

山地河川における瀬淵復元のための 実験工事とその効果予測

STUDY ON RESTORATION OF RIFFLE-POOL STRUCTURE IN MOUNTAIN RIVER BY USING GROIN PLACEMENT

清水義彦¹・小葉竹重機²・小林俊雄³・長田健吾⁴・中村佳央⁵・宮前太一⁴
Yoshihiko SHIMIZU, Shigeki KOBATAKE, Toshio KOBAYASHI, Kengo OSADA,
Yoshio NAKAMURA and Taichi MIYAMAE

¹正会員 博(工)群馬大学助教授 工学部建設工学科(〒365-8515 桐生市天神町1-5-1)

²正会員 工博 群馬大学教授 工学部建設工学科(〒365-8515 桐生市天神町1-5-1)

³群馬県土木部, 河川課長(〒371-8570 前橋市大手町1-1-1)

⁴学生会員 群馬大学大学院工学研究科(〒365-8515 桐生市天神町1-5-1)

⁵館林市役所(〒374-8501 館林市城町1-1)

Various artificial impacts of dams, weirs, the linearization of river channel by river improvement, quarrying and gravel picking, etc. have been added to rivers. Such impacts bring about the degeneration of inherent habitat, causing a loss of original species peculiar to rivers. As a habitat of the fish, the importance of riffle and pool has been indicated from river ecological studies. But, in some mountain rivers, it has been reported that the diminution of riffle-pool structure and the decreasing of fish population. Such situation occurs in the mountain streams of the River Tone tributaries and Gunma Prefecture has carried out the experimental restoration for reproducing of riffle and pool structure by the groin placement in mountainous segment of the River Kanna. This paper has tried to estimate such an effect of the experimental restoration from the morphological point by using depth-averaged flow and bed evolution analysis, considering the river channel characteristic of the field. The calculation result shows the possibility of the restoration of the riffle-pool structure through the river bed evolution caused by the groyne placement.

Key Words : River improvement, restoration, riffle-pool structure, groin, fish habitat, mountainous river gravel-bedr, 2D-numerical flow model

1. はじめに

河川には、ダムや堰の設置、河川改修による河道の直線化、河道掘削、護岸工事、採石・砂利採取など、さまざまな人為的インパクトが加えられてきた。こうしたインパクトにより、河川に住む生物の生息環境が劣化し、たとえば、魚類の数が減少してきたと言われている。魚類の生息場として、瀬・淵の重要性が従来より指摘され、瀬で摂食し淵で休息するといった一日のライフサイクルをはじめ、季節や成長段階に応じて、瀬・淵をさまざまに利用している¹⁾。ところが、瀬・淵といった河道ユニットが少なくなり、魚類の生息数が減少していることがいくつかの山地河川で報告されている。多摩川水系秋川においては²⁾、①大石の減少・埋没、②淵自体の消失、③砂利瀬の出現が、地域住民のアンケート調査から報告され、また、大量な砂利の発生によって、瀬・淵が埋ま

り、平坦化したことも指摘されている。こうした状況は、利根川水系の山地河川でも生じており、群馬県は、平成15年に、瀬・淵復元のための実験工事に関する検討(瀬と淵を取り戻す検討委員会、群馬県)を開始した。本研究は、その中で選ばれた利根川水系神流川の山地河川区間(下久保ダム上流、神流町古鉄橋付近)を対象に、水制設置による瀬淵の形成を平面流河床変動計算から検討し、その効果予測を行うものである。

2. 瀬淵復元のための実験工事の概要

瀬・淵復元の対象区間として選定された利根川水系神流川上流区間(セグメントM)では、地域住民や釣り人のヒアリングによると、かつては背丈以上の深みのある淵がよく見られ、めりはりのある瀬淵のパターンが随所

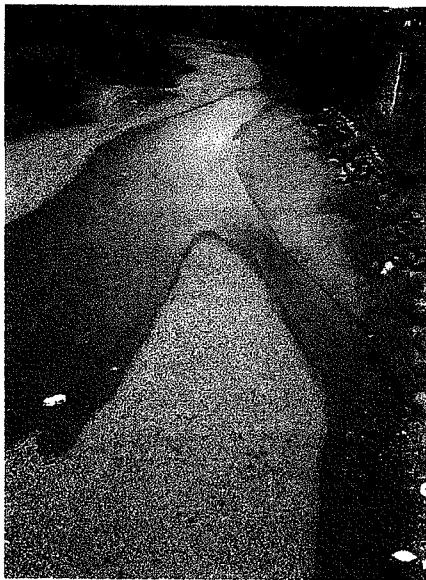


写真-1 実験工事対象区間（水制設置前）



写真-2 実験工事対象区間（水制設置直後）

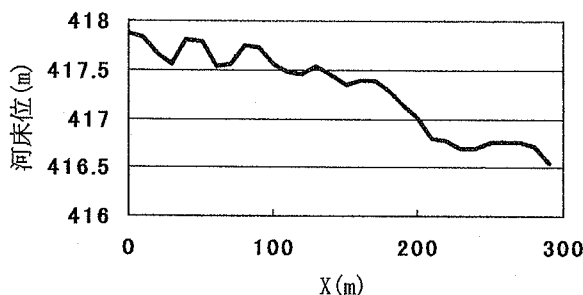


図-1 最深河床をつないだ縦断曲線（水制設置前）

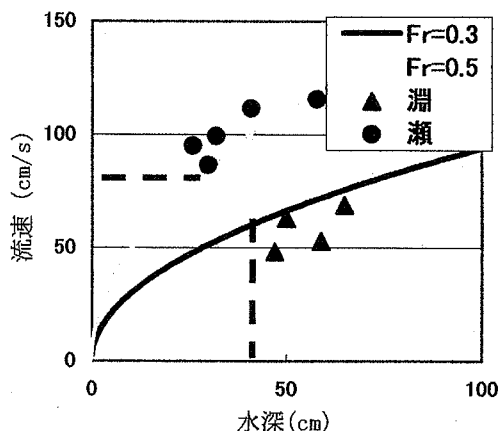


図-2 現況河道の瀬、淵の領域区分

に存在していたとのことである。ところが、昭和50年以前に盛んに行われた採石（とくに巨石の採取）や近年の出水（例えば平成11年8月豪雨）による土砂流入から河道内に細い砂礫成分が増え、淵の埋めもどしによって以前見られた淵が消失している。現地調査によれば、河岸から突き出した岩や河道内に巨石が点在する箇所では、局所的な流量集中から洗掘部を作り、周辺に深みのある地形が残されている。一方、砂利、細砂の流送が顕著のようである礫の埋没、州が形成されるなど堆積性河川の様相も観察された。こうした特徴を踏まえ、瀬・淵の復元手法として、水制を設置し局所的に掃流力を高める実験工事が選択された。

瀬・淵を復元するために選定された地点は、神流町古鉄橋付近の神流川で、河床勾配1/200、平均粒径3cm（ただし細砂分は除いた）の礫床河川である。山地河川としては勾配がゆるく、地域住民の聞き取りによれば、近年、淵が埋め戻される傾向にあると言われている。写真-1は、古鉄橋から上流に向けて撮った写真（水制設置前）で、砂利州が広がり、山地河川によく見られる基岩の露出、深みのある淵と言った特徴があまり見られない。図-1は、最深河床をつないだものの縦断曲線で、上流側に見られる

凹部は左岸水際に形成された淵にあたり、 $x=160\text{m}$ から200mにかけて勾配が急で、この付近は平瀬に相当する。一般に、急勾配な山地河道では淵-平瀬-早瀬の1サイクルが繰り返されるが³⁾、ここでは勾配が緩く早瀬に相当する箇所が見出しにくい。写真-1から分かるように、上流では川幅の狭い蛇行流路を形成しているが、対象区間では全体的に水深が薄く川幅の広い、流れが発散型の河道形態となっている。一般に、山地河川で見られる河道単位形態はAa型が代表的であるが、現地河道特性からBb型の単位形態からなる瀬淵の復元が妥当であると判断した。そこで、2基の水制（巨石積みによる水制でわずかな間隙空間を有するものの、基本的には不透水水制）を設置し、みお筋を蛇行させながら河床変動によって鮮明化することで瀬淵を形成させることが計画された。写真-2は、水制設置直後（平成16年2月）の状況を示したもので、上流から流れを左岸水制（以下、第1水制とよぶ）により、水はねと流量集中を起こしてみお筋を形成させ、下流対岸（右岸）の第2水制により流路を蛇行さ

せる。今後の出水を待って、生じる地形変化と、魚類、底生動物等の個体数と分布状況、礫表面の付着藻類などをモニタリングすることが計画されている。

3. 平面流河床変動計算による効果予測

(1) 瀬淵復元の効果予測のフレーム

水制の設置による瀬淵復元の効果予測は、水制設置前の河川地形（測量地形）と、水制設置後に与えられた流量条件での河床変動計算から求めた河川地形のそれぞれで、同一流量条件での流況比較から行う。ここで、水制設置前の河川地形と流況観測（平成15年10月に実施）では、現地での河床測量、水深、電磁流速計を用いた流速計測を行い、観測流量（約4m³/s）での瀬、淵を含む横断面の各点で流速値、水深値を求めた。図-2は観測流量時における瀬、淵と区分できた地点の水深・流速座標図で³⁾、瀬に対応する領域は、流速>80cm/s、水深<60cm、Fr数>0.5の範囲にあり、淵に相当する領域は、流速<70cm/s、水深>45cmでFr数<0.3となった。

(2) 平面流河床変動解析

流れの解析および河床変動計算は以下に示す一般化座標系平面流数値計算から行った。流れの基礎式は平面2次元流の連続式および運動量輸送式で、これらを一般化座標系（ ξ, η ）に変換し、流速ベクトルと流量ベクトルの反変成分を未知量とする基礎方程式系を用いて解析する。このような方程式系は長田⁴⁾によれば、次のように示されている。

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{h}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{Uh}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{Vh}{J} \right) = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{Q^\xi}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{UQ^\xi}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{VQ^\xi}{J} \right) \\ & - \frac{M}{J} \left(U \frac{\partial \xi_x}{\partial \xi} + V \frac{\partial \xi_x}{\partial \eta} \right) - \frac{N}{J} \left(U \frac{\partial \xi_y}{\partial \xi} + V \frac{\partial \xi_y}{\partial \eta} \right) \\ & = -gh \left(\frac{\xi_x^2 + \xi_y^2}{J} \frac{\partial z_s}{\partial \xi} + \frac{\xi_x \eta_x + \xi_y \eta_y}{J} \frac{\partial z_s}{\partial \eta} \right) - \frac{\tau_b^\xi}{\rho J} - \frac{F^\xi}{\rho J} \\ & + \frac{\xi_x^2}{J} \frac{\partial}{\partial \xi} \left(-\overline{u'^2 h} \right) + \frac{\xi_x \eta_x}{J} \frac{\partial}{\partial \eta} \left(-\overline{u'^2 h} \right) \\ & + \frac{\xi_y^2}{J} \frac{\partial}{\partial \xi} \left(-\overline{v'^2 h} \right) + \frac{\xi_y \eta_y}{J} \frac{\partial}{\partial \eta} \left(-\overline{v'^2 h} \right) \\ & + \frac{\xi_x \eta_y + \xi_y \eta_x}{J} \frac{\partial}{\partial \eta} \left(-\overline{u'v' h} \right) + \frac{2\xi_x \xi_y}{J} \frac{\partial}{\partial \xi} \left(-\overline{u'v' h} \right) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{Q^\eta}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{UQ^\eta}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{VQ^\eta}{J} \right) \\ & - \frac{M}{J} \left(U \frac{\partial \eta_x}{\partial \xi} + V \frac{\partial \eta_x}{\partial \eta} \right) - \frac{N}{J} \left(U \frac{\partial \eta_y}{\partial \xi} + V \frac{\partial \eta_y}{\partial \eta} \right) \\ & = -gh \left(\frac{\xi_x \eta_x + \xi_y \eta_y}{J} \frac{\partial z_s}{\partial \xi} + \frac{\eta_x^2 + \eta_y^2}{J} \frac{\partial z_s}{\partial \eta} \right) - \frac{\tau_b^\eta}{\rho J} - \frac{F^\eta}{\rho J} \\ & + \frac{\xi_x \eta_x}{J} \frac{\partial}{\partial \xi} \left(-\overline{u'^2 h} \right) + \frac{\eta_x^2}{J} \frac{\partial}{\partial \eta} \left(-\overline{u'^2 h} \right) \\ & + \frac{\xi_y \eta_y}{J} \frac{\partial}{\partial \xi} \left(-\overline{v'^2 h} \right) + \frac{\eta_y^2}{J} \frac{\partial}{\partial \eta} \left(-\overline{v'^2 h} \right) \\ & + \frac{\xi_x \eta_y + \xi_y \eta_x}{J} \frac{\partial}{\partial \xi} \left(-\overline{u'v' h} \right) + \frac{2\eta_x \eta_y}{J} \frac{\partial}{\partial \eta} \left(-\overline{u'v' h} \right) \end{aligned} \quad (3)$$

ここに、 $\xi_x, \xi_y, \eta_x, \eta_y$; 座標変換のメトリックス

（添え字に関する微分を表す）、 J ; 座標変換のヤコビアンで、流速ベクトル及び流量フラックスの反変成分は以下となる。

$$\begin{aligned} U &= \xi_x u + \xi_y v, V = \eta_x u + \eta_y v \\ Q^\xi &= \xi_x M + \xi_y N, Q^\eta = \eta_x M + \eta_y N \end{aligned} \quad (4)$$

ただし、 u, v ; デカルト座標系での x, y 方向流速、 M, N ; x, y 方向流量フラックス（ $M=uh, N=vh, h$; 水深）、 z_s は基準面からの高さ、 U, V ; 流速ベクトルの反変成分である。また、底面せん断応力の反変成分は、

$$\tau_b^\xi = \xi_x \tau_{bx} + \xi_y \tau_{by}, \tau_b^\eta = \eta_x \tau_{bx} + \eta_y \tau_{by} \quad (5)$$

$$\tau_{bx} = \frac{\rho g n^2 u \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{1/3}}, \tau_{by} = \frac{\rho g n^2 v \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{1/3}} \quad (6)$$

となる（ g ; 重力加速度、 n ; Manning粗度係数）。

河床変動の解析では流砂量式として芦田・道上式、横断方向流砂量式には長谷川式⁵⁾を用い、次式の一般化座標系の流砂連続式から評価した。

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{z_b}{J} \right) + \frac{1}{1-\lambda} \left(\frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{q_B^\xi}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{q_B^\eta}{J} \right) \right) = 0 \quad (5)$$

ただし、 (q_B^ξ, q_B^η) : 流砂量の反変成分である。水制はそ

の設置領域における河床高さを水制の幾何条件に合わせることで表現し、水制領域での流砂量はゼロ、水制上流面の計算格子点では、水制を乗り越える流砂ベクトル成分はゼロとした。河床変動計算では平均粒径3cmを与えた一様粒径での計算とし、マニング粗度係数はManning-Strickler式から与えた（ $n=0.023$ ）。上流端では河床を一定とし、流量を与え、最下流端では水深・流量曲線を作り、流量に応じた水深を与えた。計算流量は水位が水制上面（第一水制）に達する流量規模が150m³/s程度であるため、これ以下の流量規模で計算した。

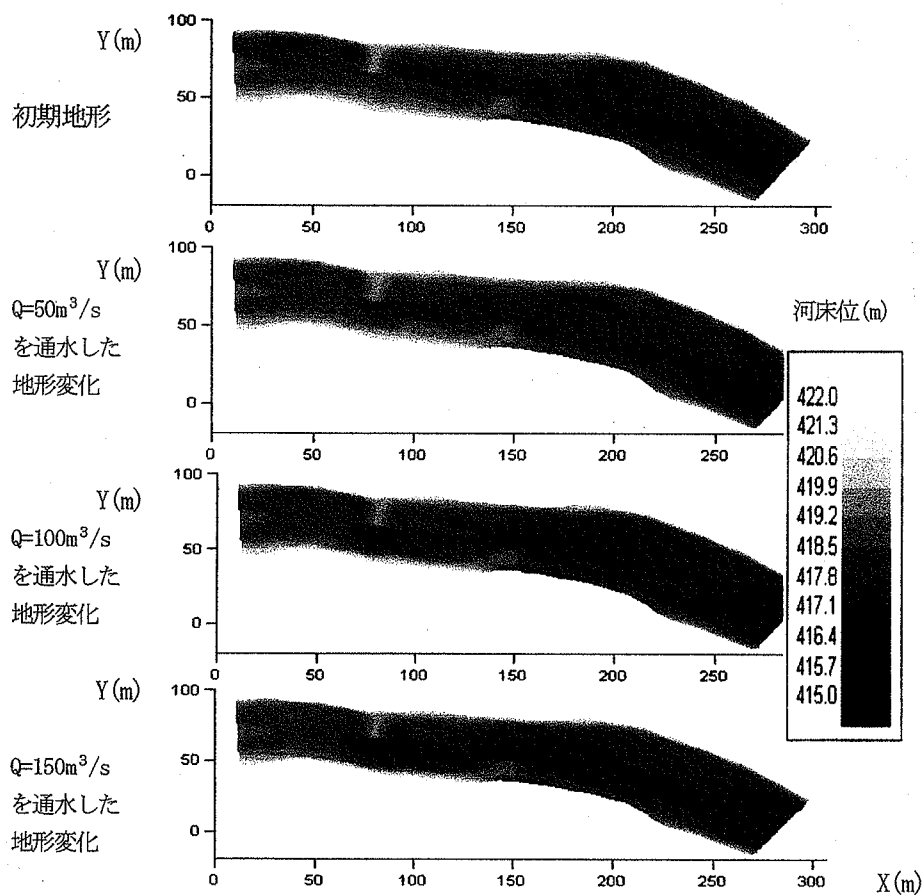


図-3 初期地形と河床変動計算後の地形コンター図

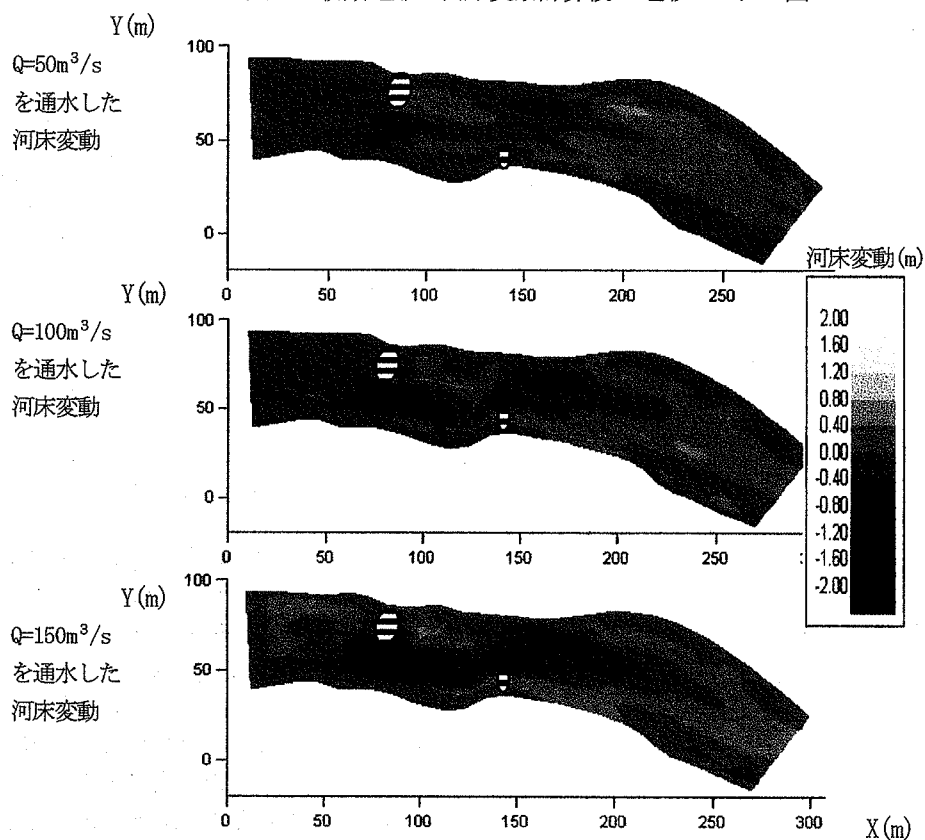


図-4 河床変動量の地形コンター図

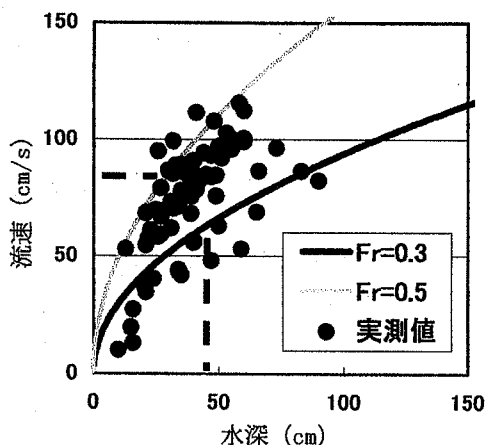


図-5(a) 観測時の水深・流量関係 (流量 $4\text{m}^3/\text{s}$)

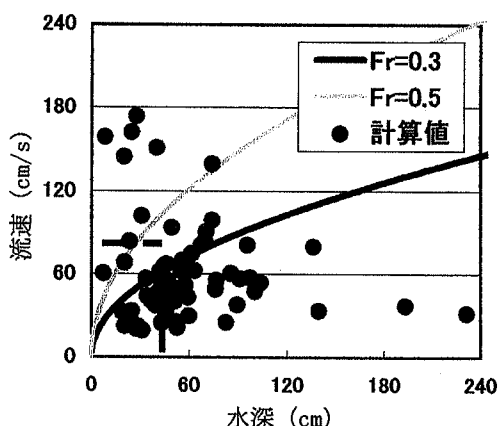


図-5(b) 水制による河床変動後の
水深・流量関係 (流量 $4\text{m}^3/\text{s}$)

なお、 $150\text{m}^3/\text{s}$ を超える年最大流量の発生頻度は1.7年に1回程度である。

(3) 水制による瀬淵復元の効果予測

計算流量(Q)を $50\text{m}^3/\text{s}$ 、 $100\text{m}^3/\text{s}$ 、 $150\text{m}^3/\text{s}$ として、水制の地形に及ぼす変化を求めた。図-3は、初期地形およびそれぞれの流量で5時間通水した場合の計算地形コンターである(付図1に流速ベクトルも示した)。また、図-4には対応する流量規模別の河床変動量を示した。水制を設置した場合、水制先端から下流にかけて洗掘部を形成し、初期地形に比べると低水路の蛇行が顕著となる。本来、Bb型の瀬淵では、流路の蛇行間にできた深掘れ(淵)をつなぐ間に、平瀬-早瀬のパターンが生まれるため、地形の等値線間隔の粗密によって表現される微地形が重要である。図-5(a)には、図-2に対応した流速-水深図(図-2では図-5(a)のうち瀬淵に相当するものだけ抜き出した)で、水制設置前での河床地形(初期地形)で観測した流速値、水深値をプロットしたものである(観測流量は約 $4\text{m}^3/\text{s}$)。一方、図-5(b)は、 $150\text{m}^3/\text{s}$ で5時間通水した後の地形において、観測流量($4\text{m}^3/\text{s}$)

を流した場合の流速値、水深値をプロットした(図-5(a)と同じ観測点での流速値、水深値の変化を示した)。これより、先に示した瀬淵の判定基準、すなわち、瀬の領域(流速 $>80\text{cm/s}$ 、水深 $<60\text{cm}$ 、Fr数 >0.5 の範囲)、および淵の領域(流速 $<70\text{cm/s}$ 、水深 $>45\text{cm}$ でFr数 <0.3 の範囲)の中にプロットされるものが増加している。図-6(a)、(b)、(c)には、流量規模別に河床変動を起こした地形で、横断の最深部を縦断的につないだ計算河床位に、観測日流量($4\text{m}^3/\text{s}$)を流した場合の計算水位を併記した。 $150\text{m}^3/\text{s}$ 流量で河床変動を起こした場合、水面形の変化から、平瀬-早瀬-淵のサイクルが生じる傾向にある。とくに、第一水制に起因する最深の淵の直上流では水面勾配が切り立った早瀬が形成されている。

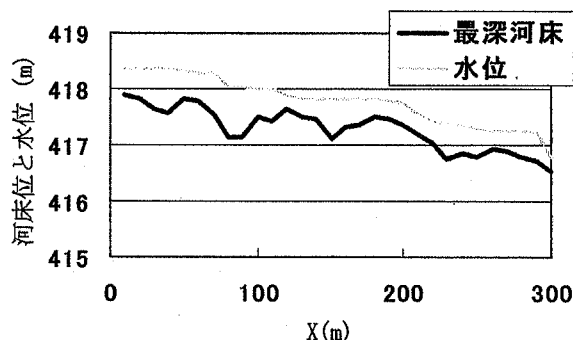


図-6(a) 水制設置後に $Q=50\text{m}^3/\text{s}$ を通水した後の
最深河床の縦断曲線と水面との関係

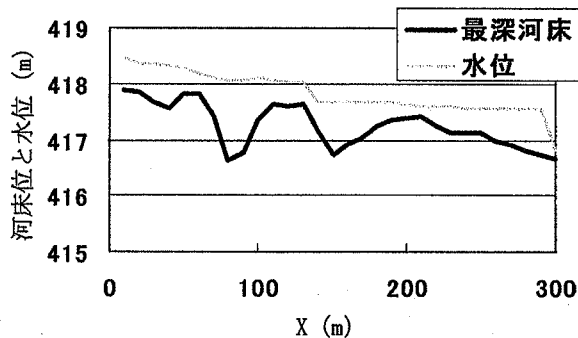


図-6(b) 水制設置後に $Q=100\text{m}^3/\text{s}$ を通水した後の
最深河床の縦断曲線と水面との関係

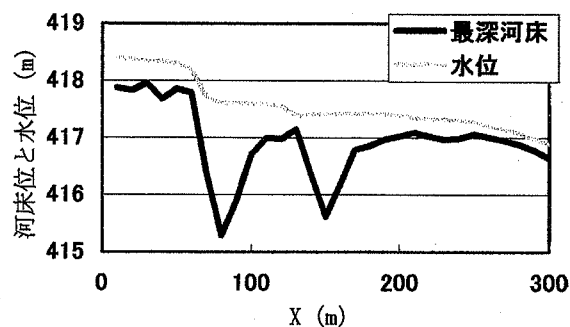


図-6(c) 水制設置後に $Q=150\text{m}^3/\text{s}$ を通水した後の
最深河床の縦断曲線と水面との関係

4. あとがき

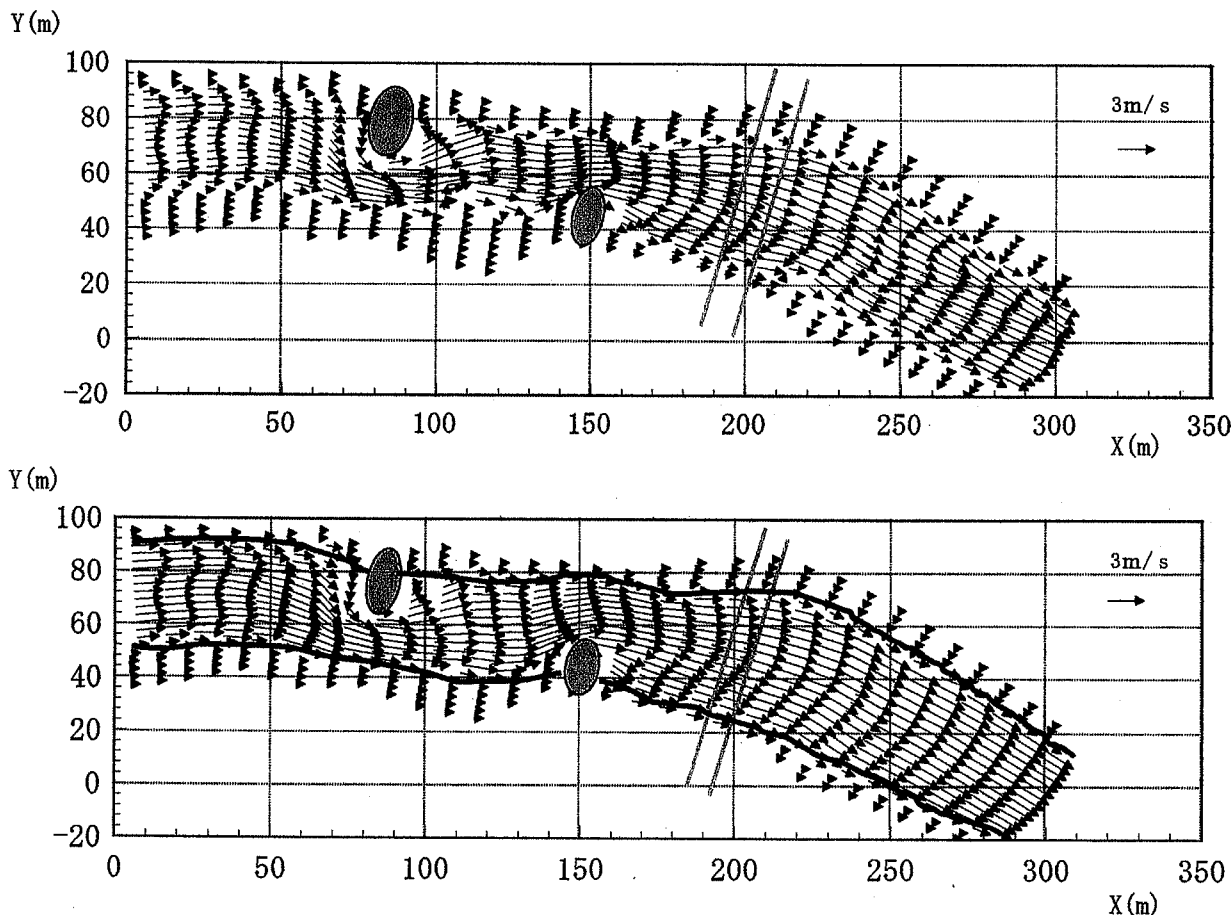
本研究では、近年、いくつかの山地河川で報告されている瀬淵の消失を、水制設置による実験工事によって復元しようとの試みに対して、簡単な条件設定のもとに数値計算からその効果予測を行ったものである。水制による瀬淵の形成が予測されたものの、実際には洗掘の進行に伴って岩盤基盤層が露出したり（河床変動の拘束条件）、ここでは取り扱わなかった細砂流送の影響（洗掘箇所の埋め戻し）など、計算で予測した河道地形との差異が生じる。ただし、その差異を評価しながら、瀬淵の再生に果たす水制の効果を評価するためには、簡単な条件設定とは言え、ベースとなる情報を本研究は与えるものと考えている。また、実験工事たる所以はその後のモニタリングによる総合評価を目的としており、物理基盤の変化のみならず生物生息環境としての変化も併せて効果評価することを考えている。

実験工事は、群馬県による「瀬と淵を取り戻す検討委

員会」のもとに行ったもので、水生生物に関する有意義な議論、資料について快く提供いただきました同委員会に、記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 水野信彦・御勢久右衛門：河川の生態学，築地書館，pp.118-133，1993.
- 2) 田中倫之・知花武佳・辻本哲郎：秋川における瀬・淵の変質パターンの解明 - 漁業関係者の認識を通して -，河川技術論文集，第9巻，土木学会水工学委員会河川部会，pp.427-432，2003.
- 3) 野上毅・渡邊康玄・長谷川和義：急流河川における生息場としての河床地形区分，水工学論文集，46巻，pp.1127-1132，2002.
- 4) 長田信寿：一般化座標系を用いた平面2次元非定常流れの数値解析，水工学における計算機利用の講習会講義集，土木学会水理委員会基礎水理部会，61-76，1999.
- 5) 長谷川和義：沖積河川における流れと河床変動の予測手法に関する水理学的研究，北海道大学博士，1984.



付図1 計算ベクトル図（上は $50\text{m}^3/\text{s}$ ，下は $150\text{m}^3/\text{s}$ を5時間通水した後の河床地形に通水したもの）

(2004. 4. 7受付)