

土砂直投工により発生する濁りの挙動特性 に関する数値解析

NUMERICAL SIMULATION ON CHARACTERISTICS OF TURBIDITY TRANSPORT GENERATED IN DIRECT DUMPING OF SOIL

玉井昌宏¹・村岡浩爾²

Masahiro TAMAI and Kohji MURAOKA

¹正会員 工博 大阪大学助教授 工学部土木工学科 (〒565 吹田市山田丘2-1)

²正会員 工博 大阪大学教授 工学部土木工学科 (同 上)

A silt curtain is commonly used in a reclamation work to reduce outflow of turbidity from construction area. However it's quite difficult to get an appropriate drawing plan of the curtain since there is little information about a series of real phenomena which occurs under the sea, with the exception of some laboratory experiments with small scale in which we can't remove scale effect. In this study, we carried out two-dimensional numerical simulation with a scale of the construction site using the two-fluid model with the $k-\epsilon$ turbulence model to investigate turbidity transport generated by direct dumping of soil using a hopper barge with bottom doors. We briefly discussed characteristics of turbidity transport and effectiveness of the silt curtain.

KeyWords. turbidity, particle, two-phase flow, numerical simulation

1. はじめに

海域において埋め立て工事を行なう場合, 各種工法において発生した濁りの工事区域外への流出を抑制するために, 区域全体を取り囲むように汚濁防止幕が仮設されるのが一般的である。これまでの使用実績から, 防止幕の有効性については実証されているものと判断できるだろう。しかしながら, 基礎的な研究は散見されるものの^{1),2),3)}, 展張や配置計画を策定するためのバックグラウンドとなる知見は意外に少ない。

このことを展張方法を例に挙げて説明しよう。防止幕は一枚で全水深にわたって展張されるのではなく, 水面から半水深付近までカバーする垂下式と水底から半水深付近までの自立式に分割され, 両者は水平方向に50~100m程度離して設置されるのが一般的である。このような展張形式を選択する理由は, 主として幕に作用する流体力を軽減させることにあるが, 濁りの流出抑制効果にとって最適かどうかは不明である。恐らく流体力(展張力)軽減と濁りの流出抑制効果向上の間にはトレードオフの関係があるものと推察されるが, こうした点についてはこれまでほとんど議論されていないのである。

汚濁防止幕の有効性に関する模型実験に行なうにし

ても, スケールの影響を除去することは不可能である。その一方で, 試験工事などの現地観測データ^{4),5)} も非常に少ない。精度高い数値予測手法を構築するためには, 高濃度混相流の乱流構造のモデル化など, 当面解決されそうにない課題が山積している。

類似した課題に対して個別要素法を基礎とした解析法等が提案されているものの⁶⁾, 室内実験との比較が行われている程度であり, 大規模な現地スケールへ適用された例は見られない。

汚濁防止幕による濁りの捕捉メカニズム, つまり, 潮流など周囲環境流動による輸送を抑制するののか, 土砂直投工によって生じる誘起流動場を抑制するののかといった問題, あるいは濁りの発生や拡がり機構等の問題について定性的な現象把握もほとんどなされていないのが現状である。

ここでは, 筆者らが粒子ブルーム流動解析に用いた2流体モデルを用いて, 現地スケールの土砂直投工による濁りの発生と拡がり過程に関する数値計算を実施する。誘起流動や濁りの規模や空間的な拡がりの目安を得ることにより, 汚濁防止幕が工事区域の数百メートル外側に設置されること等の従来の展張方式を勘案して, 汚濁流出抑制機構に当りをつけようというのが本研究の趣旨である。

表-1 計算条件 (投下条件)

CASE	1	2	3	4	5
$Q(\text{m}^3)$	3000	3000	3000	2500	3500
$q(\text{m}^2)$	60	60	60	50	70
$t_D(\text{s})$	10	5	20	10	10
$U_D(\text{m/s})$	1.5	3.0	0.75	1.25	1.75

表-2 S S総発生量⁴⁾

ケース	2	3	4	5
$m(\text{kg})$	5,040	14,990	10,910	9,230
	8,680	11,310	24,090	11,990
$Q(\text{m}^3)$	3,065	3,010	3,354	3,264
$m/Q(\text{kg/m}^3)$	1.6	5.0	3.3	2.8
	2.8	3.8	7.2	3.7
$ra \cdot 10^3$	0.62	1.9	1.2	1.1
	1.1	1.4	2.7	1.4

2. 数値解析の概要

(1) 基本的な考え方

数値計算を実行するにあたり、一連の現象に対する基本的な考え方を以下に示す。

- 1) 濁りの移流、拡散は直投土砂により誘起される流動場のみに支配される。周囲環境の流動は考慮しない。
- 2) 投下される土砂は、投下点直下近傍に全て堆積する粗な土粒子と、投下点近傍では堆積しない細かい土粒子との2粒径砂とする。粗な粒子は誘起流動の形成のみに関与する。また、投下された細砂量がそのまま汚濁負荷量となって拡散する。
- 3) 粗粒子どうしの衝突、粗粒子の底面への衝突、堆積過程の誘起流動場への影響は無視する。
- 4) 誘起流動場の速度の規模が濁りの沈降速度より遥かに大きいことから、濁質の沈降の影響を無視する。また、堆積している濁質の(再)浮上は考慮しない。
- 5) 投下時に生じる水表面の変動は考慮しない。
- 6) 誘起流動場の計算において濁質成分の体積や密度効果はこれを無視し、濁りについては拡散方程式により解析する。
- 7) 底開バージの船長(50 m程度)に比較して、水深(20 m程度)が小さいので、船長方向に直角な断面内の鉛直2次元現象と考える。

(2) 計算モデルの概要

計算手法が具備すべき条件として、

- 1) 土砂直投工により生じる流れは粒子と流体の相対運動により誘起される。従って、粒子運動についても流体運動と同程度の精度で予測できること。つまり相別の運動方程式が必要であること。
 - 2) 対象流動が固体粒子を高濃度で含んでいることから、相排除の効果が考慮されていること。また、無数の粒子が無理なく取り扱えること。
 - 3) 粒子混入による乱流変動がなるべく考慮できること。
- の以上3つの項目を設定した。

混相流を対象とした数値予測手法は相の構成や全体の流動の規模等に応じて様々なレベルが考案されている。それらは、両相を一つの混合体とするモデル、分散相と連続相をそれぞれラグランジュとオイラー方程式により表示するモデル(DPモデル)、両相を相別にオイラー方程式により表示するモデル(2流体モデル)に大別できる。条件1)よりDPモデルあるいは2流体モデルの適用が妥当であろう。最近、当該分野に対してもDPモデルが適用される傾向にあるが、実工事のスケールで条件2)を満足することは難しいだろう。このような状況から、ここでは2流体モデルを利用する。

誘起流動場の解析に用いた基礎方程式は以下に示すとおり、両相の体積率 Φ_k の保存方程式、流体相粒子相の2方向流速成分の運動方程式 U_{ki} 、全相の体積率の合計に関する式の全7式である。

$$(\rho_k \Phi_k)_{,t} + (\rho_k \Phi_k U_{kj})_{,j} + (\rho_k \overline{\phi_k u_{kj}})_{,j} = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} & \underbrace{(\rho_k \Phi_k U_{ki})_{,t} + (\rho_k \overline{\phi_k u_{ki}})_{,t}}_{\text{時間項}} + \underbrace{(\rho_k \Phi_k U_{ki} U_{kj})_{,j}}_{\text{対流項}} \\ &= - \underbrace{\rho_k (\Phi_k \overline{u_{ki} u_{kj}} + U_{ki} \overline{\phi_k u_{kj}} + U_{kj} \overline{\phi_k u_{ki}})_{,j}}_{\text{乱流相関項}} \\ & - \underbrace{\rho_k (\phi_k \overline{u_{ki} u_{kj}})_{,j}}_{\text{乱流相関項}} - \underbrace{(\Phi_k P_{,i} + \overline{\phi_k p_{,i}})}_{\text{圧力項}} + \underbrace{\rho_k \Phi_k g_i}_{\text{重力項}} \\ & + \underbrace{\sum_{k'=1}^k F_k \{ \Phi_{k'i} (U_{k'i} - U_{ki}) + \overline{\phi_{k'} (u_{k'i} - u_{ki})} \}}_{\text{相間応力項}} \quad (2) \end{aligned}$$

$$\sum_{k=1}^k \Phi_k = 1 \quad (3)$$

ここに、 ρ_k :第 k 相の密度、 Φ_k : k 相の体積率、 U_{ki} : k 相の i 方向の流速成分、 P :圧力、 g_i : i 方向の重力加速度である。 $\sum_{k=1}^k$ は全相について合計すること、 k' は k 相以外の相であることを意味している。以下では $k=f, p$ はそれぞれ流体相と粒子相であるものとする。

(2) 式の相間応力項の F_k は次式のように与えられる。

$$F_k = 18Z\nu_f/d^2 \quad (4)$$

Z は 1 次から 2 次への抵抗則の遷移領域において、ストークス則を用いるための補正係数であり、次式のように表示される。

$$Z = \begin{cases} (1 + 0.15R_e)^{0.687} & (R_e \leq 1000) \\ 0.43R_e/24 & (R_e > 1000) \end{cases} \quad (5)$$

ここで、 R_e は粒子レイノルズ数であり、 $R_e = |\vec{U}_p - \vec{U}_f| d_p / \nu_f$ と定義される。 d_p : 粒径、 $\vec{U}_k$: k 相の流速ベクトル、 ν_f : 流体相の動粘性係数である。

各種乱流相関項の完結方法は、基本的には単相乱流に対して用いられているものと同様である。また、渦動粘性係数、拡散係数の導出には、Elghobashi et al.^{7),8)} の乱流モデルを用いる。固体粒子が高濃度で混入した場合の乱流変調に関しては基礎的なデータもなく、乱流モデルも開発されていない状況にある。ここでは低濃度の混相流に対して開発された同モデルをそのまま適用する。相関項の完結、乱流モデルの詳細については参考文献^{7),8)} を参照されたい。また、流動場の数値解法はIPSA^{8),9)} を用いた。

2 流体モデルでは相排除の効果が考慮されており、濁質成分は流体相中に含まれるので、濁質濃度 C の保存方程式は次式のようになる。

$$\begin{aligned} & (\Phi_f C)_{,t} + (\Phi_f U_{fj} C)_{,j} + (\Phi_f w_0 C)_{,z} \\ & = -C \overline{\phi_f u_{fj}} + U_{fj} \overline{\phi_f C} + \Phi_f \overline{u_{fj} C} \\ & \quad - \overline{\phi_f u_{fj} C} + w_0 \overline{\phi_f C} + q \end{aligned} \quad (6)$$

ここに、 C : 濁質濃度、 z : 鉛直座標 w_0 : 濁質の沈降速度、 q : 濁質負荷量である。各種乱流相関の完結方法は、(2) 式と同様である。本計算では、濁質成分と水流の相対運動を無視しており、濁質の拡散係数についても流体相の体積率 Φ_f のそれと同一であると仮定した。

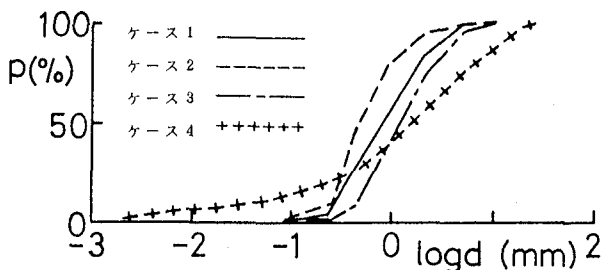


図-1 投下土砂の粒度分布

3. 計算領域と条件

(1) 計算領域

本計算では、汚濁防止幕の存在を考慮しないので、計算される現象は投下点を中心として左右対称となるは

ずである。ここでは、その右側半分について計算する。計算領域は、鉛直（水深）方向 20m、水平方向 160m の鉛直 2 次元断面である。関空二期工事程度の水深と工事区域から汚濁防止幕までの距離（数百 m 程度）を念頭に置いて計算領域を設定している。水平方向格子間隔は、投下点近傍から 0.5, 2.5, 10m と段階的に変化させている。鉛直方向格子間隔は 1.0m である。

(2) 計算条件

土砂投下条件を表-1 に示す。ここに、 $Q(\text{m}^3)$: 土砂投下総量、 $q(\text{m}^2)$: 単位長さ当たりの投下量、 t_D : 投下時間、 U_D : 土砂流入速度である。底開バージの諸元は様々であり、従って、その投下条件もまちまちである。投下条件～土砂堆積形状、投下条件～濁りの拡散過程等の関連といった課題についてはあまり検討されておらず、検討結果をバージ諸元や投下方法にフィードバックするような状況にはない。船長 (L) は 50m、底扉の開口幅 (W) は 4m、土砂空隙率 (Φ_D) は 0.4 で一定とした。CASE1 は、最も一般的と考えられる条件であり、積載土砂量を空隙込みで 3,000 m^3 とした。投下時間は底扉の開口幅、開口時間に依存するが、既往の試験工事の例を参照して、10s としている。但し、投下時間は砂質や湿度で種々変化するようで、湿潤な浚渫土やヘドロ混じりのものは投下時間が長くなる。表中の単位奥行き当たり投下量は $q = Q/L$ 、投下速度は、 $U_D = q/W/t_D$ により計算される。

図-1 に過去の試験工事において用いられた土砂の粒度分布を示す、図中の「ケース」は参考文献⁴⁾ の試験ケースをそのまま表示したものであり、本研究の計算条件とは無関係である。このことは後述する表-2 についても同様である。現実の投下土砂は滑らかな粒度分布を有するが、ここでは既述のとおり、本計算では堆積土砂と濁りの成分の 2 粒径に代表させる。土砂の平均粒径は概ね 1mm であり、粗な粒子の代表粒径として $d_p = 1\text{mm}$ を採用した。土粒子密度は $\rho_p = 2.65\text{g/cm}^3$ 、最終沈降速度は $W_p = 15.6\text{cm/s}$ である。

表-2 は古土井⁷⁾ による試験工事において観測された濁りの発生総量である。ここに、 $m(\text{kg})$: 濁質総発生量、 $Q(\text{m}^3)$: 投下総量、 $m/Q(\text{kg/m}^3)$: 濁りの発生原単位、 ra : 濁質成分の体積率である。但し、 $ra = m/Q/\rho_t$ 、 $\rho_t(\text{kg/m}^3)$: 濁りの密度である。この発生総量は投下点から 50 (上段) と 100m (下段) 離れた地点で観測された濃度フラックスを時間積分することにより求められたものである。この値には、投下土砂に含まれる濁りと誘起流動により海底から巻き上げられる濁りの両者が含まれることになる。つまり、投下点から 50 あるいは 100m の範囲内の海底面での濁りの収支を考慮したもの

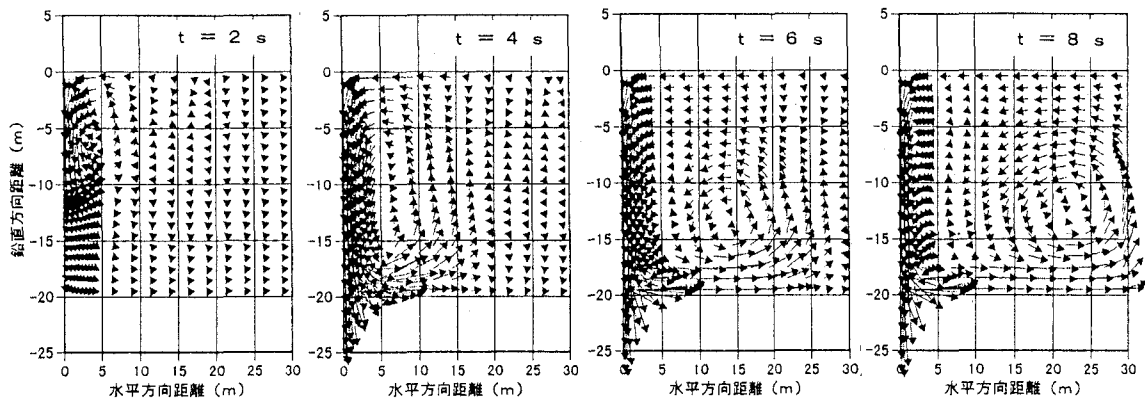


図-2 誘起流動場の形成過程

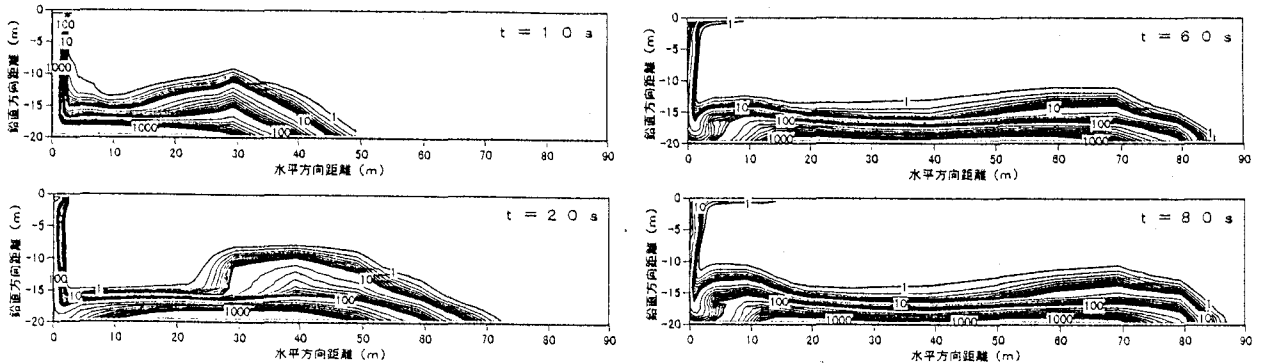


図-3 濁りの濃度分布の時間変化

になっている。この濁りの発生総量については2通りの利用方法が考えられよう。すなわち、まず第一は海底面での濁りの収支をできる限り正確に計算して、計算結果の正当性を判断するのに利用することである。第2は海底面での濁りの収支を考慮せず、発生総量に等しい濁りの挙動について計算することである。前者の方法を選択することが望ましいことはいうまでもない。しかし、既述のとおり高濃度混相流の乱流モデルの開発状況等から判断して、濁りの収支を精度高く計算できるような状況にはない。そこで、ここでは後者の考え方を選択した。表中に示したとおり、砂質により多少異なるが、投下土砂量に対する濁りの体積率を計算すると概ね 10^{-3} 程度である。本計算では体積率を0.001で一定とした。

(3) 境界条件

粒子と流体の境界条件については次のよう設定している。

a) 中心軸境界

$$\Phi_{f,x}, \Phi_{p,x}, U_{f,x}, U_{p,x}, V_{f,x}, V_{p,x}, k_{f,x}, \epsilon_{f,x}, C_{,x} = 0.0$$

b) 水面境界

$$\Phi_{f,z}, \Phi_{p,z}, U_{f,z}, U_{p,z}, V_{f,z}, V_{p,z}, k_{f,z}, \epsilon_{f,z}, C_{,z} = 0.0$$

c) 水底境界

$$\Phi_{f,z}, \Phi_{p,z}, U_{f,z}, U_{p,z}, V_{f,z}, V_{p,z}, k_{f,z}, \epsilon_{f,z}, C_{,z} = 0.0$$

d) 遠方境界

$\Phi_{f,x}, \Phi_{p,x}, U_{f,x}, U_{p,x}, V_{f,x}, V_{p,x}, k_{f,x}, \epsilon_{f,x}, C_{,x} = 0.0$
ここで、 U, V ：それぞれ水平方向速度と鉛直方向速度、 x, z ：投下点を原点とした水平方向距離と鉛直方向距離である。

4. 計算結果

(1) 誘起流動場の形成過程（～10s）

図-2に誘起流動場の形成過程（～10s）の流体流動場のベクトル図を示す。投下点下方において下向きの流動が形成され、この流動が周囲流動を連行しながら成長していることがわかる（ $t=2s$ ）。強い誘起流動が水底に到達すると、投下点から水平方向に15m、水深13m付近に中心をもつ循環が形成される（ $t=6s$ ）。循環の中心は投下点から離れるように徐々に移動していくことがわかる（ $t=8s$ ）。この流動は投下が終了すると急速に減衰し、投下終了後10s程度で明瞭な流動構造は消失するようである。鉛直方向のベクトルの大きさは、6～7m程度である。

(2) 濁水塊の移動過程（10s～）

図-3にCASE1の濁質濃度分布の時間変化を示す。濃度はppm(mg/L)表示となっている。 $t=10s$ では循環流れの影響により水平方向とともに鉛直方向にも濃度分布が広がっている。しかしながら、循環の影響が弱まっ

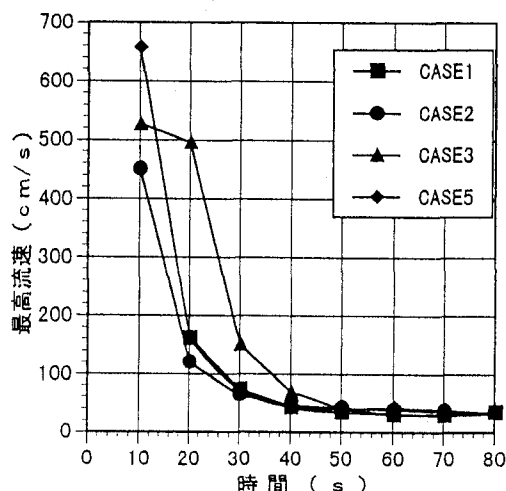


図-4 最大水平速度の減衰

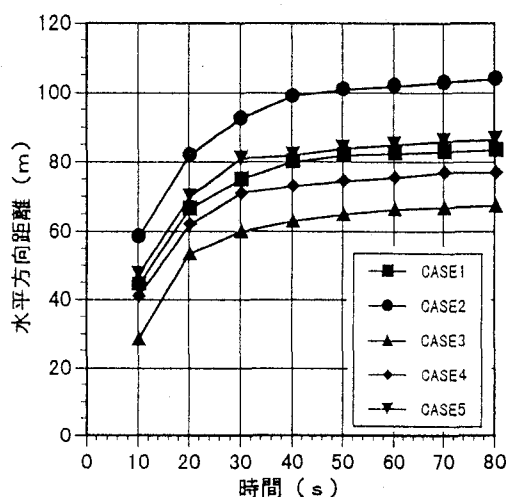


図-5 10ppm ラインの水平方向到達位置

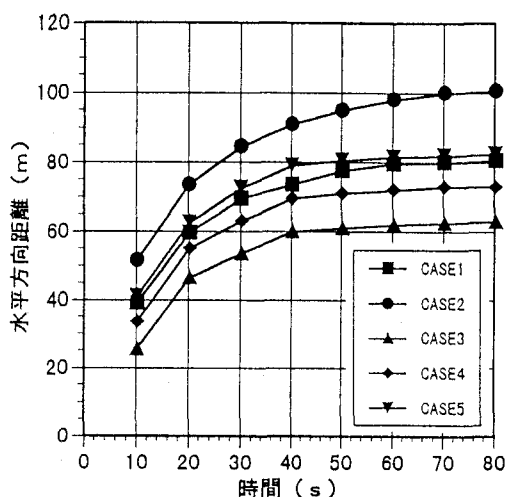


図-6 100ppm ラインの水平方向到達位置

ている $t > 20s$ では、鉛直方向への成長は弱まり、もっぱら水平方向への拡がりが卓越している。こうした鉛直方向への輸送は、投下時間の短いCASE2において最も顕著に現れた。いずれのケースについても、濁水塊の最終的は形状 ($t = 60 \sim 80s$) は中央部が若干薄い長細い形状となっている。筆者らの行った実験¹⁰⁾では、濁

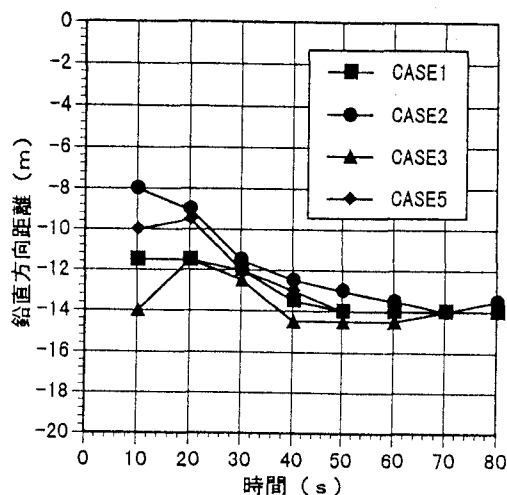


図-7 10ppm ラインの鉛直方向到達位置

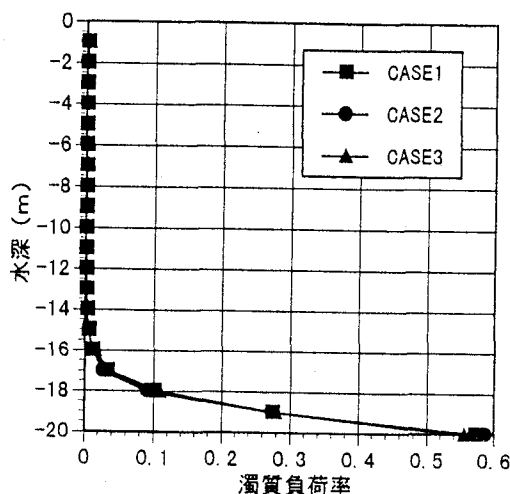


図-8 濁質量の鉛直分布

りによる密度効果が顕著でない場合には、循環により水表面にまで濁りが拡がったのに対して、今回の数値計算はそのような傾向は現れなかった。

図-4は計算領域内の最大水平流速の時間変化を示している。CASE1, CASE5では $t = 10s$ 、CASE2では $t = 5s$ 、またCASE3では $t = 20s$ において投下が終了している。 $t = 10s$ における最大流速の規模は $4 \sim 7m/s$ に達しているが、その後急速に流速場は減衰する。投下後50s程度になると $30cm/s$ 程度の流速になり、周囲環境流動の規模との差異がなくなる。つまり、投下後1分程度経過すると、周囲流動による移流や拡散が次第に顕著になる。環境アセスメントにおいて、濁りの数値計算は潮流場など周囲環境流動を対象に実施されるのが通例となっているようであるが、数10分や数時間以上の現象をシミュレートするのであれば、誘起流動場の影響は考慮しなくて良いと言える。但し、その際には本研究のような計算を別途実施して、計算開始の初期濃度を求める必要があると考えられる。

図-5と図-6はそれぞれ10ppmと100ppmの等濃度線の水平方向到達位置の時間変化を、計算した全ケー

スについて併せて図示している。図-5、図-6のグラフの勾配から、いずれのケースについても、 $t=10\sim 20s$ にかけて等濃度線の移動速度は概ね $2m/s$ 程度である。その後、減速して $t > 50s$ では濃度分布はほとんど延伸していない。CASE1,CASE2,CASE3を比較すると、同一投下量の場合、投下時間が短くなるほど水平方向の到達距離が大きくなることがわかる。つまり、単位時間当たりの投下量を小さくすることは濁りの水平方向の拡がりを抑制する効果がある。土砂投下点の近くに汚濁防止幕を設置しなければならない場合には、誘起流動場の拡がりを抑制するためには、単位時間当たりの投下量を減少させることが有効である。また、現実の土砂投下時間は $10s$ 程度であることから、誘起流動による濁りの水平方向拡散範囲は投下点から $100m$ 以内であると判断される。汚濁防止幕が工事区域より $200m$ 程度外側に設置させることから、誘起流動の影響は汚濁防止幕までは及ばないと考えてよい。従って、現状の使用方法では、周囲環境流動による濁りの移流・拡散との関連で濁りの流出抑制メカニズムは議論されるべきである。

図-7は $10ppm$ の等濃度線の鉛直方向の到達高さの時間変化を示している。但し、底開ページ直下付近では水面まで高濃度領域が存在するが、この図では、この付近の濃度分布を除外している。 $t > 20s$ では時間とともに等濃度線は下降している。誘起流動場の影響が十分弱まっていると考えられる $t > 50s$ では、 $10ppm$ 以上の濃度領域は水底から $6m$ の範囲に限定される。また、ここでは図を掲載しなかったが、 $100ppm$ についても同様の図を作成した結果、 $100ppm$ 以上の濃度領域は水底から高さ $4m$ の範囲内であることがわかった。

図-8は濁質濃度の鉛直分布を示している。同図は各ケースの $t = 80s$ における計算結果を用いて、各高さの濃度を水平方向に積分することによって求めた。投下時間により若干の差異は認められるが、濃度分布は概ね様な形状となっている。最下層 $1m$ 内に濁りの発生量の約 55% 、水底から $2m$ までに 80% 以上が含まれることがわかる。濁りが垂下式と自立式の防止幕周辺でどのような挙動特性を呈するのかは別途検討が必要であるが、濁りの鉛直分布から自立式が存在しなければ汚濁流出抑制機構は期待できないと推察される。

5. まとめ

汚濁拡散防止幕の濁りの流出抑制機構について、基本的な現象理解が進んでいないことに鑑み、土砂直投工により生じる誘起流動場とそれによる濁りの移流拡散過程を現地スケールの数値計算により検討した。但

し、既述のとおり、本計算は種々の問題点を含んでいると考えられる。従って、今回の計算結果は、一連の現象に対する一つの粗い近似値であると考えている。主要な計算結果を以下に要約する。

1) 土砂が鉛直落下する際に誘起される循環流れによって濁りの初期拡散過程は支配される。但し、土砂投下終了後循環流れは急速に減衰する。投下後 1 分程度経過すると、誘起流動場の流速の規模は高々 $30cm/s$ となり、周囲流動の移流拡散の影響を受けるようになる。

2) $10ppm$ 以上の濃度分布の拡がりを基準にすれば、濁りの水平方向拡散範囲は投下点から水平方向に高々 $100m$ 、水底から鉛直方向に約 $6m$ 程度の範囲である。また、濁りの発生総量のうち約 80% は水底から高さ $2m$ の範囲内に存在する。

3) 濁りの水平方向の拡がり範囲から判断して、投下点から数百 m 以上離れて設置された汚濁防止幕は、周囲環境流動により輸送される濁りの流出を抑制することになる。一方、水底付近に汚濁が集中することから、自立式の防止幕が汚濁流出抑制に有効に作用していると判断される。

4) 誘起流動場の拡がりを抑制するためには、単位時間当たりの投下量を減少させることが有効であると考えられる。

参考文献

- 1) 小田一紀・重松孝昌・濱崎佳尚・山瀬晴義：汚濁拡散防止膜の効果に関する研究，海岸工学論文集，第37巻，pp.843-847，1990。
- 2) 小田一紀・重松孝昌・小林徹雄・岡本寛・山瀬晴義：垂下膜・自立膜の近傍における沈降物質の拡散に関する鉛直2次元実験，海岸工学論文集，第40巻，pp.976-980，1993。
- 3) 小田一紀・重松孝昌・野口達矢・武田将英：汚濁防止膜周辺の物質拡散の高精度予測手法に関する研究，海岸工学論文集，第43巻，pp.1151-1155，1996。
- 4) 古土井光昭：港湾工事における濁りの挙動に関する研究，大阪大学学位論文，1989。
- 5) 鶴谷広一・村上和男・中川康之・安井章雄：汚濁防止膜周辺の土砂拡散機構に関する現地観測，海岸工学論文集，第43巻，pp.1146-1150，1996。
- 6) 灘岡和夫・二瓶泰雄・八木宏：新しい固相モデルに基づく固体-流体混相乱流LESモデルの開発，土木学会論文集，No.533/II-34，pp.61-74，1996。
- 7) S.E.Elghobashi and W.T.Abou-Arab：A two-equation turbulence model for two-phase Flow，*Phys. Fluids*，No.26(4)，pp.931-938，1983。
- 8) 玉井昌宏・村岡浩爾・下屋陽八郎：2流体モデルを基礎とした $k-\epsilon$ 乱流モデルによる粒子プルームの数値計算，海岸工学論文集，第40巻，pp.1071-1075，1993。
- 9) D.B.Spalding：Numerical computation of multi-phase fluid flow and heat transfer，*Recent Advance in Numerical Methods in Fluids* edited by Talor and Morgan，Vol.1，Chap.5，1978。
- 10) 玉井昌宏・村岡浩爾・室田明・町田博紀：土砂直投工における濁りの初期拡散過程に関する研究，土木学会論文集，No.515/II-31，pp.77-86，1995。

(1997.9.30受付)