

閉鎖的なわんどの水交換に及ぼす開口部形状の影響

EFFECTS OF INLET CONFIGURATION ON WATER EXCHANGE IN CLOSED EMBAYMENT

富永晃宏¹・ヌグロホ, E. O.²
Akihiro TOMINAGA and Eka O. NUGROHO

¹正会員 工博 名古屋工業大学教授 工学部都市社会工学科 (〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町)

²学生会員 名古屋工業大学大学院 工学研究科社会工学専攻博士後期課程 (〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町)

A riverside embayment is often connected with primary river flow through an inlet channel. It is important to maintain water quality and to prevent siltation in such a dead water zone. In this study, the effects of the length, and location of an inlet zone on flow structures and water exchange rate were investigated. The experiments were conducted in a laboratory flume and velocity vectors were measured by using PIV method. The flow patterns in embayment zones were extremely changed by the length and the location of the inlet region. When the length of inlet channel is long relatively to the width, an isolated vortex was generated in the inlet zone. This vortex generates recirculation flows in the embayment field indirectly. The water exchange rate is generally proportional to the velocity scale in the embayment area but it was affected by vortex structures in the inlet zone. These flow patterns were predicted on some level by using 2D numerical model.

Key Words : *riverside embayment, water exchange, vortex structure, PIV, dye concentration, 2D numerical simulation*

1. はじめに

河川の側岸に沿う湾状の淀み水域（わんど）は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重要とされる。自然わんどには砂州上の細流の作用と植生の繁茂や支川の流入によるもの等があるが、水制の設置や高水敷の掘削によってわんどを人工的につくる取り組みも行われている。本川と接する開口面が長すぎると、静穏な死水域が確保できず、また砂やシルトの堆積により埋没する可能性があるため、開口部を狭めて本川との連絡水路を設ける形式のものも存在する。

わんどの水理学的な課題として、平水時には閉鎖的になる水域の水質悪化が、また出水時にはわんど内へのシルトの堆積や土砂による埋没が考えられる。側岸に凹部が存在する流れの水理学的機能については実験的、数値的研究が数多く行われている。わんど内の流速分布や水面変動に着目した研究として、禰津らは、わんどのアスペクト比と流れ構造の関係を実験的に検討している^{1),2)}。木村らは特にわんど死水域の流体振動特性に着目した数値的研究を行っている^{3),4)}。水制群間に形成される死水域も広義のわんどと考えると、開水路側岸わんどの再循環流の構造と水交換速度についても実験的研究^{5),6),7)}や数値的研

究^{8),9),10)}が行われている。また、わんどの流れ構造に及ぼす開口部の構造物や植生の影響に関する研究として、中川ら¹¹⁾および富永ら^{12),13)}の研究がある。また、現地の人工わんどの流れと地形変化に関する現地観測に基づく研究もいくつか行われている^{14),15)}。以上の研究においてはわんどの開口部が比較的大きいケースがほとんどである。この場合には主流と停滞水域の境界部におけるせん断不安定渦の発生と下流壁面に沿うわんど内への流入に伴う再循環渦の形成機構について検討されているが、淀川の樟葉わんど¹⁵⁾や木曽川の起地区の人工わんど群のような主流域と細い連絡水路で接続するようなわんど形状における検討は少ない。富永・北村は本流と細い連絡水路で接続しているわんどの水交換に関する実験を行い、本川わんど連絡水路の角度と長さによってわんど内の渦構造は大きく変化することを明らかにした¹⁶⁾。

本研究では、富永・北村の研究¹⁶⁾をもとに、閉鎖的なわんどの開口部形状をより細かく変化させ、染料を用いた水交換速度の実験に加えて、レーザーシート光を用いたPIV解析により流れ構造の解析を行うとともに、水深平均の2次元数値計算を行い、流れ構造の再現を試みた。今回はわんど域の地盤を越流するような出水は対象とせず、時間的に大部分を占める平水時および中小出水時の状況を対象とした検討を行った。

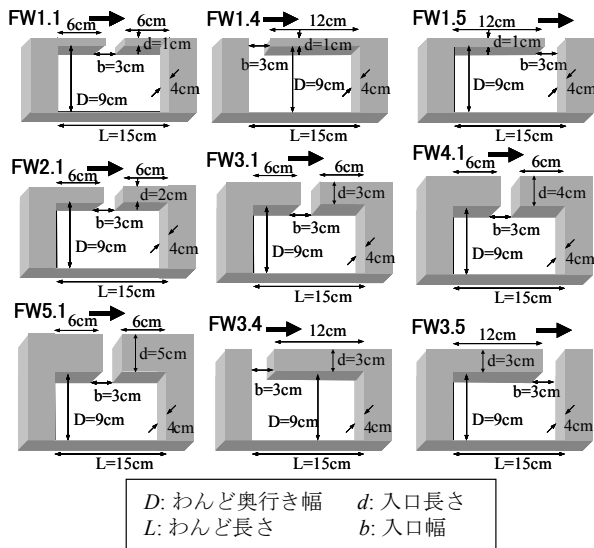


図-1 わんどの開口形状と実験ケース

2. 実験方法

実験水路は長さ8m, 幅30cm, 勾配1/800の長方形断面水路を用い, 水路右岸を遮蔽し, 上流から4mの位置にわんどを設けた. わんどと本流の間に幅1cmから5cmの遮蔽壁を設け, 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. わんど形状は長さ $L=15\text{cm}$, 奥行き $D=9\text{cm}$ の長方形断面とした. アスペクト比は1.67となる. これはアスペクト比 $L/D=1.5$ において安定な一つの再循環渦が形成されることと¹²⁾, 水路条件から決定したものである. 流量は全ケースで 1.89 lit/s とした. 水深はわんど域上流端から50cm上流で $h=4.0\text{cm}$ となるように水路下流部の堰上げにより調整した. この条件で平均流速 $U_m=31.5\text{cm/s}$, フルード数は $Fr=0.503$, レイノルズ数は $Re=7244$ であった. わんどの開口形状は開口部幅 $b=3\text{cm}$ とし, 開口部の連絡水路長さ d を1cmから5cmまで1cmずつ変化させた. また, $d=1\text{cm}$ と 3cm において開口位置を上流側と下流側に移動させたケースを行った. 図-1に実験ケースと開口部形状を示す.

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濃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 $z=5\text{mm}$, 20mm , 35mm の水平断面3断面に設定した. この可視化画像はビデオカメラを用いてフレームレート1/30sで60秒間撮影し, 1800個のデータを得た. 画像計測にはDIPFLOW PIVシステム (DITECT社製) を用い, 相互相関法により画像解析し, 60秒間平均の流速ベクトルデータを取得した.

濃度計測はいったん開口部を遮蔽して, わんど内

を染料 (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, 遮蔽板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から得たわんど内の画面を 10×10 の100の格子に分割し, 各格子のRGB値を取得し, これを白黒画像の濃淡強度に変換した. 静止画像は60コマごとに2秒間隔で作成し, 濃淡強度は262.5が黒, 0が白となるように変換される. 実際の染料濃度と画像の濃淡強度の関係は濃淡強度が185から50の範囲でほぼ線形であることを検定で確認し, 線形近似により濃度に変換した. これにより得られた値を水深平均した濃度と定義し, わんど内平均濃度の時系列変化を得た.

3. わんど内の流れ構造

(1) 入口長さの影響

以前の研究では, 開口部の入口長さ $d=1\text{cm}$ と 3cm の場合について実験を行い, 両者でわんど内の流れパターンが全く異なることを示した¹⁸⁾. これは 3cm のケースで開口部領域に閉じた渦が発生し, この渦が間接的にわんど内の再循環渦を生じさせることによるものである. そこで, 今回は入口長さを1cmずつ変化させた実験を行った. その結果の $z=20\text{mm}$ における時間平均流速ベクトルを図-2に示す. なお, 水平断面は3断面計測を行っているが, 多くのケースで高さによる流れ構造の違いは顕著でなくほぼ2次的であったため, 代表的に半水深の流速ベクトルを示すこととする. ただし, いくつかのケースでは高さによって流れ構造が異なり, 3次的流れ構造を示した. これについては後に述べる.

入口長さ $d=1\text{cm}$ のケースFW1.1では, 主流が下流側開口壁付近からわんど内に流入し, そのまま方向を変えずにわんど奥に達し, 互いに逆回転の一对の渦を形成する. 上流側の渦の方が強い. 入口長さ $d=2\text{cm}$ のケースFW2.1, $d=3\text{cm}$ のFW3.1および $d=4\text{cm}$ のFW4.1では, 開口部領域内で時計回りの渦 (以後開口渦と呼び, 図中に示す) が形成され, これが間接的にわんど内の反時計回りの再循環流を発生させており, ケースFW1.1とは全く異なる流れパターンを示す. この流れパターンの変化は入口長さが1cmと2cmの間で起こる. $d=1\text{cm}$ の場合でも, 流量を半分にした実験においては, 最初の60秒から180秒間是一对渦のパターンが現れるが, その後開口渦が現れ, ケースFW2.1と同様の流れパターンに移移することが認められた. したがって, 流れパターンの安定性については水理条件の影響をさらに検討する必要があるが, 今回の条件では全て安定な流れ構造を示している. ケースFW2.1とFW3.1ではほとんど同じ形状および大きさの流れ構造を示す. 上流側に偏った渦構造を示し, 下流側は弱い流れとなり, 下流

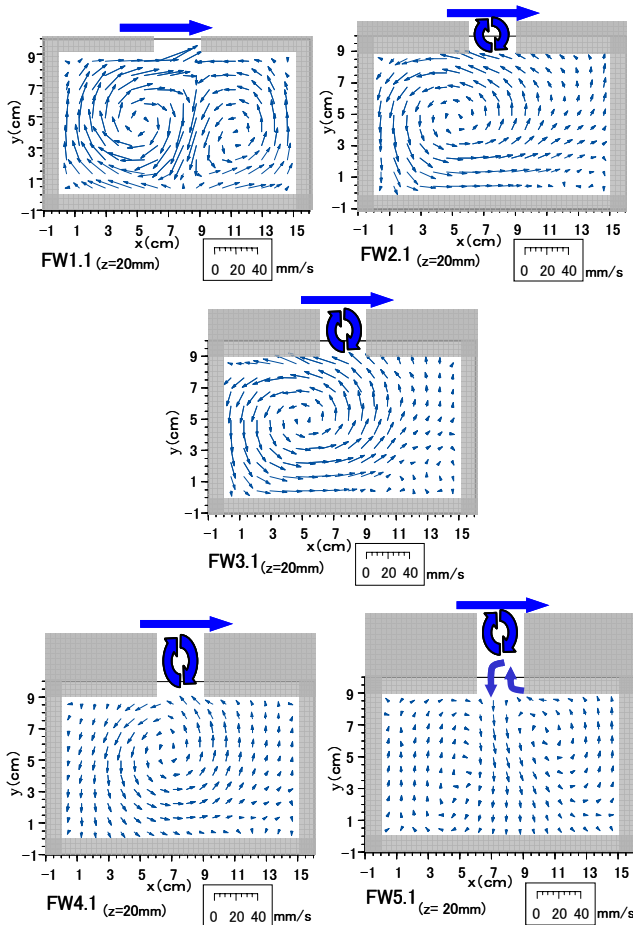


図-2 流速ベクトル（入口長さの違い）

側奥の隅角部に小さな渦が認められる。FW4.1 になると、わんど内の流速はかなり弱まり、渦中心がわんど中央に移動している。ケース FW5.1 では、流れパターンが再び変化する。流速自体はかなり弱くなるが、流れ構造はケース FW1.1 と類似の傾向を示す。これは開口部のアスペクト比（入口長さ／入口幅）が大きくなると開口渦が 1 つで安定とならず、開口部奥からわんどに向けて押し出すような流れが新たに発生し、これがそのままわんど内に侵入することによって生じると考えられる。

開口部のアスペクト比により開口渦の形成が支配され、間接的にわんど内の流れパターンが決定されることがわかった。開口部の流れ構造が重要となるが、今回の PIV 計測ではわんど全体に比べ開口部の流れが高速でかつ解像度が低いため十分な精度で捉えることができなかった。また、染料の流出過程を目視すると開口部から間欠的に渦が流入し、その後わんど内の流体が流出する様子が観察された。

(2) 開口位置の影響

図-3 に開口位置を上流および下流にしたケースの $z=20\text{mm}$ における流速ベクトルを示す。入口長さ $d=1\text{cm}$ で下流側流入のケース FW1.5 では、開口部下流の壁面に沿ってわんど内まで流れが侵入し時計回

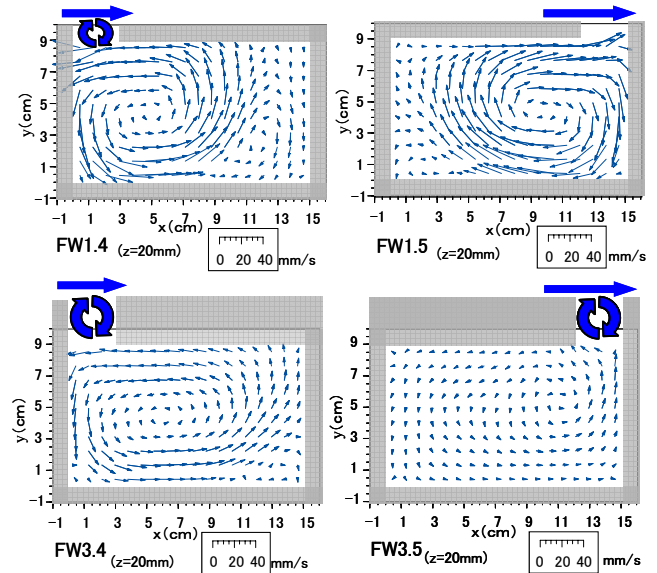


図-3 流速ベクトル（開口部位置の違い）

りの渦構造を形成する。渦はわんど上流壁まで及び、上流側壁隅角部には逆回転の小規模渦が見られる。開口部を上流に設けたケース FW1.4 では、入口長さが 1cm と短いにもかかわらず開口渦が発生した。開口渦の下端部からわんどの上流側壁に沿ってわんど奥に向かって流れが生じ、反時計回りの渦を形成する。結果的にケース FW3.1 と同様な渦構造を示すが、渦速度はこのケースの方が大きい。

入口長さ $d=3\text{cm}$ になると、上流開口部のケース FW3.4 では FW1.4 と同様のメカニズムにより反時計回りの渦が発生する。FW1.4 に比べて流速は低下するが、渦の範囲はわんど下流壁まで達し、下流隅角部に小さな渦があるのみとなる。これは、 $d=1\text{cm}$ では開口渦がわんど領域内に入り込んで生成されるため、より強くわんど内へ流体を輸送し循環流を生成できるのに対し、 $d=3\text{cm}$ では、入口領域内で閉じた渦が形成されるため、わんど内への輸送が少なくなったものと考えられる。一方、下流開口部のケース FW3.5 では、開口渦が形成されるため、流れパターンが FW1.5 から大きく変化し、わんど下流壁から流出となる反時計回りの弱い渦が形成される。このケースでは開口渦が入口領域内でかなり閉じた構造を示し、開口渦からわんど内への流体輸送はかなり小さくなっている。

(3) わんど内平均流速の比較

わんど内の流れの強さを比較するために面積平均の平均流速 V_a を次のように求めた。

$$V_a = \sqrt{\frac{1}{A} \int (U^2 + V^2) dA} \quad (1)$$

図-4 にわんど内平均流速 V_a を主流部の平均流速 U_0 で除した値を示す。入口長さの増大とともに V_a はほぼ線形的に減少しているように見えるが、開口部のア

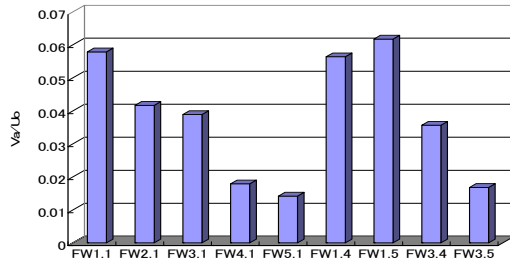


図-3 わんど内面積平均流速の比較

スペクトル比による渦生成メカニズムの違いが3段階に変化していることを示している。開口部位置を上流および下流に設置した場合も、 $d=1\text{cm}$ のケースではほぼ同等の大きさを示し、主流平均流速の5%から6%の値をとる。若干ではあるが下流開口のFW1.5が最も大きくなる。FW1.4のみは開口渦が生成されているが、わんど上流壁の影響で効率よくわんど内へ流れが伝達されているといえる。 $d=3\text{cm}$ では上流開口のFW3.4は $d=1\text{cm}$ の場合と同様に中央開口のFW3.1とほぼ同様であるが、下流開口のFW3.5ではこの半以下に減少する。

(4) 3次元流れ特性

入口長さ $d=1\text{cm}$ のケースでは鉛直方向の高さによる流れ構造の違いは顕著ではなかったが、 $d=2\text{cm}$ 以上のケースでは高さによる違いが見られた。図-5はケースFW3.1およびFW3.5における $z=5\text{mm}$, 35mm における流速ベクトルを示したものである。FW3.1では、 $z=5\text{mm}$ において渦構造がわんど下流部まで及んでいるのに対し、 $z=35\text{mm}$ では、 $x=10\text{cm}$ 付近に界面が存在し、渦構造はここまでしか達せず、これより下流域では上流向きの弱い流れとなっている。図-2に示した $z=20\text{mm}$ の流れは両者のちょうど中間的な構造を示しており、底面近傍でより強く入り込んだ流れがわんど下流壁に沿って上昇し水面近傍では湧き上がる流れとなっていることを示唆している。FW3.5では、 $z=5\text{mm}$ では開口部からわんど主流壁に沿う流入が少なく下流壁に沿う流出が大きいのに対し、 $z=35\text{mm}$ ではわんど主流壁に沿う流入が大きくなっている。これは水面で上流側へ向かい底面で下流側へ向かうらせん流の存在を示唆している。

4. わんどの水交換速度

わんど内の染料濃度の時間変化率から水交換速度を求めた。図-6は画像解析から得られた濃度 C を初期濃度除 C_0 で無次元化した値の時間変化を片対数表示したものである。ただし、遮蔽除去直後はわんど内が静止状態から流れが安定するまで数十秒程度の時間を要するため、時刻0で必ずしも1を通らない。そこで、これがほぼ直線分布することから指数近似を適用し、近似曲線を次式のように求めた⁷⁾。

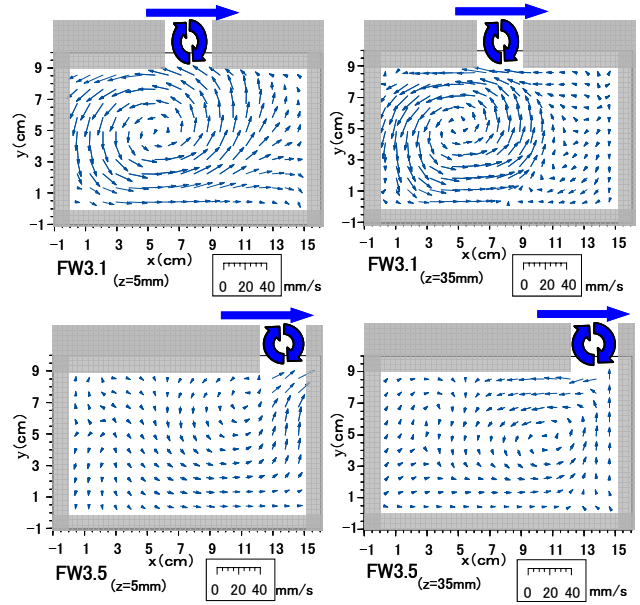


図-5 底面近傍及び水面近傍の流速ベクトル
(左: $z=5\text{mm}$, 右: $z=35\text{mm}$)

$$\frac{C}{C_0} = A \exp\left(-\frac{t}{T_r}\right) \quad (2)$$

ここで T_r は片対数グラフの傾きを、 A は時刻0における値である。 T_r はその値が大きいくほど混合が遅いことを示し、滞留時間と呼ぶことにする。この値は初期濃度から基準となる濃度に達するまでの時間に相当するが、基準濃度により値は変化するため絶対的なものではなく、あくまで相対的な指標と言える。これから水交換速度 V_e を以下のように定義する。

$$V_e = \frac{D \cdot L}{T_r \cdot b} \quad (3)$$

ここで D はわんど奥行き幅、 L はわんど長さ、 b は開口部幅であり、これはわんど内の流体が開口部を通して主流部の流体と入れ代わる代表速度である。この水交換速度 V_e をわんど内平均流速 V_a との比 V_e/V_a とともに図-7に示す。わんど内平均流速が大きい方が水交換速度も大きくなる傾向にあるが、比率で見ると平均流速が著しく小さくなるケースでも水交換速度はそれほど減少せず、むしろ V_e/V_a は大きくなる傾向にある。これは開口部を通した水交換がわんど内の流速だけでは決まらないことを意味し、開口部からわんどへの間欠的な流入・流出や3次元流れ構造が影響するものと思われる。

5. 水深平均2次元乱流モデルの適用

流れの3次元性や非定常な流体運動がこのようなわんどの水交換に影響していることが指摘されたが、ここではまず、定常な水深平均の数値計算により流れ構造が再現できるかを確かめることは意義がある。

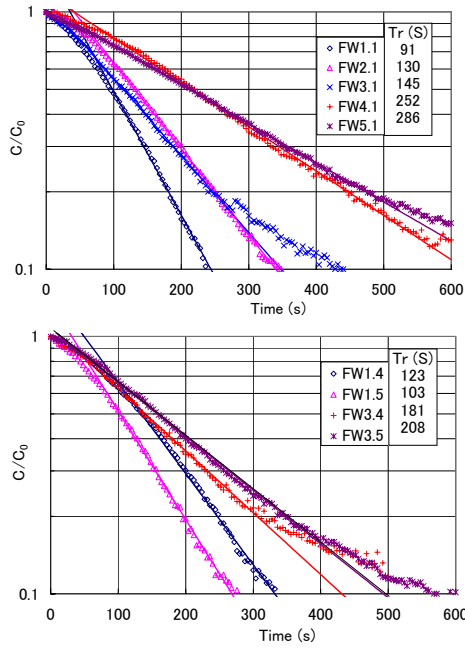


図-6 染料濃度の時間変化
(上：入口長さの影響，下：開口位置の影響)

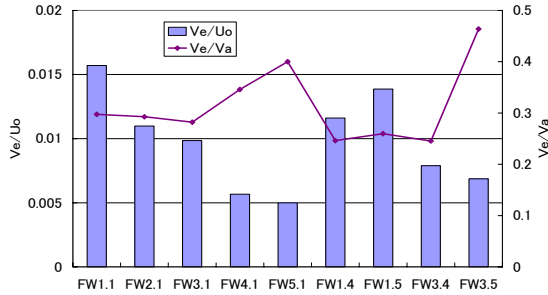


図-7 水交換速度

そこで、水深平均の k - ε モデルによる計算を試みた。水深平均の連続式、運動方程式は次のようである。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial hU}{\partial x} + \frac{\partial hV}{\partial y} = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial hU}{\partial t} + \frac{\partial hUU}{\partial x} + \frac{\partial hUV}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{\tau_{bx}}{\rho} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} \quad (5)$$

$$\frac{\partial hV}{\partial t} + \frac{\partial hUV}{\partial x} + \frac{\partial hVV}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial y} - \frac{\tau_{by}}{\rho} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} \quad (6)$$

ここに h は水深、 H は水位、 τ_{bx} 、 τ_{by} は底面せん断応力でマニング式を用いて次のように与える。

$$\frac{\tau_{bx}}{\rho} = \frac{gn^2}{h^{1/3}} U \sqrt{U^2 + V^2}, \quad \frac{\tau_{by}}{\rho} = \frac{gn^2}{h^{1/3}} V \sqrt{U^2 + V^2} \quad (7)$$

ここに n はマニングの粗度係数である。また水深平均のレイノルズ応力項は次のように表される。

$$\tau_{xx} = 2(v_t + \nu) \frac{\partial U}{\partial x} - \frac{2}{3} k, \quad \tau_{xy} = (v_t + \nu) \left(\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right), \quad (8)$$

$$\tau_{yy} = 2(v_t + \nu) \frac{\partial V}{\partial y} - \frac{2}{3} k$$

ここに ν は動粘性係数、 v_t は渦動粘性係数、 k は水深平均の乱れ運動エネルギーである。 v_t は、

$$v_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (9)$$

と与えられ、 C_μ は定数、 ε は水深平均の粘性逸散率である。 k および ε は次の輸送方程式より得られる¹⁷⁾。

$$\frac{\partial hk}{\partial t} + \frac{\partial hUk}{\partial x} + \frac{\partial hVk}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{v_t}{\sigma_k} \frac{\partial hk}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{v_t}{\sigma_k} \frac{\partial hk}{\partial y} \right) + P_k + P_\varepsilon - h\varepsilon \quad (10)$$

$$\frac{\partial h\varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial hU\varepsilon}{\partial x} + \frac{\partial hV\varepsilon}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{v_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial h\varepsilon}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{v_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial h\varepsilon}{\partial y} \right) + \frac{\varepsilon}{k} (C_{\varepsilon 1} P_k - C_{\varepsilon 2} h\varepsilon) + P_\varepsilon \quad (11)$$

$$P_k = \frac{v_t}{h} \left\{ 2 \left(\frac{\partial hU}{\partial x} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial hV}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial hU}{\partial y} + \frac{\partial hV}{\partial x} \right)^2 \right\} \quad (12)$$

$$P_\varepsilon = u_*^3 / \sqrt{C_f}, \quad P_\varepsilon = C_{\varepsilon 3} C_{\varepsilon 2} \sqrt{C_\mu} / C_f^{3/4} \cdot u_*^4 / h \quad (13)$$

ここに、 C_f は底面の摩擦損失係数であり、その他の定数はRodi¹⁷⁾による値を用い、数値解法は有限体積法にSIMPLE法を用いた。計算格子は基本的に x 、 y 方向とも3mm間隔とし、開口部とその近傍では1mm間隔とした。開口部付近も3mm間隔とするとFW3.1において開口渦の再現ができなかったため、1mm間隔にしたものである。

図-8および図-9に計算されたわんど内の流速ベクトルを示す。入口領域では流速が大きいためベクトルを表示していないが、図-8にFW2.1の開口部の計算例を示している。わんど内の流れパターンはケースFW3.5以外ではほぼ一致している。ただし、入口付近の流速はかなり大きい。PIV計測ではわんど内の流れに注目したためにフレームレートが低く、入口領域の高速な流れは捉えられなかったものと考えられる。FW3.5では開口渦が再現されず、全く逆の渦が現れている。実験と同様にわんど内の平均流速を求め、図-10に示す。平均流速の大きさはFW1.5、FW3.5以外は過小評価されているが、流速のケースによる変化はパターンの一致しないFW3.5を除きよく一致している。したがって、定常流としての2次元解析でもある程度流れパターンを再現できることがわかったが、わんど内流速は過小評価となった。この点は実際の現象が非定常で間欠的であり3次元性を有することが原因していると考えられる。水交換速度にはこの点が影響すると考えられ、今後は非定常計算および3次元計算を行い比較する必要がある。

6. おわりに

本流と細い連絡水路で接続している閉鎖的なわんどにおいて、水質および土砂堆積に影響する水交換とわんど内の流れ構造との関係について実験的および数値的に検討した。入口領域の奥行き・幅比が1.5以上で開口渦が形成され、これが間欠的にわんど内へ侵入することによってわんど内の渦が形成される。入口領域の渦を通して間接的にわんど内に再循環渦が形成されるため、わんど内の流速は直接形成され

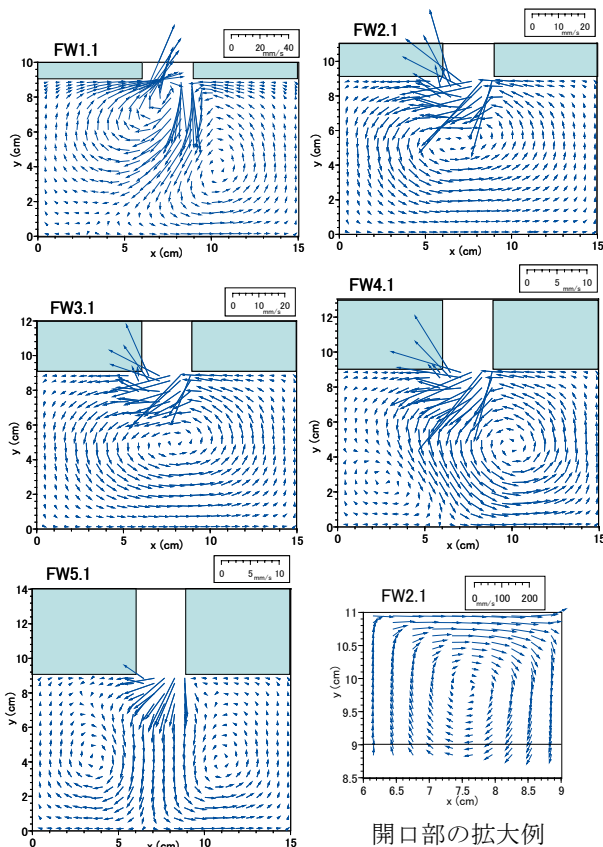


図-8 計算流速ベクトル（入口長さの違い）

るケースに比べて小さくなる。水交換速度はわんど内に発生する流れの流速におおむね比例するが、渦構造の形態により影響される。このようなわんど内の流れ発生機構は水深平均の2次元数値モデルによってもある程度再現できたが、流れパターンが異なるケースもあり、今後は水理条件の影響の検討も含め、非定常性を取り入れた解析や3次元解析等を行いより詳細な検討を行う必要があろう。

参考文献

- 1) 瀬津家久, 鬼束幸樹, 高橋俊介: 開水路わんどモデル内の乱流特性と組織渦, 土木学会論文集 II, 第684巻, II-56号, pp.11-20, 2001.
- 2) 瀬津家久, 鬼束幸樹, 高橋俊介, 乙志和孝: 開水路側壁凹部流れの水面・流速変動特性と開口部形状の効果, 土木学会論文集 II, 712巻, II-60号, pp.1-10, 2002.
- 3) 木村一郎, 細田尚, 村本嘉雄, 安永良: 開水路流れにおける死水域内の流体振動に及ぼす水理パラメータの効果, 水工学論文集, 第39巻, pp.779-784, 1993
- 4) 木村一郎, 細田尚, 安永良, 村本嘉雄: 開水路流れ止水域周辺の水面振動・流体混合特性, 水工学論文集, 第41巻, pp.711-716, 1997.
- 5) Altai, W. and Chu V. H.: Retention time in a recirculating flow, Proc. of 27th IAHR Congress, pp.9-14, 1997.
- 6) Uijtewaald, W. S. J., Lehmann, D. and van Mazijk: A. Exchange process between a river and its groyne fields: Model experiments, J. Hydraulic Engineering, ASCE, 1273(11), pp.928-936, 2001.
- 7) Weitbrecht, V., Socolofsky, S. A. and Jirka, G. H. Experiments on mass exchange between groin fields and main stream in rivers, J. Hydraulic Engineering, ASCE, 134(2), pp.173-183, 2007.

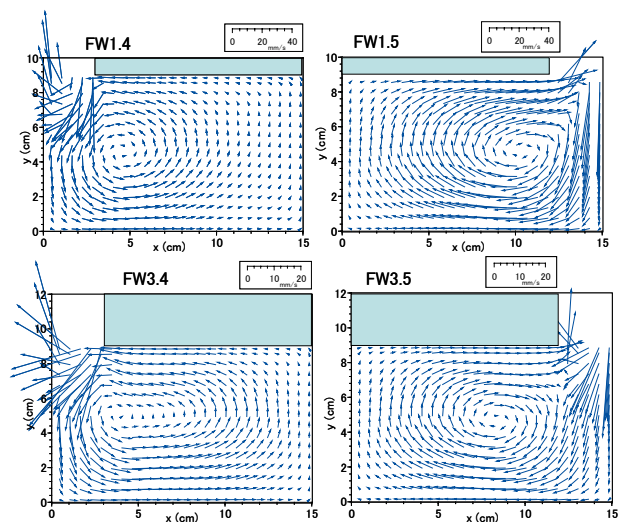


図-9 計算流速ベクトル（開口位置の違い）

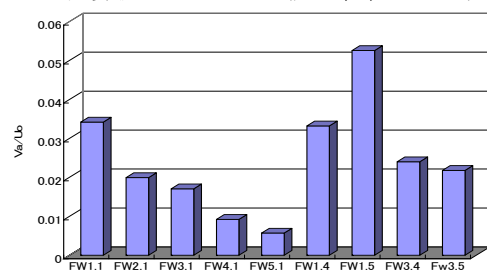


図-10 計算された凹部内平均流速

- 8) Nassiri, M. and Babarutsi, S.: Computation of dye concentration in shallow recirculation flow, J. Hydraulic Engineering, ASCE, 123(9), pp.793-806., 1997.
- 9) Hinterberger, C., Fröhlich and Rodi, W.: Three-dimensional and depth-averaged large eddy simulations of some shallow water flows, J. Hydraulic Engineering, ASCE, 133(8), pp.857-872, 2007.
- 10) McCoy, A., Constantinescu, G. and Weber L. W.: Numerical investigation of flow hydrodynamics in a channel with a series of groynes, J. Hydraulic Engineering, ASCE, 134(2), pp.157-172, 2008.
- 11) 中川研造, 河原能久, 玉井信行: ワンド内流れの水理特性に関する実験的研究, 水工学論文集, 第39巻, pp.595-600, 1995.
- 12) 富永晃宏, 谷川幸男, 久田陽史: 人工わんどの水交換機構とその制御に関する研究, 水工学論文集, 第46巻, 571-576, 2002.
- 13) 富永晃宏, 久田陽史: 人工わんどの水交換機構に与えるわんど形状と植生の影響に関する研究, 水工学論文集, vol.47, 517-522, 2003.
- 14) 武藤裕則, 北村耕一, 中川一: 水制群による砂州上わんど・たまりの形成に関する実験的検討, 河川技術論文集, 第11巻, pp.417-422, 2005.
- 15) 鍛冶塩太, 綾史郎, 武藤裕則, 馬場康之, 中西章, 出口恭, 藤田一郎, 竜門俊次: 淀川楠葉還元ワンド群の水理環境, 水工学論文集, 第50巻, pp.1117-1122, 2006.
- 16) 富永晃宏, 北村福太郎: わんどの水交換に及ぼす連絡水路形状の影響, 水工学論文集, Vol.51, 727-732, 2007.
- 17) Rodi, W., Pavlovic, R.N. and Srivatsa, S.K.: Prediction of flow and pollutant spreading in rivers, Transport Models for Inland and Coastal Waters, Academic press, pp.63-111, 1981.

(2008. 9. 30 受付)