

外洋投棄した底泥の拡散過程

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、底泥を外洋の海域に輸送投棄する方法がある。その輸送には底開式バージまたはスプリットバージなどが多く使用されるが、投下した底泥塊の沈降過程での挙動についてはこれまでほとんど知られていない。著者ら(矢内・加藤, 1989)は昨年、現地観測と室内実験から底泥塊の沈降形態が含水比により3種類に変化することを見出し、この沈降形態が流体抵抗力和底泥のせん断強度の比で定義される無次元沈降指数により明確に分離できることを明らかにした。また、現在使用されている環境アセスメント手法を拡散領域の予測にそのまま適用させるため、拡散係数を低減する Dispersion Factor を導入した。しかし、前報で導入した Dispersion Factor は現象論的には不適切な部分も存在していた。そこで、本研究においては Dispersion Factor に修正を行った。さらに、修正した Dispersion Factor の妥当性を検討するため数値シミュレーションを行い、現地観測と比較した。また、簡便かつ短時間に濁りの立体的な分布を捉える方法として、超音波測深器を使用することを試みた。その結果についても報告する。

2. Dispersion Factor の検討

(1) 沈降形態と Dispersion Factor

前報(矢内・加藤, 1989)において、底泥塊の沈降形態は含水比により図-1に示すような3種類のパターンを示すことが分かった。含水比が小さい場合には、底泥塊は一体となって沈降し海底に衝突する(泥塊沈降型)が、含水比が高くなるにつれて沈降途中で分離し始め濁りを発生するようになる(多塊拡散型)。さらに含水比が高くなり流体状になると、底泥塊は投下と同時に拡散する(分離拡散型)。この沈降形態は式(1)に示される流体抵抗力和底泥のせん断強度の比 E_* で明確に分離することができる。

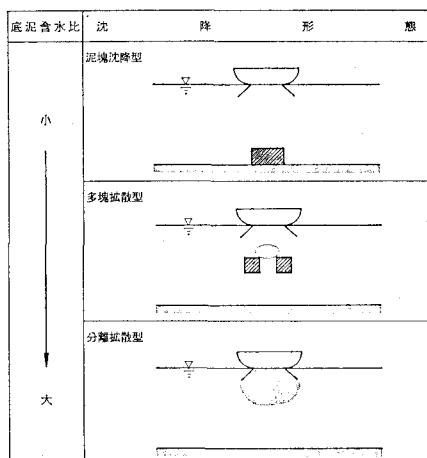


図-1 底泥塊の沈降形態

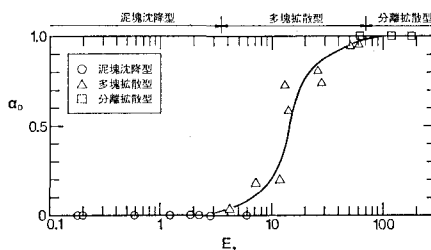


図-2 Dispersion Factor の分布

$$E_* = \frac{\rho_0 w_{f0}^2}{\tau_{\text{mud}}} \quad (1)$$

ここに、 w_{f0} : 底泥塊の沈降速度、 ρ_0 : 流体の密度、 τ_{mud} : 底泥塊のせん断強度である。

このパラメータから、図-1の沈降形態の違いは

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

で分類された。さらに、各沈降形態ごとの拡散係数 K と分離拡散型の拡散係数 K_{max} の比である Dispersion Factor α_D

$$\alpha_D = K/K_{\text{max}} \quad (2)$$

を導入して、含水比の違いに対する拡散領域の変化を示すことを試みた。その結果、 α_D と E_* の間に図-2に

* 正会員 工修 東亜建設工業(株)技術本部設計部

** 東亜建設工業(株)技術本部機電部

示すような関係があり、これを次式で近似した。

$$\left. \begin{aligned} \alpha_D &= 0 & (E_* \leq 3.5) \\ \alpha_D &= 0.023(E_* - 3.5)^{6/5} & (3.5 < E_* \leq 12) \\ \alpha_D &= 0.225(E_* - 12)^{3/10} + 0.3 & (12 < E_* \leq 70) \\ \alpha_D &= 1.0 & (70 < E_*) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3)$$

(2) Dispersion Factor の再検討

以上のように、前報においては Dispersion Factor を拡散係数に対する低減率として導入していた。これは、含水比が変化しても汚濁発生量は変化しないとの考え方である。しかし、現象論的に考えると、拡散係数は底泥塊の力学的な性質が支配的となって変化するよりも、投棄海域での波・流れなどの条件によって大きく影響される係数である。また、拡散係数を低減しても、濁度の保存条件から同一の汚濁発生量では含水比が小さいほど投下地点付近の濁りの絶対値が大きくなるという不都合が生じる。そこで、この Dispersion Factor について再検討を行う。

投棄底泥が1塊りとなって沈降していく泥塊沈降型を考えると、底泥塊は海水濁度の面からみると全く発生のない汚濁源と見ることができる。このことから、Dispersion Factor は濁りの発生量の低減率とすることが妥当である。すなわち、

$$\alpha_e = C_0 / C_{0\max} \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 C_0 : 各沈降形態ごとの汚濁発生量、 $C_{0\max}$: 分離拡散型のときの汚濁発生量である。

C_0 を実験や現地観測結果から計算するには、時刻 t における各地点での濁度を $C = fn(x, y, z)$ とすると、

$$C_0 = \iiint C dx dy dz \dots\dots\dots (5)$$

として算定される。式 (2) で計算される α_D と式 (4) で計算される α_e の間には直接的な関係はない。しかし、現地観測で得られた結果から α_e を計算すると式 (3) の曲線上に分布する。このことから、前報で導入した Dispersion Factor を拡散係数の低減率ではなく、汚濁発生原単位の低減率にそのまま置き換え、

$$\alpha_D = \alpha_e \dots\dots\dots (6)$$

とする。

3. 現地観測とシミュレーション

(1) 現地観測

現地観測は前報と同じ太平洋岸の水深 41 m の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 積みの底開ページおよびスブリットページにより運搬・投下されている。投下した底泥の土質特性を表-1に示す。今回の観測は、前

表-1 底泥の土質特性

含水比 (%)	140~190
中央粒径 (μm)	0.7~2.0
強熱減量 (%)	10.4~15.1
塑性限界 (%)	39~41
液性限界 (%)	116~130

年投下した底泥の堆積残留状況と、投下直後からの3次元的な拡散過程の把握を目的として行った。底泥の堆積残留状況の調査は、工事前の底泥を潜水土により採取し、投棄する底泥との分析比較により行った。また、工事前に CM-2 型流速計 1 台と YPC-1 型濁度計 1 台により、海底面上 1 m の地点においての流速と濁度の連続測定を行った。濁度の平面分布の観測は、次項で述べる超音波測深器による測定と、FN-5 型濁度計 1 台と YPC-1 型濁度計 5 台による測定の2種類の方法により行った。

(2) 超音波測深器による濁り分布測定

底泥塊の投棄後の濁りの拡散過程を把握するには、底泥粒子が沈降してしまうため、短時間のうちに測定を行う必要がある。しかし、濁度計により濁りの3次元的な分布を測定する場合、広域の濁度を測定するのに多くの時間を必要とする。そこで、本研究においては超音波測深器を用いて短時間に拡散過程を把握することを試みた。使用した測深器は発振ビーム周波数 70 kHz、ビーム角 11° のものである。濁度の算定方法は以下のようにして行った。

まず、測深器による測定から得られた各水深ごとの超音波反射信号の音響レベルを 5 m 間隔で積分し、層別に容積 1 m³ 当りの後方散乱強度を求める。次に、濁度計との較正をするために後方散乱強度と濁度計の光束透過率との関係を求め、光束透過率から濁度計の換算式を使って各層内の濁度を算定する。本研究では濁度の測定は YPC-1 型濁度計を使用し、図-3 に示す関係から以下の式により濁度計の光束透過率を較正した。

$$P_{er} = 77.9953 - 0.76466 S_v \dots\dots\dots (7)$$

ここに、 P_{er} : 濁度計の光束透過率 (%), S_v : 超音波測

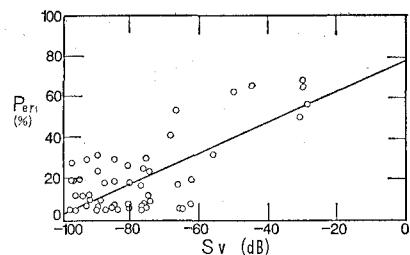


図-3 光束透過率と後方散乱強度

深器の後方散乱強度 (dB) である。超音波測深器は2次波を発生するため、表層付近では精度が低下することから、本研究では表層から5m以下に対して上記の手法を適用した。

(3) 数値シミュレーション

前項で述べた Dispersion Factor を数値シミュレーションに使用し、現地観測と比較してその妥当性を検討した。基礎式は、連続の式、運動方程式および拡散方程式に沈降の項を加えた次の式である。

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad \dots\dots\dots (8)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial u_i u_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\rho \partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_i \partial x_j} + f_i \quad \dots\dots\dots (9)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial u_j C}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} K_j \left(\frac{\partial C}{\partial x_j} \right) - w_{f1} \frac{\partial C}{\partial x_3} \quad \dots\dots\dots (10)$$

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。

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行った。

(4) 投棄地点の性質

図-4 は、投棄以前の底泥の浮遊状況を知るために、海底面上 1m での流速と濁度の関係を示したものである。投棄地点では終日 5 cm/s 以上の流速が存在し、底面付近には 3 ppm 以上の濁りが発生していることが確認された。また、流速の増加にともなって濁度も上昇し、その関係には線形性が見られる。

図-5(a), (b) および表-2 は、投棄地点に堆積している底泥と今回新たに投棄する底泥について、粒度分析と元素分析を行った結果を示したものである。粒度分析はコールターカウンター、元素分析はプラズマ分光分析装置をそれぞれ使用して計測した。図-5(a), (b) を比較すると、堆積底泥は 1 μ m 以下と 50 μ m 付近に高い分布をもつが、投棄底泥は 1 μ m から 50 μ m までほぼ平均的に分布している。しかし、堆積底泥の方に細粒成分が残存していたことから、昨年投下した底泥の移動はあ

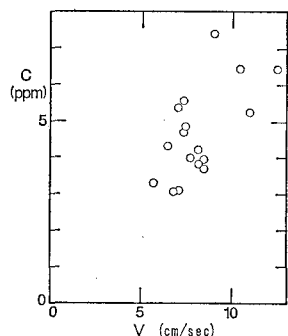
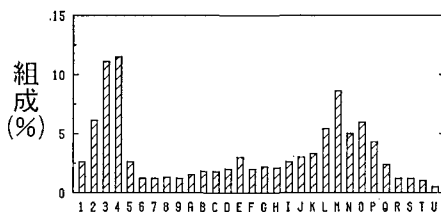
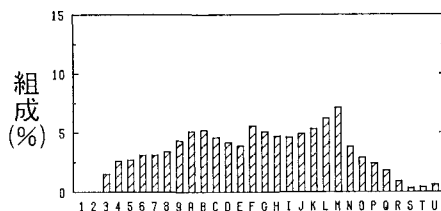


図-4 海底付近における流速と濁度

粒 径 の 範 囲 (μm)															
1: 0.397~0.500	9: 2.520~3.170	H: 15.00~20.20	P: 101.6~128.0												
2: 0.500~0.630	10: 3.170~4.000	I: 20.20~25.40	Q: 128.0~161.0												
3: 0.630~0.794	A: 4.000~5.040	J: 25.40~32.00	R: 161.0~203.0												
4: 0.794~1.000	B: 5.040~6.350	K: 32.00~40.30	S: 203.0~256.0												
5: 1.000~1.250	C: 6.350~8.000	L: 40.30~50.80	T: 256.0~327.0												
6: 1.250~1.560	D: 8.000~10.00	M: 50.80~64.00	U: 327.0~406.0												
7: 1.560~2.000	E: 10.00~12.70	N: 64.00~80.00													
8: 2.000~2.520	F: 12.70~16.00	O: 80.00~101.6													



粒 径
(a) 堆積底泥



粒 径
(b) 投棄底泥

図-5 底泥の粒度組成

表-2 元素分析結果 (g/kg)

	B	Na	Mg	Al	Ca	Mn	Fa
堆積底泥	0.130	46.0	16.0	87.0	15.0	0.76	44.0
投棄底泥	0.063	16.0	5.6	16.0	7.5	0.96	19.0

まりなかったものと見られる。表-2 の元素分析の結果でも、各元素の含有量の絶対値は海水等の濃度の影響により異なるものの、各元素の組成割合は Al を除いてほぼ同じものとなっていることから、同様に変化がなかったものと見られる。

(5) 現地観測とシミュレーションの比較

現地観測から得られた拡散過程とシミュレーション結果の比較について述べる。超音波測深器による濁り分布

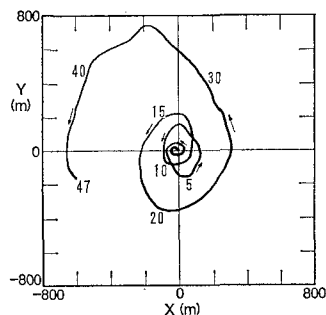


図-6 観測船走行軌跡

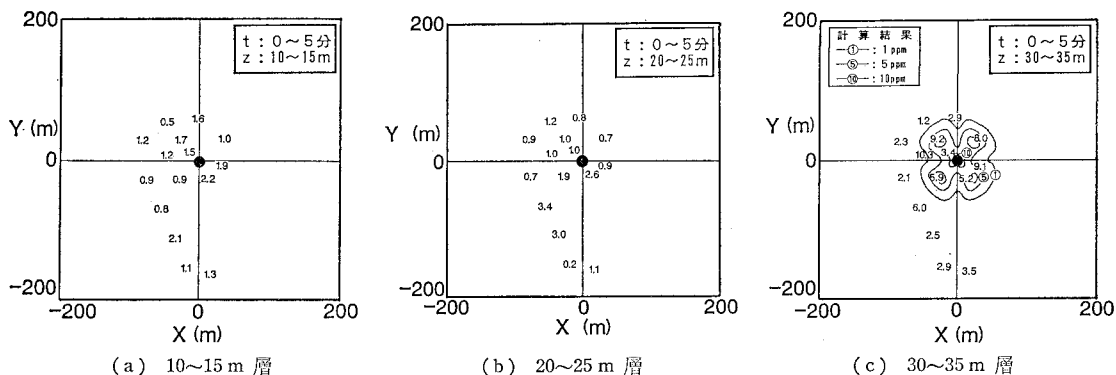


図-7 各層における濁度分布 (0~5 分後)

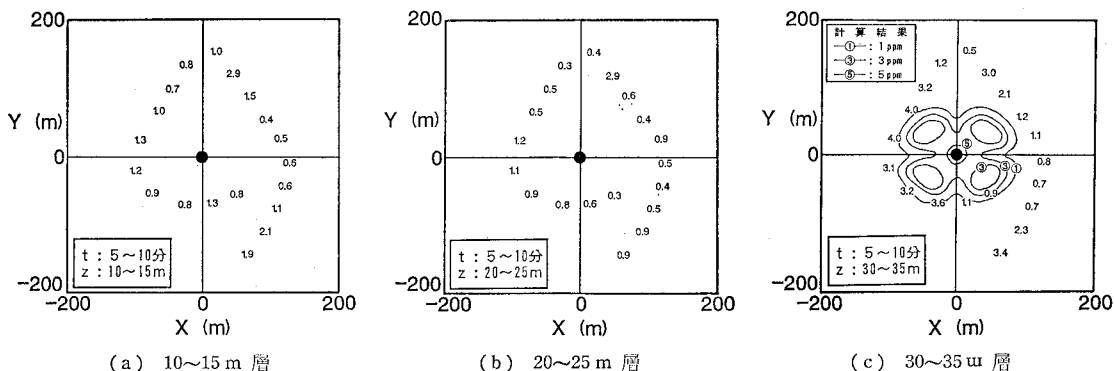


図-8 各層における濁度分布 (5~10 分後)

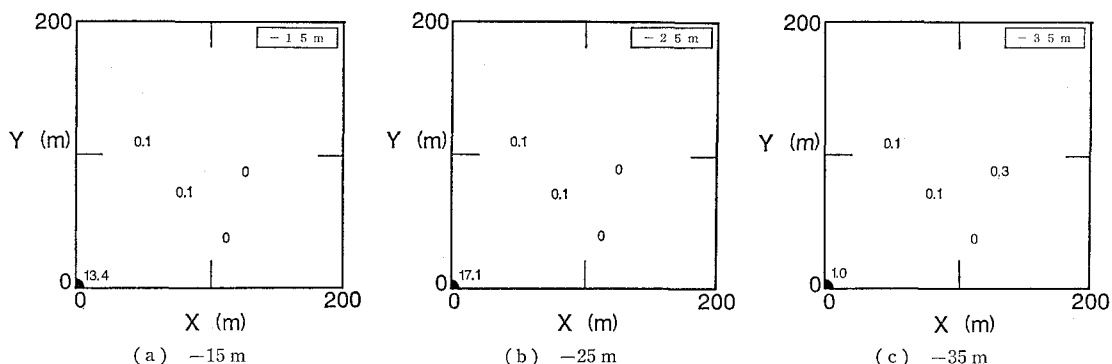
の測定は、投下点を中心として図-6のように800mの範囲内について行った。測定方法は、投下直後は投下地点周辺200mの範囲を重点的に測定し、その後は投下点から遠ざかる方法とした。測定開始から終了までの時間は47分である。

シミュレーションは投下点から200m×200m×40mの範囲に対して行った。格子間隔は投下点付近では水平方向が2.0m、鉛直方向が0.5mとし、投下点から離れるにつれて格子間隔を大きくした。投下地点は、 $x=0\sim10$ m, $y=0\sim4$ mの格子内とし、濁りの発生量は濁りの原単位表(四建, 1982)より600m³バージ1回あたり7.0tonとした。また、底泥塊の沈降過程は3段階に分けて計算した。現地観測では0~5分の30~35m層で最大濃度が検出されたことから、計算開始15秒間ではRubeyの式から計算される底泥塊の沈降速度 w_{f0} を初期速度として与えて流速計算を行い、次の15~20秒間で拡散計算を開始し、これに引続く20秒~10分は発生汚濁を停止して拡散計算と流速計算を行った。水平拡散係数は、アセスメントマニュアル(1978)で定められている $K_x=K_y=1.0$ m²/secを用い、鉛直拡散係数 $K_z=0$ とした。底泥塊と粒子の沈降速度はRubeyの式よりそれぞれ、 $u_{f0}=2.07$ m/sec, $w_{f1}=0.004$ m/secとした。Dispersion

Factorは、投棄した底泥が表-1に示すように比較的低含水比であったことから、安全側の値である $W=190\%$ のときの底泥のせん断強度 $\tau_{mud}=455$ Paを使用し、式(1), (2)より $E_*=9.42$, $\alpha_D=0.19$ を使った。

計算結果と観測結果の比較を図-7, 8に示す。図中、●は投棄地点を示し、数値は濁度の測定結果である。また、等高線は5, 10分後の水深12.5m, 22.5m, 32.5mの計算結果である。海域のバックグラウンド値は、測定法の精度を確認するため除去していない。

図-7(a)~(c)は、投棄後5分間の10~15m(以下15m層とよぶ)、20~25m(同25m層)、30~35m(同35m層)の結果であるが、35m層で大きな濁りがあるほかは有意な濁りが存在していない。35m層の大きな濁りは投下地点直下ではなく、多少離れた所で測定されている。これは底泥塊が噴流として海底面に衝突した結果と考えられ、数値計算の結果でも再現されていることが分かる。15m層、25m層のシミュレーション結果からでは1ppm以上の濁りは現れていない。図-8は同様に10分後の結果であるが、35m層に4ppm前後の値が観測されたほかは大きな濁りが観測されていない。また、35m層における結果では、シミュレーションの方が大きな値となっている。これは、シミュレーションで



図—9 濁度計による分布 (10 分後)

の粒子の沈降速度に単一粒子の値を使用したため、実際にはフロック等の形成により速く沈降しほとんど濁りが存在しなかったものと考えられる。

図—9 は、濁度計により測定された結果である。図中では海域のバックグラウンド濃度は除去してある。また、このときの底泥塊の含水比は 140~220% であり、超音波測深器のときに投棄した底泥よりも含水比が高いものも含まれている。これを見ると、投下 10 分後には投下点以外ではほとんど濁りは存在していないことが分かる。図—7, 8 と比較すると、超音波測深法では広領域を細かく濁度測定しているものの、低濃度での精度に多少問題があることが認められる。これは、使用した超音波の周波数が 70 kHz と低いためと見られ、今後検討する必要がある。

4. む す び

底泥塊の沈降と拡散過程について検討を行った結果、多塊拡散型の場合には濁りの範囲は非常に小さく、しかも短時間のうちに沈降することが分かった。また、超音波測深器による濁度の測定は、精度では多少濁度計に劣るものの、広範囲の 3 次元的な拡散過程を短時間に測定することができた。

本研究の遂行にあたり、中央大学理工学部服部昌太郎

教授より貴重なご助言をいただいた。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。
- 矢内栄二・加藤 謙 (1989): 底泥塊の沈降形態と拡散係数の評価法, 海岸工学論文集, 36 巻, pp. 324~328。
- 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。
- Whitelaw, K. and M. J. Andrews (1987): The Effect of Sewage Sludge Disposal to Sea—The Outer Thames Estuary, U.K., Proc. of Specialised Conference on Coastal and Estuarine Pollution, pp. 217~325。