
参考資料編

1. 現地調査に基づく瀬切れ予測モデルの構築手法の解説 参 1-1
 2. アユ等の魚類の生息環境要因（耐候性） 参 2-1
 3. バーブ工（上向き水制）の関連論文 参 3-1
-

1. 現地調査に基づく瀬切れ予測モデルの構築手法の解説

1. 現地調査に基づく瀬切れ簡易予測モデルの構築手法の解説

瀬切れ簡易予測モデル（以下、予測モデル）は、水面の出現状況を目的変数、流量や地形データ等を説明変数とした多変量ロジスティック回帰分析を用いて構築する。

《予測モデルの構築方針》

瀬切れ現象を予測可能なモデルとしては表流水と地下水を一体化した水理モデルなどがあるが、その構築には多大な費用や時間を要するため多くの河川に適用することが困難である。このため、簡易に瀬切れ現象を予測可能なモデルとして多変量ロジスティック回帰分析を用いている。

高時川では、瀬切れ実態調査により瀬切れ箇所と水面分布を記録し、対象範囲の河道微地形を反映した1辺5mのメッシュ上にトレースし、メッシュ毎に水面・陸地を判別した。

瀬切れ実態調査で確認したメッシュ毎の水面出現状況を目的変数、頭首工放流量およびメッシュ毎の河道内地盤高データ等を説明変数とした多変量ロジスティック回帰分析を行い、メッシュ毎の水面出現確率を算出し、水域分布を予測するモデルとした。

なお、当モデルでは河床変動を考慮できないため、現河床から将来予測を行うこととなり、河床の変動幅が小さいことが前提条件となるため、対象河川の河道特性を踏まえた上で採用を検討する必要がある。今回対象とした区間では、大きく堆積、洗掘傾向にある区間はなく、平均河床幅は概ね±1mに収まっていることから、当モデルの適応が可能と判断した。

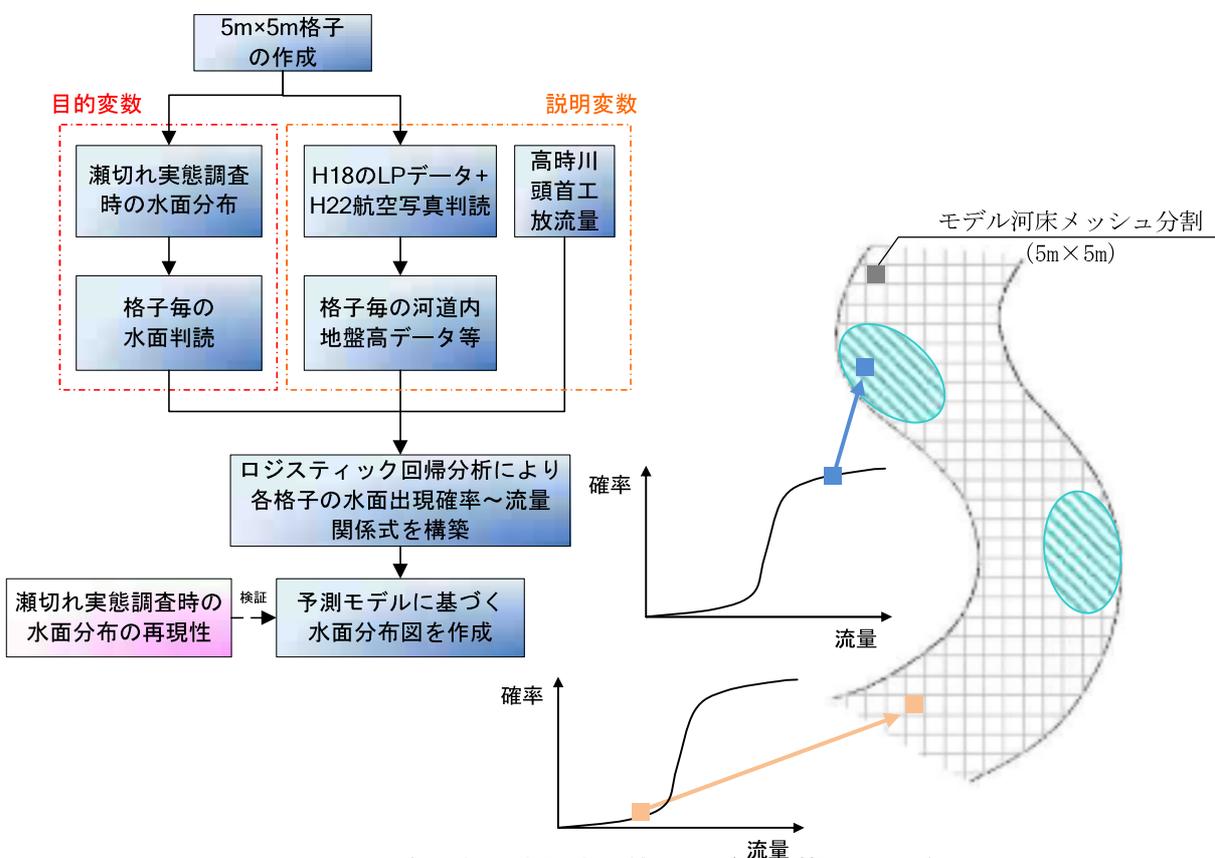


図 1.1.1 瀬切れを表現する簡易モデル構築イメージ

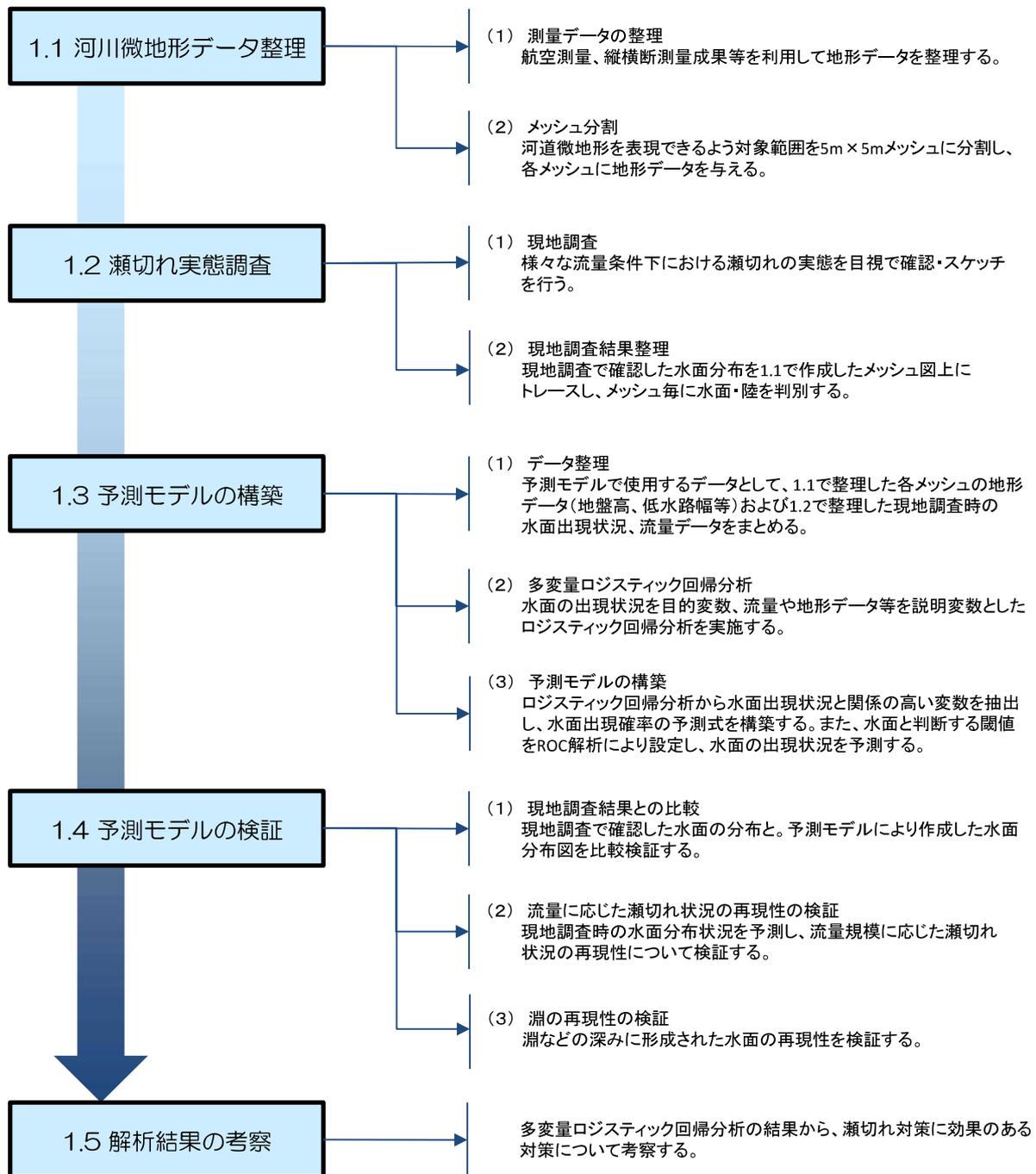


図 1.1.2 予測モデル構築手法のフロー

1.1 河川微地形データ整理

航空測量、縦横断測量および航空写真から、河道微地形および周辺地形を整理する。なお、データ整理は、予測モデルでの河道微地形を表現できるメッシュサイズとする。（高時川では5m×5mメッシュとした。）

(1) 測量データの整理

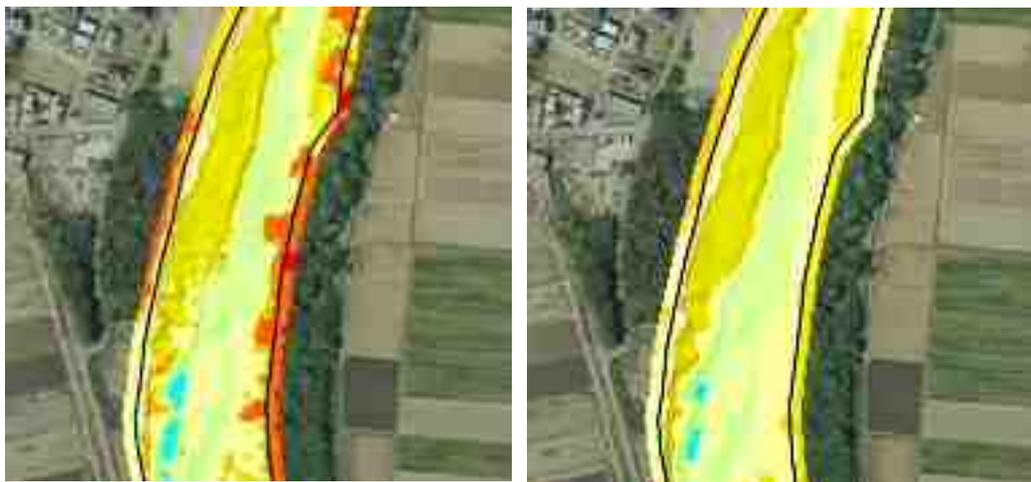
高時川では、平成18年度の航空測量によるLP（レーザプロファイラ）データ（以下、H18航空測量LP）が瀬切れ時での空撮でなかったため、平成22年撮影の近畿地方整備局琵琶湖河川事務所の所有している「B-SKYのオリジナル航空写真」を用い、立体視作業を実施し、低水路内の河床微地形データを作成した。

1) 資料収集、整理

作業にて必要な資料を収集し、整備範囲及びデータ整備手法の確認を実施した。

2) 航空写真から数値標高データの作成

- ①平成22年度撮影成果（航空写真スキヤニングデータ及び外部標定要素解析データ）を基に、画像マッチング（写真を立体視し、標高情報を取得する手法）により、表層の標高データを作成した。
- ②次に、H22年度オルソ画像データを基に、表層の標高データより、地表面以外のデータ（樹木、構造物、草地など）を目視判断により取り除く作業を行い、低水路内の地盤標高データを作成した。



①表層面標高データ段彩表

②地盤標高データ段彩表示

凡例：青系（低い） < 黄系 < 赤系（高い）

図 1.1.1 航空写真から数値標高データの作成

3) H18 近畿 LP 成果とのデータ整合

H22 航空写真を基に生成した地盤標高データ（以下、「H22 航空写真立体視成果」と記す）と H18 航空測量 LP データについて、それぞれ撮影された年度、季節が異なり、またデータの生成手法が異なることから、それぞれの特徴を生かしたデータ整合を実施した。以下にそれぞれの特徴を示す。

【H18 航空測量 LP の特徴】

- ・水面部について標高値が取得されていない。
- ・樹木が茂っている箇所や低草の多い箇所でも地表面が取得されている。

【H22 航空写真立体視成果の特徴】

- ・H18 近畿レーザ計測時に水面部だった場所や中州の地表面が取得されている。
- ・経年変化箇所（流水の流量変化に伴う河道形状の異なる場所）の地表面が取得されている。

両者を比較し、できるだけ地表面を捉えている成果を採用し、地盤標高データの整備を行なった。

(2) メッシュ分割

予測モデルでの河道微地形を表現できるメッシュサイズに分割し、各メッシュに地形データを与える。高時川では 5m×5m メッシュでデータを整備した。

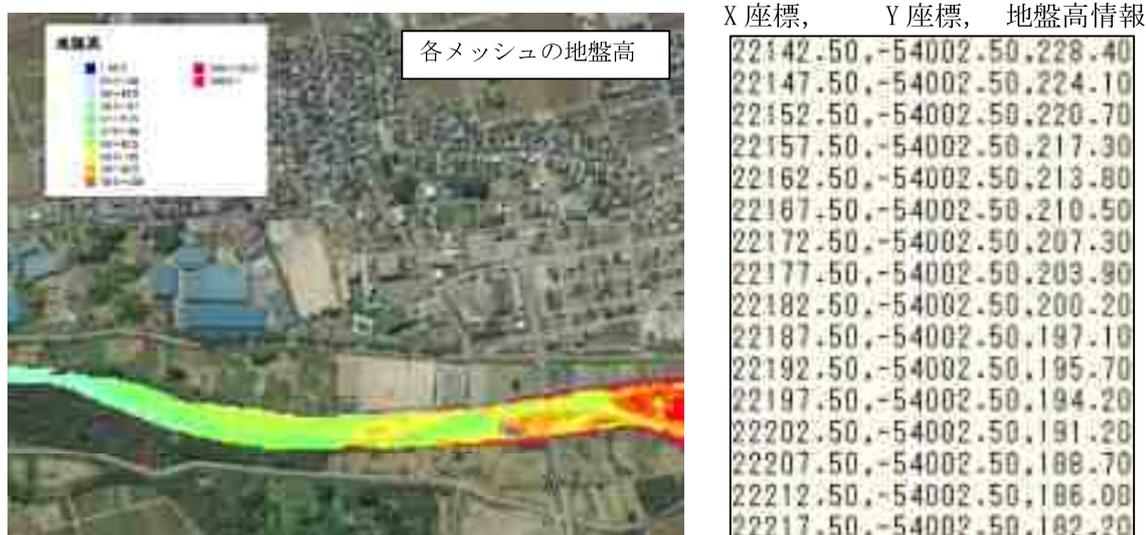


図 1.1.2 データ作成サンプル

1.2 瀬切れ実態調査

予測モデル対象範囲の全川における瀬切れ実態調査を行う。
調査は瀬切れが生じている時期の様々な流量条件下で行い、定点写真や目視観測により河道内の瀬切れの平面分布を整理し、瀬切れ箇所・水面積を概略把握する。

(1) 現地調査

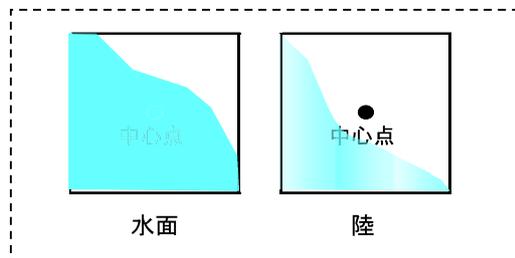
橋上や堤防上などの視界が広い箇所から目視観測および定点写真を撮影し、河道内の瀬切れの平面分布を整理、瀬切れ箇所・水面積を概略把握する。



図 1.2.1 調査イメージ

(2) 現地調査結果整理

現地調査で確認した水面分布を作成したメッシュ図にトレースし、メッシュの中心点に水面が存在した場合を水面と定義し、メッシュ毎に水面・陸に判別する。



[調査による水面位置]



[5m×5m メッシュにおける水面分布]



図 1.2.2 瀬切れ調査（水面域）とメッシュの整理例

1.3 予測モデルの構築

各メッシュの水面出現状況を目的変数、流量および地形データ等を説明変数とした多変量ロジスティック回帰分析を行い、メッシュ毎の水面出現確率を算出し、水域分布を予測するモデルを構築する。

なお、各メッシュの地形データ等は固定値であるため、本モデルは流量変動に応じたメッシュ毎の水面確率の関係を求めるものとなる。

(1) データ整理

「1.1 河川微地形データ整理」「1.2 瀬切れ実態調査」で整理したデータを用い、メッシュ毎に各調査回の水面の出現状況や流量、瀬切れと関連の高い地盤高、水面との比高差、低水路幅などのデータを整理する。

表 1.3.1 データ整理の例

ID	Num	Y	X1	X2	X3	X4	X5
5648	1	1	1.2	87.8	3.2	1	16.1
5647	1	0	1.2	87.2	3.8	1	16.1
5749	1	1	1.2	88.8	2.2	1	16.1
5748	1	0	1.2	88	3.0	2	15.3
5747	1	1	1.2	89	2.0	2	15.3
5746	1	0	1.2	90	1.0	3	14.6
5745	1	0	1.2	88.8	2.2	3	14.6
5744	1	1	1.2	88.5	2.5	3	14.6
5648	2	1	5.3	87.8	3.2	1	16.1
5647	2	1	5.3	87.2	3.8	1	16.1
5749	2	1	5.3	88.8	2.2	1	16.1
5748	2	1	5.3	88	3.0	2	15.3
5747	2	1	5.3	89	2.0	2	15.3
5746	2	0	5.3	90	1.0	3	14.6
5745	2	1	5.3	88.8	2.2	3	14.6
5744	2	1	5.3	88.5	2.5	3	14.6

項目	内容
ID	番号
Num	回
Y	水面の出現状況
X1	流量
X2	地盤高
X3	水面と地盤高の比高差
X4	縦断距離区分
X5	低水路幅

(2) 多変量ロジスティック回帰分析

格子毎の水面出現確率を算出するため、水面の出現状況を目的変数、高時川頭首工放流量、地盤高、水面と地盤の比高差、縦断距離区分、低水路幅を説明変数として一般化線形混合モデルに基づく多変量ロジスティック回帰分析を実施する。統計解析はフリー統計ソフト R で実施することができる。(http://cran.r-project.org/)

なお、説明変数間に強い相関関係が存在する場合、結果の信頼性が低くなるため、分散拡大係数 (VIF) を算出し、変数のスクリーニングを行う。VIF が 10 以上の説明変数については、目的変数との関係が強い方を採用することとする。

```
[解析に用いたプログラム]
library(glmML)
segire <- read.table("segtire.csv", header=TRUE, sep=",", na.strings="NA", dec=".", strip.white=TRUE);
glmML <- glmML(Y~X1+X2+X3+X4+X5, data=segire, family=binomial, cluster=id)
summary(glmML)
```

「(1) データ整理」で作成したデータのファイル名

表 1.1 の変数 ※VIF 解析による変数スクリーニングした後の変数を使用

↓ R Console に挿入



図 1.3.1 R によるロジスティック回帰分析の例

(3) 予測モデルの構築

1) 予測モデル式の構築

ロジスティック回帰分析の結果、水面の出現状況と有意な相関関係（ $P < 0.05$ ）のみられる説明変数を用いて予測モデル式を構築する。

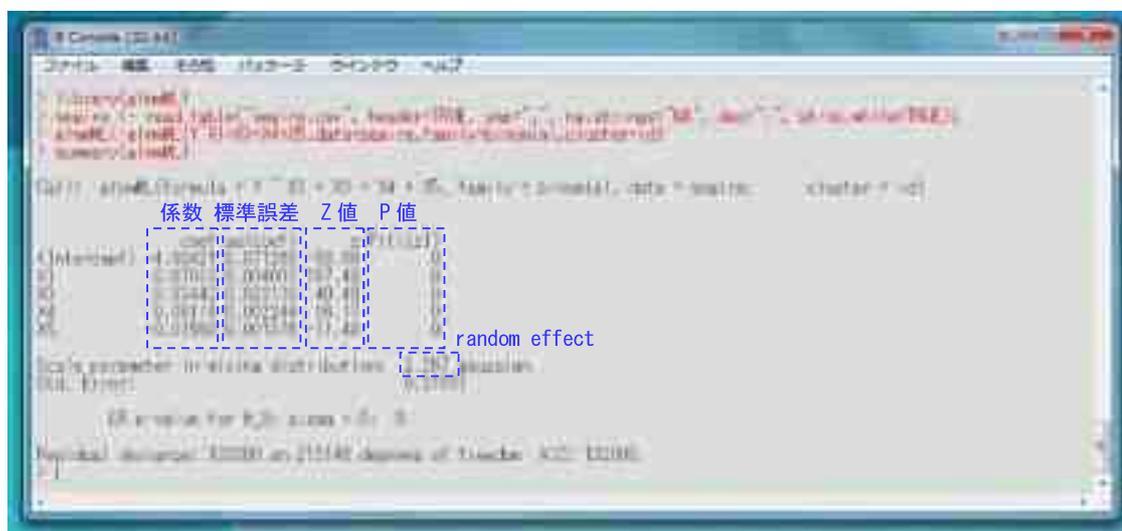


図 1.3.2 Rによるロジスティック回帰分析の結果の例

表 1.3.2 多変量ロジスティック回帰分析結果（高時川の場合）

変数	係数	標準誤差	Z 値	P 値
(切片)	-4.90			
高時川頭首工放流量（ x_1 ）	0.67	0.004	167.48	<0.001
水面と地盤の比高差（ x_3 ）	0.93	0.023	40.4	<0.001
縦断距離区分（ x_4 ）	0.08	0.002	36.17	<0.001
低水路幅（ x_5 ）	-0.02	0.001	-11.48	<0.001
random effects	2.22			

$$p = \frac{1}{1 + \exp(4.90 - 0.67x_1 - 0.93x_3 - 0.08x_4 + 0.02x_5 - 2.22)} \quad \text{予測モデル式)$$

2) ROC 解析

このモデルで推定された各メッシュの水面出現確率は 0~100%の範囲をとる。この予測モデルを水面出現予測に適用することを考えると、推定された出現確率に対して水面が出現する・出現しないと判断する閾値が必要となる。この閾値は ROC 解析を用いて判断する。

高時川では、Sensitivity (感度) と 1-specificity (特異度) の優れた独立変数の ROC 曲線は、左上隅に近づくことから、この左上隅との距離が最小となる点を閾値とした。閾値の設定は決まりがないため、水面の正解率を重んじる場合は“Sensitivity (感度) が 90%” の場合の水面出現確率を閾値とするなど状況に応じて設定すると良い。

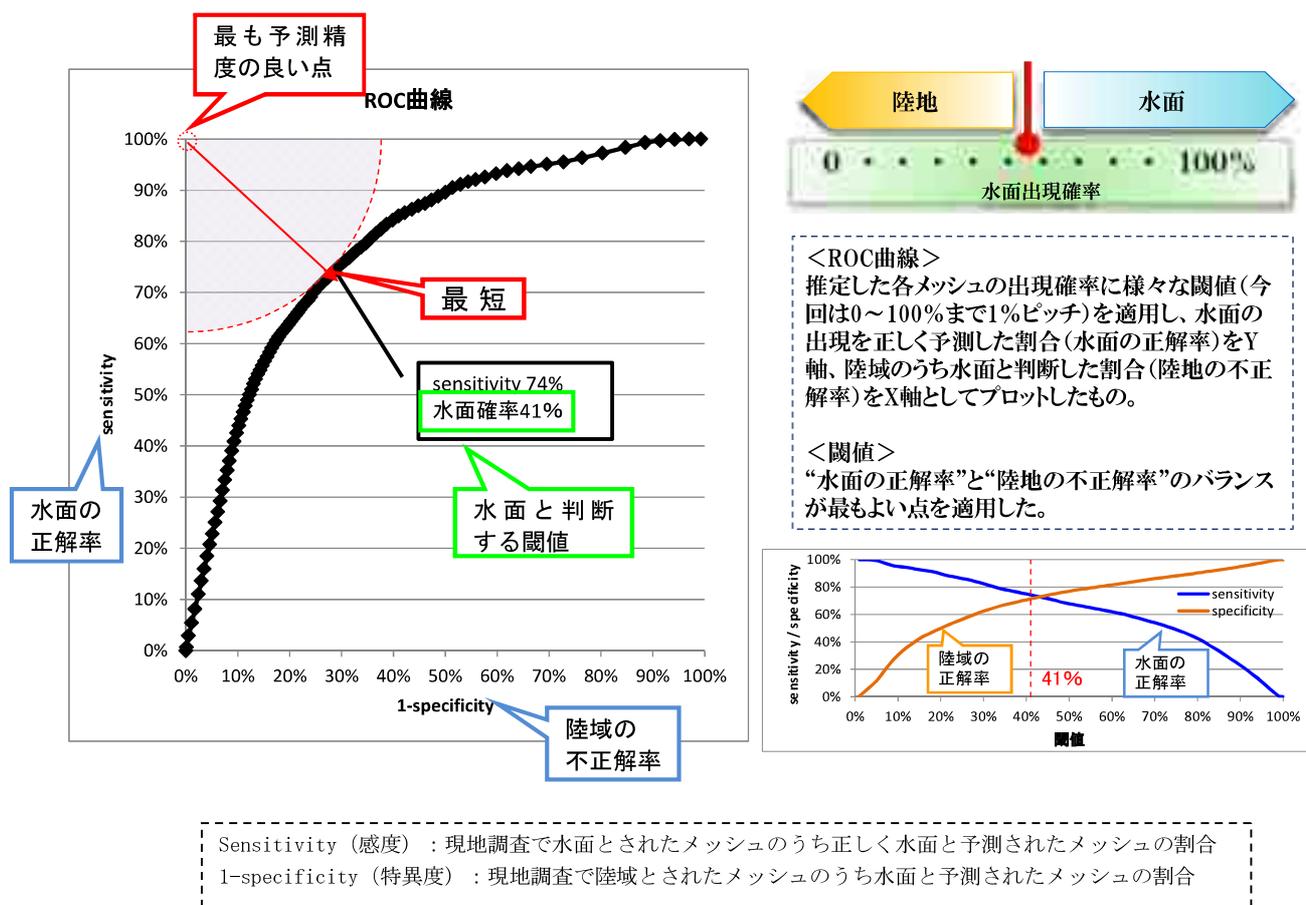


図 1.3.3 ROC 曲線

水	水	陸	陸	陸
水	水	陸	陸	陸
水	水	陸	陸	陸
陸	水	水	水	陸
陸	水	水	水	陸
陸	陸	陸	水	陸

- 現地調査により水面とされたメッシュ
- 現地調査により陸域とされたメッシュ
- 水 モデルで水面と予測とされたメッシュ
- 陸 モデルで陸域と予測とされたメッシュ

Sensitivity(感度) = 現地調査で水面とされたメッシュのうち正しく水面と予測されたメッシュの割合

$$= \frac{\text{水}}{\text{水}} = 8\text{メッシュ} \div 10\text{メッシュ} = \underline{\underline{80\%}}$$

1-Sensitivity(特異度) = 現地調査で陸域とされたメッシュのうち水面と予測されたメッシュの割合

$$= \frac{\text{水}}{\text{陸}} = 5\text{メッシュ} \div 20\text{メッシュ} = \underline{\underline{25\%}}$$

図 1.3.4 ROC 曲線解析の説明図

1.4 予測モデルの検証

現地調査で確認した水面と予測モデルで水面と判断されたメッシュを比較し、瀬切れ状況や、瀬切れ時に点在する水面などの再現性を確認する。

(1) 現地調査結果との比較

平成24年7月から平成25年10月までの現地調査で確認した水面出現状況と予測モデルによる水面予測を比較した結果、瀬切れが顕著な3.4k~11.0kにおける予測結果の正解率（現地調査と予測結果が一致したメッシュ数/全メッシュ数）は73.1%であり、現状を概ね再現推定することができた。

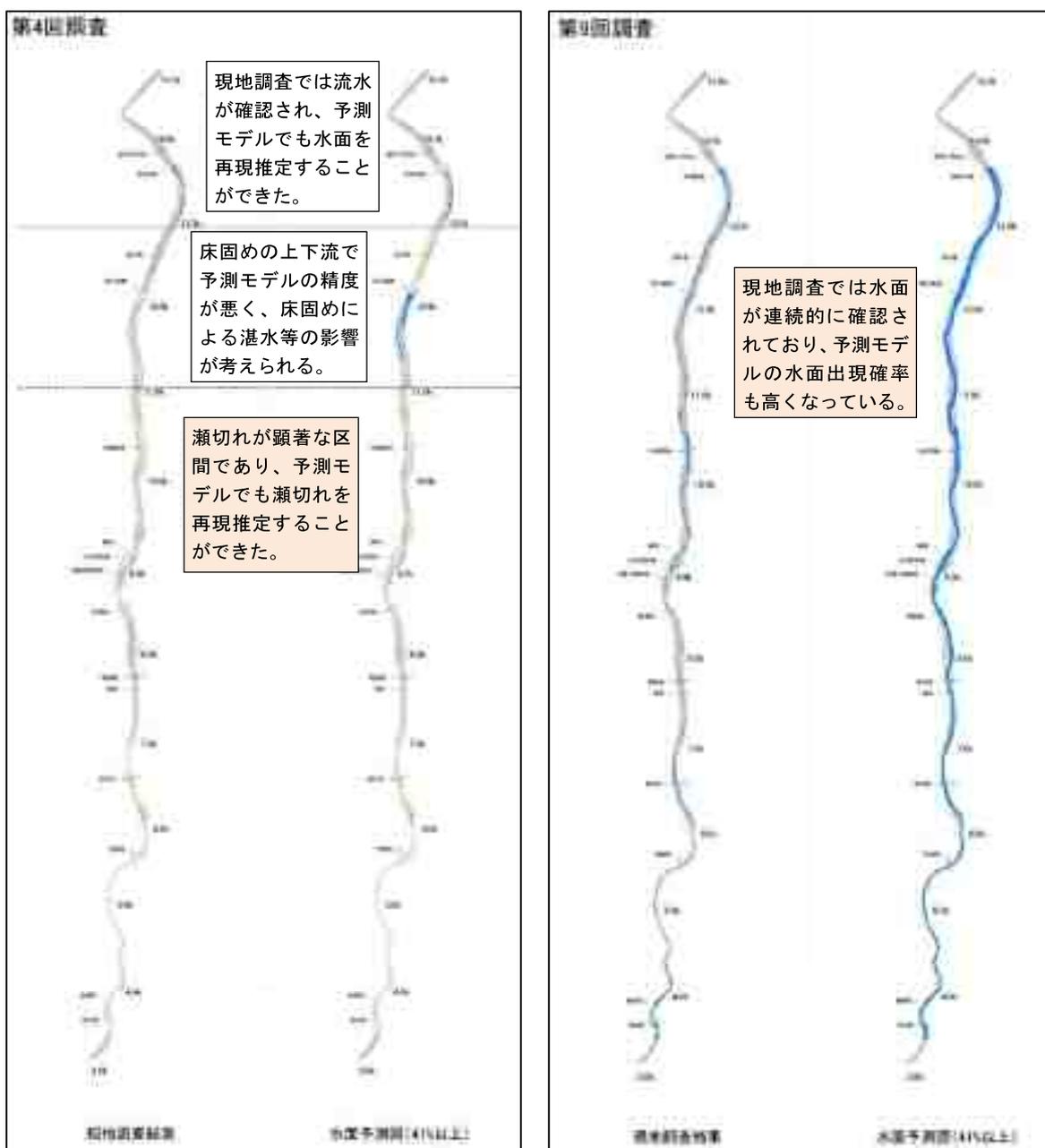


図 1.4.1 現地調査結果と予測の比較

(2) 流量に応じた瀬切れ状況の再現性の検証

瀬切れ調査時の福橋水位・流量、高時川頭首工下流水位、井明神橋流量は表 1.4.1 に示すとおりである。流量に応じた瀬切れ状況の再現性を検証するため、高時川 3.4k~11.0k における流量規模別の予測結果の正解率を求めたものが図 1.4.2 である。

高時川頭首工放流量 0m³/s では、全川の瀬切れが発生しており、予測モデルでも 85.7% と高い正解率で瀬切れ状況を再現推定できている。しかし、高時頭首工からの放流がみられる場合には正解率が 50~60%程度となっており、パッチ状に生じる瀬切れは概ね再現できているものの、狭窄部や堤防側の陸地を水域と誤判定している区間がみられる。

瀬切れ調査は半数以上が高時川頭首工放流量 0m³/s 時に実施していることから、モデルの精度向上には放流条件下での調査データの蓄積が必要である。

表 1.4.1 瀬切れ実態調査時の状況

	年月日		高時川頭首工 下流流量 (m ³ /s)		年月日		高時川頭首工 下流流量 (m ³ /s)
第 1 回	平成 24 年	7 月 31 日	0.00	第 10 回	平成 25 年	6 月 5 日	0.00
第 2 回		8 月 8 日	0.00	第 11 回		7 月 2 日	0.00
第 3 回		8 月 21 日	0.00	第 12 回		8 月 21 日	0.00
第 4 回		8 月 23 日	0.00	第 13 回		10 月 18 日	5.90
第 5 回		8 月 31 日	0.00	第 14 回		10 月 21 日	6.30
第 6 回		10 月 12 日	3.00				
第 7 回		10 月 16 日	2.50				
第 8 回		10 月 22 日	2.50				
第 9 回		11 月 7 日	4.90				

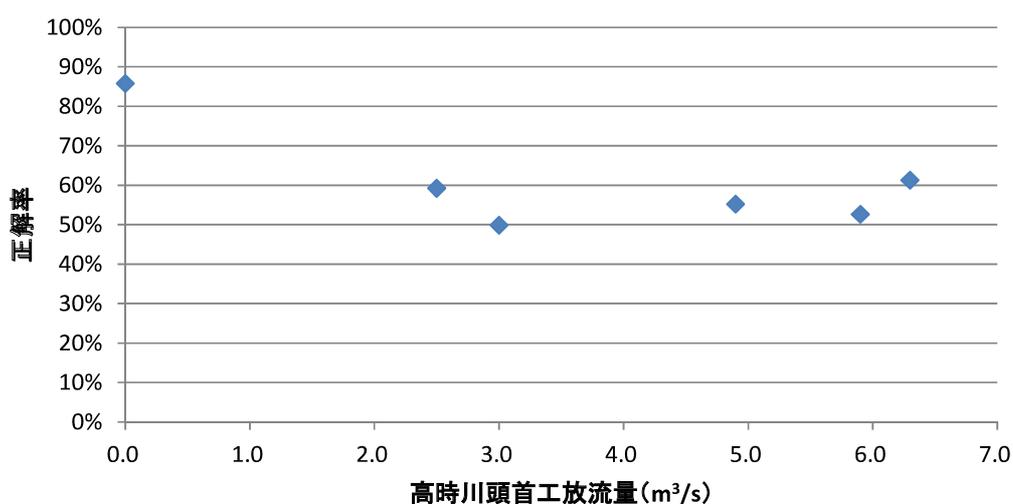


図 1.4.2 流量規模別の正解率

なお、高時川において、近畿地方整備局が過年度検討している河道伏没量は $1.87\text{m}^3/\text{s}$ であった。流量別の水面出現状況（図 1.4.3）では、高時川頭首工放流量 $2.0\text{m}^3/\text{s}$ を境に瀬切れが顕著化していることから、上記検討結果と概ね整合がとれていると考えられる。

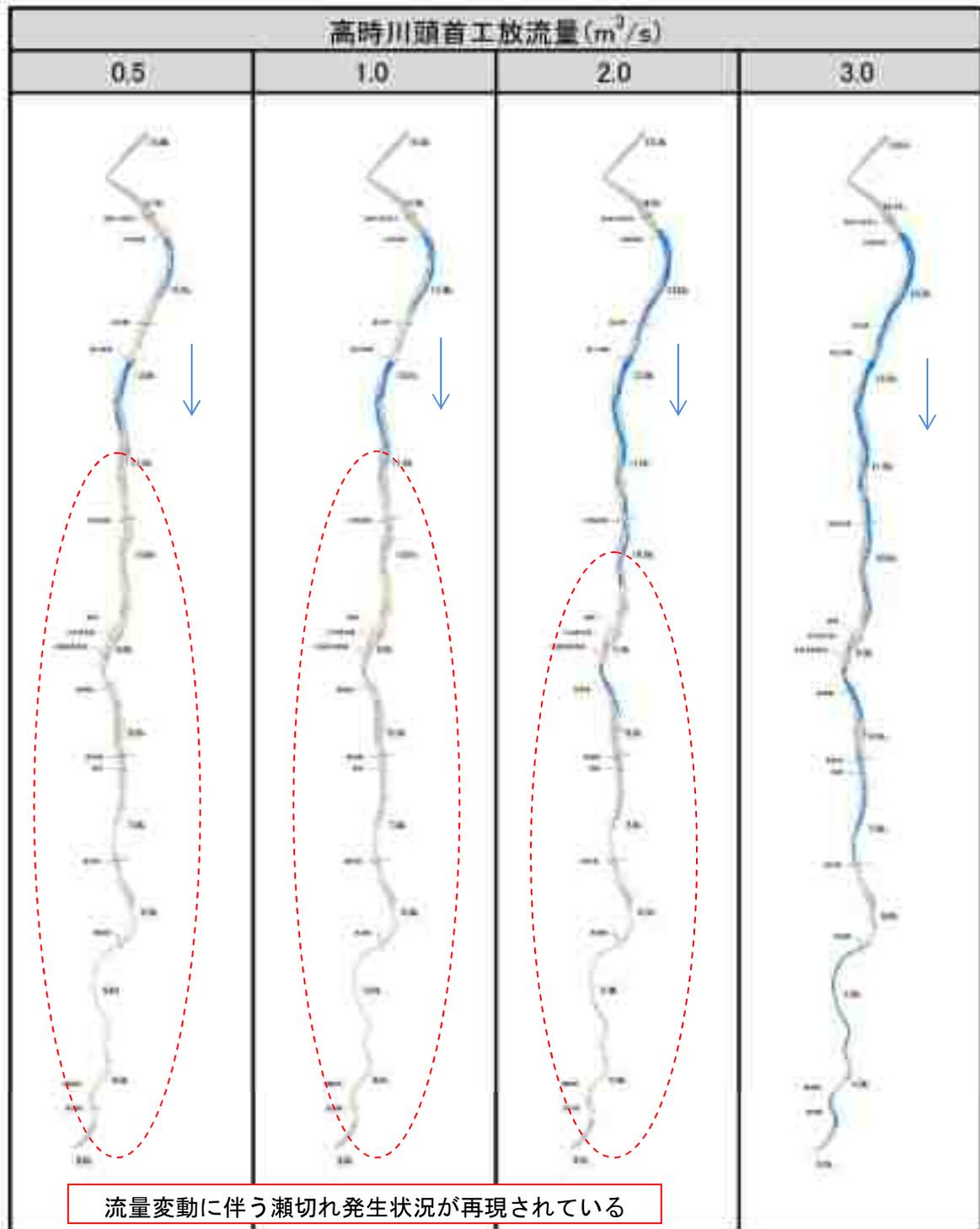


図 1.4.3 流量別の水面出現状況

(3) 淵の再現性の検証

現実的な水環境確保方策の一つとして、河道形状の工夫（水制等の設置による淵の形成）が挙げられている。予測モデルでは淵などの深みに形成された水面の再現性を確認する必要がある。

高時川では、4.5k 付近に瀬切れ時にも水面が残る淵が存在していることから、調査時の水面分布状況と調査時の高時川頭首工放流量（ $0\text{m}^3/\text{s}$ ）に基づき予測した結果から再現性の検証を行った。



図 1.4.4 予測モデルの検証位置

現地調査では上記航空写真のような「深み」が確認され、予測モデルにおいても水面が再現された。今回構築した予測モデルでは、微地形変化による水面出現状況が再現できたことから、河道形状の工夫における対象箇所への抽出に活用できるものと考えられる。

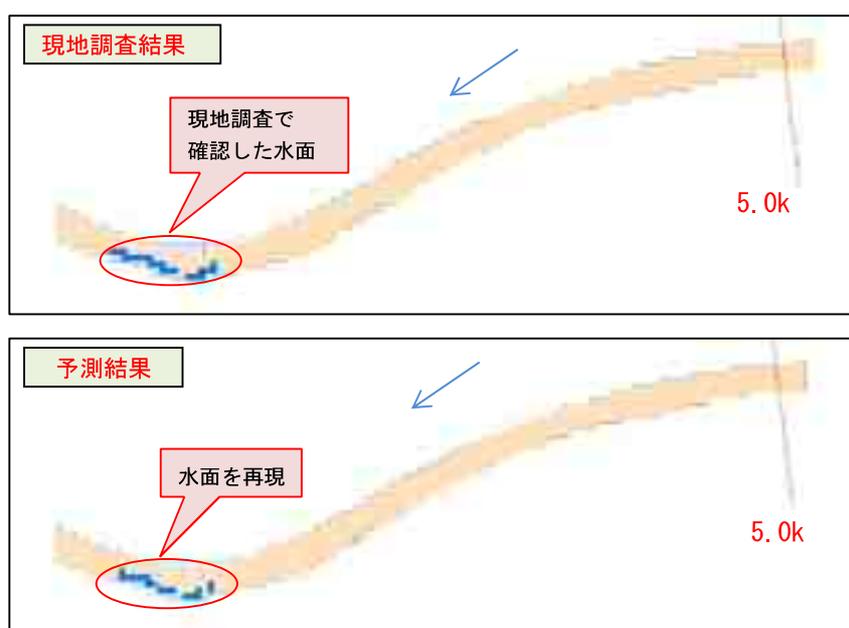


図 1.4.5 淵の再現性の検証結果の一例

1.5 解析結果に基づく考察

ロジスティック回帰分析結果から、水面の出現には「流量」の影響が最も大きく、次いで「河床高」の影響が大きいことが読み取れる。また、「低水路幅」からは、水が通常流れる場所を深めに掘り、かつ幅を狭くすること（低水路掘削）が効果的と考えられる。

これらより、対策としては、河川流量の確保（頭首工からの放流等）や河道形状の工夫（低水路掘削による連続的なみお筋の確保、水制等による淵の形成による局所的な水域の確保）が効果的であると考えられる。

表 1.5.1 ロジスティック回帰分析に基づく考察

変数	影響度 (Z 値)	相関関係	対策
河川流量 (X1)	1 位 (167.48)	水面の出現に最も影響する要因であり、頭首工流量の増加に伴い水面出現確率が増加する	河川流量の確保
水面と地盤 の比高差 (X3)	2 位 (40.4)	流量に次いで水面出現への影響が高く、河床が低いほど水面出現確率が高くなる	河道形状の工夫 (水制等による局所的な水域確保)
縦断距離区 分 (X4)	3 位 (36.17)	下流側で水面出現確率が低く、表面流の蒸発や河床材料の堆積の影響が考えられる	瀬切れが顕著な下流 の対策を優先的に実施
低水路幅 (X5)	4 位 (-11.48)	影響度は最も低いが高水路幅が狭いほど水面出現確率が高くなる	河道形状の工夫 (低水路掘削による 連続的なみお筋確保)

2. アユ等の魚類の生息環境要因（耐候性）

2. アユ等の魚類の生息環境要因（耐候性）

2.1 概要

滋賀県下の高時川をはじめとする天井川に一般的に生息するアユとヨシノボリ類に着目し、図 2.1 に示す横軸の生息可能な耐候性の環境要因について、定量的あるいは定性的なデータを既往文献・調査等から整理した。

以下に示す流水環境への依存性、溶存酸素・水温・水質等の耐候性の観点から、アユが生息できる環境要因を最低限維持すれば、ヨシノボリ類は生息可能であると考えられる。



図 2.1 アユとヨシノボリ類の生息可能環境の関係イメージ図

2.2 流水環境への依存性

- ・アユ※は、中流から上流域の大石や岩盤のある瀬に縄張りを形成して定着する。縄張りは平瀬や早瀬および淵の一部に形成する。昼はもっぱら縄張り内で摂餌し、夜間は縄張り内や淵などで休息する。
- ・ヨシノボリ類※は、河川の中流から上流域にかけての礫底に生息する。成魚は淵の周囲から平瀬にかけての流れの穏やかなところに生息し、冬季は石の下に潜って越冬する。

【出典】※リバーフロント整備センター編(1996)：川の生物図典

2.3 溶存酸素への耐候性

- ・アユとヨシノボリ類の溶存酸素（DO）に対する耐候性については、国土交通省の調査データより、図 2.6 のように整理されている。
- ・すなわち、アユは DO が 7mg/L 以上で生息可能に対して、ヨシノボリ類は DO が 3mg/L 以上であれば生息可能である。アユに対し、ヨシノボリ類は低い溶存酸素の環境でも生息可能である。

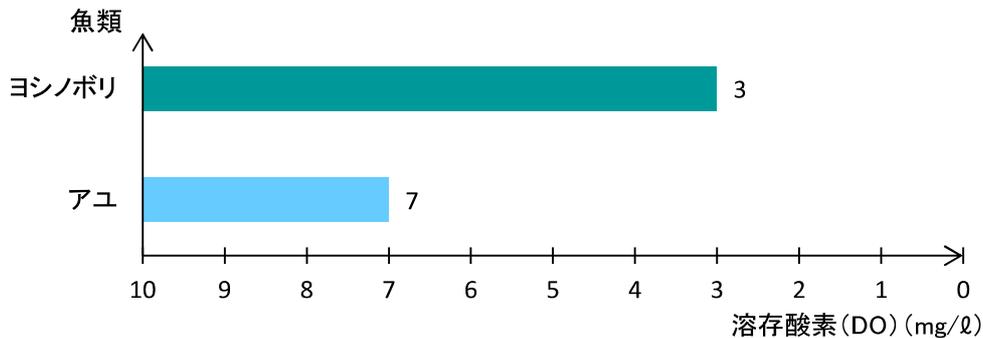


図 2.2 アユ・ヨシノボリの生息に関する環境要因（溶存酸素（DO））

2.4 水温への耐候性

(1) アユの生息に関する水温条件

- ・アユの生息に関する水温条件は、表 2.2 に示す。水産関係の既往文献では、河川水温が低下する遡上期の下限は 9℃、河川水温が上昇する成魚期の上限値は 25℃となる。なお、9～12 月の卵期、孵化期は 23℃が生息可能限界となる。

【参考】

- ・琵琶湖産アユの遡上は、河川水温は湖水温に近づく 8℃前後に始まるとされている。なお、琵琶湖の水温は、2～3 月に全層で均一となり、この間に年間最低気温が記録される。（滋賀県水産試験場資料 [酒井明久：琵琶湖産アユにおける河川への遡上開始日と遡上尾数の予測、2010.4] .）
- ・アユの生息には、水温は 28℃以下がよく、30℃が限界である。（日本水産学会誌 [岡部正也ら：同一環境課で継代飼育されたアユ 3 品種間における温度適応力の差異、2003] ）

(2) ヨシノボリ類の生息に関する水温条件

- ・ヨシノボリ類の水温に対する耐候性については、水産対象魚種でないため、アユのように生活史ごとの適水温の研究・調査データがない。
- ・ここでは、環境省資料（表 2.3）での結果を図 2.3 に整理する。このデータは、多摩川、大和川、吉野川および北浦での現地調査と水温データの関係を取りまとめたものである。実河川での生息確認水温は上限が 30℃程度である。

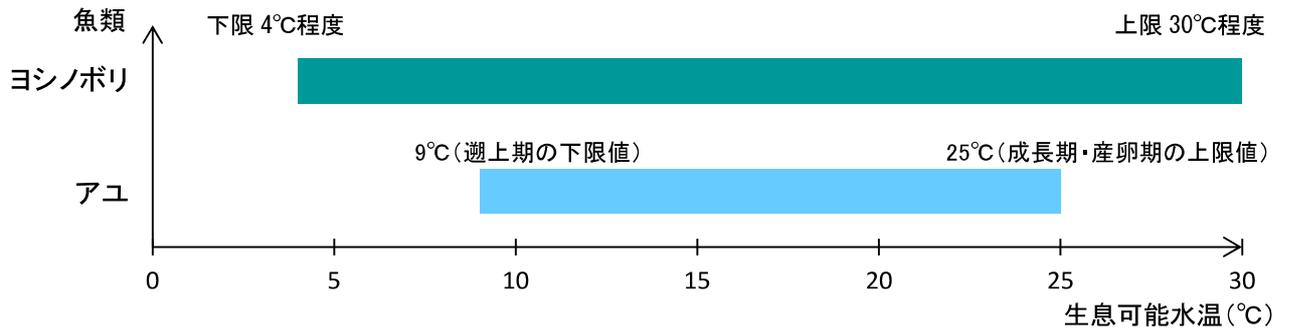


図 2.3 アユ・ヨシノボリの生息に関する環境要因（水温）

2.5 その他水質への耐候性

- ・アユとヨシノボリ類の BOD、アンモニア態窒素に対する耐候性（出典、図 2.6 参照）は、アユの方が敏感で、ヨシノボリ類の方が水質悪化に対する耐候性が高い。

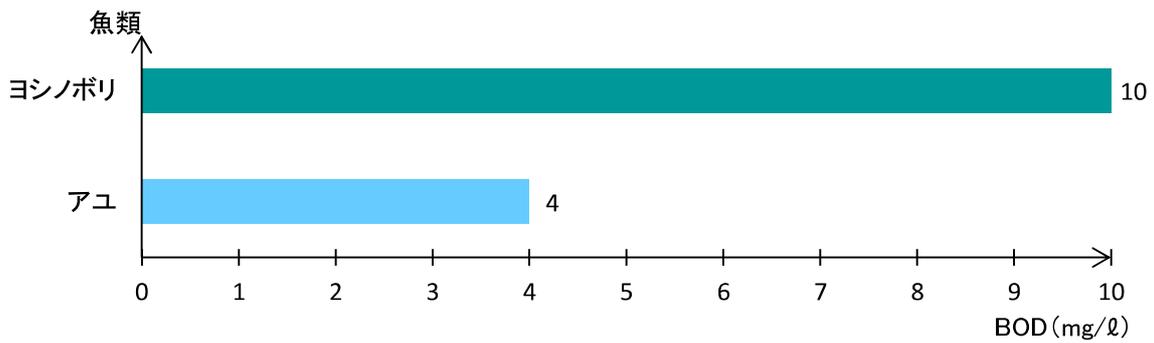


図 2.4 アユ・ヨシノボリの生息に関する環境要因（BOD）

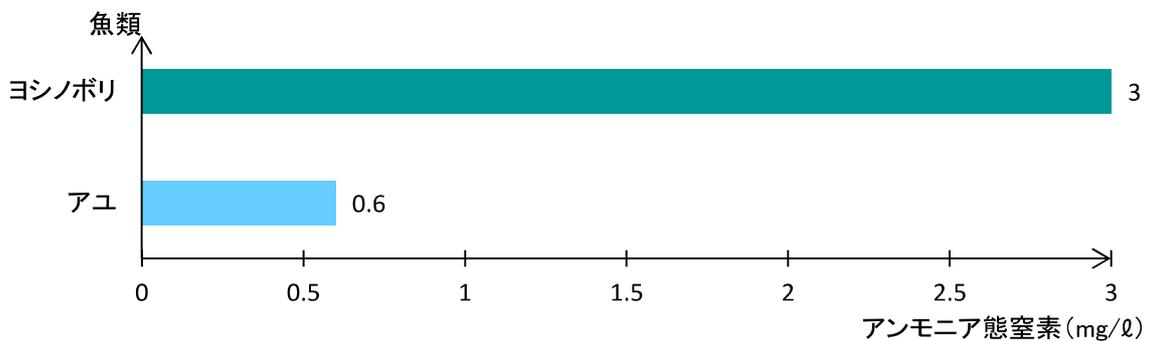


図 2.5 アユ・ヨシノボリの生息に関する環境要因（アンモニア態窒素）

表 2.3 ヨシノボリ類の生息確認水温域

河川名	生息確認水温域(°C)																														平均水温(°C)	
	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	最低	最高			
多摩川																													4	28		
大和川																													5	30		
吉野川																												5	28			
北浦																												5	29			

河川名	確認種(温水性)	水温 ¹⁾	
		平均最低	平均最高
多摩川 (多摩川水系)	ヨシノボリ、ウグイ、オイカワ、コイ、ギンブナ、ゲンゴロウブナ、ボラ、ドジョウ類 ²⁾	4°C程度(上流) 9~11°C程度(中流域) 9°C程度(下流域)	20°C弱~28°C程度
大和川 (大和川)	ヨシノボリ、ウナギ、オイカワ、コイ、ギンブナ、ゲンゴロウブナ、ボラ、ドジョウ、ナマズ、スジエビ、テナガエビ、モクズガニ等 ³⁾	5~7°C程度	25°C程度(上流域) 30°C程度(中・下流域)
吉野川 (吉野川水系)	ヨシノボリ、ウグイ、オイカワ、コイ、ギンブナ、ヨシノボリ、ナマズ、ウナギ等 ⁴⁾	7~10°C程度(上流域) 5~8°C程度(中・下流域)	20°C前後(上流域) 24~28°C程度(中・下流域)
北浦 (茨城県・淡水湖)	ヨシノボリ類、ウグイ、オイカワ、ギンブナ、コイ、シラウオ、ドジョウ、ボラ、テナガエビ、マシジミ等 ⁵⁾	5°C半ば程度	29°C後半

【出典】環境省：水生生物の保全に係る水質環境基準の類型指定について（構成及び取りまとめ方針（素案））

1) 平成 11~15 年度の公共用水域水質データ

2) 多摩川：河川水辺の国勢調査（平成 13 年度、国土交通省）、水生生物調査（平成 13・15 年度、東京都）

3) 大和川：河川水辺の国勢調査（平成 12 年度、国土交通省）

4) 吉野川：河川水辺の国勢調査（平成 12・13 年度、国土交通省）

5) 利根川水系北浦：河川水辺の国勢調査（平成 11 年度、国土交通省）、定置網漁獲調査結果（茨城県内水面水産試験場、平成 13 年度）

表 2.4 アユの生息に関する環境要因

環境要因	卵期	稚仔魚期	未成魚	成魚	産卵期
水温	〈発生水温(適水温)〉12~20℃(13~18℃) 12~20℃ ⁴⁾ , 10~19℃(15℃内外) ⁹⁾ , (13~18℃), 23℃以上危険 ⁸⁾ , 福知山・由良川: 13.5~17℃ ²⁹⁾ 孵化期〈適水温(最適水温)〉10~20℃(13~18℃) 10~20℃(13~18℃) ^{4, 8, 9, 21, 29)} , 上限 23℃ ⁸⁾	〈出現水温(盛期)〉10~25℃(12.5~18℃) 7~25℃(12.5~18℃) ^{4, 5)} , 海産アユ: 12.5~18℃ ²⁴⁾ 〈生息水温〉 下限 10℃ ¹²⁾	〈出現水温(盛期)・遡上水温〉9~22℃ (11~22℃) 9℃以上(13~16℃) ⁴⁾ , 15~18℃ ¹⁵⁾ , 11℃以上(13~16℃) ¹²⁾ 京都: (11~20℃), 江戸川: (14~16℃), 新潟(22℃) ¹¹⁾ 京都・大雲川: 14~16℃ ²⁶⁾	〈適水温〉14~25℃ 14~25℃ ^{12, 27, 29)} 15~25℃(20~25℃で最も活発に摂餌し、成長) ¹⁶⁾ 〈生息水温〉 —	〈適水温〉14~25℃ 14~25℃ ^{4, 12, 27, 29)} 〈産卵水温〉 14~19℃, 14~25℃ ¹²⁾ , 由良川: 14.5~15.5℃ ²⁹⁾ , 琵琶湖: 16.6~21.5℃ ²⁷⁾ , 同流入河川: 18~24.8℃ ²⁷⁾
水深					相模川: 大型魚は深瀬, 小型魚は浅瀬 ²²⁾ 琵琶湖・大上川・芹川: 10~30 cm ²⁷⁾ 滋賀県人工河川(姉川・安曇川): 20 cm ¹⁹⁾
水質(DO)	—	人工採苗池の溶存酸素(DO) ¹³⁾ 3ml/l: 1部の仔魚死亡 2ml/l: 大部分死亡		正常に健全な生活ができる最小溶存酸素(DO) 3.5~4.5 ml/l ¹⁷⁾ 最低限維持すべき溶存酸素 7mg/l ¹⁸⁾	—
流動	—	—	流速 2m/s 以上 ^{4, 20)} , 3m/s 以上, 遡上不可能 ²³⁾	すみつき期: 石・岩盤 ^{10, 24)}	下流: 流れの強い瀬 ^{4, 10)} , 下流 0.264 m/s 上流: 瀬 ⁴⁾ 産卵床流速 0.1~2m/s (1~2m/s) ⁶⁾ , (0.4~0.6 m/s) ⁸⁾ , 30~70 cm/s ²⁷⁾ , 50 cm/s ¹⁹⁾
底質	5~10mmの砂礫の多い所	—			砂礫 ^{4, 1, 6, 8, 11, 28)} 河床不安定で浮き石状態を有する所 ²⁵⁾
食性		降海後: 主にケンミジンコ類, オタマボヤ, 葉脚類, 裂脚類, 端脚類, イカ・二枚貝幼生, デトリタス ^{4, 5, 14, 21, 10, 24)}	付着藻類(特に藍藻を好む)……遡上期 ^{4, 14, 2, 10, 23, 24)}	動物プランクトン(琵琶湖) ^{7, 8, 24)} 付着藻類 ^{10, 7, 8, 23, 24)}	付着藻類, アユ卵 ^{8, 24)}
(参考)塩分	〈出現塩分〉 — 〈発生塩分〉 C 06~12‰ ³⁾ , C 09.35‰まで影響なし, 13.61‰以上全て死亡 ¹⁰⁾	〈出現塩分〉 淡水~海水 4, 3) 〈生息塩分〉 ふ化仔魚: C 018.13‰以下影響なし, 21.56‰で死亡 ¹⁰⁾	〈出現塩分〉 —		〈産卵塩分〉 —

【出典】(社)日本水産資源保護協会(1981):水生生物生態資料

※参考文献

- 鈴木(1977):産卵期のアユの生態及び産卵床について、三重県伊勢水産試験場研究報告
- 和田(1968):矢作川におけるアユの成長と環境の関係、岐阜大学教育学部研究報告-自然科学-,(4)2
- 田畑(1975):海水および希釈海水中でふ化したアユの仔魚について、兵庫県水産試験場研究報告,(15)
- 松原・落合(1965):魚類学(下)、水産学全集 19、恒星社厚生閣
- 資源協会(1976):新版つくる漁業、農林統計協会
- 大上(1968):天竜川におけるアユの産卵について、静岡県水産試験場研究報告,(1)
- 滋賀県水産試験場(1974):滋賀県におけるアユの産卵期ならびに成熟期について、滋賀県水産試験場研究報告,(25)
- 滋賀県水産試験場(1974):びわ湖のアユの天然産卵場および産卵群について、滋賀県水産試験場研究報告,(25)
- 川本(1978):養魚学各論、恒星社厚生閣
- 京都府経済学部水産課(1956):淵のアユの生態Ⅱ、鮎放流基準調査報告書,1955年度
- 川那部 他(1957):遡上アユの生態、とくに生息密度と生活様式について、生理生態,7(2)
- 久保(1966):水産資源各論、水産学全集 14、恒星社厚生閣
- 伊藤(1976):川魚の王、アニマ'76年10月号
- 松原・落合・岩井(1977):魚類学(上)、水産学全集 9、恒星社厚生閣
- 谷川 他(1977):新編水産学通論、恒星社厚生閣
- 稲葉・本荘(1976):淡水増殖(稲葉伝三郎編)、アユの養殖、恒星社厚生閣
- 野村(1980):流水池の環境と魚類生産、淡水養魚と用水(日本水産学会編)、水産学シリーズ 32、恒星社厚生閣
- (社)日本水産資源保護協会:水産用水基準(2005年版)、(社)日本水産資源保護協会
- 滋賀県農政水産部水産課:滋賀の水産(2011年版)、人工河川、滋賀県農政水産部水産課
- 佐藤 他(1973):北上大堰魚道水理模型におけるオイカワ及びアユの遡上行動、水産土木,10(1)
- 水産環境水質基準(1972):日本水産資源保護協会、昭和47年
- 石田(1962):アユの産卵生態学Ⅲ、産卵場の水深と産卵魚の体型、日本水産学会誌,28(4)
- 小山(1977):アユの生態、中央公論社
- 宮地(1960):アユの話、岩波書店
- 石田(1964):アユの産卵生態学Ⅳ、産卵水域と産卵魚の地形、日本水産学会誌,30(6)
- 楠田(1963):海産稚アユの遡上生態Ⅱ、大雲川における遡上群の季節的变化、日本水産学会誌,29(9)
- 西田(1978):びわ湖のコアユの産卵生態、日本水産学会誌,46(6)
- 塚本 他(1975):放流時における人工種苗アユの分散-I、日本水産学会誌,41(7)
- IWAI(1962):Studies on the *Plecoglossus altivelis* problems: Embryology and histophysiology of digestive and osmoregulatory organs.、Bull. Misaki Mar. Biol. Inst. Kyoto. Univ.,(2)

3. バーブエ（上向き水制）の関連論文

新しい河道安定工法の実用化に向けた 調査研究の取り組み

RESEARCH ON PRACTICAL APPLICATION OF CHANNEL STABILIZATION
STRUCTURE INCREASING HABITAT HETEROGENEITY

原田守啓¹・高岡広樹¹・大石哲也¹・萱場祐一²

Morihiro HARADA, Hiroki TAKAOKA, Tetsuya OISHI and Yuichi KAYABA

¹正会員 博(工) (独)土木研究所 水環境研究グループ 自然共生研究センター
(〒501-6021 岐阜県各務原市川島笠田町官有地無番地)

²正会員 博(工) (独)土木研究所 水環境研究グループ 河川生態チーム (〒300-2621 茨城県つくば市南原1-6)

This paper reports a series of actions to develop a new type channel stabilization structure for small and medium-sized rivers in Japan. At first, some types of overseas structure are shown with their characteristics. Secondly, fundamental shapes of channel stabilization structure which increase habitat heterogeneity are discussed on the basis of experimental results obtained in small-scale and large-scale movable bed experiments with test models. In latter experiment, three large scale models made by different materials are examined, it is confirmed that the surface roughness have effect distinctly on velocity profiles of passing flow.

Key Words : channel stabilization, local scour, movable bed experiments, experimental river

1. はじめに

平成20年に通知、平成22年に改訂再通知された「中小河川に関する河道計画の技術基準」¹⁾では、中小河川の河川整備計画や災害復旧事業における河道計画の立案時に、河床の掘り下げを極力行わず、川幅拡張により流下能力を確保することを基本方針の一つとして示している。また、河道法線の設定にあつては、改修前の河道の湾曲部を極力活かし、河道の直線化を避けることとしている。これらの原則は、河床に形成される砂州や滞りの蛇行による瀬淵構造が保全・形成されることを企図するとともに、改修によって洪水時の流速や河床面に作用する掃流力が増加することを回避して、安定した河道が維持されることを目的としている。

技術基準が対象とするのは、流域面積200km²以下のいわゆる中小河川であるが、昭和50年代以降急速に進められてきた我が国の中小河川改修では、限られた河川用地でより多くの流量を溢れさせずに流すために、計画断面を単断面とし、河床を掘り下げて狭くて深い台形断面とする河道改修が一般的に行われてきた。川幅の小さい河川ほど、幅水深比 B/H がより小さい断面に改修される傾向²⁾が認められ、自然河岸に比して急勾配に切り立てた河岸を保持し侵食から守るために積み護岸を設置し、結果として、小規模な河川ほど改修前後での流速と掃流力の増加の割合がより大きい改修手法が選択されてきた。

さらに、改修後の河道の縦断及び横断形を維持するために、より具体的には、計画河床高程度に河床高を維持するため、床止め工(落差工、帯工)が用いられてきた。

落差工が、河道の直線化に伴う縦断勾配の増大に対応して縦断勾配の調整と流水の減勢のためにあらかじめ落差を設けるのに対し、帯工は、河床高を維持するとともに、流水と流砂を横断方向に整え、局所洗掘を防止する目的で、小落差あるいは落差を設けずに設置される構造物である。しかしながら、帯工が河床低下を防ぐ機能は、直下流が河床低下しはじめてから発揮される³⁾ことから、帯工の機能が活かされる状況では必然的に落差が形成され、水生生物の移動阻害を生じている状況が実河川において散見される。さらに、河床形状は縦横断方向に平坦で多様性に乏しい状態に維持される。

このような、過去の河道改修における河道安定のための横断構造物が有する河川環境面での課題に鑑みて、新しい技術基準では、改修後の河床変動についてあらかじめ検討した上で、床止め等の横断構造物は必要最小限とするよう述べている。しかしながら、背後地の土地利用の制約等により河道拡張が困難な河川においては、河道安定のための構造物が依然として必要とされる場合がある。また、改修済み河道の既設の帯工・落差工を、生物の移動性や景観面について改良する場面等も想定される。近年、伝統的な石組構造を応用した分散型落差工⁴⁾が提案され、河川生態系に与える好ましい効果についても報

告されているが、より広い流域で用いられている従来型の帯工に替わる工法の開発は、未だ為されていない。

以上の背景を踏まえ、(独)土木研究所自然共生研究センターでは、主に中小河川の単断面河道を対象として、従来型の帯工が有する環境面での課題を克服した新たな河道安定工法の実用化を進めている。本報では調査研究の取り組みの概要と得られた主な成果について報告する。

2. 海外事例・技術基準類の調査

(1) 調査方法

河道安定(Channel Stabilization)の目的で設置される構造物について、主に欧米の技術資料を対象として文献調査を行った。文献は主にインターネットを用いて収集し、構造物の形状、構造、設計思想、水理的機能等について考察した。

(2) 調査結果の概要

我が国の技術体系では、帯工の平面形状は、河岸と直交する直線が基本である。実務者が携り所とする技術書²⁾によれば、曲線型、折線型とした場合、帯工下流で流れが河道の中心に集中し、洗掘が生じやすいこと、洗掘箇所の下流は堆積箇所となって分散した流れは河岸に向かうことを理由として、直線型を推奨している。

しかしながら、北米・欧州における河道安定工法では、中央部を上流側に突出させたA型あるいはII型の平面形状で、横断方向に勾配をつけて中央部を低くした点が共通する複数の工法が確認される。抽出された工法の概要を抜粋して表-1に示す。

表-1に示す4工法は、流水を河道中央に集め、瀬を形成すること、水面落差を一定の幅以内に収めること、横断方向に勾配をつけることによって、流量が変動しても常に流心と水際とが形成されることといった、生物の移動性への配慮が謳われている点において共通している。河道安定工法であると同時に、Step-Pool状の縦断的な瀬淵構造を模したものとなっていて、非常に興味深い。

これらの工法は、多くの場合、簡易な石組構造又は単

体の石が十分大きい捨石構造が基本形とされている。設計手法として、想定される流速に対応する石材の径の目安、洗掘に対する掘入れ深さ等について提示されているが、経験的な設計法で構成されており、我が国の床止め工に求められてきた構造物としての堅牢性あるいは河床変動に対する追従性などはあまり考慮されていない。

この理由は以下のように考えられる。これらの工法は、多くの場合、比較的自然度が高い河道の流路変動を制御して、渾筋を同じ場所に維持することを目的としており、河道災害を生じた際のリスクがそもそも小さいと考えられる。また、護岸と組み合わせた設置状態を前提としていないため、河岸を守るための機能を強く期待されていない。さらに、低水路満杯(Bank full)を上回るような洪水の際は流水が浅い流れのまま横に広がって溢流するような河道のつくりになっていること、そもそも我が国と比較して河況係数が小さく、流水外力の変動幅が限られている等の条件の違いを考慮する必要がある。

検討する新工法には、これらの与条件の違いを考慮した上で、「河道安定工法により縦断的な瀬淵構造を形成する」というコンセプトを取り入れることとした。

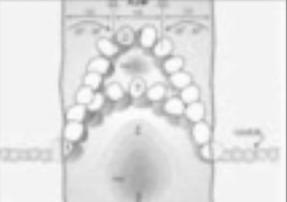
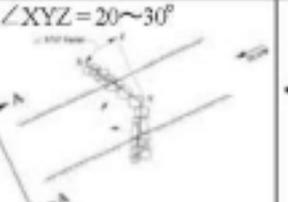
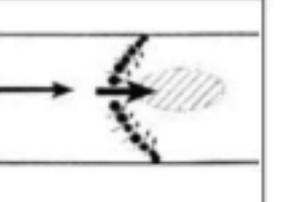


写真-1 設置事例の写真

(上段:Rosgen Cross Vane³⁾)

(下段:Sydve-type weir, Google street viewより)

表-1 河道安定構造物の海外事例(抜粋)

名称	USDA/Rock Weir ⁴⁾	Rosgen/Cross Vane ³⁾	WSDOT/Rock Weir ⁵⁾	Sydve-type Weir ⁶⁾
地域	米国, 主に西海岸	米国, 主に中西部	米国, ワシントン州	ノルウェー, Sydve地方
平面形状	 ※バリエーション有		 $\angle XYZ = 20 \sim 30^\circ$	
横断形状				—
構造	簡易な石組又は捨石構造	簡易な石組又は捨石構造	簡易な石組又は捨石構造	木製又は簡易な石組構造

3. 小型模型水理実験

(1) 実験の概要

橋脚構造物の平面形状の違いによる河床変動特性の把握を目的として、幅30cm、延長9m、勾配1/200の実験水路（岐阜大学工学部）において移動床実験を実施した。

著者らは先行実験¹¹⁾において、同様の実験系を用いて、帯工の平面形状の違いによる河床変動特性に着目し、我が国では基本である直線型に加え、A型、ハ型の帯工について、典型的な中小河川との相似を意識した移動床実験により帯工周辺の河床変動特性を把握し、平面形状及び折り曲げ角度の効果について検討するとともに、平水時に落差を生じにくい帯工の形状について検討し、以下の結果を得ている。

①直線型に対して、A型及びハ型は、帯工下流の中央部に強い洗掘孔を生じる。これは、斜め部材を越流する際に誘起される左右対称の強い螺旋流による。

②中央に開口部を有するハ型は、開口部を通過する流れによって螺旋流の発達が阻害される。

また、別途検討している寄り流の形成を目的としたパーブ工法に関する基礎的な実験結果¹²⁾より、以下の結果を得ている。

①遊流型水制の上向き角度を大きくするにつれ、局所洗掘量は減少する傾向にあるが、水制を斜めに越流する流れによる下流側の洗掘孔が拡大する。

②水制の先端を低くし、かつ流れの剥離を防ぐ法面を設けたケースでは、局所洗掘が大幅に抑制され、さらに水制の根元の高さまで流砂が堆積する。

これらの先行研究を踏まえ、工法の好ましい基本形状について再検討した結果、中央部は直線、左右岸にパーブ工の機能を付加した斜め部材を有した形状が基本形状として好ましいものと考えた。直線部と斜め部の比率を増減させることで、下流側の洗掘量を制御可能であると考えられたためである。

そこで、左右岸の斜め部材、直線部の比率を、1:1とした模型を製作し、既往実験と同様の実験条件を再現して、直線型、A型と比較した。

(2) 結果と考察

先行実験¹¹⁾の結果より直線型とA型、追加実験で行ったその中間の形状について、流量8ℓ/s、移動床区間の水路中心における水位・河床高分布から求めた平均水深と平均エネルギー勾配による無次元掃流力 $\tau^* = 0.20$ 程度、無給砂の条件で60分通水した後の河床変動量を、図-1(a)～(c)に示す。なお、模型の天端高はいずれも平坦に敷きならした初期砂面高に合わせて設置している。

模型下流側の河床変動量は、事前に予想した通り直線型とA型の中間的な傾向となったことから、直線部分と斜め部分の比率を変更することで、下流側の洗掘孔の規模の調整が可能と考えられる。

続いて、実河川において生じうる状況について検討するため、流量、土砂供給条件を変更した実験ケースとして、前記の条件に加え上流から平衡給砂を行った動的平衡条件における結果と、流量を削減して河床面に作用する平均的な掃流力が移動限界を上回らない静的平衡洗掘条件を整えた結果とを、図-1(d)、(e)にそれぞれ示す。移動床区間上流の固定床区間において、流出土砂量に見合う給砂を行った動的平衡条件下においては、模型は進行する砂堆に埋没・露出を繰り返す、時間平均的には河床面の低下を生じない。一方、静的平衡洗掘では、斜め部材による洗掘孔の発達には模型直下流に限定され、一定規模まで洗掘孔が拡大した後、維持される。本実験では粒径0.6mmのほぼ均一な砂を使用したことから、粒度分布が広い混合粒径の条件下においては、局所的な掃流力の分布に応じた分級が発生すると考えられ、やや現象は複雑になるが、洗掘を生じる位置や程度等の基本的な振る舞いに大きな差異はないものと考えられる。

したがって、実河川において、上流から土砂供給が維持される場合、流量変動に対して構造物周辺の河床形状は概ね(d)と(e)の間で維持され、平水時の流況において河床材料の移動がほとんど生じない河川では、静的平衡洗掘条件で形成された瀬が維持されるものと考えられる。しかしながら、上流からの土砂供給が何らかの理由で減少し、河床低下が継続した場合、下流側の洗掘孔が拡大し続け、(b)のような状況が現出することも想定される。そのため、設計者の視点に立てば、静的平衡洗掘条件に

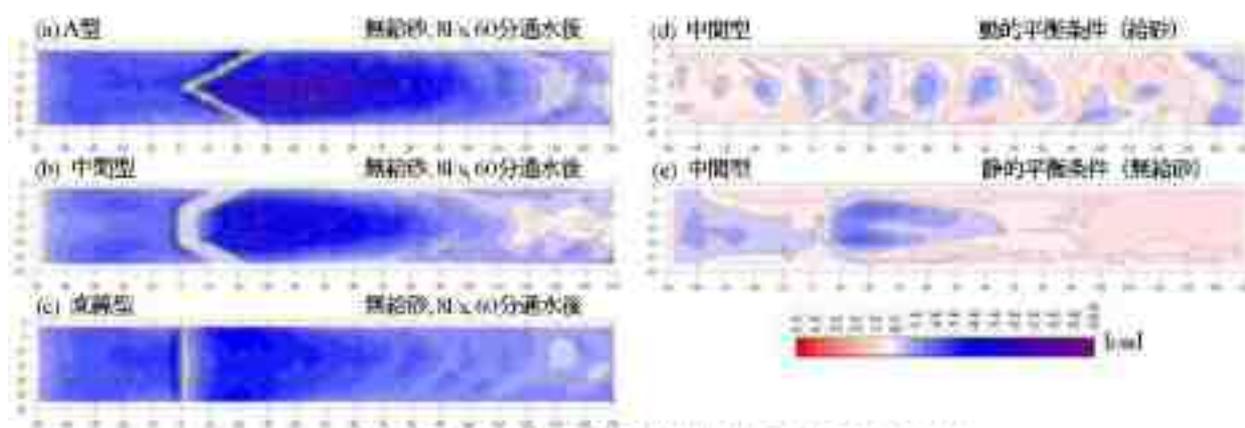


図-1 通水後の河床変動量（模型形状及び洗掘条件の比較）

よって生じる日常的な姿の想定と、河床低下が継続した際の横断構造物及び下流護岸の安全性を担保する方法の2点が主たる検討課題と認識される。

以上を踏まえ、新工法のコンセプトと、それを実現するための方策について、表-2にまとめて示す。

4. 大型模型水理実験

(1) 実験の概要

小型模型水理実験によって見出した基本形状を基に、構造の違いによる越流状況、景観性を把握するため、より実河川に近い条件・スケールにおける大型模型水理実験を行った。

大型模型水理実験は、(独)土木研究所自然共生研究センター内の実験河川(岐阜県各務原市の一部)を利用して行った。実験河川は、一級河川木曾川北派川に人工的に流路を造成したものであり、木曾川支川新境川(流域面積42.6km²、流路延長13.6km)から流路上流の調節池に河川水を導水し、流量制御のための鋼製起伏ゲートを介して、貯留した河川水を自然流下させるものである。

本実験は、3本ある実験河川のうちA河川の最上流区間に、幅2.5m、延長40m、勾配1/200に設定した区画を設定し、構造が異なる3基の模型を設置し、異なる流量における流況を計測するとともに、流水表情を含めた景観を確認した。また、設置対象河川による構造の使い分け、設計手法等について考察した。

実験に用いた土砂は、調達可能な土砂の量、実河川に流入する実験河川の立地特性等を考慮して、木曾川産の洗い砂とした。粒度試験の結果、細粒分2%、砂分71%、礫分27%のやや広い粒度分布を有しており、1%粒径は1.38mmであった。

流速の計測は、3次元超音波流速計Flow Tracker S-mack社製)、河床形状及び水位の計測はトータルステーション(Nikon Trimble社製)で行った。

(2) 構造物の形状と構造

想定される実河川の河道幅を12mと仮定した場合、小型模型水理実験は1/40スケール、大型模型水理実験は1/5スケールに相当することから、構造物の寸法、構成する材料は実物の1/5程度となるよう設定した。

平面形状は、斜め部材と直線部が1:2.1の比率とした。構造物の高さは、直線部を初期河床面に合わせて水平とし、斜め部材の端部は直線部より10cm高く設定した。天端幅を30cmとし、上下流側法面の勾配は上流側を一部五分、下流側は二割に設定した。

上流側法勾配については、小型模型実験において一割勾配を採用していたところ、局所洗掘を助長する縦溝が生じたことと、土砂・割栗石等の材料を用いる場合、一割勾配では自立が困難であること等を勘案し、一部五分を採用した。下流側の法勾配については、越流部の流況

表-2 新しい河道安定工法のコンセプト (案)

コンセプト	実現するための方策
上流側の河床高を維持する機能を発揮しながら、不連続な落差を生じさせない	越流部の形状を工夫し、小流量時にも河床面と水面が連続的に連続する状態を維持する。
直下流に淵を形成し、河床形状と流速・水深分布に多様性をもたせる	平面形状を直線型とA型の間とする。
左右岸に寄り淵を形成して、自然な水淵部を形成	斜め部材の形状にバープ工を応用する。
淵の深さ、範囲を制御し安全性を確保する	直線部と斜め部の比率によって洗掘量を制御する。極限基配置を基本とする。景下流に流れ止めを設ける。

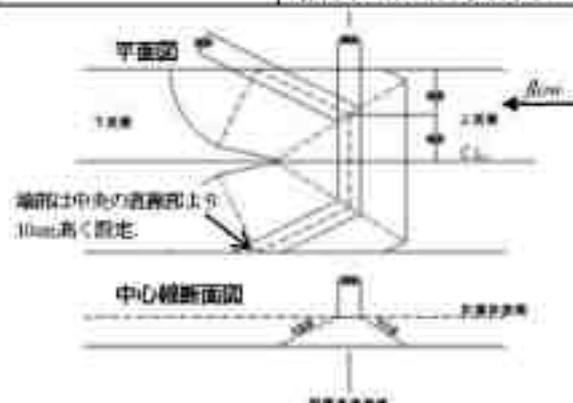


図-2 大型模型の基本形状



写真-2 各タイプの外観と設置状況

に強く影響することから、さらなる検討の余地は大きい。

構造は、従来の普工が、本体部分を現場打ちコンクリートとし、上下流に根固めブロック等を用いた護床工を設置するのに対し、より安価であること、曲線等の形状が比較的容易に製作できること等の利点を重視して以下、3タイプを検討した。すなわち、捨石構造の①捨石タイプ、捨石を丈夫なネットでくるんだ②袋詰タイプ、捨石を連節ブロックあるいはブロックマット状の製品で被覆した③ブロック被覆タイプである。

構造物としての耐久性は、①捨石タイプは捨石単体が流出するか否かによって決定されると考えられる。②袋詰タイプはネットによる拘束の効果を多少は見込むこと

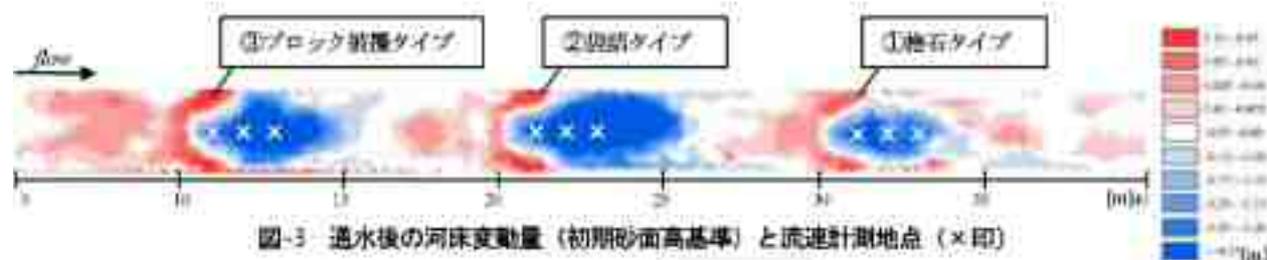


図-3 透水後の河床変動量（初期砂面高基準）と流速計測地点（×印）

によって①よりも捨石が多少は流出しにくいと考えられる。③ブロック被覆タイプは、連節構造あるいはブロックマット構造であれば、群体として滑動することが破壊要因となるが、上流側から下流側までを一体の構造とすることで、上流側が土形によって押さえられるために、護岸として設置する場合よりはかなり大きな流体力に耐えることが期待される。今後検討すべき課題を含むものの、一般的には後者の構造になるほど外力に対する耐久性は向上すると考えられる。

(3) 結果と考察

3タイプの大型模型を40m区間に10m間隔で設置し、流量を平水流量程度を想定した100ℓ/sから、中小出水を想定した300ℓ/s、年最大流量程度を想定した1,000ℓ/sの間で変化させ、越流状況、河床変動特性について把握した。

300ℓ/sを約24時間透水した状況下における各模型周辺の河床形状を図-3に、中心線に沿った模型直下流(1m, 2m, 3m)地点での主流速鉛直分布を図-4に示す。

300ℓ/s透水を開始し、河床波が十分発達した時点での水位断面形と河床形状から求めた代表粒径1.38mmに対する無次元掃流力 τ^* は0.4程度であったが、砂堆の発生により各模型上流側の流砂量はかなり削減されていた。その後、模型直下流の上砂流出が進んだことにより、計測時には水面形が階段状になっていて、各模型間の平均的な無次元掃流力は $\tau^* = 0.20$ 程度まで低下していた。

図-3に示すとおり、河床変動量は、最下流の①捨石タイプが最も少なく、中間の②袋詰タイプが最も大きく、最上流の③ブロック被覆タイプがその中間であった。②袋詰タイプは、河床低下によって実験河川の当該区間に設置されているコンクリート底版が露出したため、急激に土形が流失したと考えられる。②袋詰タイプから流出した土砂が①捨石タイプの区間に流入するという実験系の課題があるため、現時点では、構造と河床変動量の関係について厳密な議論はできていない。

一方、構造の違いは、下流側に形成された淵の内部の流況において明瞭に把握される。図-4に示すとおり、越流部直下流の流速の鉛直分布は、構造によってかなり異なる。①捨石タイプは、底層に沿った流れがきちんと減速されるのに対し、③ブロック被覆タイプは十分に減速されていない。さらに、水面付近の流速が相対的に小さいために、越流部直下において断水を生じており、その他2タイプとは流水状態も異なったものとなっている。

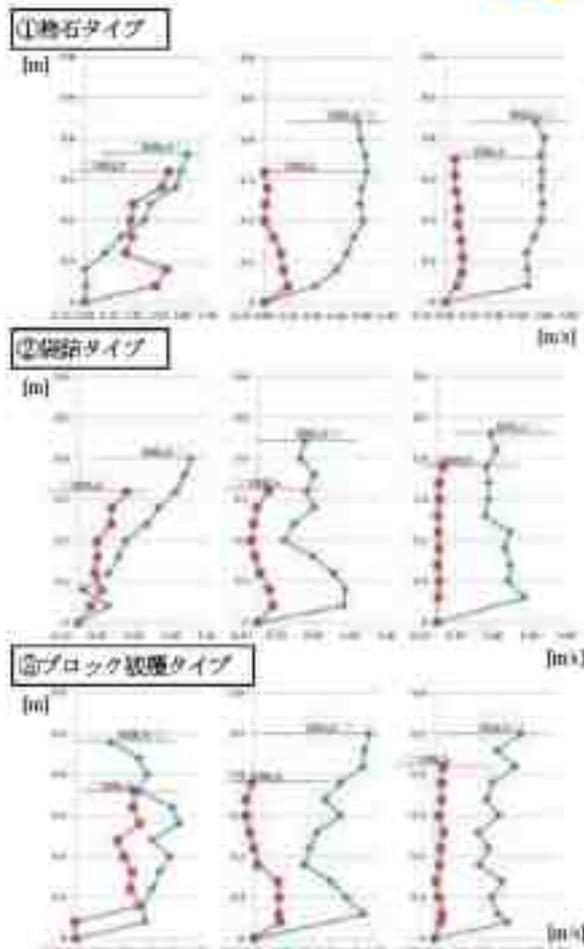


図-4 河道中心における主流速鉛直分布
(左外:模型3m下流、中内:2m下流、右内:1m下流)

②袋詰タイプの2m地点では、平滑なコンクリート底版が露出し、底面付近の流速が大きくなっているため、比較は難しい。以上のことから、越流部の流況は、構造物の表面を構成する材料の粗度の影響を強く受けていることが確認され、越流部から下流側にかけては構造物表面に適切な粗度を付与することの重要性が示唆された。

また、空間的な水深流速分布の多様性の向上が確認された。越流部においては、流量変動に対し、常に流速の小さい水層部が形成されていることから、水生生物の移動性が確保されると考えられる。ただし、③ブロック被覆タイプは表面が平滑すぎるためか、水層部の水深が薄く、淵上には不適切であるため、適度な粗度の付与が必要であると考えられた。また、下流に形成された淵には、三次元的な流れが形成されており、平面的に通流してい

る領域も見られた。魚類が淵内に定位しようとした際に走流性によって下流側を向く、あるいは複雑な流れに翻弄されることも考えられることから、淵内の流況を整える工夫も必要であると考えられる。

5. おわりに

本報では、従来型の帯工が有する環境面での課題を克服した新たな河道安定工法の実用化の取り組みについて、その概要と現時点で得られている主な成果について報告した。以下に、本報のまとめを示す。

- ・海外事例・技術基準類を調査した結果、我が国では見られない、中央部を上流側に突出させた河道安定工法が複数確認された。河道安定工法であると同時に、縦断的な瀬淵構造を形成し、生物の移動性に配慮している点に共通点が見出された。
- ・小型模型水理実験の結果、帯工左右岸に寄り淵を形成し、直下流に淵を形成する機能を有した河道安定工法の基本形状を見出した。
- ・構造の異なる3基の大型模型を設置して実施した水理実験の結果、同様の形状を有していても、構造物表面を構成する素材の粗度によって、下流側流況及び洗掘量が大きく異なることが確認された。

今後の課題を以下に示す。

本報で示したとおり、新たな河道安定工法の基本形状を見出すことができたが、詳細な点については改善の余地があると考えており、小型模型実験を系統的に実施していく。とくに、直線部と斜め部材の比率の効果、異なる出水規模における河床の応答、河床材料の混合粒径の効果については検討が必要であると考えている。

また、大型模型水理実験における構造物表面の粗さの違いが、下流側の流況にかなり影響を与えていることが確認されたことを踏まえ、本工法に必要な水理特性を具備したブロックの試作を行っていく。その際、景観面における配慮も同時に盛り込まれるべきである。

一方で、普及のためには安全性を確保できる設計法の整備が必要不可欠である。設計法を整備する方針として、床止め工、護岸工、水制工等についての既存の設計法を、照査対象とする状況に合わせて援用することにより、総合的に安全性の照査が実施可能であるか検討中である。

照査すべき状況としては、構造物本体の表面から破壊に至るケース、下流側の洗掘から本体の破壊に至るケースと、下流側の洗掘が護岸等の周辺構造物の被災につながるケースが想定される。構造物表面の破壊については、護岸の力学設計法¹²⁾における力学照査方法の援用が可能と考えている。下流側の洗掘深の予測については、従来の洗掘予測式の適用性について検討を行うとともに、効果的な洗掘深の制御方法について、また、複数基配置す

る場合の縦断的配置の考え方や掘れ止めのための補助構造物の設置等について、モデル河川への適用を前提として、具体的に検討していく。

さらに、実河道への配置計画手法として、湾曲部や砂州により形成される瀬淵構造を活かしながら、これらがともに期待できない区間をどのように抽出し、縦断的のどの程度の間隔で構造物を配置すべきかといった計画論的な議論も、多自然川づくりの現場では重要である。

これらの総合的な取り組みを進めながら、工法としての完成度を高め、多自然川づくりの現場に資する技術へと高めていく。

謝辞：本報の一部は、平成24年度に実施した岐阜大学流域圏科学研究センター藤田裕一郎教授（現フェロー）との共同研究成果に基づくものである。記して謝意を示す。

参考文献

- 1) 国土交通省河川局：中小河川に関する河道計画の技術基準について、2010。
- 2) 原田守啓、藤田裕一郎：中小河川の断面形状と河道粗度設定手法の変遷に関する考察、土木学会論文集B1(水工学) Vol.68, No.4, 1_1291-1_1296, 2012。
- 3) 道上正規、鈴木幸一：床固めの水理機能に関する研究、京大防災研究所年報、第22号B-2, pp.507-519, 1979。
- 4) 福留脩文、有川崇、西山穂、福岡捷二：石礫河川に組む自然に近い石積み落底工の設計、土木学会論文集F Vol.66, No.4, pp.490-503, 2010。
- 5) 財団法人国土開発技術研究センター：床止めの構造設計手引き、山海堂、pp.90-95, 1998。
- 6) U.S. Department of Agriculture Portland, Oregon: *DESIGN OF ROCK WEIRS*, Technical Notes Engineering-No.24, 2000。
- 7) D.L. Rosgen: *The Cross-Vane, W-Weir and J-Hook Vane Structures...Their Description, Design and Application for Stream Stabilization and River Restoration*, *Wetlands Engineering & River Restoration 2001*(ISCE), Sec.26 Chap.3 pp.1-22, 2001。
- 8) Washington State Department of Transportation: *Hydraulics Manual M 23-03.03*, pp.4_23-25, 2010。
- 9) John E. Brittain: *Weirs as a Mitigation Measure in Regulated Rivers—The Norwegian Experience*, *Canadian Water Resources Journal*, 28:217-229, 2003。
- 10) 原田守啓、高岡広樹、大石哲也、萱場祐一、藤田裕一郎：平面形状の異なる帯工周辺の河床変動特性に関する実験的研究、土木学会論文集B1(水工学) Vol.69, No.4, 1_1177-1_1182, 2013。
- 11) 原田守啓、高岡広樹、大石哲也、萱場祐一、藤田裕一郎：設置角度の異なる越流型上向き水制の河床変動特性に関する実験的研究、土木学会論文集B1(水工学) Vol.69, No.4, 1_1189-1_1194, 2013。
- 12) 財団法人土木技術センター：改訂護岸の力学設計法、山海堂、2007。

(2013.4.4受付)

設置角度の異なる越流型上向き水制の 河床変動特性に関する実験的研究

CHARACTERISTICS OF BED DEFORMATION AROUND
SUBMERGED UPSTREAM-POINTING GROINS FOR DIFFERENT ANGLE

原田守啓¹・高岡広樹¹・大石哲也¹・萱場祐一²・藤田裕一郎³
Morihiro HARADA, Hiroki TAKAOKA, Tetsuya OISHI, Yuichi KAYABA and Yuichiro FUJITA

¹正会員 博(工) (独) 土木研究所 水環境研究グループ 自然共生研究センター
(〒501-6021 岐阜県各務原市川島笠田町官有地無番地)

²正会員 博(工) (独) 土木研究所 水環境研究グループ 河川生態チーム (〒300-2621 茨城県つくば市南原1-6)

³フェロー 工博 岐阜大学流域圏科学研究センター教授 (〒501-1193 岐阜県岐阜市柳戸1-1)

Numerous spur-dikes and groins had been built for the purpose of preventing bank erosion, or stabilizing channel alignments. In each purpose, groin angle and arrangement has been studied comprehensively through past studies. It is known that horizontal angle of groin has different influence on riverbed deformation. In this study, flume experiments with movable-bed are conducted in order to discuss characteristics of bed deformation around submerged groins for different horizontal angle for the purpose of finding the fundamental shapes of the submerged groin which are suitable for channel stabilization of the small and medium-sized rivers in Japan. In results, the fundamental effect of groin angle is observed. As the angle becomes large, local scour around the tip of groin decreases. Furthermore, it is shown that scour volume is considerably reduced by devising the shape of the groin.

Key Words : submerged groins, groin angle, local scour, channel stabilization, stream barbs

1. はじめに

我が国の水制は古くは「出し」と呼ばれ、各地の河川において様々な形式の水制が水衝部河岸の防衛、航路の維持等の目的で用いられてきた。かつて、水制工の導入は、経験的になされてきたが、昭和30年代以降、秋草らの研究¹⁾を端緒として、水制の水理的機能について、実験と理論の両面から研究が進められ、近年は、技術者が計画設計の拠り所とする専門書²⁾も編まれるようになり、さらには、水制の配置計画検討にあたり、平面流況解析に水制の効果を取り込んで検討する手法³⁾が実務の場面でも一般的になりつつある。

また、従来の設置目的に加え、水制により創出される流れ、河床形状、底質分布等の多様性に着目して、水生生物の生息環境への好ましい影響を企図して水制の設置が計画される事例⁴⁾⁵⁾も増えてきている。

水制が流れと河床変動に及ぼす影響は、水制の構造、角度、川幅に対する相対長さ、水深に対する相対高さ、

配置等によって異なり、水工学分野における過去の研究では、これらの緒元について、移動床並びに固定床の水路実験、近年発展の著しい数値解析を主な研究手段として知見の蓄積がなされてきた。

水制近傍に生じる洗掘・堆積の傾向が水制の平面設置角度により異なることは古くから知られており、大正時代の技術書において既に言及されている⁶⁾が、その後の研究により、平面設置角度の影響は非越流型水制と越流型水制では異なることが知られている。Ahmed⁷⁾は、非越流型水制の平面設置角度を変化させた実験から、下向きより上向きの方が局所洗掘深が大きくなることを示したが、大木ら⁸⁾は、越流型水制ではその反対に、上向きの方が洗掘深が小さくなる傾向を実験により確認し、その要因を水制周辺の流れの構造により検討している。越流型水制の設置角度の効果に着目した研究は、主に流れの構造に着目して進められ⁹⁾¹⁰⁾、上向き、下向きそれぞれ30°程度までの範囲について検討されている。また、我が国における施工事例の平面設置角度は、秋草ら¹⁾の

統計的研究によれば、大多数が河岸直角から上向き15°以内の範囲に収まっているとされている。

一方、北米の河川工法で、spur dikesの一種である stream barbs¹¹⁾は、河岸への元付け部を河岸高とし、先端が低くなるようにA配を付けた木制を、河岸直角から60°から70°も上流側に角度を向けて、湾曲部の外岸に複数配置することにより、河岸侵食を防衛する工法として用いられている。日本国内でも、主に北海道において、stream barbsと同様に、かなり上向きの角度で、河床から突出する高さを抑えた越流型水制極の構造物（ナープ工という）が、流砂を捕捉して沓り洲を形成したり、河床形状と流れに変化をつけたりする目的で、用いられている（図-1）。

我が国の中小河川は、自然河道に比して狭くて深い単断面河道への改修¹²⁾がなされてきており、著者の行った多数の中小河川の現地調査¹³⁾では、河床材料が流失して河床低下傾向を示している河川が多く確認されている。著者は、そのような改修済みの中小河川における河床境界の改修に資する工法としてナープ工に注目している。

以上の背景を踏まえ、本研究では、河床から突出する高さの低い越流型水制について、平面設置角度を直角から上向き8°近くまで変化させた移動床水理実験を行い、平面設置角度が河床変動に及ぼす効果について考察するとともに、「洪水を勢力弱せず、流砂を捕捉して沓り洲を形成する」機能を発現するための水制形状について、基本的な検討を行った。

2. 実験方法

(1) 実験の概要

実験水路は、長さ8m、断面幅30cm（アルミ製）、側壁高さ20cm（アクリル製）の長方形断面水路である。水路上流端を9mとして、2mから4mの区間及び最下流端の1m区間を、水路床より9.5cmの高さまで板材を重ねて固定床区間とし、その間の3m区間を移動床区間として設定した。移動床区間には、粒径0.6mmの日本均一な珪砂（比重2.6、水中安息角34°）を満ち、固定床区間には同じ砂を塗布した粗度板を設置した。水路床A配は1/200とし流量は0.4 m³/sとした。

実験ケースは、水制模型の形状により設定し、各ケースの水制模型は、1m長の移動床区間の上流端から1.2mの位置に単体で設置した。

構造物周辺の河床変動を対象とした移動床実験の水理条件は、水路平均の掃流力が河床材料の移動限界を下回り構造物近傍のみ土砂が移動する静的平衡洗掘の実験と、河床全体が移動する状況で下流からの流出土砂量に平衡する上砂を上流から供給しながら行う動的平衡洗掘の実験とに区分され、水制に関する既往の研究の多くは実験が比較的容易な静的平衡洗掘条件下で行われている。

本研究では、河床低下傾向の中小河川において、高さ

の低い水制が河床変動に及ぼす影響を検討するため、水路平均の掃流力が常時移動限界を上回る状況下で、上流からの給砂は行わず実験を行った。すなわち、本実験は動的かつ非平衡の条件にあたる。通水を続けるにつれて河床低下が進行して同一流量に対する流砂量が減少すること。なおかつ水制の効果によって河床低下の進行に差があることから、実験時の水理条件は、水制を設置しない条件での値を代表値として表-1に示す。

また、通水時間は水制を設置しない条件での予備実験を踏まえ、通水30分程度で移動床区間の流砂量が減少し河床低下の速度が鈍化したことから、各ケースについて、30分通水後の水路中心における水位縦断分布と、1cmメッシュでの河床高を計測した。水位の計測はナープ式水位計（KENEK製）、河床高の計測はレーザー変位計（KEYENCE製）により行い、計器を固定した台車を観測方向に往復させながら、計器の出力電圧をAD変換カード（KEYENCE製）によりノートPCに記録し、予め用意した検定式により水路床からの比高に換算して整理した。河床高の計測中は、河床変動を停止させるため、水路下流端をせきあげ、砂の移動を停止させて計測を行った。また、水制模型周辺の三次元的な流れの構造を考察するため、ビデオ撮影を実施した。

(2) 実験ケースの設定

実験ケースは、水制なしの1ケース（Case0）、平面角度の検討のためのケースを6ケース（Case1-6）とした。さらに、水制形状の効果を検討するため、平面角度の検討結果よりCase5を基本形として抽出して、形状の異なる3ケース（Case5a, 5b, 5c）を追加した。

水制模型は厚さ18mmの木材を加工して、高さ10cmとして、初期河床高から5mm程度露出するようにした。横断方向は水平を基本とした。水制模型の断面形は長方形を基本とし、先端部のみ丸く加工した。水制長は、側壁から水路の1/3幅にあたる10cmまで確保することを共通事項としたため、上向き角度が大きくなるにつれて水制長は長くなった。

水制形状の検討のための追加1ケースは、以下のよう



図-1 ナープ工の施工事例
（左：精進川放水路、右：日高門川川）

表-1 水理条件

Discharge (m ³ /s)	Flow Depth (mm)	Channel width (mm)	Bed slope (%)	Channel slope (%)	Flow velocity (m/s)	Bank siltation (mm)
0.3	7.0	30.0	0.0050	0.0028	0.20	0.46

* - values at reference (Case0) as representative

に設定した。北米のStream beds¹¹⁾、北海道のパーブ工も、先端に向けて勾配がつけられていることから、水制先端を1cm下げ、横断面上では1:10の勾配となるケース(5a)、水制両面に法面をつけたケース(5b)、横断勾配と法面の両方を適用したケース(5c)を設定し、Case5と比較した。平面角度の検討のための実験ケースを表-2に、水制模型の形状の効果について検討するための実験ケースを表-3に示す。

3. 実験結果及び考察

表-2 実験ケース (平面角度の検討)

Case	平面角度	平面形状
1	0° (-)	
2	26.6° (1:0.5)	
3	45° (1:1.0)	
4	56.3° (1:1.5)	
5	63.4° (1:2.0)	
6	71.6° (1:3.0)	

表-3 実験ケース (水制形状の検討)

Case	横断勾配	法面	平面形状(5b, 5cのみ)及び側面図
5	水平	なし	
5a	あり (1:10)	なし	
5b	水平	あり (1:1.0)	
5c	あり (1:10)	あり (1:1.0)	

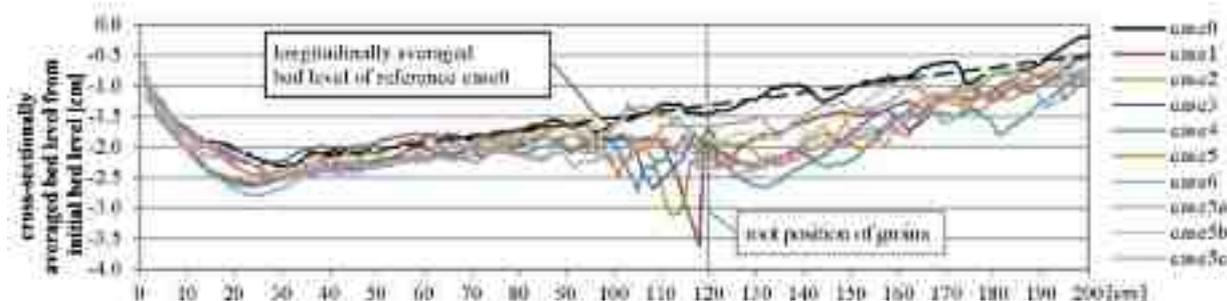


図-2 横断方向平均した砂面高の縦断分布

(1) 河床低下による縦断形の変化

移動床区間における横断方向平均の砂面高の縦断分布を、図-2に示す。全てのケースにおいて、上流側から河床低下が生じており、移動床区間下流端が固定された形で上流から河床低下が進み、水制を設置しないCase0では、移動床区間上流端から約30cmの位置で2cmあまり河床低下を生じた。河床全面に生じた砂堆の波長は20~30cm程度であった。水制模型を設置したケースでは、水制そのものが流砂量に影響を与えるため、河床低下の変合いにばらつきがある。これより、水制の効果を検討するにあたって、初期砂面高を基準とした整理では傾向が把握しづらいため、水制を設置しないCase0の河床縦断形を直線近似した平均縦断砂面高(図-2破線)を基準高として洗掘深等を整理して示す。

(2) 水平設置角度の効果

Case1~6の最大洗掘深を図-3に、水制近傍で洗掘を受けた体積を図-4に、砂面高の平面分布を図-5に示す。

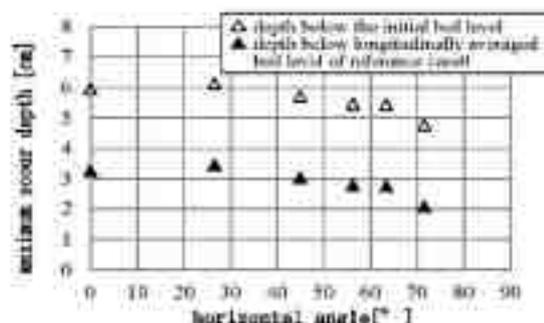


図-3 水平設置角度と最大局所洗掘深

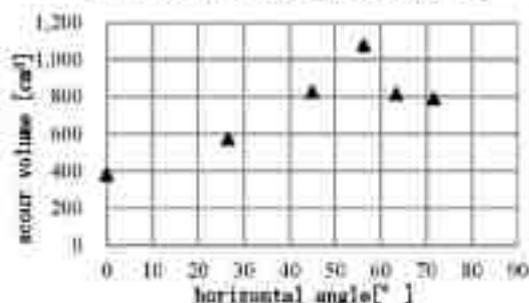


図-4 水平設置角度と洗掘体積

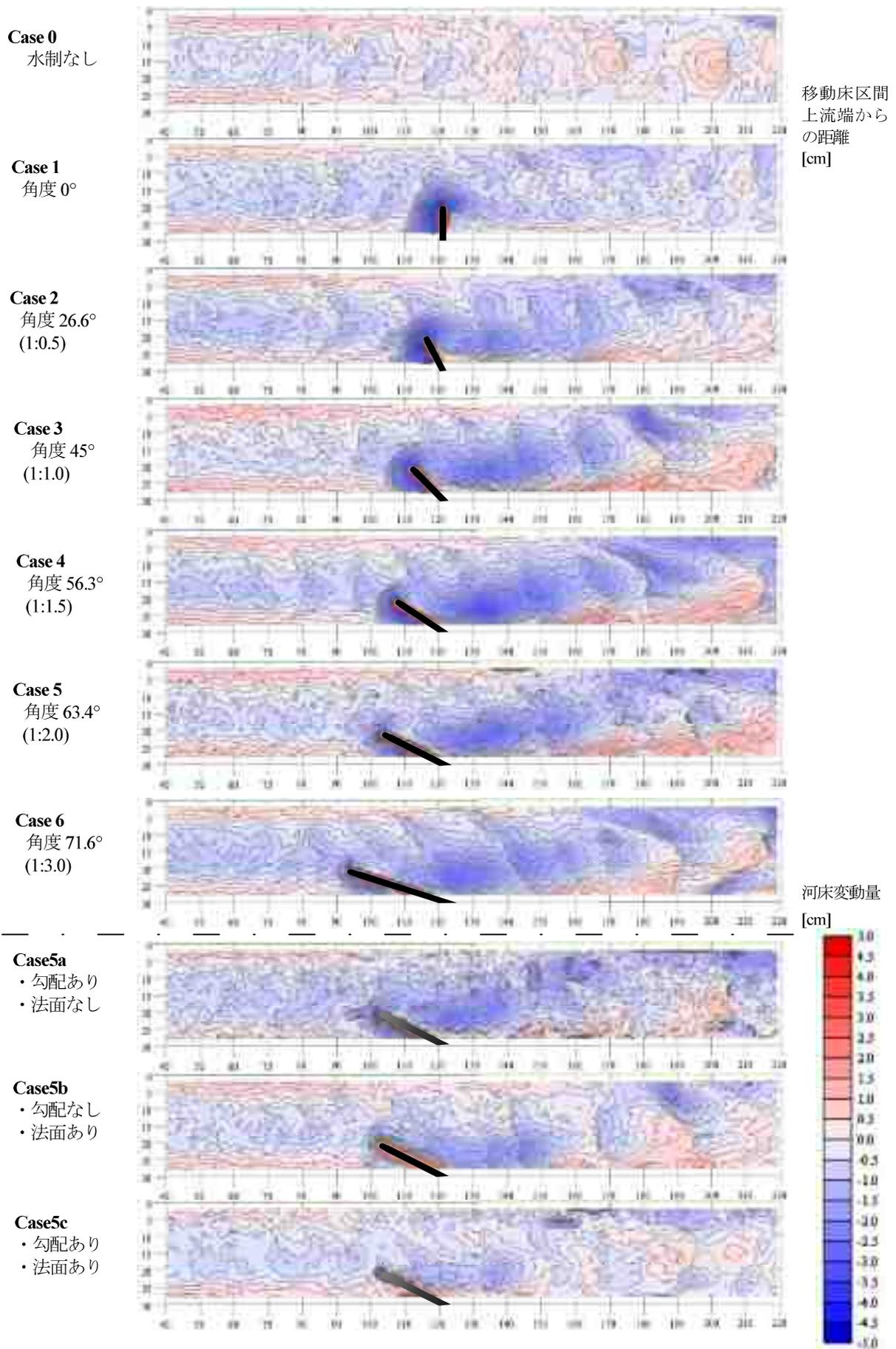


図-5 通水後の砂面高平面分布 (Case0 平均縦断砂面高基準)

なお、洗器体積は、砂堆による凹凸と区別するために、Case0の平均縦断砂面高を基準とし、水制近傍で1.5cm以上砂面が低い領域について集計した。

水平設置角度が最大洗器深に与える影響は、全般的には上向き角度を大きくするほど減少する傾向にあるが、初期河床高を基準とすれば、その差は小さい。一方、洗器体積は、角度を大きくするほど増加しており、角度 56.5° のCase4において最大となった。この理由は、図5の平面形状が示すとおり、水制を上流側に傾けるにつれ、水制先端から上流側にみられる洗器孔とは別に、水制を斜めに越流した流れに起因すると考えられる下流側の洗器孔の拡大によるものである。Case4より更に角度を大きくしたCase5aでは、下流側の洗器孔が極小し、侵食量が減少している。

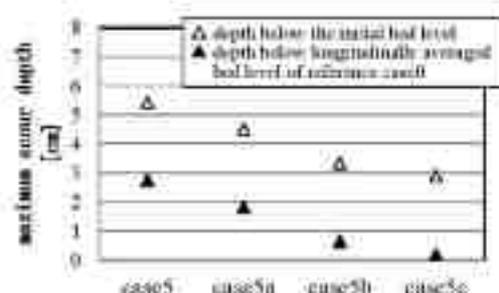


図6 水制形状と最大局所洗器深

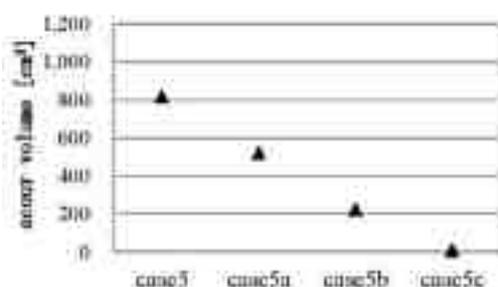


図7 水制形状と洗器体積

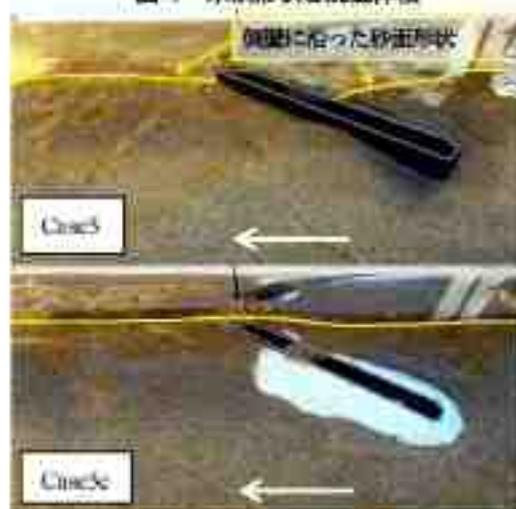


図8 水制周辺の河床形状

(3) 水制形状の効果

局所洗器深が抑制され、かつ水制下流側の侵食量が小さい上向き角度 63.4° のCase5を基本形として抽出し、形状の異なる3ケースとの比較により、水制形状の効果について検討した。最大洗器深を図6に、洗器体積を図7に示す。

先端を下げたCase5aは、通水直後には先端洗器を生じることなく、付け根付近に土砂の堆積を生じたが、砂面が低下し、水制が露出し始めると、Case5同様に先端洗器を生じ、水制根元に向けて次第に拡大した。洗器深、侵食量はCase5より減少したが、河床低下が進むにつれて、先端を下げた効果は不明瞭になると考えられる。

Case5の水制の側面に勾配1:1.0の法面を追加したCase5bでは、水制先端から上流側根元にかけての局所洗器が抑制され、最大洗器深、洗器体積ともに大幅に減少した。しかしながら、水制付近に流砂を捕捉するには至らず、通水後に水制全体が露出した。

Case5a同様に先端を下げ、かつ勾配1:1.0の法面を設けたCase5cは、通水開始から計測までの間、局所洗器を生じることなく、かつ水制の根元付近に流砂の堆積を生じた。上流から河床が低下する過程で、砂堆が水制付近を通過する際に、他のケースでは、砂堆前縁線が局所洗器孔に差し掛かると、洗器孔に常在する構脚周りの馬蹄型渦に類似した旋渦によって急速に砂が流出するが、本ケースでは、砂堆が水制を乗り越えるように進み、水制先端の河床高は回復し、水制付け根の上流側と下流側には砂が捕捉され、計測時まで維持された。図6に示した砂面高平面図は、レーザー変位計が壁面と干渉するため壁面近傍の砂面形状が捉えられていないことから、Case5と5cの計測時の河床形状の比較写真を図8に示す。写真に示すとおり、Case5では水制先端から上流側に沿って局所洗器が進行しているのに対し、Case5cでは水制の根元まで砂が堆積している。

以上の検討から、限られたケースではあるが、水制形状の効果をもとめれば以下のとおりである。まず、水制先端を下げることは、局所洗器の抑制に一定の効果は期待できるが、河床が低下し、水制が露出するとその効果は相対的に低下する。

水制側面に法面を設けることは、局所洗器の抑制に非常に効果的であるが、水制先端が水平では、上流からの流砂を捕捉・維持することはできなかった。

水制先端を下げ、側面に法面を設けることにより、局所洗器を抑制しながら、流砂を水制近傍に捕捉・維持することができた。

4. おわりに

本研究では、河床から突出する高さが低い越流型水制について、平面設置角度を直角から上向き 60° 近くまで変化させた移動床水理実験を行い、平面設置角度が河床

変動に及ぼす効果について考察した。また、「洪水を極力阻害せず、流砂を捕捉して寄り洲を形成する」機能を発現するための水制形状について、基礎的な検討を行った。本研究のまとめを以下に示す。

- (1) 上向き角度を大きくするにつれ、局所洗掘深は減少する傾向にあるが、水制を斜めに越流する流れにより下流側に形成される洗掘孔が拡大することにより、洗掘体積が増加する。
- (2) 水制の先端を低くすることにより、局所洗掘を抑制する一定の効果を得られるが、水制が露出すると局所洗掘が進行する。
- (3) 水制の先端を低くし、かつ流れの剥離を防ぐ法面を設けたケースでは、局所洗掘が大幅に抑制され、さらに水制の根元の高さまで流砂が堆積した。

以上の結果より、パーブ工による寄り洲の形成機構は、上向き角度が大きく、かつ先端を下げた低い水制が、出水中に水制の高さまで掃流砂を堆積させる働きによるものと考えられる。

本研究では、水制の角度の効果よりも形状の効果の方がより支配的である可能性が示唆されたが、形状の比較は上向き角度を固定して検討しているため、今後、適切な角度と形状の組み合わせを見出すべく、系統的な実験を継続し、検討成果の一般化を図る。

また、構造物設計の観点から、以下の検討を行っている。水制の設計にあたっては、基礎の根入れ深さを決定するために、洗掘深の予測が重要であることから、従来の洗掘予測式の適用性について検討を行う。同様に、構造物に作用する流体力の算定が必要であるが、川口ら¹⁴⁾は、水制に作用する流体力を抗力係数、揚力係数により整理しており、本研究が対象としているパーブ工についても、同様の整理が必要であると考えている。また、松本ら¹⁵⁾は、水制の構造体を蛇籠等の透過性材料とすることで、局所洗掘が抑制されることを示している。透過性材料の利用は、現地材料の利用やコスト削減の面でも利点が見込まれるため、今後検討を行う。

最後に、本研究では現象を単純化するために単一粒径の材料を用いた移動床実験を行ったが、水谷ら¹⁶⁾が示すように、現地河川における河床材料は通常混合粒径であり、水制近傍の河床変動特性に影響を与えることから、混合粒径の効果についても検討を行っていく。

謝辞：北海道におけるパーブ工の施工事例と貴重なノウハウを借しみなくご紹介いただいた(株)北海道技術コンサルタントの岩瀬晴夫氏、パーブ研究会の皆様、記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 秋草勲, 吉川秀夫, 板上義二郎, 芦田和男, 土屋昭彦: 水制に関する研究, 土木研究所報告第170号, 1960.
- 2) 山本晃一: 護岸・水制の計画・設計 一歩先そして一歩手前, 山海堂, 2003.
- 3) 福岡捷二, 西村達也, 高橋晃, 川口昭人, 岡信昌利: 越流型水制工の設計法の研究, 土木学会論文集, No.593-II-43, pp.51-68, 1998.
- 4) 福岡捷二, 藤田真二, 福岡捷二: 護岸環境を回復した低水路水制の設計とその環境機能の評価, 水工学論文集, 第54巻, pp.1267-1272, 2010.
- 5) 山本晃一: 日本の水制, 山海堂, pp.102-224, 1996.
- 6) Ahmed, M.: Experiments on design and behavior of spur dikes, *Proc. International Hydraulic Convention*, ASCE, pp.145-159, 1953.
- 7) 大本照憲, 平川隆一, 井出賢正: 越流型水制群に対する二次流と流砂の応答, 水工学論文集, 第42巻, pp.1003-1008, 1998.
- 8) 木村一郎, 細田尚, 音田慎一郎, 富永晃宏: 越流型水制周辺の非定常三次元流れ構造に及ぼす水制設置角度の影響, 水工学論文集, 第47巻, pp.841-846, 2003.
- 9) 川口広司, 福岡捷二, 渡邊明英: 設置角度の異なる越流型水制周辺の流れと流体力分布特性, 水工学論文集, 第48巻, pp.811-816, 2004.
- 10) 松本大三, 富永晃宏: 越流型水制群を用いた河床変動創出に及ぼす水制設置角度の影響, 水工学論文集, 第50巻, pp.1009-1014, 2006.
- 11) U.S. Department of Agriculture Portland, Oregon Natural Resources Conservation Service: *Engineering Technical Note 23 Design of Stream Barbs Version 2.0*, 2005.
- 12) 原田守啓, 藤田裕一郎: 中小河川の断面形状と河道粗度設定手法の変遷に関する考察, 土木学会論文集B1(水工学), Vol.68, No.4, pp.1_1291-1296, 2012.
- 13) 大石哲也, 高岡広樹, 菅場祐一, 原田守啓: 中小河川の効率的・適確な維持管理に向けて～岐阜県の複数河川を対象にした河道タイプの把握と成立要因の分析～, 河川技術論文集, 第18巻, pp.221-226, 2012.
- 14) 川口広司, 岡信昌利, 福岡捷二: 越流型水制群に作用する流体力の特性, 水工学論文集, 第44巻, pp.1065-1070, 2000.
- 15) 松本大三, 富永晃宏, 石川光雄: 越流型水制群を用いた河床変動創出に及ぼす透過性の影響, 水工学論文集, 第52巻, pp.637-642, 2008.
- 16) 水谷英朗, 中川一, 川池健司, 馬場康之, 張浩: 混合砂河床における水制周辺の局所洗掘及び粗度変化に関する研究, 水工学論文集, 第54巻, pp.805-810, 2010.

(2012. 9. 30受付)