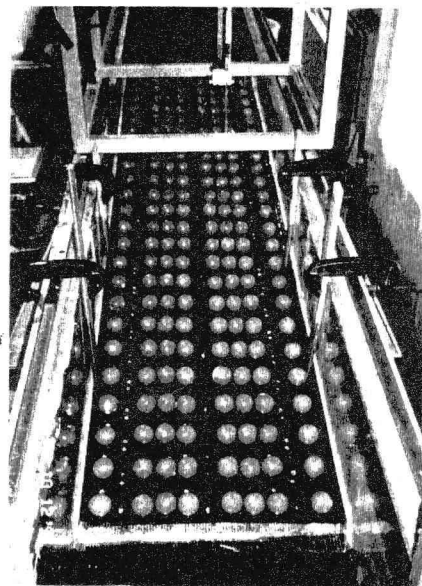


写真2 実験室の粗石付き斜路模型

0.015として計算), ΔB :レーン幅 ($\Delta B=0.25\text{m}$), ν_i :渦動粘性係数である。写真1のように粗石の有無による流速差は必ずしも充分混合していないので ν_i は動粘性係数程度とした。計算においてはまず横断混合を無視して第1近似解を得, そのときの ΔU_L , ΔU_R によって補正する方法を逐次進めた。粗石の抗力係数はこのような水理計算で求められた流量が実測流量と合致するよう1.0とした(図3は計算例)。もちろん水理解析の手法はまだ改良されるだろう。また現地で水理計測出来ない条件については実験室で小型模型で水理計測を行って補完する(写真2)。

5. 2 評価値曲線の決定

評価値曲線の単純化されたモデルは図1に示したとおりで, これにしたがってモデル化するなら, 対象魚種・サイズについて突進速度, 巡航速度を調べればよい。アユやウグイについてはこれらを調べた結果が報告されている¹⁰⁾。図4にはこうした結果を利用して決めた評価値曲線の例を示す。

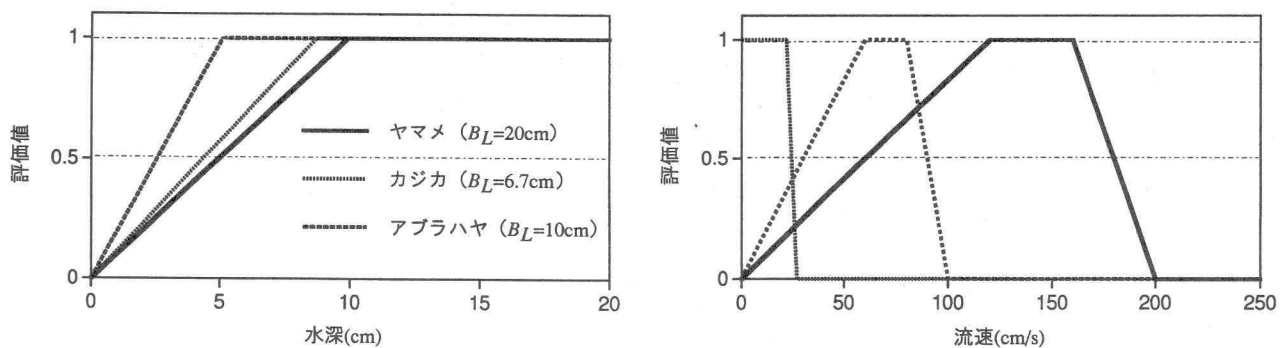


図4 対象魚種ごとの評価値曲線

試験魚道があるときは, そこでの対象魚の遡上実験を行って評価値曲線を検討するのがよい。図5は魚見川試験魚道でアブラハヤを魚道下流端で放流して経路を観察した結果を流速(小型電磁流速計を利用), 水深分布の実測結果と併持したものである。

5. 3 魚道の評価

評価値曲線(図4)と水理解析結果(図3)を融合して得られる横断方向の位置による評価の違いを図6に示した。図5ではヤマメとアブラハヤの例を示すが, 魚種により利用空間が異なることがわかる。この評価値の横断方向平均値が魚道全体としての評価値 Ξ_f となり, 流量 Q を変えて計算を行うことが出来る。魚道の諸量, 入り口条件が決まれば河川の流況に応じて魚道流量時系列 $Q(t)$ が得られ, 評価値の時系列 $\Xi_f(t)$ を得る

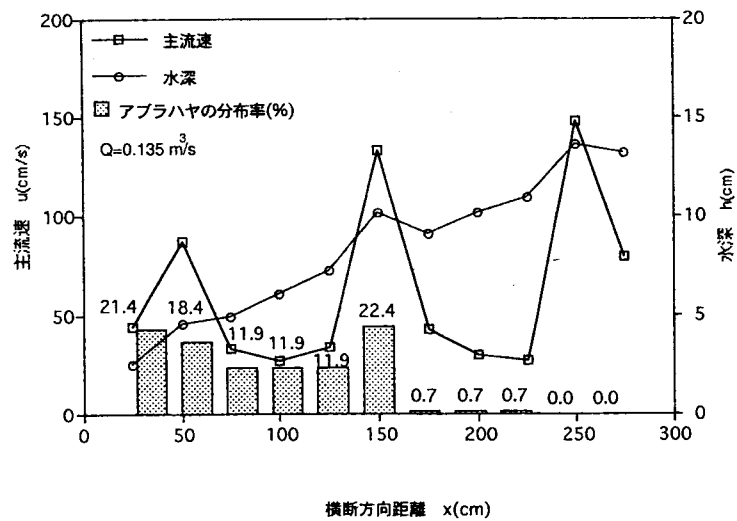


図6 粗石付き斜路における水理量とアブラハヤの出現頻度の横断分布

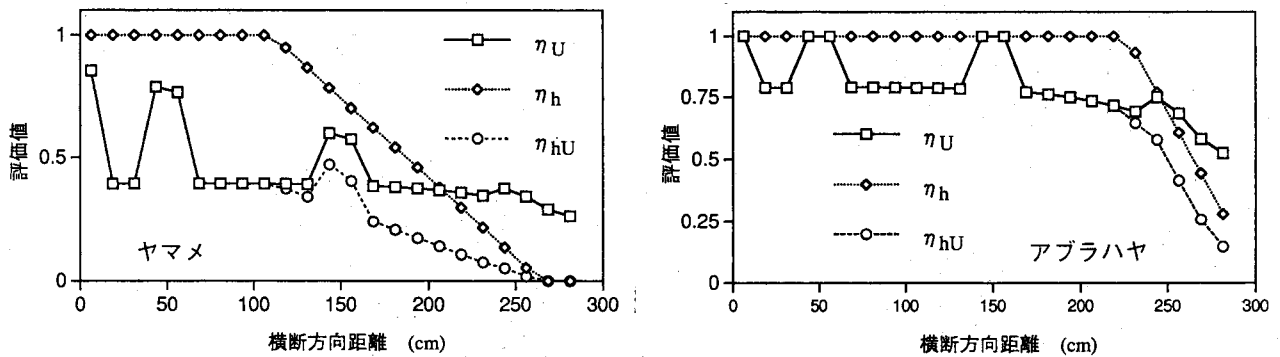


図7 粗石付き斜路における対象魚種の評価値の横断分布

ことができる。図8は浅野川（石川県）の流況を日流量時系列で表示したもので、取水量などを勘案して魚道流量時系列を決めることができ、これも表示している。本来これを考慮して魚道諸元を決めるべきであるが通常は低水量などが設計流量となっている。この魚道案は複数魚道設置であるが、そのうちのひとつ（玉石魚道の表面流）を対象として今回の評価法を適用した。この流量で評価値時系列を作った例が図9である。ウグイ、アユについての評価値時系列の計算結果を示す（グレイの曲線）が、当初計画の流量では魚道機能

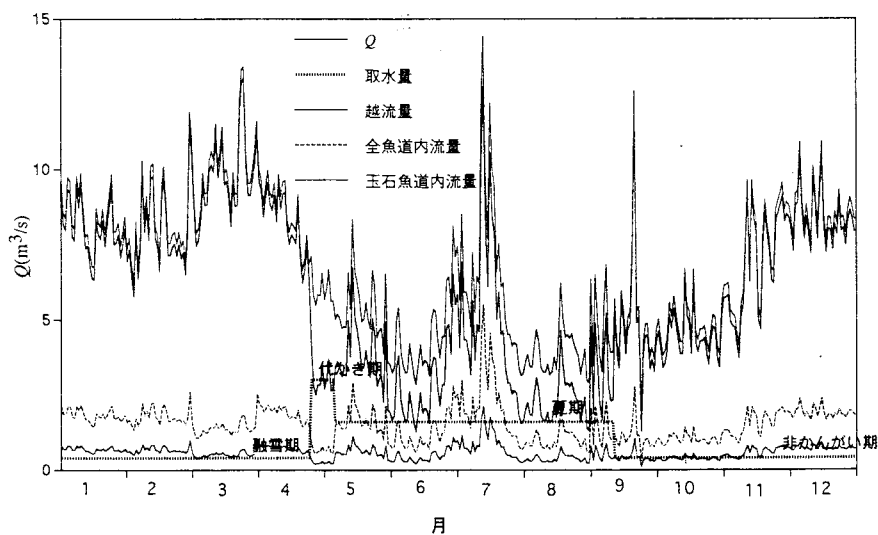


図8 浅野川（石川県）の流況

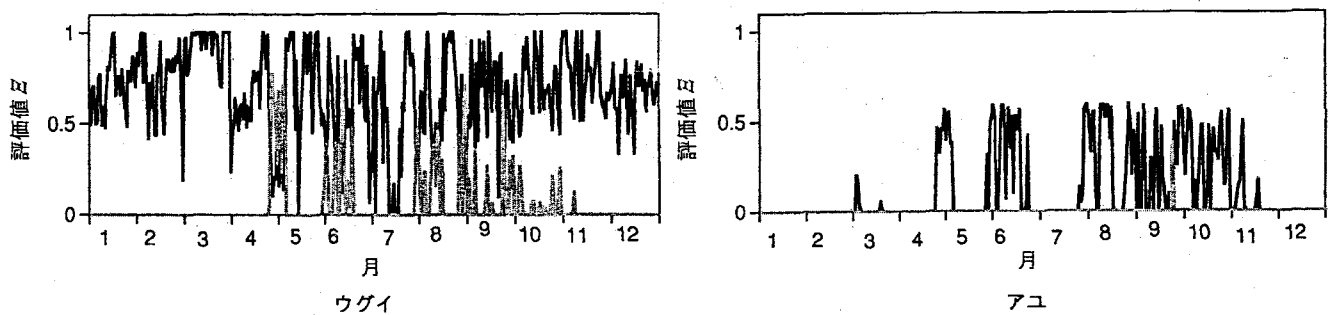


図9 粗石付き斜路における対象魚種の評価値の横断分布

が充分でない。魚道の上流側入口断面積を絞り流量を $1/3$ に低減した代替案についての計算結果（黒太線で表示）ではかなり改善されることがわかる。ここでは、代替案づくりについては検討していないが、代替案との比較が今回提案した評価法で可能となっていることがわかるだろう。

6. あとがき

本研究では、河川整備・管理の新しい理念の中で、潜在自然型河川が指向されるというシナリオの中で魚道を位置づけ、魚道がこれまでの水産有用種から多様な種の持続的生息場の確保といった観点で設計されるべきものと移行していくことを想定し、その評価について検討した。とくに最近生息場評価で注目を浴びているIFIMの魚道評価への適用を試み、さらに従来のIFIMでは充分定量化できていない流況の効果と生態行動のとりこみをおこなった。後者の手法は生息場評価にも逆に応用できるものである。本文では、多様な種、多様な流況に対応するには多様な水理条件の組み合わせが必要となる。一般的な意味でのデニール型魚道は断面内水理特性が複雑で有用だが、ここではもっとも簡単な横断勾配のある粗石付き斜路を想定して方法論を具体化した。ここでは、粗石を全面に配置したものを想定しているため断面内の流速の変化はゆるやかであるが、粗石の配置をレーンごとに変えて水流の速い・遅いをつけた流路なども現実的に効果的であり、現地での実験（水理計測と魚の行動観察）を並行した研究を進めている。本方法論は、断面内流れの水理計算、魚道としての評価曲線の推定など独立したサブシステムの評価精度向上のほか、魚道の長さや休憩プールの組み合わせの適否、セグメント程度のスケールの河道区間、さらには水系で魚道設置が魚類生態環境に及ぼす効果の評価までも、ここに示した方法論を展開してゆきたいと考えている。一方、種ごとに得られる評価値を見て総合的にどう判断するか（種に対して優先性を認めるか、種に対する平等性を確保すべきかなどの判断）のための研究も残されている。

参考文献

- 1) 玉井信行：潜在型自然川づくりの体系化に向けて，河川，No.598，日本河川協会，pp.61-66,1996.
- 2) Nestler,J.M., R.T. Milhaus and J.B. Layzer: Instream habitat modeling techniques, *Alternative in Regulated River Management*, edited by J.A. Gore & G.E. Petts, CDC Press, 1989.
- 3) 山本晃一：河道特性論，土木研究所資料，第2662号，pp.169-185，1988.
- 4) 宇多高明・藤田光一・佐々木克也・服部敦・平館治：河道特性による植物群落の分類－利根川・鬼怒川を事例として，土木技術資料，Vol.36, No.9, pp.56-61, 1994.
- 5) 辻本哲郎：河川環境のありかたとその実現に向けて，金沢大教育開放センター紀要，第15号，pp.1-17,1995.
- 6) 辻本哲郎：新しい河川管理の概念とそれを支える河川水理学の展開－生息環境としての河川の景観と管理－，第3回日独河川技術交流講演会テキスト，名古屋，中部建設協会，pp.1-17，1996.
- 7) 佐野修・山本邦彦：石川県の淡水魚類，石川県の自然環境シリーズ，石川県環境部，74p., 1996.
- 8) 河川審議会答申：21世紀の社会を展望した今後の河川整備の基本方向について，27p., 1996.
- 9) 河川環境管理財団編：河川生態環境評価基準の体系化に関する研究報告書，193p., 1997.
- 10) 農林水産省構造改善局建設部設計課編：頭首工の魚道設計指針，194p., 1994.
- 11) 日本農業土木総合研究所編：平成8年度県営かんがい排水事業小橋地区魚道技術検討業務報告書，231p., 1997.