

新しい河川環境の概念に基づく魚道設計の方法論に関する基礎的研究

Fishway Design Methodology Based on New Concept for River Environment

辻本哲郎*・堀川紀子**

By Tetsuro TSUJIMOTO and Noriko HORIKAWA

Previously, fishways were designed to assist migration of only commercial fish. However, new emerging concept of river environment management requires fishways to provide "biopath" for many species of fish. In this paper, the new methodology for fishway design is discussed. IFIM (instream flow incremental methodology), which was derived for habitat evaluation, is here developed to apply to fishway evaluation. Not only the hydraulic condition of flow in fishway but also the influence of time series of discharge are taken into account to evaluate the fishway design. The procedure of the methodology is explained for an example of fishway of triangular section with large roughness.

Keywords: river environment, fishway, instream flow, fishway design

1. まえがき

河川管理・整備の新しい理念は河川を多機能と認識することにある。すなわち、洪水に対する安全性（治水）、水資源利用・舟運・水産などの利水、親水（リクリエーション、アメニティ、文化）そして生態環境保全機能を等しく確保することにある。1986年12月の「河川環境管理のありかたについて」の河川審議会答申では水質問題、親水機能としてしか捉えられなかった河川環境もその後の様々な取り組みのなかで、とりわけ「多自然型川づくり」の導入とともに生態環境保全的機能への着目へと深化してきた。すなわち「多様な生物生息環境」としての河川の機能の認識（1995年3月の河川審議会答申「今後の河川環境のありかたについて」）とその確保の問題である。

河川の生息環境（habitat）の研究は水産資源確保の観点から従来より進められていたが（最近ではフィッシングの立場もある）、潮河・降河を妨げる横断構造物における魚道の適切な設置がそのなかで大きなウェートを占めていた。近年、フランス¹⁾やカナダ²⁾で水理学的アプローチで従来の経験に頼っていたその設計法が近代化されそれをもとにしたガイドラインが提案され^{3)・4)}、「魚ののほりやすい川づくり」モデル事業を支えた。このように関心の高まる中で、数値解析など水理学の最近の成果の適用⁵⁾によってより機能的な水理条件を産み出す工夫が可能になりつつあるし、一方では、より自然流路的魚道^{6)・7)}を指向するものもでてきた。そのひとつの背景に水産（あるいは釣り）用の魚種のみを対象とするのではなく、より多様な種を対象とするという考え方が主流になってきたことによる。すなわち、魚道の意義は新しい河川環境管理・整

* 正会員 工博 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)

** 金沢大学工学部学生 土木建設工学科

備の理念とともに変質してきている。

本研究では、新しい河川環境の概念のもとで魚道の意義を捉え、こうした魚道の設計方法論と水理学的アプローチについて考察した。

2. 河川環境のありかたと魚道の意義

河川環境管理・整備の理念は河川が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⁸⁾ 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⁹⁾。玉井¹⁰⁾ はこれを「潜在自然河川」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¹¹⁾。魚道の設置の意義もこの観点から考えるべきである。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。

河川環境の新しい概念は河川を「多様な生物の持続的生息環境」として捉えることで、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、またそれゆえ、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。

3. 魚道設計の手順

前章で述べた意義付けに基づいて魚道を設計するするときの第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¹²⁾ を整理したもので、河床勾配、生息魚類からだけでもセグメント分割の重要性が認められる。

次にここから対象魚種を選定するわけであるが、その条件としては、(i) その種の生息において回遊 (遡上・降下) を必要とするもの、(ii) 水産資源確保対象種、(iii) 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ものを帰還さ

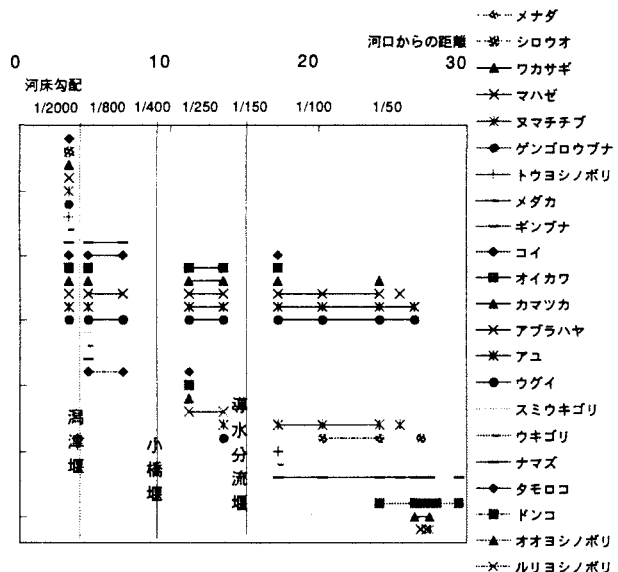


図1 浅野川のセグメントと魚類の棲息状況

せる), (iv) 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ならない。いずれにせよ, 多様な種を対象とせねばならず, この点が従来型とは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。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日の流況を考える必要がある。

多様な種(サイズや行動パターン)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。現段階では条件として水深と流速が考えられ, そ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 Methodology¹³⁾)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 はその指標のとる値を表す。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_k), それに応じた評価値 η_k 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_k が流量 Q の関数であるから η_k 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で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。

本論文ではこの手法を魚道評価に応用する。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 $\eta_{R_i}(U)$, $\eta_{R_i}(h)$ 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 $\eta_{R_i}(U)$

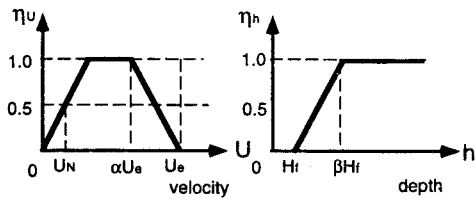


図2 魚道としての評価値曲線

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、 $\eta_{th}(h)$ は魚の体

高をパラメータとしよう。図2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 ($0 < \alpha < 1, \beta > 1$)。図3はこれまでに知られている魚の突進速度 U_e と体長 L_F の関係³⁾を図化したもので両者の相関はよい。巡航速度も同様体長 L_F と良好に相関している(突進速度の数10%)。また体高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。これらが想定できれば、魚道の評価値 Ξ ～流量曲線が次式で計算される。

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

$\Xi(Q)$ はシルエットの同等な魚では(種というよりも)むしろサイズによって決まる。

$\Xi(Q)$ が得られれば、流況 $Q(t)$ (t : 時間) 応じて評価値の時系列 $\Xi(t)$ 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、溯河の場合はほぼ1.0であるが、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。

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

ここで T は1年間を表す。分母を T にしていないのは期待される時期、期待される限度で効果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) $\Xi \sim Q$ 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. 魚道設計の手順

これまで述べたように新しい考え方で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もっとも簡単な例として三角形断面の粗石付斜路とした。粗石の等価砂粗度 k_s と横断勾配 i_x を設計変数と想定する(図4参照)。

何らかの水理解析によって各レーンごとに水深と流速の関係を図5(A)のように求める。すなわち最大水深 H を想定すれば、各微小レーン ΔB_k ごとの流速 U_k が計算され、これと各レーンの水深 h_k から流量が $Q = \sum (U_k h_k) \Delta B_k$ として計算される。このようにして図5(B)のように $H \sim Q$ 関係が求められる(流量が図の Q_4 のときの魚道に現われる水深 h_k の範囲、流速 U_k の範囲を、それぞれ図5(B), (A)に矢印付き線分で示してある)。

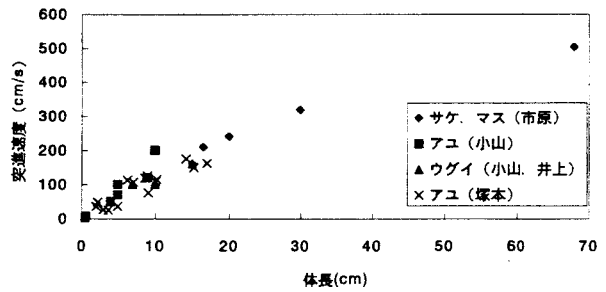


図3 紡錐体型魚の突進速度

図5 (C), (D)には流速, 水深に対する魚道の評価値曲線 $\eta_R(U)$, $\eta_R(h)$ が示されており, 出現する流速, 水深に対する評価値が求められ, 式で魚道の評価値 Ξ が求められる. さまざまな流量に対してこの値を計算してプロットすることで $\Xi(Q)$ が得られる(図6 (E)). ところで図6 (F)のように魚道に流入する流量時系列のモデルを考える. 北陸地方を対象とし, 融雪期, 梅雨末期, 台風期, 冬季の降雪をモデル化したものである. これに, 先に求められた $\Xi(Q)$ (図6 (E))を適用して評価値 Ξ の時系列を表示したのが図6 (G)である. 図6 (H)は年間の魚道への期待度 $\gamma(t)$ でここではアユを想定して溯河期(4~6月)に大きな期待度とし, 冬季は期待度をゼロとしている. 図6 (G)に点線で $\gamma\Xi$ の時系列を示した. この曲線の下側の面積が年間を通しての魚道の評価値 Φ を計算する式(3)の分子となる. この値を, 代替案(たとえば横断勾配や粗度の変化させたもの)と比較することによって改良を重ねて適正な魚道の設計をする.

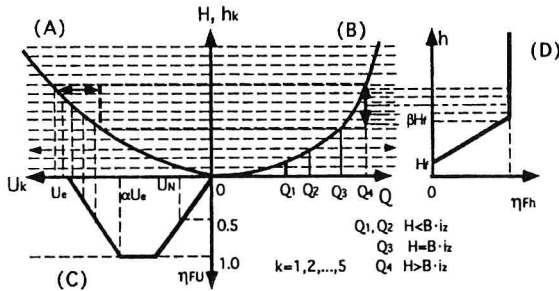


図5 水位・流量及び水深の関係と各評価値曲線度

写真1はF県K川水系U川粗石(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,

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

となる. 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, ΔU_L , ΔU_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0.015として計算), ΔB : レーン幅($\Delta B=0.25\text{m}$), v_L :

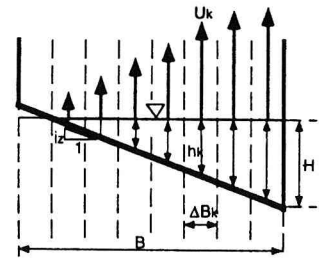


図4 粗石付斜路式魚道

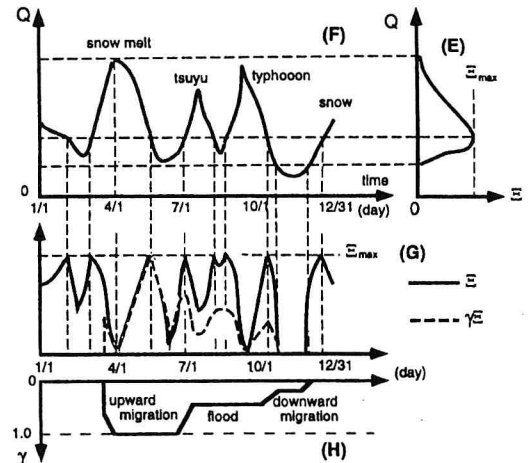


図6 流況及び評価値の時系列

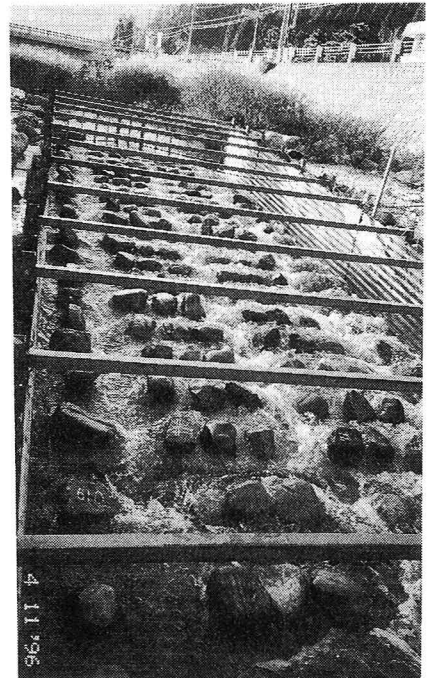


写真1 粗石付斜路式魚道の現地実験

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 v_t 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力計算で求められた流量が実測流量と合致するように1.0とした。図7は流速分布の計算例で、体長20cm、体高3cmの紡錐型魚を対象に評価曲線を決め($\alpha=0.8$, $\beta=3.0$), $\Xi(Q)$ を計算した。その結果が図8に示される。現地実験での流量測定は電磁流速計によった。この事例では、魚道流況がまだ明らかなので、時系列を考慮した計算はまだおこなっていないが、本研究で示した方法論では、魚道流量のコントロールの議論も可能である。

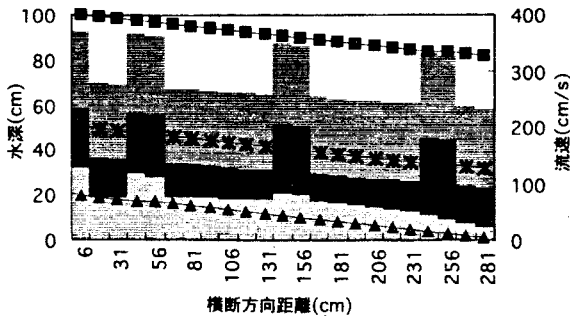


図7 流速分布の計算例 (K川水系U川試験魚道の例)

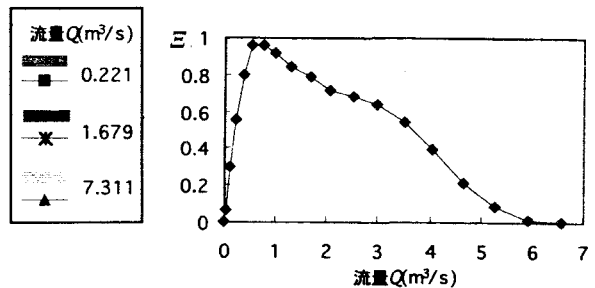


図8 評価値～流量関係の計算例

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、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の設計へと移行していくことを想定し、その設計の方法論を検討した。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力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力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、現地実験を実施中の実験魚道に評価値の計算例を一部示した。これについてはさらに水力計測と魚の行動観察と並行して研究を進めていきたい。また、本方法論は、断面内流れの水力計算、魚道としての評価曲線の推定、魚道への期待度の評価、さらに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)など独立したサブシステムの評価精度向上のための研究が残されている。

本研究の遂行に当たり、金沢大学大学院学生・山本貴章、永禮大の協力を得た。また平成7・8年度河川美化・緑化調査研究助成(河川環境管理財団)を受けた。記して謝意を表す。

参考文献

- 1) Larinier, M. : Les passes a ralentisseurs, Chapt.6, *Bull. Fr. Peche Piscic.*, 326-327, pp.73-94, 1992.
- 2) Katopodis, C. : Advancing the art of engineering fishways for upstream migration, *Proc. Int. Sym. Fishways '90*, Gifu, 1990.
- 3) 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.
- 4) 中村俊六：魚道のはなし, リバーフロント整備センター／山海堂, 225p., 1995.
- 5) 辻本哲郎・泉倫光・山本貴章：ストリーム型魚道の流れの構造について, *水工学論文集*, 第40巻, pp.731-736, 1996.
- 6) Katopodis, C. : Recent fishway design problems in Canadian rivers, *Proc. Int. Sym. Fishways '95*, Gifu, pp.1-7, 1995.
- 7) Komura, S., S. Kazusa and T. Hara : Naturally shaped fishway of the Nagara River estuary barrage, *Proc. Ecohydraulics 2000*, Quebec, Canada, Vol.B, pp.855-860, 1996.
- 8) 山本晃一：河道特性論, 土木研究所資料, 第2662号, pp.169-185, 1988.
- 9) 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.
- 10) 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.
- 11) 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—, 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.
- 12) 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.
- 13) 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.