

潮流による底質の浮き上りおよび浮遊土砂の拡散

——拡散方程式の数値解析を用いた検討——

白石英彦*・大西亮一**

1. 序 論

沿岸漁場の環境問題の1つに、サンドポンプ等を用いた海中工事での流出土砂による汚濁がある。この場合には流出量と海の拡散係数が明らかであれば拡散の問題として解析できるが、土砂は海底に沈殿するので沈殿を解析する必要がある。

一方、有明海では海底の土砂が潮流によって浮き上る現象が観察される。同様の現象は Wadden Zee¹⁾ や San Miguel 湾²⁾ から報告されている。このように潮流速の速い海域では海底に沈殿した土砂が再び浮遊することが考えられる。すでに Postoma は Wadden Zee における浮泥の調査結果を用いて、潮流により海底の土砂が浮遊する場合には湾奥へ微細粒子が運ばれ干潟を形成するメカニズムを図式を用いて説明した³⁾。これらの結果から考えて、有明海のように潮流速が大きい湾では、海中工事中に発生した浮遊土砂が海底に堆積しても再び浮遊し拡散することが考えられる。また汚濁濃度も潮流により浮き上る濃度と比較しなければならないと考えられる。

この問題に対して筆者らは沈降速度の項を含む拡散方程式の数値解析を用いて検討することにした。これまでに筆者の1人が数値解析の方法として前進型と連立型を併用する方法を報告したが⁴⁾、海底からの浮き上りと海底への沈殿を解析する方法が残されていた。本論文では海底からの浮き上りと海底への沈殿の解析方法として、開水路における芦田・道上の方法⁵⁾を応用することにした。

この結果、潮流のように流速が時間的に変化する流れに対する土砂の浮遊濃度と、バージ舟から流出する土砂の拡散を解析することができたので報告する。

なお、この解析方法を用いれば Wadden Zee において Postoma が示した潮流速により、浮遊した土砂が湾奥に運ばれるメカニズムについて、拡散の問題として解析することができると考える。

2. 解析方法

(1) 基礎式

移流項を含む拡散方程式は次の形で表わされる⁶⁾。

$$\begin{aligned} \frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} + v \frac{\partial c}{\partial y} + (w + w_s) \frac{\partial c}{\partial z} \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left(\kappa_x \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\kappa_y \frac{\partial c}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\kappa_z \frac{\partial c}{\partial z} \right) \\ + Q \cdot \delta(x_*) \cdot \delta(y_*) \cdot \delta(z_*) \dots\dots\dots (1) \end{aligned}$$

ここに、 c : 濃度、 x, y, z : 主流向を x とした座標、 $\kappa_x, \kappa_y, \kappa_z$: x, y, z 方向の拡散係数、 u, v, w : x, y, z 方向の流速、 w_s : 沈降速度、 Q : 土砂の混入源の強さ、 δ : Dirac の δ 関数、 x_*, y_*, z_* 混入点の位置である。

(2) 底面からの浮き上り量の解析

沈降性物質の拡散を考える場合には、底面からの浮き上りと底への沈殿を考えなければならない。筆者はこの解法として開水路における芦田・道上の方法⁵⁾を応用する。

いま底面から単位時間に単位面積当りの浮き上る量 q_{su} は、単位面積あたりの砂粒子の露出個数 N 、1個の砂粒子の質量 $\pi d^3 \rho_s / 6$ 、単位時間あたりの砂粒子の浮き上がる個数、および底面における浮き上る粒子の相対的割合に比例するとする。

すなわち、次式となる

$$q_{su} = K_1 \cdot N \cdot \frac{\pi}{6} d^3 \rho_s \frac{w_{pq}}{d} \int_{w_p}^{\infty} f(w_p) dw_p \dots\dots\dots (2)$$

ここに

$$f(w_p) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_p} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left(\frac{w_p}{\sigma_p} \right)^2 \right\} \dots\dots\dots (3)$$

w_p : 粒子の速度、 σ_p^2 : 砂粒の速度変動の分散、 N : $1/d^2$ 、 K_1 : 比例定数、 d : 粒径

$$w_{pq} = w_p - w_s \dots\dots\dots (4)$$

w_s : 粒子の沈降速度、 w_{pq} : 重力の効果を考慮に入れた粒子の速度、 ρ_s : 砂の密度、である。

式(2)をまとめれば次式となる。

$$q_{su} = \rho_s K [g(\xi_0) \cdot \sigma_p - w_s \cdot G(\xi_0)] \dots\dots\dots (5)$$

ここに、

* 農博 農林省農業土木試験場
** 正会員 農林省農業土木試験場

$$\left. \begin{aligned} \xi &= w_p / \sigma_p, \quad \xi_0 = w_s / \sigma_p \\ g(\xi_0) &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2}\xi_0^2\right) \\ G(\xi_0) &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{\xi_0}^{\infty} \exp\left(-\frac{1}{2}\xi^2\right) d\xi \\ K &= \frac{2}{3} K_1 \end{aligned} \right\} \cdots (6)$$

である。定常状態では底面付近の濃度 c_b は、浮き上りと沈降する量がつり合っていると考えられるので

$$q_{su} = \rho_s \cdot c_b \cdot w_s \cdots (7)$$

となる。

(3) 基礎式の差分化

基礎式は連立形と前進型を併用する形で差分化する^{4),6)}。差分間隔は図-1に示す。

混入点の解析には種々の方法が提案されているが、ここでは $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ に一様に入るものとして

$$\begin{aligned} Q \cdot \delta(x_*) \cdot \delta(y_*) \cdot \delta(z_*) &= Q \cdot \Delta V \\ &= Q \cdot \Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta z \cdots (8) \end{aligned}$$

とした。

(4) 境界条件の設定法

拡散方程式を解く場合に境界条件の設定は重要となる。境界条件は底と水面および水平方向の格子の端であたえなければならない。水平方向の格子端では全反射を仮定した。

底面では図-2に示すように底からの浮き上り量と底への沈降量、および拡散によって上方向へ移動する量によって決まるので水平方向を省略して

$$\frac{\partial c}{\partial t} + w_s \frac{\partial c}{\partial z} = \frac{1}{\delta z} \left\{ \kappa_z \frac{\partial c}{\partial z} \right\}_{z>0} - q_{su} \cdots (12)$$

となる。ここに δz : 微小量である。

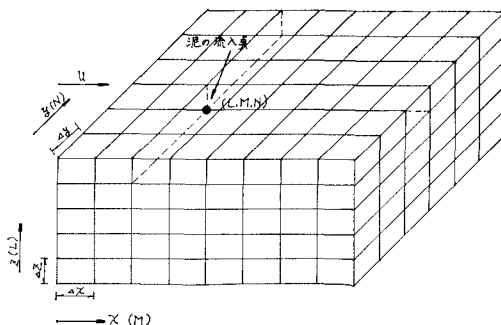


図-1 解析モデル

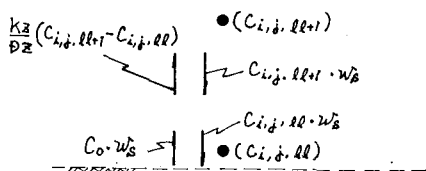


図-2 底面付近の泥の動き

水面では上からの補給がないので、

$$\frac{\partial c}{\partial t} + w_s \frac{\partial c}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\kappa_z \frac{\partial c}{\partial z} \right) \cdots (13)$$

を用いて計算する。

(5) 解析モデル

解析モデルは図-1に示すように3次元モデルとし、 x 方向に M ($M_{\max}=30$), y 方向に N ($N_{\max}=15$), z 方向に L ($L_{\max}=5$) の格子で計算する。拡散係数と流速は各格子の中間点であたえる。

差分間隔は $\Delta x = \Delta y = 500$ m, $\Delta z = (h/4)m$, $\Delta t = 12$ 秒とした。ここに、 h : 水深である。この場合に、 Δz が 3 m 以下になると、 Δt をより小さくしなければならないので水深が 12m 以上の場所の解析を行った。

次に、式(6)における定数 K の値は、芦田・道上⁵⁾によれば、 $K=0.025$ が上限としているが筆者は図-3に示すように、河川や、開水路での実測値を考えて、ここでは $K=0.001$ とした。

(6) 拡散係数

拡散方程式を解く場合には、拡散係数が重要となる。そこで拡散係数は開水路における結果を用いることにすれば、鉛直拡散係数 κ_z は次式になる。

$$\kappa_z = \kappa_* \cdot u_* \cdot h \cdots (14)$$

ここに、 u_* : 摩擦速度である。

摩擦速度 u_* は、マンニングの粗度係数 n と鉛直断面平均流速 u_s を用いて次式を用いる。

$$u_* = \sqrt{g \cdot n \cdot u_s \cdot h^{-1/6}} \cdots (15)$$

(7) 沈降速度

砂粒子の沈降速度はストークスの式で、

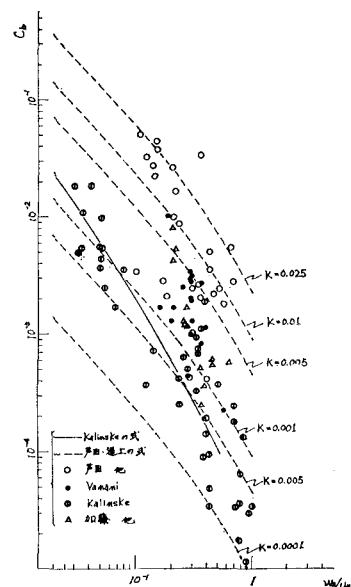


図-3 開水路における底面付近の濃度

$$w_s = \frac{1}{18} \left(\frac{\rho_s}{\rho_w} - 1 \right) \cdot \frac{g}{\nu} \cdot d^2 \quad \dots\dots\dots (16)$$

として与えられるが、その粒径は粘土よりも小さいのでブラウン運動によってコロイド状態となり、沈降しないと考えられる。しかし海水中では Na^+ の影響で綿毛化して沈降速度が増大するといわれているが、沈降速度をどの程度にとればよいであろうか。そこで筆者は 200 cc のビーカーに水道水を入れて、それに有明粘土（有明干拓の防潮堤前面の粘土）を約 1 万 ppm 程度になるように入れ十分かきまわした。このビーカーを 5 個用意して塩分が 1‰, 5‰, 20‰ 程度になるように食塩を入れて十分にかきまわした。その後静かに放置して観察した。この結果、5‰~20‰ では約 1 分 10 秒で綿毛化して沈降を始めた。沈降速度は図-4 に示すように l だけ沈下する時間 t を測定し、

$$w_s = \frac{l}{T} \quad \dots\dots\dots (17)$$

として求めた。この結果、 $w_s = 0.03 \sim 0.06$ cm/sec で平均 $w_s = 0.05$ cm/sec を得た。水道水では 10 時間でもほとんど濃度は変わらず、1‰ の塩分では約 1 時間程度で沈降した。この結果から海水中の塩分濃度が 18~32‰ と考えれば、沈降速度は $w_s = 0.05$ cm/sec といえる。

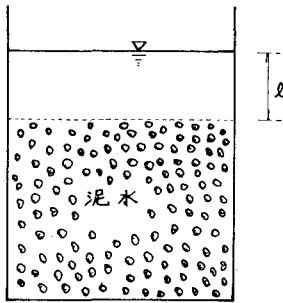


図-4 泥の沈降状態

3. 解析法の検討

(1) 沈降の解析

一様な濃度にした泥水は静止状態では下に沈降する。そこでこの計算モデルの初期条件として、1 000 ppm の一様濃度にして拡散係数 $\kappa_z = 0$ の場合の計算を行ったのが図-5 である。 $w_s = 0.01$ m の粒子は 5 分後には、

$$l = w_s \times T = 0.01 \text{ m/sec} \times 300 \text{ sec} = 3.0 \text{ m} \quad \dots\dots\dots (18)$$

となり、 $z = 9.0$ m より上では $w_s = 0.01$ m/sec の粒子の濃度は 0 となる。これに対して図-5 では表面で 400 ppm, $z = 9$ m で約 700 ppm となっている。

この原因としては、この数値解析は体積 ΔV

$$\Delta V = \Delta z \cdot \Delta x \cdot \Delta y \quad \dots\dots\dots (19)$$

の平均値を用いているために生じた誤差と考えられる。

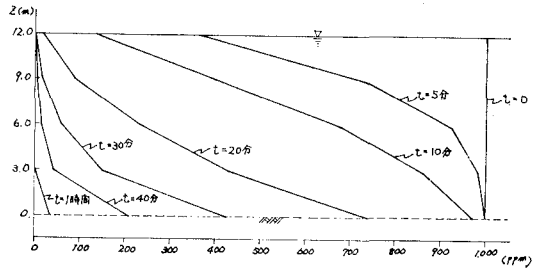


図-5 沈降状況 ($w_s = 0.01$ m/sec)

(2) 浮き上りの状況と定常濃度

底面から浮き上る濃度を計算するために、初期濃度を 0 として計算させた結果を図-6 に示す。この計算は水深 12 m, $n = 0.03$, 流速 $V = 1.0$ m として計算したものである。この結果図-6 では 2 時間ではほぼ定常に達しているといえる。図-7 に濃度の鉛直分布を示す。いま定常状態を考えれば、

$$w_s \frac{\partial c}{\partial z} = \kappa_z \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} \quad \dots\dots\dots (20)$$

となる。

式 (20) を積分して $z = 0$ で $c = c_b$ とすれば、

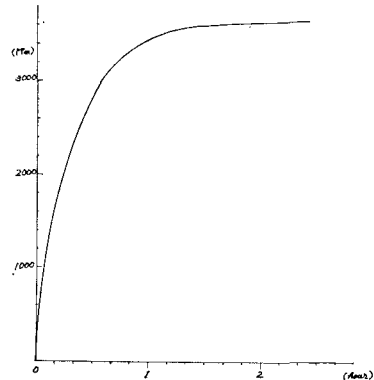


図-6 浮上り状況 ($w_s = 0.01$ m/sec, $u = 1.0$ m/sec, $n = 0.03$, $h = 12$ m)

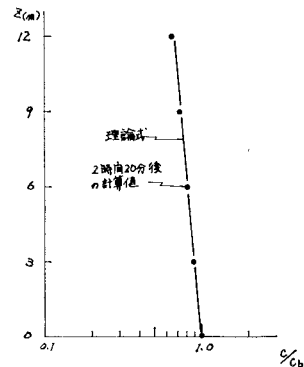
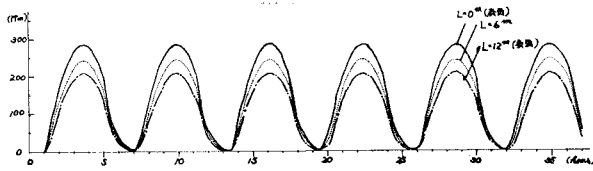
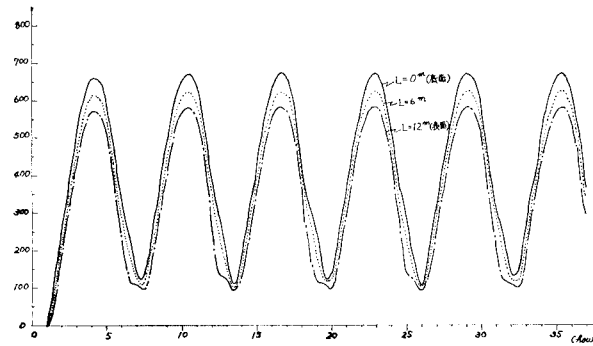


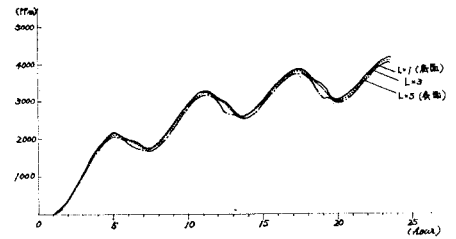
図-7 濃度の鉛直分布 ($w_s = 0.01$ m/sec, $K_z = 0.298$ m²/sec)



(a) ($w_s=0.7$ cm/sec)



(b) ($w_s=0.275$ cm/sec)



(c) ($w_s=0.04$ cm/sec)

図-8 浮遊濃度の時間変化

$$\frac{C}{C_0} = \exp\left(\frac{w_s}{K_z} \cdot z\right) \dots \dots \dots (21)$$

となる。よって片対数紙にプロットすれば直線となる。図-7 は式 (21) の関係を満足していることがわかる。

(3) 周期変動流と濃度変化

潮流のように周期的に変動する流れの場で、砂粒子がどのように浮遊したり沈降するかを見るために、初期濃度 0 で流速は、

$$u = 1.0 \sin \omega t \dots \dots \dots (22)$$

のように与えた。ここに、 $\omega = 2\pi/T$, T : 周期(=12.5)とした。この結果 図-8 に示すように、 $w_s=0.007$ m/sec では 0 からある値の間を周期的に変動する。また、 $w_s=0.00275 \sim 0.0009$ m/sec では最低は 0 とならないが、ほぼ周期変動を示す。しかし、 $w_s=0.001$ m/sec では濃度がどんどん高くなる。

4. 計算条件

(1) 底質の粒度組成

解析の対象地区は有明海と備讃瀬戸とで、それぞれの底質の粒度加積曲線を 図-9 に示す。

(2) バージ舟からの流出土砂量⁷⁾

バージ舟へサンドポンプで積み込む場合に越流水と一緒に土砂が流出する。この場合に沈降速度が $w_s=1.0$ cm/sec ($d=0.1$ mm) 以下はすべて流出すると考えられる。しかし、実測値を見るとは $w_s=1.0$ cm/sec 以下の 1/10 程度が流出している。

サンドポンプの能力は $1.92 \text{ m}^3/\text{sec}$ で土砂濃度は表-1 となる。

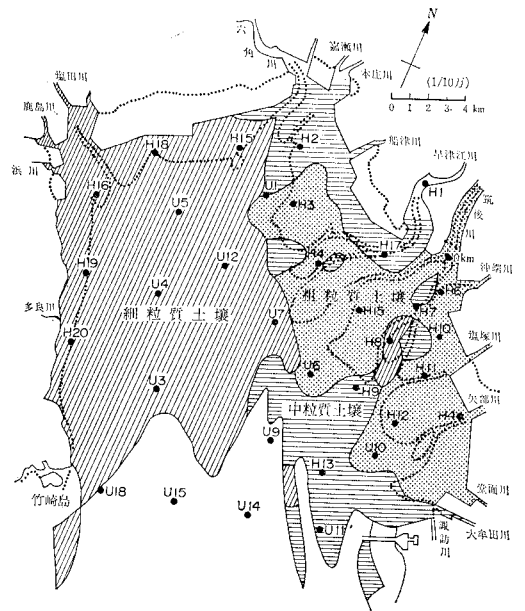


図-9 底質分布と測点

表-1 バージ舟から流出する土砂の濃度 (粒度組成から推定した値)

沈 降 速 度	土 砂 濃 度
0.275 cm/sec	32 000 ppm
0.05	45 000

5. 計算結果

(1) 海底からの浮き上り濃度

有明海における浮泥の調査データは干潟部で 図-10 に示すように多くとられているが、海中では数点あるのみである。この中の U_{18} 地点の測定値を用いて計算値と比較することを考えた。 U_{18} 地点では 1 潮汐間に 4 点の測定値があるが、位相差等が不明であるので H_{12} 地点の水位の測定値を用いて位相を決定し、流速 u は 10 時 30 分を 0 として

$$u = 0.68 \sin \omega t \quad \dots\dots\dots (22)$$

とした。海底粗度係数 n は 0.03 として浮遊濃度を予測したのが 図-11 である。

この結果、測定値が少ないので明確ではないが時間変化を示しているといえる。

(2) バージ舟から流出した土砂の拡散

サンドポンプでバージ舟に積み込んだ場合に、越流水とともに流出する土砂は拡散する。この状況を解析した結果を 図-12 に示す。この結果流入点で濃度は時間的に変化するが、ほぼ 2~3 波で定常的な変化となることがわかる。次に備讃瀬戸で実測された結果と比較すれば 図-13 となる。図-13 の結果から沈降速度が大きいものは近くに沈殿し、沈降速度が小さいものは遠くへ拡散する現象を示していることがわかる。

図-13 の実測値は種々の粒径の土砂を含んでいると

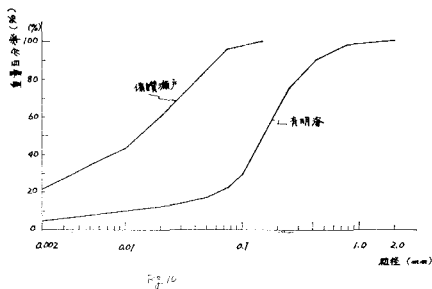


図-10 粒径加積曲線

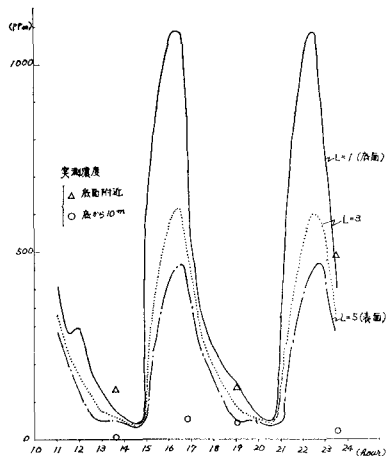


図-11 混合砂礫の濃度変化 ($K_s = 0.4 \cdot u_* \cdot z$)

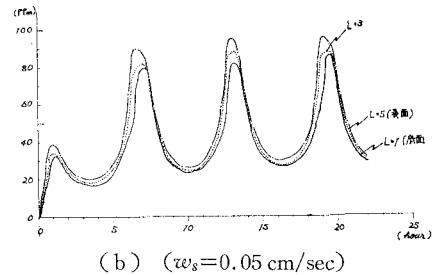
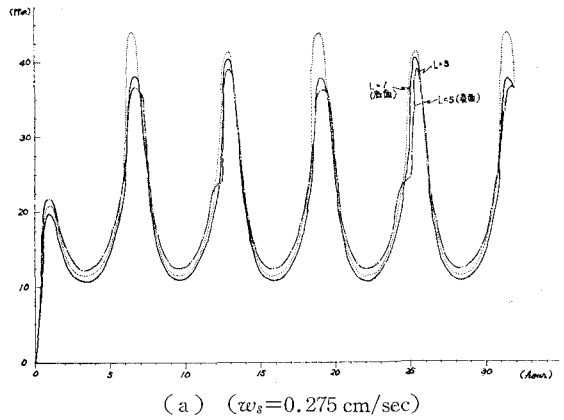


図-12 バージ舟から流入した土砂の濃度

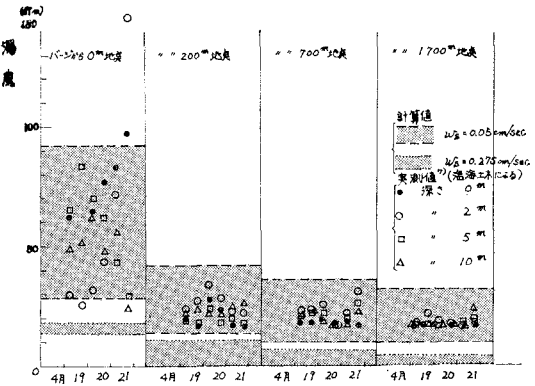


図-13 バージ舟からの流出土砂の濃度

考えられるが、実測の粒度加積曲線がないので比較できない。しかし計算値から考えて、遠くではほぼ微細粒子と考えられる。

6. 考 察

時間的に流速が変化する潮流などによって、海底の土砂が浮き上がったリ沈殿する場合の解析方法を提案した。底面の境界条件として底からの浮き上り量を開水路における芦田・道上の方法で推定することにより計算が可能になったと考えられる。しかし、定数 K の決定と拡散係数などについては今後現地調査データでより詳細に検討しなければならない。

バージ舟から流出する土砂の拡散についてはほぼ満足できる結果を得た。底からの浮き上がりが考えられる場所では、底からの浮き上がり量の影響が加わることになり、この解析方法で浮き上がり量をも計算することができる。しかし、ここでは実測のデータがないので割愛した。

7. 結 論

(1) 潮流により底質が浮き上る現象や、浮遊土砂の拡散を解析する場合に、底の境界条件の与え方として、底からの浮き上がり量の解析が必要である。この場合に、開水路における芦田・道上の方法を応用したもので計算できる。

(2) バージ舟から流出した土砂が潮流で拡散する場合の解析は、沈降速度の項を加えた拡散方程式で解析できる。

謝辞: 本研究は農業土木学会 汚濁拡散検討委員会(委員長 九大 藤川教授)の活動の一環として行ったものである。東工大 日野教授の御指導を賜った。また、東工大 吉川教授をはじめ水理研究会の方々より有益な討議と御教示を得た。ここに、これらの方々に対して深く感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) Postoma, H.: Sediment Transport and Sedimentation in Estuarine Environment, Estuaries edited by E. H. Lauff, Amererica Association for Advancement of Science, Washington D.C. (1967)
- 2) Smift, J. P. and R. G. Pirie: Fine Sediment Dispersal in the Gulf of San Miguel, Western Gulf of Panama, a Reconnaissance, J. Marine Reseearch, Vol. 28, No.1 (1970)
- 3) 吉川秀夫: Estuary の水理, 水工学シリーズ, 土木学会 (1970)
- 4) 大西亮一: 非定常拡散方程式の数値解法—沈降速度を考えた鉛直拡散—, 第21回海講論文集, pp. 335~340 (1974)
- 5) 芦田・道上: 浮遊砂に関する研究 (I)—河床付近の濃度—, 京大防災研報告第13号A, pp. 233~242 (1970)
- 6) 日野幹雄: 排煙濃度分布に関する数値解析 (I)—差分近似による方法—, 電力中研, 技術研究報告, No.65058 (1966)
- 7) 農業土木学会: 長崎南部地域総合開発事業の築堤工事について, 汚濁拡散検討委員会検討報告 (1976)