

運輸省港湾技術研究所

港湾技術研究所 報告

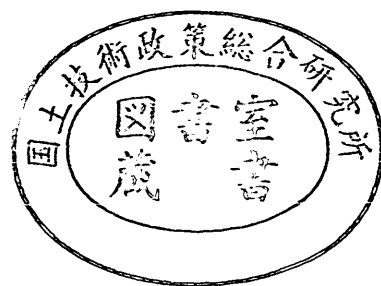
REPORT OF
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH
INSTITUTE
MINISTRY OF TRANSPORT

VOL. 16

NO. 3

SEPT. 1977

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN



港湾技術研究所報告 (REPORT OF R.H.R.I.)

第16巻 第3号 (Vol. 16, No. 3), 1977年9月 (Sept. 1977)

目 次 (CONTENTS)

1. Diffraction of Sea Waves by Rigid or Cushion Type Breakwaters
.....Tomotsuka TAKAYAMA, Yutaka KAMIYAMA..... 3
2. ドルフィン上部工に作用する水平波力
..... 谷本勝利・高橋重雄・轟 正彦・和泉田芳和..... 39
(Horizontal Wave Forces on a Rigid Platform
.....Katsutoshi TANIMOTO Shigeo TAKAHASHI, Masahiko TODOROKI,
Yoshikazu IZUMIDA)
3. 東京湾の海水交換に関する水理模型実験
..... 堀江 毅・村上和男・亀山 豊・入尾野幸雄..... 69
(Model Experiment on Tidal Exchange Ratio in Tokyo Bay
...Takeshi HORIE, Kazuo MURAKAMI, Yutaka KAMEYAMA, Sachio IRIONO)
4. 待ち合せ理論による最適バース数の決定に関する研究
..... 奥山育英・口田 登.....101
(Determination of Optimum Number of Berths Applying Queuing Theory
.....Yasuhide OKUYAMA, Noboru KUCHIDA)

3. 東京湾の海水交換に関する水理模型実験

堀江 毅*・村上和男**・亀山 豊**・入尾野幸雄**

要 旨

海水交換率——主として潮汐作用による湾内水と外海水との交換率——に関して従来いくつかの研究が発表されているが、これらのモデルにおける海水交換率の定義、すなわち、どの水塊とどの水塊との交換を意味しているのかは必ずしも同一でない。このため、これらの関係を明らかにすると共に、東京湾の水理模型（水平縮尺1/2000、鉛直縮尺1/100）を用いて、湾口部での湾内水と外海水との海水交換率の算定に適用し検討した。

本実験の結果、東京湾は観音崎側で流出が卓越し、富津側で流入が卓越するパターンがみられ、この循環が海水交換に大きく貢献していることがわかった。

海水交換率のモデルとして、連水らの方法及び Parker らの方法を用いた結果、東京湾の湾口部（富津——観音崎）での海水交換率は、大潮時のケースで数%程度であった。

また、ボックスモデルによる隣接ボックス間の交換率は他の方法によるよりも大きく見積られることが明らかになった。

* 海洋水理部 海水浄化研究室長

** 海洋水理部 海水汚染水理研究室

3. Model Experiments on Tidal Exchange Ratio in Tokyo Bay

Takeshi HORIE*

Kazuo MURAKAMI**

Yutaka KAMEYAMA**

Sachio IRIONO**

Synopsis

This paper describes the experimental investigation of tidal exchange ratio by use of Tokyo Bay model.

There are several definitions of tidal exchange ratio. These are different from model to model respectively. The differences among them are explained by use of the figure.

From the experiments, patterns of tidal current of Tokyo Bay are characterized that the outflow is predominant in the Kannonzaki side of the bay entrance section, on the other hand, the inflow is predominant in the Futtsu side of same section. The circulation due to tidal current promotes the exchange of bay and ocean water.

The methods employed in this investigation on tidal exchange are Hayami's model and Parker's model. As a consequence, it is estimated that the tidal exchange ratio at entrance section (Kannonzaki to Futtsu) of Tokyo Bay is several percent or so.

Exchange ratio of Box model is overestimated than other models.

*Chief of the Purification Hydraulics Laboratory, Marine Hydrodynamics Division

**Member of the Marine Diffusion Laboratory, Marine Hydrodynamics Division

目 次

要 旨	69
1. ま え が き	73
2. 海水交換に関する従来の研究	73
3. 東京湾水理模型による海水交換実験	77
3.1 実験施設及び実験装置	78
3.2 実験方法	78
4. 東京湾湾口流速及び湾内染料濃度測定結果	80
4.1 湾口（富津—観音崎）断面流速	81
4.2 湾口（富津—観音崎）断面染料濃度	83
4.3 東京湾内染料濃度平面分布	86
5. 海水交換率の算定	90
5.1 Parker et al のモデルによる交換率	90
5.2 速水らのモデルによる交換率	91
5.3 ボックスモデルによる交換率	93
6. ま と め	96
7. あとがき	98
参考文献	98

1. まえがき

1960年代から70年代にかけての我国の急速な経済の発展により、国民の生活水準は向上したが、各地で公害の発生という副産物が残された。中でも生活環境の破壊、特に水質環境の悪化は深刻な問題であり、安定経済へと軌道修正した後にも依然として大きな社会問題となっている。これらの問題を解決するためには、汚染源からの廃水規制を行うことが先決であることは言うまでもないが、水質汚濁の機構——特に、汚濁物質の拡散、希釈作用、海水の自浄作用——を解明することも重要な解決方法のひとつである。

東京湾のような内湾では、外海との接触が極端に狭められた湾口部に限定されているために、外海水と湾内水との交換が非常に悪いこと、さらに背後地に京浜、京葉の大都市を控えているために、工業廃水、家庭下水等が他の海域に比べて圧倒的に多いという悪条件も重なって、同湾内の水質は悪化の一途をたどっている。

このような閉鎖的内湾についての汚染問題は、東京湾のみに限らず、大阪湾、伊勢湾、瀬戸内海、又外国ではサンフランシスコ湾等でも取り上げられ、それらの湾口部での海水交換の問題が研究されている。

本報告は、これら各種の海水交換の考え方を明確にしつつ、東京湾水理模型による実験データから、Parkerらのモデル、速水らのモデル、並びにボックスモデルによる海水交換率を算定し、東京湾口における実測データ⁶⁾とも比較して、水理模型実験による海水交換率の求め方、実験に際しての問題点、ならびにこれらの算定法についての限界などについて記述するものである。

2. 海水交換に関する従来の研究

海水交換に関する問題は過去において、数多くの研究者により取り扱われているが、これらの研究者における海水交換率の定義は、必ずしも同じものとは限らない。

速水⁷⁾は、明石海峡で、大阪湾と播磨灘の海水がどの程度混合しているかの割合を調べるため、H. Stommel⁸⁾による混合距離の概念を潮流による水平混合の拡散現象として取り扱えるという考えに基づいて解析している。このモデルは、塩素量 Cl_1, Cl_0 なる二つの水塊が最初 ($t \leq 0$) ひとつの鉛直境界面で互いに接触しており、それが突然潮流によって混合する場合を考えている。時刻 t 後の塩素量の分布は、一次元の拡散方程式から式(1)のように表わすことができる。

$$Cl = \frac{Cl_0 + Cl_1}{2} + \frac{Cl_1 - Cl_0}{2} \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{A_x t}}\right) \dots\dots(1)$$

ここで、 Cl : 塩分濃度、 Cl_0, Cl_1 : それぞれの水塊の初期濃度、 A_x : 拡散係数、 x : 境界面からの距離、 t : 混合を始めてからの時間、 erf : 誤差関数を示す。ここで、観測した時間は平均において $t = T$ (潮流の半周期) とし、また観測された塩素量の時間変化を式(2)によって空間分布に置きかえている。

$$x = x_0 + \int_{t_0}^t u_{\max} \sin\left(\frac{t-t_0}{T}\right) dt \dots\dots(2)$$

ここに、 x は地点 x_0 で t なる時刻に観測された海水が、 t の直前の転流時刻 t_0 に存在した位置を表わし、 u_{\max} は潮流の最大流速である。この塩分濃度と位置の関係を、最も適切な誤差関数で近似することにより (図-1参照)、拡散係数 A_x を求めている。また、拡散係数は混合距離の理論から式(3)のように表わすことができる。

$$A_x = \alpha u l \dots\dots(3)$$

ここで、 α : 交換率、 u : 潮流の平均流速、 l : 混合距離 (潮流によって一方向に流れる流動距離) である。このようにして、明石海峡での交換率は10%前後であるという結果を得ている。しかし、この思考模型において、時間 t を潮流の半周期にとることには疑問が残る。この点に関して、柏井⁹⁾ は α は交換率を表わすものでないと指摘している。しかしながら、速水らのモデルは気体分子運動の拡散過程に基づく移流項のない一次元拡散方程式を解いていることから、これもひとつの拡散混合のモデルと考えてよい。このモデルでは6時間毎に初期状態の矩形分布の仮定をしていること、すなわち時間 t を潮流の周期の半分にとることに問題があるのであって、このモデルで示されている α は、ある意味での交換率を示すものであると考えてよい。

さらに、速水、宇野木⁴⁾ は瀬戸内海全域の海水の交流と物質の移動を一次元の定常モデルによって解析している。この方法は、瀬戸内海を図-2のように分割し、対象として塩素量を取り上げ瀬戸内海全域で塩素量分布を測

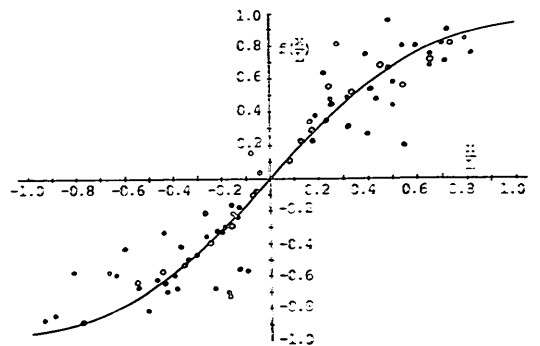


図-1 明石海峡の塩素量分布 (速水他⁴⁾)

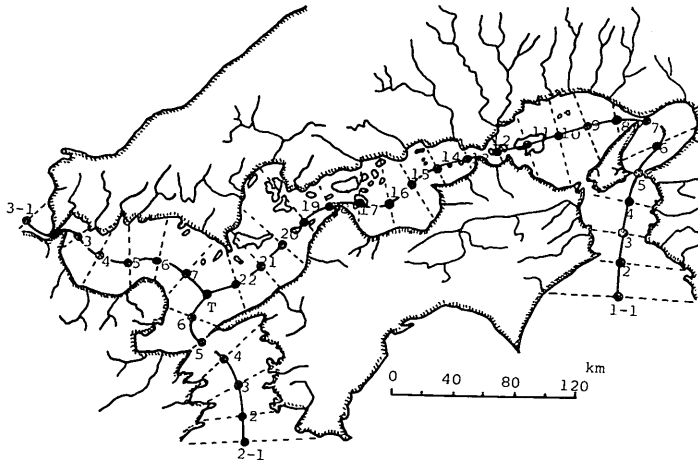


図-2 瀬戸内海の複合内海モデルと断面の座標 (速水・宇野木⁴⁾)

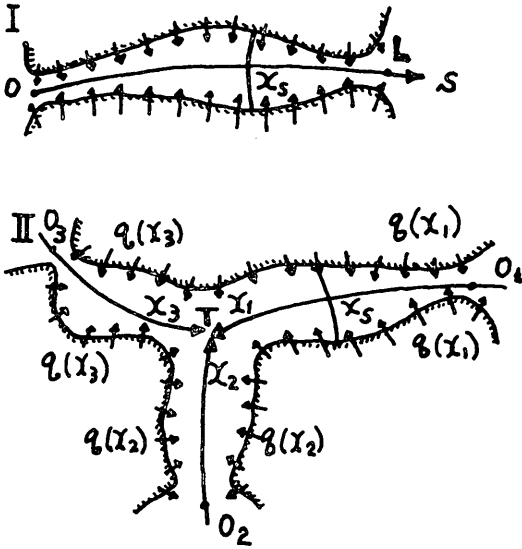


図-3 瀬戸内海に関するモデル：I. 単一内海，
II. 複合内海 (速水・宇野木⁴⁾)

定する。次に河川水、降雨、蒸発等の淡水量の増減と、豊後水道及び紀伊水道からの流入流出を考慮した一次元定常の拡散方程式を解き、パラメータを変化させて、実際の塩素量分布にあわせる。図-3に示すような細長い内海の軸に沿ってx軸をとり、内海の長さL、保存性の物質濃度を $C(x)$ 、断面積 $A(x)$ 、拡散係数 $K(x)$ とする。また $x=0$ から単位時間に流入する海水の量 Q_0 、内海の軸の単位長さ 単位時間に供給される淡水量を $q(x)$ 、放出物質の質量を $m(x)$ とする。このとき任意の断面を通る流量及び、物質に関する連続の式は、式(4)、式(5)で表わされる。

$$W(x) = Q_0 + \int_0^x q(\xi) d\xi \quad \dots\dots(4)$$

$$\frac{d}{dx} \left[AK \frac{dc}{dx} - WC \right] = -\frac{m}{\rho} \quad \dots\dots(5)$$

この式を境界条件 $C_{x=0} = C_0$ 、 $C_{x=L} = C_L$ で解き、

$$C(x) = e^{\int_0^x E d\xi} \left\{ C_0 \int_x^L \frac{1}{AK} e^{-\int_0^\eta E d\xi} d\eta + C_L e^{-\int_0^L E d\xi} \int_0^x \frac{1}{AK} e^{-\int_0^\eta E d\xi} d\eta - \int_0^L \frac{1}{AK} e^{-\int_0^\eta E d\xi} d\eta \cdot \int_0^x \frac{M}{AK} e^{-\int_0^\eta E d\xi} d\eta + \int_0^x \frac{1}{AK} e^{-\int_0^\eta E d\xi} d\eta \cdot \int_0^L \frac{M}{AK} e^{-\int_0^\eta E d\xi} d\eta \right\} \int_0^L \frac{1}{AK} e^{-\int_0^\eta E d\xi} d\eta \quad \dots\dots(6)$$

を得ている。ここで、 $E(x) = W/AK$ 、 $M(x) = \int_0^x (m/\rho) d\xi$ である。これらの式を用いて拡散係数 K 及び流入海水量 Q_0 を変化させながら測定した塩素量分布に合わせると、淡水供給量としては合計 $2.5 \times 10^{10} \text{ m}^3/\text{年}$ 、海水流入量としては $7 \times 10^{10} \text{ m}^3/\text{年}$ 、拡散係数は $10^7 \text{ cm}^2/\text{sec}$ とした時に最も実際の分布と一致しているという結果を得ている。

この方法は時間的及び空間的にスケールの大きな問題を論ずるのに適している。ここでは比較的安定な塩素量を取扱っているが、ここで得られた値を用いて非保存的な有機汚染 (例えば COD) の分布等の計算にも利用できる。

一方、Parker et al⁵⁾ は、アメリカのサンフランシスコ湾の Golden Gate での海水交換を開口部の塩分の現地観測から求めている。ここで用いられたモデルは、上

げ潮時に湾内に流入する海水の中に含まれる外海水の割合を求めるものである。すなわち、上げ潮時に湾内に流入する水はその前の下げ潮時に流出した水と新しい外海水が含まれている。この外海水は下げ潮時に流出した水と交換したものであり、外海水と上げ潮時に流入する水の割合を海水交換率 (tidal exchange ratio) と定義するものである。すなわち、上げ潮時に湾内に流入する流量 Q_F 、塩分濃度 C_F は、この前の下げ潮時に流出した湾内水が再び湾内に戻る水 (流量 Q_E 、塩分濃度 C_E) と外海から新しく湾内に入る水 (流量 Q_0 、塩分濃度 C_0) との和であると考えられ、式(7)、式(8)で与えられる。

$$\sum_{i=1}^n Q_{F_i} C_{F_i} \Delta T = \sum_{i=1}^n Q_{E_i} C_{E_i} \Delta T + \sum_{i=1}^n Q_{0i} C_{0i} \Delta T \quad \dots(7)$$

$$Q_{F_i} = Q_{E_i} + Q_{0i} \quad \dots(8)$$

海水交換率は式(9)で定義される。

$$r_i = Q_{0i} / Q_{F_i} \quad \dots(9)$$

ここで、 r_i が海水交換率 (tidal exchange ratio) である。式(8)、式(9)を式(7)に代入すると式(10)となる。

$$\sum_{i=1}^n Q_{F_i} C_{F_i} \Delta T = \sum_{i=1}^n (1-r_i) C_{E_i} Q_{F_i} \Delta T + \sum_{i=1}^n r_i Q_{F_i} C_0 \Delta T \quad \dots(10)$$

ここで、上げ潮時及び下げ潮時の平均濃度を式(11)、式(12)で表わすと、1 潮汐間の海水交換率 \bar{r} は式(13)によって表わすことができる。

$$\bar{C}_E = \frac{\sum_{j=1}^m Q_{E_j} C_{E_j} \Delta T}{\sum_{j=1}^m Q_{E_j} \Delta T} \quad \dots(11)$$

$$\bar{C}_F = \frac{\sum_{j=1}^m Q_{F_j} C_{F_j} \Delta T}{\sum_{j=1}^m Q_{F_j} \Delta T} \quad \dots(12)$$

$$\bar{r} = \frac{\bar{C}_F - \bar{C}_E}{C_0 - C_E} \quad \dots(13)$$

式(11)の Q_{E_j} 、 C_{E_j} はそれぞれその前の下げ潮時に湾外に出ていく湾内水の流量及び塩分濃度である。これらの関係式を用いて、Parker らはサンフランシスコ湾の Golden Gate で4点の観測点を設けて塩分濃度を測定し、流量については、潮位観測値から従来の潮流データを用いて海水交換率を求める。その結果、交換率は潮位差の大きい時は31~36%、小さい時は17~18%とかなり高い交換率を得ており、また潮位差に比例するという結果を得ている。

この Parker らの海水交換のモデルを東京湾⁶⁾、伊勢湾⁷⁾に適用し、塩分濃度、断面流速の測定から、各々の湾口での海水交換率を求めた例がある。これらの二つの調査方法は太筋において Parker の方法に準じているが、測定方法、データの整理方法等の細部において若干の相異がみられる。

東京湾の現地観測は Parker らの方法をほぼそのまま踏襲している。図-4に示すように観音崎と富津岬を結ぶ断面で流速と塩素量の測定を行っている。測定断面は図-5に示す如くかなり細かい区画に分割している。Parker の方法に比べると流速の測定 (小野式流速計) を塩分濃度と同時測定をしていること、測定が水深方向にも行なわれていることが測定方法で相異なる点で、複雑な東京

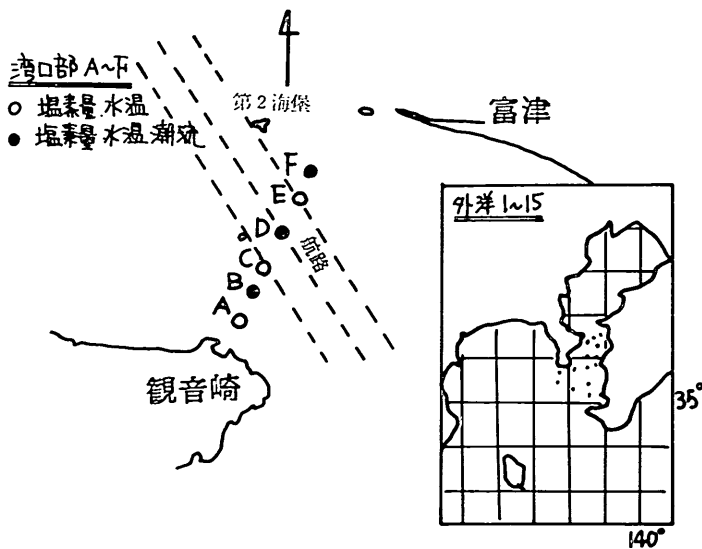


図-4 東京湾の海水交換の現地観測 (松本他⁶⁾)

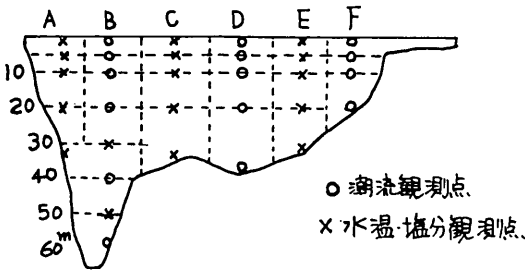


図-5 東京湾口の測定断面 (松本他⁶⁾)

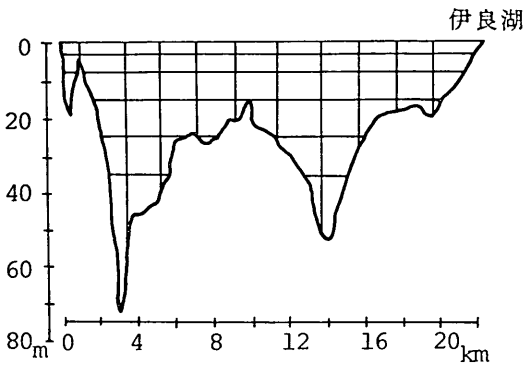


図-7 伊勢湾口の測定断面 (藤森他⁷⁾)

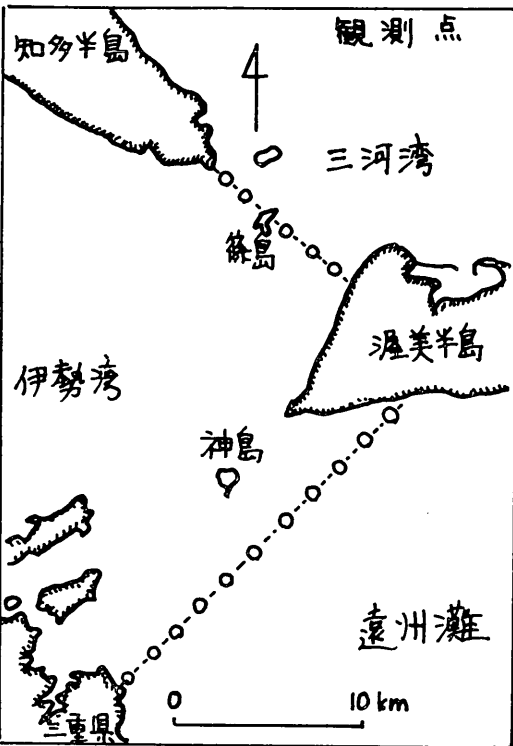


図-6 伊勢湾の海水交換の現地観測 (藤森他⁷⁾)

湾の湾口での海況がかなり詳細に調べられている。この調査⁶⁾によると、恒流については、“その変化は激しいが平均的傾向として観音崎から中央部にかけての表層から流出し、観音崎から中央部にかけての底層および富津側から流入している”としている。また海水の交換率は観音崎側で大きく、富津側で小さい値を得ており、平均的には8~10%の交換率を得ている。

伊勢湾の現地調査についてもやはり Parker の方法を用い、湾口部で流速測定と塩分濃度の測定を行っている。図-6はその調査地点である。図-7に示すように50余りのブロックに分割し、各々のブロックでの交換率を求

め、これを式(14)によって上げ潮時の流入量による重み付き平均操作により湾口断面全体の海水交換率として5~15%の値を得ている。

$$\bar{r} = \frac{\sum_i Q_{Fi} r_i}{\sum_i Q_{Fi}} \quad \dots\dots(14)$$

このモデルには 1) 各ブロックを通過する湾内水は各ブロックの前面の外海水と交換する。2) 各ブロックの海水交換率が負ということは流入する海水が全て以前に流出した湾内水とする ($r_i=0$)。という二つの仮定を設定している。しかしながらこの仮定は、湾口部のような流れが複雑な領域では当てはまらないと思われる。

柏井⁸⁾は、Parker らの海水交換率の定義の拡張を行って、外海水と湾内水とが直接交換していると考えた交換率 r_G を提案している。上げ潮による流入量のうち、始めて湾内に流入する外海水のしめる割合、下げ潮による流出量のうち始めて湾外に流出する湾内水のしめる割合をそれぞれ r_E 、 r_F で表わすと式(15)、(16)になる。

$$r_E = \frac{C_F - C_E}{C_0 - C_E} \quad \dots\dots(15)$$

$$r_F = \frac{C_F - C_E}{C_F - C_B} \quad \dots\dots(16)$$

ここで C_F : 上げ潮時に流入する水塊の平均濃度、 C_E : 下げ潮時に流出する水塊の平均濃度、 C_0 : 外海水の濃度、 C_B : 湾内水の濃度を示す。さらにここで、湾内水と外海水との交換を考えると交換率は式(17)によって表わすことができる。

$$r_G = \frac{C_F - C_E}{C_0 - C_B} = \frac{r_E r_F}{r_E + r_F - r_E r_F} \quad \dots\dots(17)$$

すなわち、下げ潮時に湾内に流出する水塊 (Q_F) は、湾内水 (Q_1) と外海水 (Q_2) の混合したものであり、流出水塊と外海水の交換を意味する Parker らのモデルは、これに含まれる湾内水と外海水の交換 (Q) だけでなく、外海水と外海水の交換 (Q_2) をも同時に含むものと考え

られる。従って、下げ潮時に湾外に流出する水塊 (Q_E)、及び次の上げ潮時に湾内に流入する水塊 (Q_F) は式(18)によりつぎのように表わされる。

$$\left. \begin{aligned} Q_E &= Q_1 + Q_2 \\ C_E Q_E &= C_B Q_1 + C_0 Q_2 \\ Q_F &= (Q_1 - Q'_1) + (Q_2 - Q'_2) + (Q'_1 + Q'_2) \dots (18) \\ C_F Q_F &= C_B(Q_1 - Q'_1) + C_0(Q_2 - Q'_2) \\ &\quad + C_0(Q'_1 + Q'_2) \end{aligned} \right\}$$

しかしながら、外海水と外海水の交換 (Q'_i) は水質の点からは意味のないものである。従って、潮汐流によって外海水と交換される湾内水の量 (Q_i) は、Parker らのモデルでの交換量 ($Q_0 = Q'_1 + Q'_2$) とは異なり、その交換率は $r_0 = Q_i / Q_F$ で定義される。式(18)より、流出水塊 (Q_E) 流入水塊 (Q_F) 中に含まれる湾内水の割合は

$$\left. \begin{aligned} \frac{Q_1}{Q_E} &= \frac{C_E - C_0}{C_B - C_0} \\ \frac{Q_1 - Q'_1}{Q_F} &= \frac{C_F - C_0}{C_B - C_0} \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (19)$$

で表わされることから、式(19)及び $Q_E = Q_F$ を用いて、柏井のいう交換率 ($r_0 = Q_i / Q_F$) は式(19)によって表わされることがわかる。

式(19)からわかるように、湾内水と外海水の交換率は流出水と外海水との交換 r_E と流入水と湾内水との交換 r_F の両方の交換があって始めて交換するものである。従って汚れた湾内水と清浄な外海水の交換による湾内の水質の浄化を問題にするには、式(19)を用いることが最も適切であると考えられる。しかしながら、各汚染源からの水質が異なる場合には、湾内水の濃度 C_B を何にとるのかに問題点が残る。

以上のような現地の塩分濃度、潮流観測より海水交換を求める方法に対し、数値モデルや水理模型実験によっても、同様の考え方が適用できる。数値計算による水質予測は最近数多くなされている。代表的なものとして堀口の一連の研究⁹⁾があり、著者らも同様に計算機による水質予測の研究¹⁰⁾を行っている。この方法は、運動方程式と連続方程式とから流動計算を行い、この結果を用いて拡散計算を行うもので、潮汐周期が約12時間であるのに対してタイムステップが数秒から数分という細かい間隔で計算をしなくてはならず、労力も費用も莫大なものとなる。これに対し、細かい変動を捉えることは出来ないが、大略的な水質予測を行う手段としてボックスモデルによる方法が数多く提案されている。

宇野木¹¹⁾は伊勢湾を図-8のように4つのボックスに分割(伊勢湾、三河湾、湾口および外洋)し、次のようなモデルを組み立てている。

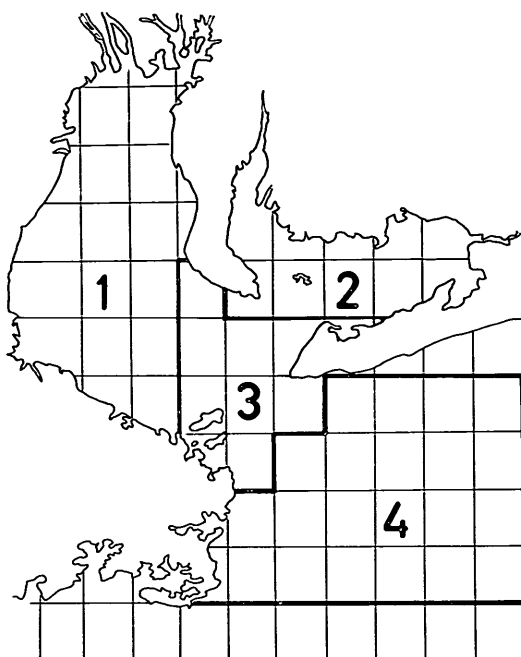


図-8 伊勢湾のボックスモデル (宇野木他¹¹⁾)

$$V_1 \frac{\partial Z_1}{\partial t} = Q_1 Z_{r1} - Q_1 Z_1 + A_1 K_1 \left(\frac{\partial Z}{\partial x} \right)_1 + H_1 \dots \dots \dots (20-1)$$

$$V_2 \frac{\partial Z_2}{\partial t} = Q_2 Z_{r2} - Q_2 Z_2 + A_2 K_2 \left(\frac{\partial Z}{\partial x} \right)_2 + H_2 \dots \dots \dots (20-2)$$

$$\begin{aligned} V_3 \frac{\partial Z_3}{\partial t} &= Q_1 Z_1 + Q_2 Z_2 + Q_3 Z_{r3} - (Q_1 + Q_2 + Q_3) Z_3 \\ &\quad - A_1 K_1 \left(\frac{\partial Z}{\partial x} \right)_1 - A_2 K_2 \left(\frac{\partial Z}{\partial x} \right)_2 \\ &\quad + A_3 K_3 \left(\frac{\partial Z}{\partial x} \right)_3 + H_3 \dots \dots \dots (20-3) \end{aligned}$$

ここで、 Z : 濃度、 Q : 供給される淡水量、 Z_r : 淡水濃度、 H : 負荷量、 A : 断面積、 V : ボックスの容積、 K : 水平方向の拡散係数、 $(\partial Z / \partial x)$: 法線方向の濃度勾配を示す。これらの符号のもつ意味は、考えている物理量(例えば濃度、温度)によって若干異なる。各ボックス毎の塩素量(あるいは水温)の月平均値を求め、また各ボックスの容積、面積、長さ、流量等の諸量を式(20-1)~式(20-3)に代入すると、計算により各断面での海水混合に関する水平拡散係数を求めることができる。この報告書では拡散係数は断面1, 2, 3ともに $10^3 \sim 10^7 \text{ cm}^2 / \text{sec}$ の範囲であったとしている。

3. 東京湾水理模型による海水交換実験

現況地形における海水交換率、又はその概観は、現地

の潮流や塩分濃度の観測から、先の各モデルを適用して求めることができる。ところが、湾内の埋立、浚渫、航路掘削などによる地形、水深の変化に伴う海水交換への影響を調べるためには、潮流や水質予測の場合と同様、数値モデルや水理模型実験によらなければならない。したがって、ここでは著者らが先に潮流及び汚染拡散の実験^{12),13)}に用いた東京湾模型を利用して、以下に述べる施設、手法にて実験を行い、海水交換に関する各モデルを検討すると共に、この種の問題に対する模型実験の可能性と問題点について考察を加える。

3.1 実験施設及び実験装置

図-9に東京湾模型の概観図を示す。模型はコンクリート及びモルタルにて製作されており、縦46.5 m、横29 mの範囲に東京湾の全部及び相模湾の一部を含んでいる。縮尺は水平縮尺 1/2,000、鉛直縮尺 1/100であり、20:1の歪模型である。水深は海図を基準にして定めているが、水深 100m 以上の領域に対しては水深を一定とし、

表-1 原型、模型の水理諸元

	縮 尺	原 型	模 型
水 平 距 離	1/2,000	50 km	25 m
水 深	1/100	100 m	1 m
潮 差	1/100	51.9 cm	0.52 cm
周 期	1/200	12時間25分	3分44秒
流 速	1/10	1m/sec	10 cm/sec
流 量	1/2×10 ⁶	10 m ³ /sec	5 cm ³ /sec
拡 散 係 数	1/2×10 ⁴	10 ⁶ cm ² /sec	50 cm ² /sec
粗 度 係 数	2.08/1	0.025	0.052

模型上で1 mの深さにしている。湾内の恒流に影響を及ぼしていると思われる主要河川として、鶴見川、多摩川、隅田川、江戸川(含放水路)、荒川(含放水路)、養老川、木櫃川の感潮水域(背水到達地点までの河段)までを模型上に再現した。

潮流のように重力が重要な要因である現象については、Froude の相似則が適用される。前述の縮尺にすると Froude の相似則から決定される模型の水理要素の縮率は表-1のようになる。

潮汐発生装置は、気圧式の起潮装置を用いている。これは、空気室(幅20 m、高さ3 m、奥行4 m)を模型端に設け、外部からブローにて送られる空気の入出力で、空気室の気圧を周期的に変動させることにより、模型内に潮汐を発生させる装置である。

3.2 実験方法

模型実験によって海水交換率を測定するためには、湾内水と外海水とを識別するトレーサーが必要である。現地観測では一般に塩素量を測定しているが、模型でもそれに対応するものを与える必要がある。ここでは次のような方法を用いた。まず東京湾を観音崎と富津岬を結ぶ線で遮蔽板によって湾内と湾外に分離する。次に、湾内側に染料を投入し一様濃度の湾内水を作る。各河川からも、この湾内水と同じ濃度で年平均流量に相当する流量を連続的に放流する。染料としては、比較的安定で吸着の少ないウラニウムを用いる。湾内水の濃度を約5 ppmに設定し、実験開始直前に湾口部断面に設置した遮蔽板を取除き、起潮装置の運転を開始する。同時に、各河川からの河川水(湾内水の濃度)の投入を開始する。このようにして、潮汐による海水混合現象を発生させた。

試料の採水は、東京湾模型全体から採水器による採水と、測定断面でのサイホンによる採水の両方について行った。前者については、湾内水の濃度の減少及び湾外水の濃度上昇から交換率を測定する方法で、図-10に示す採水点(約70点)での採水器による全点同時採水を10潮

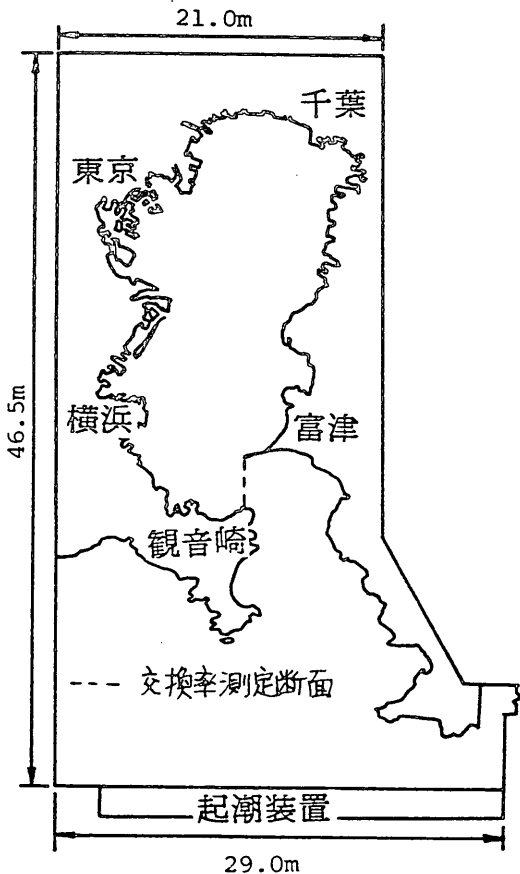


図-9 東京湾模型の概観図

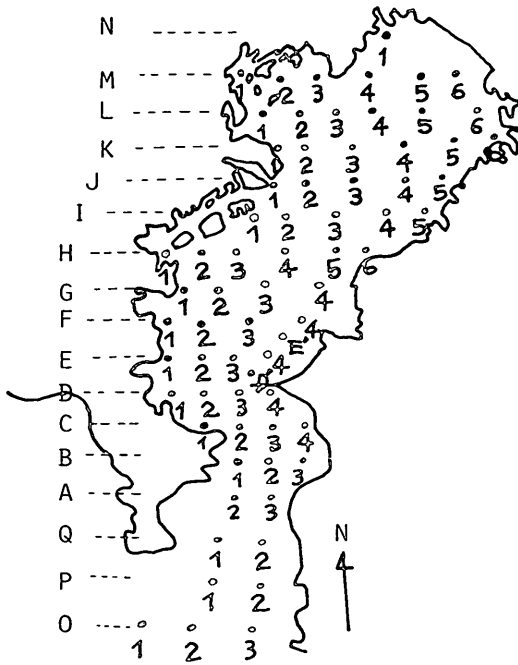


図-10 濃度測定点の位置及びその番号

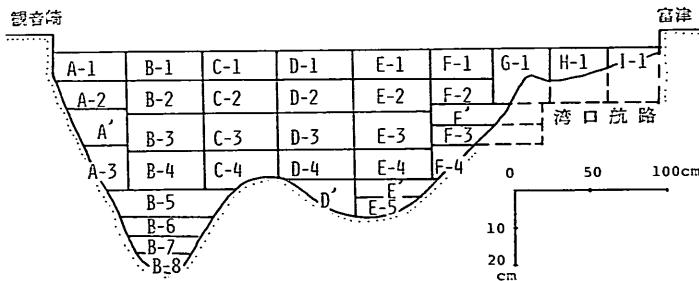


図-11 東京湾湾口部（富津—観音崎）の測定断面

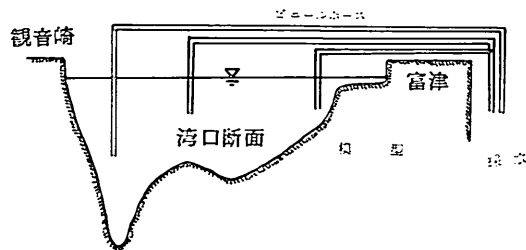


図-12 湾口部断面での採水方法（サイホン方式）

汐毎に50潮汐まで行った。

後者については、観音崎と富津岬を結ぶ断面を約30区画に分割して、各々の区画で16秒間隔で採水した。現在所有している採水器では、16秒という短い間隔での採水

が不可能なためにサイホン方式を利用した。図-11 に断面区画、図-12にサイホン方式による採水手順を示す。これは、内径8mmのビニールホースを用いて、一方の端を測定断面に、他方の端を採水の場所に置き、サイホンにより連続的に放流するもので、ビニールホースの長さは総て同じにし、またビニールの出口の高さを同一にして模型水面と出口との水頭差を同一にしている。模型の測定断面から採水口までの所要時間は35秒となることから、潮位振幅の周期から35秒間遅らせて30区画の断面の16秒間隔（1回の採水は2～3秒）の同時採水を行った。現実には、模型水面とビニールホースの出口との水頭差が一定であっても、ビニールホースの曲がり、内径の不ぞろいによる損失水頭の差が生じ、放出流量は一定とならない。従って、ビニールホースの容積 V と放出流量 q を測定し、 $t=V/q$ より遅れ時間を算定し、この遅れ時間による濃度補正を行い潮汐の周期との一致をはかった。この方法による採水を実験開始後20潮汐目の1～2潮汐間にわたって行った。

試料水の採水点と同じ断面で超音波流速計（電子工業社製）による流速測定を行った。図-13に超音波流速計の概観図及び記録器等の配置を示す。この流速計の原理は、180°方向に対向させた超音波振動子から超音波を発信させ、反対側の素子での受信までの時間の水流による位相差を検出して、これを電気的に変換して流速変化を求めるものである。ここで用いた超音波流速計はかなり遅い流速に対しても検出可能であるが、振動素子が約10mmの大きさを有しているために流れの方向によっては影響がある。また現在所有している流速計は超音波振動子の間隔が55mmであり、この間の平均流速を測定していることになる。

図-14は、超音波流速計の検定曲線である。0°及び90°の方向では、振動子の影響により検定カーブに歪が生じる。従って、流れの主流方向から45°の方向に流速計を傾けて設置することが望ましい。また流れの方向に従って、図-14により流速を補正する必要がある。

流速の測定は1～2潮汐間にわたって行った。各断面の流速を同時に測定することが困難であるために、流速計を移動しながら測定を行った。流速と潮位の位相関係を合わせるために、ペンレクタグラフ上の潮位記録を注視し、流速の測定開始時刻を浦賀水道での満潮位に合わせて行った。

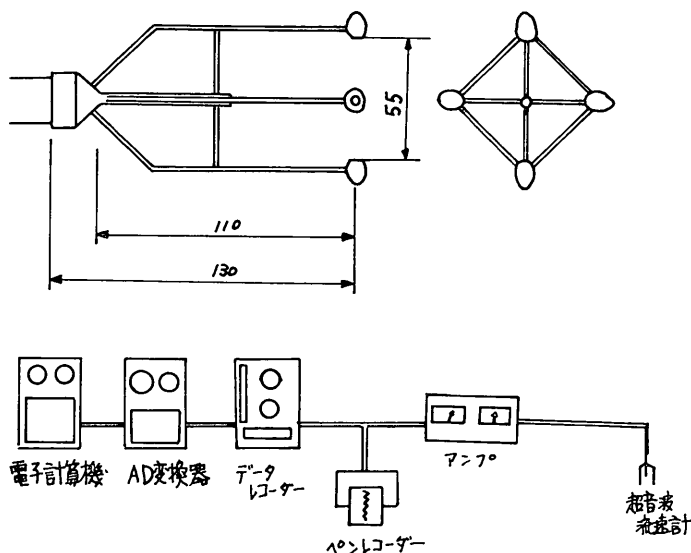


図-13 超音波流速計による流速測定

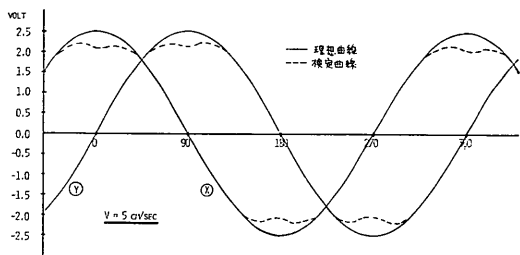


図-14 超音波流速計の検定曲線

4. 東京湾湾口流速及び湾内染料濃度測定結果

潮位と潮流の原型との再現性については、ほぼ満足で

表-2 東京湾沿岸の潮汐の調和定数値

	K_1		O_1		M_2		S_2	
	H (cm)	K (°)	H (cm)	K (°)	H (cm)	K (°)	H (cm)	K (°)
館山	22	161	18	156	36	147	18	174
布良	21.6	175.3	16.7	158.5	35.6	141.3	16.3	171.9
富津	25	178	18	158	45	149	21	180
千葉	26	182	19	161	51	155	25	186
東京	24.6	184.4	18.6	166.6	50.1	162.4	23.9	193.0
品川	22	182	19	164	49	159	23	191
横浜	24.9	179.7	19.3	160.2	46.7	155.2	22.7	185.1
横須賀	24.1	179.4	18.8	160.0	42.8	153.0	20.7	182.5
浦賀	24	176	20	163	38	151	18	178
城ヶ島	22	177	18	159	38	146	17	171

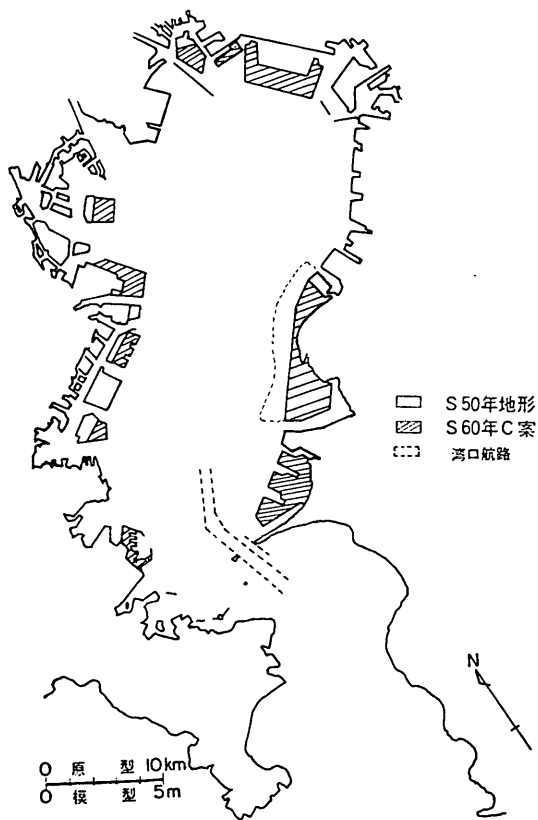


図-15 昭和60年計画地形及び湾口航路の予定地

きる結果を得ている¹²⁾。今回の実験も、前の報告に基づいて実験を行った。実験に用いた潮汐は大潮 (M_2+S_2) と小潮 (M_2-S_2) で、布良の潮汐調和定数値 (表-2) を起潮装置前で与えた。

実験ケースは次の3つのケースについて行った。Case 1: 現況地形, 大潮時, Case 2: 将来地形, 大潮時, 湾口航路の掘削, Case 3: 現況地形, 小潮時の3通りのケースである。図-15 に将来地形の計画図及び湾口航路の掘削について示す。

4.1 湾口 (富津—観音崎) 断面流速

超音波流速計により1~2潮汐間にわたって湾口部の断面で測定を行った。図-16 は観音崎側断面 (A-1), 湾口部中央の表層 (D-1), 底層 (D-4) 及び富津側断

面 (H-1) の Case 1 (現況大潮) の流速—時間曲線を示す。流出方向を正とする。この図より、湾口部中央の断面では流出時最大 10 cm/sec であり、流入時最大 9 cm/sec である。また観音崎側は流出が卓越し、富津側は流入が卓越しているのが明瞭にわかる。これらの結果は過去の観測例¹⁴⁾にみられる恒流パターン及び海水交換の現地観測の結果⁹⁾と一致している。このように断面によって流出量と流入量が大きく異なる現象は、上げ潮時には観音崎による反流域の発生、下げ潮時には富津岬による反流域の形成によるもので、地形性の潮汐残差流¹⁵⁾の影響であると考えられる。図-17 は各々の区画断面での1潮汐間での流入出量を示す。上に示す数字が流出流量、下に示すのが流入流量である。A断面 (観音崎寄り) では

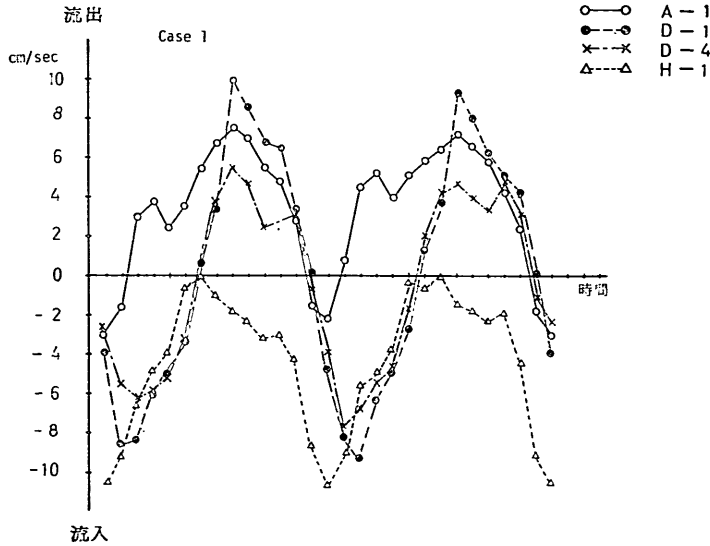


図-16 湾口 (富津—観音崎) 断面の流速測定, Case 1, 現況, 大潮

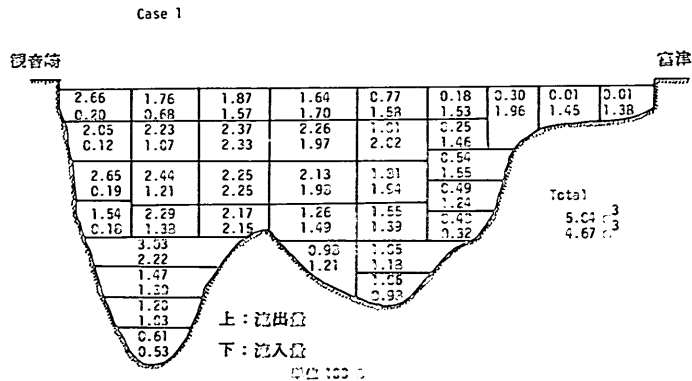


図-17 湾口の断面区画での一潮汐間の流入出量 Case 1, 現況, 大潮 (上: 流出量, 下: 流入量, 単位 100³)

流出量が流入量の10~20倍である。また逆にG~H断面（富津側）では流入量が流出量の10~100倍になっている。湾口部断面全体での流出量及び流入量はそれぞれ 5.04m^3 、 4.67m^3 である。この流入流出量の差が湾口部断面での恒流量になる訳であるが、実際にはこれに対応する現地の恒流量は存在せず、実験時の測定誤差によるものと思われる。また、流入流出量も湾内の水位上昇量から考えた容積（約 3.5m^3 ）に比べるとかなり大きい。これは、同じ時間にある断面では流出していても他の断面では流入している現象が存在していることを示している。

図-18にCase 2（将来、大潮、湾口航路有）の場合の流速-時間曲線を示す。図-19には各々の断面での1潮

汐間の流入流出量を示す。湾口航路の掘削は図-19の側断面図からもわかるように、幅1,800 m、深さ23 mの掘削である。この掘削により、湾口部の流れが促進され、湾口部での海水交換の増加が期待される。図-18より、観音崎から中央部にかけての断面では、現況時と比べて余り変化は見られず、上げ潮時の流速が多少小さくなっていく程度である。しかしながら、湾口航路掘削部の富津側で大きな変化がみられる。現況時にはほとんど流出しなかったこの断面で、最大 5cm/sec の流出速度が得られた。図-19の流入流出量でも観音崎側では流出量が流入量の20倍と、現況時のそれと比べて大きな変化はないが、富津側では流入量が流出量の約5倍（現況時は100

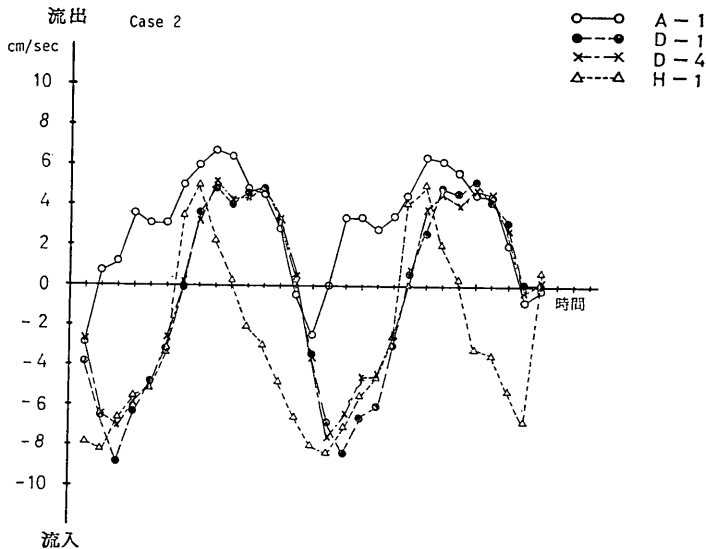


図-18 湾口（富津—観音崎）断面の流速測定，Case 2，60年C案，湾口航路掘削，大潮

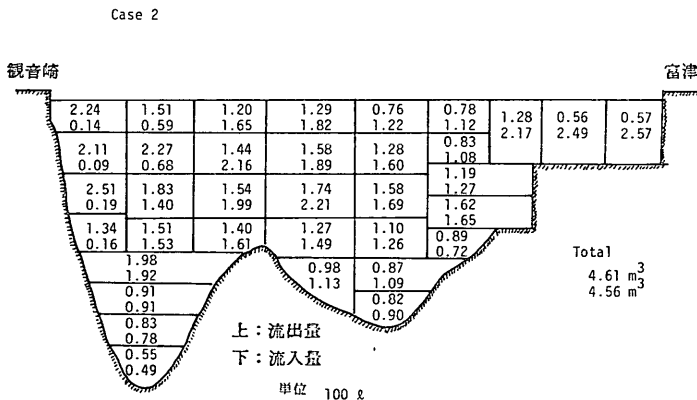


図-19 湾口の断面区画での一潮汐間の流入流出量，Case 2，60年C案，湾口航路掘削，大潮（上：流出量，下：流入量，単位 100 l ）

東京湾の海水交換に関する水理模型実験

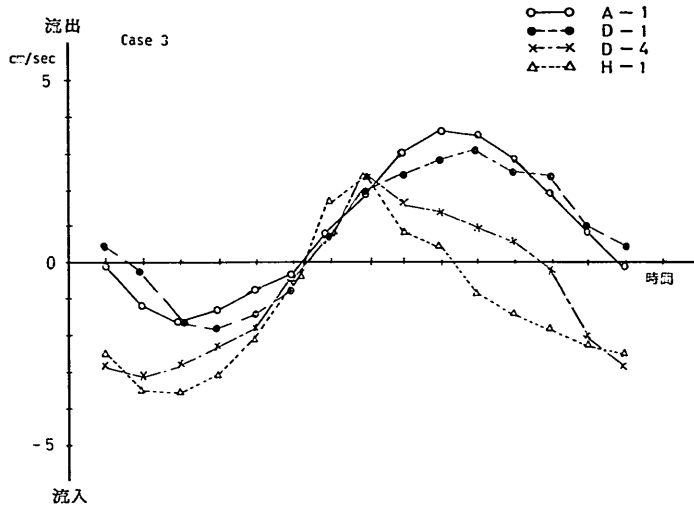


図-20 湾口(富津-観音崎)断面の流速測定, Case 3, 現況, 小潮

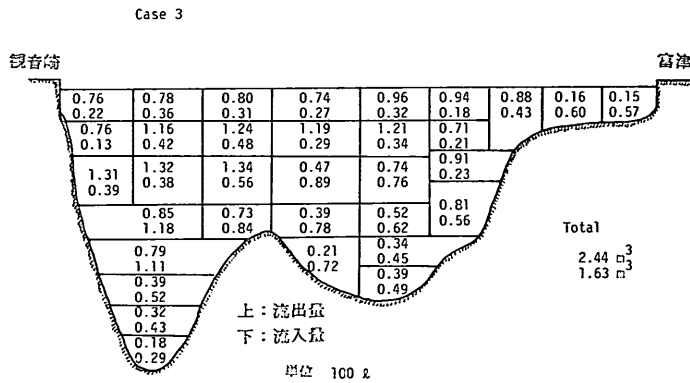


図-21 湾口の断面区画での一潮汐間の流入出量, Case 3, 現況, 小潮(上: 流出量, 下: 流入量, 単位 100L)

倍)となっている。観音崎側で流出, 富津側で流入という湾口部全体の傾向には大きな変化は認められない。

潮汐の大きさによる交換率の影響を調べる目的で小潮についての実験を行った。図-20, 図-21より, 小潮の場合は表層が流出, 底層が流入という傾向が著しいのがわかる。最大流速は上げ潮時で3.5 cm/sec, 下げ潮時で4.5 cm/secであった。また大潮時ほど極端ではないが, 観音崎側で流出, 富津側で流入が卓越しているのがわかる。このように上層で流出, 下層で流入という現象は, 現地では密度躍層の状態の時によく起こる現象であり, 模型上でも気温の高い日は比較的水深の浅い湾内水が暖められて, 密度流的な流れとなり上層で流出, 下層で流入という現象がよく観察される。若者らの経験¹⁰⁾では, 気温の高い夏季に行った実験は拡散速度が早くなる傾向

が認められた。これも, 水温差による対流現象の影響であろうと思われる。

4.2 湾口(富津-観音崎)断面染料濃度

流速測定と同じ断面で濃度の測定を行った。図-22(1)~(4)に Case 1 の濃度の経時変化図を示す。拡散実験はそれぞれ2回ずつ行った。1回目の測定結果を黒丸で, 2回目の結果を白丸で示す。また破線で示すのが同じ断面での流速の結果である。濃度は時間的に激しく変動しているが, 時間的には下げ潮時に上昇, 上げ潮時に低下するパターンがみられる。この傾向はD断面(湾口部中央)において明瞭にみられる。A断面及びH断面はそれぞれ上げ潮時及び下げ潮時の反流域の影響もあって, かなり複雑な流れとなっている。このため, 付近の濃度も変動しやすくなるものと思われる。またこれらの

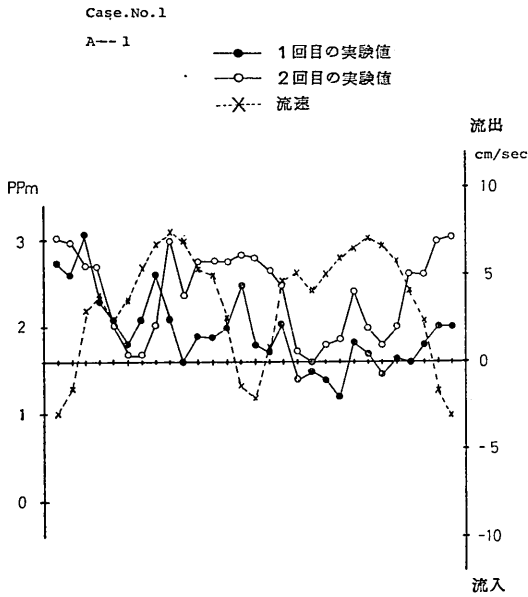


図-22 (1) 断面濃度の経時変化, A-1
(Case 1, 現況, 大潮)

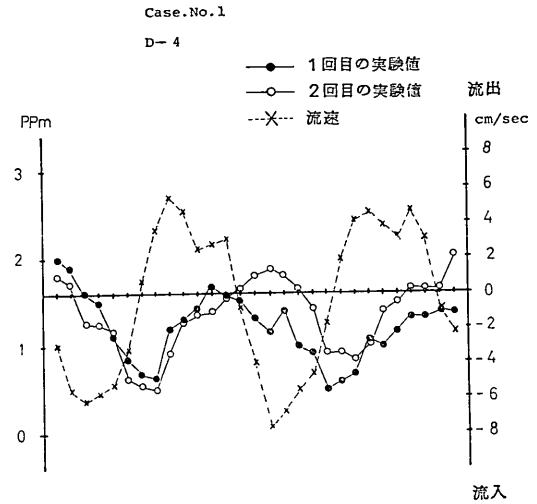


図-22 (3) 断面濃度の経時変化, D-4
(Case 1, 現況, 大潮)

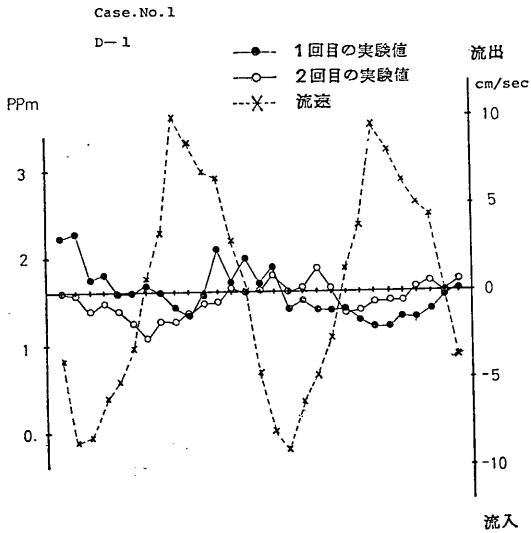


図-22 (2) 断面濃度の経時変化, D-1
(Case 1, 現況, 大潮)

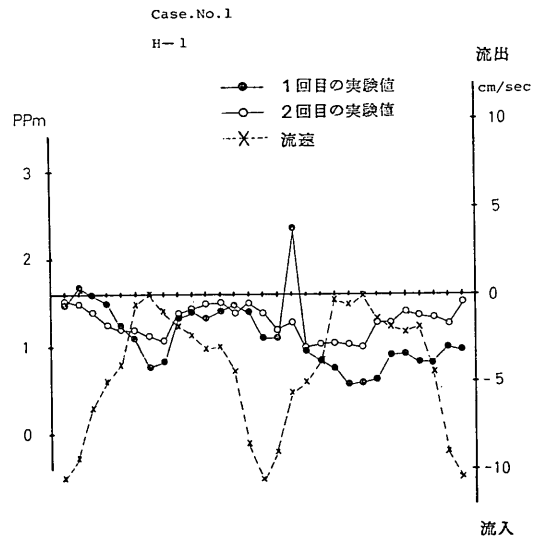


図-22 (4) 断面濃度の経時変化, H-1
(Case 1, 現況, 大潮)

東京湾の海水交換に関する水理模型実験

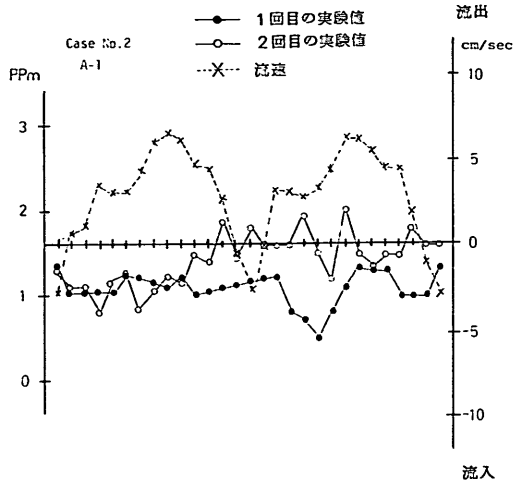


図-23 (1) 断面濃度の経時変化, A-1 (Case 2, 60年C案, 湾口航路掘削, 大潮)

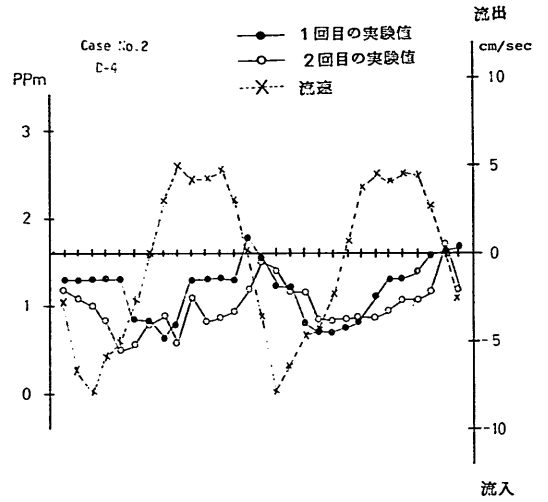


図-23 (3) 断面濃度の経時変化, D-4 (Case 2, 60年C案, 湾口航路掘削, 大潮)

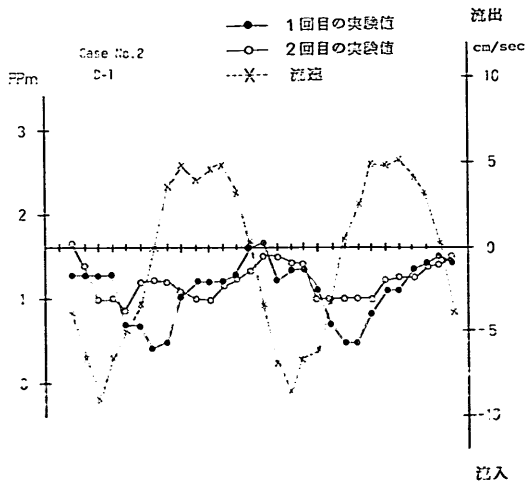


図-23 (2) 断面濃度の経時変化, D-1 (Case 2, 60年C案, 湾口航路掘削, 大潮)

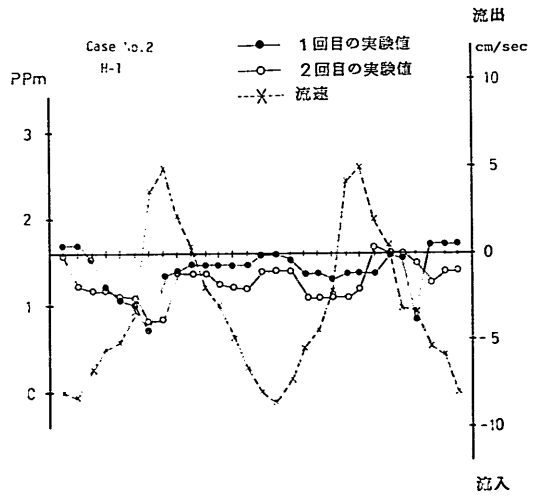


図-23 (4) 断面濃度の経時変化, H-1 (Case 2, 60年C案, 湾口航路掘削, 大潮)

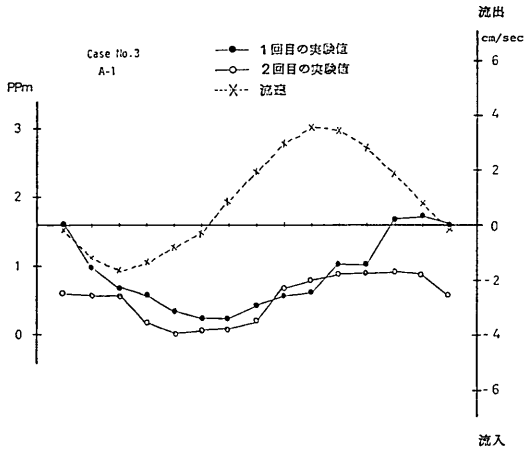


図-24 (1) 断面濃度の経時変化, A-1 (Case 3, 現況, 小潮)

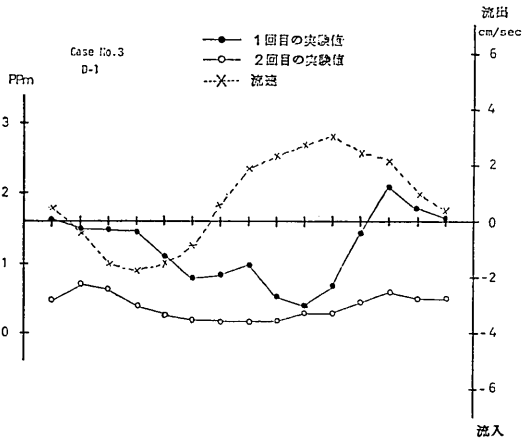


図-24 (2) 断面濃度の経時変化, D-1 (Case 3, 現況, 小潮)

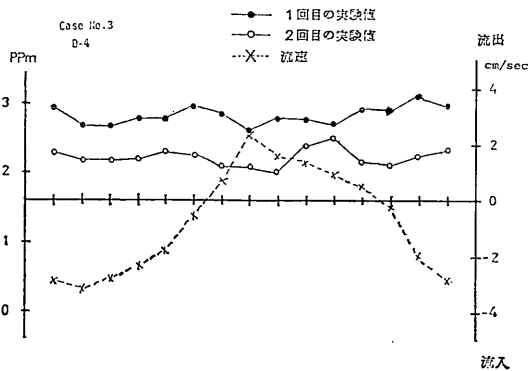


図-24 (3) 断面濃度の経時変化, D-4 (Case 3, 現況, 小潮)

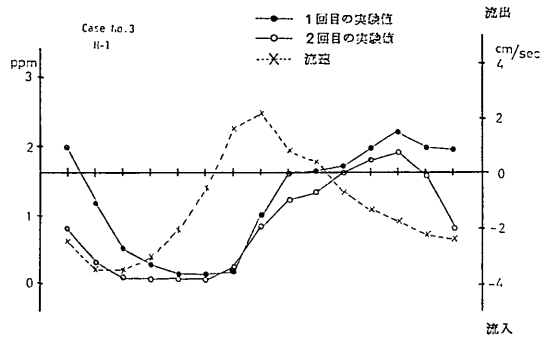


図-24 (4) 断面濃度の経時変化, H-1 (Case 3, 現況, 小潮)

図より測定断面の平均値を求めると、流出が卓越しているA断面が最も高く、流入が卓越しているH断面が最も低い。従って、高濃度の湾内水が観音崎側(A断面)から流出し、低濃度の外海水が富津側(H断面)より流入している状況が、これらの図からもよくわかる。

Case 2についても同様に濃度の経時変化を図(図-23(1)~(4))に示す。Case 1と比べて濃度が全般的に低い。特にA-1断面においては濃度が極度に減少している。この原因の一部は、湾口航路の掘削による湾内の流況の変化とも考えられるが、詳細は明らかでない。

次にCase 3の濃度の経時変化図を示す(図-24(1)~(4))。下層(D-4)でかなり高い濃度を示しており、上層(D-1)では低く、特に満潮時には0.05 ppm以下になる。これは濃度の高い湾内水が下層に入り込んで流出したものと考えられる。図-20で流速分布が上層で流出、下層で流入というパターンであるのに対し、濃度分布は逆のパターンとなっている。このような密度流的な流れは、小潮時のように起潮装置による強制水位が小さい場合に、その影響が大きく現われてくるものと考えられる。

4.3 東京湾内染料濃度平面分布

湾口部断面の濃度の測定と同時に、湾内外全域の濃度の測定を約70点で行った。真空ポンプを用いた自動採水装置により、70点の全点同時採水を10潮汐間毎に行った。濃度分析器はTurner社製110型の蛍光光度計を使用した。図-25(1)は、Case 1の実験開始前の濃度分布図を示すものである。湾口部に設けられた遮蔽板(図中の破線部)により、湾内は4.5~5 ppmに、湾外は0 ppmに分けられている。図-25(2)は、遮蔽板を取り除いた後50潮汐目の濃度分布図を示す。湾奥部(上から1/3の領域)では、あまり変化は見られないが、横浜沖の湾中央部は2~4 ppmと、濃度がかなり減少している。

東京湾の海水交換に関する水理模型実験

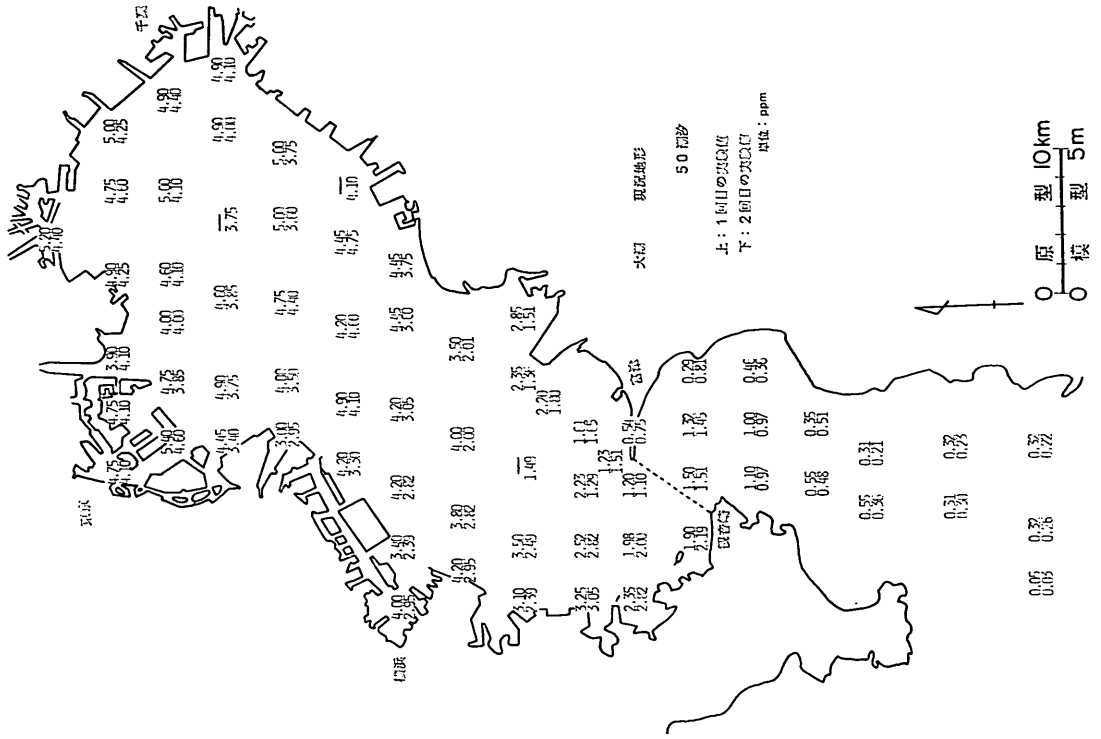


図-25 (2) 濃度の平面分布, 50潮汐時 (Case 1, 現況, 大潮)

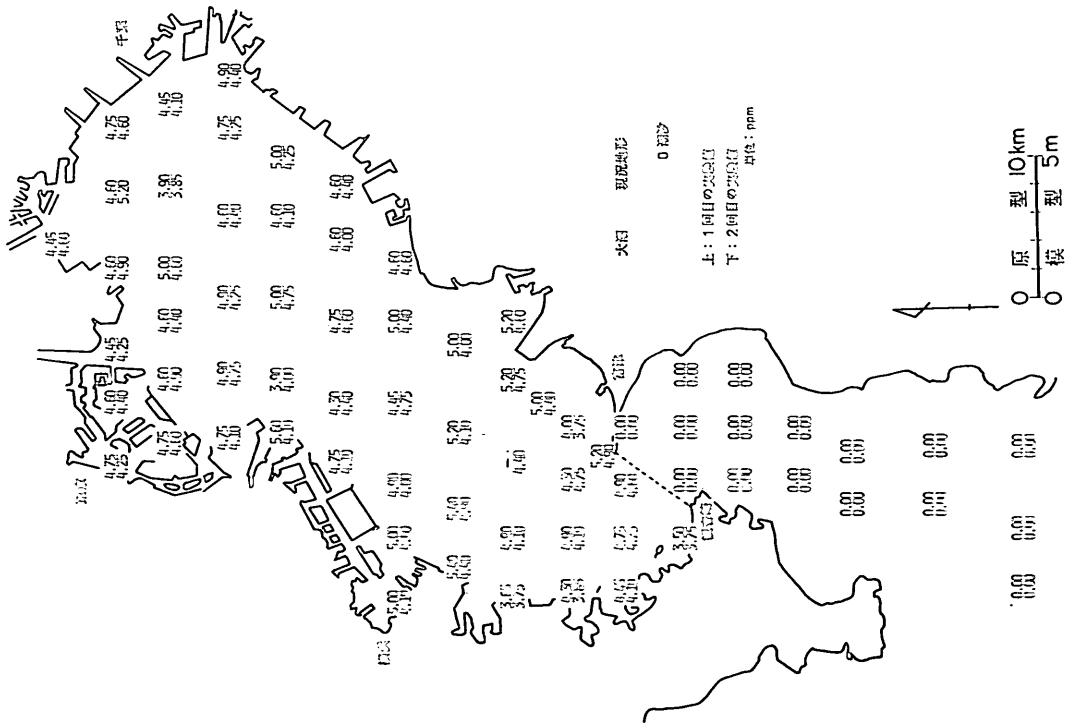


図 25 (1) 濃度の平面分布, 0 潮汐時 (Case 1, 現況, 大潮)

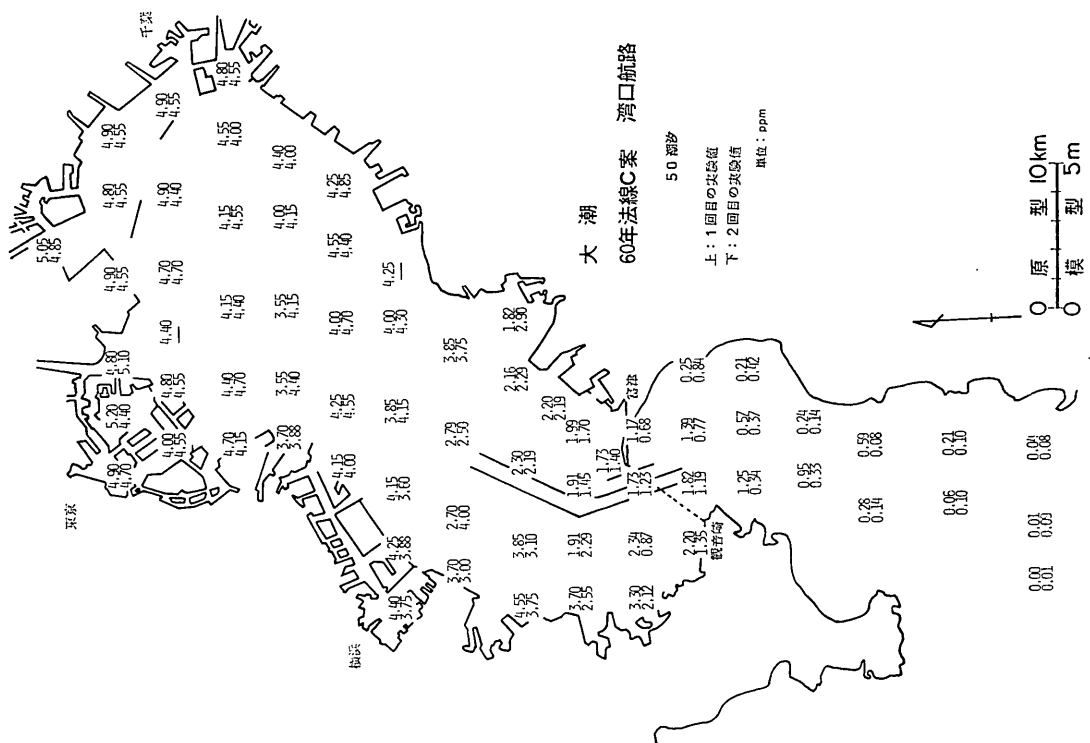


図-26 (2) 濃度の平面分布, 50潮汐時 (Case 2, 60年C案, 湾口航路掘削, 大潮)

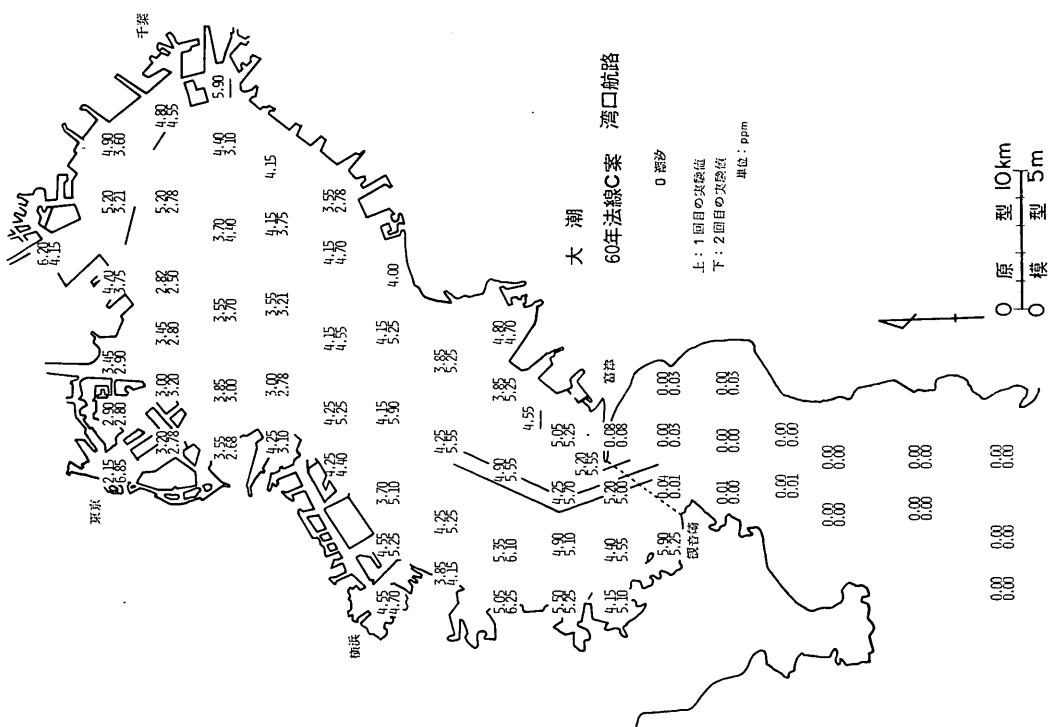


図-26 (1) 濃度の平面分布, 0潮汐時 (Case 2, 60年C案, 湾口航路掘削, 大潮)

東京湾の海水交換に関する水理模型実験

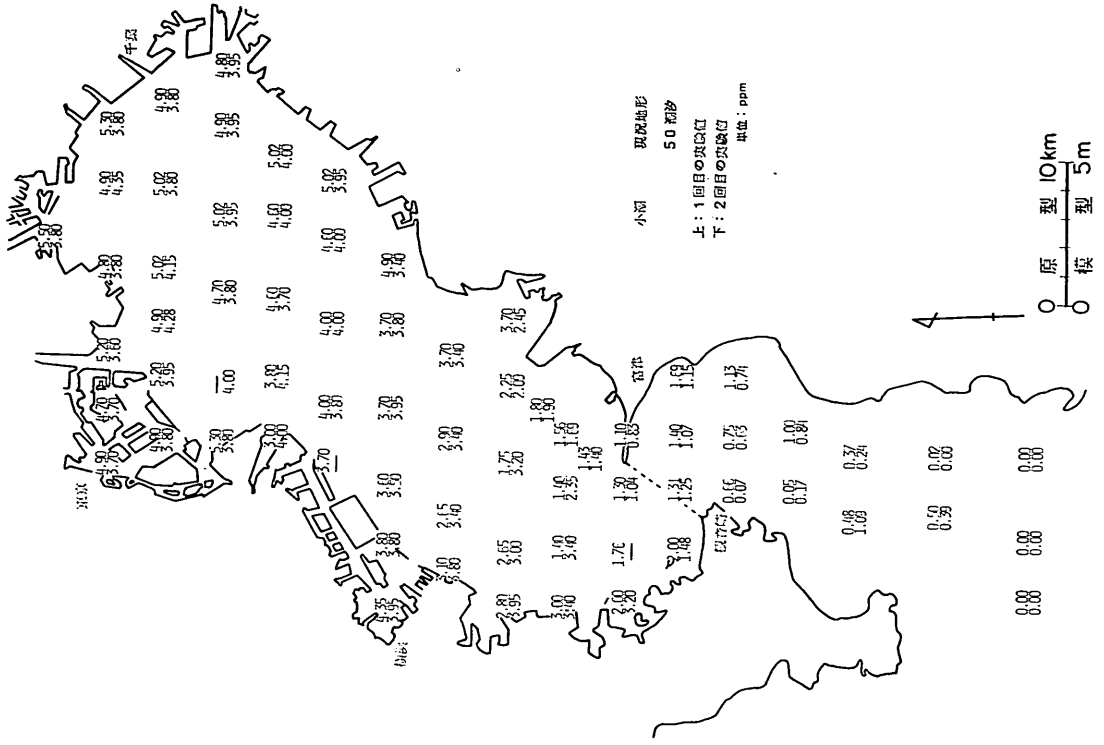


図-27 (2) 濃度の平面分布, 50潮汐時 (Case 3, 現況, 小潮)

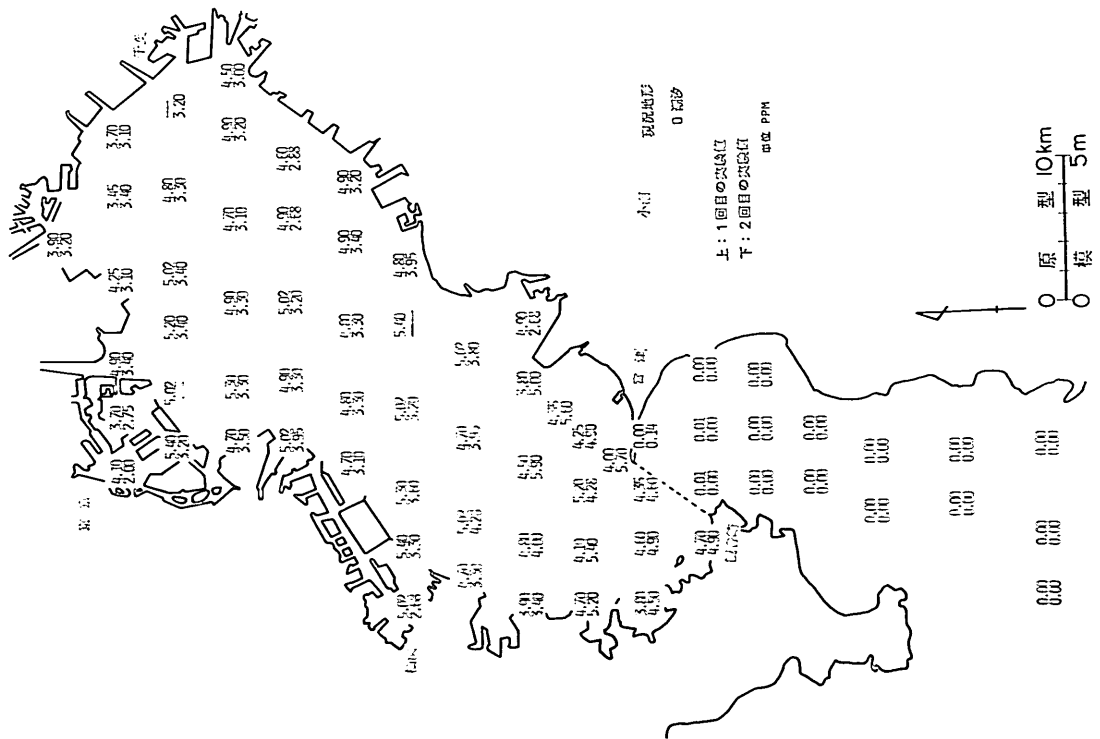


図 27 (1) 濃度の平面分布, 0 潮汐時 (Case 3, 現況, 小潮)

また、神奈川県寄りの海域よりも、千葉県寄りの海域の方が濃度が低い。これからも、富津側で流入、観音崎側で流出が卓越していることが読みとれる。2回目の実験の方が濃度測定値は低い。湾口部では、1～2 ppm へと濃度が減少し、この領域の水はかなり外海水と混合していることを示している。湾口部から外に行くに従って、徐々に濃度は減少し、0.2～0.5 ppm の濃度となる。この領域でも、観音崎側の方が富津側よりも濃度が高いことがわかる。

Case 2 についても同様の実験を行った。図-26(1)に実験開始前、図-26(2)に50潮汐後の濃度分布図を示す。この図より、Case 1 の濃度分布図と大差ない。湾口航路の掘削による流出パターンの変化は認められなかった。

Case 3 の小潮の場合についても同様に図-27(1)～図-27(2)に濃度分布図を示す。湾内の濃度分布にはあまり変化はみられないが、湾外の濃度分布に若干の変化が認められる。千葉県側の測点B-3、D-4での濃度が他のケースに比べて高いこと、及び外海のO～Pの測点での濃度が0 ppm に近い濃度となっていることである。これは、小潮時には、50潮汐では濃度の高い湾内水が三浦半島の先端付近までは流出するが、それより以南の外海にまでは拡がっていないことを示している。

5. 海水交換率の算定

5.1 Parker et al⁵⁾ のモデルによる交換率

下げ潮時に湾外に流出した湾内水は次の上げ潮時ほどの程度外海水と交換して戻ってくるかを求める Parker らの方法によって、東京湾モデルでの海水交換率を求めた。式(11)により下げ潮時の平均濃度 \bar{C}_E 、式(12)より上げ潮時の平均濃度 \bar{C}_F を求める。 C_0 は外洋水の濃度であるから 0 ppm とする。従って式(13)より、海水交換率を求めることができる。

$$r_E = \frac{\bar{C}_F - \bar{C}_E}{C_0 - \bar{C}_E} \dots\dots\dots(13)$$

式(11)、式(12)の右辺に示されている Q_{Ej} , C_{Ej} , Q_{Fj} , C_{Fj} は 4.1 の断面流速、4.2 の断面濃度の測定結果を用いる。表-3にそれらの結果を示す。また柏井が指摘しているように、下げ潮時に湾外に流出する水塊のうち始めて湾外に流出する湾内水の割合 r_F (式(16))、湾内水と外海水の交換率 r_G (式(17)) についても同様に表-3に示す。

表-3より Parker らの方法での交換率 r_E は、Case 1 の1回目が2.9%、2回目が9.7%と2回目の交換率の方が3倍以上となった。このことは図-25(2)の湾中央部のF～J海域の濃度が、2回目の方が低いことからもう

表-3 Parker 及び柏井の方法による交換率 (単位%)

	C_1	C_0	\bar{C}_E	\bar{C}_F	r_E	r_F	r_G
Case 1-1	5.0	0.0	1.49	1.44	2.9	1.2	0.9
1-2	4.4	0.0	1.70	1.54	9.7	5.8	3.8
Case 2-1	4.9	0.0	1.26	1.14	9.5	3.2	2.5
2-2	4.8	0.0	1.17	1.09	6.8	2.2	1.7
Case 3-1	4.8	0.0	1.58	1.42	11.1	4.6	3.3
3-2	4.1	0.0	1.90	1.85	2.9	2.3	1.3

C_1 : 湾内濃度, C_0 : 外海濃度, \bar{C}_E : 流出濃度,

\bar{C}_F : 流入濃度

$$r_E = \frac{\bar{C}_F - \bar{C}_E}{C_0 - \bar{C}_E}, \quad r_F = \frac{\bar{C}_E - \bar{C}_F}{C_1 - \bar{C}_F}, \quad r_G = \frac{\bar{C}_E - \bar{C}_F}{C_1 - C_0}$$

なすける。

Case 2 については、1回目が9.6%、2回目が6.8%の交換率が得られた。本ケースは湾口航路を掘削した場合のケースであるが、この結果より判断すれば、掘削による海水交換率の増減を問題にする程、実験の精度は高くないようである。

Case 3 の場合は、1回目2.9%、2回目11.1%の交換率が得られ、2回目が1回目の4倍という結果になった。また現地観測^{5),6)}によれば、海水交換率は潮位変動に比例するという結果が得られているが、本模型実験ではそれを確認できるような結果を得ることができなかった。この理由は、流速分布と濃度分布の間に流入と流出のパターンが一致していないことが考えられる。また、各々の測定をそれぞれ別個に行ない、潮位記録をもとに位相を調整して行っているため、小潮のように潮位振幅が小さい場合には、測定誤差が大きくてでること等が主な原因であると思われる。

柏井の示す r_F , r_G については表-3に示す通りである。汚染した湾内水を清浄な外海水と交換して、希釈による自浄能力を考える場合には、湾内水と外海水の交換率を意味する r_G が一番適切な表現であるとも考えられるが、湾内水として何をを用いるかに若干問題が残る。ここでは、湾内水 C_1 として、実験開始前の湾内の平均濃度を採用した。式(17)からもわかるように、Parker らのモデルの交換率よりも値は当然小さくなる。Case 1 で0.9%、3.8%、Case 2 で2.5%、1.7%、Case 3 で1.3%、3.3%と $1/3 \sim 1/4$ に減少している。交換率は一般に、 $r_E > r_F > r_G$ となる。

現地観測で、各々測定断面毎の交換率を求めている例があるが、これは適切ではない。例として Case 1 の2回目について検討してみる。各々の断面の流出時の平均

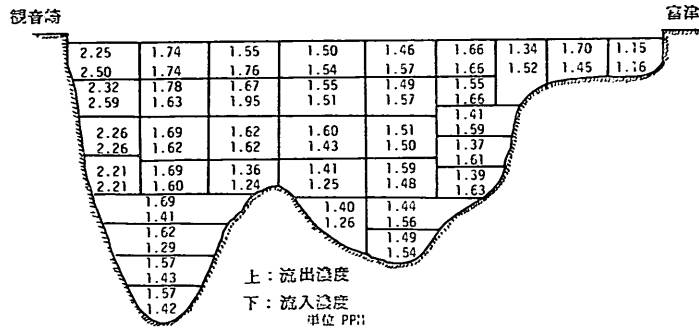


図-28 湾口での流出濃度及び流入濃度 (Case 1, 現況, 大潮)

濃度, 流入時の平均濃度を 図-28 に示す。また, 図-17 に同じ断面の流入出量を示している。図-28 の平均濃度に 図-17 の流入出量を掛ければ, それらの断面の物質の流入, 流出が得られる。しかしながら, 図-28 の平均濃度を用いて式(13)により交換率を計算すると, 流出が卓越している断面でもマイナスの交換率が得られることがある。これは, A断面のように, 流入量と流出量が大きく異なる断面では, 流出の場合の平均濃度が必ずしも流入の平均濃度より高くなるとは限らないからである。従って, このような断面では, 式(13)の適用はあてはまらない。

例えば, A-1 断面について計算してみると,

- 流出流量 $Q_F=265 l$
- 流入流量 $Q_E=20 l$
- 流出濃度 $\bar{C}_F=2.25 \text{ ppm}$
- 流入濃度 $\bar{C}_E=2.50 \text{ ppm}$

流出物質量 $Q_F \bar{C}_F=0.59 \text{ gram}$

流入物質量 $Q_E \bar{C}_E=0.05 \text{ gram}$

交換率 $r_E=-11\%$

となる。

このように, 流出量が圧倒的に卓越している A-1 断面で交換率が -11% という不合理な結果になる。従って, 断面毎の交換率はあまり意味がない。交換率は, 断面全体あるいはモデルのもつ仮定を満足する断面での物質量の流入量及び流出量によって求められるべきものであると考えられる。

5.2 速水ら¹⁾のモデルによる交換率

速水らのモデルを模型実験に適用するために, 湾内外の平面的な濃度分布の測定を行った。速水らは, 現地観測での平面分布の測定の困難さから, ある断面での濃度の経時変化を求め, それを式(2)により空間分布に変換しているが, 模型面では濃度の空間分布を測定することは

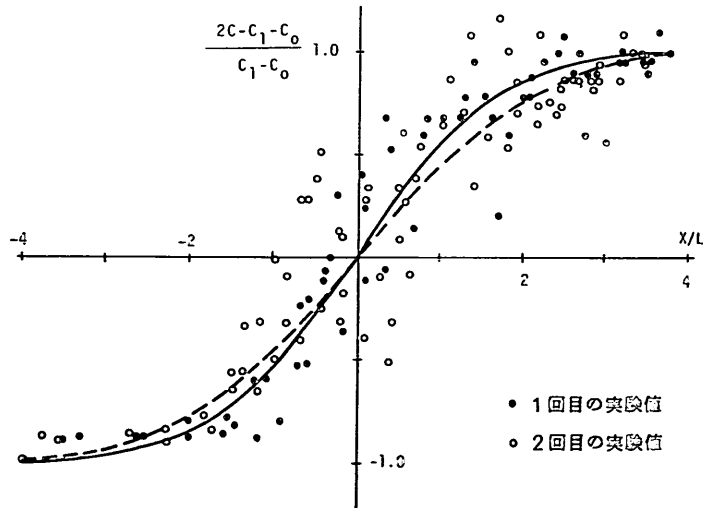


図-29 濃度分布の誤差関数近似 (Case 1, 現況, 大潮)

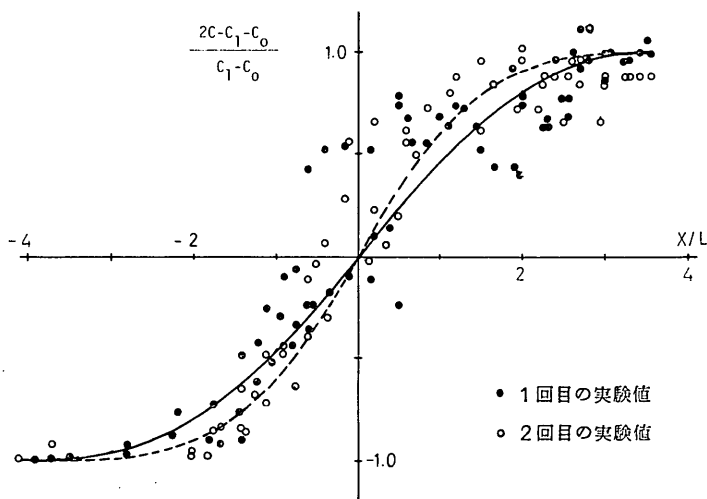


図-30 濃度分布の誤差関数近似 (Case 2, 60年C案, 湾口航路掘削, 大潮)

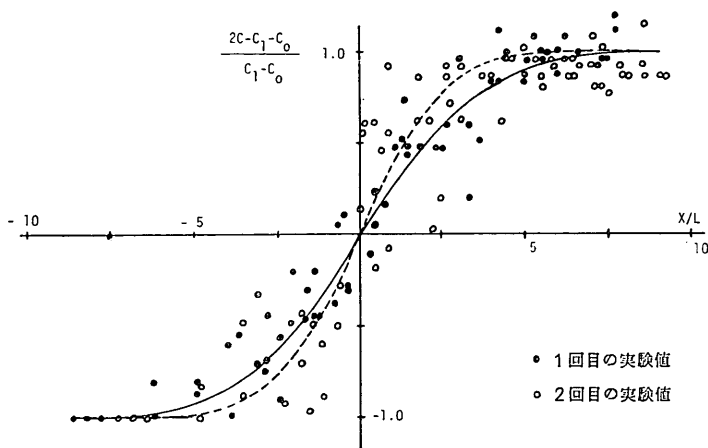


図-31 濃度分布の誤差関数近似 (Case 3, 現況, 小潮)

比較的容易である。また柏井³⁾が指摘しているように、塩素量の分布が半周期毎に step 状に与えられることは現地ではありえないことであるが、模型上では人為的に遮蔽することにより、初期状態として step 状の分布を与えることも可能である。このような観点から、速水らの方法を模型実験に適用することは簡単かつ、有効な方法であると考えられる。

速水らのモデルでの問題点は、半周期毎に step 状の分布が与えられること、すなわち式(1)において t を潮汐周期の半分にしたことであると思われる。ここで用いた方法は、実験開始(湾口断面において遮蔽板を取り除く)からの時間を t として採用した。

図-29に示すのが、Case 1 の場合の50潮汐目の濃度の平面分布(図-26(2))を一次元の濃度分布図に整理したものである。横軸は、湾口断面から湾の中心軸に沿って x 軸をとり、それを潮流によって一方向に流れる距離(混合距離) l で割った無次元量 x/l 、縦軸は濃度に関する無次元量 $(2C - C_0 - C_1)/(C_1 - C_0)$ である。 C_1 が湾内濃度、 C_0 が外海濃度である。式(1)を変形すると式(2)になる。

$$\frac{2C - C_0 - C_1}{C_1 - C_0} = \text{erf}\left(\frac{x/l}{2\sqrt{E_x t/l}}\right) \quad \dots\dots(2)$$

図-29の点列を式(2)の誤差関数で近似する。ここで式(2)の両辺に次の諸量を代入する。 C_1 (湾内濃度)=5.0ppm,

表-4 速水らの方法による交換率

		L (m)	U (cm/s)	E _x (cm ² /s)	α (%)
Case 1-1	大潮	4.5	4.0	80	4.4
1-2	大潮	4.5	4.0	130	7.2
Case 2-1	大潮	4.5	4.0	130	7.2
2-2	大潮	4.5	4.0	60	3.3
Case 3-1	小潮	2.0	1.8	80	22
3-2	小潮	2.0	1.8	40	11

C₀(外海濃度)=0 ppm, l(流動距離)=4.5m, t(実験開始後の時間)=50 潮汐等を代入すると、1回目の実験(黒丸)については E_x=80 cm²/sec, 2回目の実験(白丸)については E_x=130 cm²/sec となった。ここで求めた拡散係数 E_x 及び平均流速として u=4.0 cm/sec を用いて Stommel の混合距離の式, E_x=αul から交換率(α)を求めると、1回目の実験が4.4%, 2回目の実験が7.2%であった。

Case 2 についても同様の方法で50潮汐目の濃度分布を図-30に示す。1回目の実験(黒丸)では、拡散係数 E_x=130 cm²/sec であり交換率は7.2%, 2回目の実験(白丸)では、E_x=60 cm²/sec, 交換率は3.3%であった。

Case 3 (図-31)については、1回目(黒丸) E_x=80 cm²/sec, 交換率22%, 2回目(白丸) E_x=40 cm²/sec, 交換率11%の結果が得られた。これらの結果を表-4にまとめて示した。Case 3(小潮)の場合、拡散係数 E_x としては Case 1, Case 2 と大差ないかあるいは若干小さいが流動距離 l, 平均流速 u が小さいために交換率が非常に大きな値となった。これは、小潮の場合は潮汐による交流量が少ないにもかかわらず、ほぼ大潮と同程度の拡散速度を示していることから、当然交換率は大きくならなければならない。これは、流速測定の結果及び浸度測定の結果からもわかるように、小潮時には水温差による対流現象が発生しており、これが海水交換を促進しているものと考えられる。これらの混合現象をすべて、潮汐混合による海水交換であるとして、式(3)で計算したために、小潮時の交換率が大きくなったものと考えられる。

5.3 ボックスモデルによる交換率

宇野木ら¹²⁾の方法にならって東京湾をいくつかのブロックに分割し、ボックスモデルによって海水交換の現象を調べた。この方法は、物質量の保存を基礎とした連続の条件式が基本となっているもので、タイムステップはかなり大きく(例えば数潮汐)取れるので、最も簡単な

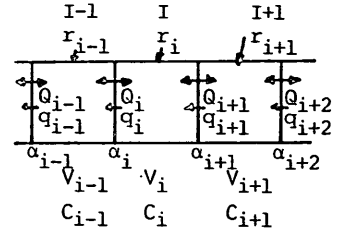


図-32 ボックスモデル

つ迅速にできる解析法である。ところがこの方法は、流れ又は拡散についての微細な挙動、構造等とはみることができず、あくまでも平均的、かつ大まかな物質移動、拡散等について論ずるものである。

東京湾を一次元の水路と考える。いま、あるボックス i (図-32)に注目し、このボックスでの物質量の増減を考える。まず干潮から満潮までは式(2)で表わされる。

$$V_i(C_i^{t+\frac{1}{2}} - C_i^t) = Q_i C_{i-1}^t - Q_{i+1} C_i^t - \frac{q_i}{2} C_i^t + \frac{q_{i+1}}{2} C_{i+1} + \frac{r_i}{2} C_{ri} \dots\dots\dots(2)$$

続いて、満潮から次の干潮までのボックス i での物質量の増減を考える。この時、潮流によって隣のブロックに入った交流量 Q は、隣のブロックの水塊と α だけ交換して戻ってくるものと仮定すると式(3)のようになる。

$$V_i(C_i^{t+1} - C_i^t) = Q_i C_{i-1}^t - (1-\alpha_i)Q_i C_{i-1}^t - \alpha_i Q_i C_i^t - Q_{i+1} C_i^t + (1-\alpha_{i+1})Q_{i+1} C_i^t + \alpha_{i+1} Q_{i+1} C_{i+1}^t - q_i C_i^t + q_{i+1} C_{i+1}^t + r_i C_{ri} \dots\dots\dots(3)$$

ここで、V_i: ボックス i の容積, C_i: ボックス i の濃度, Q_i: ボックス i-1 と i での交流量, α_i: 交流量 Q_i の交換率, q_i: ボックス i から i-1 に流れる恒流量, r_i: ボックス i に流入する流量, C_{ri}: 流入河川の濃度等を示す。恒流量 q は河川流量の和として表わされる。

$$q_i = q_{i+1} + r_i = \sum_{j=i}^N r_j \dots\dots\dots(4)$$

1 潮汐経過した後に、各々のブロックで完全混合するものと仮定する。式(2)を整理すると式(5)になる。

$$V_i(C_i^{n+1}-C_i^n) = \alpha_i Q_i (C_{i-1}^n - C_i^n) + \alpha_{i+1} Q_{i+1} (C_{i+1}^n - C_i^n) - q_i C_i^n + q_{i+1} C_{i+1}^n + r_i C_{i+1}^n \dots\dots\dots (25)$$

式(25)の交換を表わす項と、拡散方程式での拡散係数との関連について考える。一次元の拡散方程式は、一般には式(26)で表わされる。

$$\frac{\partial C}{\partial t} + U \frac{\partial C}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(E_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + r C \dots\dots\dots (26)$$

ここで、C：濃度、U：恒流速、E_x：拡散係数、r：単位時間、単位体積あたりの流入量を表わす。

式(26)を、タイムステップを1潮汐(ΔT)、距離間隔をボックス長(ΔL)で差分化すると式(27)となる。

$$V(C_i^{n+1}-C_i^n) + \frac{V\Delta T}{\Delta L}(U_{i+1}C_{i+1}^n - U_i C_i^n) = -\frac{V\Delta T}{(\Delta L)^2} \{E_{x,i+1}(C_{i+1}^n - C_i^n) - E_{x,i}(C_i^n - C_{i-1}^n)\} + R_i C_{i+1}^n \dots\dots\dots (27)$$

式(25)と式(27)を比較すると、拡散係数を式(25)で表わしたものと同等になる。

$$\alpha Q = -\frac{V\Delta T}{(\Delta L)^2} E_x \dots\dots\dots (28)$$

交流量 Q=AU $\frac{\Delta T}{2}$ 、容積 V=A \cdot ΔL (A断面積、U平均流速)であるから

$$E_x = -\frac{(\Delta L)^2 \cdot \alpha \cdot AU \frac{\Delta T}{2}}{A \cdot \Delta L \cdot \Delta T} = \frac{1}{2} \alpha U \Delta L \dots\dots\dots (29)$$

となる。式(29)は拡散係数(潮汐流による混合を含む) E_x と交換率 α の関係を示す式である。いまボックス長を潮汐による流動距離 L にとれば、拡散係数 E_x は式(30)となり、

$$E_x = \frac{1}{2} \alpha UL \dots\dots\dots (30)$$

表-5 ボックスモデルに用いた諸量

ボックス番号	V 容積 (m ³)	A 面積 (m ²)	Q* 交流量 (m ³)	q 恒流量 (l)	r 河川流量 (l)	C** 初期濃度 (ppm)
1	141	141	8.69	33.7	0	0
2	22.0	34	5.84	33.7	0	0
3	8.1	21	5.14	33.7	0	0
4	5.4	27	4.72	33.7	0.3	5.0
5	6.1	32	4.17	33.4	0	5.0
6	8.1	39	3.53	33.4	3.6	5.0
7	7.0	35	2.73	29.8	2.0	5.0
8	9.3	62	2.02	27.8	25.6	5.0
9	3.0	38	0.77	2.2	2.2	5.0

* 小潮の場合は交流量 Q'=Q \times 0.43
** 初期濃度は実験開始前の湾内水濃度

表-6 ボックスモデルによる交換率(単位%)

	Case 1		Case 2		Case 3	
	1	2	1	2	1	2
α ₉	7	8	7	15	7	25
α ₈	8	23	9	30	9	50
α ₇	10	15	16	25	26	50
α ₆	12	38	20	30	26	30
α ₅	15	30	13	15	44	18
α ₄	15	20	13	25	48	17
α ₃	21	21	20	30	65	50
α ₂	36	30	26	30	65	50
α ₁	27	8	39	30	65	50

α_i ボックス(i)とボックス(i-1)の交換率

速水らのモデルでの式(3)と若干異った式となる。これは柏井⁹⁾の言う Schmidt の交換係数 (Austausch-koeffizient) と同じ表現となる。

今ここで、東京湾を図-32のように1次的に9つのブロックに分割した。各々のブロックでの容積、面積、河川流量、断面積等の諸量を表-5に示す。交流量については、超音波流速計による湾口部での測定流量を用い、その断面から湾奥までの面積に比例させた。これらの諸量を用い、交換率 α を適当に与えることにより式(28)から、各々のボックスの濃度変化が計算できる。

交換率 α は前述の模型実験の結果から求めた。図-33(1)は Case 1 の1回目の実験に対する9つのブロックの平均濃度の経時変化を示したものである。図中の実線で示したものが実験結果である。この図から、30~50潮汐目の値を用いて平均的な濃度勾配を求め、また内挿により39潮汐目と40潮汐目の各々のブロックの濃度を求めこれを式(29)に代入すると、ブロック間の交換率 α が求められる。実験データによっては、負の交換率、100%以上の交換率を示すことがあるが、そのような場合には図-33(1)の実験結果にそくすように α を若干修正して、表-6 に示すような交換率を得た。この交換率を用い、初期値として1~3ブロックを0 ppm、4~9ブロックを実験開始前の湾内水の最大濃度に設定(河川水濃度も同じ)して式(29)を50潮汐まで求めると、図-33(1)の破線で示したようになる。同様にして求めた他のケースについても、図-33(2)~図-35(2)に示す。

表-6 から湾口部(観音崎-富津岬)断面での交換率は、Case 1 で1回目15%、2回目20%、Case 2 で1回目13%、2回目25%であった。またCase 3 については、1回目48%、2回目17%と2回の実験値にかなりの相異があった。また、他の断面での交換率からもわかるよう

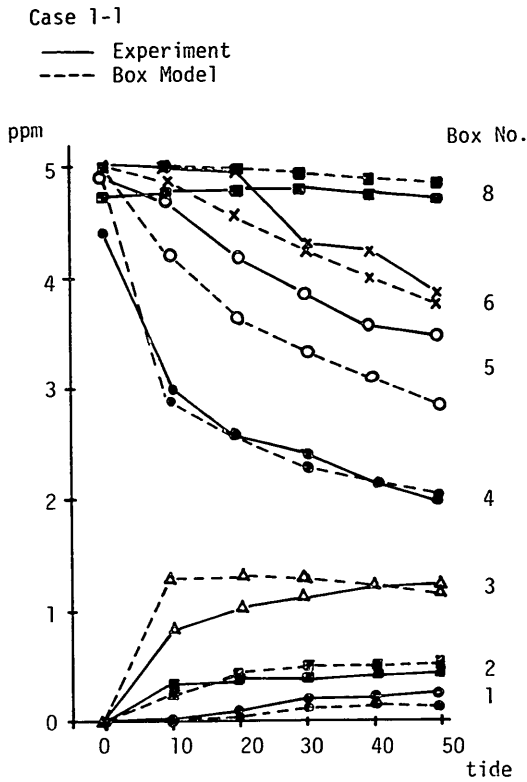


図-33 (1) ボックスモデル (実験値と計算値の比較)
Case 2-1

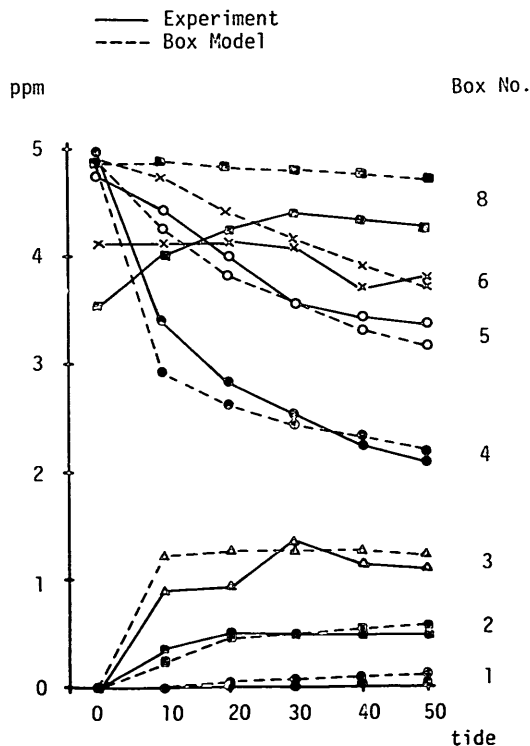


図-34 (1) ボックスモデル (実験値と計算値の比較)

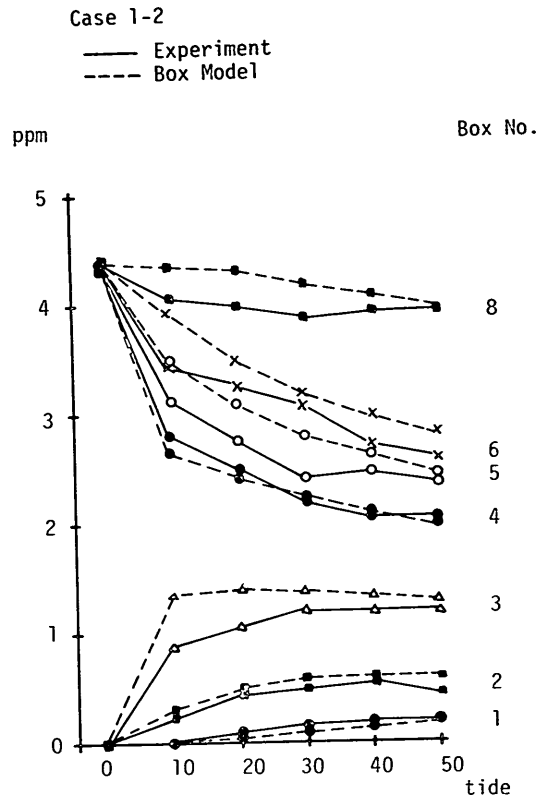


図-33 (2) ボックスモデル (実験値と計算値の比較)

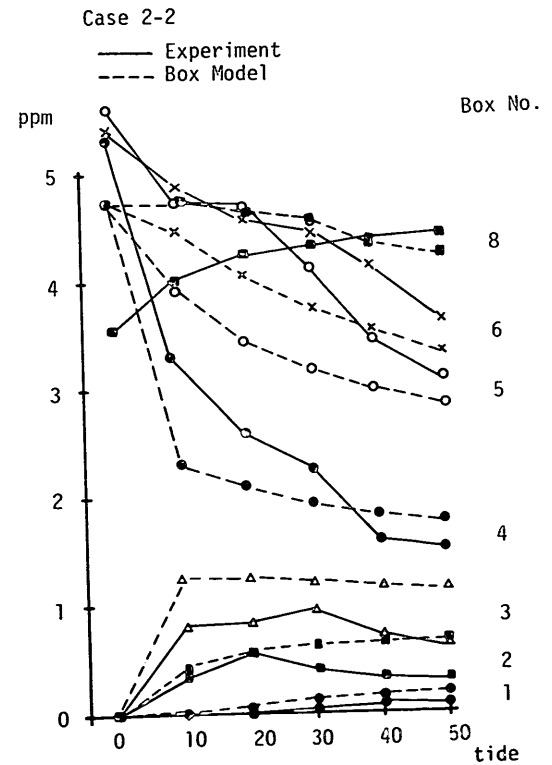


図-34 (2) ボックスモデル (実験値と計算値の比較)

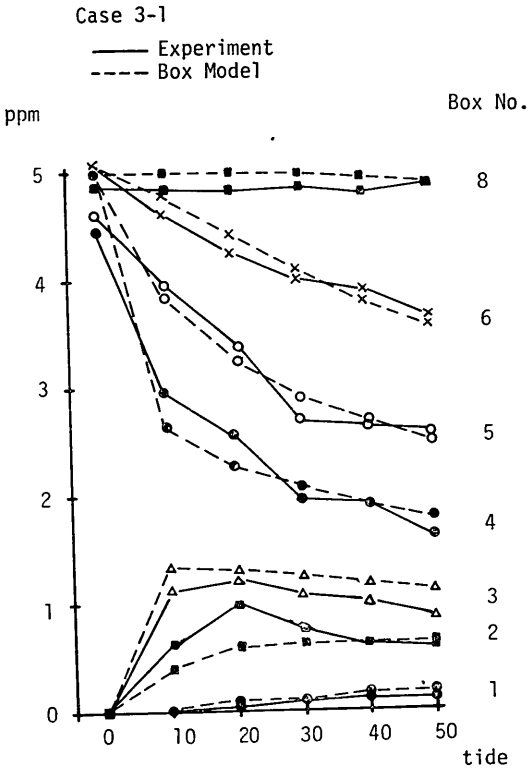


図-35 (1) ボックスモデル (実験値と計算値の比較)

に、小潮の場合は交換率が大きく出る傾向にある。

このモデルは、一潮汐間での完全混合を仮定しているため、図-32のボックスの分割方法には若干の問題が残る。潮汐による流動距離に基づいた一次元分割が望ましいと考えられるが、東京湾のような流動の複雑な水域においては容易でない。また、二次元的なブロックに分割すると、各々の断面での流量を求めるのに、観測あるいは計算等から与えなければならず、計算もより複雑となる。

6. ま と め

東京湾の湾口部断面(観音崎と富津岬を結ぶ断面)で、i) Parkerらのモデル、(式(13))、ii) 柏井のモデル(式(17))、iii) 速水らのモデル、(式(3))、iv) ボックスモデル、の4つの方法により湾内水と外海水の海水交換率を求めた。

これら4つの方法は交換率の定義が異なるので、値も当然異なっている。それらの交換現象の持つ意味を調べるために、模式図(図-36)によってどの水塊が交換しているのかを明らかにする。水塊A(湾内水 C_1)、水塊B(外海水 C_0)、水塊C(下げ潮時の流出水の平均濃度 C_E)、

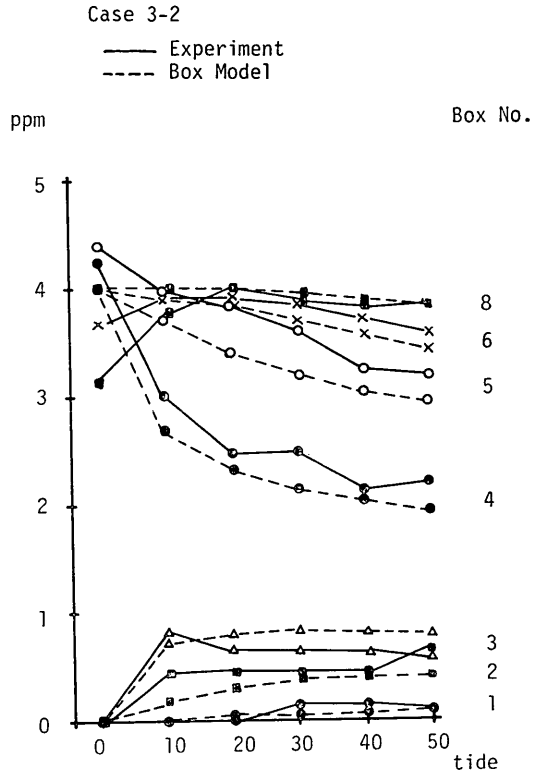


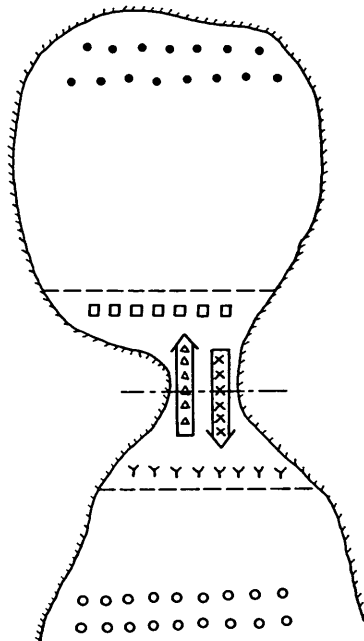
図-35 (2) ボックスモデル (実験値と計算値の比較)

水塊D(上げ潮時の流入水の平均濃度 C_F)、水塊E(ボックス $i+1$ での濃度 C_{i+1})、水塊F(ボックス i での濃度 C_i)については、それぞれ図中の記号で示す。

Parkerのモデルは、水塊Cの一部が水塊Bと交換して水塊Dとなって戻る場合に、各々の濃度 C_E 、 C_0 、 C_F を測定することにより、それらがどの割合で交換をしたものかを求める方法で、式(13)で表わされる。

柏井のモデルは湾内水(水塊A)と外海水(水塊B)の交換の割合を求めるもので、水塊A(C_1)、水塊B(C_0)、水塊C(C_E)、水塊D(C_F)の濃度を式(17)に代入すれば求められる。この式は、Parkerのモデルと、このモデルを逆にした水塊Dと水塊Aの交換を示す式(16)によって表わすことができる。湾内の水質を論ずる場合に、湾内水と外海水が交換して始めて湾内水が希釈されるのであるから、交換の概念としては最も適切であると思われる。なぜならば、式(17)からわかるように、 r_E が大きな値を示しても r_F がゼロであれば、湾内水と外海水は全然交換しないことになるからである。しかしながら、このモデルでの難点は湾内水の濃度を設定するのが難しいと思われる点である。外海水の場合は、塩分濃度であれば35‰、COD濃度であれば清浄であるとして0

東京湾の海水交換に関する水理模型実験



- A • 湾内水 C_1
- B ○ 外海水 C_0
- C × 流出水 C_E
- D △ 流入水 C_F
- E □ ボックス $i+1$ C_{i+1}
- F Y ボックス i C_i

- 式(3) EとFの交換
- 式(13) CとBの交換
- 式(16) DとAの交換
- 式(17) AとBの交換
- 式(25) EとFの交換

図-36 海水交換の模式図

ppm というように外海水濃度を仮定するか、あるいは直接測定することが容易であるが、湾内水の場合は何をもって湾内濃度にするかによって交換率が変化し、非常に難しい問題である。また、塩分濃度を0% (淡水流水) とすると、交換率が小さくなりすぎて、現実の交換現象にそぐわない感がある。

ボックスモデルは、隣接する水塊Eと水塊Fとの交換の割合を示すものである。どちらの水塊も、水塊A、水塊Bの混合したもので、混合の割合が異なる場合に、交換によって物質の移動が生じるものである。故に、ボックスモデルでの交換率は他のモデルと比較して、大きな値となることは当然である。しかしながら、実際現象としては、このように隣接する水塊がそれぞれの場所で交換を繰り返して、その結果として湾内水と外海水が交換するのであるから、湾内を希釈するひとつのパラメータであると思われる。

速水らのモデルはこれらのモデルと若干異なる。一次元の拡散方程式の解析解を実際の濃度分布に近似させて、拡散方程式の持つ拡散係数を求め、この拡散係数と水塊E、Fの濃度勾配から物質の移動量を示すものである。この解は流動項を無視した場合の両端が無限拡がりの場合の等モル相互拡散の解である。従って、模型のように遮板によって初期状態を作りうる場合は近似的に用いることができるが、現地のように濃度分布が定常に

表-7 海水交換率 (単位%)

交換率のモデル		I	II	III	IV
Case 1	1	2.9	0.9	4.4	15
	2	9.7	3.8	7.2	20
Case 2	1	9.5	2.5	7.2	13
	2	6.8	1.7	3.3	25
Case 3	1	11.9	3.3	22	48
	2	2.9	1.3	11	17

- I Parker : 式(13)
- II 柏井 : 式(17)
- III 速水 : 式(3)
- IV ボックスモデル : 式(25)

なっている場合 ($T \rightarrow \infty$) には、両端が有限なものとして解く必要があろうと考える。

以上、4つの方法で東京湾の海水交換率を求めると、表-7のようになる。各々のモデルの交換率の持つ意味が異なるから、それぞれの値については直接比較はできないが、柏井のモデルは他のモデルと比べて交換率が小さくなり、ボックスモデルは大きくなるのがこの表からもわかる。このように、海水交換率といっても、モデルによって定義が異なり、各々の定義に従って交換率の値が

大きく変化することから、それぞれの持つ意味をよく理解して注意して扱う必要がある。

交換率としていずれを選択するかは、それぞれの目的に応じて異なってくると思われるが、湾口部での交換現象による希釈作用を考える場合、Parkerらのモデルが最も考えやすいモデルであると思われる。

以上述べた各々のモデルの持つ特徴、及び明らかにした点をまとめると次の通りである。各モデルの特徴について、

- 1) Parkerらのモデルでは、流出水塊(C)と外海水(B)との交換率であり、これは流速と濃度の位相差に敏感で、誤差が大きく表われる。模型実験の結果(表-3)は、現地観測⁹⁾の結果(8~10%)とほぼ同程度の値を得ている。
- 2) 柏井のモデルでは、湾内水(A)と外海水(B)との交換率であり、交換率の値は、これら4つの中で最も小さくなる。湾内水の水質(濃度)の決定が難しい。
- 3) 速水らのモデルでは、1次元の拡散方程式の解から求めるもので、濃度の平面分布を求めればよく、簡単である。定常状態($T \rightarrow \infty$)における交換率に対しては、このモデルは用いられない。境界値問題として考える必要がある。
- 4) ボックスモデルでは、隣接したボックス間の水塊の交換率であり、水質予測手法として、非常に簡単である。他のモデルに比べて、交換率が大きく得られる。次に、東京湾の海水交換の現象について、
- 5) 東京湾は観音崎側で流出し、富津側で流入するパターンがみられる。
- 6) 東京湾の海水交換率は、数%程度であると考えられる。
- 7) 湾口航路の掘削により、掘削部の流出が促進される。
- 8) 湾口航路の掘削による海水交換率への影響は、本実験からは識別できる程の差異を認めることができなかった。

7. あとがき

閉塞性内湾での水質汚濁を論ずる場合に、汚染された湾内水がどの程度外海水と交換しているのか、あるいは、どのようにしたら海水交換を促進できるかということが、今後益々重要な問題となってくるであろう。

このためには、海水交換に関する現地観測手法や、ここで取り扱った模型実験、数値モデルによる算定手法の確立を急ぐ必要がある。

本研究では、現在用いられている海水交換のモデルを紹介し、それらの持つ交換率の意味を明らかにした。ま

た、模型実験によって、東京湾の海水交換率を算定したが、模型実験における再現性や現地との対応について、今後研究すべきいくつかの問題点が残された。

現地での海水交換率を把握するためには、長期的かつ広域的な観測が必要である。また、交換による希釈は、汚れた湾内水を外海にまきちらすだけの作用に終わらないように、汚染の機構、希釈と自浄能力等の関係について、把握しておく必要がある。

最後にあたり、この実験は運輸省第二港湾建設局の委託により実施したものである。また、本報告をとりまとめるにあたり、種々の貴重な御助言、御指導を戴いた佐藤昭二海洋水理部長、金子安雄前海水汚染水理研究室長(現㈱日本テトラポッド)、ならびに市原正史海水汚染水理研究室長に深く感謝いたします。さらに、本実験の実施にあたって、海水浄化研究室員細川恭史、三好英一両君の協力を得た。これらの方々に感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) 速水頌一郎・福尾義昭・依田大介：明石海峡による播磨灘と大阪湾との海水交流について、第3回海岸工学講演会講演集，pp. 49~53, 1956.
- 2) Stommel, H. and A.B. Arons: A mixing length theory of tidal flushing, Trans. A.G.U., Vol. 32, 1951.
- 3) 柏井 誠：潮汐による海水交換について—その2。速水ほか(1956)に対する検討，1977年度日本海洋学会春季大会講演要旨集，pp. 98~99, 1977.
- 4) 速水頌一郎・宇野木早苗：瀬戸内海における海水の交換と物質の拡散，第17回海岸工学講演会論文集，pp. 385~393, 1970.
- 5) Parker, D.S., P. Norris and A.W. Nelson: Tidal exchange at Golden Gate, Proc. of ASCE, Vol. 98, No. SA2, pp. 305~323, 1972.
- 6) 松本輝寿・金子安雄・寺尾 健・川島 毅：海水交流に関する現地観測，第21回海岸工学講演会論文集，pp. 291~296, 1974.
- 7) 藤森研一・稲富隆昌・内田豊彦・園山哲夫：伊勢湾水理模型実験と現地調査(第2報)—伊勢湾の海水交流について—，第23回海岸工学講演会論文集，pp. 519~523, 1976.
- 8) 柏井 誠：潮汐による海水交流について—その1。海水交換の概念と海水交換率，1977年度日本海洋学会春季大会講演要旨集，pp. 96~97, 1977.
- 9) 例えば、堀口孝男：汚染物質拡散の数値解法について，第16回海岸工学講演会論文集，1969.
- 10) 例えば、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について—，港研報告，第14巻1号，昭和50年3月，
- 11) 宇野木早苗・岸野元彰・岡見 登：伊勢湾の平均的海況と交流要因，伊勢湾における汚濁物質の循環機構

東京湾の海水交換に関する水理模型実験

- に関する調査報告書, 産業公害防止協会, pp. 31~130, 1974.
- 12) 金子安雄・堀江 毅・上野信行・久保正則: 東京湾口航路潮流模型実験, 港研報告, Vol. 12, No. 1, 1973.
- 13) 金子安雄・堀江 毅・村上和男・亀山 豊: 東京湾の潮流による物質拡散の水理模型実験, 港研報告, Vol. 13, No. 3, 昭和49年9月。
- 14) 小金井正一・堀越増興: 東京湾口の海況—東京湾口の研究(昭和34年)—その3—日本海洋学会誌創立20周年記念論文集, pp. 90~97, 1962.
- 15) Sugimoto T.: Effect of boundary geometries on tidal currents and tidal mixing, Journal of the Oceanographical Society of Japan, Vol. 31, pp. 1~14, 1975
- 16) 金子安雄・堀江 毅・村上和男・亀山 豊・入尾野幸雄: 大阪湾の潮流と物質拡散に関する模型実験(第2報)—主要汚染源の湾内汚染に与える影響—, 港研報告, Vol. 15, No. 2, 1976.