

1. はじめに

海洋開発の進歩とともに大規模な海中工事が各地で行われるようになった。その際、海中工事によって大量の浮遊土砂が発生し、流れや波によって拡散され、環境汚染の一因となる可能性がある。このような海中工事による汚濁について、著者はその発生量に関して模型実験を行い、その成果の一部については前報¹⁾で報告したが、この報告では同海域に及ぼしている影響を、発生量を与えられした場合に数値計算によって予測する方法について述べる。ここで述べる方法は、混合粒径を有する発生土砂をいくつかの代表的な粒径で代表させて計算を行うものである。また流れが定常流の場合について実験を行い、拡散の挙動を調べるとともにモデルの検証を行った。

2. 数値予測モデル

2.1. 底質粒径と沈降速度

ここでは水深が30m程度で潮汐流の卓越する場合、例えば瀬戸内海などにおける海中工事に伴う浮遊土砂の沈降拡散を考察の対象とする。

さて、海底における底質粒径は場所により変化するが、例えば図-1のように与えられたとする。このとき細粒の土砂は $d_1=0.1\text{ mm}$ 以下で17%、 $d_2=0.01\text{ mm}$ 以下で7%程度含まれている。一方、これらの粒子が沈降する場合のレイノルズ数は小さいため、ストークス則がほぼ成立すると考えられる。図-2は粒径と沈降速度の関係を示している。また同図には代表水深30mを沈降するに要する時間(代表時間 T^*)の粒径による変化も示されている。底質粒径の代表として上記 d_1 、 d_2 を考えたとき、 w_0 、 T^* は次の通りである。

$$d_1 = 0.1 \text{ mm}, \quad w_0 = 1.0 \times 10^{-2} \text{ m/sec}, \quad T_1^* = 3.0 \times 10^3 \text{ (sec)}$$

$$d_2 = 0.01 \text{ mm}, \quad w_0 = 1.0 \times 10^{-4} \text{ m/sec}, \quad T_2^* = 3.0 \times 10^5 \text{ (sec)}$$

一方、潮汐の代表的変化として半日周期をとれば、 $T_c = 4.62 \times 10^4 \text{ (sec)}$ となり、 T_c と T^* を比較すれば、 d_2 の粒子に対しては流れの時間的な変化を考える必要があるが、 d_1 に対しては流れは定常と見なしても良いと考えられる。更にこの考慮を拡張すれば、 $d_2 = d_r$ とおいとき d と d_r の相対的関係から次のような分類が可能であり、各々に対応したモデルを作成する必要がある。

$$\text{i) } d \gg d_r \quad w_0 \neq 0 \quad (\text{モデル I})$$

$$\text{ii) } d \sim d_r \quad w_0 \neq 0 \quad (\text{モデル II})$$

$$\text{iii) } d \ll d_r \quad w_0 \sim 0 \quad (\text{モデル III})$$

2.2. モデル I

さて、主流方向に x 軸、水面より鉛直下方に z 軸、横方向に y 軸をとり、汚濁濃度を C とすれば、基礎式は式(1)で与えられる。

$$-\frac{\partial C}{\partial t} + u_0 \frac{\partial C}{\partial x} + w_0 \frac{\partial C}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} (k_x \frac{\partial C}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (k_y \frac{\partial C}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (k_z \frac{\partial C}{\partial z}) \quad (1)$$

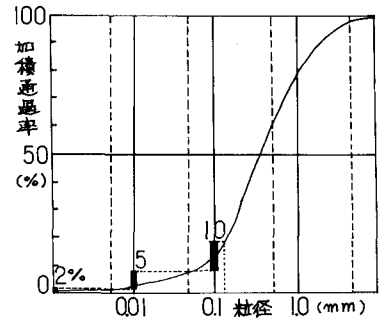


図-1 海底マ質の粒径加積曲線例

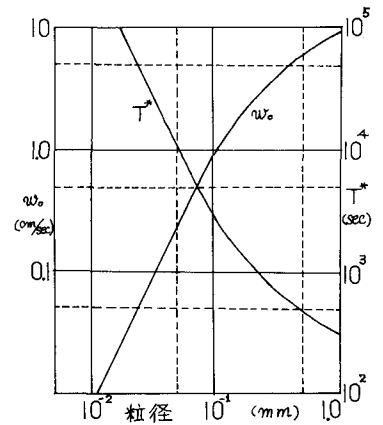


図-2 底質粒径と沈降速度

ここに、 u_0 は主流流速であり、 k_x, k_y, k_z は拡散係数である。

次に物理的意味を明確にするために無次元化を行う。鉛直方向の代表長さを l_z 、代表主流流速を U_0 とおけば、各変数は式(2)のように無次元化される。

$$t = \frac{l_z}{U_0} t^*, \quad x = \frac{U_0}{l_z} x^*, \quad u = U_0 u^*, \quad z = l_z z^*, \quad y = l_z y^*, \quad k_x = \gamma \frac{U_0^2}{l_z} k_x^*, \quad k_y = \beta u_0 l_z, \quad k_z = \alpha u_0 l_z, \quad C = C_0 C^* \quad (2)$$

式(2)を式(1)へ代入し整理すると、無次元式(3)が得られる。

$$\frac{\partial C^*}{\partial t^*} + u^* \frac{\partial C^*}{\partial x^*} + \frac{\partial C^*}{\partial z^*} = \frac{\partial}{\partial x^*} (\gamma \frac{\partial C^*}{\partial x^*}) + \frac{\partial}{\partial y^*} (\beta \frac{\partial C^*}{\partial y^*}) + \frac{\partial}{\partial z^*} (\alpha \frac{\partial C^*}{\partial z^*}) \quad (3)$$

汚濁予測を行うに際して式(3)をそのまま差分化する方法²⁾も提案されているが、計算に大容量の計算機を必要とすることや、また必ずしも計算精度が良好ではないなどの点から、ここでは濃度が y^* 方向に相似形な分布を仮定し、計算を簡略化する。すなわち、

$$C^*(x^*, y^*, z^*, t^*) = C_1(x^*, z^*, t^*) \cdot F\left(-\frac{y^*}{\sigma^*}\right) \quad (4)$$

と置く。式(4)を式(3)へ代入し、 y^* について $-\infty$ から $+\infty$ の範囲で積分すると式(5)となる。

$$\int_{-\infty}^{\infty} \frac{\partial C_1}{\partial t^*} F dy^* + \int_{-\infty}^{\infty} u^* \frac{\partial}{\partial x^*} (C_1 F) dy^* + \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\partial C_1}{\partial z^*} F dy^* = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\partial}{\partial x^*} \left\{ \gamma \frac{\partial}{\partial x^*} (C_1 F) \right\} dy^* + \int_{-\infty}^{\infty} C_1 \frac{\partial}{\partial y^*} (\beta \frac{\partial F}{\partial y^*}) dy^* + \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\partial}{\partial z^*} (\alpha \frac{\partial C_1}{\partial z^*}) F dy^* \quad (5)$$

ここで関数 F が次の関係を持つと仮定する。

$$\int_{-\infty}^{\infty} F\left(-\frac{y^*}{\sigma^*}\right) dy^* = 1, \quad \beta \frac{\partial F}{\partial y^*} \Big|_{y^*=\pm\infty} = 0 \quad (6)$$

式(6)が成立する場合、式(5)は積分順序を変えて計算を行うと最終的に式(7)となる。

$$\frac{\partial C_1}{\partial t^*} + u^* \frac{\partial C_1}{\partial x^*} + \frac{\partial C_1}{\partial z^*} = \frac{\partial}{\partial x^*} (\gamma \frac{\partial C_1}{\partial x^*}) + \frac{\partial}{\partial z^*} (\alpha \frac{\partial C_1}{\partial z^*}) \quad (7)$$

式(7)が数値計算のための基本式である。ただしここでは式(6)を満足する関数としては次の正規分布を仮定する。すなわち、

$$F = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma^*} \exp\left(-\frac{y^{*2}}{2\sigma^{*2}}\right) \quad (8)$$

である。ところで式(7)の計算は水深方向の断面での計算を行うことになる。計算は差分法を用い、村上³⁾によるADI法を用いて行う。ただしここでは差分法などについてはふれないことにする。式(7)より $C_1(x^*, z^*, t^*)$ が求まれば、濃度 C^* は式(9)より求めることができる。

$$C^*(x^*, y^*, z^*, t^*) = \frac{C_1(x^*, z^*, t^*)}{\sqrt{2\pi} \sigma^*} \cdot \exp\left(-\frac{y^{*2}}{2\sigma^{*2}}\right) \quad (9)$$

ところで σ^* は一般には x^* と z^* の関数と考えられるが、主流流速が水深速度より大きければ、 σ^* は

$$\sigma^* = \sqrt{2\beta x^*} \quad (10)$$

と表わされる。

2.3 モデルⅡ

モデルⅡでは沈降時間が潮流の代表時間と同程度の場合を取扱う。現象を記述する基礎式は式(1)と同様である。さて、このような問題を考察するには次に述べる二通りの方法が考えられる。

i) 水平拡散 (モデルⅡ-a)

式(1)を水面より水底まで積分し、

$$\bar{C} = \frac{1}{h} \int_0^h C dz, \quad \bar{u} = \frac{1}{h} \int_0^h u dz \quad (11)$$

とおけば式(12)が得られる。ただし h は水深である。

$$\frac{\partial \bar{C}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{C}}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} (\bar{k}_x \frac{\partial \bar{C}}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (\bar{k}_y \frac{\partial \bar{C}}{\partial y}) - Q_{z=h} + Q_{z=0} \quad (12)$$

ここに、

$$Q = \frac{1}{h} (-k_z \frac{\partial C}{\partial z} + u_0 C) \quad (13)$$

であり、 Q は生産または減少量を表わす。計算を行うには式(13)の Q を評価しなければならない。このため Q に関して次の仮定を設ける。

1. 沈降によって失われる量($-Q_z=k$)は沈降時間 T^* において瞬時的に生ずるものとする。
2. 生産量は原点でのみ与えられる。

以上の仮定のもとでは基本式は式(14)になる。ただし平均を表わすバー印は省略し、またデルタ関数を $\delta(x)$ と書く。

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} (k_x \frac{\partial C}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (k_y \frac{\partial C}{\partial y}) + q \cdot \delta(x) \cdot \delta(y) \quad (14)$$

次に物理的意味を明確にするため式(14)を無次元化する。 $u = U_0 \cos \omega t$ とすれば、速度の代表スケールとして U_0 を選ぶことができる。主流方向の代表長さを l_x とすれば、各変数は次のように無次元化される。

$$u = U_0 u^*, \quad x = l_x x^*, \quad y = l_y y^*, \quad t = \frac{l_x}{U_0} t^*, \quad k_x = \beta U_0 l_x, \quad k_y = \alpha U_0 l_y \quad (15)$$

$$C = C_0 C^*, \quad q = \frac{U_0 C_0}{l_x} q^*$$

以上の式を式(14)へ代入すれば、

$$\frac{\partial C^*}{\partial t^*} + u^* \frac{\partial C^*}{\partial x^*} = \frac{\partial}{\partial x^*} (\beta \frac{\partial C^*}{\partial x^*}) + \frac{\partial}{\partial y^*} (\alpha \frac{\partial C^*}{\partial y^*}) + q^* \cdot \delta(x^*) \cdot \delta(y^*) \quad (16)$$

となる。式(16)が数値計算のための基本式となる。濃度分布は時刻 T^* に関して周期性を有する。したがって位置を変えて T^* 時間計算を実行すれば良い。

ii) 鉛直拡散 (モデルII-b)

モデルII-aでは鉛直分布を考慮しなかったが、モデルII-bでは鉛直分布を考慮する。基本式はモデルIと同様に式(3)で与えられる。しかしモデルIにおいて式(3)を解く際に仮定した相似形分布はこの場合にはそのまゝ仮定できない。ただし濃度変化は線型系であることを考慮すれば重ね合わせが利用できることから、 $t=T$ に発生した汚濁を T^* 時間追跡し、順次 Δt 時間だけ T 時間をずらして計算し、最後に重ね合わせを行うのであれば計算は可能である。今、 $t=T$ に発生した汚濁に対して濃度分布が次の相似形を持つて仮定する。

$$C^*(x^*, y^*, z^*, t^*) = C_1(x^*, z^*, t^*) \cdot F(-\frac{y^*}{\sigma_z^*}) \quad (17)$$

このとき式(13)はモデルIと同様の方法により単純化され、最終的には式(17)と同じになる。ところで式(17)の F に関しては正規分布を仮定すれば、

$$F = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_z^*} \exp\left(-\frac{y^{*2}}{2 \sigma_z^{*2}}\right) \quad (18)$$

であり、ここで σ_z^* は汚濁発生後の経過時間を z とすれば、

$$\sigma_z^{*2} = \alpha \beta t^* \quad (19)$$

と表わす。 $t=T^*$ において汚濁が発生した場合、その後の時刻における値は式(17)を用いて差分法によって $C^*(x^*, z^*, t^*)$ を求め、次に式(17)より分布形が決定される。 Δt ずつ時間をずらしてすべて時刻で計算を繰り返す、重ね合わせれば最終的な分布形が求まる。

2.4 モデルIII

モデルIIIでは沈降速度がほとんど零と見なせるため、鉛直方向に平均した拡散式を解くことになる。ただし時間及び距離のスケールが大きいため、地形変化による流況を考慮する必要があり、汚濁計算を行う前に潮流計算を行わなければならない。この方法は既に実用化されているので詳細な点は省略する。

実際の予測計算に当っては、いくつかの代表粒径に対してモデルI~IIIの計算を行い、最後に加え合わせることで濃度分布や代表点の濃度が決定されることになる。

3. 拡散実験

ここでは発生源近傍での汚濁物質の挙動を調べるために行った拡散実験について述べる。実験条件は現地条件

を考慮して次のように定めた。

- i) グラブによる浚渫時発生する汚濁物質は水平方向の運動量を持ちうるので、実験では汚濁物質が水平方向に放出されるモデルにする。
- ii) 潮流は断面的に変化するが、実験では定常流とする。
- iii) 底質としては自重による沈降の効果を持つものとしてカオリンを選ぶ。

3.1. 実験装置と実験方法.

実験は長さ12 m、幅1.2 mの二次元水槽で行った。下部にこの水槽専用の貯水槽があり回流するように作られている。この盆中にはバルブがあり、その開度によって送水量が調節できる。送水パイプにはベンチュリ管が装着され、流量測定が可能である。実験では水深を約42 cmに保った。また流量測定はピトー管を用いた。

使用したカオリンは径が $60 \sim 74 \mu$ 、比重が2.45のものである。なお、静水中の沈降速度は Stokes 則によれば、 0.4 cm/sec である。カオリンを混入した放出水は大型の塩ビ製バケツに入れ攪拌器で常に攪拌した。放出口先端は内径2 cmの塩ビパイプで、先端には径1.0 cm、0.5 cmのノズルが取換えられるようになっていた。放出位置は水面、中位水深、底面上の3通りとした。また放出流速は主流の約 10 cm/sec に対して $5 \sim 40 \text{ cm/sec}$ まで7通り変化させた。採水は内径3 mmの銅パイプを使用してサイホンを作って行った。このサイホンは放出口下流の3断面に配置した。また放出水の拡りの状態を調べるために、上方と側方から写真撮影を行った。

3.2 実験結果.

実験条件は種々変化した。現地及び模型実験¹⁾によれば、汚濁はその大部分が表面近くで発生することから、ここでは主に表面放出について考察する。まず、主流の流速分布は放出口の下流150、300、450 cmの第1～3断面において1断面当り5点測定した。図-3は下流300 cmにおける流速分布を示している。流速はほぼ一様であり、平均流速は約 10 cm/sec である。次に図-4、5、6は表面放出の場合の中心軸上の濃度逓減率を示す。すなわち、 $\gamma_c = (C - C_b) / (C_0 - C_b)$ である。ただし C_b 、 C_0 、 C は各々バックグラウンド、放出原水、及び任意点の濃度である。また放出

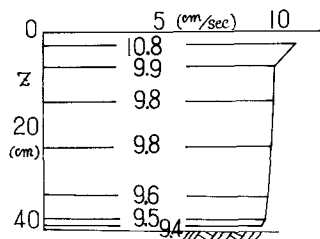


図-3 流速分布

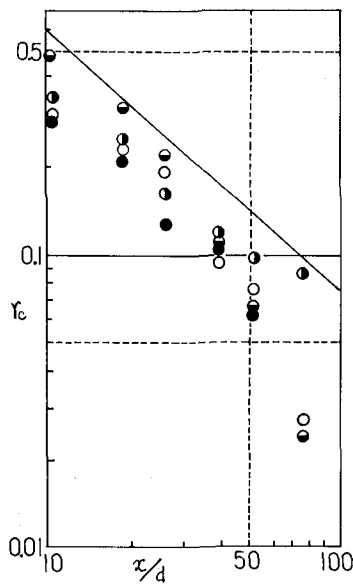


図-4 中心軸上の濃度逓減率 ($u=15.9 \text{ cm/s}$)

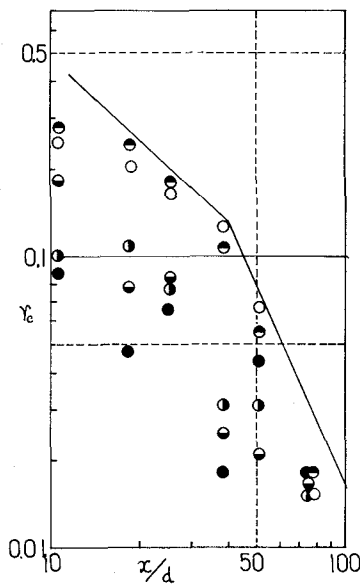


図-5 中心軸上の濃度逓減率 ($u=9.6 \text{ cm/s}$)

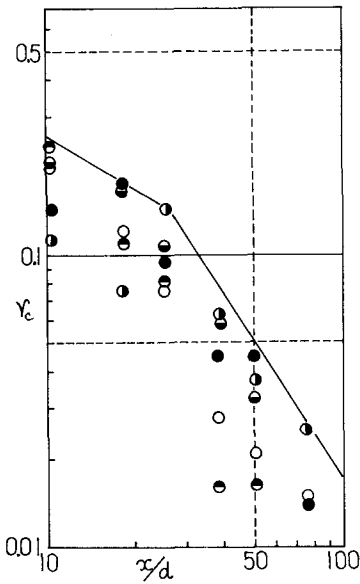


図-6 中心軸上の濃度逓減率 ($u=6.5 \text{ cm/s}$)

流速を順に $u=15.9, 9.6, 6.5 \text{ cm/sec}$ と変えている。図-4と図-5を比較すると、図-5では濃度勾配が $x/d=40$ 付近で急激に変化しており、この付近で運動量が失われる。更に放出流速の遅いとき(図-6)には $x/d=20$ 付近で勾配が急変し、図-5と同様な傾向を示している。また図-7は断面の濃度分布を示しているが、自重による沈降の効果が顕著に表われている。

以上に述べたように、放出流速が遅くなるにつれて周囲水の流いの構造と自重による沈降が問題になってくる。放出流速が遅い場合、放出口径の20倍程度の所までは大きな渦の効果も大きくなり、また底面の効果もそれほどではないようである。その後は乱れの構造と沈降速度が重要性を増す。

ここで、実験結果に対してモデルⅠを適用させてみる。まず、上方写真より得られる拡散幅(b)が中心軸上の濃度の約10%程度となる場所に対処すると仮定すれば、 b と分散(σ)の間には式(20)の関係が成立する。

$$b/2 = 1.52 \sigma \quad (20)$$

両辺を口径 d を用いて無次元化し、これを k_y と U_0 を用いて表わすと、

$$b^* = 3.04 \sqrt{\frac{g d^3}{U_0^3}} \cdot \sqrt{x^*} \quad (21)$$

となる。ここで、図-8は写真より判読した無次元厚さ(h_i^*)及び無次元幅(b_i^*)の変化を示している。ただし代表長さとしては口径 d を用いている。式(21)において $U_0=9.8 \text{ cm/sec}$ 、 $d=2 \text{ cm}$ 、 $k_y=3.3 \text{ cm/sec}$ とおけば、

$$b_i^* = 1.76 \sqrt{x_i^*} \quad (22)$$

となり、これは図-8で実線で示されている通り、実験値とはほぼ一致する。したがって横方向の拡散係数としてはほぼ $k_y=3.3 \text{ cm/sec}$ であると言える。次に、 k_y が与えられたとき、式(8)で定義した相似性が成立するかどうかを調べたのが図-9である。ただし、

図-9の鎖線はバックグラウンドレベルを示す。図中の値は、各点の濃度も各断面の各水深の中心軸上の濃度を用いて正規化したものである。データは多少のバラツキはあるもののほぼ図中の実線で示された曲線 $\exp(-\frac{1}{2} \frac{x^*}{h_i^*})$ にしたがうと言えよう。

最後に図-10は中心軸上の濃度変化を示す

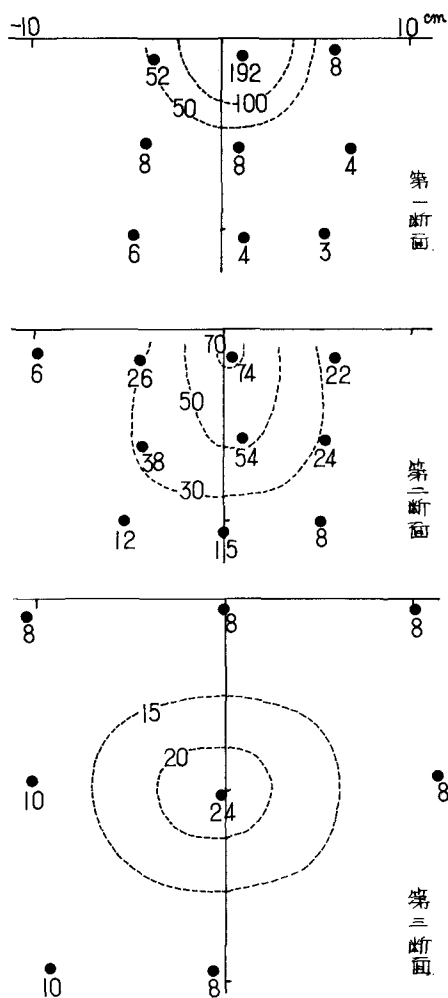


図-7 断面濃度分布

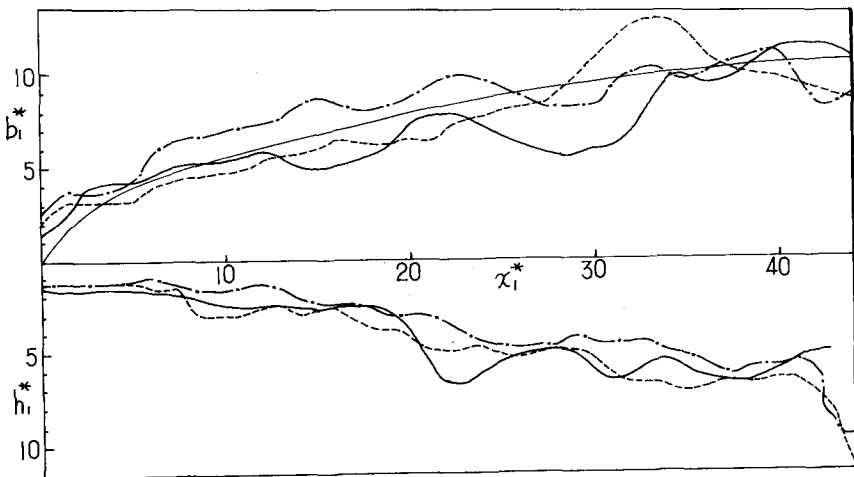


図-8 無次元厚さ(h_i^*)及び無次元幅(b_i^*)の変化

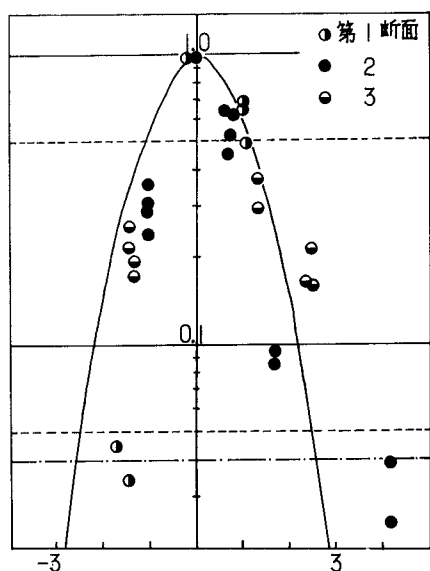


図-9. 相似形

ものである。図中には第1～3断面の測定値が○印で示されている。また第2断面の濃度を既知として実線のように近似した場合の第3断面における計算値が点線で示されている。濃度最大の点の実験では測定されていないが、測定値と計算値はほぼ一致をみている。

4. 計算上の誤差の扱い

掘削によって発生する汚濁は実際の油蔵ではほぼ点源と見なし得るので、例えばモデルⅡ-αにおいて一点で y^* を与えて計算を行い、解析解と比較すると計算精度は低く、実際への適用上問題になることがわかった。この点を明らかにするため点源より一定濃度が発生する簡単なモデルを用いて解析解との比較を行った。この結果、発生源に極めて近い所では濃度が急激に変化するため、この点の値を数値計算によって求めることに困難があることが明らかになった。このため発生源に極めて近い所の値は解析解によって与えて数値計算を行ったところ、精度は著しく向上した。

計算例のうち x 軸方向の濃度の速減曲線を示したのが図-11であり、また y 軸方向の分布形を示すのが図-12である。これらによれば、無次元拡散係数 α が小さくなるにつれ誤差は大きくなる傾向を示すが、数値解と解析解は高い精度で一致している。結局、点源より汚濁が発生する場合は、発生源は特異点と考えられ、このような点の近傍では解析的に求めることによって精度は著しく向上する。

一方、鉛直二次元の計算においても同様の検討を行った結果、発源近傍においては水平二次元と同様の扱いをしなければならぬことがわかった。また水面付近から汚濁が発生する場合は、水面条件を満足させるために、

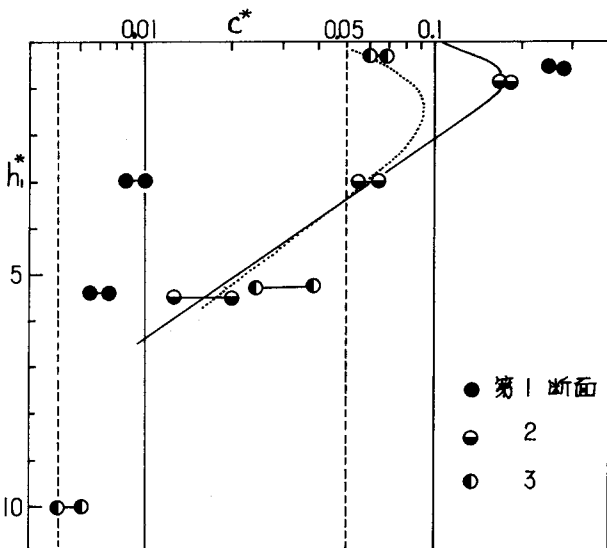


図-10. 鉛直断面(中心軸上)の濃度分布

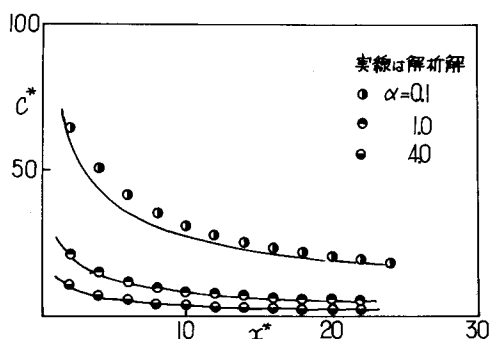


図-11. 主流方向の濃度の速減曲線

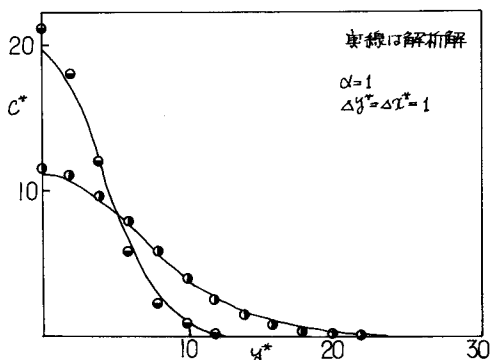


図-12. y 軸方向の濃度分布

水面に仮想的な壁面を用いる必要がある。

5. 数値予測例

ここでは予測モデルによって海底々質が図-1に示される粒度分布を持った、水深が30m付近におけるグラブ工事による濁りの拡散についての計算例を示す。図-1の粒度分布において代表粒径を簡単に0.1, 0.01, 0.001 mmと選ぶことにすれば、全体に対する割合は、各々10%、5%、2%とすることが出来る。したがって対象地点で予測モデルにより、各粒径に対する計算を行い、最後に合成を行えば、代表点の濃度と濃度分布等が求まる。ここでは0.001 mmの場合を除いて前二者に対する計算例のみ示すことにする。

5.1. モデルⅠ (d=0.1 mm)

計算を行うには以下の諸条件を決定する必要がある。すなわち、i) 代表量 w_b , U_b , k_b , ii) 拡散係数, iii) 汚濁の発生量と発生方法, iv) 計算領域に対応した Δx^* , Δz^* , Δt^* の選択。

まず最初に項目 i) に関して鉛直方向の代表長さ k_b としては $k_b = 1m$ とおく。また海底々質は $d_b = 0.1 mm$ である。したがって沈降速度は図-2によれば、 $w_b = 10 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$ となる。更に代表速度としては $U_b = 1 \text{ cm/s}$ とおく。次に項目 ii) のうち k_b は文献(4)によれば、水深30m程度の海域では約 $1.0 \sim 10 \text{ cm}^2/\text{s}$ の値を持つことから、計算では $k_b = 2, 10 \text{ cm}^2/\text{s}$ とする。このとき無次元拡散係数は $\alpha = 0.02, 0.1$ とする。

一方、 k_b に関しては長さのスケールを Y とすれば、一般に、

$$k_b = P Y^{4/3} \text{ (cm}^2/\text{sec)} \quad (23)$$

の関係があるが、樋口⁵⁾らは瀬戸内海の水島灘で $P = 0.02$ という値を得ている。ここで問題とする海域においても式(23)の関係が成立するものとし、代表スケールを $Y = 100 m$ とおけば、 $k_b = 0.43 \text{ (cm}^2/\text{sec)}$ 、 $Y = 500 m$ とすれば、 $k_b = 3.68 \text{ cm}^2/\text{s}$ となる。無次元表示をすれば、 $\beta = 43, 368$ である。最後に k_b については一

応 k_b と同じ値を持つと仮定する。次に項目 iii) のうち、汚濁発生量と模型実験と現地観測結果を用いて次のように定める。まず、グラブ掘削は $20 m^3$ の大型グラブを用いることとし、含水土分が100%とすれば、土砂の体積は $V_s = 5.47 m^3$ となる。サイクルタイムが3分とし、またグラブから発生する漏水量が全量の5%程度とすれば、0.1 mmの土砂の占める割合は10%であるから、単位時間当りの発生量は $4.03 \times 10^{-4} \text{ tons}$ となる。したがって単位時間当りの汚濁発生量は汚濁の拡がる深さを h_s とすれば、式(24)のようになる。

$$q = 4.03 \times 10^{-2} / (h_s \Delta x \Delta y) \quad (\text{ppm/sec)} \quad (24)$$

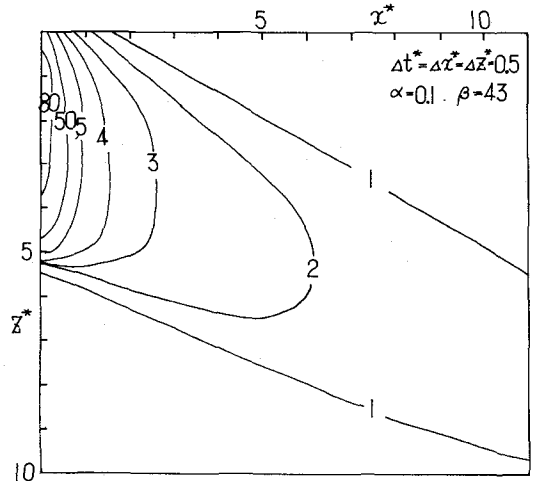


図-13 鉛直拡散(モデルⅠ)

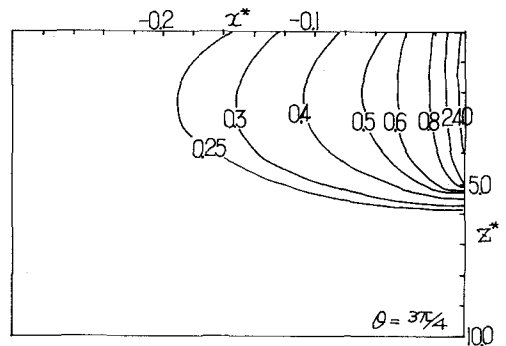
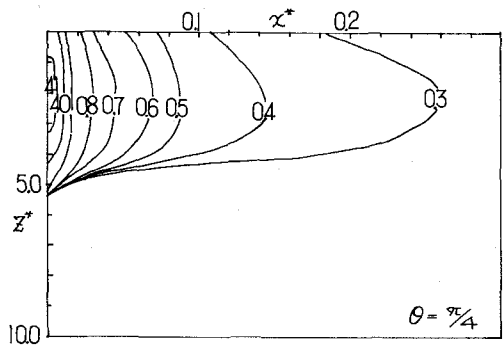


図-14 鉛直拡散(モデルⅡ)

次に汚濁の発生方法については、現地観測によれば、汚濁の発生は水表面近くで最大の発生があり、底部での発生は極めて小さいと考えられる。したがってここでは h_0 としては、一応代表的に 5 m としてみる。

最後に項目 IV) を決める。 w_0 , k_z , U_0 が既知であるから、各変数の次元量と無次元量の比は、

$$t = 10^2 t^*, \quad x = 10^2 x^*, \quad z = z^* \quad (25)$$

となる。計算領域として次の領域を選ぶ。

$$0 \leq z \leq 30 \text{ (m)}, \quad 0 \leq t \leq 3000 \text{ (sec)}, \quad 0 \leq x \leq 3000 \text{ (m)} \quad (26)$$

式(25)を(26)へ代入し(整理すれば、 x^* , z^* , t^* の変域が定まる。

以上の条件によって計算を行った例が図-13である。ただしこれは $k_z = 10 \text{ cm}^2/\text{sec}$ に対応する。濃度は流下方向に急激に減衰し、断面内で濃度が最大の深さは流下方向に次第に増加する。代表地点として $x^* = 5$ ($x = 500 \text{ m}$) をとれば、最大濃度は約 2 ppm となっている。

5.2 モデル II ($d = 0.01 \text{ mm}$)

この場合の予測法はモデル a と b があることはすでに述べたが、モデル II-a の計算法は4節で述べた発生源での扱いを別にすれば、方法自体はそれほど問題にはならないと考えられるので、ここでは省略し、モデル II-b についてのみ述べる。

実際に計算を行うに当ってはモデル I と同様に条件 i) ~ iv) を決めなければならぬ。大部分の値はモデル I と同様でよいが、粒径は $d = 0.01 \text{ mm}$ であり、したがって沈降速度は $w_0 = 1.0 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ となる。汚濁発生量については 0.01 mm の点める割合が 5% とすれば、単位時間当りの発生量は、

$$q = 2.02 \times 10^2 / (\text{hr} \Delta x \Delta z) \quad (\text{ppm/sec}) \quad (26)$$

となる。 w_0 , k_z , U_0 は既知であるから各変数の次元量と無次元量の比は次のようになる。

$$t = 10^4 t^*, \quad x = 10^4 x^*, \quad z = z^* \quad (27)$$

計算領域としては次の領域を選択する。

$$0 \leq z \leq 30 \text{ (m)}, \quad 0 \leq t \leq 3.0 \times 10^4 \text{ (sec)}, \quad 0 \leq x \leq 16,000 \text{ (m)} \quad (28)$$

ここで、図-14は流速を $U = U_0 \cos \omega t$ と与えたときの $\omega t = \pi$ と 3π に対応した時刻の濃度分布の一例を示している。濃度分布は周期的に変化し、流れとともに移動しつつ拡散する。代表地点として $x^* = 0.1$ ($x = 1000 \text{ m}$) を選べば代表的濃度は高々 0.5 ppm 程度になっている。

6. まとめ

海中工事に伴う汚濁の拡散予測に関しては、代表的粒径の沈降時間と潮汐の代表時間との相対的關係から三つの異なるモデルを作成する必要があり、これらのモデルを使って計算を行えば混合粒径に対する汚濁の分布の計算が可能になることが明らかになった。また定常流の場合について模型実験を行い、濃度分布を測定することによりモデル作成に伴う相似性の仮定が満足されることを実験的に明らかにした。しかしながら実際の計算に際しては拡散係数や発生量の算定等多くの問題が残っており、これらの問題を更に検討する必要がある。

謝辞：本研究を行うに当り東北大学の首藤伸夫教授には実験に関し多くの助言をいただいたことを感謝致します。

参考文献

- 1) 首藤伸夫・橋本宏・宇多高明・伊沢孝吉：グraubodenseeにともなう汚濁工場の生産について，第7回海洋汚染シンポジウム講演集，pp. 50~55，1976。
- 2) 白石英彦・大西亮一：潮流による底質の浮き上りおよび汚濁工場の拡散・拡散方程式の数値計算を用いた検討一，第23回海洋工学講演会論文集，pp. 189~194，1976。
- 3) 村上健：非定常拡散方程式の数値計算方法，第19回海洋工学講演会論文集，pp. 265~270，1972。

4) 海洋物理 I, 海洋科学基礎講座, pp. 372 ~ 373.

5) 樋口明生・杉本隆成: 潮流による拡散の水理模型実験について(Ⅲ) 京都大学防災研究所年報第 12 号-B,
pp. 633 ~ 644, 1969.