（参考2）　水質予測シミュレーションの基本モデルの構造について

1．はじめに

本水質予測モデルは、指定水域において陸域から流入するCOD、窒素及び燐の濃度を再現し、さらに内部生産CODの寄与等についても的確に再現できるシミュレーションモデル（基本モデル）として、国立環境研究所において確立されたものである。

総量規制の指定水域である東京湾、伊勢湾及び瀬戸内海は、人口や産業の集中の著しい都市圏を集水域に擁し、それらからの有機汚濁負荷が高いことや、外海との海水交換が少ないことなどの理由から昭和30年代以降富栄養化が進行し、赤潮の発生や、貧酸素水塊の形成、青潮の発生など、海洋環境の劣化が問題とされてきた。

閉鎖性海域の富栄養化については、河川や点源・非点源を通して流入する有機物の量、すなわちCOD流入負荷量が問題とされ、総量規制が実施されてきた。しかし、陸域から流入する窒素・燐といった栄養塩類が植物プランクトンの増殖に利用され、その結果海域内部で生産される有機物、すなわち内部生産CODの量も無視できないことから、CODの負荷削減とともに窒素・燐の負荷削減による内部生産CODの削減についても予測できるモデルの開発が急務とされてきたところである。

閉鎖性海域の水質予測モデルとして、従来多くの数値モデルが提案されてきたが、ここで開発された数値予測モデルは、三次元流動モデルと生態系モデルから構成されている。

三次元流動モデルは、海域内部での水の動きを再現するものであり、鉛直混合を含む流動場を再現することにより、各種の物理的過程（水温・塩分・流動・鉛直混合）の変化について予測できる。

生態系モデルは、陸域から負荷されるCODや窒素・燐の形態別の濃度変化を再現するとともに、植物プランクトンの増殖過程による内部生産過程、沈降・分解・溶出過程などをモデル化しており、海域内部での生物・化学的な物質循環過程（生態系）の変化について予測できる。

2．基本モデルの構造

2．1．三次元流動モデルの構造

ここで用いた三次元流動モデルは、1993年度に開発された流動モデルを基本として、Blumberg and Goodrich（1990）により開発された三次元海水循環モデルに熱収支のモデルを組み込んで改良した流動モデル（渡辺ら、1998）である。

本モデルは、感潮域や閉鎖性海域に通常見られる1～100km程度の空間スケールと潮汐30日間程度の時間スケールに代表されるようなメゾスケール現象を表現できるような基礎方程式をモデル化したものであり、潮汐流、吹送流、熱・塩分に基づく密度流により駆動される流動を再現しており、鉛直混合過程を乱流モデルによりパラメーター化している。

基本となる流動モデルの再現性や予測事例についての詳細報告は、1998年度国立環境研究所報告や渡辺ら(1998)を参照されたい。

2．1．1．三次元流動モデルの基本式

Blumberg and Mellorモデルに基づく連続、運動量、塩分および乱流モデルに新しく水温モデルを加え、全体モデルを構築した。

以下に直交座標を用いた場の支配方程式を示す。ここで、xは東を増加方向、yは北を増加方向、zは上向きを増加方向とする座標軸で、U、V、Wはx、y、z方向に対応したアンサンブル平均流速である。

自由水面は$z=\eta(x、y、t)$、海底は$z=-H(x、y)$で表される。支配方程式においては Hydrostaticの仮定とBoussinesq近似を用いている。

【連続方程式】

$$\frac{\partial U}{\partial x}+\frac{\partial V}{\partial y}+\frac{\partial W}{\partial z}=0 \qquad (1)$$

【運動量方程式】

$$\frac{\partial U}{\partial t}+\frac{\partial U^2}{\partial x}+\frac{\partial UV}{\partial y}+\frac{\partial UW}{\partial z}-fV=-\frac{1}{\rho_0}\frac{\partial P}{\partial x}+\frac{\partial}{\partial z}\left(K_M\frac{\partial U}{\partial z}\right)+F_U \qquad (2)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t}+\frac{\partial UV}{\partial x}+\frac{\partial V^2}{\partial y}+\frac{\partial VW}{\partial z}-fU=-\frac{1}{\rho_0}\frac{\partial P}{\partial y}+\frac{\partial}{\partial z}\left(K_M\frac{\partial V}{\partial z}\right)+F_V \qquad (3)$$

$$\rho g=-\frac{\partial P}{\partial z} \qquad (4)$$

ここで、ρ_0は基礎密度、gは重力加速度、Pは圧力、K_Mは鉛直渦動粘性係数、fはコリオリパラメータである。

水温θと、塩分の保存式は次式で与えられる。

$$\frac{\partial U}{\partial t}+\frac{\partial U\theta}{\partial x}+\frac{\partial V\theta}{\partial y}+\frac{\partial W\theta}{\partial z}=\frac{\partial}{\partial z}\left(K_H\frac{\partial\theta}{\partial z}\right)+F_\theta \qquad (5)$$

$$\frac{\partial S}{\partial t}+\frac{\partial US}{\partial x}+\frac{\partial VS}{\partial y}+\frac{\partial WS}{\partial z}=\frac{\partial}{\partial z}\left(K_H\frac{\partial S}{\partial z}\right)+F_S \qquad (6)$$

ここで、K_Hは熱及び塩分の鉛直渦動拡散係数である。

また、密度は状態方程式により次式のように与えられる。

$$\rho=\rho(\theta,S) \qquad (7)$$

鉛直渦動粘性係数及び鉛直渦動拡散係数は、以下の式に従い逐次計算される。

$$(K_M,K_H)=lq(S_M,S_H) \qquad (8)$$

ここで、lは乱流マクロスケール、$q^2/2$は乱れエネルギーである。安定関数及びl、qはMellor and Yamada（1982）に従い求められる。

モデルのグリッド（サブグリッドスケール）によって直接表現できないsmall-scaleのプロセスによって生じる運動は、すべて水平混合過程によってパラメータ化される。(2)、(3)、(5)および(6)式にある、F_U、F_V、F_θおよびF_Sはそれら直接表現できないプロセスに起因する項であり、乱流拡散と類似の表現で次のように表現される。

$$F_U=\frac{\partial}{\partial x}\left(2A_M\frac{\partial U}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left[A_M\left(\frac{\partial U}{\partial y}+\frac{\partial V}{\partial x}\right)\right] \qquad (9)$$

$$F_V=\frac{\partial}{\partial y}\left(2A_M\frac{\partial V}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial x}\left[A_M\left(\frac{\partial U}{\partial y}+\frac{\partial V}{\partial x}\right)\right] \qquad (10)$$

$$F_{\theta,S}=\frac{\partial}{\partial x}\left[A_H\frac{\partial(\theta,S)}{\partial x}\right]+\frac{\partial}{\partial y}\left[A_H\frac{\partial(\theta,S)}{\partial y}\right] \qquad (11)$$

ここで、は水平渦動粘性係数及び水平渦動拡散係数である。

本モデルにおいてこれらパラメータはSmagorinsky（1963）に従い次式のように求められる。なお、$C_{M,H}$については、0.01と設定した。

$$A_{M,H}=C_{M,H}\Delta x\Delta y\left[\left(\frac{\partial U}{\partial x}\right)^2+\left(\frac{\partial V}{\partial x}+\frac{\partial U}{\partial y}\right)^2+\left(\frac{\partial V}{\partial y}\right)^2\right]^{\frac{1}{2}} \qquad (12)$$

２．１．２．境界条件

１） 自由水面での境界条件

$$\rho_0 K_M\left(\frac{\partial U}{\partial z},\frac{\partial V}{\partial z}\right)=\left(\tau_{0x},\tau_{0y}\right) \qquad (13)$$

$$\rho_0 K_H\left(\frac{\partial \theta}{\partial z},\frac{\partial S}{\partial z}\right)=\left(\dot{H},\dot{S}\right) \qquad (14)$$

ここで、（τ_{0x}，　τ_{0y}）は水面での風による応力、$\dot{H}$は水面での純熱フラックス、$\dot{S}$は水面での塩分フラックスである。

水面での純熱フラックスは次式で表される。

$$\dot{H}=\left(\phi_S-\phi_{Sr}\right)+\left(\phi_a-\phi_{ar}\right)-\phi_{br}-\phi_e-\phi_c \qquad (15)$$

ここで、

$$\phi_{ar}=5.9\times10^{-3}\left(\frac{e}{T_a}\right)^{\frac{1}{7}}T_a^4\left(1+0.17C^2\right)=\text{atomospheric radiation,}$$

$$\phi_{br}=5.9\times10^{-3}\left(T_a+273\right)^4=\text{back radiation,}$$

$$\phi_e=\left(0.000308+0.000185W_z\right)\rho\left(e_s-e_z\right)\times\left(2493-2.26T_s\right)\times10^3=\text{evapolative heat flux,}$$

$$\phi_c=269.1\left(0.000308+0.000185W_z\right)\rho\left(T_s-T_z\right)=\text{conductive heat flux,}$$

ここで、ϕ_{SC}は晴天時の日射量、Ｃは雲量、ｅは水蒸気圧、T_aは気温、W_zは水面上高さｚでの風速、ρは水の密度、e_Sは水面上の気温に対する飽和水蒸気圧、e_zは海面上高さｚにおける水蒸気圧である。

また、水面での塩分フラックスは次式で表される。

$$\dot{S}=S(0)\left[\dot{L}-\dot{I}\right]/\rho \qquad (16)$$

ここで、$\left[\dot{L}-\dot{I}\right]$は蒸発－降雨による水面での純淡水量フラックスであり、S(0)は水面での塩分濃度である。

２） 海底ｚ＝-Ｈでの境界条件

海底ではθ、Ｓの鉛直勾配はゼロであり、境界を通しての熱・塩分の移動は無い。

$$\rho_0 K_M\left(\frac{\partial U}{\partial z},\frac{\partial V}{\partial z}\right)=\left(\tau_{bx},\tau_{by}\right) \qquad (17)$$

$$\rho_0 K_H\left(\frac{\partial \theta}{\partial z},\frac{\partial S}{\partial z}\right)=0 \qquad (18)$$

ここで、（τ_{bx}, τ_{by}）は海底における応力で、次式の対数近似則で与えられる。

$$\left(\tau_{bx},\tau_{by}\right)=\rho_0 C_D\left(U_b^2+V_b^2\right)^{\frac{1}{2}}\left(U_b,V_b\right) \qquad (19)$$

$$C_D \equiv k^2\left(\ln\left(H+z_b\right)/z_0\right)^{-2} \qquad (20)$$

ここで、$H_{(x、y)}$は海底地形を表し、z_b、U_b、V_bは海底に最も近い計算格子とそこでの流速を表す。

kはvon Karman定数である。抗力係数C_Dは、0.0025と式(18)で計算された値とのどちらか大きい方の値を用いている。z_0は、海底の局所的な粗度に依存する値であり、ここでは1 cmとした。

3） Open boundaryでの境界条件

流入河川上流端では流量、水温、塩分を直接与える。湾口では潮位、水温、塩分を与える。境界条件についての設定方法の詳細は、Blumberg and Mellor（1983）に準拠している。

4） 座標変換

内湾のように沿岸域で急激な水深変化が見られる場合、それを表現するには直交座標は有効ではない。本モデルにおいては、上述の基礎方程式について鉛直方向に新しい変換座標(x*、y*、z*、t*)を導入し、全ての方程式の座標変換を行っている。

すなわち、

$$x^*=x,\quad y^*=y,\quad \sigma=\frac{z-\eta}{D},\quad t^*=t \qquad (21)$$

ここで、D=H＋ηであり、z＝ηでσ＝0、z＝-Hでσ＝-1となる。