

# ワンド内の流れの水理特性に関する実験的研究

## Experimental Study on Hydraulic Characteristics of Flows in Embayments

中川研造\*・河原能久\*\*・玉井信行\*\*\*

By Kenzo NAKAGAWA, Yoshihisa KAWAHARA and Nobuyuki TAMAI

Flows in embayments are investigated systematically using flow visualization technique and two-component electromagnetic velocimetry. Measured data show that the shape of embayment exerts considerable effect on the development of the vortices along the interface, hence velocity distribution in the embayment at low water depth. Under flood flow condition, flow becomes more complex due to the effect of vertical recirculation formed at the upstream end of the embayment and vegetation on the floodplain.

Keywords: man-made embayment, large vortices, recirculation, momentum transfer, vegetation

### 1. はじめに

ワンドとは河道に設置した水制に土砂が堆積し淀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に多様な生物にとって格好の生息、繁殖、避難場所となっている。また、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ものであるが(写真-1)、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。八木<sup>1)</sup>は、河床に凹部が存在する場合の流れの可視化や流速分布の測定を行い、さらに水質交換速度と凹部長さとの関係を求めている。このような自由水面を有さない凹部流れの研究例は多くあるが、自由水面を有する場合の凹部内の流速分布を詳細に測定した例は少ない。Jalilら<sup>2)</sup>は、開水路キャビティー内の流れを水深が高水敷より小さい場合と大きい場合とに分けてそれぞれ流れの可視化、流速測定を行い、低水時にはキャビティー内の流れはほぼ二次元的で循環流が生じること、また高水時には鉛直方向の循環流が生じる複雑な流れであることを示している。木村ら<sup>3)</sup>は開水路死水域内の流れに対し二次元の数値解析を行い、低水時のせん断不安定に起因する渦とセイシュとの共鳴現象などを再現している。しかし、実際に河川にワンドを造成した場合には周辺に植生が存在していたり、河川本流との境界に砂州が発達していたりするために、凹部の形状、寸法や植生条件が流れ場に与える影響を系統的に明らかにし、信頼性の高い実験結果を蓄積することが必要である。

\* 学生会員 東京大学大学院工学系研究科修士課程 (〒113 東京都文京区本郷7-3-1)

\*\* 正会員 工博 東京大学助教授 工学部土木工学科 (同上)

\*\*\* 正会員 工博 東京大学教授 工学部土木工学科 (同上)

本研究の目的は、ワンド内の水質が問題となる低水時に対してワンドの形状が変化した場合、またワンド内での洗掘、土砂堆積など維持管理上の問題点が生じる高水時に対して、ワンド周辺に植生がある場合のワンド周辺の流れ場の詳細を実験的に明らかにすることである。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を行い、ワンド内と周辺部の流れ場における周期的な渦の発生と時間平均した流速の分布に見られる特性を検討した。

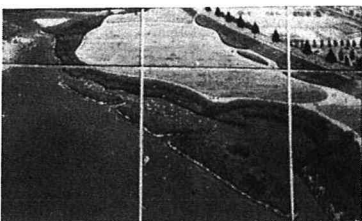


写真-1 人工ワンド（多摩川）

## 2. 実験装置及び方法

実験で用いた水路の概要を図-1に示す。用いた水路は全長25m、幅1mの循環式水路である。水路片側に板を設置することにより高さ5cmの高水敷を設け、水路上流より10.6mの位置に幅 $W=20\text{cm}$ の矩形の切れ込みを作ることによりワンドを造成した。水路床勾配は $1/2000$ で、水路床は滑面である。ワンドの流下方向の長さ $L$ は変化させることができる。

流速測定には2成分電磁流速計（東京計測製、プローブの長さ $1.4\text{cm}$ 、直径 $5\text{mm}$ ）を使用した。低水時には時間平均流れが二次元的とみなすことができるためにI型プローブを使用して水位の中心にて2成分の流速を、高水時にはI型とL型のプローブを使用して水位の異なる3断面にて3成分の流速を測定した。サンプリング間隔は $0.1\text{秒}$ であり、それぞれの計測点につき600個のデータを得た。ワンドの形状及び境界部の形状については表-1及び表-2に示すように変化した。ここに、 $Q$ ：流量、 $U$ ：主流流速、 $H$ ：主流水深、 $h$ ：ワンド中心部の水深である。ケースa～fは低水時、ケースg～iは高水時を対象としている。ケースaは正方形、ケースbは $L:W=3:1$ の長方形、ケースcとdはワンドの上流端から境界面上にそれぞれ長さがワンド幅の $1/3$ 、 $2/3$ の仕切り板を設置した場合、ケースeは境界面上の中央に長さがワンド幅の $2/3$ の仕切り板を設置した場合、ケースfはケースdの仕切り板を植生列で置き換えた場合である。仕切り板の厚さは $1\text{cm}$ である。また、ケースgはケースbと同じ長方形、ケースhは高水敷上に植生帯を設けた場合、ケースiはワンドの境界面上に植生列を設けた場合である。植生は直径 $2\text{mm}$ 、長さ $3.4\text{cm}$ のプラスチック製のものを使用し、ケースf及びiの植生列は植生を $2.5\text{cm}$ 間隔で並べた植生列を千鳥状に2列配置した。またケースhでの高水敷上の植生にも同じものを使用し、 $2.5\text{cm}$ 間隔で格子状に配置した。

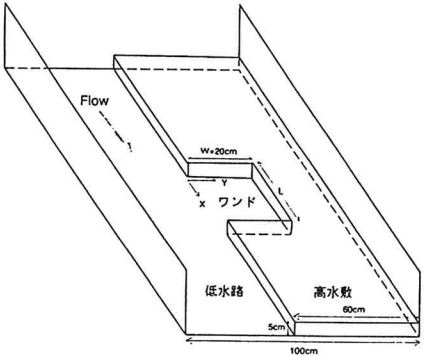


図-1 実験水路

表-1 実験条件（低水時）

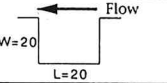
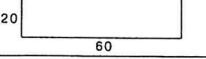
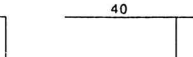
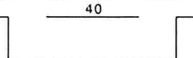
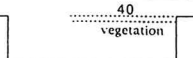
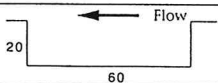
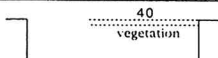
| CASE | Geometry of Embayment (cm)                                                          | $Q (\ell/s)$ | $U (\text{cm/s})$ | $H (\text{cm})$ | $h (\text{cm})$ |
|------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------|-------------------|-----------------|-----------------|
| a    |  | 5.93         | 32.28             | 4.69            | 4.63            |
| b    |  | 3.88         | 26.80             | 3.63            | 3.62            |
| c    |  | 3.99         | 27.48             | 3.67            | 3.63            |
| d    |  | 4.09         | 28.88             | 3.58            | 3.54            |
| e    |  | 3.78         | 26.32             | 3.61            | 3.59            |
| f    |  | 2.95         | 23.12             | 3.19            | 3.19            |

表-2 実験条件（高水時）

| CASE | Geometry of Embayment (cm)                                                          | $Q (\ell/s)$ | $U (\text{cm/s})$ | $H (\text{cm})$ | $h (\text{cm})$ |
|------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------|-------------------|-----------------|-----------------|
| g    |  | 14.46        | 43.09             | 7.75            | 7.80            |
| h    |  | 16.69        | 43.52             | 7.60            | 7.55            |
| i    |  | 16.47        | 44.0              | 7.75            | 7.77            |

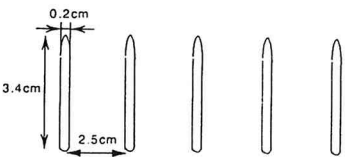


図-2 植生模型

3. ワンド開口部における渦の発達過程

3.1 流れの可視化

既報<sup>24)</sup>において、正方形のワンド内の流れと低水路の流れとの物質交換のメカニズムを述べた。そこで、ワンドの形状及び境界部の形状が変化することにより渦の交換の様子がどのように変化するかを把握するために、流れ場の可視化を行った。トレーサーとしてはウォーターブルーを使用し、ワンドよりやや上流の高水数の側壁にウォーターブルーを付着させ、主にワンド開口部における流れの挙動を観察し、写真及びビデオカメラで撮影した。

ワンド上流端より境界面に沿ってほぼ一定の周期で渦が形成され流下していく。この渦は境界面において形成されているせん断層を通過しながら渦どうしの合体を起こし、周囲の流体を取り込んで次第に成長しながら流下する。そして大規模に発達した渦がワンドの下流端に衝突して破壊され、一部はワンド内へ、ほかの部分は主流部へ流入することによって物質交換が行われていた。この物質交換のメカニズムはケースb～dに共通してみられたが、ワンドの開口部長さが大きいほど渦がより大きく発達し、境界面での物質交換も顕著に行われていた。

ケースeは開口部が上下流の2カ所に分かれているが、上流側の開口部においては上記と同様な現象が見られた。下流側の開口部においては渦は存在していたがあまり発達しなかった。

ケースfでは上流端から放出された剥離渦が植生列に衝突して破壊されるため渦があまり成長せず、下流端での流体の出入りは少なかった。植生列内では植生によって破壊された渦がそのままワンド内と主流部とに流入して物質交換が行われており、非常に複雑なメカニズムを示した。

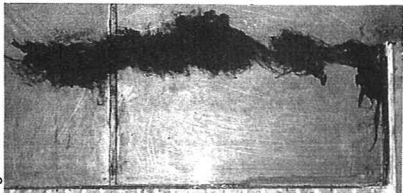


写真-2 ワンド開口部の可視化

3.2 流速の時間変動

流れの可視化によりワンド開口部に組織的な渦構造が認められ、物質交換に寄与していることが分かった。そこで、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、ワンド開口部の数点においてそれぞれ512個の流速データを用いてFFTによりY方向の乱れ成分 $v'$ のパワースペクトルを計算した。

ケースbの上流端寄りの点( $X/L=0.1$ )と下流端寄りの点( $X/L=0.9$ )とのパワースペクトルを比較すると、 $v'$ のグラフにおいて $X/L=0.1$ の点にのみ周波数の大きい成分が見られた。 $v'$ においてもほぼ同じ周波数でピークを示した。この大きな周波数は上流での渦の放出の周波数に相当し、渦は流下しながら合体を起こして大規模渦に成長するために下流寄りの点ではこの成分が見られないと考えられる。

表-3は、上流側での渦の周期と下流側での渦の周期を、可視化したビデオテープから目視によって測定した周期とパワースペクトルで卓越した周波数成分から読みとった周期とを比較したものである。目視による測定方法は、30秒間にわたってそれぞれの渦の個数を測定し、その平均値を周期とした。またパワースペクトルにおいてはもっとも高いエネルギーを持った周波数を選び、その周期をそれぞれの渦の周期とした。表-3を見ると、上流側の渦、下流側の渦ともに可視化とパワースペクトルとで得られた周期はよく対応しているといえる。このことから、パワースペクトルで得られた卓越した周波数成分は渦の通過する周期を示していると考えられる。

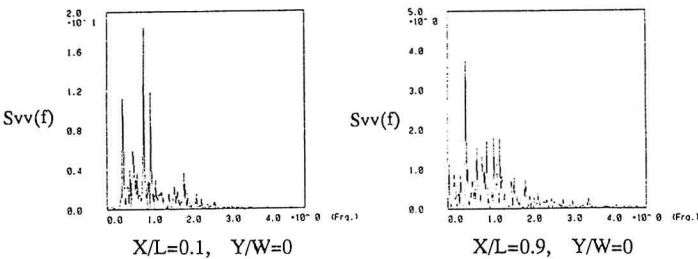


図-3 パワースペクトル

表-3 渦の周期

| X/L=0.1 |       | X/L=0.9 |       |
|---------|-------|---------|-------|
| 可視化     | FFT   | 可視化     | FFT   |
| 0.90s   | 1.09s | 2.10s   | 2.22s |

#### 4. ワンド内及び周辺部の時間平均流速

##### 4-1 低水時の特性

図4は、低水時のワンド内の平均流速の分布図である。

ケースaでは、ワンド内に一つの循環流しか存在していないが、ケースbでは、ワンド内の下流寄りの部分に大きく強い循環流（以下では主循環流と呼ぶ）と、上流寄りの部分に小さく弱い循環流（以下では副循環流と呼ぶ）とが生じている。このことからワンドの形状比によって内部の循環流の様子が変化することが分かる。ワンド内部の流速は主流流速に比べて小さく、ワンドの境界面においてせん断層が形成されている。

ケースc、dはワンドの上流端から境界面に沿って仕切り板を設けた場合である。ケースcはケースbと流れの様子が似ているが、ケースbより主循環流の大きさがやや小さく中心が下流寄りに位置しており、副循環流の規模はやや大きくなっている。ケースdではさらに主循環流が小さくなり、その中心が下流寄りに位置している。また副循環流はワンドの中心近くに見られるが、その流速は非常に小さい。ワンド内の上流端に近い部分には流速がほとんどゼロである領域が存在し、ケースc、ケースdともに仕切り板の裏側付近に沈降性の汚濁物質の堆積が予想される。

ケースb～dのベクトル図の比較により、ワンド上流端から仕切り板を設けた場合の主循環流の大きさは仕切り板の長さ、すなわちワンドの開口部長さに依存することが考えられる。またワンドの開口部長さが大きいほど循環流も強いものであることが分かる。

ケースeはこれまでの流れとはパターンが異なり、上流側の開口部付近に強い循環流、仕切り板の背後に弱い循環流が見られる。この結果は、ワンド内部の循環流の構造は境界面の形状の効果が支配的であることを示している。

開口部に模擬植生を有するケースfはケースdよりも開口部の面積が大きいにもかかわらずワンド内部の循環流が弱く、副循環流もあまり明確には見られなかった。これは前にも述べたように境界面での渦の発達が抑えられるために主流とワンド内との運動量交換が弱いためであると考えられる。

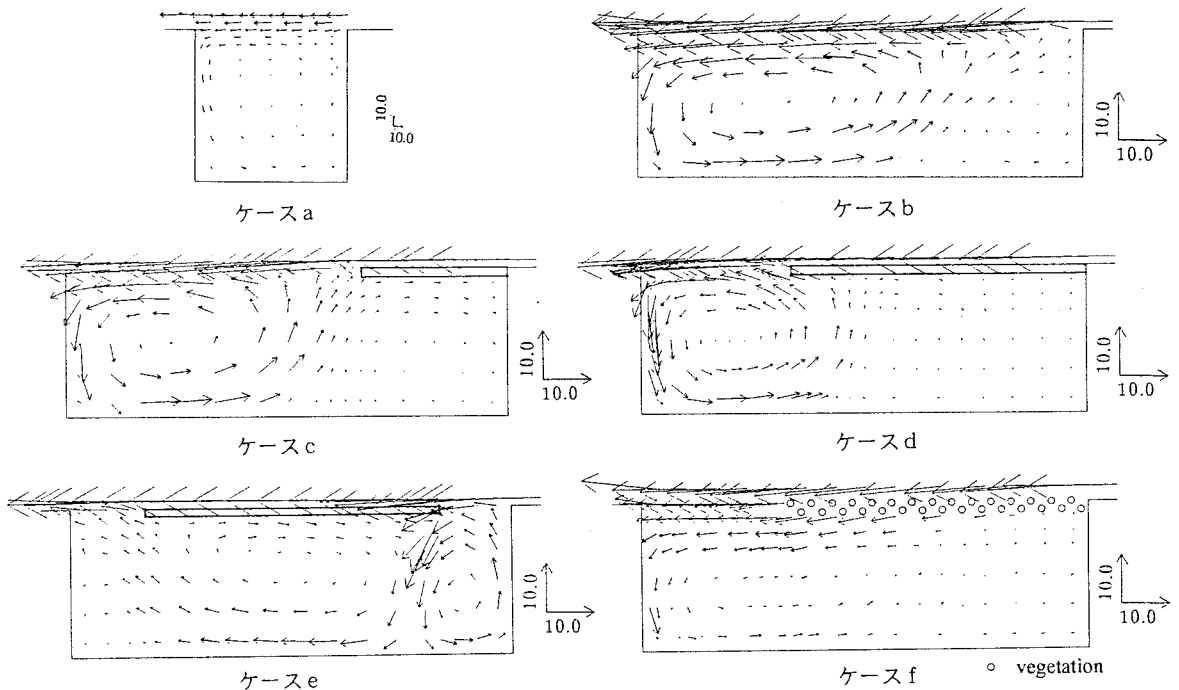


図4 平均流速分布図（低水時）

4-2 高水時の特性

様々な高さでの水平面内の平均流速分布を図-6～図-8に示す。測定水位は図-5に示すようである。図-6～図-8から明かなようにワンド内の流速分布は低水時の場合と大きく異なっており、非常に複雑である。

ケース g（図-6）では、高水数より高い水平面  $Z_1$ （低水路の底面より 6.5cm の高さ）においてはほぼ主流と同方向の流れであり、左右からワンド内に流入するような流れが見られ、水面勾配が発生している。高水数高さよりわずかに低い面  $Z_2$ （底面より 4cm の高さ）での流速も上流端付近を除いて主流と同方向である。最も底面に近い面  $Z_3$ （底面より 1cm の高さ）では、低水時に見られたような明確な循環流は見られず、ワンドの上流寄りの部分に弱い循環流が生じている。ワンド内部は上流寄りの部分で特に流速が小さく、洪水時には土砂などが堆積することが考えられる。主流と平行に  $Y/W=0.4$  の垂直面で切った断面内の平均流速ベクトル図を見ると、上流寄りの部分に鉛直方向の循環流が生じており、段落ち部において見られる流れと類似している。これらのことから、高水時にはワンド内には複数の循環流が存在する複雑な流れが生じていることが分かる。

ワンド周囲の高水数上に植生帯を設置したケース h（図-7）では、面  $Z_1$  において高水数上の植生帯中からワンド内へ流入する流れが目立っており、水面勾配が発生しており、植生帯が運動量の輸送に大きな影響を与えていることが分かる。ワンド内の流速はケース g と比較すると全体的に小さい。鉛直断面内には鉛直方向の循環流が生じているが、ケース g と比較すると循環流の大きさは小さくなっている。

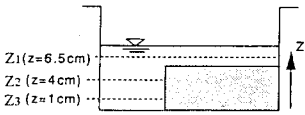


図-5 測定水位

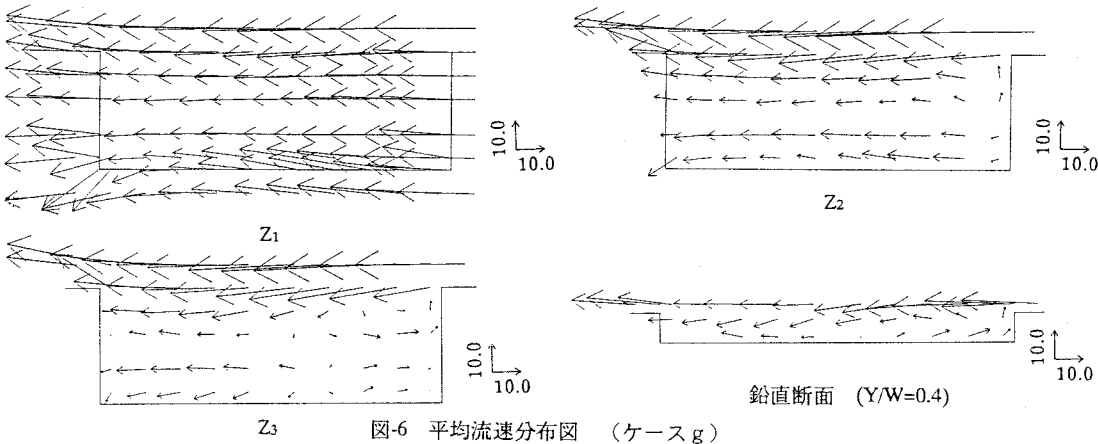


図-6 平均流速分布図（ケース g）

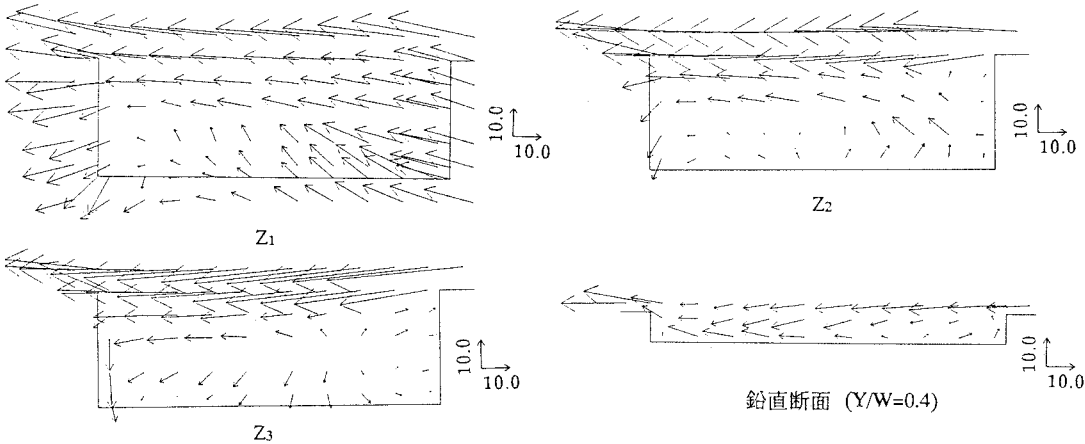


図-7 平均流速分布図（ケース h）

ワンドの境界面に沿って植生列を設置したケース i (図-8) では、植生列上の水位が周囲より大きくなることによって面Z<sub>1</sub>でワンドの入り口の境界面においてワンドから流出する方向の流れが見られる。面Z<sub>2</sub>、Z<sub>3</sub>では低水路からワンド内へ流入する流れが弱くなっており、ケース g と比較すると面Z<sub>3</sub>において上流端寄りに見られる循環流がより明確になっており、植生列を配置することによって低水路とワンド内との運動量の輸送が抑えられていることが考えられる。Y/W=0.5の垂直断面内での鉛直方向の循環流はケース g とほぼ同じ大きさである。

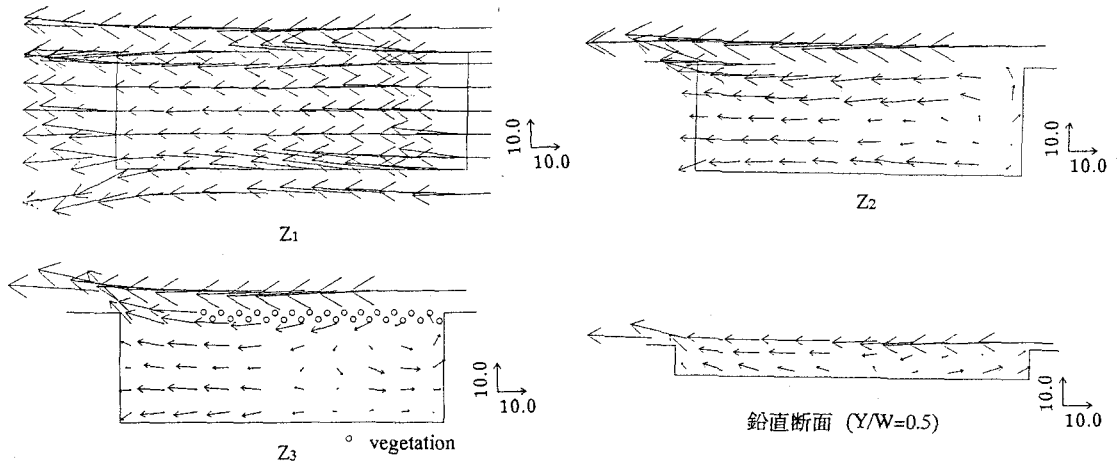


図-8 平均流速分布図 (ケース i)

## 5. おわりに

人工ワンド周辺部の流れ場の特性を流れの可視化、流速の点計測により検討し、ワンドの形状、境界面の開口度及び植生がワンド周辺に与える影響を検討した。今後さらに系統的な実験を継続するとともに数値解析による流れの再現を行いたい。

本研究に際して前田記念工学振興財団並びに河川環境管理財団の補助を受けた。関係各位に謝意を表します。

また、本研究を進めるに当たり、芝浦工業大学4年の垂秀明君、三井聡君、三好朝海君に多大な協力をいただいたことを記し深く感謝します。

## 参考文献

- 1) 八木俊策：凹凸水路における水質伝搬に関する基礎的研究、京都大学博士論文、1984.
- 2) M.A.Jalil, Y.Kawahara, N.Tamai and K.Kan : Experimental Investigation of Flow in Embayment, 水工学論文集、第37巻、pp.503-510、1993.
- 3) 木村一郎・細田尚・友近文志：死水域を伴う開水路流れの非定常振動特性、水工学論文集、第38巻、pp.425-430、1994.
- 4) 中川研造、M.A.Jalil、河原能久、菅和利：人工ワンド周辺部の流れ場に関する実験的研究、河道の水理と河川環境シンポジウム論文集、pp.89-94、1993.