

湾域の閉鎖度に関する考察

馬場康之・今本博健

要 旨

本報は単純な矩形型の湾域を対象に、湾域の閉鎖性について数値計算手法を用いて考察したものである。湾域は水面積が等しく、幅と奥行き異なる3種類とし、数値計算は水深方向に平均化した平面2次元流れの基礎式を差分化し、ADI法による計算を行った。湾域の閉鎖性に対して、潮差は負のべき乗の形で影響することがわかった。湾域の形状は湾域内に生成される流動に影響し、加えて潮差の大きさとも相互的に関連して、湾域の閉鎖性に影響することが知れた。

キーワード：閉鎖性水域・潮汐・湾域形状・数値シミュレーション

1. はじめに

「閉鎖性水域」という術語が使われるようになって久しく、この語は明確には定義されていないものの、一般的に対象水域内の水塊と外界水との交換の悪い水域に対して用いられる。この水域の閉鎖性の度合いは、塩分濃度を対象とした交換率、海水容積を淡水流入量で除した淡水滞留年数や、物質に対する平均滞留時間等の指標により表されることが多い。また、湖・湾・内湾などの幾何学的形状を評価して、閉鎖度の指標とするものとして、閉鎖度指標 (Enclosed Index) がある。閉鎖度指標 (國松ら, 1989) は次式で表される。

$$E.I. = \frac{\sqrt{S \cdot D_1}}{W \cdot D_2} \quad (1)$$

ここに、 S ：湾面積、 D_1 ：湾内最大水深、 W ：湾口幅、 D_2 ：湾内最大水深である。

閉鎖度指標は水域の幾何形状のみに基づいて評価するものではあるが、水域の閉鎖性を定量的に評価する一つの目安とされ、溶存酸素濃度などの水質指標との

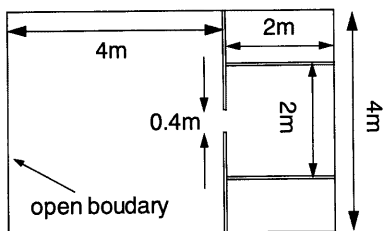
関係について検討がなされている (中尾ら, 1995)。

一方、水域の閉鎖性は、対象水域内の流動特性にも深く関連するものである。従って、閉鎖度の表現にも幾何学的な量以外に、外海側の潮汐の大きさや、潮流・潮汐残差流、水域内に発生する密度成層の位置や強さ、密度流、吹送流等の流動要因となる諸量、さらに水域の形状の違いによる影響などが、その表現中に含まれることが望ましい。

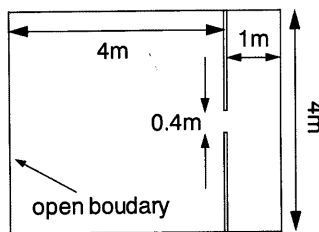
本報は、単純な矩形型の湾域を対象に、湾域の閉鎖性に及ぼす、外力条件と湾域の形状の影響について考察するものである。

2. 対象領域および検討方法

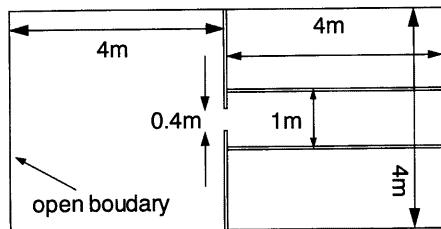
本研究で対象とした領域は、Fig.1 に示すような3種類 (A、B、C) の湾域である。いずれの湾域も、外海とは幅 0.4m の開口部のみで接続しており、水深は領域全体において 0.2m で一定である。湾域の面積は3種類とも同じであり、式 (1) で閉鎖性を評価す



(A)



(B)



(C)

Fig.1 Model basins for numerical simulation

ると全て同じとなる。これらの湾域に対して、流動要因として作用する外力としては、潮汐のみを考慮する。

上記の3種類の湾域を対象に、以下に示す水深方向に平均化した水平2次元流れの基礎式(堀江, 1981)を用いて、AD I法による計算により潮流場のシミュレーションを実施した。

連続式

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

運動方程式 (X方向)

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} - f v + g \frac{\partial \xi}{\partial x} - A_h \left\{ \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right\} + \frac{g u \sqrt{u^2 + v^2}}{(\xi + h) c^2} = 0$$

運動方程式 (Y方向)

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + f u + g \frac{\partial \xi}{\partial y} - A_h \left\{ \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right\} + \frac{g v \sqrt{u^2 + v^2}}{(\xi + h) c^2} = 0$$

なお、式中の記号の意味は以下のようである。

u, v : X方向・Y方向の流速成分 t : 時間

ξ : 基準面(平均水面)からの水位変動量

h : 基準面からの水深 g : 重力加速度

f : コリオリ係数(本研究では、f=0)

A_h : 水平渦動粘性係数 c : ジェジー係数

ここでは、水平渦動粘性係数 A_h 、およびジェジー係数 c を次のように定義する。

$$A_h = \alpha \cdot u_* (\xi + h)$$

$$c = \frac{1}{n} (\xi + h)^{1/6}$$

ここに、 α : 比例係数、n : マニングの粗度係数、

u_* : 摩擦速度である。

水平渦動粘性係数は、流体の運動状態や運動規模によって、その大きさが変化するものであるが、従来の数値シミュレーションでは、格子間隔の4/3乗に比例する形で与えられることが多い。この与え方では、対象とする全水域に一律の値となり、時間的にも一定値となる。上述のような与え方は、非定常な潮流場の計算を行う上では不都合が多い。従って、本研究では、流動場の空間的・時間的変化を考慮するために、摩擦速度と水深の積に比例する形で水平渦動粘性係数を与えている。比例係数の α については、過去に水理模型を対象に行われた数値シミュレーションにおける結果より $\alpha=1.5$ を用いている。

また、マニングの粗度係数については、モルタル仕上げの壁面を想定し、 $n=0.015$ を与えている

AD I法による基礎式の差分化については、参考文献(大年, 1994)を参照されたい。

本研究では、計算領域の格子間隔をX方向・Y方向とも0.05mとし、タイムステップは0.1秒とした。その結果、タイムステップの制約条件であるクーラン数は0.808となり、過去のシミュレーション結果と比較しても十分小さい値で、計算の安定性・収束性は確保

されていると考えられる。

数値シミュレーションでは、境界に対する取り扱いが重要となるが、本研究においては、閉境界の取り扱いとは過去のシミュレーション例に基づき、境界外の流速を0としている。一方、外海側に設定された開境界において、潮差を10段階(0.2~2.0cm)に変化させた正弦波の強制水位を与えている。湾域の特徴を表す量として、 $(\text{潮差} \times \text{面積}) / (\text{容積})$ があり(國末ら, 1989)、我が国の代表的な内湾においては、秋田湾 0.004、東京湾 0.081、伊勢湾 0.115、大阪湾 0.036、広島湾 0.139 である。本研究の場合には、0.01~0.1 となることから、本研究での潮差の設定が現実の湾域と比較しても妥当なものであることがわかる。

以上の計算条件のもとで、3種類の湾域に対する潮流場のシミュレーションを実施した。潮流場の計算後、計算された流動場における仮想粒子の追跡計算を実施した。仮想粒子の追跡法としては、Predictor-Corrector 法(Buning, 1989)を用いた。仮想粒子の追跡結果より、残余率の時間変化を求め、湾全体に対する平均滞留時間を算出している。

3. 潮汐条件の影響に関する検討

本節では、先に示した3種類の湾域のうち、正方形の湾域(A)を対象に、流動要因としての潮汐条件の変化による、物質の移動特性、および湾域の閉鎖性に対する影響について考察する。

Fig.2 は外海側の潮差が2.0cm の場合の流速ベクトル図である。上げ潮・下げ潮に伴う湾口部での強い流入・流出と、憩流時に湾口部付近で1対の環流対の形成が確認される。他の潮汐条件の場合にも、ほぼ同様の流況が見られるが、潮差の大小により流入・流出時の流速が異なるため、潮差の減少に伴い流入・流出の影響や環流対の形成される領域が縮小ようになる。

次に、計算された流動場に合計1600個の仮想粒子を上げ潮最強時に配置し、その後50周期間にわたって粒子追跡を実施した。仮想粒子の湾内残存数(n)の初期粒子数(n_0)に対する割合、すなわち残余率(n/n_0)の経時変化をFig.3に示す。各条件下における残余率の変化は、指数関数的に減少する傾向を持ち、潮差が小さくなるにつれて、直線的な減少傾向

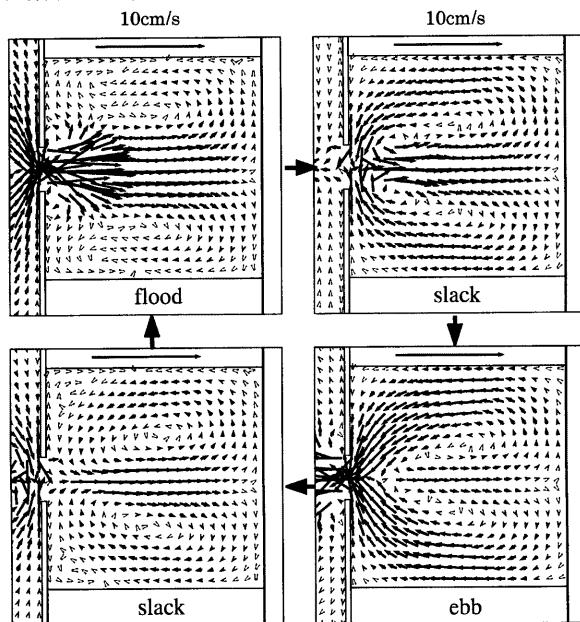


Fig.2 Velocity vectors in model basin (A) (tidal range : 2.0cm)

を強める。本研究では、

$$y=a\{exp(-bx)\}$$

なる式により、残余率の経時変化を近似し、残余関数を推定した。武岡（1984）はある時刻に海域に存在する物質粒子が、将来海域から出るまでに要する時間を、その物質の滞留時間と定義しており、残余関数がわかれば、水域に存在する物質に対する平均滞留時間を算定することができる。

Fig. 4 は、残余関数から算定された平均滞留時間と、平均水深で無次元化された潮差の関係を示したものである。図中には近似曲線も合わせて示しており、潮汐条件の影響が、負の指数を持つべき乗の形で平均滞留時間に及ぶことがわかる。従来の研究において、湾域

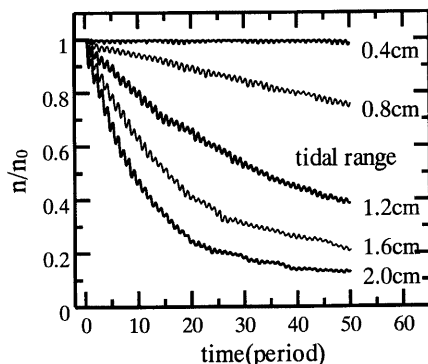


Fig. 3 The ratio of the remaining particles in model basin (A)

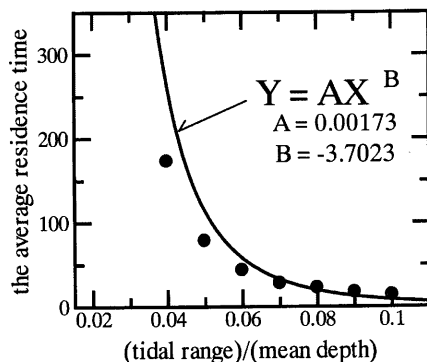


Fig. 4 The average residence time (model basin (A)) (solid line : regression curve)

全体を一つのタンクモデルとして捉えた場合の平均滞留時間は、タイダルブリズムに反比例することが指摘されている（大年，1993）。指数の値に違いがあるものの、外力の影響は指数が負のべき乗の形で、湾域全体の閉鎖性に関連することがわかる。

Fig. 4 において、無次元化された潮差が 0.05～0.06（潮差：1.0～1.2cm）の付近を境に、平均滞留時間の増減の度合いが異なる様子が認められる。特に、潮差の大きな範囲においては、平均滞留時間の変化は少なくなっていることがわかる。潮差の大小による平均滞留時間への影響について、仮想粒子の流出状況から考察する。Fig. 5 は、追跡開始から、1，3，5 周期後に湾外へ流出した粒子の初期配置位置を示したものであり、潮差 2.0cm の結果については残差ベクトルも併せて示している。残差ベクトルと流出した粒子の初期位置を比較すると、粒子の流出は湾口部から湾の周囲にかけての、残差ベクトルの値の大きな領域に沿って存在していることがわかる。潮差の小さい場合においても、同様の対応が確認されている。図には、追跡計算開始から 5 周期後までの流出状況を示しているが、潮差の大きな 2 ケースについては、湾の奥部に位置する粒子が、早い段階から流出する傾向にある。一方、潮差が小さい場合には、早期に流出する範囲が湾口部付近に限定される。そのため、湾奥部の粒子が流出するにはより多くの時間が必要となり、平均滞留時間が増加する結果となる。

潮差が大きい範囲において、平均滞留時間の差が少なくなる理由については、次のように考えられる。ある程度の大きさ以上の潮差の場合には、湾の奥行き、幅が有限であるため、湾全域に及ぶ強い流動が形成されやすくなる。その結果、粒子の流出に関連する残差ベクトルの大きな領域が、ほぼ湾全域に生成される。従って、流出に時間の必要となる粒子がほとんど無く、潮差の大小による平均滞留時間への影響が少なくなると考えられる。このように、潮汐条件は流動に直接影響して、湾域の閉鎖性に関係するが、湾域の規模も潮汐の大きさと相まって、湾域の閉鎖性に影響する。

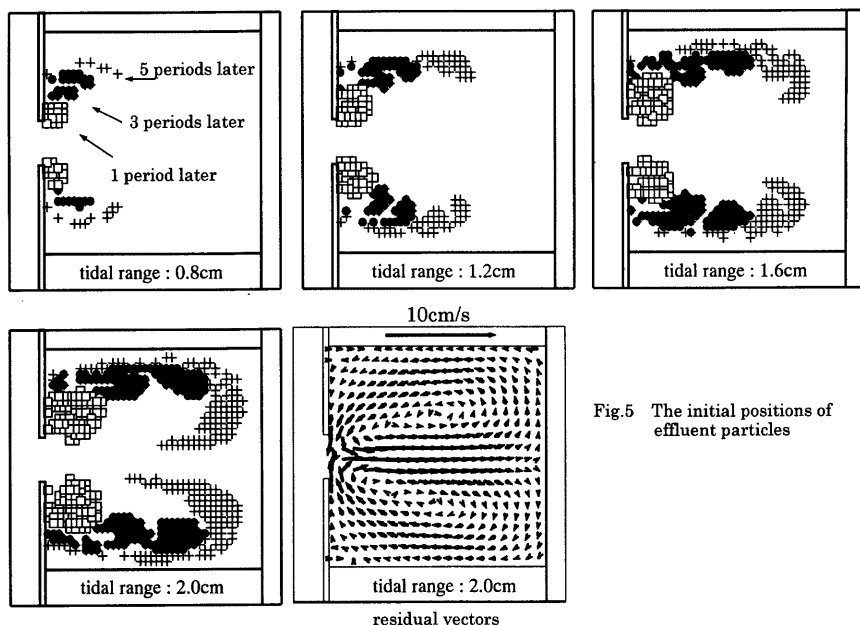


Fig. 5 The initial positions of effluent particles

4. 湾域の形状による影響に関する検討

次に、湾域の形状の違いが、全体の閉鎖性に及ぼす影響について考察する。前節で示した正方形の湾域（A）と等しい水面積を持ち、湾域の幅と奥行きを変えた2種類の湾域（B、C）に対して、先と同様の流動計算と仮想粒子の追跡計算を実施した。

Fig. 6、Fig. 7 は、潮差 2.0cm の場合の流速ベクトル図である。まず、湾域の幅が2倍、奥行きが半分の湾域（B）の場合（Fig. 6）、上げ潮時に流入した流れは勢いを保ったまま、湾奥の境界によって左右に分けられる。次の転流時には、中央部に湾域の約半分の規模に達する環流対が形成されている。下げ潮時にも、その環流対は位置を湾奥側に移して存在しており、次の転流時にはその規模をやや減少させながらも、湾内に残っている。

次に、湾域の幅が半分、奥行きが2倍の湾域（C）場合（Fig. 7）、上げ潮時に流入した流れにより、次の転流時に湾内に環流対が形成されるが、その大きさは湾域の幅により制限を受け、奥への拡がりも全体の1/4程度に留まっている。下げ潮時には、他の形状の

場合と同等の流速での流出があるものの、次の転流時には、湾口部の両側にわずかに環流らしき流れが見られるのみで、湾域内全域において微弱な流動となっている。

これら2つの湾域において実施された、仮想粒子の追跡計算より得られた、残余率の経時変化をFig. 8に示す。前節の結果（Fig. 3）と比較すると、それぞれ残余率の遞減特性が弱まっており、Aの場合には10%程度まで減少するのに対して、Bでは約50%、Cでは約75%にしか減少していない。平均滞留時間を算定して、Aの場合を1として比較すると、全条件の平均値では、Bの場合が1.26倍、Cの場合が2.47倍と平均滞留時間が増加する結果となっている。これら平均滞留時間の増分も、潮差の大きさによって異なり、潮差が大きい場合には増加の度合いが大きく、逆に潮差が小さい場合には、平均滞留時間の差も縮まる傾向にある。同じ外力条件のもとでも、湾域の形状の違いにより形成される流動場が異なり、その結果、湾域内の物質の移動特性、ひいては湾域の閉鎖性に影響することがわかる。

Fig. 9 は、BとCの場合の、潮差 2.0cm の場合の残

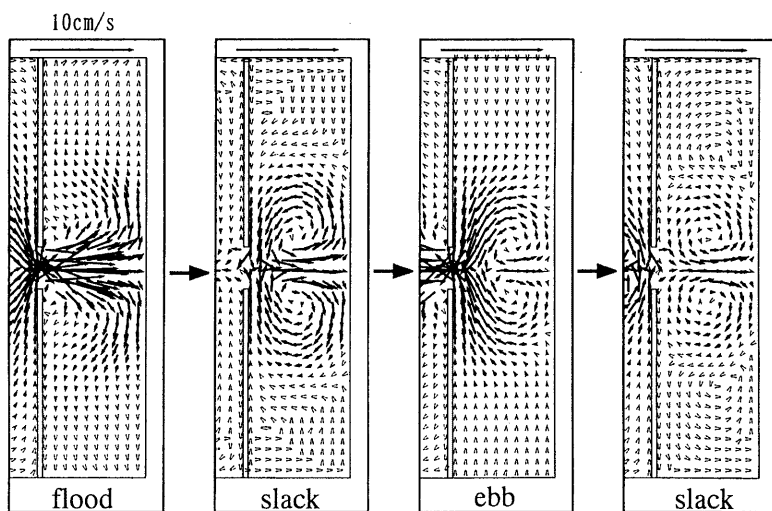


Fig.6 Velocity vectors in model basin (B)

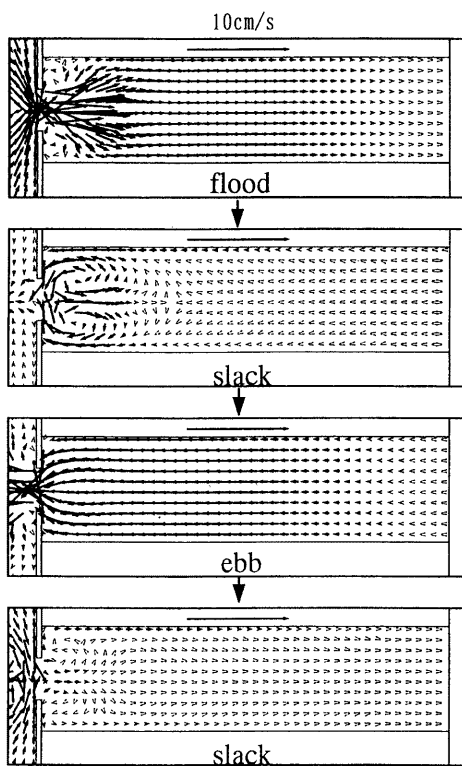


Fig.7 Velocity vectors in model basin (C)

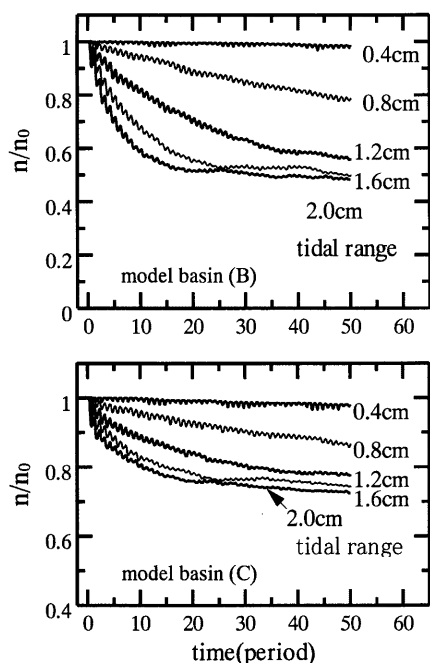


Fig.8 The ratio of the remaining particles in model basin (B) and (C)

差ベクトルと、仮想粒子追跡開始から5周期後に湾外に流出した粒子の初期配置位置である。Aの場合と同様に、流出した粒子は比較的大きな残差ベクトルが見られる領域に存在している。しかし、湾の形状がA→B→Cと変わるに従い、残差ベクトルが大きな値を持つ領域が減少し、それに伴い流出粒子数の減少、つまり平均滞留時間の増大という形で現れている。

先に示した閉鎖度指標では、3種類の湾域は同じ値となる。しかし、湾域の幾何学的諸量を用いて閉鎖性を評価する場合でも、幅や奥行きといった形状の違いを表す量を取り入れる必要がある。

5. おわりに

本研究では、湾域の閉鎖性に対する外力条件、ここでは潮差の大きさによる影響と、湾域自体の形状による影響について数値計算手法を用いた検討を行った。その結果、潮差の影響が負の指数をもつべき乗の形で、湾域全体の閉鎖性に関係し、湾域の規模も生成される流動の強さに応じて、閉鎖性に関連することが知れた。また、湾の閉鎖性を定量的に評価する指標として示されている閉鎖度指標が等しい湾域であっても、形状の違いが湾域内の物質の移動特性に影響を及ぼし、湾域の閉鎖性が異なることもわかった。

本研究では、検討手法として数値計算手法のみに留まったが、計算結果については検証の必要がある。今後は水理実験手法との併用により、検討手法としての精度を高め、湾域の閉鎖性に関するより定量的な評価法について検討を進める。

参考文献

- 大年邦雄 (1993) : 感潮狭水路の水理に関する研究, 京都大学防災研究所年報, 第36号B-2, pp.537-552.
- 大年邦雄 (1994) : 閉鎖性海域の潮流と海水交換に関する研究, 京都大学学位論文.
- 國松孝男・村岡浩爾(1989) : 河川汚濁のモデル解析, 技報堂出版, pp.239.
- 武岡英隆 (1984) : 沿岸海域の海水交換, 沿岸海洋研究ノート, 第20巻, 第2号, pp.169-182.
- 中尾 徹・松崎加奈恵(1995) : 地形形状による富栄養化の可能性, 海の研究, Vol.4, No.1, pp.19-28.
- 堀江 毅(1981) : 沿岸海域の水の流れと物質の拡散に関する水理学的研究, 京都大学学位論文.
- Buning, P.G. (1989) : Numerical Algorithms in CFD Post-Processing, von Karman Institute for Fluid Dynamics, Lecture Series 1989-07.

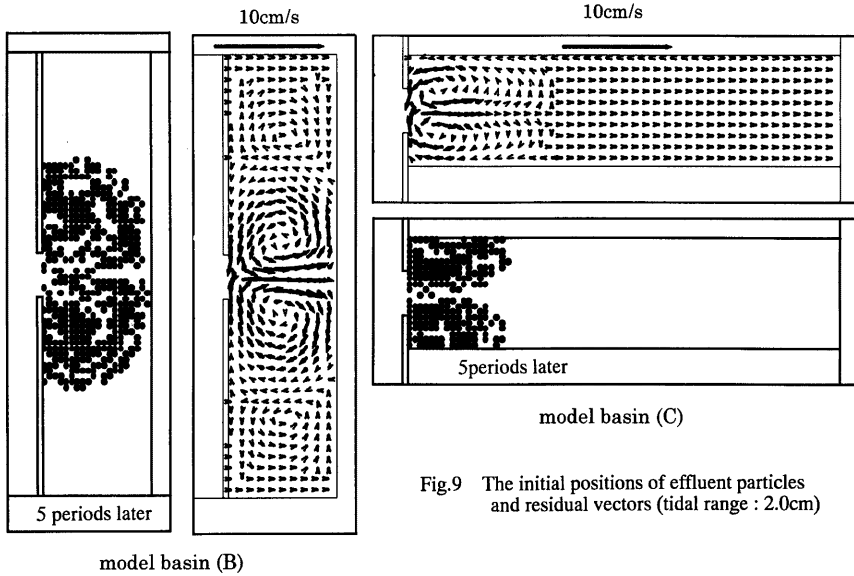


Fig.9 The initial positions of effluent particles and residual vectors (tidal range : 2.0cm)

A Study on the flow in enclosed basins

Yasuyuki BABA and Hirotake IMAMOTO

Synopsis

In this paper, some numerical simulations for the flow and the transportation of particles in three model basins were performed. 2-D depth averaged numerical model was used to calculate the velocity distributions in the model basins, and the solutions follow an iterative procedure based on the ADI scheme. The flow feature in the model basin is influenced by the tidal range and the shape of the model basin. And the characteristics of the transportation in the model basins are related to both the tidal range and the shape of the basin.

Keywords: enclosed basin, tide, the topography of the basin, numerical simulation