

二色の浜における潮流の水理模型実験

樋口 明生・柏井 誠

HYDRAULIC MODEL EXPERIMENT ON THE TIDAL CURRENT IN NISHIKINOHAMA

By Haruo HIGUCHI and Makoto KASHIWA

Synopsis

The flow pattern and mixing process due to the tidal current in NISHIKINOHAMA Coast are studied through a hydraulic model experiment. A distorted Froude model with horizontal and vertical scales of 1/2,000 and 1/160 respectively, was constructed. A semidiurnal tide and tidal current with constant current generated by the tidal current generator were provided for it.

Experiments have shown that the tide and the tidal current are well reproduced in the model. The mixing process by local eddy and similarity of the diffusion process are discussed.

1. ま え が き

大阪府下二色の浜周辺海域における埋立地造成によって生ずる潮流（および恒流）の流況の変化とそれともなう物質の分散過程の変化について水理模型実験を行った。

この論文では、実験装置の特色および2, 3の実験結果を示し、さらに、地形性渦流ともなう海水の混合過程に関し若干の論議を行う。

2. 原 型

二色の浜を含めて泉南海岸は、大阪湾の東南岸を形成する比較的単調な地形の海岸である。これまでの浅海部の埋立によって二色の浜以北の水深10m以浅は臨海工業地帯となっており、二色の浜はこの海岸に残された唯一の海水浴場となっている。埋立地が造成される以前の自然地形は Fig. 1 に示すとおりである。

この海域の潮汐定数を Table 1 に示す。潮型示数 $[F=(H_h+H_o)/(H_m+H_s)]$ は $F=0.95$ となり、混合型である。したがって大潮時には半日周潮型に近いものとなり、小潮時には日周潮型に近くなる。この実験は大潮時における流況と埋立地造成によるその変化を調べることを目的としたので、半日周潮に着目することとした。

この海域で得られている潮流の調和定数^{1)~3)}にもとづいて求めた半日周潮流 (M_2+S_2) の長軸成分を Fig. 2 に、恒流 (15昼夜平均値) を Fig. 3 に示す。

観測資料によると、恒流 (潮流観測値の25時間平均値) は、必ずしも安定したものではない。潮流観測値の25時間の移動平均を行い、8時間毎の値をプロットすると Fig. 4 のように変動している。この変化は大潮からの日数に関係しているようであり、一昼夜平均流は、約15日周期の変動を示す可能性がある。Fig. 4 において+印で15昼夜平均流を示した。

現地 (Fig. 2 における St. P) で、瞬間点源染料域の拡散実験が行なわれた¹⁾。この結果得られた拡散係数を、Fig. 5 に示す。

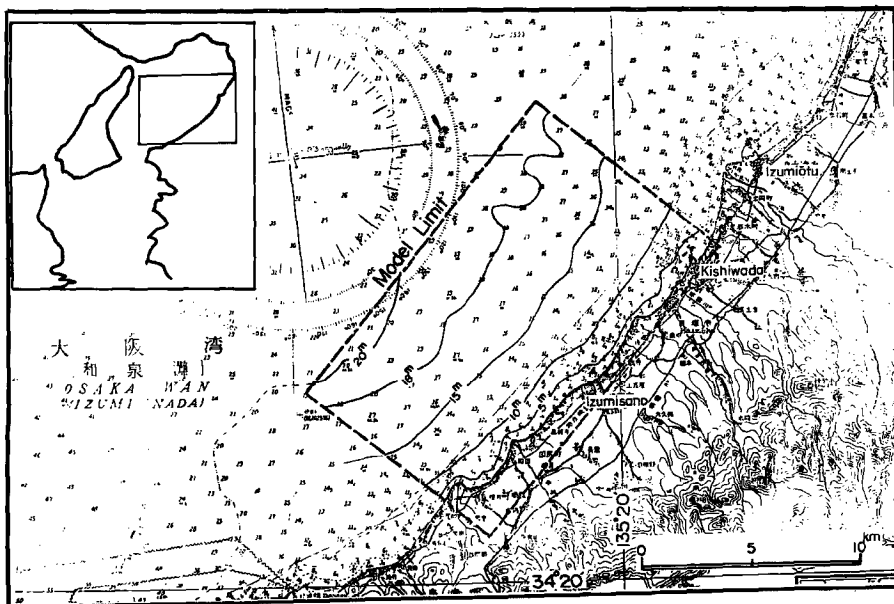


Fig. 1 Bathymetric chart of the eastern part of OSAKA BAY.

Table 1. Tidal constant in the prototype.
(KISHIWADA)

constituent	Amplitude	phase lag
	H (cm)	κ ($^{\circ}$)
M ₂	31.39	211.8
S ₂	16.70	227.4
K ₁	25.95	203.7
O ₁	19.84	108.6

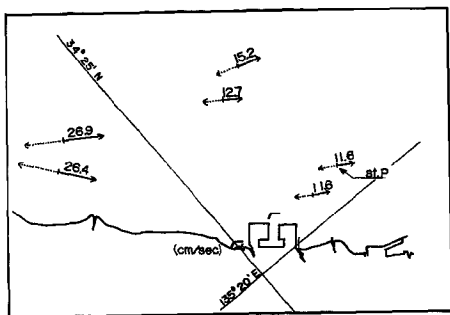


Fig. 2 Tidal current (prototype).

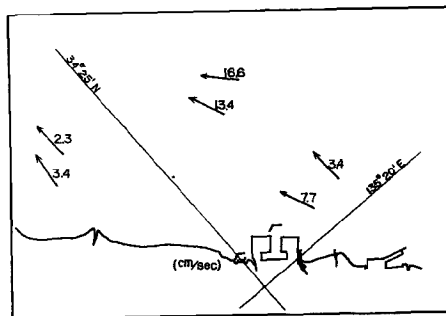


Fig. 3 Constant current (prototype).

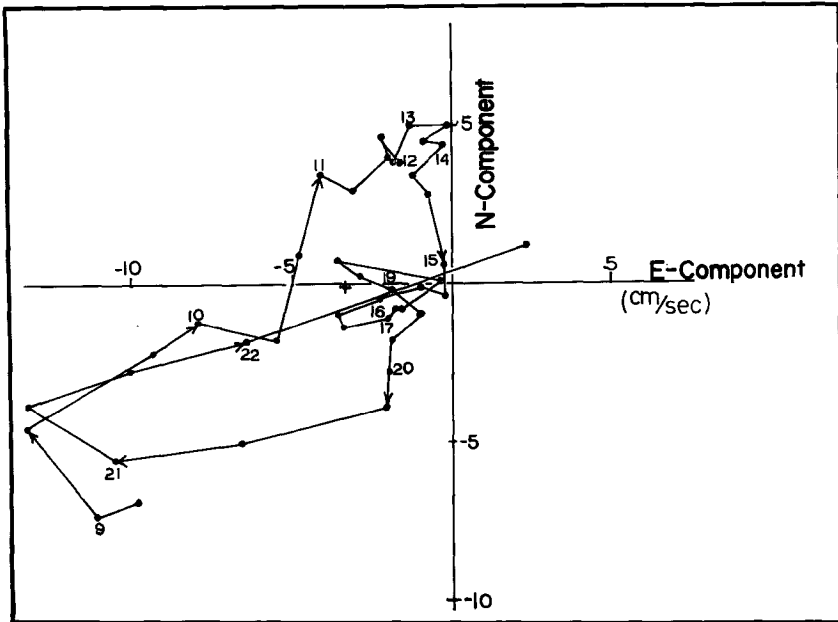


Fig. 4 Variation in the constant current (prototype).

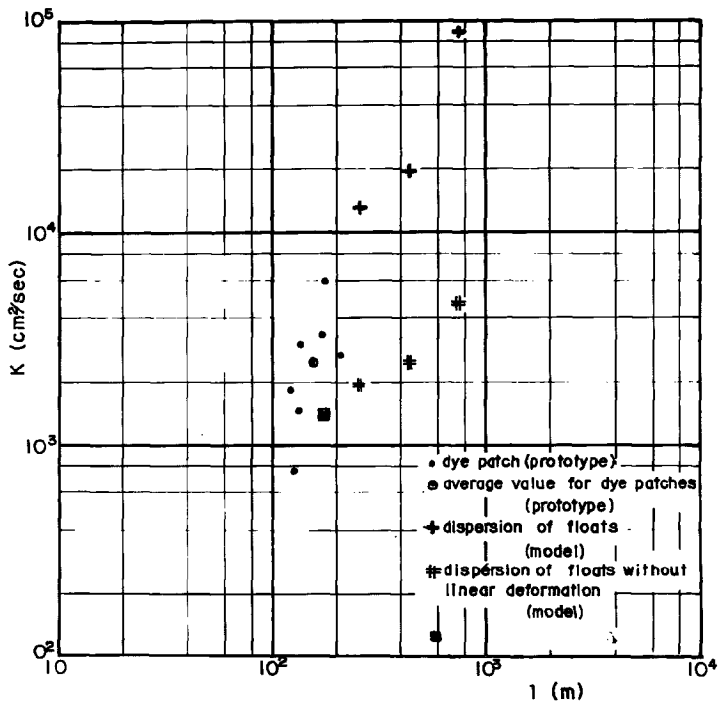


Fig. 5 Diffusivity K versus horizontal scale l in NISHIKINOHAMA Coast.

3. 相似則と模型諸元

流動と拡散現象の相似則⁴⁾——すなわち Froude 数と海底摩擦の効果および単位質量あたりのエネルギー逸散率を原型と模型で一致させる——にしたがい、対象とする海域、水粒子の移動範囲と実験施設の大きさを考慮して水平縮尺を1/2,000、鉛直縮尺を1/160とした。これにともなう模型の諸元を **Table 2** に示す。

Table 2. Hydraulic factors in the prototype and the model.

Factor	Scale	Prototype	Model
Distance	1/2,000	20km	10m
Water Depth	1/160	12m	7.5cm
Tidal Range	1/160	96.2cm	0.60cm
Tidal Period	1/160	12 ^h 25 ^m	4 ^m 40 ^s
Velocity	1/12.5	50cm/s	4.0cm/s
Discharge	1/4×10 ⁶	4m ³ /s	1.0cm ³ /s
Diffusivity	1/2.5×10 ⁴	10 ⁴ cm ² /s	0.4cm ² /s

4. 実験施設・装置

実験は宇治川水理実験所の海洋河口実験施設で行なわれた。模型一般図を **Fig. 6** に示す。実験施設・装置の概要は以下のとおりである。

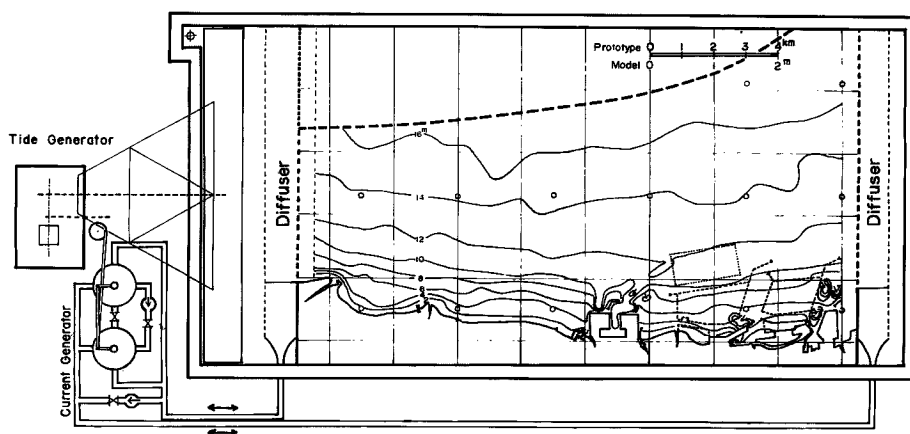


Fig. 6 Model of NISHIKINOHAMA Coast.

4.1 模型水槽

潮流楕円の長軸方向、恒流の向きと大きさ等を考慮して、模型範囲を **Fig. 1** に点線で示したように定め、この海域の模型を、長さ11m、幅5.4m、深さ0.27mのコンクリート水槽内に製作した。海底はモルタル刷毛仕上げとした。

4.2 起潮機

模型に潮汐を与えるためにプランジャー式起潮機を用いた。プランジャーは、長さが5.36m、幅0.60m、高さ0.40mで、周期は3~30分、ストロークは0~40cmの間で調節可能である。この起潮機によって、本実験では、潮差0.60cm、周期4分40秒の潮汐を与えた。これは **Table 2** に示したように、原型では潮差96cm、

周期12時間25分に相当する。

4.3 潮流発生装置

対象海域の恒流を含む潮流を再現するため潮流発生装置を製作した。動作原理は Fig. 7 に示すように、一

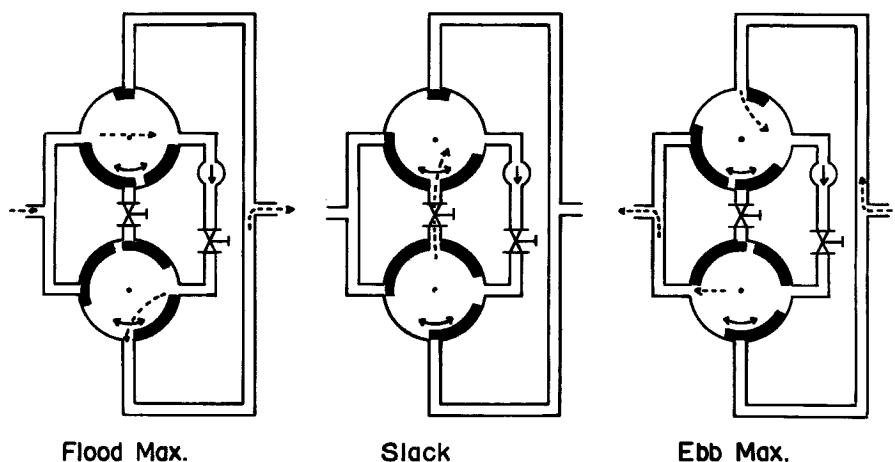


Fig. 7 Principle of Current Generator.

方向に定回転する循環ポンプの流量と流向を2つの四方バルブで制御するものである。ポンプによって起こされる水流は、バイパスを含む3方向の管路へそれぞれの開度に応じて配分される。この3つの開度の合計はいつも一定である。このバルブの回転角を正弦的に変化させると流量は正弦的に変化し、またバイパス系全開の位置（外部への流量0）から一定の偏角を与えて正弦的に回転させると一定の平均流の加わった正弦流を発生させることができる。流量の大きさは、このバルブの回転角の振幅とポンプ吐出側の流量制御バルブによって設定される。この回転バルブの駆動は、起潮機の一部からとり出したプランジャーと同一周期の動力によって行なわれる（Fig. 6 参照）。この装置は Fig. 6 に示されるように、水槽の両端に設けたディフューザーに接続されている。

動作条件は Fig. 2, 3 に示した原型の流況を再現するように設定した。

4.4 計測装置

水位は電気抵抗式水位計によって測定した。流速は、主として浮標追跡により測定した。

5. 実験経過

潮汐定数の知られている岸和田について、大潮差 $2(M_2+S_2)$ が再現されるように、起潮機のプランジャーのストロークを調整し、海域で得られている半日周潮流の振巾、恒流の大きさが再現されるように潮流発生装置を調整するとともに Fig. 6 に破線で示した位置に導流壁を設けた。

潮汐および流況の再現を得た後、現場での拡散実験と対応する海域で浮標の分散によって拡散係数を求めた。次にこの海域で計画されている埋立地によって生じる海況（潮流および恒流）の変化を調べた。またこの流況の変化に対応する拡散状況を調べるために連続点源染料域の拡散実験を行なった。

また埋立造成地の防波堤付近に形成される地形性渦流について詳細な実験を行なった。

6. 実験結果および考察

6.1 流況について

上げ潮最盛期と下げ潮最盛期の流況を Fig. 8 (a), (b) に示す。これらはこの海域の流況すなわち、岸沿い

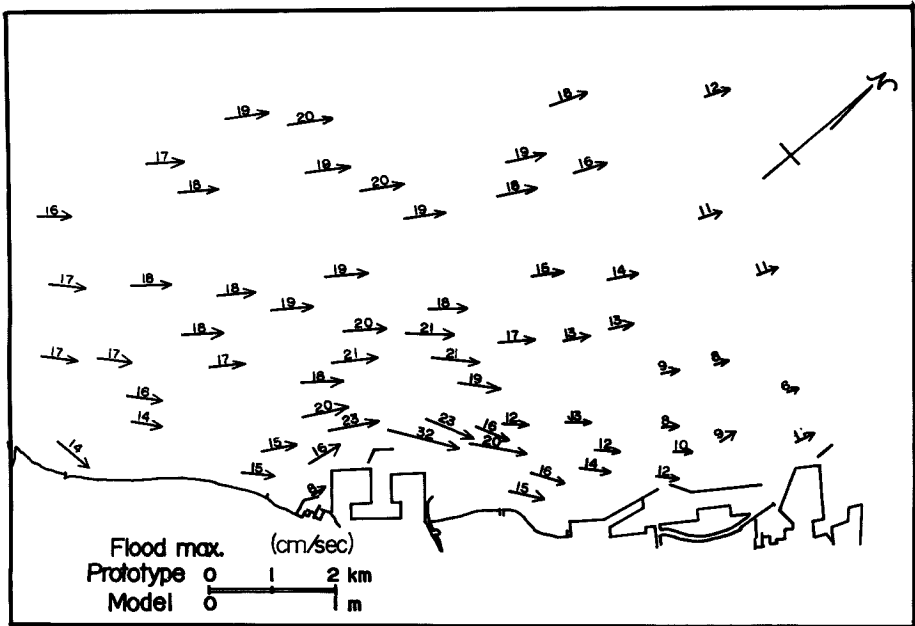


Fig. 8 (a) Flow pattern in the flood (model, present state).

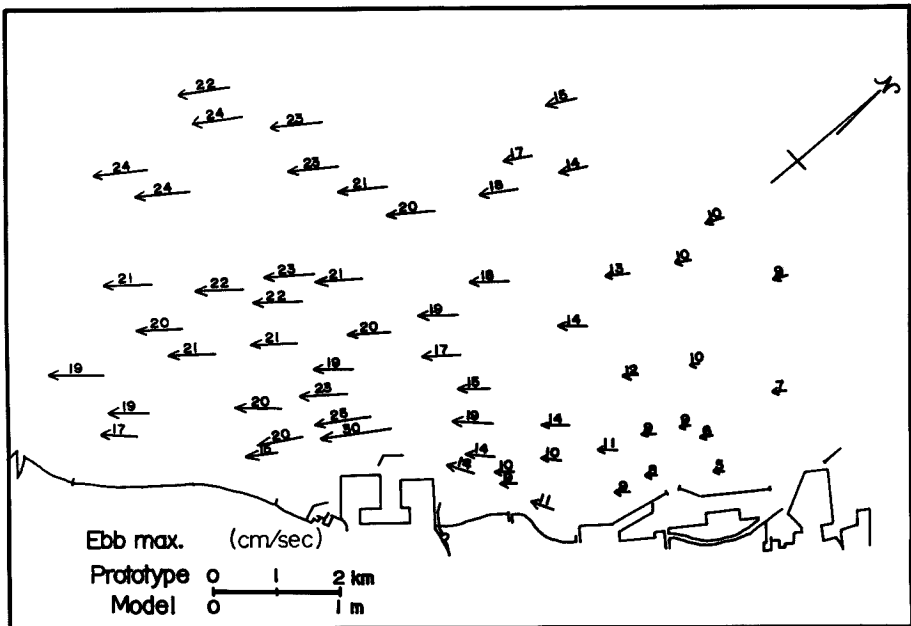


Fig. 8 (b) Flow pattern in the ebb (model, present state).

に往復する潮流，そして南部に行くにしたがって増大する振巾をよく再現している。原型に関する値の知られている点については潮流の振巾，恒流の大きさを±5%以内で再現している。

模型における恒流（潮汐残渣流）を Fig. 9 に示す。潮汐残渣流は位置の誤差を小さくするという点からは

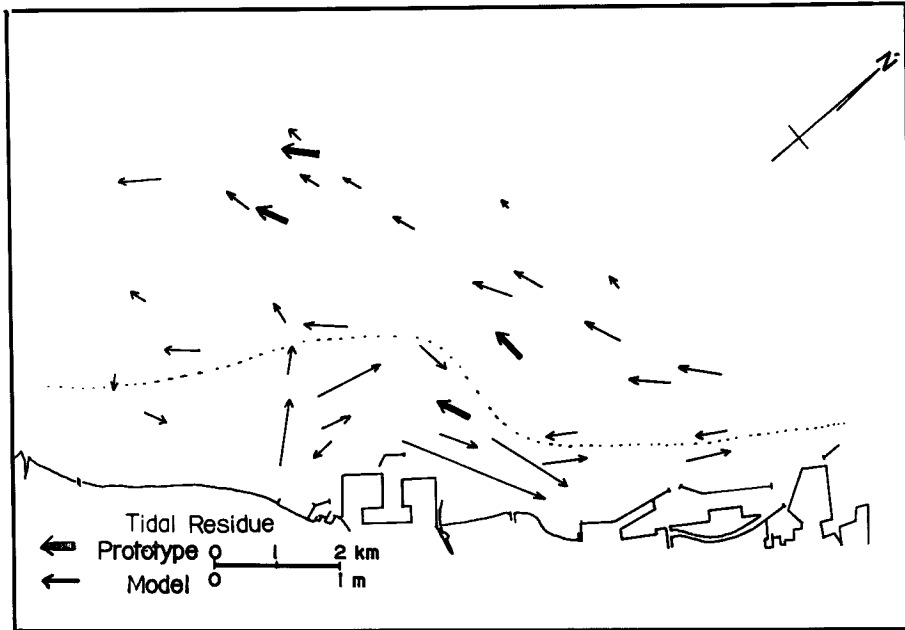


Fig. 9 Tidal residue (present state).

憩流から憩流まですなわち $H. W$ (または $L. W$) から $H. W$ (または $L. W$) までの浮標の変位を求めるのが望ましい。しかし潮汐残渣が岬や防波堤など極端な地形に起因するような場合にその地形との対応をみよとする時やオイラー的に得られた恒流との対応を調べる場合には平均水面時を基準にするのが妥当である。ここでは平均水面時を基準に潮汐残渣を求めた。平均水面時は一般に潮流の最強時にあたるので浮子の位置を求める際、精度を保つように注意した。

Fig. 9 に示した太い矢印は原型における恒流（15昼夜平均流）の流向である。図からわかるように恒流の流向もかなりよく再現されている。

また Fig. 9 には、岸沿い距岸 1~1.5km の範囲にこれより沖側とは逆に北上する恒流の存在が示されている。この流れの存在は原型では観測例がないので確認されないが、沿岸域とくに二色の浜海域の汚染を考える際きわめて興味ある現象である。

6.2 流況の変化

埋立地が造成された場合の流況の変化を Fig. 10, 11 に示す。Fig. 10 の埋立地の防波堤付近に形成される強い地形性渦流が特徴的である。Fig. 11 と比較すると、この地形性渦流は防波堤に起因するものであることが明らかである。

恒流の変化は Fig. 12, 13 に示されている。これらを見るとときに Fig. 9 で見られた恒流の岸沿いの反流域は埋立地造成による海岸線の前進に対応して沖側に移動し、その幅は大きく変化しないことが示されている。また Fig. 10 に見られる強い地形性渦流に対応して、防波堤付近に強い潮流残渣環流が形成されている。この環流域は防波堤の両側に tidal excursion に相当する距離をとった規模となっている。

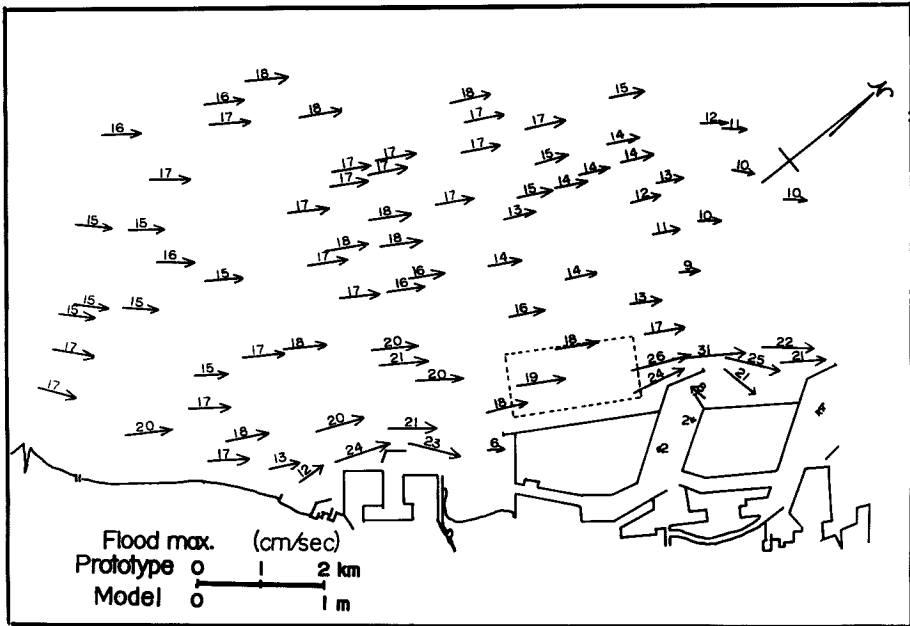


Fig. 10 (a) Flow pattern in the flood (model, planned state 1).

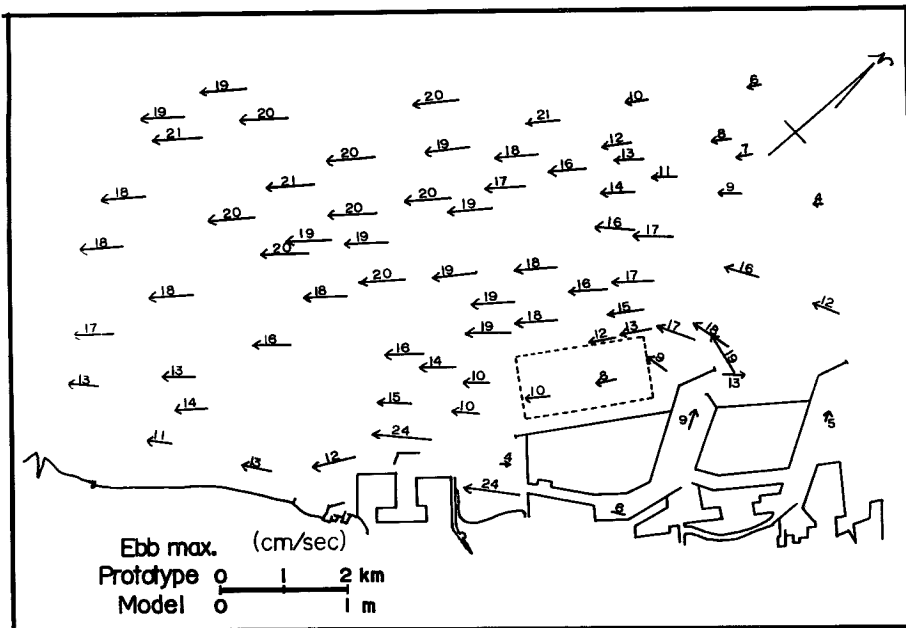


Fig. 10 (b) Flow pattern in the ebb (model, planned state 1).

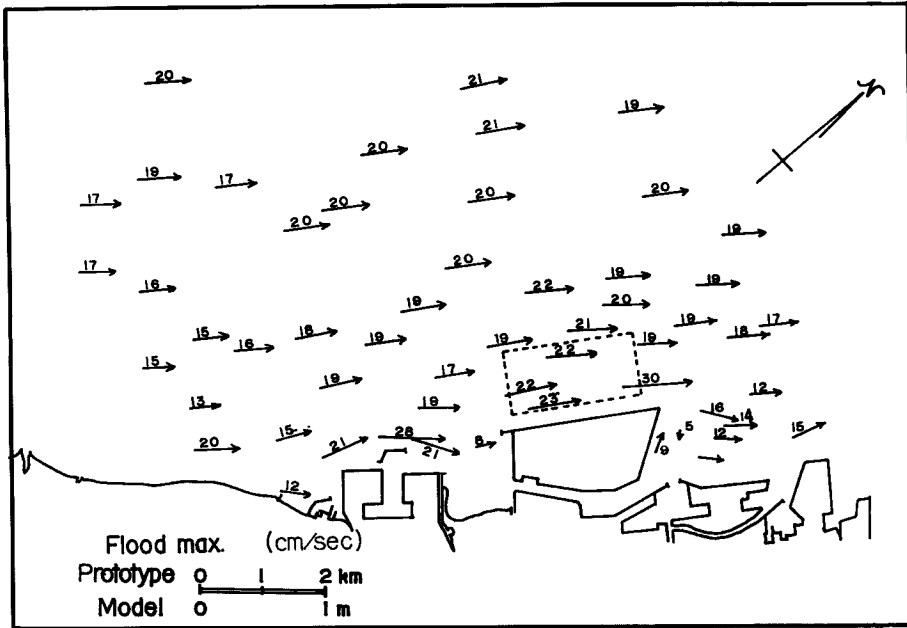


Fig. 11 (a) Flow pattern in the flood (model, planned state 2).

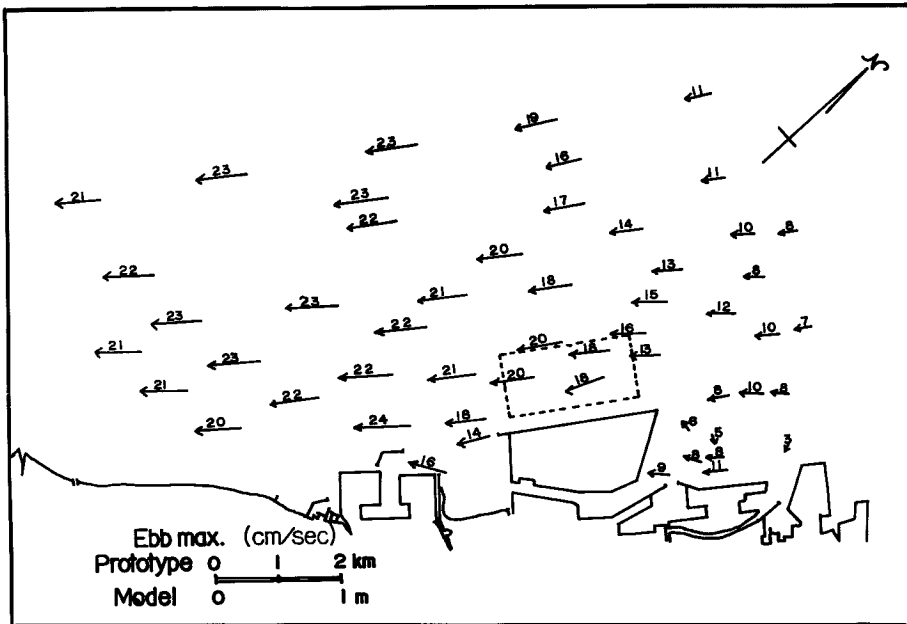


Fig. 11 (b) Flow pattern in the ebb (model, planned state 2).

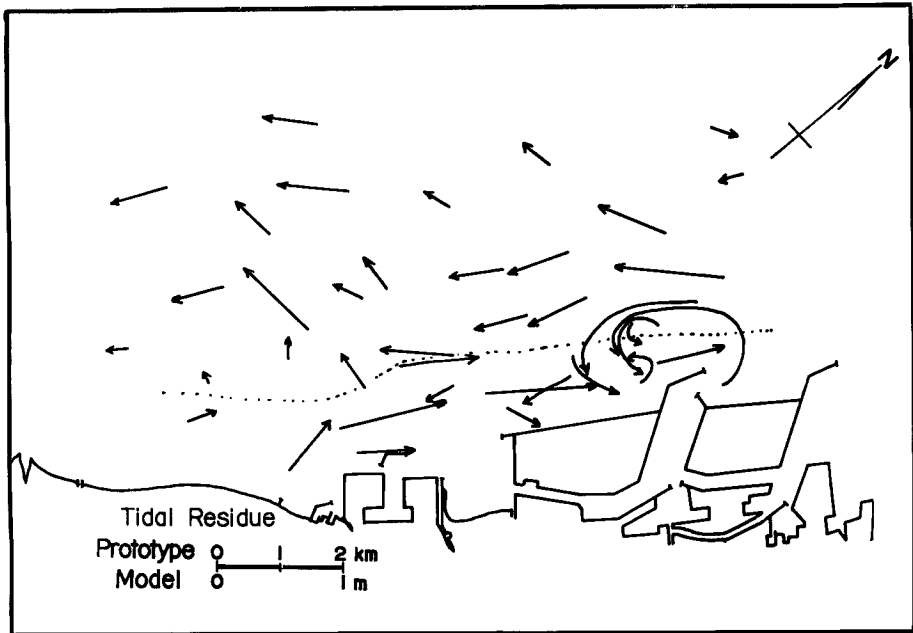


Fig. 12 Tidal residue (model, planned state 1).

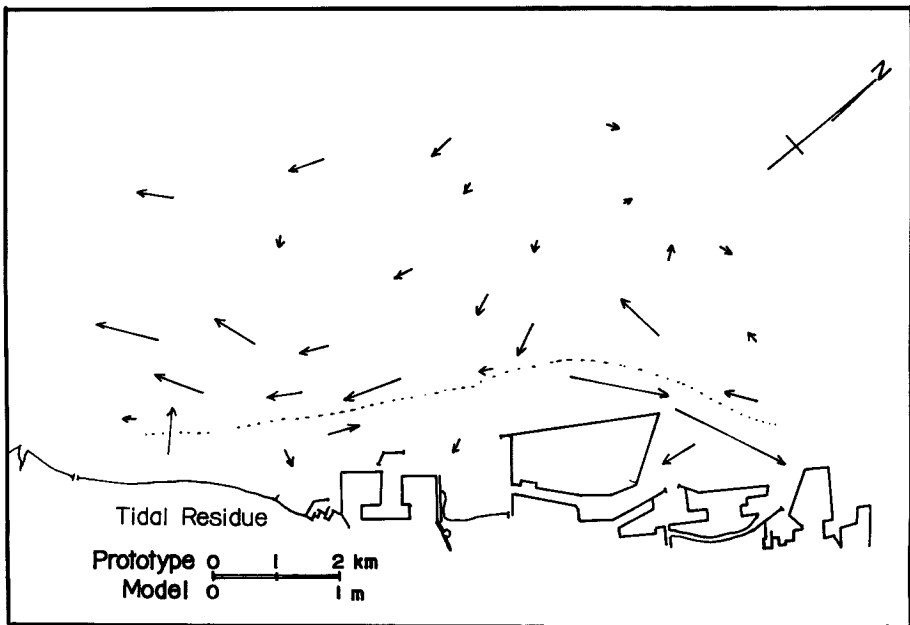


Fig. 13 Tidal residue (model, planned state 2).

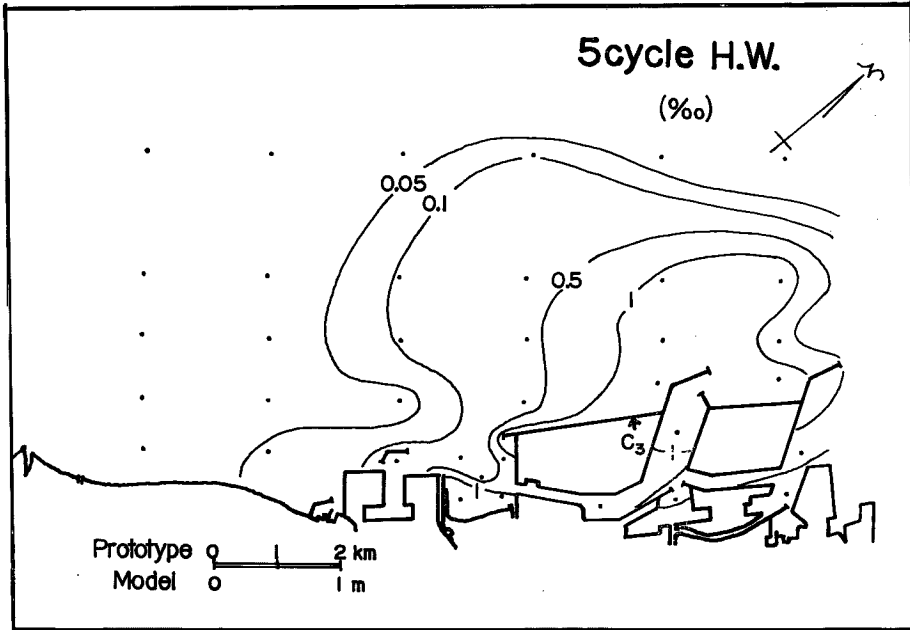


Fig. 14 (a) Horizontal distribution of dye concentration at high water (model, planned state 1).

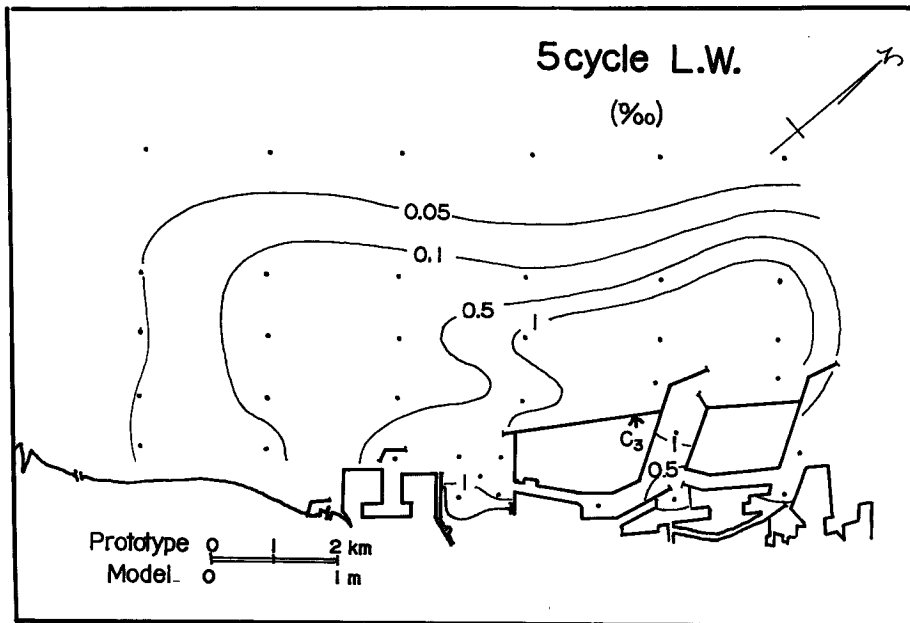


Fig. 14 (b) Horizontal distribution of dye concentration at low water (model, planned state 1).

この潮汐残渣は水粒子の実質的変位を意味するから、これが閉じた環流を形成することは、その内部が滞留域となる可能性があることを示している。

防波堤付近(図中 C_3 と印した位置)から染料を投入した連続点源による染料域の拡散実験の結果、得られた濃度の水平分布パターンを Fig. 14 に示す。前述の環流域に高濃度域が対応している。

このように地形性渦流が潮汐残渣環流と対応する場合には、地形性渦流を拡散に寄与する最大渦として算定された拡散係数は、環流域の滞留水塊の均一化の速度を示すことになるだろう。これは潮汐残渣環流の規模と強さをもとに得られる拡散係数にもあてはまることと思われる。

6.3 地形性渦流域の混合過程について

地形性渦流域のより詳細な流況とその変化を2時間毎に、その時点と前後30分における浮標の位置を結んだ流程として、Fig. 15 (a)~(f) に示す。この流れのパターンの変化とこれが安定するのに起潮機始動後2~3周期要したことから考えて、この渦流の形成には防波堤による偏流と剥離がまず一次的に働き、また現象的には潮汐残渣環流として表われる海域への循環エネルギーの蓄積が二次的に働いているようである。また防波堤のごく近くでは、主流の憩流期に強い流れがみられる。

上げ潮期、下げ潮期とも防波堤の先端で小さな渦が形成され、次々に流されていくのが観察された。

Fig. 15 (a) の左寄りに点線で描かれた3角形から成る海面がこの地形性渦流によってどのように変形するかを調べた。右寄りのオタマジャクシのような点線図形はこの海面の一周期後の形状である。この変化のようを追ってみよう。三角形の辺の位置は図に示した浮標およびそれ以外のものの相互の位置関係から内そうして求めていく。

- 上げ潮最盛期に正三角形をなすこの海面は (Fig. 15 (a))
- 2時間後の満潮1時間前にはやや変形しながら防波堤前面を流れている (Fig. 15 (b))。
- 満潮後1時間では主流部はすでに転流している。防波堤の左には下げ潮期の流れのパターンが形成されつつあり、また防波堤の右には上げ潮期の時計廻りの渦流がまだ残っている。この両者にまたがった着目海面は急速にひき伸ばされ扁平になっていく。(Fig. 15 (c))
- 下げ潮最盛時には左側から防波堤上部の反時計廻りの渦流にまきこまれてさらに伸びて線状になる (Fig. 15 (d))。
- 干潮1時間前、左側では防波堤左方に移動した渦流にさらにまきこまれてゆき、右方では上流側の防波堤下流に形成されている同様の渦流によってひきのばされていく (Fig. 15 (e))。
- 干潮後1時間では、岸寄りから上げ潮流が強まる形で転流を始めている。着目海面は幅を描けないので線で示す。(Fig. 15 (f))
- 1周期後の上げ潮最盛期は Fig. 15 (a) の右方の形となる。

このようにこの地形性渦流内には強いシアが存在し、それが着目した海面の形状を強く一方に伸長させる。この海面の周長は原型に換算して始め2.2kmであったが1周期後には16.8kmを伸びている。これは 10^{-4} のオーダーの伸長変形をうけたことになる。別に浮標の相互位置の変化から上げ潮期における渦流域の変形を求めると次のような結果が得られている。

$$\text{発散} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) : D_v = 5.0 \times 10^{-5} \text{ (sec}^{-1}\text{)}$$

$$\text{渦度} \left(\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right) : V_r = 9.8 \times 10^{-5} \text{ (sec}^{-1}\text{)}$$

$$\text{実質変形} \left\{ \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \right\}^{\frac{1}{2}} : S_t^* = 11.8 \times 10^{-5} \text{ (sec}^{-1}\text{)}$$

$$\text{見かけの拡散係数} \left\{ \frac{1}{2} \frac{d}{dt} \left(\frac{x_1^2 + y_1^2}{2} \right) \right\} : K = 8.7 \times 10^4 \text{ (cm}^2\text{/sec)}$$

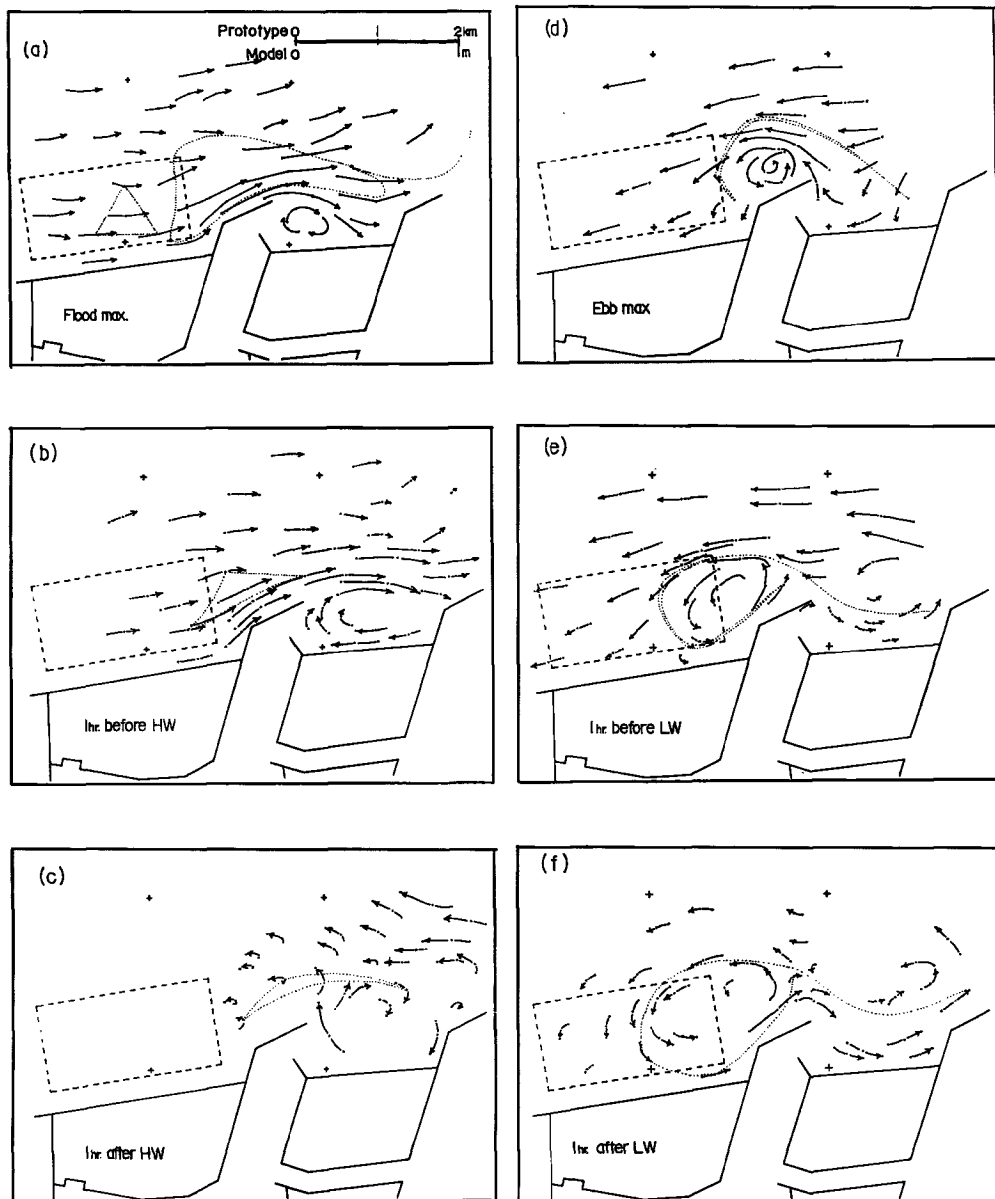


Fig. 15 (a)~(f) Flow pattern and the deformation of material area in the local eddy region (model, planned state 1).

$$\text{変形の効果をのぞいた拡散係数} \left\{ K - \frac{1}{2} \frac{\partial u}{\partial x} x_1^2 - \frac{1}{2} \frac{\partial v}{\partial y} y_1^2 - \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) x_1 y_1 \right\} :$$

$$A = 4.7 \times 10^3 \text{ (cm}^2\text{/sec)}$$

ここで実質変形とはずり変形と伸長変形の合成されたものである。

このように地形性渦流内で、水塊要素は強い変形によって一方に伸長され幅が減少するので規模の相当小さ

い乱れによる混合の効果を強くうける結果となる。

これまでの議論では乱れを考えに入れなかったので、変形と拡散の効果を前述の値を例として比較してみよう。

時間 Δt 内に拡散で均一化される長さのスケールは渦動拡散係数を A とすると $\sqrt{A \cdot \Delta t}$ である。着目する水塊のスケール (たとえば浮遊物の帯の幅) を L とすれば、発散 D_v および実質変形 S_t^* による変化はそれぞれ $D_v \cdot L \cdot \Delta t$, $S_t^* \cdot L \cdot \Delta t$ である。今 $L=500\text{m}$, $\Delta t=30\text{min}$ として先の数値を用いると、

$$\begin{aligned} \Delta L &= \sqrt{A \cdot \Delta t} + D_v \cdot L \cdot \Delta t - S_t^* \cdot L \cdot \Delta t \\ &= 29 + 45 - 106 = -32(\text{m}) \end{aligned}$$

となり、変形の効果が卓越し幅が減少することがわかる。

6.4 拡散現象と地形性渦流の相似性

原型において染料パッチの拡がりから求めた拡散係数と模型で浮標の分散から求めた拡散係数 **Fig. 5** に示した。

染料パッチによる結果と浮標の分散から求めた結果とを単純に比較することはできないが、これまでも報告されている⁶⁾と同様に、模型内の拡散係数はスケール l の $4/3$ 乗よりも 2 乗に近い傾向を示している。

沿岸域において地形性渦流のスケールまで $4/3$ 乗則を適用することは問題がある。したがって拡散現象と考える場合、流れの綜観的構造に対応するような変形の効果を除いて考えるのが妥当であろう。この考えのもとに変形の効果を除いた拡散係数を求める⁶⁾と、**Fig. 5** において $\#$ 印でプロットしたように 1 ケタ小さい値となり、原型における 100m スケールのものに近い値を示した。これは 100m スケールの乱れが模型で再現されると考えてよいだろう。

地形性渦流の相似条件は Reynolds の相似則による。すなわち

$$R_{er} = \frac{U_r L_r}{K_{xr}} = 1$$

この場合、地形性渦流をひきおこす沖側の流速を代表流速 U に、地形の大きさを代表長さ L にとり、渦動拡散係数 K_x を 100m 程度の乱れによるものとするのが妥当であろう⁴⁾。

したがって渦動粘性係数の相似性を同一スケールでの渦動拡散係数の相似性が保証するかぎりにおいて、この地形性渦流は原型においても発生するものと考えられる。

7. あとがき

以上、著者らは二色の浜海域の水平縮尺 $1/2,000$ 、鉛直縮尺 $1/160$ の模型実験を行ない次のことが明らかになった。

- 1) 海域の潮汐、潮流および恒流はかなりよく再現できる。
- 2) この海域は大阪湾中央部の時計廻り環流域に含まれ、ほぼ岸と平行に南西に流れる恒流が卓越するが、実験の結果、岸沿い距岸 $1 \sim 1.5\text{km}$ に岸に平行に北東流する恒流が見出された。この流域の幅は埋立地造成によって変化しない。
- 3) 防波堤の下流側に強い地形性渦流が発生しそれに対応する潮汐残渣環流が形成される。
- 4) 渦流内のみかけの拡散係数 9×10^4 (cm^2/sec) は、変形の効果をのぞくと 5×10^3 となり、原型における渦流のない海域の、 100m スケールの拡散係数 ($0.6 \sim 8 \times 10^3$, 平均 2.5×10^3) とほぼ等しいものとなる。
- 5) この地形性渦流内では 10^{-4} (sec^{-1}) のオーダーの強い実質 (伸長) 変形が存在する。これが渦流域の比較的大きな見かけの拡散係数の実体であろう。

以上、限られた条件の下での実験結果について述べたが、周辺海域の流況をある程度強制的に原型と一致させることの影響、潮流場の変形と乱れとの関係などの多くの問題が残されているが、これらについては今後の

研究課題としたい。

終りにあたって、実験に協力していただいた北川吉男技官、武岡英隆氏に感謝の意を表す。なお、この研究の一部は大阪府の委託によるものであることを付記する。

参 考 文 献

- 1) 産業公害防止協会：泉南臨海部の海況調査報告書，1974.
- 2) 大阪府水産試験場：海況自動観測ブイ観測資料（大阪府水産試験場報告発表予定）
- 3) 運輸省第三港湾建設局：昭和46年度大阪湾潮流観測 観測報告書，1971.
- 4) 樋口明生・杉本隆成：潮流による拡散の水理模型実験について(Ⅳ)，京都大学防災研究所年報，第13号 B，1970，pp. 457—470.
- 5) 柏井誠・川合英夫：浮標による収束・発散と相対拡散の測定について，昭和50年度日本海洋学会春季大会講演予講集，1975，p. 44.
- 6) 樋口明生・杉本隆成：潮流による拡散の水理模型実験について(Ⅱ)，京都大学防災研究所年報，第11号 B，1968，pp. 447—461.