

1. はじめに

魚類の生息環境の確保や水域から陸域への生態系の連続性の創出を目指した多自然型川づくりにとって河川の側岸の多様性が重要とされる。このような河岸の重要な形状要素の一つとして、河川の側岸に沿う湾状の淀み水域があげられる。このような水域のうち、平水時に流水域と開口部で接続しているものを「わんど」という。わんどは平水時には魚類の産卵や子稚魚期の生活場、他の生物の生息・生育に適した環境空間であり、洪水時には魚類の避難場の役割をするとされている。魚類によってはたまり状の閉鎖的水域を好むものがあり、この場合水質維持のために本川とつながる開口部を設ける必要がある。そこで開口部の位置や形状を決定するための指針を得ることを目的として、わんどの開口形状を変化させた際のわんど内渦構造、水交換機構について研究を行った。なお本川流速は変化の少ない平水時ではなく小出水時を対象としている。

2. 実験方法

実験水路は長さ 7.5m, 幅 30cm, 勾配 1/800 の長方形断面水路を用い、水路右岸を遮蔽物により遮蔽し、上流から 4m の位置に解放区を設け、わんど域とした。また対岸に遮蔽を設けることで本流幅をすべてのケースにおいて 15cm となるように設置した。わんどには開口部長 L と奥行き幅 B_w の比 (アスペクト比) が 1.67 (15 : 9) (開口部を除く) のものを用いた。流量は 1.89 l/s とした。水深はわんど域で 4cm となるように水路下流部の堰上げにより調整した。整流区間は上流約 50cm の範囲とした。この条件で平均流速は 31.5cm/s, フルード数は $Fr=0.503$, レイノルズ数は $Re=7243.8$ となった。以上は全ケースで一定とした。

計測はわんど内の流れ構造に着目した可視化 PIV 法による流速ベクトル計測と水交換速度に着目した画像撮影による濁度経時変化計測を行った。PIV 計測の流れの可視化には、直径 50 ミクロン、比重 1.02 のナイロン樹脂粒子を用い、厚さ約 3mm のシート状にしたアルゴンレーザー光を開水路水平断面に照射した。レーザーシートの照射位置は水平断面に 3 断面 ($z=5, 20, 35\text{mm}$) を設定した。この可視化画像はビデオカメラを用いて 1/30s で撮影した。画像計測には DIPFLOW (DITECT) PIV システムを用い、相互相関法により画像解析し、1800 データ 60 秒間平均値の流速ベクトルデータを取得した。なおわんど内平均流速は PIV による流速ベクトル計測位置の合成流速絶対値のアンサンブル平均である。

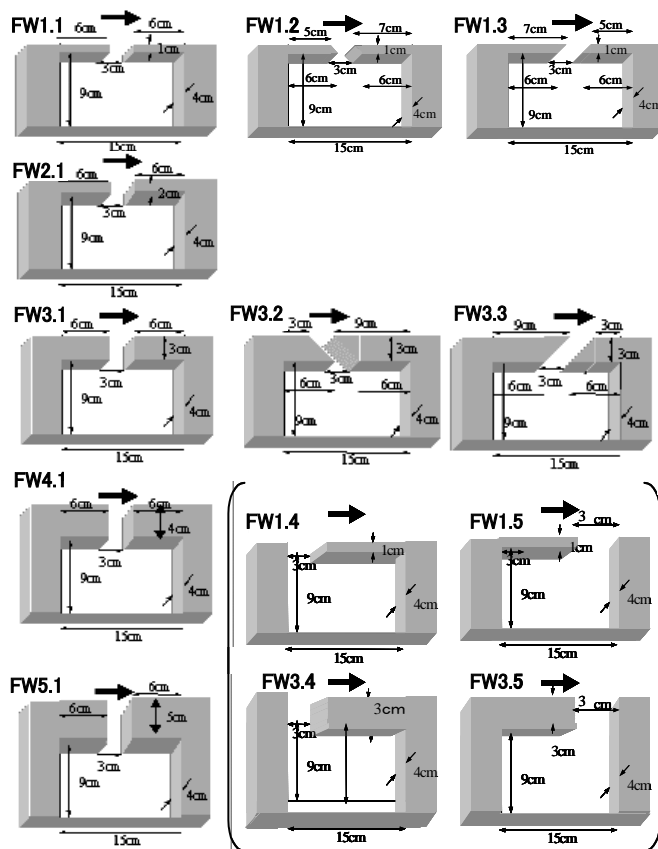


図-1 わんど開口形状

濁度計測はいったん開口部を遮蔽して、わんど内をアクアブルーによって一定濃度になるように満たした後、遮蔽部を取り去る実験を行った。この染料の流出状況をわんど上面からビデオで撮影し、ビデオ画像から一定間隔で取り出した静止画像より RGB 値を取得し、これを白黒画像へ信号を変換させて濃淡情報として表す方法を用いた。静止画像は 60 コマごとに 2 秒間隔で作成し、わんど内の画面を 10×10 の 100 の格子を設定し、各格子点の濃淡強度を読み取ってから全体の平均値を求めた。濃淡強度は 262.5 が黒、0 が白となるように変換される。これにより得られた値を本実験における濁度と定義し、濁度の時系列変化が得られた。なお実験ケースとしては、わんど開口形状は開口長と開口向き、開口位置の違いにより図-1 に示す 13 ケースとした。

3. わんど内の流速ベクトル

$z=20\text{mm}$ の断面における流速ベクトルを図-2 に示す。開口水路長 10mm の場合、わんど流入の際すべて開口向きに流向を向けるが、その流入機構は同じではないということが分かった。FW1.1, FW1.2, FW1.5 は本川の流れが下流側わんど開口壁にぶつかることで直接

流入してくる。一方FW1.3及びFW1.4では開口部に流速の大きい渦が発生（以降開口渦と表記する）し、その渦に本川流れがいったん取り込まれた後に放出されることでわんど内に侵入してくるといった間接的な流入が発生している。

開口水路長 30mm の場合、すべてのケースで開口渦の存在が確認された。FW3.1では開口渦の形成によりわんど内上流側に向かう流れを形成する。FW3.2では開口渦の形成範囲が引き伸ばされた形でわんど内に及ぶため、わんど奥の方向に流向を向けた流れが流入し、わんど内に2つの渦を形成する結果となっている。FW3.3では開口渦形成範囲がFW1.3とほぼ同じ範囲と小さいため流入流れはその後の開口水路を通ることで開口向きに向けられてわんど内に進入している結果となっている。FW3.4ではFW1.4同様に開口渦を介してわんど内に反時計回りの渦を形成していることが分かる。FW3.5では開口渦の発生しないFW1.5と逆の反時計回りの渦を形成している。

わんど中央直角開口のケースについて、FW1.1では開口渦が形成されないのに対し、FW2.1では一部わんど内にはみ出して開口渦が形成され、わんど内では上流方向に放出された流れにより渦を形成している。FW3.1, FW4.1では開口部に収まる範囲で開口渦が形成され、わんど内の渦はFW2.1同様である。FW5.1ではさらに開口渦が本川側に近い一部区間で形成されるため、わんど内への流入は残りの開口区間を通ることにより向きを変えられるため、2つの渦を形成している。これらのことから開口渦は円形で形成され、開口渦は円形から離れた形（楕円）にはなりにくいことが分かる。

以上のことより、わんど内への流入は開口渦の発生と直接流入の2通り存在するが、本川流れが下流側わんど開口壁にぶつかることで起こるものと考えられる。どちらの形状をとって流入するかは、上流側のわんど開口壁の長さにより決まると考えられる。ただしこの開口渦の有無を決定する上流側開口壁の長さは流量により変化する。この開口渦が形成される機構について、下流側開口壁の影響で上流側に流向を向けた流れは上流側開口壁の影響で行き場を失い、そこに上流側開口壁に沿って本川へ流出する流れが加わることで開口渦形成に至ると考える。開口長が10mmであるのに開口渦を形成したFW1.4も上流側わんど開口壁がわんど形成壁にあたるので、同様に説明ができる。

4. 濁度の時系列変化と水交換速度

染料を用いた濃度変化速度を計測して水交換速度を求めた。実際の染料濃度と画像の濃淡強度の関係は濃淡強度が180以下ではほぼ線形であることを検定で確認しているため、ここでは濃淡強度そのものを相対的な指標として用いた。実験はまず開口部を遮蔽し

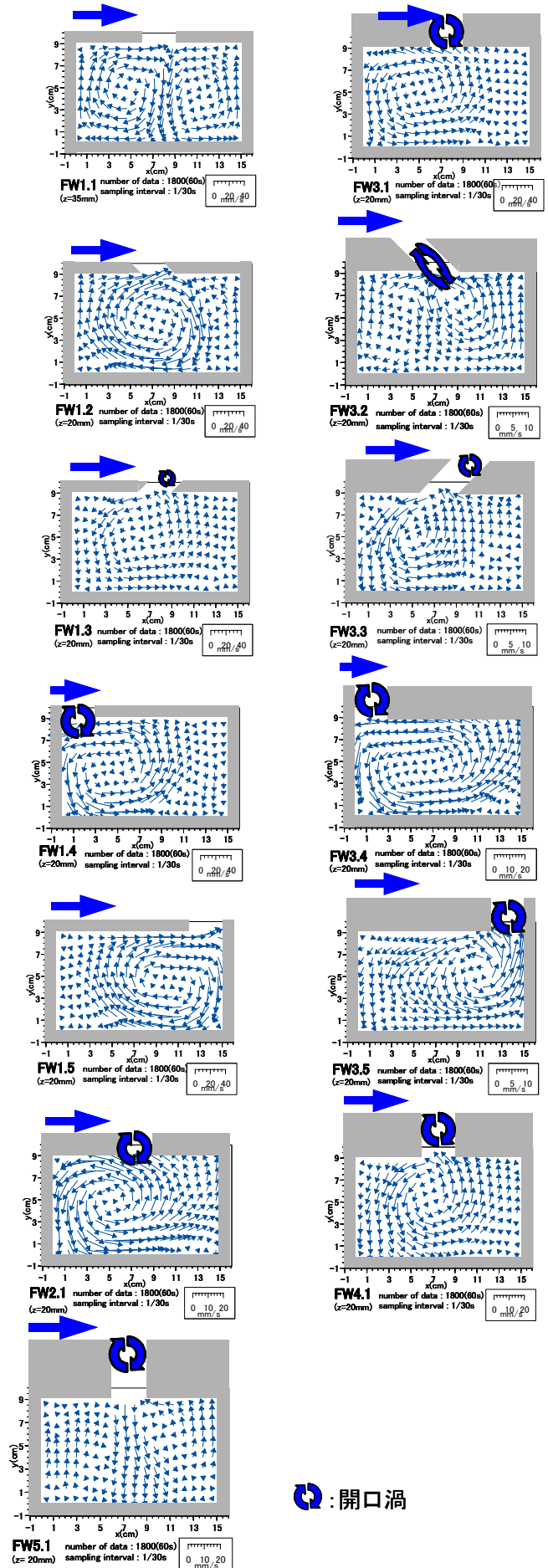


図-2 PIV解析による流速ベクトル

てわんど内を一定濃度の染料液で満たす。この時の濃淡強度を基準濁度 C_0 とする。開口部遮蔽を解除してからの各時間ステップにおける濃淡強度のわんど内空間平均値 C をビデオ画像計測から求めた。無次元化のためこれを基準濁度 C_0 で除したものが図-3 であり経時変化を片対数表示したのが図-4 である。これがほぼ直線分布することから指数近似を適用する。近似曲線を次式のように求めた。

$$\ln(C/C_0) = -t/\tau + A \quad (1)$$

ここで τ は片対数グラフの傾きを、 A は切片を示す。 τ はその値が大きいほど混合が遅いことを示し、滞留時間と呼ぶ。これから水交換速度 V_e を以下のように定義する。

$$V_e = \frac{D \cdot L}{\tau \cdot b} \quad (2)$$

ここで D はわんど奥行き、 L はわんど長さ、 b は開口部の幅である。この水交換速度 V_e はわんど内の水の交換の速さを示し、大きければ交換が早いことを示す。この定義よりわんど内平均流速と水交換速度を比較した結果を図-5に、平均流速に対する水交換速度の割合を示したものを図-6に示す。

図-5 よりわんど内平均流速が大きい方が水交換速度も大きいという傾向があるが、その増加率は一定でなく、効率が存在することが明らかになった。開口渦の形成が見られるケース (FW1. 1, FW1. 2, FW1. 5 以外) では直接の流入がないため、わんど内平均流速が小さくなり、水交換速度も小さくなる。しかし図-6 より交換効率は直接流入のケース (FW1. 1, FW1. 2, FW1. 5) より良くなる結果となっている。開口向きについて、上流向きに開口したもの (FW1. 3, FW3. 3) は特に平均流速は遅くなり、開口長を長くするとよりわんど内静穏域確保に効果的であるが、同時に水交換も遅くなることが分かる。FW1. 2 に見られるように開口渦が発生しない場合開口向きをわんど下流向きにすることで平均流速増加は望めないことが分かる。一方 FW3. 2 に見られるように開口渦が発生する場合は、平均流速が小さい割りに水交換速度が大きい値をとっているため、非常に効率が良いことが分かる。これはわんど内に2つの渦を形成するため、渦中心や渦形成範囲外といった水交換が遅れる場所が少ないためであると考えられる。開口位置について開口部を上流端 (FW1. 4, FW3. 4) にとることは平均流速の低下に効果があるが同時に水交換の遅れを招き、再循環渦を形成しやすいため効率も悪いということが分かった。開口長についてみると、開口長が増すにつれ、平均流速が遅くなり、同時に水交換速度も遅くなっていることが分かる。

最後に開口渦が発生するケースにおいて上面 ($z = 35\text{mm}$) に比べ下面 ($z = 5\text{mm}$) で大きい流速を示すものが

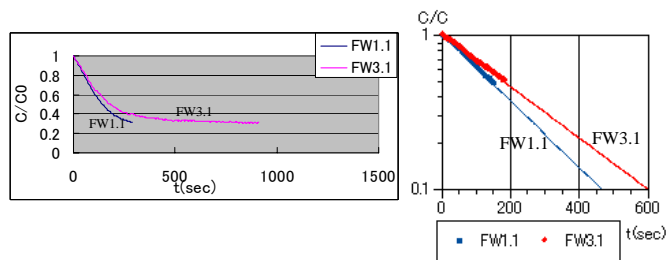


図-3 濁度の経時変化 図-4 濁度経時変化指数近似

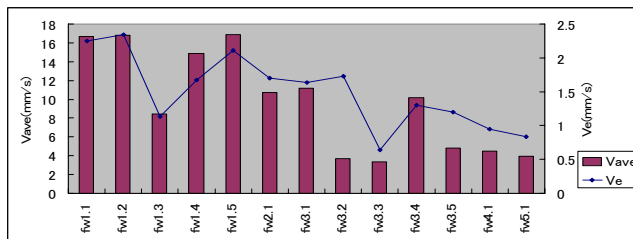


図-5 わんど内平均流速と水交換速度

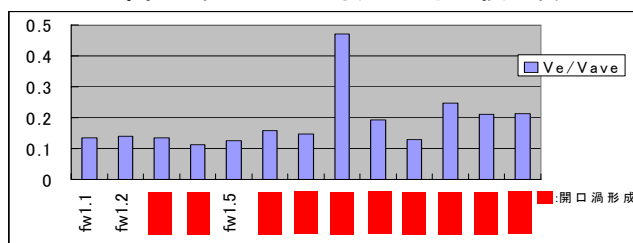


図-6 平均流速に対する水交換速度の割合

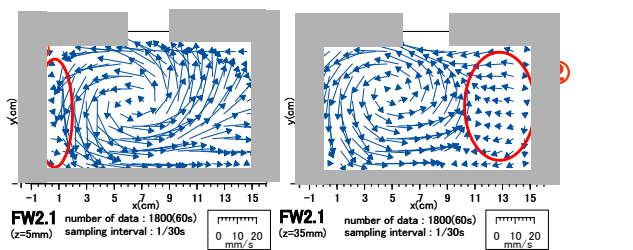
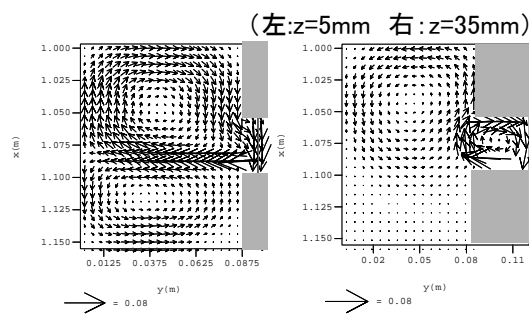


図-7 FW2.1 上下面における流速ベクトル



FW1.1 FW3.1
図-8 計算により求めた流速ベクトル (FW1.1, FW3.1)

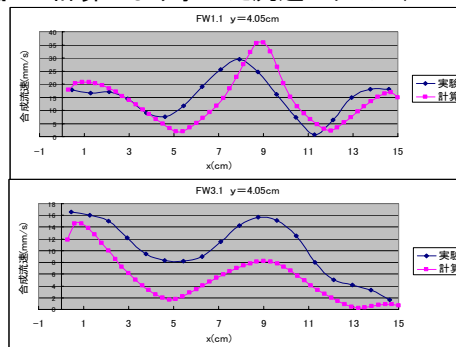


図-9 各ケースの実験結果と計算結果合成流速比較

多く存在した。この例として図-7に示すFW2.1の上下面の流速ベクトルより、開口渦を介することでより大きい遠心力で放出された上面の流れが最初の壁にぶつかることで下面にもぐり(図-7①)、さらに壁にぶつかることで上昇する(図-7②)。このことにより下面を大きい流速が通過すると共に、再度上昇した流れと上面の渦がぶつかり、打ち消しあうため下面での流速が大きくなったと考えられる。

5. 計算による本実験の実河川への適用について

実河川において本実験結果が再現されるかを検討するために計算により実河川での流れを再現する。本研究で用いた水深平均の連続式および開水路浅水流支配方程式は以下のとおりである。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial U_h}{\partial x} + \frac{\partial V_h}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial U^2}{\partial x} + \frac{\partial UV}{\partial y} = -g \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} - \frac{\tau_{bx}}{\rho} \quad (4)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + \frac{\partial UV}{\partial x} + \frac{\partial V^2}{\partial y} = -g \frac{\partial H}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} - \frac{\tau_{by}}{\rho} \quad (5)$$

τ_{bx} , τ_{by} : x, y 方向の底面せん断応力

τ_{xx} , τ_{xy} , τ_{yy} : 水深平均されたレイノルズ応力
また水深平均のレイノルズ応力, 渦動粘性係数 ν_t について以下に示す。

$$\tau_{xx} = \rho \nu_t \left(\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial U}{\partial x} \right) - \frac{2}{3} k, \tau_{xy} = \rho \nu_t \left(\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right), \tau_{yy} = \rho \nu_t \left(\frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial y} \right) - \frac{2}{3} k \quad (6)$$

$$\nu_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (7)$$

C_μ : モデル定数

運動方程式の離散化には有限体積法を、移流項には従来用いていたハイブリッド法を、時間項には完全陰解法を用いている。レイノルズ応力と渦動粘性係数の算出には 0 方程式モデルより実験に近い結果が得られた k-ε モデルを採用した。図-8 の FW1.1 及び FW3.1 は計算により求めた流速ベクトルである。図-2 に示す実験結果と比較すると、渦構造がほぼ一致していることが分かる。また FW3.1 は開口渦の再現もできている。実験結果と計算結果比較のため、図-9 に示す y=40.5mm における合成流速を見ると、流速分布はそれぞれ近い形状をとっていることが分かる。今回実験ケースに示す全ての形状で数値計算を行ったが、渦構造が比較的うまく再現できたものは FW1.1, FW1.2, FW1.4, FW1.5, FW3.1, FW3.4 である。これら以外のケースがうまく計算されなかった理由は、設定した計算メッシュが粗く、開口渦等の細かい現象まで正確に再現できなかったためであると考えられる。

次に数値計算で実験結果との再現性が高い FW1.1 について、実河川での流れを見るためにスケールを 25 倍した FW1.1*25 及び 100 倍した FW1.1*100 の結果を見ていく。実験条件、わんど形状は表-1, 図-10 に示す。なおこの際の流量等は Fr の相似則に従い決定

表-1 各ケースにおける条件

| ケース名 | FW1.1 | FW1.1*25 | FW1.1*100 |
|-------------------------|-------|----------|-----------|
| 本川幅(m) | 0.15 | 3.75 | 15.00 |
| 本川水深(m) | 0.04 | 1.00 | 4.00 |
| 本川流量(m ³ /s) | 0.00 | 0.01 | 189.00 |
| 本川平均流速(cm/s) | 31.50 | 157.50 | 315.00 |
| 計算時間間隔(s) | 0.01 | 0.05 | 0.10 |

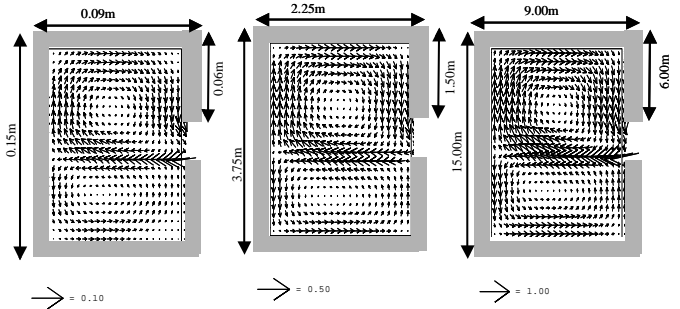


図-10 計算により求めた流速ベクトル

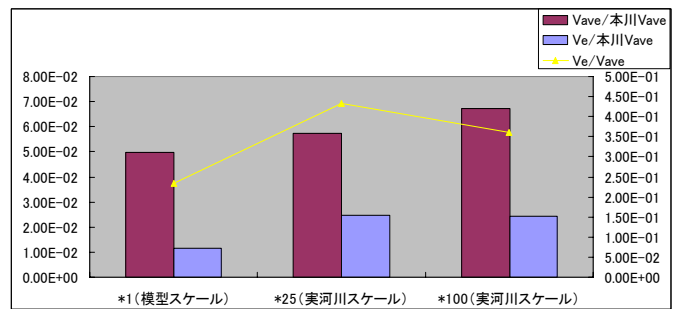


図-11 各スケールの本川流速に対する平均流速と水交換速度

し、勾配等従わないものは一定としている。図-10 に示す流速ベクトルより各スケールにおいて渦構造はほぼ同じ結果となった。図-11 より本川流速に対するわんど内平均流速及び、水交換速度の割合は一定となっていない。これはスケールが違うことで平均流速については壁面からの摩擦、水交換については拡散の仕方に違いが出てくるためであると考えられ、そのまま相似則を適用することはできない。しかし全体としての渦構造はほぼ一致するため、開口部の違いによる水交換速度、わんど内渦構造の傾向把握はできるものと考えられる。よって本実験結果は実河川においても適用できると考える。

6. おわりに

本研究によりわんど開口部の長さ、向き、位置を変化させることでわんど内の平均流速、水交換等に大きく影響を与えることができるということが分かった。実際の河川ではこれらの違いによりわんど内の環境を変えることができると考えられるため、本川の水質等に代表される状況を見ながら開口形状を決定していくことで、生物のより住みやすい環境創造ができると考える。