

三次元潮流シミュレーションによる東京湾の海水混合の解析

小林卓也*・三村信男**・塚田光博***

1. はじめに

東京湾のような閉鎖性の内湾は、貧酸素水塊の形成や青潮の発達など深刻な水質汚濁問題に直面してきた。これらの水質汚濁現象の発生は湾内における流れや密度成層、さらに、外洋との海水交換や水塊の混合に密接に関連しているため、水質管理の上でこれらの特性を知ることが求められる。東京湾では、現在までに多くの現地調査が行われ、湾内の流動構造や水質分布に関する知見が蓄積されてきた。しかし、青潮の発生原因の一つである貧酸素水塊の分布など、水塊構造をより詳細に把握することが必要になっており、そのためには流動・密度場の数値シミュレーションが有力なツールになる。従来、内湾の海水交換や混合の程度を表すために、海水交換率という湾全体に対するオーバーオールな指標が用いられた。しかし、現実の内湾は地形が複雑で水塊混合にも場所的な分布が存在するため、湾全体の指標ではなく、より細かな空間スケールで流れの構造や混合特性を表現する手法が必要になっている。近年、こうした方向での研究（例えば中辻ら、1994；和田ら、1994）が行われている。

本研究では3次元数値シミュレーションによって得られた流動場、密度場をもとに、オイラー的及びラグランジュ的解析方法を用いた内湾内部での海水混合の指標、表現方法を検討し、東京湾に適用した。

2. 数値モデルの概要

2.1 潮流シミュレーションモデル

潮流に対する数値シミュレーションモデルは 3 次元の Navier-Stokes の式，連続式，熱・物質の拡散方程式を基礎式とした三村ら（1993）のものを用いた。これらの式を鉛直多層のレベルモデルを用いて，空間的にはスタッガードメッシュ，時間的にはリーブフロッグ法によって差分化して数値計算することによって，3 次元非定常の流動場と密度分布を求めた。

計算領域は図-1に示すような東京湾全域とし、水平方向には1 kmの格子に分割した。鉛直方向には、湾奥で水深10~20 mと浅い一方、湾口部には東京湾海谷があって水深200 mに達するなど水深の差が大きい。湾中央から湾奥にかけての浅海域で詳細な解析を行うため、水深30 mまでは不等間隔に2~5 m、それ以上は30 m毎に合計12層に分割した。

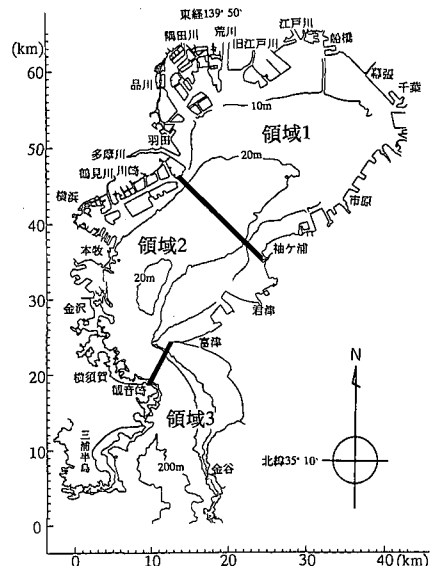
湾内の流動場を計算する上で、湾口部分で振幅 0.356 m、周期 12 時間の M_2 分潮成分を想定した水位変動を正弦波で与え、潮流を発生させた。河川水の流入も考慮し、東京湾に流れ込む河川の 60 % を占める江戸川・荒川・隅田川・多摩川・鶴見川の主要 5 河川を、それぞれの年平均流量で与え続けた。また、後で示すように、風（北東風）による吹送流も考慮した。

2.2 海水混合の指標化

以下に示す3つの方向から、海水混合の特性に多面的にアプローチした。

(1) 局所の海水交換率

局所的な海水交換（混合）の程度を表すために、東京



図一1 東京湾と領域区分

- ・ 工修 日本原子力研究所
- ・ 正会員 工博 茨城大学教授 工学部都市システム工学科
- ・ 茨城大学大学院 工学研究科

湾全体に水平方向1 km×1 km, 鉛直方向1 mのボックスを設定し, このボックス毎に1 潮汐当たりの流出量とボックス容積との比を求めて, 局所的な海水交換率と定義した。1 潮汐平均の流量フラックスは平均流によって決まる。そのため, この指標は, 平均流の移流による物質輸送の強弱をあらわす指標となっている。

(2) ラグランジュ的な粒子の追跡

湾内の種々の地点に多数の中立粒子を投入し, その流跡を追跡した。粒子の移動速度を(潮流・吹送流・密度流成分)+(乱流成分)で与え, ラグランジュ的に粒子の時々刻々の位置を追跡するもので, 流速の乱流成分は中辻ら(1994)と同様, モンテカルロ法で求めた。時間ステップ Δt 毎の粒子の移動量は次式で表される(小林ら, 1989)。

$$x_i = x_{i-1} + u(x_{i-1}, t)\Delta t + u'(x_{i-1}, t)\Delta t \quad \cdots (1)$$

右辺第1項は $i-1$ ステップの粒子の位置, 第2項は平均流速による移流, 第3項は乱れが1次のマルコフ過程に従うときの変動流速を示し, 次式で与える。

$$u'_i = \rho_i + \gamma_i \quad \cdots (2)$$

ここに, u'_i : i ステップの乱れ速度, γ_i : 平均0, 標準偏差 σ_0 の正規乱数, また, $\rho = \exp(-\Delta t/T_L)$, $\sigma_0^2 = (1 - \rho^2)D/T_L$, T_L は乱れの積分時間スケール, D は拡散係数である。従来の拡散係数に関する研究成果を参考にして, ここでは $T_L = 30$ 分, 水平, 鉛直方向の拡散係数は各々 $D_h = 10 \text{ m}^2/\text{s}$, $D_v = 0.05 \text{ m}^2/\text{s}$ とした。効率よく計算を行うため, 空間を一つのメッシュの周期的繰返しで近似する周期境界条件を用い, 湾口を通り越した粒子は湾内に戻らず, 海底, 海岸, 水面に達した粒子は完全反射するという境界条件を設定した。

(3) 小領域における海水交換率

図-1に示すように東京湾を滞留率の高い湾奥, 海水交換が活発な湾央と湾口の3つの小領域に分け, 領域毎に中立粒子を放流してラグランジュ的に粒子の移動を追跡した。各領域における粒子数の減少をカウントして領域毎の海水交換率を求めた。

2.3 計算ケース

東京湾の流況や水塊混合については従来から様々な調査研究が実施されてきた(例えば, 宇野木ら, 1980; 市原ら, 1980; 和田ら, 1994)。これらによって把握された流況や混合の概要は以下のようにまとめられる。

① 平均流は, 潮汐残差流, 吹送流, 密度流で構成され, そのパターンは風にもっとも強く支配される。

② 平均流のパターンは季節変化が大きい。秋・冬には湾奥で時計回りの循環流が形成される。夏の平均流のパターンは明瞭ではない。

③ 冬期には北から北東の風が卓越し, 西岸沿いに南下する流れが発達する。この流れは夏期にも存在する。

表-1 計算ケース

(湾奥成層(A), (B)は三村ら(1993)と同じ)

計算ケース	風	密度分布
CASE-1	無し	一様
CASE-2	北東風4.0 m/s	一様
CASE-3	無し	湾奥成層(A)
CASE-4	北東風4.0 m/s	湾奥成層(A)
CASE-5	北東風4.0 m/s	湾奥成層(B)

④ 湾口では表層で流出, 下層で流入という密度流的鉛直循環流の傾向がある。

⑤ 密度場は, 秋・冬は鉛直方向に一様になる傾向を示し, 密度勾配は湾口から湾奥に向かう水平方向に大きい。一方, 春・夏には表層に成層が形成され, 密度勾配は鉛直方向に大きくなる。

⑥ 近年の水質汚濁現象として, 千葉県沿岸での青潮発生があげられる。青潮は夏期に密度成層が存在する条件下で北東風が継続して吹いたときに発生する。

東京湾の流況, 密度構造, 水質混合はこのように, 季節によって大きく変化する。そこで, 密度成層の有無, 風(北東風)の有無の条件を組み合わせる表-1のように計算ケースを設定した。これらは, 秋・冬及び春・夏の特徴的な条件を選んだものとなっている。

3. 東京湾の海水混合の検討

3.1 局所的海水交換率の分布

(1) 全般的特点

図-2(a)~(e)に局所的海水交換率の分布を示す。これらは全て表層のものである。どのケースでも, 多摩川河口から市原沖に至る湾奥では海水混合はきわめて弱い。一方, 浦賀水道から湾口部ではどのケースでも海水交換が活発で, 100%以上の値を示している。これは, この領域では, 今回設定した1 km×1 km×1 mのボックスの水が1 潮汐(12時間)で全て入れ替わることを意味する。また, 図としては示さないが, 湾口部では特に中層(水深30 mから150 m程度)で大きな海水交換率が現れている。

こうした特徴は, 東京湾の潮汐が重複波性で湾口部で潮流が大きく, 富津岬や観音崎, 東京湾海谷などの地形の効果によって潮汐残差流が顕著になるためであると考えられる。

(2) 風と密度流の効果

東京湾の流動に対して風と密度成層の効果が大きいことは既に指摘されている。そこで, 表層での平均流のパターン(図-3(a)~(c))を参照しながら, これらの海水混合に対する影響を検討する。

北東風がないケース(Case-1)と連風するケース(Case-2)を比較すると, 湾奥部で若干局所的海水交換率

が増加するものの全般的なパターンに大きな変化はみられない。これは、図-3(a), (b) に示した平均流のパターンに大きな差がないことによって裏付けられる。

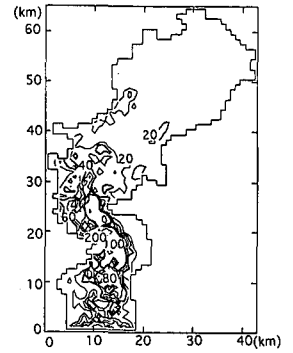
つぎに、密度成層の有無 (Case-1 と Case-3) を比較すると、密度界面が存在する付近で大きな変化が生じている。密度成層がある場合、密度界面付近に西に向かう強い平均流が現れ、それが神奈川沖の南下流につながっている。これに対応して、湾央に海水交換率が40~80%の領域が現れている。

さらに、密度成層の存在の上に風 (北東風) が作用すると海水交換率の分布は大きく変化する。図-2(d), (e) にみられるように、湾奥まで局所的交換率40%以上の領域が広がるようになる。これは、図-3(c)にみられるように、湾央・湾奥で水平循環流が強化されるためである。その他にも、北東風にとまって東岸沿いに湧昇流が励起されたことが寄与していると思われる。

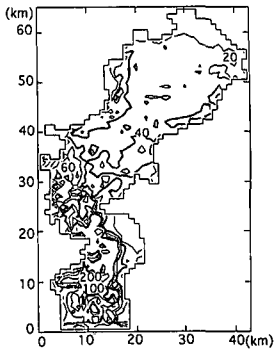
今回計算した Case-3 と 4 は夏期の特徴的な条件に対応している。Case-3 は無風で密度成層が存在している場合であるが、この時には、湾奥一帯の海水交換は非常に弱い。そのため水塊は停滞し、底層水が貧酸素化し易いと考えられる。こうした状況で北東風が吹けば、図-2(d) のように千葉県沿岸に底層水が湧昇し青潮現象を引き起こすことになる。

3.2 ラグランジュ的な粒子の追跡

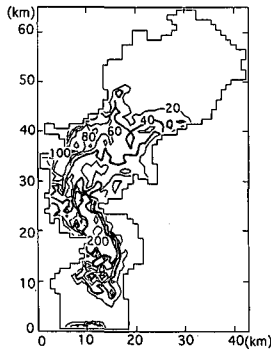
東京湾の海水交換の状況を視覚的にとらえるために様々な地点に中立粒子を投入し、拡散の様子を計算した。図-4, 5,



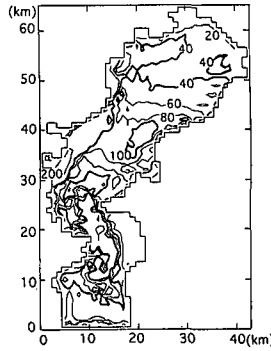
(a) Case-1

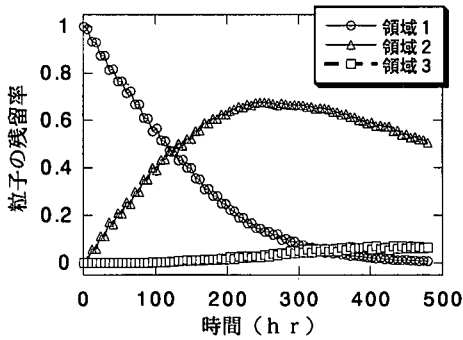


(b) Case-2



(c) Case-3





図一 粒子の残留率の時間変化 (領域1投入)

表一 湾奥 (領域1) の海水交換率

計算ケース	交換率
CASE-1	2.1%
CASE-2	4.1%
CASE-3	2.9%
CASE-4	5.4%
CASE-5	5.3%

を求めた。領域1の交換率を表一に示す。これをみると北東風の影響が大きく、風のないケース (Case-3 で交換率2.9%)、北東風がある場合には4.1%~5.4%と1.5倍程度になることがわかる。この結果から単純に計算すれば、東京湾の湾奥 (領域1) の水が入れ替わるのに37日から95日を要することになる。

もちろん湾奥にも交換率の分布があり、場所によって滞留時間が異なるため、水塊の中にはもっと長く滞留するものも存在する。さらに、流出した水塊が環流して再び湾奥に流入し、累積的に滞留時間が増加する可能性があることにも注意を要する。

4. おわりに

本研究は、内湾内部における海水の混合を対象にしたものであるが、目的は次の2つにまとめられる。第1は、

空間的に細かなスケールでの海水混合をいかに把握し、表現するかという手法の検討である。湾内における水塊の停滞域を把握できれば、貧酸素水塊の形成をはじめ水質変化の予測に有用なデータを提供するものになる。そのために、本研究では、局所的な海水交換率やラグランジュ的な粒子の追跡を用いる方法を提案した。第2の目的は、これらの手法を東京湾に適用し、特徴的な気象、海象条件に対応する混合特性を明らかにすることであった。その結果、東京湾の海水混合が風や密度成層に強く依存していることを示した。これらは、従来からも指摘されていることであるが、3次元の潮流シミュレーションの結果を用いることによって、より詳細な空間分布を求めた。

このように、3次元の数値モデルは内湾での海水混合を検討する上で強力なツールになりうる。しかし、求められた結果の妥当性を検証するには総合的な現地調査のデータが不足している。こうしたモデルの精度を向上させる上でも、さらに詳細な現地観測の実施が望まれる。

参考文献

- 市原正史・木村哲夫・福代倫男・野沢良一 (1980): 東京湾の潮流観測とシミュレーション, 第27回海岸工学講演会論文集, pp. 448-452.
- 宇野木早苗・岡崎守良・長島秀樹 (1980): 東京湾の循環流と海峡, Technical Report No. 4, 理化学研究所海洋物理研究室, 255 p.
- 宇野木早苗 (1985): 第9章東京湾II, 日本全国沿岸海洋誌, pp. 344-361.
- 小林紘士・和田明・角湯正剛 (1989): 流体数値実験, 朝倉書店, pp. 55-64.
- 中辻啓二・末吉寿明・山根伸之・藤原建紀 (1994): 三次元粒子追跡による流動構造の解明, 海岸工学論文集, 第41巻, pp. 326-330.
- 堀江 毅・村上和男・亀山 豊・入尾野幸雄 (1977): 水理模型実験による海水交換率の算定, 第24回海岸工学講演会論文集, pp. 491-495.
- 三村信男・矢内勝浩・小林卓也・登坂弘明 (1993): 密度成層を考慮した東京湾の潮流の数値シミュレーション, 海岸工学論文集, 第40巻, pp. 1006-1010.
- 和田 明・高野泰隆・穂積照雄 (1994): 湾内水の滞留時間の推定, 水工論文集, 第38巻, pp. 331-336.