

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

三村 信男*・矢内 勝浩**・小林 卓也***・登坂 弘明****

1. はじめに

東京湾は、貧酸素水塊の形成や青潮の発生など深刻な水質汚濁に直面してきた。こうした水質汚濁現象の発生は湾内における流れや密度成層に密接に関連しているため、水質管理の上で湾内の流動・密度場を知ることが不可欠である。東京湾における流れの現地観測は、以前から数多く行われてきており、概略次のような知見が得られている(市原ら, 1980; 宇野木, 1985)。東京湾の恒流は、湾口部において、上層流出、下層流入の傾向にあり、湾内ではとくに冬期時計回りの環流が形成される。また、西岸沿いに南下流が存在する。こうした恒流のパターンは、潮汐だけでなく、風や密度成層の有無に応じて複雑に変化することも指摘されている。一方、平面的なパターンだけでなく鉛直方向の現象も重要で、青潮は北からの風が連風した時に生じる底層水の湧昇によって発生することが明らかにされている。

従って、内湾の水質の予測、評価を行うためには、物理環境に関する数値モデルにも湾内の流動場と密度場の両者を3次元的に再現、予測することが求められる。本研究では、その第一歩として密度分布の効果を組み込んだ潮流の数値シミュレーションモデルを構築し、このモデルを用いて、東京湾の流動場に対する風と密度分布の影響を解析した。

2. 数値モデルの概要

(1) 基礎式と差分化

モデルの基礎式は、3次元の Navie-Stokes の式、連続の式、塩分濃度の拡散方程式、熱収支の式、海水の密度と水温・塩分濃度を関係づける状態方程式である。数値計算法としては鉛直多層のレベルモデルを用い、座標系は、平均海面上に x, y 軸を、鉛直下向きに z 軸を設定する。水深を鉛直方向に n 層に分割し、表層を $k=1$ とし第 k 層の層厚を h_k とすると、層毎に積分された基礎方程式は次のようになる (Leendertse ら, 1973; 中田ら,

1985)。

(運動方程式)

$$\begin{aligned} \frac{\partial M_k}{\partial t} = & -\frac{\partial}{\partial x}(M_k u_k) - \frac{\partial}{\partial y}(M_k v_k) - (uw)_{k-1/2} \\ & + (uw)_{k+1/2} + fN_k + \frac{1}{\rho_k} \left\{ P_k - \frac{1}{2} gh_k \frac{\partial \rho_k}{\partial x} \right\} \\ & + \frac{\partial}{\partial x} \left(A_x \frac{\partial M_k}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(A_y \frac{\partial M_k}{\partial y} \right) \\ & + \frac{1}{\rho_k} \tau_{x,k-1/2} - \frac{1}{\rho_k} \tau_{x,k+1/2} \dots\dots\dots (1) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial N_k}{\partial t} = & -\frac{\partial}{\partial x}(N_k u_k) - \frac{\partial}{\partial y}(N_k v_k) - (vw)_{k-1/2} \\ & + (vw)_{k+1/2} - fM_k + \frac{1}{\rho_k} \left\{ P_k - \frac{1}{2} gh_k \frac{\partial \rho_k}{\partial y} \right\} \\ & + \frac{\partial}{\partial x} \left(A_x \frac{\partial N_k}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(A_y \frac{\partial N_k}{\partial y} \right) \\ & + \frac{1}{\rho_k} \tau_{y,k-1/2} - \frac{1}{\rho_k} \tau_{y,k+1/2} \dots\dots\dots (2) \end{aligned}$$

$$P_k = \sum_k (h_k \rho_k g) \dots\dots\dots (3)$$

(連続の式)

$$\text{第1層} \quad \frac{\partial \zeta}{\partial t} = w_{1/2} - \frac{\partial M_1}{\partial x} - \frac{\partial N_1}{\partial y} \dots\dots\dots (4)$$

$$\text{第 } k \text{ 層} \quad w_{k-1/2} = w_{k+1/2} - \frac{\partial M_k}{\partial x} - \frac{\partial N_k}{\partial y} \dots\dots\dots (5)$$

(塩分・熱の拡散方程式)

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(h_k C_k) = & -\frac{\partial}{\partial x}(M_k C_k) - \frac{\partial}{\partial y}(N_k C_k) \\ & - (wC)_{k-1/2} + (wC)_{k+1/2} + \frac{\partial}{\partial x} \left(h_k K_x \frac{\partial C_k}{\partial x} \right) \\ & + \frac{\partial}{\partial y} \left(h_k K_y \frac{\partial C_k}{\partial y} \right) + \left(K_z \frac{\partial C_k}{\partial z} \right)_{k-1/2} \\ & - \left(K_z \frac{\partial C_k}{\partial z} \right)_{k+1/2} - Q_s \dots\dots\dots (6) \end{aligned}$$

(状態方程式)

$$\rho = \rho(S, T) \dots\dots\dots (7)$$

ここで、 $M_k = \int_{h_k} u dz$, $N_k = \int_{h_k} v dz$ であり、 u, v, w はそれぞれ x, y, z 方向の流速、 τ_x, τ_y は各層間のせん断応力、 f はコリオリパラメタ、 P は層平均圧力、 ρ は海水密度、 S, T はそれぞれ塩分濃度と水温で C はそのどちら

* 正 会 員 工 博 茨城大学助教授 工学部都市システム工学科

** 工 修 茨城県庁 土木部港湾課

*** 学生会員 茨城大学大学院 工学研究科

**** 工 修 新日本気象海洋株式会社

かを表す。 Q_s は熱収支の式における表面での太陽放射による熱の流入を表す。さらに、 A_x, A_y は x, y 方向の渦動粘性係数であり、 K_x, K_y, K_z は x, y, z 方向の渦動拡散係数、 ξ は平均海面からその時点の海面までの高さである。添字の k は第 k 層を表し ($\pm 1/2$) はそれぞれ第 k 層の上下面での値であることを示す。式 (3) のように静水圧分布が仮定できるとして鉛直方向の運動方程式は簡単化されている。

鉛直方向の運動量の移動と物質の拡散は、水域の成層の程度によって大きく変化することから、鉛直渦動粘性係数 A_z (せん断応力 τ を求める際に用いる) と鉛直渦動拡散係数 K_z は Leendertse (1975) にない、Richardson 数の関数として与えた。

海表面と海底面の摩擦応力はそれぞれ次式で与えた.

海表面 $\tau_s = C^* \rho_a W_a^2 \dots\dots\dots (8)$

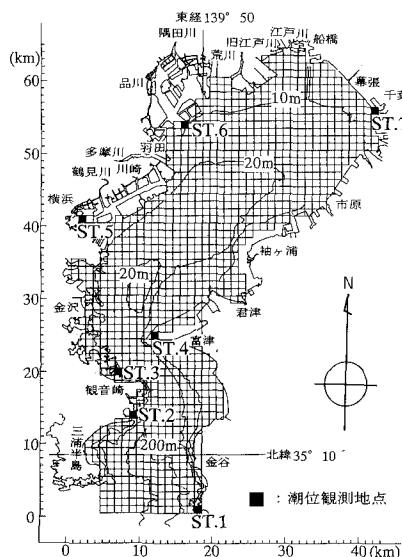
海底面 $\tau_{b,i} = \rho g C_b u_i \sqrt{u^2 + v^2} \dots\dots\dots (9)$

ここで、 W_a は海上風速、 ρ_a は空気密度、 C^* は海表面の摩擦係数、 C_b は海底面の摩擦係数、 g は重力加速度である。

基礎式を空間的にはスタッガードメッシュ，時間的にはリープフロッグ法によって差分化して数値計算することにより，非定常・3次元の流動場と密度分布を求めた。

(2) 東京湾の計算領域

計算領域は東京湾全域とし、水域を水平方向には1 kmの格子に分割した。図-1に示すように合計1138個のメッシュで東京湾全域が覆われている。一方、鉛直方向は不等間隔で12層に分割した。東京湾は、湾奥から湾奥にかけては水深20 m前後と浅いが、湾口付近には水深が



図一1 東京湾の計算領域

表一1 計算ケース

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	北東風 4.0 m/s	湾奥成層 (A)
CASE-4	北東風 4.0 m/s	湾奥成層 (B)

200 m に達する地点もあり、複雑な地形をしている。湾奥から湾奥にかけて広がる浅海域で詳細な解析を行うため、表層(第1層)は層厚 2 m、第2層は 3 m、そこから水深 30 m までは層厚 5 m の 7 層に分割し、それ以降は 30 m 毎に分割した。

湾口部は地形が複雑ですぐに外洋となって広がっている。ここに開境界をもうけると計算が不安定になったので、湾口部に 5 km の延長区間をもうけ、そこを開境界とした。

(3) 境界条件と計算ケース

湾口部分で、振幅 0.356 m、周期 12 時間の潮汐 (M_2 分潮を想定) の水位変動を正弦波で与え、湾内の潮流を発生させた。河川水の流入も考慮し、江戸川・荒川・隅田川・多摩川・鶴見川の主要な 5 河川で各々の年平均流入量を与え続けた。

東京湾の流動と水質変化には、風と成層化の効果が大きい。又、青潮発生の条件として、晩春から初秋にかけての時期で湾内の成層が発達している場合であること、発生日の前に北東風が季節外れに高い値で継続することの二つの要因が挙げられている。そこで、湾内の成層の有無、北東からの風(風速 4.0 m/s)の有無という条件を組み合わせて計算を行った。表-1 に計算ケースを示す。

3. 湾内の潮汐の再現性

まず、本モデルの妥当性を検討するために計算結果と実測値との比較を行った。実測値としては、村上(1981)が行った調和解析による M_2 分潮の潮位振幅および潮流

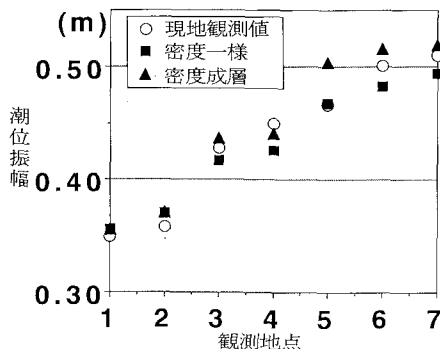


図-2 潮位振幅の比較

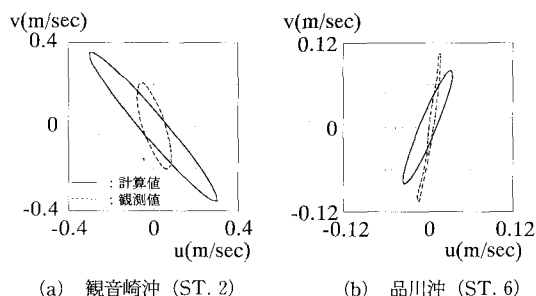


図-3 潮流だ円の比較

楕円を用いた。図-2に各測定点における潮位振幅の実測値と計算値(CASE-2, 4)との比較を示す。計算値においても測定点が湾奥に行くほど潮位振幅が大きくなり、湾奥では湾口部の約1.4倍になるなど、振幅変化がほぼよく表されている。全体的にみて若干計算値の方が小さいが、その差は3 cm以下と小さい。潮流だ円の比較の例を図-3に示すが、潮流だ円でみると再現性は落ちるものの、湾中央から湾奥にかけての広い水域で流速、長軸の方向ともに、観測結果とある程度一致する傾向が得られた。

これらの結果より、本モデルは東京湾の潮汐を大局的には良く再現しているといえる。

4. 東京湾の流動・密度場の特性

(1) 流れのパターン

水域の物質輸送に重要な役割を果たす流れとして、恒流がある。恒流を形成する成分としては、潮汐残差流、密度流、風による吹送流などが挙げられる。夏期の東京湾における恒流の卓越方向・成分は、これらの要因の変化に対応して複雑な様相を呈すると指摘されている(宇

野木, 1985)。そこで、各CASEの計算で得られた潮汐残差流を比較する事によって各要因の影響を検討した。今回の計算結果と比較するため、夏期の表、下層における流況(宇野木, 1985)を図-4(a), (b)に示す。

a) CASE-1: 密度一様、無風の場合

まず、無風で海水密度を全水域で一様とした場合の表層の潮汐残差流を図-5に示す。富津岬と観音崎の間の海峡部分で、神奈川県側で湾内水が流出、千葉県側で外洋水が流入するという傾向が現れており、湾口部のこの流れのパターンは図-4(a)と一致している。過去の研究においても指摘されている通り、この流況は地形の影響によって発生するものと考えられる。湾中央から湾奥にかけての水域では、恒流の流速は小さく、定まった傾向はみられない。

これらのことから、湾口から富津岬付近までの恒流は潮汐残差流としての性格が強いが、それより湾奥の部分では恒流の形成に関して潮流はあまり大きな影響を及ぼさないといえる。

b) CASE-2: 密度一様、北東風の場合

次に海水密度一様のままで4.0 m/sの北東風を与え続けた場合の表層の恒流の流速ベクトルを図-6に示す。この場合には、表層での吹送流が発達し、湾の全水域で西もしくは南西方向へ向かう流れが発達しているのが特徴的である。また、この場合にも富津～観音崎間には無風の場合と同様の流れが存在し、千葉県側では流入、神奈川県側では流出の傾向が現れている。湾内へと流入した流れは横浜沖のあたりまで流入している。

c) CASE-4: 密度成層、北東風の場合

初期条件としてほぼ全水域に密度成層を与え、4.0 m/sの北東風をかけ続けた場合の表層と下層(水深15 m)における残差流を図-7(a), (b)に示す。まず表層の様子

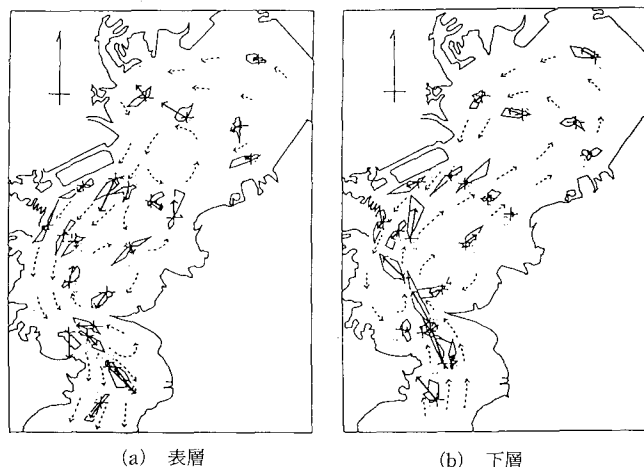


図-4 東京湾における恒流のパターン

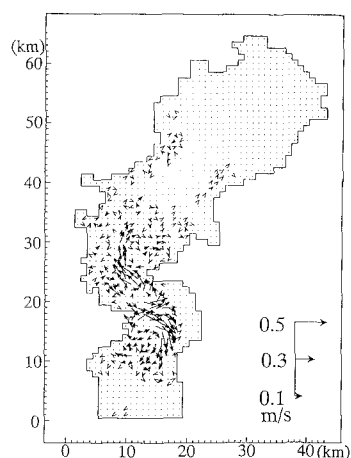


図-5 表層の恒流 (CASE-1)

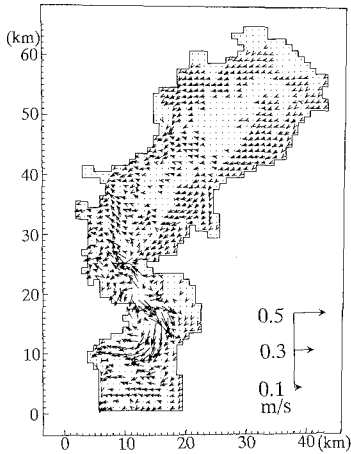
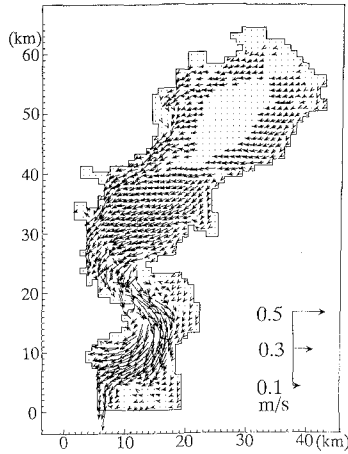
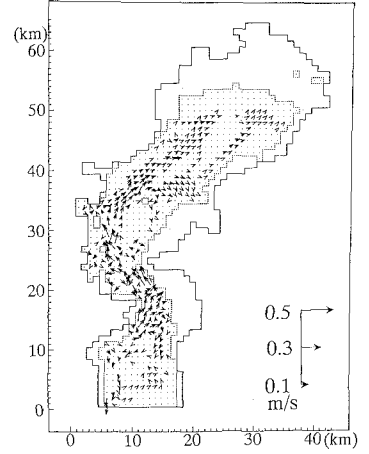


図-6 表層の恒流 (CASE-2)



(a) 表層



(b) 下層 (水深 15 m)

図-7 恒流 (CASE-4)

(図-7(a))を見てみると、湾全体に西もしくは南西向きの流れが発達しているが、図-6と比べてさらに強められている。流速が大きくなるにつれて、地球自転の効果が強く働き、流向が西向きにそろうようになり、それが、横浜沖での南下流に合流している。一方下層の流れでは、風向きと反対方向の湾奥への強い流れが水域全体で卓越している様子がわかる。密度成層は、水平、鉛直両面で恒流のパターンを強化するように作用しているといえる。

CASE-1とCASE-3における恒流成分の大きさを比べたところ、観音崎と富津周辺では、両者とも表層で10 cm/s程度の大きさで違いはなかった。一方、東京湾内で南下流の発達する横浜沖では成層を与えたCASE-3の方が4～5倍大きい。このことから、湾口の恒流は主と

して潮流によるものであり、観音崎と富津間より湾内側の恒流には風や密度成層の効果がより支配的であるといえる。

(2) 湾内の恒流に対する密度成層の効果

密度分布が流れに及ぼす影響を捉えるために密度分布の初期条件を図-8のように(A)、(B)の2通り設定し、それらの違いによる流れの変化を比較した。計算では双方に同じく4.0 m/sの北東風を与えた。初期条件(A) (CASE-3)に対する表層の恒流を図-9に示すが、初期条件(B) (CASE-4)の計算結果はすでに図-7(a)で示した通りである。

(A)、(B)ともに風と地球自転の効果のために表層全体の流れは南西へと向かっているが、その様子は大きく違っている。(A)では湾の中央付近に存在する密度界面

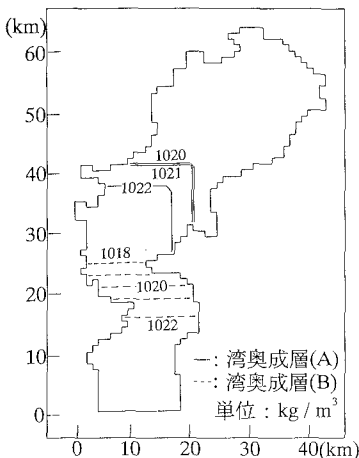


図-8 密度分布の初期条件

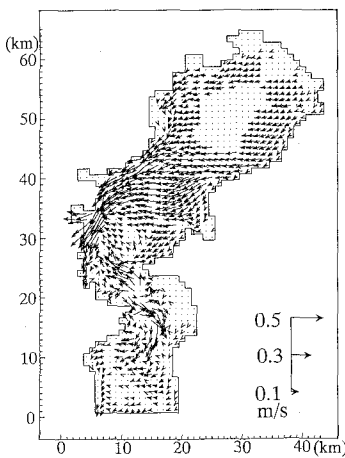
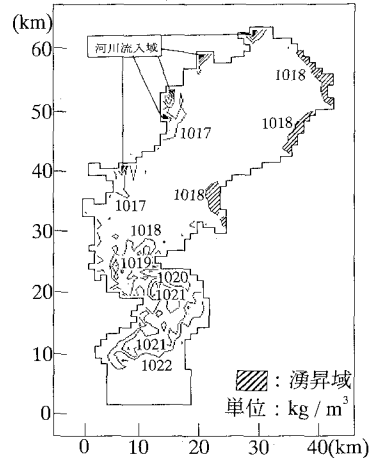


図-9 表層の恒流 (CASE-3)

図-10 表層の密度分布
(12時間後)

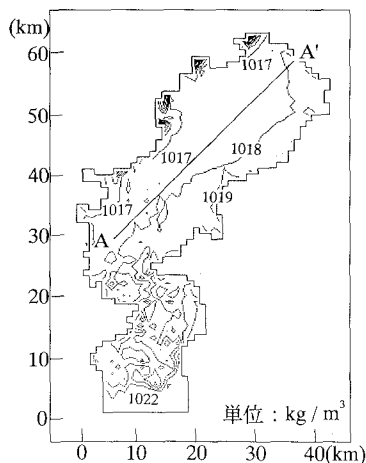


図-11 表層の密度分布
(24時間後)

に沿うように、東から西へ向かう流れがみられる。一方(B)では、内湾水全体が湾口へと流出しており、局所的な強い流れは内湾部ではほとんど見られない。このケースでは逆に観音崎・富津から湾口にかけての領域に強い恒流が現れている。このように、密度界面の存在が流動に非常に大きな影響を及ぼすことが確認できる。夏期における湾内の成層のパターンは常に同一ではありえないので、それに応じて複雑な恒流のパターンが生じることが理解される。

(3) 密度場の時間変化

密度の初期分布を与えて北東風を連吹させ始めてから12時間後の密度の表層の分布の様子を図-10に、24時間後の様子を図-11に示した(CASE-4)。

まず12時間後の様子を見てみると、千葉市、市原市、木更津市の岸寄りの水域に底層の密度の高い水塊が出現している。図-11の中のA-A'の線に沿った鉛直断面内の流れを図-12に示すが、表層では湾口へと流れ、それ以下の層では湾奥に向かって流れ鉛直循環が生じ、千葉県沿岸では底層水が湧昇する様子がわかる。これらの湧昇域は過去に青潮が観測された地点とかなり良く一致している。夏期に成層化が進み底層に貧酸素水塊が存在している時に北東風が連吹した場合には、これらの水域において青潮が発生する可能性が高い。

次に24時間後の様子を見ると、密度の高い水塊が湾の東側全域に広がり、時間が経過するにつれて湧昇した底層水が広がっていく様子がわかる。

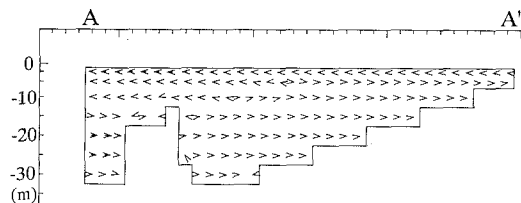


図-12 鉛直断面内の恒流の分布
(A-A'断面)

6. 結 論

本研究では、密度効果を考慮した東京湾の流動場のモデルを構築した。このモデルは、潮位振幅、潮流楕円などにおいて現地観測から得られた結果をかなり良く再現しており、モデルとしての妥当性が確認された。

このモデルによる検討の結果、東京湾の恒流の特徴が把握された。すなわち、湾口から富津付近の水域までは潮流成分が卓越しているが、それより湾奥の部分においては潮汐残差流は弱くなり、吹送流など、他の要因による恒流が支配的になる。密度分布は流れの水平構造、鉛直構造に大きな影響を与え、風に起因する恒流も密度分布の影響を受ける。さらに、密度成層発達時に、青潮の発生要因のひとつとされている北東風を連吹させると、千葉市から木更津市にかけての岸側の水域で底層水が湧昇する現象が確認できた。

今回のモデルは3次元の流れの構造をある程度計算しうるものであるが、開境界における境界条件や計算時間などの点に問題があり、より効率的なアルゴリズムが必要である。これらの点に関して今後検討を進める必要がある。

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回海講論文集, pp. 448-452.
- 宇野木早苗(1985): 第9章東京湾II物理, 日本全国沿岸海洋誌, pp. 344-361.
- 中田喜三郎・石川公敏・松川康夫 (1985): 内湾の流動場の数値実験, 沿岸海洋研究ノート, 第22巻, 第2号, pp. 96-108.
- 村上和男 (1981): 有限要素法による潮汐流の計算, 港湾技研資料, No. 404, 95 p.
- Leendertse, J. J and Siao-Kung Liu (1975): A Three Dimensional Model for Estuaries and Coastal Seas; Volume II, aspects of computation, the RAND Corporation, R-1764-OWRT, 123 p.