

淵縦断面形状が生息場に与える 影響の数値的解析

THE NUMERICAL ANALYSIS FOR THE EFFECT OF POOL SHAPES ON AQUATIC HABITAT IN A RIVER

岡滋晃¹・知花武佳²・辻本哲郎³・玉井信行⁴・小池俊雄⁵

Shigeaki OKA, Takeyoshi CHIBANA, Tetsuro TSUJIMOTO, Nobuyuki TAMAI and Toshio KOIKE

- ¹学生員 東京大学大学院工学系研究科 社会基盤工学専攻 修士課程 (〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1)
²正会員 工博 東京大学大学院工学系研究科 社会基盤工学専攻 助手 (〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1)
³正会員 工博 東京大学大学院工学系研究科 社会基盤工学専攻 客員教授 (〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1)
⁴フェロー会員 工博 金沢大学工学部 土木建設工学科 教授 (〒920-8667 石川県金沢市小立野2-40-20)
⁵正会員 工博 東京大学大学院工学系研究科 社会基盤工学専攻 教授 (〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1)

Flow velocity and water depth are the most important indices of PHABSIM, which is one of the most famous methods to evaluate aquatic habitat in a river. However, the same velocity and depth do not always indicate the same situation of stream. Moreover, the habitat of an omnivorous river-fish is strongly connected with the vertical aspect of flow velocity, as it could be natural action for such kind of fish to stay in near-bed flow and catch feed near surface.

In this paper, 'overall velocity gradient' is proposed as an index that indicates the variation of flow velocity. Additionally, a 2-D $k-\varepsilon$ model is employed to analyze the effect of pool-shapes on overall velocity gradient. With the result of the calculation, typical types of pools can be classified by the width of a space for fish to stay. Using the result of above analysis, it is proved that a steep slope near the start of a pool makes wider the space in which a river-fish can stay with its low energy and a mild slope at the end of a pool produces the wide variation of flow velocity and depth. The result suggests that the vertical velocity gradient should be vital for the construction of a pool.

Key Words : PHABSIM, IFIM, omnivorous river fish, velocity gradient, pool construction

1. はじめに

魚類生息域を評価するモデルとしてはPHABSIMがよく使用されるが、本モデルは平面2次元による水深と平均流速の2指標を基準として用いているために、水深方向の流速分布は全く考慮されていない。流速分布を仮定するための対数則については既に良く知られているが、流速分布形状に対する流れの加速・減速による効果は大きく、対数則が適用できない場合も多い。また、淵内における流況は魚類の行動に大きく影響すると考えられるものの、流速分布形までを指標化して評価する方法は未だ確立されていない。

一般に加速流では順圧力勾配となり、流速分布は膨らみ流速勾配は小さくなる。対して減速流では逆圧力勾配となり、流速分布は細くなり流速勾配は大きくなる。結果、加速・減速両域においては対数則がもはや適用されなくなる。特に底層付近において、加速域では魚類に対

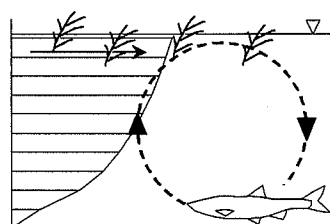


図-1 雑食性魚類の行動概念図

し定位に多大なエネルギー消費を強いることになり、減速域では最小のエネルギーで定位・行動できる。したがって通常、河床近傍の流速の小さな場に定位し、表層に餌が流れてきた場合にのみ捕食のために水面付近に向かうと考えられる雑食性魚類の行動に、流速勾配は密接に関係するであろう。以上の背景に鑑み、本研究では水深方向の流速の多様性を表す数値指標を提案し、合わせて一般鉛直座標系による鉛直2次元 $k-\varepsilon$ モデルを用いて淵内の流況を計算して、淵の縦断面形状が生息場に与える影響の評価を行った。

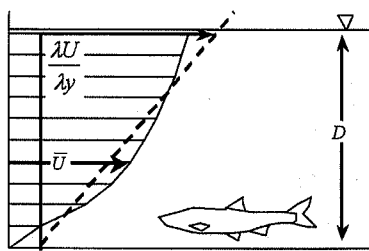


図-2 総括的流速勾配の定義

2. 総括的流速勾配とは

PHABSIMをはじめ、魚類生息場評価の際に用いる指標である平均流速は、数学的には水深方向にとった流速分布曲線が囲む面積を水深で除したものであるため、流速分布曲線の様子までも正確にあらわすことはできない。従って、流速分布を適切に表現する指標を考えるべきである。本研究では、流速分布を表す指標の開発にあたって流速分布曲線の勾配（流速変化率）に着目した。水深方向の流速勾配は、当然ながら各点において異なっており、一般的に底層ほど大きくなり、逆に表層ほど小さくなるが、流速勾配を指標として用いるためには代表性のある指標が望ましい。よって水深全域に渡って流速分布曲線を直線で回帰近似し、得られた回帰直線の勾配を評価指標として用いることを考える。回帰直線の勾配は水深方向における各点の情報を全て含むと考えられるため総括的流速勾配と呼び、 $\lambda U / \lambda y$ と書く¹⁾。

さて、統計解析の慣習に習い総和を $[\]$ で表すことにすれば、総括的流速勾配は回帰直線の勾配であるから、基礎式は式(1)となる。

$$\frac{\lambda U}{\lambda y} = \frac{[U_i \cdot y_i] \cdot N - [U_i] \cdot [y_i]}{[y_i]^2 \cdot N - [y_i]^2} \quad (1)$$

ただし、 U_i : 第 i 番目における水平流速、 y_i : 第 i 番目における底面からの高さ、 N : データ総数である。また、各点は1, 2, ..., $N-1$, N の如く番号付けされ、 i は付けられた番号全てを渡る整数とする。観測点が鉛直方向に等間隔にとられており、データ総数 N を無限に多くするならば、無限級数と実関数の積分における交換則を用いて、式(1)は次式(2)となる。

$$\frac{\lambda U}{\lambda y} = \frac{12}{D^3} \int_0^D (Uy) dy - \frac{6}{D^2} \int_0^D U dy \quad (2)$$

式(2)で D は水深である。ここで、対数則を仮定できる場合は、式(2)に対数則を用いて次式(3)となる。

$$\frac{\lambda U}{\lambda y} = 3 \frac{U_*}{\kappa D} \quad (3)$$

直上の式で U_* は摩擦速度、 κ はカルマン係数を示す。総括的流速勾配の持つ意味は、次のように解釈される。もし、水深や平均流速が同じである場合、総括的流速勾配が大きいほど、底層での流速分布が細くなり、小さいほど膨らむ。細い流速分布形は減速域でよく見られ、逆

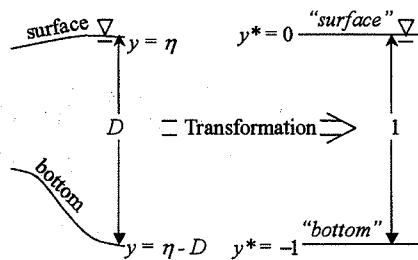


図-3 一般鉛直座標変換（文献 2）より引用

に膨らんだ分布形は加速域で現れやすい。

さらに、総括的流速勾配を水深と平均流速によって無次元化したものを「無次元流速勾配」と呼ぶことにする。特に、無次元流速勾配は水深・平均流速が等しくない二点を比較する際には、各物理オーダーに左右されないため非常に有用である。すなわち、無次元流速勾配は「相対的な」流速の多様性を表現する。特に対数則が成立する場では、無次元流速勾配は流速係数 ϕ に反比例する。

$$\frac{D}{\bar{U}} \frac{\lambda U}{\lambda y} = \frac{3}{\kappa} \frac{U_*}{\bar{U}} \propto \frac{1}{\phi} \quad (4)$$

上の議論からなされる結論は、水深・平均流速・総括的流速勾配の3指標を用いることで、考察する観測点における流況を的確に判断できる点にある。よって、本研究における淵の縦断面形状の評価では、以上の3指標に重点をおくことにする。

3. 一般鉛直座標変換による鉛直二次元モデルの概要

一般鉛直座標変換の概念は、1992年にDeleersnijder E. & Ruddick K.G.が定式化した。一般鉛直座標系では、変換後の空間では、水表面が0、河床底面が-1で表現され、計算空間が河床形状の凹凸に影響されないため、数値誤差がデカルト座標系を使用する場合に比して低く抑えられるケースが多い。一般鉛直座標変換には様々なものが考案されているが、本論文では、使用した2つの座標変換法を紹介するにとどめる。

1つ目は、Mixed Layer Transformation (MLT)とよばれるもので、Burchard H. & Petersen O.により1997年に開発され、座標格子設定式は以下で示される²⁾。

$$(x^*, y^*) = (x, \alpha \sigma + (1 - \alpha) \beta) \quad (5)$$

ただし、水平空間座標 x に付記されたアスタリスク*は変換後の座標であることを示唆する。また、 α, β, σ は直下の式群(6)で示される。

$$\begin{cases} \sigma = \frac{y - \eta}{D} \\ \beta = \frac{\tanh\{d(1 + \sigma)\}}{\tanh(d)} - 1 \\ \alpha = \min \left[\frac{(D_{\min}/D) \sigma_{N-1} - \beta(\sigma_{N-1})}{\sigma_{N-1} - \beta(\sigma_{N-1})}, 1.0 \right] \end{cases} \quad (6)$$

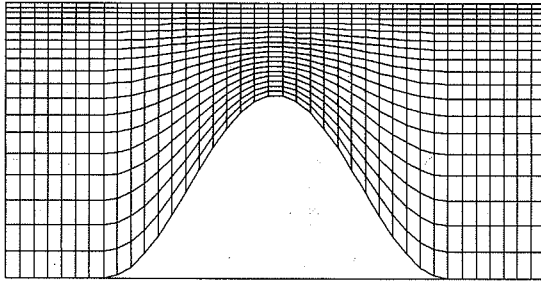


図-3 Mixed Layer Transformation 計算格子設定図

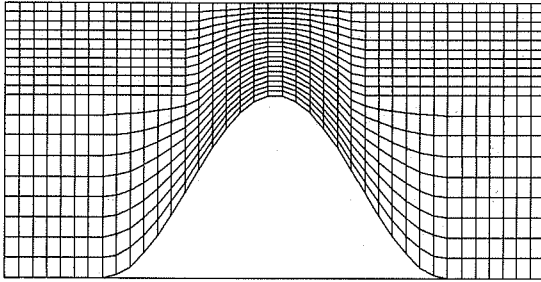


図-4 Dual-Sigma座標系 計算格子設定図

式(5)・(6)において、 y ：鉛直空間座標、 γ ：MLT変換後の鉛直空間座標、 η ：水表面水位、 D ：水深、 $D_{\min}$ ：最小水深、 N ：最大格子点番号、 d ：座標系混合指数(>0)である。

2つ目は、灘岡・吉野・二瓶によりDual-Sigma座標系と名付けられ、2000年に開発されたものである³⁾。また、岡はDual-Sigma座標系を直下の形式で表現した⁴⁾。

$$(x^*, \lambda) = \begin{cases} \left(x, \frac{D_{\min}}{D} \frac{N-1}{N-N_c} \sigma \right) & (N_c \leq k \leq N) \\ \left(x, \frac{D-D_{\min}}{D} \frac{N-1}{N_c-1} (\sigma+1) - 1 \right) & (1 \leq k < N_c) \end{cases} \quad (7)$$

式(7)で、 λ ：Dual-Sigma変換後の鉛直空間座標、 N_c ：上下層境界上の格子点番号、 k ：鉛直空間座標 y に対応する格子点番号である。ただし、Dual-Sigma座標系における最小水深 $D_{\min}$ は以下で代用する。

$$D'_{\min} = \min \left(D_{\min}, \frac{N-N_c}{N-1} D \right) \quad (8)$$

上述2つの座標変換による計算格子設定図を示すと図-3、図-4となる。いずれの座標変換においても表層における計算格子は水平に近く設定され、底層付近の計算格子は河床形状に沿うように設定されている。

一方、鉛直2次元 k - ε モデルにおける一般鉛直座標変換後の基礎式は適当な近似の下で式(9)・(10)となる。

$$\frac{\partial \tilde{U}}{\partial x} + \frac{\partial \tilde{V}}{\partial y} = 0 \quad (9)$$

$$\frac{\partial}{\partial x^*} \left(\tilde{\Phi} \tilde{U} - \Gamma_x \frac{\partial \tilde{\Phi}}{\partial x^*} \right) + \frac{\partial}{\partial y^*} \left(\tilde{\Phi} \tilde{V} - \Gamma_y \frac{\partial \tilde{\Phi}}{\partial y^*} \right) = S_\Phi \quad (10)$$

上式で、 x^*, y^* ：変換後の水平・鉛直空間座標、 $\tilde{U}, \tilde{V}$ ：

表-1 鉛直2次元乱流 k - ε モデルにおける基礎式の内容

$\tilde{\Phi}$	Γ_x	Γ_y	S_Φ
$\tilde{U}$	$D(v_t + \nu)$	$\frac{(v_t + \nu)}{D}$	$gD^2 I_e - \frac{D^2}{\rho} \frac{\partial \Pi}{\partial x^*} + \frac{\partial}{\partial x^*} \left(\Gamma_x \frac{\partial \tilde{U}}{\partial x^*} \right) + \frac{\partial}{\partial y^*} \left(\Gamma_x \frac{\partial \tilde{V}}{\partial x^*} \right)$
$\tilde{V}$	$D(v_t + \nu)$	$\frac{(v_t + \nu)}{D}$	$-\frac{1}{\rho} \frac{\partial \Pi}{\partial x^*} + \frac{\partial}{\partial x^*} \left(\Gamma_y \frac{\partial \tilde{U}}{\partial y^*} \right) + \frac{\partial}{\partial y^*} \left(\Gamma_y \frac{\partial \tilde{V}}{\partial y^*} \right)$
k	$D \left(\frac{v_t}{\sigma_k} + \nu \right)$	$\frac{1}{D} \left(\frac{v_t}{\sigma_k} + \nu \right)$	$DP_k - D\varepsilon$
ε	$D \left(\frac{v_t}{\sigma_\varepsilon} + \nu \right)$	$\frac{1}{D} \left(\frac{v_t}{\sigma_\varepsilon} + \nu \right)$	$\frac{\varepsilon}{k} (C_1 DP_k - C_2 D\varepsilon)$

表-2 計算条件

地形	モデル地形	実河川 (平井川)
縦断長 (m)	80.0	85.0
最大水深 (m)	1.0	0.77
単位幅流量 (m ² /s)	0.3	0.15 ~ 0.25
マニング粗度	0.025	0.020
水温 (°C)	22	22
格子点総数	2500	3260

変換後の流速、 $\tilde{\Phi}$ ：変換後基礎式対象物理量、 S_Φ ：ソース項（外力項）、 Γ_x, Γ_y ：拡散係数を示す。 $\tilde{\Phi}, S_\Phi, \Gamma_x$ 及び $\tilde{U}, \Gamma_y$ の内容は基礎式ごとに表-1に示すとおり変化する。表-1では、 k ：乱れエネルギー、 ε ：乱れエネルギー逸散率、 g ：重力加速度、 ρ ：密度、 I_e ：エネルギー勾配、 Π ：静水圧との圧力差、 ν_t ：渦動粘性係数、 ν ：動粘性係数である。 P_k は次式(11)で示される。

$$P_k = \left[\frac{2}{D^2} \left\{ \left(\frac{\partial \tilde{U}}{\partial x^*} \right)^2 + \left(\frac{\partial \tilde{V}}{\partial y^*} \right)^2 \right\} + \left(\frac{1}{D^2} \frac{\partial \tilde{U}}{\partial y^*} + \frac{\partial \tilde{V}}{\partial x^*} \right)^2 \right] \quad (11)$$

鉛直空間座標 y^* は、使用する座標変換法によって若干しくは λ となる。すなわち、いずれの座標変換法も数学的には全く同等に扱うことが可能である。

以上の変換法を、モデル地形及び実河川形状に適用し、数値実験を行った。モデル地形はサインカーブを持つ単純な淵形状としたが、実河川データは、多摩川支流の平井川（河川長16.5(km)、流域面積38.9(km²))における2003年10月25日の観測データ（水深・流速・地形・底質）を使用した。両者の具体的な計算条件は表-2に示すとおりである。数値実験の過程で計算精度ではMLTが優るものの、河床の凹凸が激しい場合はDual-Sigma座標系を用いたほうが計算の安定性が確保されることが判明し、本研究ではモデル地形をMLTで計算する一方で、実河川はDual-Sigma座標系により解析を行った。図-5、図-6に結果を示す。数値解により、たとえ同じ水深・流速の場であっても淵頭・淵尻で流速分布形が互いに異なる様子がよく分かる。また、一般鉛直座標系を用いた本モデルは現地観測の結果とも一致することが理解される。さらに、同じ平井川の別の淵頭において2001年8月27日に

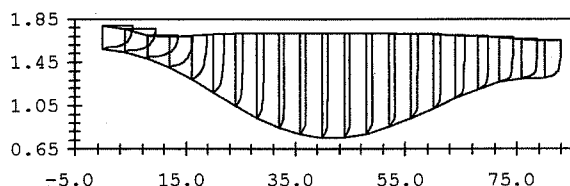


図-5 モデル地形における流速分布計算結果
(縦軸：標高(m), 横軸：距離標(m))

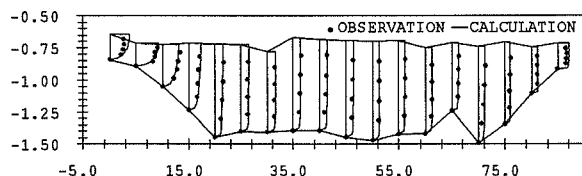


図-6 実河川(平井川)の淵における流速分布計算結果
(縦軸：標高(m), 横軸：距離標(m))

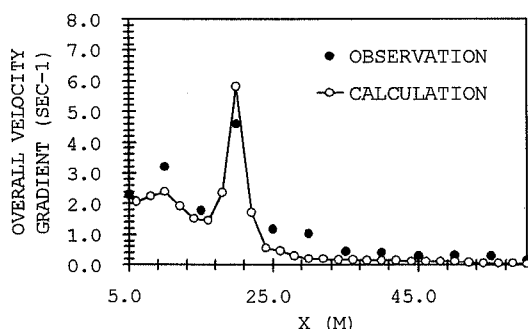


図-7 縦断方向の総括的流速勾配の変化

観測されたデータ(水深・流速・地形・底質・魚数)を使用して、数値計算と観測結果による総括的流速勾配を比較したところ、図-7となった。特に距離標20.0(m)において総括的流速勾配が非常に高いことが認められるが、ここは、平均流速1.32(m/sec)・水深0.20(m)という非常に速い流れであるにもかかわらず、同点にはウグイ4.5(fish/m²)、オイカワ1.5(fish/m²)、アユ1.5(fish/m²)が定位置しており、河川魚類の行動には流速勾配の考慮が不可欠であることが明らかとなった。

4. 類型化された淵における流速勾配の変化

本研究で対象としている雑食性魚類は、瀬淵構造の中で滞り付近を中心に活動していることから、特に淵内の流れに関する計算を行い、結果を考察する。実河川における淵の形成要因は非常に多いため⁹⁾、個々の形成要因に起因して生成される淵を、直下の6タイプに分類する。

① R型(Rock Type)：河床に置かれた岩石の周囲を洗掘することによって生成される淵である。淵頭から最深部までと最深部から淵尻までの縦断距離はほぼ

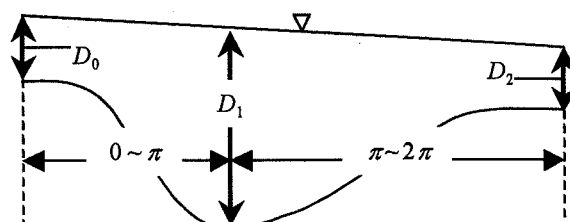


図-8 環境傾度位相法概念図

等しい。

- ② B型(sandBar Type)：交互砂州若しくは寄州対岸に多く認められる淵である。淵頭から最深部までの縦断距離は最深部から淵尻までに比して短く、本研究では両者の比を1:2とする。
- ③ S型(Substrate Type)：落差工下流部の落ち込みや地質が硬い場から柔らかい場に変化する際に河床を洗掘して形成される淵である。淵頭の落ち込みは垂直である。
- ④ D型(Dam Type)：ダム上流部の堰上げにより形成される淵である。淵尻が垂直となる。
- ⑤ Fp型(Foot protection Type)：淵内に根固め工が施されているために、淵頭・淵尻においてのみ河床高が変化する淵である。本研究では淵頭/淵中央部/淵尻の比を1:3:1とし、淵中央部の水深は変化させない。
- ⑥ A型(Artificial Type)：人工的に施工された淵で、淵頭・淵尻部がなく、淵最深部に近い水深をもつ場が淵のほぼ全域を占める淵である。

以上の淵形状を相互に比較する際に、実距離を用いて比較すると、各々の地点における水深・平均流速が全く違うために比較は困難なものとなる。したがって、水深・平均流速が互いに等しい場合同士で計算結果を比較するために、本研究では環境傾度位相を用いた。

環境傾度位相という指標は、2002年に知花・玉井によって初めて導入され、淵内で水深・平均流速が相対的に高い若しくは低い地点に対応した位相を、図-8を参照し式(12)によって割り出すものである⁹⁾。

$$\begin{cases} D_x = \frac{(D_0 - D_1)}{2} \cos \theta_x + \frac{(D_0 + D_1)}{2} \\ D_x = \frac{(D_2 - D_1)}{2} \cos \theta_x + \frac{(D_2 + D_1)}{2} \end{cases} \quad (12)$$

任意の点P_xが、淵頭P₀と淵中央部P₁の間に位置する点であれば0~πの値を与え、淵中央部P₁と淵尻P₂の間に位置する点であればπ~2πの値を与えることで淵の上下流を区別する。特に、各々の淵における単位幅流量・最大水深・最小水深が等しければ、同じ位相における平均流速と水深は全く同一となり、各淵を比較しやすくなる。

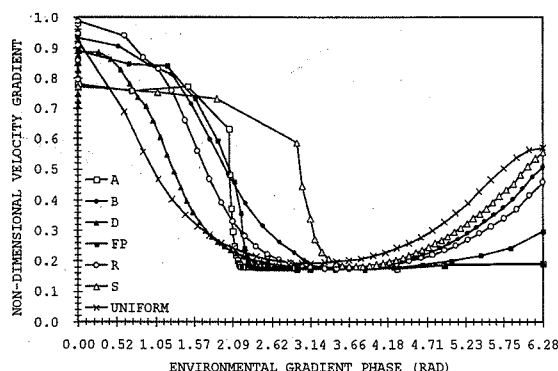


図-9 各淵形状における無次元流速勾配の変化

以上の知見を基に、6タイプの淵に対して数値計算を行い相互に比較したものが図-9である。この数値計算条件は表-1に示すとおりである。ここで、淵縦断方向には水深・平均流速が変化するために、縦軸に無次元流速勾配を用い、横軸には環境傾度位相を用い比較を行った。また、参考のために、等流場を仮定した場合の無次元流速勾配の変化も示しておいた。環境傾度位相が $0 \sim \pi/3$ ($0.0 \sim 1.05$) の範囲では、R型の無次元流速勾配が高く、 $\pi/3 \sim \pi/2$ ($1.05 \sim 1.57$) ではB型、Fp型が大きい無次元流速勾配を示し、 $\pi/2$ 以後はS型が概して大きい点である。このように淵頭の形状によって最も流速勾配がつく水深は変化する。また、 $7\pi/6 \sim 4\pi/3$ ($3.66 \sim 4.18$) では、河床形状によらず、無次元流速勾配がほぼ一定値0.18を示す点も興味深い。すなわち、最深部を少し過ぎたあたりでは加速効果がほとんど各淵において等しいことを示している。S型を除いたいずれの淵も加速による効果によって最深部 $2\pi/3$ ($=2.09$) 以降は等流仮定の無次元流速勾配よりも低く、S型でも $7\pi/6$ 以降は低い。

すると、淵頭部はR型やB型と同様の形状にしつつも、位相 $\pi/2$ 付近にS型のような段差を設置すれば、最深部付近においても無次元流速勾配が大きくなり、雑食性魚類にとって待機空間が広がると考えられる。また、最深部以後は、A型やD型のように、最深部水深に近い場が続くよりも、S型やB型のように緩勾配の傾斜にすることにより、平均流速・流速勾配共に多様にする事ができる。直上の議論は、ウグイやオイカワといった雑食性魚類のみならず、シマドジョウやジュズカケハゼ等の底生魚にとっても有用であると考えられる。

5. 淵内の流れが底質に与える影響の考察

上述は、淵形状が流れに及ぼす影響に関する解析であったが、淵内における生物相は魚類だけではない。したがって、本章では、食物連鎖で下位の生物相に当たる底生生物に着目し議論を進める。

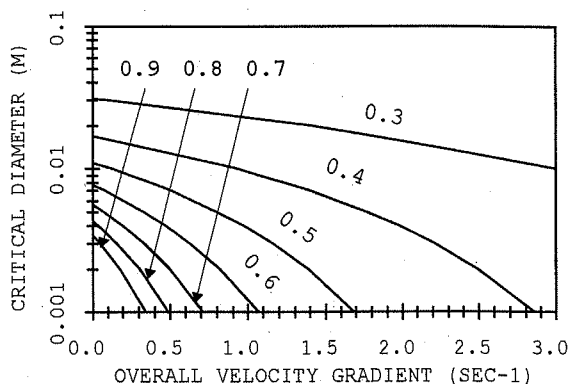


図-10 総括的流速勾配と移動限界粒径の関係
(図中の数字は水深(m))

平水時の流れが変わることで、砂やシルトといった細かい粒径が堆積しやすい場も変化するが、これは底生生物、特に細かい粒径を使用するモンカゲロウ科等の掘潜型底生昆虫の生息場に大きな影響を及ぼす。細かい粒径の土砂が堆積しやすい場の指標としては平水時の移動限界粒径を用いることが最も適切であると思われる。

通常、移動限界粒径の算定は、Shields (1936) や岩垣 (1956) による無次元掃流力 τ^* と粒子Reynolds数 R_* の関係を示すグラフに基づいて行われるが、いずれの曲線も等流仮定に基づいているために、加速・減速域における移動限界粒径は算出された値に比して各々大きくなる、若しくは小さくなると考えられる。以上の議論を総括的流速勾配を用いてもう少し定量的に考える。

移動限界流速を U_c 、移動限界粒径を d_c とすれば、両者の関係は次式(13)で表される。

$$\frac{U_c^2}{sgd_c} = A^* \quad (13)$$

ただし、 s : 礫の水中比重、 g : 重力加速度、 A^* : 土砂係数である。Egiazaroff (1963) によれば、河床の礫を動かす移動限界流速は中間径の0.63倍の高さにおける流速であるとされる。よって、流速分布形を直線で近似すれば、移動限界流速は直下となる。

$$U_c = \bar{U} + \frac{\lambda U}{\lambda y} \left(0.63d_c - \frac{D}{2} \right) \quad (14)$$

よって、式(13)と式(14)より、以下の式(15)が導かれる。

$$\frac{\sqrt{A^*sgd_c} - \bar{U}}{0.63d_c - D/2} = \frac{\lambda U}{\lambda y} \quad (15)$$

標準的な値として $s = 1.65$ とする。また、Forchheimer (1914) によれば $A^* = 1.0$ 、Carstens (1965) によれば $A^* = 3.61$ であるが、中間値として $A^* = 2.0$ とする。単位幅流量を $0.3 \text{ (m}^3/\text{sec} \cdot \text{m)}$ として総括的流速勾配と移動限界粒径の関係を式(15)によって描いたものが図-10である。図-10のようなグラフを得ることによって、堆積させたい粒径と、その場の平均流速・水深のオーダーにより、いか

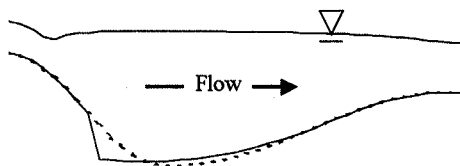


図-11 河道改修案（破線：B型，実線：改修後）

ほどの流速勾配をつけたらよいかを知ることができる。このように，流速勾配の多様性は，移動限界粒径の多様性につながり，移動限界粒径が大小様々に混在する淵は，掘潜型から造網型の底生昆虫の生息場にとって非常に好都合であるといえる。

6. 流速の多様性に着目した淵形状

前章まで，流速勾配を考慮することが生息場を考える上でいかに大切であるかに着目して，流速勾配を定量的に扱った議論を進めてきた。本章では議論で得られた知見を基に，いかなる河床地形で流速の多様性を最も大きくできるかについて考える。

すでに，類型化された6つの淵では，流速の多様性を発揮する水深がそれぞれ異なることを，無次元流速勾配を用いて示した。そして，位相 $\pi/2$ まではB型の淵であり， $\pi/2$ 以降はS型の淵であるような淵形状が，全域に渡って縦断方向・鉛直方向共に多様な流速の場を創出できるのではないかと述べた。そこで図-11に示すように一般的なB型淵の最深部をS型に変化させた場合を考える。これは，落差工を設置したと言うよりは，砂州形状にメリハリをつけた形となる。そして，この改修前，改修後，減速・加速の効果を無視した場合のそれぞれで計算を行い，結果を横軸に環境傾度位相，縦軸に無次元流速勾配を取ったグラフ上に示したものが図-12である。改修の効果で淵最深部付近の流速勾配が大きくなっている様子が見て取れる。

このように，多様な流れが淵内に混在することは，河川魚類が各々の行動に応じて適切な流れ場を選択できることを示しており，最大水深のみを考慮し，巨石投入等の局所的な流れの変化を考慮した淵の造成に比して，よりよい生息場となることが期待される。同時に，底質に対する流れのインパクトも変化するために，移動限界粒径に着目しつつ底生生物にとっての環境評価を行うことも可能となる。

7. おわりに

本研究で明らかとなった主要な点は次の通りである。

- (1) 流速の多様性を代表する指標として「総括的流速勾配」を考えることができる。特に総括的流速勾配を

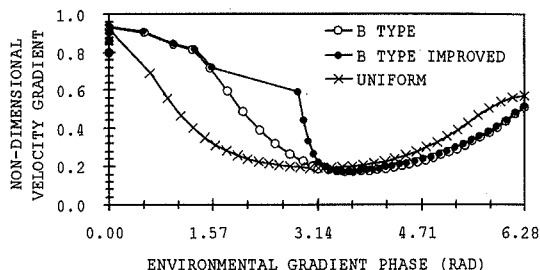


図-12 B型淵の改修前と改修後の無次元流速勾配の比較

水深・平均流速で無次元化した「無次元流速勾配」は相対的な流速の多様性を表現する。

- (2) 総括的流速勾配の高い点では，たとえPHABSIMによる評価値が低くとも，雑食性魚類の待機空間と捕食空間を確保する。
- (3) 一般鉛直座標系を用いた数値シミュレーションによって瀬淵規模の水深方向の流況を詳細に把握することができる。
- (4) 基本的な淵の形状は，各々の淵の形成要因から6つの型に類型化でき，環境傾度位相法を用いて相互に物理環境を比較することが可能である。
- (5) 位相 $\pi/2$ 以前ではR型・B型淵，以降ではS型淵の淵形状が流速の多様性を創出する。
- (6) 流速勾配の大小，すなわち流体の加減速は底質の移動限界粒径に影響し，河床を利用する底生生物に大きく影響する。
- (7) 類型化した淵形状における知見を用いて，多様な流速をもつ淵形状の決定が可能となる。

参考文献

- 1) 岡滋晃，知花武佳，玉井信行：鉛直流速勾配に着目した生態環境評価方法に関する考察，第5回応用生態工学研究会研究発表会講演集，pp.89-92，2001。
- 2) Burchard, H. and Petersen, O.: Hybridization between σ - and z -coordinates for improving the internal pressure gradient calculation in marine models with steep bottom slopes, *International journal for numerical methods in fluids*, Vol.25, 1003-1023, 1997.
- 3) 灘岡和夫，吉野忠和，二瓶泰雄：沿岸海水流動数値計算法の高度化のためのDual- σ 座標系の提案，土木学会論文集，No.656/II-52, pp.183-192, 2000。
- 4) 岡滋晃：河口域流動シミュレーションにおける座標変換の検討，大阪大学工学部卒業論文，2001。
- 5) 河川整備基金助成事業：瀬と淵の形成要因とそこでの水生生物に関する研究報告書，pp.7-14, 1999。
- 6) 知花武佳，玉井信行：生息域の季節変動に着目した魚類生息域適性基準に関する研究，水工学論文集，Vol.46, pp.1145-1150, 2002。

(2004. 4. 7受付)