

東京湾の富栄養化機構の研究 (その7) 閉鎖性海域の海水交換に関する数値実験

安藤 晴夫 曾田 京三

1 はじめに

東京湾の臨海部では、副都心開発計画をはじめとする整備事業が予定あるいは実施され、それに伴って海浜公園等の親水施設の造成も進められている。環境行政の側では、こうした状況を踏まえ、従来の広域的な浄化対策に加えて、個々の親水施設周辺の局所的な海域を対象として、利水目的や地域特性に応じた、よりきめの細かい水質改善方法の検討を行っている。

こうした局所的な海域に的を絞った水質改善方法を考える場合、まず浄化対象海域(内海)とそれに隣接する周辺海域(外海)との間での海水や汚濁物質の挙動を把握する必要がある。すなわち、内海水と外海水の水質の差と相互の交換量が内海の水質を決定する重要な要因となるからである。しかし、現在整備計画段階にある海域については、実際の水質や水理量を観測することができないので、これらの点を解明するためには、水理模型実験や電子計算機による数値実験によらざるを得ない。

ここでは、こうした海域間での海水の挙動、交換過程について検討するために行った数値実験の結果について報告する。

2 数値実験の方法

(1) モデル海域の作成

数値計算に用いたモデル海域の水平地形を図1に示す。これは、東京湾臨海部有明地区周辺の将来地形を、現況の海図及び臨海部副都心整備計画のイメージ図を参考にしてモデル化したものである。ここでは、図中の太線で囲まれた300×300mの領域を内海、それ以外を外海とする。格子間隔は、X、Y両方向とも37.5mで一様、格子数71×36(約2.5×1.3km)、鉛直方向には1層である。水深は、境界Aの付近が最も深く10m、内海部では断面1付近が4mでそれから奥にむかって段階的に浅くなって

いる。なお、計算実行中に潮位が水深を下回り干潟部分が出現するのを防ぐため最も浅い部分でも0.55mとした。

(2) 数値実験

数値実験の全体の処理の流れを図2に示す。

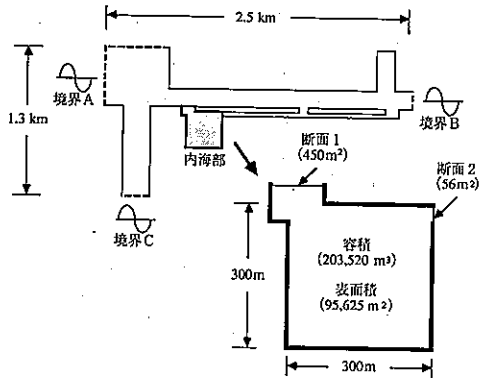


図1 モデル海域

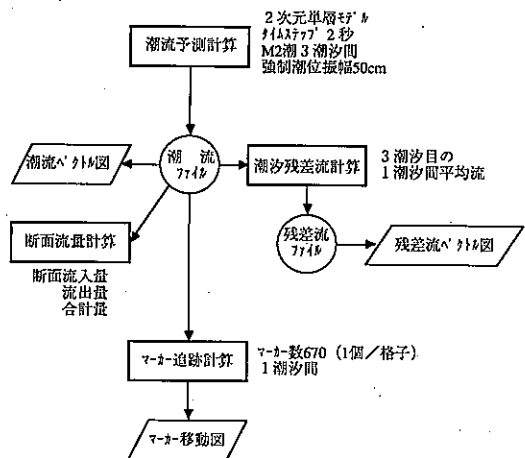


図2 数値実験のフロー

ア) 潮流予測計算

潮流予測計算は、環境保全局環境情報管理システムの3次元流動シミュレーションプログラム(COSMOS)を使用して行った。このプログラムは、差分法多層レベル潮流予測モデルに基づいて作成されたもので、干潟領域を含む計算や塩分、水温による密度流計算も可能なように設計されている。しかし、ここでは最も単純な1層潮流予測モデルとして使用し、計算を行った。

主な計算条件は以下の通りである。

- * 風の流れに対する影響(吹送流)は考慮しない。
- * 陸上や河川からの流入負荷はないものとする。
- * 計算のタイムステップ: 2秒。
- * 計算期間: 3潮汐(129600秒)。
- * コリオリの係数: $8.45 \times 10 \text{ rad/秒}$ 。
- * 水平渦動粘性係数: $3.0 \times 10 \text{ cm}^2/\text{秒}$ 。
- * 海底摩擦係数: 0.0026。

境界条件としては、図1のA, B, C3本の開境界線上の格子点に片振幅0.5m, 周期43200秒(M2潮)の強制潮位振幅を与えた。このとき各開境界線上は同一位相とし、3本の開境界線には表1に示す3通りの位相を与え、

表1 数値実験の設定ケース

	潮位変動の位相(度)		
	境界A	境界B	境界C
ケース1	0	0	0
ケース2	0	-1	0
ケース3	0	-1	-1

それぞれの計算ケースとした。その地点間の差を位相差とよび、地点間の潮の干満の時間差を表わす。この実験の場合、潮汐周期は43200秒であるから、1度の位相差は120秒(43200/360)に相当する。すなわちケース2では、境界B(位相-1度)は境界A, C(位相0度)に比べて120秒遅く潮の干満が起きるという条件を設定したことを意味する。

イ) 潮汐残差流計算

潮汐残差流は、潮流ファイルの1潮汐間の流速を平均して求めた。

ウ) 断面流量計算

潮流ファイルから1潮汐間の潮流データを入力し、図

1に示す断面1及び断面2での流入量と流出量を積算した。

エ) マーカー追跡計算

流体力学における流体運動の扱い方には、オイラー的な方法とラグランジュ的な方法の2通りがある。前者は固定した座標点でそこを通過する流体粒子の運動状態の時間的変化を記述する方法で、ア)の潮流予測モデルは、こうした立場で組み立てられている。後者は、流体粒子それ自体を追跡し、その運動状態の時間的変化を記述する方法である。

ここでは、今里、淡路らが、海峡で結ばれた2つの海^の域間の海水交換過程を解明するために行った、オイラー・ラグランジュ法と呼ばれる上記の両者を組合せた手法で数値実験を実施した。具体的な手順はつぎの通りである。

モデル海域の座標に多数の識別可能な海水粒子(マーカー)を配置する。潮流ファイルから先頭の流速データを入力し、配置された座標に応じて、これらのマーカーに流速を与える。ただし、潮流ファイルからは格子状に配置された流速定義点での流速だけしか得られないので、内挿により各マーカーが存在する座標の流速を計算する。内挿法を図3に示す。マーカーの座標Pが流速U(x軸方向の流速)の4つの定義点a, b, c, dで囲まれ、その点での流速が U_a, U_b, U_c, U_d とすると、座標Pでの流速は、

$$U_p = W_a U_a + W_b U_b + W_c U_c + W_d U_d$$

と表わされる。この式のWは重みで、図3に示す方法で

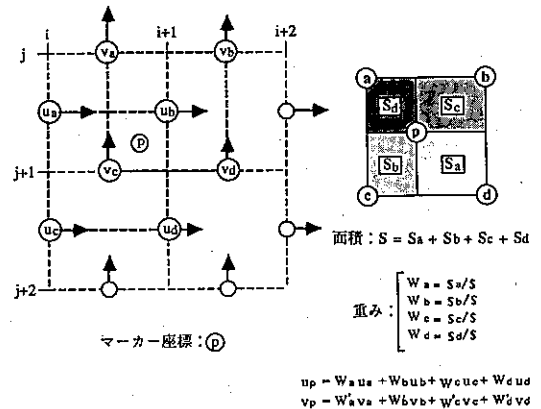


図3 流速の内挿法

計算した。こうして内挿された流速は、周囲の線形補間となっている。流速V (y軸方向の流速) に関しても全く同様である。

次に、マーカーの座標を2番目の流速データの時点まで、それぞれの流速で直線的に移動させる。以上の操作を潮流ファイルが終わるまで1潮汐間繰り返し、マーカーの挙動を観察する。

3 数値実験の結果と考察

(1) 潮流予測計算

計算開始から2潮汐後(潮流ファイルの先頭)の潮位分布を図4に示す。内海部とその前面の海域ではケース2, 3のパターンは、ほぼ同一である。図5に下げ潮最強流速時の潮流ベクトル図を示す。ケース3では境界AからCへの流れが顕著であるが、内海部とその前面の海域での流れは、どのケースもあまり変化が見られない。したがって、この地形ではA, B間の潮汐の位相差が内海部周辺の流況に与える影響は小さいと考えられる。

(2) 潮流残差流計算

図6に各ケースの残差流ベクトル図を示す。この結果によれば、内海部分ではケースによらず、断面1から流入し、断面2から流出するというパターンが見られ、潮流ベクトルについて見られたように、境界での位相差の変化は残差流パターンにほとんど影響しない。内海部での流速は、奥の浅い部分(23, 23)で最大となり、その値は約0.6cm/秒である。この速度は1潮汐間の到達距離に換算すると約260mで内海部の1辺よりも小さい。計算領域全体では、ケース1と2は、ほぼ同じパターンを示しているが、ケース3のみ、境界AからCへの反対向きの流れが見られる。

(3) 断面流量計算

表2は各ケースごとの断面1と断面2における流入量、

表2 断面通過流量

	断面番号	流入量	流出量	合計量
		m ³ /潮汐		
ケース1	1	107,200	101,800	5,400
	2	6,300	11,700	-5,400
ケース2	1	101,000	95,500	5,500
	2	1,000	6,500	-5,500
ケース3	1	100,500	95,400	5,100
	2	900	6,000	-5,100

流出量とその合計量である。内海部の表面積は95625m²(図1)で、また干満による潮位差は1mであるから、海面が平面とすれば、その間に変動する水量は95625m³となり、表2の流入、流出量と良く一致する。合計量については、どのケースも1潮汐間に断面1から5000m³強流入し、断面2から同量流出している。この量は、内海部容積の約1/40で、断面2からの流出する海水がすべて内海水であるとすれば約20日間で内海水が流入する外海水と交換されることになる。また、境界での位相差がないケース1で、断面1, 2の流入、流出水量が他のケースより大きかった。

(4) マーカー追跡計算

初期のマーカーの配置と1潮汐後のマーカーの配置を図7に示す。この図によれば、内海部に配置されたマーカーは途中、外海部に流出しても、1潮汐後には大部分が再び内海部に戻る。これを模式化したのが図8である。この図の網かけの濃い部分に初期配置されたマーカーは、

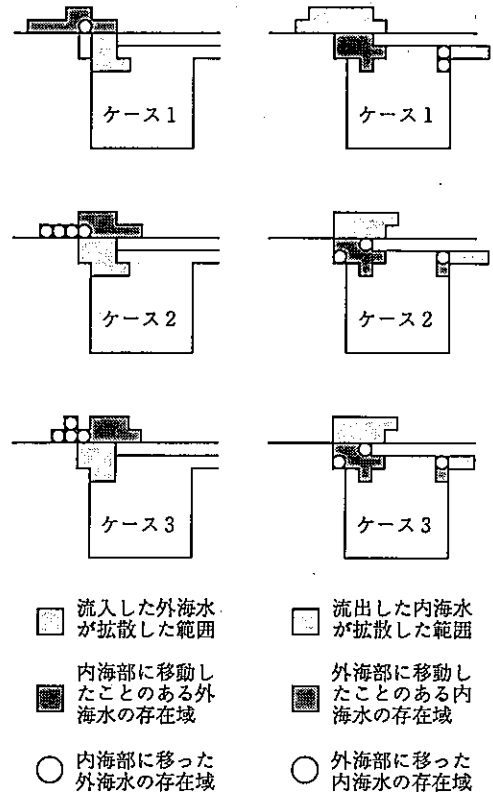


図8 海水移動の模式図

1 潮汐間に他の海域へ移動したことがあり、そのときに拡散した範囲が網かけのうすい部分である。また○に初期配置されたマーカーは、1 潮汐後の時点で、他の海域に残留していた。これによれば、1 潮汐間で海水が往復する範囲は断面近傍の狭い領域であること、実際に交換されるのは、そのうちのまた1/2以下であることがわかる。つぎに各マーカーが最初に配置された格子の体積を有する水塊として移動するものと仮定して、量的な検討を行った。

その結果を図9に示す。このグラフでは、○は内海部に存在する外海由来のマーカーの全体積、●、◆はそれぞれ断面1、2を通過後外海部に存在する内海由来のマーカーの全体積を示す。各ケースとも、内海部に存在する外海水の量は境界潮位の上昇とともに満潮時まで増加し、それ以降は減少して、潮位がゼロの時点でその量もゼロになる。ここで断面1から内海水の外海への流出がはじまり、その量は干潮時に最大となり、再び潮位とともにゼロに近づく。ただし、断面2からは、潮位の上昇時にも外海水の流入に押される様にほぼ一定量流出する。この様に内海部に流入した外海水が1 時点に存在する量は最大、ケース1で約60000m³、ケース2、3は同量で約54000m³に達する。最終的に内海部に残留する量はそれぞれ約6000m³、27000m³となる。

4 おわりに

本数値実験から以下の点が明らかになった。

(1) このモデル地形では、潮汐変動の境界A-B間の位相差の変化は、内海部の潮汐残差流にはほとんど影響しない。

(2) 1 潮汐間の平均で見れば、断面1からは流入し、断面2からは流出する。その量は1 潮汐間に約5000m³である。

(3) マーカーの追跡計算結果によれば、1 潮汐間に内海水、外海水が相互に往来する範囲は、断面近傍の比較的狭い領域に限られる。

(4) 内海部への外海水の流入量は最大で50000~60000m³に達し、その量は海域の容積の1/3~1/4になる。また残留量の容積に対する割合は、ケース1とケース2、3でそれぞれ1/30、1/8と変化が大きい、この量で内海水が外海水と入れ換わるとすると、交換率は断面流量での推定値に比べ大きくなる。

マーカー追跡法の結果は、流速ベクトル図に比べて、直感的で、より理解し易いが、マーカーを一定体積の水塊とみなして行う計算は、移動先により水深が変化するため、あくまでもおおまかな推定である。しかし、今回の実験では、流入水量の変動パターンは、潮位変動の正弦曲線に比較的良く一致し、概算的には正しいと考えられる。

今回作成したマーカー追跡プログラムを用いて、他の海域の特性についても数値実験を行っていく所存である。

なお、本研究に際しては、当研究所の非常勤研究員、長谷川賢一氏に多大な御指導を受けた。

参考文献

- 1) 今里哲久ら：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，20，1，p.19 (1982).
- 2) 平野敏行編：海の環境科学 (恒星社厚生閣).

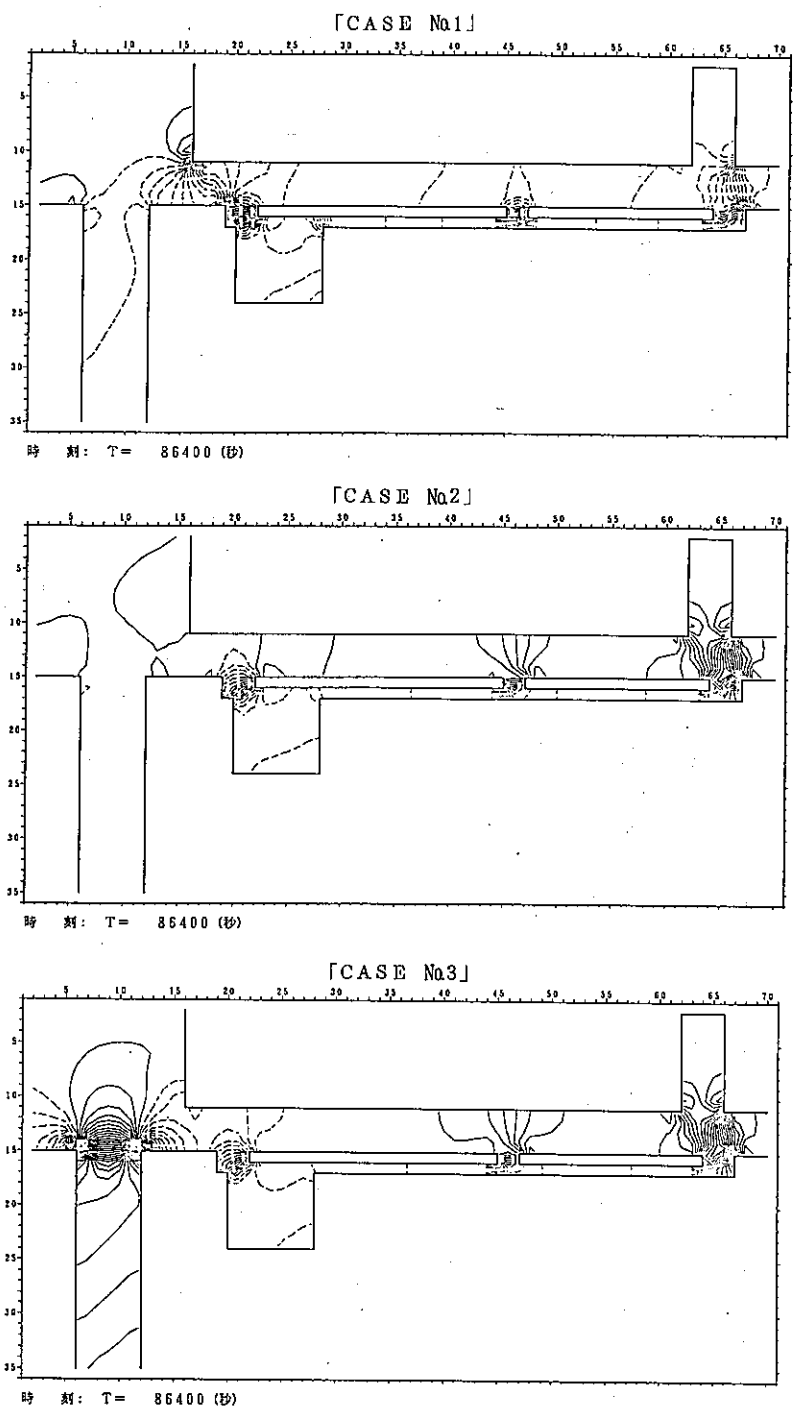


图4 潮位分布图
(实线部: 潮位 ≥ 0 , 破线部: 潮位 < 0)

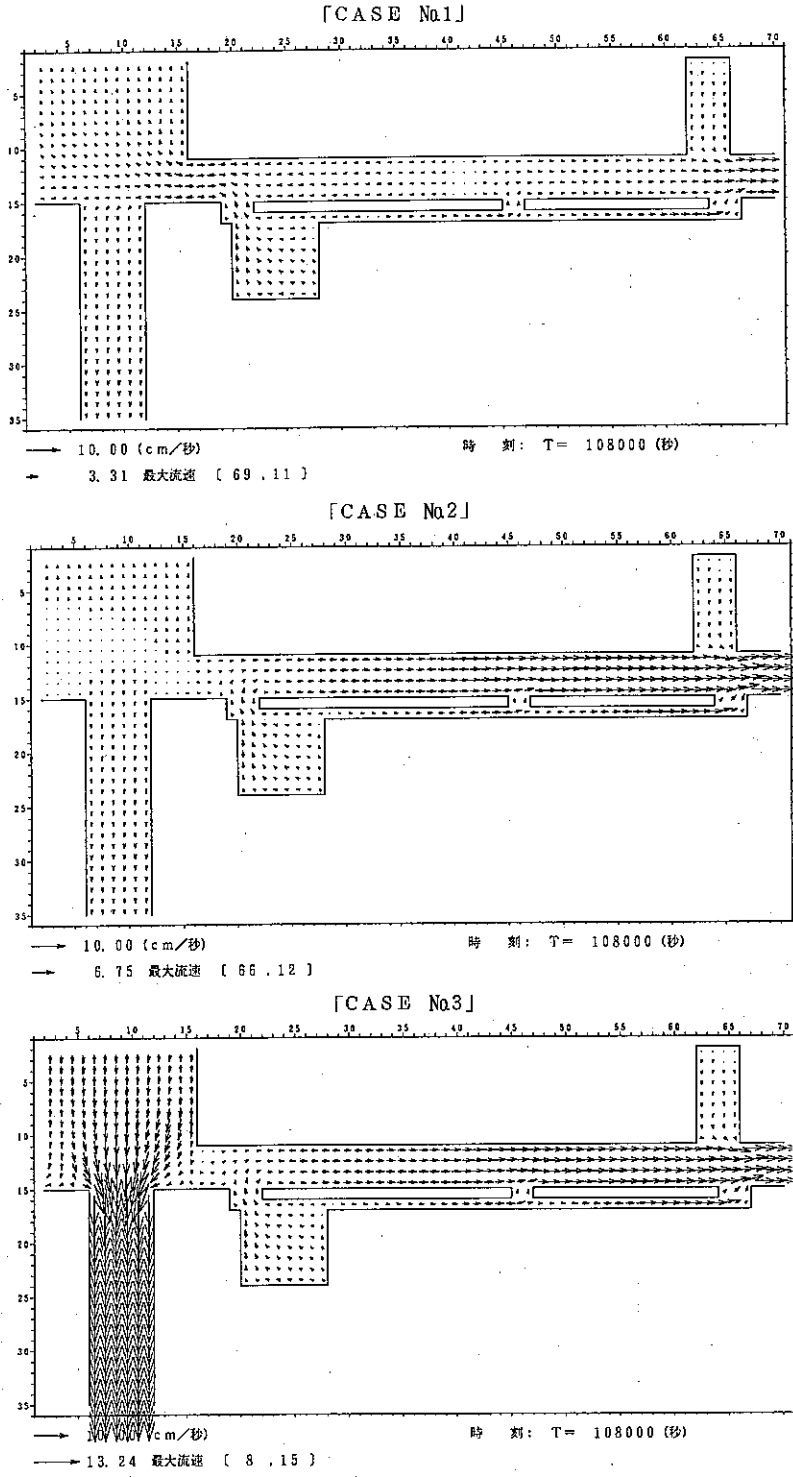


図5 流速ベクトル図 (下げ潮最強時)

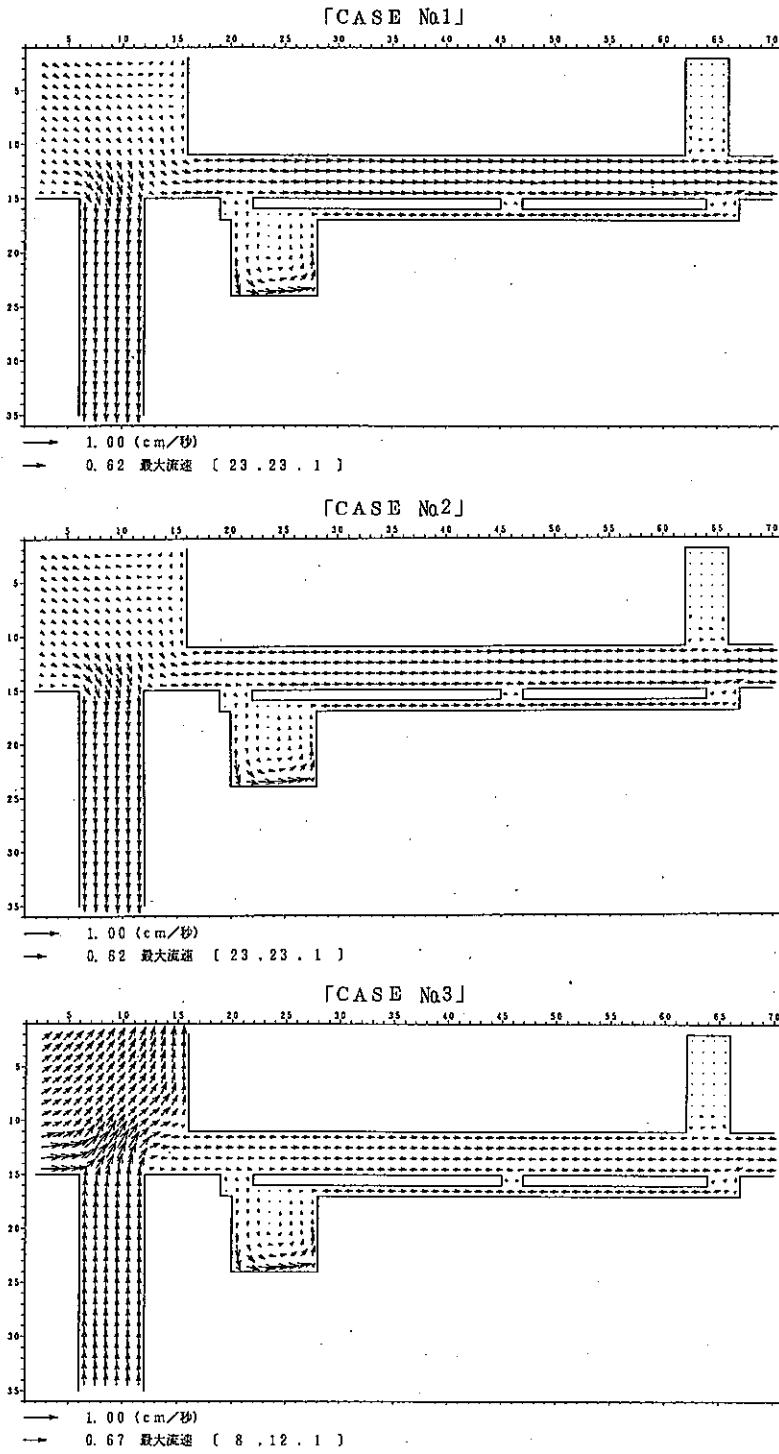


図6 残差流ベクトル図

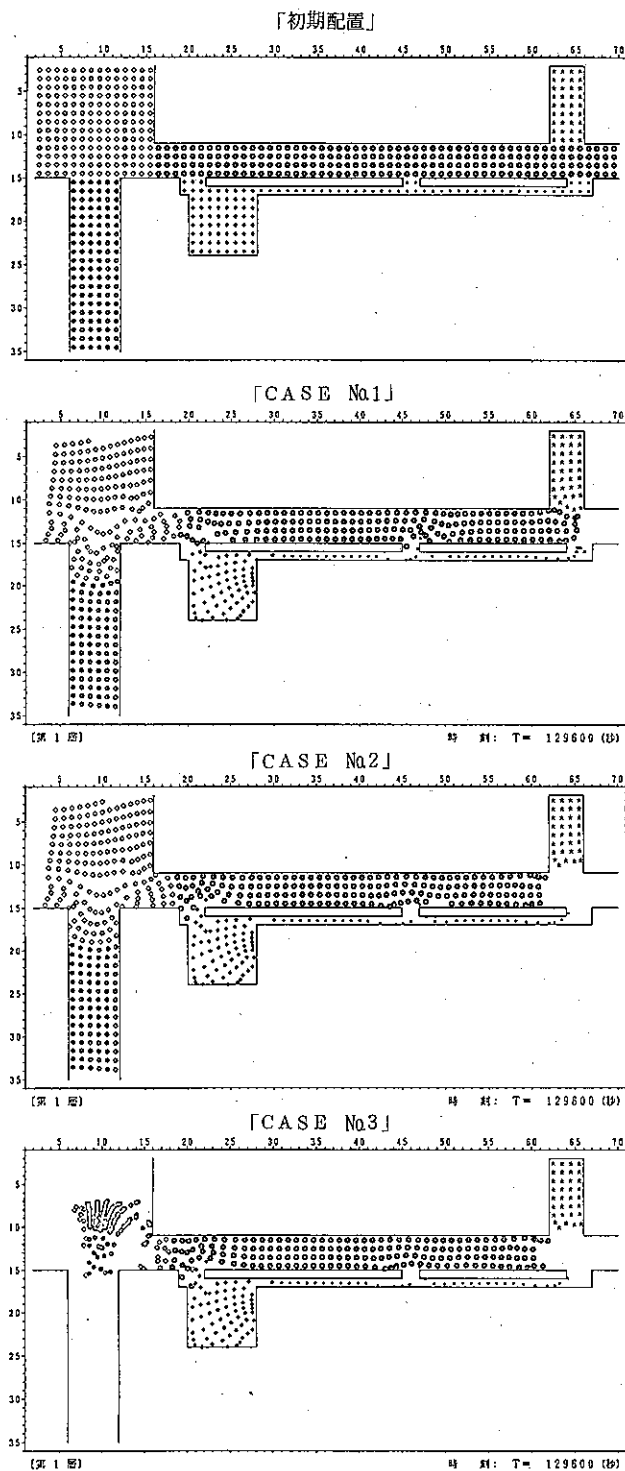


図7 マーカーの初期配置と各ケースの1潮汐後の配置

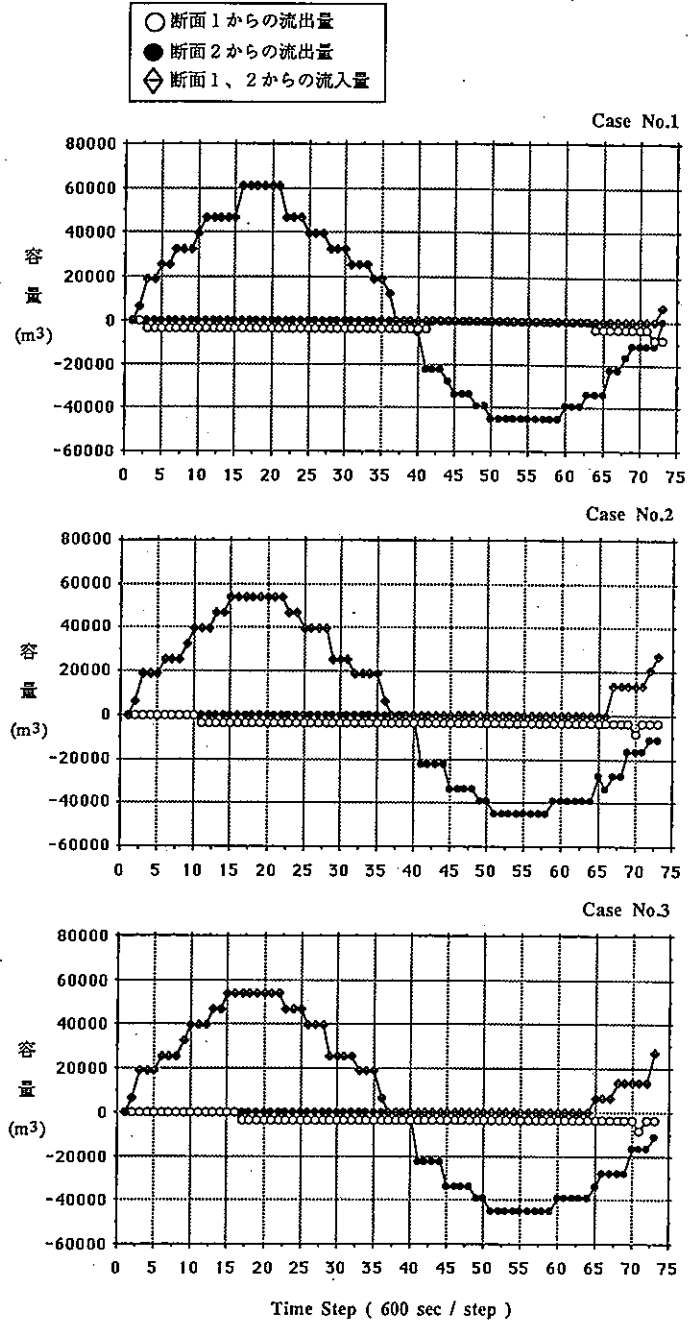


図9 流入・流出水量の経時変化