

港 湾 技 研 資 料

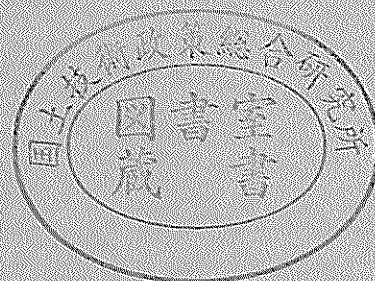
TECHNICAL NOTE OF
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH INSTITUTE
MINISTRY OF TRANSPORT, JAPAN

No. 625 June 1988

密度流を考慮した海水交換に関する水理模型実験

村 上 和 男
白 井 正 生

運輸省港湾技術研究所



目 次

要 旨	3
1. まえがき	3
2. 海水交換現象とそのメカニズム	4
3. 水理模型実験手法	6
3.1 水理模型実験	6
3.2 水理模型実験の相似則	6
3.3 実験施設および実験方法	8
4. 水理模型実験による検討	12
4.1 水理模型実験結果	12
4.2 水理模型実験結果の考察	16
5. 海水交換実験に関する考察	18
5.1 数値シミュレーションによる検討	18
5.2 海水交流と海水交換率	24
5.3 水理模型実験と数値シミュレーションの比較	26
6. ま と め	27
参 考 文 献	28

Investigations on Water Exchange with Density Current by Hydraulic Model Experiments

Kazuo MURAKAMI*
Masao SHIRAI**

Synopsis

This paper describes the investigation of the mechanism of water exchange with density current by hydraulic model experiments.

In enclosed inner-bay, the water exchange is caused mainly by vertical circulation due to density current, horizontal circulation due to tidal residual flow, and turbulent diffusion due to tidal current. The influence of marine structures on the water exchange in the coastal region is investigated by physical model and numerical simulation techniques.

In order to reproduce density current, seawater and freshwater are used in the hydraulic model experiments. From the experiments, the comparisons of the water exchange behaviors with and without density difference are carried out. The characteristics of the water exchange between inner and outer bay waters are investigated by the hydraulic model experiments and the numerical simulations.

From these results, it is pointed out that the vertical circulation caused by density current has a large effect on exchange waters in enclosed regions. The experimental method described in the report is useful to consider the water exchange mechanism in stratified water conditions.

Key Words: Diffusion, Water Exchange, Hydraulic Model Experiment, Density Current, Circulation

* Chief of Marine Diffusion Laboratory, Marine Hydrodynamics Division

** ex-Member of Marine Diffusion Laboratory, Marine Hydrodynamics Division

密度流を考慮した海水交換に関する水理模型実験

村上和男*・白井正生**

要 旨

本報告は、水理模型実験手法を用いて、密度流効果を考慮した海水交換に関する検討を行ったものである。

閉鎖性内湾域の海水交換の要因として、密度流による鉛直循環流、潮流残差流による水平循環流、および潮流乱れによる乱流拡散などの効果が大きいものと考えられる。このような内湾域に建設される港湾構造物の海水交換へ及ぼす影響を把握する手段として、水理模型実験、あるいは、数値シミュレーションが最も一般的である。

本研究では、海水と淡水により密度差を与えて、密度流を考慮した海水交換の水理模型実験を実施し、従来の密度差を考慮しない実験結果との比較を行うとともに、密度差を考慮することによって、構造物の海水交換へ及ぼす影響の変化について検討した。

これらの検討結果を通して、海水交換現象に及ぼす水平循環流および鉛直循環流の重要性について述べ、さらに密度流の卓越している海域に対しては密度流を考慮した実験の必要性を指摘するとともに、閉鎖性内湾域の海水交換のメカニズムについて考察した。

キーワード：拡散，海水交換，水理模型実験，密度流，サーキュレーション

1. まえがき

汚染された水域の浄化において、水の交換による希釈作用は極めて重要な要因である。したがって、埋立や防波堤などの港湾構造物の建設に際しても、周辺海域へ及ぼす環境影響、特に海水の流れ、海水の交換に及ぼす影響は前もって把握する必要がある。そして、このような検討は水理模型実験あるいは数値シミュレーションによって行われるのが一般的である。

海水の交換現象に及ぼす要因としては、流れによる輸送および乱れによる混合現象があり、その流れと乱れ的作用が重なりあって更に大きな交換へと発展していく。特に、流れの中での一方向流、あるいは水平・鉛直の循環流（サーキュレーション）が海水交換に及ぼす影響は非常に大きいものと考えられる。

このような海水交換に対する検討を水理模型実験、あるいは数値シミュレーションによって行う場合には、現地での潮位・潮流を正しく再現するとともに、構造物の背後に出来る水平循環流、あるいは海水の密度差より生

じる鉛直循環流を正しく再現することが重要である。しかしながら、これらの現象は非常に複雑で、水理模型実験や数値シミュレーションにおいて、これらの水平・鉛直循環流を正しく評価することは、現時点においては難しく、これからの研究課題の一つである。

以上のような観点から、本報告では、密度差を考慮した海水交換の水理模型実験を実施し、水平・鉛直循環流の海水交換現象へ及ぼすメカニズムについての考察を加えながら、従来の均一流体を用いた実験との比較を行った。また、数値シミュレーションに対しては、密度効果を考慮しない単層モデルでの海水交換に関する数値実験を行い、水理模型実験と数値シミュレーションとの関連についても考察した。

本報告の構成は、1.にまえがき、2.に海水交換現象とそのメカニズムおよび従来の研究について述べ、3.に水理模型実験手法、4.に水理模型実験による検討、5.に海水交換実験に関する考察について述べ、6.にまとめとなっている。

* 海洋水理部 海水汚染水理研究室長

** 前海洋水理部 海水汚染水理研究室

2. 海水交換現象とそのメカニズム

内湾水と外海水との交換は湾口を通して行われる。したがって、湾口における流入・流出、すなわち海水交流は内湾水と外海水との海水交換現象の根幹をなすものである。しかし、外海から内湾に流入した外海水が次の下げ潮でそのまま外海に流出したのでは、単なる移流が行われただけであって何ら交換は生じていない。このことは、内湾域および外海域内での乱れ、混合現象も、湾口を通じての海水交換に大きく関与することを意味する。

海水交換の大きさを表すパラメータに海水交換率というものがある。海水交換率は、各研究者によってその定義が若干異なるので注意を要するが、ここでは Parker et al.¹⁾ による海水交換率の概念について少し述べてみることにする。Parker らの方法は、サンフランシスコ湾の湾口部での海水交換率を求めたもので、その定義は以下のものである。すなわち、図-1に示されるように、

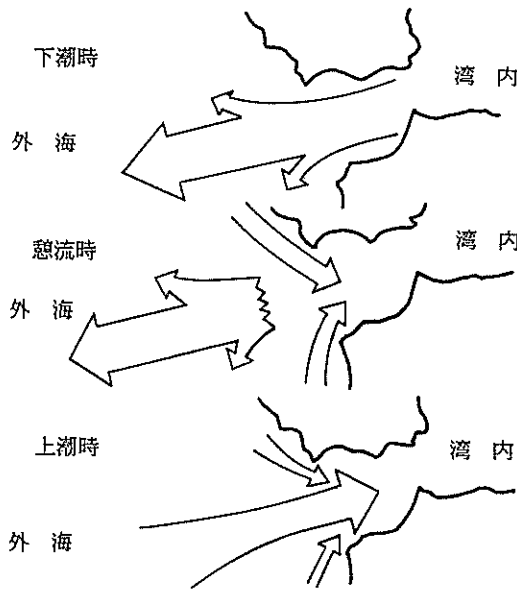


図-1 Parker et al.¹⁾による海水交換の考え方

上げ潮のときに湾内に流入する海水量 Q_F は、前の下げ潮時に流出した湾内水が再び湾内にもどるものと、新しく湾内に流入する外海水との混ったものと考えられる。そのうちの、始めて湾内に入る外海水量 q_s の占める割合で定義したもので、式(1)で表される。

$$r = \frac{q_s}{Q_F} \quad (1)$$

ここに、 Q_F : 上げ潮時に湾内に流入する海水量

q_s : 上げ潮時に湾内に新しく流入する外海水量

r : 海水交換率

である。この定義に基づいて、Parker らは海水交換率の算定方法として次式を導いている。

$$r = \frac{\bar{C}_F - \bar{C}_E}{C_0 - \bar{C}_E} \quad (2)$$

ここに、 C_0 : 外海での塩分濃度

\bar{C}_F : 上げ潮時の平均塩分濃度

\bar{C}_E : 下げ潮時の平均塩分濃度

である。Parker らの考え方に基づいて、東京湾²⁾、伊勢湾³⁾での現地調査が実施され、各々海水交換率の算定が行われている。また、著者らも東京湾の水理模型を用いて模型実験による海水交換率の算定法⁴⁾の検討を行っている。

以上の概説は湾口部を通しての輸送量を見積ることに由る湾内外の海水の交換について注目したものである。

次に、湾内に物質が投入された場合に、この物質が湾内にどの程度の長さ滞在するのか、また海水交換現象により、どのように希釈されていくのかについて注目する。このような滞在時間に関する概念もいくつか提案されているが、ここでは Bolin et al.⁵⁾あるいは Takeoka⁶⁾らが用いている平均滞留時間の概念を用いて説明する。

平均滞留時間とは、図-2に示されたように、ある海

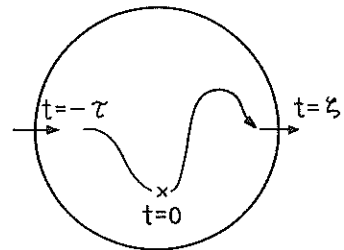


図-2 平均滞留時間の概念⁶⁾

域に存在する物質、あるいは投入された物質が、この海域の外へ出ていくのに要する時間(滞留時間)の期待値(平均値)を示すもので、次式によって定義される。

$$\tau_r = \frac{1}{R_0} \int_0^{\infty} t \left(-\frac{dR(t)}{dt} \right) dt \quad (3)$$

ここに、 τ_r : 平均滞留時間

R_0 : 時刻 $t = 0$ におけるある海域内の物質量

$R(t)$: 時刻 t においてある海域内に残っている物質

である。式(3)において、 $R(\infty) = 0$ であるとすれば、

$$\tau_r = \int_0^{\infty} \frac{R(t)}{R_0} dt = \int_0^{\infty} r(t) dt \quad (4)$$

で表される。ここに、 $r(t)$ は残余関数と呼ばれるものである。

このような海水交換のメカニズムは、基本的には流れによって運ばれたものが乱れによって混合・希釈され、それがまた流れによって運ばれるという機構で説明される。ここで海水交換に及ぼす現象として、流れのどの成分の寄与が大きいかにについて物質輸送の観点から考察する。

流れによる物質輸送のメカニズムとして、Fischer⁷⁾あるいは宇野木⁸⁾は流れをいくつかの成分に分割し、各々の成分の物質輸送に及ぼす寄与を見積っている。ここでは、Fischerによる物質輸送メカニズムについて説明する。まず、流速 u を次式に示す3つの成分に分割する。

$$u = u_0 + u_1 + u_2 \quad (5)$$

ここに、 $u_0 = \langle \bar{u} \rangle$ 、 $u_1 = u - \bar{u}$ で定義されるものである。ここで、 $\langle \rangle$ は1潮汐周期の平均を意味し、 $\bar{}$ は断面平均を意味する。したがって、 u_2 は断面平均値からの偏差と考えられる。この偏差 u_2 は、さらに時間平均値 u_s とその偏差 u' に分割される。

$$u_2 = u_s + u' \quad (6)$$

ここに、 $u_s = \langle u_2 \rangle$ で定義されるものである。 u_s, u' は、さらに、水平成分の平均値 u_{st} と鉛直成分の平均値 u_{sv} 、およびそれらの偏差 u'_t, u'_v に分割される。したがって最終的に流速 u は6つの成分に分割されて、

$$u(x, y, z, t) = u_0(x) + u_1(x, t) + u_{st}(x, z) + u_{sv}(x, y, z) + u'_t(x, z, t) + u'_v(x, y, z, t) \quad (7)$$

で表される。濃度 C に対しても同様に6つの成分に分割し、

$$C(x, y, z, t) = C_0(x) + C_1(x, t) + C_{st}(x, z) + C_{sv}(x, y, z) + C'_t(x, z, t) + C'_v(x, y, z, t) \quad (8)$$

で表される。

流れによる物質の輸送量は、流速と濃度の積によって表され、

$$\dot{M} = \frac{1}{T} \int_0^T \int_A u C dA dt \quad (9)$$

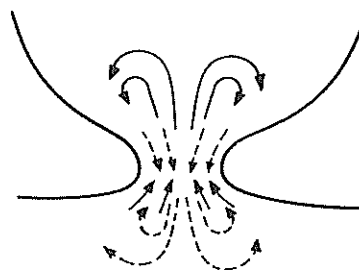
によって算定される。式(9)に式(7)、式(8)を代入し、

かつ断面積 A の時間的変動は小さいと仮定すると、

$$\dot{M} = A u_0 C_0 + A \langle u_1 C_1 \rangle + A \left[\overline{u_{st} C_{st}} + \overline{u_{sv} C_{sv}} + \langle u'_t C'_t \rangle + \langle u'_v C'_v \rangle \right] \quad (10)$$

が導かれる。式(10)の右辺第1項は湾内に流入する河川流量などの一方向成分流によって運ばれる量、第2項は流速と濃度の位相差より生じる輸送項である。また、第3項はそれぞれ、水平循環流による輸送項 ($\overline{u_{st} C_{st}}$)、鉛直循環流による輸送項 ($\overline{u_{sv} C_{sv}}$)、およびそれぞれの乱れによる輸送項 ($\langle u'_t C'_t \rangle$ 、 $\langle u'_v C'_v \rangle$) である。これらの各項の中で、それぞれの状況によって異なるが、閉鎖的な内湾域においては一般的に恒流によるもの、特に、水平・鉛直循環流による物質の輸送量が大きいものと考えられる。

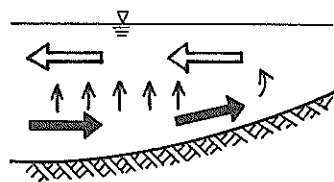
海水交換はこれまでに述べた物質の輸送と混合によって行われる。これらの海水交換の模式を示すと図-3のようになる。(a)に示すのは水平循環流の模式図であり、



---> 下潮時

—> 上潮時

(a) 水平循環流



← 表層流出

→ 底層流入

↑ 鉛直流

(b) 鉛直循環流

図-3 水平循環流と鉛直循環流の模式図

(b)に示すのは鉛直循環流の模式図である。水平循環流は一般に湾内の恒流と呼ばれるものである。恒流の生成要因としては、潮汐の非線型により生じる潮汐残差流、風の接線応力による吹送流、河川からの淡水流入、あるいは上・下層の水温差による密度流、および黒潮の分枝流などが考えられる。潮汐残差流は、島影や半島の背後あるいは構造物の背後にできるサーキュレーションがその主成因であり、地形性要因によるものである。湾内の恒流のパターンはその地形特性、潮流特性、および気象・海象条件によって左右されるものである。例えば、大阪湾における時計廻りの恒流は潮汐残差流によるもの⁹⁾と考えられるが、東京湾における時計廻りの恒流は風によるものが最も大きい¹⁰⁾と考えられている。したがって、防波堤などの構造物の海水交換への影響を調べる際には、防波堤の背後に形成される潮汐残差流が最も重要な要因となるものと考えられる。また著者らは、恒流（水平循環流）の海水交換に及ぼす影響の大きいところから、人為的に水平循環流を発生させて海水交換を促進させるような試みの模型実験¹¹⁾を実施している。

鉛直循環流は一般に密度流と呼ばれるものが最も大きく、上層にある軽い流体が流出し、下層の重い流体が流入する現象の際に生じる。感潮河川における塩水くさびがその典型的な例である。このような現象は、夏期においては東京湾のような内湾域においても生じている。¹²⁾すなわち、躍層状態になると、表層の軽い流体は流出傾向にあり、また底層の重い流体は流入傾向を示す。また、比較的大きな淡水流入がある場合にもこのような現象が生じる。この密度流による鉛直循環流の海水交換へ及ぼす影響もかなり大きいものと考えられる。

3. 水理模型実験手法

3.1 水理模型実験

内湾域における汚染物質の拡散、あるいは海水の交換現象を調べた水理模型実験は数多く実施されている。^{13),14),15),16)}しかし、これらの実験において密度差を考慮した実験例はあまり数多くない。これは、大型の水理模型において、僅かな密度差による流れを制御することは非常に困難なためであると考えられる。

密度の効果を考慮した実験例としては塩水くさびの実験¹⁷⁾あるいは河川水の流出の実験¹⁸⁾などをあげることができる。この種の実験は、対象領域が比較的せまく、そこでの密度差は淡水と海水との差であるために、躍層の場合と比べて大きな差が存在し、現象をコントロールしやすいと思われる。また、大河川でのエスチュアリーのような実験²⁰⁾の場合には、流入する河川流量が大き

いために、僅かな密度差により流れが支配されるようなことがないものと思われ、均一流体による実験が実施されている。

我が国の大型水理模型で密度効果を考慮した実験としては、大阪湾²⁰⁾および伊勢湾²¹⁾の模型で行われたいくつかの実験例があるが、その実験手法もまだ定まったものとは言い難い。

しかし、海水交換に及ぼす密度流の大きさは無視し得ないものと考えられる。均一流体を用いた海水交換の実験において、湾口部に防波堤のような障害物を置いた場合の方が海水交換率が高かったという報告例²²⁾がある。これは、防波堤を設置したことにより防波堤開口部で早い流れが形成され、この早い流れによって防波堤の背後に水平循環流が形成される。この水平循環流が海水交換の促進に寄与したためと思われる。この現象は、密度流が卓越していない海域に対してはあてはまるものと考えられる。しかし、現実の海域において、多くの閉鎖性の強い内湾域での水質悪化の現状をみると、他の要因による海水交換率の悪化を考慮する必要性が感じられる。

このような観点から、密度流の効果を考慮した海水交換の実験手法についての検討を行った。

3.2 水理模型実験の相似則

水理模型実験により原型（現地）での現象を模倣して調べる場合には、模型と原型との相似則が成立つ必要がある。ここでは、潮流に関する相似則、密度流に関する相似則、および拡散現象に関する相似則についての検討を行う。

まず、潮流に関する相似則については、従来のフルードの相似則を適用する。フルードの相似則より、以下の関係式が求められる。

$$V_r = H_r \frac{1}{\tau_r^2} \quad (11)$$

$$f_r = T_r^{-1} \quad (12)$$

$$T_r = L_r H_r^{-\frac{1}{2}} \quad (13)$$

$$\tau_r = H_r^{\frac{3}{2}} L_r^{-1} \quad (14)$$

ここに、

L_r : 水平長さの縮尺

H_r : 鉛直長さの縮尺

T_r : 時間の縮尺

V_r : 水平流速の縮尺

f_r : コリオリ係数の縮尺

τ_r : 摩擦係数の縮尺

である。したがって、式(11)を満足するように原型と模型でフルード数を一致させ、この関係式に基づいて時間縮尺、摩擦係数等を調整すればよいことになる。なお、式

(12)の科リオリ項の効果に関しては、模型の回転を T_r^{-1} の角速度で与えればよいわけであるが、本実験(須崎港、縦12 km、横8 km)のように再現範囲があまり大きくないことや、実際の模型において科リオリ力を再現することはかなりの困難が伴うことから、ここでは無視して扱うことにする。

次に、密度効果を考慮した場合の相似則についての検討を加える。密度効果を考慮する場合、強混合と弱混合とで取り扱いが異なる。今、ここでは上下の密度差が比較的大きい弱混合の状態を想定して、塩水くさびに対する相似則²³⁾を適用するものとする。塩水くさびに関する相似則は図-4に示すように海域を上層と下層に分け

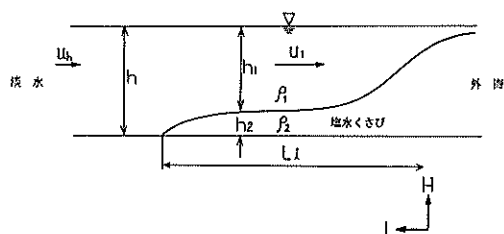


図-4 塩水くさびの模式図²³⁾

て考える。弱混合の塩水くさびにおいて、淡水と海水の境界面の勾配は、

$$\frac{dh_2}{dx} = -\frac{f_i}{8} \frac{h}{h_2} \left[\frac{F_h^2}{F_h^2 - \left(\frac{h-h_2}{h} \right)^3} \right] \quad (15)$$

で表される。ここに、 x は水平方向の距離、 h は全水深、 h_2 は下層の水深を示し、図-4のように定義されている。また、 f_i は内部摩擦抵抗係数、 F_h は次式で定義されるような内部フルード数である。

$$F_h = \frac{u_h}{\sqrt{\theta \frac{\Delta \rho}{\rho} h}} \quad (16)$$

式(15)において、 $h_2^0 = h_2/H$ 、 $h_0 = h/H$ 、 $x_0 = x/L$ のように無次元量を定義すると、

$$\frac{dh_2^0}{dx_0} = -\frac{1}{8} \left(\frac{f_i L}{H} \right) \frac{h^0}{h_2^0} \left[\frac{F_h^2}{F_h^2 - \left(\frac{h_0 - h_2^0}{h_0} \right)^3} \right] \quad (17)$$

が得られる。密度成層の相似則を満足させるためには、式(17)の内部境界面の勾配を規定する係数 $(f_i L/H)$ と内部フルード数 F_h を原型と模型とで一致させればよい。すなわち、

$$\left(\frac{f_i L}{H} \right)_r = 1 \quad (18)$$

$$(F_h)_r = 1 \quad (19)$$

と規定される。式(19)、およびフルードの相似則式(11)より、上下層の密度差の比が、

$$\left(\frac{\Delta \rho}{\rho} \right)_r = 1 \quad (11)$$

が得られる。このことは、模型においても実際の海水と淡水を用いれば良いことを示している。また、内部摩擦抵抗抵抗に関しては、近似的にブラウジウスの公式を用いると、

$$f_i = \frac{0.316}{Re^{1/4}} \quad (21)$$

と表される。ここで、 Re はレイノルズ数である。レイノルズ数の縮率に関しては

$$(Re)_r = H_r \frac{3}{2} \quad (22)$$

である。これらの関係式を式(18)に代入すると、

$$H_r = L_r \frac{8}{11} \quad (23)$$

という関係式が得られる。この関係式は、鉛直縮尺が水平縮尺によって規定されることを意味している。

次に、拡散現象に関する相似則についての考察を行う。水深方向に平均された水平二次元の拡散方程式は次のように表される。

$$\frac{\partial c_p}{\partial t_p} + u_p \frac{\partial c_p}{\partial x_p} + v_p \frac{\partial c_p}{\partial y_p} = \frac{\partial}{\partial x_p} \left(K_{x_p} \frac{\partial c_p}{\partial x_p} \right) + \frac{\partial}{\partial y_p} \left(K_{y_p} \frac{\partial c_p}{\partial y_p} \right) \quad (24)$$

ここに、 c は物質の濃度、 K_x 、 K_y はそれぞれ x 方向、 y 方向の拡散係数である。潮流の場合と同様に、この基本方程式が原型と模型において成り立つ必要がある。ここで、各々の変数の縮率を以下のように定義する。

$$C_r = \frac{c_p}{c_m}, \quad K_r = \frac{K_{x_p}}{K_{x_m}} = \frac{K_{y_p}}{K_{y_m}}, \quad V_r = \frac{u_p}{u_m} = \frac{v_p}{v_m}$$

$$L_r = \frac{x_p}{x_m} = \frac{y_p}{y_m}, \quad T_r = \frac{t_p}{t_m} \quad (25)$$

これらの関係式を式(24)に代入すると、

$$\frac{\partial c_m}{\partial t_m} + \left(\frac{VT}{L}\right)_r u_m \frac{\partial c_m}{\partial x_m} + \left(\frac{VT}{L}\right)_r v_m \frac{\partial c_m}{\partial y_m} = \left(\frac{KT}{L^2}\right)_r \left\{ \frac{\partial}{\partial x_m} \left(K x_m \frac{\partial c_m}{\partial x_m} \right) + \frac{\partial}{\partial y_m} \left(K y_m \frac{\partial c_m}{\partial y_m} \right) \right\} \quad (26)$$

となる。式(26)において、 $(VT/L)_r = 1$ および $(KT/L^2)_r = 1$ が成り立てば、式(24)と全く同じ表現式となる。前者はフルードの相似則より満足されることから、拡散係数の縮率として

$$K_r = \left(\frac{L^2}{T}\right)_r \quad (27)$$

が満足すればよいことになる。

拡散現象に関する相似則に関しては、いくつかの報告例がある。ここでは、代表的なものとして樋口ら²⁴⁾による乱流拡散を考慮した水理模型実験の相似則について述べる。乱れが十分に発達した海域においては、乱流拡散係数 K はKolmogoroffの4/3乗則に従うと考えられるので、

$$K = \text{const.} \cdot \epsilon^{\frac{1}{3}} l^{\frac{4}{3}} \quad (28)$$

で与えられる。ここに、 ϵ は単位時間、単位質量あたりの乱れのエネルギー逸散率、 l は乱れのスケールを表す代表長さである。したがって、乱流拡散係数の縮率は

$$K_r = \epsilon_r^{\frac{1}{3}} L_r^{\frac{4}{3}} \quad (29)$$

となる。いま、乱流状態の相似性を考えると、乱れのエネルギー逸散率の原型と模型の縮率 $\epsilon_r = 1.0$ と置くことができる。式(29)および式(27)より、拡散係数の縮率は次のように表される。

$$K_r = L_r^{\frac{4}{3}} = \frac{L_r^2}{T_r} \quad (30)$$

これより、時間縮尺 T_r は水平縮尺 L_r のみの関数となる。

$$T_r = L_r^{\frac{2}{3}} \quad (31)$$

式(31)に式(13)を代入すると、鉛直縮尺は水平縮尺の関数として、

$$H_r = L_r^{\frac{2}{3}} \quad (32)$$

が得られる。我が国の潮流拡散に関する水理模型においては、この関係式を満足するように作られているものが多い。しかし、ここで述べた関係式は乱流拡散が卓越した海域での拡散現象に適用できるものであって、流速の

シアーによる移流分散の卓越する海域の拡散現象にはあてはまらない。

例えば、Fischer & Holley²⁵⁾が述べているように、流速の鉛直シアーが卓越している海域での拡散係数は、Elder²⁶⁾の式によって次のように表される。

$$K_x = 5.9 u_* h \quad (33)$$

式(33)の拡散係数の縮率は

$$K_{x,r} = H_r^2 L_r^{-\frac{1}{2}} \quad (34)$$

で表される。式(34)と式(27)を比較すると異なっており、歪模型においては一致しないことがわかる。このように、拡散現象の水理模型実験の相似則に関しては、まだ確立されたものとは言えない現状である。その他、拡散の模型実験に対する考え方としては、乱れのエネルギースペクトル形状を模型と原型で相似にさせること²⁷⁾、あるいは、模型の歪率を4以下にすること²⁸⁾などが提案されている。

以上、3つの観点から水理模型実験の相似則について検討してきた。本研究では、流れの相似則に関してはフルードの相似則を適用した。また、鉛直縮尺に関しては、密度勾配の相似則より式(23)を満たすように設定し、拡散現象に関する相似則は流れが乱流であるということとを考慮するにとどまった。

3.3 実験施設および実験方法

実験は港湾技術研究所所有の須崎港の水理模型を用いて行った。この模型は、津波の高さの防波堤による削減効果の実験のために作られたものであり、それを海水交換特性の把握の実験として便宜上利用した。模型の概観を図-5に示す。閉鎖海域における流れの要因としては潮流が最も卓越していると考えられるので、本実験においても模型内に潮汐現象を発生させて潮流の再現を行った。潮汐の発生方法は、模型端部に設置されている気圧式の起潮装置による。

須崎港の模型縮尺は水平縮尺1/350、鉛直縮尺1/70で作られている。表-1に、須崎港水理模型における各変数の縮率を示す。前節のフルードの相似則、および塩水くさびの相似則が満足するように作られている。底面粗度に関しては、現地の海底摩擦より若干大きい抵抗を与える必要がある。模型の底面はモルタル刷け仕上げで作られている。須崎港水理模型は鉛直方向に5倍に引き伸ばされた歪模型であるために、棒状の棧型粗度を用いて、底面の抵抗が水面にまで影響を及ぼすように配慮されている。このような人工粗度の配置に関しては、まだ現地での海底摩擦の実態も不透明な点が多いことから、

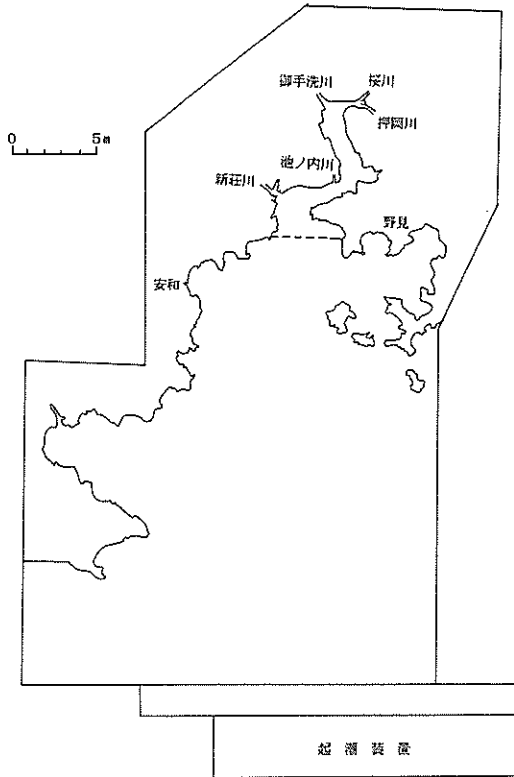


図-5 須崎港水理模型

表-1 水理模型の各変数の縮率

変数	縮率	縮尺	原型	模型
水平縮尺	L_r	1/350	5 km	14.3 m
鉛直縮尺	$H_r = L_r^2/11$	1/70	20 m	29 cm
時間	$T_r = L_r H_r^{-1/2}$	1/42	12時間25分	17分49秒
流速	$V_r = H_r^{1/2}$	1/8.4	10 cm/s	1.2 cm/s
流量	$Q_r = L_r H_r^{3/2}$	$1/2 \times 10^5$	$10 \text{ m}^3/\text{s}$	$50 \text{ cm}^3/\text{s}$
水位	$\zeta_r = H_r$	1/70	1 m	1.4 cm
拡散係数	$K_r = L_r^2/T_r$	1/2900	$10^4 \text{ cm}^2/\text{s}$	$3.4 \text{ cm}^2/\text{s}$
マニッパ粗度係数	$n_r = H_r^{3/2} L_r^{-1/2}$	1/0.91	0.026	0.029

潮位あるいは潮流の実測値等を勘案して試行錯誤的に行うのが現状である。本実験における人工粗度としては、 $\phi = 20 \text{ mm}$ の棒状の塩化ビニールパイプを用い、それを50cm格子間隔状に配置した。また、粗度の高さは平均水面下2cmになるように設定した。写真-1に棒状の粗度パイプを示す。

本実験の目的が密度流を考慮した海水交換、および河川水の拡散状況の把握にあったので、実験水としては久



写真-1 塩化ビニールパイプによる人工粗度

里浜湾からの海水を導水し、それに水道水を流入するという方式で実験を行った。

海水交換実験は以下に述べる手順で行った。その概要を図-6に示す。まず、模型内に久里浜湾から海水を所定の水位まで導水する。つづいて、遮へい板により湾内水と湾外水とを分離する。遮へい板の設置位置は図-5に破線によって示す。次に、湾内水の海水の一部(47ℓ)と淡水(47ℓ)を入れ換えてよく攪拌する。これは、湾内水と湾外水との塩分差を0.5‰つけるためである。この塩分差は須崎港の水質調査結果²⁹⁾を参考に決めたものであるが、実際には湾口部から湾奥部にかけて徐々に塩分は減少しており、また水深方向にも分布を持っている。このような分布を再現することは現有施設では不可能なこと、および湾内水のトレーサの設定法の困難さから、本実験の方法を初期条件として採用した。また、湾内水の攪拌時に蛍光染料(フルオレッセイン・ナトリウム)も同時に投入し、湾内水が均一塩分濃度、均一染料濃度になるように攪拌し、その後静置する。湾内が静まった後、遮へい板を引き上げ、同時に潮汐を発生させる。また、周辺河川からは湾内水と同一濃度の河川水を連続的に投入する。このようにして、湾内水と湾外水の交換・混合が開始される。

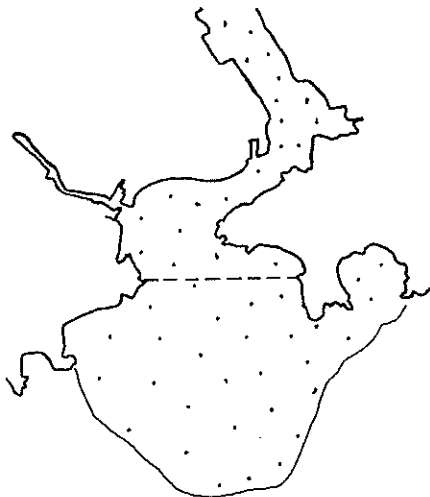
実験開始後、湾内および湾外の染料濃度分布の測定を行った。染料濃度の測定は採水器により採水されたサンプル水の蛍光分析による方法を用いた。採水は図-7に示す湾内10点、湾外17点で行った。写真-2に採水器を示す。各々の採水点から、3~5層に分けての採水を実施している。図-8に、各々の採水点での採水孔の深さ方向の配置を示す。また、同時に、遮へい板の設置位置において多点濃度計(エイソン社製)14台を用いて、開口部断面での染料濃度の連続測定を実施した。多点濃度計の



- ① 模型内に海水を導入する。
- ② 遮へい板により湾内水と湾外水に分離する。
- ③ 湾内水の海水の一定量を淡水と入れ変える。また、湾内水に染料を投入してよく混合する。



- ④ 遮へい板を取り外すとともに潮汐を始動させる。海水交換の始動



- ⑤ 断面濃度測定および平面濃度測定を行う。
- ⑥ 海水交換率を算定する。

図-6 水理模型による海水交換実験の手順

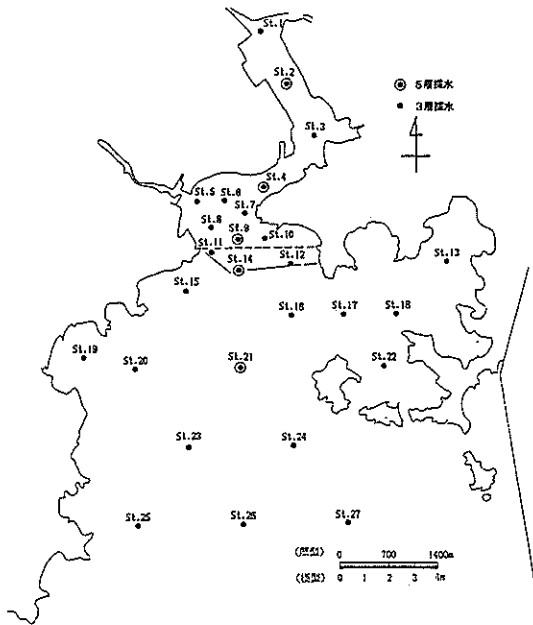


図-7 採水点の位置

測定断面を図-9に示す。ここで、濃度の測定はすべて塩分についてではなく、蛍光染料の濃度測定を実施している。海水と淡水による密度効果を考慮に入れた湾内水の挙動を調べる実験には塩分濃度測定を行えばよいわけであるが、塩分計の台数に制限があったこと、および取り入れた海水の塩分濃度の均一性に問題があることなどから判断して、染料濃度を測り、それを塩分濃度に換算した

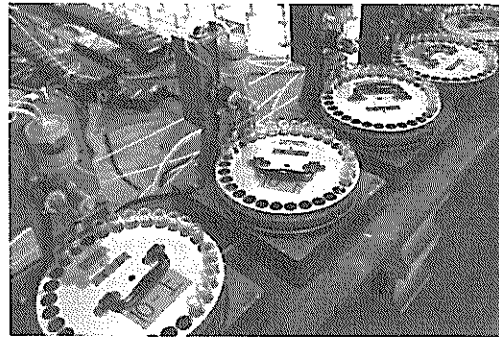


写真-2 自動採水装置

方が精度良いと思われ、染料濃度による測定を実施した。

流況の測定に関しては、密度流効果を把握するためには流速の鉛直分布を測定すべきであると思われるが、底層での流況を湾内全域を測ることは非常に難しかったので、湾内全域に対してはフロートによる表面流速の測定のみ行った。また、開口部断面においては、多点濃度計と同じ位置において超音波流速計による流速測定を実施したが、模型内の流速の値が最大でも1~2 cm/s程度と非常に小さかったので、精度良いデータは得られなかった。なお、流速と濃度の測定は、本来、同時にすべきであると考えられるが、実験技術上、流速計と濃度計を同一位置に設置できなかったこと、および機器の台数との制約などから別々に測定を実施したことも、本実験の精度が悪くなった原因であると思われる。したがって、こ

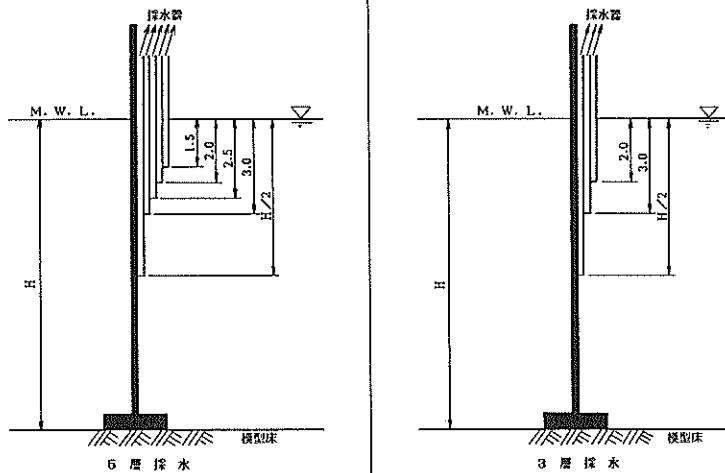


図-8 採水層の設置深さ(単位: cm)

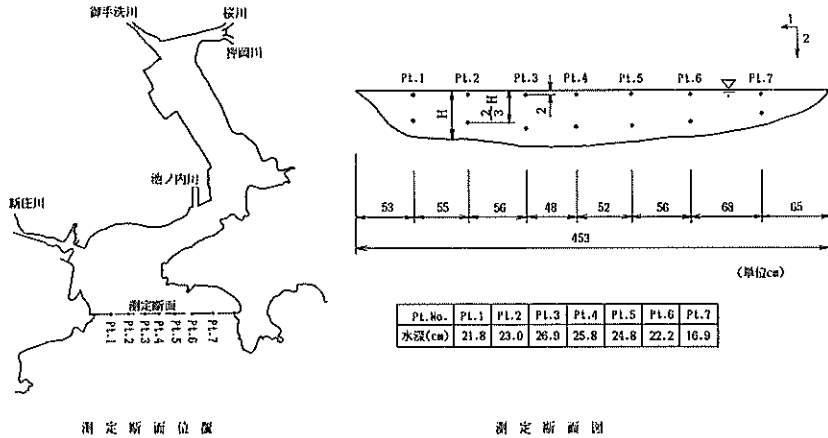


図-9 多点濃度計，超音波流速計の設置位置

ここでは港口断面での物質輸送量からの海水交換量の算定は行わなかった。

表-3 須崎港の潮汐の調和定数³⁰⁾

4. 水理模型実験による検討

4.1 水理模型実験結果

実験は表-2に示すケースについて行った。ここでは、海水交換現象に及ぼす密度効果の影響、および湾口部での防波堤構造物の影響について考察した。なお、以後の実験ケースの呼び方として、密度効果を考慮したものを海水、考慮しないものを淡水で、防波堤が無いものを現況地形、有るものを将来地形と呼ぶ。

	振幅 (cm)	遅角 (度)
M ₂	51.6	171.9
S ₂	23.0	200.8
K ₁	21.2	188.0
O ₁	16.4	167.5

表-2 実験ケース

	実験水	密度差	津波防波堤
I	海水	有	無
II	海水	有	有
III	淡水	無	無
IV	淡水	無	有

で簡便に正弦曲線として与えた。

(1) 潮流実験結果

潮流実験に先立って、まず潮位の測定を実施した。これは、海域の流れの主要因が潮汐運動に基づく潮流であることから、模型内に潮位変動を再現することが重要であることによる。現地での潮位は数多くの分潮が重なった複雑の振動現象で表現されるが、工学的にはM₂、S₂、K₁、O₁の主要4分潮が重要となる。表-3に、須崎港での潮汐の主要4分潮の調和定数³⁰⁾を示す。実験では、大潮時の潮汐を再現する目的で、M₂+S₂潮の振幅を、17分49秒(現地のスケールで12時間25分)の周期

水位変動の測定は湾内外の6地点で行った。模型の範囲が狭いので、各測点での潮位と位相はほとんど同じ値であった。このような潮位の測定を他のケースについても実施しているが、実験ケースによる潮位振幅、および位相に顕著な差は見い出せなかった。このことは、密度差あるいは防波堤の効果が、潮汐のような長い周期の波に対してはほとんど影響ないことを示している。これは、同防波堤の津波(周期=40分)に対する効果が、波高を約30%削減する³¹⁾という現象とは基本的に相違している。したがって、港内側のようなある領域を考えた場合に、満潮から干潮、あるいは干潮から満潮までの海水の流量はどの実験ケースに対してもほぼ等しいということの意味している。

次に潮流実験の結果を示す。図-10~13にフロートの流跡図を示す。フロートの追跡による流向・流速の測定は、湾全域の非常に遅い流れに対しては有効であるが、フロートが時間的に移動するので同一地点、同一時刻での流れの比較は難しい。そこで、防波堤開口部付近に焦点を絞って、この領域を通過したフロートの流速の平均値を上潮時と下潮時に分けて表-4に示す。図-10~13

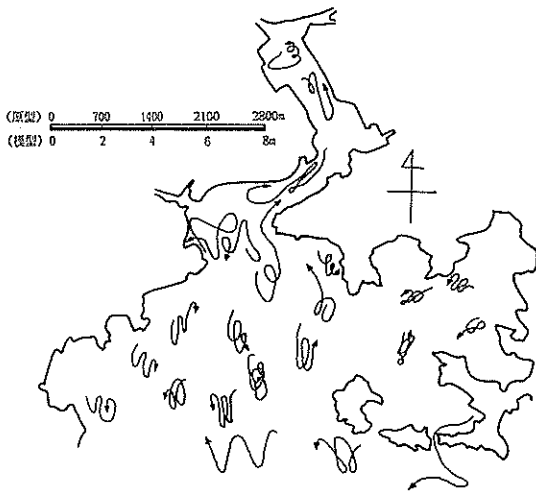


図-10 フロートの流跡図
(海水・現況, 2潮汐間の軌跡)

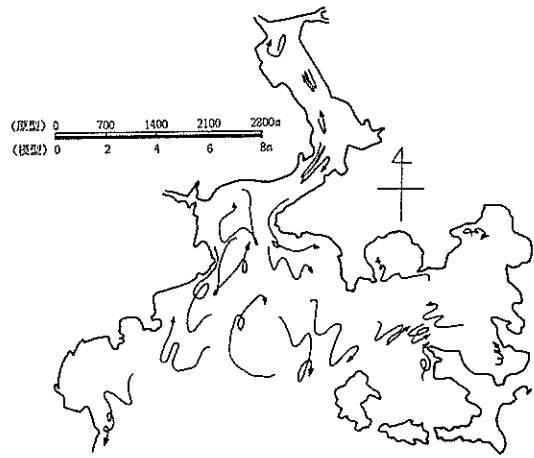


図-12 フロートの流跡図
(淡水・現況, 2潮汐間の軌跡)

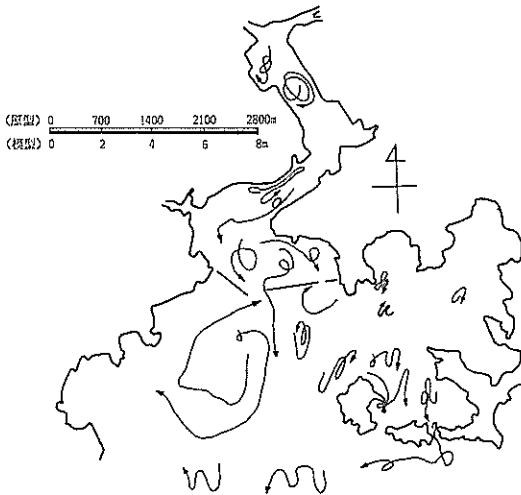


図-11 フロートの流跡図
(海水・将来, 2潮汐間の軌跡)

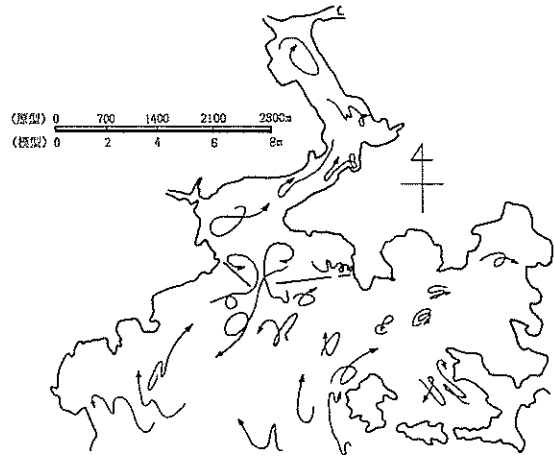


図-13 フロートの流跡図
(淡水・将来, 2潮汐間の軌跡)

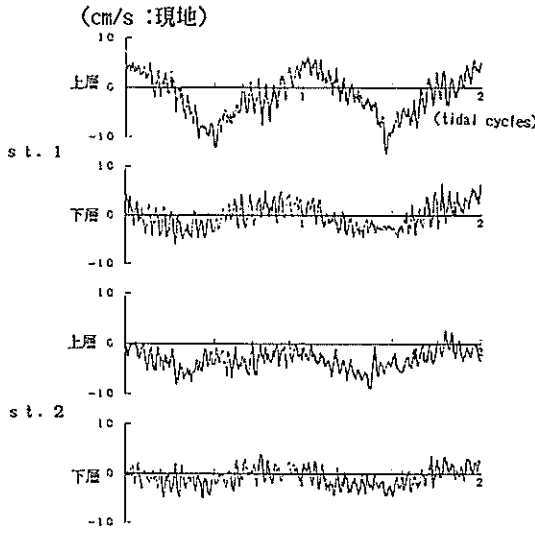
表-4 防波堤開口部付近の最大流速

ケース番号	実験条件	上げ潮	下げ潮
I	海水 現況	2.9 cm/s	2.8 m/s
II	海水 将来	6.0	1.3.8
III	淡水 現況	1.6	0.8
IV	淡水 将来	10.5	8.9

に示した流跡図, および表-4の結果から, 現況地形ではその差異は明確でないが, 防波堤設置の将来地形では港口部に設置された防波堤の背後に環流が形成されていること, また, 海水を用いた実験, すなわち, 密度効果を考慮した実験の方が表層で流出傾向にあることなどがわかる。

図-14には, 海水を用いた場合の実験ケースでの港口部に設置された超音波流速計の記録から, 比較的流速値の大きい測点1と測点2の結果を示す。上向きが流入を, 下向きが流出を示している。模型内の2次振動の影響で流速はかなり振動しているが, この記録からも上

現況地形



将来地形

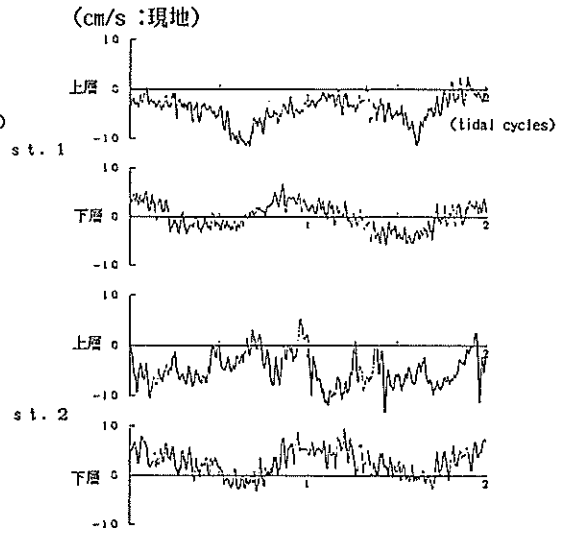


図-14 超音波流速計による測定記録

(左:海水・現況, 右:海水・将来)

層からの流出の傾向は読みとれる。

(2) 海水交換実験結果

海水交換実験開始後、数潮汐毎に採水を実施した。そ

の染料濃度の水平分布結果を図-15~18に示す。ここでは一例として、海水を用いた実験の将来ケースについて示している。各測点での採水は3~5層に分けて実施

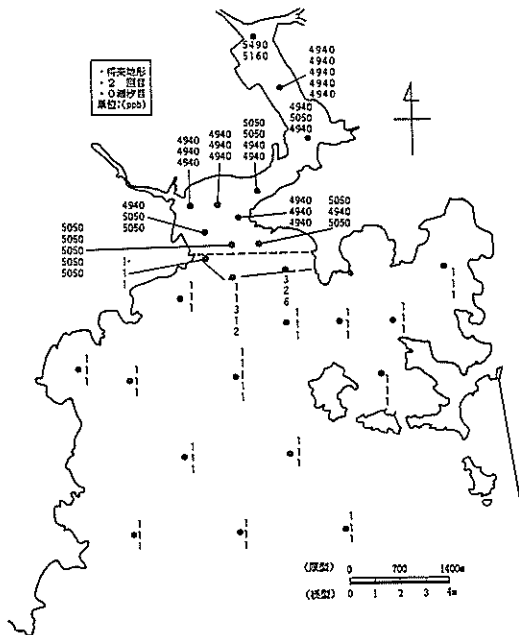


図-15 染料の濃度分布図(海水・将来・0潮汐目)

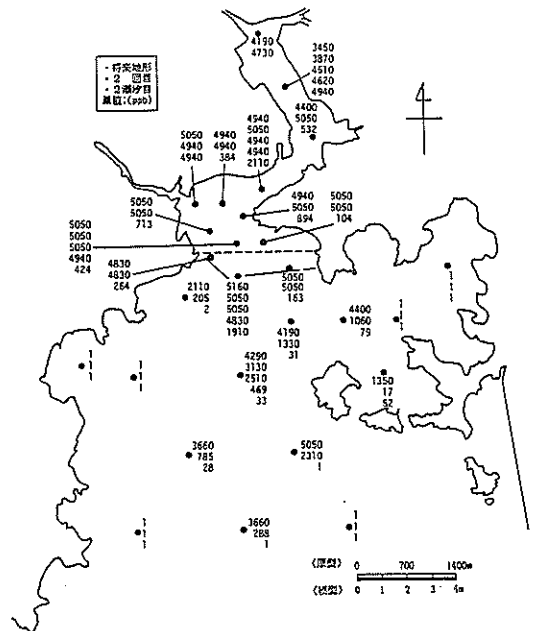
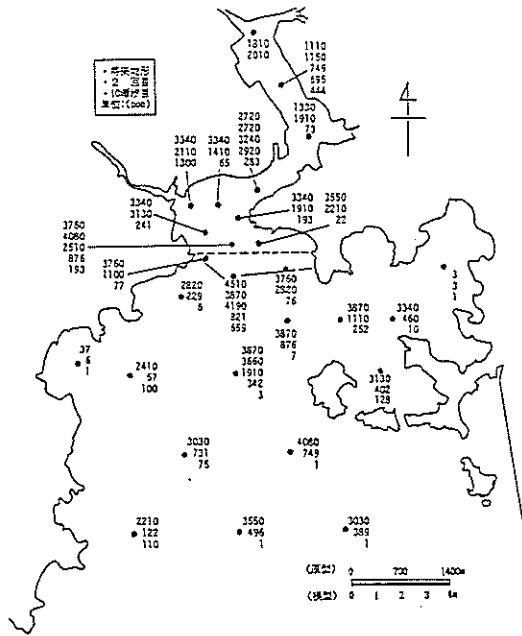
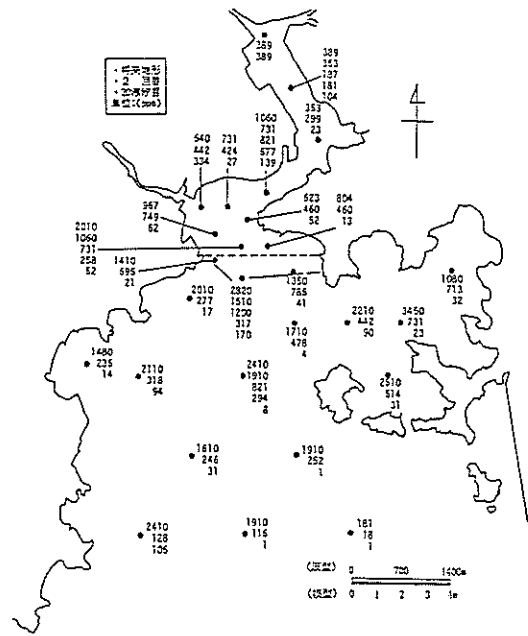


図-16 染料の濃度分布図(海水・将来・2潮汐目)



図一七 染料の濃度分布図(海水・将来・10潮汐目)

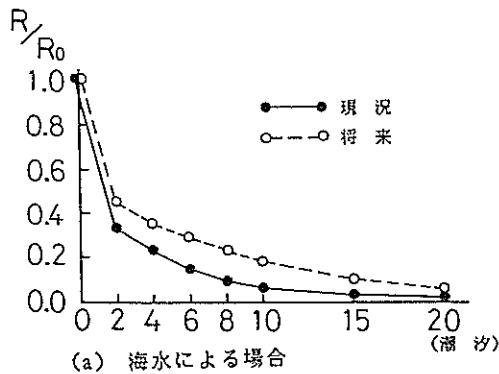


図一八 染料の濃度分布図(海水・将来・20潮汐目)

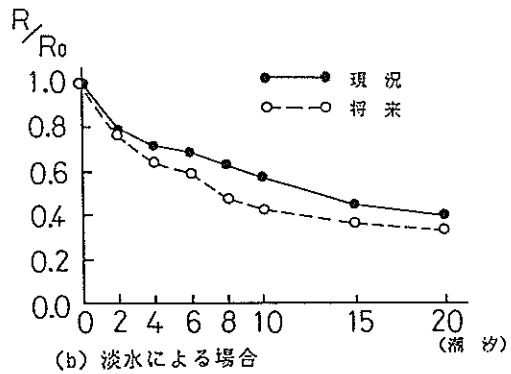
している。起潮後は、表層に染料濃度の濃い(塩分濃度が薄い)部分があり、中層から底層にかけては濃度が低く、ほとんど湾外水であると考えられる。これらの結果からもわかるように、水深方向に非常にシャープな染料濃度分布(塩分分布)となっているので、採水点の深さ、および採水時の水位により、その濃度が大きく変化することから、採水には細心の注意が必要である。採水孔の位置が水位変化に連動して変動することが望ましいが、本実験では採水孔の位置は固定している。

これらの濃度分布図から、各採水点での濃度の重み付き平均による湾内水の平均濃度の低減曲線を図一十九に示す。各採水点での重みの付け方は、その採水点が代表

する水域のポリウムによっている。図一十九に示された値は、それぞれのケースについて2回ずつ行った実験結果の平均値である。(a)に示すのが海水を用いた実験で、密度効果を考慮した場合での現況地形と将来地形での比較を、(b)に示すのが淡水を用いた実験で、密度効果を無視した場合での現況地形と将来地形での比較を示す。密度効果を考慮した場合には現況地形の方が将来地形よりも海水交換が早いのに対し、密度効果を無視した場合には、将来地形の方が現況地形よりも海水交換が早いという結果になっている。また、密度効果を考慮した場合と無視した場合は、考慮した場合の海水交換の方がかなり早いことがわかる。以上の結果から、港口に設置され



(a) 海水による場合



(b) 淡水による場合

図一十九 湾内水の平均濃度の低減曲線(水理模型実験)

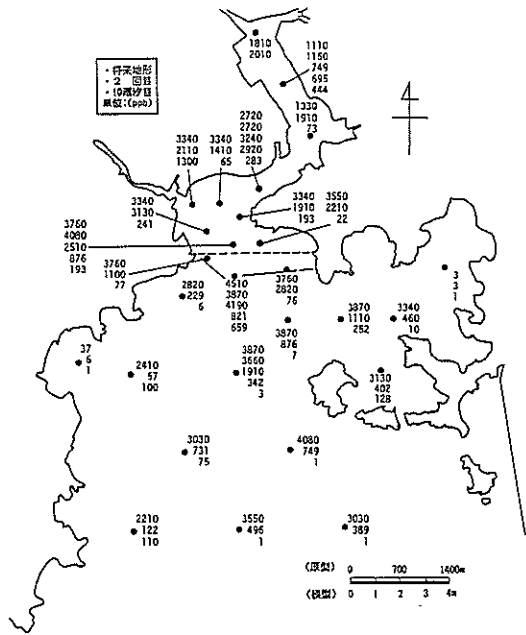


図-17 染料の濃度分布図(海水・将来・10潮汐目)

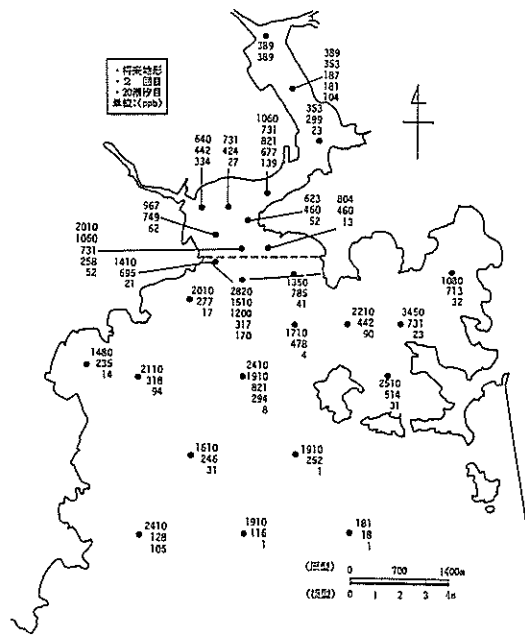


図-18 染料の濃度分布図(海水・将来・20潮汐目)

している。起潮後は、表層に染料濃度の濃い(塩分濃度が薄い)部分があり、中層から底層にかけては濃度が低く、ほとんど湾外水であると考えられる。これらの結果からもわかるように、水深方向に非常にシャープな染料濃度分布(塩分分布)となっているので、採水点の深さ、および採水時の水位により、その濃度が大きく変化することから、採水には細心の注意が必要である。採水孔の位置が水位変化に連動して変動することが望ましいが、本実験では採水孔の位置は固定している。

これらの濃度分布図から、各採水点での濃度の重み付き平均による湾内水の平均濃度の低減曲線を図-19に示す。各採水点での重みの付け方は、その採水点が代表

する水域のボリュームによっている。図-19に示された値は、それぞれのケースについて2回ずつ行った実験結果の平均値である。(a)に示すのが海水を用いた実験で、密度効果を考慮した場合での現況地形と将来地形での比較を、(a)に示すのが淡水を用いた実験で、密度効果を無視した場合での現況地形と将来地形での比較を示す。密度効果を考慮した場合には現況地形の方が将来地形よりも海水交換が早いのに対し、密度効果を無視した場合には、将来地形の方が現況地形よりも海水交換が早いという結果になっている。また、密度効果を考慮した場合と無視した場合は、考慮した場合の海水交換の方がかなり早いことがわかる。以上の結果から、港口に設置され

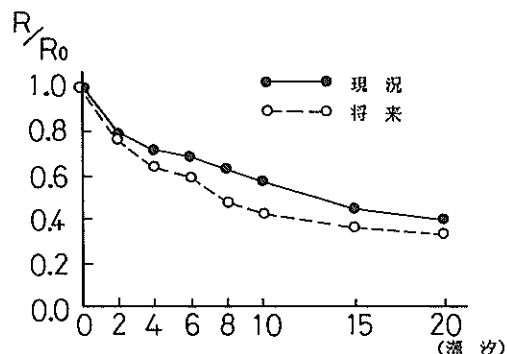
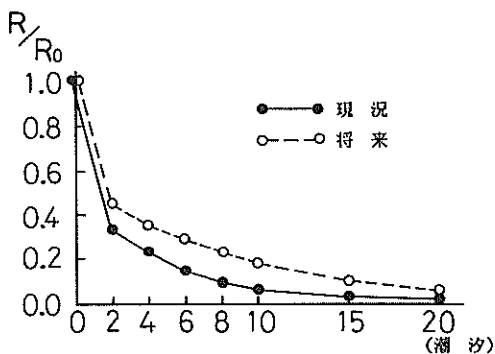


図-19 湾内水の平均濃度の低減曲線(水理模型実験)

た防波堤の海水交換に与える影響は、防波堤背後にできる水平循環流により海水交換が促進されるという効果をもつ反面、港口部の面積を減少させることから、密度効果による鉛直循環流による海水交換の効果を抑制するという相反する効果をもつことがわかる。

図一19に示された湾内水の平均濃度の低減曲線から、湾内水の海水交換量についての検討を行う。いま、式(4)に示された残余関数 $r(t)$ を、式(35)によって近似するものとする。

$$r(t) = \exp \left\{ -\alpha t_{d1}^{\beta} \right\} \quad (35)$$

ここで、 t_{d1} は潮汐数、 α 、 β は定数である。表一5に、式(35)によって近似された場合の図一19に示された低減曲線の α と β の値、および式(3)より得られた平均滞留時間の結果を示す。

表一5 平均滞留日数と α 、 β の値(水理模型実験)

ケース番号	実験条件		α	β	τ_p (日)
I	海水	現況	0.688	0.58	1.3
II	海水	将来	0.358	0.68	2.7
III	淡水	現況	0.143	0.63	15.3
IV	淡水	将来	0.201	0.57	13.2

図一20、21には、比色計による港口断面での染料濃度の連続記録の結果を示す。下層での濃度は、実験開始直後にはある程度の値をもっているが、1潮汐以後からはほとんど0ppmとなっており、下層ではほとんど外海水と置き換えていることがわかる。上層の濃度は、時間の経過とともに外海水の影響を受けて、上潮時には濃度の低下がみられる。このように、上・下層での濃度変化が非常に大きかったこと、また、超音波流速計による流速の測定が流れが遅いためあまり良い精度で得られなかったことから、Parkerらの手法による海水交換率の算定は行わず、ここでは、その結果の一例を呈示するにとどめた。

4.2 水理模型実験結果の考察

水理模型実験により海水交換現象の検討を行った。ここで明らかになったことは、港口部に設置された防波堤は海水交換現象に対して、潮汐残差流による水平循環流を形成し海水交換を促進させるが、密度流による鉛直循環流を阻害して海水交換を抑制するという相反する働きをもつことである。したがって、防波堤等の港湾構造物の海水交換へ及ぼす影響は、対象海域の潮汐残差流の大きさ、密度流の大きさなどに依存するものと考えられる。

いま、須崎港の水理模型を利用して行った実験結果を基に、海水交換のメカニズムを簡略化して考察する。海水交換のメカニズムには、図一22に示したような水平循環流による潮汐残差流効果、鉛直循環流による密度流効果、および潮流乱れによる拡散効果などが考えられる。いまここで、淡水・現況のケースについての海水交換を拡散効果のみによる交換と考え、淡水・将来のケースは拡散効果と潮汐残差流の効果、海水・現況のケースは拡散効果と密度流効果、さらに、海水・将来のケースは拡散効果、密度流効果、潮汐残差流の効果が重なったものと仮定する。また、拡散効果と密度流効果は港口部の断面積に比例すると考え、潮汐残差流の効果は現況ケースの場合はないものと仮定して考える。

以上の仮定より、各4ケースの海水交換のメカニズムは以下のように表される。いまここで、1潮汐間における交換量の割合を、図一22に示すように、拡散によるものを α^* 、潮汐残差流によるものを β^* 、および、密度流によるものを γ^* とし、港口部での断面積を現況の場合 S 、将来の場合を S' とすると、それぞれのケースについての1潮汐間での交換量は、

$$q_I (\text{淡水} \cdot \text{現況}) = \alpha^* \cdot Q \quad (36)$$

$$q_{II} (\text{淡水} \cdot \text{将来}) = (\alpha^* \cdot S' / S + \beta^*) \cdot Q \quad (37)$$

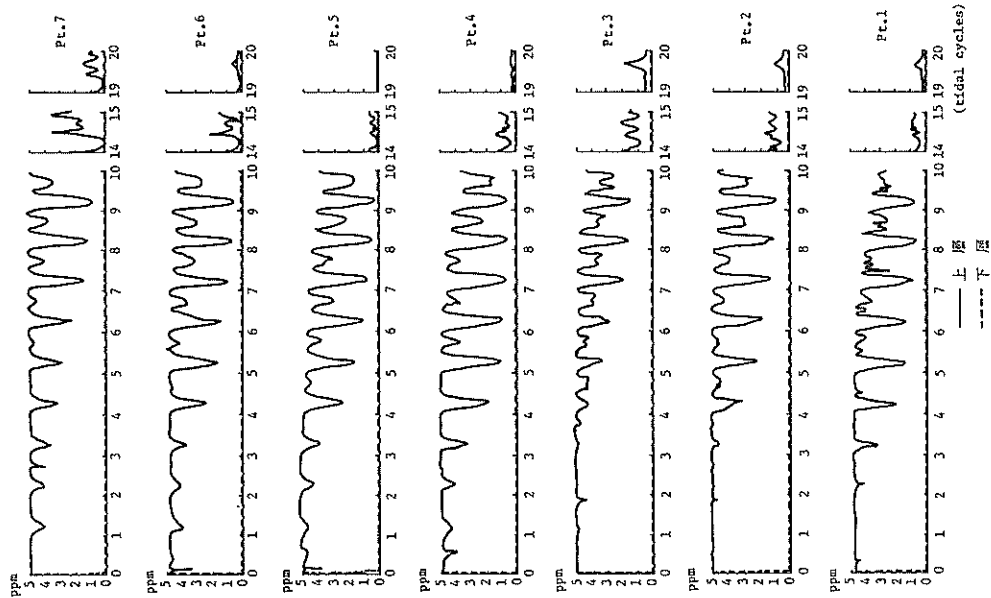
$$q_{III} (\text{海水} \cdot \text{現況}) = (\alpha^* + \gamma^*) \cdot Q \quad (38)$$

$$q_{IV} (\text{海水} \cdot \text{将来}) = (\alpha^* \cdot S' / S + \beta^* + \gamma^* \cdot S' / S) \cdot Q \quad (39)$$

と表される。いま、 $S' / S = 0.3$ と仮定する。これらの式に、表一5に示された低減式の1潮汐目の結果を代入すると、式(36)より $\alpha^* = 19.9\%$ 、式(37)より $\beta^* = 19.8\%$ 、および式(38)より $\gamma^* = 44.3\%$ という値が得られる。これらの結果を式(39)に代入すると、海水・将来の1潮汐間の交換量は39.1%という値が得られる。この結果は表一5から算定される43.6%という値にかなり近い。

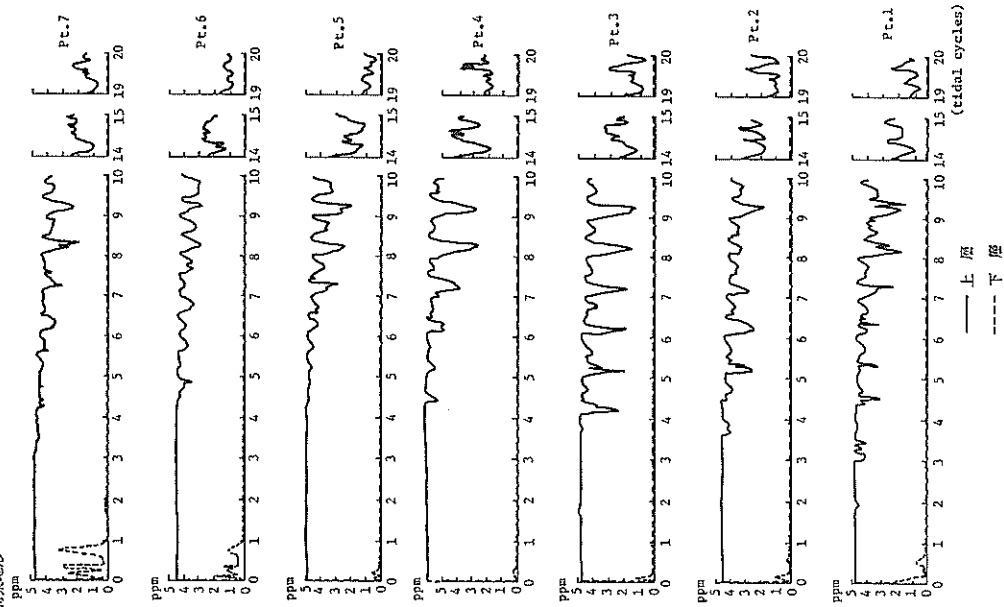
このような考察により、今回の水理模型実験より得られた海水交換のメカニズムは、非常に大まかな仮定を基にしているが、密度流による鉛直循環流の効果が最も大きく、次いで、防波堤の設置による水平循環流の効果、潮流乱れによる拡散効果の順になった。また、港口部に防波堤を設置した場合に、その開口部の断面積が減少することにより、拡散効果と密度流効果が減少するという考え方から、淡水を用いた場合と海水を用いた場合の海水交換実験の相反する結果の現象の説明ができた。こ

現状地形



図一20 比色計による染料濃度の連続記録(海水・現況)

将来地形



図一21 比色計による染料濃度の連続記録(海水・将来)

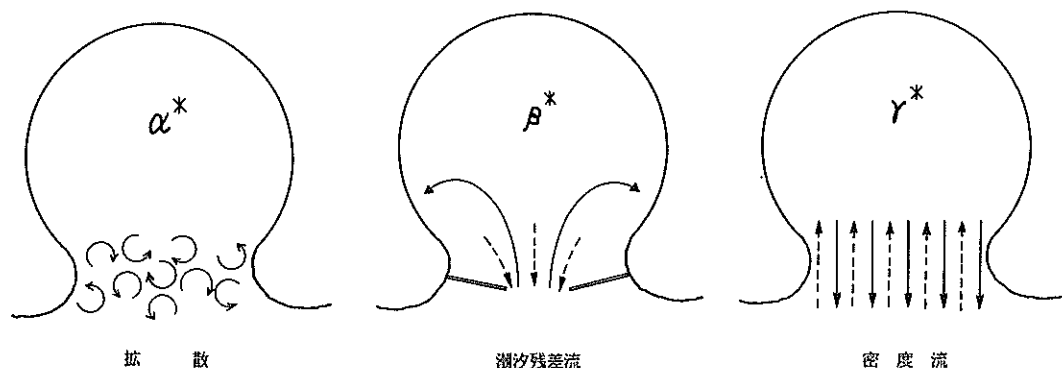


図-22 海水交換の簡略化されたメカニズムの模式図

で行った実験は、密度流の設定法に現実とは大きな隔りがあることからあまり断定的なことは言えないが、密度流が存在する場合の防波堤の海水交換に及ぼす影響が、これより定性的に説明できるものと考えられる。

以上のような検討から、閉鎖水域の海水交換に及ぼす要因は、対象海域の潮流、潮汐残差流、密度流等の流れの構造によって変化しうるものであり、また、防波堤等の構造物による影響も、対象海域の流れの構造によって変わりうるものであることがわかる。

5. 海水交換実験に関する考察

5.1 数値シミュレーションによる検討

近年、潮流および汚染拡散現象、あるいは海水交換などの現象に対して数値シミュレーションで検討することが多くなった。したがって、ここで、数値シミュレーションによる海水交換現象についての検討を行った。

潮流あるいは物質拡散の現象は本来3次元的存在であるが、密度流的な現象が非常に複雑であること、および3次元的现象を解くことは計算時間、および記憶容量の点からあまり経済的でないため、鉛直方向に平均化された平面2次元流の取り扱いを行うのが一般的である。したがって、ここでは、密度効果を考慮しない流れについての単層2次元モデルによる計算を実施し、数値計算による海水交換の検討を行った。

2次元単層の潮流の基本方程式は以下のように表される。

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial [u(h+\zeta)]}{\partial x} + \frac{\partial [v(h+\zeta)]}{\partial y} = 0 \quad (40)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = f v - g \frac{\partial \zeta}{\partial x} - \frac{\tau_x^b - \tau_x^s}{\rho_w (h+\zeta)} + E_h \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (41)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -f u - g \frac{\partial \zeta}{\partial y} - \frac{\tau_y^b - \tau_y^s}{\rho_w (h+\zeta)} + E_h \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \quad (42)$$

ここにおいて、圧力 P は次式のように密度の関数となっている。

$$P = \rho_w g (\zeta + Z) \quad (43)$$

式(40)~(43)において、種々の変数は図-23に定義されるものである。また、

E_h : 水平混合係数

τ^s : 海面せん断力

τ^b : 底面せん断力

ρ_w : 水の密度

である。

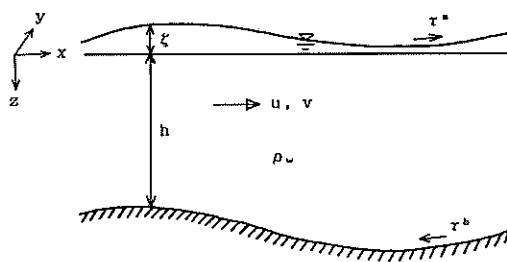


図-23 座標系と変数の定義

2次元単層モデルにおいては海水の密度は一定と仮定しており、したがって、密度の水平分布および鉛直分布は流れには関与しない。すなわち、密度効果による流れを無視した計算に相当する。

数値シミュレーションによる海水交換現象の検討は、水理模型実験の場合と同様に行った。すなわち、初期条件として、湾内側の領域の濃度を一定値に設定し、拡散計算を実行して、湾内水と外海水との交換の程度を算定する方法である。

次に、物質拡散の基本方程式を示す。

$$\frac{\partial ch}{\partial t} + \frac{\partial(vch)}{\partial x} + \frac{\partial(vch)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x h \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y h \frac{\partial c}{\partial y} \right) \quad (44)$$

ここに、 c は物質濃度を表す。これらの式中の u 、 v 、 w は前述の潮流計算において得られた結果を用いる。

水理模型実験の場合には、遮へい板により湾内水と外海水とを分離したために、初期状態の水は静止しているのに対し、数値シミュレーションの場合は、流れがある状態で初期状態が容易に設定できるので、周期的に定常な状態での海水交換現象が算定できる。

2次元単層の潮流計算の計算条件を表一六に示す。

表一六 2次元単層モデルの計算条件

計算領域	図-28 参照
格子間隔	$\Delta s = 150\text{m}$
タイム・ステップ	$\Delta t = 90\text{s}$
海底摩擦	$n = 0.026$ (マニングの粗度係数)
水平混合係数	$A_h = 1.8 \times 10^4 \text{cm}^2/\text{s}$
境界条件	振幅 $7.46 \text{cm} (M_2 + S_2)$ 位相差 なし
河川流量	新莊川 $1.90 \text{m}^3/\text{s}$
	桜川 $0.32 \text{m}^3/\text{s}$
	その他 $0.18 \text{m}^3/\text{s}$
解法	ADI法

境界での水位は模型実験と同条件にするために、おのこの境界で同一振幅を与え、位相差はないものとした。

数値シミュレーションについても、それぞれ現況地形、および、防波堤設置後の将来地形についての計算を実施した。それらの計算結果から、上げ潮最強時の潮流図を図-24~25に、および、潮汐残差流を図-26~27

に示す。潮汐残差流の結果から、現況地形の場合はゆるやかな循環流であるのに対し、将来地形の場合は港口防波堤の背後に水平循環流が形成されていることがわかる。

これらの潮流計算結果を流れの条件として、拡散計算を実施した。初期条件としては、図-28に示す範囲を10ppmに設定し、その他は0ppm、また、境界の濃度も0ppmに固定した。拡散計算における計算条件を表一七に示す。拡散係数は $10^5 \text{cm}^2/\text{s}$ を全域一様に与

表一七 拡散計算における計算条件

2次元単層モデル	
計算領域	図-28 参照
格子間隔	$\Delta s = 150\text{m}$
タイム・ステップ	$\Delta t = 360\text{s}$
水平拡散係数	$1 \times 10^5 \text{cm}^2/\text{s}$
初期濃度	湾内: 10ppm (図-28参照) 湾外: 0ppm
境界濃度	0ppm
投入負荷量	新莊川: 1.64 t/日 桜川: 0.28 t/日 その他: 0.16 t/日

えた場合について示す。

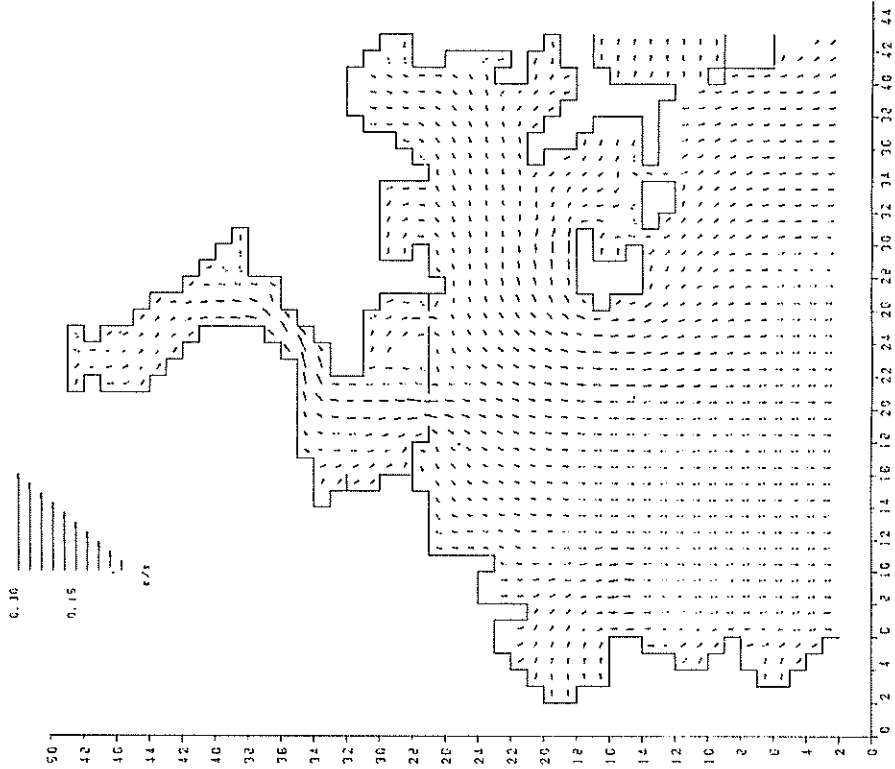
拡散計算の結果から、湾内の平均濃度の時間的変化曲線を図-29に示す。実線は現況地形の結果を、破線は将来地形の結果を示す。現況地形の方が将来地形よりも海水交換率が大きい結果となっている。

数値シミュレーション結果についても、模型実験結果と同様に、図-29の平均濃度の低減曲線から平均滞留時間、および、 α 、 β の値を求めた。その結果を表一八に示す。この表から、港口部に防波堤を設置すると α の

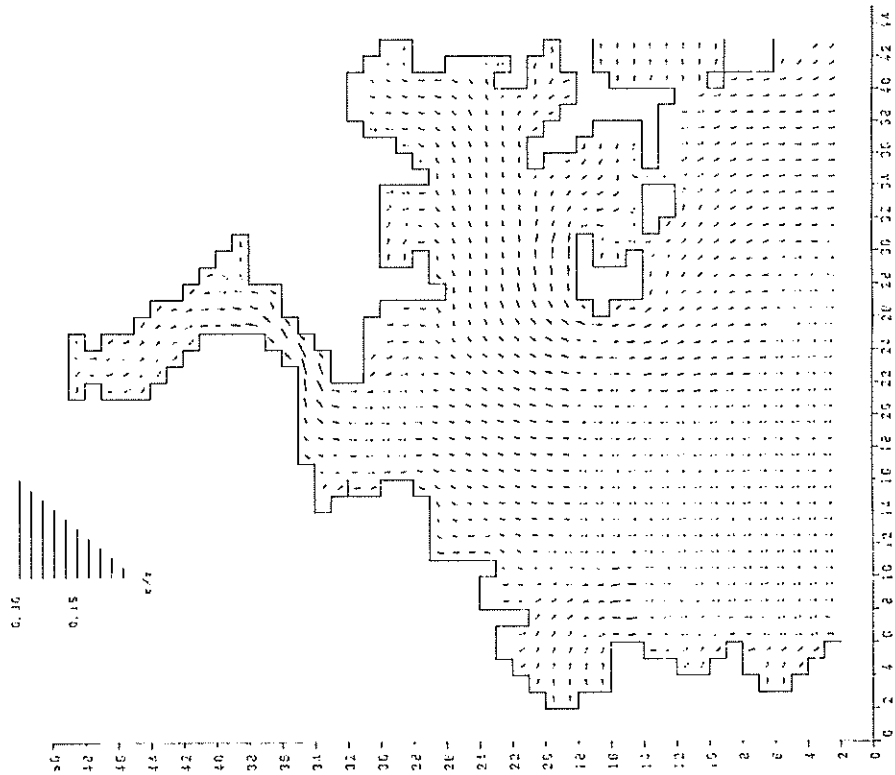
表一八 平均滞留日数と α 、 β の値 ($K_x = K_y = 10^5 \text{cm}^2/\text{s}$)

計算条件	α	β	τ_p (日)
2次元単層 現況	0.346	0.55	5.5
2次元単層 将来	0.231	0.63	6.8

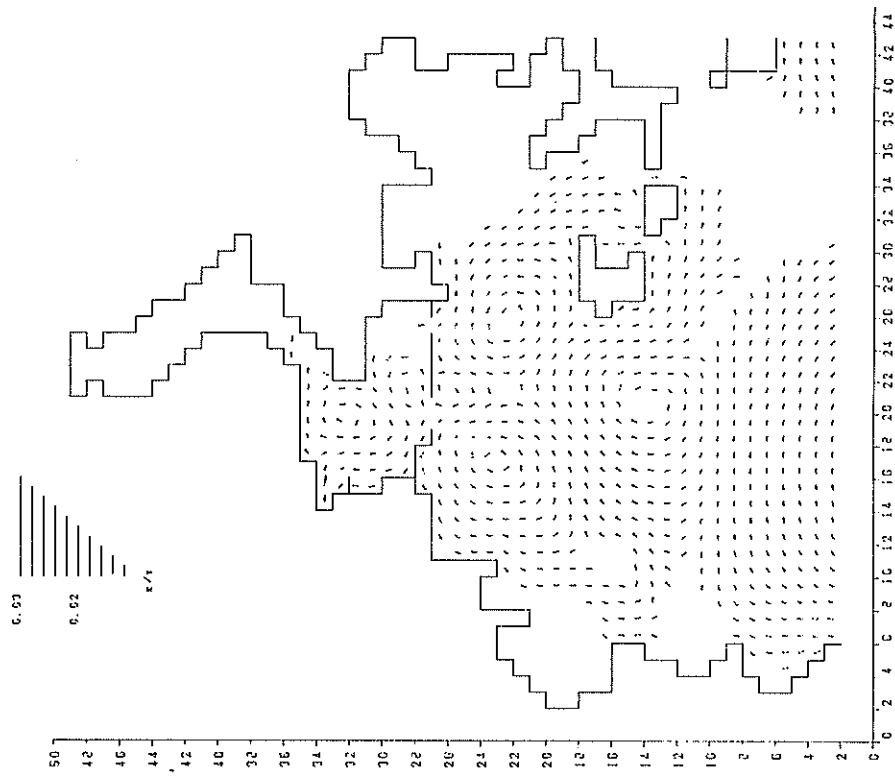
値は小さくなり、 β の値は大きくなっていることがわかる。また、平均滞留日数は若干増加しており、防波堤により海水交換が抑制されている結果となっている。同様の検討を、拡散係数 $10^4 \text{cm}^2/\text{s}$ に対しても行った。その結果を、図-30、表-9に示す。これらの結果と水理模型実験の結果を比較すると、数値シミュレーションの方が $K_x = 10^5 \text{cm}^2/\text{s}$ の場合は海水交換が大きく、また、



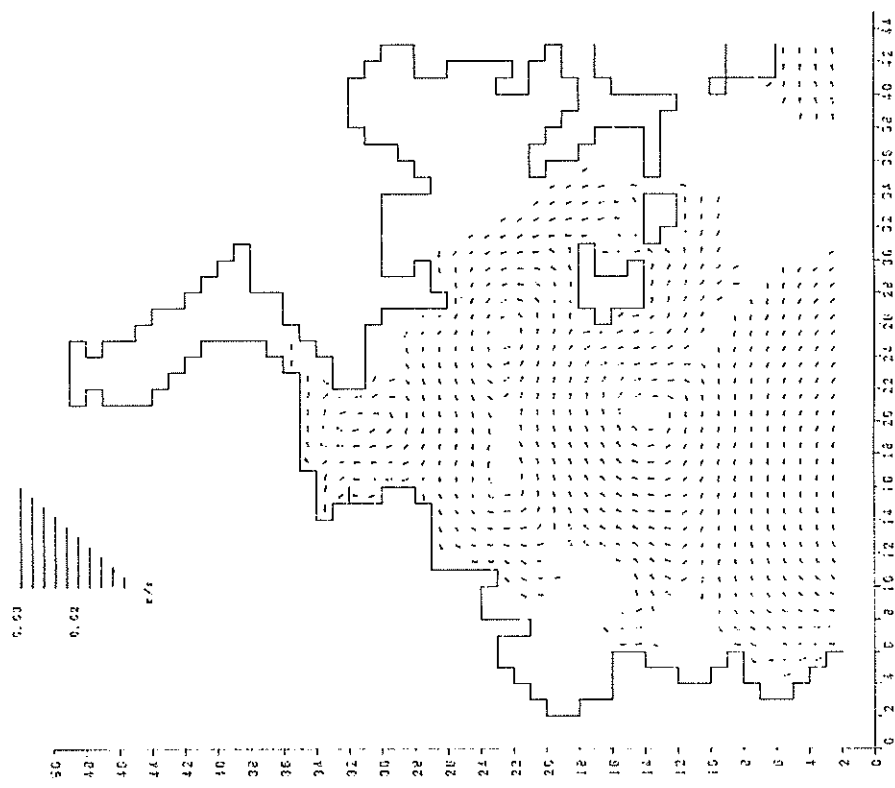
図一24 潮流ベクトル図(2次元単層モデル, 現況, 上げ潮最強時)



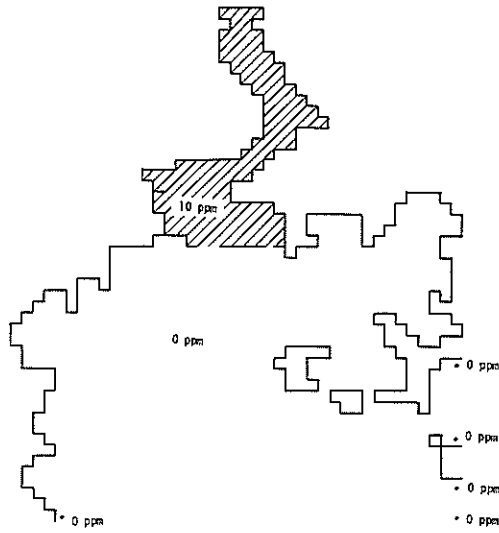
図一25 潮流ベクトル図(2次元単層モデル, 将来, 上げ潮最強時)



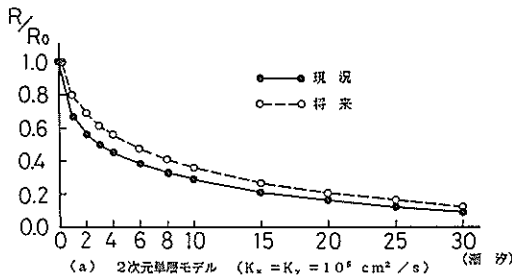
図一26 潮汐残差流（2次元単層モデル，現況）



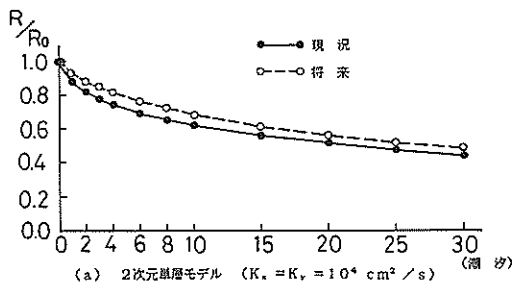
図一27 潮汐残差流（2次元単層モデル，将来）



図一 28 海水交換計算における初期条件と境界条件



図一 29 湾内水の平均濃度の低減曲線
(数値シミュレーション $K_x = K_y = 10^5 \text{ cm}^2/\text{s}$)



図一 30 湾内水の平均濃度の低減曲線
(数値シミュレーション $K_x = K_y = 10^4 \text{ cm}^2/\text{s}$)

表一 9 平均滞留日数と α, β の値 ($K_x = K_y = 10^4 \text{ cm}^2/\text{s}$)

計算条件		α	β	τ_r (日)
2次元単層	現況	0.128	0.55	35.5
2次元単層	将来	0.0744	0.64	40.0

$K_x = 10^4 \text{ cm}^2/\text{s}$ の場合には、小さい海水交換となっている。しかし、どちらのケースも防波堤を設置した方が海水交換が小さくなっているのがわかる。

このように、現況地形の方が将来地形よりも海水交換が大きいのは、数値シミュレーション結果の方が水平循環流の大きさが小さいこと、および、移流項に比べて拡散項の方が大きいために、港口断面積の減少の効果が大きく影響しているためと思われる。いま、拡散方程式において移流項と拡散項の比をとってみると、

$$P_e = \frac{u \cdot \Delta x}{K_x} \quad (45)$$

で表される。ここで、 $u = 3 \text{ cm/s}$ 、 $\Delta x = 150 \text{ m}$ 、 $K_x = 10^5 \text{ cm}^2/\text{s}$ を与えると $P_e = 0.45$ 程度となる。これに、移流項の上流差分による数値拡散項

$$D_N = \frac{u \cdot \Delta x}{2} = 2.25 \times 10^5 \text{ cm}^2/\text{s} \quad (46)$$

を加えると、 $P_e' = 0.37$ となり、かなり拡散項の方が大きくなる。したがって、防波堤設置による港口部の面積の減少が海水交換の抑制に働き、将来地形の方が海水交換量が小さくなったものと推定される。次に、 $K_x = 10^4 \text{ cm}^2/\text{s}$ についてみると、 $P_e' = 1.38$ となり移流項と拡散項は、ほぼ匹敵する大きさとなる。しかし、潮汐残差流の効果が非常に小さいために、将来地形による海水交換量の大きさが小さく見積られたものと思われる。そこで、次に水平循環流の海水交換に及ぼす影響について検討する。潮流シミュレーションにおいて、水平循環流の大きさは水平混合項の大きさに左右され、水平混合項が大きい場合には水平循環流の大きさが小さくなる傾向にある。³²⁾ 本計算においては、水平混合項は

$$E_h = 0.05 (\Delta l)^{\frac{4}{3}} = 1.8 \times 10^4 \text{ cm}^2/\text{s} \quad (47)$$

で与えている。ここに、 Δl は計算格子の長さ (cm) である。しかし、計算が不安定な場合には数十倍の水平混合項を与える場合もあり、また、計算全域に一様な値を与えている方法についても疑問が残る。水平混合項に相当する項は、本来は流れのレイノルズ応力に相当する水

平粘性であることから、乱流モデルなどを用いて正しく、粘性項を評価することにより、防波堤背後の循環流を正しく見積ることも可能と思われるが、まだ明らかではない。ここでは、水平混合項を式(47)の値の1/10に設定した場合の潮流計算を実施した。その結果の潮汐残

差流図を図-31に示す。図-27と比較するとわかるように、水平混合項を小さくすると防波堤背後の水平循環流が大きくなるのがわかる。この潮流計算結果を用いて海水交換の計算を行った結果が図-32である。移流の効果を大きくみるために、拡散係数の値は $10^4 \text{ cm}^2/\text{s}$

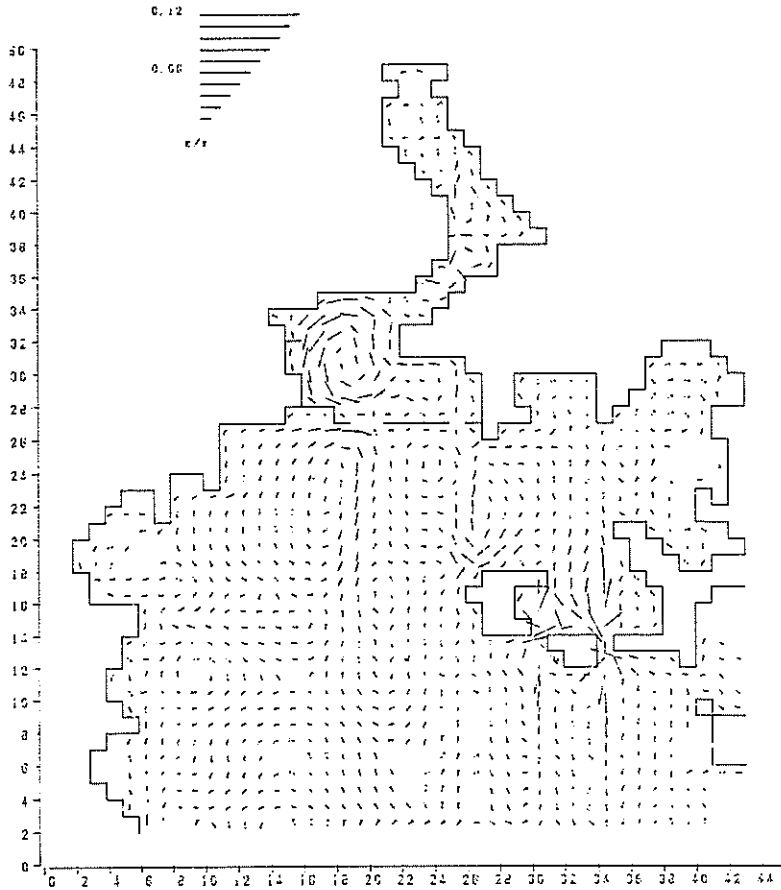


図-31 潮汐残差流（2次元単層モデル，将来，水平混合係数を小さくした場合）

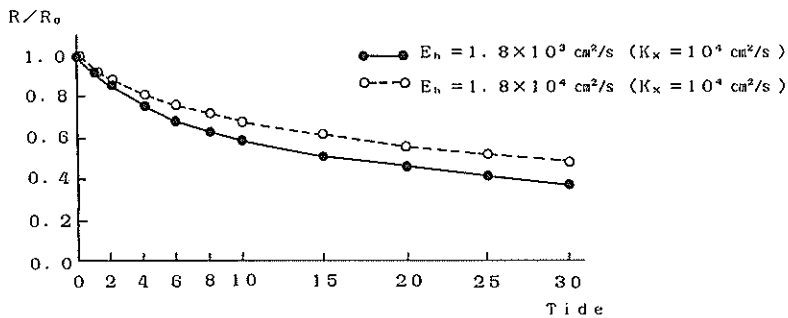


図-32 湾内水の平均濃度の低減曲線（水平混合係数の違いによる比較）

の比較的小さいケースについての比較を行っている。たしかに、水平混合項が小さくなると水平循環流が大きくなり、海水交換が促進される結果となっている。

また、このケースにおいては現況ケースの場合よりも海水交換が大きく、模型実験結果の傾向と一致していることがわかる。しかし、拡散係数が $10^5 \text{cm}^2/\text{s}$ の場合に対しては、水平混合項による海水交換への効果はみられず、また、現況地形の方が海水交換が大きいという結果になっている。このことから、水理模型実験による結果は数値シミュレーションの結果に比べて、潮汐残差流の効果が大きく、また拡散効果が小さいものと類推される。

なお、同様の検討を密度流を考慮した2レベルモデルによる計算を用いて行ったが、密度流を考慮した流れの計算結果において、非常に大きな鉛直循環流となり、満足のゆく結果が得られなかった。したがって、ここでの数値シミュレーションによる検討は、2次元単層の密度流を考慮しない場合についてのみの記述にとどめるものとする。

5.2 海水交流と海水交換率

水理模型実験、および数値シミュレーションとも湾内水の平均濃度の低減曲線から、湾内水と外海水との海水交換について論じてきた。ここで、平均濃度の低減曲線と海水交換量の関連についての検討を行う。

これまで、湾内水の平均濃度の低減曲線を残余関数として、

$$r(t) = \exp \left\{ -\alpha \cdot t_d^\beta \right\} \quad (35)$$

によって近似した。この近似曲線における α と β の値は、水理模型実験結果については表-5に、また、数値シミュレーション結果については表-8, 9に示した。 α , β の値とも、その値が大きい程、海水交換の速度が早いことを示している。

いま、1潮汐間に湾内の海水の $m\%$ (m_1) のものが外海水と交換すると仮定すると、湾内に残る物質質量 $Q(1)$ は、1潮汐前の物質質量 Q_0 の比率として、

$$\frac{Q(1)}{Q_0} = (1 - m_1) \quad (48)$$

で表される。式(48)の左辺は残余関数に相当するもので、したがって、 t 潮汐後の残余関数は

$$\frac{Q(t)}{Q_0} = r(t) = (1 - m_1)^t \quad (49)$$

で表される。これは、 $\alpha = -\log(1 - m_1)$ 、および $\beta = 1$ とおけば

$$r(t) = \exp \left\{ -\alpha \cdot t_d \right\} \quad (50)$$

となり、式(35)と同じ表現式となる。しかし、表-5, 表-8の結果をみると β の値はすべて1以下の値となっており、式(50)の低減曲線とは異なったものとなっている。

このような現象を説明するために、次のような3つの仮定をおく、①；湾内では1潮汐間に $m\%$ の海水が交換するものとする、②；次の上潮時に、湾外に $m\%$ 出て行ったもののうち、 $n\%$ (n_1) のものが湾内にもどる、③；湾内から湾外へ出た物質のうち、1潮汐間で対象の系内に滞まる割合は $l\%$ (l_1) である。ここで、湾内とは湾口部より内側の領域を、また湾外とは湾口部より外側ではあるが潮流により湾内に影響を及ぼす領域を示し、系外とは再び湾内には戻らない領域をいう。

以上の仮定を基にした海水交換現象の模式図を図-33に示す。ここで、 $m_1 = m/100$, $n_1 = n/100$, $l_1 = l/100$ である。したがって、 $n-1$ 潮汐目で湾内での物質が A' 、湾外での物質が B' とすると、 n 潮汐目での湾内 (V_{in})、湾外 (V_{out})、および系外 (V_0) の物質量は、

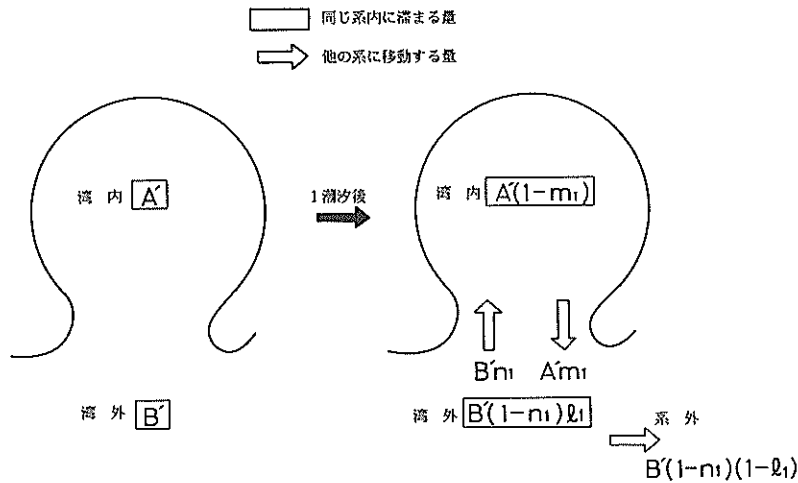
$$\left. \begin{aligned} V_{in} (\text{湾内}) &= A'(1 - m_1) + B'n_1 \\ V_{out} (\text{湾外}) &= A'm_1 + B'(1 - n_1)l_1 \\ V_0 (\text{系外}) &= B'(1 - n_1)(1 - l_1) \end{aligned} \right\} (51)$$

となる。この方法を用いて、数値シミュレーションの結果を近似させると図-34のようになる。(a)に示すのは拡散係数が $10^5 \text{cm}^2/\text{s}$ のケースであり、(b)に示すのが $10^4 \text{cm}^2/\text{s}$ のケースである。また同図には、式(35)で近似した曲線についても示す。

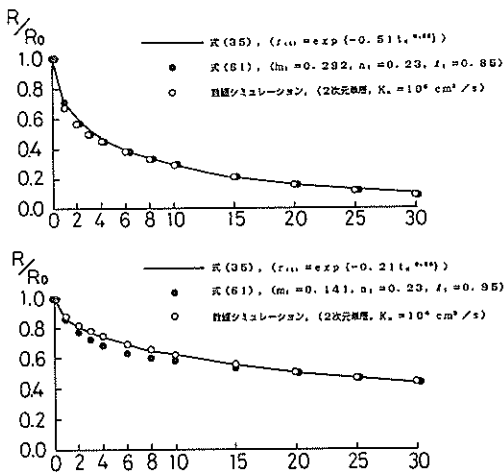
以上の検討を他のケースについても実施した。その結果を表-10に示す。ここにおいて、 m_1 の値は表-8,

表-10 m_1, n_1, l_1 の値

ケース	地形	E_h	K_x	m_1	n_1	l_1
1	現況	大	$10^5 \text{cm}^2/\text{s}$	0.292	0.230	0.85
2	現況	大	10^4	0.141	0.230	0.95
3	将来	大	10^5	0.204	0.190	0.85
4	将来	大	10^4	0.086	0.160	0.95
5	将来	小	10^5	0.206	0.190	0.85
6	将来	小	10^4	0.123	0.160	0.95



図一 3 3 海水交換現象の模式図



図一 3 4 3つの求め方による湾内水の平均濃度の低減曲線の比較

表一 9 に示された係数を用いて式 (35) にあてはめた場合での 1 潮汐目の湾内水の交換率の値を、また l_1 に関しては、境界条件の与え方が一定であることから、拡散係数が $10^5 \text{ cm}^2/\text{s}$ の場合は 0.85、 $10^4 \text{ cm}^2/\text{s}$ の場合は 0.95 と固定した。これらの係数より、式 (51) で求める低減曲線と式 (35) より求める低減曲線とが近くなるように求めたものが n_1 である。この表からわかることは、拡散係数を大きくすると、湾内から湾外への交換率 m_1 がかなり大きくなるが、湾外から湾内へ戻る率 n_1 はあ

まり大きな変化はないことである。これに対して、現況地形と将来地形では、現況地形の方が湾内から湾外へ出る交換率 m_1 も大きい、湾外から湾内へ戻る n_1 の値も大きく、したがって、計算開始当初急激に湾内濃度が減少するが、その後、湾内濃度の減少速度が鈍る傾向にある。

今回の計算においては、流れの計算において海流の影響を無視して行っているために、湾外へ出たものが系外へ流出する割合があまり大きくない。したがって、現況地形のように湾外から湾内へ戻る割合が大きい場合には、湾内濃度の低減速度が鈍ってしまうので、初期の海水交換は速くとも平均滞留時間が将来地形よりも若干大きくなるという場合も生じてくる。図一 3 5 に示すのは、 m_1 、 n_1 、 l_1 の内、1つの変数を変化させた場合の湾内濃度の低減曲線の変化を示したものである。湾内濃度の低減に対しては m_1 の変動によるものが最も大きい、 n_1 、 l_1 の変動によってもかなり影響を受けることを示している。特に、潮汐数が増えるにつれて l_1 の大きさの影響が徐々に大きくなっていく。このことは、海水交換現象に及ぼす海流の影響、モデルに関していえば境界条件の設定の仕方の重要性を示すものである。

以上の考察から、閉鎖域の海水交換現象を論ずる際に、内湾域の海水交換率ばかりでなく、外海域の交換特性、あるいは海流などの影響を考慮する必要性を示している。また、閉鎖域の水質を浄化するためには、どこを改善すべきかなどの検討方法として、ここに示した方法が 1 つの参考になるものと考えられる。

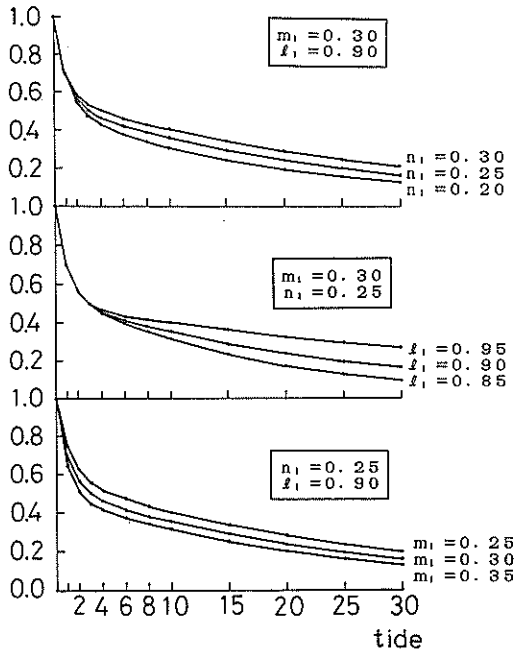


図-35 m_1, n_1, l_1 の変化による湾内水の平均濃度の低減曲線の変動

5.3 水理模型実験と数値シミュレーションの比較

海域における環境問題を検討する手法として、水理模型実験と数値シミュレーションは代表的なものである。本研究においても、海水交換に関して両者の手法を用いての検討を行った。ここで、それぞれの手法の長所、あるいは短所等の特性について検討した。

表-11に、拡散および海水交換に関する問題に対する水理模型実験と数値シミュレーションの比較を示す。これらから特徴的なものを取り上げると、水理模型実験に関しては、長所としては、現象が3次元的であること、地形表現が現地に忠実でかなり細かい現象まで表せること、実際の水を使っていること、さらに、実験者が自分の目で観察できることなどがあげられる。また、短所としては、模型縮尺での実験であること、歪模型であることなどからくる相似則、スケール効果などの問題が最も大きいであろう。また、コリオリ力の効果、海底摩擦、拡散係数などの実験条件を変えるには多くの労力を必要とすること、実験結果にバラツキが生じることなども短所の一つであろうと思われる。

表-11 水理模型実験と数値シミュレーションの比較

	水 理 模 型 実 験	数 値 シ ャ ム レ ー シ ョ ン
縮 尺	模型縮尺、一般にひずみ模型である。 相似則を満足する必要がある。	原型、ひずみなし
モデルの次元	ひずんではいるが3次元的である。	平面二次元
地形表現	忠実である。	差分法：正方形格子の場合、細かい地形表現は無理 有限要素法：比較的忠実である。
コリオリの力	非常に困難である。	容易
底面摩擦	底面仕上げ、人工粗度により調整(塩ビパイプ) 調整は多大な労力が必要	数値的には変更は容易、 しかし、実態は不明確
拡散係数	流れの状態に依存する。 調整は非常に困難である。	数値的に変更は容易 しかし、実態は不明確
水平混合係数	流れの状態に依存する。 人工粗度により調整する。 実態は不明確	数値的に変更は容易 しかし、実態は不明確
密度流効果	再現はかなり難しい。	再現は難しい。
潮汐残差流	大きい 人工粗度に依存する。	小さい 水平混合項に依存する。
風の効果	非常に困難	比較的容易である。
鉛直混合	小さい	完全混合(単層モデル)
非保存性物質	取り扱いには非常に困難	取り扱いは容易 しかし、実態は不明確
境界条件	限定される、その他の調整は困難	容易
費用	モデルの大きさに依存	格子間隔、タイムステップに依存

これに対して、数値シミュレーションにおいては、縮尺は現地スケールであること、コリオリ力の効果を容易に考慮できることなどの長所がある。また、海底摩擦、拡散係数などの値を容易に変更でき、感度解析、数値実験などが容易であるのも重要な長所である。しかし、短所としては、現象を2次的にみていること、差分法および有限要素法においても、ある有限な領域での離散量を取扱っていることなどがあげられる。また、拡散係数や水平混合係数などのように、流れの状態に依存するものなどの場合、設定が非常に難しいこと、また、計算が不安定になることもあることなども短所の一つとして考えられる。費用に関しては、近年の電子計算機の低廉化に伴って、数値シミュレーションの方が経済的になりつつある。

本研究においても、海水交換に関する水理模型実験と数値シミュレーションの特性についての考察を行った。海水交換において、水平循環流および鉛直循環流の果たす役割は非常に大きいことが示されたが、このような現象が水理模型実験、あるいは数値シミュレーションにおいて、どのように再現されているのか、どのように考慮されているのかについての検討を行う。

まず、コリオリの力に関してであるが、水理模型実験においては模型全体を回転するのは非常に困難であるので、コリオリ・トップの回転体を水中に設置するか³³⁾、あるいは本実験のように無視するのが一般的である。これに対し、数値シミュレーションではこの効果を考慮することは容易で、密度流のような一方向流を形成するような流れに対してはコリオリ力がかなり重要であるという指摘³⁴⁾もなされている。

拡散係数に関しては、水理模型においては流れの状態に依存する。棧型の粗度を設置することで拡散状況の変化は可能であるが³⁵⁾、任意の大きさに調整することは非常に困難である。流れ、および乱れを再現することが肝要である。数値シミュレーションにおいては、前章でみたように拡散係数の大きさによって海水交換の大きさも左右される。本来、拡散係数は拡散方程式において、流速あるいは濃度の時間的・空間的アンサンブル平均における物質の輸送量を表すものであって、故に、流れの大きさ、格子の大きさなどに関与して、場所的・時間的に変化するものである。本研究においては全域一律の値を用いて検討したが、計算結果を大きく左右する項目であるので、より厳密な検討が必要である。

水平混合係数についても拡散係数と同様なことが言える。この大きさは、防波堤背後にできる循環流、故に、潮汐残差流の大きさにも関与する。したがって、海水交

換の大きさにも関与する。水理模型実験においては、潮汐残差流はよく再現されているが³⁶⁾、棧型粗度がないような場合には大きすぎる結果となる。これに対し、数値シミュレーションにおいては、一般的に潮汐残差流は小さい。この大きさは、水平混合項の大きさ³⁷⁾、格子間隔の大きさ³⁸⁾により影響を受けるもので、防波堤開口部のような場所では乱流モデル³⁹⁾によるより詳細な検討も必要であろう。

密度流の効果、および鉛直混合の効果はどちらの手法に対してもかなり難しい問題である。水理模型実験に関しては、模型内の流れが微弱であるために鉛直混合の大きさが小さく、故に、密度流の効果を大きく見積る可能性がある。一方、数値シミュレーションにおいては、ここでは2次元単層モデルを計算を実施したにすぎず、密度流の効果を考慮することができなかつた。実際には、2レベルモデルによる計算を試みたが、鉛直循環流が異常に大きな結果となり、模型実験結果、あるいは現地の現象と大きく異なる結果となってしまった。故に、ここでは実験結果と比較することができないので省略する。

その他、風的作用、非保存性物質の取扱いに関しては、水理模型実験においては考慮するのが非常に難しいが、数値シミュレーションにおいては比較的容易である。しかし、数値シミュレーションにおいては、取扱いは容易であっても実態が不明確であるような現象の場合は、計算結果を適合するための係数あわせの要素をもつこともあり、その使い方には注意を要することも少なくない。

以上、水理模型実験と数値シミュレーションでの長所・短所等について述べてきたが、これまでに見たように、どちらの手法においてもそれぞれの特性を持ち、どちらの手法が優位であるとの結論は出しにくい。できることならば、両者の手法による検討を行うことが望ましいものとする。また、密度流を考慮した流れについて、精度の良い数値モデルの開発を早急に行う必要がある。

6. ま と め

水理模型実験手法を用いて、密度流を考慮した海水交換に関する検討を行った。本研究において明らかになったことを列挙すると以下ようになる。

水理模型実験結果に関して、

- ①：模型内に海水を導入することにより、密度効果を考慮した拡散・海水交換の実験を実施した。
- ②：港口部に設置された防波堤の海水交換に及ぼす影響は、防波堤背後に形成される水平循環流によって交換が促進されるが、密度流による鉛直循環流効果、潮流乱れによる拡散効果は、開口部の断面積が減少することによ

り抑制される。

③：本実験での流れは密度流が卓越しているために、海水交換に及ぼす要因は、密度流による鉛直循環流の効果が最も大きく、ついで、潮汐残差流による水平循環流効果、潮流乱れによる拡散効果の順であった。

④：内湾域の海水交換を論じる際には、対象海域の海洋構造をよく把握する必要がある。例えば、対象海域が上下によく混合されているならば均一流体による実験が、また密度流が卓越している海域であれば、密度差による鉛直循環流を考慮に入れた実験が必要である。

また、数値シミュレーションの結果に関しては、水理模型実験の結果と比較しながら述べると、

⑤：数値シミュレーションにおいては、計算結果の潮汐残差流の大きさが小さいこと、また係数として与える拡散係数、あるいは数値拡散の海水交換へ及ぼす影響の大きいことなどから、水平循環流による海水交換への寄与が小さく算定される。このため、水理模型実験とは異なる結果となった。

その他として、

⑥：湾内水の平均濃度の低減曲線から、閉鎖域の海水交換のメカニズムが、内湾域での交換、外海域での交換、及び外海域から系外へ出て行くという図式で説明できた。

本研究において、かなり極端な状態の初期条件の下での海水交換の水理模型実験を実施した。これは、水理模型実験において、密度流を精度良く再現することが非常に難しかったことによる。しかし、密度流の物質拡散、および海水交換に及ぼす効果の重要性から鑑みて、今後も海水等を用いた研究は進められなければならないと考えられる。また、数値シミュレーションにおいても、さらに3次元的现象を考慮したモデルの開発を行い、密度流による鉛直循環流、潮汐残差流による水平循環流の効果を正しく見積る必要があるものと思われる。

最後に、本研究において用いた須崎港の水理模型は、運輸省第三港湾建設局高知港工事々務所の委託で製作されたものである。これらの関係各氏に深く感謝致します。

(1988年3月31日受付)

参考文献

- 1) Parker, D. S., D. P. Norris and A. W. Nelson : Tidal exchange at Golden Gate, *Proc. of ASCE*, Vol. 98, No. SA2, pp. 305-323, 1972.
- 2) 松本輝寿・金子安雄・寺尾 健・川島 毅：海水交換に関する現地観測，第21回海岸工学講演会論文集，土木学会，pp. 291~296，1974.
- 3) 藤森研一・稲富隆昌：伊勢湾水理模型実験と現地調査（第2報）— 伊勢湾の海水交換について —，第23回海岸工学講演会論文集，土木学会，pp. 518~523，1976.
- 4) 堀江 毅・村上和男・亀山 豊・入尾野幸雄：東京湾の海水交換に関する水理模型実験，港湾技術研究所報告，第16巻，第3号，pp. 69~99，1977.
- 5) Bolin, B. and H. Rodhe : A note on the concepts of age distribution and transit time in natural reservoirs, *Tellus*, Vol. 25, pp. 58~63, 1973.
- 6) Takeoka, H. : Fundamental concepts of exchange and transport time scales in a coastal sea, *Continental Shelf Research*, Vol. 3, No. 3, pp. 311~326, 1984.
- 7) Fischer, H. B. : Mass transport mechanisms in partially stratified estuaries, *Jour. of Fluid Mechanics*, Vol. 53, No. 4, pp. 671~687, 1972.
- 8) 宇野木早苗：海水交換とその素過程について，沿岸海洋研究ノート，第17巻，第2号，pp. 89~98，1980.
- 9) 村上和男・森川雅行：沿岸域の潮流について，昭和58年度港湾技術研究所講演会講演集，pp. 27~70，1983.
- 10) 長島秀樹・岡崎守良：冬季における東京湾の流況と海況，沿岸海洋研究ノート，第16巻，第2号，pp. 76~86，1979.
- 11) 村上和男・森川雅行・白井正生・佐藤英治：強制循環流による海水交換促進の水理模型実験 — 鹿児島湾模型による検討 —，港湾技研資料，No. 544, 31p., 1986.
- 12) 山田紀男：東京湾の潮流，水路要報，水路100年記念号，海上保安庁，pp. 85~90，1971.
- 13) 金子安雄・堀江 毅・村上和男・上野信行・久保正則：大阪湾の潮流と物質拡散に関する模型実験，港湾技術研究所報告，第12巻，第3号，pp. 101~201，1973.
- 14) 樋口明生・柳 哲雄・柏井 誠：潮流による拡散の水理模型実験について(V)，京大防災研年報，第16号B，pp. 619~629，1973.
- 15) 上嶋英機・早川典生・湯浅一郎・橋本英資・山崎宗広：瀬戸内海大型水理模型による染料拡散実験技術について，中国工業技術試験所報告13，pp. 49~78，1981.
- 16) O'Connell, R. L., C. M. Walter : Hydraulic model tests of estuarial waste dispersion, *Proc. of ASCE*, Vol. 89, SA1, pp. 51~65, 1963.
- 17) 須賀堯三・高橋 晃：塩水くさびに関する大型水路実験による二・三の考察，土木学会年次学術講演，第II部，pp. 470~471，1975.

- 18) 柏村正和・吉田静男：河口を出る淡水の流れ，第13回海岸工学講演会講演集，土木学会，pp. 268~271，1966．
- 19) Stroband, H. J. and N. J. van Wijngaarden : Modeling of the Oosterschelde Estuary by a hydraulic model and a mathematical model, *Proc. of 17th IAHR Congress, Baden-Baden*, A-109, pp. 271~278, 1977.
- 20) 藤原建紀・石川雅紀・熊谷幹郎・西村 肇・早川典生：密度成層をとりいれた大阪湾恒流の水理模型実験，中国工業技術試験所報告14，pp. 31~47，1981．
- 21) 運輸省第五港湾建設局設計室，伊勢湾海水成層分析調査 — 密度成層実験調査(2) —，伊勢湾水理模型実験場報告，No. 22，1985．
- 22) 中野拓治・岩上淳一・溝内俊一・入尾野幸雄：名瀬港における潮流実験 — 防波堤計画の比較検討 —，第29回海岸工学講演会論文集，土木学会，pp. 629~632，1982．
- 23) Harleman, D. R. F. : Physical hydraulic models, *Estuarine Modelling: An Assessment, Water Pollution Control Research Series*, 16070, EPA, pp. 215~254, 1971
- 24) 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)，京大防災研年報，第11号B，pp. 447~461，1968．
- 25) Fischer, H. B., and E. R. Holley : Analysis of the use of distorted hydraulic models for dispersion studies, *Water Resources Research*, Vol. 7, pp. 46~51, 1971.
- 26) Elder, J. W. : The dispersion of marked fluid in turbulent shear flow, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 5, pp. 544~560, 1959.
- 27) 和田 明・加藤正進・片野尚明：潮流水理模型による拡散予測(その2)，第20回海岸工学講演会論文集，土木学会，pp. 215~220，1973．
- 28) 文献(19)に同じ
- 29) 第三港湾建設局高知港工事事務所：昭和58年度須崎港水質底質等調査結果の概要(資料編)，1984．
- 30) 海上保安庁，日本沿岸潮汐調和定数表，書誌第742号，p. 113，昭和58年12月．
- 31) 高山知司・平石哲也：須崎港における津波に関する水理模型実験，港湾技研資料，No. 549，131p，1986．
- 32) Tee, K. T. : Tide-induced residual current, a 2-D nonlinear numerical tidal model, *Journal of Marine Research*, Vol. 34, pp. 603~628, 1976.
- 33) 樋口明生：潮流水理模型実験における世界の動向，中国工業技術，No. 2, pp. 3~20, 1974.
- 34) 永田 豊・北村佳照・道田 豊・福森一郎：回転水槽による温排水の拡がり方に対する地球自転効果の研究，第30回海岸工学講演会論文集，土木学会，pp. 531~535，1983．
- 35) 花村哲也・H. B. Fischer：拡散水理模型実験におけるひずみ模型効果，第2回環境問題シンポジウム，土木学会，1974．
- 36) 参考文献(13)に同じ
- 37) 宝田盛康：潮流流数值計算における水平渦動粘性係数の役割，中国工業技術試験所報告，No. 12，pp. 121~135，1980．
- 38) 堀江 毅・金子安雄・村上和男：潮流の数値シミュレーションについて — 特に境界条件と支配因子の取扱い —，昭和50年度港湾技術研究所講演会講演集，pp. 53~90，1975．
- 39) Rodi, W., R. N. Pavlovic', and S. K. Srivatsa : Prediction of flow and pollutant spreading in rivers, *Transport Models for Inland and Coastal Waters*, Academic Press, pp. 63~111, 1981.

港湾技研資料 No. 625

1988・6

編集兼発行人 運輸省港湾技術研究所

発行所 運輸省港湾技術研究所
横須賀市長瀬3丁目1番1号

印刷所 株式会社 東京プリント

Published by the Port and Harbour Research Institute
Nagase, Yokosuka, Japan.