

海洋投棄底泥の沈降・分散過程*

矢内栄二¹

¹正会員 工博 東亜建設工業(株)土木本部設計部 (〒102 東京都千代田区四番町5)

海洋投棄した底泥の沈降と分散挙動について水理実験により検討した。実験結果をもとに底泥塊の分離・分散過程について理論的に検討し、環境アセスメント(影響評価)での評価指標となる汚濁負荷量をより適切に算定しうるモデルを提案した。さらに、実際の投棄の現場において濁りの鉛直分布の測定を行い、理論の妥当性について検討した。

Key Words : ocean dumping, mud lump, settlement, environmental assessment

1. はじめに

河川、湖沼および海域に堆積している微細な粒子等からなる底質は総称して底泥と呼ばれ、その主要な成分はシルトや粘土等の無機物質、未分解な生物の遺骸等の有機物質などである。

沿岸域の開発利用にあたり必ず取り上げられる底泥問題として、シルテーションと呼ばれる底泥の移動・堆積現象と、底泥の処理・処分があげられる。シルテーションとは、港湾の建設・維持管理に伴う浚渫・埋立工事や、湾・入江などの閉鎖性水域での波・流れにより発生する、流体運動と底質移動とに関連する問題である。

浚渫底泥の処理・処分の問題点は、①浚渫土が多量であること、②底泥が塩分を含むこと、③残存有機物質からガスと悪臭を発生することで、浚渫した底泥を陸上に搬出して処分することはほとんど困難な状況となっている。そのため、浚渫した底泥をバージ(土運船)により海上輸送し投棄する、いわゆる海洋投棄が行われている。底泥の場合は砂礫などと比べてきわめて沈降速度が小さいため濁りの拡散域が広範囲にわたり、濁りが環境へ与える影響が大きくなる。そこで、圧密や脱水などによって浚渫底泥の固結処理を行い、底泥の分散性を抑制して濁りを低減する方法などが行われている。しかし、このような処理を行った底泥の力学特性と、投棄底泥の沈降・分散過程および発生濁度に関する研究は、底

*本研究は海岸工学論文集第36巻¹⁾、第37巻²⁾、および第39巻³⁾に発表した内容をさらに発展させ、系統的に考察したものである。

泥の物理特性が複雑でしかも投棄底泥塊の沈降時に見られる崩壊機構が十分解明されていないため極めて少ない。

本論文は、海洋投棄後の底泥塊の分離・拡散過程および汚濁負荷量の変化を解明することにより、環境アセスメント(影響評価)での評価指標となる汚濁負荷量をより適切に算定しうるモデルを提案することを目的としたものである。

2. 底泥塊の沈降形態

(1) 実験装置と方法

海洋にバージから投棄された底泥は、3次元的に拡散していくと考えられるが、本研究では鉛直方向の沈降・拡散過程に着目するため、実験は図-1に示すような幅0.5m×長さ2.5m×高さ1.0mの2次元鋼製水槽を用いた。水深は80cmとし、バージ模型は3.7cm×2.9cm×2.0cmの直方体容器を使用した。実際のバージでは、泥塊は土槽から自重で排出するが、本実験では容器側壁の影響が大きいため自重では排出されなかった。そこで、容器上部に押し出し装置を取り付け、泥塊を静かに押し出すこととした。底泥は、実際に海洋投棄されている表-1に示す物性値を持つ3種類の浚渫底泥を用い、含水比を170%～700%まで変化させた。ここで、中央粒径以外の値については資料が少量だったためにA～C泥を混合して測定した。

測定は、拡散雲の拡がり、泥塊の沈降速度、底泥のせん断強度について行った。拡散雲の測定と泥塊の沈降速度は、タイマー付きのビデオカメラを用い、

表-1 底泥の物性

項目	A 泥	B 泥	C 泥
中央粒径 (μm)	0.8	0.8	2.2
粒子比重		2.61 *	
液性限界 (%)		155.3 *	
塑性限界 (%)		38.5 *	
単位体積重量 (kN/m^3)	12.8 *		

* A ~ C 泥を混合して測定

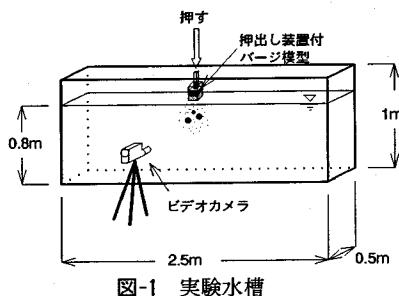


図-1 実験水槽

底泥のせん断強度はせん断強度測定装置⁴⁾を使用して測定した。

(2) 沈降形態と泥塊の分離状況

実験の結果、底泥塊の沈降は写真-1~3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、底泥塊が一塊りのまま沈降し海底に衝突する。この場合、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。このとき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。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し、沈降するとともに拡散領域を広げていく。

これより、沈降形態を分類したものが図-2である。それぞれ、泥塊沈降型、多塊拡散型、および分離拡散型と呼ぶこととする。

写真-4は、多塊拡散型における泥塊の分離の状況を示したものである。泥塊は、背後の渦の影響を受けるために揺れながら沈降し、やがて泥塊中央部附近から折れ曲がるように破壊する。この沈降時の状況を模式化したものが図-3である。

(3) 汚濁負荷量の算定法

前項のように、泥塊の沈降形態は含水比の変化によって3種類のパターンを示すことがわかった。含

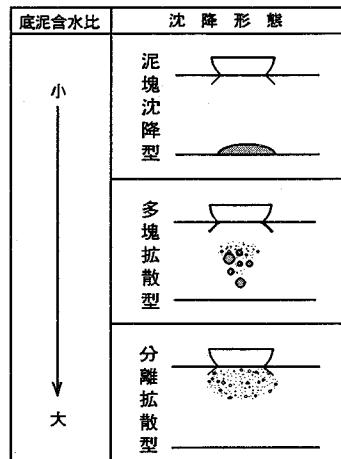


図-2 沈降形態

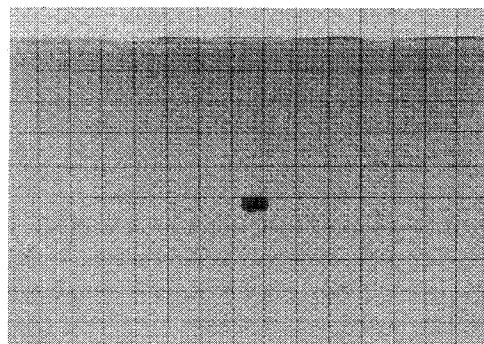


写真-1 泥塊の沈降状況 (W=320%)

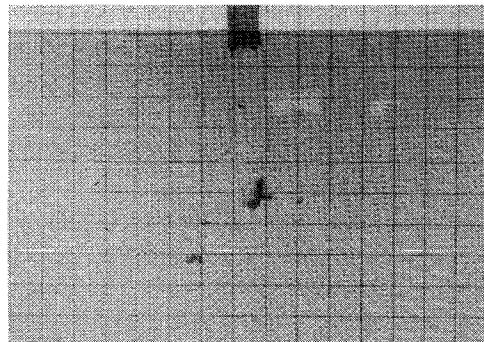


写真-2 泥塊の沈降状況 (W=429%)

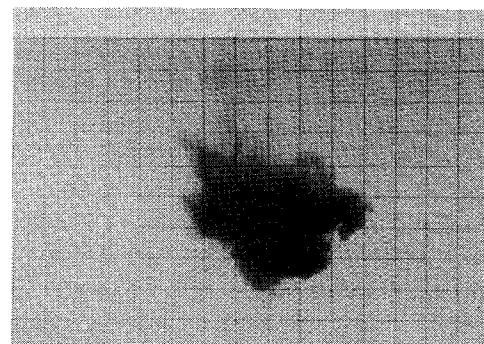
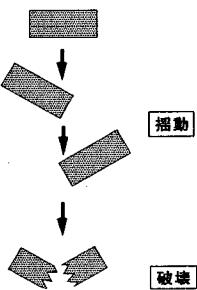
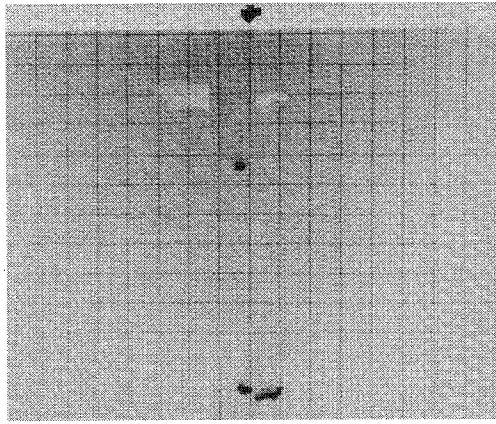


写真-3 泥塊の沈降状況 (W=633%)



水比が小さく、固体としての性質が支配的なときは、写真でも見られるように発生する濁りの量は小さい。したがって、含水比の変化は沈降のパターンの違いと同時に濁りの発生量についても影響を与えると考えられる。そこで、濁りの発生量、すなわち汚濁負荷量について検討する。

海洋投棄における環境アセスメントにおいては、発生汚濁負荷量はつぎのように定義されている。

$$q = q_* Q \quad (1)$$

ここに、 q ：発生汚濁負荷量、 q_* ：発生汚濁原単位、 Q ：投棄土量。

アセスメント・マニュアル^{5) 6)}は、発生汚濁原単位を式(2)で示すように投棄土中に占める細粒分($< 74 \mu\text{m}$)のうち、水域の流れの中で浮遊し続けると考えられる粒径(汚濁限界粒子径)以下の割合により規定している。

$$q_* = \frac{1}{\beta} q_0 \quad (2)$$

$$\beta = R_{74}/R$$

ここに、 q_0 ：発生原単位表による発生原単位、 R_{74} ：発生原単位表によるシルト以下(粒径 $74 \mu\text{m}$ 以

下)粒径加積百分率、 R ：粒子沈降速度から計算される汚濁限界粒子以下の粒径加積百分率、である。

アセスメント・マニュアルでは含水比の影響をこの汚濁原単位中に含んでいないことから、マニュアルに規定した原単位は汚濁予測としては安全側となる図-2の分離拡散型での最大の原単位を示したものと考えられる。そこで、含水比の影響を汚濁原単位中に取り込むためには、細粒分をどのように粗粒分として評価していくかということに帰着する。

この方法として考えられることの一つは、実験において底泥の含水比の違いに対する汚濁負荷量の変化を測定することである。しかし、汚濁負荷量は3次元的濃度分布を積分することにより求めなければならないために、同時に多数の汚濁濃度を測定する必要があり、大掛かりな測定が必要となる。また、本研究の目的からいえば、実験における個々の汚濁負荷量を測定することよりも、現行のアセスメント・マニュアルで使われている汚濁負荷量との違いを見積もることが有効であると考えられる。そこで、本研究ではつぎの方法により、汚濁負荷量を算定することとした。

実験における投棄後の濁りの拡がりは、拡散方程式で表示できるような濃度の差による拡散のほかに、濁りの粒子が沈降することにより発生する流れと乱れにより拡散する。現行のアセスメント手法にならって投棄後の濁りの拡がりが3次元的に進行すると考えると、泥塊がある瞬間に点放し出し、放出された後の拡散雲は、点源を原点とすると式(3)で示される3次元拡散方程式の解にしたがって拡がると考えられる。

$$C = \frac{q}{(4\pi t)^{3/2} K^{3/2}} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2 + z^2}{4Kt}\right) \quad (3)$$

ここに、 C ：濃度、 K ：拡散係数、 t ：時間、 x 、 y ：水平方向座標、 z ：鉛直方向座標、である。

同心円上の拡散を仮定すると、実験で観測される拡散雲の領域は最大の拡散域を測定していると考えられることから $y=0$ の断面と見なすことができる。また、拡散雲の領域が可視範囲の限界と考えられることから拡散範囲の外縁における濃度が常に等しいとすると、ある実験1と2における汚濁負荷量の比は、

$$\frac{q_1}{q_2} = \frac{K_1^{3/2} \exp\{-(x^2 + z^2)/4K_1 t\}}{K_2^{3/2} \exp\{-(x^2 + z^2)/4K_2 t\}} \quad (4)$$

となり、 $x \rightarrow 0$ 、 $z \rightarrow 0$ とすると、

$$\frac{q_1}{q_2} = \left(\frac{K_1}{K_2}\right)^{3/2} \quad (5)$$

となる。 q_2 として汚濁負荷量の最大値を考え、その

表-2 せん断強度、拡散係数および泥塊沈降速度の測定結果

底泥	含水比W(%)	せん断強度 τ_{max} (Pa)	K (cm ² /s)	汚濁負荷率 ϕ	沈降速度 w_s (cm/s)	圧力 p (Pa)	最大モーメント $M \times 10^{-5} N\cdot m$	最大応力 σ (Pa)	分離指數 Ψ
A	177	860.4	0	0	26.3	69.2	$M_x = 4.822$ $M_y = 4.106$	24.95	0.029
	190	405.7	0	0					0.061
	258	122.5	0	0					0.20
	344	16.8	0.096	0.004					1.49
	394	6.3	0.877	0.099					3.98
	486	2.6	2.55	0.490					9.41
	560	1.2	3.44	0.769					21.14
	633	0.6	3.91	0.931					42.28
	K _{max}		4.1	1.0					—
	168	1176.0	0	0	27.0	72.9	$M_x = 5.145$ $M_y = 4.381$	26.61	0.023
B	194	362.6	0	0					0.073
	320	25.9	0	0					1.03
	375	10.1	0.365	0.023					2.64
	429	5.2	1.53	0.198					5.13
	490	2.5	3.32	0.634					10.64
	544	1.4	3.79	0.773					19.42
	681	0.4	4.33	0.944					68.23
	K _{max}		4.5	1.0					—
	216	399.8	0	0	27.8	77.3	$M_x = 5.390$ $M_y = 4.596$	27.88	0.70
C	232	37.7	0	0					0.74
	282	59.1	0	0					0.47
	322	30.9	0	0					0.90
	368	12.0	0	0					2.33
	423	5.6	3.65	0.346					4.99
	482	2.7	4.81	0.524					10.18
	560	1.2	6.16	0.759					23.63
	K _{max}		7.4	1.0					—

比を ϕ とすると、

$$\phi = \frac{q}{q_{max}} = \left(\frac{K}{K_{max}} \right)^{3/2} \quad (6)$$

となる。ここに、添字 max は汚濁負荷量の最大値のときのそれぞれの値を示す。

本研究では、拡散係数 K を平野・杉浦⁷⁾の算定法にならって式(3)の拡散領域より式(7)で求めることとした。

$$K = \frac{1}{4} \left(\frac{r_i^2/t_i - r_{i-1}^2/t_{i-1}}{\ln t_i^{3/2} - \ln t_{i-1}^{3/2}} \right) \quad (7)$$

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。

式(6)で求められる汚濁負荷量の負荷の割合 ϕ を、汚濁負荷率と呼ぶこととする。

実験の結果を表-2に示す。各ケースの結果は、泥塊の分離が無いときは1回の値をとり、泥塊が分離したときは3回の平均値をとった。標準誤差は21~25%であった。投入時の影響を小さくするために、投入後5秒から15秒まで、または泥塊が着底するまでの間、分離後の個々の可視可能な濁りの範囲について1秒ごとに拡散雲の面積を測定し、個々の面積の総和を取った。 K_{max} は、泥塊のせん断強度 τ_{max} に対する K の分布から算定した。

3. 泥塊の沈降・分散過程の評価

(1) 泥塊の分散とモデル化

3種類の泥塊の沈降パターンをモデル化する場合、現象的な面から図-4のように二つに分けることができる。

泥塊が「自立する」場合には、水中を沈降してい

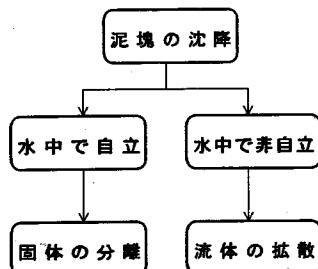


図-4 泥塊の分散状況

くときに固体としての性質が支配的となるため、弾性体としてモデル化することが可能である。一方、泥塊が水中で自立しない場合には、沈降・拡散過程は高い粘性を持つ流体の拡散となり、「自立する」場合とは異なるモデルを検討する必要がある。

泥塊を固体として取り扱う場合には、泥塊内の応力は構造力学的に解析することができ、比較的解析が容易である。これに対し、泥塊を粘性流体として取り扱うときは、コロイド化学などの分野で行われているように^{8)~10)}、粘着力の主要な要因である底泥粒子の van del waals 力を正確に算定する必要があり、本研究で対象とするような 500m³以上といった大量の底泥を取り扱う方法として有効とは言いがたい。

そこで、本研究では、泥塊が「自立する」場合からアプローチしてモデル化を行い、泥塊の沈降・拡散過程について考察する。

(2) 沈降過程での作用力

水中で「自立する」底泥塊を考えたとき、泥塊が塊状に分離する現象は、泥塊が沈降過程で受ける流体力と、泥塊自身の抵抗力とが非平衡状態になったときに生じるものと考えられる。

今、泥塊が、

1. 沈降途中で回転しない
2. 表面摩擦による破壊が小さい

とすると、泥塊に作用する力としては泥塊上下面の圧力差に起因する抗力が支配的となる。

一方、泥塊の抵抗力としては、せん断強度、圧縮強度、および引張強度などが挙げられる。泥塊の破壊においては引張強度が重要な要素であるが、これらはいずれも相関性がある¹¹⁾ことから、測定の容易なせん断強度を泥塊の抵抗力として代表させることとする。

(3) 沈降過程のモデル化と分離指數

実験における泥塊の分離は、写真-4に示すように

泥塊の中央部付近から折れ曲がることから始まる。このことから、泥塊を図-5のような任意の形状の薄い板とし、これに流れによる荷重が作用している状態を考える。これより、泥塊内の応力解析は平板の曲げ問題に置き換えることができる。流れによる圧力は面に垂直に働くから、力の釣り合い方程式は

$$\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} = \frac{p}{\gamma} \quad (8)$$

となる¹²⁾。ここに、 w ：変位、 p ：泥塊面に作用する荷重、 γ ：泥塊の曲げ剛性($=Eh_{med}^3/12(1-\delta^2)$)、 δ ：ポアソン比、 h_{med} ：泥塊厚、 E ：泥塊のヤング率である。

式(8)を実際の海洋投棄時の状況を考慮して解析的に解く。海洋投棄に使用される一般的な底開バージの土層は直方体であることから、泥塊を辺長 a 、 b 、高さ h_{med} とする直方体とする。また、実験での泥塊破壊は中央部の分離から始まることから、泥塊に働く流体力を均一な荷重であるとする、破壊は泥塊中央部での最大曲げモーメントにより生じていると考えられる。このときの泥塊の支持条件は泥塊中央部の剛支持となるが、解析的に解くために泥塊端部での境界条件を泥塊中央部の最大曲げモーメントが中央剛支持にはば近い周辺単純支持と考える。よって、境界での条件は、

$$w=0 \quad (x=0, x=a, y=0, y=b)$$

$$M_x=M_y=0 \quad (x=0, x=a, y=0, y=b) \quad (9)$$

となる。式(8)を(9)の条件で解くと、Navier の解¹²⁾として知られる次式が得られる。

$$w = \frac{1}{\pi^4 \gamma} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{a_{mn}}{(m^2/a^2+n^2/b^2)^2} \sin \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b} \quad (10)$$

ここに、 a_{mn} は荷重分布関数 $p(x,y)$ を複正弦級数に展開したときの係数を表わす。すなわち、

$$p(x,y) = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} a_{mn} \sin \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b} dx dy \quad (11)$$

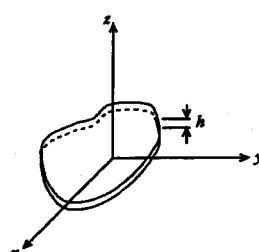


図-5 解析のモデルと座標系

$$a_{mn} = \frac{4}{ab} \int_0^a \int_0^b p(x', y') \sin \frac{m\pi x'}{a} \sin \frac{n\pi y'}{b} dx' dy' \quad (12)$$

よって、泥塊内に働く曲げモーメントは

$$M_x = \frac{a^2 \lambda_{ab}^2}{\pi^2} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(\lambda_{ab}^2 m^2 + \delta n^2) a_{mn}}{(\lambda_{ab}^2 m^2 + n^2)^2} \sin a_m x \sin \beta_n y$$

$$M_y = \frac{a^2 \lambda_{ab}^2}{\pi^2} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(\delta \lambda_{ab}^2 m^2 + n^2) a_{mn}}{(\lambda_{ab}^2 m^2 + n^2)^2} \sin a_m x \sin \beta_n y \quad (13)$$

となる。ここに、 $a_m = m\pi/a$ ， $\beta_n = n\pi/b$ ， $\lambda_{ab} = b/a$ である。

最大曲げモーメントは、泥塊中央部で生じることから $x=a/2$ ， $y=b/2$ とし、荷重を等分布荷重とする

$$a_{mn} = \frac{16p}{\pi^2 mn} \quad (14)$$

より

$$M_x = \frac{16pa^2 \lambda_{ab}^2}{\pi^4} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(\lambda_{ab}^2 m^2 + \delta n^2)}{mn (\lambda_{ab}^2 m^2 + n^2)^2} \quad (15)$$

$$M_y = \frac{16pa^2 \lambda_{ab}^2}{\pi^4} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(\delta \lambda_{ab}^2 m^2 + n^2)}{mn (\lambda_{ab}^2 m^2 + n^2)^2} \quad (16)$$

となる。ここで、泥塊の断面係数を Z_x ， Z 、とすると、泥塊内に生じる応力は

$$\sigma_x = M_x / Z_x, \quad \sigma_y = M_y / Z, \quad (17)$$

で求められる。

泥塊の破壊は、式(17)で算定された応力が底泥のせん断強度を超えたときに生じると考えられるところから、式(17)の応力の最大値 σ_{max} と底泥塊のせん断強度 τ_{md} との比 Ψ を導入して、

$$\Psi = \frac{\sigma_{max}}{\tau_{md}} \quad (18)$$

を、泥塊の分離の判定指標として、分離指数と呼ぶこととする。ただし、 σ_{max} は σ_x ， σ_y の大きい方の値である。

式(18)を本研究における底泥塊分離の指標とする。式(18)は、泥塊が「自立する」場合を対象としているが、その適用限界については実験結果との比較により考察する。また、分離指数が分離の限界に達したときを Ψ_c とし、分離限界指数と呼ぶこととする。

(4) 汚濁負荷率の評価

汚濁負荷率は、2.(3)で述べたように底泥塊のせん断強度や含水比に影響されるものであり、したがって分離指数により変化するものである。そこで、汚濁負荷率の評価について理論的に考察する。

実験結果からも明らかなように、泥塊投棄時の漏りの発生は、泥塊が分離することによって生じる。ある泥塊が分離して汚濁が発生する確率を P_a とすると、平均的な汚濁負荷量 q は、最大汚濁負荷量 q_{max} に対して次式で与えられる。

$$q = q_{max} \cdot P_a \quad (19)$$

したがって、汚濁負荷率 ϕ は式(6)より、

$$\phi = q / q_{max}$$

$$= P_a \quad (20)$$

となる。このことから、汚濁負荷量の負荷の割合である汚濁負荷率は、言いかえれば泥塊が分離する確率と等しい。

つぎに、汚濁負荷率のモデル化について検討する。汚濁負荷率のモデル化の方法として、二つの方法が考えられる。一つは、外力が確率的であり、これにより分離の確率が変動するという考え方であり、二つめは分離そのものが確率的であるという考え方である。後者の考え方は、結果的に実験式を求める方法となるが、本研究においては実用上の汎用性の面から、力学的な考察より検討する方法を採用するほうが望ましいと考えられる。そこで、流砂理論において粒子の飛びだし確率を考察したものとして知られる Einstein¹⁸⁾理論を参考に、この泥塊が分離する確率を検討する。

泥塊が沈降するときに働く流体力は時間的に変動していると考えられることから、泥塊の応力も時間的に変動すると考えられる。よって、

$$\sigma = \sigma_0 \cdot |1 + \eta(t)| \quad (21)$$

ここに、 σ_0 ： σ の時間平均値、 $\eta(t)$ ：変動成分、である。

泥塊の応力 σ とせん断強度 τ_{md} の関係を図-6のように考えると、 σ が τ_{md} を上まわったときに泥

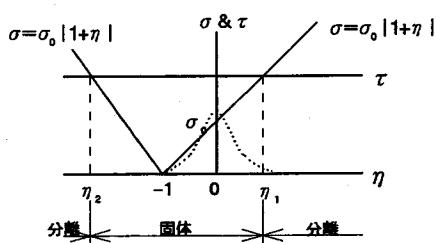


図-6 泥塊の応力と分離との関係

塊の分離が生じるものと考えられる。よって、

$$\frac{\sigma_{max}}{T_{max}} > \Psi_c \quad (22)$$

のときに泥塊は分離する。ここに、 Ψ_c ：分離限界値であり、数値については後で議論する。

式(21)と(18)より、式(22)はつぎのように書き直される。

$$\Psi |1+\eta(t)| > B\Psi_c \quad (23)$$

ここに、 B ： Ψ の変動値を補正する定数である。

η の確率密度関数として正規分布を考え、 η の標準偏差を η_0 とすると、図-6より式(23)が成り立つ確率 P_s は、

$$P_s = 1 - \int_{\eta_0}^1 p(\eta) d\eta \quad (24)$$

$$\begin{aligned} p(\eta) &= (1/\sqrt{2\pi\eta_0^2}) \exp(-\eta^2/2\eta_0^2) \\ \eta_1 &= B\Psi_c/\Psi - 1 \\ \eta_2 &= -B\Psi_c/\Psi - 1 \end{aligned} \quad (25)$$

である。したがって、汚濁負荷率 ϕ は式(20)と(24)より

$$\phi = 1 - \int_{\eta_2}^1 p(\eta) d\eta \quad (26)$$

となる。

式(26)を図示すると、図-7、8のようになる。ただし、図-7は $B\Psi_c=4.0$ として η を変化させたものであり、図-8は $\eta_0=1.0$ として $B\Psi_c$ を変化させたものである。 η_0 は、図-7の曲線の勾配を後に示す図-9の実験値の勾配との整合性より決定することとし、 $B\Psi_c$ は図-8および(6)の分離限界値 Ψ_c の検討から決定することとした。本研究では、

$$\eta_0=1.0, B\Psi_c=9.0 \quad (27)$$

とする。

式(26)を本研究における汚濁負荷率の算定式とする。なお、一般的な正規分布形の推定では標準偏差と期待値を推定するが、本研究で採用したEinsteinの方法は力学的な考察から限界値に着目して分布形を推定する方法であると考えることができる。

(5) 理論式と実験結果の比較

実験での底泥塊の大きさは、 $a=3.7\text{ cm}$ 、 $b=2.9\text{ cm}$ 、 $h_{max}=2.0\text{ cm}$ である。長方形板の抵抗力係数として $C_D=2.01^{14)}$ 、および水の密度 $\rho=1.0\text{ g/cm}^3$ とし、ポアソン比は粘土の一般的な値である $\delta=0.5^{15)}$ とすると、各ケースにおける結果はそれぞれ表-2のようになる。表中の圧力 p は、式(28)より求められた値である。

$$p = C_D \rho w f_0^2 / 2 \quad (28)$$

表-2の実験結果を理論と比較したものが図-9である。式(27)の定数値 η_0 は、図-9において「泥塊が自立する」仮定が成立する $\Psi \leq 20$ における傾向が一致するように決定したが、泥塊がすでに流体状となっている $\Psi > 20$ の領域でも、理論と実験結果は良い一致を示している。

(6) 泥塊の分離限界

本研究で導入した分離指數は、曲げモーメントにより発生する応力と泥塊のせん断強度により定義している。しかし、曲げモーメントに対する抵抗力は本来は引張強度であり、この場合には曲げ応力/引張強度=1のときが分離の限界値となると考えられ

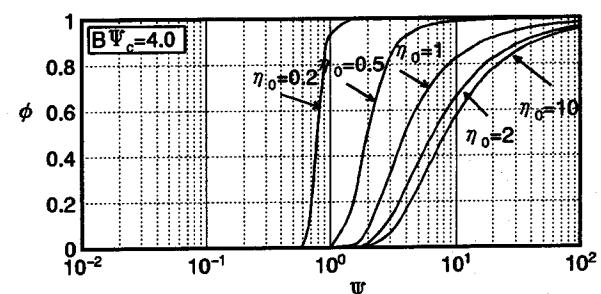


図-7 分離指數 Ψ と汚濁負荷率 ϕ
($B\Psi_c = 4.0$)

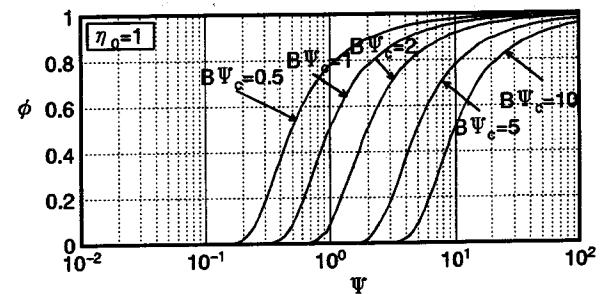


図-8 分離指數 Ψ と汚濁負荷率 ϕ
($\eta_0 = 1.0$)

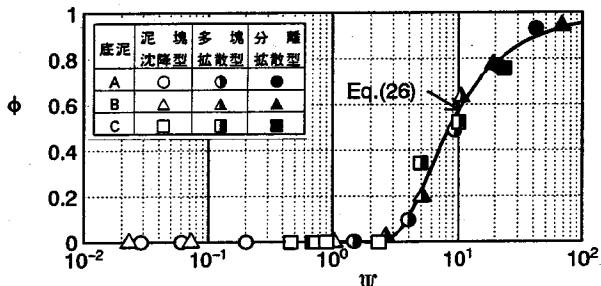


図-9 分離指數と汚濁負荷率

る。粘性土の引張強度 σ_t と粘着力 c およびせん断強度 τ_{max} の間には式(29)のような関係がある¹¹⁾。

$$\sigma_t = 2c \frac{\cos\theta_0}{1+\sin\theta_0} \quad (29)$$

$$\tau_{max} = \sigma_t \tan\theta_0 + c$$

ここに、 θ_0 ：内部摩擦角（粒子間の摩擦係数を角度で示したもの）である。

式(29)において、 $\theta_0=0$ となるような理想的な状態では $\sigma_t=2\tau_{max}$ となる。したがって、泥塊の分離限界としての分離指標 Ψ_c は、

$$\Psi_c = 2.0 \quad (30)$$

となると考えられる。しかし、実際の底泥では砂粒やベントスなど、引張強度を低減する成分が含まれていることが多く、 $\theta_0 \neq 0$ と考えられる。そこで、本研究においては図-9の実験結果との比較から、

$$\Psi_c = 1.5 \sim 2.0 \quad (31)$$

を泥塊の分離限界値と考えることとする。

(7) 沈降形態の分類と分離指標

図-9から、分離指標 Ψ は沈降形態と密接に関連していることが認められる。3種類の沈降形態に対して Ψ は、

- | | |
|-----------------------------|---------|
| $\Psi < \Psi_1$ | ： 泥塊沈降型 |
| $\Psi_1 \leq \Psi < \Psi_2$ | ： 多塊拡散型 |
| $\Psi_2 \leq \Psi$ | ： 分離拡散型 |
- $$(32)$$

となっており、沈降形態の分類の指標としても Ψ が有効であると考えられる。式(32)を、本研究における沈降形態の分類指標とする。 Ψ_1 と Ψ_2 は、図-9からそれぞれ $\Psi_1 = 1.5 \sim 2.0$, $\Psi_2 = 10 \sim 20$ とする。

4. 現地観測による検証

(1) 観測項目と方法

現地観測は、太平洋岸の水深41mの地点において行った。湾内の泊地と航路維持のため、グラブ船により浚渫された表-3に示すような土質特性を持つ底泥が、500～600m³積みの底開式バージまたはスプリット式バージによって、本投棄地点に運搬・投下されており、全体で約90,000m³の投棄が予定されている。

観測は、1988年と1989年のそれぞれ5～8月に5tクラスの漁船5隻を用いて行った。観測時の海象条件は、有義波高0.5～1mであった。また、本調査の前に観測地点を決定するための予備調査として流況観測を行った。その結果、北西方向の流れが

終日卓越したことから、図-10に示すような投下点を中心とした半径700mの円内において、投棄位置より下手側に50m～100m間隔で配置した5ヵ所を観測点とした。

使用した測定器は、塩分・水温計としてEILサリノメータ5台、流速測定として自記式アーンデラーフローメーター3台、CM-2型流速計1台である。また、濁度の測定にはFN-5型透過光型濁度計1台とYPC-1型透過光型濁度計5台、および魚群探知機²⁾を用いた。底泥の粒度分析にはコールターカウンターを使用した。

濁度、水温、および塩分の鉛直方向の測定間隔は、海面下1mより1mピッチで行った。流速測定は、底泥の投棄の影響が少ないと考えられる図-10に示す投棄位置から350m南西の位置において、上層(-3m)・中層(-20m)・下層(-38m)に流速計を配置して定点観測を行った。

濁度観測用魚群探知機は、観測船の船首の水切り音とスクリュー音の影響を避けるため、船中央付近の舷側部にディストリビューターを設置して測定した。測定範囲は、図-11に示すように投下点を中心として800mの範囲内であり、投下直後は投下地点周辺200mの範囲を重点的に計測し、その後は投下点から遠ざかる方法とした。測定点数は、船速5ktに対して、132点となった。

(2) 濁りの鉛直分布と沈降形態

図-12～14は、泥塊投下地点直下における異なる3回の泥塊投下直後(0～5分)の濁度(バックグ

表-3 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(kN/m ³)	11.2～12.9

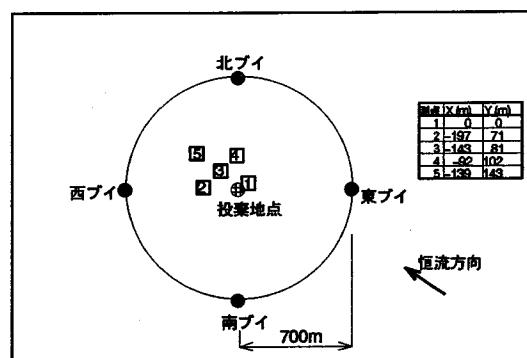


図-10 観測地点

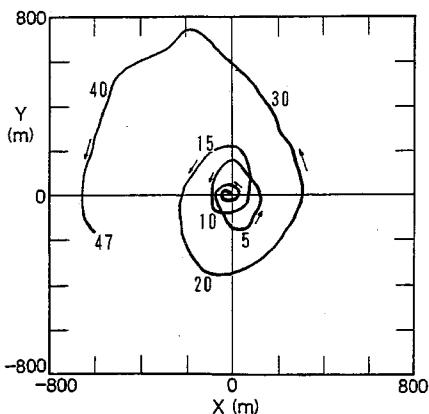


図-11 観測範囲と観測船走行軌跡（単位：分）

ラウンド濃度除去後）の鉛直分布である。

図-12は、含水比 $W=142\%$ の結果である。このときの泥塊は、グラブから浚渫したときの固形状がそのまま残るような状態である。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、33m 以深で大きな濁りが発生している。これは、底泥塊が一塊りとなって沈降し海底に衝突したときの砂の巻上げと思われる。この沈降形態は、泥塊沈降型であると考えられる。

図-13は、含水比 $W=170\%$ のときの結果である。水深 22m まではほとんど濁りが検出されないが、水深 23m ~ 27m の間で 50ppm 前後の濁りが発生し

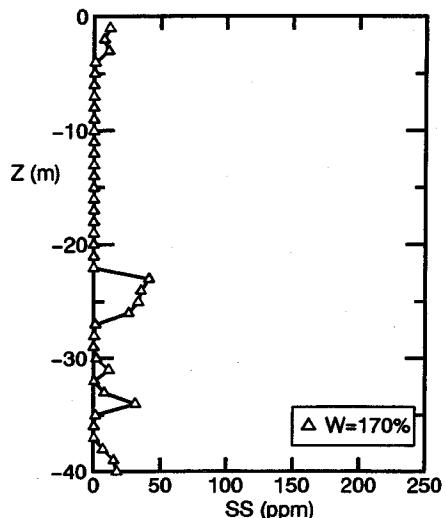


図-13 投棄地点の濁度の鉛直分布

($W=170\% : 0 \sim 5$ 分)

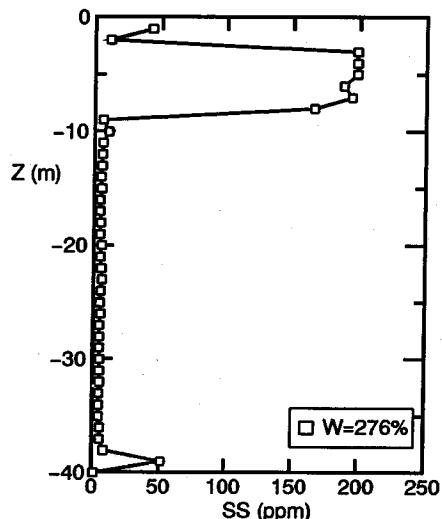


図-14 投棄地点の濁度の鉛直分布

($W=276\% : 0 \sim 5$ 分)

ている。これは、図-12と同様に途中までは一塊り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であると見られる。したがって、このときの沈降形態は多塊拡散型と考えられる。

図-14は、底泥の流動性が最も高い含水比 $W=276\%$ のときの結果である。水表面に近い水深 2m ~ 9m 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。このときの沈降形態は、分離拡散型と考えられる。

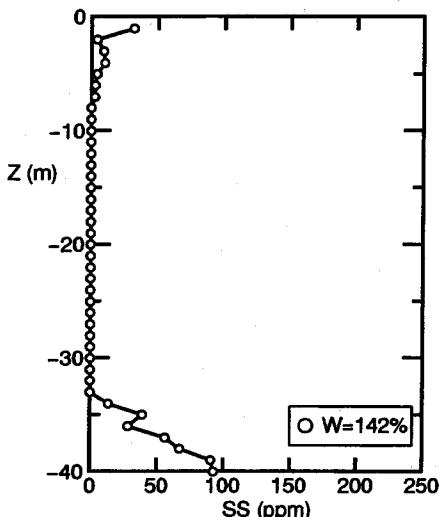


図-12 投棄地点の濁度の鉛直分布

($W=142\% : 0 \sim 5$ 分)

つぎに、それぞれの泥塊の条件から、式(18)により分離指数 Ψ を計算して、式(32)の分類と比較する。

まず、泥塊の沈降速度を算定する式として式(33)の沈降速度式¹⁴⁾を用いる。

$$w_f = \sqrt{(4/3)(s-1)gd/C_D} \quad (33)$$

投棄に使用した 600m^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、泥塊の単位体積重量は 11.6kN/m^3 、代表長さ d および効力係数 C_D は Wadell¹⁶⁾ の方法よりそれぞれ $d=8\text{m}$ 、 $C_D=5.7$ である。よって、泥塊の沈降速度は $w_f=1.82\text{m/s}$ となり、式(15)より泥塊内の最大曲げモーメントを計算すると、 $M_{max}=25.87\text{kN}\cdot\text{m}$ となる。したがって、泥塊の最大応力は式(17)より、

$$\sigma_{max}=2.16\text{kPa}$$

となる。図-12~14の泥塊それぞれの測定されたせん断強度は、

$$\tau_a=1.79\text{kPa} \quad (W=142\%)$$

$$\tau_b=0.839\text{kPa} \quad (W=170\%)$$

$$\tau_c=53.8\text{Pa} \quad (W=276\%)$$

であるから、分離指数 Ψ は式(18)より、沈降形態の分類は式(32)より、それぞれ、

$$\Psi_a=1.2 \quad (<\Psi_1=1.5 : \text{泥塊沈降型})$$

$$\Psi_b=2.6 \quad (<\Psi_2=10 : \text{多塊拡散型})$$

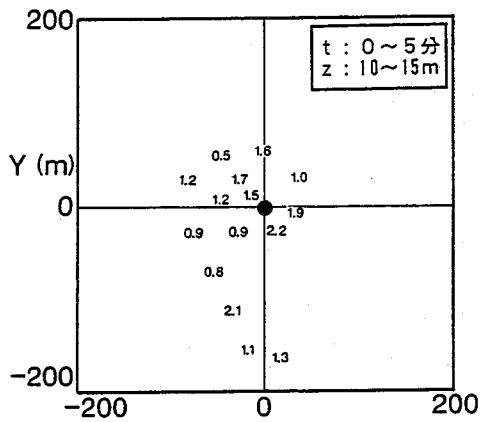
$$\Psi_c=40.1 \quad (\geq\Psi_2=10 : \text{分離拡散型})$$

となり、観測時の沈降形態と式(32)の分類が一致している。このことから、式(32)の分類が現地における海洋投棄においても妥当な結果を与えると考えられる。

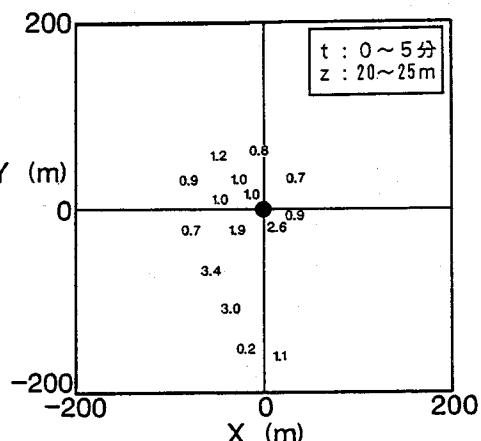
(3) 濁りの3次元分布と汚濁負荷量

図-15は、魚群探知機により3次元濁度分布を測定した結果である。投棄時の底泥の含水比は泥槽中央部で 170% ($\tau_{max}=839\text{pa}$)、泥槽端部で 185% ($\tau_{max}=527\text{pa}$) 前後であり、多塊拡散型に分類される沈降形態が予想された。図中、●は投棄地点を示し、数値はバックグラウンド濃度を除去していない濁度の測定結果（単位：ppm、以下同じ）である。

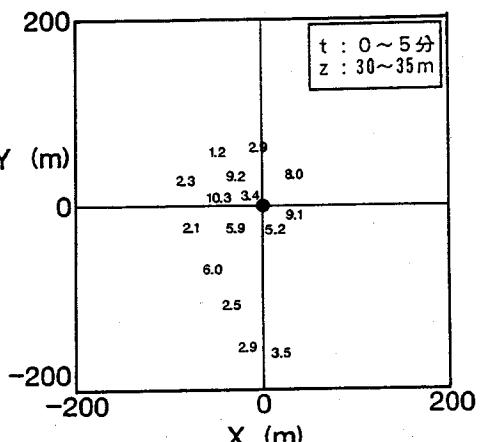
15m層、25m層では有意な濁りが見られず、35m層で 10ppm 前後の大きな濁りが発生している。このことから、3次元的な濁りの分布からも測定時の投棄泥塊は多塊沈降型を示していると推定され、本研究の分類と一致していると考えられる。また、35m層の大きな濁りは投下地点直下ではなく、多少離れた場所で測定されているが、これは泥塊が海底面に衝突したときに巻き上げた濁りを含んでいるた



(a) 10 ~ 15m 層



(b) 20 ~ 25m 層



(c) 30 ~ 35m 層

図-15 濁度の3次元分布（魚探：0 ~ 5分後）

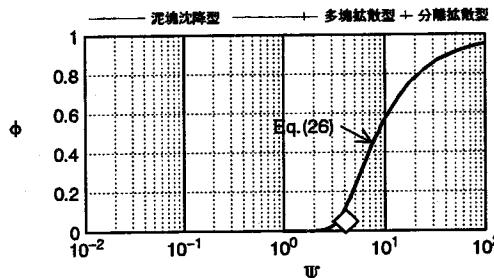


図-16 理論式と現地観測結果の比較

めと考えられる。

各層の濁度を積分すると、本投棄時の汚濁負荷量 q と汚濁負荷率 ψ が計算される。積分の方法は、投棄地点を中心とした軸対象を考え、5mごとの層内を多重円筒としてバックグラウンド濃度を除去した層内の濃度を算出した。その結果を、図-16に示す。ここで、泥塊の含水比は 185 %とした。本投棄時の観測結果は、表層 0 ~ 5m 部分の濃度が超音波の 2 次波の影響により算定されないため理論式より多少小さいもののほぼ一致しており、現地での底泥投棄において本研究の理論式が適用可能であると考えられる。

5. むすび

海洋投棄底泥の分離過程について実験的および理論的に検討した。その結果、底泥塊の分離の指標として、泥塊内の応力と底泥のせん断強度の比によって定義される分離指数を導入した。また、汚濁負荷量の負荷の割合として汚濁負荷率を導入し、分離指数との関係を検討した。さらに、現地観測により沈降形態の分類と汚濁負荷率について理論の検証を行った。

謝辞：本研究を遂行するにあたり、終始懇切なるご指導を賜った中央大学理工学部服部昌太郎教授に深甚なる謝意を表します。また、有益なご助言を頂いた中央大学理工学部久野悟郎教授、水口優

教授、山田正教授、ならびに茨城大学工学部三村信男教授に深く感謝の意を表します。さらに、室内実験と現地観測に多大なるご協力を頂いた東亜建設工業(株)技術研究所五明美智男氏、同社機電部加藤謙氏に謝意を表します。

参考文献

- 矢内栄二、加藤謙：底泥塊の沈降形態と拡散係数の評価法、海岸工学論文集、vol.36, pp.324-328, 1989.
- 矢内栄二、加藤謙：外洋投棄した底泥の拡散過程、海岸工学論文集、vol.37, pp.774-778, 1990.
- 矢内栄二：海洋投棄した底泥の分離過程、海岸工学論文集、vol.39, pp.956-960, 1992.
- 矢内栄二、五明美智男：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, 1988.
- 運輸省第四港湾建設局海域整備課：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, 323p., 1982.
- 港湾環境アセスメント手法の開発ワーキンググループ：港湾環境アセスメント技術マニュアル, 303p., 1978.
- 平野敏行、杉浦健二：河川流入のある小内湾の塩分分布に就いて、東海区水産研報告, vol.22, pp.1-15, 1962.
- Meakin,P. : Diffusion-controlled flocculation : The effects of attractive and repulsive interactions, *Journal of Chemical Physics*, vol.79, No.5, pp.2426-2429, 1983.
- Jones,R.B. and Burfield,G.S. : An analytical model of tracer diffusivity in colloid suspensions, *Physica* 133A, North-Holland, vol.133, No.1/2, pp.152-172, 1985.
- Maron,V.I. and Kleinman : Longitudinal diffusion of solid particle admixture in a flow through a tube, *International Journal of Multiphase Flow*, vol.10, No.5, pp.571-584, 1984.
- 大草重康(訳)：フロー リンの土質力学、第 1 卷、森北出版, 444p., 1969.
- Timoshenko, S.P. and Woinowsky-Krieger,S. : *Theory of plates and shells*, 2nd Ed., McGraw-Hill, 580p., 1959.
- Einstein, H. A. : The bed-load function for sediment transportation in open channel flows, *Technical Bulletin No.1026*, U.S.Dept. of Agric., Washington, D.C., pp.1-78, 1950.
- 土木学会編：水理公式集, pp.76-77, 1985.
- Rubey, W.W. : Settling velocities of gravel, sand, and silt particles, *American Journal of Science*, 5th Series, vol.25, No.148, pp.325-338, 1933.
- Wadell, H. : The coefficient of resistance as a function of Reynolds number for solids of various shapes, *Journal of Franklin Institute*, vol.217, 1934.

(1994.12.12 受付)

SETTLEMENT AND DISPERSION PROCESS OF OCEAN DUMPED MUD

Eiji YAUCHI

Experimental study was carried out to develop the settlement and dispersion process of ocean dumped mud. Based on this experiment, a physical model was proposed for predicting the turbidity that will produced by ocean dumping. Then, the validity of the model was confirmed by comparing with the field experiment.