

京都大学工学部 正 酒井哲郎、 三井造船 正 加藤 仁

1. まえがき 沿岸域で大規模な埋立工事や浚渫工事を行なう際は、工事にともなう土砂の拡散による海域の濁りを周囲の環境を悪化させない程度に押えながら工事を進める必要がある。そのためには、工事中つねに濁りの程度を監視し、将来の濃度を予測して、工種や施工速度を変えながら工事を進める必要がある。とくにリアルタイムの濁りの濃度予測を考えた場合、長い計算時間の必要な計算モデルは不適当であり、多少仮定が多くても簡単に計算のできるモデルが好ましい。その意味で、ここでは 1974 年に発表された MIT のモデルを取りあげ、土砂濃度の時間変化およびモデルの支配的なパラメーターである分散係数と減衰係数の効果について検討する。

2. 潮流の卓越する沿岸域での濁り拡散に関する MIT モデル (1974) このモデルではいくつかの重要な仮定がなされている。まず、投入土砂のうち拡散に寄与する細かい土砂のみを数グループに分け、各グループは夫々一定の沈降速度を有すると仮定して、各グループ毎に濃度分布を計算し、全体の濃度はそれらをたし合せたものとする。流れは、恒流成分と調和成分とからなり、それらは水深方向にのみ変化すると仮定する。土砂は水深方向に一樣な線源として投入される。濃度は水深方向には平衡状態にあり、その分布は水深のべきで与えられる。以上の仮定のもとで、水平二方向の拡散方程式を水深方向に積分し、水深方向に平均された諸量に関する次式を得た。

$$\frac{\partial \bar{c}}{\partial t} + (\bar{U}_{fs} + \bar{U}_{Ts} \sin \omega t) \frac{\partial \bar{c}}{\partial x} + \bar{V}_{Ts} \sin \omega t \frac{\partial \bar{c}}{\partial y} = E_x \frac{\partial^2 \bar{c}}{\partial x^2} + E_y \frac{\partial^2 \bar{c}}{\partial y^2} - \alpha \bar{c} \quad (1)$$

ここで $\bar{c}$ は水深方向平均濃度、 t は時間、 $\bar{U}_{fs}$, $\bar{U}_{Ts}$, $\bar{V}_{Ts}$ はそれぞれ濃度の鉛直分布を考慮して水深方向に平均された恒流成分、恒流と同方向の調和成分および恒流と直交する方向の調和成分、 x , y は直行する水平二方向の座標、 E_x , E_y は本来の拡散係数と水深方向の流速分布および濃度分布による分散効果を合わせた x および y 方向の分散係数、 α は沈降速度に関係する減衰係数である。時刻 0 から一定割合で連続投入を行なった場合の無次元時刻 t' での濃度に対する式 (1) の解は、次式のように無次元表示される。

$$c' = \frac{V' T}{h^3} \int_0^{t'} \frac{\exp \left[- \frac{\left\{ x' - \bar{U}_{fs}' (t' - \tau') + \frac{\bar{U}_{Ts}'}{2\pi} (\cos 2\pi t' - \cos 2\pi \tau') \right\}^2}{4 E_x' (t' - \tau')} - \frac{\left\{ y' + \frac{\bar{V}_{Ts}'}{2\pi} (\cos 2\pi t' - \cos 2\pi \tau') \right\}^2}{4 E_y' (t' - \tau')} - \alpha' (t' - \tau') \right]}{4\pi (t' - \tau') \sqrt{E_x' E_y'}} d\tau' \quad (2)$$

ここで V' は土砂投入速度、 T は潮流周期、 h は水深であり、“'” の付いた量は、以下に例示するように、 $\bar{c}$ を除いて h と T で無次元化された量である： $c' = \bar{c} / (\lambda_i \cdot C_0)$, $t' = t / T$, $x' = x / h$, $U' = U / (h / T)$, $E' = E / (h^2 / T)$, $\alpha' = \alpha T$ 。ここで、 λ_i は各土砂グループの全体に占める割合、 C_0 は土砂密度である。

3. 濃度の時間変化 式 (2) で与えられる水深方向平均濃度の時間変化を調べるために、原論文で用いられている各パラメーターの値を用いて式 (2) を計算した。土砂グループは細砂、三種類のシルトおよび粘土であり、粘土以外の 4 つのグループの沈降速度と粘土のフロッキュレーションを考慮して各グループの沈降速度を決定している。パラメーターの値の詳細は省略するが、概略は以下の通りである： $h = 30 \text{ m}$, $T = 12 \text{ hr}$, $V' = 0.02 \text{ m}^3/\text{s}$, $0.7 \times 10^{-4} \text{ cm/s} \leq$ 沈降速度 $\leq 0.46 \text{ cm/s}$, $3 \text{ cm/s} \leq \bar{U}_{fs} \leq 8.6 \text{ cm/s}$, $3.4 \text{ cm/s} \leq \bar{U}_{Ts} \leq 4.0 \text{ cm/s}$, $4.0 \text{ cm/s} \leq \bar{V}_{Ts} \leq 6.8 \text{ cm/s}$, $12 \text{ m}^2/\text{s} \leq E_x \leq 20 \text{ m}^2/\text{s}$, $6 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s} \leq E_y \leq 3.2 \text{ m}^2/\text{s}$, $5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1} \leq \alpha \leq 4 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$, $C_0 = 1.0 \text{ g/cm}^3$ 。図一は、 $(x', y') = (200, 0)$ での $\bar{c}$ の時間変化を示している。図からわかるように、濃度はほぼ 3 潮流周期で定常状態に達し、ピークは一周期に二度現れている。このモデルは水深方向には濃度分布は平衡状態に達していると仮定しており、それに要する時間は約 2 周期であるが、その範囲においても濃度の時間変化は妥当である。投入開始後 2.05 周期 (約 1 日) と 9.05 周期 (約 4.5 日) の濃度の平面分布を図二と図三に示

す。遷移過程にある投入後1日から定常状態の4.5日になると、等濃度のコンターが恒流方向（ x 方向）へ広がっていく様子がわかる。

4. 分散係数と減衰係数の効果 原論文では、3つの異なった条件での浮子観測結果から決定したパラメーター値を用いた計算結果から間接的に、恒流と直交する方向の分散係数 E_y と減衰係数 α が濃度の平面分布に支配的であると類推している。ここでは、これを確かめるために、他の条件を同じにしてまず E_y のみを10倍にした場合の9.05周期での平面分布を図-4に示す。図-3と比べて明かに E_y の値を増加すると濃度が大きく広がるのがわかる。一方 α の値のみを1/10にしたところ、ほとんど平面分布に差が生じないことがわかった。その意味で、このモデルを用いる場合、恒流と直交する方向の係数値をいかに与えるかが基本的な問題となる。前述したように、このモデルにおける分散係数は潮流と濁りの濃度の鉛直分布を考慮したものであり、本来はこれらがわかってはじめて決定できるものである。しかし現実には、いづれも適当に与える必要のあることが多い。また、恒流の方向の時間的変化もみかけ上は分散係数の増加として現れる。なおこのモデルでは、潮流は時間的には変化しても、式2)の積分中の $\overline{U}_{fs}$, $\overline{U}_{Ts}$, $\overline{U}_{Ts}$ を時間の変数として扱えばよい。したがって潮流の時間的変化効果を、恒流と直交する方向の分散係数の中で考慮する必要はない。最後に、MITの原論文を紹介していただいた運輸省港湾技術研究所の堀江海水浄化研究室長に謝意を表する。

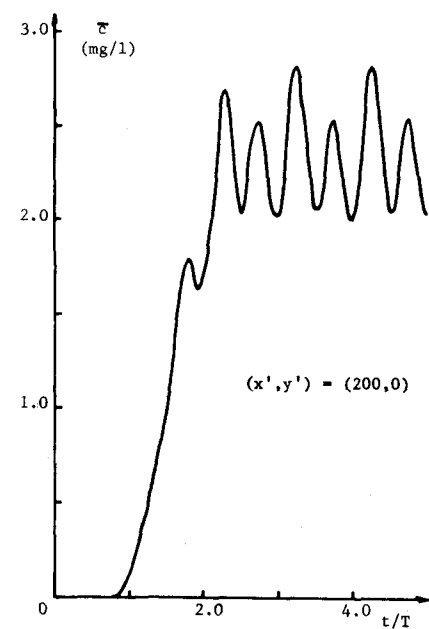


図-1 $(x', y') = (200, 0)$ での水深方向平均濃度の時間変化

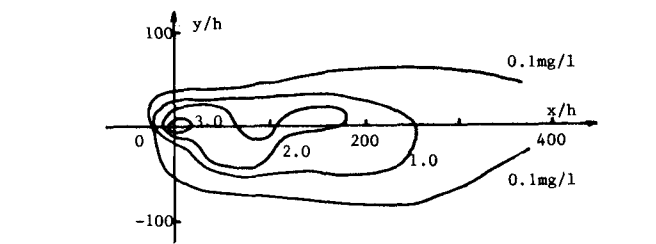


図-2 投入開始後約1日での水深方向平均濃度の平面分布

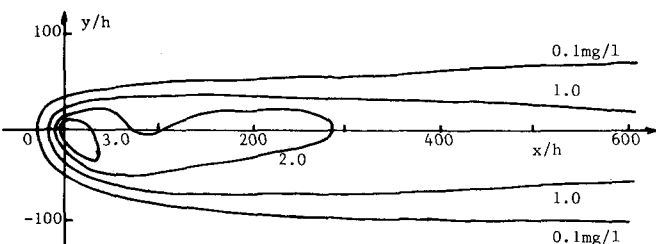


図-3 投入開始後約4.5日での水深方向平均濃度の平面分布

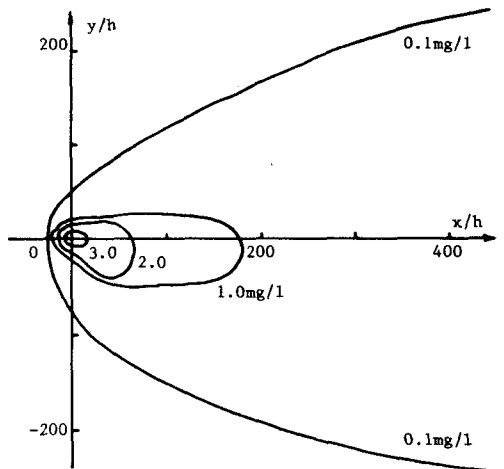


図-4 恒流と直交する方向の分散係数を10倍にした場合の投入後約4.5日での濃度の平面分布