

# 人工ワンド周辺部の流れ場に関する実験的研究 Hydraulic Characteristics of Flows in Man-made Embayments

中川研造\*・Muhammad A. Jalil\*\*・河原能久\*\*\*・菅和利\*\*\*\*

By Kenzo NAKAGAWA, Muhammad A. Jalil, Yoshihisa KAWAHARA and Kazutoshi KAN

Flows in artificial embayments are investigated using flow visualization, two-component electromagnetic velocimeter and thermal image processing technique. It is shown that large vortices develop along the embayment-main channel interface to exchange momentum and mass and that the shape of embayment and the type of structure installed along the interface exert considerable effect on the development of the vortices. Furthermore, time-averaged velocity distribution in embayment is found to vary little with depth.

**Keywords:** man-made embayment, flow visualization, large vortices, recirculation, momentum transfer

## 1. はじめに

ワンドとは流れに設置した水制に土砂が堆積しよどみ部となったものである。ワンド内では流速が小さいため多種の生物にとって格好の生息、繁殖、避難場所となっているとともに様々な植生も見られ、自然豊かな水系環境が創出されている。人工ワンドは河川の複断面形状の高水敷を一部掘り込んで造成されるが、その周辺の流れ場は複雑である。このような流れは水理学的にも特徴のある流れ場であり、凹部流れとしてこれまでも研究が行われている。<sup>1),2)</sup> これらの研究により、ワンドのような凹部を持った河道の流れには次のような特性があることが知られている。すなわち、凹部内には循環流が存在し、主流部との間の物質交換は凹部界面で剝離した渦が成長し、下流壁に衝突して破壊することによって生じることである。しかし、それらの研究においては流れ場の詳細な測定が十分なされていない。また、数値計算においては凹部内の時間平均流れを二次元的に捉えているものが多い。だが、実際の流れは非定常性が強く三次元性を帯びているものであると考えられる。

本研究はワンド内の水質が問題となる低水時に対して、ワンド周辺部の流れ場の詳細を実験的に明らかにすることを目的としている。また、人工ワンドの形状や開口部の形状が運動量輸送や物質交換に与える影響を検討することも目的としている。そのために、トレーサーを用いた流れの可視化と流速計による点計測、及び水面温度の熱画像解析を行い、ワンド内と周辺部の流れ場の非定常特性と時間平均流速の分布を計測し

\* 東京大学大学院 工学系土木工学専攻 (〒113 東京都文京区本郷 7-3-1)  
\*\* 東京大学大学院 工学系土木工学専攻 (同上)  
\*\*\* 東京大学助教授 工学部土木工学科 (同上)  
\*\*\*\* 芝浦工業大学助教授 工学部土木工学科 (〒108 東京都港区芝浦 3-9-14)

た。なお、高水時には人工ワンド内での洗掘、土砂堆積などの維持管理上の問題が生ずるが、その場合の流れ場の測定結果についてはJalilら<sup>3)</sup>が報告している。

## 2. 流れの可視化

流速測定に先だって、低水時のワンドにおける流れの構造の概略を把握し、物質交換のメカニズムを明らかにするために、トレーサーを用いて流れ場の可視化を行った。実験装置の平面図を図-1に示す。実験に使用した水路は長さ20m、幅40cmの可変勾配水路で、水路片側に幅20.6cmの木箱2個を離して上下流に設置することにより水路中央部に奥行き20.6cmの矩形わんどを作った。わんどの幅 $l$ は任意に調節できる。実験条件を表-1に示す。ここに、 $l$ :水路勾配、 $U_0$ :主流部流速、 $H$ :主流部水深、 $h$ :わんど中心部水深、 $U$ :摩擦速度である。

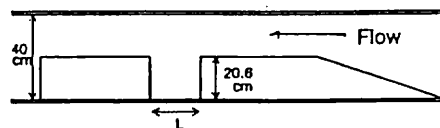


図-1 実験装置

表-1 実験条件

I	U (cm/s)	H (cm)	h (cm)	Re
1/2000	27.48	2.70	2.65	5810

図-2(a)は低水時のワンド内の流れをアルミ粉懸濁法により可視化したものである。少量の界面活性剤を混入したアルミ粉をワンドのやや上流からノズルを用いて連続的に注入し、側部から水平にスリット光をあてワンド上部からカメラで連続撮影を行った。写真の露光時間は1/2秒である。この写真より、ワンド内部には大きな循環流が生じ、その中心部がワンドの中心よりも下流側の主流部よりに位置していることがわかる。またワンドの隅角部には流速の小さい部分が見られ、副循環流が生じていることが確認できる。図-2(b)はワンド上流端から剝離した渦を捉えたものである。同図より、ワンド開口部に組織的な渦構造が存在することが分かる。図-2(c)は水面をアルミ粉で可視化したものである。わんど開口部の渦により主流部から流体が取り込まれる様子が分かる。

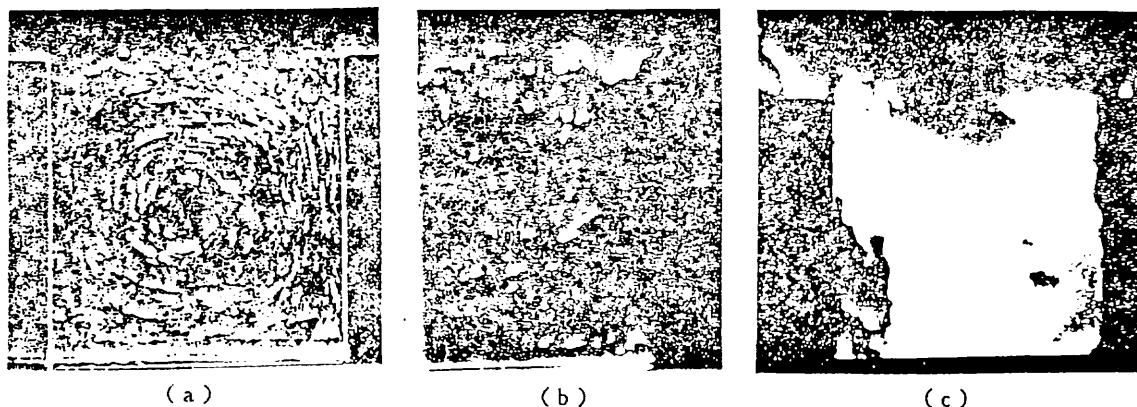
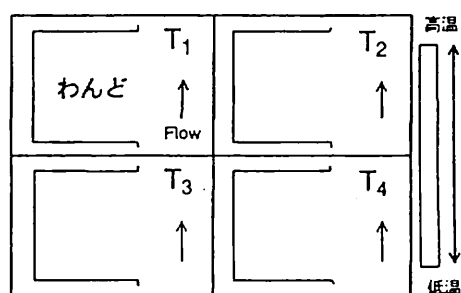


図-2 アルミ粉による可視化写真

アルミ粉懸濁法により、ワンドにおける流れの幾何学的構造はある程度把握できたものの、物質交換のメカニズムを解明するにはワンド開口部における実際の流体塊の出入りを可視化する事が重要であると考えた。そこで、物質輸送の様子をより詳細に観察し、さらにワンドの幾何学的形状が物質交換に与える影響を定量的に評価するために熱画像解析を用いた流れの可視化を行った。熱画像解析には赤外線熱画像装置 TVS-2000 ST (日本アビオニクス製)を用いた。まずわんど開口部に隔壁を設け、静止状態でわんど内にほぼ一定温度の温水を蓄えた後隔壁を取り除き、わんど周辺部での水面温度変化を上方に設置した赤外線カメラで撮影し、画像をビデオ録画するとともに10秒間隔でフロッピーディスクに記録した。

図-3に結果の一部を示す。図-3(a)は結果の読み方を説明するもので、図中の $T_1$ から $T_4$ のフレームの順に時間が経過していることを示している。白色が高温域に、黒色が低温域に相当する。図-3(b)は正方形のわんど内での10秒間隔での温度分布を示している。わんど上流端で剥離した渦が開口部に沿って流下しながら主流部とワンド内とから流体を取り込んで発達し、わんどの下流端に衝突して破壊され、一部はわんど内へ、他の部分は主流部へ入ることにより物質交換が行われている。図-3(c)はわんど上流端から主流に平行にわんど幅の半分の長さの仕切り板を設置した場合の20秒間隔の温度分布を表している。わんどの下流端部には渦の形成が認められるが、図(b)と比較すると発達が抑制されており内部の循環流も弱く物質交換は不活発である。図-3(d)はわんどの奥行きを半分にした場合の温度分布である。主流部とわんど内との水の交換は活発で、短時間に温度が低下している。わんど内の循環流の様子は図(b)とは異なり、下流部に形成される大きな循環流の他に上流側にも複数の循環セルが生じている。また図-3(e)はワンド開口部を縦0.7cm、横3.2cmの孔が4個あいている孔あき板でふさいだ場合の30秒間隔の温度変化である。

上述のケースと比べて極端に交換速度が小さいことが分かる。これはワンド上流端での渦の発生が抑えられているからであると考えられる。このことから、ワンド開口部に発達する組織渦が物質交換に寄与しているといえる。これらの結果より、ワンドにおける物質交換にはワンド及び開口部の形状が大きな影響を及ぼすことが分かる。



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)

図-3 熱画像解析を用いた可視化

### 3. 流速測定

#### 3.1 実験装置、方法

流速測定に用いた実験装置を図-4に示す。用いた水路は全長25m、幅1mの循環式水路で、水深は下流部の堰で任意に調節できる。水路片側に板を設置することにより高さ5.18cmの高水敷を設け、水路上流より9.5mの位置に幅20cm、奥行き20cmの正方形の切れ込みをつくることにより正方形ワンドを造成した。

実験条件を表-2に示す。流速測定には二成分電磁流速計（東京計測製、プローブの長さ1cm、直径5mm）を使用した。

RUN-1では底面から水深の30、50、80%の3断面において測定した流速変動を0.1秒間隔でAD変換し、それぞれの計測点につき600個のデータを得た。またRUN-2からRUN-5は同一の水力条件下でワンドの形状を変化させ、水深の中心において流速を測定しそれぞれ300個のデータを得た。RUN-2は正方形、RUN-3はワンド上流端から主流に平行にワンド幅の半分の長さの仕切り板を設置した場合、RUN-4はワンド下流端から主流に平行にワンド幅の半分の長さの仕切り板を設置した場合、RUN-5はワンドの幅を2倍にした場合である。

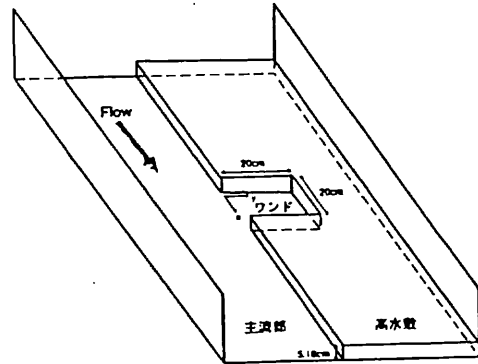


表-2 流速測定条件

	I	Q	$U_0$	H	h	Re
RUN-1	1/2000	5.93	32.3	4.69	4.63	12200
RUN-2~5	1/2000	3.40	28.2	3.55	3.50	8500

図-4 実験装置

#### 3.2 流速及び水面の時間変動

流れの可視化により、ワンド開口部に組織的な渦が認められ、物質交換に寄与していることが分かった。目視によるとこの渦はほぼ同一周期で非常に規則的に発生していた。そこで、まず点計測で得られた流速変動の時系列にどのような周期成分が含まれているかを明らかにするために、RUN-2の256個の流速データを用いて正方形ワンド内の数点においてFFTによりX方向の乱れ成分 $u'$ 、Y方向流速の乱れ成分 $v'$ のパワースペクトルを計算した。結果の一部を図-5に示す。xは測定点のワンド上流端からの距離を表す。どのグラフにも0.57Hzの所に顕著な成分がみられる。八木<sup>1)</sup>の実験では、可視化と点計測を同時に行なった結果この顕著な成分が剝離渦の発生周期と対応しているとしており、本実験でもこの顕著な成分の周波数が目視による渦の発生周波数と近似していることからこの成分が剝離渦の発生周波数に相当すると言える。

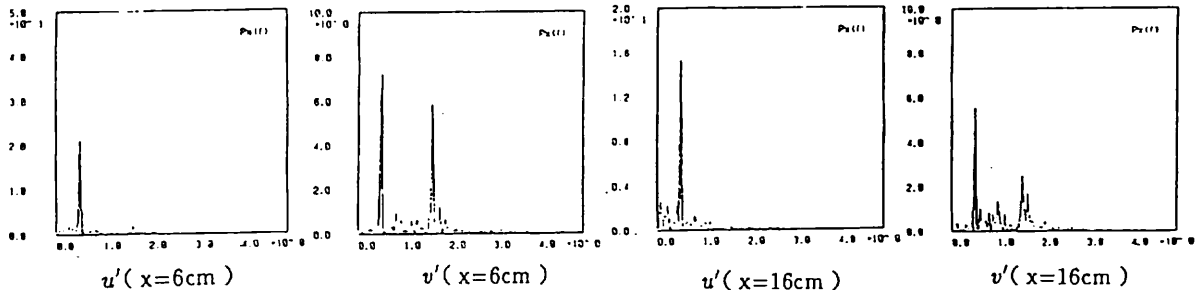


図-5 ワンド開口部のパワースペクトル

次に、ワンド内の水面変動と流速変動との相関を調べるため、ワンド内部の水位とワンド開口部の流速とを同時に測定した。水位の測定には容量式波高計を使用した。0.1秒間隔でサンプリングしたデータをAD変換

し、それぞれ1250個のデータを得た。図-6は水位と流速との時間変動を表すものである。水位と流速とがある一定の位相差を持って同一周期で振動していることが分かる。この位相差は約0.8秒である。またFFTでそれぞれのパワースペクトルを計算したものが図-7である。水位と横断方向流速とが同一の卓越周期を持っていることが分かる。これらの結果より、ワンド内の水面変動はワンド下流端で破壊した渦がワンド内に流れ込むことによって引き起こされていると考えることができる。

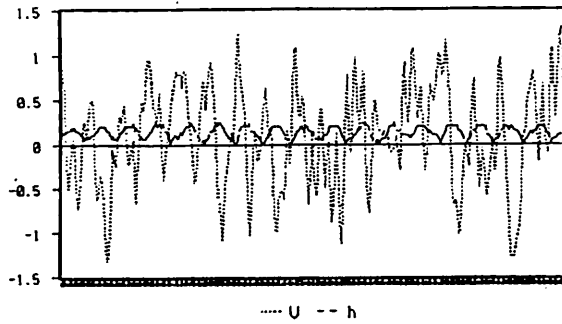


図-6 水位と流速との時間変動

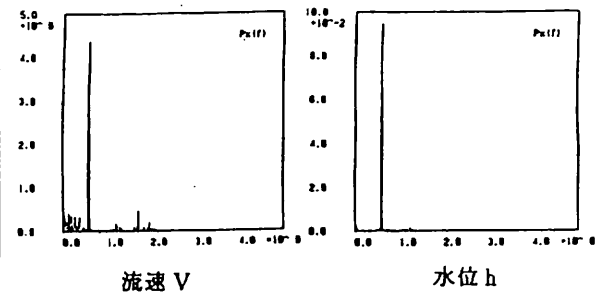


図-7 パワースペクトル

### 3.3 平均流速及び乱流量の分布

流速の点計測で得られた流れの平均特性、乱れ特性について結果の一部を示す。

図-8 (a)、(b)は底面から水深の30%、80%の面における平均流速分布図である。ワンド内には一つの大きな循環流が生じている。さらに異なる高さにおける平均流速分布が相似の形状を示している。この結果より、低水時のワンド内の流れはほぼ二次元的であると言える。可視化において確認された副循環流が捉えられていないが、これは電磁流速計のプロープが大きかったことによると考えられる。

図-9はそれぞれの水深における横断方向流速の乱れ強度  $\sqrt{v'^2}/U$ 、図-10はレイノルズ応力  $\overline{u'v'}/U^2$  の等値線図である。図(c)、図(d)を見ると両断面においてワンド開口部付近で横断方向流速の乱れが大きくなっている。またレイノルズ応力も両断面ともにワンド開口部付近で高い値を示し、運動量の輸送がワンド開口部で激しいことがわかる。これらの特性より、低水時におけるワンド周辺の物質輸送にはワンド開口部付近の乱れが寄与していると考えられる。

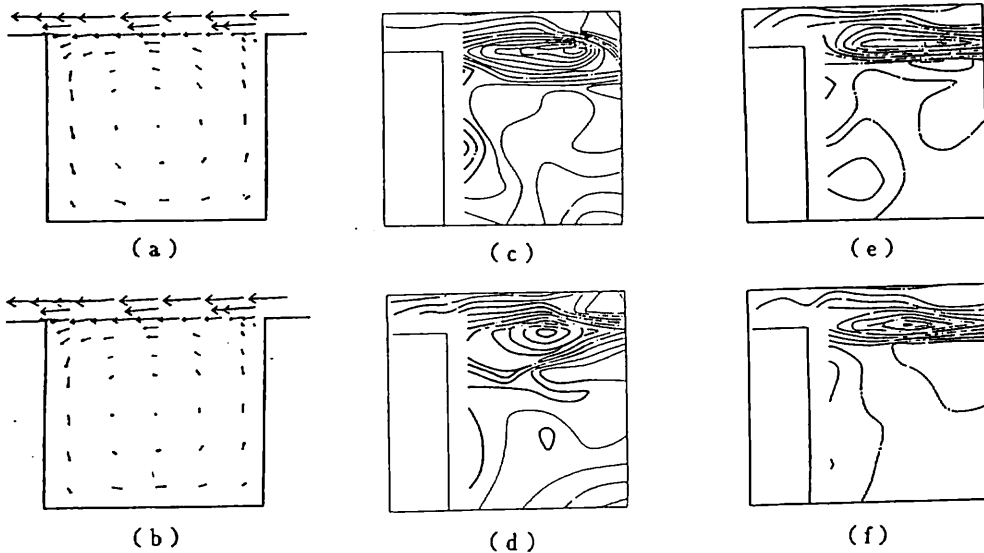


図-8 平均流速分布図

図-9 乱れ強度  $\sqrt{v'^2}/U$

図-10 レイノルズ応力  $\overline{u'v'}/U^2$

### 3.4 ワンド及び開口部の形状が運動量交換に与える影響

熱画像解析の結果で説明したように、ワンドにおける運動量交換や物質輸送にワンドの形状が大きな影響を及ぼす。そこでワンドの形状を変化させ、流速の測定を行った。実験装置は図-4に、実験条件は表-2に示してある。図-11(a)は正方形の場合であるが、内部に大きな循環流が一つ存在している。図(b)はわんど上流端から開口部の半分の長さの仕切り板を設置した場合である。ワンドの上流側に非常に流速の小さい部分が見られ、汚濁物質の堆積を予想させる。図(c)はワンド下流端から同じ長さの仕切り板を設置した場合である。ワンド上流側の主流部寄りに循環流が生じているが、下流側やわんど奥部での流速は小さく、汚濁物質の堆積が考えられる。図(b)、図(c)において流速の小さい部分は熱画像解析において物質交換があまり行われていなかった部分と一致する。図(d)はわんど幅を2倍にした場合である。ワンドの上流側に副循環流が存在している。この副循環流は熱画像解析においても確認されている。これらの結果より、時間平均流においてもワンドの形状が運動量交換に与える影響が大きいことが分かる。

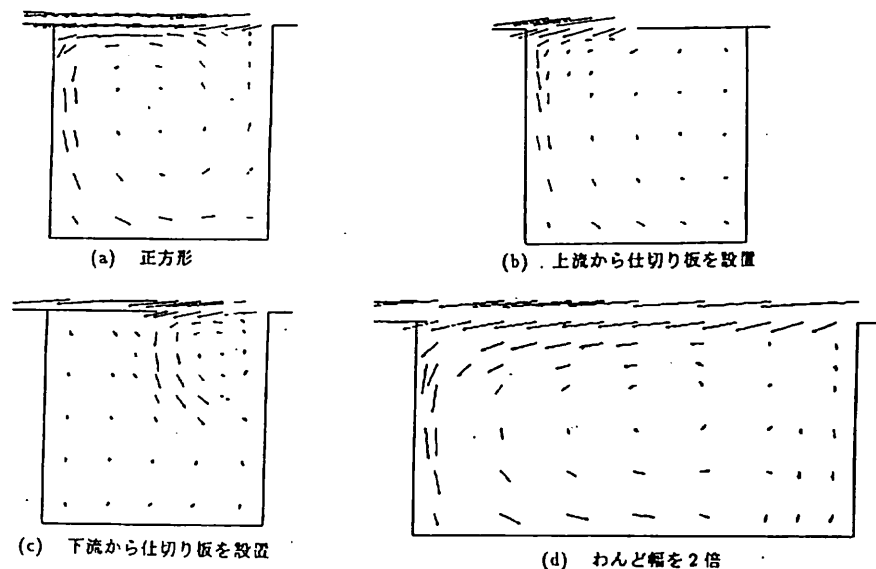


図-11 平均流速分布図

## 4. おわりに

低水時の人工ワンド周辺部の流れ場の特性を流れの可視化、点計測、熱画像解析により検討し、以下の知見を得た。

- (1) ワンドにおける物質交換はワンド上流端で剥離した渦が流体を取り込んで成長し、一部がワンド内へ、他の部分が主流部へ流れ込むことにより生じる。
- (2) ワンド内の時間平均流は広い領域でほぼ二次元的である。
- (3) ワンド及び開口部の形状は渦の発達やワンド内の流速分布に大きな影響を及ぼす。
- (4) ワンド内の水面変動は下流端で破壊した渦がワンド内に流れ込むことによって生じると考えられる。

本研究を進めるにあたり、東京大学土木工学科玉井信行教授にご指導頂いた。ここに記して謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 八木俊策: 凹凸流路における水質伝搬に関する基礎的研究, 大阪大学学位論文, 1984.
- 2) 木村一郎・細田尚: 平面2次元モデルによる微小な循環流の数値解析, 土木学会第47回年次学術講演会, 1992.
- 3) M. A. Jalil, Y. Kawahara, N. Tamai and K. Kan: Experimental Investigation of Flow in Enbayment, 水工学論文集, 第37巻, 1993.