

# 人工わんどの流れ構造と水交換機構に関する研究

12418041 谷川 幸男

## 1.はじめに

わんどは、河川環境に多様性を生み出す効果があり、淀川に代表される人為的に造成されたわんど(人工わんど)にも同様の効果が期待できるという調査結果から、環境支援型構造物として各地に造成されてきた。人工わんどの流れ構造に関しては、様々研究が行われているが、わんどを環境支援型構造物として考えた場合、わんど域内の水質は重要な注目点であるにもかかわらず、これまでわんどの水交換機構に関する研究はあまり行われていない。本研究では、流速によるわんど内の流れ構造と水交換の変化について検討し、さらに、わんど開口部の形状を様々に変化させた場合についても同様の検討をすることとした。また、非定常組織渦を再現できる数値計算による解析も行った。

## 2.実験条件

実験水路は長さ 13m、幅 59.3cm の長方形断面可変勾配型水路を用い、水路右岸を遮蔽物により 30cm 遮蔽し、上流から 5.4m の位置に一区間のみ開放区を設け、わんど域とした。わんどの形状はわんどの開口部長と奥行き幅の比(アスペクト比)が、1.5:1 のものを用いた。流量による比較を行い、その後わんど上流端、下流端に突起を配置し、突起長を変化させたケース、わんど域と主流域との境界上に杭粗度を様々な形状で配置したケースについて、流れ構造と水交換機構を検討した。流量の変化については、4, 8, 12l/s の 3 ケースを行い、形状変化の実験では 4l/s で実験を行った。各ケースの水深は、わんど域上流の主流域で規定水深になるように、水路下流部の堰上げにより調節した。実験条件を表 1 に、開口部の形状変化に関する実験ケースを表 2 に示す。計測は、流速計測と主流との水交換を捉える目的で、わんど域内を染液で染色すること流れの可視化を行い、染液の濃度変化を濁度計により計測を行った。流速計測には 2 成分 I 型電磁流速計(東京計測製)を用い、主流方向流速  $u$  と、横断方向流速  $v$  を計測した。座標軸は  $X$  を流下方向、 $Y$  を横断方向とし、水路右岸壁面のわんど上流端を原点としている。サンプリング周波数 100Hz で 41 秒間の計測したデータについて解析している。濁度の計測には、濁度計(東京計測製)を用いて、サンプリング周波数 20Hz で 5 分間計測したデータについて解析した。

## 3.数値解析の手法

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

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial Uh}{\partial x} + \frac{\partial Vh}{\partial y} = 0$$

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial UU}{\partial x} + \frac{\partial UV}{\partial y} = -g \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} - \frac{\tau_{bx}}{\rho}$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + \frac{\partial UV}{\partial x} + \frac{\partial VV}{\partial y} = -g \frac{\partial H}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} - \frac{\tau_{by}}{\rho}$$

表 1. 実験条件表

Q(cm <sup>3</sup> /s)	h(cm)	Fr	Re	Um(cm/s)
4×10 <sup>3</sup>	6.0	0.297	8496	22.753
8×10 <sup>3</sup>	6.0	0.593	16992	45.506
12×10 <sup>3</sup>	8.0	0.578	23237	51.195

表 2. 実験ケース表

Wa Wb		Wt15	
Wo		Wt9	
Wd		Wt3	
Wu1/2		Wu1/4	
Ws1/2		Wu3/4	

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と、中心差分による計算手法による比較を行った。時間項には完全陰解法を用いている。

## 5.実験結果

5-1.流量による影響 過去の研究の中で、わんど内の時間平均した流れ構造はアスペクト比に依存し、水路の断面平均流速による相似性があることが確認されている。図1に主流域の断面平均流速で無次元化した主流方向流速の横断分布( $X=275$ )と横断方向流速の縦断方向分布( $Y=150$ )を示す。これにより、先に述べたわんど内の流れが無次元化によりほぼ一致していることがわかる。わんど域と主流域の水交換を染液の濁度変化で検討する。図2に濁度の経時変化を示す。計測点は 開口部上流端( $X=20, Y=270$ )、 わんど中央部( $X=225, Y=150$ )である。この濁度変化は、初期の遅れを除き、時間経過するに従い、指数関数的に減少しており、流量が多いほど減少速度が速い。ここでは、8, 12l/sではほぼ同様の減少過程であるが、4l/sではほぼ直線的に濁度減少が生じている。また、この減少過程では、他のケースでも存在する乱れ変動が特に顕著である。図3に同一の計測点における濁度の経過時間を断面平均流速 $U$ とわんど開口部 $L$ による特性時間 $L/U$ で除したものを示す。この計測点でも濁度の変化過程が4l/sの結果を除き、同一曲線上に一致することが分かる。これにより、わんど内の水交換には特性時間に相似しており、水交換時間はおよそ流速の逆数に比例するものと考えられる。しかし、わんど中央部の濁度変化に相違が見られた。

図4に4l/sのケースについて、濁度の変化の連続ビデオ静止画像を示す。画像は実験開始後4経過時であり、わんど域内は、わんど中央部を除き、ほぼ均一の濃度となっていることがわかる。わんど中央部には濁度の高い部分が残有し、わんどほぼ中央部で高濁度の部分が回転しながら、拡散している。これが濁度変化で他の流量のケースと異なる傾向を示す要因となっている。また、循環流の影響が大きいと考えられる。濁度変化は、主流域の清水がわんど開口部上に発生する乱れにより、流下過程でわんど内の水と混合し、わんど下流端で乱れが壁面に衝突する際に、濁度の低い水塊として流入することで進行している。この開口部上の乱れは、わんど域と主流域とのせん断不安定に

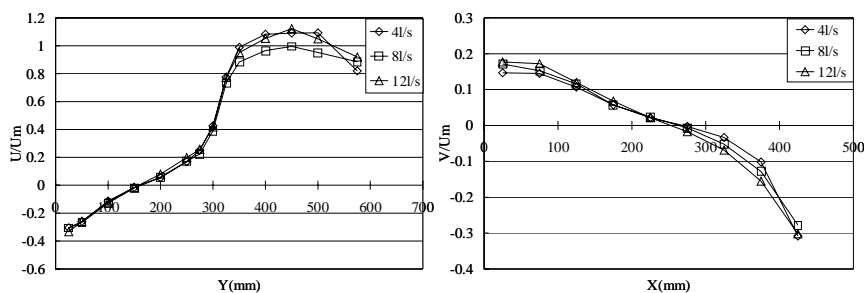


図1. 時間平均流速分布図 (左:横断分布, 右縦断分布)

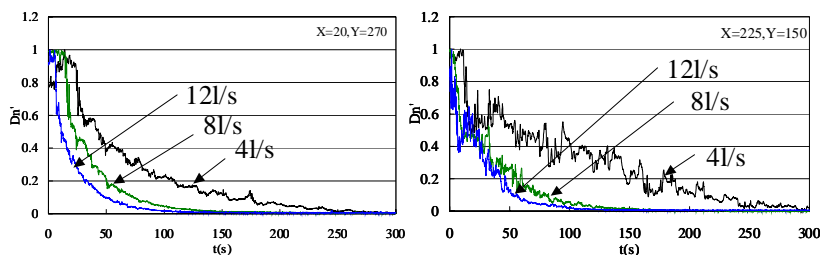


図2. 濁度の経時変化 (左:開口部側上流端, 右:わんど中央部)

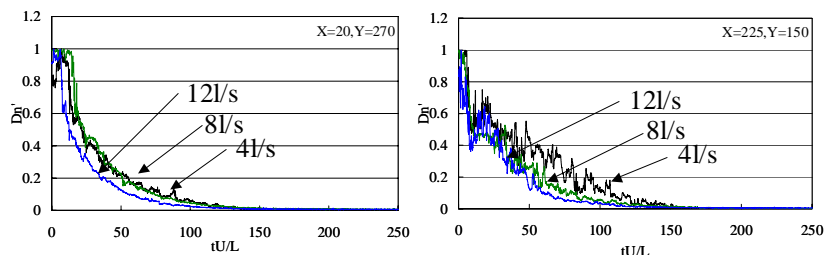


図3. 濁度変化の特性時間  $L/U$  による無次元化

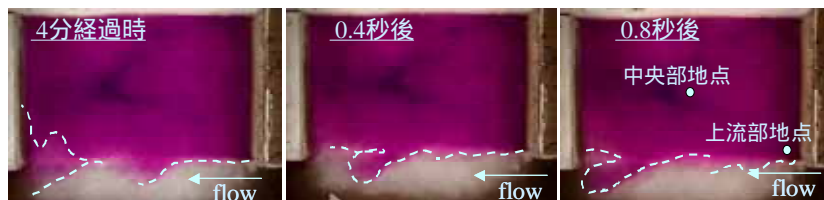


図4. 連続静止画像

図4に4l/sのケースについて、濁度の変化の連続ビデオ静止画像を示す。画像は実験開始後4経過時であり、わんど域内は、わんど中央部を除き、ほぼ均一の濃度となっていることがわかる。わんど中央部には濁度の高い部分が残有し、わんどほぼ中央部で高濁度の部分が回転しながら、拡散している。これが濁度変化で他の流量のケースと異なる傾向を示す要因となっている。また、循環流の影響が大きいと考えられる。濁度変化は、主流域の清水がわんど開口部上に発生する乱れにより、流下過程でわんど内の水と混合し、わんど下流端で乱れが壁面に衝突する際に、濁度の低い水塊として流入することで進行している。この開口部上の乱れは、わんど域と主流域とのせん断不安定に

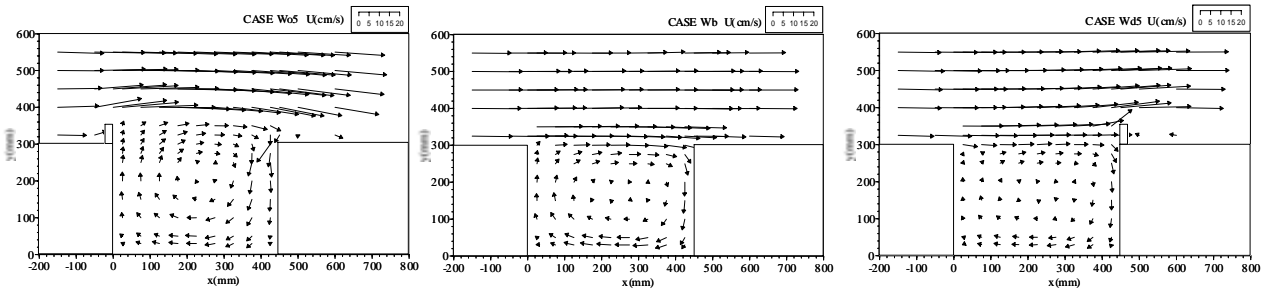


図 5. 時間平均流速ベクトル (左から Wo5, Wb, Wd5)

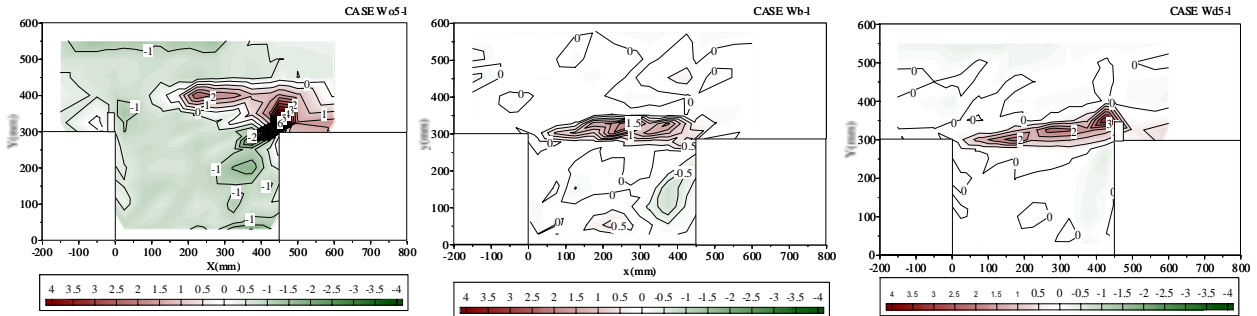


図 6. レイノルズ応力分布 (左から Wo5, Wb, Wd5)

起因する渦であり、ここではせん断渦と呼ぶこととする。このせん断渦により、取り込まれた濁度の低い水塊がわんど内を循環する大周期の渦により、輸送される過程で濁度変化は進行するものと考えられる。このため、濁度変化には周期的な乱れが確認される。

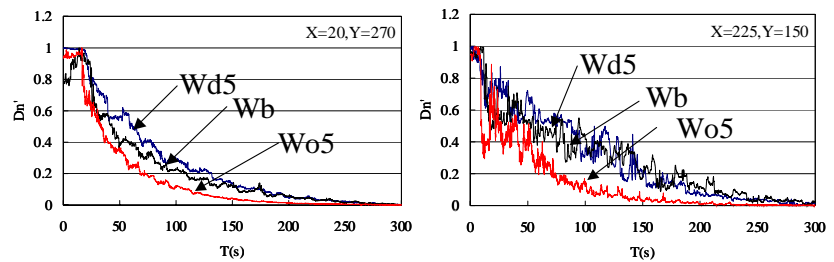


図 7. 濁度の経時変化 (左: 開口部側上流端, 右: わんど中央部)

5-2. 外部突起による影響 次に、わんどの水交換を活性化させる目的で、わんど開口部の上流端、下流端に突起を配置したケースについて検討する。流量に関する影響で、わんど内部の水交換にはせん断渦の影響により、進行したことが示唆された。下流部に突起を設けることにより、わんど域内への主流域の流れの流入を促進され、上流端に突起を配置することで、わんど域と主流域の流線から遠ざかるために水交換が抑制されるものと考えたが、実際の結果は異なっている。図 5 に Wo5, Wb, Wd5 の各ケースの時間平均流速ベクトルを示す。上流に突起を配置することでわんど域内の循環流は主流方向に拡大し、流れは速くなる。下流に配置することで遅くなることがわかる。図 6 に同一ケースでのレイノルズ応力分布を示す。境界上のレイノルズ応力は、主流域とわんど域との運動量輸送の指標であり、さらに、せん断渦の発達経過の指標として考えることもできる。Wo5 では、主流域方向に拡大した渦に沿う形で、分布している。これは、上流部に配置した突起による水はねが、わんど下流端で再付着することを示しており、この影響により循環渦が拡大すると考えられる。Wd5 では逆に、わんど下流部に配置した突起に向かいレイノルズ応力が分布しており、わんど内部にはほとんどその分布が見られない。せん断渦は上流端配置で発達しやすく、下流端配置では、基本ケースと同様の発達経過であるが、わんど域に流入し難くなることがわかる。このことが水交換にどのような影響を持つか、濁度変化から検討してみた。図 7 に濁度の経時変化を示す。計測点は流量変化で検討したものと同一点である。この点での濁度変化は、Wo5, Wb, Wd5 の順で速いが、流速などの結果から予測されるほど顕著ではない。これは、上流に突起を配置したケースでは、突起の背後の領域にあたるため、逆に流速が遅いためである。この計測点ではその差が顕著である。これは、レイノルズ応力分布から推察できた結果と一致しているといえよう。

5-3. 開口部に配置した杭粗度による影響 流量、突起の配置による検討からわんど開口部に生じるせん断渦の影響がわんど内の流れ、水交換に影響が大きいことが分かった。そこで、開口部上に様々な形状に杭粗度を配置し、せん

断渦の発生への影響について検討してみる。ここでは、杭を境界上に一列に等間隔に配置し、その間隔を 9, 15cmと変化したWt9, 15の結果について示す。図 8 に主流方向流速の横断分布(X=275)と横断方向流速の縦断方向分布(Y=150)を示す。横断分布から杭を配置することによりわんど開口部の流速が、減速していることがわかる。この影響で縦断分布では、わんど上流部での流速が遅くなっている。図 9 にレイノルズ応力分布を示す。開口部に杭を 2 本しか配置していないWt15 でも、境界上のレイノルズ応力分布は

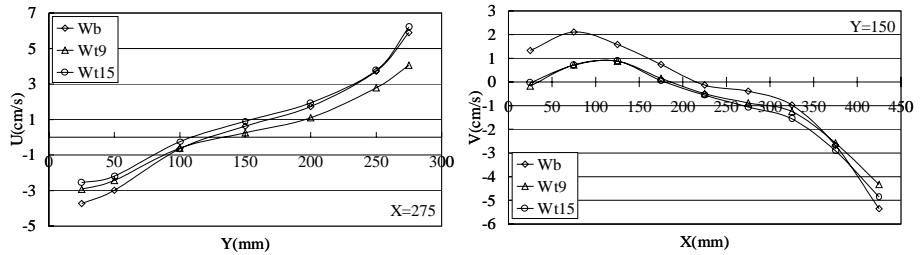


図 8．時間平均流速分布（左：横断分布，右：縦断分布）

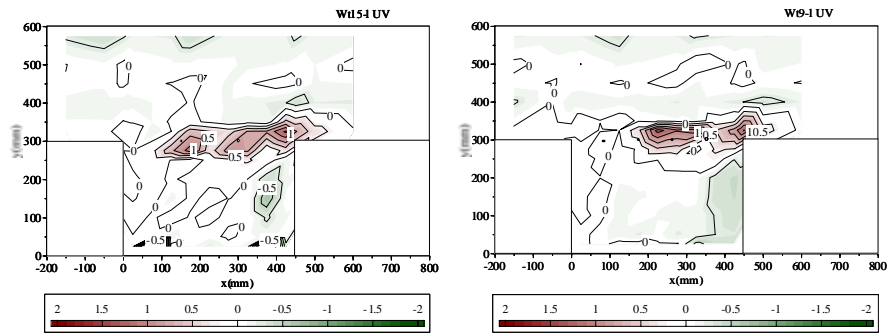


図 9．レイノルズ応力分布（左：Wt15，右：Wt9）

何も配置していないケースと異なる。分布範囲は杭の周辺に横断方向に広いが、強度は弱くなっている。Wt9 では強度はWt15 よりも大きい、ピーク値がわんど境界上杭粗度よりも主流側に存在している。これはせん断層が主流側に遷移したものと考えられる。せん断渦は存在するが、杭の主流側を主に、流下していくものと考えられるので、濁度変化は遅くなることが推察される。

### 6. 数値解析結果

従来用いていたハイブリッド法では、数値的粘性をもたらすために高周波の現象を打ち消す傾向がある。わんどの水交換を議論するには組織的なせん断渦を再現することが必要であると考え、数値粘性のない中心差分を用いた非定常計算を採用した。図 10 に中心差分による濁度の経時変化コンターを示す。境界上のせん断渦が、再現されており、せん断渦による濃度拡散の経過が良く表現されている。その結果、わんど内の濃度拡散過程も良好に評価された。

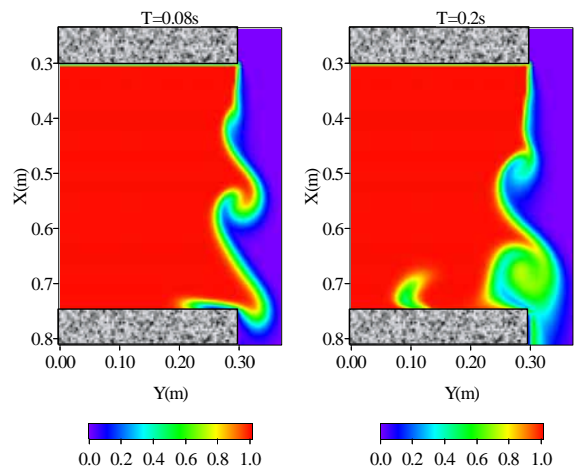


図 10．数値解析による濁度変化の再現

### 7. おわりに

わんど内部には図 11 に示すような境界による領域分けが考えられ、互いに関連していることが示された。わんどの全体の流れ構造と水交換機構にわんどの開口部上のせん断層に生じるせん断渦の影響があることが考えられた。せん断渦の発達により、わんど域内への流入、停水域の領域の変化が確認された。せん断渦はわんど開口部形状により、促進、抑制が可能であることが示唆された。また、数値解析で中心差分による非定常計算を用いることで、このせん断渦の効果を含む濁度変化が良好に再現できることが示された。

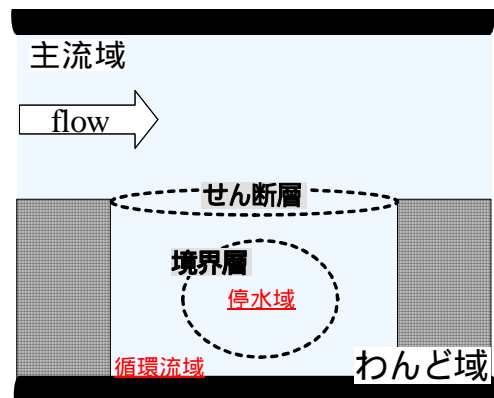


図 11. わんど領域区分