

透過型防波堤を有する港湾の海水交換特性

Characteristics of the Seawater Exchange in a Harbor
with Water Exchangeable Breakwater

高山知司¹・吉岡 洋²・大栗 剛³・村山英俊⁴

Tomotsuka TAKAYAMA, Hiroshi YOSHIOKA, Tsuyoshi OGURI and Hidetoshi MURAYAMA

1 フェロー工博 京都大学教授 防災研究所海岸海域分野 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

2 正会員 理博 京都大学助手 防災研究所海岸海域分野 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

2 正会員 工修 三井造船株式会社 千葉鉄構工場設計部 (〒290-8601 千葉県市原市八幡海岸通1)

4 京都大学大学院 工学研究科 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

We investigated how the water exchangeable breakwaters promote seawater exchange between a harbor and its outer region using numerical simulation. The flow was calculated with nonlinear baroclinic two and three layers model taking into account the flow through a water exchangeable breakwater. In this model, we express a breakwater as a line on the grid space without thickness. In order to calculate the water level at inside and outside of a breakwater, water level was defined with 4 division at 1 point. The mass flux through a water exchangeable breakwater is calculated by an energy equation of non-steady flow through a tube. Characteristics of seawater exchange at a harbor were investigated by many water particle trajectories. Distribution of water residence time and variation of exchange ratio were evaluated. Dominant horizontal oscillating flow had little effect for water exchange; therefore, residual flow including vertical component played on important role for it. When exchangeable breakwaters were arranged to promote tidal residual circulation, water qualities of the harbor was improved effectively.

Key Words: Exchangeable breakwater, seawater exchange, numerical evaluation, Euler-Lagrange numerical scheme

1. はじめに

近年、湾内の静穏度を保つとともに、湾内環境の改善を可能とするさまざまな透過型防波堤が提案・実用化されている。しかしそれはこれまでの不透過型防波堤に比べて建設費が高いため、すべての防波堤を透過型にするのは非現実的であり、いかに効率的に透過型防波堤を配置するかが重要である。そこで透過型防波堤を配置した港湾水域の潮流数値モデルを開発して、その最適な配置を検討した。すでに著者らは、3次元 Baroclinic モデルと粒子追跡を組み合わせて海水交換機構を検討するオイラーラグランジェ法¹⁾を用いて、閉鎖水域の海水交換量を見積もった²⁾。そのモデルで不透過型防波堤を表現するためには、防波堤を線状の形体で取り込み、さらに透過型防波堤の透過流量を考慮に入れて潮流を計算しなければならない。また防波堤周辺では流れの場所変化が激しいので、局所的に流れの強さに対応して拡散係数を変える必要がある。

2. 数値計算手法

(1) 基本方程式

流速場の計算には数値計算モデルとして3次元 Baroclinic モデルを用いた。基本となる方程式は静水圧近似の Navier-Stokes 式である。

$$\begin{aligned}\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} - f v &= -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\nu_h \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu_h \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu_v \frac{\partial u}{\partial z} \right) \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} + f u &= -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\nu_h \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu_h \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu_v \frac{\partial v}{\partial z} \right)\end{aligned}$$

$$p = \rho_0 g \zeta - \rho_0 \int_0^z B dz \quad (B = \frac{\rho_0 - \rho}{\rho_0} g)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$

ここで u, v, w は x, y, z 方向の流速, f はコリオリパラメーター, ρ_0 は鉛直平均密度, p は圧力, ν_h, ν_v はそれぞれ水平・鉛直渦動粘性係数, B は浮力, g は重力加速度である。ただし x, y, z 軸は左手系直交直線座標である。海水の密度は一定としている。

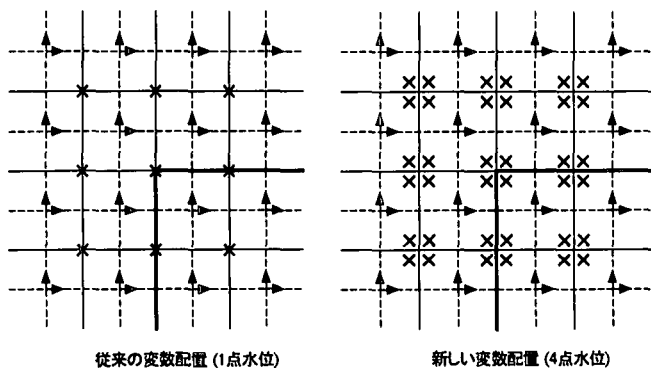


図-1 格子配置図

(2) 格子点配置

本モデルは淡路・今里(1980)³⁾によって開発された潮流モデルを基本にしており、各変数は図-1 左のように配置している。それぞれの分割された直方体の中心で u , v を定義し、 B , w , ζ (水位) は鉛直な稜において定義しており、両者は半格子ずれている。

元のモデルでは防波堤は細長い陸地として表現してきたが、そうすると防波堤の幅が最低でも1グリッドとなり長さに対して幅の小さい防波堤の表現は難しい。また、透過型防波堤をそのようなグリッドで表現すると流速場の計算の際、透過堤内の透過流の扱いが複雑になる。そこで防波堤を計算格子上では厚みを持たせず、格子間のラインとして表現した。これによって数十から数百メートルという大きなグリッドサイズが用いられる潮流計算においても、防波堤を幅の小さい構造物として、より現実に近い形で表現することが可能になる。

しかし、それに伴い新たな問題が生じる。水位は陸地の境界部分すなわち格子間のライン上に定義しているため、防波堤上に水位点が来てしまい、防波堤をはさんだ水位差を表せないのである。そこで、今まで1点で定義されてきた水位点を便宜上4点に分割して定義している (図-1 右)。

(3) 粒子追跡

まず、3次元 Baroclinic モデルを用いて計算領域の流速場を求め、得られた流速場上に粒子を置いて、ラグランジュ的にそれらを追跡する。本研究では、静止状態から外部開境界に水位変動を与えて潮流を起こし、4周期後にほぼ安定した潮流の場を得た。粒子追跡に用いる流速場データは、ほぼ安定した流れの場となる5周期目以降の1周期分のものを用いる。粒子追跡開始時間としては、港内と外海の海水交換能力を中立に評価できるように、干潮(満潮)時の状態ではなく、下げ潮の最強流時から開始した¹⁾。

(4) 透過型防波堤

防波堤の種類について普通の防波堤(直立ケーソン堤)と透過型防波堤の2種類を用いる。透過型防波堤とはケーソン堤の一部に港湾の内と外をつなぐ貫

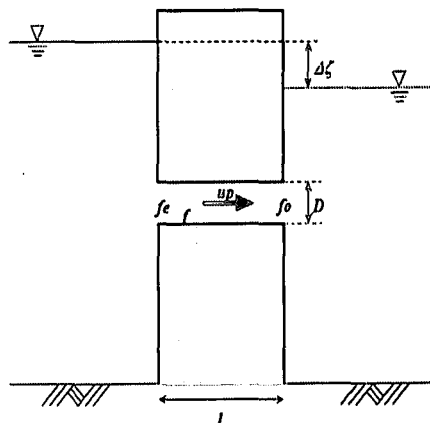


図-2 透過型防波堤断面図

通部を設けたものである(図-2)。透過型防波堤内の貫通管を管路に見立て、その貫通管内を流れる透過流の流速と水位差の関係を次式の非定常のエネルギー式でモデル化する。

$$\frac{l}{g} \frac{du_p}{dt} + F \frac{u_p |u_p|}{2g} - \Delta \zeta = 0$$

$$(F = 1 + f \frac{l}{D} + f_e + f_o + f_b)$$

ここで、 u_p は透過流速、 l は防波堤の幅、 D は管径、 f は摩擦損失係数、 f_e は入口損失、 f_o は出口損失、 f_b は曲がり損失、 $\Delta \zeta$ は防波堤をはさんだ水位差である。

摩擦損失係数は次式で評価する。

$$f = \frac{12.7 g n^2}{D^{\frac{1}{3}}}$$

n : Manning の粗度係数

(5) 乱流モデル

地形の効果を考慮に入れて渦動粘性係数や拡散係数を評価するために、1方程式 $k - \epsilon$ モデルを用いた。

$$\frac{Dk}{Dt} = \frac{\partial}{\partial X_i} \left\{ C_k \frac{k^2}{\epsilon} + \nu \right\} \frac{\partial k}{\partial X_i} - \overline{u_i u_i} \frac{\partial U_i}{\partial X_i} - \epsilon$$

$$\epsilon = C_\epsilon \frac{k^{3/2}}{l}$$

k : 乱流エネルギー、 ϵ : エネルギー散逸率、

ν : 動粘性係数、 C_k : モデル定数

$$\overline{u_i u_i} = \nu_i \left(\frac{\partial U_i}{\partial X_j} + \frac{\partial U_j}{\partial X_i} \right) - \frac{2}{3} \delta_{ijk} \quad \text{レイノルズ応力}$$

$$\nu_i = C_\nu \frac{k^2}{\epsilon} = C_\nu \sqrt{k} l$$

渦拡散係数

$$l = \sqrt[3]{dx dy dz}$$

l : 乱れの混合長

dx , dy , dz は x , y , z 方向の格子サイズ

今回のモデルでは、2つの乱流パラメータ C_ν , C_ϵ が用いられている。これらの値については一般的に C_ν , C_ϵ にはそれぞれ 0.09, 0.31 がよく用いられ

ている。本計算においてもまずこれらの値を用いてみたが、非常に不安定な流速場の結果しか得られなかった。 $C_v=0.40$ にすると、粘性係数は $4,000(\text{cm}^2/\text{s})$ 程度となり全体的な流れは若干弱まるが、防波堤付近の流れは安定したものになった。

現地観測との比較から過去の研究において格子サイズが数百(m)で粘性係数に $100,000(\text{cm}^2/\text{s})$ がよく用いられている。これにリチャードソンの $4/3$ 則を使って格子サイズ $40(\text{m})$ での粘性係数を算出すると $10,000(\text{cm}^2/\text{s})$ 程度が得られる。そこで本計算では粘性係数が $4,000(\text{cm}^2/\text{s})$ 程度となり、安定した流速場が得られる $C_v=0.40$ を採用した。

(6) 海水交換

港湾の海水交換の目安として、粒子追跡から湾口を通しての海水交換率および港内の滞留時間率を次式のように定義する。

$$E_N = \frac{P_N(T)}{P_N(0)} \quad r_\tau(n) = \frac{\tau(n)}{T}$$

ここで、 E_N は海水交換率、 $P_N(0)$ は最初に港湾内に浮標させた粒子数、 $P_N(T)$ は時間 T における港口を通しての流入粒子数と流出粒子数の平均値、 $r_\tau(n)$ は港内滞留時間率、 $\tau(n)$ は港内に存在していた時間、 n は粒子番号(1-N)を表わしている。

3. 境界条件

地形条件及び各種パラメータは図-3 及び表-1 に示す。東西に細長く西端が開いた入り江(間口 0.88km 、奥行き 6km)の南側中程に掘り込み港湾を設け、西端で振幅 150cm の M_2 分潮周期の潮位振動を与えた。北端及び東端は閉境界でスリップ条件、陸地及び防波堤の境界はノンスリップ条件にした。

本研究は層数と層厚を変えることによって流速場や粒子移動がどのように変化するか比較検討した。各層を2層モデルでは上層、下層と呼び、3層モデルでは水面から第1層、第2層、第3層と呼ぶ。粒子追跡を行うのは図-3 でハッチで示した $50(\text{東西}) \times 30(\text{南北}) \times 3(\text{層})$ メッシュの港湾を含む領域である。

表-1 地形条件及び各種パラメータ

		2層モデル		3層モデル	
計算領域	水平方向	150(東西)×30(南北)メッシュ			
	鉛直方向	2層位		3層位	
メッシュサイズ	水平方向	40m			
	鉛直方向	上層	10m	第1層	6m
				第2層	6m
		下層	10m	第3層	8m
タイムステップ		$\Delta t=1.0\text{sec}$			
コリオリパラメータ		$f=8.2 \times 10^{-5} \text{cm}^2/\text{sec}$			
海底摩擦係数		$C_b=2.6 \times 10^{-3}$			
渦動粘性係数	水平方向 ν_h	k-εモデルの1方程式モデルで計算			
	鉛直方向 ν_v	$1.0\text{cm}^2/\text{sec}$			
拡散係数	水平方向 K_h	k-εモデルの1方程式モデルで計算			
	鉛直方向 K_v	$1.0\text{cm}^2/\text{sec}$			
海水密度		$\rho=1.0\text{g}/\text{cm}^3$			

4. シミュレーション結果

防波堤配置を図-4 に示す。港の西側にある北方向に伸びた防波堤を「西堤」、東側にある北方向に伸びた防波堤を「東堤」、東堤の先端から西方向に伸びた北側にある防波堤を「北堤」と呼ぶ。シミュレーションは「全部不透過」、「全部透過」、「東西堤透過」、「北堤透過」の4ケースの防波堤配置で行った。

(1) 流速場

各潮時における流れの場の変化は、ほぼ4ケースにおいて共通するので、全不透過型の例を図-5 に示す。港外では上げ潮時に西流、下げ潮時に東流という東西往復流が卓越しているが、港内では強さは変わるものの時計回りの循環が存在する。いわゆる潮汐残差流である。透過型防波堤が配置されると、その通過流によって防波堤近傍は流れの場が少し変わるが、港内全体の流れのパターンは変わらない。

(2) 粒子追跡

全部不透過型ケースの1周期後の粒子追跡結果を図-6 に示す。粒子追跡図において黒い粒子は粒子追跡開始時に港内にあった「港内粒子」で、グレーの粒子はそのときに港外にあった「港外粒子」である。

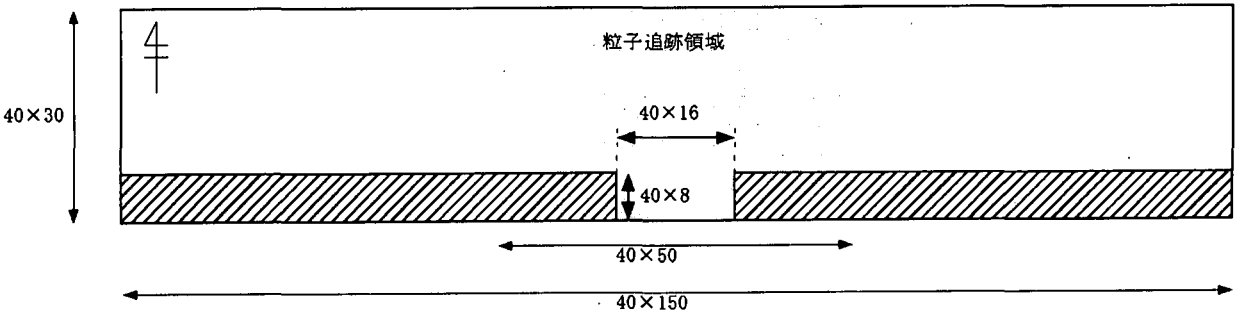


図-3 計算領域

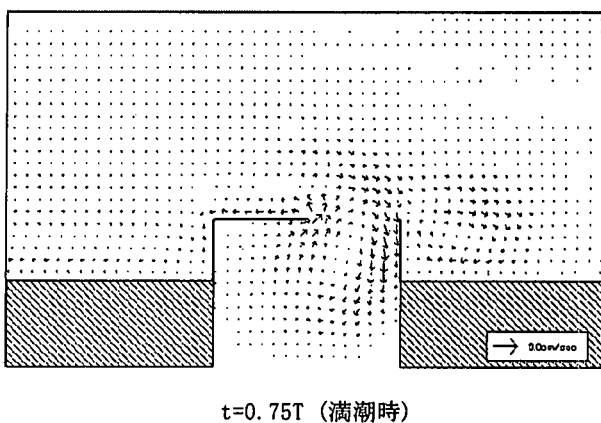
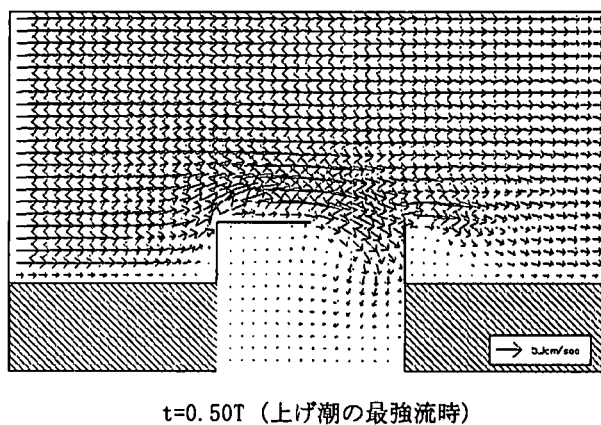
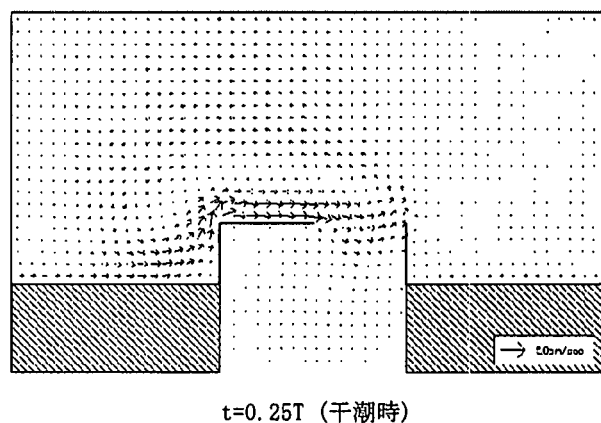
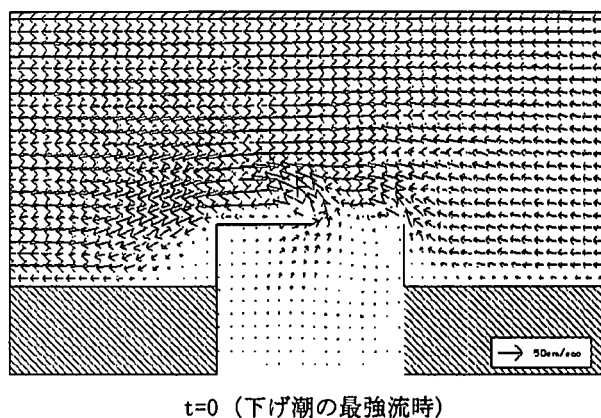
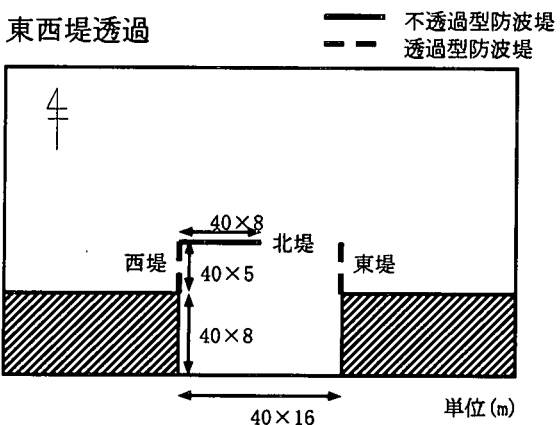
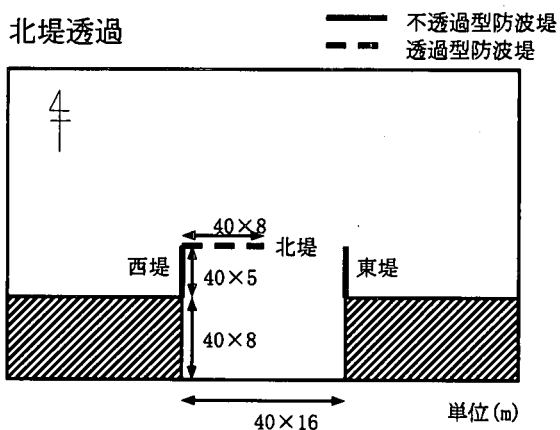
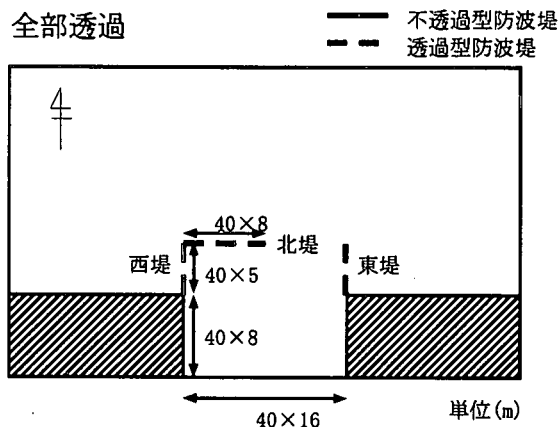
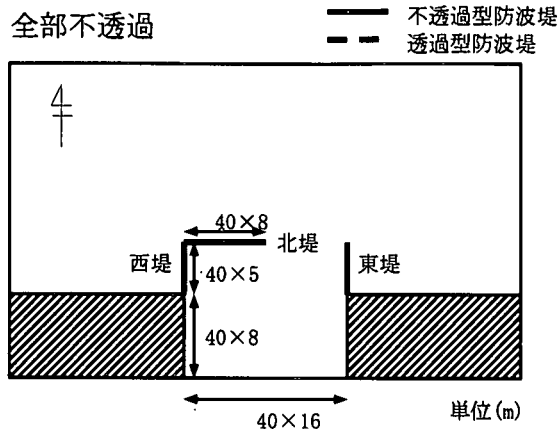
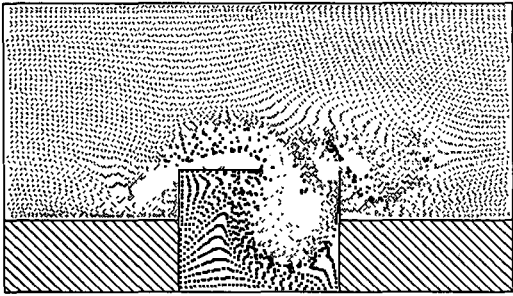


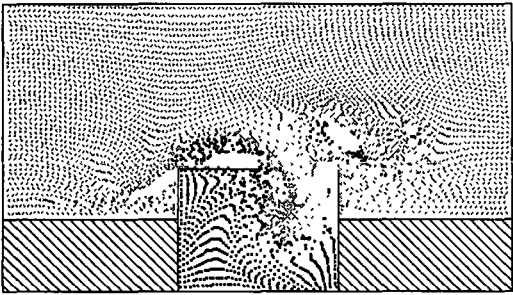
図-4 防波堤配置図

図-5 潮流分布 (3層モデル1層・全不透過型)

港内について第1層を見ると、循環流の中央付近には粒子がほとんど存在せず、同じ場所の第3層では粒子が密集していることから、強い上昇流が時計回りに渦を形成しながら生じていることが分かる。そして、流入してきた港外粒子に押し出される形で港内粒子が港口部西側から流出している。このように、港内で発生している循環流によって、港内と港外の海水交換が効率的に進んでいる。このような海水交換機構は4ケースに共通するものである。



第1層



第3層

図-6 粒子追跡図（1周期後・全部不透透）

全部透過型ケースの1周期後の粒子追跡結果を図-7に示す。港内の循環流の影響が港内全体に届いている。特に港内北西部での粒子の分散が特徴的で、ここは全部不透透型のケースではほとんど粒子の動きがなかった場所であることから、透過型防波堤を設置することによって港内水の動きが活発になったと考えられる。全部透過堤にすることにより港内の北西部で北向きの流れが生じて北堤から港内水が流出し、海水交換が促進されることが分かった。

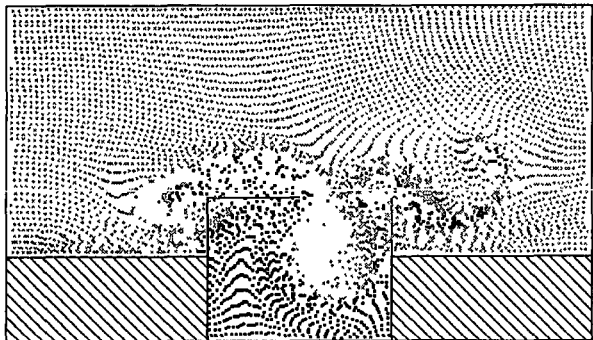


図-7 粒子追跡図（1周期後・全部透過型）

東西堤透過ケースの1周期後の粒子追跡結果を図-8に示す。東西の防波堤を透過型にすると港内で循環流が生じたときに港内北東部で北西向きの流れが生じ、港口と西堤の両方から海水が流出することによって海水交換が進むことが分かった。

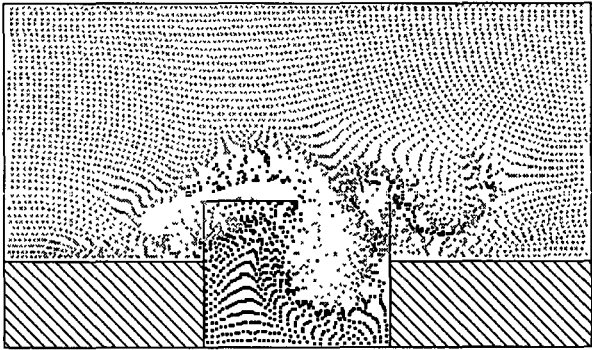


図-8 粒子追跡図（1周期後・東西透過型）

北堤透過ケースの1周期後の粒子追跡結果を図-9に示す。港内の循環流により、外海から多くの粒子が流入、その流入した粒子に押し出される形で港内の粒子が北堤から流出している。北堤の北側では上昇流が発生している。北側の防波堤を透過型にすることによって、港内循環流が発生したときに港内北西部では北向きの流れになり、そのまま北堤から港内水が流出し海水交換が効率よく進む。

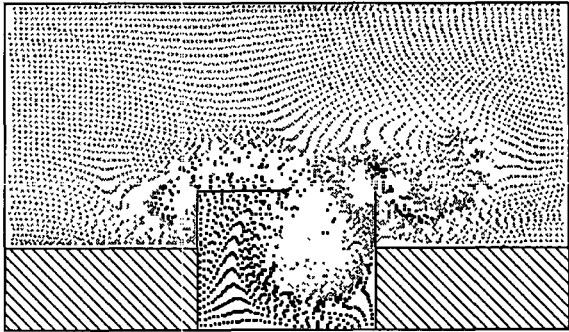


図-9 粒子追跡図（1周期後・北堤透過型）

(3) 2層モデルと3層モデルの比較

2層と3層では基本的には変わらないが、細かい点で異なるところがある。流速場では、3層モデルの1層に局所的に強い流れがみられるが全体にほとんど差はない。粒子追跡においては、2層モデルの上層と下層で粒子分布の疎密が明瞭に対応して鉛直流の分布を示唆しているが、3層モデルではやや対応がわかりにくい。中層の流れは上下層を補間した形にはなっていないことがあるので、海水の動きについて詳しく知るためには層数は多いほうがよい。透過型防波堤の近傍では2層モデルと3層モデルに粒子の粗密に違いがみられたが局所的なものである。

(4) 海水交換率

防波堤配置による海水交換能力の違いについて、各防波堤配置の1周期後の海水交換率は表-2のようになった。全透過型が高いのは当然であるが、北堤型でもそれに匹敵する海水交換能力を有し、透過堤の長さでは北堤型に勝る東西堤型でそれほど交換がよくななかった。透過流は周囲の流れからみると微弱ではあるが、通過粒子が透過堤周辺の強流に乗って遠くに運ばれて海水交換を促進する。逆にいくら通過流量が大きくても周辺の流れが弱いとほとんどが戻ってしまうので、交換に寄与しない。

表-2 海水交換率

	3層モデル	2層モデル
全不透過	0.233	0.255
全透過	0.282	0.310
東西堤透過	0.240	0.270
北堤透過	0.298	0.315

1周期以上の海水交換率の変化は図-10に示すように、1周期目で30%近くになるが、それ以後は緩やかに増加し、この増加率は港湾の海水交換特性というよりは港外の周辺海域（本研究では東西に細長い入り江）の海水交換特性に支配される。

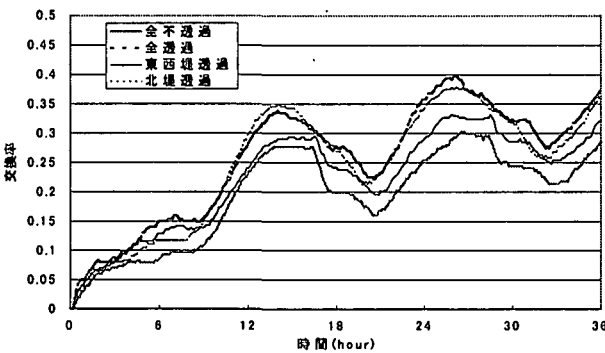


図-10 海水交換率の変化

港内の局所的な水質の悪化を予測するためには、湾全体の海水交換率よりも、それぞれの場所の水の港内滞留時間が目安となる。2層モデルで6周期間粒子追跡後、各グリッド内に存在している粒子のそれまでの履歴から港内に存在していた時間を求めて、グリッド内で平均化したのが図-11に示す港内滞留時間率分布である。0.9を超える部分は、6周期間の90%以上を港内に滞留しているわけで、水質悪化が予想される。全不透過型ではその区域が湾奥に広く分布しており、全透過型ではそれが湾奥に狭く押さえられており、透過型を配置することにより水質悪化区域が大幅に減少することが期待される。

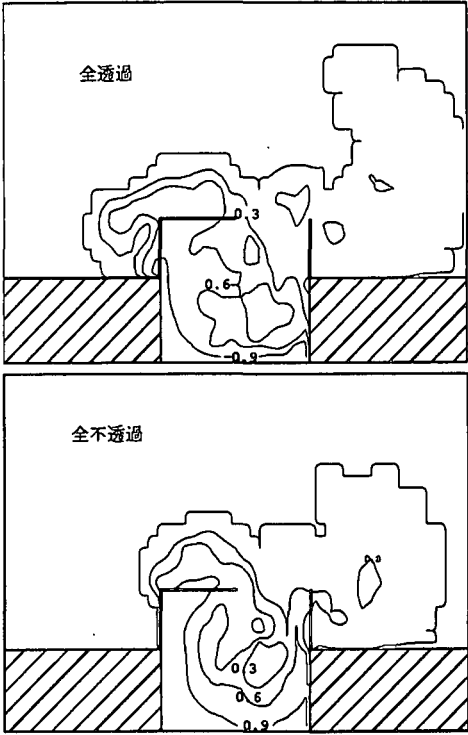


図-11 港内滞留時間率分布

5. まとめ

- 透過型防波堤の配置を変えることによる海水交換能力の違いの比較と、同じ条件で2層と3層で計算したものとの比較、という2点について考察を行った。
- 透過型防波堤によって港内の海水交換能力が向上する。今回の計算では全透過は全不透過に比べ、海水交換率で約1.2倍となった。
 - 全部透過型にしなくても、透過型防波堤の配置を工夫することによって高い海水交換能力を得られる。今回は、北堤だけを透過型にすることで、全透過と変わらない海水交換率を得られた。
 - 2層モデルのほうが3層モデルよりも粒子密度の差がはっきりしていて、鉛直流の存在はわかりやすい。3層モデルではより詳細な鉛直の流速場を得ることができるため、今後、3次元的に詳細な粒子追跡をする場合には、層の数をさらに増やす必要がある。

参考文献

(1)今里哲久, 淡路敏之(1982): 明石・鳴門海峡を通しての海水交換の数値実験, 沿岸海洋研究ノート, 第20巻, 第1号, pp.19-32.
(2)高山知司, 吉岡 洋, 大栗 剛 (1998): 閉鎖性領域内の海水交換特性, 海洋開発論文集, 第14巻, pp.525-530.
(3)Norihisa IMASATO, Toshiyuki AWAJI, Hideaki KUNISHI (1980): Tidal Exchange through Naruto, Akashi and Kitan Straits, Journal of the Oceanographical Society of Japan, Vol.36, pp.151-162.