

運輸省港湾技術研究所

# 港湾技術研究所 報告

---

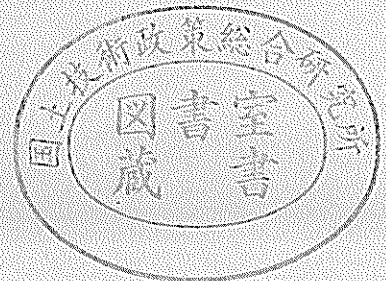
---

REPORT OF  
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH  
INSTITUTE  
MINISTRY OF TRANSPORT

---

VOL. 33      NO. 1      MAR. 1994

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN



# 港湾技術研究所報告 (REPORT OF P.H.R.I.)

第33巻 第1号 (Vol.33, No.1), 1994年3月 (Mar.1994)

## 目次 (CONTENTS)

1. 手すりによる越波時の人の転落防止効果に関する研究  
—親水性港湾構造物に関する水工的研究 (第3報)— ……高橋重雄・遠藤仁彦・室 善一郎…………… 3  
(Experimental Study on People's Carriage into the Sea Caused by Overtopping Waves  
on Breakwaters — A Study on Amenity-oriented Port Structures (3rd Rept.) —  
……………Shigeo TAKAHASHI, Kimihiko ENDOH and Zen-ichirou MURO)
2. グチ式造流堤による流れの解析 —模型実験と数値計算による検討—  
……………古川恵太・平野隆幸・細川恭史……………37  
(Flow Analysis on Tidal Flow Generator  
—Hydraulic Experiments and Numerical Simulation —  
……………Keita FURUKAWA, Takayuki HIRANO and Yasushi HOSOKAWA)
3. 港内の波浪及び係留船舶の動揺のリアルタイム予測システムの開発 (第1報)  
—システムの開発及び現地への設置—  
……………上田 茂・永井紀彦・平石哲也・白石 悟・木内里美・小林昭男……………67  
(Predicting System of Wave Conditions and Movements of Moored Ships in Harbour  
……………Shigeru UEDA, Toshihiko NAGAI, Tetsuya HIRASHI, Satoru SHIRASHI,  
Satomi KIUCHI and Akio KOBAYASHI)

## 2. グチ式造流堤による流れの解析 —模型実験と数値計算による検討—

古川恵太\*

平野隆幸\*\*

細川恭史\*\*\*

### 要 旨

海域制御構造物の一種であるグチ式造流堤の起こす流れについて、水理模型実験と数値計算による検討を行った。

グチ式造流堤は潮汐による海水の出入りを利用した一種の起流装置である。流れを作り出すことによって、海域における物質の移送効果や滞留時間を減少させる効果があり、海域の浄化方策の1つとしての活用が期待されている。

水理模型実験は、数10cm規模の小型模型と1m規模の中型模型を用いて実施した。グチ式造流堤により起こされる流れを測定した結果、下げ潮時に噴流状の流出現象が確認された。また、測定された流れのデータを用いて、トレーサの放流実験を数値計算で行い、グチ式造流堤が周囲の水塊を集めながら1方向に押し流す状況を可視化した。さらに、起こされる流れの強さを予測する実験式を提案し、実験定数を示すことによってグチ式造流堤の諸元と起こされる流れの関係を明らかにした。

さらに、水理模型実験で得られた流速の空間分布を再現するために数値計算を行った。特に、グチ式造流堤からの流出時の流れの再現に重点をおき、離散渦法により検討した。この結果、噴流状のフローパターン、中心流速の減衰の傾向、横断流速分布形状等を良好に再現することができた。

以上の検討により、グチ式造流堤を海域の浄化方策の1ユニットとして利用することの有効性が示された。

キーワード：海水浄化，海域制御構造物，局所流，噴流，水理模型実験，数値計算，離散渦法

\*海洋水理部 海水浄化研究室

\*\*前海洋水理部 海水浄化研究室

(現第4港湾建設局熊本港工事事務所)

\*\*\*海洋水理部 海水浄化研究室長

## 2. Flow Analysis on Tidal Flow Generator —Hydraulic Experiments and Numerical Simulation—

K. FURUKAWA\*

T. HIRANO\*\*

Y. HOSOKAWA\*\*\*

### Synopsis

Hydraulic experiments and a numerical simulation were carried out for a Tidal Flow Generator (TFG). The TFG is an assembly of break waters with a small mouth for controlling sea environment through flow regulation.

The TFG makes uni-directional flow in front of its mouth using the power of tidal motion. The residence time of a pollutant can be decreased by this flow. It means that the TFG can be used as a flushing system for water purification.

By hydraulic experiments, some features of the flow coming out of the TFG were measured. The velocity distribution of the flow can be described as that of 2D free jet flow. The intensity of central velocity in front of the mouth was well predicted by the proposed function.

By applying an optimized discrete vortex method, the velocity distribution of the flow was well predicted. The numerical method that we proposed here proved to have a high cost performance for the prediction of local flow.

**Key Words** : water purification, maritime structure for control of tidal flow, local flow, jet flow, hydraulic experiment, numerical simulation, discrete vortex method

---

\*Member of the Purification Hydraulics Laboratory, Marine Hydrodynamics Division

\*\*ex—Member of the Purification Hydraulics Laboratory, Marine Hydrodynamics Division  
(Kumamoto Port Construction Office, 4th District Port Construction Bureau, MOT)

\*\*\*Chief of the Purification Hydraulics Laboratory, Marine Hydrodynamics Division

# 目 次

|                                 |    |
|---------------------------------|----|
| 要旨                              | 37 |
| 1. まえがき                         | 41 |
| 2. グチ式造流堤の概要および実験目的             | 41 |
| 3. グチ式造流堤による流れの特性に関する水理模型実験     | 42 |
| 3. 1 実験水槽および模型                  | 42 |
| 3. 2 計測機器とデータ収録方法               | 43 |
| 3. 3 実験条件と測定方法                  | 44 |
| 3. 4 中心流出流速の整理および流速分布の検討        | 45 |
| 4. グチ式造流堤による流れの定式化に関する水理模型実験    | 46 |
| 4. 1 実験水槽および計測機器                | 46 |
| 4. 2 実験条件および相似則の検討              | 46 |
| 4. 3 流速分布の検討                    | 47 |
| 4. 4 噴流の定式化                     | 49 |
| 5. 数値計算手法による検討と水理模型実験との比較       | 51 |
| 5. 1 離散渦法による計算方法                | 52 |
| 5. 2 数値計算と水理模型実験との比較            | 53 |
| 5. 3 数値計算によるグチ式造流堤の諸元の決定法に関する考察 | 54 |
| 6. まとめ                          | 55 |
| 付録                              | 56 |
| 参考文献                            | 65 |
| 記号表                             | 65 |

### 1. まえがき

海域を浄化するためには、対象となる浮遊物や懸濁物質の負荷量を減らすことが根本的な解決方策であると同時に、対象となる汚染物質の海域における滞留時間を減少させることも有効な方策のひとつである。滞留時間は、物質が海域に流入してから流出するまでの経過時間であり、物理的・化学的・生物的作用や境界条件により決定される。しかし、滞留時間を減少するための方策が全ての海域に対して有効である訳ではなく、その海域の特性に応じて、適切な対策を選ぶことが重要である。

本研究では、グチ式造流堤と呼ばれる構造物により、海域の中に流れを創り出す方策の検討を行う。

グチ式造流堤は、シーブルー計画<sup>1)</sup>で提案された構造物で、潮汐の干満を利用して海域に流れを創り出すことができるものである。海域に流れを創り出すことによって滞留域を解消し、直接的に物質の滞留時間を減らすことに加え、創り出された流れによって浮遊物や懸濁物質を集めて回収するシステムの一部として利用することが可能である。

しかし、シーブルー計画においては、その概念が示されているだけで、実際の造流効果を定量的に推定する方法が示されていない。そのため、その実用的な活用方法について十分な検討ができていなかった。そこで、グチ式造流堤の造流効果を水理模型実験によって確認し、その流出流れの特徴を抽出することとする。また、水理模型実験を補うために、数値計算により流出流速の予測を試みる。

### 2. グチ式造流堤の概要および実験目的

「グチ」というのは沖縄などで珊瑚礁海岸の特有の地形を指して用いられている言葉である。珊瑚礁は海岸線から数十～百mの距離において沿岸を囲い込み、閉鎖性の静穏な海域を作っている場合がある。この珊瑚礁の切れ目つまり開口部にあたる部分が「グチ」である。「グチ」の周辺は珊瑚礁の生態系において生物幼生の集積場所、清浄な海水の導入場所としての意味があると考えられており、生物相が多様なこと、水質が良好なことで知られている。これは、「グチ」を通して海水が交換することによる効果であると考えられる。この「グチ」の機構を人工的に作成し、海水浄化方策のひとつとして利用しようと考案されたものがグチ式造流堤である。

シーブルー計画において提案されたグチ式造流堤の概要を図-1に示す。グチ式造流堤は、小さな開口部を残し

て海域を囲い込んだ防波堤の集合体である。囲い込まれた海域と周囲の海域の間で開口部を通して潮汐により海水が交換される。海水の交換の状況を模式的に表すと図-2のようになる。上げ潮時には、周囲の海域から開口部を通してグチ式造流堤の内部に海水が流入する。周囲の水塊は吸い込み流れとなって緩やかにグチ内部へと導入される。一方、下げ潮時には導入された海水が開口部より流出する。流出流速が小さいときには流入時と同様に今度は湧き出し流れとなって外部に流出し、流入時と対称な流れとなる時には残差流は残らない。しかし、開口部が十分に小さい場合には、流出流速が大きくなり、流れは噴流となる。その場合には、流れが開口部前面に集中し、残差流として開口部から外部に向かう流れが生じる。この残差流の影響により、グチ式造流堤の開口部周辺に滞留している物質が開口部前面に集められ、その後1方向に移送される。

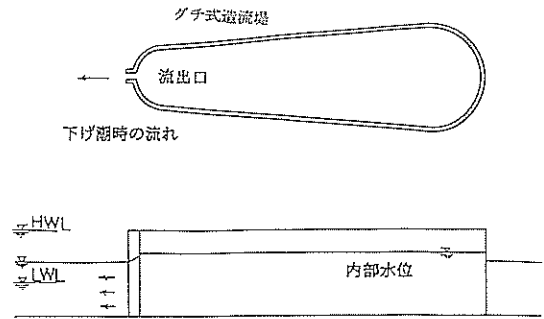


図-1 グチ式造流堤

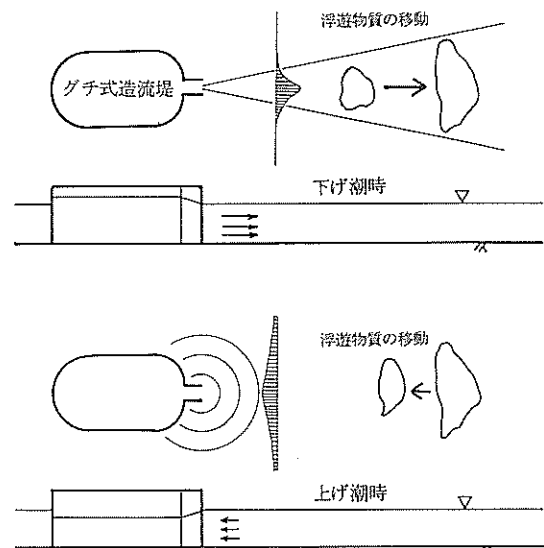


図-2 グチ式造流堤の造流原理

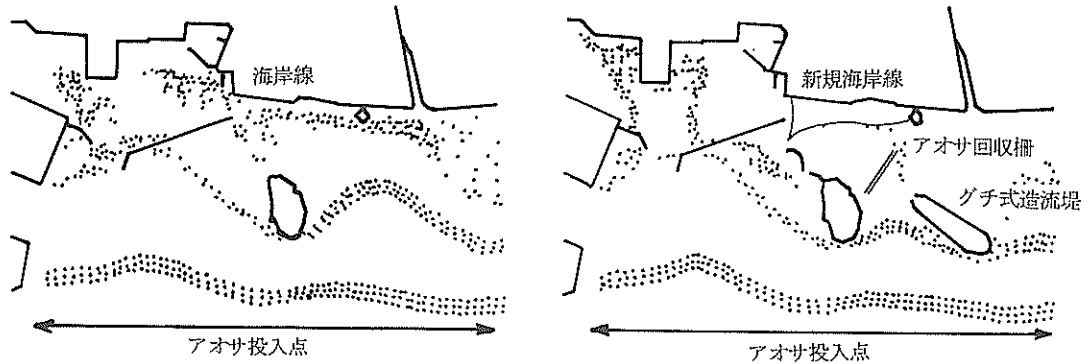


図-3 グチ式造流堤の適用検討例)  
 (左図: 対策工が無い場合のアオサの漂着状況  
 右図: 対策工がある場合のアオサの漂着状況)

この流れにより、開口部周辺では滞留域が解消され、その周辺の海域の滞留時間が減少する。さらに、1方向に移送される先端域に物質の回収装置を設置することができれば、効率的に物質を回収できるシステムとなる。

シーブルー計画においてケーススタディとして提案されている検討例を図-3に示す。この事例においては、波浪の影響などを受けて漂流しているアオサが風送流によって移送され、海岸に大量に打ち上げられて環境に悪影響を及ぼしている。同図は、対策工がある場合と無い場合のアオサの漂着状況を数値計算結果により比較したものである。対策工としては、グチ式造流堤とアオサの回収柵が設置されている。対策工の効果により、明らかに海域からアオサが除去されており、海岸線に漂着するアオサが減少していることがわかる。

ただし、この例ではグチ式造流堤から流出する流れは湧き出し流れとして大胆な仮定を用いて推定されており、実際の検討を行うためには根拠にとぼしい。グチ式造流堤を用いた海域の浄化方策をより詳細に検討し、他の方策との比較検討を行うためには、グチ式造流堤から流出する流れの強度、広がり等を定量的に推定する方法を確立する必要がある。そこで、次章以降においてグチ式造流堤の大きさや設置水深、潮汐振幅等の条件から流出流速を推定する方法を検討する。

### 3. グチ式造流堤による流れの特性に関する水理模型実験

流出流速の特性を明らかにするために、水理模型実験を行った。水理模型実験は、小型の模型を用いた第1段階の実験と中型の模型を用いた第2段階の実験の2段階

で行った。

まず、第1段階の実験においては、流出流の特性の概要を把握し、次に第2段階の実験でより詳細な実験を行うと共に、流出流速を定式化することを試みた。

本章では、第1段階の実験について記述する。

#### 3.1 実験水槽および模型

第1段階の水理模型実験において使用した水槽は、図-4のように、1m(幅)×1.5m(長さ)×0.4m(深さ)の水槽を2台用いたもので、2台の水槽間に接続された定量ポンプと電磁4方弁によって潮汐を起こしている。

電磁4方弁を含むポンプの配管は図-5に示すようになっており、定量ポンプで吸い上げられた水を電磁4方弁で振り分けることによって潮汐を起こしている。したがって、起こされた潮汐は鋸波状の潮汐となる。

ポンプにより潮汐を起こすので、水の流れの影響を少なくするためには水槽内に十分な水量が必要である。一方、実験に必要な水深は非常に浅い。そこで、水槽の内部にグチ式造流堤の模型を設置するためのプラットフォームを設け、全体の水量を確保するとともに、水深は浅くとした。グチ式造流堤の模型はアクリル板により作成し、同じくアクリル板で作成した床盤上に設置した(図-6)。

図-6に示すように、グチ式造流堤の模型は、面積が400cm<sup>2</sup>のものと同900cm<sup>2</sup>のものを作成した。模型が小型であることと、模型が床盤に固定されていることにより、模型の交換は非常にスムーズに行うことができた。なお、床盤上には、人工粗度として直径1mm程度のスチレンビーズを敷き詰めてある。

### 3.2 計測機器とデータ収録方法

次に、計測器とデータの収録方法について説明をする。水位の計測にはサーボ式精密水位計（ケネック製：SW-201）を用いた。流速の計測にはサーマル式微流速計（ケネック製：VS-101）を用いた。サーマル式微流速計のセンサー部は、図-7に示すように、流速計測センサーと温

度補償センサーからなっている。加熱された流速計測センサーが流れによって冷却されるので、一定温度に保つための加熱電圧をブリッジ回路により測定し、1volt/

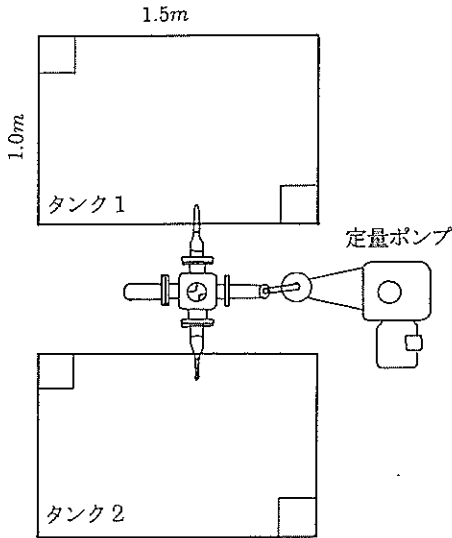


図-4 小型グチ模型実験水槽

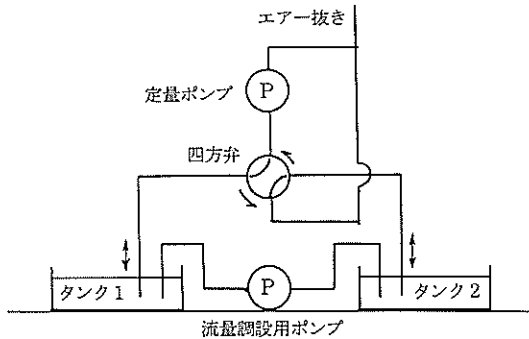


図-5 小型グチ模型実験水槽の配管

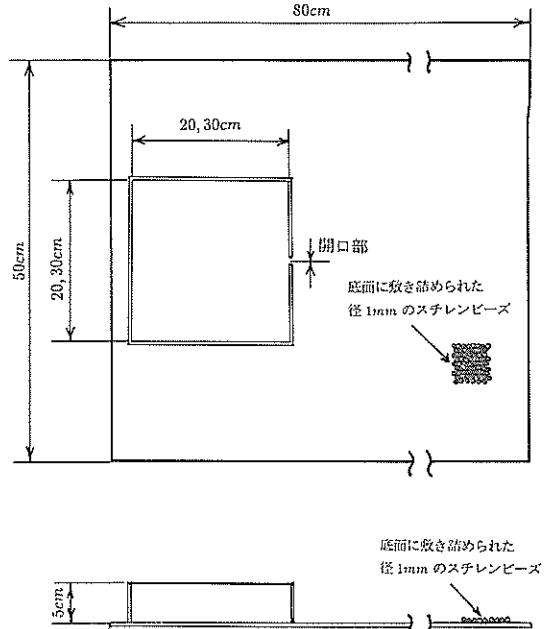


図-6 グチ式造流堤の亚克力模型

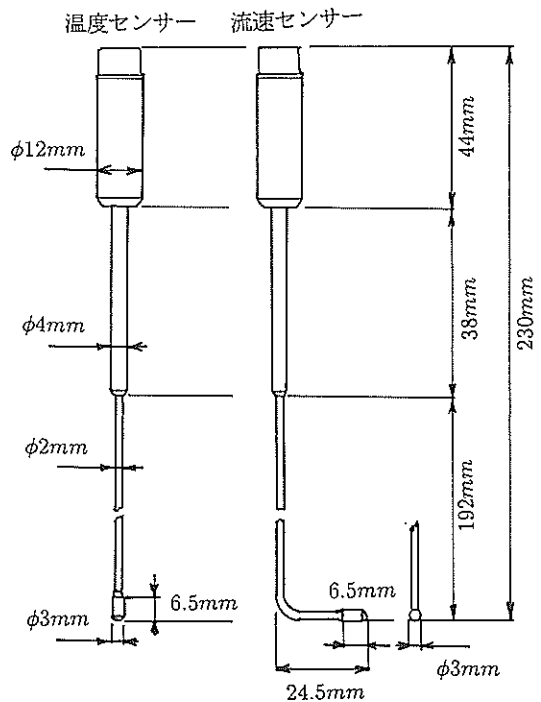


図-7 サーマル式微流速計のセンサー部



(cm/s)の電圧を出力する。1方向ながら、数mm/sの流速を高精度に測定することが可能である。

測定された水位および流速をデジタルデータレコーダー (TEAC製: DRF1+) で収録し、以下に示す方法で流出時の流速として整理した。まず、収録されたデータは図-8のようになる。水位変化は、転潮時に多少の乱れを含む鋸波状となっていた。

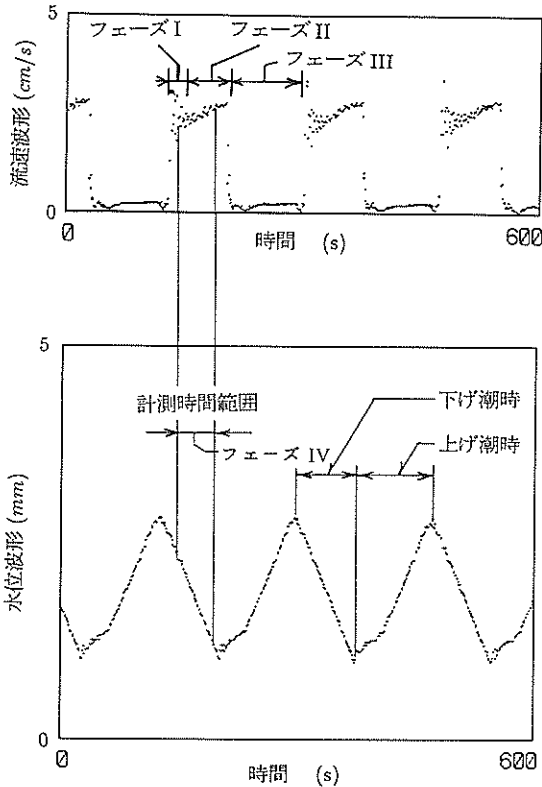


図-8 小型グチ模型実験水槽に起こされた潮汐と流れ

それに対応して、流速変化はつぎの、I~IIIのフェーズに分けられる。I: 上げ潮から下げ潮に変わった時に水位の急激な変化に対応したピークをもつ。II: 下げ潮時に、細かな変動を含みながら漸増する流速を示す。III: 上げ潮時には、流れの方向が変わり、流速データは欠測する。

計測対象範囲はフェーズIIであり、細かな変動は定量ポンプがプランジャータイプであることにより生じている乱れと考えられた。また、漸増する流速は、ほぼ線形に増加しているの、水深が減っていくことによる影響が現れている。そこで、フェーズIのピークを含まないように、解析対象範囲IVを設定し、その間の平均流速

( $U_{mean}$ )を求めることによって、細かな流速変動を相殺した。また、その時の水深を、解析対象範囲の中間時間の水深 ( $H_{mean}$ ) とし、設定水深 ( $H_{obj}$ ) と補正流速 ( $U$ ) の関係を式(1)で線形的に補正した。

$$U = U_{mean} \cdot \frac{H_{mean}}{H_{obj}} \quad (1)$$

つまり、流量を保存する形で、設定水深での補正流速に変換している。この補正は、水深の微細な変化を吸収するための補正であり、設定水深と計測した水深との違いは、およそ10%以下 (大部分は、5%以下) に保たれている。

### 3.3 実験条件と測定方法

実験条件は、グチ式造流堤の大きさ、設定水深、潮汐振幅等を考慮して、表-1のように設定した。

ただし、ケースBBにおいては流出流速が測定範囲を越えたため欠測となった。

したがって、予備実験のケースは、全部で7ケースである。

表-1 予備水理模型実験ケース一覧

| ケース名 | グチの大きさ<br>$L \times B$<br>(cm × cm) | 開口幅<br>(cm) | 設定<br>水深<br>(mm) | 潮位差<br>(mm) | 潮汐<br>周期<br>(s) |
|------|-------------------------------------|-------------|------------------|-------------|-----------------|
| AA   | 20 × 20                             | 1.0         | 10.0             | 0.9         | 176             |
| BA   | 20 × 20                             | 1.0         | 10.0             | 1.9         | 176             |
| CA   | 20 × 20                             | 1.0         | 20.0             | 0.9         | 176             |
| DA   | 20 × 20                             | 1.0         | 20.0             | 1.9         | 176             |
| AB   | 30 × 30                             | 1.0         | 10.0             | 0.9         | 176             |
| BB   | 30 × 30                             | 1.0         | 10.0             | 1.9         | 176             |
| CB   | 30 × 30                             | 1.0         | 20.0             | 0.9         | 176             |
| DB   | 30 × 30                             | 1.0         | 20.0             | 1.9         | 176             |

計測用の座標軸として、図-9に示すように、グチ式造流堤の開口部中心を原点とし、外向きにx軸、x軸に直交する向きにy軸を設定した。計測点は、基本的に、 $x = 1, 3, 7, 11, 15, 20, 30$ cmに対して、 $y = 0, 1, 3, 5, 10, 15, 20, 25, 30$ mmの地点である。ただし、流速が測定限界より小さくなったところまでの範囲を計測している。また、流速は、xに対して正の方向の流速 ( $U$ )のみを計測した。水深・流速は同時に計測され、計測時間は潮汐周期の約2倍、サンプリング周期は1Hzで行った。

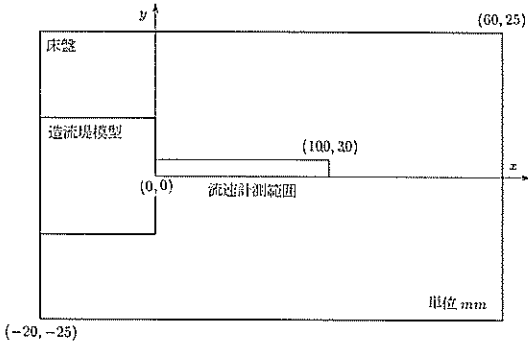


図-9 小型グチ模型実験の座標軸

### 3.4 中心流出流速の整理および流速分布の検討

こうして計測された流速( $U(x,y)$ )に対して中心流出流速の整理、中心流速の減衰、横断流速分布についての整理を行った。

#### (1) 中心流出流速の整理

開口部直前での中心流出時流速 $U_0$ の測定結果を表-2に示す。

表-2 中心流出流速の測定結果

| ケース名 | 流速値<br>(cm/s) |
|------|---------------|
| AA   | 1.439         |
| BA   | 2.736         |
| CA   | 0.727         |
| DA   | 1.467         |
| AB   | 2.953         |
| BB   | —             |
| CB   | 1.588         |
| DB   | 2.953         |

中心流出流速の大きさの傾向として、およそグチ式造流堤の面積、潮汐振幅に比例し、水深に反比例することがわかった。

#### (2) 中心流速の減衰

開口部から流出した流れは、流下にしたがって減衰する。その様子を、 $y=0$ 上の流速の最大値( $U_{max}$ )を $x$ 軸に対して記述すると、例えば、図-10のようになる。

他のケースにおいても、ほぼ同様の傾向を示している。まず、減衰がおおよそ距離の1/2乗に反比例する緩やかな減衰域が現れ、つづいて、距離の1~2乗に反比例する急速な減速域が現れる。急速な流速の減速の起こる原因のひとつは、開口部から流出した流れが到達していないこ

とが考えられる。

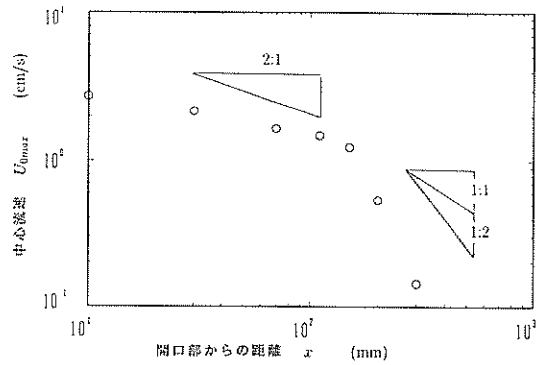


図-10 中心流速の減衰 (ケースBA)

#### (3) 横断方向の流速分布

目視による染料拡散の観察により流出流は噴流であることが推測された。そこで、噴流の流速分布式と、流出軸に垂直な横断方向における $x$ 軸方向の流速分布を比較したものが図-11である。

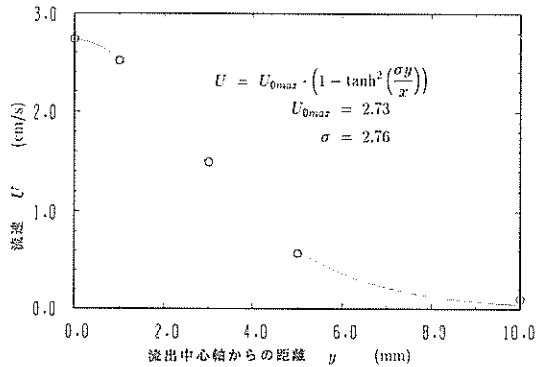


図-11  $x=1$ における $U$ の分布形 (ケースBA)

当てはめた流速分布は、2次元自由噴流の解としてGoertlerにより提案されたものを用いている<sup>2)</sup>。

$$\frac{U(x,y)}{U_{max}} = 1 - \tanh^2\left(\frac{\sigma y}{x}\right) \quad (2)$$

ここで、式(2)を用いた意味は、流出流が2次元自由噴流となっていることを仮定しているのではなく、汎用性のある流速分布式として採用している点にある。

ここに、 $\sigma$ は、噴流の広がり角に関するパラメータであり、 $\sigma$ が小さいほど、噴流が広がっていることに対応する。しかも、中心流速( $U_{max}$ )が推定できれば、式(2)より直ちに流速分布が計算できる。このことは、逆に計測流

速から $\sigma$ を求める際に、手続きを簡単にすることができ  
ることを意味する。

$\sigma$ の流下方向への分布は、いずれのケースにおいても、  
最初噴流の広がり角が小さく、流下にしたがって広がり角  
が増大していた。その広がり角を $\sigma$ で表すとおよそ2  
~20の範囲となっている。2次元自由噴流における $\sigma$ は、  
7.67~12であると言われているので<sup>2)</sup>、ほぼ2次元自由  
噴流に近い流れが生じていたことがわかる。流下方向へ  
の $\sigma$ の分布に関しては4.4において再度検討する。

#### 4. グチ式造流堤による流れの定式化に関する水理模型 実験

第2段階の実験として、中型の模型を用いた実験を行  
い、流出流速を定式化することを試みた。

##### 4.1 実験水槽および計測機器

第2段階の水理模型実験において使用した水槽は、図  
-12に示すような中型平面水槽である。この中型平面水槽  
は空気室式の起潮装置を備えており、任意波形の起潮が  
可能である。本実験においても、水深が浅くなることによ  
る流れの影響などを軽減するため、第1段階の実験同様  
に水槽の中に設置した耐水合板製の床盤上に同じく耐  
水合板製の模型を設置した(図-13)。使用した耐水合  
板にはアクリル塗料を塗布した。

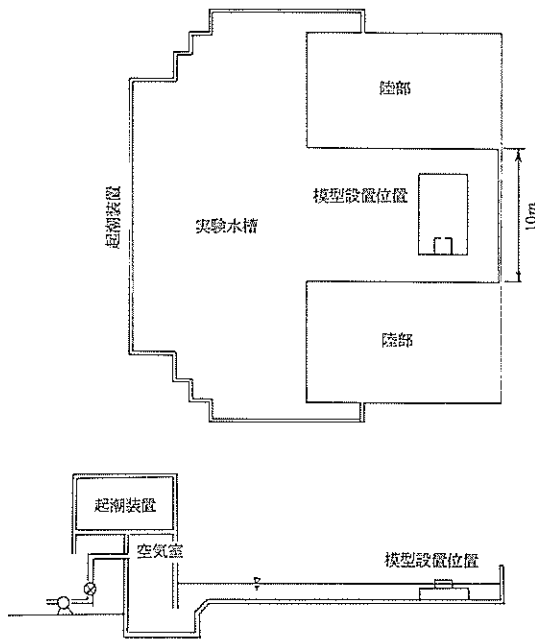


図-12 本実験で用いた水槽と模型の設置状況

耐水合板の凹凸が粗度効果を持つと考えられるので、今  
回は特に人工粗度を設けなかった。

水位の計測には、水質補償付きのサーボ式精密水位計  
(ケネック製：NS-101)を用いた。流速の計測には、2  
成分電磁流速計(ケネック製：VM-201H)4台を同時  
に用い、効率的に行った。

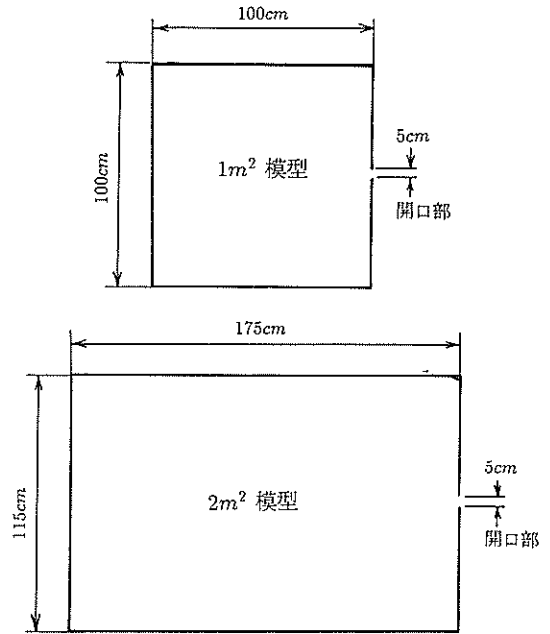


図-13 本実験で用いたグチ式造流堤の模型

##### 4.2 実験条件および相似則の検討

実験条件は、第1段階の実験の結果を考慮し、表-3の  
ように設定した。

表-3 水理模型実験ケース一覧

| ケース名 | グチの大きさ<br>$L \times B$<br>(m × m) | 開口幅<br>(cm) | 水深<br>(cm) | 潮位差<br>(cm) | 潮汐<br>周期<br>(s) |
|------|-----------------------------------|-------------|------------|-------------|-----------------|
| AC   | 1.0 × 1.0                         | 1.0         | 9.82       | 0.53        | 390             |
| BC   | 1.0 × 1.0                         | 1.0         | 9.89       | 0.74        | 390             |
| AD   | 1.0 × 1.0                         | 1.0         | 9.72       | 0.76        | 275             |
| BD   | 1.0 × 1.0                         | 1.0         | 9.81       | 1.45        | 275             |
| CD   | 1.0 × 1.0                         | 1.0         | 19.77      | 0.77        | 275             |
| DD   | 1.0 × 1.0                         | 1.0         | 19.40      | 1.47        | 275             |
| AE   | 1.7 × 1.2                         | 1.0         | 9.81       | 0.37        | 390             |
| BE   | 1.7 × 1.2                         | 1.0         | 9.97       | 0.73        | 390             |
| AF   | 1.7 × 1.2                         | 1.0         | 9.85       | 0.77        | 275             |
| BF   | 1.7 × 1.2                         | 1.0         | 9.20       | 1.33        | 275             |
| CF   | 1.7 × 1.2                         | 1.0         | 18.43      | 0.80        | 275             |
| DF   | 1.7 × 1.2                         | 1.0         | 19.42      | 1.58        | 275             |

グチ式造流堤の模型は、1 m<sup>2</sup>と2 m<sup>2</sup>の2通りを用意し、相似則の検討のために、それぞれ2通りの潮汐周期を選択した。その他に、水深と潮位差のバリエーションをつけ、全部で12ケース実施した。

計測用の座標軸は、第1段階の実験と同様に、グチ式造流堤の開口部中心を原点とし、外向きにx軸、x軸に直交する向きにy軸を設定した(図-14)。計測点は、x=5, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50, 75, 100 cmとy=0, 1.5, 2.5, 5.0, 7.5, 10.0, 12.5, 17.5 cmの計80点とした。

計測時間は潮汐周期によって600~800秒とし、サンプリング周波数は1 Hzとした。

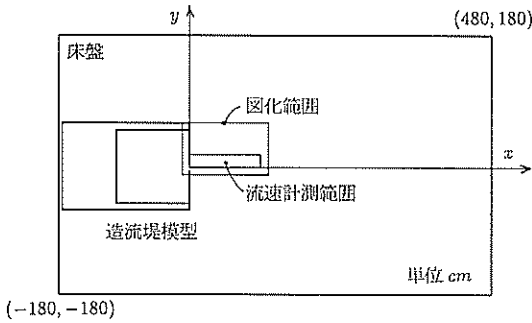


図-14 グチ模型実験の座標軸と模型設置状況

今回の水位変化はサインカーブで与えている。個々の測定点で収録された流速データは同時に測定されている水位変化を用いて整理され、1潮汐分の流速変動データとしてとりまとめた。なお、流速データには周期10~15秒の変動成分が現れていたため、±30秒の線形重みつき移動平均によりデータをスムージングした。

本実験においては現場での適用性を考慮し、以下のよう相似則を考慮した。

グチ式造流堤の造流の原因は、潮汐による水面変動であるので、フルードの相似則を用いることが適当と考えられる。まず、実験での潮汐周期と現地での半日周潮の周期(12時間)から、時間縮尺が決定される。次に、水平縮尺を仮定することにより、その他の縮尺が表-4のように決定される。

表-4 水理模型実験の相似則

| 縮尺   | 定式化                          | 模型    | 現地      | 縮尺率    |
|------|------------------------------|-------|---------|--------|
| 時間   | $T_r$                        | 390s  | 12h     | 1/110  |
| 水平長さ | $L_r$                        | 1m    | 2km     | 1/2000 |
| 鉛直長さ | $H_r = L_r^2 \cdot T_r^{-2}$ | 10cm  | 33m     | 1/330  |
| 水平流速 | $U_r = L_r \cdot T_r^{-1}$   | 1cm/s | 18cm/s  | 1/18   |
| 鉛直流速 | $V_r = H_r \cdot T_r^{-1}$   | 1cm/s | 0.3cm/s | 1/3    |

ただし、第1段階の実験の結果を同様に相似則で現地スケールに直すときには、潮汐が鋸波状に与えられたことを考慮する必要がある。そこで、最大水面変動速度に着目し、相似則の拡張を行った。

まず、実海域の水面変動速度 $V_p$ を潮汐振幅 $dH_p$ と潮汐周期 $T_p$ で表示すると、任意の時間 $t$ において、

$$V_p = \frac{2\pi dH_p}{T_p} \cos\left(\frac{2\pi t}{T_p}\right) \quad (3)$$

となる。この場合、最大の水面変動速度 $V_{pmax}$ は、

$$V_{pmax} = \frac{2\pi dH_p}{T_p} \quad (4)$$

である。一方、第1段階の実験の場合は、潮汐振幅 $dH_m$ と潮汐周期 $T_m$ に対して、転潮時を除いて常に一定の水面変動速度 $V_{mmax}$ をもち、

$$V_{mmax} = \frac{4dH_m}{T_m} \quad (5)$$

となる。

したがって、水面変動速度の縮尺 $V_r = V_{mmax} / V_{pmax}$ は、潮汐振幅の縮尺 $dH_r$ と時間縮尺 $T_r$ を用いて、

$$V_r = \frac{2}{\pi} \frac{dH_r}{T_r} \quad (6)$$

と表すことができる。これを整理すると、

$$dH_r = \frac{\pi}{2} H_r \quad (7)$$

となる。つまり、 $dH_r$ が見かけ上 $H_r$ の $\pi/2$ 倍だけ大きくなっているとした場合に、フルード相似則が成立することを示している。

### 4.3 流速分布の検討

得られた流速測定結果を、グチ式造流堤の開口部前面での流速分布形状の視点から、瞬間の流速ベクトル図、残差流の流速ベクトル図、フローパターンの可視化についての整理を行った。

#### (1) 流速の空間分布

測定された水位変動記録を用いて、流速データを下げ

グチ式造流堤による流れの解析

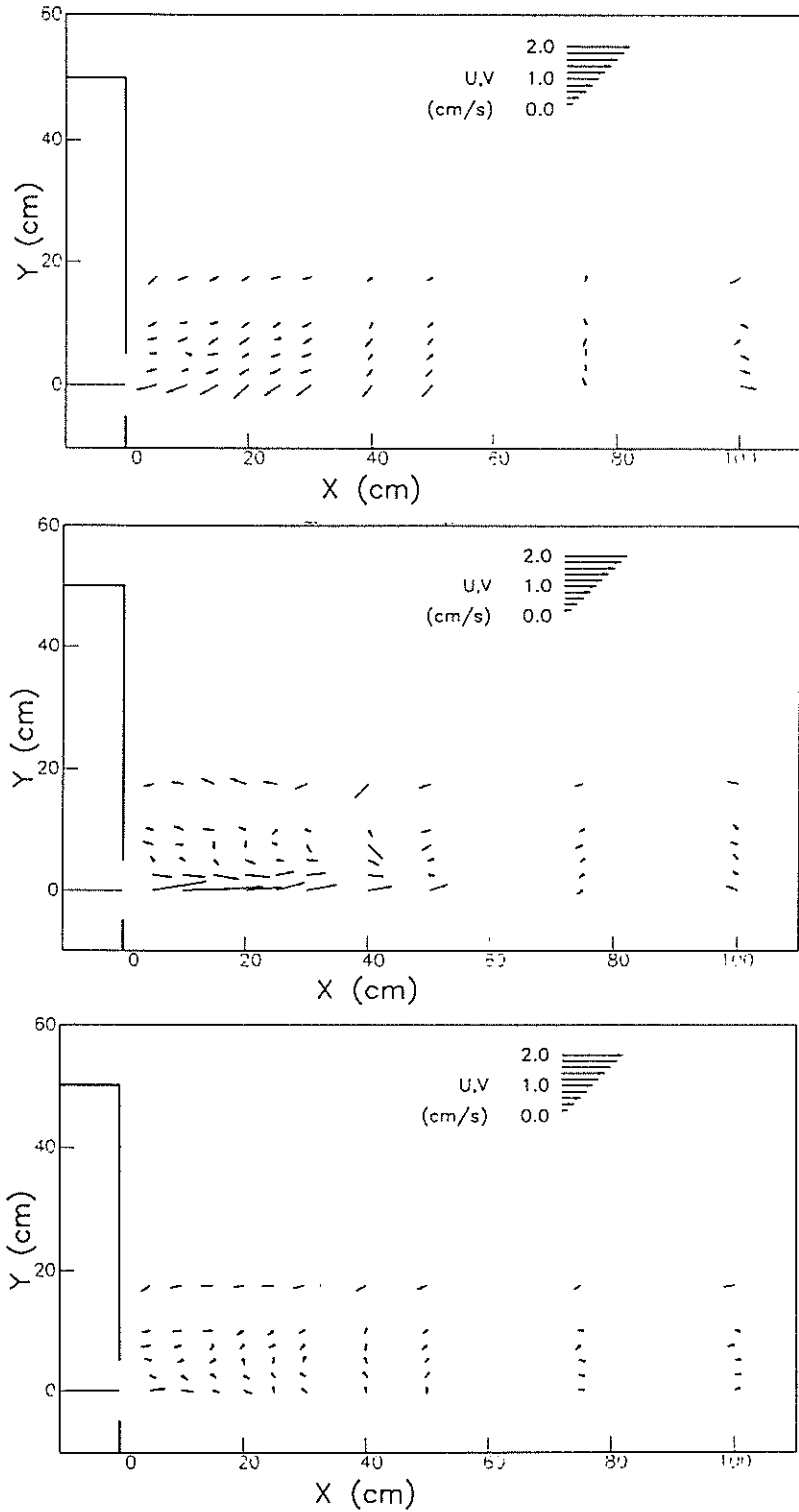


図-15 ケースA Cの流速ベクトル図  
(上段：上げ潮最強時 中段：下げ潮最強時 下段：残差流)

潮止まりから1潮汐分のデータとして抽出し、ある時刻の平面的な流速分布形状を検討した。

データは、1潮汐間連続して得られているが、上げ潮最強時、下げ潮最強時の2つの時刻における流速ベクトル図のみを出力した。さらに、1潮汐間の平均流速を求め残差流のベクトル図として整理した。

例として、ケースACの場合の測定結果を図-15示す。

上げ潮時には、開口部に向かって周囲の水塊が集まっていることがわかる。また、開口部から離れた位置では、前の下げ潮時に発生した外向きの流れが残っている。下げ潮時には、開口部から噴流状に流出している状況と、周囲の水塊が噴流に向かって集まってきている状況がわかる。このとき、開口部から離れた位置では流れの向きが逆転していることも特徴的である。定性的には、開口部から流出する流れに周囲の水塊が集まる状況が現れており、グチ式造流堤の目的である1方向流が造流されている。

残差流に関しては、全ケースの図面を付録に添付する。

## (2) トレーサ追跡によるフローパターンの可視化

流速ベクトル図では時間的な変化を離散的にしか表せないで、得られた流速測定結果を用いてトレーサを数値実験的に移流させた。その方法は、ある瞬間に投入されたトレーサをその時刻における流速分布に乗せて移流させ、一定時間後の分布を出力するものである。移流されたトレーサの位置はそれまでの時間履歴を表しており、時間的なフローパターンの変化を可視化する方法として有効な手法である。

トレーサは図-16の枠線内の点で投入され、全部で80点である。

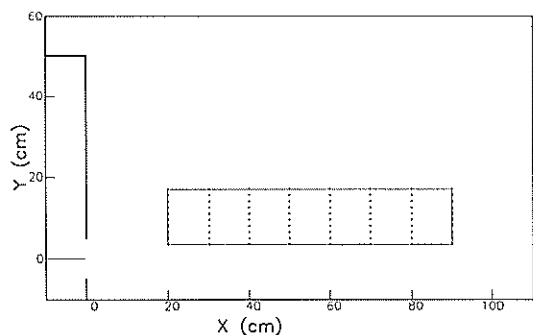


図-16 トレーサの投入位置

トレーサの投入は上げ潮最強時と下げ潮最強時の2回行い、それぞれ1/8周期後の移流位置を示した。トレーサの移流追跡は流速が測定されている範囲内のみとし、境界を越えた場合にはそこで静止させている。また、移流

計算は5秒毎に1次のオイラー法により計算した。移流のための流速の内挿は、計測データの平滑化の意味も含め、単純にトレーサの含まれる4点近傍の流速データを算術平均することによって求めている。

図-17にケースACの結果を例として示す。

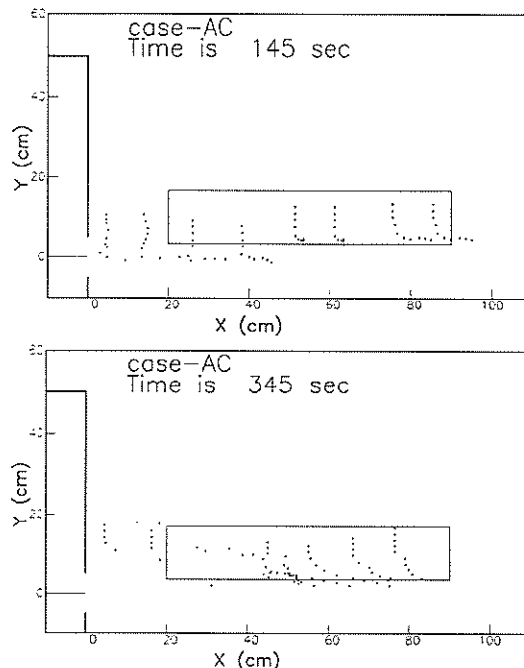


図-17 トレーサの移流結果

(上段：上げ潮最強時投入 下段：下げ潮最強時投入)

上げ潮時には、周囲の水塊が開口部前面に集まってきており、開口部に近いところほど速やかに集まっている様子が見える。下げ潮時には、噴流が周囲の水塊を巻き込みながらトレーサを外向きに大きく移流している状況が示されている。その程度の判定方法として、例えば、初期投入点を示す枠線内に滞留しているトレーサの個数を数えることなどが考えられる。

この他のケースについては、付録にその図面を収録した。ケース毎に比較すると、流出流速の大小により、影響範囲が変化していることがわかる。限られた実験条件の下であるが、影響範囲は、グチ式造流堤の水平スケールの約0.5倍から1.0倍程度であった。

## 4.4 噴流の定式化

グチ式造流堤から流出する流れは噴流として定式化できることが3.4において示されているので、本実験結果についても、同様の整理を試みる。ただし、第1段階の実験の結果の検証と再整理のため、4.2で検討した相似則を

用いて、現地換算の流速に変換している。

(1) 噴流強度の整理

グチ式造流堤開口部直前の流速値を、噴流強度  $U_{max}$  として定式化することを試みた。第1段階および第2段階の実験の実験結果を、現地スケールに換算した場合の諸元と噴流強度を取りまとめて表-5に示す。表-5の結果を取りまとめるにあたって、以下のような整理を行った。

グチ式造流堤の諸元は、面積  $A$ 、開口幅  $B$  と設置水深  $H$  によって規定されている。これらから、以下のような無次元開口率  $D_n$  を定義した。

$$D_n = \frac{B \cdot H}{A} \quad (8)$$

一方、造流の原因となる潮汐の諸元は、潮汐周期  $T$  と潮位差  $dH$  であり、 $dH/T$  により速度の次元をもったパラメータが規定できる。そこで、噴流強度  $U_{max}$  を無次元流速  $U_n$  として整理すると、

$$U_n = U_{max} \cdot \frac{T}{dH} \quad (9)$$

となる。ここで定義された無次元開口率と無次元流速の関係を図化すると、図-18のようになる。

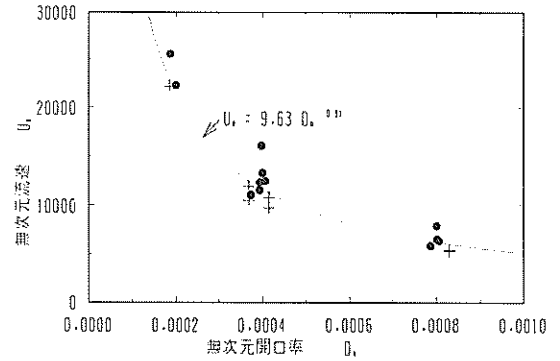


図-18 無次元開口率と無次元流速の関係  
(●：第一段階実験結果、+：第二段階実験結果)

表-5 全実験ケースの現地換算値

| ケース名 | 水平縮尺    | 時間縮尺  | 面積<br>( $km^2$ ) | 平均水深<br>( $m$ ) | 潮位差<br>( $m$ ) | 噴流強度<br>( $m/s$ ) |
|------|---------|-------|------------------|-----------------|----------------|-------------------|
| AA   | 1/10000 | 1/244 | 4.0              | 16.6            | 2.35           | 0.586             |
| BA   | 1/10000 | 1/244 | 4.0              | 16.6            | 4.95           | 1.115             |
| CA   | 1/10000 | 1/244 | 4.0              | 33.2            | 2.35           | 0.296             |
| DA   | 1/10000 | 1/244 | 4.0              | 33.2            | 4.95           | 0.607             |
| AB   | 1/10000 | 1/244 | 9.0              | 16.6            | 2.35           | 1.203             |
| CB   | 1/10000 | 1/244 | 9.0              | 33.2            | 2.35           | 0.647             |
| DB   | 1/10000 | 1/244 | 9.0              | 33.2            | 4.95           | 1.203             |
| AC   | 1/2000  | 1/111 | 4.0              | 32.0            | 1.71           | 0.314             |
| BC   | 1/2000  | 1/111 | 4.0              | 32.2            | 2.42           | 0.359             |
| AD   | 1/2000  | 1/156 | 4.0              | 15.8            | 1.23           | 0.353             |
| BD   | 1/2000  | 1/156 | 4.0              | 15.9            | 2.35           | 0.876             |
| CD   | 1/2000  | 1/156 | 4.0              | 32.1            | 1.24           | 0.188             |
| DD   | 1/2000  | 1/156 | 4.0              | 31.5            | 2.38           | 0.324             |
| AE   | 1/2000  | 1/111 | 8.0              | 32.0            | 1.20           | 0.370             |
| BE   | 1/2000  | 1/111 | 8.0              | 33.0            | 2.37           | 0.687             |
| AF   | 1/2000  | 1/156 | 8.0              | 16.0            | 1.25           | 0.646             |
| BF   | 1/2000  | 1/156 | 8.0              | 14.9            | 2.15           | 1.274             |
| CF   | 1/2000  | 1/156 | 8.0              | 29.9            | 1.30           | 0.333             |
| DF   | 1/2000  | 1/156 | 8.0              | 31.5            | 2.55           | 0.683             |

開口部幅は、全ケース 100m

図から、2つのことが言える。1つは、小型の模型を用いた第1段階の実験結果と中型の模型を用いた第2段階の実験の結果が、同等の条件をもつ場合にほぼ同じ位置にプロットされており、今回用いた相似則の妥当性が示されている。もう1つは、式(8)、(9)で定義された無次元量により、実験結果が1つの曲線上に整理されていることである。この関係を定式化することにより、噴流強度の推定式が作成できる。

今回は、以下のように指数型で定式化した。

$$U_n = \alpha \cdot D_n^\beta \quad (10)$$

ここに、 $\alpha$ と $\beta$ は、実験定数である。最小2乗法によりその値は、 $\alpha=9.63$ 、 $\beta=-0.91$ となった。

ここで、これらの実験定数の意味を考える。仮に、潮汐によってグチ式造流堤内に入った水塊が、流出時に一様流として開口部より流出するとした場合、その流出流速を噴流強度 $U_{omax}$ とするならば、式(4)の $V_{pmax}$ を用いて、

$$U_{omax} = \frac{A \cdot V_{pmax}}{B \cdot H} \quad (11)$$

で表すことができる。これを式(8)、(9)に代入して整理すると、

$$U_n = 2\pi \cdot D_n^{-1} \quad (12)$$

の関係を得る。つまり、 $\alpha=6.28$ 、 $\beta=-1$ である。この値と実験により得られた値とを比較すると、噴流の流速分布が生じたことにより、無次元流速が約1.5倍になっていることがわかる。また、 $\beta$ の違いはエネルギーの損失などによる違いであるとも考えられるが、実験データのばらつきの影響もあり一概に説明できない。

ここで示した定式化および実験定数は、こうした整理により噴流強度の予測式が立てられることの確認の意味のために示されており、実際の設計にあたってはより精密な計測による定式化の確認を行う必要がある。

## (2) 噴流の広がり角の変化

噴流の広がり角の変化は式(2)で定義した $\sigma$ の分布として整理した。第1段階の実験結果を含め、全部の実験ケースについて、 $\sigma$ を開口部からの距離で整理したものが図-19である。この図から、流下にしたがって $\sigma$ が大きくなっていくことがわかる。ただし、 $\sigma$ の増加傾向は流下にしたがって小さくなり、ある値で限界値をもつようにも

見える。このような傾向を示す原因としては、開口幅の影響、残差流の影響、および底面摩擦による噴流の減衰の影響等が考えられる。

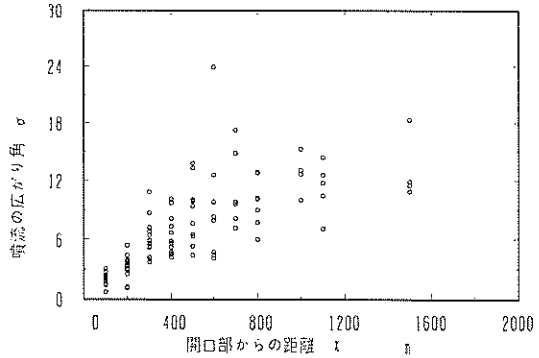


図-19  $\sigma$ の流下方向分布

開口部直前では有限の長さをもった開口部から噴流が開始するので、点源からの噴流の解に対して、幅の広い噴流となっている。一方、開口部から離れると、残差流の分布からもわかるように開口部への戻り流れが生じている。この流れによって噴流の裾野の部分が負の流速となり、見かけ上噴流の幅を減少させている。これらが $\sigma$ の増加に寄与していると考えられる。また、底面摩擦により噴流は減衰していく。この減衰の結果、噴流の広がり角は増加し、 $\sigma$ の増加を抑える働きをされると考えられる。この他にも流出が有限時間に起こっているため、噴流の到達距離等の影響も考えられる。

以上のことを考慮して図-19の再整理を試みたが、有意な結果が得られなかった。噴流強度が定式化できたのは、それが局所的、同時的な現象であったことにある。一方、噴流の広がり角は空間的、時間的に分布をもつ現象であることが、定式化を困難にした原因といえる。ここでは以上のように定性的な見解をまとめるにとどめ、数値計算による流速分布の推定法に関して5.で検討を進める。

## 5. 数値計算手法による検討と水理模型実験との比較

グチ式造流堤から流出する流れは、噴流状になることが実験結果から明らかになった。従来のメッシュに依存する計算法で噴流を予測するためには、メッシュサイズを十分に小さくする必要のあること、噴流による乱れを考慮するために乱流のモデル化が必要なことなどから、膨大な計算容量が必要となり、現実の問題に適用することは難しい。そこで、境界要素法のひとつであり、渦点を流線に沿って追跡するラグランジュ的な解析法である



離散渦法を数値計算法として採用することにした。

著者らは離散渦法を高レイノルズ数流れの計算に応用する方法の検討を進めてきた<sup>3,4)</sup>。その中で、離散渦法を用いた防波堤背後の渦構造や導流堤による整流効果を検討し、基礎的なパラメータの同定方法などを提案している。

本論文では、さらに検討を進め、グチ式造流堤から流出する噴流を再現する試みを行った。これにより、数値計算によるグチ式造流堤の諸元決定のための方法が提案される。

また、計算法の開発の視点から見ると、本来Navier-Stokes方程式の直接解法の1つとして発展してきた渦法を新たな計算領域に適用する試みとして位置づけられる。

### 5.1 離散渦法による計算法

本論文で使用した離散渦法の基礎方程式、粘性の考慮の方法、離散渦のモデル化は次の通りである。

#### (1) 基礎方程式

離散渦法の基礎方程式は、非圧縮性のNavier-Stokes方程式であり、

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \text{grad})\mathbf{u} = \frac{1}{\rho} \text{grad}P + \nu \nabla^2 \mathbf{u} \quad (13)$$

$$\text{div} \mathbf{u} = 0 \quad (14)$$

と記述される。ここに、 $\mathbf{u}$ は流速ベクトル、 $\rho$ は流体密度、 $P$ は圧力、 $\nu$ は粘性拡散係数、 $\nabla^2$ はラプラシアン演算子、 $\text{div}$ は発散の演算子である。これらの式に、rotationを作用させ、微小体積 $\delta v$ について積分すると、次の式が得られる。

$$\frac{D\Gamma}{Dt} = (\Gamma \cdot \text{grad})\mathbf{u} + (\nu \nabla^2 \Gamma) \quad (15)$$

ここに、 $D/Dt$ は全微分オペレータ、 $\Gamma$ は $\Gamma \equiv \omega \delta v$ である。 $\omega$ は、 $\omega \equiv \text{rot} \mathbf{u}$ で定義される渦度であるので、 $\Gamma$ は渦強度を表す。式(15)は、渦強度の移送・拡散方程式である。ただし、解析場を2次元に限れば、式(15)左辺第1項は常に0となる。つまり、2次元では、粘性の影響による渦強度の拡散と場の流速による渦強度の移流を考慮することにより流れ場が解析できることとなる。

#### (2) 粘性

粘性の影響を与える方法はいくつかあるが、ここでは渦核の拡大として考慮した<sup>4)</sup>。無限に長い1本の渦糸の誘起する回転速度 $u_r$ の粘性拡散を解くと、

$$u_r = \frac{\Gamma}{2\pi r} (1 - \exp(-\frac{r^2}{2\nu t})) \quad (16)$$

となる。この流速分布をもつ渦核は、図-20のような構造をもつ。この流速の極大値をとる半径 $r_0$ は、式(16)を2回微分することにより求められ、

$$r_0 \cong 2.24 \cdot \sqrt{\nu t} \quad (17)$$

となり、時間と共に拡大する渦核となっていることがわかる。本計算ではこの考え方を乱流拡散係数 $\nu_t$ にも適用し、

$$u_r = \frac{\Gamma}{2\pi r} (1 - \exp(-\frac{r^2}{2\nu_t t})) \quad (18)$$

として計算した。

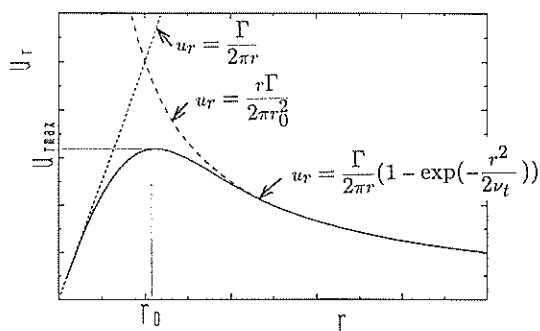


図-20 粘性渦の誘起流速分布

#### (3) 剥離渦のモデル化

場に存在する渦の起源は境界層から剥離してくる渦である。渦のモデル化には境界層の近似の仕方や、放出過程の仮定により様々な手法が考えられるが、本論文では以下のような方法を用いた。グチ式造流堤は長い直線の防波堤の集合体からなるので、境界をいかに単純に表すかが計算時間の短縮やメモリの節約に役立つ。離散渦法においては境界上の境界層を離散渦や渦パネルで近似する方法であるので、板の表裏に渦点を配置するのがもつ

とも簡単な方法である。ここでは、さらに一步進めて、板の中心線に沿った離散渦で直線状の構造物を近似した。それぞれの境界上の離散渦の強度は離散渦の中心線上に配置された制御点での法線流速が0となり、かつ全体の渦強度が保存されるよう決定される。次に、剥離点となる境界上の渦点を流れ場の中へ放出する。放出する方向と距離はプログラムの中で明示的に指定する。離散化の概要を示すと図-21のようになっている。また、渦の放出点は、同じく図-21に示すように開口部の端部となる渦点を開口部の中心方向に距離 $\epsilon$ だけ移動させた点とした。

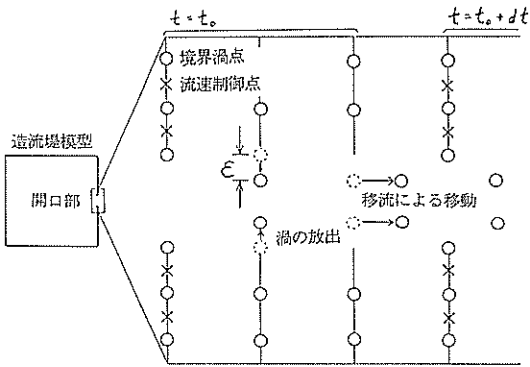


図-21 構造物の離散化と渦放出の模式図

5.2 数値計算と水理模型実験との比較

(1) 計算条件

計算条件は表-6で示した水理実験の諸元を用いた。

表-6 計算条件

|      | 現地換算   | 計算条件   | 縮尺                     |
|------|--------|--------|------------------------|
|      | (a)    | (b)    | (b/a)                  |
| 大きさ  | 2km    | 20cm   | $L_r$                  |
| 水深   | 16m    | 1cm    | $H_r$                  |
| 潮汐周期 | 12hour | 180sec | $L_r \cdot H_r^{-0.5}$ |
| 流速   | 40cm/s | 1cm/s  | $H_r^{0.5}$            |

また、境界の渦点は0.2cm毎に設置し、394個の渦点でグチ式造流堤を再現している。

計算は2次元であるので、潮汐によるグチ式造流堤への流入流出はグチ式造流堤の中央部に水位の変化速度とグチ式造流堤が囲い込む面積をかけた大きさの吸い込みやわき出しを造流堤内部に配置することによって与えている。任意のパラメータとして、乱流拡散係数 $\nu_t$ と渦放出高さ $\epsilon$ があるので、表-7に示すような計算ケースを設定した。

表-7 計算ケース一覧

|            |      | $\nu_t$ |       |      |      |
|------------|------|---------|-------|------|------|
|            |      | 0.001   | 0.005 | 0.01 | 0.05 |
| $\epsilon$ | 0.1  | g61     | g62   | g63  | g64  |
|            | 0.05 | g71     | g72   | g73  | g74  |
|            | 0.2  | g81     | g82   | g83  | g84  |

(2) フローパターンの比較

計算開始100秒後の渦分布を比較すると、図-22のようになる。乱流拡散係数 $\nu_t$ を高めると渦が拡散せず、最初に放出された渦を中心にして双子渦が移流されていくようになる。 $\epsilon$ を大きくすると、開口部から相対して放出される渦間隔がせばまるので、中心流速が増加する。一般に、 $\nu_t$ が小さい場合には、染料拡散の結果に良く似た分布図が得られている。このことから、定性的に噴流状の流出をシミュレートできていることが判る。

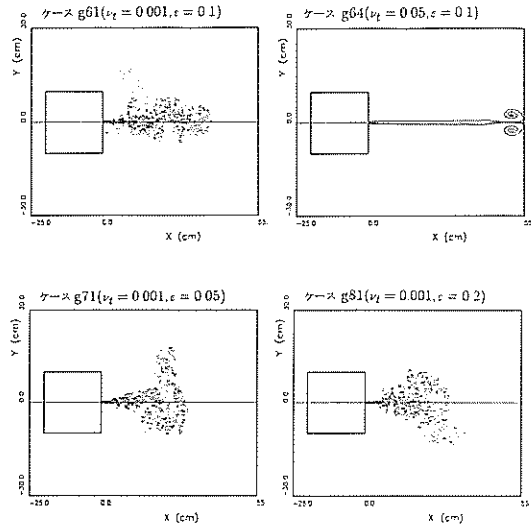


図-22 離散渦法によるフローパターンの比較

(3) 流速分布の比較

図-23は、ケースg61, g71, g81の中心流速の分布を示している。プロットは実験値であり、実線は計算値である。計算値の流速データは計算開始後60秒から100秒までの間の平均流速を表示している。流速の絶対値は合っていないが、変化の傾向は再現されている。

図-24は、 $x = 1 \text{ cm}$ 、図-25は、 $x = 15 \text{ cm}$ の地点の横断方向の流速分布を示している。プロットは、実験値であり、実線は、計算値である。流速分布の形を見るために、縦

軸に最大流速で無次元化された流速と横軸に最大流速の1/2となる $y$ の値で無次元化した距離を表示している。これらの図から、流出直後では噴流の流速分布が良く一致しているが、噴流の流下に従って微小な流速の再現がうまく行っていないことが判る。この理由としては、2次元計算と3次元水理模型実験におけるエネルギー減衰過程の本質的な違いや、噴流の境界面でのせん断流によるエネルギー減衰といった計算モデルに組み込まれていない機構による違いではないかと予想される。

以上のように、離散渦法による数値計算手法は、結果において定量的な違いがあるものの、パラメータを適切に与えることで、定性的に噴流強度の違い等を比較できる計算手法であることが確認された。

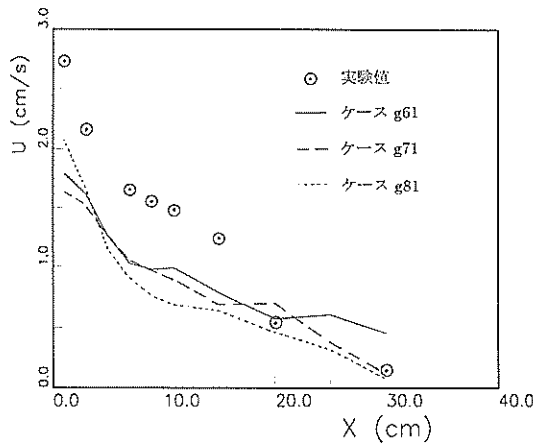


図-23 離散渦法による中心流速の比較

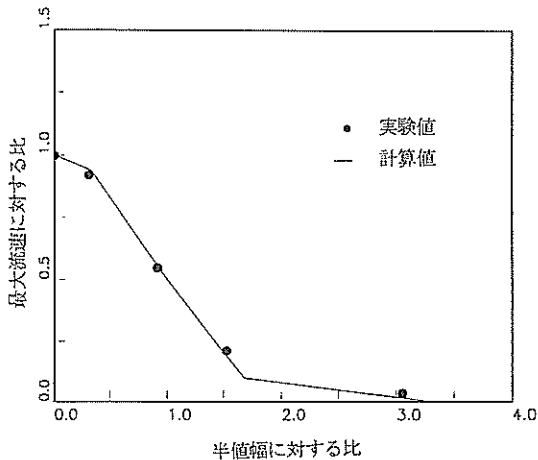


図-24 離散渦法による横断流速の比較 (X = 1 cm)

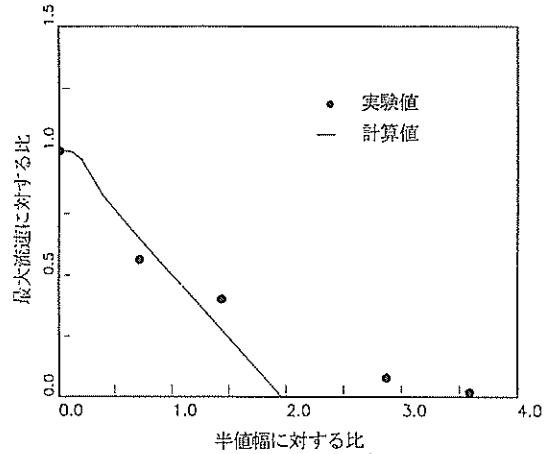


図-25 離散渦法による横断流速の比較 (X = 15 cm)

### 5.3 数値計算によるグチ式造流堤の諸元の決定法に関する考察

#### (1) 本計算方法の問題点

離散渦法は実験値を定性的に再現できる計算法であることが示された。しかし、定量的なシミュレーション手法として利用するにはいくつかの問題点を解決する必要がある。

渦の粘性拡散の効果が放出からの時間と拡散係数のみで表示されているので、空間的な、例えばシアーによる拡散効果などが導入されていない。これは渦の移流時にシアレイヤー近傍での流速の空間的变化による渦中心位置の移動誤差として陰に取り込まれているが、それだけでは不十分であり、さらなる検討が必要である。

離散渦法の計算時間は、渦点の数の2乗に比例して増大するので、長時間の計算結果を得るためには、渦点の増加を途中で相殺することを考える必要がある。方法としては、渦の融合過程をモデル化し、接近した渦を1つにまとめることや、計算対象領域から大きくはずれた渦群を代表渦で置き換える方法等が考えられる。これらの手法に対する一般的な解決方法はまだ提案されておらず、渦の取りまとめ方で計算結果が左右される危険性もあるので、基礎的な検討が必要である。

上記の計算時間にも関連するが、離散渦法を用いた場合、グチ式造流堤単体の周りの流れの予測は容易である。しかし、周辺海域の境界条件を考慮するためには、さらなる計算方法の拡張が必要である。離散渦法は、従来の計算方法によって代わるものではなく、従来の計算方法を支援する方法として考えることが有効な利用方法である。

(2) グチ式造流堤の諸元の決定法

流出流速を指標としたグチ式造流堤の諸元の決定方法の概要を示す。その中で、いままで検討された離散渦法の利用範囲や、実験結果の活用について考察してみる。

諸元の決定方法として図-26のような手順が考えられる。

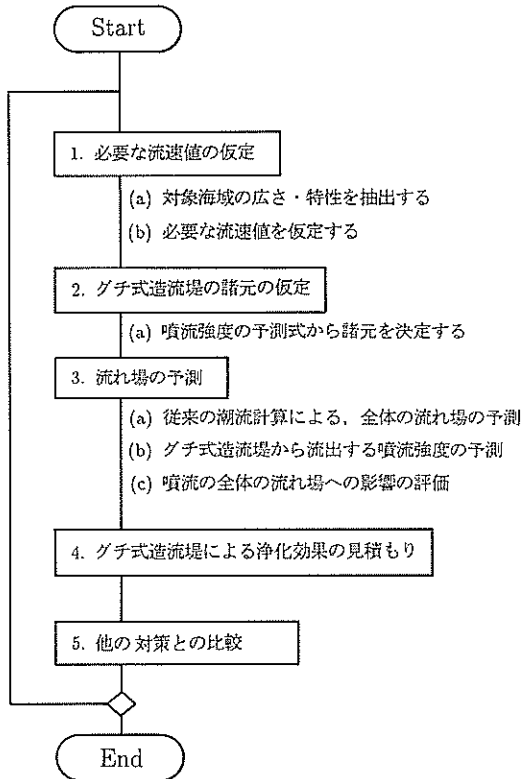


図-26 グチ式造流堤の諸元決定の手順

まず、グチ式造流堤の諸元を決定するための条件を明確にするために、対象海域の特性を把握し、必要な流速値を仮定する。その流速を得るために必要なグチ式造流堤の規模は式(10)を用いて決定できる。ただし、定式化の精度についてはより詳細な検討が別途必要である。

仮定されたグチ式造流堤を用いて水理模型実験または数値計算により流れ場の予測を行う。数値計算により予測する際には、全体の流れ場は従来の潮流計算により求められ、グチ式造流堤近傍の流れについては、本論文で提案した離散渦法等を用いて詳細に検討することができる。離散渦法だけで全体の流れ場を予測することは不可能ではないが、多くの計算時間を費やすことになるので好ましくない。それよりは、従来の潮流計算で計算できない局所的な流れを解いておき、パラメータや境界条件

の形で反映させることが適当と考えられる。

最後に、計算または実験により求められた流れ場によって浄化効果がどの位になるのかを検討し、他の手法による対策との比較を行うことによって選択されたグチ式造流堤の採択を決定する。しかし、浄化効果の見積もり方法はそれ自体が非常に難しい。4.3で用いられたトレーサ追跡によるフローパターンの検討方法を応用し、滞留時間を比較することもひとつの方法である。仮に図-3に示された海域について試計算を行うと、以下ようになる。条件は設置水深3～5m、潮位差86cm、グチ式造流堤の面積40,000m<sup>2</sup>、開口部幅5mである。式(10)によれば、流出流速は、16～25cm/sとなり、その影響範囲は約200m程度と予測される。また、 $\sigma$ を10程度と仮定すると、造流堤により移流されたアオサは造流堤の開口部から100～200mで幅10～20m位の所に集められる可能性がある。

6. まとめ

本論文では、グチ式造流堤を海域の浄化方策として利用する際に、検討の根拠となる流れについて、水理模型実験と数値計算により検討した。

主な結論を以下に列挙する。

- (1) 水理模型実験によりグチ式造流堤は開口部前面に一方向流れを起こすことが確認された。
- (2) 下げ潮時におけるグチ式造流堤からの流出流は、2次元自由噴流の流速分布で近似できたが、流れの特性量は異なっている。
- (3) グチ式造流堤から流出する流れの強度を推定する実験式を提案した。
- (4) 流出流を噴流で近似した場合の広がり角は、流下にしたがって小さくなっていく。
- (5) 流出流の空間分布を予測するために開発した数値計算手法は流出流の形を定性的に推定するのに応用できる。

グチ式造流堤の造流効果を見積もるため水理模型実験や数値計算を行った結果、1方向に造流された流れによって海域の浮遊物や懸濁物質を移流させることができ、海域の浄化方策として利用できる可能性が認められた。

本論文では、モデル化されたグチ式造流堤に限って検討を進めてきたが、ここで用いられた検討手法が応用できる問題は少なくない。例えば、港などが防波堤によって囲込まれている場合には、防波堤先端部付近で同様の現象が発生すると考えられる。また、生態系を考慮した構造物の検討や、人にやさしい港湾構造物の検討など

においては、より局所的な流れの解析が必要となってくることが予想され、離散渦法のような新たな計算手法の利用も必要となる可能性がある。

今回の検討では、局所的な流れにのみ着目したが、局所的な流れと大局的な流れの相互作用に関する研究も重要である。ミクロな問題である局所的な流れの研究を継続すると共に、どのようにマクロな視点からの研究と連携を取っていくかという問題が、今後の課題として残されている。

なお、本実験は国立機関公害防止等試験研究費「ウォーターフロントの開発における環境創造に関する研究」の一部として実施された。

最後に、本研究を取りまとめるにあたり、数多くの助言をいただいた当所海洋水理部長堀江毅博士、離散渦法の理論展開に関してご指導いただいた横浜国立大学工学部亀本喬司教授、その他関係各位に感謝します。

(1993年11月30日受付)

付録

水理模型実験の結果の参考として、残差流とトレーサの移流結果を示す。

a) 残差流

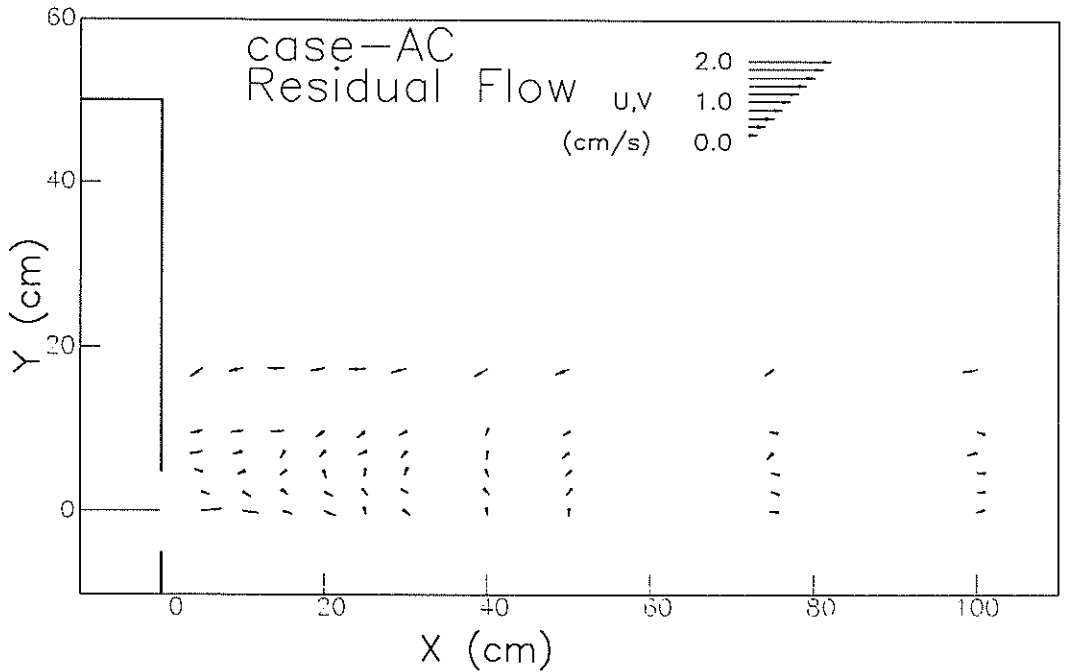


図-A 1 ケースACの残差流のベクトル図

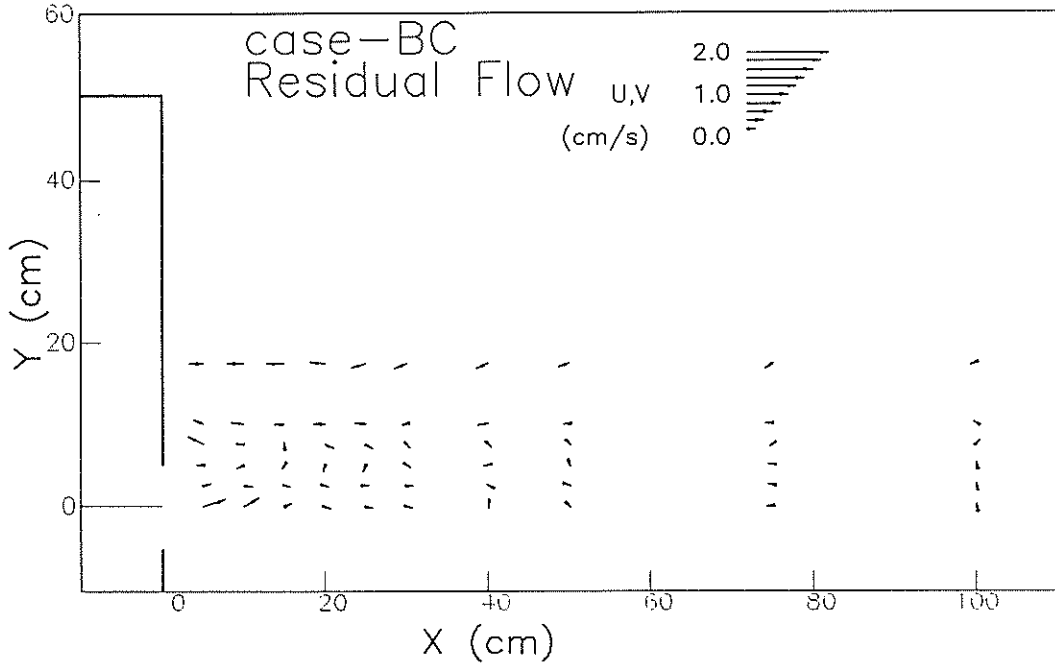


図-A 2 ケースBCの残差流のベクトル図

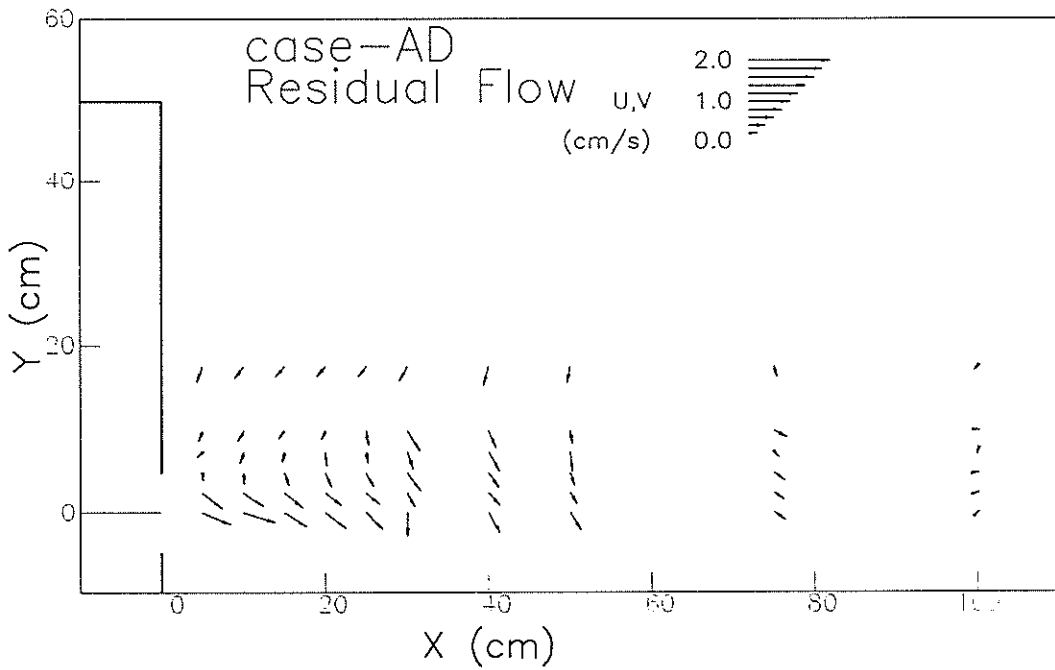


図-A 3 ケースADの残差流のベクトル図

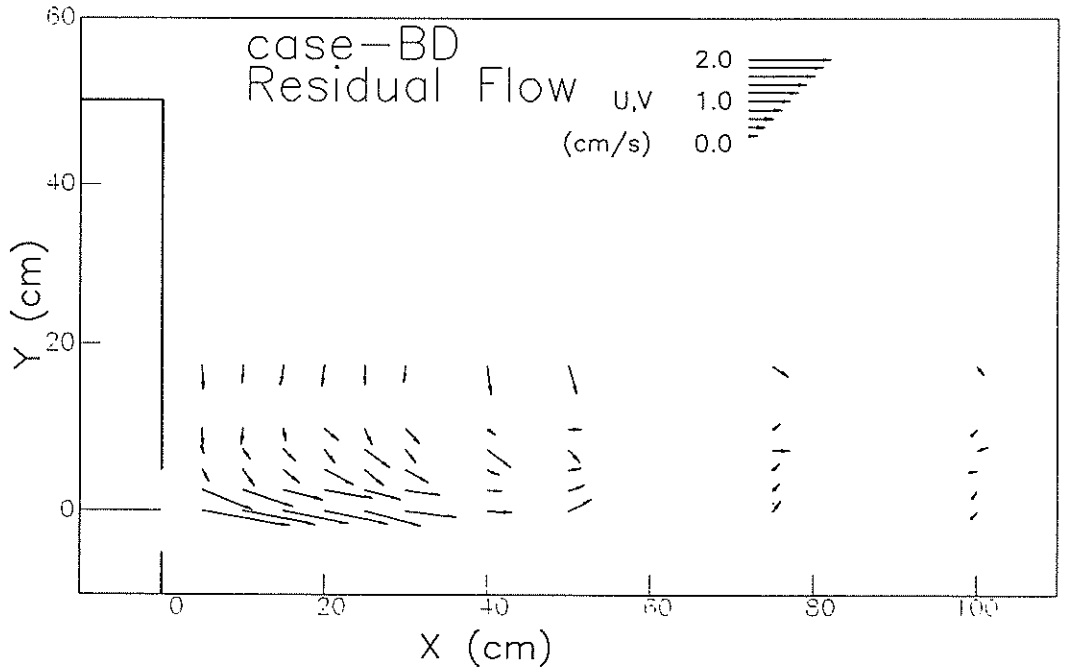


図-A 4 ケースBDの残差流のベクトル図

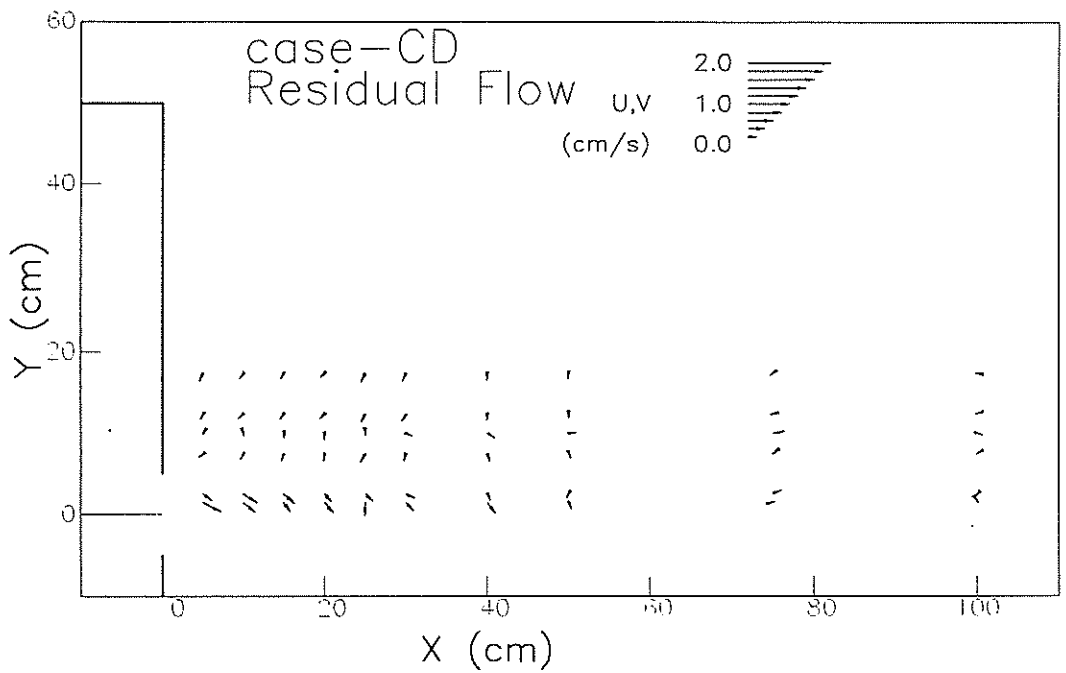


図-A 5 ケースCDの残差流のベクトル図

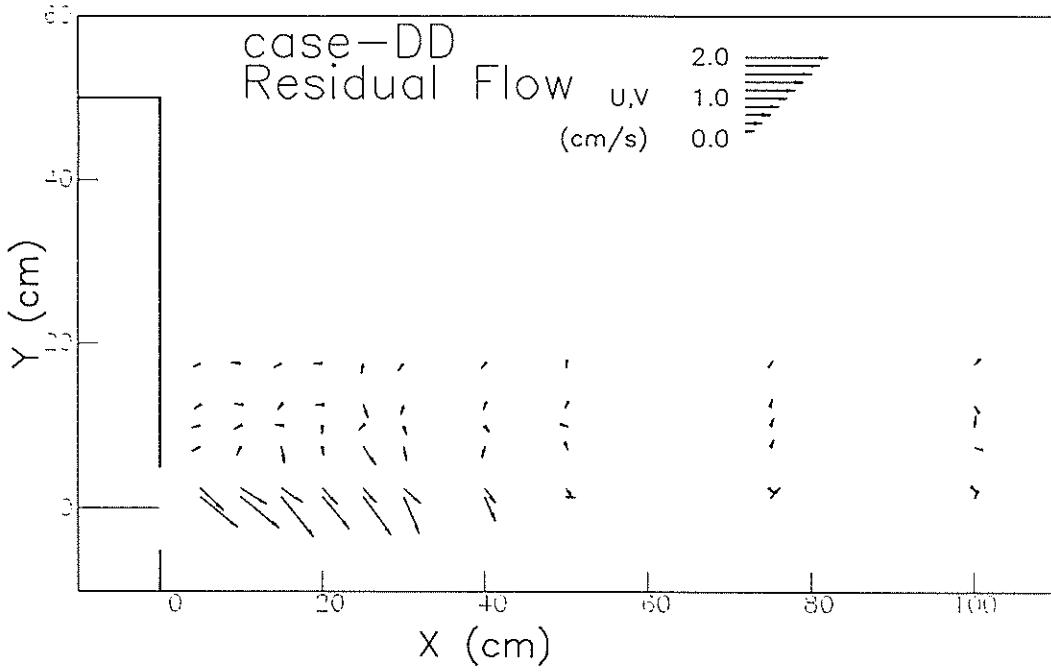


図-A 6 ケースDDの残差流のベクトル図

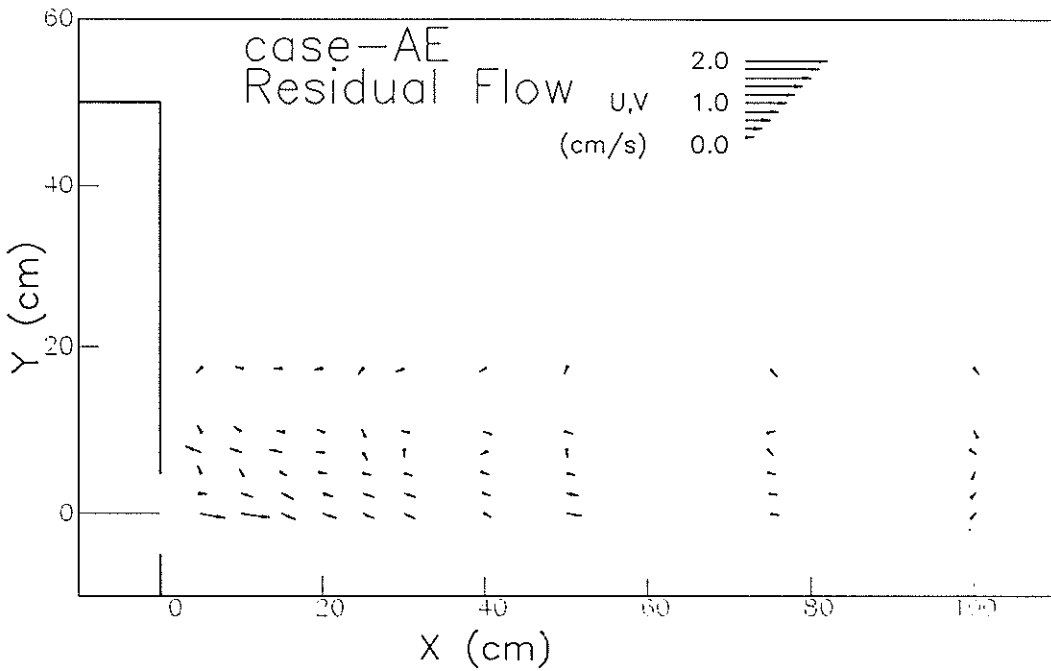


図-A 7 ケースAEの残差流のベクトル図



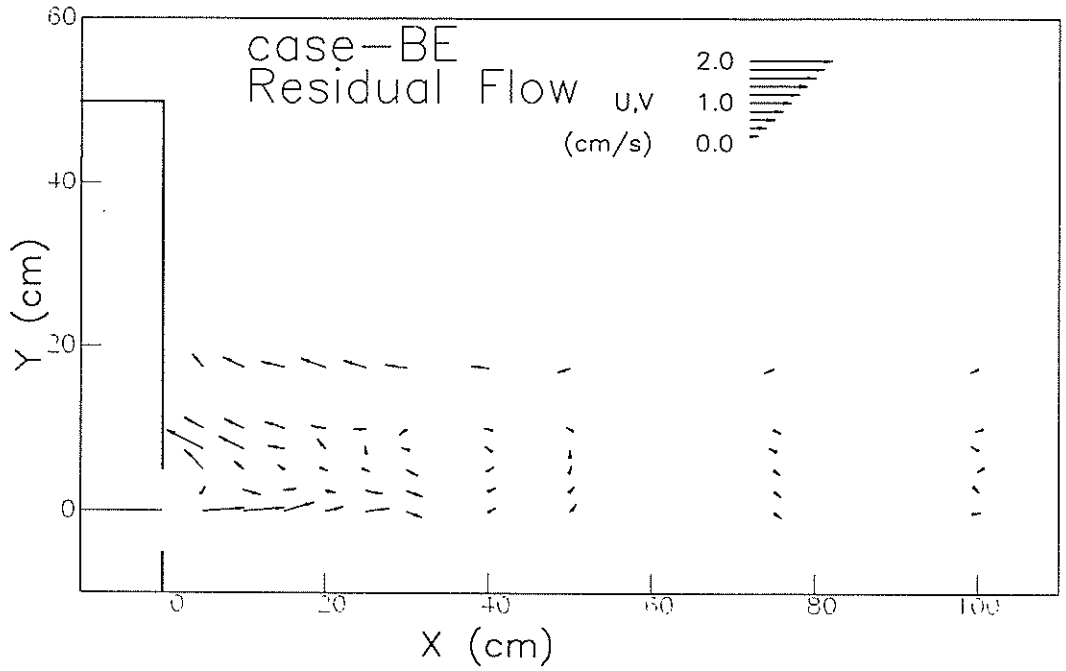


図-A 8 ケースBEの残差流のベクトル図

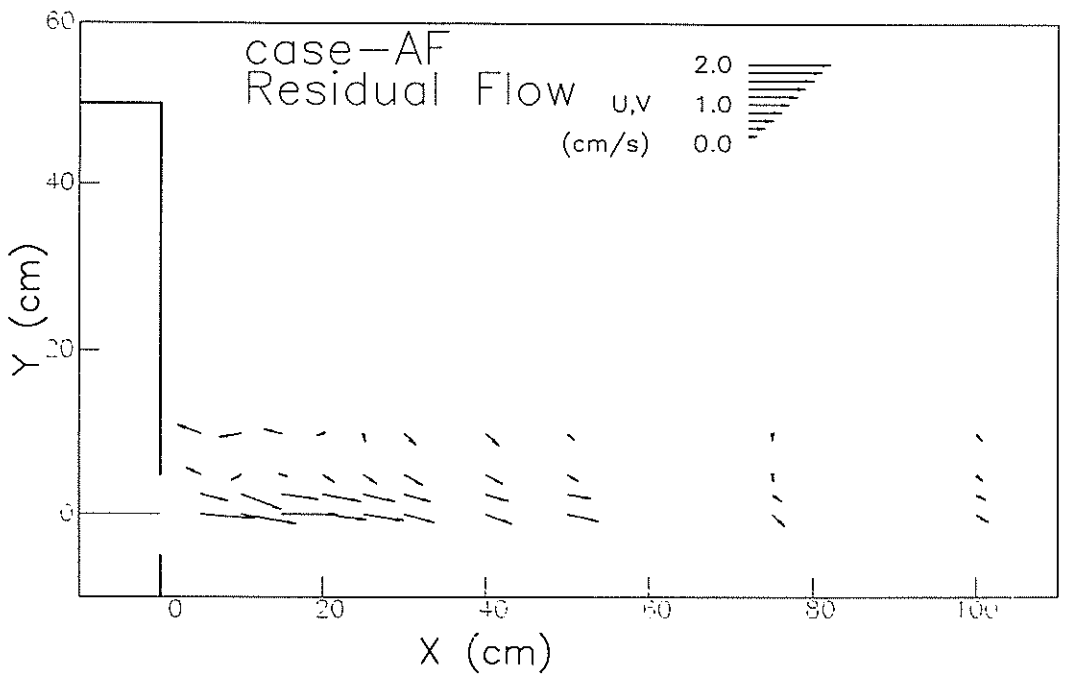


図-A 9 ケースAFの残差流のベクトル図

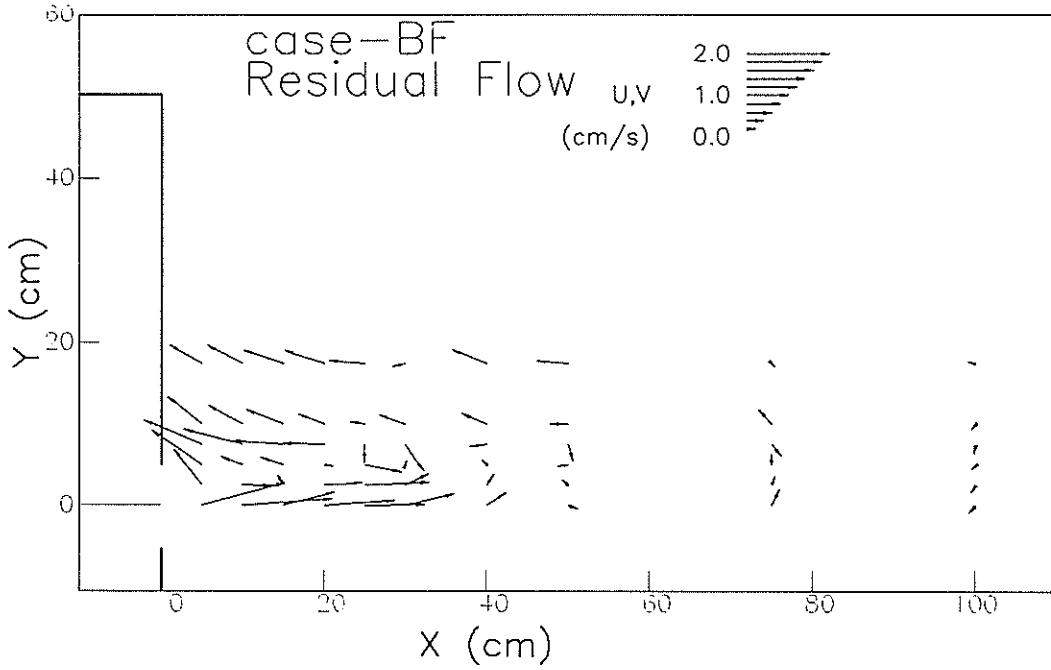


図-A10 ケースBFの残差流のベクトル図

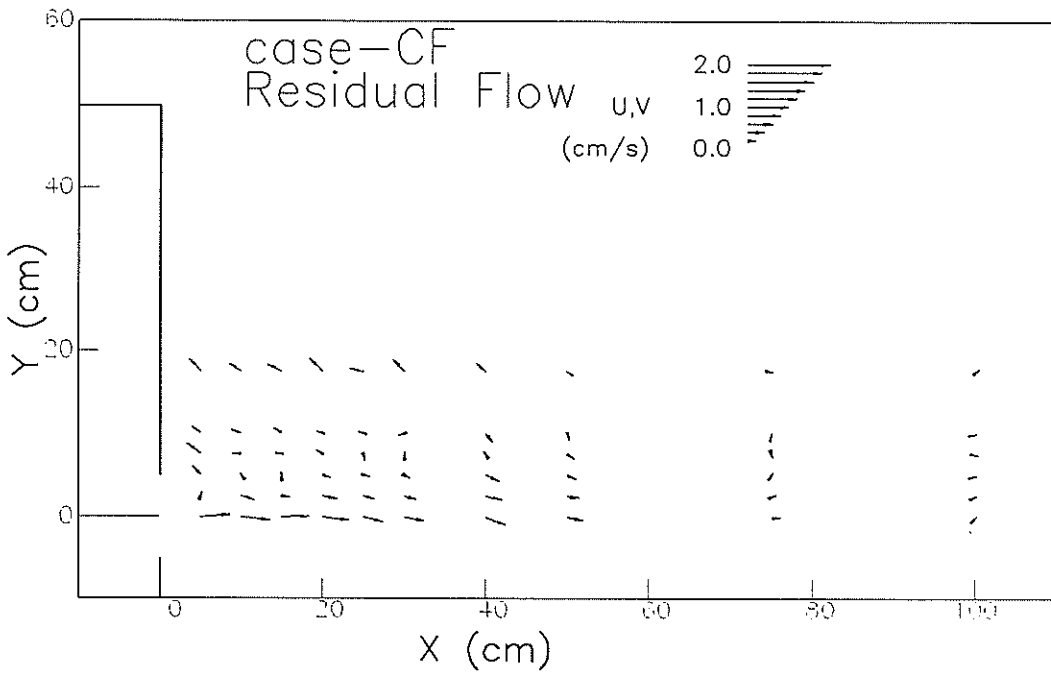


図-A11 ケースCFの残差流のベクトル図

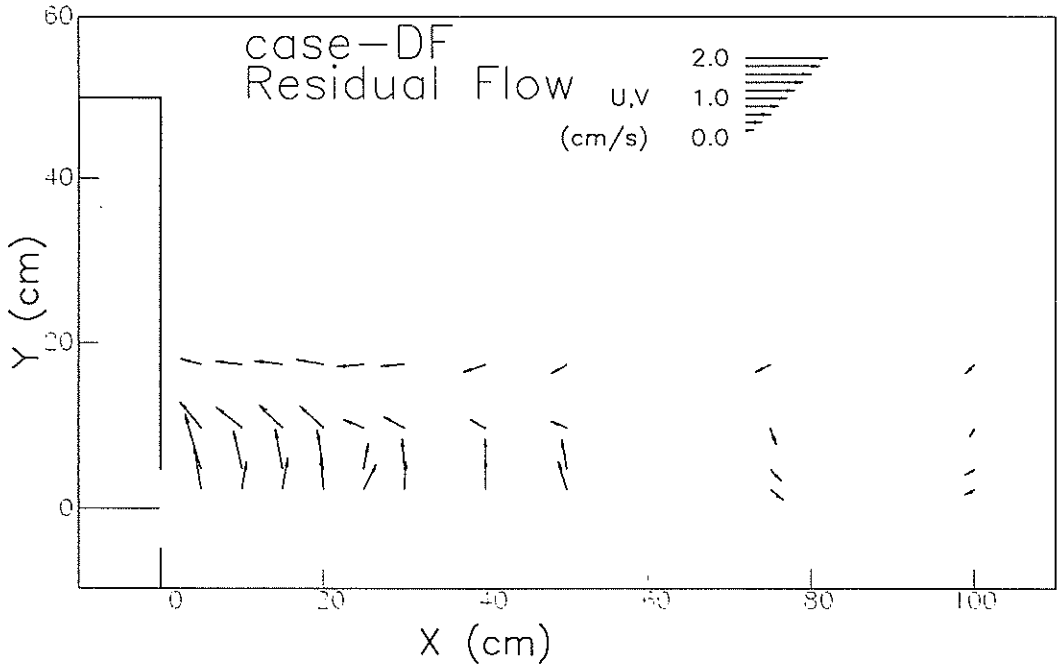


図-A12 ケースDFの残差流のベクトル図

b) トレーサの移流結果

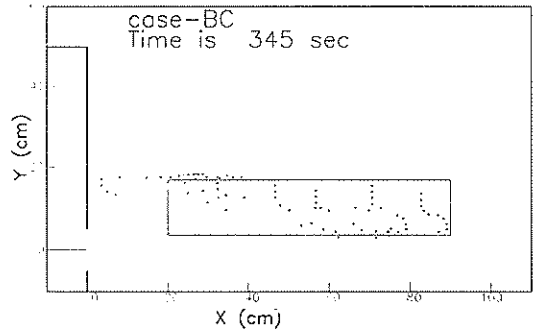
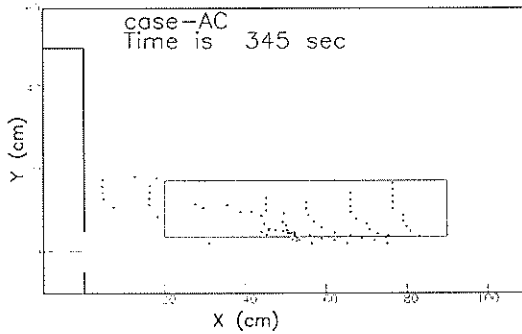
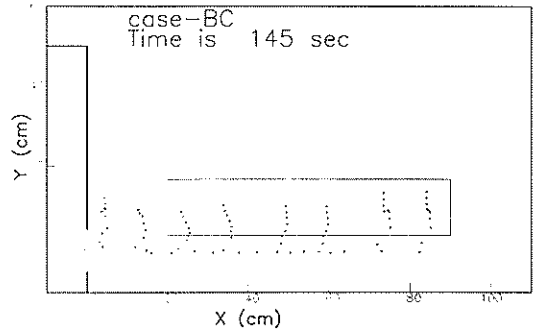
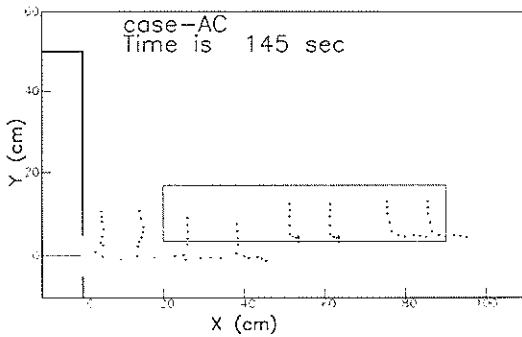


図-B1 ケースACのトレーサ移流結果

(下段：上げ潮最強時投入 上段：下げ潮最強時投入)

図-B2 ケースBCのトレーサ移流結果

(下段：上げ潮最強時投入 上段：下げ潮最強時投入)

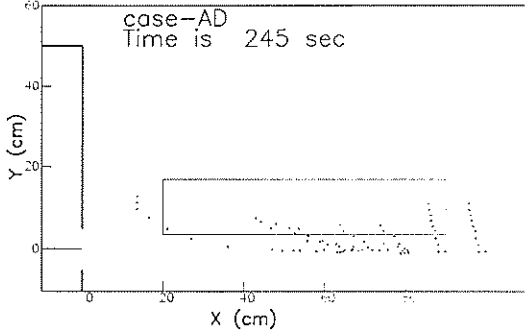
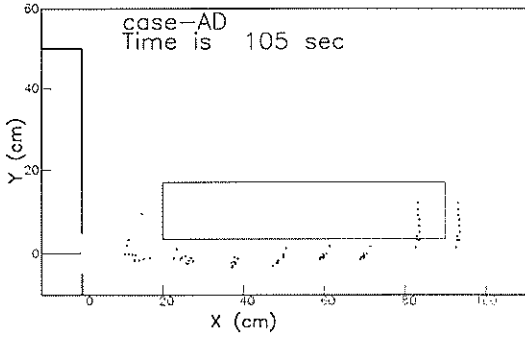


図-B 3 ケースADのトレーサ移流結果  
(下段：上げ潮最強時投入 上段：下げ潮最強時投入)

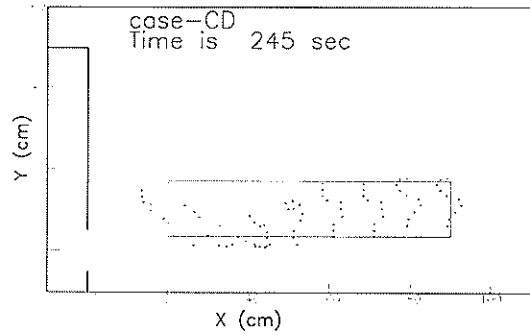
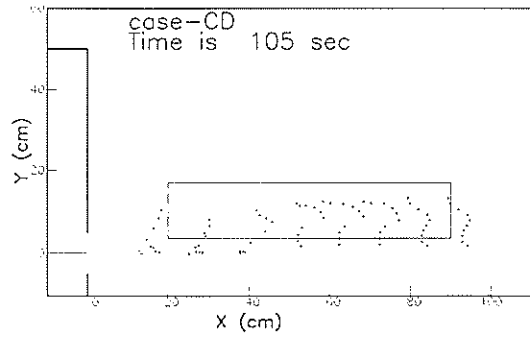


図-B 5 ケースCDのトレーサ移流結果  
(下段：上げ潮最強時投入 上段：下げ潮最強時投入)

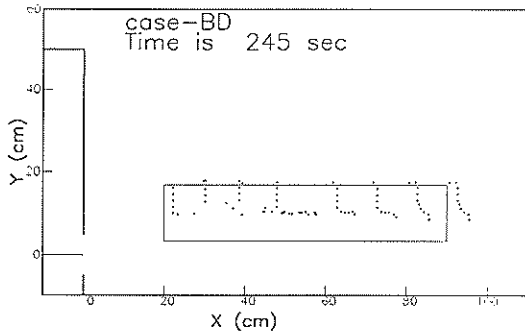
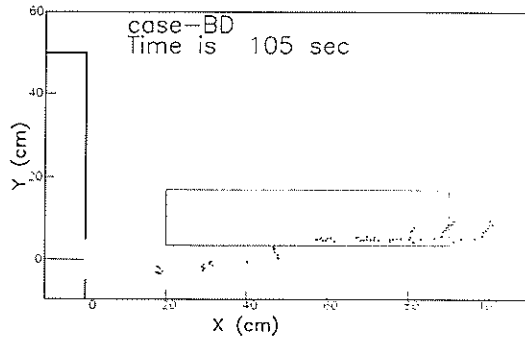


図-B 4 ケースBDのトレーサ移流結果  
(下段：上げ潮最強時投入 上段：下げ潮最強時投入)

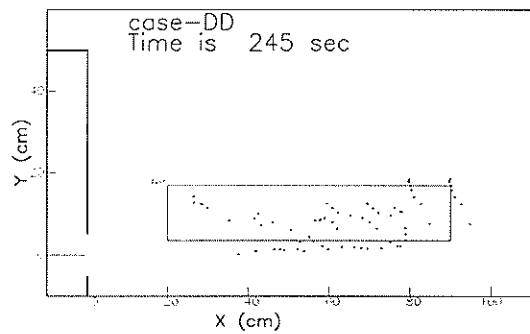
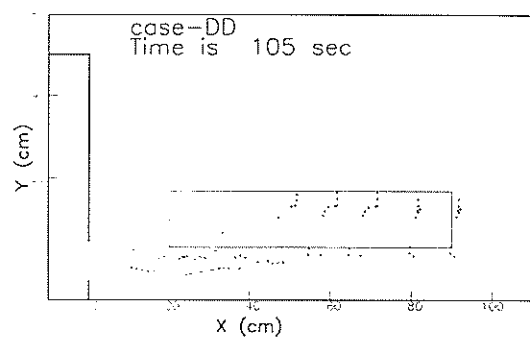


図-B 6 ケースDDのトレーサ移流結果  
(下段：上げ潮最強時投入 上段：下げ潮最強時投入)

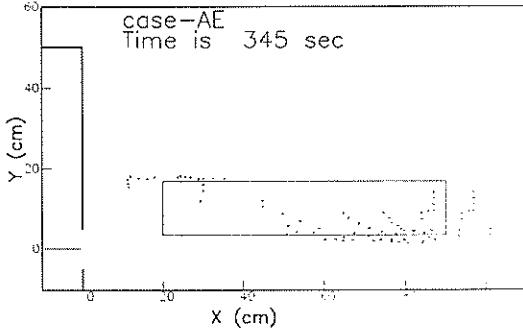
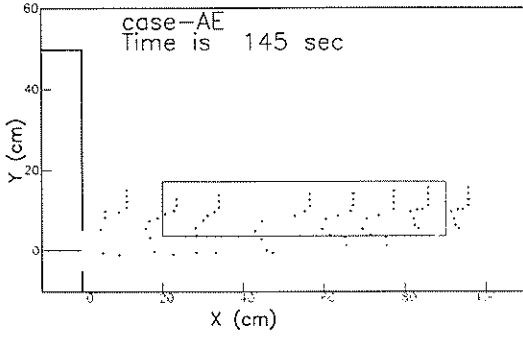


図-B 7 ケースA Eのトレーサ移流結果  
(下段：上げ潮最強時投入 上段：下げ潮最強時投入)

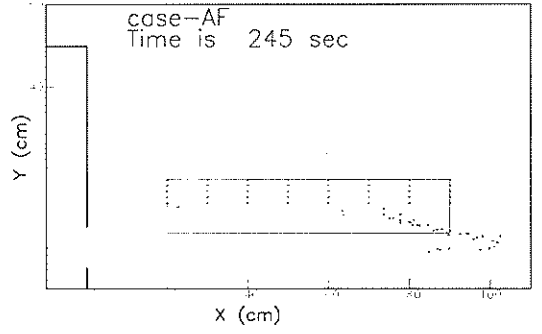
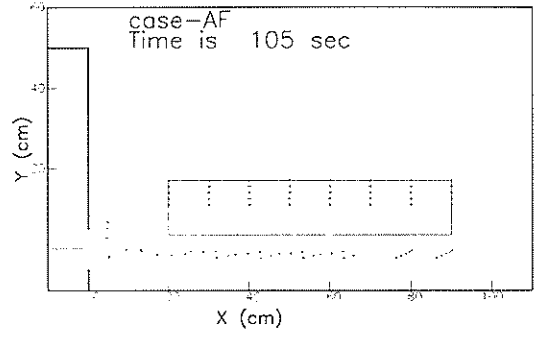


図-B 9 ケースA Fのトレーサ移流結果  
(下段：上げ潮最強時投入 上段：下げ潮最強時投入)

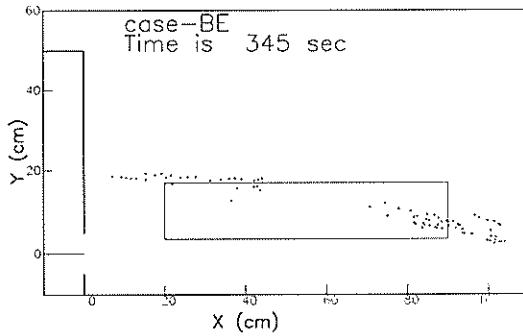
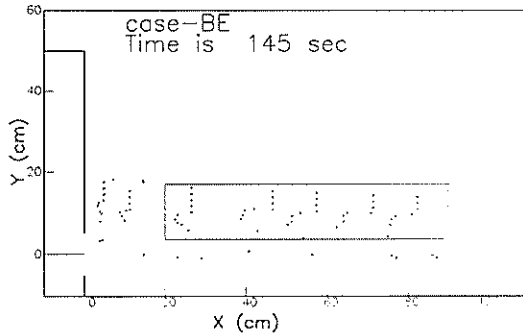


図-B 8 ケースB Eのトレーサ移流結果  
(下段：上げ潮最強時投入 上段：下げ潮最強時投入)

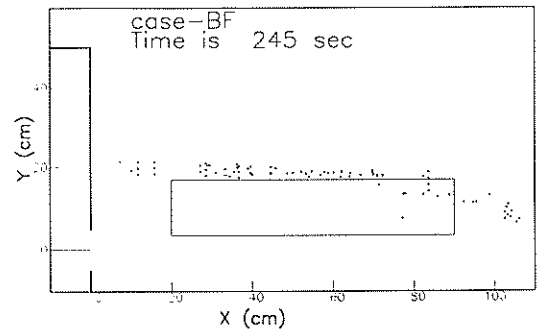
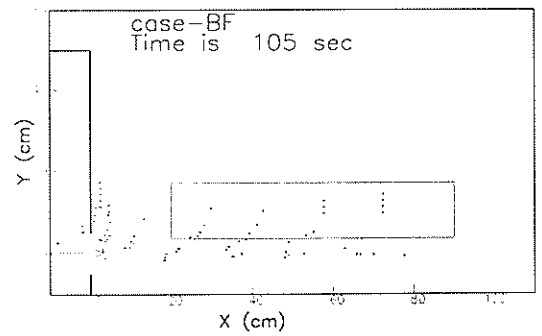


図-B 10 ケースB Fのトレーサ移流結果  
(下段：上げ潮最強時投入 上段：下げ潮最強時投入)

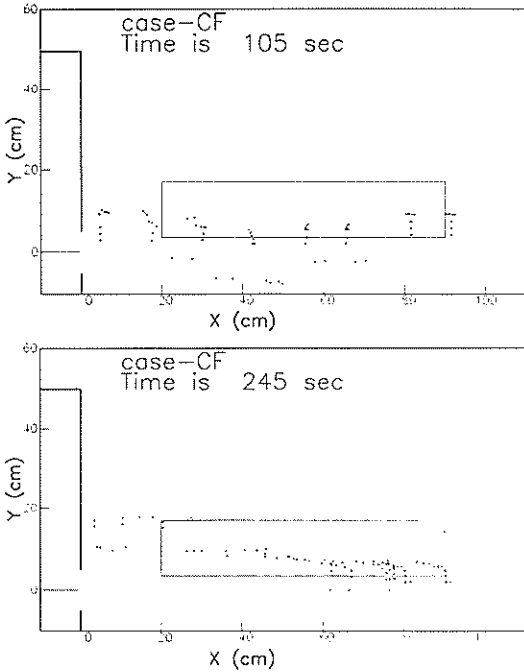


図-B11 ケースCFのトレーサ移流結果  
(下段：上げ潮最強時投入 上段：下げ潮最強時投入)

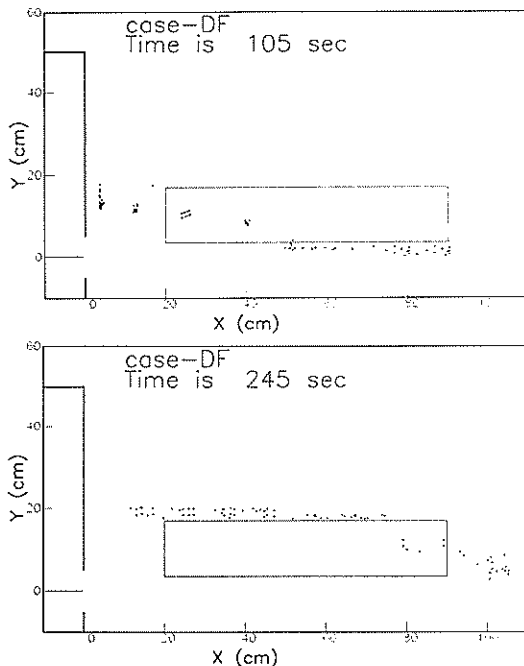


図-B12 ケースDFのトレーサ移流結果  
(下段：上げ潮最強時投入 上段：下げ潮最強時投入)

参考文献

- 1) シーブルー・テクノロジー研究委員会：シーブルー計画，239p.,1989
- 2) N. Rajaratnam, Turbulent Jets, Elsevier, 1976, (日本語版), 野村安正訳, 噴流, 森北出版株式会社, p.309,1981
- 3) 細川恭史・古川恵太：離散渦法による構造物周りの流れシミュレーション, 港湾技術研究所報告, 第30巻, 第2号, pp.155-209,1991
- 4) FURUKAWA, K. and HOSOKAWA, Y.: Application of Discrete Vortex Method to 2D Turbulent Free Jet, Proceedings of the 5th International Symposium on Computational Fluid Dynamics, Vol. I, pp.235-240,1993

記号表

|            |                  |
|------------|------------------|
| $A$        | : グチ式造流堤の面積      |
| $B$        | : グチ式造流堤の開口部の幅   |
| $D/Dt$     | : 全微分オペレータ       |
| $D_n$      | : 無次元開口率         |
| $dH$       | : 潮汐振幅, 潮位差      |
| $dH_m$     | : 模型の潮汐振幅        |
| $dH_p$     | : 実海域の潮汐振幅       |
| $dH_r$     | : 潮汐振幅縮尺         |
| $H$        | : グチ式造流堤の設置水深    |
| $H_{mean}$ | : 測定時の平均水深       |
| $H_{obj}$  | : 実験条件設定水深       |
| $H_r$      | : 鉛直縮尺           |
| $L_r$      | : 水平縮尺           |
| $P$        | : 水圧             |
| $r$        | : 渦糸中心からの距離      |
| $r_0$      | : 誘起流速が最大となる $r$ |
| $T_m$      | : 模型の潮汐周期        |
| $T_p$      | : 実海域の潮汐周期       |
| $T_r$      | : 時間縮尺           |
| $u_r$      | : 渦の誘起する速度の回転成分  |
| $U$        | : 補正流速           |
| $U(x, y)$  | : 各測点の補正流速       |
| $U_0$      | : 開口部直前の流出流速     |
| $U_{0max}$ | : 開口部直前の流出流速の最大値 |
| $U_{mean}$ | : 測定平均流速         |
| $U_n$      | : 無次元流速          |
| $U_r$      | : 水平流速縮尺         |

|                 |                    |
|-----------------|--------------------|
| $u$             | : 流速ベクトル           |
| $V_m$           | : 模型の水面変動速度        |
| $V_{mmax}$      | : 模型の面変動速度の最大値     |
| $V_p$           | : 実海域の水面変動速度       |
| $V_{pmax}$      | : 実海域の水面変動速度の最大値   |
| $V_r$           | : 鉛直流速縮尺           |
| $x, y$          | : 平面座標             |
| $\alpha, \beta$ | : 実験定数             |
| $\Gamma$        | : 渦強度              |
| $\varepsilon$   | : 渦を放出する高さ         |
| $\nu$           | : 粘性拡散係数           |
| $\nu_t$         | : 乱流拡散係数           |
| $\rho$          | : 流体密度             |
| $\sigma$        | : 噴流の広がり角に関するパラメータ |
| $\omega$        | : 渦度               |