

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

EFFECTS OF CONFIGURATION AND VEGETATION ON THE MECHANISM OF WATER EXCHANGE IN ARTIFICIAL RIVERSIDE EMBAYMENT

富永晃宏¹・久田陽史²

Akihiro TOMINAGA, Kiyohito HISADA

¹正会員 工博 名古屋工業大学教授 工学部社会開発工学科 (〒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 工学部社会開発工学専攻 (〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町)

Riverside embayment is expected to provide good habitat for fish in rivers. We measured flow field and water qualities at the artificial embayment zone in the experimental river of the Aquatic Restoration Research Center in order to investigate the mechanism of water exchange in riverside embayment. In a high water stage, flow structures near the embayment were revealed by the measurement. Vegetation on the downstream end of the entrance zone reduces the recirculating flow and this effect is well reproduced by the numerical model. In a normal water stage, the flow pattern in the embayment is affected by the configuration of the embayment. Laboratory experiments were conducted to make clear the effects of vegetation along the entrance of the embayment systematically.

Key Words : *riverside embayment, water exchange, vegetation, recirculating vortex shear-induced vortex, numerical simulation*

1. 序論

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されるとされている¹⁾. このようなわんどの生態環境改善の効果を期待してわんどを人工的につくる取り組みが行われている. わんどの生態系と物理環境に関する現地観測がいくつか行われているが²⁾, 現地の水理特性の把握には困難が多い. 実験室レベルでもわんどの水理学的機能について多くの実験的, 数値的研究が行われているが³⁾, わんど形状が実際とは程遠い理想的なケースの議論になりがちである. 我々は現地と実験室の両方のアプローチを備えた独立行政法人土木研究所の自然共生研究センターのわんど研究ゾーンを利用して, 平水時から洪水時に至る非定常な流況下におけるわんどの水交換機構を調べてきた. これは主に洪水時のわんど内流況と土砂等の堆積機構を調べることを目的としたものである. 過去の観測では, 人工洪水実験時のわんど内の水質変化および流れ構造の計測を行うとともに, 室内模型実験において非定常流を発生させた場合のわんど内の流れ構造を計測して比較検討を行った⁴⁾. ただし,

この観測では実験河川に植生が密生していたためにピーク流量が小さくわんど内の流れも非常に弱いものであった. 本研究では, 実験河川の植生が刈り取られた状態で, 出水実験のピーク流量が大きい条件下で流速計測を行い, 開口部の流出入分布と瞬間流速構造について検討を行った. 次に, 実験河川に除草シートを敷き植生がない状況でわんど内のみ植生が存在する条件下での出水実験において濁水のわんど内への進入状況の目視観測を行うとともに水質計測を行った.

これらのわんど研究ゾーンの条件下での数値計算を行い, 出水時のわんどの水交換機構に及ぼすわんどの形状や植生の影響を検討し, 洪水時のわんどの水交換および物質輸送機構を明らかにするとともに, 平水時の流況についても検討した.

以上の検討から, わんどの流れ構造と水交換に植生の及ぼす影響が大きいことが明らかとなり, わんど開口部付近は土砂の堆積が見られ植生が生育しやすい状況にあることから, わんど開口部の植生がわんど周辺流れに及ぼす影響に着目して室内実験を行った. すなわち, わんどの開口部に植生抵抗を模擬した木棒をさまざまに配置した条件において, わんど内の流れ構造および濃度拡散過程を調べた.

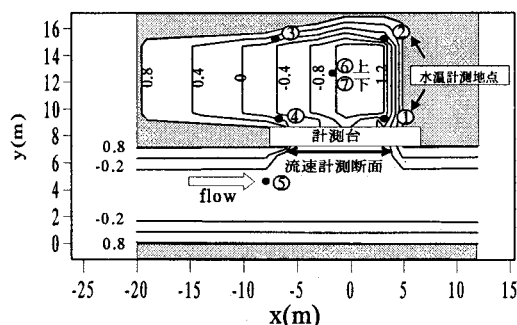


図-1 自然共生研究センターのわんど形状

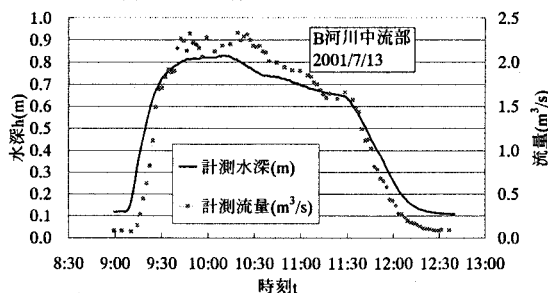


図-2 実験河川B中流部の水深・流量時間変化

2. 現地観測方法

自然共生研究センターのわんど研究ゾーンは、全長800mの人工河川B、Cの上流端より450mから560mの区間に設けられている。この区間に3つの連続したわんどが作られており、そのうちのB河川の最上流部のわんどを研究対象とした。わんど部の形状は図-1に示すようである。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。図中の番号は水温計測点を示すが、本論文ではわんど内への主流からの流入を検討するために②のみの結果を示す。

現地観測は2001年7月13日の9:00よりB河川において行われた。非定常実験は、基底流量0.1m³/sからピーク流量2.5m³/sまで約30分で増加させ、約1時間ピーク流量を維持した後、上流配水池の水量不足により約1時間かけて1.5m³/sまで流量を減少させ、その後基底流量に戻す方法で行われた。実験河川B中流部での計測水深および流量の時間変化を図-2に示す。わんど開口部付近の植物は事前に取り除き、わんど開口部の計測断面において三次元電磁流速計による流速計測を行った。水位上昇期は計測を計3回に分けて行った。流下方向の計測点はわんど開口部中央をX=0とし、水位上昇期には開口部下流端(X=300cm, Z=8cm)で定点観測を行い、9:17, 9:24, 9:31の連続した計3回、サンプリング周波数20Hz, サンプリング数8200で410秒間計測した。ピーク流量期には、開口部の縦断方向にX=-300, -240,

-180, -120, -60, 0, 60, 120, 180, 240, 300cmの11点を河床から鉛直上向きにZ=10, 60cmの22点観測を行い、サンプリング周波数50Hzで82秒間計測した。2002年7月31日にもピーク流量2.0m³/sの出水実験が行われた。このときには系統的な流速計測は行わずに、わんど内への濁水の浸入状況の目視観測と水中ビデオ撮影を行うとともにわんど開口部下流側の植生の影響について検討した。

3. 数値計算方法

現地観測流速との比較に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⁵⁾。

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial UU}{\partial x} + \frac{\partial UV}{\partial y} = -g \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} - \frac{\tau_{bx}}{\rho} - \frac{C_D \beta_x U}{2} \sqrt{U^2 + V^2} \quad (1)$$

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

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

底面せん断応力は、マンニングの粗度係数を用いて、

$$\frac{\tau_{bx}}{\rho} = \frac{gn^2}{\sqrt{h}} U \sqrt{U^2 + V^2}, \frac{\tau_{by}}{\rho} = \frac{gn^2}{\sqrt{h}} V \sqrt{U^2 + V^2} \quad (4)$$

とし、水深平均レイノルズ応力は、

$$\tau_{xx} = \rho \nu_t \left(\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial U}{\partial x} \right), \tau_{xy} = \rho \nu_t \left(\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right), \tau_{yy} = \rho \nu_t \left(\frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial y} \right) \quad (5)$$

と表す。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、nはマンニングの粗度係数、 ν_t は水深平均の渦動粘性係数である。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。渦動粘性係数は $\nu_t = \epsilon_0 u_* h$ とし $\epsilon_0 = 0.14$ とした。植生パラメータとしてはC_D=1.0, $\beta_x = \beta_y = 5.0(1/m)$ を与えた。式(1), (2)は、スタッガード格子で有限体積法によって離散化され、ハイブリッド法を用いて解かれた。水深はSIMPLE法に基づき水位補正式から計算される。

4. 現地観測結果

(1) 流速計測結果

図-3に水位上昇期のx=300cm, z=8cmの地点における瞬間流速u, v, wの時系列を示す。わんど開口部の下流側が最もわんど内への流入が活発であることが目視観測により認められたことから、この計測点を選定したものである。ここで時間t=0sはわんど領域において水位変化が生じ始めた時間である。水位変化以前は、わんど下流端の計測点では流れは非常に小さいことがわかる。9:17から100秒経過後から流速の変化が顕著に現れる。横断方向流速の変化は敏感であり、わんどへの流入方向である正の値を

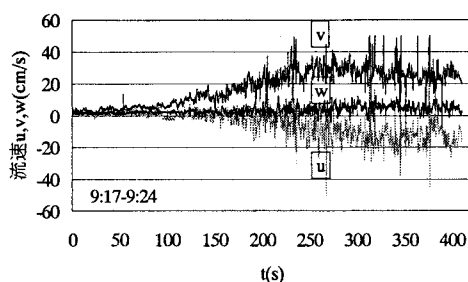


図-3 水位上昇開始時における瞬間流速 u, v, w の経時変化 ($x=300\text{cm}$, $z=8\text{cm}$)

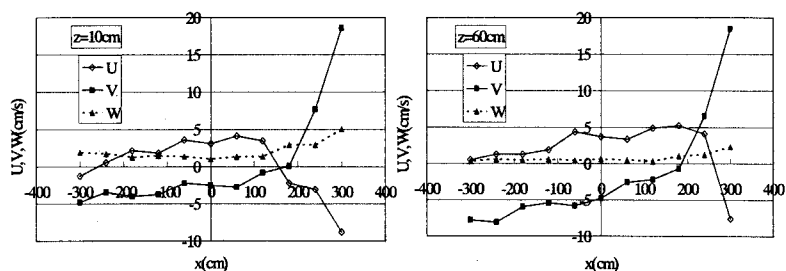


図-4 ピーク流量時におけるわんど開口部測線上の時間平均流速縦断分布

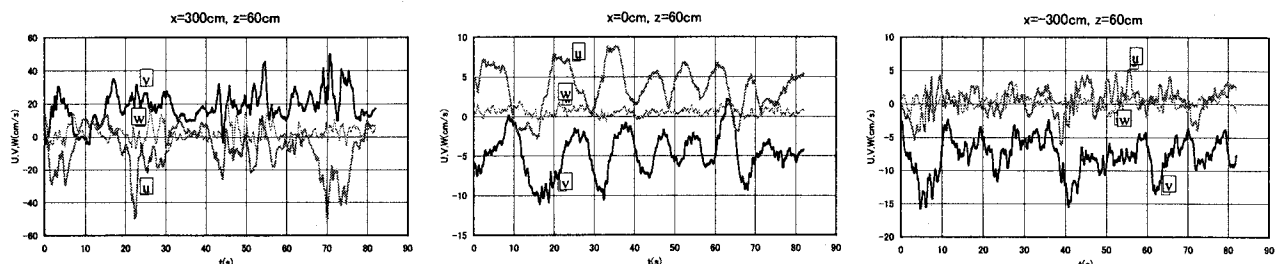


図-5 ピーク流量時におけるわんど開口部の代表的測定位置での瞬間流速時系列

大きくとるようになる。最大値は約300秒後の9:22付近に現れ、流入流速は約30cm/sに達する。この値は後に示すピーク流量で定常流状態の横断方向流速よりも大きな値である。主流方向流速は、 $t=100\text{s}$ から200sにかけて乱れ成分の振幅は大きくなるが平均流速にはそれほど大きな変化は確認できない。しかし、約250秒経過後からは逆流を意味する負の値が生じている。この地点では下流方向から上流に向かってわんど内に流入が生じていることがわかる。また、鉛直方向流速 w は若干の上昇流を示している。

次に、ピーク流量時の河床からの高さが $z=10\text{cm}$ 、 60cm の断面での時間平均流速のわんど開口部測線に沿う縦断分布を図-4に示す。先の瞬間流速の計測点は $x=300\text{cm}$ の地点であり、これと同様に U は負の値であり、流下方向に逆流を示しており、 V はわんど内への流入、 W は上昇流を示すことが確認できる。ただし、主流速 U および横断方向流速 V は水位上昇期よりも小さな値を示している点が注目される。開口部全体として、主流方向流速ではわんど下流端で逆流が、横断方向流速では上流部でわんどから主流域への流出が、下流部でわんど域への流入が生じていることがわかる。わんど下流の非常に狭い範囲から流入し、上流の広い範囲から流出している流れ構造が明らかである。上断面と下断面ではほぼ同様の傾向を示すが、下断面の方が主流方向流速の逆流領域が広い。

上断面の代表的計測位置における瞬間流速の任意の80秒間の時系列を図-5に示す。まず、最もわんど内への流入が激しい $x=300\text{cm}$ では、約20秒の周期で u が正から負に急激に変化し、 u が負の時には v は流入速度が増大することを示している。わんど開口部中央の $x=0\text{cm}$ では、周期10秒から12秒程度の比較的

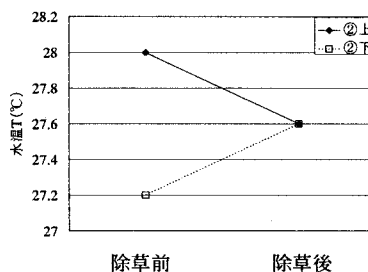


図-6 開口部植生の除去前後での水温比較

規則的な変動が見られる。 u と v の位相は 90° 程度ずれており、わんどからの流出が大きく発生した後主流速が加速し、流出が小さくなった後主流速は減速していることがわかる。わんどのセイシュの固有周期は約3~4秒程度と推測されるのに対してあまりにも周期が長いため、水面振動とは異なる現象と考えられる。開口部上流の $x=-300\text{cm}$ では、中央で見られた10秒程度の周期変化にさらに高周波の変動が重なったものと考えられる。この高周波成分はせん断不安定に起因する渦の発生を示しているものと考えられる。以上のように、わんど開口部付近の流れは様々な周期の変動成分が含まれており、複雑な渦運動に支配されていることがわかる。また目視観測により激しいボイル現象が頻繁に発生していることも確認されており、複雑な周期特性は3次元的な渦運動にも起因していると考えられる。

(2) わんど開口部の出水時流況と植生の影響

2002年7月31日の出水実験においては、わんど開口部下流に植物が繁茂していた。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

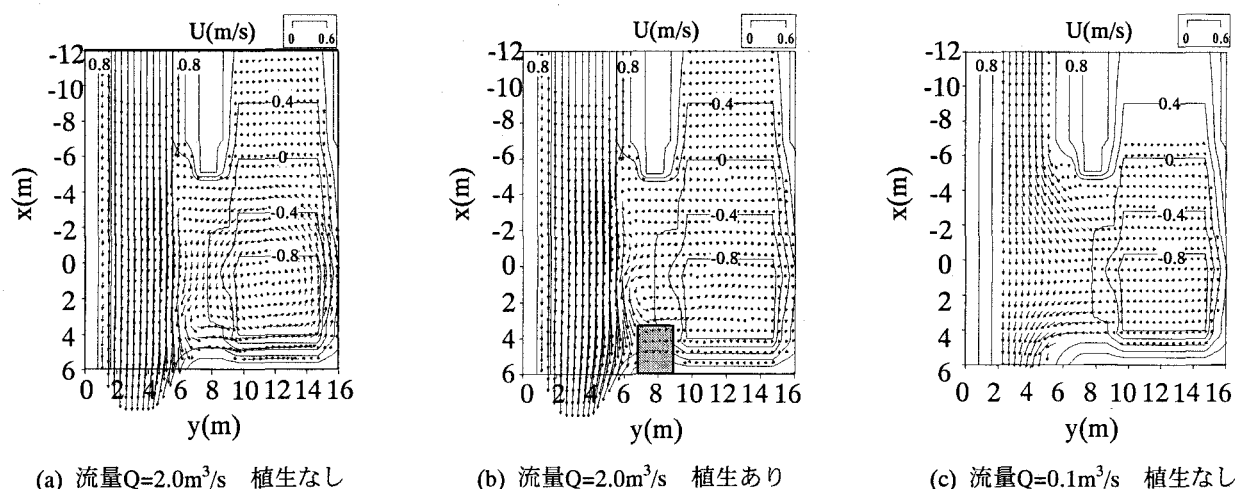


図-7 数値計算による流速ベクトルの比較

濁水と清水の境界が形成されていた。水面の水は見た目では変化していないが、わんどの水位は増えていることより本川の水は下層へと浸入しているものと推測される。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。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-6である。計測位置は図-1の②の位置で水面近傍と水面下50cmの位置の2点で計測した。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ことがわかる。このことは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ものと解釈される。

このことの計測による検討には限界があるため、数値計算によって検討することとした。上述のように3次元的な流動も観察されているが、全体的には平面的な流動が支配的であると考えて水深平均2次元の解析値によって検討した。ピーク流量時 ($Q=2.0\text{m}^3/\text{s}$) 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-7に示す。図には平水時 ($Q=0.1\text{m}^3/\text{s}$) の計算結果も示している。ピーク時の下流端水深は70cm、平水時は20cmとしている。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。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。わんど下流部奥では通常とは逆の循環流が形成されているが、これは目視観測で認められたものと一致する。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-8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

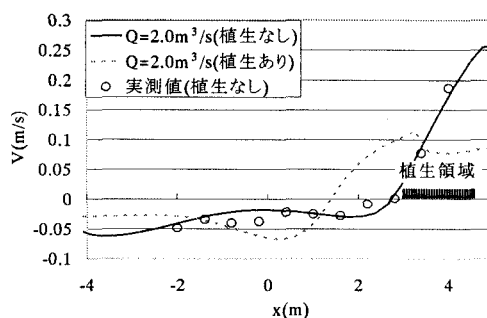


図-8 わんど開口部の横断方向流速分布の計算結果と実測値の比較

とがわかる。こ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。

このような出水時流況はわんど内への土砂等の輸送に関係する。この実験河川では土砂供給量が少ないため、わんど内土砂堆積量の変化を検討するのは困難であった。わんど入口の $x=300\text{cm}$ 付近の底面近くに本川側へ向けてセットした水中ビデオ撮影では、土砂や植物くずの激しい流入が観測されるとともに、フナがこの付近に集まっていることが確認された。

平水時の計算結果の流速ベクトルを見ると、わんど上流側で流入し、下流側で流出する流れとなっており、これに伴うわんど内の循環流は非常に弱いことがわかる。これにはこのわんどの形状が関係しているものと思われ、実際にわんど入り口で湾曲した藻の形状が確認されている⁹⁾。このように平水時にはわんど内全体に及ぶ循環流による水交換は期待されないが、わんどの深い部分への本川水の供給があり、弱い循環流と分子拡散や風による鉛直混合などが加わって、緩やかに水交換が行われると思われる。

そこで、出水時のわんど内の浮遊砂や有機物の輸送を対象として、特にその影響が顕著にみられた植生の影響について、系統的な実験を行うこととした。

5. 植生配置に関する実験

(1) 実験方法

わんど開口部の植生の影響を調べる室内実験は、長さ13m、幅59.3cmの長方形断面水路を用い、右岸側壁に遮蔽物を設け一区間をわんどとした。わんどの開口部長と奥行き幅の比は1.5とした。植生の効果を杭粗度で代用し、直径5mm、長さ15cmの木棒を用いて開口部上に配置した。実験条件を表-1に、わんど開口部の杭粗度配置形状と濁度の計測点を図-9にそれぞれ示す。植生はわんど開口部の上流側にも生育することから、植生の影響を総合的に検討する目的でこれらの配置を選定した。流速計測には2成分I型電磁流速計を用い、主流速 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。流速はサンプリング周波数100Hzで41秒間計測した。わんどの水交換を直接的に把握するために濃度拡散実験を行った。これはわんど入口をいったん遮蔽し、過マンガン酸カリウムを染料に用いてわんど域内を着色した後、入口を瞬時に開放するという方法で行われ、濃度変化をビデオ撮影するとともに、濁度計（東京計測製）を用いて濁度をサンプリング周波数20Hzで5分間計測した。

(2) 実験結果とその考察

杭の設置間隔と設置長さ、設置位置の違いがわんど域内の流れに及ぼす影響についてそれぞれ検討する。図-10にわんど中央部にあたる $x=225\text{mm}$ における主流方向流速 U の横断分布を、図-11に $y=150\text{mm}$ における横断方向流速 V の縦断分布を示す。杭間隔が狭くなるにつれて循環流速が減少することがわかり、杭間隔が最も狭いWt3は U 、 V ともに著しく減少する。杭間隔が大きい場合でもわんど上流部の流出する流速 V が減少する傾向にある。次に配置長さの影響についてみると、開口部長さの1/4と最も短いWu1は影響が小さくWbとほぼ同様であるが、1/2を超えると著しく流速が減少し、 V については全長さに及ぶWt3と同程度になる。また設置位置について比較すると、上流側に設置したWu2で剥離の始まる上流端からの加速が抑えられ循環流が弱まっているのに対し、下流側に設置したWs2ではそれほど減少していない。自然共生研究センターのわんどでは下流側植生の影響が大きかったが、実験では密度が疎なため影響が少なかったものと考えられる。

次に、WbとWt3、Wu2、Ws2の $z=1.5\text{cm}$ における無次元化したレイノルズ応力分布を図-12に示す。Wbではわんど開口部に沿って大きな値をとり、せん断不安定渦による乱れが大きいことを示している。また、わんど下流の内壁に沿って負の値を示す。Wt3では大きなレイノルズ応力の範囲は杭粗度周辺には現れず、わんどの下流端付近にのみ存在している。杭粗度は大規模なせん断不安定渦を減衰させる

表-1 実験条件

B(cm)	Bw(cm)	L(cm)	L/Bw	Q(cm ³ /s)	h(cm)	Fr
59.3	30.0	45.0	1.5	4.0×10^3	6.0	0.297

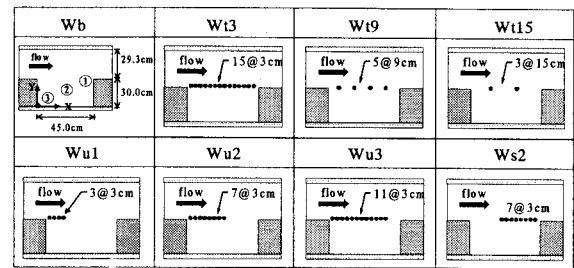


図-9 開口部杭粗度配置

効果を有していることがわかる。上流側半分には杭粗度のあるWu2では杭がなくなる $x=225\text{mm}$ 付近からレイノルズ応力が大きくなる。これは杭のある場所では杭によってせん断渦の発達が抑制されていることを意味している。下流側半分に杭粗度のあるWs2では、杭の設置開始位置で最も大きな値を示し、上流で発生したせん断不安定渦が杭によって壊され、杭の下流端付近でも大きな値を示すようにわんど内への流入を促進しているものと考えられる。この場合密生度の影響が大きいものと思われる。

わんどの水交換には循環渦とともに境界部のせん断不安定に起因する渦が重要な役割を果たしていることが知られている⁶⁾。そこで水交換への影響を濁度変化によって検討する。図-13は濁度計による出力の時間変化である。濁度値 D_n を各地点での最大値 $D_{\max}$ 、最小値 $D_{\min}$ により、 $D_n'=(D_n-D_{\min})/(D_{\max}-D_{\min})$ とする無次元化を行っている。まず流入部となる下流端では杭設置による大きな違いは見られず、いずれも大きな乱れを示している。中央部においては杭設置によって濁度変化の遅れが見られ、Wt3およびWt9では水交換が遅くなることを示している。わんどの上流側壁面付近ではWt3の濁度変化の違いは顕著であり、他のケースでの変化が指数関数的な曲線を描く減少過程であるのに、直線的に減少している。次に設置長さや設置位置が濁度変化に与える影響を最も違いが顕著に現れたわんど上流奥の1点について検討する。設置長さが長くなるにつれて濁度変化はWbより遅くなり、順にWs2、Wu1とWu2、Wu3とWt3となっている。この結果はわんど内部の流速分布から予想される結果と一致している。これらの効果については組織渦構造を再現できる数値シミュレーションによる検討が有効と考えられ⁷⁾、今後の検討課題としたい。

6. 結論

わんど開口部の流速分布および乱れの特性について詳細に検討した。自然共生研究センターのようなわんど形状では洪水時にわんど開口部下流側から集

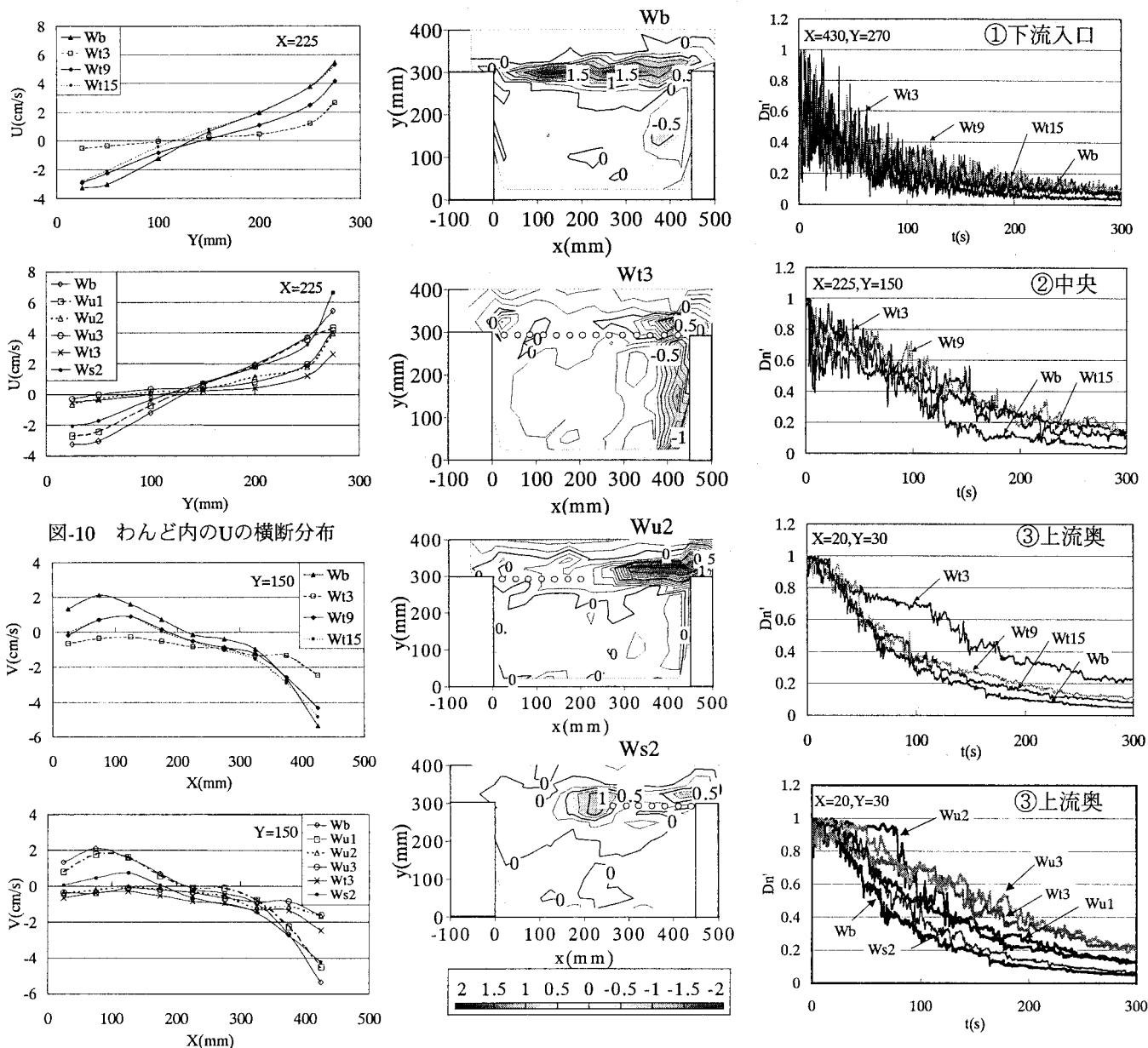


図-10 わんど内のUの横断分布

図-11 わんど内のVの縦断分布

図-12 レイノルズ応力コンター

図-13 濁度の経時変化

中的に流入することが示され、実際のわんど形状を取り入れた数値計算によって、時間平均の流れ構造は良好に再現された。また、開口部の流速は周期的な変化を示し、多重のスケールの渦運動を含んでいることが確認された。さらに、開口部に存在する植生の影響が大きいことが観測および数値計算によって明らかにされた。また室内実験において開口部に存在する杭には主流域とわんど域の連続的な運動を妨げることによる循環流の抑制と境界上のせん断渦の発達を抑制する働きがあることがわかった。

謝辞：現地観測にあたっては自然共生研究センター関係諸氏の協力を得たことを記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 河川環境管理財団大阪研究所編：わんどの機能と保全・創造～豊かな河川環境を目指して～, 1999.
- 2) 木村一郎ら：平成12年度河川懇談会共同研究 ワンドの水理特

性と河川環境 研究成果報告書, 2001.

- 3) 瀬津家久・鬼束幸樹・池谷和哉・高橋俊介：わんど形状が河川に及ぼす影響に関する水理学的研究, 応用力学論文集, vol.3, 813-820, 2000.
- 4) 富永晃宏・谷川幸男：非定常流における人工わんどの水交換について, 平成12年度自然共生研究センター研究報告書, 209-212, 2001.
- 5) 富永晃宏・長尾正志：河道内樹木群流れの横断混合に及ぼす高水敷高さの影響, 水工学論文集, 第42巻, pp.415-420, 1998.
- 6) 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.
- 7) 富永晃宏・谷川幸男・久田陽史：わんどの水交換機構に関する数値的検討, 土木学会第57回年次講演会概要集, 2002.

(2002. 9. 30受付)