

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. 16      NO. 2      JUNE 1977

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN



# 港湾技術研究所報告 (REPORT OF P.H.R.I.)

第16巻 第2号 (Vol. 16, No. 2), 1977年6月 (June 1977)

## 目 次 (CONTENTS)

1. Numerical Experiments on Statistical Variability of Ocean Waves  
.....Yoshimi GODA..... 3  
(波浪の統計的変動性に関する数値実験.....合田良実)
2. レクリエーション海浜における突堤・離岸堤の汚濁拡散に対する影響  
.....佐藤昭二・木村久雄・高松恭文.....27  
(Influence of Groins and Offshore-breakwaters on Pollutant Diffusion in Recreational  
Beach .....Shoji SATO, Hisao KIMURA and Kiyobumi TAKAMATSU)
3. 港湾貨物の背後圏の合理的設定法に関する統計的研究  
.....稲村 肇・山田尚人・金子 彰.....63  
(Statistical Study on the Rational Setting Method of the Hinterland of the Cargo  
..... Hajime INAMURA, Hisato YAMADA and Akira KANEKO)

## レクリエーション海浜における突堤・離岸堤の 汚濁拡散に対する影響

佐藤 昭二\*・木村 久雄\*\*  
高松 恭文\*\*

### 要 旨

砂浜は背後海浜を波浪などから防護し、レクリエーションの場として役立ち、魚貝の生育場として重要な役割を果たし、そして海水の水質浄化に役立っている。このため、最近砂浜の重要性が再認識され、その保全のみならず、人工海浜の造成工事も多くなってきている。このような砂浜を波や流れによる侵食から防ぐために、突堤や離岸堤を建設することが多い。しかし、この侵食対策工としての突堤や離岸堤の設置は、堤内の海水を停滞させるおそれがある。特に、レクリエーション海浜においては、夏期は比較的水温が高く、波もない上に海水浴客の有機汚染物の放出も加わるので、この海水の停滞については留意する必要がある。

本研究では、平行直線状の等深線をもつ海浜をモデルとして取り上げ、潮流による汚濁拡散に与える突堤や離岸堤の影響を調べた。まず、水理模型実験によって定常流の実験を行ない、その結果を参照して定常流および非定常流の数値シミュレーションを行なった。数値シミュレーションでは、流速分布が水理模型と類似にするために汀線に近いほど chezy の流速係数が小さくなるような式を提案し、潮汐変動を与えるために沖側境界で弱い流れを流し出す方法を提案した。汚濁は汀線に投入しその拡散に関して突堤のみの場合、突堤の先端に離岸堤を設けた場合、突堤間に離岸堤を設けた場合について比較検討した。その結果、(1) 突堤間に離岸堤を設けると、潮流が小さい時は突堤のみの場合より汚濁拡散が悪いが、速い時には突堤のみの場合よりよいこと。(2) 離岸堤を突堤の前面に設けると常に突堤のみの場合より汚濁拡散は悪くなること。(3) 離岸堤は突堤を結ぶ線より少し沖側に建設した方が堤内の汚染拡散に良いこと。(4) 水面近くに孔をあけたスリット式の離岸堤は特に波があるとき汚濁拡散に有効であることなどを明らかにした。また、流速分布についても詳細に調べ汚濁拡散状況と比較した。

\* 海洋水理部長

\*\* 海洋水理部 水理研究室

## Influence of Groins and Offshore-breakwaters on Pollutant Diffusion in Recreational Beach

Shoji SATO\*

Hisao KIMURA\*

Kiyobumi TAKAMATSU\*\*

### Synopsis

In recreational beach, groins and offshore-breakwaters are often constructed to protect the shore from erosion by waves. But, such structures are feared to obstruct smooth flowing of tidal currents and to stagnate polluted water near to the shore, especially in summer when sea is calm.

In this paper, taking the beach of which equi-depth lines are parallel each other, influence of groins and breakwaters on dispersion of pollutant discharged on the shoreline are researched using hydraulic and numerical models. Hydraulic model test was conducted against various arrangements of groins and breakwaters under a constant current. Numerical simulation was conducted using ADI-method under cyclic tidal current in addition to the same constant current as the hydraulic model test.

As the results, the followings are founded on the influence of groins and offshore-breakwaters:

- (1) Groins obstruct the smooth flowing of tidal currents to stagnate pollutant near the groins.
- (2) Offshore-breakwaters placed between groins strengthen the offshoreward currents along the groins to disperse pollutant more offshorewards than the groins only, except when the current is very weak.
- (3) Offshore-breakwaters placed in front of the tip of groins furthers the stagnation of pollutant near to the groins and shoreline.
- (4) Offshore-breakwaters should be placed more offshorewards than the line connecting the tip of groins, from the view of prevention of stagnation of pollutant near to the shoreline.

---

\* Head of Marine Hydrodynamics Division

\*\* Member of Hydrodynamics Section, Marine Hydrodynamics Division

## 目 次

1. はしがき	31
2. 実験方法	31
2.1 実験装置	31
2.2 実験条件	31
2.3 測定方法	33
3. 実験結果	33
3.1 定常流の場合	33
3.2 定常流に波を加えた場合	37
4. 定常流に対する数値シミュレーション	40
4.1 数値モデルと入力および境界条件	40
4.2 連続区間の場合の結果	43
4.3 単区間の場合の結果	46
5. 非定常流に対する数値シミュレーション	48
5.1 入力および境界条件	48
5.2 計算結果	49
6. ま と め	56
参考文献	56
付 図	57

## 1. はしがき

海浜はそこに作用する波や流れのエネルギーを吸収あるいは減殺して背後海浜を防護する一方、レクリエーションの場として重要な役割を果たしている。特に、近年における経済的、文化的な生活水準の向上や都市生活の緊張に伴って、国民のレクリエーションに費やす時間が年々増加しており、そのレクリエーションの場の一つとして簡単に利用できる海浜の重要性が年々高まりつつある。また、砂浜の水質浄化能力にも注意が集まり、海水の水質浄化保全という観点からも砂浜の重要性が再認識されて来ている。このため、波浪等によって浜幅の少なくなった海浜に人工的に砂を補給して養浜をしたり、岩礁海岸や埋立地前面に人工海浜を作ることも行なわれるようになって来ている。

このような海浜を波や流れによる侵食から防護するために、突堤や離岸堤を建設することが多い。特に、養浜された海浜や人工的に建設した海浜では、台風や冬期風浪による砂浜の消失対策として突堤や離岸堤の建設は不可避である。しかし、この侵食対策としての突堤や離岸堤の設置は堤内の海水を停滞させ、前浜近くの海水を汚濁させるおそれがある。特に、海水浴シーズンにおいては、海水浴客による有機汚染物の放出に加えて海水の水温が高く、プランクトンの発育も高いので海水の停滞は一層海水を汚濁させることになる。また、夏期は波が小さいので、海水の交換や循環は主として潮流の作用によらざるを得ず、海水は汚染され易い状態となる。したがって、侵食対策工法としての突堤や離岸堤の海水交換に与える影響を把握しておくことが必要となる。

著者らは、この種の研究の手始めとして神戸市須磨レクリエーション海浜の養浜計画に基づく突堤や離岸堤の海水交換に対する影響を実験的に検討し<sup>1),2)</sup>、また青森市合浦レクリエーション海浜の実験では、既設の離岸堤の影響などについても検討した<sup>3)</sup>。そうして、突堤は汀線方向の潮の流れを阻害し、突堤付近に汚水を停滞させる傾向があるが、それに離岸堤を適当に配置すれば、堤内の海水循環を促進させ水質を改善できることもあることを示した。しかし、上述の実験は、ある特定の海域を対象とした定常流による実験であるので一般性に欠けている。そこで、本研究では、平行直線状の等深線をもつ海浜をとり上げ、突堤や離岸堤を数基並べた場合についての定常流実験と、その数値シミュレーション、およ

び潮汐変動を加えた非定常流の場合の数値シミュレーションを行なって、構造物の汚濁拡散に与える影響を調べた。

## 2. 実験方法

### 2.1 実験装置

実験は、当研究所の廻流装置を有する平面水槽内に図1に示すように模型を作って行なった。この模型海浜は直線平行等深線を持ち、その断面は図の左下に示すように、前浜で1/10、 $-0\sim 2$  cm で1/25、 $-5\sim 10$  cm で1/40 $\sim$ 1/60となっており、水深 $-10$  cmの等深線より沖側は水平となっている。この断面は、神戸市須磨海岸の平均的な断面を1/100に縮尺したものに相当する。模型床はモルタル刷け仕上げとし、白色ペイントを塗り、黒色ペイントで図示のように一辺1 mの格子を画き、縦方向に1から8横方向にAからUまで番号を付けた。

実験水は、模型床の下に設けてある低水槽から高水槽にポンプアップされ、バルブで流量を調整して図示の左側の樋頭水槽から供給した。樋頭水槽より流れ出た水は、約1 m間隔で区切られた可動堰で流量配分され、整流板を通して模型床部分に入る。そうして模型床を流れた水は右側の可動堰を越流して低水槽に戻る。模型水面は、この下流側可動堰によって調整される。写真1, 2および3はこの模型の状況を示す。

つぎに、実験に用いた突堤や離岸堤は木製で、その形状を図2, 3に示す。これらは接着ペーストで模型床に固定された。スリット式透過堤は水面付近に縦1 cm, 横2 cmの開孔を1 cmおきに設けたものである。

### 2.2 実験条件

図1に示した模型を現地の1/100縮尺と考え、水位を $+8.5$  mm, 流速を沖で5 cm/sec, 汀線近くで1 cm/sec前後の海岸に平行な定常流が起るように流量を調整した。この水位および流量は実験のすべてのケースを通じて同じに保った。そうして、構造物のない状態を現況とし、図4に示した各ケースの構造物配置について汚濁拡散に関する実験を行なった。この場合、突堤は図1の格子番号C, G, K, O, Sを通る縦線上に、離岸堤は番号6を通る横線上に設けた。各ケースとも突堤の長さは海岸線から125 cm,  $\pm 0$  cm線からは75 cmの一定であり、離岸堤は長さ100 cmのものと50 cmのものがあるが、各突堤間についての総延長は同じである。また、図3で点線は図2に示すスリット式透過堤であり、点線は不透

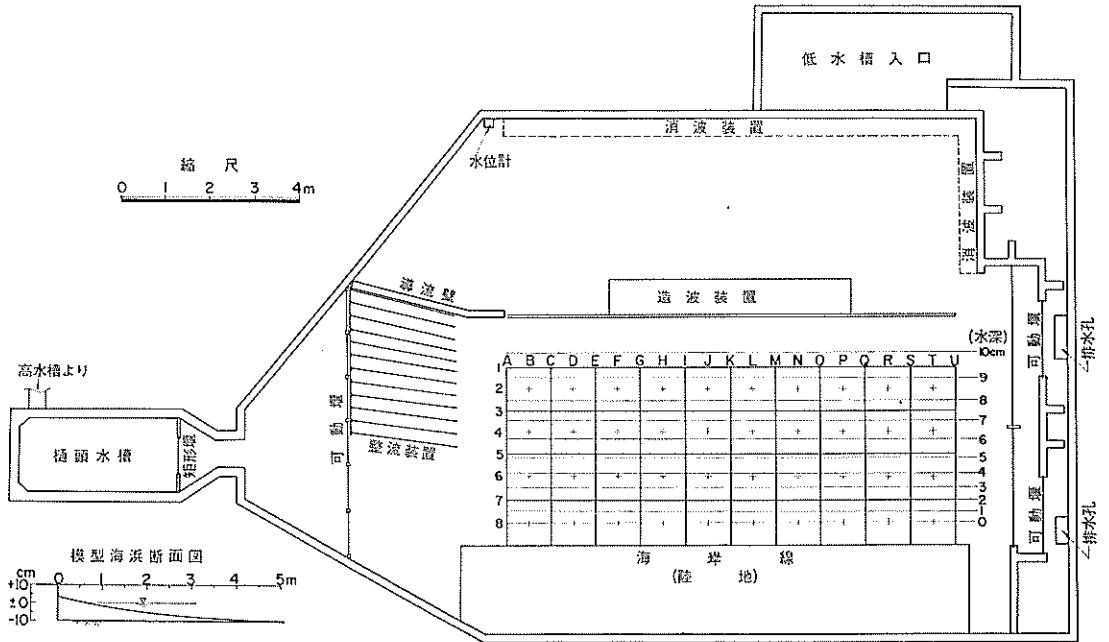


図1 実験水槽と模型

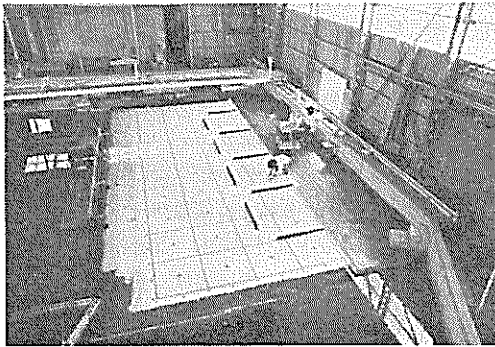


写真1 模型全体

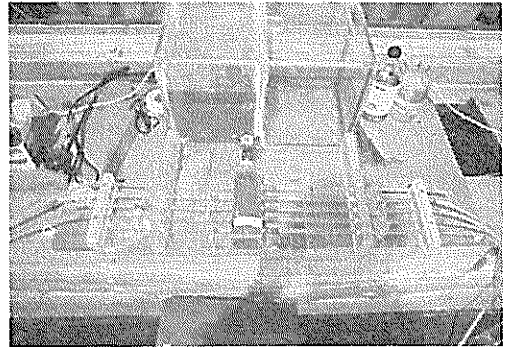


写真3 染料投入器

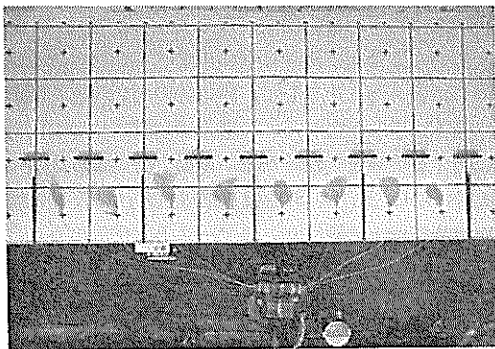


写真2 汀線からの染料投入

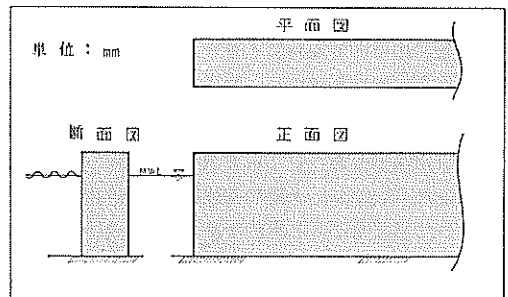


図2 不透過堤模型の形状

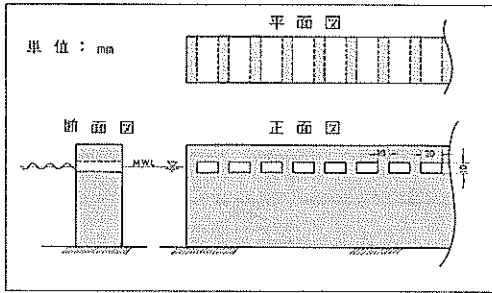


図3 透過堤模型の形状

過堤である。

以上のケースについて、上述した流れのみの場合およびその流れに加えて周期 0.8 sec、波高 5 mm の波を汀線に直角に作用させた場合について実験を行なった。周期を 0.8 sec、波高 5 mm をとしたのは、夏期の低いうねりを対象としたためであり、これは現地のそれぞれ 8 sec、50 mm に対応する。

### 2.3 測定方法

海水交換の状況を調べるために、500 ppm のウランニ染料液を汀線の 8 点、すなわち、格子番号 D, F, H, J, L, N, P および R を通る縦線と  $\pm 0$  cm の等深線の各交点の 8 点から同時投入した。投入は初めの 15 分間のみとし、その間に各点につき 200 cc ずつ投入した。染料の投入には写真 2, 3 に示したように染料液の入ったアクリル製矩形容器に 8 本のビニール管を接続したも

のをを用いた。各ビニール管の先端には径 1 mm の金属製ノズルを取り付け汀線の位置に固定した。矩形容器からの分岐点にはコックをとりつけ、液の流出量を調整した。

染料の拡散状況は、模型上 7 m の高さに固定した広角レンズカメラにより一定時間々隔でカラー撮影して調べた。このとき、模型面上に 100, 10, 1, 0.1 ppm の染料サンプルを置き、これを目安としてカラー写真から目視で濃度分布図を作成した。

また、流れの測定も随時行なった。流れの測定には径 10 mm のプラスチック製球 または 3 mm の発泡スチロール球を水面に投入し、一定区間のその流下時間をストップウォッチで測定した。

### 3. 実験結果

#### 3.1 定常流の場合

まず、先に述べたように、水位 +8.5 mm とし、流速が沖側で約 5 cm/sec、岸近くで 1 cm/sec 前後で、汀線に平行な定常流が得られるように流量や可動堰を調整した。この状態を現況と名付けることとする。この現況における流速分布を図 5 に示す。汀線では流速が 1 cm/sec 以下で沖向きの成分があるが、それ以外は、ほとんど海岸に平行な数 cm/sec の流れとなっている。図 6 は、このような流れの状態に先に述べたように汀線の 8 ケ所からウランニ染料液を投入した場合の濃度分布の時間変化を示す。図中の格子は図 1 に示した格子と一致し、

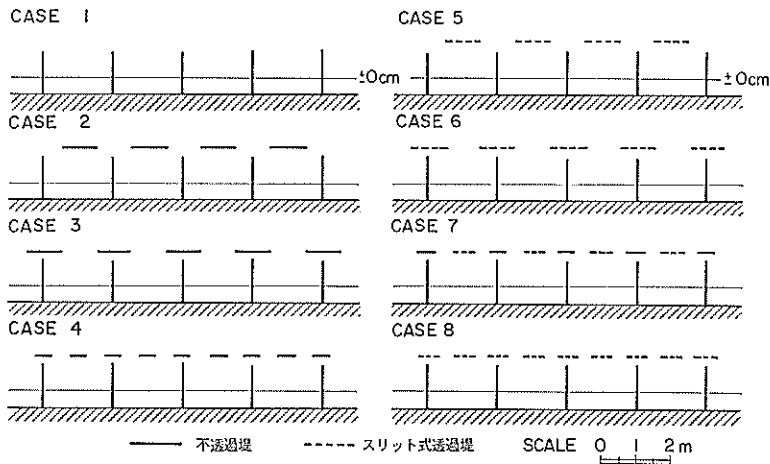


図4 各ケースについての構造物の配置



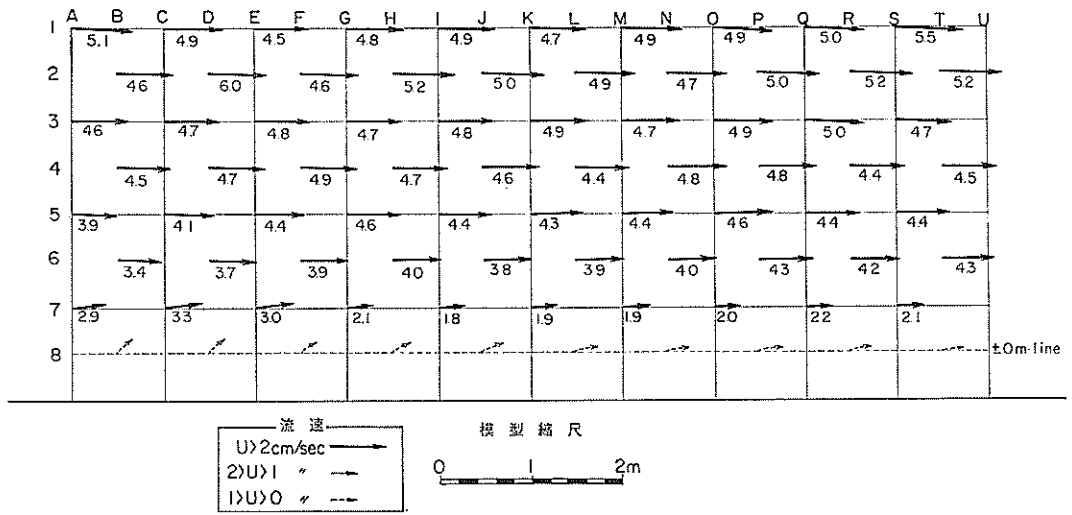


図5 現況の流速分布

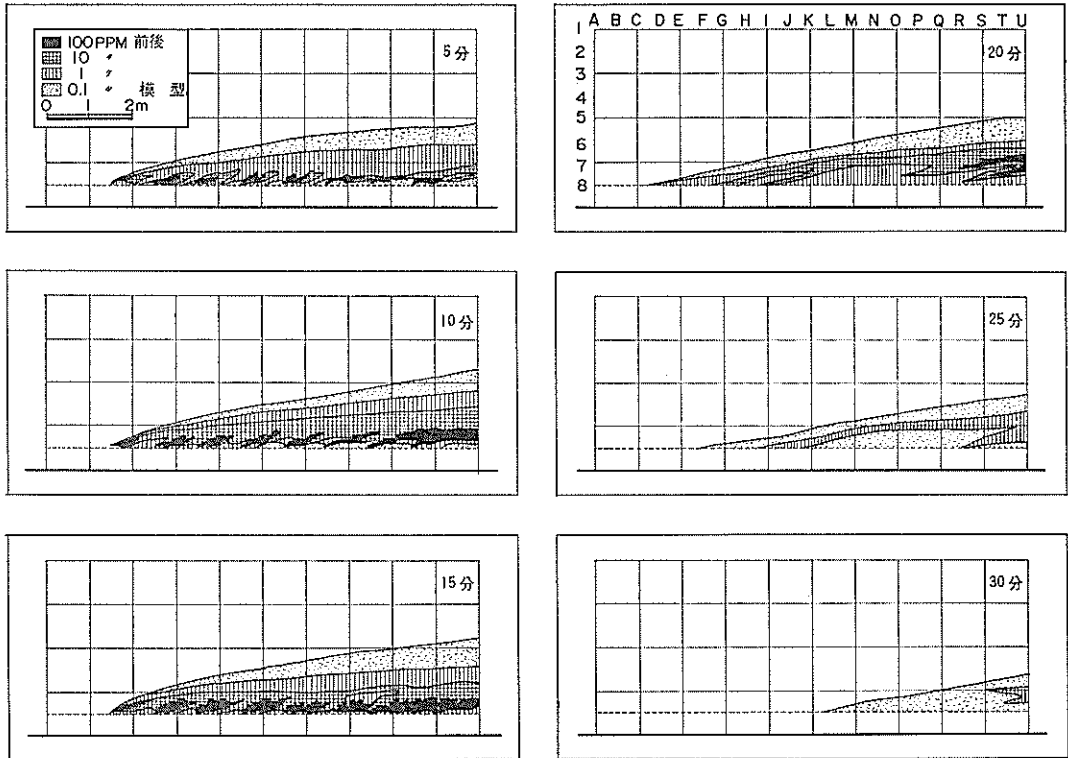


図6 現況の染料濃度分布の時間変化 (定常流)

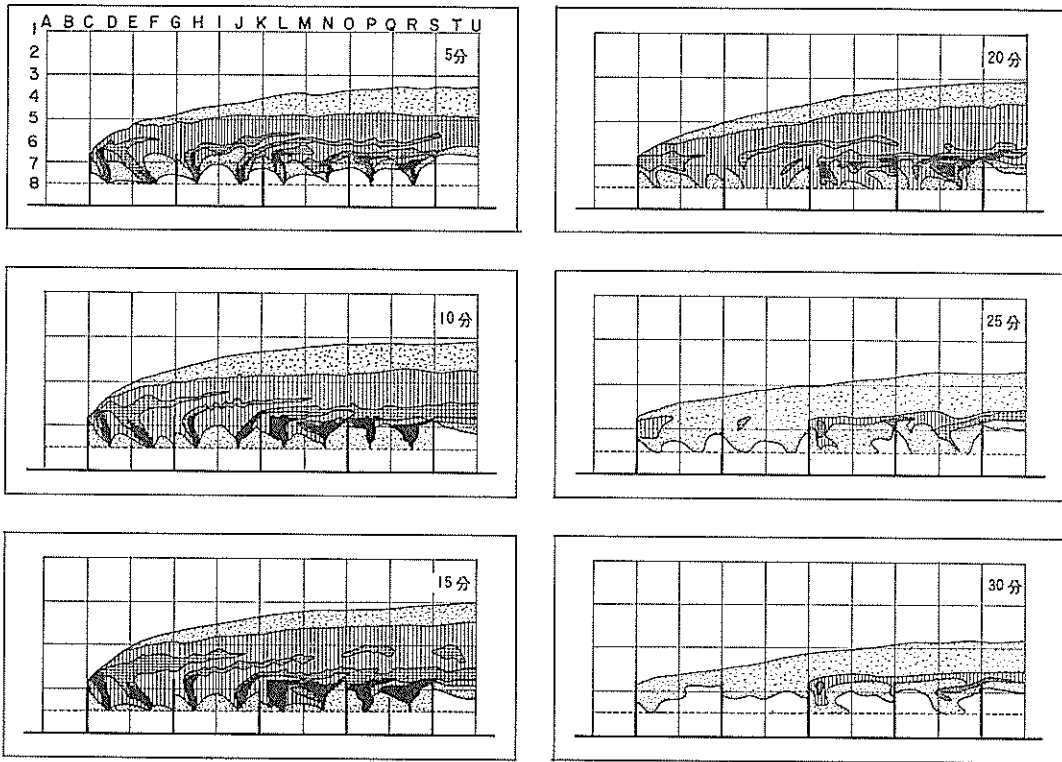


図7 ケース1の染料濃度分布の時間変化(定常流)

右上に示す時間は染料投入開始からの経過時間であり、15分は染料投入を停止した直後に相当する。染料は多少沖に広がった後、海岸にほとんど平行に流出し、30分では右端に1ppm程度の染料が残っている程度である。

次に、図4に示した突堤のみのケース1についての同様な染料分布の時間変化を図7に示す。図6の現況と比較して染料はより沖側に広がった後に流下拡散している。これは突堤によって汀線近くの流れが遮断され、汀線に投入された染料は反流によって外側に引き出された後に流下するからである。染料の拡散は現況と比較して極端に遅いわけではなく、25分後には10ppm以下となり、図示していないが、60分には染料がすべて図示の測定範囲から流出してしまった。

図8は、不透過離岸堤を追加した場合のケース2, 3, 4について30分と60分の染料濃度分布を比較したものである。上から染料拡散のよい順にならべてある。離岸堤が突堤の間にあるケース2が突堤の先端にあるケー

ス3より染料の拡散流出が速い。ケース4はケース2と3を組合わせたような離岸堤の配置であり、染料拡散の程度もそれらのケースの中間にある。このことは、離岸堤の長さが同じであれば、突堤の中間に設けた方が海水交換がよいことを示すもので興味深い。図9と図10はケース2と3の流速分布である。いずれも、現況の図5と比較すると汀線近くの1cm/sec以下で沖向き成分の卓越した流速の範囲が広くなり、突堤の先端近くまで広がっている。この弱い流れによって汀線に投入された染料が沖側へ引き出されている。しかし、この部分の流速は小さいために正確な把握は困難で、図からはケース2と3との間における染料拡散の相異を説明し得るような流速分布の明確な相異は見出されない。ただ、離岸堤の背後の流速はケース2の方が幾分速いようである。これについては、後述の数値シミュレーションで更に検討する。しかし、各突堤区間ごとに下手側突堤先端近くから水が流入して、時計回りの反流が生じることは明らかである。なお、突堤先端に離岸堤を設ける場合、

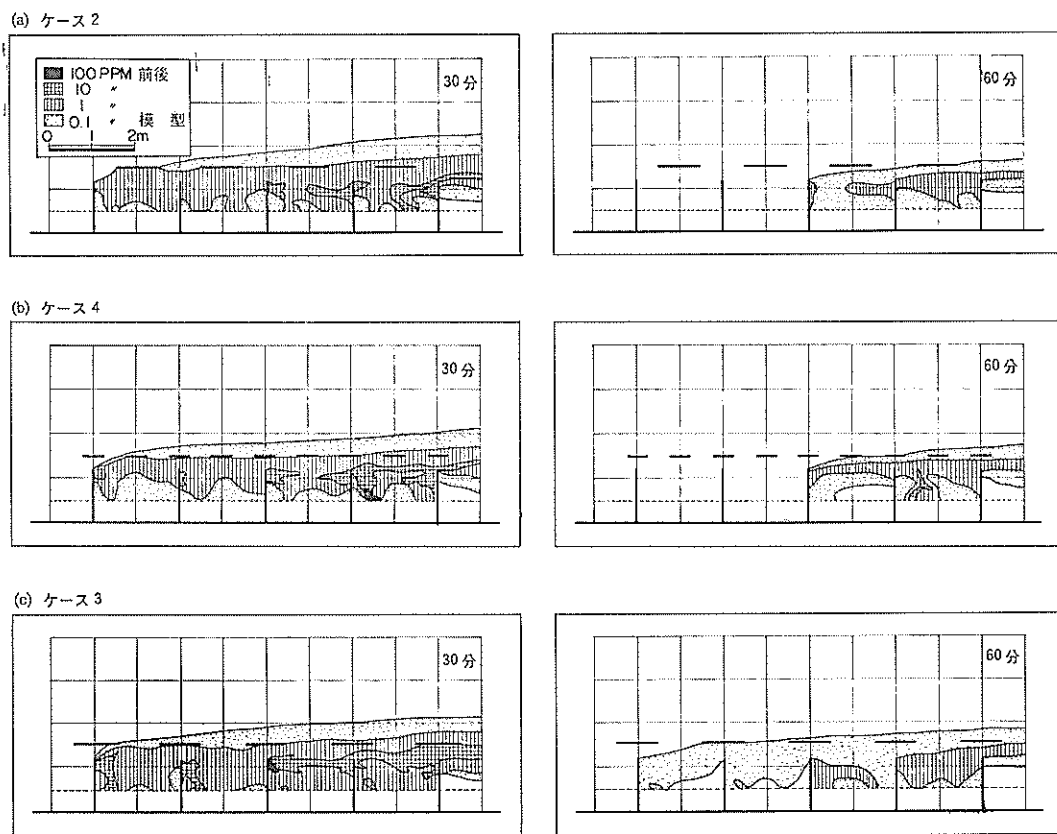


図 8 定常流ケース 2, 3, 4 の染料濃度分布

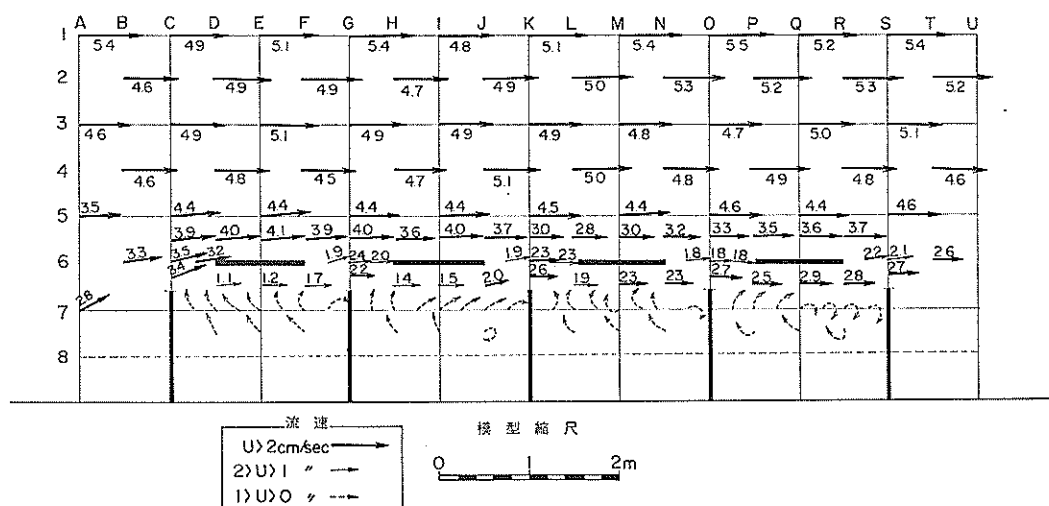


図 9 定常流ケース 2 の流速分布

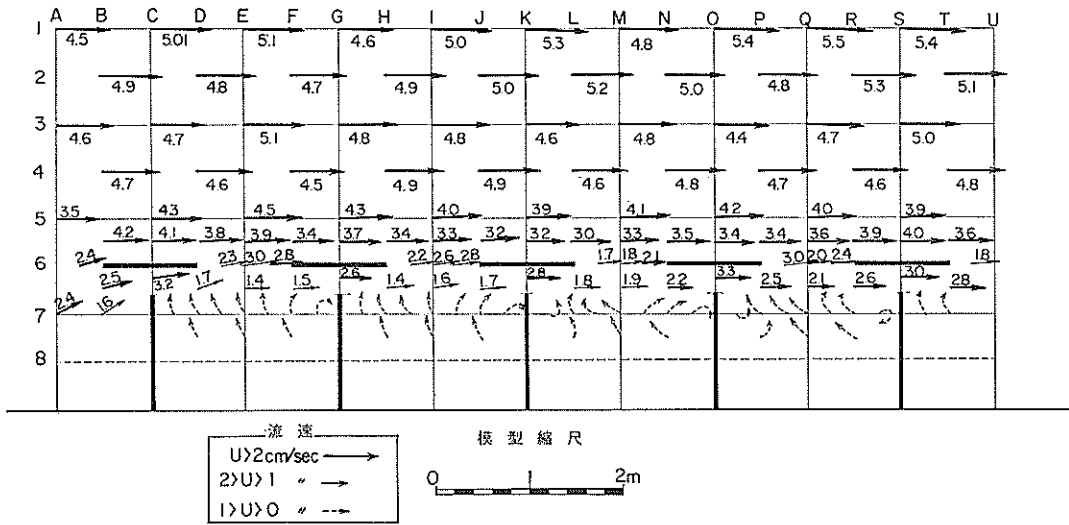


図 10 定常流ケース 4 の流速分布

突堤と離岸堤の間に間隙がないと海水交換は一層悪くなる。

図 11 は、離岸堤がスリット式透過堤のケース 5, 6, 7, 8 についての染料濃度分布の同様な比較である。この場合も、離岸堤が突堤の中間にあるケースの方が先端にあるケース 6 よりも染料拡散が速い。ケース 7, 8 は、ケース 6 と比較して、わずかによいようであるが、さほど差は見られない。これらを図 8 の不透過離岸堤の場合と比較しても、スリット式にしたことの効果はほとんど現われていない。

### 3.2 定常流に波を加えた場合

次に上述した定常流に波高 5 mm, 周期 0.8 sec の波を汀線と直角に作用させて、同様にウラン溶液の分布を調べた結果について述べる。この場合、波は小さいので前浜で碎波するのみであった。

図 12 は、染料濃度分布の 30 分および 60 分の各ケースの比較である。上から拡散の速い順に並べてある。最も拡散のよいケースは、スリット式離岸堤を突堤の中間においた場合である。これがよいのは、スリットから波が堤内に入るの、堤背後から前浜に向い、そこから離岸堤両端の開口部に向うような流れが加わるからである。このことは、須磨海岸の実験ですでに明らかにされている。

離岸堤が突堤の中間にあるケース 5 と 2 が、突堤のみ

のケース 1 よりも染料拡散が速いということは、極めて興味深い。図 13 は、15 分すなわち染料流出停止時における分布をこれらの 3 つのケースについて比較したものである。スリット式離岸堤のケース 5 では、投入された染料が離岸堤を通過した波によって両側に排除され突堤の先端から流出し、離岸堤背後に沿う平行流と離岸堤両端から沖へ向かう流れによって拡散している様子が明らかである。不透過な離岸堤ケース 2 の場合には、離岸堤背後でそのような顕著な染料の排除は見られないが、離岸堤背後にそう比較的強い流れによって流下している。突堤のみの場合には、染料の沖向きへの流出速度は前者と比較して小さく、突堤先端を出た染料の流下速度も小さいようである。すなわち、離岸堤は、堤内に入った流速に対する導流堤のような役割も果しているものと思われる。図 12 にもどって、短い離岸堤を突堤の先端にも並べたケース 4, 7 を見ると、やはりケース 7 の透過堤の背後で染料の払い出しが速いように思われる。また、突堤の下流側面に沿って染料が停滞する傾向も他ケース同様見られる。しかし、全体としては両者についてはほとんど差がない。

つぎに、図 12 を波のない前述のケースと比較すると全体的に波のある場合の方が拡散が速い。そうして特に目立つことは流れのみの場合には、突堤のみのケース 1 が離岸堤が中間にあるケース 2 や 5 よりも染料の拡散が

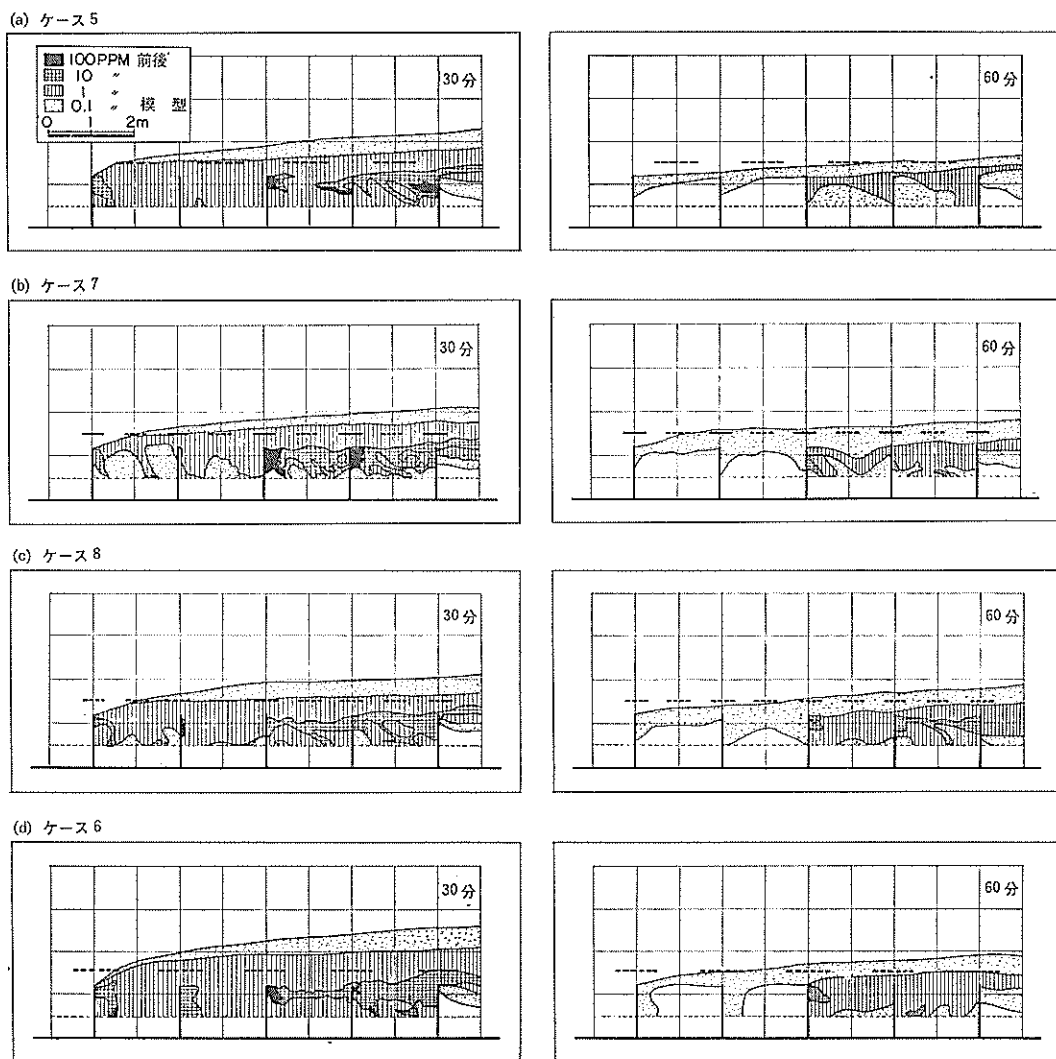
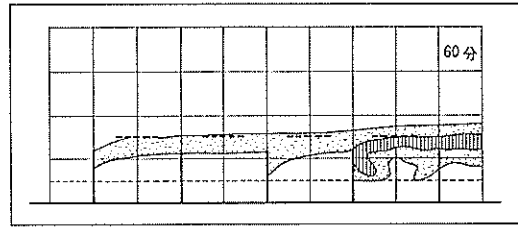
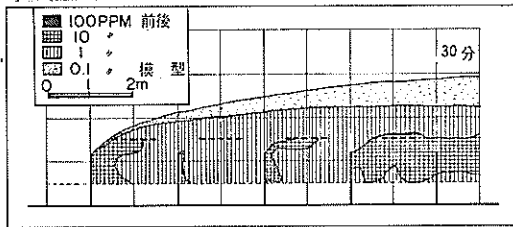


図 11 定常流ケース 5, 6, 7, 8 の染料濃度分布

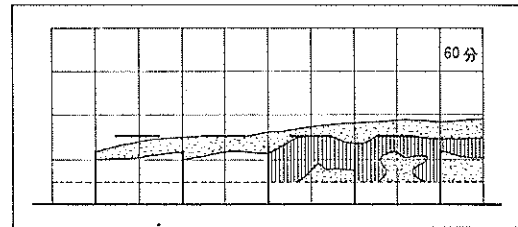
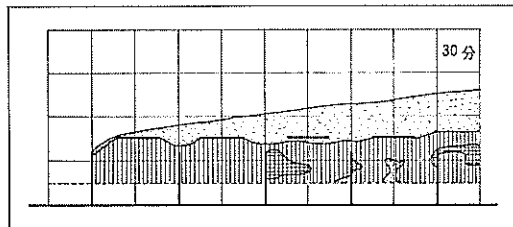
よかったのに反し、波がある場合にはそれが反対になっていることである。これは、汀線近くの流速が小さいために染料が水面よりも水底近くに留まる傾向が強かったためである。突堤のみの場合よりも離岸堤を設けた場合の方が汀線近くは流速が弱く、この傾向が一層強く現われ易い。したがって、流れのみの場合は突堤のみの場合がより拡散が速かったものと考えられる。一方、波を加えると汀線近くで碎波による攪乱のため染料は水底から

巻き上げられて弱い流れでもそれに乗って拡散する。この場合、離岸堤を設けた場合には、堤内の廻流が突堤のみの場合より発達し、それによって離岸堤の近くに染料が押し出され、その背後に沿う比較的強い流れによって運び去られることになる。波があると、また、波による質量輸送が突堤のみの場合よりも汀線近くに強弱ができ、廻流が一層起り易くなることも原因していると思われる。

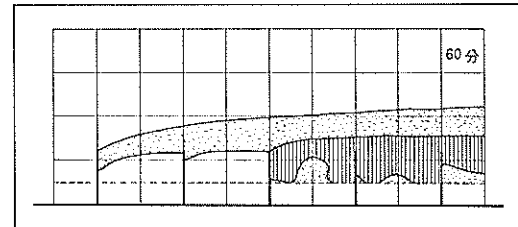
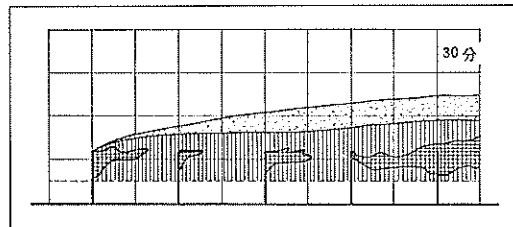
(a) ケース 5



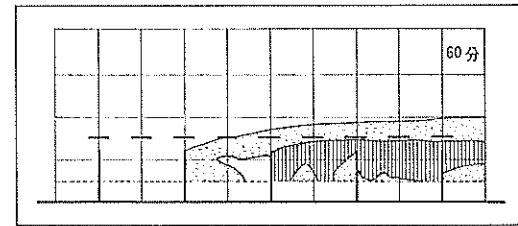
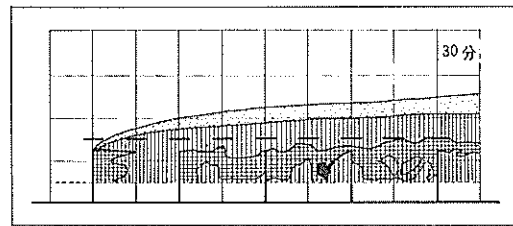
(b) ケース 2



(c) ケース 1



(d) ケース 4



(e) ケース 7

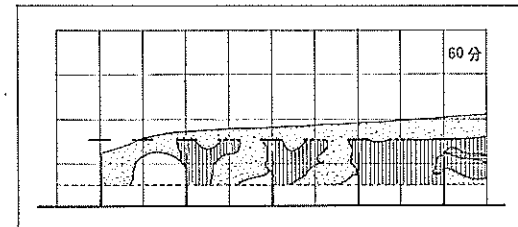
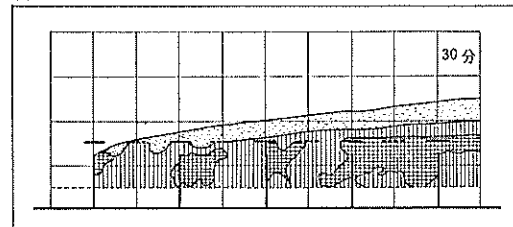


図 12 定常流に波を加えたときの染料濃度分布のケース間比較

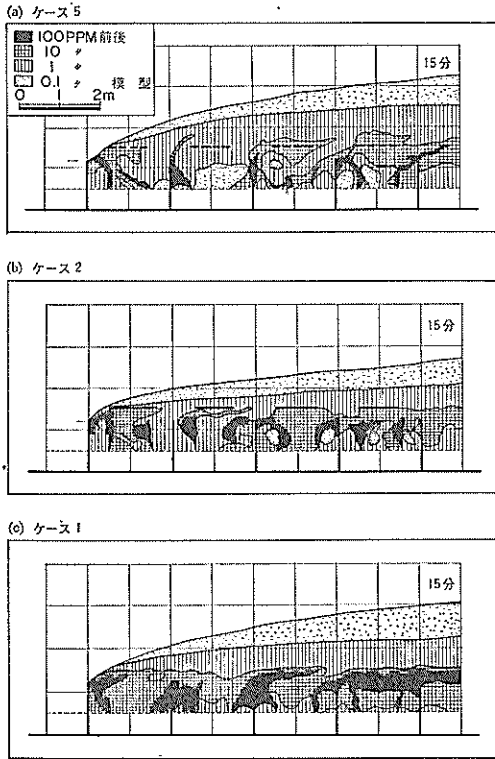


図 13 染料流出停止直後の染料濃度分布比較

#### 4. 定常流に対する数値シミュレーション

##### 4.1 数値モデルと入力および境界条件

模型実験結果の一般性を高めるために、数値シミュレーションを行なうのであるが、まず初めに前述した実験と出来るだけ境界その他の条件が同じになるように努めた。

数値モデルとしては Leendertse による ADI 法であるが、金子、堀江、村上等によって一部改良されたプログラム<sup>4),5)</sup>を用いた。その文献にもとづき計算概要を述べると次のようである。

##### 1) 流速の計算

水深方向に平均化を行なった連続および運動方程式は

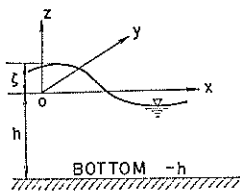


図 14 座標系の定義

図 14 のように座標をとって次のように表わされる<sup>4)</sup>。

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}[(\zeta+h)u] + \frac{\partial}{\partial y}[(\zeta+h)v] = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} - f v + g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{g u \sqrt{u^2 + v^2}}{(\zeta+h)C^2} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + f u + g \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{g v \sqrt{u^2 + v^2}}{(\zeta+h)C^2} = 0 \quad (3)$$

ここで、 $h, \zeta$  は水深および水面変動量、 $f$  は地球自転に基づくコリオリ係数、 $C$  は Chezy の流速係数、 $u, v$  は  $-h \leq z \leq \zeta$  間のそれぞれ  $x$  および  $y$  方向の平均流速である。

ADI 法は、まず時間  $k\Delta t \rightarrow (k + \frac{1}{2})\Delta t$  において運動方程式 (2) と連続方程式 (1) を  $x$  軸方向成分を implicit、 $y$  方向成分を explicit に表示し、 $x$  方向の漸化式を導いて  $x$  方向の成分を求め、それを用いて  $y$  方向の成分を explicit に解く。次の時間  $(k + \frac{1}{2})\Delta t \rightarrow (k+1)\Delta t$  においては、implicit と explicit の表示を  $x, y$  方向について転換して計算を行なう。また、上述の運動方程式には流体の水平方向の剪断力に基づく水平混合項が省略されている。これは水平混合項が摩擦項に較べて数オーダー小さいため、水平混合項を省略してある程度計算を進めた後、水平混合項による  $u, v$  への影響をまとめて計算するためである。すなわち、次式を差分化して或時間々隔ごとに、 $u, v$  を修正する<sup>5)</sup>。

$$\frac{\partial u}{\partial t} = Al \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (4)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} = Al \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \quad (5)$$

ここで、 $Al$  は水平渦動粘性係数である。

##### 2) 染料拡散の計算

拡散物質の濃度、すなわち単位体積の水に含まれる染料物質の量を  $p$  とし、流速計算におけると同様に水深方向に平均化を行なった拡散方程式は次のように表わされる<sup>4)</sup>。

$$\begin{aligned} & \frac{\partial[(\zeta+h)p]}{\partial t} + \frac{\partial[(\zeta+h)up]}{\partial x} + \frac{\partial[(\zeta+h)vp]}{\partial y} \\ & = \frac{\partial[(\zeta+h)K_x \frac{\partial p}{\partial x}]}{\partial x} + \frac{\partial[(\zeta+h)K_y \frac{\partial p}{\partial y}]}{\partial y} + S_m \end{aligned} \quad (6)$$

ここで、 $u, v, p$  は  $-h \leq z \leq \zeta$  間、すなわち水深方向の平均量、 $K_x, K_y$  は拡散係数、 $S_m$  は単位時間単位面

積当りの染料の負荷量である。

(6) 式は、流速計算で得た流速を用い、ADI 法によって計算する。すなわち、 $hdt \rightarrow (k + \frac{1}{2})dt$  において、(6) 式の第 1 項、第 2 項および右辺第 1 項のみの  $u, p$  に対して implicit に  $(k + \frac{1}{2})dt$  タイムレベル、その他については  $hdt$  タイムレベルの値を用いて差分化して  $p$  を求める。つぎの  $(k + \frac{1}{2})dt \rightarrow (h + 1)dt$  においては、左辺第 1 項と第 3 項および右辺第 2 項に対して implicit に  $(h + 1)dt$  タイムレベルをとり、 $p$  を計算する<sup>4)</sup>。  $S_m$  はもちろん、各タイムレベルごとに条件として与えられる。

次に、数値シミュレーションの計算領域は、図 15 に

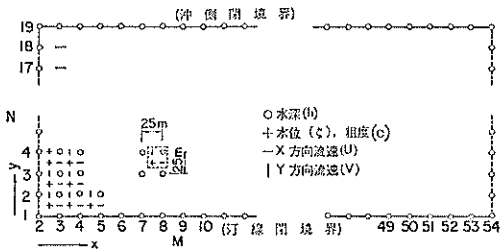


図 15 定常流数値シミュレーションの計算領域

示すようにとった。格子間隔は  $\Delta x, \Delta y$  とも 25 m とし、 $x$  方向については格子点を  $M=2$  から 54、 $y$  方向については  $N=1$  から 19 までとした。境界は  $N=1$  および 19 の行を閉境界とし、 $M=2$  および 54 の列を開境界とした。水深  $h$ 、水位  $z$ 、流速  $u$  および  $v$  を計算する点は、図 15 に示したようにお互いに格子間隔の半分、すなわち 12.5 m に配置し、それらを一組とし同じ格子番号を与える。例えば図中の点線が囲まれたものには同じ格子番号 ( $M=8, N=4$ ) を与える。

上述の計算範囲は、図 1 に示した模型を 1/100 の縮尺と考えると、実験の主要範囲を含むことになる。 $N=1$  の閉境界を汀線 ( $\pm 0$  m 線) にとり、定常流の方向を  $M$  の増加する方向にとれば、模型実験をシミュレートしたことになる。実験では、水位 +8.5 mm を加えているので、本当の水際線は上述の  $N=1$  の閉境界より少し陸側になるが、計算ではそれを無視している。したがって、計算における閉境界での水位は  $\pm 0$  m でなく、+85 cm となっている。

境界条件や入力条件については、計算の安定性と模型実験の現況の結果を参照して次のように決めた。

### 1) 開境界における流速

開境界に与えた定常流は、現況実験の流速分布図 5 の

(a) 両側開境界における流速

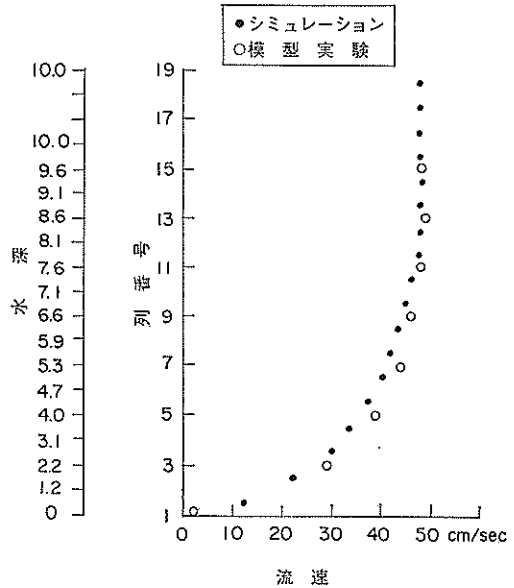


図 16 開境界における流速の実験値との比較

中央部分、すなわち図の H から N の範囲の各水深ごとの平均値を基準とした。図 16 に白丸で示したものが、その実験の平均値の海岸に直角方向の分布である。ここで、縦軸には図 15 に示した水深点の格子番号  $N$  値とその水深を示してある。黒丸は数値シミュレーションに用いた値であり、格子点 5~11 付近で実験値より多少小さくとってある。その理由は次に説明する。

### 2) 流速係数

運動方程式 (2), (3) 中に表われる Chezy の係数  $C$  は Manning の粗度係数  $n$  によって次のように表わされる。

$$C = \frac{1}{n} h^{1/6}$$

この  $n$  に 0.026 (M.K.S. 単位) を与え、1) に述べた実験値とほとんど同じ流速分布を両側開境界に与えて計算したところ、計算領域の流れの上手側では沖から岸へ、また下手側では岸から沖へ向う流速成分が顕著に現われ、結果として汀線近くの流速が実験値より大きくなった。そこで、開境界における  $N=5 \sim 11$  付近の流速を実験値より幾分か小さくして図 16 に黒丸で示した値を用いて計算してみたが、やはり汀線付近で流速が大きくなり過ぎた。さらに、種々開境界の流速を変えてみたが同じようなことが起った。その結果、水深が浅い所では流速



抵抗をより大きくする必要があることに気づいた。そこで、汀線に近い部分で係数が十分小さくなるように、 $C$  を次のように変更した。

$$C = \frac{1}{n} (h - \alpha)^{1/6} \quad (\text{M.K.S. 単位}) \quad (7)$$

$C$  は水深の  $1/6$  乗に比例するので、すべての水深  $h$  から一定値  $\alpha$  を引くと水深の浅いほど  $C$  の値が小さい方向に顕著に変化する。本計算では、(7) 式に与える  $h$  としては水位 +85 cm を加えない値をとることにしたので、最も汀線に近い地点 ( $N=2$ ) の  $C$  の値を計算するときの水深  $h$  は  $N=1$  と  $N=2$  の水深の平均をとり  $(0+1.2)/2=0.6\text{m}$  となる。 $\alpha$  については二、三の値を用いて流速計算をし、0.5 m と決定した。

図 17 の (a) は (7) 式で  $\alpha$  を 0 および 0.5 m としたときの係数  $C$  の比較である。汀線に近い所で両者の差が顕著に現われる。図の (b) は  $M=25$  列線上の流速分布で、白丸で示す  $\alpha=0.5$  の (7) 式の方が汀線に近い

所で、図 16 に示した開境界の値とよい一致を示している。図 18 は、このときの流速の平面分布であり、実験と同様な平行流が再現されている。本シミュレーションでは汀線に近い部分の流速分布が特に重要なので、以下のすべての計算においても  $\alpha=0.5$  とした (7) 式を用いている。

3) 流速計算における入力その他の条件

流速計算におけるその他の入力条件は次のようである。

水位 ( $\pm 0\text{m}$ 上)	+0.85 m
流速計算の時間ステップ $\Delta t/2$	6 秒
水平混合項の計算時間ステップ	300 秒
水平渦動粘性 $Al$	0.06 $\text{cm}^2/\text{sec}$
突堤や離岸堤の取扱	線境界 <sup>9)</sup>

上記で  $\Delta t/2$  が 6 秒と通常の計算より小さくなっているのは、格子間隔が 25 m で小さいからであり、 $Al$  も通常用いる値より比較的大きくにとってあるのも格子間隔

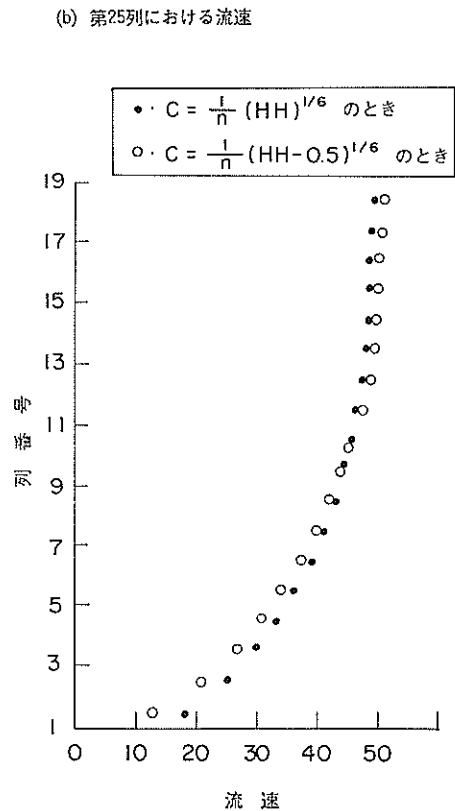
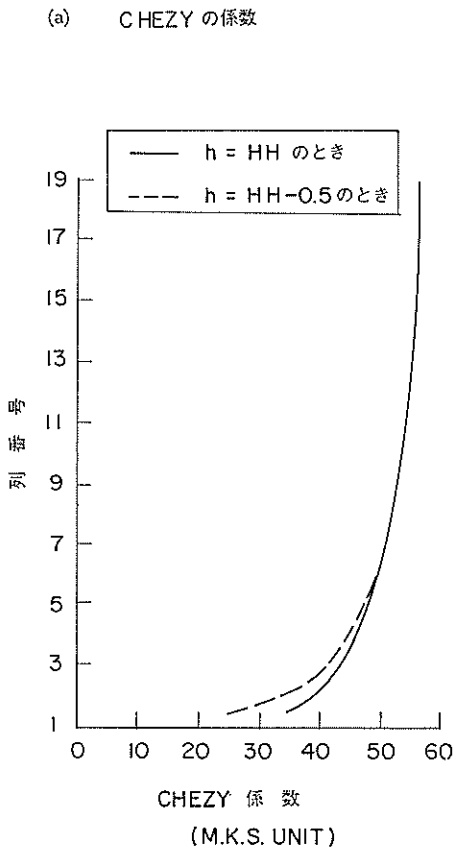


図 17 Chezy の流速係数の相異による流速分布比較

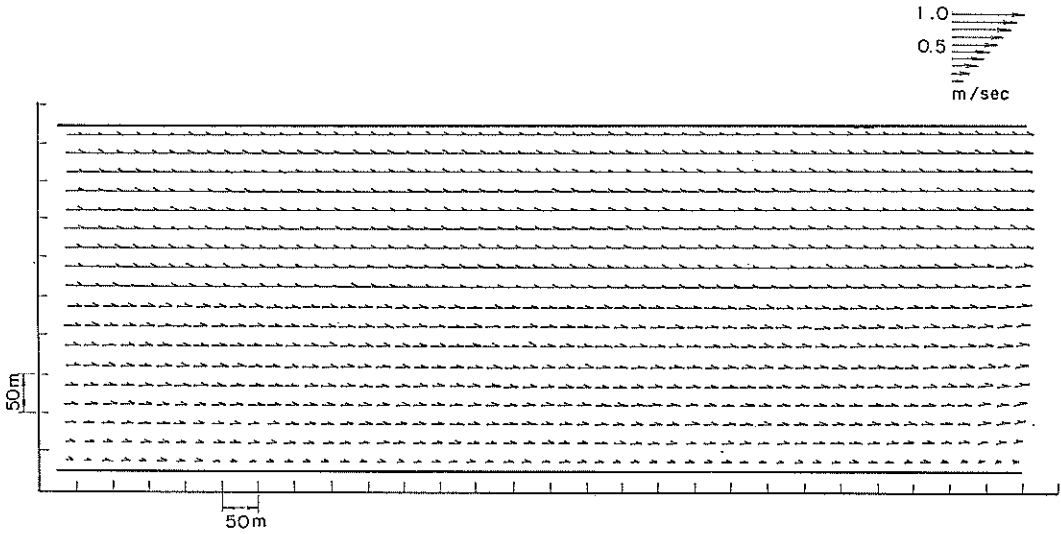


図 18 現況における定常流の流速分布

が小さいためである。線境界とは、堀江ら<sup>5)</sup>によって提案された方法で、突堤や離岸堤の幅に 1 メッシュの格子間隔を与えず、幅のない線として計算を行なう方法である。

4) 拡散計算における投入負荷量

模型実験においては、2.3 で述べたように 1 点あたり 500 ppm のウラン溶液を 15 分間に 200 cc づつ投入した。これを模型縮尺を 1/100 として原型に換算すると、1 点当りの投入ウラン量は

$$200 \times 100^3 \times 500 \times 10^{-6} = 10^8 \text{ gr}$$

となる。毎秒当りでは

$$10^8 \div (150 \times 60) = 11.1 \text{ gr/sec}$$

となる。投入時間は模型実験に合わせて初めの 150 分間のみとした。投入格子点は、図 15 において  $N=2$  で  $M=15, 20, 23, 28, 31, 36, 39$  および 44 の 8 つの汀線にもっと近い水位点とした。すなわち、各点につき毎秒 11.1 gr/sec の割合でこれらの 8 つの水位点における格子  $25 \text{ m} \times 25 \text{ m}$  の中に投入することとした。計算上は染料は投入された瞬間にそれぞれの格子の中の水と均一に混合されることになる。また、これらの投入点はメッシュの関係から実験におけるよりも、それぞれ突堤に近づいている。

5) 拡散係数  $K_x$  および  $K_y$

拡散係数は、通常の広域の湾などの潮流計算では  $K_x, K_y$  共に  $10 \text{ m}^2/\text{sec}$  前後の一定値を用いるのが通常である。そこで、まず、この値を用いて計算した。その結果

は実験値と比較して冲向き拡散が大きく現われた。これは対象水域においては、流速  $v$  が  $u$  に比して非常に小さいからであろう。そこで、流速の関数である Leendertse による次の式を用いた<sup>7)</sup>。

$$\left. \begin{aligned} K_x &= 5.93\sqrt{g}|\bar{u}|h/C \text{ (m}^2/\text{sec)} \\ K_y &= 5.93\sqrt{g}|\bar{v}|h/C \text{ (m}^2/\text{sec)} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

この (8) 式で計算した結果は、後述するように実験と比較して冲向きの拡散が多少小さかったが、他によい方法が見出せなかったので、すべてについて (8) 式を用いた。

6) 拡散計算におけるその他の条件

計算区域内の初期濃度	零
開境界の外側の濃度	零
計算の時間ステップ $\Delta t/2$	60 秒

開境界の外側の濃度は零としたので、開境界を海水が流れ出るときは、海水と共に染料も流出するが、開境界から計算領域に流入するときは、濃度零の海水が流入することになる。これは、模型実験の条件と同じである。

4.2 連続区間の場合の結果

前節で述べた条件の下に、流速計算を行ない、それによって得られた流速を用いて染料拡散計算を行なった。その染料拡散シミュレーションの染料投入後 150 分および 300 分の結果を図 19 に示す。図で (a) は現況の場合、(b) は突堤のみの場合、(c) は突堤の先端に離岸堤がある場合、(d) は突堤の間に離岸堤を設けた場合で濃度のコンターで染料分布を示している。突堤、離岸堤はす

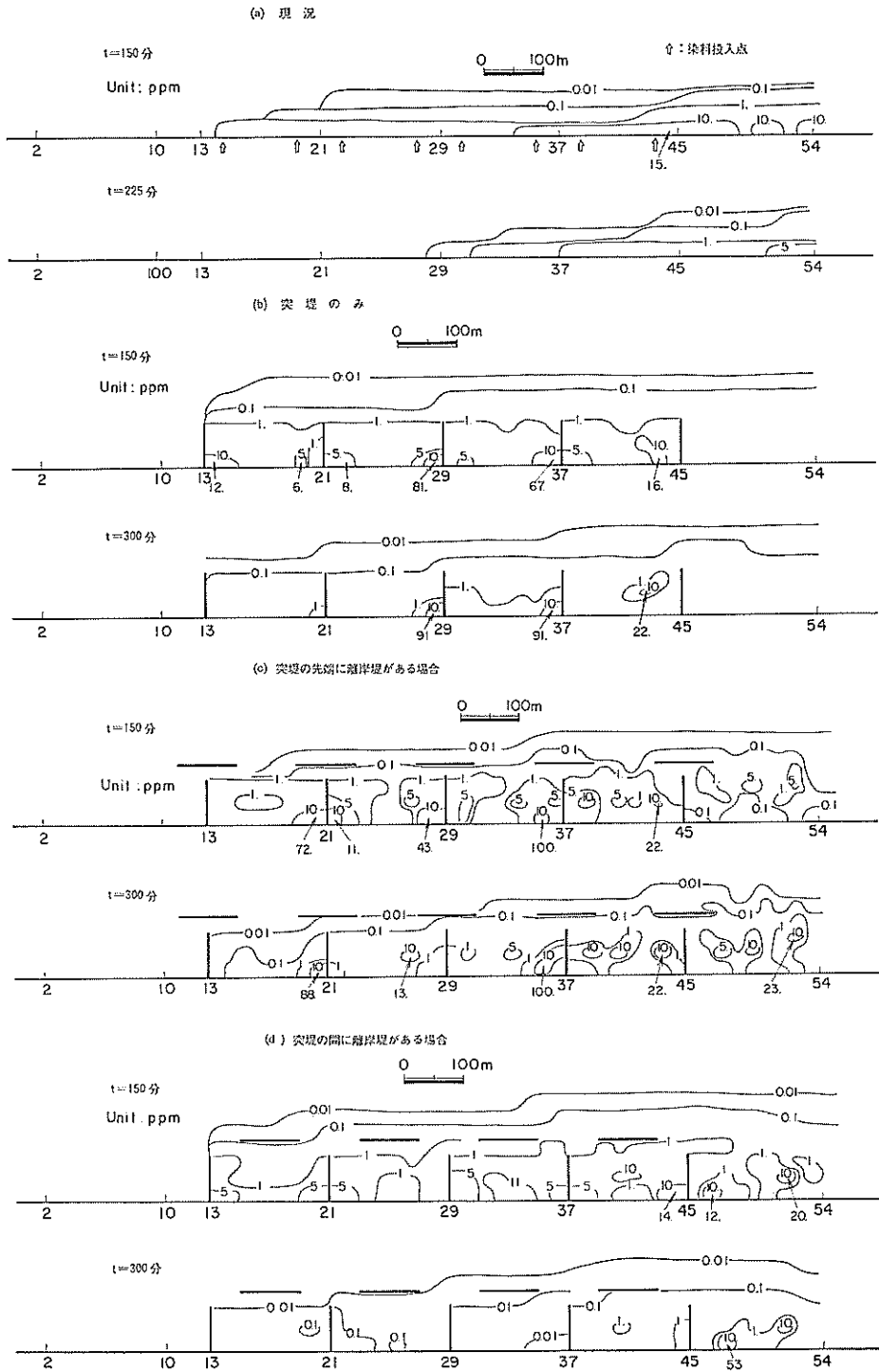


図 19 定常流連続区間の場合の染料拡散シミュレーションの結果

べて不透過であり、濃度が特に高い所はそのピーク値も示してある。 $t=150$ 分は染料投入停止直後の状態であり、(a)の場合には $t=300$ 分では染料濃度が計算領域内すべてで $0.01$  ppm以下となったので、 $t=225$ 分のものを示してある。

現況の濃度分布を図6に示した実験結果と比較する。図6に画いてある正方格子の一边の長さは $1$  mであり、原型に換算するとそれは $100$  mに相当し、シミュレーションの $150$ 分は実験の $15$ 分に相当する。両者を比較すると、シミュレーションの方が拡散がやや速い。これは、シミュレーションでは模型の表面流速を鉛直方向平均流速としたこと、および染料が投入と同時に $25$  m $\times$  $25$  mの格子内に均等に混り合うとしたことなどによるものと思われる。また、前述したように、沖向きの拡散がシミュレーションの方が多少小さい。しかし、全体として両者は類似した染料の拡散パターンを示している。

次に、(b)の突堤の場合を図7の実験結果と比較して非常に異なる点は、中央の2つの区間において流れの下手側の突堤寄りに高濃度の点が見われ、それは $300$ 分後においても残っている点である。実験では、染料がわずかながらも速度を持って流出するに反し、シミュレーションでは、そのような速度を与えていないために、突堤で流れが極端に弱められるとその影響がそのまま現われることおよびシミュレーション本来の疑似拡散<sup>9)</sup>にもとづく欠点によるものと思われる。しかし、この点を除いては、現況について述べたと同様なことが云える。(c)、(d)の離岸堤を付加した場合は、図8の実験と対応するが、

同様な傾向が見られる。

さらに、図19において、構造物の影響を比較すると次のようなことが判る。

(1) 突堤を設けると汀線に投入した染料の拡散を阻害するが、時間の経過と共に大部分の個所の濃度は減少して行く。しかし、中央の2つの区間で下手側の突堤の根本の近くに高濃度の部分が存在し、この濃度値はほとんど変化がなく、 $t=300$ 分でそれぞれ $91$  ppmの値を示している。この高濃度は図20に示すように $t=600$ 分でも値が多少減少したのみで残っている。

(2) 離岸堤を突堤の先端に設けると、染料の拡散を一層阻害する。突堤の先端より沖側の領域での濃度値は、突堤のみの場合と変りないが、その先端より岸側、特に離岸堤の背後になる所においては濃度が高い。第1区間と第3区間において下手側の突堤の根本近くに、高濃度の点が見られる。これらの点は、図20に示すように、 $t=600$ 分でも高い濃度を示すが、その値の減少割合は突堤のみの場合よりも大きい。

(3) 離岸堤を突堤の間に設けると、染料の拡散を助長する。高濃度の地点が、もっとも下手側の突堤の外側に現われているが、その値は突堤のみの場合より小さく、一方堤内には見られない。 $t=300$ 分では、堤内の染料はほとんど流出してしまっている。

以上のように、離岸堤を突堤の先端に設けた場合よりも、突堤の間に設けた場合の方が、堤内の汚染拡散がよいことは定常流のみの実験結果と同じである。しかし、突堤の間に離岸堤を設けると、突堤のみの場合よりも拡

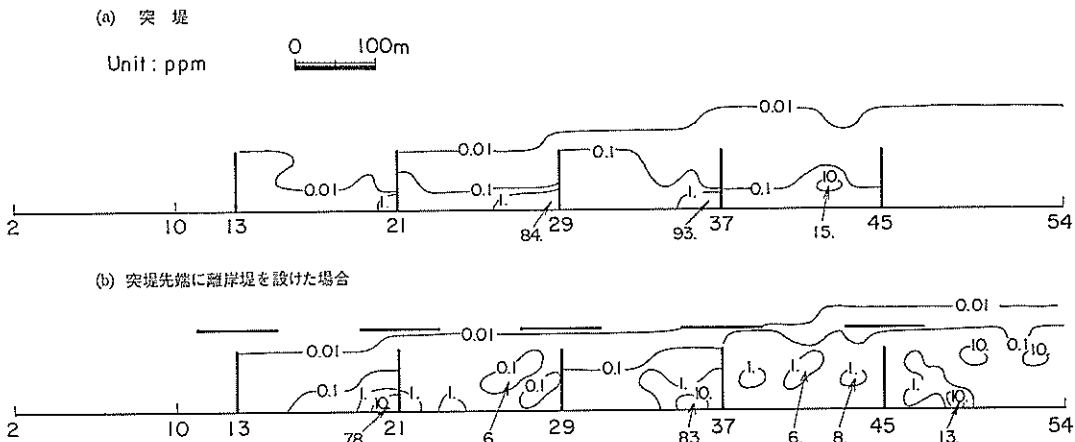


図20 定常流連続区間の場合の $t=600$ 分における染料濃度分布

散がよくなることは実験結果とは異なる。これは、数値シミュレーションでは、染料は深さ方向に常に均等に混合されるという条件で行なっているので、実験の場合で述べたように染料が流れの弱い所で底層に停滞することはないためと考えられる。したがって、数値シミュレーションでは、流れの変化がそのまま染料拡散の変化として現われている。

#### 4.3 単区間の場合の結果

上述の連続区間の場合のシミュレーションにおいては突堤の近くに高濃度の所が現われた。これは、投入個所の影響もあるのではないかと見られたので、染料の投入点を汀線に沿って一様に分布すると共に、各構造物の染料拡散に対する効果が単区間でも変わらないかどうかを確かめることとした。そこで、突堤は図 15 において  $M=21$  と  $29$  のみの位置に設置し、染料はその突堤間の汀線に沿うすべての水位点に、各点当り  $0.277 \text{ g/sec}$  の割合で 150 分間投入した場合のシミュレーションを実施した。その他の条件はすべて前述の連続区間の場合と同じである。

図 21 は、各ケースについて構造物付近の流速分布と  $t=150$  分、 $300$  分の染料濃度分布を示す。流速は  $1 \text{ cm/sec}$  以下、 $1\sim 10 \text{ cm/sec}$ 、 $10\sim 20 \text{ cm/sec}$  の 3 種に分けて異なる矢印で示してある。濃度分布は ppm 単位の数字で示してあるが、小数点の位置がその濃度値を示す格子点に相当する。これらの図においても、連続区間の場合と同様に (c) の突堤の間に離岸堤がある場合が (a) の突堤のみの場合よりも染料の拡散がよく、(b) の突堤の間に離岸堤がある場合が一番よくない。また、(a) と (b) において突堤の下手側近くに特に高濃度の部分が存在するのも前と同様である。これらの理由を流速分布と対比しながら考えてみる。

(a) の突堤のみの場合、突堤の先端のすぐ沖に流速が  $20 \text{ cm/sec}$  に近い汀線に平行な流れが存在する。この流れの逆流として堤内に時計回りの廻流がある。この逆流によって汀線に投入された染料が汀線と平行な流れの中に持ち出されて流下することが判る。しかし、下手側の突堤の根本近くでは流速が  $1 \text{ m/sec}$  以下で弱く、その上流向が突堤の基部に向っている。これがその部分に染料の高濃度の部分が生じる原因である。上手側の突堤の基部では流速が数  $\text{cm/sec}$  ある上に流向は突堤の先端方向へ向いているので、そのような染料の停滞は見られない。

(b) の離岸堤を突堤の先端に設けた場合の流れは突堤

の先端と離岸堤の間にやはり  $20 \text{ cm/sec}$  に近い汀線と平行な流れが存在する。しかし、突堤間の逆流は中央で 2 つに分かれており下手側は反時計回り、上手側は時計回りとなっている。そうして、汀線に沿う流れは (a) の場合よりも弱い。特に、下手側突堤の根本に近い汀線では一層弱く突堤の基部に向っている。このことがその基部において濃度が突堤より高くなっている原因であろう。 $t=300$  分では、その基部の濃度は一層高まり、そのために上手側突堤に近い部分では、(a) の場合より濃度が下がっている。

(c) の突堤の間に離岸堤を設けた場合の流れも、(b) の場合と同様に反時計回りと時計回りの逆流が見られる。しかし、 $1 \text{ cm/sec}$  以下の流速の所はなく、離岸堤の内側に沿う  $20 \text{ cm/sec}$  の平行流のすぐ内側に  $15 \text{ cm/sec}$  程度の強い流れが (b) の場合より幅広く入り込んでおり、また突堤に沿う沖向きの流れもより大きい。これらの点が、この配置が染料をよく拡散させた原因と思われる。

また、染料停止直後の  $t=150$  分の分布では、離岸堤を設けた場合が、突堤のみの場合より堤内の中央部と両突寄りの部分との濃度差が大きいのも、逆流のパターンが両者で上述のように異なるためであろう。さらに同図の (d) は、突堤の先端を結ぶ線より汀線側の堤内の染料の総量の時間的変化を示す。この堤内の染料は、染料投入停止の  $t=150$  分後いずれのケースも  $t=300$  まで急速に減少する。突堤の間に離岸堤のある場合は、その  $300$  分で堤内染料はほとんど流出してしまっているが、他のケースは  $300$  分以後あまり減少しない。それでも、突堤のみの場合はゆるやかに減少を続けるが、突堤の先端に離岸堤のある場合は、その染料は停滞したままである。この図の白丸、半黒丸および黒丸のマークは、凡例に示したように、汀線に沿う  $25 \text{ m}$  の幅の部分の染料の量の合計値の時間変化を示すものであり、 $500$  分以後これらの値がそれぞれの堤内染料総量の大部分を占めていることがわかる。すなわち、前述したように、下手側の突堤の基部に停滞した染料の分散がきわめて悪いことがわかる。

なお、離岸堤を突堤先端を結ぶ線上に設けた場合と同様な染料シミュレーションの  $t=300$  分の結果を図 22 に示す。いずれの場合も堤内への海水の流入は、図 21 と比較して悪く、染料の堤外への分散もよくない。しかし、(a) の T 形堤には特に高濃度の部分はなく、(b) の離岸堤の場合に高濃度値が生じているのは興味深い。

レクリエーション海浜における突堤・離岸堤の汚濁拡散に対する影響

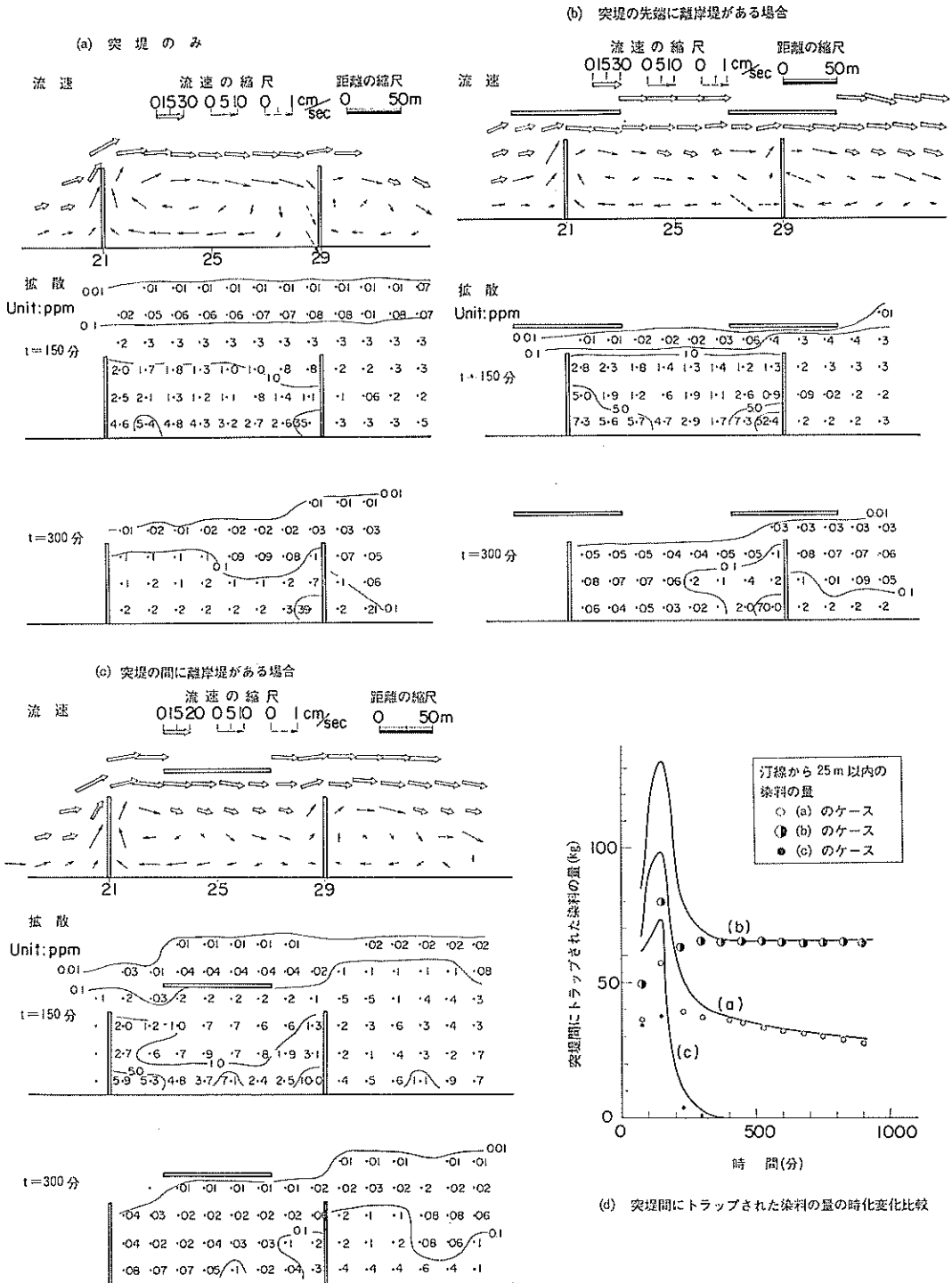


図 21 定常流単区間の場合の流速と染料拡散の数値シミュレーション

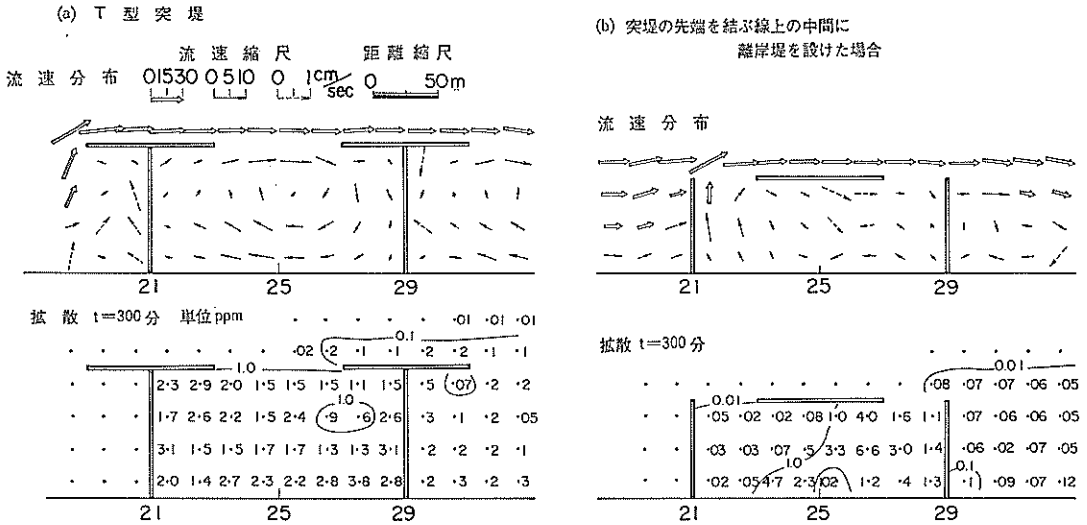


図 22 突堤の先端を結ぶ線上に離岸堤を設けた場合の流速と染料拡散のシミュレーション

5. 非定常流に対する数値シミュレーション

5.1 入力および境界条件

現地においては潮流は常に変化し、海岸近くでは水位の変動をともなった往復流であるのが常である。そこで上述のように定常流で得られた突堤や離岸堤の汚染拡散に対する影響がそのまま非定常の場合にも適用されるかどうかを確かめるために潮汐流を与えてシミュレーションを行なった。

まず、計算領域としては、計算時間を節約するために定常流の場合より狭くし、図 23 に示すようにした。すなわち、 $N=1$  の行の  $M=2$  から 37 までを汀線の閉境界、 $M=2$  および 37 列の  $N=1$  から 12 を潮流が流入する開境界とした。さらに、計算区域内の水位を潮汐にしたがって変化させるために、 $N=12$  行の  $M=1$  から 37 までを沖側開境界とし、ここから微弱な流れを流出させることとした。このような計算領域において次

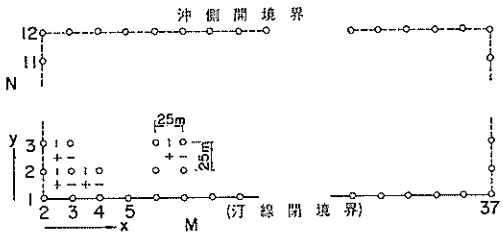


図 23 非定常流シミュレーションの場合の計算領域

のような入力条件を与えた。

1) 両端開境界における流れの入力

両端の  $M=2$  および 37 列上の  $N=2$  から 12 の  $x$  方向流速点において次のような流速  $u_M$  を与えた。

$$u_M = \alpha_M \sin \frac{2\pi}{T} t \quad (\text{M.K.S. 単位}) \quad (9)$$

$\alpha_M$ :  $M=2, 3, 4, 6, 7, 12$  に対してそれぞれ 0.12, 0.22, 0.30, 0.37, 0.40, 0.475 m/sec で中間の  $M$  に対しては直線的に変化

振幅  $\alpha_M$  は定常流シミュレーションの場合の開境界の流速、すなわち図 16 に示した  $M=12$  までの値と同じである。

(9) 式によって両端開境界で時間の経過にともなって、周期  $T$  の正弦波形の潮流が入力されることになる。 $T$  は 12 時間とした。

2) 沖側開境界における流れの入力

計算区域内の水位も正弦波形で変化させる必要がある。通常の海岸では、潮位変化は潮流に対して位相がほぼ  $90^\circ$  ずれている。このような水位変動は計算領域が十分広く適当であれば両端の潮流に位相差をつけることによって得られるであろう。しかし、本計算のように両開境界の距離がたかだか 1 km 程度の狭い水域においては、流速も水位も全領域がそれぞれほとんど同位相で変化しているのでそのような方法はとれない。そこで、沖側開境界から水位を正弦的に変化させるに必要な水量を流入させることとした。

かくて、 $N=12$  行の  $M=2$  から 37 までのすべての  $y$  方向流速点において次のような流速  $v$  を与えた。

$$v=0.003352 \sin\left(\frac{2\pi}{T}t-\pi\right) \quad (\text{M.K.S. 単位}) \quad (10)$$

(10) 式の流速振幅 0.003352 の値を  $v_0$ 、沖側開境界の長さを  $l$ 、その境界における干潮面からの水深を  $h$ 、計算区域内の水面積を  $S$ 、潮汐の振幅を  $\eta$  とすれば、干潮から満潮までの間に流入する水量  $2\eta S$  は、次のように表わされる。

$$\begin{aligned} 2\eta S &= \int_0^{T/2} l \left\{ h + \eta + \eta \sin\left(\frac{2\pi}{T}t - \frac{\pi}{2}\right) \right\} v_0 \sin \frac{2\pi}{T} t dt \\ &= v_0 (h + \eta) \left[ \frac{T}{\pi} \right] l \end{aligned}$$

したがって、流速振幅  $v_0$  は、

$$v_0 = \frac{2\eta S T}{\pi (h + \eta) l} \quad (11)$$

となる。また、(10) 式が (9) 式より  $180^\circ$  だけ位相を遅らせてあるのは、汀線に平行方向の流れが正の向き ( $M$  の値が増加する方向) のとき沖側開境界から海水を流入させ、満ち潮時に相当するようにしたためである。

(10) 式で与えられる流れは、(9) 式の両開境界で与えられる流れの  $10^{-2}$  のオーダーであるので、海岸線に平行な潮流への影響は無視される。

### 3) 水平混合項

水平混合項は、本来は運動方程式の中に含めて計算すべきであるが、そのオーダーが摩擦項などと較べて小さいために、先に述べたように別に計算している。したがって、(4)、(5) 式で水平混合項の補正をしたあとの流速成分は厳密には連続方程式を満足していない。このため、水平混合項による補正が大きすぎると計算の安定性が悪くなる。水平混合項による補正は、格子間隔や計算時間ステップが大きいかほど、また、渦動粘性係数  $AI$  が大きいほど大きくなる<sup>5)</sup>。

初めに、前述の定常流の計算と同様な条件で計算を行った所、発散してしまった。そこで、次のように定常流計算の場合の  $1/2$  にした。

水平混合項の計算時間ステップ	150 秒
水平渦動粘性項	$0.03 \text{ cm}^2/\text{sec}$

以上の外、初期水位を  $+0.1 \text{ m}$  とした以外の条件はすべて前述した定常流の場合のシミュレーションと同じである。

流速計算は、すべて干潮面から開始して 3 潮汐まで行ない、最後の 3 潮汐目の 1 潮汐分の流速、水位の変化を繰

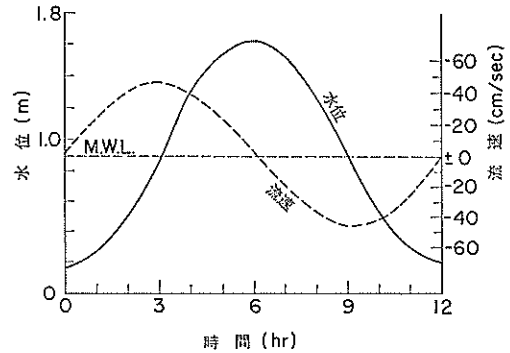


図 24  $M=20$ ,  $N=10$  の格子点における水位と流速の時間変化

返し用いて拡散計算を行なった。その流速と水位の  $M=20$ ,  $N=10$  の格子点における 1 潮汐分の時間変化を図 24 に示す。ここでは、流速振幅がほぼ  $46 \text{ cm/sec}$ 、水位振幅がほぼ  $70 \text{ cm}$  である。干潮面は初期水位より  $10 \text{ cm}$  増加し  $20 \text{ cm}$  となっている。これは、図 23 において例えば左側境界から海水が流入していくとき、同じ速度で右側境界から海水が流出しているが、この時わずかながら右下りの水面勾配ができる。したがって、流速が両側同じであっても流量は入ってくる方がわずかに大きい。流向は周期的に変化してもこの関係は変わらないためである。しかし、この程度の増加は、ここでは問題ではない。

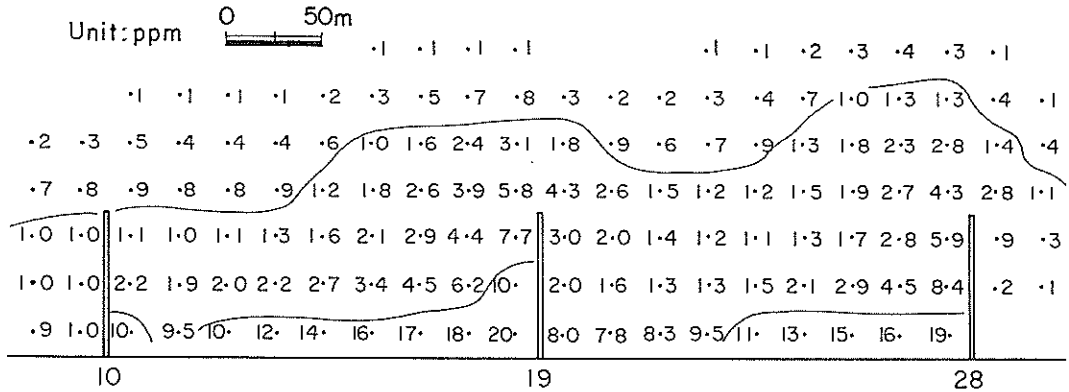
### 5.2 計算結果

図 23 において、 $M=11$  から 28 までの汀線に最も近い各水位点に、各点あたり染料を  $0.277 \text{ g/sec}$  の割合で初めの 1 潮汐間 (12 時間) 投入しつづけた場合の染料濃度分布を図 25 および図 26 に示す。図中の数字は各格子点ごとの濃度で  $\text{ppm}$  単位である。

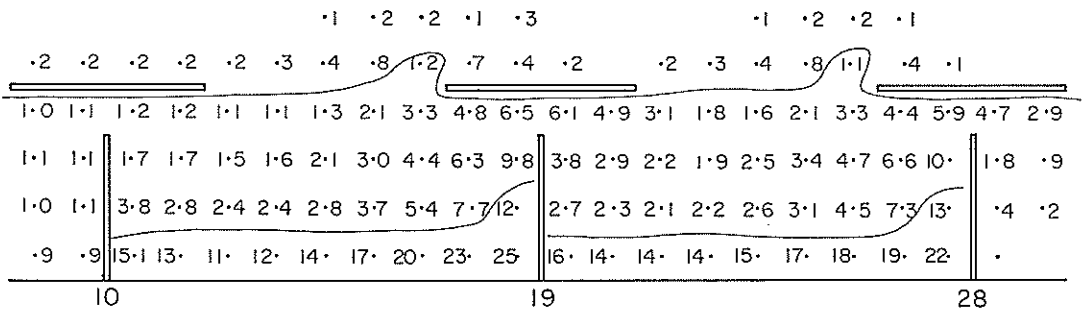
図 25 は、1 潮汐後の状態で、染料投入停止直後に相当する。計算は干潮面から上げ潮、満潮、下げ潮、干潮と繰返されている。上げ潮では左から右へ向かう潮流、下げ潮では右から左へ向かう潮流となる。したがって、この図では右から左へ向かう流れの影響がより強く残っている。すなわち各区間とも流れの上手側すなわち右側突堤寄りが濃度が大きくなっている。しかし、定常流の場合のように、突堤の根本近くに極端な高濃度部分が残るといったことはない。各ケース間では、定常流ほどに濃度値の差は見られないが、突堤の場合が最も拡散がよく、次に離岸堤を突堤間に設けた場合であり、やはり離岸堤を突堤先端に設けた場合が最もよくない。



(a) 突堤のみ



(b) 突堤先端に離岸堤がある場合



(c) 突堤間に離岸堤がある場合

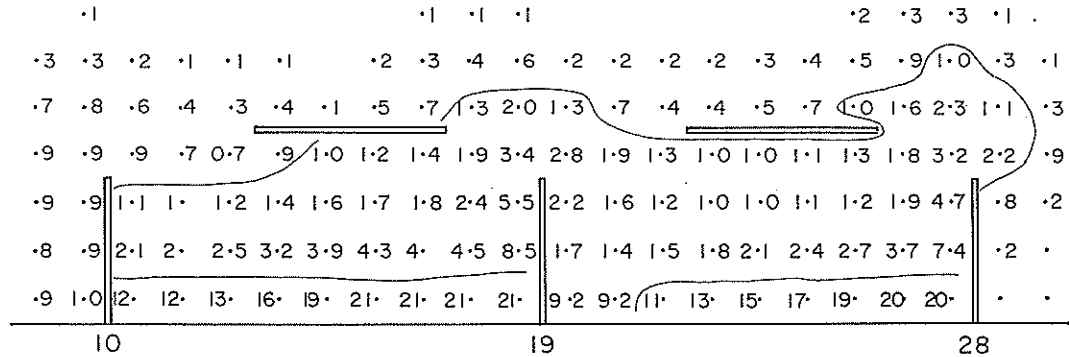


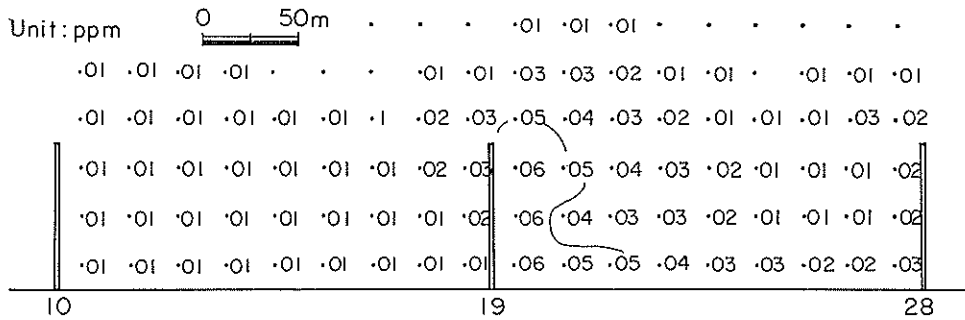
図 25 非定常流 1 潮汐後の染料分布比較

図 26 は、1 潮汐半後の状態であり、前者と比べて濃度は 10~100 分の 1 程度に減少している。この場合は左から右へ流れる上げ潮流の影響がより強り、(a) の突堤の場合の右側区間、(b) の突堤の先端に離岸堤を設けた場合などで、右側突堤寄りでは濃度が高くなっている。なお、図で黒丸印のみの所は濃度が 0.01 ppm 未満の所で

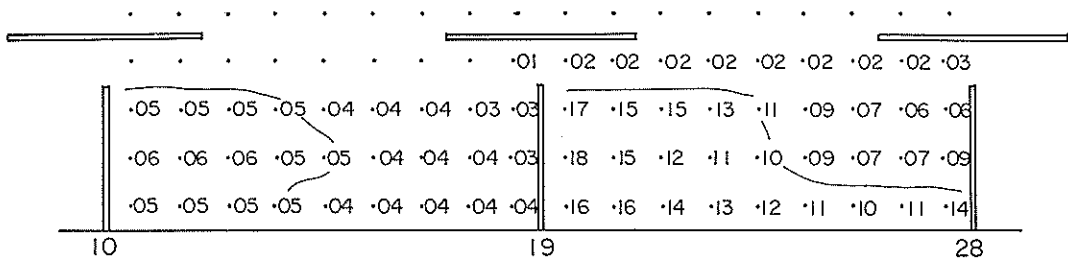
ある。(b) は離岸堤に遮ぎられそれから沖への拡散が他の場合より弱い。各ケースの比較では、離岸堤が突堤先端にある場合が、前と同様にもっとも濃度が高いが、それが突堤の中間にある場合は、前者と異なり、(a) の突堤のみの場合よりも濃度が小さくなっている。そこで、突堤の先端を結ぶ線より汀線までの突間にトラップされ

レクリエーション海浜における突堤・離岸堤の汚濁拡散に対する影響

(a) 突堤のみ



(b) 突堤先端に離岸堤のある場合



(c) 突堤間に離岸堤のある場合

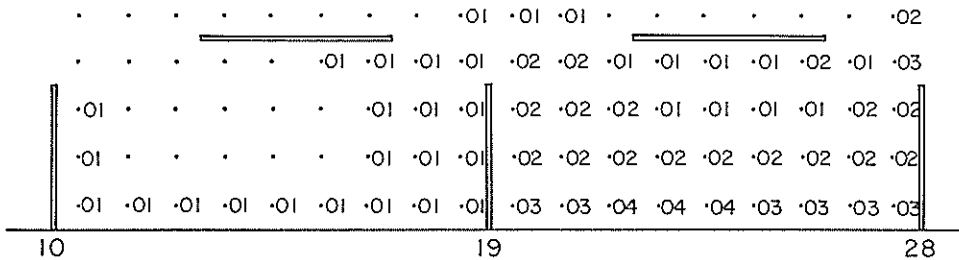


図 26 非定常流 1 潮汐半後の染料分布比較

ている染料量を各時間ごとに計算し図示したのが、図 27 である。染料量の計算は、各時間ごとに各メッシュの水底から水面までの水量を求め、それにそれぞれの濃度を掛けて集計した。図で 15 時間以後と以前とは、染料量のスケールが異なっていることに注意されたい。図を見て気付くことは、6 時の満潮、12 時の干潮の憩流時には、染料のトラップ量が極大値を示していることである。これは、その付近で流れがほとんどなくなるからである。染料投入は 12 時間で停止しているのでそれ以後のトラップ量は急激に減少している。さて、構造物間の

相違であるが、突堤の先端に離岸堤のあるケースは、時間の経過に関係なく常にトラップされている染料量が多いためである。突堤の間に離岸堤のあるケースは、6 時と 12 時の憩流時付近において突堤のみの場合より染料トラップ量がわずかに多いが、その中間ではよりずっと少ない。そうして、染料を停止後 2 時間以後は常に前者の方が残留染料量は少ないことがわかる。図 25、図 26 は、それぞれ図 27 の 12 時、18 時に相当する。

次に、上述の染料拡散の状況をより明らかにするために、潮流分布を調べてみよう。図 28 は 1 潮汐間の残差

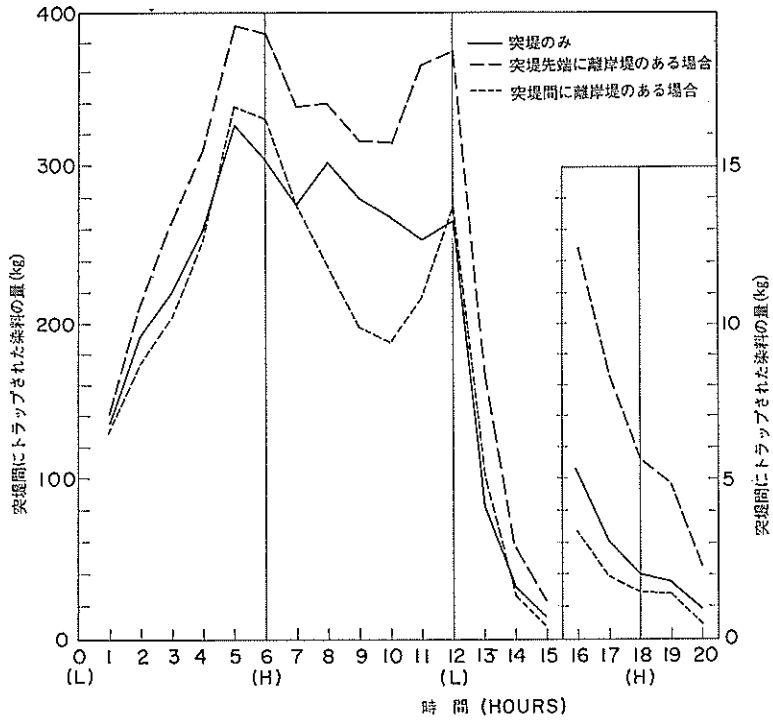


図 27 突堤間にトラップされた染料の全量の時間変化

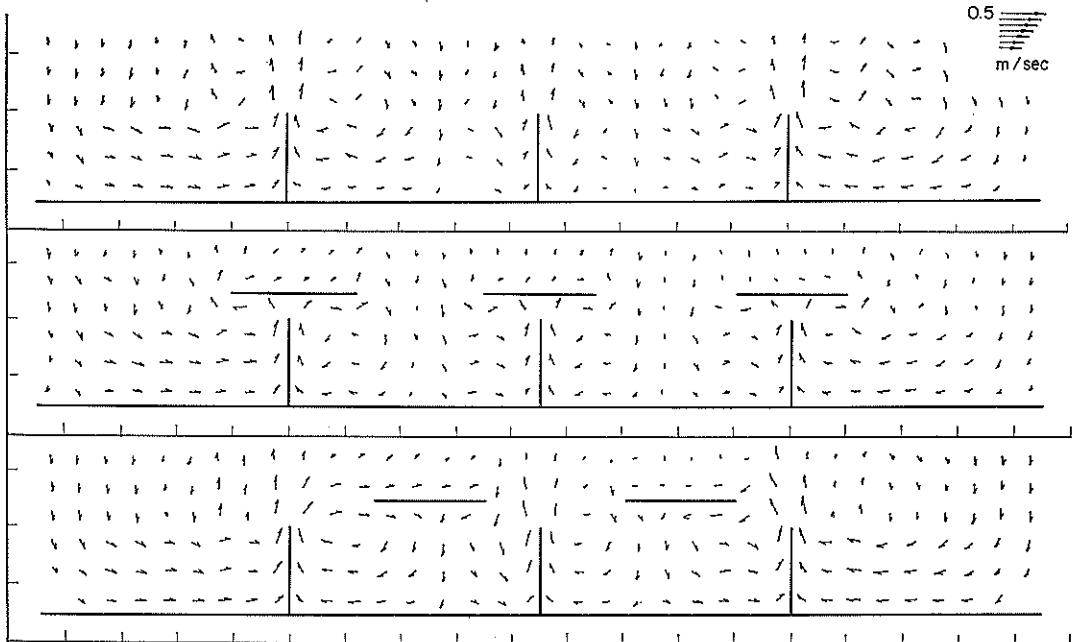


図 28 潮汐残差流の比較

流を示す（沖側は残差流はほとんど零であるので構造物付近のみを示す）。突堤の間隔は 125 m、離岸堤の長さは 50 m であるので、格子メッシュ割の関係から図の (c) で離岸堤の位置が突堤の中間より少し右側にずれている。また、流速はその値に応じて拋物線状に減少する矢印長で示してあり、凡例に示した最下の矢印が 10 cm/sec、それから 5 番目上にあるものが 50 cm/sec の流速に相当する。したがって、図示の残差流はほとんど 10 cm/sec 以下である。この図から次のことがわかる。

(1) 沖側では残差流がほとんど零であるにもかかわらず、構造物周辺には明確な残差流が見られ、特に突堤の両側に沿って沖向きに残差流が顕著である。

(2) いずれのケースも、各構造物の区間において左寄りに時計回り、右寄りに反時計回りの廻流が存在する。

(3) 各区間内の残差流の大きさには、各ケース間にそれほど大きい差は見られないが、突堤先端に離岸堤のある場合が他と比較して特に汀線付近で幾分小さいようである。このことと、突堤先端から沖向きへの残差流が離岸堤で阻上されていることが、染料拡散が他と比較して悪い原因のように思われる。

(4) 突堤のみの (a) より中間に離岸堤がある (c) の方が廻流性が強く、突堤に沿う残差流速も多少大きい。

図 29 は下げ潮最強時の潮流分布図である。離岸堤線の沖側では流速が 20 cm/sec 以上で、図中では流速ベクトルの矢印が重なっている。突堤間の流速について注目して見ると次のようなことがわかる。

(1) 突堤のみのケースと中間に離岸堤をもつケースは、流線のパターンが類似しているが、後者の方が突堤の両側に沿う沖向きに流速および岸から沖へ 3 行目の流線の流速がより岸へ向き幾分大きい。すなわち、後者の方が突堤間に沖側からより多くの海水が流れ込んでいるように思われる。これが、後者の場合が通常染料拡散がより大きい理由であろう。

(2) 突堤の先端に離岸堤をもつケースは、他 2 者と流速のパターンが異なっている。岸から沖へ 3 行目の流線の流速は中間に離岸堤を設けた場合と同じ程度の強い流速をもっているが、各区間の下手側突堤の根本近くでは、流線がその根本の方向へ向っている。

(3) すべてのケースにおいて、流線のパターンは前述した図 21 の定常流のときのパターンとほぼ一致している。

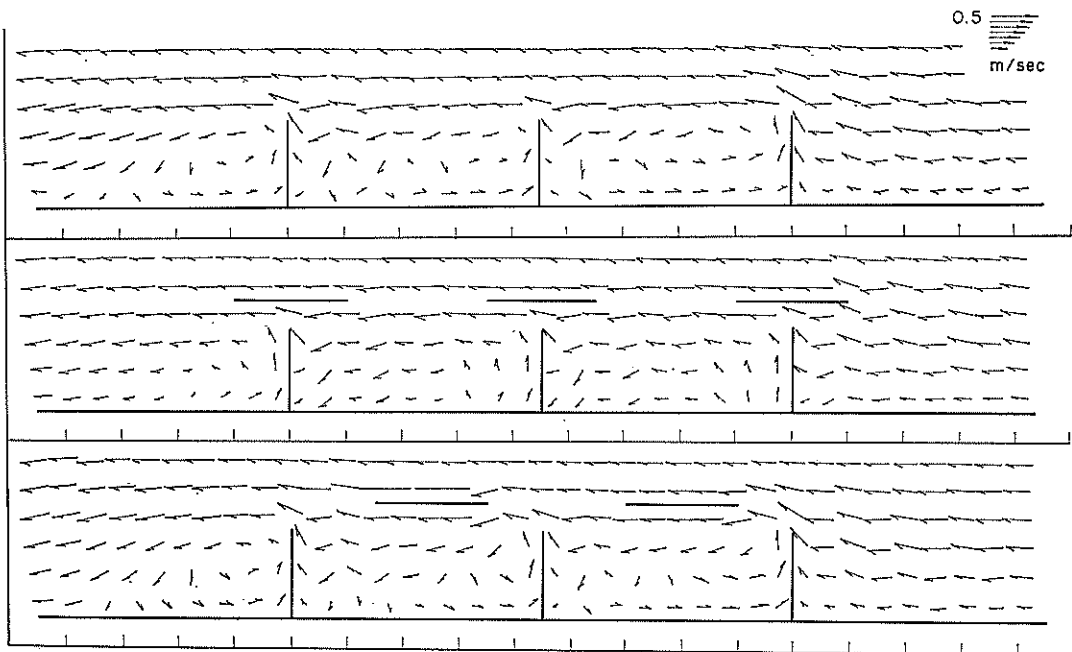


図 29 下げ潮最強時潮流分布比較

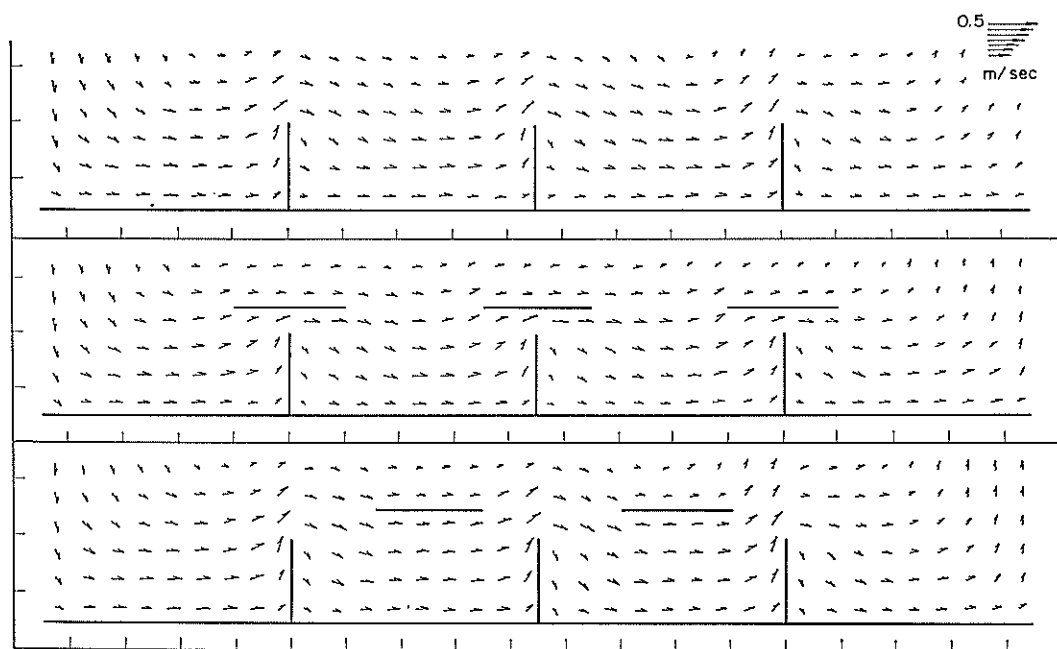


図 30 干潮憩流時の潮流分布比較

図 30 は、干潮憩流時の流線比較である。沖では流速がほとんどなくなっているが、堤内では数 cm/sec の流速が存在する。流線分布のパターンは各ケースともほとんど同じであるが、突堤のみのケースが突堤間で幾分流速が他よりも大きいように見える。しかし、図 30 は転流時であるので、流速の遅いときの流速パターンが、これと類似であるとは思われない。しかし、図 27 の満潮と干潮の 1 時間前、すなわち 5 時および 11 時に相当する流速パターンについて付図を参照して突堤のみの場合と突堤間に離岸堤のある場合について比較して見ても、憩流時付近で突堤のみの場合がより染料拡散が大きい理由は明確には見出されない。そこで、この非定常流計算区域図 23 と同じ領域に対して、両側開境界の流速を (9) 式の振幅  $\alpha_M$  の 40%、すなわち  $M=2, 3, 4, 6, 7$  および 12 で、それぞれ 0.048, 0.088, 0.120, 0.148, 0.16 および 0.19 m/sec にとって定常流計算を行なった。その結果を図 31 に示す。染料の投入は 4.3 で述べた定常流単区間の場合と同様に突堤間の汀線に沿うすべての格子点とし、染料濃度その他もその単区間の場合と同様である。したがって図示 300 の分の濃度分布は、染料投入停止後 150 分に相当する。この図を見ると、染料拡散につ

いて左側の区間では、全体的に (a) の突堤のみの場合がよく、右側区間では (b) の離岸堤がある場合の離岸堤の蔭になる汀線付近に高濃度部分が存在しているので、やはり突堤のみの場合がよいことになる。このような相違が起る原因を流速分布図から推定してみよう。汀線から 3 行目の流速を見ると、離岸堤のある場合の方が流速も大きく汀線方向に向かっており、突堤間への海水の流入は大きい。そのため、突堤間における流速は全体として離岸堤のある場合が大きくなっている。しかし、汀線付近の流れについて見ると、離岸堤のある場合が突堤のみの場合より流線が乱れているように思われる。そのために、このような乱れは流速が比較的大きければ問題にならないが、小さいときには染料のスムーズな運搬を妨げることになるものと思われる。また、図 21 と比較してもわかるように、流速が大きいときには、そのような乱れもないようである。結局、流速が非常に小さいときには突堤間に離岸堤を設けた場合は、突堤のみの場合より悪くなる可能性があると言えらる。その流速値がどの程度であるかは、この計算のみからは断定することもできないであろうし、また、流向や構造物の配置のわずかな相違によっても変る可能性は強い。



## 6. ま と め

直線平行等深線に突堤や離岸堤を設けた場合についての堤内の汚染の堤外への拡散について水理模型実験および数値シミュレーションを行なって検討した。水理模型実験は、前浜勾配が 1/10、水深 -10 m までの平均勾配が 1/50 で、潮流は沖浜で約 1 ノットの状態を 1/100 の模型に再現して行なった。定常流の外、夏期の小さい波も作用させた場合についても行なった。汚染としては、汀線にウラン溶液を投入しその拡散を調べた。数値シミュレーションでは ADI 法を用いて行なったが、流速分布や拡散分布が現況（構造物のない場合）において模型実験結果と一致するよう境界条件その他の係数を決めた。数値シミュレーションでは、定常流の外、潮汐および潮流変化を加味した非定常流についても行なったが、波のある場合は行なうことができなかった。

以上の研究を通して突堤や離岸堤の汚染拡散に対する影響について次のことが明らかにされた。

(1) 自然海岸に突堤を設けると、汀線付近に投入された汚染の堤外への拡散を阻害する。しかし、堤内には堤外を流れる潮流の一部が流入あるいは廻流するので極端な汚染の停滞は起こらない。

(2) 突堤間に離岸堤を設ける場合、突堤の先端を結ぶ線より少し沖側に設けた方が堤内の汚染拡散の観点からはよい。その方が、外側の海水がより多く堤内へ流れ込むからである。

(3) 離岸堤は、それを突堤先端を結ぶ線より沖側に設ける場合でも、突堤前面に設けるよりも、突堤間に設けた場合の方が汚染拡散上からはよい。

(4) 突堤間に離岸堤を設けると、潮流が非常に小さい場合には突堤のみのときより汚染拡散は悪くなるが、一般にはよくなる。その潮流の限界は、流線、構造物の配置によって変わるので一概に云うことができないが、少なくとも沖浜で最強時に 1 ノット程度の潮流のある所では、離岸堤がある場合の方が汚染拡散はよい。

(5) 波が小さくても、それがあつた場合には離岸堤はスリット式とすると、汚染拡散には有効である。

次に、定常流と非定常流の数値シミュレーションの比較については次のようである。

(1) 定常流の場合は、汚染の濃度分布に濃淡が強く現われ、構造物の配置による汚染拡散の差が大きく現われる。非定常流の計算では、濃度も弱く構造物の配置による差も小さくなる。

(2) 定性的な傾向、すなわち、各構造物配置の汚染拡散に与える影響の順序は、定常流と非定常流とではほぼ一致している。

また、数値シミュレーションについては、

(1) ADI 格子間隔を 25 m と狭くとも十分可能であることが判った。

(2) 一般に Chezy の係数は  $C = \frac{1}{n} h^{1/6}$  として計算することが多いが汀線近くの流れが重要な本研究のような場合は、 $C = \frac{1}{n} (h - \alpha)^{1/6}$  (ただし  $\alpha$  はもっとも浅い水深より大きい値とする) として計算する必要がある。すなわち、汀線近くは沖側よりも流速抵抗をずっと大きくとらないと流線が一樣にならない。

(3) 短い区間で潮汐と潮流の時間変化を再現する方法として、両側開境界で流速制御をし、沖側境界で潮汐変動に必要な流量を計算領域に与える流速制御をする方法が有効である。

(4) 流速成分  $u, v$  が極端に異なるときには  $x, y$  方向に対して同じ一定の拡散係数を用いるのはよくなく、流速の函数である Leendertse の式の方がよい。

(5) 水平混合項の計算時間ステップは、定常流の場合より非常流の場合には小さくとる必要がある。

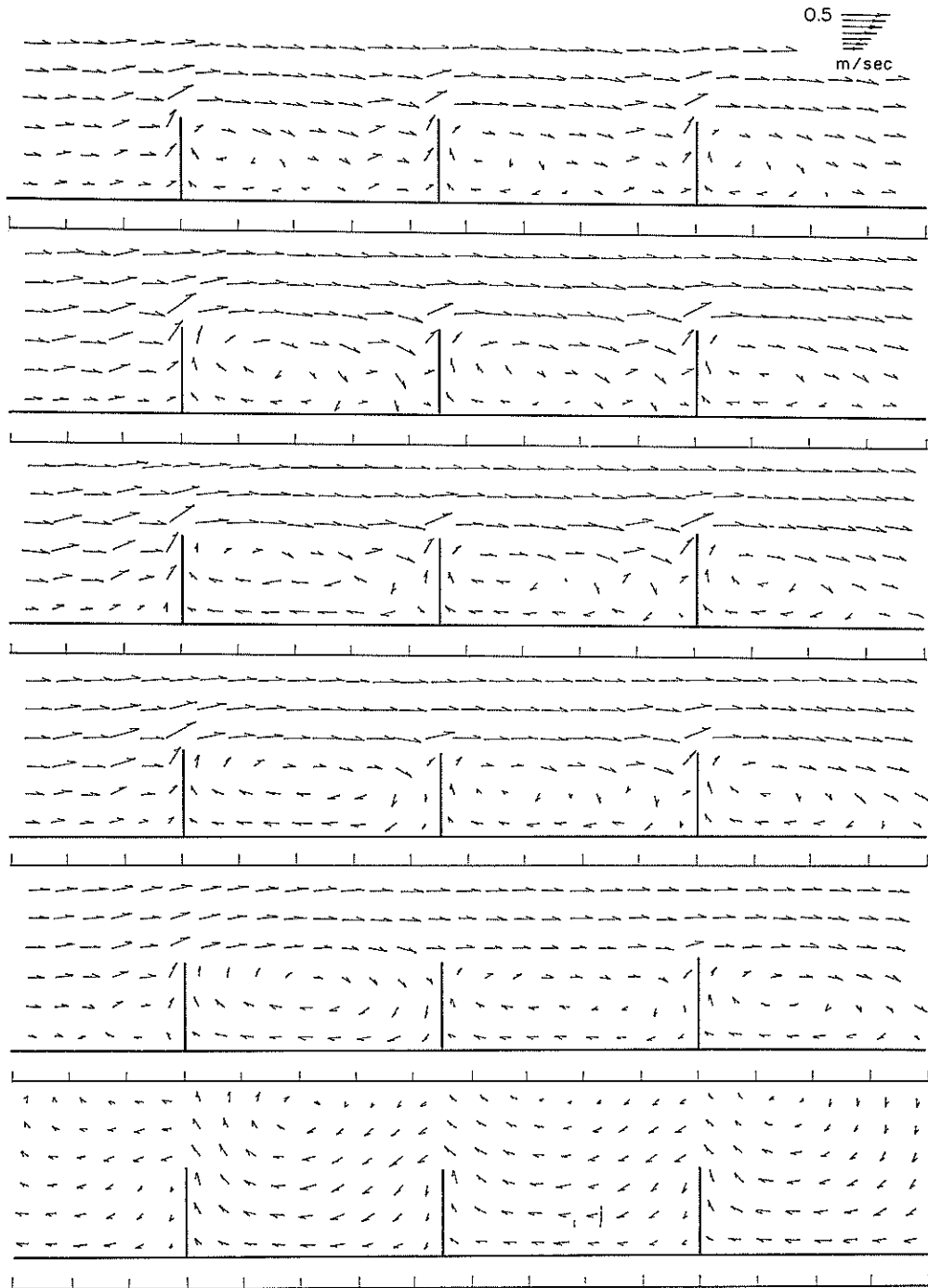
最後に本研究を行なうに当たり、海洋水理部加藤始水理研究室長から御助言を戴くと共に、数値シミュレーションに当っては、海洋水理部堀江毅海水浄化研究室長、海水汚染水理研究室村上和男技官、亀山豊技官から多くの貴重な助言と協力を得た。これらの諸氏に厚く感謝いたします。

(1977年3月31日受付)

## 参 考 文 献

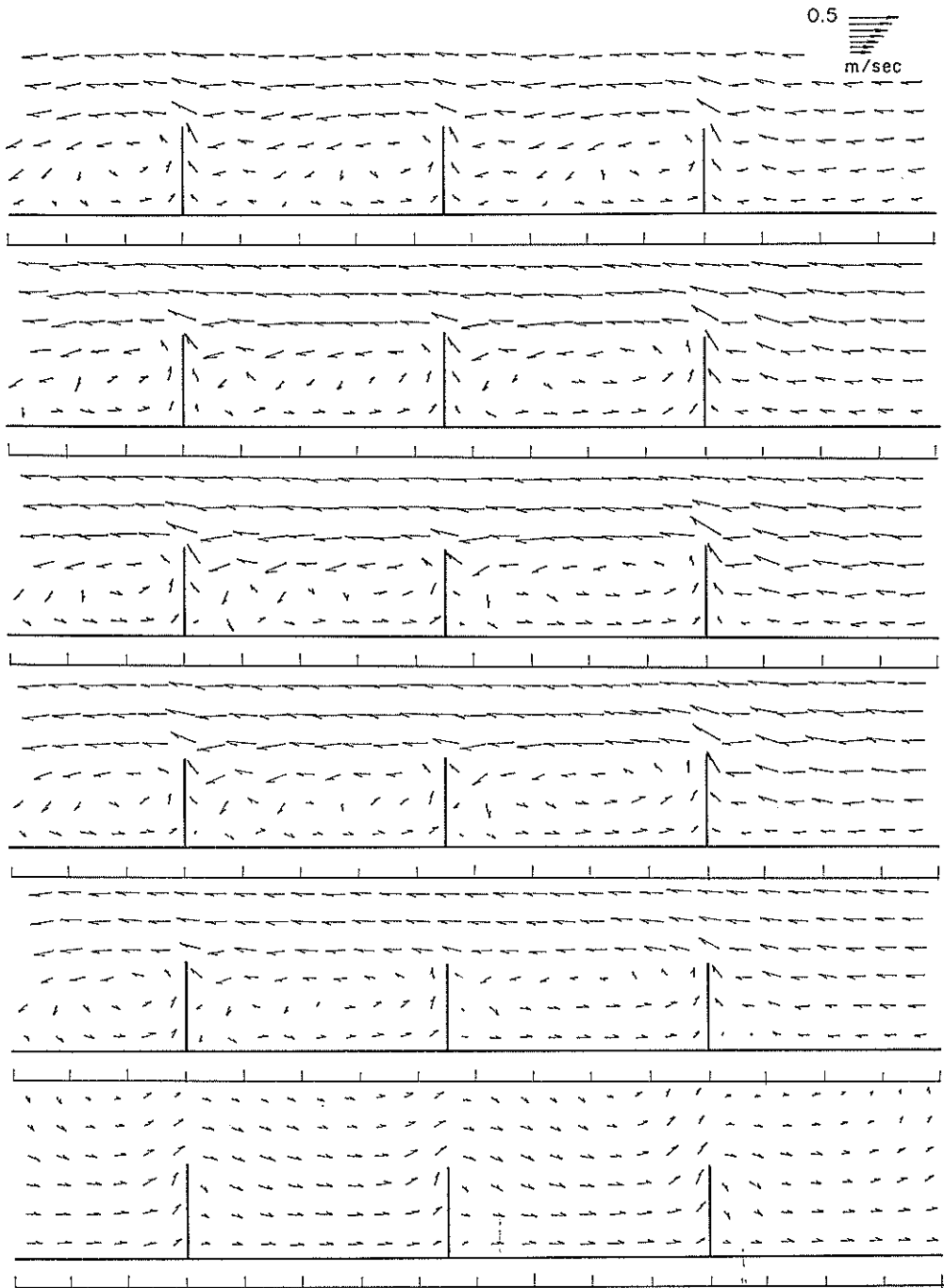
- 1) 佐藤昭二・加藤 始・木村久雄・高松恭文：須磨レクリエーション海浜における突堤・離岸堤の海水交換に与える影響、港湾技術研究所資料、No.243、1976年9月
- 2) 佐藤昭二・加藤 始・木村久雄：レクリエーション海浜における突堤・離岸堤の海水汚濁に関する実験的研究、第22回海岸工学講演論文集、1975年11月
- 3) 佐藤昭二・木村久雄・高松恭文：合浦レクリエーション海浜の海水循環促進による汚濁対策について、港湾技術研究所資料、No. 244、1976年9月
- 4) 金子安雄・堀江 毅・村上和男：ADI法による潮流と汚染拡散の数値計算—大阪湾に適用した場合—、港湾技術研究所報告、第14巻第1号、1975年8月
- 5) 堀江 毅・金子安雄・村上和男・細川恭文・亀山 豊：潮流計算における境界の取扱い、港湾技術研究所報告、第15巻第2号、1976年6月
- 6) David A. Bella and William J. Grenney: Finite-Difference Convection Errors, Proc. of ASCE, Sanitary Eng. Division No. 6, Dec. 1970, pp. 1361~1375

レクリエーション海浜における突堤・離岸堤の汚濁拡散に対する影響

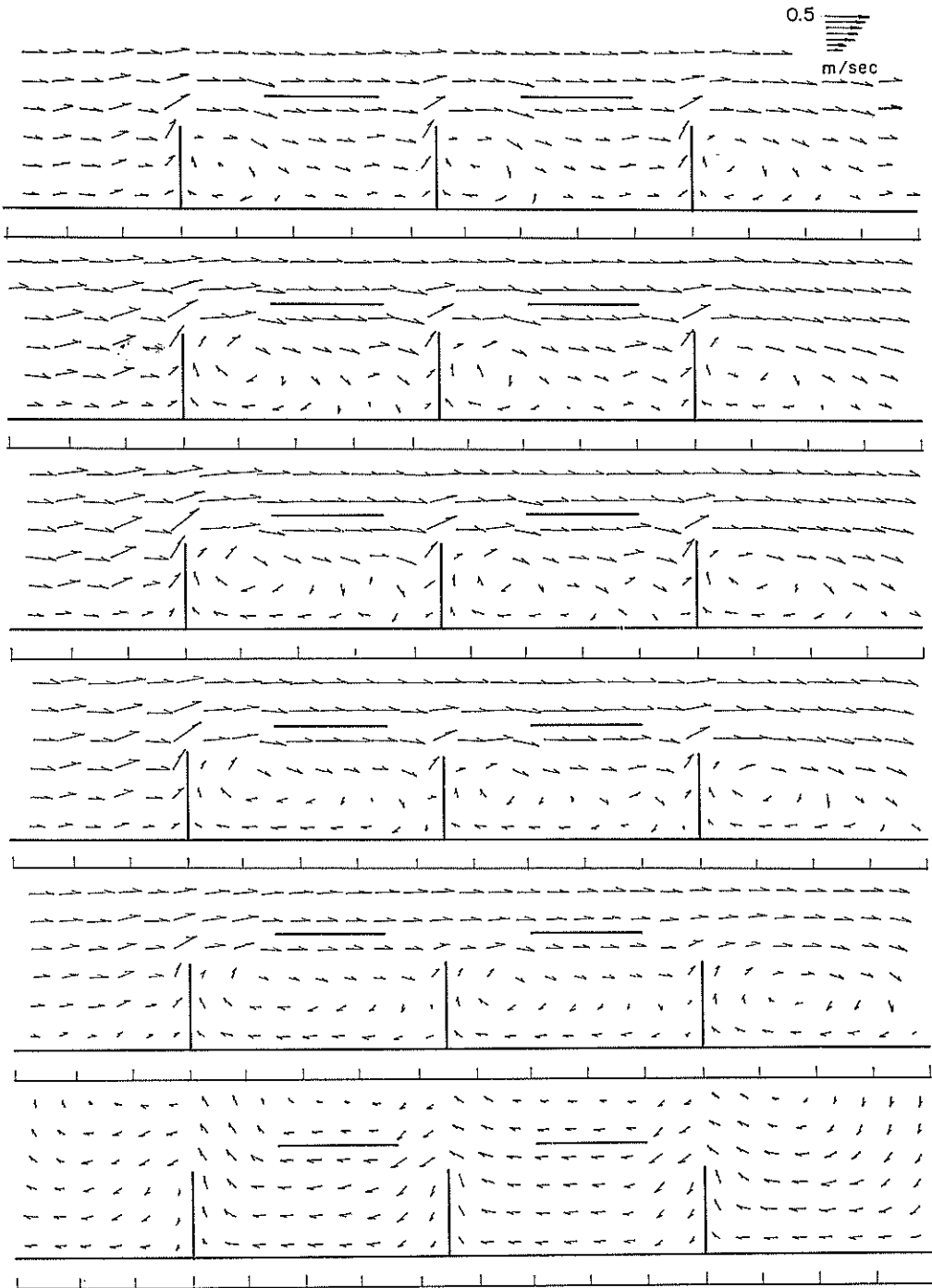


付図 1 突堤の場合の流速分布 (上から 1, 2, 3, 4, 5, 6 時) その 1

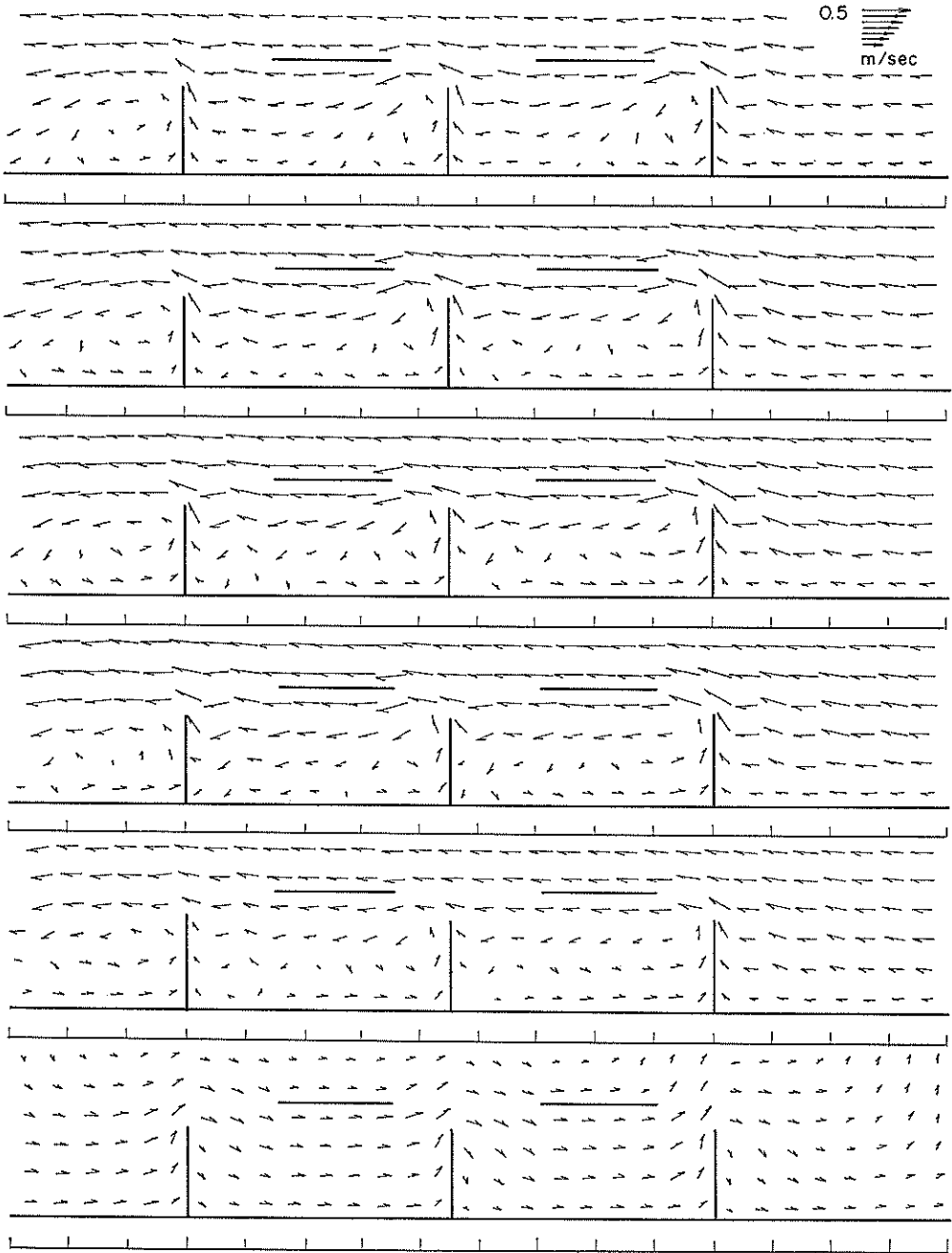




付図 2 突堤の場合の流速分布 (上から 7, 8, 9, 10, 11, 12 時) その 2

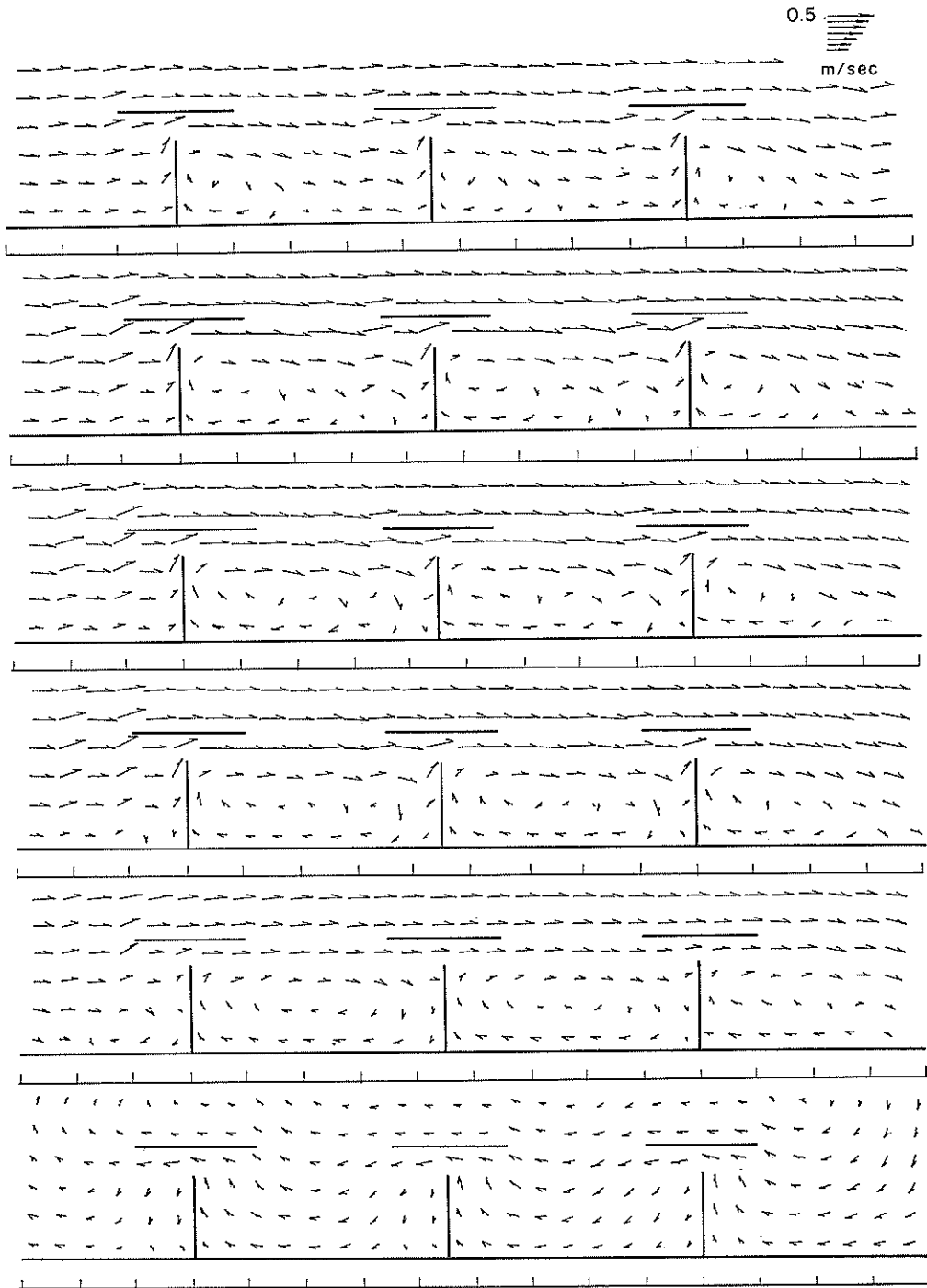


付図 3 突堤間に離岸堤のある場合の流速分布 (上から 1, 2, 3, 4, 5, 6 時) その 1

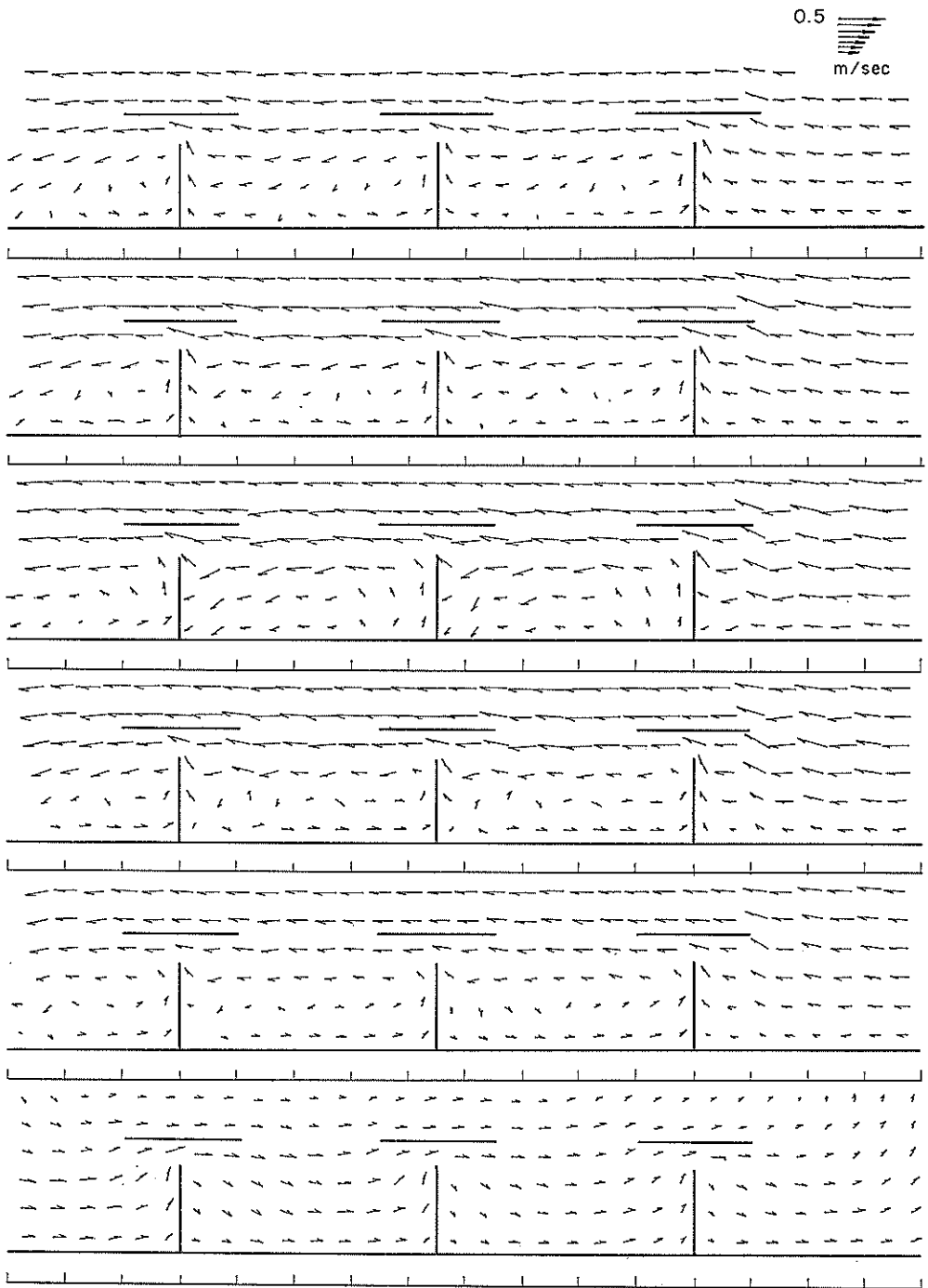


付図 4 突堤間に離岸堤のある場合の流速分布 (上から 7, 8, 9, 10, 11, 12 時) その 2

レクリエーション海浜における突堤・離岸堤の汚濁拡散に対する影響



付図 5 突堤先端に離岸堤のある場合の流速分布 (上から 1, 2, 3, 4, 5, 6 時) その 1



付図 6 突堤先端に離岸堤のある場合の流速分布 (上から 7, 8, 9, 10, 10, 11, 12 時) その 2