

沈降性粒子の平面 2 次元拡散堆積モデルの高精度化について

九州大学大学院 学生員○山崎智弘 押川英夫 九州大学工学部 正 員 小松利光 矢野真一郎

1. まえがき

近年の電子計算機の発達により、対象場によっては 3 次元モデルを用いた流動・拡散場の数値計算も行えるようになってきた。しかし計算領域が大きい非定常計算等では、依然として 2 次元モデルを用いた数値計算に頼る場面も少なくない。海域における埋め立てや浚渫等の海洋開発、土石流による海洋への土砂流出の問題等、土砂の拡散や堆積状況の予測が必要とされる場合には、現在でも平面 2 次元計算が用いられることがある。しかし、平面 2 次元計算では流速や濃度の鉛直分布に相似形が仮定されているため、鉛直方向の現象が正確に評価されているとはいえない。本研究では平面 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堆積を高精度に予測可能な拡散堆積モデルの構築を試みた。

2. 内容

1) 計算方法および計算条件 Jobson and Sayre は沈降性粒子の濃度分布、堆積量等に対する支配的な物理量を明らかにするため、開水路定常流場において種々のパラメータを変化させた鉛直 2 次元拡散堆積計算を行っている^{1),2)}。本研究は彼らの行った鉛直 2 次元拡散堆積計算から得られる沈降・堆積現象を、同条件の流下方向 1 次元の拡散堆積計算中にモデル化して取り込み、そのモデルを平面 2 次元拡散堆積計算中でも利用できるように拡張し、高精度化を図るものである。

Jobson and Sayre の結果を利用するため基礎式、計算条件は彼らと同様とした。鉛直 2 次元拡散計算の基礎式は以下の式で、流下方向の濃度勾配は鉛直方向の 1 % 程度であるため流下方向の拡散は無視している。

$$u \frac{\partial c}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial y} (\epsilon_y \frac{\partial c}{\partial y} + V_s c)$$

ここに u は流下方向の流速、 c は粒子濃度、 ϵ_y は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。

水表面、水底面での境界条件は以下に示す 2 式であり、粒子は水表面を越えて輸送されず、水底面から粒子は取り込まれないとしている。

$$\text{水表面}(y=Y_N) : \epsilon_y \frac{\partial c}{\partial y} + V_s c = 0, \text{水底面}(y=0) : \epsilon_y \frac{\partial c}{\partial y} + V_s (1-A)c = 0$$

式中の A は bed absorbcency coefficient³⁾ と呼ばれ、水底部に達した粒子がそこに沈積する確率 ($0 \leq A \leq 1$) を意味している。

各変数を表-1 に示す式によって無次元化すると、以下の無次元鉛直 2 次元拡散方程式が得られる。

$$\mu \frac{\partial c}{\partial X} = \frac{\partial}{\partial \eta} (\phi \frac{\partial c}{\partial \eta} + v_s c)$$

流速分布は次式で表される対数分布を仮定する。

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

ここで κ は 0.4 を使い、粘性底層は $\eta = 0.05$ ままでとし直線分布を仮定して

いる。流速係数 $\frac{u}{u_*}$ は 10.0 (海底摩擦係数で 0.01) で一定とした。粒子の供給は沈降性粒子が上流端において水深方向に一樣に連続投入されるものとし、計算格子間隔はそれぞれ $\Delta X = 0.002$ 、 $\Delta \eta = 0.02$ とした。

2) 堆積モデルの構築 平面 2 次元拡散堆積計算で堆積厚を算出する際に用いる無次元堆積速度 D を次式で定義する。

$$D = v_s A c_{\text{bottom}}, \quad c_{\text{bottom}} : \text{底面直上の格子点での濃度}$$

更に平面 2 次元計算から求まる水深平均濃度 $\bar{c}$ と、海底への堆積速度の比を表す堆積率 γ を次式で定義する。

$$\gamma = D / \bar{c}$$

Jobson and Sayre は堆積に最も支配的なパラメータは v_s であるとしているが、本研究では堆積に直接関わるパラメータである A と v_s により堆積率 γ の定式化を行うものとした。本モデルでは粒子の単位面積当たりの堆積量は $\gamma \Delta t \bar{c}$ となり、次のタイムステップの水深平均濃度は堆積前の水深平均濃度から堆積した分を差し引くことに

表-1 各変数の無次元化

無次元鉛直座標 η	$\eta = \frac{y}{Y_N}$
無次元沈降速度 v_s	$v_s = \frac{V_s}{\frac{\kappa}{6} u_*}$
無次元流速 μ	$\mu = \frac{u}{u_*}$
無次元鉛直拡散係数 ϕ	$\phi = \frac{\epsilon_y}{\epsilon_y} = \frac{\epsilon_y}{\frac{\kappa}{6} u_* Y_N}$
供給点からの無次元距離 X	$X = \frac{x \bar{u}_y}{Y_N^2 u_*} = \frac{\kappa u_* x}{6 Y_N u}$
(Y _N : 全水深、 κ : カルマン定数、 u_* : 摩擦速度、 $\bar{u}$: 水深平均流速、 ϵ_y : 乱流拡散係数の水深平均値)	

より評価できる(図-2 参照)。

鉛直2次元拡散堆積計算から求まる濃度 c を水深方向に平均して得られる水深平均濃度 $\bar{c}$ は、流速が鉛直分布を持つことと沈積する確率の影響により投入直後にわずかに増加することがあるが、ピーク位置以降は単調に減少する(図-3 参照)。本研究ではピークを持つ位置を座標 X の原点とし、 $X' \geq 0$ の領域を定式化の対象とした。定式化する無次元沈降速度 ν_s の範囲は、雲仙普賢岳での土石流発生に伴い問題とされている有明海へ流出する土砂の粒径^{4),5)} $0.001 \sim 0.1(\text{mm})$ から換算される $0.001 \sim 10.0$ とした。

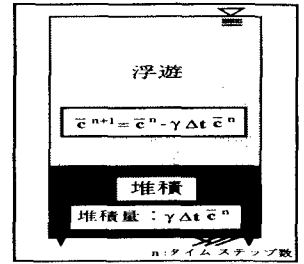


図-2 堆積モデル概念図

ν_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、それぞれの堆積率 γ を求めた。結果の一例として沈積の確率を $A=0.3$ として ν_s を変化させた場合と無次元沈降速度を $\nu_s=3.0$ として A を変化させた場合の堆積率の流下方向分布をそれぞれ図-4、図-5に示す。これらのグラフの各種曲線による近似を試みた結果、図-6のような一定値に漸近する曲線 $\gamma(\nu_s, A, X) = a \tanh\{b(X-c)\} + d$ により統一的に表せることが分かった。ここに、近似曲線の振幅 a 、変曲点付近の勾配 b 、 γ 方向の原点からの変曲点のずれ d 、座標 X の原点での堆積率 γ_0 をそれぞれ以下のように定義する。

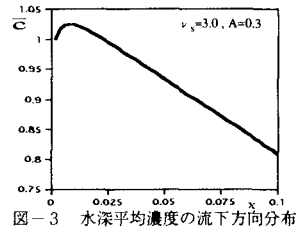


図-3 水深平均濃度の流下方向分布

$$a = \gamma_{\max} - d, b = \frac{-1}{2c} \ln \left\{ \frac{2(\gamma_{\max} - d)}{\gamma_{\max} - \gamma_0} - 1 \right\}, d = \gamma_{\max} / 2, \gamma_0 = \gamma_{\max} - \gamma_{2c}$$

 $\gamma_{\max}$ は堆積率 γ の漸近値、 c は変曲点の X 座標、 γ_{2c} は $2c$ の位置での堆積率であり、これらを ν_s と A により定式化した。堆積に対し最も支配的なパラメータは ν_s であるため、まず A を 0.3 に固定して鉛直2次元拡散堆積計算を行い ν_s が変化する影響を定式化した。次に A が変わる影響を比例係数として近似的に表し定式化を試みた。得られた近似式を以下に示す。

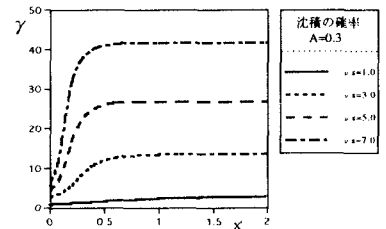


図-4 堆積率 γ の流下方向分布

$$\gamma_{\max} = (0.2456\nu_s^2 + 4.559\nu_s - 2.251)(1.203 - 0.05878/A) \nu_s^{0.0849 - 0.02384/A}$$

$$c = (-0.305 \log \nu_s + 0.381)(1.1478 - 0.04322/A)$$

$$\gamma_{2c} = (0.188\nu_s^2 + 4.203\nu_s - 2.486)(1.289 - 0.08841/A) e^{(0.0198 - 0.00646/A) \nu_s}$$

近似の程度を確認するため、一例として $\nu_s=7.0, A=0.7$ の場合に上記の関係式を用いて得られた近似曲線と数値計算から得られる堆積率の流下方向分布を図-7に示す。この図から、得られた式は堆積率 γ をよく近似できていることが分かる。

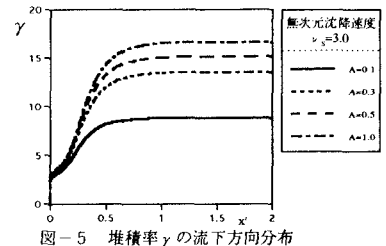


図-5 堆積率 γ の流下方向分布

3. 結論

平面2次元モデルを用いた土砂拡散堆積計算を行う際に、本研究で定式化された堆積率 γ を用いることにより、土砂の堆積量をより正確に予測できることが期待される。今後は流速係数(海底摩擦係数)が変わる影響を考慮した上で、実際に平面2次元拡散堆積計算にこのモデルを適用してその有効性を確認していく予定である。

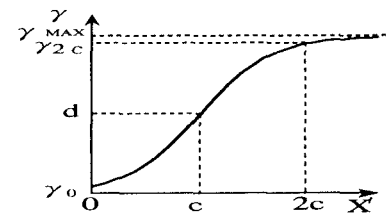


図-6 近似曲線の概略図

参考文献

- 1) Jobson, H.E. and Sayre, W.W.: Vertical transfer in open channel flow, J. of Hydraulics Div., Proc. ASCE, 96, HY.10, 703-724, 1970.
- 2) Jobson, H.E. and Sayre, W.W.: Predicting concentration in open channels, J. of Hydraulics Div., Proc. ASCE, 96, HY.10, 1983-1996, 1970.
- 3) 藤崎一裕、谷川弘樹、栗谷陽一: 開水路乱流における沈降性物質の移流分散現象、第32回水理講演会論文集、1988年2月
- 4) 平野宗夫: 雲仙における土石流・火砕流の調査研究 平成5年3月
- 5) 長崎大学生涯学習教育研究センター運営委員会: 雲仙普賢岳火山災害にいたむ-長崎大学からの提言-

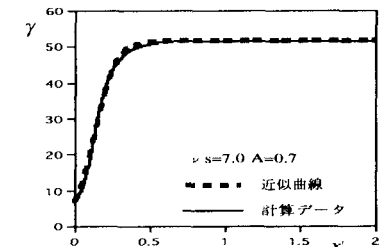


図-7 計算データの近似結果