

1. はじめに わんどは平水時において本川との水の行き来がある死水域のことであり、平水時には魚類の産卵や子稚魚期の生活場、洪水時には避難場の役割をなすとされている。このようなわんどの生態環境保全の効果を期待してわんどを人工的につくる取り組みがなされている。現地と実験室の両方のアプローチを備えた岐阜県羽島郡にある自然共生研究センターのワンド研究ゾーンを利用して、出水時のわんどの流れ構造や平水時における水質を計測した。この結果、わんどの流れ構造と水交換に及ぼす影響が大きい植生の繁茂状況と、わんどを造成する際に問題となる開口部の形状の水理的評価を目的として、植生の配置と開口部形状を様々に変化させて室内実験と数値計算を行った。

2. 自然共生研究センターにおける観測

2.1 観測方法 本研究で対象としたわんど部の形状を図-1に示す。わんど内の周辺には植生が繁茂しており、開口部が狭くなっている特長がある。図中のコンターは河床高を示し、単位はmである。主水路は底面幅2.4m、側壁傾斜1:2の台形断面水路で、わんど開口部の長さは底面において約7.9mである。わんど部は開口部から上流へ深く入り込んでいいる。わんどの開口部付近は主水路より深く掘り下げられ、約1/10の勾配で上流側へ向かって浅くなっている。2002年7月31日にピーク流量2.0m³/sの出水実験が行われた。わんどには図-1中の斜線部分に示すように開口部下流に植物が繁茂していた。流速計測はわんど開口部においてハンディー電磁流速計（計測技研製）により計測した。また、図-1に示す点において水質チェッカー（東亜電波製）を用いてDO、pH、水温、濁度の計測を行った。

2.2 数値計算方法 現地における計測結果は限られていること、および設計段階で種々の形状について検討するためには数値シミュレーションが有効な手段となる。本研究で用いた植生の抵抗を考慮した2次元非定常流の基礎方程式は次のようである。また河床形状は自然共生研究センターの水路設計図に基づき与えている。

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial UU}{\partial x} + \frac{\partial VU}{\partial y} = -g \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{gn^2}{h^{4/3}} U \sqrt{U^2 + V^2} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} - \frac{C_D \beta_x}{2} U \sqrt{U^2 + V^2} \quad (1)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + \frac{\partial UV}{\partial x} + \frac{\partial VV}{\partial y} = -g \frac{\partial H}{\partial y} - \frac{gn^2}{h^{4/3}} V \sqrt{U^2 + V^2} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} - \frac{C_D \beta_y}{2} V \sqrt{U^2 + V^2} \quad (2)$$

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

水深平均レイノルズ応力は

$$\tau_{xx} = \rho \nu_t \left(\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial U}{\partial x} \right) - \frac{2}{3} k, \tau_{xy} = \rho \nu_t \left(\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right), \tau_{yy} = \rho \nu_t \left(\frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial y} \right) - \frac{2}{3} k \quad (4)$$

と表わす。ここに、U、Vは流下方向および横断方向水深平均流速、hは水深、 ν_t は水深平均の渦動粘性係数である。現地観測流速との比較には0方程式モデルを用い ν_t を $\nu_t = \varepsilon_0 h U_*$ とし、 $\varepsilon_0 = 0.14$ とした。ここに、kは乱れエネルギーであるが、0方程式モデルではk=0としている。C_Dは植生の抵抗係数、 β_x 、 β_y はx、y方向の植生密度パラメータである。運動方程式の離散化には有限体積法を、移流項にはハイブリッド法を用い、時間項には完全陰解法を用いた。

2.3 現地観測および数値計算結果 出水実験においては、植生がある場合には、わんど内の全体に及ぶ循環流が形成されずに、わんどの中央に向かう流れが見られた。本川の濁った水はわんど内全体に広がらず、わんど入口付近に濁水と清水の境界が形成されていた。そこで、ピーク流量時の途中で植生を取り除いたところ、明確な循環流が形成され始め、濁水のわんど奥への侵入が見られるようになった。図-1の地点2で水面近傍と水面下50cmの位置における植生除去前のピーク流量時水温と植生除去後30分経過後の水温を比較したのが図-2である。植生除去後、水温は両者の中間の水温にほぼ同じになった。

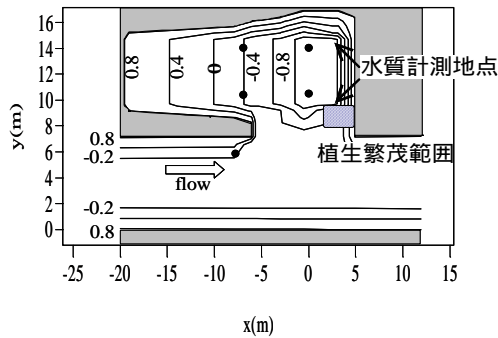


図-1 わんど形状と水質計測点

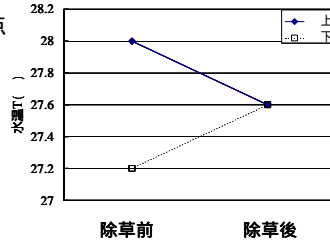


図-2 植生除去前後での水温の比較

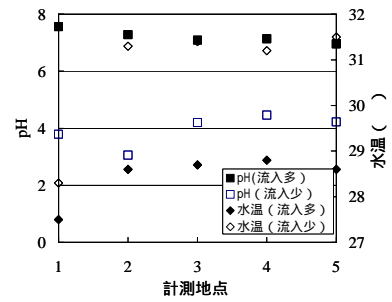


図-3 本川からの流入頻度による水質の比較

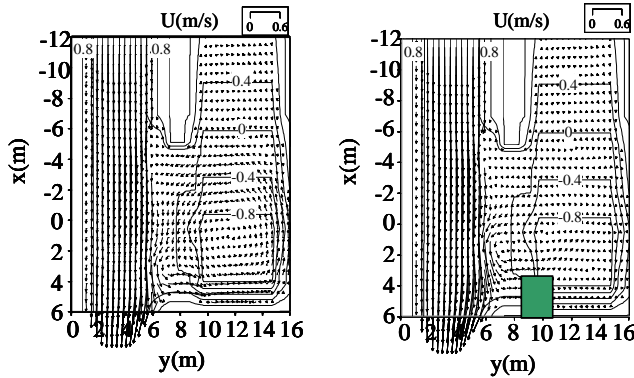


図-4 数値計算による流速ベクトルの比較
(左: 植生なし, 右: 植生あり)

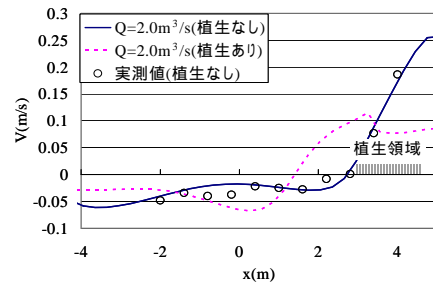


図-5 わんど開口部の横断方向流速分布の計算結果と実測値の比較

ことから植生除去によって形成された循環流がわんど内水質の混合を促進していることを示している。また本川からの流入頻度がわんど内水質に与える影響を図-3に示す。図より本川からの流入の少ない別のわんどでは酸性化しており、水温が高くなっていることがわかる。流速計測はわんど開口部に沿う測線でのみ行われ、わんど内全体の計測ができなかったため、数値計算によって検討することとした。植生パラメータとしては $C_D=1.0$, $\alpha = \beta = 5.0(1/m)$ を与えている。ピーク流量時 ($Q=2.0m^3/s$) の植生がない場合とある場合の流速ベクトルの比較を図-4に示す。ピーク時の下流端水深は70cmとしている。植生なしの場合はわんど開口部下流から強い流入があり、わんど全体に及ぶ循環流が形成されているのに対し、植生ありの場合は、植生にさえぎられる形で流入する流れが弱められてわんど中央部へと向かうのが見て取れる。わんど開口部の横断方向流速の実測値と計算値を比較したのが図-5である。実測値は植生がない場合のみである。植生なしの場合の計算値は実測値とよく一致しており、下流の2mの狭い範囲で流入していることがわかる。開口部下流の流入が最も強くなる位置に植生が繁茂した場合、計算値は流入流速が弱められ上流側へずれることを示している。自然共生研究センターのような開口部が狭く、周辺に植生が繁茂しているわんど形状では以上のことがいえるが、開口部長さとわんど周辺の植生がわんどの水交換および土砂堆積に重要なパラメータであると考えられたことから、これらについて、系統的な実験を行うこととした。

3. 植生と開口部形状の影響に関する実験

3.1 実験方法 水路は、長さ4m、幅30cm、勾配1/2000の亚克力製長方形断面水路を用い、水路右岸を亚克力板により遮蔽し、一区間のみ開放区を設けることでわんどとした。わんどの開口部長と奥行き幅の比は1.5とした。流量は2l/s、水深はわんど域の主流部で4cmとなるように調整した。植生模型としてわんど内部に直径0.3cm、長さ6cmの木棒を0.9cm間隔で配置した。開口部の遮蔽には厚さ1cmの亚克力板を用いている。実験条件を表-2に、実験ケースを図-6、図-7に示す。流速計測にはPIV可視化装置を用いレーザーシート光により半水深の高さにおける水平面を可視化し、高速ビデオカメラを用いて1/120sで撮影された可視化画像を、相互相関法により画像解析し、約16秒間の流速ベクトルデータを取得した。またわんどの水交換を捉える目的でわんど域内をいったん遮蔽してから染液で染色

し、開放してからの濃度変化について実験を行った。染液の濃度変化をデジタルビデオカメラの瞬間画像から濃度を数値データとして取得可能な画像解析プログラムを開発して濃度時系列を得た。

3.2 わんど内植生の影響 図-8 にwb, wo4, ws4 の各ケースについてPIV計測により得られた16秒間平均の平均流速ベクトル図を示す。植生のないwbではわんど域全体に循環渦が形成される。この流れはわんどにより急拡大した主流域の流れがわんど下流部の壁面に衝突することを発端としたものである。わんど奥部に植生を配置したwo4ではわんど内に入り込んだ流れが植生によって減速されることで上流側まで到達せず、渦の中心がわんど下流側に移動し規模が小さくなっている。わんど下流側の壁面に木棒を設置したws4では明確な循環流はみられなくなり、 $y/B_w > 0.8$ で植生内へ流入し、 $y/B_w < 0.6$ で一様に流出している。これは下流部の壁に衝突する直前に植生によって減速されることにより、わんど内への流入が少なくなり、循環渦の形成が妨げられたものと考えられる。以上のようにわんど奥の植生は循環流を縮小させ下流側へ移動させるのに対し、下流側の植生は循環流の形成を阻害する働きをする。

3.3 開口部形状に関する検討 わんどの開口部長さを変化させたケースw9f, w3b, w9bのPIVによる流速ベクトルを図-9 に示す。開口部遮蔽を 3/5 としたw9fでは循環流が形成されるものの流速は弱まり、上流側の主流へ向かう流れが非常に小さくなる。一方、下流側 1/5 を遮蔽したw3bでは逆に循環流が強められているのは興味深い。これは下流入り口の遮蔽が圧力上昇を引き起こしわんど内への流入を促進したためと考えられる。w9bでは循環流は開口部付近にみられるが、w3bに比べわんど内の流れは弱まることがわかる。次に水交換に与える影響を濃度変化により検討する。図-10 に最も違いが顕著に現れたわんど上流奥の点 ($x/B_w=0.2, y/B_w=0.2$) での無次元濃度 C/C_0 の経時変化を示す。 C_0 は初期濃

表-1 実験条件

Q(cm ³ /s)	h(cm)	Fr	Re	Um(cm/s)
2.0×10 ³	4.0	0.4	10000	25.0
Bw(cm)	L(cm)	L/Bw	B(cm)	I
10.0	15.0	1.5	20.0	1/2000

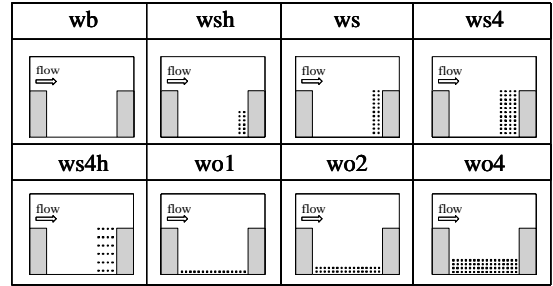


図-6 植生配置

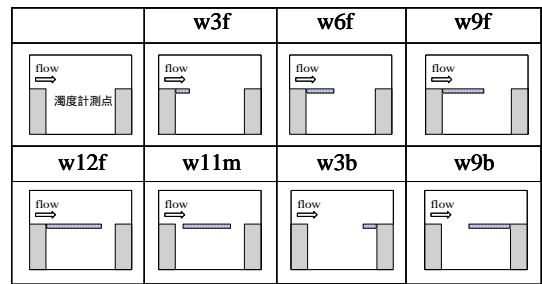


図-7 開口部遮蔽板配置

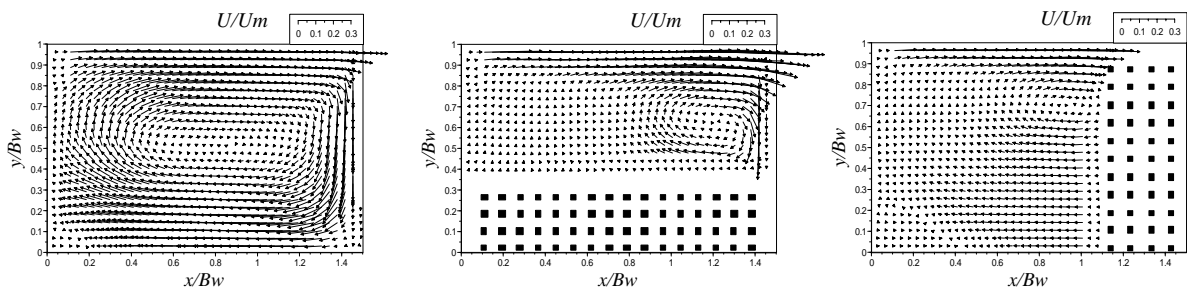


図-8 PIV 解析による流速ベクトル (左から wb, wo4, ws4)

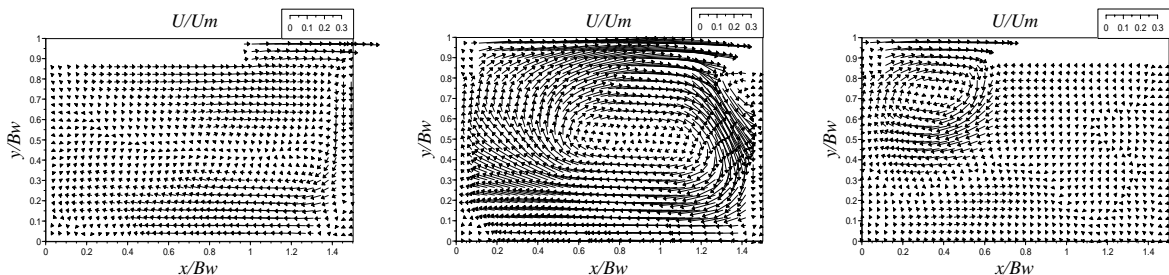


図-9 PIV 解析による流速ベクトル (左から w9f, w3b, w9b)

度である．開口部の狭いw12f, w11mのケースにおいては濃度変化の初期の遅れが顕著にみられる．また，他のケースが指数関数的に減少しているのに対して，直線的に濃度減少が生じていることがわかる．これを定量的に評価するためにC/C₀の時間変化を次式のように近似して定義される滞留時間による比較を行う．

$$C/C_0 = \exp(-t/\tau) \quad (5)$$

ここで τ が滞留時間である．算出した滞留時間を表-2に示す．開口部長さの減少とともに滞留時間が長くなり開口部と遮蔽長さの比が 1/2 を超えたあたりから滞留時間が急激に大きくなることがわかり，下流側を遮蔽した場合は循環流自体が異なり，特に w3b では wb よりも小さくなる．

3.4 数値計算結果 室内実験との比較には壁面効果を精度良く再現できる Launder-Sharmaの低レイノルズk-モデルを用いた．運動方程式，連続式は(1)-(4)と同じであるが，渦動粘性係数 ν_t は次式で定義される．

$$\nu_t = C_\mu f_\mu \frac{k^2}{\bar{\varepsilon}} \quad (6)$$

C_μ, f_μ はモデル定数， k は乱れエネルギー，

は乱れエネルギーの逸散率である． $k, \bar{\varepsilon}$ の輸送方程式は次式で与えられ，

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial Uk}{\partial x} + \frac{\partial Vk}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\nu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\nu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial y} \right) + G - (\bar{\varepsilon} + D) + P_{kv} \quad (7)$$

$$\frac{\partial \bar{\varepsilon}}{\partial t} + \frac{\partial U\bar{\varepsilon}}{\partial x} + \frac{\partial V\bar{\varepsilon}}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \bar{\varepsilon}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \bar{\varepsilon}}{\partial y} \right) + c_1 \frac{\bar{\varepsilon}}{k} G - c_2 f_1 \frac{\bar{\varepsilon}^2}{k} + E + P_{Ev} \quad (8)$$

$$\bar{\varepsilon} = \varepsilon - 2\nu \left(\frac{\partial \sqrt{k}}{\partial y} \right)^2 \quad (9)$$

G は乱れエネルギー発生率であり， $c_1, c_2, k, \bar{\varepsilon}$ は係数で標準値を与えた． P_{kv}, P_{Ev} は水深平均に伴う付加生成項である．その他のモデル関数は表-3のように与えた．本計算では植生モデルや遮蔽物を格子を遮蔽することによって表現しているため，各遮蔽格子の壁面効果を的確に表現することが必要とされる．ws4, w6fの流速ベクトルの計算結果を図-11に示す．ws4, w6fでは計算値は実験結果を良好に再現している．ws4では計算値は植生域外の，特にわんど上流部の横断方向流速が大きく現れ，実験と異なる印象を与えている．この点については今後モデルを改善する必要がある．

4. おわりに 現地観測によりわんど内に繁茂する植生と開口部長さがわんど内流れと水交換に及ぼす影響が大きいことがわかった．PIVによる流速計測と濃度実験によりこれらの効果について系統的に検討した結果，特に下流側の岸に帯状に植生が繁茂した場合には，わんど内の水交換が大きく阻害されることが示された．また開口部が狭まると急激に水交換が遅れることもわかり，配置により流れ構造が大きく異なることが示された．数値計算については循環渦が過大評価される傾向にあるものの，実験室および現地スケールにおいて数値予測がかなりの精度で可能であることが示された．

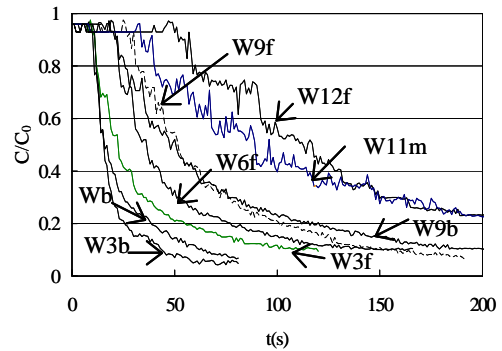


図-10 濃度経時変化

表-2 滞留時間 (sec)

wb	w3f	w6f	w9f
28.7	50.8	64.9	64.5
w12f	w11m	w3b	w9b
138.9	185.2	24.2	84

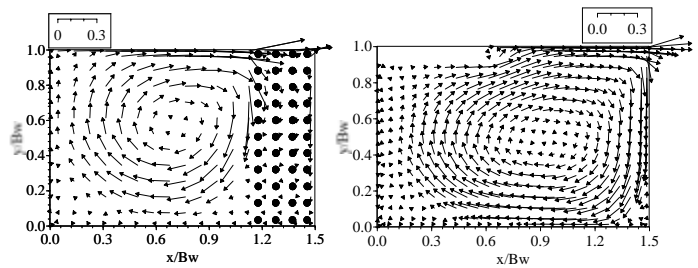


図-11 低レイノルズk-モデルによる流速ベクトル (左から ws4, w6f)

表-3 モデル関数

D	E	f_μ	f_1	f_2
$2\nu \left(\frac{\partial \sqrt{k}}{\partial y} \right)^2$	$2\nu \nu_t \left(\frac{\partial^2 \bar{U}}{\partial y^2} \right)^2$	$\exp \left[\frac{-3.4}{(1+R_t/50)^2} \right]$	1.0	$1 - 0.3 \exp(-R_t^2)$