

# わんどの水交換に及ぼす連絡水路形状の影響

## EFFECTS OF CONJUNCTION-CHANNEL CONFIGURATION ON WATER EXCHANGE IN RIVERSIDE EMBAYMENT

富永晃宏<sup>1</sup>・北村福太郎<sup>2</sup>

Akihiro TOMINAGA and Fukutaro KITAMURA

<sup>1</sup>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)

<sup>2</sup>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前期課程 (〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町)

Riverside embayment is often connected with primary river flow through a conjunction channel. It is important to maintain water quality in such a dead water zone during ordinary water-stage. In this study, we concentrated on the effects of length and orientation angle of the conjunction channel on flow structures and water exchange rate. The flow patterns in embayment zones were extremely changed by the orientation angle of the conjunction channel. When the length of conjunction channel is long relatively to the width, an isolated vortex was generated in a conjunction zone. This vortex fluctuates and penetrates intermittently into embayment zone. This indirect inflow generates consequential vortices but the magnitude of these vortices are considerably smaller than those caused by direct inflow. The water exchange rate was generally proportional to the velocity scale but it was affected by the vortex structures.

**Key Words :** *riverside embayment, water exchange, vortex structure, conjunction channel  
PIV, concentration diffusion*

### 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よ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」といい、平水時に流水域と接続していないものを「たまり」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・生育に的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とされている<sup>1)</sup>。明治時代に淀川や木曾三川に低水路維持のために設置された水制の周辺に土砂が堆積して良好なわんどが形成された例のように、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。また、砂州上の細流の作用と植生の繁茂等によって自然に形成されたわんどが存在する。

わんどの生態学的な役割を維持するための課題として、平水時には閉鎖的になりがちな水域の水質悪化が考えられ、これを防止するには静穏域を確保しながら適度な水交換が必要となる。高水時には土砂堆積によるわんどの閉塞や破壊が考えられ、防止策としてわんどを越流する洪水流による土砂堆積を考

慮した位置および形状の選定あるいは保全策が必要となる。前者の課題については、側岸に凹部を設置したわんどの水理学的機能について実験的、数値的研究が数多く行われている。これら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凹部内への流入に伴う再循環渦の形成機構や水面変動に着目しているものである<sup>2),3),4),5)</sup>。また、わんど周辺の流れの制御に関する研究や<sup>6),7),8)</sup>、水制群によるわんど形成プロセスに関する研究や<sup>9),10)</sup>、わんどの生態系と物理環境に関する現地観測に基づく研究がいくつか行われている<sup>11),12)</sup>。次に後者の洪水時のわんど内流況に関する実験的研究<sup>13)</sup>や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た研究がある<sup>14)</sup>。

本研究では、時間的に大部分を占める平水時のわんど内の水質環境に着目した。実際、主流域と細い連絡水路で接続するようなわんどが数多く存在するとともに、人工わんどについては淀川の樟葉わんど<sup>12)</sup>や木曾川の起地区の人工わんど群において同様の形状が作られている。これまでの実験的研究は開口部の広い、いわゆるサイドキャビティにおける流れ構造に関するものがほとんどであった。開口部が細く狭められたわんどにおいては主流との水交換が著しく低下するおそれがあるが、長期的には有効な水交換が存在し、わんど内の水質が維持されているもの

と考えられる<sup>14)</sup>。わんどと主流の連絡水路の形状によって水の交換やわんど内流速にどのように変化するかを明らかにすることが必要である。そこで、わんどと主流域をつなぐ連絡水路の長さや向きを変化させた実験を行い、これらがわんど内の流れ構造と主流との水交換機能に及ぼす影響について検討した。

## 2. 実験方法

実験水路は長さ4m、幅48cmの塩化ビニル製長方形断面開水路を勾配を1/500に設定して用いた。水路右岸を遮蔽し本流幅を30cmとなるようにし、上流から2.2mの位置にわんど域を設けた。わんど形状は長さ15cm、奥行き9cmの長方形とした。わんど開口部には厚さ1cmまたは3cmの板を設置し、この中央に向きの異なる幅3cmの連絡水路を設けた。この場合もわんどの奥行き長さは9cmと一定にした。流量は4.19 lit/sとし、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。本川の平均流速は34.9cm/sである。本川・わんど連絡水路形状は、長さや向きの組み合わせにより図-1に示す6ケースとした。連絡水路の向きはFW11, 21が直角、FW12, 22が下流向き45°、FW13, 23が上流向き45°である。斜め連絡水路の場合、わんど内の中央3cmが開口部となるように形状を設定した。

計測はわんど内の流れ構造に注目した。わんど内の流速計測はまず2成分1型電磁流速計を用いて40秒間の平均流速を求めた。計測は壁から2cm離れた領域内で鉛直方向にz=1cm, 2cm, 3cmの3断面で行った。ただしケースFW22およびFW23では流速が著しく遅かったため誤差の範囲内で計測できなかった。

次に、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。これについてはわんど上面からのビデオ撮影を行い、PIV解析と濁度の経時変化計測を行った。PIV計測では染料の濃淡画像の相互相関法により流速ベクトルを算出した。精度良い計測をするにはトレーサー粒子を用いた可視化画像の取得が必要と考えられるが、本実験では流れパターンを得るための簡易的手法としてこのPIV解析を用いることとした。染料は高速域では早く拡散し、低速域では滞留するなど画像情報に精度上の場所的なばらつきが生じる可能性があることは否定できない。しかし、適当な濃度時間帯においては流動が的確に把握できる画像が得られ、オーダー的には速度計測が可能であると判断した。また、PIV解析では染料の濃淡を上から見た画像を用いており、水面から底面までの染料が集積された画像となっている。そのため、この結果は水深方向に平均された流速を表すと考えられる。この点については後に述べるように電磁流速計による計測結果からわんど内

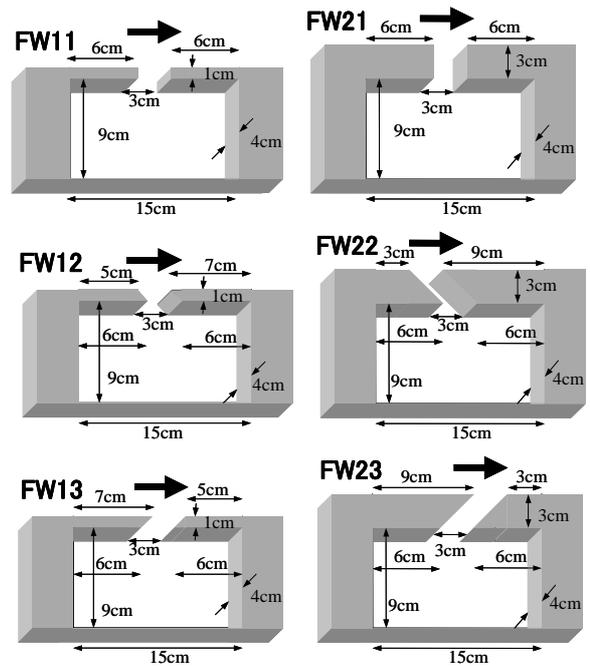


図-1 わんどと連絡水路の形状

の流れはほぼ2次元であることが示されたことから、問題は少ないと判断した。ただし、計測時間及びサンプリング時間間隔はケースによって変更する必要がある。

濁度計測はビデオ画像から一定間隔で取り出した静止画像から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。

## 3. わんど内の流速ベクトル

まず電磁流速計による計測結果から、わんど内渦構造の3次元性について検討する。図-2はケースFW21の各水平断面における流速ベクトルである。いずれの高さにおいてもほぼ同様の流れ構造を示していることがわかる。x=5cm, y=5cm付近に中心を持つ反時計回りの渦が形成されている。詳細に見ると、この渦は底面に近づくほど明確になる。また水面に近づくほど、わんど下流の本流側のコーナーへ向かう流れが強くなっている。この実験ではわんど壁面近傍が計測されていないため全体の渦構造は不明確であるが、わんど内の流れはかなり2次元な流れであることは明らかである。他のケースでも流れ構造の高さによる違いはわずかであり、ほぼ2次元な流れ構造が形成されていた。

ケースFW22およびFW23は非常に流速が小さい

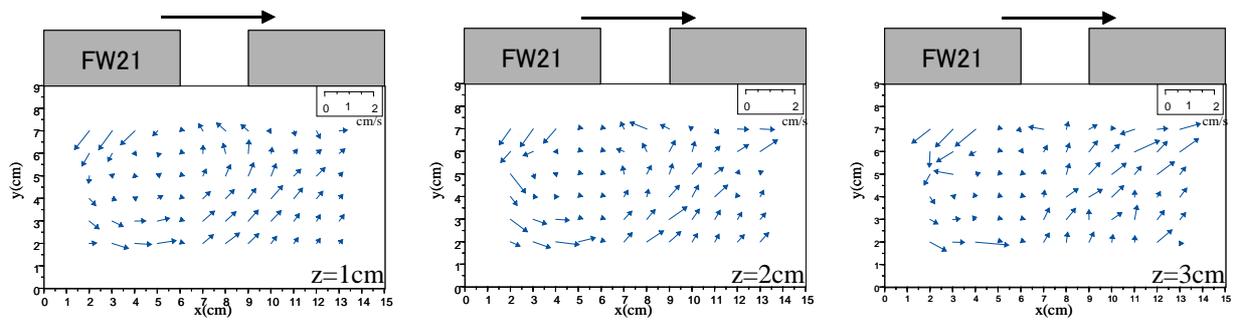


図-2 電磁流速計による流速ベクトル (FW21, 鉛直高さによる違い)

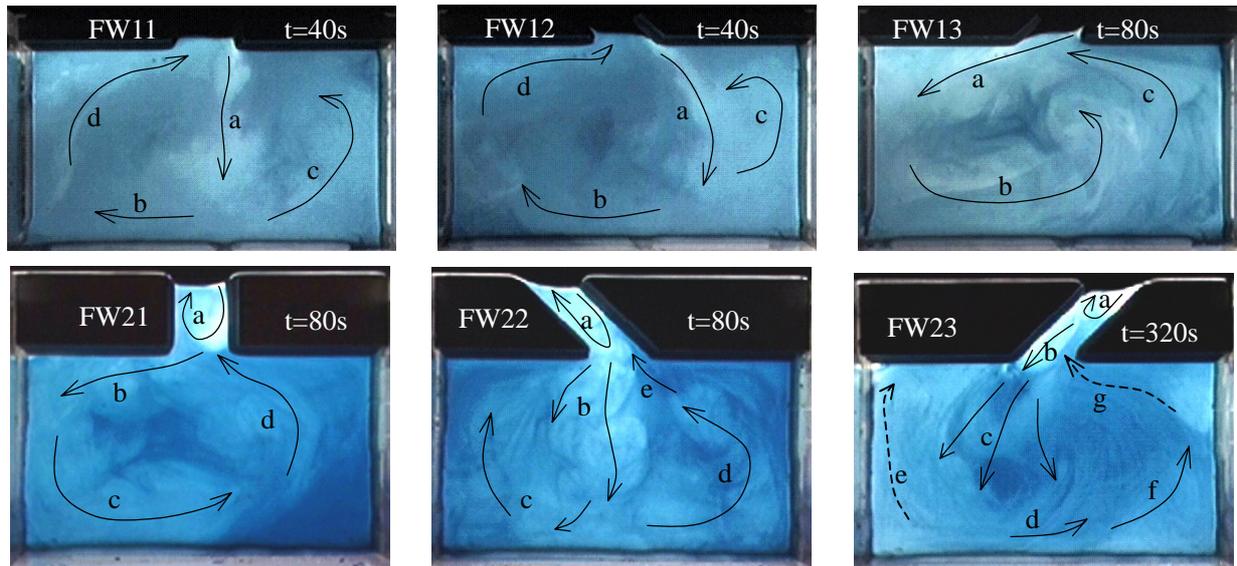


図-3 染料画像から見た瞬間的渦構造

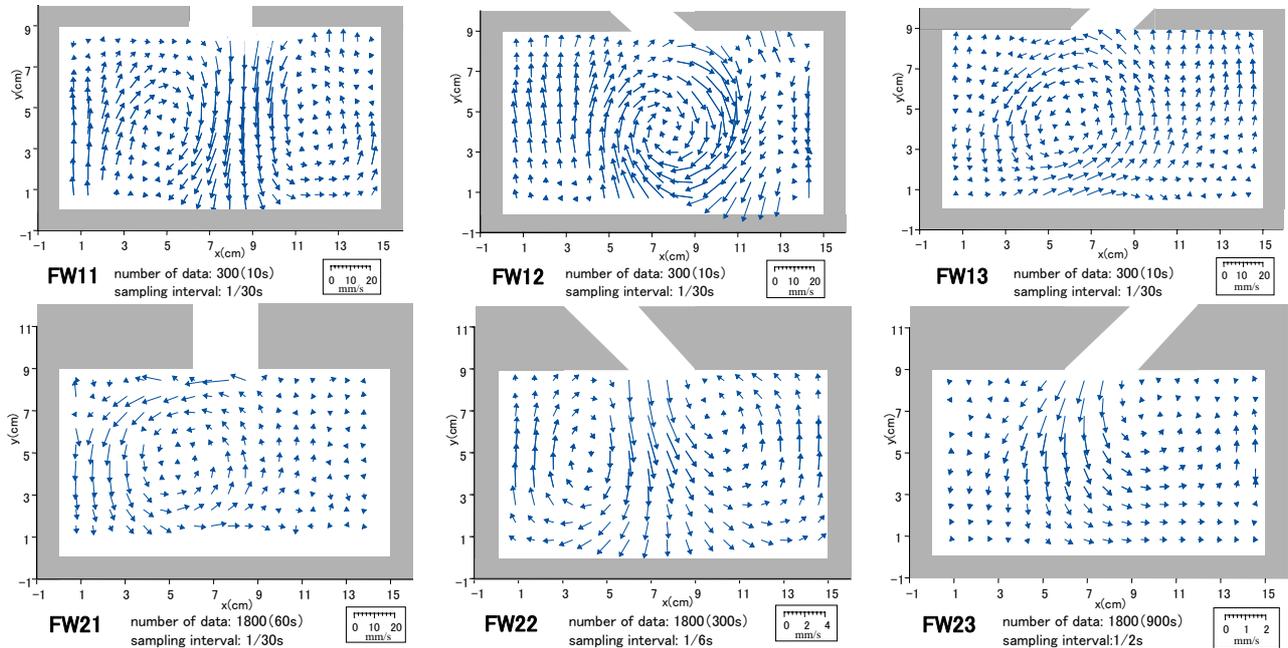


図-4 染料画像のPIV解析による流速ベクトル

め、染料のビデオ画像をコマ飛ばしでPIV解析することによって流速ベクトルを得た。電磁流速計による計測を行ったケースについても同様のPIV解析を行い、同一の解析による結果を比較検討する。

図-3に各ケースの染料画像の一例を示す。それぞれ開口部の遮蔽除去後の経過時間を示しており、静止画として最も渦構造が判別できる時間を選定したものである。これより瞬間的な渦構造を見ることがで

きる。ビデオ画像の観察をもとにわんど内の流れ構造の形成機構について考察する。図中には代表的な流れの方向を示す矢印を記号を付して重ねて描いている。また、図-4にPIV解析によって得られた流速ベクトルを示す。これには画像データのサンプリング間隔と個数を示している。

まず本流・わんど連絡水路の長さが1cmの場合について検討する。直角のケースFW11では、開口部下流側からわんど内に噴流的に流入した流れがわんど奥まで直進し (a)、壁にぶつかり壁に沿って上下流へ回り込み1対の再循環渦を形成する (b, c)。わんど上流側の時計回りの渦が規模も大きく強い流れとなっている (b, d)。わんど開口部上流側から本流へ流出が発生している (dの先端)。一方、わんど下流側では反時計回りの渦が見られるが、わんど外への流出はできず、再循環渦を形成する (c)。流速ベクトルからは、わんど奥へ直進する強い流れと、1対の渦構造が計測されており、上流側の壁に沿う本流向き流れが強いことがわかる。

下流向きのケースFW12では、開口部から流入する流れが流下方向の成分を持ちわんど下流側へ入り込む (a)。これがわんど下流側の壁の存在によってわんど奥で上流側に向きを変え (b)、結果としてわんど全体に及ぶ1個の時計回りの渦が形成される (a, b, d)。わんど連絡水路を下流向きにしたことで、わんど内には直角の場合より大きく明確な渦構造を発生させる。わんど開口部の下流側から流入し (a)、上流側から流出する (d) 水交換が行われている。わんど下流側では弱い反時計回りの渦が観察される (c)。流速ベクトルではわんど中央を中心とするひとつの渦構造が計測されているが、下流側の弱い渦は明確でない。以上の2ケースは、わんど内への流入は噴流的な流れの不安定渦の発生によって間欠的な乱れ挙動は示すものの、比較的定常的に上述の流れ構造が存在している。

上流向きのケースFW13では、開口部下流端からの流入が上流側に曲げられ開口部を横切る形で上流側への流れが発生する (a)。これにより反時計回りの再循環渦がわんど上流側に形成される (b)。このケースではわんどからの流出 (c) が開口部を横切って流入する流れ (a) によって妨げられてしまう。この流出の圧力は間欠的に流入を突き破り、わんど外へ出る流れを生じさせる。この結果わんど開口部付近では間欠的に上流向きのわんど内への流入とわんど下流域から開口部を通しての流出が周期的に繰り返す流れとなる。流速ベクトル図に見られる長時間の平均としては上流側の反時計回りの渦が残る形となっている。このように連絡水路の侵入角度はわんど内の流れ構造に大きな影響を与えている。

本流とわんどを結ぶ連絡水路を長くした直角向きのケースFW21では、連絡水路の3cm×3cmの領域で

下流から流入し上流から流出する一つの再循環渦が形成される (a)。わんどの境界付近でこの渦の上流へ向かう流れが間欠的にわんど内へ侵入することにより (b)、わんど内の再循環渦が形成される (c, d)。したがって、連絡水路長さが1cmのケースFW11とは全く異なる流れ構造を示し、むしろケースFW13と同様な流れパターンである反時計回りの渦構造を示す。渦の中心部には染料が集積しているのが認められる。この場合のわんどからの流出は連絡水路の渦の揺動によって間欠的に行われる。流速ベクトルではわんど上流側の時計回りの渦構造を示しているが、下流側の流出する流れ (d) は明確ではない。また、わんど下流側は渦形成域外で流速が非常に遅く染料が停滞している領域が確認される。ここではPIV計測の精度上困難であった。

下流向きのケースFW22では、連絡水路の長さが傾斜したことで長くなったため、連絡水路下流からの流入による再循環渦が引き延ばされた形で連絡水路内に発生する (a)。この連絡水路への流入が周期的に開口部上流側からわんど内へ直進しながら侵入する (b)。これに伴い、わんど上流側に時計回りの渦 (c)、下流側に反時計回りの渦 (d) が形成される。このわんど内の流れ構造はFW11と類似している。流速ベクトルにおいてもFW11と同様の渦構造が得られているが、わんどへの流入が間欠的となるためにわんど内流速は遅くなる。また、わんどからの流出が開口部下流側から行われているため (e)、下流側の流れが相対的に強くなっている点は異なる。

上流向きのFW23では、わんど内流速は非常に遅くなる。この画像は遮蔽除去後320秒経過後のものである。これは、連絡水路への流入による再循環渦が流入口近くの狭い範囲に限られるためである。この流入口渦の不安定により連絡路上流部に沿ってゆっくりとした流入が起こる (b)。これが開口部から放射状の流入を引き起こし (c)、わんど奥および上流側へと向かう流れが現れる (d, e)。流出は開口部下流側から行われるため (g)、下流側には反時計回りのゆっくりとした渦が形成される (f)。上流側は渦構造が明確には見られない。このケースではゆっくりではあるが複雑な渦構造を形成しながらわんど奥へ流入していき、染料が空間的に集積拡散を繰り返しながら移動している様子が見られた。流速ベクトルではゆっくりとした流入と下流側の渦が確認される。

次に、PIV解析で得られた流速の大きさについて検討する。図-5はわんど内に形成される渦の大部分がその中心をとる位置である $y=5.25\text{cm}$ における、各ケースの合成流速 $V_a (= \sqrt{U^2 + V^2})$ の縦断方向分布である。まず連絡水路長さ1cmのケースであるFW11およびFW12が最も大きな値を示す。わんど内への流入流速として、FW11では開口部下流端である $x=9\text{cm}$ で最大値を取るのに対し、FW12ではこれより下流の

$x=11\text{cm}$ 付近で最大値を取ることがわかる。このピーク値は両者でほとんど同じで  $V_a = 1.8\text{cm/s}$  である。また、反対に外へ向かう流れとして、FW11ではほぼ上流側壁面近くで、FW12では  $x=3\text{cm}$  で最大値  $V_a = 1.4\text{cm/s}$  をとる。下流側の外向き流れはこれに比べてかなり小さいピークしか示さない。連絡水路長さ  $1\text{cm}$  のケースの中でも上流向きFW13では流入流速はかなり小さくなり、直角および上流向きの場合の約半分になっている。次に連絡水路長さ  $3\text{cm}$  のケースにおいて、FW21では、FW13と同様な傾向を示すが、ピーク位置が若干上流側にずれ、ピーク値も流入で約70%、外向きで流れで約60%と小さくなる。FW22では流速はかなり減少する。流入は  $x=5\text{cm}$  から  $9\text{cm}$  の広い範囲に現れ、ピーク値はFW21の約40%程度である。これより上流側および下流側に外向き流れの弱いピークが見られる。上流向きFW23ではさらに流速が減少し、流入のピーク値で約  $0.06\text{cm/s}$  と小さい。このように、わんど内流速は本川・わんど連絡水路の長さが長くなるほど小さくなり、連絡水路の角度にも大きく影響されることがわかる。

#### 4. 濁度の時系列変化と水交換速度

平水時のわんどの水質維持については、本川との水交換速度が重要な指標となる。わんど内の流速だけでは実際の水交換量は不明である。ここでは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。

この相対濁度の経時変化を示したのが図-6である。これより濁度の変化速度は3グループに分けられ、連絡水路長さ  $1\text{cm}$  の直角と下流向きFW11およびFW12が最も速く、次に連絡水路長さ  $1\text{cm}$  で上流向きFW13、連絡水路長さ  $3\text{cm}$  で直角と下流向きFW21およびFW22がほぼ同様な変化を示す。連絡長さ  $3\text{cm}$  で上流向きFW23は最も濁度変化が遅い。この結果は図-5で示した流速の大きさとほぼ対応しているが、若干の相違も見られる。濁度経時変化を片対数表示したのが図-7であり、これがほぼ直線分布することから指数近似を適用する。ただし、遮蔽除去直後は流れが安定するまで多少の時間を要するため、時刻0で必ずしも1を通らない。この発達時間は、流れの速いケースFW11、FW12、FW13では約5~10秒、次にFW21では約15秒、FW22では約30秒、最も遅いFW23では約80秒程度であった。そのため近似曲

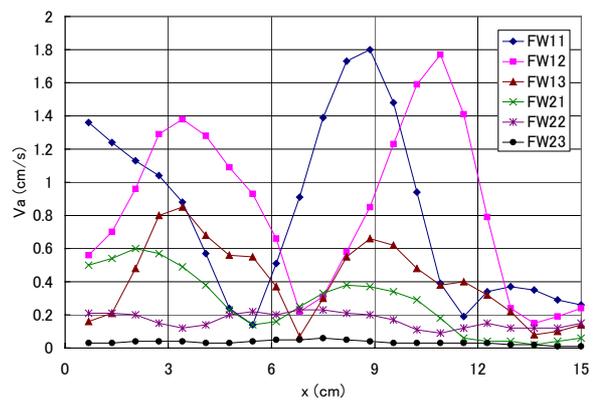


図-5 わんど中央における合成流速の縦断分布

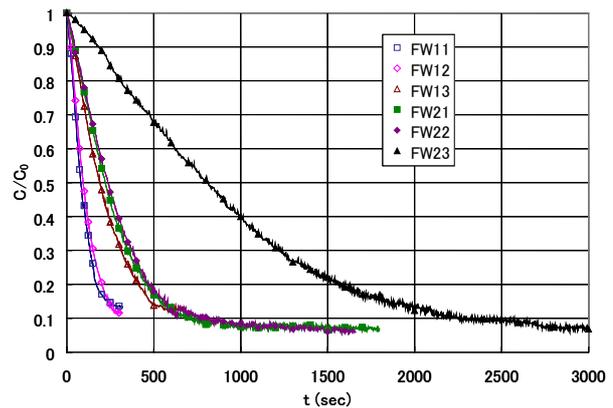


図-6 濁度の時間変化

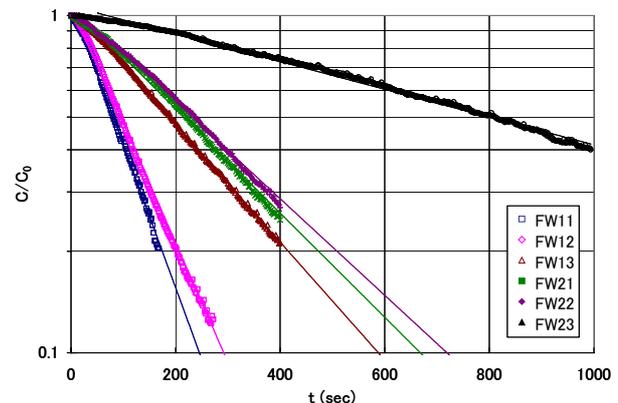


図-7 濁度の時間変化の指数近似

線を次式のように求めた。

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

ここで  $\tau$  は片対数グラフの傾きを、 $A$  は切片を示す。 $\tau$  はその値が大きいかほど混合が遅いことを示し、これを滞留時間と定義する。各ケースにおける滞留時間の値は表-1のように求められた。また、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。この定義よりわんど内平均流速と水

表-1 滞留時間

	FW11	FW12	FW13	FW21	FW22	FW23
$\tau$ (s)	102	122	249	280	303	1010

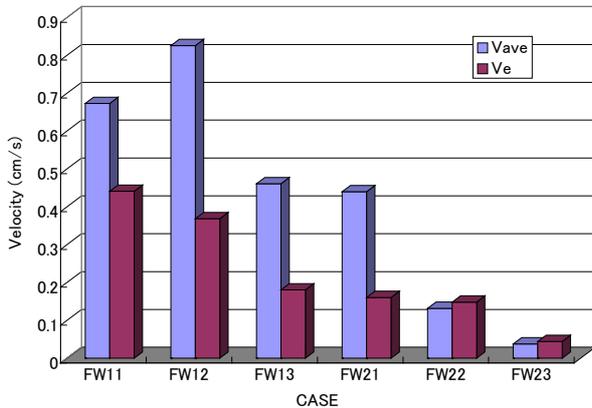


図-8 わんど内平均流速と水交換速度

交換速度を比較した結果を図-8に示す。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。これよりわんど内平均流速が大きい方が交換速度も大きい傾向が確認される。FW11とFW12では水交換速度が最も大きい。これはわんど内の渦形成と連絡水路における水の流入が相対的に効率よく行われているためであると考えられる。ただし、FW12の方がFW11より水交換速度が若干小さくなっている。これはFW12では単一の大きな渦構造となるため、渦中心部の拡散が遅くなることに起因していると考えられる。次にFW13はFW11、12と比較して平均流速の減少率に比べて水交換速度の減少率が大きい。これは開口部の流入が水交換を妨げていることによると考えられる。連絡水路長さが3cmのケースについては、1cmに比べて水交換速度は著しく減少する。これは連絡水路で発生する一つの渦を介して間接的にわんど内流動が引き起こされることによるものである。FW21では同様な流れパターンを示すFW13と同程度のわんど内平均流速を示し、水交換速度も同程度である。FW22ではさらに平均流速が減少するが水交換速度の減少はわずかである。このケースでは連絡水路における水の流入が相対的に効率的に行われていると考えられる。FW23ではわんど内平均流速は著しく減少するが水交換速度はある程度行われているのがわかる。以上より、わんど連絡水路長さが同じ場合でも連絡水路の角度によってわんどと本流の水交換速度が大きく変化することがわかった。

## 5. おわりに

本流とわんどが細い連絡水路で接続しているわんどにおいて、平水時の水質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に検討した。

本川わんど連絡水路の角度によってわんど内の渦構造は大きく変化する。連絡水路長い場合、連絡水路内に渦構造が形成され、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渦が形成される。したがって、連絡水路が短い場合とは全く異なる渦構造が形成される可能性がある。ただし連絡水路の渦を通して間接的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るケースに比べて小さい。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。このようなわんどの設計にあたっては連絡水路長さと同わんどに対する角度の関係を考慮する必要がある。

## 参考文献

- 1) (財)河川環境管理財団大阪研究所：わんどの機能と保全・創造，1999。
- 2) 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
- 3) 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。
- 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) 武藤裕則・馬場康之・藤田一郎・綾史郎：わんどの形成過程に関する一考察—死水域の速度分布—，河川技術論文集，Vol.8，pp.383-388，2002。
- 6) 禰津家久，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，Vol3，pp.813-820，2000。
- 7) 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。
- 8) 富永晃宏・久田陽久：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。
- 9) 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。
- 10) 北村忠紀，山田淳夫，辻本哲郎：水制背後の局所河床低下におけるわんど地形の形成，河川技術論文集，第7巻，pp.327-332，2001。
- 11) 木村一郎・北村忠紀・鷲見哲也・武田誠・鬼束幸樹・庄建治朗・大塚康司：木曾川感潮域に設置された水制群周辺のワンド形成過程と河川環境に関する共同研究，河川技術論文集，第8巻，2002。
- 12) 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：淀川楠葉復元ワンド群の水理環境，水工学論文集，第50巻，pp.1117-1122，2006。
- 13) 河原能久，佐藤研一郎：高水時における人工わんど周辺の流れの3次元特性，第3回環境流体シンポジウム講演論文集，pp.321-322，1998。
- 14) 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。