

閉鎖性領域内の海水交換特性

Characteristics of Sea Water Exchange in Semi-Enclosed Areas

高山知司*、吉岡洋**、大栗剛***

Tomotsuka Takayama, Hiroshi Yoshioka, Tsuyoshi Oguri

Abstract

Characteristics of sea water exchange between a semi-enclosed area (narrow channel or harbor) and its outer region in coastal sea was investigated by a numerical simulation. The flow was calculated with nonlinear baroclinic two layers model and mixing process was analyzed with 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 an important role for it. Small jetty type structures which disturb the dominant oscillating flow at a mouth of harbor change the residual flow pattern and make remarkable effect on water exchange.

Keywords: water exchange, residual flow, residence time, tidal mixing

1. はじめに

我が国の沿岸海域では、東京湾横断道路、関西国際空港2期事業および中部新国際空港などが建設または計画されているように、大規模な開発が続いている。しかし、沿岸海域は居住域に近接して、人間活動の影響を受け易いため、そこでの水質汚染は深刻な社会問題となっている。本研究はその適切な対応策を検討するために、閉鎖性領域の海水交換機構をオイラー・ラグランジェ法（潮流の場を非線型多層モデルで計算し、その場に粒子をおいてラグランジェ的に流れに乗った軌跡を求めて、海水交換を再現する）を用いた数値モデルによって究明するものである。本計算法は、海峡を通しての海水交換量の決定方法として、今里・淡路らによって開発され、まず明石海峡や鳴門海峡に適用されたものであり^{1) 2) 3)}、その後沿岸—外洋交換過程や、大洋のグローバルな海水交流の研究に適用されて、多くの成果を上げてきた。しかし港湾区域のような小スケールの問題に対しては、適用例はまだ少なく、現場環境に適合した改良が求められている。そこで、本研究では、沿岸海域において開発工事によって出現した長水路型や港湾型の閉鎖性領域の海水交換特性について調べている。

2. 計算法

2.1 地形と境界条件

潮流計算は、西側のみ開いた閉鎖領域を2層レベルモデル(格子間隔 40m、縦 30×横 150 格子、上層 10m+潮位、下層 10m)で行った。対象海域は中央の縦 30×横 50 格子内であるが、そこに安定した潮流の場を作るために両側に縦 30×横 50 格子の計算領域をとり、西側の開境界に振幅 37cm の M2 分潮の水位を強制的に与え、東端はスリップ境界で自由に反射させて、定在波的な振動を励起させた。対象領域に島に挟まれた長水路や掘り込み港湾地形を設け、陸地境界ではノンスリップ条件を、その他の境界ではスリップ条件を与えている。(図-1)

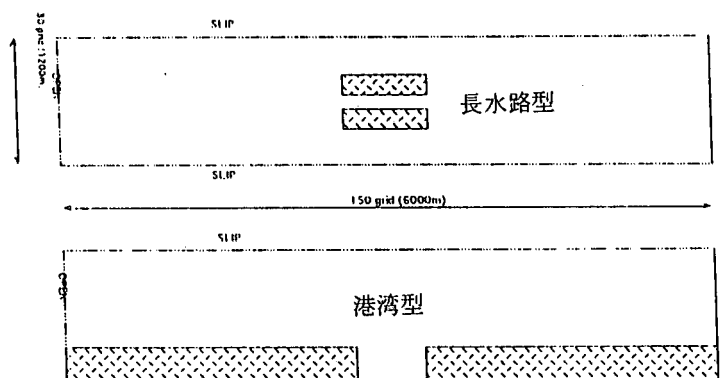


図-1 地形条件および境界条件

* フェロー 京都大学防災研究所水災害研究部門 (611-0011 宇治市五ヶ庄)

** 京都大学防災研究所水災害研究部門

*** 学生会員 京都大学大学院

2.2 基礎方程式

流速場の計算は、タイムステップ6秒で上下2層それぞれの水平成分 u と鉛直成分 w を次の方程式によって求めている。

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla_H \mathbf{u} + w \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial z} + f \mathbf{k} \times \mathbf{u} = -\frac{1}{\rho} \nabla_H P + \nu_H \nabla_H^2 \mathbf{u} + \nu_z \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial z^2} \dots (1)$$

$$\frac{\partial P}{\partial z} = -\rho g \dots (2)$$

$$\nabla_H \cdot \mathbf{u} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \dots (3)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla_H \rho + w \frac{\partial \rho}{\partial z} = k_H \nabla_H^2 \rho + k_z \frac{\partial^2 \rho}{\partial z^2} \dots (4)$$

式(1)は水平方向の運動方程式、式(2)は鉛直方向の運動方程式、式(3)は連続式、式(4)は熱・物質の拡散方程式をそれぞれ表している。 P は圧力、 k は鉛直単位ベクトル、 ρ は海水の密度、 H は水深、 $f=8.2 \times 10^{-5} \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ はコリオリパラメータ、 $\nu_H=K_H (=10^4 \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1})$ は水平渦動粘性係数、 $\nu_z=K_z (=1 \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1})$ は鉛直渦動粘性係数である。

2.3 粒子追跡計算

時刻 t 、位置 X における流速 $U(X, t)$ は

$$\frac{dX}{dt} = U(X, t)$$

従って、

$$X - X_0 = \int_{t_0}^t U(X, t) dt$$

となり、これを4次精度の Runge Kutta 法によって積分すると、ある時刻における粒子位置 $X(t)$ と、任意の位置、時刻における流速 U がわかれば、時刻 $(t+\Delta t)$ における粒子位置 $X(t+\Delta t)$ は、

$$X(t+\Delta t) = X(t) + \frac{1}{6}(k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4)$$

によって求められる。

ただし、

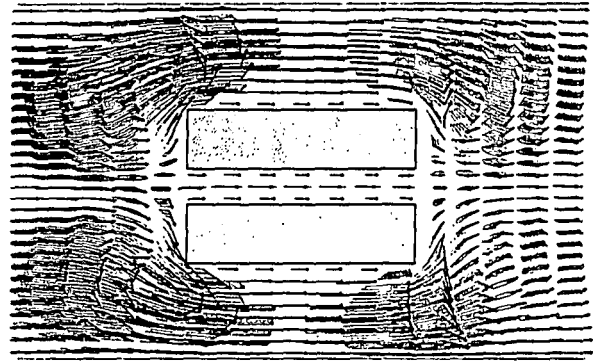
$$k_1 = U(X(t), t) \Delta t$$

$$k_2 = U\left(X(t) + \frac{1}{2}k_1, t + \frac{1}{2}\Delta t\right) \Delta t$$

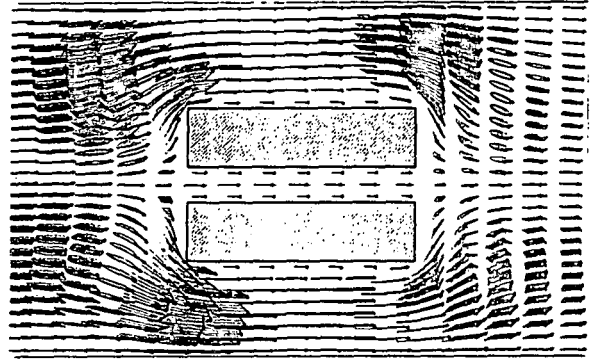
$$k_3 = U\left(X(t) + \frac{1}{2}k_2, t + \frac{1}{2}\Delta t\right) \Delta t$$

$$k_4 = U(X(t) + k_3, t + \Delta t) \Delta t$$

Δt をむやみに大きくとると $X(t+\Delta t)$ が $X(t)$ の存在する格子の外に出てしまっていて、流速の補間誤差が大きくなるので、計算領域内の最大流速場 (20cm/s) でも格子内 (40m)にとどまる時間刻み (3 min) で粒子追跡を行った。

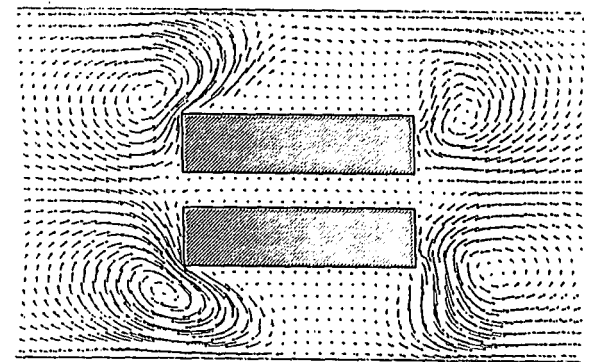


(1) 上層

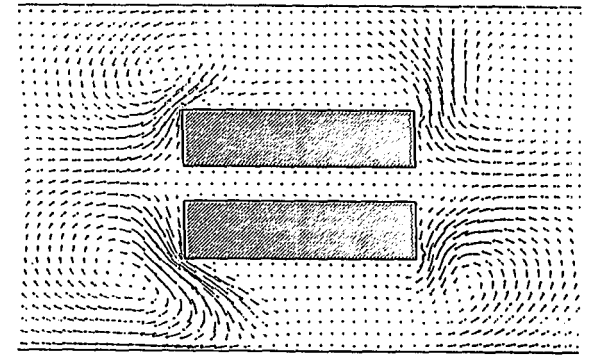


(2) 下層

図-2 15分間隔の粒子追跡図



(1) 上層



(2) 下層

図-3 1周期間隔の粒子追跡図

3. 長水路型の数値シミュレーション

3.1 粒子追跡結果

静止状態から流速場を計算した結果、第2周期目ではほぼ安定し、第5周期目にはほとんど定常状態に達していることが確認できたので、粒子追跡には第6周期目の流速場を繰り返し用いた。

図-2は、4周期間に互って粒子追跡をしたもので、矢印は、各粒子の最初に存在した位置と4周期後の位置を結んだものである。また、図-3は4周期間に互る粒子の運動を1周期ごとにプロットして、残差流だけを表現している。上下層ともに長方形の島を囲むように残差流の渦が4つ形成されている。時計回りの渦では上層では渦の中心に粒子が収束し、下層では渦の中心から粒子が分散している。逆に反時計回りの渦については上層で分散、下層で収束をしている。また上下の収束渦と分散渦の中心の位置が若干ずれていて、渦の中心が水深によって移動している。長水路内では潮流による往復流があるにもかかわらず、粒子は4周期後には元の位置からわずかに西側に移動しているだけである。

3.2 鉛直流速分布

第6周期目の流速場における上層と下層の境界面における1周期平均鉛直流速の分布を図-4に示す。実線は鉛直上向きの流速、破線は鉛直下向きの流速を表している。長水路内では鉛直方向の流速は存在せず上層と下層の間での海水交換はほとんど行われていない。長水路外の海域では島の角に強い上昇スポットが存在し、時計回りの水平残差流の渦が存在したところでは下降流域が見られる。逆に反時計回りの水平残差流の渦が存在したところでは島角の上昇スポットと渦に伴う上昇域とが合体して強くて大きな上昇域が形成されている。ここで問題とされる上昇スポットの生成メカニズムについては、角部では順圧勾配力と遠心力の釣り合いによって海水は流れているが、海底では摩擦によって遠心力が弱められバランスがくずれて、摩擦層内の海水は角部へ押され、上昇流が形成されると考えられる。⁴⁾

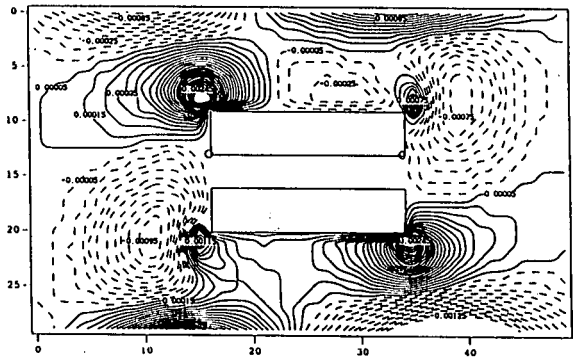


図-4 1周期平均鉛直流速分布

3.3 海水交換特性

3.1で見られるように、長水路内では潮流が発達しているのにも関わらず残差流は微弱で海水交換はそれほど期待できない。逆に島角付近ではそれ程潮流は目立たないにも関わらず地形性渦流や水平残差流が発達して海水交換が良いことがうかがえる。潮流場における海水交換は、これらの流れに依存するのであって潮流の強さに単純に依存していないことが特徴的である。そこで最も汚染度の高いと思われる水路中央部での滞留時間を以下のように求めてみた。粒子追跡による4周期間での粒子移動距離から粒子の平均移動速度を出して、粒子が外海に流出するまでにかかる時間を計算すると、上層では中央の滞留時間が59.3(日)に対し、両側の粒子が172.7(日)と非常に長く、下層では中央の粒子が90.5(日)で両側の粒子が271.6(日)となり、下層の方が上層と比べてかなり海水交換が悪いことがわかる。

4. 港湾型の数値シミュレーション

4.1 粒子追跡結果

次に、港湾型地形について基本型として矩形の掘り込み湾型のTYPE1、さらにこの基本型の湾口両端部を外海に突出させたTYPE2の2種類について海水交換特性を調べた。UENOら⁵⁾が湾口の先端部に出っ張りを付けることで海水交換が良くなることを報告しているので、TYPE2はその原理を究明するために設けたモデルであ

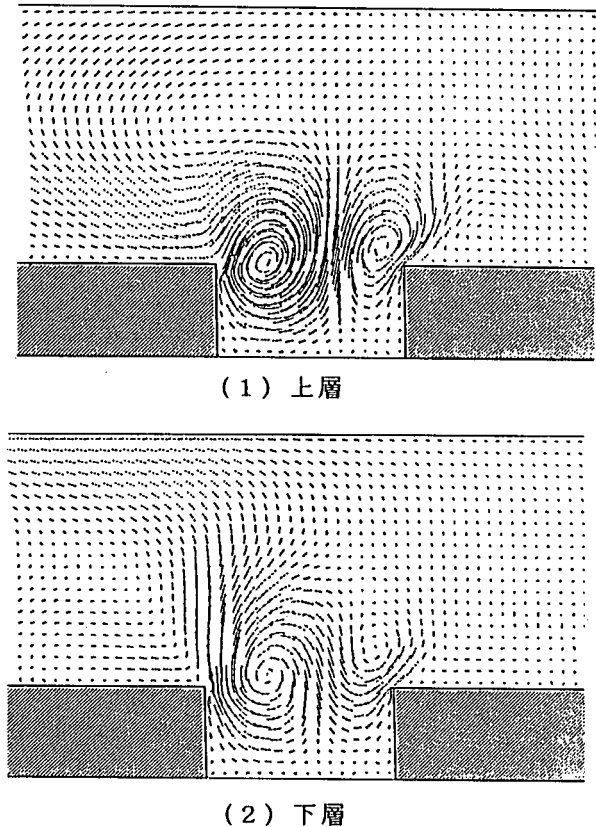


図-5 TYPE1の1周期間隔の粒子追跡図
(12周期間)

る。長水路型のとときと同様に港湾型においても流速場は第5周期目あたりで定常状態に達したので、第6周期目の流速場を繰り返し用いて粒子追跡を行っている。

TYPE1、TYPE2の12周期間(6日間)に亘る粒子追跡結果を1周期ごとにプロットして残差流の分布を求めたのが図-5、6である。両者ともに湾口中心付近から湾内に流入してきた粒子が渦を巻くような形で東西に別れて湾外に流出している様子が現れている。西側の渦の中心は湾内と外海の境界線上にあり、東の渦の中心はそれより少し沖側に存在する。この2つの渦が東西に対称な形ではなく西側の渦が東側に比べて大きくなっているのは、境界条件の与え方が西端で開境界であるに対して東端は閉じているという非対称条件によるためと思われる。また上層と下層の渦を比べると下層の渦は少し小さ目で、渦の中心の位置も若干ずれており水深によって渦の中心位置が移動している。西側の渦では、周辺海域の粒子が渦の中心に収束し、下層では逆に外海に粒子を分散しており、東側の渦では上層で粒子を外海に分散し、下層で収束している様子がみられる。

TYPE2は港湾内の海水の流入出形態はTYPE1と同様であるが、湾口部に発生した残差渦が一回り大きくなっており、渦の中心位置もTYPE1と比べて若干沖に移動している。

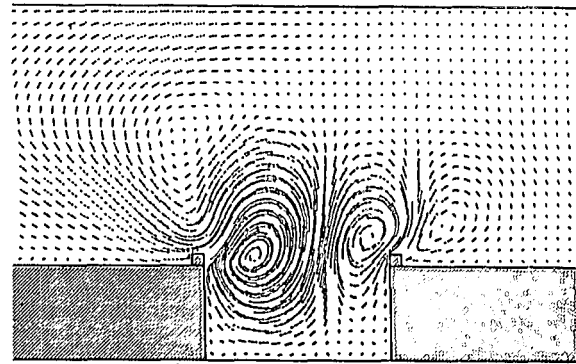
4.2 鉛直流速分布

第6周期目の流速場における上層と下層の境界面における鉛直流速の1周期平均した分布が図-7である。TYPE1、TYPE2ともに港口の角付近に強い上昇スポットが存在した。中央やや西側よりの強い時計回りの渦に対応して下降流域がある。隣り合う東側の弱い反時計回りの渦に対応する上昇流域は角の上昇スポットと合併して西側の下降流域に匹敵する規模である。このように、陸地の角に水平渦を伴わない強い上昇スポットが発生することと、その付近にもっと大きいスケールで残差流渦が存在して時計回りの渦は下降流を、反時計回りの渦は上昇流を伴い、後者は上昇スポットと合併してより広範囲の上昇流域を作り出すことは長水路型地形においても見られる特徴である。

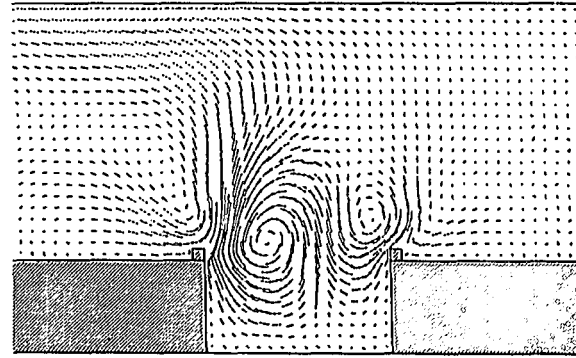
次に上層と下層間での海水交換時間について調べる。最大鉛直流速が分布している海域で2層間を粒子が移動するのにかかる時間を求めることにする。鉛直方向の平均流速は境界面での流速の1/2で近似して、最大鉛直流速 $5.0 \times 10^{-4} \text{ (cm} \cdot \text{s}^{-1})$ の半分の流速 $2.5 \times 10^{-4} \text{ (cm} \cdot \text{s}^{-1})$ で2層間(10m)の移動時間を求めたところ約46.3(日)かかることになる。

TYPE1とTYPE2の鉛直流速分布を比較すると分布形態は同様であるが、TYPE2では平均鉛直流速が $5.0 \times 10^{-4} \text{ (cm} \cdot \text{s}^{-1})$ の分布範囲がTYPE1と比べてかなり大きくなっていることがわかる。また全体的な鉛直流速分布も広がっていることから、TYPE2はTYPE1と比べて上下層間の海水のやり取りが盛んになっていることがわかる。

4.3 海水交換特性

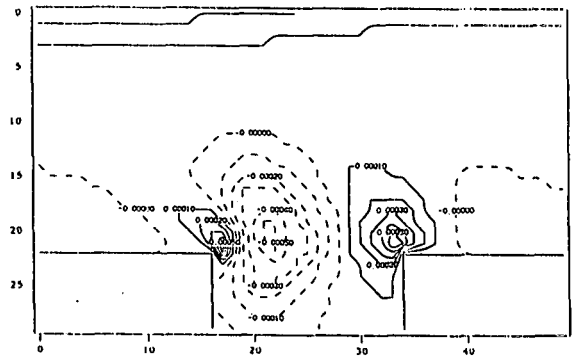


(1) 上層

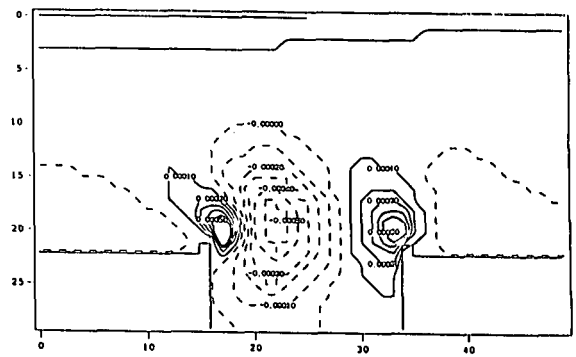


(2) 下層

図-6 TYPE2の1周期間隔の粒子追跡図
(12周期間)



(1) TYPE1



(2) TYPE2

図-7 1周期平均鉛直流速

港湾内での一般的な海水交換は、水平循環流が湾内を循環する間に潮流とそれに伴う渦流や乱流によって内湾水の一部を取り込んで外海に運び出すとともに、それと等量の外海水を湾内に引き入れることで行われている。湾口の地形を変えた2種類の港湾について粒子追跡図より4周期(2日)、8周期(4日)、12周期(6日)後の上層、下層の湾内での流出粒子数と流入粒子数を表-1、表-2にまとめている。

それによると上層では TYPE1、TYPE2 ともに流入粒子数が流出粒子数を上回っており、下層においては流出粒子数が流入粒子数を上回っている。これは上層で湾内へ海水が流入して、下層では外海へ流出していることを表わしている。そこで上層と下層の両層での総流出粒子数と総流入粒子数を比べてみるとほぼ同数になっており、上層と下層で湾内の粒子数がほぼ保存されている。このことは質量保存式から当然あるべき結果であるが、1格子に1個の粗い粒子追跡で充分海水の流動を定量的に議論できることを示している。このことから湾内の海水交換率を評価するには、上層と下層での流入粒子数と流出粒子数との平均値が湾内の総粒子数に対する割合で表すこととして、1周期あたりの海水交換率を求めたものが表-3である。

TYPE1を基準にして考えると、湾口両端部が外海に突出している TYPE2 では交換率が上がっている。外海の卓越潮流方向に垂直に伸びている港口突出部分が潮流の分離を促進し、湾口付近における残差渦の強さが増加したためと考えられる。このことから海水交換を促進させるには、その海域で卓越する流れを妨げるような方向に突堤を伸ばしてやることが有効であることがわかるが、むやみに伸ばしてもいいと言う訳でもない。TYPE2の突堤をさらに伸ばしたら、残差渦自体の威力は増大したものの交換率は低下した(図省略)。これは突堤部延長によって残差渦の中心が沖の方に移動したため、渦は増大してもその効果が湾奥まで伝わらず、湾奥を含む海水交換が低下したためである。このことから、大きな残差渦の中心が湾口境界線上にのるように作れば海水交換率は良くなると思われる。

上層と下層とも流入粒子数と流出粒子数とで差が生じていたが、湾内の海水量の保存からこれらの差の分が鉛直方向の海水のやり取りを表わしていると思われる。この考えに基づき湾内の鉛直方向の海水交換率を求めたのが表-4である。その大きさは湾口を通しての水平方向の交換率の半分近くになっている。鉛直流速は一部を除くと微弱であるのに鉛直方向の海水交換がこのように大きいのは、水平方向の交換が湾口断面(幅 640m 深さ 20m)を通してなされるのに対し、鉛直方向の交換は港湾全域(幅 640m、奥行き 320m)で行われるためである。また水平方向の海水交換では TYPE2 が TYPE1 に勝っていたが、鉛直方向の海水交換においては、TYPE1の方がTYPE2より大きい。4.2で述べたように、対象領域全体ではTYPE2の方が鉛直混合も盛んであるが、水平渦が沖に少し移動したため、湾内に限って交換量を求めるとTYPE1のほうが勝るのである。

次に、最初に湾内に存在した粒子の湾内残存率の時間経過を図-8に示す。ここでは1/48周期(15分)間隔で湾内における残存率をプロットして、各潮時における残存率の変化を示している。それによると、最初の1周期後の残存率は1.0で、湾内水は1周期後にはすべて湾内に戻って、湾内の海水交換がなされていないことになるが、これは1格子1個の粗い粒子配分のためである。しかし、その後は1周期経つごとに残存率は徐々に下がっており、湾内での海水交換が進んでいることを表している。1からこの残存率を引いた値は、先に粒子追跡図より流出粒子数だけを数えて求めた交換率に相当し、この折れ線の傾きの絶対値を海水交換の進行速度と考えることができる。

表-1 流出入粒子数(上層)				
	追跡期間 (周期) P	総粒子数 N_o	流出粒子数 N_{OUT}	流入粒子数 N_{IN}
TYPE1	4	128	5	8
	8	128	10	15
	12	128	15	24
TYPE2	4	128	7	9
	8	128	15	17
	12	128	18	26

表-2 流出入粒子数(下層)				
	追跡期間 (周期) P	総粒子数 N_o	流出粒子数 N_{OUT}	流入粒子数 N_{IN}
TYPE1	4	128	5	3
	8	128	11	6
	12	128	18	10
TYPE2	4	128	6	5
	8	128	12	7
	12	128	17	11

表-3 水平交換率							
	追跡期間 P (周期)	湾内総粒子数 $N_o=N_o^U+N_o^D$	総流出粒子数 $N_{OUT}=N_{OUT}^U+N_{OUT}^D$	総流入粒子数 $N_{IN}=N_{IN}^U+N_{IN}^D$	平均交換粒子数 $N_{AV}=(N_{OUT}+N_{IN})/2$	交換率(%) EN=	
TYPE1	4	256	10	11	10.5	1.03	
	8	256	21	21	21.0	1.03	
	12	256	31	34	32.5	1.08	
TYPE2	4	256	13	14	13.5	1.32	
	8	256	27	24	25.5	1.25	
	12	256	35	37	36.0	1.17	

表-4 鉛直交換率							
	追跡期間 P (周期)	湾内総粒子数 N_o	下層流出粒子数 $N_{OUT}^D=N_{OUT}^D-N_{OUT}^U$	上層流入粒子数 $N_{IN}^U=N_{IN}^U-N_{IN}^D$	平均交換粒子数 $N_{AV}=(N_{OUT}^D+N_{IN}^U)/2$	交換率(%) EN=	
TYPE1	4	128	3	2	2.5	0.49	
	8	128	5	5	5.0	0.49	
	12	128	9	6	7.5	0.49	
TYPE2	4	128	2	1	1.5	0.29	
	8	128	2	5	3.5	0.34	
	12	128	8	6	7.0	0.46	

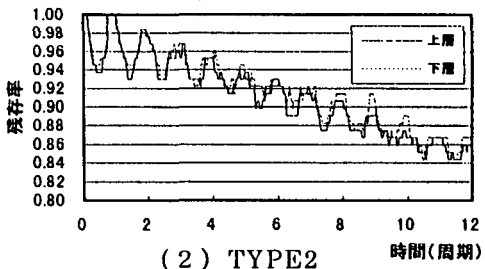
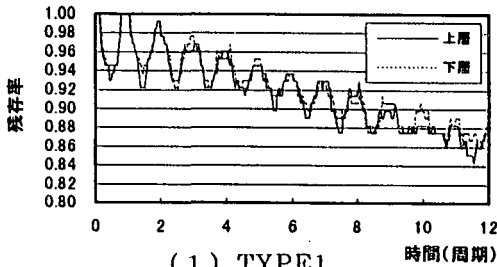


図-8 湾内残存率図

以上の結果は港湾全体の海水交換特性を表すものであるが、実際に問題になるのは港湾内の局所的な水質汚染である。そこで粒子追跡を開始して 12 周期後に各格子内に存在する粒子がそれまで湾内に滞留していた時間を求め、格子内で平均を取り、12 周期間に対する割合を求めたのが図-9 である。これは港湾内の停滞水の分布を表している。色が濃いところほど湾内での滞留時間が長い。上層では、湾口中央部に湾内滞留時間が短い粒子が分布しており、この辺りでは水質の良い海水が存在していることがわかる。下層では、湾口中央部から湾奥や西湾岸の方にかけて湾内滞留時間の短い粒子が分布している。これは湾口上層中央部から沈降しつつ湾内に流入した粒子が湾奥方向に分散しているものと思われる。

5.まとめ

長水路内と港湾内における海水交換特性を 2 層モデルによる潮流計算と粒子追跡を用いて調べ、以下の結論を得た。

「長水路型地形」

- ・長水路内では潮流がある程度発達しているにもかかわらず、海水はほとんど同じ所を往復運動し、わずかに西方移動しているだけで、長水路内での海水の滞留時間は非常に長くなっている。
- ・長水路内での鉛直流速分布は見られず鉛直方向の海水交換もほとんどない。
- ・島角付近の上昇域とその外側の残差流渦に伴う上昇下降流域とが複合して、島の回りに鉛直循環を含む活発な残差流循環が形成されている。

「港湾型地形」

- ・湾内全体としての海水交換は上層で湾内に流入した海水の一部が下層で湾外に流出している。
- ・湾口中央部から湾奥にかけて比較的水質の良い海水が存在している。
- ・潮流の流れに逆らうような地形によって湾口渦は増大し湾内での海水交換を促進している。
- ・湾内の海水交換率は湾口渦の大きさとその中心の位置に依存する。
- ・上層と下層の流入粒子数と流出粒子数の差から鉛直方向の海水交換が予想以上に活発であると考えられる。

鉛直流速は水平流速に比べて非常に小さいため鉛直方向の海水交換は見落としがちであるが、鉛直方向の交換は非常に広い面積で行われているため、その速度が微小であっても無視することは出来ない。

おわりに本研究を進めるにあたり、潮流計算と粒子追跡のプログラム提供と指導をいただいた京都大学理学部海洋研究室の今里哲久教授、淡路敏之教授および秋友和典助教授に感謝の意を述べる次第である。

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 to 32.
- (2) 淡路敏之, 今里哲久, 佐藤敏 (1985): 沿岸潮汐の数値実験について 沿岸海洋研究ノート, 第 23 巻, 第 1 号, pp.35 to 47.
- (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 to 162.
- (4) Norihisa IMASATO, Shinzou FUJIO, Qian ZHANG, Toshiyuki AWAJI, Kazunori AKITOMO (1997): Three-Dimensional Numerical Experiments on Tidal Exchange through a Narrow Strait in a Homogeneous and a Stratified Sea. Journal of Oceanography, Vol.50, pp.119 to 139.
- (5) Seizo UENO, Hideo OHTANI, Fumio KANEKO (1997): Problems and Improvement Methods of Water Quality in Eutrophicated seas in Japan, pp.237 to 246.

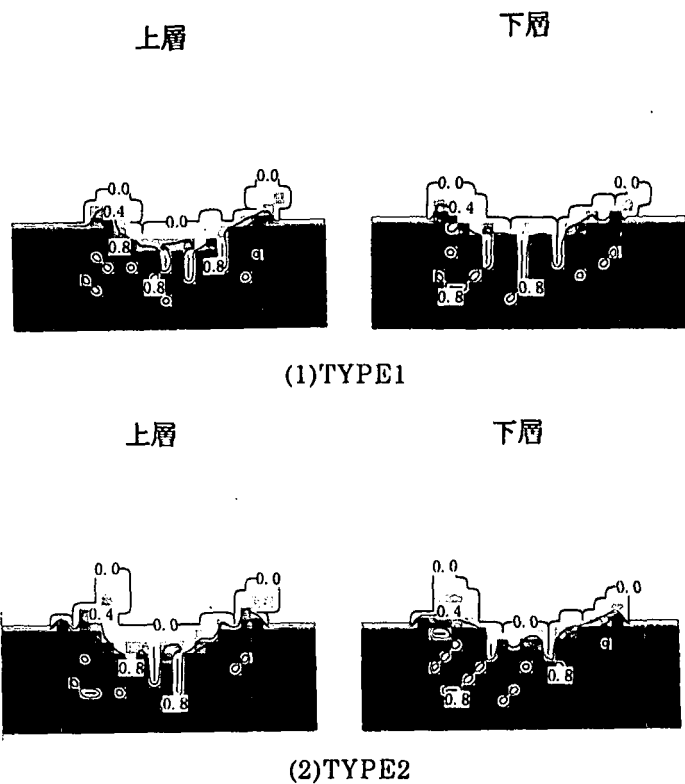


図-9 湾内滞留率分布