

海水交換に対する拡散能の影響について

ON THE EFFECT OF DIFFUSIVITY ON THE TIDAL EXCHANGE

矢野真一郎¹・小松利光²・鞠承淇³

Shinichiro YANO, Toshimitsu KOMATSU and Seung-Gi GUG

¹正会員 工修 九州大学助手 工学部建設都市工学科 (〒812-8581 福岡市東区箱崎 6-10-1)

²フェロー 工博 九州大学教授 工学部建設都市工学科 (同上)

³学生員 工修 九州大学大学院 工学研究科博士後期課程 (同上)

In order to examine the tidal exchange between an inner bay and an outer sea area, particle-tracking method (Euler-Lagrange method) has been often applied to numerical tests using the depth-averaged model. We attempted to investigate the fundamental effect of diffusivity on the tidal exchange, because it has not been well known in detail yet. In this study, many particle-tracking simulations with/without consideration for the isotropic/anisotropic diffusivity in a semi-enclosed model bay by using the Markov chain model were carried out. Then, the effects of the magnitude and of the anisotropy of diffusivity on the short/long-term tidal exchange were investigated. As a result of many kinds of numerical experiments, it becomes clear that it is necessary to evaluate the accurate diffusivity for estimation of the tidal exchange rate with a reliable accuracy.

Key words : tidal exchange, tidal residual current, Euler-Lagrange method, semi-enclosed bay, diffusivity, anisotropy of diffusivity

1. まえがき

内湾や漁港のような閉鎖性海域では、湾内水の停滞に起因する水質の悪化が問題となっている。近年、比較的浅い海域において人工構造物を用いて潮流を制御し、外海との海水交換を活性化させて水質の改善を図る方法が幾つか提案されている。そのような方法の浄化効果を検討するのに、潮流シミュレーションにより得られた潮流場において粒子追跡計算を行い海水交換を調べる手法がよく用いられている。また、海上空港や人工島の建設等に伴う埋立による地形変化が海水交換に及ぼす影響を評価する際にも同様の手法が用いられる。そのような解析には通常平面2次元モデルが適用されているが、水深平均操作による移流分散効果により、流れ方向の拡散能が大きくなることとそれに伴い拡散能の異方性が生じることが予想される。

拡散が海水交換率へ及ぼす影響については、著者らの知る限りではAwaji¹⁾により言及されているだけであり、その影響はあまり大きくはないと報告さ

れている。しかしながら、拡散能の大きさに対して系統立てた検討はされておらず、また、拡散能の異方性については全く考慮されていない(拡散係数が0, 1.0, 10.0 m²/s (一定)の3ケースのみの検討が行われている)。

そこで、本研究では半閉鎖性内湾における海水交換に対する拡散能の影響についての基礎的情報を得るために、モデル湾の潮流場に粒子追跡計算を適用し拡散係数に対する海水交換の応答性を調べた。

2. 潮流シミュレーション

本研究で対象とする半閉鎖性内湾は、図-1に示す湾口部に防波堤を持つモデル湾とした。このモデル湾においてADI法による平面2次元潮流シミュレーションを行った。計算条件は、計算格子間隔： $\Delta x = \Delta y = 500$ m, 時間格子間隔： $\Delta t = 15$ s, 渦動粘性係数： $\nu_t = 100.0$ m²/s, 平均水深： $h = 10$ m, 海底摩擦係数： $\gamma_b^2 = 0.0026$, コリオリ係数： $f = 0$ s⁻¹とした。境

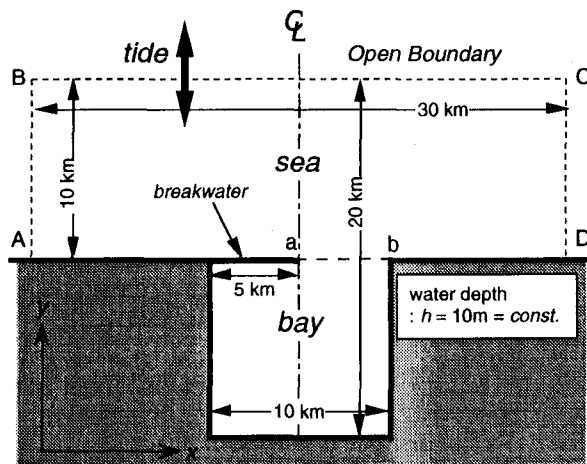


図-1 モデル湾概略図

界条件は、開境界 B-C で振幅： $a = 1.0$ m, 周期： $T = 12\text{hr. } 25\text{min.}$ の正弦波を与え、開境界 A-B, C-D で $U = 0, dV/dx = 0$ を、壁面境界上では no-slip 条件を与えている。図-2 a), b) に最大下げ潮時と潮汐残差流の計算結果を示す。図-2 b) より、防波堤による湾口渦に起因して強い潮汐残差環流が湾内と外海部に存在することが認められる。以下、この1周期分の潮流計算結果を用いて粒子追跡計算は行われた。

3. 粒子追跡計算

(1) 粒子追跡計算 (Euler-Lagrange 法) の基礎式

時刻 t に位置 $\mathbf{X}(t) = (X(t), Y(t))$ にあったある海水粒子の時刻 $t + \Delta t$ における位置 $\mathbf{X}(t + \Delta t)$ は、時刻 t 周りの Taylor 展開において $O(\Delta t^2)$ までとると次式で求められる²⁾。

$$\mathbf{X}(t + \Delta t) = \mathbf{X}(t) + \Delta t \cdot \mathbf{U}(\mathbf{X}(t), t)$$

$$+ \frac{\Delta t^2}{2} \frac{D\mathbf{U}(\mathbf{X}(t), t)}{Dt} + \Delta t \cdot \mathbf{u}'(\mathbf{X}(t), t) \quad (1)$$

ここで、 $\mathbf{U}(\mathbf{X}(t), t) = (U, V)$: 時刻 t における粒子の速度成分、 $\mathbf{u}'(\mathbf{X}(t), t) = (u', v')$: 拡散による流体粒子のランダム変動速度成分である。

(2) ランダム変動速度の評価

拡散によるランダム変動速度 $\mathbf{u}'(\mathbf{X}(t), t)$ は、次式で示す1次の Markov 連鎖モデルで記述できるものと仮定した。

$$u'_i(t + \Delta t) = \rho_i u'_i(t) + \gamma_i(t) \quad (2)$$

ここで、 $\rho_i = \exp(-\Delta t / T_{Li})$: 相関係数、 T_{Li} : ランダム変動速度の積分時間スケール、 $\gamma_i(t) : N(0, \sigma_{\gamma_i}^2)$ に従う正規乱数、 $\sigma_{\gamma_i}^2 = (1 - \rho_i^2) \sigma_{u'_i}^2$ 、 $\sigma_{u'_i}$: ランダム変動速度 u'_i の標準偏差 (乱れ強度) である。本研究では

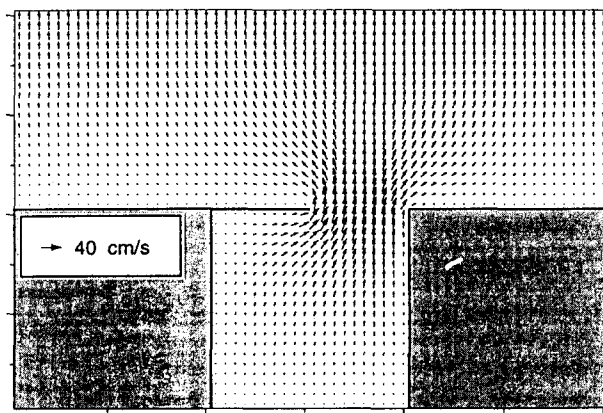


図-2 a) 潮流計算結果 (最大下げ潮時)

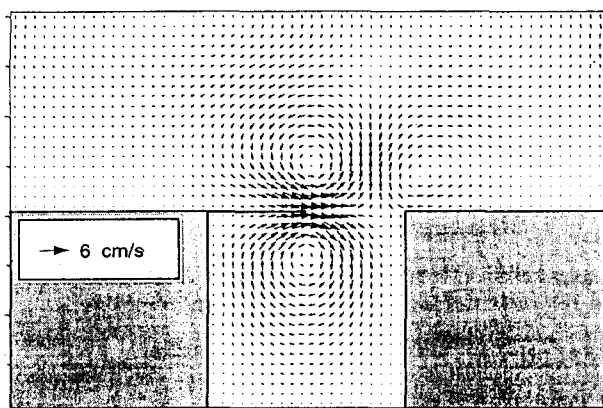


図-2 b) 潮流計算結果 (潮汐残差流)

各粒子の流れ方向 ($i=L$) とその直角方向 ($i=T$, 以下横方向) が拡散係数テンソルの主軸と一致しているものと考えた。また、正規乱数 $\gamma_i(t)$ は Box-Muller 法により発生させた。なお、本論文において添字 i については総和規約は適用されない。

拡散係数は次式

$$D_i = \overline{u_i'^2} T_{Li} \quad (3)$$

で表されるので、流れ方向と横方向の拡散係数 D_L, D_T が与えられた時、乱れ強度が積分時間スケールのどちらかが与えられれば、式(2)からランダム変動速度が算出できることになる。

a) 拡散係数について

流れ方向と横方向の拡散係数は次式にて表されるものと仮定した。

$$D_L = k_L U_* H \quad (4.a)$$

$$D_T = k_T U_* H \quad (4.b)$$

ここで、 U_* : 摩擦速度、 $H = h + \zeta$: 全水深、 k_L, k_T : 流れ方向と横方向の無次元拡散係数である。

本研究では、平面2次元モデルを用いているため拡散係数は流れ方向には移流分散が、横方向は乱流拡散が支配的になるものと考えられる。Holly and Usseglio-

Polatera³⁾はElder⁴⁾の結果より $k_L = 5.93$, $k_T = 0.23$ を, Lin and Falconer⁵⁾はFischer et al.⁶⁾によりまとめられた実験と観測のデータ ($k_L = 8.6 \sim 7500$, $k_T = 0.42 \sim 1.61$ が得られている)を参照し $k_L = 13$, $k_T = 1.2$ を適用している. 今回は4 (1) c)において後述するように, 非等方的な拡散能を持つ場合の無次元拡散係数の基準値として流れ方向に $k_L = 5.93$ を採用することにした.

b) 積分時間スケールについて

和田・角湯⁷⁾が実施した瀬戸内海における潮流場の乱流計測結果によると, 積分時間スケールは $T_L = 1 \sim 2$ 時間程度であった. また, 乱れ速度成分の自己相関曲線は遅れ時間 τ に対して指数関数的に減少する形状をとっており, Markov 連鎖モデル (2) 式より得られる自己相関曲線と同形式になることも確認されている. 本研究では乱流拡散に対する積分時間スケールとして $T_{LT} = 1$ 時間を採用することにする.

移流分散の積分時間スケールに関しては, Fischer⁸⁾により検討がなされている. それによると, 鉛直方向流速分布に対数則を仮定すると, その水深平均流速からの偏差速度

$$\frac{\tilde{u}}{u_*} = \frac{u - \langle u \rangle}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \left(\ln \frac{z}{h} + 1 \right) \quad (5)$$

の2乗水深平均値は次式のようにになる.

$$\langle \tilde{u}^2 \rangle = \frac{u_*^2}{\kappa^2} \quad (6)$$

Elder⁴⁾とBatchelor et al.⁹⁾により対数則が成り立つ場では, marker の cloud の重心に対する各 marker のずれの確率分布が Gauss 分布になることが実験的に確認されており, 移流分散に対応するランダム速度成分の2乗 (ensemble) 平均値と偏差速度の2乗平均値 (6) との間には良い近似として次式が成り立つ.

$$\overline{\tilde{u}^2} \approx \langle \tilde{u}^2 \rangle \quad (7)$$

よって, (3), (6), (7) 式より積分時間スケール T_{LL} が算出でき, 移流分散に対応するランダム速度成分が求められる. ここで採用された各積分時間スケールは普遍的ではないが, 第一近似として採用した.

4. 数値実験について

(1) 拡散能と海水交換率の関係

a) 海水交換率について

海水交換率を評価する境界線は図-1に示す湾口部のライン a-b とする. 標識粒子をラインより湾内側全域に1メッシュ (500m×500m) 当たりに等間隔に25個, 計10,000個配置し, 下げ潮最強時から始まる1潮汐間にわたって各粒子の軌跡を計算する. 今里²⁾は潮汐の1周期間で境界線よりも外側へ出た粒子が代表

表-1 各CASEの k , EX の値

CASE	k	EX (%)
0	0.00	13.48
1	0.10	13.20
2	0.25	13.39
3	0.50	13.49
4	0.75	13.71
5	1.00	13.79
6	2.50	13.68
7	5.00	14.38
8	7.50	15.04
9	10.0	15.22
10	25.0	15.85
11	50.0	15.67
12	75.0	15.77
13	100.0	17.39
14	250.0	20.43
15	500.0	24.12
16	750.0	25.29
17	1000.0	26.97
18	5.93	14.48

する湾内水の体積が最大となる時 (通常は最干潮時付近) の体積を V_{max} , 1周期後の下げ潮最強時にライン外側へ残っている粒子が代表する体積を V_{res} として, 海水交換率を次式で定義している.

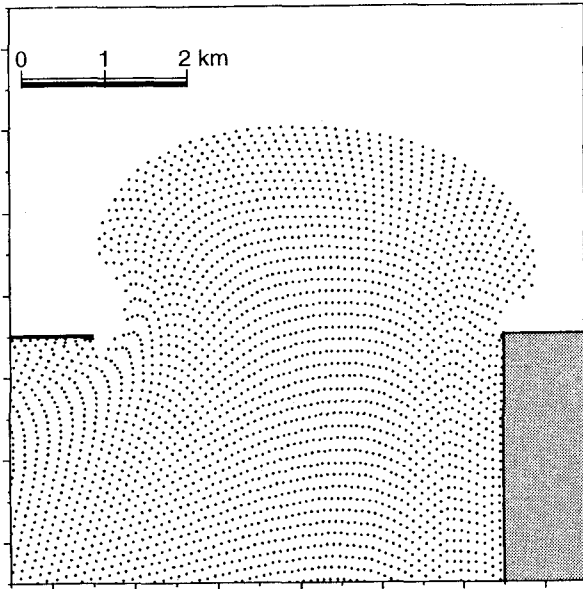
$$EX = \frac{V_{res}}{V_{max}} \quad (8)$$

本研究では, 海水交換の評価として EX を採用した.

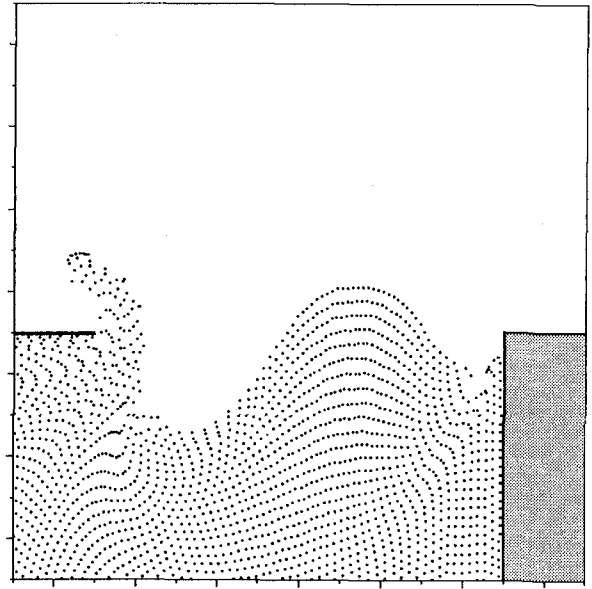
b) 拡散能の強さと海水交換率

まず, 拡散能として等方的な拡散係数 ($k_L = k_T = k$) を与え, 表-1に示すように無次元拡散係数 k の値を Lin and Falconer⁵⁾を参照し現実にとりうるオーダーで系統的に変化させた CASE-0~18 について粒子追跡計算を行い, 海水交換率を算定した. 粒子追跡計算結果の一例としてCASE-0の V_{max} と V_{res} が得られた時刻の湾口部付近の粒子の分布を図-3 a), b) に示す. また, 各CASEにおいて得られた海水交換率 EX の値を表-1に, k と EX の関係を図-4に示す.

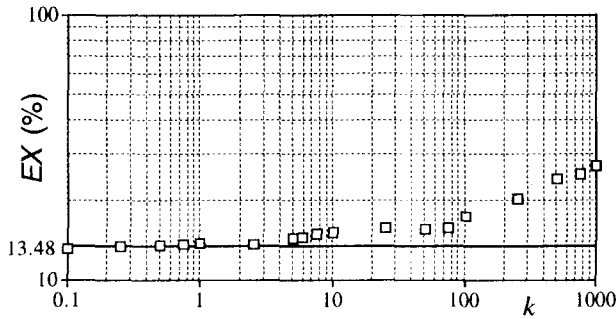
図-4によると, EX は k の増加に対して漸増する傾向があることが分かる. Awaji¹⁾は, 拡散がない場合でも非常に大きな海水交換率を持つ海峡部分において検討を行っていたため, 拡散を与えた場合の海水交換率の変化の割合は相対的に小さく, 拡散の影響は小さいと判断していた. しかしながら, 今回のように拡散がない場合には海水交換率が小さくなるような流れ場においては拡散の作用を与えることによる影響が相対的に大きくなる. そのため, 精度良く海水交換率を見積もるためには, 拡散能の高精度な推定が必要になるものと考えられる.



図一 3 a) 粒子追跡計算の計算結果 (CASE-0: V_{max} が得られた時刻)



図一 3 b) 粒子追跡計算の計算結果 (CASE-0: V_{res} が得られた時刻)



図一 4 無次元拡散係数 k と海水交換率 EX の関係

また、同図より $k=100$ を閾値として傾向が変化していることも確認できる。今回の検討において湾口部における潮流による粒子の拡がり幅に相当する $1/4$ 周期間における tidal excursion L_{te} が、図一 3 a) より $L_{te} \approx 2500$ m と見積もられるが、平均的な拡散係数が

$$\bar{D} = k \bar{U}^* h \quad (9)$$

と与えられるので、代表値として湾口付近における $\bar{U}^* = 0.011$ m/s を用いると拡散による 1 周期間の粒子の拡がり幅 L_D は次式で見積もられることになる。

$$L_D = \sqrt{2 \bar{D} T} \approx 100 \sqrt{k} \quad (10)$$

これより、 $k > 100$ で L_{te} と $L_D (> 1000$ m) は comparable になり、 k が大きくなるにつれて拡散による海水交換が支配的になってくるためと考えられる。

c) 拡散能の非等方性と海水交換率

次に、拡散係数の非等方性が海水交換率に与える影響について検討するために、表一 2 に示す CASE-A0～A4 の 5 ケースについて (但し、CASE-A4 は CASE-18 と同じ) 粒子追跡計算を行った。非等方的な拡散能の基準値として流れ方向の無次元拡散係数に $k_L = 5.93$ を採用した。各 CASE で得られた海水交換率 EX の値は

表一 2 各CASEの k_L , k_T , EX の値

CASE	k_L	k_T	EX (%)
A0	5.93	0.23	14.31
A1	5.93	0.01	14.31
A2	5.93	0.10	14.29
A3	5.93	1.00	14.31
A4(18)	5.93	5.93	14.48

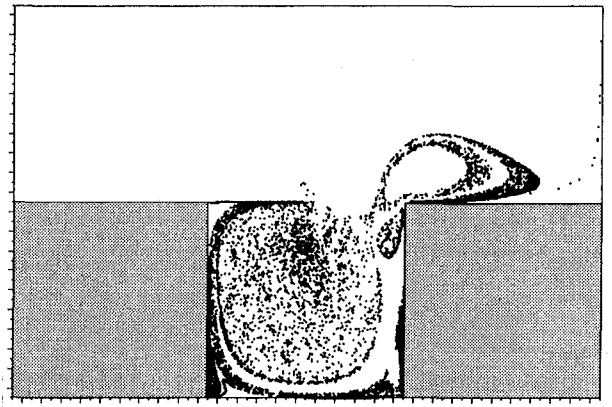
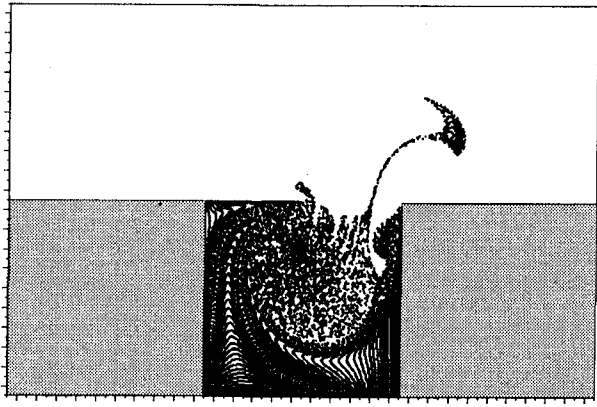
表一 2 に示した通りであるが、今回の検討の範囲においては拡散係数の非等方性の度合いが EX に与える影響は非常に小さいことが分かる。

(2) 湾内水の滞留に対する拡散能の影響について

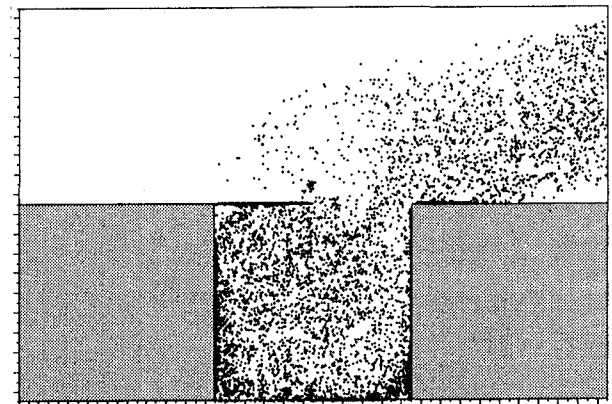
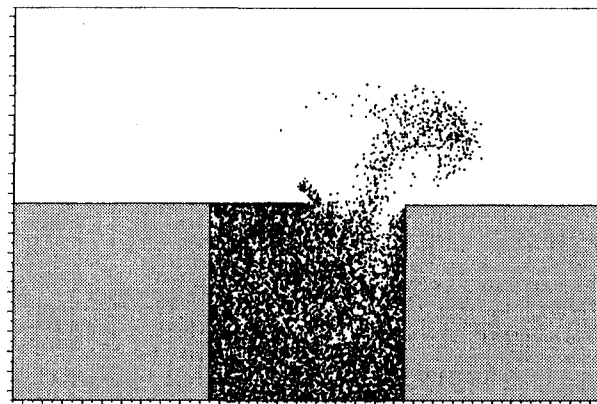
最後に、湾内水の長期的な交換に対する拡散能の影響について検討するために、CASE-0, 1, 5, 9, 13, 17, 18(A4), A0～A3 の 11 ケースについて粒子追跡計算を 180 周期 (約 3 ヶ月) 間に渡って行った。CASE-0, 18(A4), A0 について初期時刻から 15 周期後と 180 周期後の最大下げ潮時における粒子の分布をそれぞれ図一 5 a) ～ f) に示す。

a) 拡散能の強さと湾内水の滞留

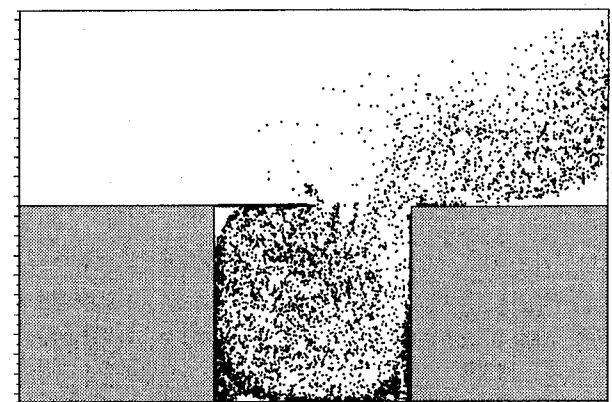
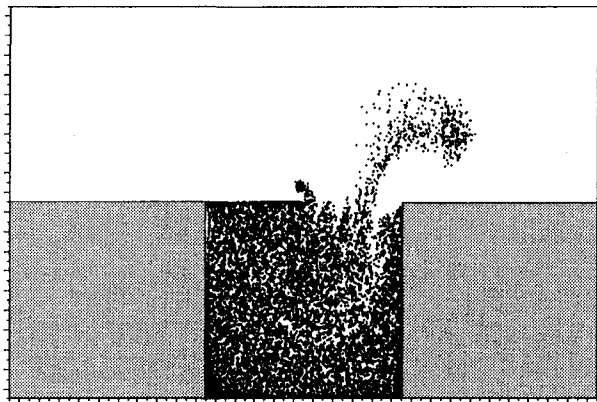
上記 11 ケースのうち等方的な拡散係数を与えた CASE-0, 1, 5, 9, 13, 17, 18 の 7 ケースについて、初期時刻に湾内に配置された全粒子のうち各周期の最後の時刻 (最大下げ潮時) に湾内に存在している粒子の残存率の経時変化を比較したものを図一 6 に示す。拡散係数が比較的大きい CASE-9, 13, 17, 18 は湾内水の交換が大きく見積もられるという結果を示した。平均滞留時間 $\tau^{10)}$ を算出すると、CASE -0 が $\tau \approx 1600$ 周期、CASE-18 が $\tau \approx 1000$ 周期、CASE-



図一 5 a), b) 粒子追跡計算の計算結果 (CASE-0 [左図: 15 周期後, 右図: 180 周期後])



図一 5 c), d) 粒子追跡計算の計算結果 (CASE-18(A4) [左図: 15 周期後, 右図: 180 周期後])



図一 5 e), f) 粒子追跡計算の計算結果 (CASE-A0 [左図: 15 周期後, 右図: 180 周期後])

17 が τ = 約 600 周期となり約 4 ~ 6 割程異なっている。平均滞留時間が長期的な海水交換の指標として利用されていることから考えて、拡散能の精度良い推定が重要であると考えられる。

b) 拡散能の非等方度と湾内水の滞留

a) と同様に非等方的な拡散係数を与えた CASE-A0 ~ A3, 等方的な CASE-A4 と拡散を与えない CASE-0 の 6 ケースについて、粒子残存率の経時変化を比

較したものを図一 7 に示す。CASE-0 を除く他の 5 ケースは、流れ方向の無次元拡散係数には $k_L = 5.93$ を採用し、横方向の無次元拡散係数 k_T のみを変化させたものである。拡散のない CASE-0 と較べると非等方的な CASE-A0 ~ A3 は、拡散がある分だけ海水交換は大きく見積もられているが、等方的な CASE-A4 に較べると海水交換能は小さくなっている。これは、横方向の拡散能がある程度強くなると

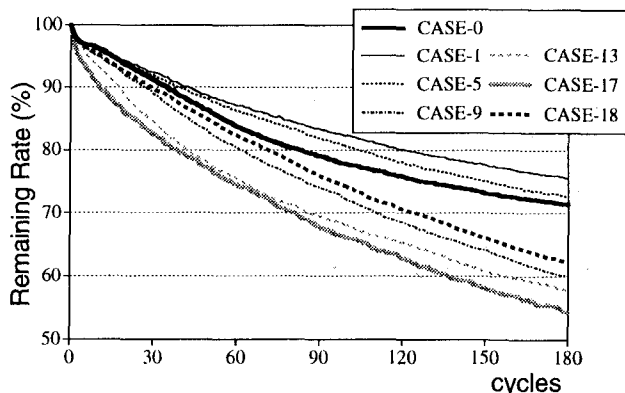


図-6 湾内粒子残留率の系時変化（等方性の場合）

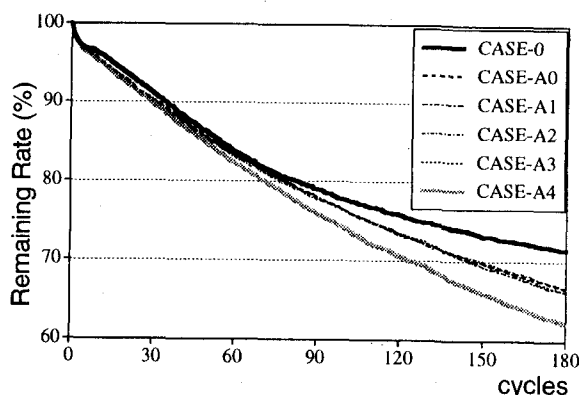


図-7 湾内粒子残留率の系時変化（異方性の場合）

拡散が弱いときには交換に寄与しない（短時間で交換しない）軌道に乗っていた粒子が、交換が（短時間で）可能な軌道へに移る頻度が増すことによるものと考えられる。また、交換可能な軌道に乗っていた粒子が交換しない軌道へに移る頻度も同時に増すことになるが、短時間で交換可能な軌道に乗った粒子は外海へ放出されてしまう確率が高いため海水交換が大きくなったものと推測される。よって、横方向の拡散能（乱流拡散）の強度により等方的拡散能と非等方的拡散能の適用可能領域が分けられるものと考えられる。なお、CASE-1, 5 等拡散能が非常に小さい場合について拡散を与えない CASE-0 より海水交換が少ないという結果が出ているが、使用した粒子の数が現象のアンサンブル平均を求めるのには少なすぎた可能性があるためと考えられる。しかし、全体として傾向性が明確であるため問題ないものと判断した。

5. 結論

半閉鎖性内湾の潮流場において、拡散能が海水交換に及ぼす影響について数値実験により検討した。

その結果、以下の4点が明らかになった。

1. 拡散能が強いほど湾口部の海水交換率 EX も大きく見積もられる。また、その影響の度合いは湾口付近の拡散による空間スケール（拡散幅）と潮流による粒子の移動の空間スケール（tidal excursion）の比に依存している。
2. 拡散能の非等方性の EX への影響は小さい。
3. 湾内水の長期的な交換能力に対して、基準値である CASE-18 を含め拡散能が強い場合には平均滞留時間が小さく（海水交換が大きく）評価される傾向がある。
4. 拡散能の非等方性は、横方向の拡散能が比較的大きい場合に滞留時間を小さくする。

これらのことより、海水交換能力の正確な評価のためには、高精度な拡散能の見積もりが不可欠であることが確認された。

今回は特定の湾における検討のみに終わったため、普遍的な評価にはなっていない。しかしながら、拡散能が海水交換に与える影響を議論する上での基礎的な情報を提示できたものと考えられる。

参考文献

- 1) Awaji, T. : Water Mixing in a Tidal Current and the Effect of Turbulence on Tidal Exchange through a Strait, *J. Phys. Oceanogr.*, Vol. 12, pp. 501-514, 1982.
- 2) 今里哲久：海水交換の概念と交換率, 沿岸海洋研究ノート30周年記念特別号, pp. 111-123, 1993.
- 3) Holly, F. M. and Usseglio-Polatera, J. M. : "Dispersion Simulation in Two-Dimensional Tidal Flow", *J. Hydr. Engrg.*, ASCE, Vol. 110, No. 7, pp. 905-926, 1984.
- 4) Elder, J. W. : "The Dispersion of Marked Fluid in Turbulent Shear Flow", *J. Fluid Mech.*, Vol. 5, pp. 554-560, 1959.
- 5) Lin, B. and Falconer, R. A. : "Tidal Flow and Transport Modeling Using ULTIMATE QUICKEST Scheme", *J. Hydr. Engrg.*, ASCE, Vol. 123, No. 4, pp. 303-314, 1997.
- 6) Fischer, H. B. et al. : *Mixing in Inland and Coastal Waters*, Academic Press, 1979.
- 7) 和田明, 角湯正剛："瀬戸内海における水粒子運動の数値シミュレーション", 水理講演会講演集, 20, pp. 191-196, 1976.
- 8) Fischer, H. B. : "The Mechanics of Dispersion in Natural Streams", *J. Hydr. Div.*, ASCE, Vol. 93, HY6, pp. 187-216, 1967.
- 9) Batchelor, G. K., Binnie, A. M. and Phillips, O. M. : "The Mean Velocity of Discrete Particles in Turbulent Flow on a Pipe", *Proc. Phys. Soc.*, Vol. 68, pp. 1095-1104, 1955.
- 10) 武岡英隆："海水交換と物質輸送の概念について", 愛媛大学紀要第III部, 9 (4), pp. 287-298, 1981.

(1997. 9. 30 受付)