

人工わんどの水交換機構とその制御法 に関する研究

STUDY ON MECHANISM AND CONTROL METHOD OF WATER EXCHANGE IN ARTIFITIAL RIVERSIDE ENBAYMENT

富永晃宏¹・谷川幸男²・久田陽史²

Akihiro TOMINAGA, Sachio TANIGAWA and 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)

Water exchange in riverside embayment is influenced by two factors. One is the vortex caused by the shear instability in the interfacial region between main flow and embayment. The other is the recirculating vortex in the embayment. The relation between shear-induced vortex and recirculating vortex was investigated by using flow visualization technique, velocity measurement and turbidity measurement. In order to enhance the water exchange, projection structures were mounted on the upstream end and the downstream end of the embayment. The feature of both vortices and the water exchange rate are changed by position and length of the projection structures.

Key Words : *embayment, water exchange, shear-induced vortex, recirculating vortex, visualization technique, turbidity measurement, projection structures*

1. 序論

平成9年の河川法改正で河川環境の整備・保全が治水・利水とともに河川管理の目的に加わり、河川の持つ生態保全機能への関心が高まり、河川環境支援構造物の様々な研究が行われている。その中で明治時代に護岸目的の治水構造物として設置された水制の周辺に土砂が堆積して形成された止水域が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るとして注目されている。このような河川の止水域は平水時に流水域と開口部を有するものを「わんど」、平水時に開口部のないものを「たまり」と呼び区分される。淀川、木曽川に代表されるように自然に時間をかけて造られたわんどの調査結果¹⁾から、わんどを人工的につくすることで、生態環境改善の効果を期待する取り組みも行われるなかで、わんどの水理学的機能についても多くの研究が行われている^{2),3)}。木村ら^{4),5)}は室内模型実験で、わんどのアスペクト比(開口部長さ/奥行き)が0.5および1.5の場合について実験を行い、アスペクト比が異なるわんど内の循環渦をアルミ粉末を用いた可視化

によって捉え、アスペクト比により異なる渦が形成されることを示した。また、アスペクト比1.5のケースではわんど内の水面変動の計測からせん断不安定に起因する渦とセイシュとの共鳴現象について確認した。橋津ら⁶⁾はアスペクト比が2, 3, 5および10の流れをPIV法を用いて計測し、平均流による渦構造とPIV法で得られた瞬間的な渦構造が全く異なることを指摘し、アスペクト比の変化によって発生する渦のパターンや規模が変化することを示した。わんどを河川環境支援構造と考えたとき、わんど内の水質が重要な要素であると考え、現地観測などによる調査^{7),8)}をしてきたが、主流域とわんど内での水交換を現地観測レベルで捉えることは困難である。そこで本研究では、室内模型実験により流れ構造とわんど内の水交換機能の関係について検討する。過去の実験結果より循環渦構造が安定すると考えられるアスペクト比1.5のケースについて、わんど内の水交換機能に及ぼす影響について考察した。また、わんどの開口部に突起を設けることによるわんど奥行きの変化によるアスペクト比の変化と境界部のせん断不安定に起因する渦の変化について検討した。

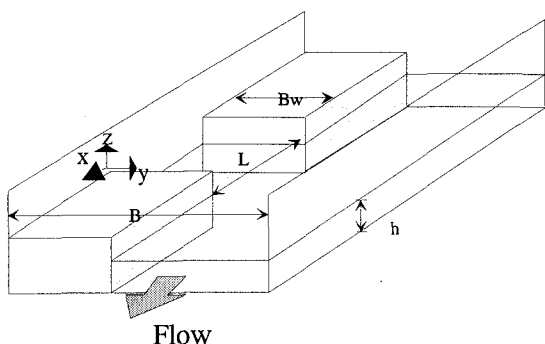


図-1 実験諸元図

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

表-2 実験ケース

case	projectin length :d(cm)	figure
Wu1	1	
Wu3	3	
Wu5	5	
Wb	0	
Wd5	5	

2. 実験方法

実験水路は長さ13m、幅60cmの長方形断面可変勾配型水路を用い、図-1で示すように水路右岸を遮蔽物により30cm遮蔽した。上流から5.4mの位置に一区間のみ開放区を設け、わんどとした。わんどの形状はアスペクト比1.5のものを基本とした。水路は勾配1/2000、流量を4000cm³/s、水深は下流部で堰上げを行い、わんど上流端で6cmになるように設定した。実験条件を表-1に示す。わんど内と主流域の水交換を促進する目的で表-2に示すようにわんど上流端、または下流端に突起を設けることとした。突起は非越流型で幅2cmとし、上流端のケースでは長さを1、3、5cmと変化させ、下流端では5cmのみとした。

流速計測には2成分I型電磁流速計(東京計測製)を用い、主流速 u と横断方向流速 v を計測した。座標軸は流下方向を x 、横断方向を y として、わんど開口部の上流端を原点とした。流速は2点法により $z=1.2$ cmと $z=4.8$ cmで計測を行い、サンプリング周波数100Hzで41秒間計測したデータについて解析した。また、主流域とわんどの境界部ではサンプリング周波数20Hzで3分間の長時間計測も行っている。

次にわんど内の流れ特性と水交換を調べる目的で、

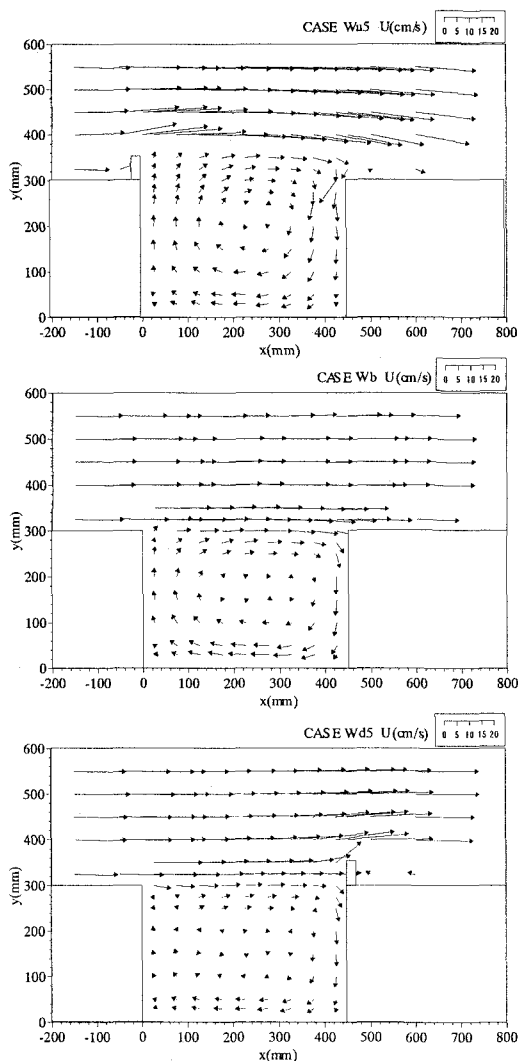


図-2 時間平均流速ベクトル図

わんど域内を過マンガン酸カリウムによって着色することで可視化実験を行った。主流との水交換を捉えるために染料による着色液の濃度変化をデジタルビデオカメラによる撮影で記録した。また、濃度の計測には濁度計を用い、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. 実験結果

(1) 渦構造に関する検討

基本形状のWbと上流部、下流部に5cmの突起を設けたWu5、Wd5について時間平均流速ベクトルを図-2に示す。どのケースについてもわんど内に循環渦が観察される。主流がわんどの下流端に衝突することを発端としてわんどへの流入がみられるが、時間平均した流速からは明確な流出は確認されない。Wb、Wd5では壁面沿いの流速が比較的速い領域と中心付近の流れが遅い領域との区分が確認される。Wu5では中心の流れが遅い領域が狭く、わんど中心が他のケースよりも主流方向に移動していることも確認で

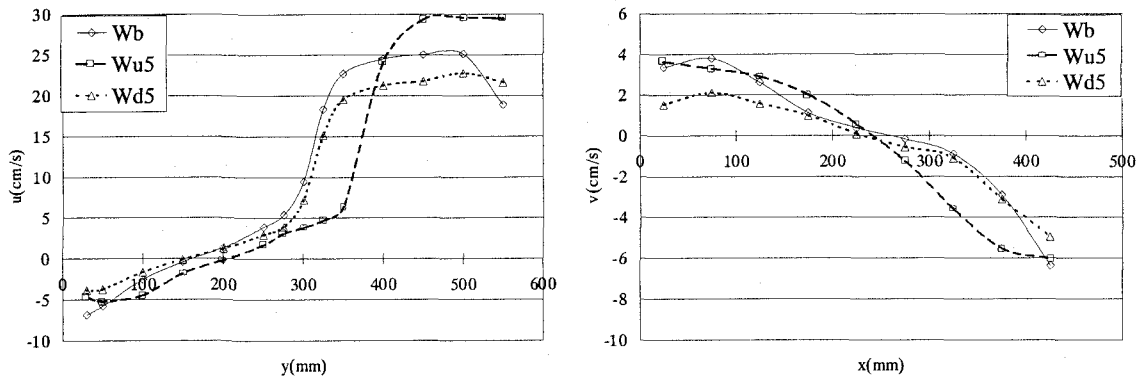


図-3 流速分布図(主流速 U の横断分布：左，横断方向流速 V の縦断分布：右)

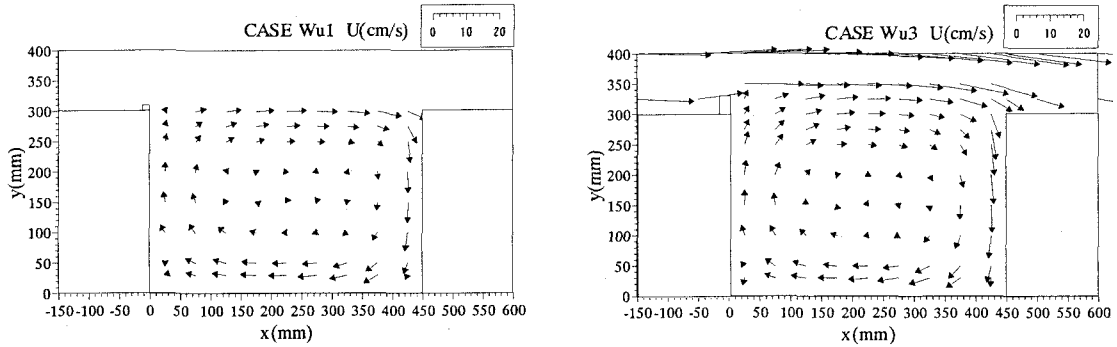


図-4 時間平均流速ベクトル図

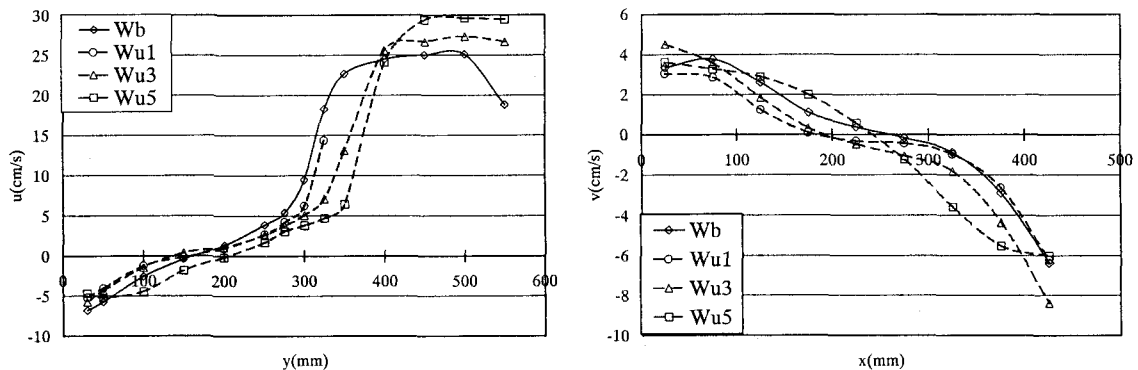


図-5 流速分布図(主流速 U の横断分布：左，横断方向流速 V の縦断分布：右)

きる。突起による水はねが生じていることが確認でき、この水はねによって主流側へ拡大したせん断領域を外縁として循環渦が拡大し、突起の背後までの循環渦が生じている。Wd5では流入の中心と考えられる下流から流入が促進されることを期待したが、循環渦のわんど内上流部で流れが弱くなる。わんど中央部($x=225, y=150$)を通る断面の流速について、主流方向流速 U の横断分布、横断方向流速 V の縦断分布を図-3に示す。 U の横断分布からWu5では、突起により主流域が縮小される影響で、主流域の流速が加速されており、他のケースよりも大きな値を示す。渦の中心と考えられる流速の正負の境界がWb、Wd5ではわんど域の中心の $y=150$ mm付近にみられるが、Wu5では突起の長さ程度、主流方向に移動した $y=200$ mmとなっている。 V の縦断分布より、わんど内の流速については下流部壁面付近ではほぼ同程度の流速であるが、上流部壁面付近でWbおよびWu5の流速が4cm/s程度であるのに、Wd5ではほぼ半分の

2cm/s程度と遅いことがわかる。下流の流入部をみると上流部に突起を配置したWu5が他のケースと異なり、流速分布において流れの速い範囲が広がる。そこで上流部に突起を設けたケースについては突起の長さ変化について検討した。突起長を1, 3cmとしたWu1, Wu3のわんど領域内の時間平均流速ベクトルを図-4に、突起長による流速分布を図-5に示す。Wu1では、突起の影響はあまりないが、Wu3, Wu5と長くなるに従い、循環渦が突起の背後に拡大し、わんど内の下流部壁面付近の流速が速くなることがわかる。Wu3でわんど内の流速がWbと比べ速くなるが、流速分布形状の変化がみられるのはWu5のみである。次に乱れ特性としてレイノルズ応力分布に注目した。Wd5, Wb, Wu3, Wu5についてレイノルズ応力分布を図-6に示す。各ケースで、主流、わんどの境界部で大きな値がみられる。これはせん断不安定に起因する渦が境界で生じるためである。水の交換には乱れが重要な役割を果たしており、境界

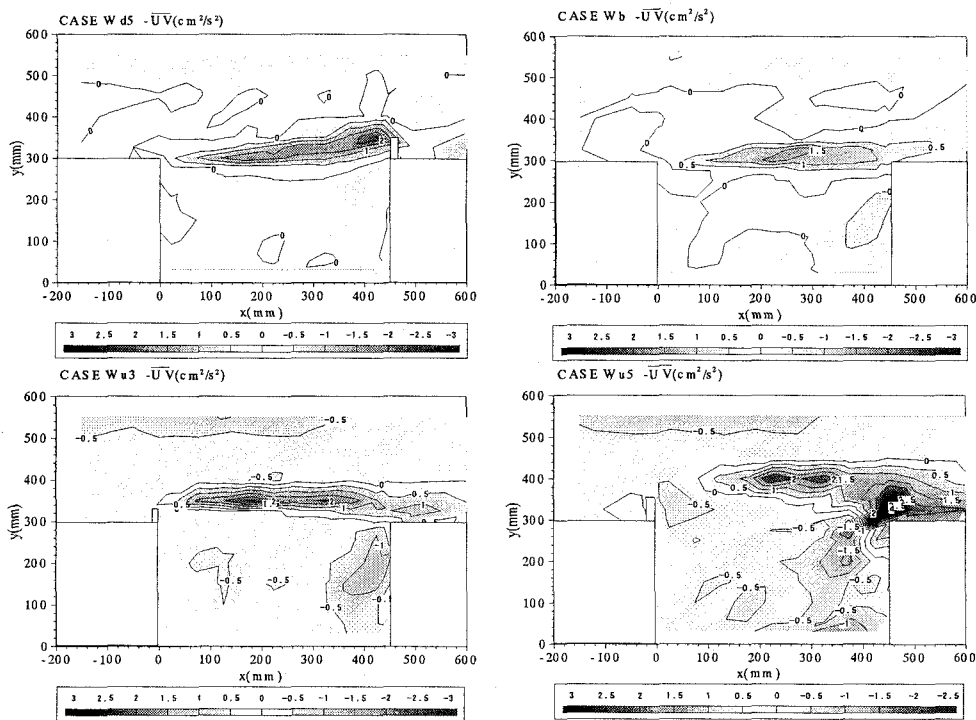


図-6 レイノルズ応力分布図

部においてこの機能が果たされていることが推察できる。Wu3, Wu5ではわんど内部でもレイノルズ応力が大きく分布しており、特にWu5ではわんど下流端で大きな値を示し、他のケースと異なっている。これは上流部の突起による渦の拡大と水はねの再付着地点がわんど下流端に生じることが原因と考えられる。Wu3はWbの値が強くなった感があるが、Wu5は下流端に流れが衝突することによってわんどへの流入が生じる傾向が強く、渦の中心が主流側に移動し、循環流規模が大きくなり、水はねによって湾曲した流れが、下流境界付近でわんど内に向かっていくからでないかと考えられる。逆に、Wd5は下流部に設置された突起先端に大きな値が発生しており、開口部のレイノルズ応力が下流で主流方向に移動して、わんど内には分布していない。

(2) 染料の濃度分布変化に関する検討

染料を用いたわんど内の可視化実験の結果について、Wbの連続ビデオ静止画像を図-7に示す。連続画像のわんど内の染色液の希釈過程から、主流とわんど内の水交換について次のようなことがわかる。わんど内の染料は、主流との境界部付近で、せん断不安定に起因する渦によって主流域の水と混合を生じる。すなわち、この渦によって染料水の流出と清水の流入が認められる。わんど上流端で生じた小規模渦は下流端までの間に大規模な渦に統合(合体)し、わんど下流端で壁面に衝突する。そこで主流域へ流出する濃度の大きな部分と、わんど内へ濃度の低い水塊として流入する部分に分かれる。流入直後の水塊は渦度を有し、循環流によりわんど内を移動する過程で渦度が弱まり、周囲との拡散で濃度が均一化する。このわんど境界部の周期性を持つ渦とわんど

内の循環渦による輸送により、主流との水交換が行われているものと考えられる。

Wu3, Wu5では同様の濃度変化が生じるが、循環渦により染色された領域が突起背後にまで拡大しているため、染色された水塊を含む境界部渦もそのまま流下していく傾向がある。

わんど境界部の渦と循環渦について、横断方向流速 v の時系列変化を検討する。せん断不安定に起因する渦は、Wb, Wd5では境界部上を流下するが、Wu5では突起による水はねの影響で境界部から離れて移動する。そこでWb, Wd5では主流域とわんどの境界上を、Wu5では水はねの経路上について、 $x=50, 225, 400\text{mm}$ の地点での流速 v 時系列データを図-8に示す。流速 v の変動は渦の合体の影響で流下していくにつれて振幅が大きくなり、周期も長くなる。Wu5では流下による振幅の増加が著しく、大規模な渦への合体が考えられる。Wd5では流速 v の変動は周期が長く、下流部の突起により、渦の経路が主流方向に移動したことが影響している可能性がある。スペクトル解析による結果を図-9に示す。木村ら⁵⁾は、この周期にわんど内のセイシュの影響について考慮する必要があることを指摘している。本実験のケースではセイシュの周期は 1.174sec であり、周波数では 0.852Hz となる。Wbでは上流部では 1.7Hz 付近で固有周期を持つが、下流部では 0.5Hz 付近に移動する。Wu5は、初期の周波数がはっきりとしていないが 1Hz 付近の周波数が強いことがわかる。また、Wdでは、 1Hz 付近の周波数でピークがみられない。このような結果から、上流部に突起を配置したことで境界部の渦の発生周期がわんどのセイシュの周期に近くなり、発達が促進されていることがわかる。次にわんど内の各地点の濁度変化について検討する。

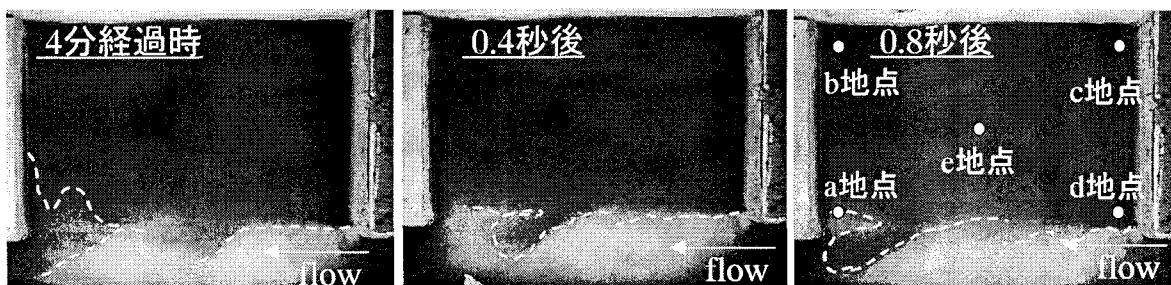


図-7 連続静止画像

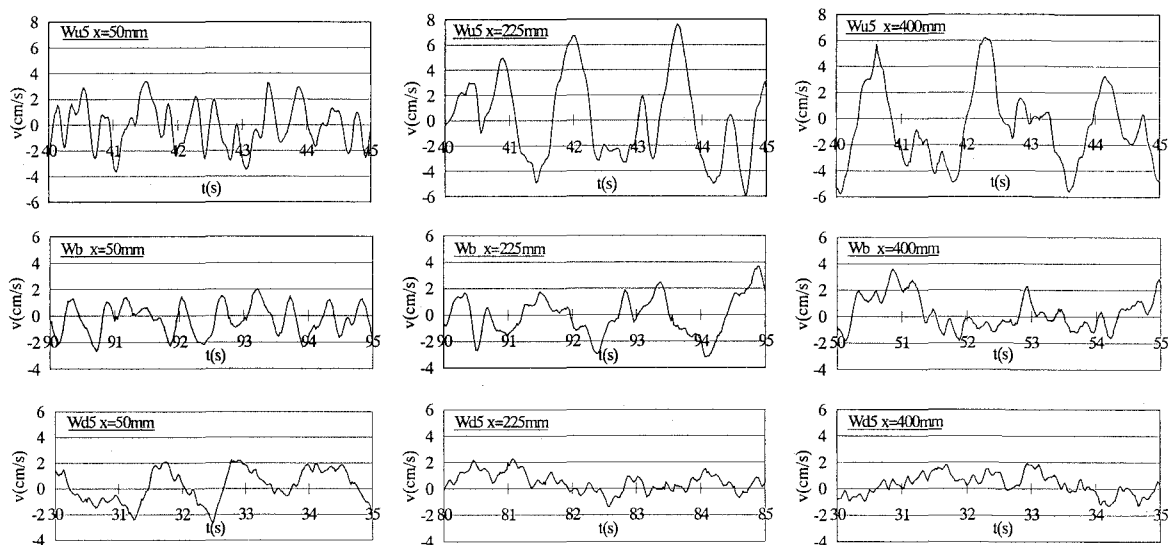


図-8 流速 v 時系列データ

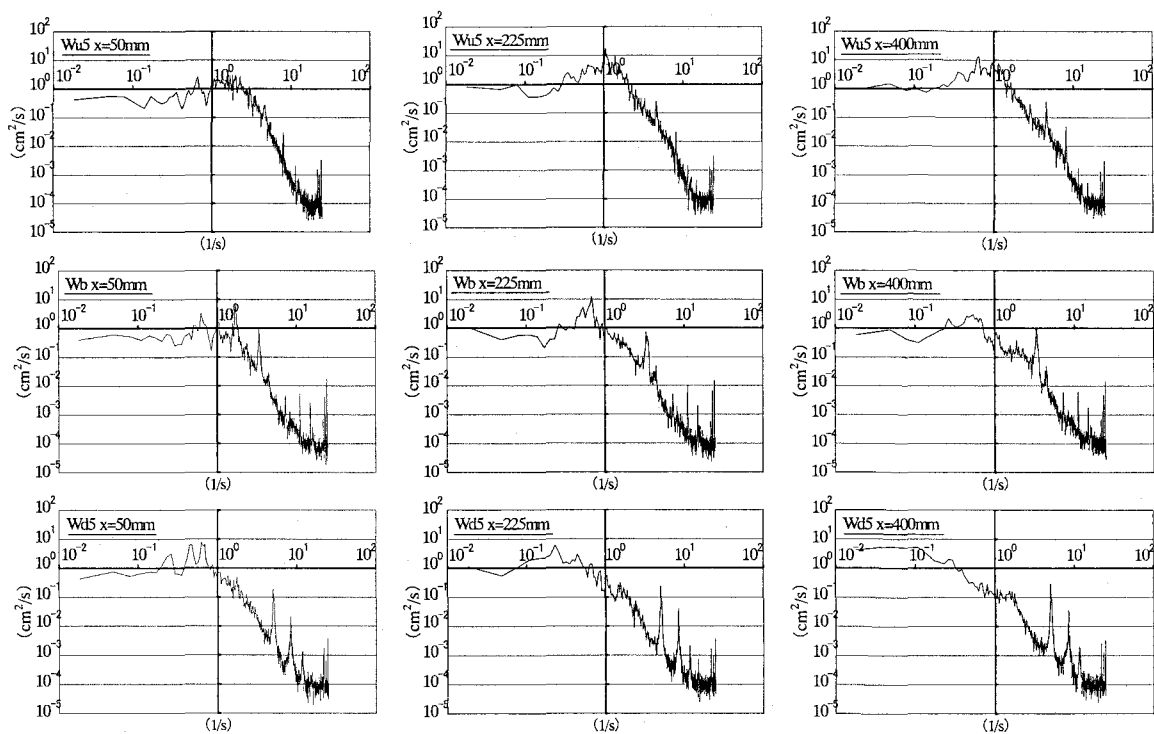


図-9 スペクトル分布図

図-10は濁度計による出力の時間変化である。値は図-7に示したa～eの各計測点の濁度の時系列データ D_n を各地点での最大値 D_{max} 、最小値 D_{min} により、 $D'n = (D_n - D_{min}) / (D_{max} - D_{min})$ の無次元化を行っている。わんど内部の濃度変化を $Wu5$ 、 Wb 、 $Wd5$ について比較すると、わんど内壁面沿いの濃度はa地点では境界部の渦によって濃度の低い水塊が周期的に流入するため、濃度の変動が大きくなり、振幅が大きいが、b、c、d地点では振幅は小さくなる。これは水塊が輸送される過程で、周囲との拡散混合を生じ、比較的安定した濁度となるためと考えられる。濁度変化開始までの時間がa、b、c、d地点と順に遅れが生じ、わんど内の循環渦方向と一致する。また、循環渦方向に進むにつれ、 $Wu5$ 、 Wd の間で濃度減少の過程に差が生じていることから循環渦流速分布の影響が明らかである。突起の長さによる違いをみるために Wb 、 $Wu1$ 、 $Wu3$ 、 $Wu5$ について同様の比較を行ったが、わんど周辺の濃度変化は同様の傾向を示した。図-11に中心のe地点における濁度の時間変化を示す $Wu3$ 、 $Wu5$ での濃度拡散に差が生じ、 $Wu5$ の方が小さい濃度を示す。 $Wu5$ では渦の中心が時間とともに移動し、他のケースと比べて中心付近と壁面付近で流速差が小さく、レイノルズ応力がわんど内部まで大きく分布していることが影響しているものと考えられる。逆に、 $Wu5$ 以外のケースでは渦中心が比較的安定しており、中心部の濃度減少速度が遅いといえる。

4. 結論

わんどの模型実験により、わんど内の水交換機構をある程度確認することができた。従来研究されているわんど内の循環渦、境界部のせん断不安定に起因する渦などの水理特性が水交換の速度に重要な役割を果たしており、わんど境界部の周期性を持つ渦によりわんど域と主流域との水交換が行われるとともに、わんど内の循環渦の輸送により主流域の水の流入の拡散が支配されているものと考えられる。また、可視化によるわんど内の流れの把握から、瞬間的な渦構造が水交換に大きな影響を及ぼしていることも示唆された。

わんど外部に突起を設けることにより、わんど内の流れ構造を変化させることが可能であり、常識とは逆に上流に突起を設けることで、循環流を強め、境界部の渦も大きくなり、わんど内への流入傾向を強めることが示された。逆に下流部に配置することで循環流が弱まり、境界部に発生する渦もわんど内下流端に達し難くなる。以上のことより、水交換の促進・抑制の両面に対しての可能性がみられた。河川の生態環境への支援構造物としてわんどを考えた場合、わんど内の水質が生態系に及ぼす影響を考えることは重要であり、現地計測などによる結果から模型実験で得られた結果の再現性についてさらに検討が必要であると考えられる。

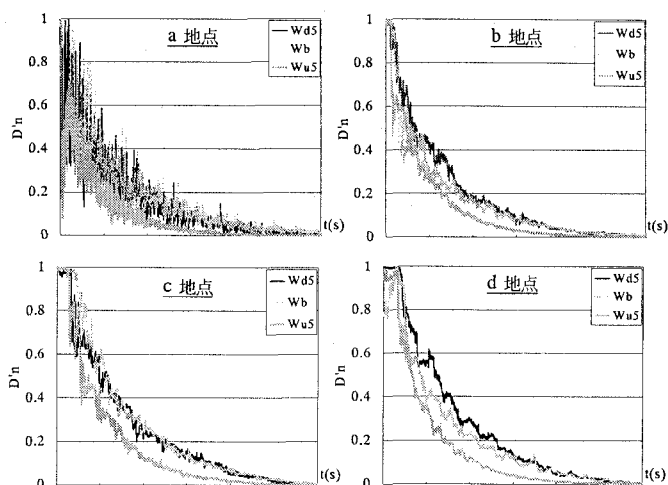


図-10 突起の配置位置による濁度変化

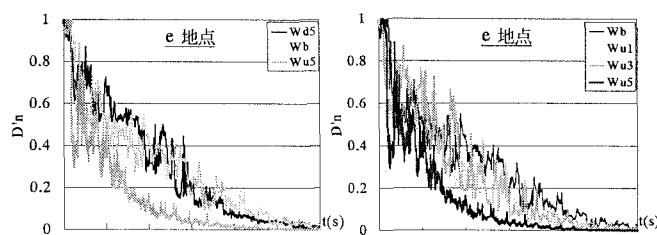


図-11 わんど中央部の濁度変化

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) 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。
- 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，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。
- 5) 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。
- 6) 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，Vol3，pp.813-820，2000。
- 7) 富永晃宏，今野威一郎，北村浩史，藤長賢二：わんど内の流れに及ぼす非定常流性の影響，土木学会第55回年次講演会概要集，第Ⅱ部，pp.426-427，2000。
- 8) 富永晃宏，谷川幸男，今野威一郎：非定常流時の人工わんどにおける水交換について，土木学会第56回年次講演会概要集，第Ⅱ部，pp.366-367，2001。

(2001. 10. 1受付)