

底泥塊の沈降形態と拡散係数の評価法

矢内 栄二*・加藤 謙**

1. はじめに

航路や泊地の維持のために浚渫された底泥の処理方法の一つとして、環境に悪影響をおよぼさないと考えられる海域に底泥を輸送する方法がある。この場合、環境アセスメントとして周辺の汚濁拡散予測が行われる例が多い。この輸送方法として底開式バージ（底の開閉する土運船）やスリット式バージ（ヒンジを中心に船体が2分割する土運船）が一般に使用されるが、底泥塊の沈降挙動についてはほとんど知られていない。そのため、周辺の濁り予測を行う際に、設定すべき拡散係数や沈降速度等の条件について、これまでは砂粒子と同じ扱いがなされてきている。しかし、実際には周辺の濁りは土砂投下の場合よりも少ない場合が多く、精度の高い汚濁拡散予測を行うためには底泥塊の沈降過程について知ることが必要である。特に、拡散係数は濁度予測の上で重要であるが、底泥塊の含水比によって泥塊特性が大きく変化するため、この変化と拡散係数の関係について知る必要がある。拡散係数について検討する場合、流体の乱れの強さに着目する微視的な方法があるが、底泥粒子の粘着性を評価することは難しく、大スケールの海洋の場では現実的とはいえない。それよりも、現在の環境アセスメントで使用されている解析モデルあるいはシミュレーションモデルで設定した拡散係数に対して、どの程度の補正を行うかを知ることの方が利用上有効な方法である。

本研究では、底泥投下の現場における観測結果をもとに底泥塊の沈降形態について検討し、あわせて拡散係数の評価方法についても考察を行った。

2. 現地観測

(1) 現地観測の方法

現地観測は太平洋岸の水深 41 m の A 地点において行った。泊地と航路維持のためにグラブ船により浚渫された底泥が、500~600 m³ 積みの底開バージまたはスリットバージによって、A 地点に運搬・投下されている。底

泥は表-1 に示すように中央粒径が 0.7~2.0 μm 程度の小さなもので、有機物の含有量も多い。観測は図-1 に示すように、投下点を中心とした半径 700 m の円内での濁度測定と同時に、水温、塩分、流況について行った。測定器は、FN-5 型濁度計 1 台と YPC-1 型濁度計 5 台、EIL サリノメータ 5 台、自記式アーンデラー流速計 3 台を使用した。濁度と水温・塩分の測定間隔は、鉛直方向には海面下から 1 m より 1 m ビッチで行い、水平方向には 50 m~100 m 間隔に同時観測を行った。流速測定は図-2 に示すように上層（-3 m）・中層（-20 m）・下層（-40 m）に流速計を配置して定点観測を行った。

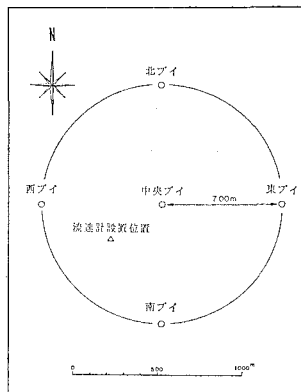


図-1 観測範囲

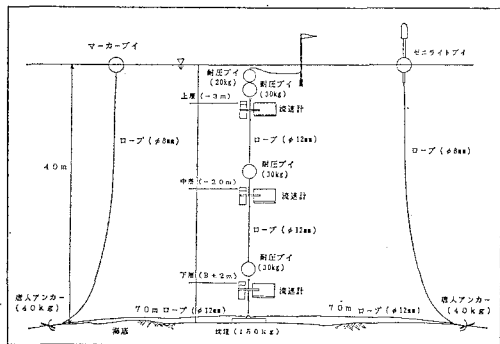


図-2 流速計設置方法

* 正会員 工修 東亜建設工業(株)技術研究所

** 東亜建設工業(株)船舶機械部

表-1 底泥の土質特性

含水比 (%)	142~280
中央粒径 (μm)	0.7~2.0
強熱減量 (%)	10.4~15.1
単位体積重量 (tf/m^3)	1.14~1.32

予備調査として、底泥塊投下前の濁度や水温・塩分などの分布特性について測定を行った。投下時に発生する拡散雲の拡がり状況についてはカイトフォトグラフィによった。カイトフォトグラフィとは $3\text{m} \times 4\text{m}$ のアルミ製支柱のたこのたこ糸部分にビデオカメラと 35mm カメラを取付け、船上からの無線操作により空中撮影を行うものである。

(2) 現地観測結果

図-3 に現地観測の2日前に行った予備調査時の水温と塩分の鉛直分布を示す。水温は表層で 17°C 程度で、水深とともに低下している。塩分濃度の場合は下層ほど上昇しているが、その傾向も水温と同様に直線的であり、当該海域において温度・密度いずれの躍層も発達していないことが認められる。

図-4 は観測期間中(1988年7月7日~7月13日)の流速測定結果を示したものである。投下地点の上層での最大流速は N-S 方向に対して $20\text{cm}/\text{sec}$ 程度であった。

図-5 (a)~(c) は異なる3回の底泥塊投下直後の濁度(バックグランド濃度除去後)の鉛直分布である。

図-5 (a) は、グラフから浚渫したときの固形状がそのまま残るような硬い底泥塊の場合である。表層に投下時の攪乱によるわずかな濁りが見られるものの、水深 32m 付近までは全く濁りが認められず、それ以下で大きな濁りが発生している。これは底泥塊が一体となって沈降し海底に衝突したときの砂の巻き上げと思われる。

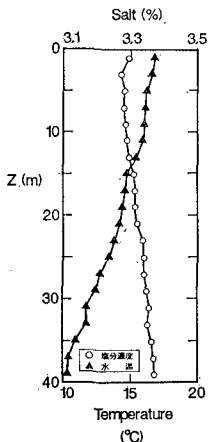
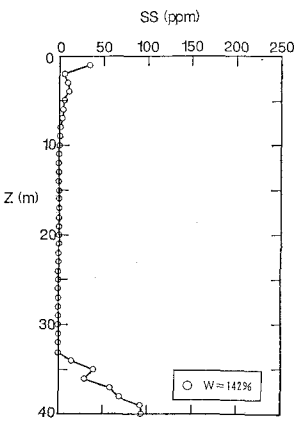
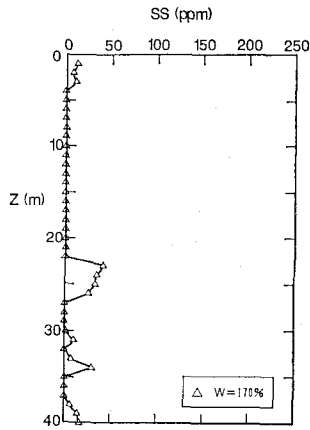


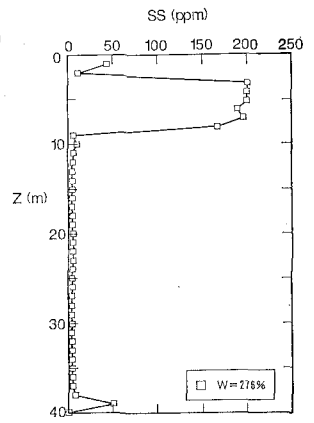
図-3 水温と塩分の鉛直分布



(a) $W=142\%$



(b) $W=170\%$



(c) $W=276\%$

図-5 濁度の鉛直分布

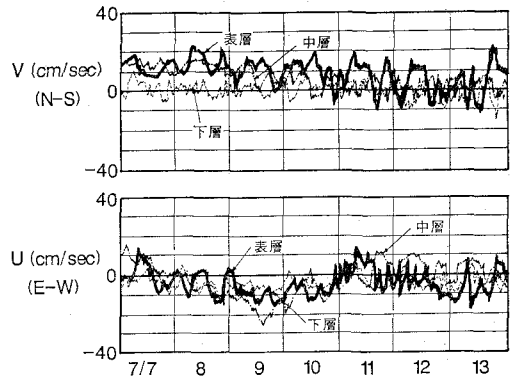


図-4 流速測定結果の一例

図-5 (b) は (a) より軟らかい場合の結果で、水深 22m まではほとんど濁りが検出されなかったが、水深 $23\text{m} \sim 27\text{m}$ の間で若干の濁りが発生している。これは (a) と同様に途中までは一体として落下した底泥が、水深 23m で分解されたときに発生した濁りが観測されたものと見られる。

図-5 (c) は最も底泥の流動性が高い場合で、水深 $2\text{m} \sim 9\text{m}$ の間に 200ppm を越える大きな濁りが発生しているものの、それ以下ではほとんど濁りは見られていない。

3. 室内実験

現地観測の結果から、底泥塊の含水比によって拡散状況が変化することがわかった。そこで、底泥の含水比を変化させて、拡散状況の違いについて室内実験により検討した。

(1) 実験装置と方法

実験は幅 $0.5\text{m} \times$ 長さ $2.5\text{m} \times$ 高さ 1.0m の鋼製水槽

を用いて行った。底泥塊は 37 mm×29 mm×20 mm の直方体容器に入れ、容器底面を水面に接触させ下部を開放して沈降させた。底泥は 3 種類の浚渫泥を用い、含水比を 170%～700%まで変化させた。底泥のせん断強度はせん断強度測定装置(矢内・五明, 1988)を使用して測定した。拡散雲の測定はビデオカメラを用い、拡がり幅は次に示す式 (1) を用いて拡散係数として換算した。

$$K = \frac{r_i^2 - r_{i-1}^2}{4(t_i - t_{i-1})} \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 r_i, r_{i-1} : 時刻 t_i, t_{i-1} における拡散雲を、それと同面積の円に換算したときの円の半径である。

(2) 沈降形態

実験の結果を表-2 に示す。各ケースの結果は 1～3 回の平均値をとったものである。表中の沈降速度は、最も含水比の低い場合についてのみ測定し、拡散係数比はそれぞれの底泥の最大含水比のときの拡散係数に対する比をとった。

実験の結果から、底泥塊の沈降形態には図-6 に示すような 3 種類のパターンがあることがわかった。底泥の含水比が小さい(せん断強度が大きい)場合には、底泥塊が一体となって沈降し海底に衝突する。これを泥塊沈降型と呼ぶことにする。沈降過程での濁りの拡散はほとんど見られない。次に、含水比を上げて底泥のせん断強度を減少させると、底泥塊は沈降途中で分割していくつかの大きな塊りとなって沈降するようになる。この時に発生する濁りは分割の個数の増加につれて大きくなる。これを多塊拡散型と呼ぶことにする。最後に、底泥のせん断強度がほとんどない高含水比の流体状になると、底泥塊は投下と同時に拡散する。これを分離拡散型と呼ぶことにする。

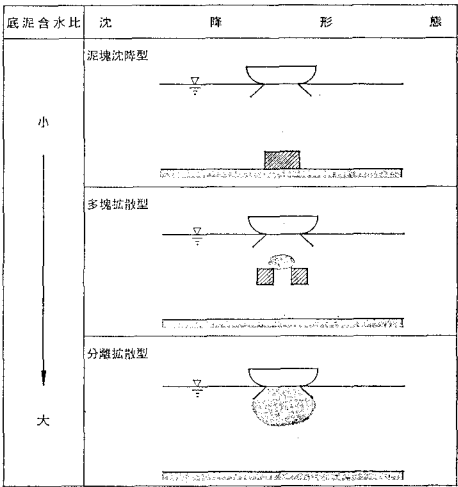


図-6 沈 降 形 態

表-2 実 験 結 果

底泥	含水比 $W(\%)$	せん断強度 τ_{mud} (gf/cm ²)	拡散係数 K (cm ² /sec)	拡散係数比 α_D	沈降速度 W_{f0} (cm/sec)
A	177	8.78	0	0	26.3
	190	4.14	0	0	
	258	1.25	0	0	
	344	0.171	0.195	0.024	
	394	0.064	1.65	0.203	
	486	0.027	6.04	0.742	
	560	0.012	7.78	0.956	
	633	0.006	8.03	1.0	
B	168	12.0	0	0	27.0
	194	3.73	0	0	
	320	0.264	0	0	
	375	0.103	0.768	0.179	
	429	0.053	2.53	0.591	
	490	0.025	4.69	1.094	
	544	0.014	4.08	0.952	
	681	0.004	4.28	1.0	
C	216	4.08	0	0	27.8
	232	0.385	0	0	
	282	0.603	0	0	
	322	0.315	0	0	
	368	0.122	0	0	
	423	0.057	7.37	0.734	
	482	0.028	8.17	0.814	
	560	0.012	10.04	1.0	

(3) 沈降形態の分類パラメータ

以上のように、底泥塊の沈降形態には 3 種類のパターンがあることがわかったが、底泥投下にあたってどのような力学的パラメータによって分類されるかを知る必要がある。このパラメータとしては、底泥塊の投下時の条件から算出されることが実用的であることから、投下直後の底泥の条件によって算定することを試みる。

底泥塊の沈降速度を w_{f0} とすると、底泥塊は密度 ρ_0 の流体から $\rho_0 w_{f0}^2$ の抵抗力を受ける。一方、底泥はそれ自身がせん断強度 τ_{mud} で外力に対して抵抗しており、二つの力の不平衡によって底泥塊の分散が生ずると考えられる。そこで、式 (2) に示す流体抵抗力と底泥のせん断力の比(無次元沈降指数とよぶことにする)をパラメータとして導入する。

$$E_* = \frac{\rho_0 w_{f0}^2}{\tau_{mud}} \dots\dots\dots (2)$$

汚濁拡散計算を行う場合拡散係数が重要であるが、海域での土砂の拡散にどの程度の拡散係数を使用すべきかについては、種々のモデルがあるため明確な指標がな

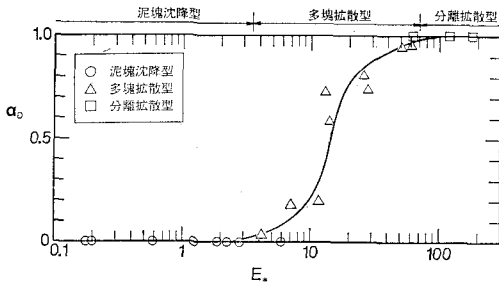


図-7 沈降形態の領域区分

い。しかし、実際にはそれぞれのモデルを使用するにあたり、経験的あるいはアセスメントマニュアル等で定められた値が使われており、底泥の場合にもこの拡散係数を適用することが実用上有利である。これらモデルの拡散係数は単一粒子に対して得られたものであるから、底泥の場合には含水比の大きな分離拡散型のときに相当する。そこで、従来からの拡散係数を使用するためには、含水比の変化に対する各沈降形態ごとの拡散係数を分離拡散型の拡散係数に対する比で表せばよい。この比を、Dispersion Factor α_D とし、

$$\alpha_D = K/K_{max} \quad \dots\dots\dots (3)$$

で表現することにする。ここに、 K ：各沈降形態ごとの拡散係数、 K_{max} ：分離拡散型のときの拡散係数である。

実験結果を E_* と α_D で表したものが図-7 である。ここで、 w_{f0} は各底泥の最小含水比のときの沈降速度を使用している。

沈降形態はそれぞれ、

$$\begin{aligned} E_* \leq 3.5 & : \text{泥塊沈降型} \\ 3.5 < E_* \leq 70 & : \text{多塊拡散型} \dots\dots\dots (4) \\ 70 < E_* & : \text{分離拡散型} \end{aligned}$$

で分類されることが分かる。このときの Dispersion Factor α_D を近似式であらわすとそれぞれ以下のようになる。

$$\begin{aligned} \alpha_D &= 0 \quad (E_* \leq 3.5) \\ \alpha_D &= 0.023 \quad (E_* - 3.5)^{6/5} \quad (3.5 < E_* \leq 12) \\ \alpha_D &= 0.225 \quad (E_* - 12)^{8/10} + 0.3 \quad (12 < E_* \leq 70) \\ \alpha_D &= 1.0 \quad (70 < E_*) \dots\dots\dots (5) \end{aligned}$$

現場で計測された図-5 の状況と式 (4) の分類との整合性について検討する。まず、底泥塊の投影面積 A と水中重量を用いて Rubey の沈降速度をかきかえると、式 (6) が得られる。

$$w_{f0} = \sqrt{(\rho_{mud} - \rho_0) g V_{mud} / (\rho_0 A)} \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここに、 ρ_{mud} ：底泥の密度、 g ：重力加速度、 V_{mud} ：底泥塊の容積である。

使用した 600 m^3 バージの土槽の大きさは $3 \text{ m} \times 25 \text{ m} \times 8 \text{ m}$ であり、測定された底泥塊の単位体積重量 $\rho_{mud} g = 1.18 \text{ tf/m}^3$ (11.6 KN/m^3) を代入すると、底泥塊の沈降速

度 $w_{f0} = 2.07 \text{ m/sec}$ となる。次に、底泥塊の含水比は図-5 (a) のとき $W = 142\%$ 、(b) で 170% 、(c) のとき 276% であり、このときの底泥の乱された状態のせん断強度 τ_{mud} はそれぞれ 18.3 gf/cm^2 (1.79 KPa)、 8.56 gf/cm^2 (0.839 KPa)、 0.549 gf/cm^2 (53.8 Pa) であるから、これを式 (2) に代入すると、

$$E_* = 2.46 \quad (W = 142\% : \text{泥塊沈降型})$$

$$E_* = 5.11 \quad (W = 170\% : \text{多塊拡散型})$$

$$E_* = 82.0 \quad (W = 276\% : \text{分離拡散型})$$

となり、それぞれ観測されたときの状況が式 (4) の分類と一致している。

4. 数値計算

式 (5) を使用して、数値シミュレーションを行った一例を示す。

基礎式は連続の式、運動方程式と式 (5) の Dispersion Factor を導入した拡散方程式を用いる。

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad \dots\dots\dots (7)$$

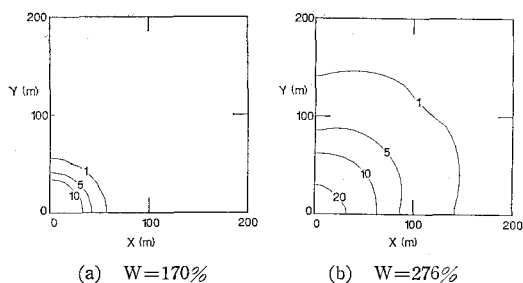
$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial u_i u_j}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_i \partial x_j} + f_i \quad \dots\dots (8)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial u_j C}{\partial x_j} = \alpha_D \frac{\partial}{\partial x_j} K_j \left(\frac{\partial C}{\partial x_j} \right) \\ - w_{f1} \frac{\partial C}{\partial x_3} \quad \dots\dots\dots (9) \end{aligned}$$

ここに、 x_i ：座標、 u_i ：流速、 p ：圧力、 ν ：動粘性係数、 t ：時間、 C ：拡散物質の濃度、 f_i ：体積力、 w_{f1} ：底泥単一粒子の沈降速度、 $i, j = 1 \sim 3$ である。

単一粒子の拡散に対する式である上式中には底泥塊の沈降に対する項が含まれていない。これは、本研究の目的が従来の計算モデルをそのまま利用することであるためである。本研究では、上式中の沈降項に底泥塊の沈降に対する項である w_{f0} の項を加えず、式 (8) の初期速度としてのみ与える方法をとることとする。

計算はソフトウェアクレイドル社の流体解析コード STREAM を上式のように改良して、実測を行った海域を対象に $200 \text{ m} \times 200 \text{ m} \times 40 \text{ m}$ の範囲に対して、含水比が 170% と 276% の場合について行った。格子間隔は投下地点付近では水平方向は 2 m 、鉛直方向は 0.5 m とし投下地点から離れるにつれて格子間隔を大きくし、 $x = 0 \sim 10 \text{ m}$ 、 $y = 0 \sim 4 \text{ m}$ を投下地点とした。計算に使用した拡散係数は、対象海域の最大流速が 20 cm/sec 程度であることから、アセスメント・マニュアル (1978) で定められている $K_x = K_y = 1.0 \text{ m}^2/\text{sec}$ を使い、鉛直拡散係数 $K_z = 0$ とした。濁りの発生量は濁りの原単位表 (四建, 1982) を用いて 600 m^3 のバージに対して一回当たり 7.0 ton とし、投下直後の10秒間のみに発生するものとした。このときの初期速度は $w_{f0} = 2.07 \text{ m/sec}$ を与え、粒子沈降速



(a) $W=170\%$ (b) $W=276\%$

図-8 濁度の水平分布 (-20m, 60分後)

度は Rubey 式から $w_{f1}=0.004$ m/sec とした。実際には海水による底泥のフロック化のために、これよりも大きな沈降速度となる。したがって、現地調査の測定値よりも大きな計算結果が得られるが、本研究では拡散範囲の比較のために、この値を使用する。また、含水比の変化により汚濁発生原単位が変化することが考えられるが、今回の計算では図-5 に示した投下直後の濁度の最大値の比を原単位の低減率として与えた。

投下1時間後の中層(-20m)での濁りの平面分布の結果を図-8に示す。含水比276%の場合には濁りの範囲が投下地点を中心にして同心円状に広い範囲に見られるが、含水比が170%の場合には小さな拡散域となっている。

5. む す び

底泥塊の沈降現象について検討を行った結果、底泥塊

の沈降は底泥の含水比(せん断強度)によって3種類の沈降形態を示し、その判別が無次元沈降指数によって行えることがわかった。また、拡散計算は単一粒子に対する拡散係数に Dispersion Factor を考慮すれば、従来の計算法をそのまま適用できることがわかった。

本研究を遂行するにあたり、中央大学理工学部服部昌太郎教授より貴重な御助言を頂いた。記して謝意を表します。

参 考 文 献

- 運輸省第四港湾建設局海域整備課 (1982): 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。
- 合田良実編著 (1986): 海岸・港湾調査法, 技報堂出版。
- 港湾環境アセスメント手法の開発ワーキンググループ (1978) 港湾環境アセスメント技術マニュアル。
- 堀口孝男・古土井光昭・堀江 毅 (1985): 海上工事による濁りの分布特性と数値シミュレーション, 第32回海岸工学講演会論文集, pp. 268~272。
- 矢内栄二・五明美智男 (1988): 軟らかい底泥のせん断強度特性について, 第43回年次学術講演会概要集II, pp. 768~769。
- DeLo, E. A. and T. N. Burt (1986): Dispersion of Sidecast Dredged Spoil — A Mathematical Prediction and Field Study, The Dock and Harbour Authority, No. 778. pp. 285~290。
- Miller, H. P. (1984): Three-Dimensional Free-Surface Suspended Particles Transport in The South Biscayne Bay, Florida, Int. Jour. for Numerical Methods in Fluids, vol. 4, pp. 901~914。
- Nicholson, J. and B. A. O'Connor (1986): Cohesive Sediment Transport Model, Jour. of Hydr. Eng., ASCE, vol. 112, No. 7, pp. 621~640。