

河道モデルと沿岸流動モデルの統合とその必要性に関する検討

Integration of River Model and Estuary Model and Necessity of the Integrated Model

中山恵介¹⁾ Dutta DUSHMANTA²⁾ 田中 岳³⁾ 岡田知也¹⁾
Keisuke NAKAYAMA Dutta DUSHMANTA Gaku TANAKA Tomonari OKADA

- 1) 国土技術政策総合研究所
National Institute for Land and Infrastructure Management
- 2) 東京大学生産技術研究所
Institute of Industrial Science, The University of Tokyo
- 3) 北海道大学大学院工学研究科
Graduate School of Engineering, Hokkaido University

本論文では、統合型沿岸流動モデルを作成することによるメリットを示すために、河道モデルと沿岸流動モデルを統合させ、東京湾におけるその影響評価を行った。統合型沿岸流動モデルとは、水文モデル、沿岸流動モデル、気象モデルにより構成されるものを示す。閉鎖性内湾において長期における物質循環に大きな役割を果たしているのは、湾内の密度を卓越的に決定している塩分であると言える。そこで本論文では、統合型沿岸流動モデルの必要性を検討するために、水文モデル中に含むことができる河道モデルと沿岸流動モデルを組み合わせ、湾内における塩分濃度に関する検討を行う。河川流量を2種類、潮汐振幅を3種類与え、感潮域におけるバックウォーターの影響を考慮した場合としない場合の湾内平均塩分による海水交換を検討した。その結果、河川流量を一定値として潮汐による河川流量の変化を考慮した場合、河道モデルより与えられる河川流量が、潮汐により生じる河川流量の最大値より小さい場合、湾内平均塩分が大きく低下してゆくことが分かった。それゆえ、河口での塩分フラックスを高精度で再現するためには、感潮域の特徴を含むことができる河道モデルと沿岸流動モデルの統合が必要であることが分かった。

キーワード: 統合型沿岸流動モデル、水文モデル、潮汐、海水交換、タンクモデル

In this study, the effect of integration of river model and estuary model was evaluated to demonstrate the benefit of an integrated estuary model. An integrated estuary model consists of hydrological model, estuary model and meteorological model. In general, salinity distribution may be found to be significant for the evaluation of long-term water quality in an enclosed bay because salinity mainly controls density in a bay. Therefore, the influence of tide on salinity in a bay was investigated to demonstrate the necessity of an integrated estuary model. Two different river discharges and three different tidal amplitudes were used to examine the influence of tidal effect on salinity flux at the mouth of river. It was revealed that, for the case where river discharge at the upstream end of river model is constant and river discharge due to tide is included, with increasing reduction of average salinity from initial conditions, the river discharge at the upstream end was smaller than river discharge due to tide. The integration of river model, which can include the feature of estuary, and estuary model is, thus, found to be important to evaluate salinity flux at the mouth of river accurately.

Key words: Integrated estuary model, Hydrological model, Tide, Seawater exchange, Tank model

はじめに

東京湾のように栄養塩が十分に存在する、いわゆる閉鎖性内湾では、その供給源である河川中の流れの正確な再現が、重要な課題として挙げられる。例えば、1次汚染型と考えられる河川からの栄養塩の供給は、2次汚染型である増殖したプランクトンな

どによる汚染に比べ影響が数倍であることが示されている(小倉編, 1993)。そのため、閉鎖性内湾に河川から流入する栄養塩のフラックスを正確に把握することが重要であると考えられる。

これまで、多くのモデルが閉鎖性内湾における水質環境を評価するために用いられてきた。しかし多くのモデルは、1ヶ月、半年、それ以上という時間

1) 沿岸海洋研究部 〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1 Yokosuka, 239-0826, Japan

2) 〒153-8505 東京都目黒区駒場4-6-1 Tokyo, 153-8505, Japan

3) 〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目 Sapporo, 060-8628, Japan

スケールに注目したものが多く、それ以下の時間スケールである、大潮、小潮周期などによる河川からの物質のフラックスに注目して作成されたものではない。そのため、これまでのモデルにおける河道の再現性は低く、河川からのある物質のフラックスの潮汐による影響を高精度に再現できるものではなかった。

そこで、河川からの栄養塩などの物質のフラックスを高精度に再現するために、湾内流動モデルに、物質のフラックスの再現性を向上することができるという改良を加えた河道モデルを統合する必要がある。

物質のフラックスを再現するために、まず再現性が検討されなくてはならない。流量を再現するためのモデルとして、多くのモデルが存在するが、ここでは分布型流出モデル (Dutta *et al.*, 2000; Tachikawa *et al.*, 2003), タンクモデル (例えば、国松ら, 1989) を例として考える。両モデルとも、栄養塩モデルを導入し、流域におけるノンポイントソースの影響を考慮することで、栄養塩フラックスを再現できる。タンクモデルの計算時間は短く実用的であるが、タンクモデルでは河道モデルを持たないため、潮汐の影響 (バックウォーター) による河口での正確なフラックスを考慮することができない。一方、

分布型流出モデルは、浅水流方程式を用いて河道を再現しているため、河口部でのフラックスを再現することは容易である。しかし、計算時間がタンクモデルに比べて長いという欠点を持つ。

そこで本論文では、タンクモデルを用いてもフラックスを精度よく再現できるような河道モデルを沿岸流動モデルに統合することを提案する。さらに、潮汐の影響による感潮河川内での流れを精度よく再現することによる、フラックス再現の精度向上に関する検討を行うことを目的とする。

・統合型沿岸流動モデル

本論文で検討する河道モデルと沿岸流動モデルの統合に関して、タンクモデルと分布型流出モデルの統合型沿岸流動モデルへの適用法について紹介する。分布型流出モデルは、物理過程に基づき流れが計算され、潮汐による河口部におけるバックウォーターの影響を考慮できるため、タンクモデルよりも統合向きであるといえる。しかし、計算時間がタンクモデルに比べて長く、例えば東京湾に注ぎ込む全流域を分布型流出モデルで再現することは、現段階では困難である。

そこで、統合型沿岸流動モデルを構築する際、2つのタイプを提案することができる (図 - 1)。

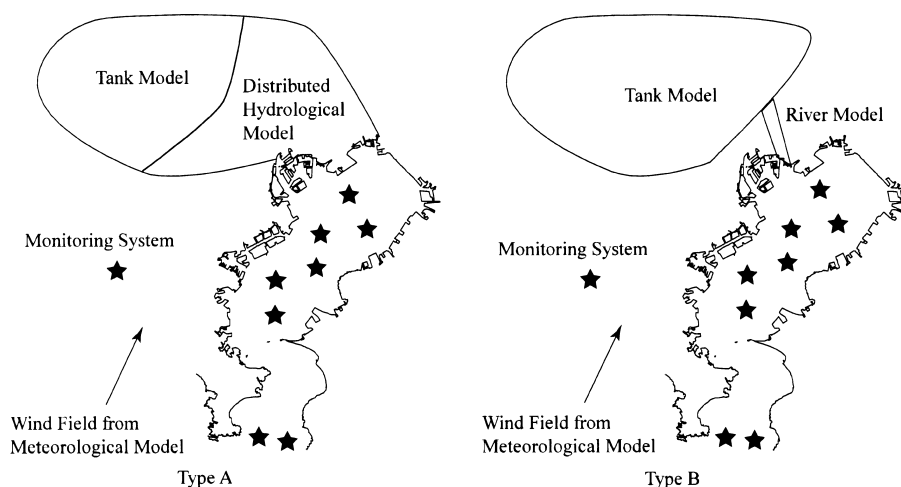


図 - 1 水文モデルと沿岸流動モデルの統合手法。Type A：上流域にタンクモデルをもちい、下流域に分布型流出モデルを用い水文モデルを結合する。Type B：感潮域を除いた全流域にタンクモデルを用い、河道モデルにより結合する。

Fig. 1 Schematic diagram to show integrated estuary model. Type A: Upstream region is modeled using Tank model and downstream region is modeled using distributed hydrological model. Type B: Tank model and river model are used.

Type A はタンクモデルと分布型流出モデルを結合し、計算時間を短縮することができるものであり、バックウォーターの影響も考慮できる。Type B は感潮域を除いた流域全体にタンクモデルを用い、感潮域に河道モデルを用いるものであり、計算時間を大幅に短縮することができる。

1. 河道モデル

分布型流出モデルを用いた Type A は、河口でのフラックスを精度よく計算できる水文モデルとして、そのまま利用できる。一方、現実的な問題として、計算時間が短い Type B の沿岸流動モデルへの統合が望まれる。そこで、タンクモデルを沿岸流動モデルに結合する際に Type B で生じる、フラックスに関する問題を解決する方法を示す。まず、タンクモデルの下流端を、感潮域を除いた河道の下流端と一致すると定義する。そして、その下流端には、潮汐の影響を考慮できる物質の移流拡散モデルを結合する。結合されるモデルは、通常の物質の移流拡散モデルであり、流速は、タンクモデルにより与えられる流量に潮汐による流量を加えたものから得られるものとする。

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_r} (\phi u_r) = \frac{\partial}{\partial x_r} \left(K_r \frac{\partial \phi}{\partial x_r} \right) \quad (1)$$

$$u_r = u_R + \frac{2\pi a_T x_r}{T_T h} \sin\left(\frac{2\pi}{T_T} t\right) \quad (2)$$

$$K_r = \alpha C_m l^2 \sqrt{\frac{C_m}{C_\varepsilon}} \frac{u_r}{h_r} \quad (3)$$

$$C_m = 0.0856 \quad (4)$$

$$C_\varepsilon = 0.845 \quad (5)$$

$$\eta_T = a_T \left\{ 1 - \cos\left(\frac{2\pi}{T_T} t\right) \right\} \quad (6)$$

ここで、 u_r ：流下方向流速、 K_r ：渦拡散係数、 C_m 、 C_ε ：乱流定数、 ϕ ：ある注目する物質、 x_r ：感潮河川域の上流端をゼロとし下流に向けて増加する距離、 u_R ：タンクモデルにより与えられる河道内での流速、 a_T ：潮汐振幅、 T_T ：潮汐周期、 h ：水深、 l ：代表距離、 α ：河道にあわせた定数、 η_T ：潮位変化量である。

潮汐の影響を考慮しない場合、常に河川から流出するのみであるのに対して、潮汐の影響を考慮することにより、河川からの流出と湾から河川内への流入が、潮汐波の周期で発生することを再現できるようになる。長期的にみた場合、この潮汐周期での流量の変動が、拡散の効果として働くことが予想され、

この効果を検討することは、重要な問題の一つであるといえる。

2. 沿岸流動モデル

河川水の広がり、流量が注ぎ込む湾の体積に比べて大きい場合（数百日で海水が交換する程度の流量）、広がってゆく河川水は、フロントをともなった密度流であるといえる。そのため、湾内における淡水量を精確に再現するためには、非静水圧モデルを用いる必要がある。そこで、本論文では3次元非静水圧モデルである MEL3D を用いる（中山ほか、2000）。連続の式、運動方程式は以下の通りである。

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (7)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_k \frac{\partial u_i}{\partial x_k} = - \frac{\partial R_{ik}}{\partial x_k} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \delta_{i3} \frac{g \rho'}{\rho} + \nu \nabla^2 u_i \quad (8)$$

ここで、 u_i ：流速（ $i = 1, 2, 3$ 各軸に対応する）、 ρ ：密度、 p ：圧力、 ρ' ：密度の偏差、 ν ：動粘性係数である。

水温、塩分に関する移流拡散方程式は、以下の通りである。

$$\frac{\partial \theta_T}{\partial t} + u_k \frac{\partial \theta_T}{\partial x_k} = \frac{\partial}{\partial x_k} \left(K_{hk} \frac{\partial \theta_T}{\partial x_k} \right) + \kappa_T \nabla^2 \theta_T \quad (9)$$

$$\frac{\partial \theta_s}{\partial t} + u_k \frac{\partial \theta_s}{\partial x_k} = \frac{\partial}{\partial x_k} \left(K_{hk} \frac{\partial \theta_s}{\partial x_k} \right) + \kappa_s \nabla^2 \theta_s \quad (10)$$

ここで、 θ_T ：水温、 θ_s ：塩分濃度、 κ_T ：水温の拡散係数、 κ_s ：塩分の拡散係数、 K_{hi} ：渦拡散係数である。

乱流エネルギーは、以下に示される1方程式モデルに順ずる（Deardorff, 1975 and 1980；Klemp and Wilhelmson, 1978）。

$$\begin{aligned} \frac{\partial E_v}{\partial t} + u_k \frac{\partial E_v}{\partial x_k} + R_{ik} \frac{\partial u_i}{\partial x_k} &= \frac{\partial}{\partial x_k} \left(K_{mk} \frac{\partial E_v}{\partial x_k} \right) \\ &+ \delta_{i3} g \frac{1}{\rho} \overline{u_i' \rho'} - C_\varepsilon E_v^{3/2} / \Delta_v \end{aligned} \quad (11)$$

$$\rho' = f(\theta, \theta_s) \quad (12)$$

$$R_{ik} = \overline{u_i' u_k'} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \overline{u_i' u_k'} &= \delta_{i1} \frac{2}{3} E_h + \delta_{i2} \frac{2}{3} E_h + \delta_{i3} \frac{2}{3} E_v \\ &- K_{mk} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_k} + \frac{\partial u_k}{\partial x_i} \right) \end{aligned} \quad (14)$$

$$\overline{u_i' \rho'} = K_{hi} \frac{\partial \rho}{\partial x_i} \quad (15)$$

ここで、 Δ_v ：鉛直方向の代表長さである。

本モデルでは、1方程式の乱流モデルを全ての方向に関して1本しか用いない。湾内の計算を行う場合には、水平と鉛直のメッシュの間隔の比が大きく、2本別々に用いることがより適当であると考えられるが、本論文では計算時間短縮のため、1本のみ用いる。この1本は、メッシュ間隔がより小さい軸における乱流エネルギーを示している。そこで、水平方向に関して等方性の仮定のもと、鉛直方向の乱流エネルギー方程式で得られた散逸と生成の関係は、水平方向のものと同一であるとする。すると、水平方向の乱流エネルギーを以下の式で得ることができる。

$$\frac{C_\varepsilon E_v^{3/2}}{\Delta_v} = \frac{C_\varepsilon E_h^{3/2}}{\Delta_h} \rightarrow E_h = \left(\frac{\Delta_h}{\Delta_v} \right)^{2/3} E_v \quad (16)$$

$$K_{m1} K_{m2} = C_m E_h^{1/2} \Delta_h \quad (17)$$

$$K_{m3} = C_m E_v^{1/2} \Delta_v \quad (18)$$

$$K_{h1} K_{h2} = C_m E_h^{1/2} \Delta_h / Pr \quad (19)$$

$$K_{h3} = C_m E_v^{1/2} \Delta_v / Pr_t \quad (20)$$

ここで、 Δ_h ：水平方向の代表長さである。

成層状態による鉛直フラックスの変化を考慮するために、代数方程式化し定常状態を仮定した2方程式モデルから、以下の乱流プラントル数を用いることとする (Lilly *et al.*, 1967; Schmidt and Schumann, 1989)。

$$Pr_t = 1 + 0.3 \Delta^2 N^2 / E_v \quad (21)$$

$$C_\varepsilon = 0.845 \quad (22)$$

$$C_m = 0.0856 \quad (23)$$

$$Pr = 0.420 \quad (24)$$

3. 計算スキーム

河道モデルの計算には、保存型の差分スキームを用いる。一方、沿岸流動モデルでは、時間積分に、Time Splitting を用いて予測子、修正子を計算し、CIP法 (Yabe *et al.*, 1990; Yabe *et al.*, 1991) を組み合わせたものを用いる。表面波による非線形な影響は、東京湾の計算において小さいため、表面波による CFL 条件が1以上でも計算できるように、完全陰解法により表面波を解いている。

空間微分に関して、拡散項は保存型の有限体積法に基づき計算されている。対流項はCIP法による。非静水圧成分を計算する際のポアソン方程式の解法には、残差切除法 (Tamura *et al.*, 1997) を用いている。残差切除法は、繰り返し計算による収束性を高める方法である。その際、近似解を得るために、SOR法を用いた。水面はALE法 (Hirt *et al.*, 1972) に

より計算されている。

表面波に関して完全陰解法を導入したこと、非静水圧成分の計算に残差切除法を用いたことにより、時間ステップを大きく取れるようになり、ポアソン方程式を解く際の繰り返し計算の回数を飛躍的に少なくすることができるようになった。

・河道モデルと沿岸流動モデルの統合効果

1. 計算条件

河道モデルと沿岸流動モデルの統合モデルによる河川周辺でのフラックスの再現精度向上に関する検討を行う。河道モデル上流端における流量は、計算期間において一定値とした。さらに、東京湾湾奥において考慮する河川は、1つとした。河道モデル上流端における河川流量は、東京湾に流れ込む主要河川の平水流量に近い100 m³/sと、大きな流量による効果を見るための1000 m³/sの2種類を考慮することとした (表-1)。

感潮河川域における潮汐の影響による流れ場の変化は、2003年3月に行われた荒川河口部での流量観測データをもとに推定することとした (図-2)。この結果をもとに、河口における流量の変化は、以下の式で示されるものとした。その際、潮汐波の湾口から湾奥への伝達時間はゼロと簡略化した。

$$Q_T = 1500 a_T \sin \left(\frac{2\pi}{T_T} t \right) \quad (25)$$

ここで、 Q_T ：潮汐によって生じる河口での河川流量である。

潮汐の影響を調べるために、0.3 m, 0.6 m, 0.9 mの3種類の振幅を、同一の周期12時間のもと考慮

表-1 計算条件。 a_T ：潮汐振幅、 q_R ：河川流量、 Q_T ：潮汐によって生じる河川流量。

Table 1 Conditions for computations. a_T : tidal amplitude q_R : river discharge, Q_T : river discharge due to tide.

q_R (m ³ /s)	a_T (m)	Q_T (m ³ /s)	Q_T / q_R
100	0.3	450	4.5
100	0.6	900	9.0
100	0.9	1350	13.5
1000	0.3	450	0.45
1000	0.6	900	0.90
1000	0.9	1350	1.35

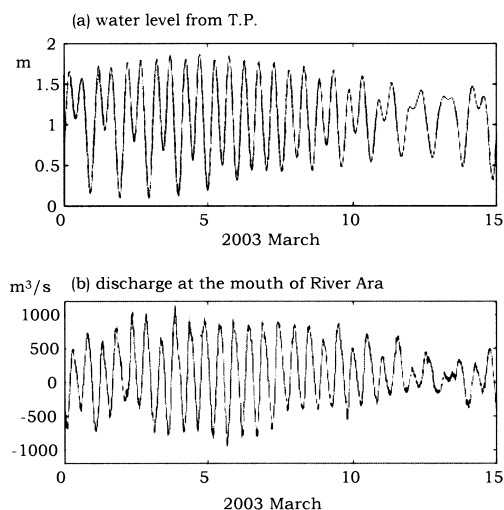


図 - 2 荒川河口域における2003年3月の(b)流量と(a)潮位の変化。

Fig. 2 Time series of (b) river discharge at the mouth of River Ara and (a) water level.

した。最大の振幅が与えられた場合、 $1350 \text{ m}^3/\text{s}$ の流量が河口で生じることに対応する。河川形状は、感潮域河川長20 km、水深5 m、川幅500 mの一定値と簡略化し、潮汐による河川流量の変化による影響評価を行いやすくした。

河道モデルを結合したことによる湾内での物質の河口域でのフラックスを検討するために、我々は塩分に注目することとした。湾内での塩分は33の一定値を初期値として与えた。周期的に変化する流れ場を初期の状態として与える必要があるため、12時間周期の潮汐波を6周期与え、初期条件を作成した。その後、水文モデルを統合し、6周期分の計算を行い、湾内における塩分の広がり等の検討を行った。

図 - 3に、沿岸流動モデルで対象とした東京湾周辺の地形コンタとメッシュを示す。メッシュ数は $60 \times 45 \times 40$ であり、メッシュ間隔は $1 \text{ km} \times 1 \text{ km} \times 1 \text{ m} \sim 4 \text{ m}$ である。水文モデルを統合したポイントは、○で示される点である。

2. 流れ場と塩分分布

上げ最強時、下げ最強時での表層における流速ベクトル図から、湾口部における大きな流速の発生が分かる(図 - 4)。水文モデル統合部における流速を見てみると、湾奥に位置しているため非常に小さく、潮汐による湾内での流れ場による影響が小さいこと

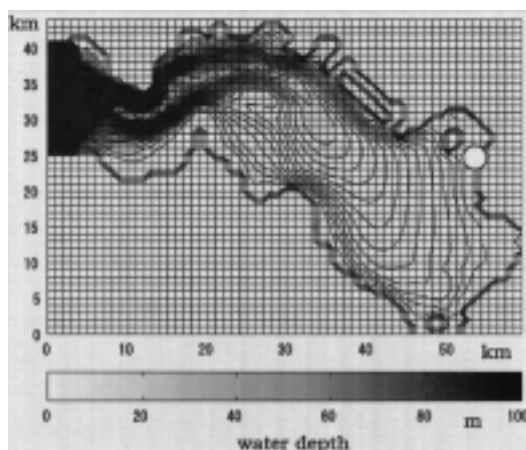


図 - 3 沿岸流動モデルで用いられた東京湾周辺の水深とメッシュ。

Fig. 3 Bathymetry of Tokyo Bay where a circle indicates the mouth of river and mesh used in computations.

がわかる。

潮汐振幅0.9 m、河川流量 $1000 \text{ m}^3/\text{s}$ における6周期後の表層における塩分分布を示す(図 - 5)。計算期間が6周期と短いため、河川水の広がりの影響が湾口部まで達していないことが分かる。

3. 感潮河川域下流端における塩分

河川流量が $100 \text{ m}^3/\text{s}$ であり、潮汐により河川流量が変化しないとする場合、初期に与えられた河口での塩分は、ほぼ一定値で推移している(図 - 6)。一方、潮汐の影響により河川流量が変化する場合、河口塩分は大きく変動していることが分かる。上げ最大の流速が発生する3時間後から、12時間毎に湾内の高塩分水が河川に流入してゆくため、河口塩分が大きくなり、逆に下げ最大である9時間後から12時間毎に河川水の流出により河口塩分が低下していることが分かる。潮汐振幅0.3 m、0.6 m、0.9 mで、それぞれ河口流量 $450 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $900 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $1350 \text{ m}^3/\text{s}$ であるため、潮汐振幅が大きいケースほど河口塩分が低下していることが分かる。

河川流量 $1000 \text{ m}^3/\text{s}$ のケースでは、潮汐による河川流量の変化を考慮しない場合、河川からの流出量が大きいため、河口塩分が河川流量 $100 \text{ m}^3/\text{s}$ のケースに比べて低くなっている。潮汐の影響を受けて河口塩分が変動している点は、前者と同様である。潮汐による河川流量の変化を考慮した場合、河川流量

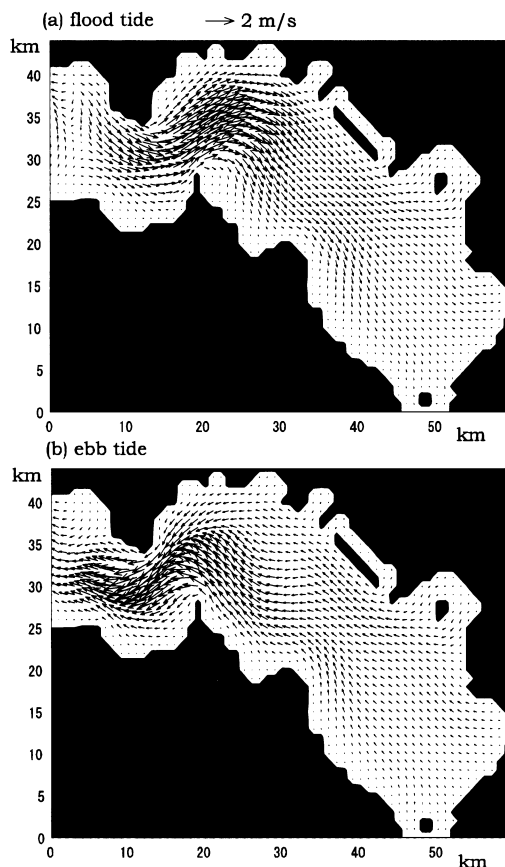


図 - 4 潮汐振幅0.9 m, 潮汐周期12時間が与えられた場合の上げ最強時, 下げ最強時における流速ベクトル。

Fig. 4 Velocity vector at surface in the case when tidal amplitude is 0.9 m. (a) flood tide case when the maximum value of velocity occurs during flood tide. (b) ebb tide case when the maximum value of velocity occurs during ebb tide.

100 m³/s ケースと同様に, 潮汐振幅が大きくなるにつれて, 変動量が大きくなっている。注目すべき現象としては, 河川流量が大きく, 潮汐による河川流量の変化量と同様なオーダーである場合, 潮汐による河川流量の変化を考慮したケースでの河口塩分の変動は, 潮汐による河川流量の変化を考慮しないケースでの河口塩分を中心に振動している点である。これは, 河川流量が比較的大きい場合には, 潮汐による河川流量の変化は, 潮汐周期以上の長周期で変動を考えると, 河川からのフラックスに与える影響が小さくなることを示すものと考えられる。

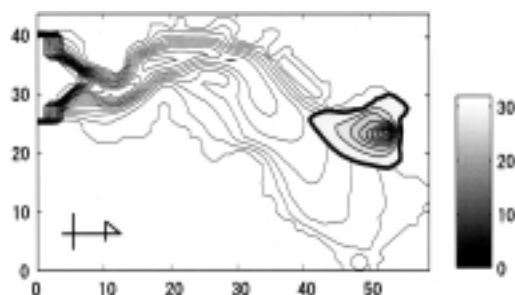


図 - 5 潮汐振幅0.9 m, 潮汐周期12時間が与えられた場合の6周期後の塩分分布。河川流量1,000 m³/s。潮汐による河川流量の変化は考慮されていない。

Fig. 5 Salinity distribution in the horizontal plane at surface at six tides in the case when tidal amplitude is 0.9 m and river discharge is 1000 m³/s. The change in River discharge due to tide is not included.

4. 湾内平均塩分

富津以北を東京湾湾内と定義し, 東京湾内における平均塩分の時系列を計算した(図 - 7)。湾内平均塩分が長期的に変化する様子を見るために, 潮汐による変動成分を取り除いた時系列も計算した。潮汐は, 12時間周期のものが与えられたので, 12時間の移動平均を計算することにより, 潮汐の変動成分を取り除いた。河川流量が100 m³/sで潮汐による河川流量の変化を考慮しない場合, 湾内平均塩分は, 潮汐を変化させた3種類のケース全てで, ほぼ同様に減少している。しかし, 潮汐による河川流量の変化を考慮したケースでは, 湾内平均塩分の減少傾向が大きく異なっており, 潮汐振幅が0.9 mのケースでは, 初期との湾内平均塩分差が考慮しない場合に比べて10数倍であった。

一方, 河川流量1000 m³/sのケースでは, 湾内平均塩分の減少が, どの場合においてもほぼ同様な減少傾向を示していた。河口塩分の時系列において, 潮汐による河川流量の変化を考慮した場合でも, 河口塩分の長期的な変化は, 考慮しない場合と同様であったことと同じく, 河川流量が大きく, 潮汐による河川流量の変化と同様である場合には, その湾内平均塩分への影響は小さいことが考えられる。

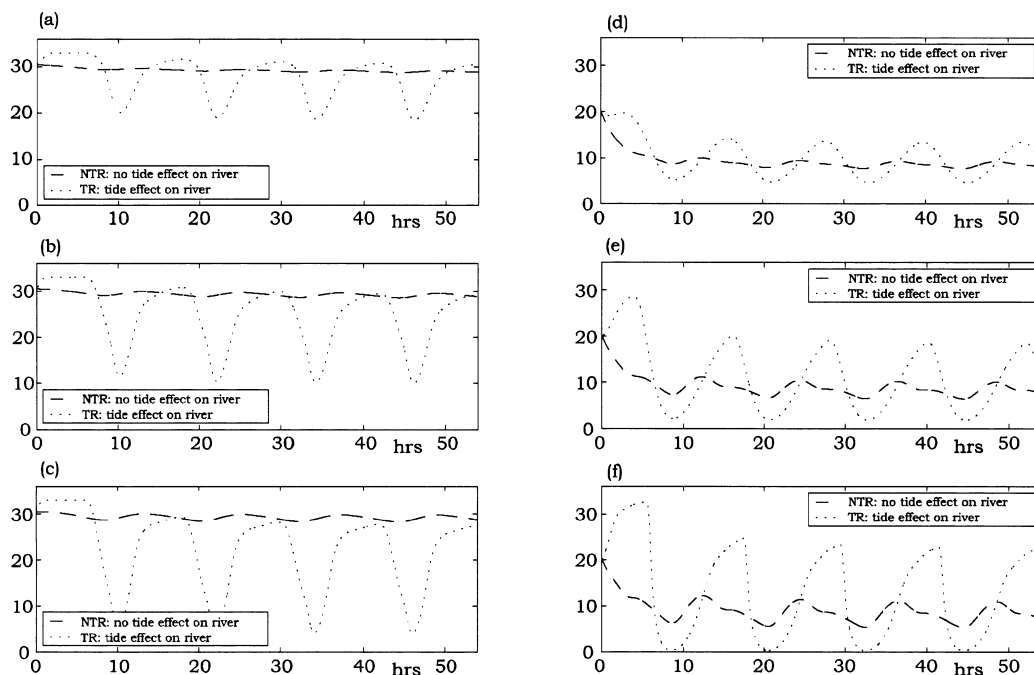


図 - 6 図 - 3 ○ で示される感潮河川域下流における塩分の時系列。破線：潮汐による河川流量の変化を考慮していない。点線：潮汐による河川流量の変化を考慮 (a) 潮汐振幅 0.3 m, 河川流量 100 m³/s (b) 潮汐振幅 0.6 m, 河川流量 100 m³/s (c) 潮汐振幅 0.9 m, 河川流量 100 m³/s (d) 潮汐振幅 0.3 m, 河川流量 1,000 m³/s, (e) 潮汐振幅 0.6 m, 河川流量 1,000 m³/s (f) 潮汐振幅 0.9 m, 河川流量 1,000 m³/s。

Fig. 6 Time series of salinity at the mouth of river which is shown as a circle in Fig. 3. Broken line: River discharge due to tide is not included. Dotted line: River discharge due to tide is included. (a) Tidal amplitude is 0.3 m and river discharge is 100 m³/s. (b) Tidal amplitude is 0.6 m and river discharge is 100 m³/s. (c) Tidal amplitude is 0.9 m and river discharge is 100 m³/s. (d) Tidal amplitude is 0.3 m and river discharge is 1,000 m³/s. (e) Tidal amplitude is 0.6 m and river discharge is 1,000 m³/s. (f) Tidal amplitude is 0.9 m and river discharge is 1,000 m³/s.

・考 察

潮汐による河川流量の変化を考慮した場合、湾内平均塩分の変化が、潮汐により大きく影響を受けていることが分かった。東京湾の海水交換は、エスチュアリー循環により卓越して支配されていることが知られている(宇野木ほか, 1977)。つまり、東京湾においてエスチュアリー循環を正確に把握しない限り、湾内における物質の循環を解明することはできないことを示している。湾内平均塩分は、エスチュアリー循環を発生させる大きな要因であり、湾内平均塩分、河川流量、そして潮汐による河川流量の変化との関係を解明し、その影響がどの程度のものであるかを検討する必要がある。そこで本節では、

湾内平均塩分の定式化を行い、潮汐による河川流量の変化の湾内平均塩分への影響を把握することを目的とする。

1. 湾内平均塩分の変化の定式化

湾内平均塩分 C は、湾内から湾外へと流出する流量 q_R により減少する成分であるフラックス $q_R C$ 、河川から湾内へと流入する流量 q_R により増加する成分であるフラックス $q_R C_R$ 、潮汐などの影響により湾口で発生するフラックス Q_C により、以下の通り、式中含むことができる。

$$V \frac{dC}{dt} = -q_R C + q_R C_R + Q_C \quad (26)$$

ここで、 V ：湾内体積である。

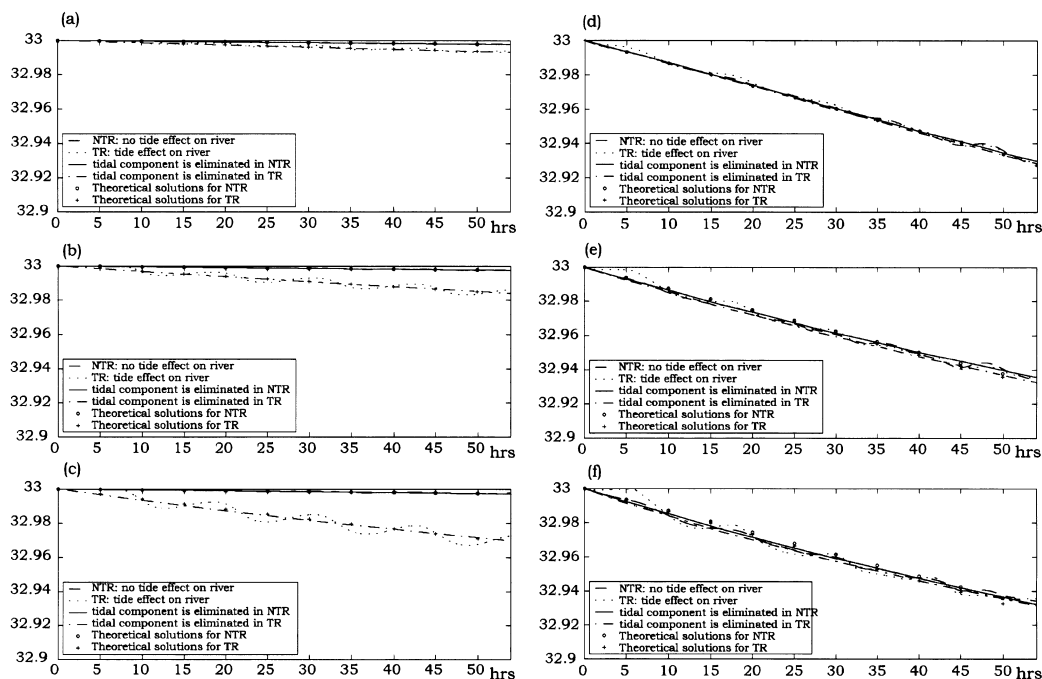


図 - 7 湾内平均塩分の時系列。破線：潮汐による河川流量の変化を考慮していない (NTR)，点線：潮汐による河川流量の変化を考慮 (TR)，実線：NTR から潮汐成分除去，一点鎖線：TR から潮汐成分除去 (a) 潮汐振幅 0.3 m，河川流量 100 m³/s (b) 潮汐振幅 0.6 m，河川流量 100 m³/s (c) 潮汐振幅 0.9 m，河川流量 100 m³/s (d) 潮汐振幅 0.3 m，河川流量 1,000 m³/s (e) 潮汐振幅 0.6 m，河川流量 1,000 m³/s (f) 潮汐振幅 0.9 m，河川流量 1,000 m³/s。

Fig. 7 Time series of averaged salinity in Tokyo Bay. Broken line: River discharge due to tide is not included (NTR) Dotted line: River discharge due to tide is included (TR) Solid line: tidal component is eliminated in NTR. Dot-dash line: tidal component is eliminated in TR. (a) Tidal amplitude is 0.3 m and river discharge is 100 m³/s. (b) Tidal amplitude is 0.6 m and river discharge is 100 m³/s. (c) Tidal amplitude is 0.9 m and river discharge is 100 m³/s. (d) Tidal amplitude is 0.3 m and river discharge is 1,000 m³/s. (e) Tidal amplitude is 0.6 m and river discharge is 1,000 m³/s. (f) Tidal amplitude is 0.9 m and river discharge is 1,000 m³/s.

6 周期計算した後の塩分分布の図 (図 - 5) から分かるとおり，計算終了時点での湾口における塩分分布は河川水の影響を受けていない。そこで，湾口における湾内水と湾外水の交換 Q_c は，塩分分布に空間的な変化がないためゼロである。一方，河川流量が同じ場合，河川から流入してくる塩分 C_R は，潮汐による河川流量の変化がない場合の塩分 C_{R0} と，変化を考慮した場合の塩分 C_{R2} の 2 種類が存在することが考えられる。ここでは，潮汐の影響による河川流量の変化をよりはっきりと評価するために， C_{R2} を C_{R0} とその変化分 C_{RT} との和で表現することとする。このように定義し， C_{R0} と C_{RT} を比較すること

で，潮汐による河川流量の変化の影響を評価することが容易となる。

$$V \frac{dC}{dt} = -q_R C + q_R (C_{R0} + C_{RT}) \quad (27)$$

式(27)の解は，初期塩分を C_I とすることで，以下の通り得られる。

$$C = C_I - (C_{R0} + C_{RT}) \exp\left(-\frac{q_R}{V} t\right) + C_{R0} + C_{RT} \quad (28)$$

湾内平均塩分は，潮汐変動の影響を受けて12時間周期で変動する。式(28)は，そのような12時間周期の成分を含んで導かれたものではない。そこで，湾内平均塩分から，12時間周期の変化を取り除き，式(28)

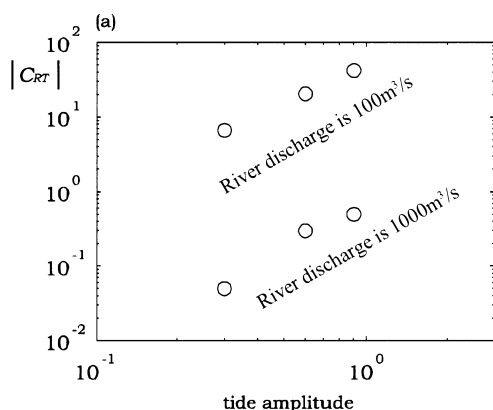


図 - 8 潮汐振幅と $|C_{RT}|$.
Fig. 8 Tidal amplitude and $|C_{RT}|$.

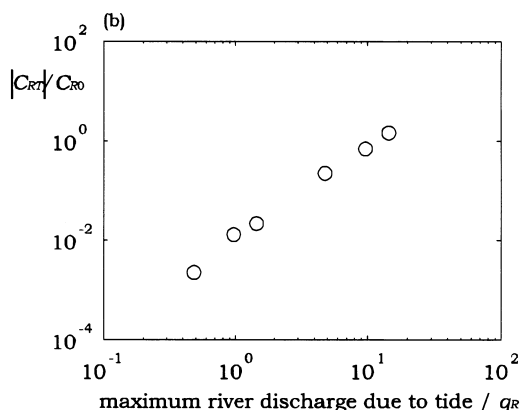


図 - 9 潮汐による最大河川流量 $/q_R$ と $|C_{RT}| / C_{R0}$.
Fig. 9 Maximum river discharge due to tide/ q_R and $|C_{RT}| / C_{R0}$.

を適用しやすい形へと修正した．その修正された値を，潮汐成分が取り除かれたものと定義する．理論式が，計算結果をよく再現していることが分かる(図 - 7)．その際に得られた C_{R0} と C_{RT} を，表 - 2 に示す．河川流量が $100 \text{ m}^3/\text{s}$ である場合，潮汐による河川流量の変化が大きいほど， C_{RT} の絶対値が大きくなっていることが分かる．潮汐振幅が 0.9 m のケースでは， C_{RT} の絶対値が C_{R0} より大きくなっている．これは，河川中に湾内の塩分の影響が伝わってゆき，湾内平均塩分がより減少していたことを示している．一方，河川流量が大きい場合， C_{RT} の変化は小さいことが分かる．

これまでの結果から，河川流量と潮汐による河川

流量の変化，および C_{R0} と C_{RT} は，何らかの関係を持っていると考えられる．そこでまず，横軸に潮汐振幅，縦軸に C_{RT} をプロットした(図 - 8)．河川流量の違いが横軸に反映されていないため，2 種類の傾向が現れているが，明らかに潮汐振幅が増加することで， C_{RT} の絶対値が増加していることが分かる．河川流量の影響も考慮するために，横軸に潮汐による最大河川流量 / 河川流量を取り，再プロットした(図 - 9)．興味深いことに，河川流量の違いを考慮して，一つの近似曲線を描くことができるように値が配置されている．潮汐による河川流量の変化が，河川流量と同程度である場合，湾内に流入してくる

表 - 2 計算結果． C_{R0} ：潮汐による河川流量の変化がない場合の河口塩分， C_{RT} ：潮汐による河川流量の変化を考慮した場合の河口塩分- C_{R0}

Table 2 Comparison results. C_{R0} : salinity at the mouth of river not including tidal effect, C_{RT} the mouth of river with tidal effect- C_{R0} .

$q_R \text{ (m}^3/\text{s)}$	$a_T \text{ (m)}$	$Q_T \text{ (m}^3/\text{s)}$	Q_T / q_R	C_{R0}	C_{RT}	C_{RT} / C_{R0}
100	0.3	450	4.5	29.7	-6.60	0.222222
100	0.6	900	9.0	29.4	-20.4	0.693878
100	0.9	1350	13.5	29.0	-42.0	1.448276
1000	0.3	450	0.45	22.5	-0.05	0.002222
1000	0.6	900	0.90	22.9	-0.30	0.013100
1000	0.9	1350	1.35	22.5	-0.50	0.022222

河川の塩分は一樣として考えても、その誤差は小さく、およそ0.01であること、潮汐による河川流量の変化が河川流量に対して大きい場合、例えば10倍程度であると、河川からの流入塩分が潮汐により受ける影響が大きくなることを示している。

本論文では、潮汐による河川流量の変化の影響が大きく出るように、湾内塩分の初期値を高い値である33とした。そのため、図-9で示される河川からの塩分フラックスの潮汐による変化は、実際には小さくなるものと考えられることを記しておく。

・おわりに

本研究では、閉鎖性内湾の代表として東京湾を対象とし、河道モデルを沿岸流動モデルに統合することの必要性を検討した。最適な統合モデルの一つとして、分布型流出モデルを沿岸流動モデルに統合することが挙げられる。しかし、計算機容量の問題から、タンクモデルと湾内流動モデルの統合も、計算時間を短縮できるという大きな利点を持つ。そこで、水文モデルとしてタンクモデルを用いる場合でも、分布型流出モデルの長所を損なわないよう、潮汐により変化する河川流量の変化を考慮できる河道モデルをタンクモデルと沿岸流動モデルの中間に配置することとした。

河道モデル上流端における河川流量には、100 m³/s、1,000 m³/sの2種類を、潮汐振幅には0.3 m、0.6 m、0.9 mの3種類をそれぞれ与え、計6ケースの計算を東京湾において行った。潮汐振幅が大きくなるほど、潮汐による河川流量の変動を考慮したケースでは、河口における塩分が大きく変化していた。さらに、河川流量が100 m³/sの場合、潮汐による河川流量の変化を考慮しない場合より、考慮する場合の方が、長期変動成分に着目すると、河口塩分が低くなることが分かった。一方、河川流量が1,000 m³/sの場合、長期的に見た河口塩分の変化は、潮汐の影響を考慮する場合としない場合でそれほど大きな変化はなかった。

物質循環を考慮する上で重要となる、海水交換に関する考察を行うために、湾内平均塩分の時系列を計算し、理論式との比較を行った。その結果、潮汐による河川流量の変化を考慮した場合、河川流量がその変化量より小さい場合、湾内平均塩分は大きく影響を受け、低くなることが分かった。さらに、潮汐による最大河川流量/河川流量を横軸にとり、 $|C_{RT}|/C_{R0}$ を縦軸にとった場合、横軸の値が増加する

と、 $|C_{RT}|/C_{R0}$ が増加するという、はっきりとした傾向が示されることが分かった。つまり、潮汐の影響を考慮して河川流量を変化させた場合、もともとの河川流量が小さい場合、潮汐による流れが拡散の効果を生み出し、湾内平均塩分を低くさせるということが分かった。

これらの結果から、湾内に流入している塩分フラックスは、潮汐により大きく影響を受けており、感潮域上流における河川流量が一定値であったとしても、河口での塩分フラックスを一定で扱うことが不適当であることが分かった。これは、河道モデルを沿岸流動モデルに統合する際の長所の一つであるといえる。

参考文献

- Deardorff, J. W. (1975): The development of boundary-layer turbulence models for use in studying the severe storm environment. *Proceeding of the SESAME Meeting*, Boulder, NOAA-ERL, pp. 251-264.
- Deardorff, J. W. (1980): Stratocumulus-capped mixed layers derived from a three-dimensional model. *Boundary-Layer Meteorology*, 25, pp. 495-527.
- Dutta, D., Herath, S. and Musiak, K. (2000): Flood inundation simulation in a river basin using a physically based distributed hydrologic model. *Hydrological Processes*, 14, pp. 497-519.
- Hirt, C. W., Amsden, A. A. and Cook, J. L. (1995): An arbitrary lagrangian-eulerian computing method for all flow speeds. *Journal of Computational Physics*, 14, pp. 227-253.
- Klemp, J. B. and Wilhelmson, R. B. (1978): The simulation of three-dimensional convective storm dynamics. *Journal of Atmospheric Science*, 35, pp. 1070-1096.
- 國松孝男・村岡浩爾編(1989): 河川汚濁のモデル解析, 技法動出版。
- Lilly, D. K., Waco, D. E. and Adelfang, S. I. (1967): The representation of small-scale turbulence in numerical simulation experiments. *Proceedings of IBM Science and Computer Symposium on Environmental Science*, pp. 195-210.
- 中山恵介・岡田知也・野村宗弘・日比野忠史・細川恭史・古川恵太(2000): 大潮, 小潮期における湾外水の影響, 海岸工学論文集第47巻, pp. 421-425.

- 小倉紀雄編(1993): 東京湾— 100年の環境変遷—, 恒星社厚生閣.
- Schmidt, H. and Schumann, U. (1989): Coherent structure of the convective boundary layer derived from large-eddy simulations. *Journal of Fluid Mechanics*, **200**, pp. 511-562.
- Tachikawa, Y., Bieux, B. E., Georgakakos, K. P. and Nakakita, E. (2003): Weather radar information and distributed hydrological modelling. IAHS Publication.
- Tamura, A., Kikuchi, K. and Takahashi, T. (1997): Residual cutting method for elliptic boundary value problems: application to poisson's equation. *Journal of Computational Physics*, **137**, pp. 247-264.
- 宇野木早苗・岸野元彰(1977): 大局的に見た内湾の海水交流, 海岸工学講演会論文集, 第24巻, pp. 486-490.
- Yabe, T., Ishikawa, T., Wang, P. Y., Aoki, T., Kadota, Y. and Ikeda, F. (1991): A universal solver for hyperbolic equations by cubic-polynomial interpolation ii. two-dimensional solvers. *Computer Physics Communications*, **66**, pp. 233-242.
- Yabe, T., Takeo, I. and Kadota, Y. (1990): A multidimensional cubic-interpolated pseudoparticle (cip) method without time splitting technique for hyperbolic equations. *Journal of The Physical Society of Japan*, **59**, pp. 2301-2304.
- (受付 : 2004年 8 月23日 , 受理 : 2005年 2 月22日)