

沈降による鉛直濃度分布の遷移を考慮した 平面2次元拡散堆積モデル

DEPTH-AVERAGED MODEL OF DIFFUSION AND DEPOSITION OF SETTLING
PARTICLES WITH CONSIDERATION FOR TRANSITION OF VERTICAL PROFILE

小松利光¹・押川英夫²・矢野真一郎³

Toshimitsu KOMATSU, Hideo OSHIKAWA and Shinichiro YANO

¹フェロー 工博 九州大学教授 工学部建設都市工学科 (〒812-8581 福岡市東区箱崎6-10-1)

²学生員 工修 九州大学大学院 工学研究科博士後期課程 水工土木学専攻 (同上)

³正会員 工修 九州大学助手 工学部建設都市工学科 (同上)

Diffusion and deposition of sediment in a sea area have caused serious problems in various situations. Thus, it has been required to predict the distribution of the sediment more accurately to take steps.

For horizontally large flow fields having particle sources with well-mixed cross sections, we had proposed the depth-averaged model for diffusion and deposition of settling particles by adopting the result of the numerical research by Jobson and Sayre (1970). In this paper, we improved this model to be adaptable to a flow field having a particle source near a water surface or a bottom region. In addition, the new model was applied to simulate the distribution of the sediment generated by the reclamation in Kawatana Port.

As a result of this research, it was confirmed that the present model would make it possible to predict a more accurate distribution of sediment in a nearly-plane sea area.

Key Words : *Settling Particle, Depth-Averaged Model, Sedimentation, Port and Harbor Works*

1. 緒言

近年の電子計算機の飛躍的な発達により, 対象場によっては3次元モデルを用いた流動・拡散の数値計算も行えるようになってきた。しかし計算領域の大きい非定常計算等では, 依然として平面2次元モデルを用いた数値計算に頼らざるを得ない場合も多い。海域における埋め立てや浚渫等の海洋開発, 土石流による海域への土砂流出の問題等において, 広範囲に渡る土砂の拡がりや堆積状況の平面分布の予測が必要とされる場合には, 依然として平面2次元計算がよく用いられている。しかし, 平面2次元計算では流速や拡散物質濃度等の鉛直分布に相似形が仮定されているため, 鉛直方向の沈降現象が正確に評価されていないきらいがある。

本研究は平面2次元モデルを用いながらも, 鉛直方向の現象である土砂の沈降・堆積を高精度に予測することが可能な拡散・堆積モデルの構築を目的としており, 第一段階として汚濁の発生源においてその鉛直混合が強い場合(例えば土石流の海洋流出等)を想定し, 発生断面における粒子濃度が一様と見なし得る場合(以下, 一様投入と呼ぶ)に関する平面2次元拡散堆積モデルを既に報告している¹⁾。第

2段階として本論文では, 汚濁発生源での粒子濃度分布が水深方向に一様とは見なせない場合, すなわち汚濁の発生源が水表面付近にある場合(以下, 水表面投入と呼ぶ), および浚渫作業の様に水底面近傍にある場合(以下, 底層供給と呼ぶ)の2つの場合についてモデル化を行った。またその適用例として, 大村湾内の川棚港における港湾工事に伴う汚濁の拡散・堆積予測に本モデルを適用し, その有効性の検討を行った。

尚, 本モデルは個々の粒子が自由沈降すると仮定した場合のモデルであり, massとしての沈降を考慮する必要がある場合には, 投入土砂中の浮遊成分のみを扱う発生原単位²⁾の併用等が必要となる。

2. 汚濁発生源が水表面近傍にある場合

(1) モデル化の方法および用いた条件

本研究で行われたモデル化におけるプロセスは, 基本的には著者らが一様投入の場合に用いた方法¹⁾と同様である。開水路定常流場において鉛直2次元モデルを用いて鉛直方向の現象が再現可能な拡散・堆積計算を予め行い, その計算から得た沈降・堆積現象の計算結果を水深平均モデルに取り込むことによ

表-1 各変数の無次元化

鉛直座標 $\eta = z/h$	鉛直方向乱流拡散係数
沈降速度 $v_s = V_s / (\kappa u_* / 6)$	$\phi_\eta = \varepsilon_z / \varepsilon_x = \varepsilon_z / (\kappa u_* h / 6)$
流速 $\mu = u/\bar{u}$	流下方向乱流拡散係数
粒子供給点からの距離	$\phi_x = \varepsilon_x / \varepsilon_z = \varepsilon_x / (\kappa u_* h / 6)$
$X = x \varepsilon_z / (h^2 \bar{u}) = \kappa u_* x / (6h \bar{u})$	
(κ :カルマン定数, $\bar{u}$:水深平均流速)	
ε_x :流下方向乱流拡散係数の水深平均値, u_* :摩擦速度	
ε_z :鉛直方向乱流拡散係数の水深平均値, h :水深)	

り, 平面2次元計算でも高精度に土砂の拡散・堆積予測ができるように改良を図るものである。

鉛直2次元拡散堆積計算の基礎式及び計算条件はJobsonら³⁾に従い以下の式で与えられるものとした。

$$u \frac{\partial c}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon_x \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\varepsilon_z \frac{\partial c}{\partial z} + V_s c \right) \quad (1)$$

ここに u は流下方向流速, c は粒子の体積濃度, $\varepsilon_x, \varepsilon_z$ はそれぞれ流下方向, 鉛直方向の乱流拡散係数, V_s は粒子の終局沈降速度である。浚渫, 護岸工等では汚濁は連続発生源として適用するとされている²⁾ので, 汚濁発生開始直後の非定常変化は無視して定常状態で置き換えられるものとし, (1)式では非定常項は無視した。境界条件は以下に示すように, 水表面では濃度 flux=0, また水底面に達した粒子の一部が堆積するものとしている。

$$\text{水表面 } (z=h): \quad \varepsilon_z \frac{\partial c}{\partial z} + V_s c = 0 \quad (2)$$

$$\text{水底面 } (z=0): \quad \varepsilon_z \frac{\partial c}{\partial z} + V_s (1-A)c = 0 \quad (3)$$

ここで A は底面吸収係数であり, 水底部に達した粒子が底に堆積する確率($0 \leq A \leq 1$)を意味する。本研究では簡単のために A の流れや乱れとの関連性, 局所性, 非定常性は無視して定数で与えられるものとした。

Jobsonら³⁾に従い各変数を表-1に示すように無次元化すると, (1)式より以下に示すような無次元の鉛直2次元拡散方程式が得られる。その際, ε_x にはその水深平均値を用いている。

$$\mu \frac{\partial c}{\partial X} = \left(\frac{\kappa u_*}{6\bar{u}} \right)^2 \frac{\partial}{\partial X} \left(\phi_x \frac{\partial c}{\partial X} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\phi_\eta \frac{\partial c}{\partial \eta} + v_s c \right) \quad (4)$$

流速分布は次式で表される対数分布則を仮定する。

$$\frac{u - \bar{u}}{u_*} = \frac{1}{\kappa} (\ln \eta + 1) \quad (5)$$

ここに $\kappa=0.4$ を用い, 流速係数は $\psi = \bar{u}/u_* = 10.0$ (海底摩擦係数で0.01)で一定とした。無次元鉛直拡散係数は放物線分布 $\phi_\eta = 6\eta(1-\eta)$ とし, 無次元流下方向拡散係数 ϕ_x は, 本研究の主な対象領域である水平方向に広い海域を想定し, 一定値1000を与え

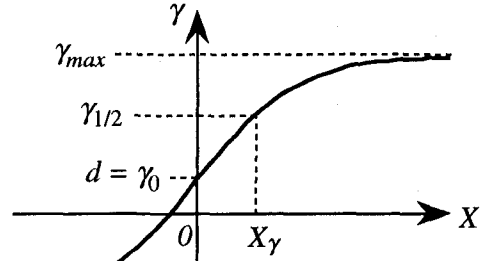


図-1 近似曲線の概略

た。沈降性粒子は上流端において最上層の格子の濃度を $c=1.0$ と固定して連続供給した。計算格子間隔は $\Delta X=0.002$, $\Delta \eta=0.02$ として数値解析を行った。

(2) 堆積モデルの概略

鉛直2次元拡散堆積計算で堆積厚を算出する際に用いられる堆積率 D は式(3)より次式で表される。

$$D = V_s A c_{\text{bottom}} \quad (6)$$

ここで, c_{bottom} は底面直上の格子点の粒子濃度である。

粒子濃度が鉛直方向に非一様な分布を持つことから来る影響を平面2次元モデルによる土砂堆積量の計算に反映させるために, 鉛直2次元計算から得られる堆積率 D を水深平均粒子濃度 $\bar{c}$ と沈降速度 V_s で正規化したものを無次元堆積速度 γ として次式で定義する。

$$\gamma = D / (V_s \bar{c}) \quad (7)$$

従って平面2次元モデルでは, 単位面積当たり Δt 時間内に粒子が堆積する量は $\gamma V_s \Delta t \bar{c}$ で表される。

(3) 無次元堆積速度 γ の定式化

v_s と A を独立に変化させて鉛直2次元拡散堆積計算を行い, それぞれの γ の流下方向分布を求めた。得られた γ の流下方向分布の近似を試みた結果, 一様投入の場合¹⁾と同様, 図-1に示す $\gamma(X) = a \tanh(bX) + d$ の曲線により統一的に表せることが分かった。近似曲線の振幅 a , 切片 d は次式で表される。

$$a = \gamma_{\text{max}} - \gamma_0, \quad d = \gamma_0 \quad (8)$$

γ_{max} は $X \rightarrow \infty$ のときの γ の漸近値であり, $\gamma_0 = \gamma(0)$ である。水表面投入の場合, 粒子供給地点の c_{bottom} が0であるため, γ_0 は常に0となる。 b の決定には γ_{max} と γ_0 の中間値 $\gamma = (\gamma_{\text{max}} + \gamma_0)/2 = \gamma_{1/2}$ をとる点 $X (=X_\gamma)$ を用いた。 v_s と A により X_γ の定式化を試みた結果, 次式で近似できることが分かった。

$$\begin{aligned} X_\gamma = & (-2.08 \times 10^{-4} A^3 + 3.08 \times 10^{-4} A^2 \\ & - 9.39 \times 10^{-5} A - 5.34 \times 10^{-5}) v_s^3 \\ & + (1.37 \times 10^{-3} A^2 - 2.04 \times 10^{-3} A + 1.67 \times 10^{-3}) v_s^2 \\ & + (0.0150 A^3 - 0.0336 A^2 + 0.0228 A - 0.0117) v_s \end{aligned}$$

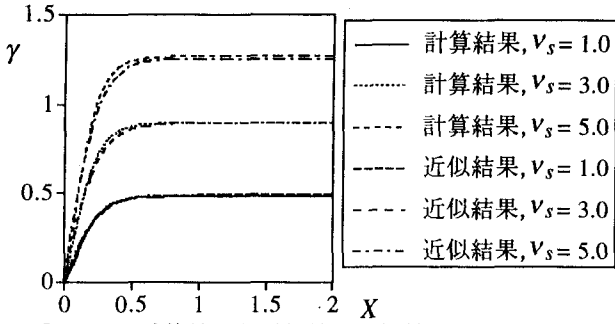


図-2 γ の計算結果と近似結果の比較 ($A=0.3$)

$$+(-7.53 \times 10^{-3} A^3 + 0.0151 A^2 - 9.29 \times 10^{-3} A + 0.151) \quad (9)$$

その結果、 b は次式で表されることになる。

$$b = \ln 3.0 / 2X_\gamma \quad (10)$$

従って、 γ は最終的に以下の式のようにになる。

$$\gamma(X) = (\gamma_{\max} - \gamma_0) \tanh\left(\frac{\ln 3.0}{2X_\gamma} X\right) + \gamma_0 \quad (11)$$

ここで、 $\gamma_{\max}$ が v_s と A で定式化されれば、各条件下での無次元堆積速度 γ が決定できることとなる。計算結果から、 v_s と A による $\gamma_{\max}$ の定式化を試み、次式を求めた。

$$\begin{aligned} \gamma_{\max} = & (0.920A^5 - 2.35A^4 + 2.13A^3 - 0.784A^2 + 0.0846A)v_s^2 \\ & + (-1.01A^3 - 2.16A^2 + 1.27A + 4.59 \times 10^{-3})v_s \\ & + (-0.512A^3 + 0.754A^2 + 0.762A - 4.38 \times 10^{-3}) \quad (12) \end{aligned}$$

γ の分布の例として $A=0.3, v_s=1.0, 3.0, 5.0$ の場合に上記の関係式から得られた近似曲線と数値計算から得られた γ の流下方向分布の比較を図-2に示す。近似式は無次元堆積速度 γ を高い精度で近似できている。

(4) 移流項補正係数 β の定式化

鉛直2次元モデルにおける移流fluxの水深平均値と水深平均モデルの移流fluxは、濃度と流速が鉛直方向に分布を持つために一般的には一致しない。そこで水深平均モデルの移流fluxを補正するため、次式で表される移流項補正係数 β を導入する。

$$\beta = \int_0^1 \mu(\eta) c(\eta) d\eta / (\bar{\mu} \bar{c}) \quad (13)$$

この β についても v_s と A をパラメータとして γ と同様の手法で近似を試みたところ、近似曲線は $\beta(X) = -a \tanh(bX) + d$ により精度良く表された。 a, b, d は次式で定義される。

$$a = \beta_0 - \beta_{\min}, b = \ln 3.0 / 2X_\beta, d = \beta_0 \quad (14)$$

β_0 は $X=0$ での β の値であり、流速分布および供給点の鉛直方向濃度分布が境界条件として規定されているため、 $\beta_0 = 1.2475$ で一定である。また $\beta_{\min}$ は $X \rightarrow \infty$ での β の漸近値であり、 X_β は β_0 と $\beta_{\min}$ の中間値をとる点の X 座標である。 $\beta_{\min}$ および X_β についても γ と同様に定式化を行った結果、以下の2式が得られた。

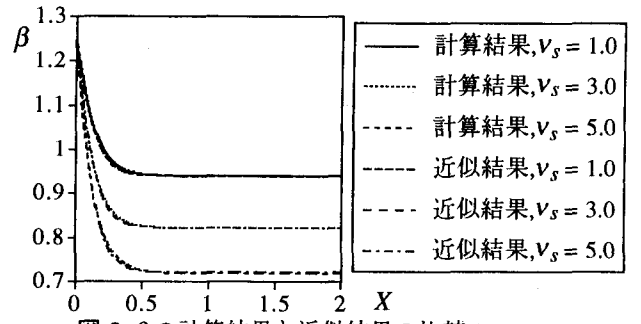


図-3 β の計算結果と近似結果の比較 ($A=0.1$)

$$\beta_{\min} = (5.41 \times 10^{-3} A^3 - 8.86 \times 10^{-3} A^2$$

$$+ 1.91 \times 10^{-3} A + 2.07 \times 10^{-3}) v_s^2$$

$$+ (0.0672 A^3 - 0.173 A^2 + 0.169 A - 0.0828) v_s + (-0.0364 A^3 + 0.0834 A^2 - 0.0543 A + 1.01) \quad (15)$$

$$X_\beta = (7.26 \times 10^{-4} A^4 - 1.71 \times 10^{-3} A^3$$

$$+ 1.33 \times 10^{-3} A^2 - 4.01 \times 10^{-4} A + 2.68 \times 10^{-5}) v_s^3$$

$$+ (-6.73 \times 10^{-4} A^3 + 2.21 \times 10^{-3} A^2 - 1.44 \times 10^{-3} A + 5.61 \times 10^{-4}) v_s^2 + (7.69 \times 10^{-3} A^3 - 0.0156 A^2 + 5.50 \times 10^{-3} A - 3.81 \times 10^{-3}) v_s + (-5.69 \times 10^{-3} A^3 + 0.0107 A^2 - 6.51 \times 10^{-3} A + 0.102) \quad (16)$$

β の分布の例として $A=0.1, v_s=1.0, 3.0, 5.0$ の場合の上記の近似曲線と数値計算から得られた β の流下方向分布の比較を図-3に示す。 β は近似式により高い精度で近似されていることが分かる。

(5) 水平方向の乱流拡散の影響について

これまでに得られた無次元堆積速度 γ および移流項補正係数 β は、 $\phi_x=1000$ の場合の鉛直2次元計算の結果から定式化されたものである。鉛直方向の乱流拡散係数 E_y に対する水平方向の乱流拡散係数 E_x の比を示す ϕ_x の値は、実際には流れ場によって変化する。そこで ϕ_x を変化させて鉛直2次元拡散堆積計算を行い、 γ, β に対する ϕ_x の影響を調べた。 ϕ_x の値としては、一般的な海域に於て見られる $\phi_x=10^0 \sim 10^4$ の範囲を検討の対象とした。

その結果、 $\gamma_{\max}$ に対する ϕ_x の影響は非常に小さいことが分かった。しかし ϕ_x が大きくなると水平拡散項により、水表面に投入された高い濃度の粒子が速やかに下流方向に拡散されるため γ の勾配が小さくなり、 X_γ が若干大きくなる。そこで $\phi_x=1000$ とはみなし得ない場合のこの効果を考慮するため、 $v_s=3.0, A=0.3$ の場合に於て、 $\phi_x=1000$ のときの X_γ に対するその他の場合の X_γ の比 E_γ を ϕ_x を用いて定式化した。従って、次式で表される E_γ を $\phi_x=1000$ のときの X_γ に掛けることで補正できることになる。

$$E_\gamma = -9.96 \times 10^{-9} \phi_x^2 + 2.81 \times 10^{-4} \phi_x + 0.720 \quad (17)$$

また β に関しても同様の結果が得られた。 $\beta_{\min}$ には ϕ_x の変化は殆ど影響しないが、 X_β は若干増加する。そ

ここで X_β に関しても X_γ と同様の定式化を行い、次式の補正係数 E_β を得た。

$$E_\beta = -7.99 \times 10^{-9} \phi_x^2 + 2.53 \times 10^{-4} \phi_x + 0.753 \quad (18)$$

(6) 流速係数の影響について

流速係数 ψ は一般に8~25の値をとることが知られている。そこで ψ の変化に対する γ, β の応答性を調べた。その結果、 ψ は $\gamma_{max}, \beta_{min}$ および β_0 にはそれ程影響しない($\psi=10$ 以外の時は $\beta_0=1.2475$ にはならず若干変化する)が、 γ と β の分布形が ψ により歪むことにより、 X_γ および X_β が変化する。そこで前述の拡散係数の変化に対する補正式と同様の定式化を行い、 X_γ に対して F_γ, X_β には F_β の2つの補正係数の式を得た。

$$F_\gamma = (-1.16 \times 10^{-4} \psi^3 + 6.94 \times 10^{-3} \psi^2 - 0.140 \psi + 1.82) \quad (19)$$

$$F_\beta = (-9.32 \times 10^{-5} \psi^3 + 5.87 \times 10^{-3} \psi^2 - 0.126 \psi + 1.77) \quad (20)$$

これらにより、 $\psi=10$ と異なる流速係数を用いる際には、 F_γ, F_β を $\psi=10$ に対して定式化された X_γ および X_β にそれぞれ掛けることにより補正が可能となる。

3. 汚濁発生源が水底面近傍にある場合

(1) モデル化の方法

底層供給の場合に対してもモデル化に用いた基礎式、計算方法、そのプロセスは水表面投入の場合と同じであり、用いるパラメータの定義も改めて断らない限り同じである。

底層供給の場合には供給点における γ_0 の値が問題となり、その値は定義により供給点の鉛直濃度分布に依存する。即ち汚濁発生源における汚濁の水底からの存在範囲(そこでの汚濁水塊は十分に混合されていると考える)により γ_0 は決まることになる。しかし、鉛直2次元計算の境界条件となるこの存在範囲に関しては、実際の浚渫工事や土砂採取等の状況により大きく異なってくることが予想され、一般的な値は設定しにくい。そこで今回は、発生断面の最下層の格子に沈降性粒子を連続供給した場合についてモデル化を行った。

(2) γ および β の定式化

v_s と A を変化させて鉛直2次元拡散堆積計算を行い、 γ および β の流下方向分布を求めて定式化を行った。

底層供給の場合の γ と β の分布も、初期値の γ_0 および β_0 からそれぞれの漸近値に漸近する。水表面投入の場合とは逆に γ の分布は減少傾向、 β の分布は増加傾向にあるため、それぞれ以下の式を用いることとした。

$$\gamma(X) = -(\gamma_0 - \gamma_{min}) \tanh\left(\frac{\ln 3.0}{2X_\gamma} X\right) + \gamma_0 \quad (21)$$

$$\beta(X) = (\beta_{max} - \beta_0) \tanh\left(\frac{\ln 3.0}{2X_\beta} X\right) + \beta_0 \quad (22)$$

ここでの X_γ および X_β はそれぞれ、 γ_0 と γ_{min} の中間値、 β_0 と β_{max} の中間値をとる地点の X 座標である。

底層供給の場合の γ_{min} および水表面投入の場合の γ_{max} は共に十分下流における γ の漸近値であり、その領域では土砂の鉛直混合が十分に進んでいるため、投入条件による漸近値の差は殆ど無いものと考えられる。事実計算結果を比較しても両者の差は殆ど現れなかったため、 γ_{min} には水表面投入の場合の γ_{max} の評価式(12)をそのまま用いることとした。 γ_0 に関しては、今回の条件下では $\gamma_0=50A$ である。

β に関しても同様のことが言え、計算結果からも確認されたため、底層供給の場合の β_{max} にも水表面投入の β_{min} の評価式(15)をそのまま用いることとした。 β_0 は供給点の鉛直方向濃度分布と流速分布から決まる定数であり、 $\beta_0=0.09871$ である。

X_γ および X_β については水表面投入と同様の定式化を行い、以下の2式を得た。

$$\begin{aligned} X_\gamma = & (-2.51 \times 10^{-3} A^4 + 5.99 \times 10^{-3} A^3 \\ & - 4.96 \times 10^{-3} A^2 + 1.56 \times 10^{-3} A - 1.14 \times 10^{-4}) v_s^2 \\ & + (5.99 \times 10^{-4} A^3 - 2.07 \times 10^{-3} A^2 + 2.70 \times 10^{-3} A + 1.65 \times 10^{-4}) v_s \\ & + (-4.41 \times 10^{-3} A^3 + 7.94 \times 10^{-3} A^2 - 3.99 \times 10^{-3} A + 0.0131) \end{aligned} \quad (23)$$

$$\begin{aligned} X_\beta = & (-0.0109 A^4 + 0.0270 A^3 \\ & - 0.0225 A^2 + 6.76 \times 10^{-3} A - 3.52 \times 10^{-4}) v_s^2 \\ & + (-1.26 \times 10^{-4} A^3 - 5.23 \times 10^{-3} A^2 + 9.42 \times 10^{-3} A - 1.15 \times 10^{-3}) v_s \\ & + (-4.76 \times 10^{-3} A^3 + 0.0107 A^2 - 7.06 \times 10^{-3} A + 0.0346) \end{aligned} \quad (24)$$

(3) ϕ_x および ψ の影響について

底層供給の場合に対しても、流下方向の拡散係数 ϕ_x および流速係数 ψ を変化させて鉛直2次元拡散堆積計算を行い、 γ, β に対する ϕ_x, ψ の影響を調べた。

ϕ_x の効果は水表面投入の場合と全く同様で、 $\gamma_{min}, \beta_{max}$ に対する影響は非常に小さいが、 X_γ と X_β は大きくなることが分かった。そこで、補正係数の定式化を行い以下の2式を得た。

$$E_\gamma = 7.22 \times 10^{-12} \phi_x^3 - 1.28 \times 10^{-7} \phi_x^2 + 8.27 \times 10^{-4} \phi_x + 0.275 \quad (25)$$

$$E_\beta = 7.10 \times 10^{-12} \phi_x^3 - 1.24 \times 10^{-7} \phi_x^2 + 7.77 \times 10^{-4} \phi_x + 0.315 \quad (26)$$

ψ の変化に対しては X_γ, X_β だけでなく、 β_0 も大きく影響されることが分かった。 β_0 は供給点の鉛直濃度分布と流速分布によって決まるため、今回の条件下では ψ のみに依存する。そこで、 ψ により β_0 の定式化を行った結果、次式で良く近似された。

表-2 潮流計算の計算条件

(計算 A) 計算格子間隔 $\Delta x = \Delta y = 250.0 \text{ m}$ 時間格子間隔 $\Delta t = 10.0 \text{ s}$ 渦動粘性係数 $\nu_t = 100.0 \text{ m}^2/\text{s}$ 計算 A の開境界での境界条件 $\zeta = a \cos(2\pi t/T)$ 潮位振幅 $a = 0.221 \text{ m}$, 潮汐の周期 $T = 12 \text{ 時間} 25 \text{ 分}$ (計算 A & B) コリオリ係数 $f = 7.943 \times 10^{-5} (1/\text{s})$	(計算 B) 計算格子間隔 $\Delta x = \Delta y = 50.0 \text{ m}$ 時間格子間隔 $\Delta t = 5.0 \text{ s}$ 渦動粘性係数 $\nu_t = 10.0 \text{ m}^2/\text{s}$
---	--

$$\beta_0 = -1.84 \times 10^{-3} \psi^2 + 0.100 \psi - 0.710 \quad (27)$$

X_γ, X_β に関してはこれまでと同様の方法で補正を行うこととし, 次の 2 つの補正式を得た.

$$F_\gamma = -3.65 \times 10^{-4} \psi^3 + 0.0207 \psi^2 - 0.405 \psi + 3.35 \quad (28)$$

$$F_\beta = -5.16 \times 10^{-4} \psi^3 + 0.0295 \psi^2 - 0.558 \psi + 4.17 \quad (29)$$

4. 港湾工事に伴う汚濁拡散・土砂堆積の予測への適用

(1) 計算方法および潮流計算

構築されたモデルの実際問題への適用例として, 大村湾内の川棚港における港湾工事に伴う汚濁濃度の拡散と土砂堆積厚の平面分布の予測を, 2. で定式化された水表面投入のモデルを用いて行い, 本モデルの妥当性を検討した.

川棚港周辺海域の拡散堆積計算を行なう際に必要な潮流流速および潮位のデータを作成するため, 予め平面 2 次元潮流計算を行った. まず大村湾全域における潮流計算 (計算 A) を行い, その結果を境界条件として用いて川棚港近郊のより詳細な潮流計算 (計算 B) を行った. そして計算 B により得られた一潮汐周期分の潮流の結果を用いて汚濁の拡散堆積計算 (計算 C) を行った.

潮流計算の計算条件を表-2に示す. 計算 A, B の結果は潮位, 潮流共に実測結果^{4),5)}と良く一致しており, 実際の潮流場を再現できていた.

(2) 拡散堆積計算(計算 C)

前述の堆積モデルを用いた平面 2 次元拡散堆積計算の基礎式は次式となる.

$$\frac{\partial \bar{c}}{\partial t} + \beta \left(\mu \frac{\partial \bar{c}}{\partial x} + \nu \frac{\partial \bar{c}}{\partial y} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\epsilon_x \frac{\partial \bar{c}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\epsilon_y \frac{\partial \bar{c}}{\partial y} \right) + \frac{P-D}{H} \quad (30)$$

ここで, P は単位時間・単位面積あたりの汚濁発生量であり, H は全水深である.

無次元距離 X は供給点から同心円状に設定した¹⁾. この際の無次元距離 X は, 実距離 x と土砂投入点からその地点までの水深 $h(\text{m})$ の分布により決定される. 川棚港周辺海域の水深分布は, 工事地点(汚濁発生点)を中心に北を $\theta = 0^\circ$ とし, 反時計回りにとった角度

表-3 拡散堆積計算に用いた条件

(計算 C)	計算格子間隔 $\Delta x = \Delta y = 50.0 \text{ (m)}$
底面吸収係数 $A = 0.1$	時間格子間隔 $\Delta t = 100.0 \text{ (s)}$
流速係数 $\psi = 19.6$	分散係数 $\epsilon_x, \epsilon_y = 1.0 \text{ (m}^2/\text{s)}$
粒径 $d_{10} = 20.0 \text{ (}\mu\text{m)}$	沈降速度 $V_s = 0.0356 \text{ (cm/s)}$
水中比重 $s = 1.65$	重力加速度 $g = 9.8 \text{ (m/s}^2)$
汚濁発生量 $Q = 26.7 \text{ (m}^3/\text{hr)}$	
無次元水平方向拡散係数 $\phi_x = 1000$	

θ によって勾配が異なる次式のような直線分布で近似できた.

$$h = (-5.13 \times 10^{-7} \times \theta^2 + 1.84 \times 10^{-4} \times \theta - 0.0133)x + 6.1 \quad (30^\circ \leq \theta \leq 300^\circ) \quad (31)$$

なお $0 \leq \theta < 30^\circ$ の領域では $\theta = 30^\circ$, $\theta > 300^\circ$ では $\theta = 300^\circ$ での水深分布を用いた. X は次式で評価される.

$$X = \frac{\kappa u_*}{6u} \int_0^x (1/h) dx \quad (32)$$

今回の計算対象となった川棚港付近の潮流流速は非常に小さく (計算 B の開境界でも最大流速が 4 cm/s 程度), また参考文献 2) および 5) から得られる取扱い土砂の粒度から判断すると, 汚濁として発生する土砂は殆ど拡がることなく工事地点付近に堆積することが予測された. そこで今回の計算は, 拡散する土砂の代表粒径として $20 \mu\text{m}$ (d_{10} に相当) を採用し, 工事地点において連続発生させることとした. 土砂の終局沈降速度 V_s は Rubey の式を用いて算出した. 拡散堆積計算に用いた計算条件を表-3に示す. モデルの精度を比較するため, 同条件下において簡便な堆積モデル (鉛直方向の粒子濃度分布が常に一様と仮定されたモデルであり, 本研究で得られたモデルに換算すると γ, β は常に定数で $\gamma = A = 0.1, \beta = 1.0$ に相当する) を用いた拡散堆積計算も併わせて行った.

本研究で提案された水表面投入のモデルと簡便なモデルを用いて計算された 15 周期後の土砂濃度分布をそれぞれ図-4a), b) に, 土砂堆積厚分布を図-5a), b) に示す. なお, 土砂堆積厚は含水比, 粒子の形状等を考慮せず, 計算格子内に堆積した土砂の体積を格子面積で除した値である. 本研究で提案したモデルによる計算結果 (図-4a), 5a)) は, 沈降による土砂濃度の鉛直分布の変化を考慮したため, 簡便なモデルを用いた場合 (図-4b), 5b)) と比べ濃度, 堆積厚分布共に大きく異なった. 実測結果が無いために定量的な評価を行うことは難しいが, 粒子沈降による鉛直濃度分布の変化の効果を取り入れることで, 濃度および堆積厚の拡がりが増えられており, より実現象に忠実な計算が可能となったと思われる.

5. 結論

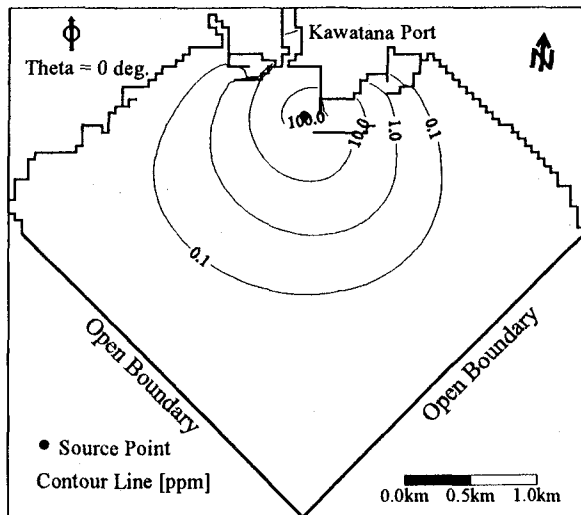


図-4a) 水表面投入モデルによる濃度分布

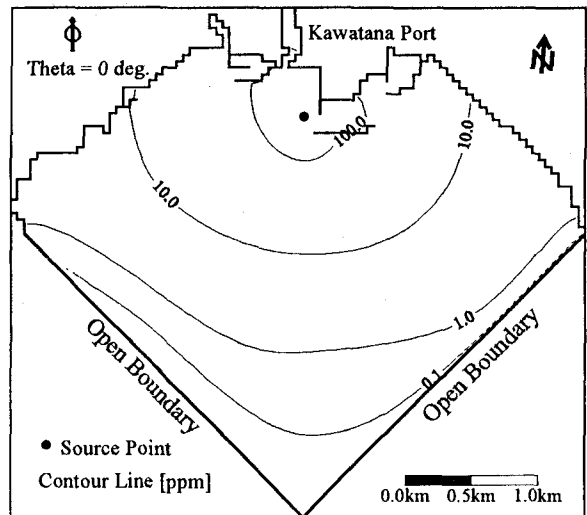


図-4b) 簡便なモデルによる濃度分布

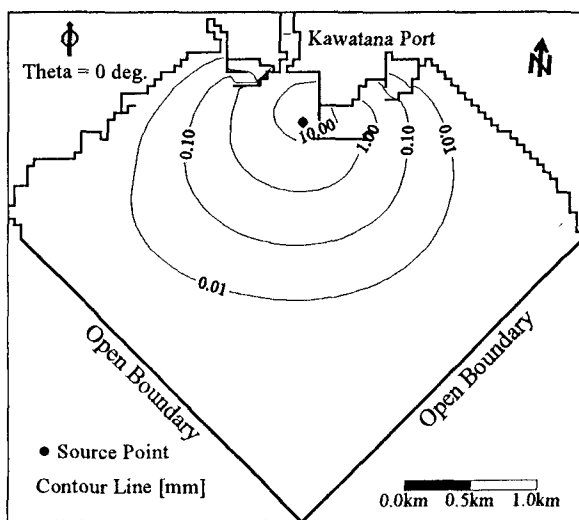


図-5a) 水表面投入モデルによる堆積厚分布

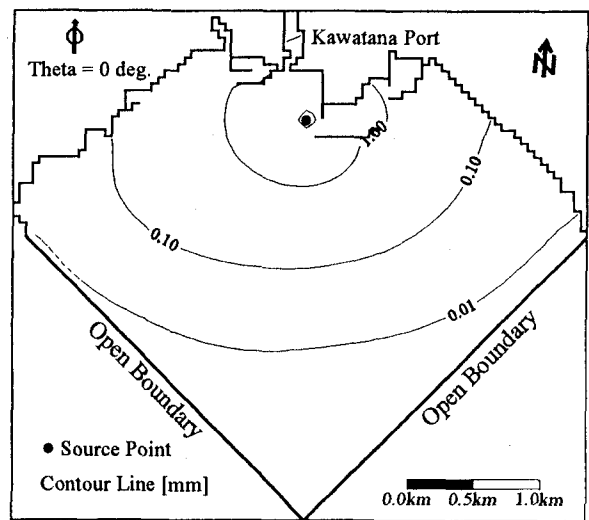


図-5b) 簡便なモデルによる堆積厚分布

埋め立てや浚渫等の海洋工事に伴う汚濁の拡がりや堆積の予測を平面2次元モデルを用いて行なう際に、本研究で提案された拡散・堆積モデルを用いることにより、鉛直濃度分布の変化に起因する影響を、汚濁濃度や堆積厚の計算に反映させることが可能となった。また、本モデルを用いて川棚港における港湾工事に伴う汚濁の拡散堆積計算を行った結果、妥当な結果が得られ実際問題に対する本モデルの有効性が確認された。

ところで本モデルでは汚濁発生点の鉛直濃度分布が境界条件として規定されているが、拡散方程式は線型であるため、計算の際に汚濁の発生状況に応じて本モデルおよび一様投入のモデル¹⁾を別々に用いて計算し、最終的にそれらの結果を重ね合わせることも可能である。また、本文中で水表面投入の場合と底層供給の場合で γ, β の漸近値は投入条件に殆ど影響されずほぼ同じ値となることに触れたが、このことは供給点の鉛直断面のどの位置で汚濁の発生があったとしても成り立つことである。換言すれば $\gamma,$

β の漸近値は汚濁発生点の鉛直濃度分布には影響されない。従って、著者らが以前行った計算領域全体に γ, β の漸近値を用いる方法¹⁾を利用して沈降性粒子の拡散・堆積計算を行う場合には、 γ, β の漸近値に関する推定式(12), (15)を用いるだけで汚濁の発生条件に無関係に計算が可能となる。

参考文献

- 1) 小松利光, 押川英夫, 矢野真一郎, 山崎智弘: 沈降性粒子の平面2次元拡散堆積モデルの高精度化, 海岸工学論文集, 第44巻, pp.1026-1030, 1997.
- 2) 運輸省第四港湾建設局海域整備課: しゅんせつ埋立による濁り等の影響の事前予測マニュアル, pp.83-103, 149-154, 1982.
- 3) Jobson, H.E. and Sayre, W.W.: Predicting Concentration Profiles in Open Channels, Proc. ASCE, 96, HY.10, pp.1983-1996, 1970.
- 4) 福本正: 大村湾における流動特性と水質予測に関する研究, 長崎大学学位論文, pp.9-26, 42-66, 1997.
- 5) 川棚港都市再開発用地造成工事資料, 1997.

(1997.9.30受付)