

II-171

東京湾における3次元数値モデルへの σ 座標系の導入

運輸省 正員 白井正興
大阪大学工学部 正員 中辻啓二

1. はじめに

近年、3次元数値シミュレーションがさかんに行われているが、そのほとんどは鉛直方向の層分割に関して水平面と平行な面で行われている。しかし、それらは底層部分を階段状にモデル化（図-1）しているため、底層に沿った部分において、隣接する格子間の物質輸送を空間的に適切に表現することができない。そこで、底層近傍の流動を滑らかに表現できる σ 座標系（図-2）を用いた数値モデルを導入し東京湾に適用した。そして、その計算結果から流動構造の再現性、モデルの特性について検討した。

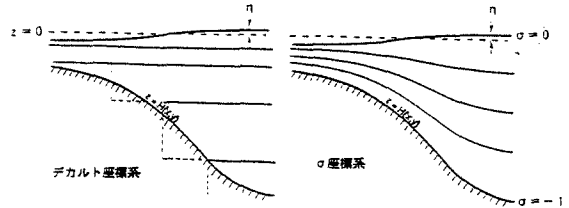


図-1 デカルト座標系

図-2 σ 座標系

2. 座標変換について

基礎方程式は、連続式、3次元レイノルズ運動方程式、温度・塩分の拡散方程式、密度の状態方程式を用いている。次式のように、 z 座標系は、 σ 座標系に変換される。ここで、 η は水位変動量、 H は水深である。よって、偏微分も連鎖定理により、以下のようになり、基礎方程式はこれらを用いて σ 座標系に変換される。

$$x = x^* \quad y = y^* \quad \sigma = \frac{z - \eta}{H + \eta} \quad t = t^* \quad (1)$$

$$\frac{\partial G}{\partial x} = \frac{\partial G}{\partial x^*} - \frac{\partial G}{\partial \sigma} \left(\frac{\sigma}{D} \frac{\partial D}{\partial x^*} + \frac{1}{D} \frac{\partial \eta}{\partial x^*} \right) \quad (2)$$

$$\frac{\partial G}{\partial y} = \frac{\partial G}{\partial y^*} - \frac{\partial G}{\partial \sigma} \left(\frac{\sigma}{D} \frac{\partial D}{\partial y^*} + \frac{1}{D} \frac{\partial \eta}{\partial y^*} \right) \quad (3)$$

$$\frac{\partial G}{\partial z} = \frac{1}{D} \frac{\partial G}{\partial \sigma} \quad (4)$$

$$\frac{\partial G}{\partial t} = \frac{\partial G}{\partial t^*} - \frac{\partial G}{\partial \sigma} \left(\frac{\sigma}{D} \frac{\partial D}{\partial t^*} + \frac{1}{D} \frac{\partial \eta}{\partial t^*} \right) \quad \text{ここで、} D \equiv H + \eta \quad (5)$$

3. 数値実験の概要

計算領域は、図-3に示すように、東西に45km、南北に64kmの東京湾全域で、水平方向には 0.8×0.8 kmの正方格子に分割し、鉛直格子数は全域で11層に分割している。ここで、計算の安定を考慮して最大水深を50mとした。また、計算を行うに際して、MODE SPLITTING法を採用している。これは、パロトロピックな外部モードとパロクリニックな内部モードを分割して計算することにより、従来より大幅に時間を短縮することができる。そこで、東京湾では、CFL条件を考慮して、外部モードの時間ステップを10秒、内部モードの時間ステップを400秒に設定している。河口部では、水温28℃、塩分20‰とし、流量は521m³/sを主要5河川を河口部で与えた。初期条件と開境界部での条件と

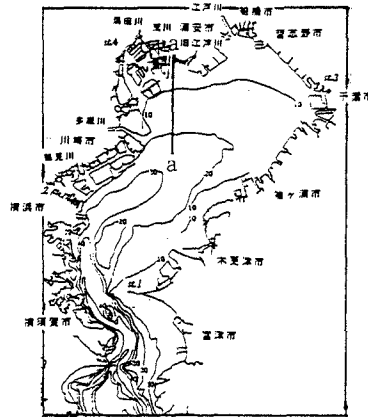


図-3 東京湾における計算領域

して、水温40℃、塩分32‰とした。また、水平方向の拡散にSmagorinskyのSGSモデルを導入し、鉛直方向の拡散係数は、中辻ら(1995)と同様、リチャードソン数の関数としている。

4. 残差流の検討

図-4(a),(b)は、60潮汐計算後の残差流と σt の分布である。水深は、残差流においては $\sigma=-0.016$ 、 σt においては $\sigma=-0.022$ を示している。図-4(a)では、河口部付近に比較的大きな渦が存在していることが分かる。これらの渦は村上ら(1986)による観測結果、中辻ら(1995)の計算結果からも示されている。その渦は、中層部の $\sigma=0.5$ では、全く見られない。図-4(b)では、 $\sigma t=22$ のラインは残差流に見られる湾奥部の渦を囲むように形成しているが、多摩川沖において $\sigma t=22$ のラインは湾奥へ、22.5のラインは湾外に向かって突出している。これは、河口から流出した河川水が渦に取り込まれて湾奥部を1周して多摩川沖にたどり着いたものが、再び渦に取り込まれるもの、湾外に向かって流出していくものと分かれていくものと考えられる。

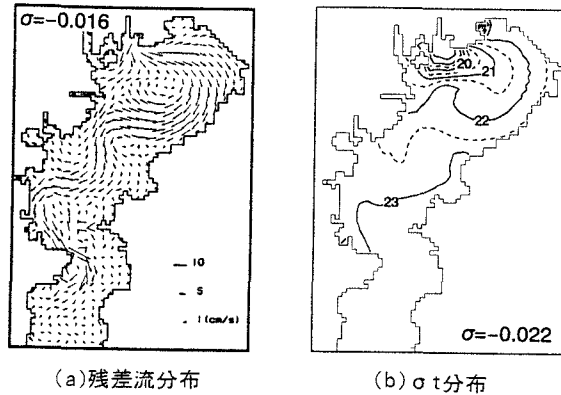


図-4 60潮汐後の水平分布

5. 鉛直流動・密度構造

図-5(a),(b)は、図-3の荒川河口から湾中央部にかけてのa-a断面分布を示している。それぞれ、60潮汐計算後から3時間後の流速分布、 σt 分布を示している。図-5(a)において、河口部の表層部分では、密度流が卓越しているため、流れの向きは常に沖方向で一定である。一方、下層においては、図-5の上げ潮時には岸向き、下げ潮時には沖向きにと流向は変動する。上層と下層の間の界面では、鉛直上向きの流れが生じていること分かる。これは、エスチュアリー特有の鉛直混合形態のエスチュアリー循環における連行現象であり、これら大阪湾においても示されており、東京湾においても明瞭に見られることが分かる。図-5(b)の河口において、コンター線が垂直になっているのは、河口境界において低密度水を鉛直に一定値として与えているからである。また、流速分布からも分かるように表層に沿って低密度水が拡がっており、底層近傍の σt 分布から、下層から高密度水が流入していることが分かる。

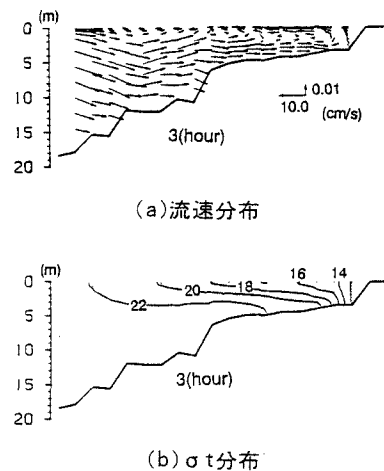


図-5 60潮汐後の潮流の鉛直断面分布

6. まとめ

σ 座標系を用いた数値モデルにより東京湾のバロクリニック流動を再現した。本モデルにおいては、河口部の表層から中層にかけて、密度流とコリオリ力に起因する循環流が見られた。また、本モデルでは浅海部でのエスチュアリー循環を良好に再現できることがわかった。

参考文献 中辻ら(1995):東京湾の残差流系に関する3次元数値実験, 海岸工学論文集, 第42巻, pp. 386-390.

村上ら(1986):東京湾における長周期流れの変動特性, 港湾技研資料, No. 550, pp. 1-50