

## ◆ 河川生態特集 ◆

# コンクリートブロック化した 急勾配水路式魚道の適用性とアユの遡上経路

小野雅人\* 柏井条介\*\*

## 1. はじめに

本報告の対象とする水路式魚道は、水路内に流れに抵抗する粗度を配置し、流速を低減させようというものであり、横断方向に粗度の配置や水路床標高を変化させることにより、水深、流速の変化する多様な流れの場を形成させることが可能な魚道形状である。

土木研究所水工水資源研究室では、水路式魚道の設計手法を確立すべく、円筒を粗度とした場合を対象に配置と水理特性の関係を調査し、魚道の設計手法を提案した<sup>1)</sup>。更にその検討結果を受け、コスト縮減、工期短縮等の観点からコンクリートブロック化を念頭に置いたより実用的な形状設定方法を検討し、アユ、ヨシノボリ等を用いた遡上実験により、魚道としてはかなりの急勾配である1/5勾配まで適用可能な魚道形状を提示した<sup>2)</sup>が、これまでの実験では1/5勾配が最急勾配であり、更なる急勾配水路への適用が期待された。このことを踏まえ、本報告では、更に急勾配な1/3勾配の場合を対象に水理特性調査及び遡上実験を行い、その適用可能性を検討した。

また、これまでの検討では、粗度を上下流方向に直列とし、粗度と粗度間の空間を同程度のものとして設定してきたが、これらの設定の妥当性の確認及び形状の更なる改善のため、遡上経路や休憩状況といった魚の遡上形態に関する詳細な知見が必要であり、アユを対象に遡上実態調査を実施した。

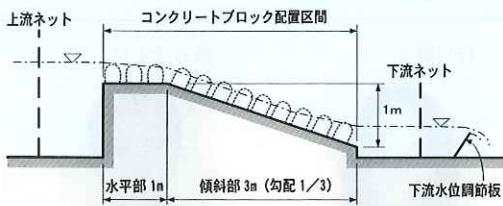


図-1 実験模型概要図

Application of a Steep Slope Concrete Block Stream Type Fish-way and Sweetfish Ascending Routes

## 2. 1/3 勾配魚道の適用性調査

## 2.1 実験の概要

図-1に実験模型の概要を示す。これまでと同様、模型は原型の大きさのものであり、底部については実際にコンクリートブロックで製作した。上流端は、流れがスムーズに加速するよう1mの水平区間を設けている。また、魚道下流水路の下流端には水位調節板を設け、魚道下流端付近での流れが、減勢しながらスムーズに下流水路に導かれるよう水位制御を行った。上流端と下流端のブロックの落差は約1mであり、水路幅はこれまでの検討で所定の水深範囲で良好な遡上状況を得るために必要とされた2mとした。

図-2に粗度配置を示す。この粗度配置は1/5勾配のものと同じである。当然のことながら、1/3勾配で必要な流速低減量は1/5勾配のものよりも大きく、粗度配置は1/5勾配より密なものとする必要があるものと考えられるが、1/5勾配の配置でも粗度間の隙間は、小さい箇所では数cmであり、既に魚の通過空間としては厳しい条件であること、また、1/5勾配での結果が非常に良好であり、

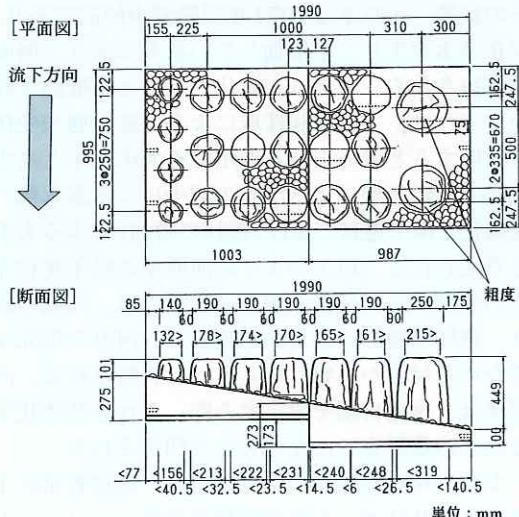


図-2 粗度配置

流れの状態としては余裕があるものと考え、今回1/5勾配のものをそのまま用いることとした。

水理特性調査は、50, 150, 250ℓ/sの各流量に対し流況観察を実施するとともに、ポイントゲージにより水面形を、プロペラ流速計により流速を測定した。基本単位(1m×2m)内での水面形、流速の測定位置を図-3に示す。測定は傾斜部の中央のブロックで行った。また、流速は水深方向に計測し、流速分布を把握した。

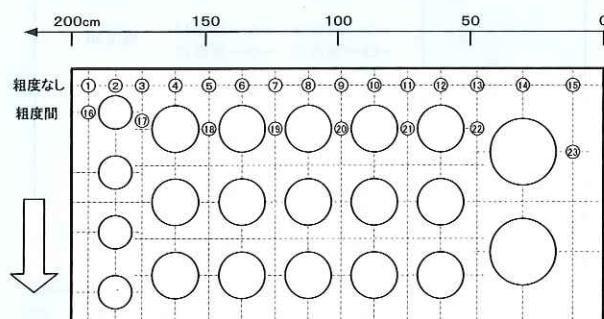
遡上実験は、浮遊魚としてアユ、底生魚として主にヨシノボリを用い、表-1に示す条件にて実施した。アユは養殖魚、底生魚は近傍河川での捕獲魚である。なお、50, 250ℓ/sの条件は、それぞれ設計上の最低水位wl<sub>min</sub>(最深部で20cm)及び最高水位wl<sub>max</sub>(最深部で40cm)を与える流量条件に相当している。

アユに関する遡上実験方法は、これまでの方法と同様である。すなわち、遡上実験時間をアユの遡上が盛んな日の入、日の出を含む午後4時から翌朝の午前9時までとし、実験終了後に遡上魚、非遡上魚数の確認を行った。また、底生魚は遡上時刻が明確でないこと、移動速度がゆっくりであることから、実験時間を朝10時から2日目の朝10時までの48時間とし魚数確認を行った。ただし、経過時間と遡上状況を確認するため、また、下流へ戻る魚の影響を軽減するため、24時間後においても、一度通水を中断して遡上魚の捕獲を実

表-1 遡上実験の実験条件

| 対象魚(実施時期) | 流量(ℓ/s)                              | 体長の範囲      | 体重の範囲     |
|-----------|--------------------------------------|------------|-----------|
| アユ(7月)    | 50 <sup>1)</sup> , 250 <sup>2)</sup> | 9.5~14.8cm | 6.1~24.5g |
| 底生魚(7月)   | 250 <sup>2)</sup>                    | 3.4~5.6cm  | 0.2~1.3g  |

注：1)wl<sub>min</sub>に対応、2)wl<sub>max</sub>に対応

写真-1 wl<sub>max</sub>付近の流況

施した。なお、遡上実験では既に十分な遡上が得られることが確認されている1/12勾配魚道の実験を同時にを行い、本勾配との比較を行っている。実験での使用魚数は、統計処理上の有意性を持たせるため、各ケース100尾程度以上とし、繰り返し使用はしないこととした。

## 2.2 実験結果

### 2.2.1 水理特性調査

#### 1) 流況

写真-1にwl<sub>max</sub>付近での流況を示す。粗度位置でのせき上げ、加速による水面への影響がかなり顕著であり、上下流方向の水面形は階段状の様相を示す。流れは水深の大きい側が速く、最深部側の最も大きい粗度では、粗度上流側の水面付近で飛散する状況がみられ、空気混入による白濁の影響も大きい。この最深部付近の流況の乱れは、流量が小さくなてもそれ程改善されない。

#### 2) 水面形

図-4に横断方向の水深変化を示す。図中の粗度なし、粗度間断面は図-3に示してあるとおりである。これまでのケースと同様、幅方向には水面はほぼ水平になっている。1/5勾配以下では、粗度間と粗度なしの水深はあまり変わらなかったが、1/3勾配では粗度間の水深が粗度なし断面のそれよりも大きくなっている。

#### 3) 流速

図-5に縦断方向に粗度のない測線上での粗度あり、粗度間の流速分布を示す。図はwl<sub>max</sub>の条件下におけるもの

であり、水深方向については水深で、流速については平均流速で無次元化し、水深の異なる各測点を比較した。粗度間の流速分布はこれまでのケースと同様、測点位置によらずほぼ相似となっている。粗度なし断面では流速分布に2つのパターンが見られるが、水路の中央部付近における、水深の中央付近で流速のピークを持つ分布がこれまでのケースの傾向である。それ以外の領域の分布は、底面付近に流速のピークを持つ粗度間におけるよ

パターンと似ている。底面付近に流速のピークを持つ理由は明確ではないが、 $1/3$ 勾配では加速による水面勾配が大きく、加速流が底面に押し付けられる傾向をもつことが考えられる。

図-6には、水深方向の流速測定結果を平均した平均流速と流量の関係を測点毎に示す。図より、流速は最深部で最も大きく、水深の大きい方から小さい方に向かって低減している。また、同じ測点でも流量が大きくなれば流速も大きくなる。粗

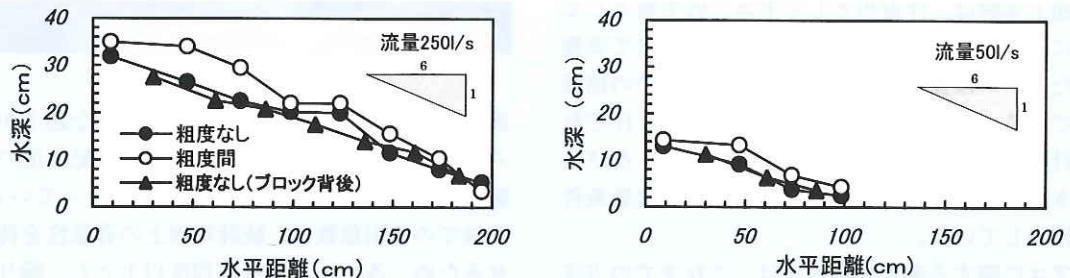


図-4 ブロック内の横断方向における水深変化

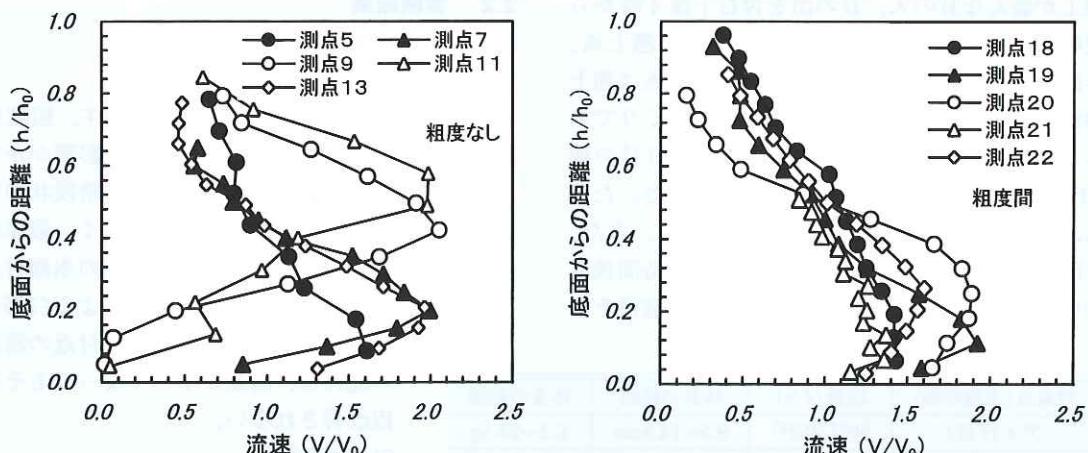


図-5 横断方向に粗度のない測線における深さ方向の流速分布

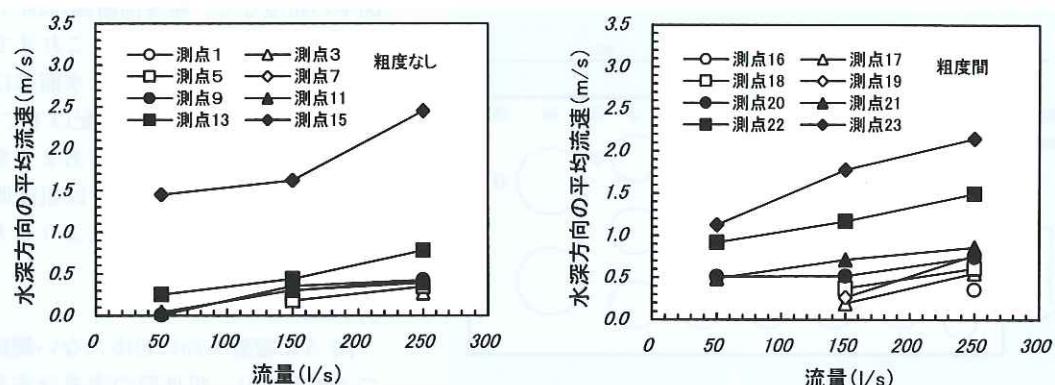


図-6 水深方向の平均流速と流量の関係

度なしでは、最深部を除く領域の流速は1m/s以下に制御されている。粗度なしと粗度間では、粗度間の流速の方が若干大きくなっているが、最深部付近を除く領域の流速は1m/s以下であり、1/3勾配においても流速の小さい領域が十分に確保されている。なお、図は縦断方向に粗度のない断面上のものであるが、粗度背後の領域の平均流速は数十cm以下であり非常に小さいものである。

図-7は側壁及び横断方向にみた粗度間の中央断面により断面分割を行い、粗度なし測線上の流速測定結果から断面平均流速を求め、計算値<sup>1)</sup>との比較を行ったものである。断面平均流速の計算値は、勾配1/20の水路上に円筒を上下流方向に直列に並べ、配置密度を変化させて行った実験で得られた実験式  $n = 0.0332(1 - \alpha)^{-1.7}$  を用いて、マニング式  $v_e = 1/n \cdot R^{2/3} I^{1/2}$  より算出したものである。ここに、 $n$ ：マニングの粗度係数、 $\alpha$ ：遮蔽率 =  $A_r/A_t$  ( $A_r$ ：粗度の流れ方向の投影面積、 $A_t$ ：粗度を含む流れ断面積)、 $v_e$ ：断面平均流速、 $R$ ：径深、 $I$ ：水路勾配である。

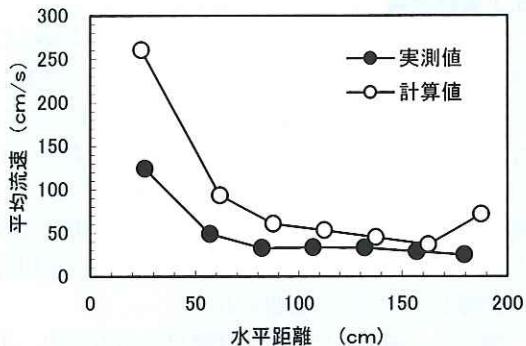


図-7 断面平均流速の実測値と計算値の比較

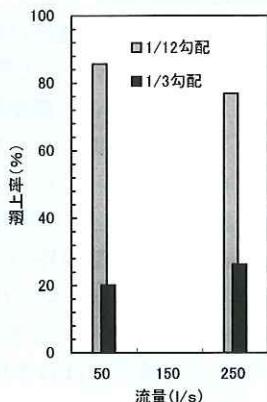


図-8 水路式魚道の遡上率 (アユ)

図-7より、水深の大きいところでは、実測値と計算値の平均流速の差は、これまでに実施した1/12～1/5勾配よりも大きくなっているものの、流速の比較的小さいところでは、実測値は計算値と同程度かそれより小さい値となっており、本計算手法の有用性が確認される。

## 2.2.2 遡上実験

図-8にアユの遡上実験結果を1/12勾配魚道での結果と併せて示す。図より、同時実験を行った1/12勾配では80%程度の高い値が得られているのに対し、1/3勾配では20%程度のかなり低い遡上率に留まっている。先に示したように、平均的な流速は数十cm/s程度の小さな値がかなり広い範囲に亘り得られており、遡上率の低い原因は明確ではないが、平均的な流速のみでは表せない局所的に存在する速い流れが遡上に影響を与える可能性がある。水面は細かく測定すれば横断方向にも階段状になっており、局所的に速い流れが存在しているものと考えられる。また、全体的な流況の乱れ、すなわち水路の全幅に亘る気泡の存在や大きい水面変動なども遡上に影響を与えていることが考えられる。更には、魚道勾配そのものが遡上に影響を与えている可能性もあるう。

図-9にはアユの体長別の遡上率を示す。どちらも体長が大きくなるほど遡上率が良くなる傾向を示しているが、1/3勾配ではより顕著であり、概ね体長12～13cmを境に遡上率が変化している。特に、小流量の50ℓ/sではこのあたりの体長を境に極端に遡上率が低下しており、体長の小さい、すなわち遊泳力が小さいアユにとってこの勾配は極めて厳しい条件であると考えられる。

図-10には底生魚の遡上率を示す。底生魚は遡上に時間を要するため、実験終了後、魚道を上流、

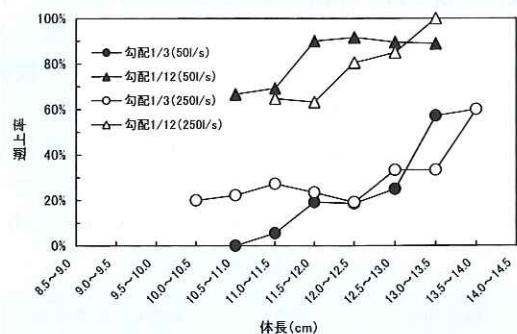


図-9 水路式魚道の体長別遡上率 (アユ)

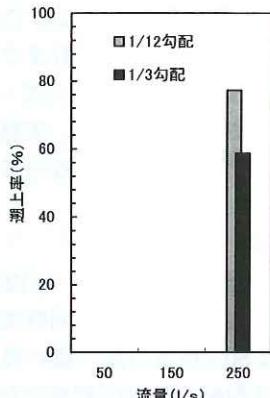


図-10 水路式魚道の遡上率(ヨシノボリ他)

中流、下流の3区分し、これら魚数についてもカウントしたが、最上流及び上流まで達したものに加えると、1/3勾配で概ね60%、比較のために行った1/12勾配では概ね80%の遡上率であった。これまでの実験で得られた底生魚の遡上率は概ね40~50%であり、底生魚は1/3勾配といった急勾配においても遡上可能であると思われる。底生魚は遡上の際、水深が小さい低流速域を利用しているものと考えられる。実際、実験終了間際、流量を下げる段階で、僅かなみず道を利用して遡上する様子が観察できた。

図-11は体長別の遡上率(最上流、上流のものを足した遡上率)を示したものであるが、どちらのケースも遡上率と体長には一定の傾向が見られず、遡上意欲のある魚体については、遡上可能であると考えられる。

### 3. 遡上実態調査

#### 3.1 実験の概要

実験条件を表-2に示す。実験は勾配1/12の模型を用い、遡上実験と同様の方法で行った。遡上状況の観察は、水面の波の影響をなくすため、上流から5ブロック目(全12ブロック)の上部に水面と接するように透明アクリル板で製作した観察箱を設置し、上面からビデオ撮影により行った。この位置は基本単位の流れが上下流方向に変化しなくなる区域であり、水面形、流速の測定ブロックでもある。流量は、水面が粗度高以上となり、

表-2 遡上実態調査の実験条件

| 魚道勾配   | 流量     | 対象魚(実施時期) |
|--------|--------|-----------|
| 1/12勾配 | 300ℓ/s | アユ(8月)    |

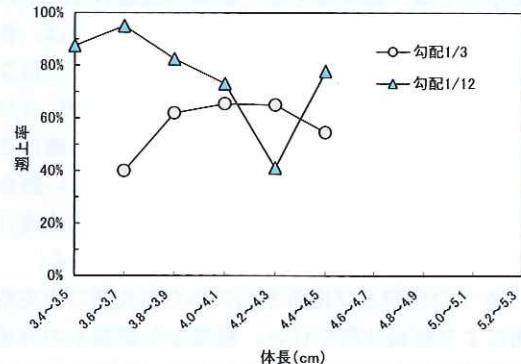


図-11 水路式魚道の体長別遡上率(ヨシノボリ他)

観察箱による観察が可能な流量として300ℓ/sとし、対象魚はアユとした。

なお、最深部の流速は大きく、観察箱を設けても気泡や白波により観察が困難であったため、観察範囲は全幅(2m)に対して、浅い側の概ね6割程度とした。また、実験中の照明は、遡上への影響を極力抑えるため、ビデオ撮影が可能な程度の最小限のものとした。

#### 3.2 実験結果

観察範囲を通過した全てのアユ(上流から戻ってきたものや途中で引き返したものは除く)の遡上の軌跡を水面形、平均流速と併せて図-12に示す。なお、この実験における遡上率は66%であり、そのうち観察範囲を遡上したものは80%であった。遡上率は、同模型を用いた過去の実験結果と比較して若干低いが、これは実験時期、流量、照明等が影響しているものと思われる。

図より、遡上には一定の経路はないものの、水深の小さい領域の利用頻度が若干高い傾向が見られた。アユは魚道の端を遡上するものほど直進性が高く、中央に近づくほど直進性は低くなった。これは経路の選択肢が増えることと関係があるのかもしれない。しかしながら、観察範囲内では、左右に1ブロックないしは2ブロック移動した後は再び直進していることから、アユはある程度まとまった区間を直進して遡上する傾向があるものと考えられる。また、観察範囲外の高流速域は2割程度のアユが利用していると見られるが、観察範囲内である低~中流速域との行き来は少なく、アユは自分の好む流速域からはあまり外れることはないと考えられる。

図には、アユの休憩が観察された場所も併せて

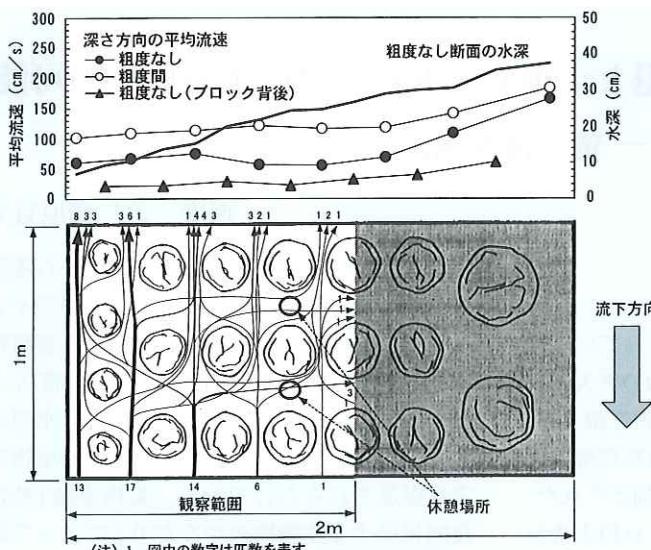


図-12 アユの遡上経路(勾配 1/12, 流量 300ℓ/s)

示している。これらの場所では3~7分程度の休憩が観察されており、アユはブロック背後の低流速域を適当な休憩場所として利用していることが分かる。

ここで、本実験では図-2に示した通り、粗度は直列配置、上下流方向の粗度の隙間間隔は粗度と同程度としている。これらはアユの直進性、ならびに休憩場所を考慮したものである。今回の実験結果から、アユはある程度まとまった区間を直進すること、ブロック背後の空間を適当な休憩場所として利用していることから、これらの配置の有効性が確認された。

遡上の割合を時刻別で見ると、日没付近の19時台(遡上割合25%)及び22時台(同22%)に遡上のピークが見られた。アユの遡上活動が活発になる時間帯は、これまでの知見から照度変化の激しい日出、日没と言われている。22時台に遡上が活発に見られた理由は定かではないが、ビデオ撮影用の照明が影響しているのかもしれない。また、遡上は深夜0時台でほぼ終了し、日出付近での遡上は見られなかった。

#### 4. おわりに

本報告では、1/5勾配から更に急勾配とした1/3勾配魚道を対象に、その水理特性、遡上特性を調査した。また、1/12勾配魚道を対象に、アユの遡

上実態を把握するための調査も併せて行った。主な結論は次の通りである。

- 1) 1/3勾配では多様な流速場が得られ、ヨシノボリの遡上率はこれまでのものと変わらないが、アユの遡上率はかなり低減する。したがって、適用可能な魚種や体長が制限される。
- 2) アユは様々な流速域に対して遡上が可能である。また、アユの遡上経路や休息状況から、本魚道のブロック配置の有効性が確認された。

なお、本成果は建設省土木研究所の共同研究制度に基づき実施した、株式会社ホクエツ、技研興業株式会社、株式会社テトラ、共和コンクリート工業株式会社との共同研究の成果の一部である。

#### 参考文献

- 1) 柏井条介、野仲典理:水路式魚道の粗度とアユの遡上に関する調査、土木研究所資料、第3601号、平成10年12月
- 2) 桜井力、柏井条介、佐々木國隆、岡崎克美、進藤邦雄、岡本俊策:コンクリートブロックを用いた粗石式魚道の水理および遡上特性、水工学論文集、第44卷、2000年2月

小野雅人\*



建設省土木研究所ダム部  
水工水資源研究室研究員  
Masato ONO

柏井条介\*\*



同 水工水資源研究室長  
Josuke KASHIWAI