

力, ρ : 流体の密度, ρ_b : 底層における浮泥密度, K_x , K_z : それぞれ x , z 方向の渦動粘性係数, C : 浮遊泥濃度, w_f : 浮泥の沈降速度, E_x , E_z : それぞれ x , z 方向の渦動拡散係数, D : 浮泥の沈降量, P : 浮泥の巻き上げ量, η : 底面位置

2.3 境界条件

式 (1)~(5) を解く際に z 方向に関して海面と底面の2箇所境界条件を設定する必要がある。海面での条件としては、これを横切る濃度フラックスはないものとする。一方、底面での境界条件の与え方としては、大別して、i) ネットの濃度フラックス (沈降成分 + 拡散成分) をせん断力の関数として評価する。ii) フラックス中の乱れ拡散による成分 (巻き上げ項) のみを評価する。iii) 基準濃度を与える。の3タイプがあり、それぞれ Owen モデル⁵⁾, Sheng モデルおよび入江モデルで代表される。

上記3タイプのうち、巻き上げ、沈降に関する研究成果のモデルへの取り込みが容易であることから、i), ii) の Owen モデルと Sheng モデルを選び、モデルケースでの比較検討を行なった。

a) 巻き上げ・沈降量の評価モデル

i) Owen モデル

Owen らは、底面に作用するせん断力 (τ) と沈降限界におけるせん断力 (τ_d)、巻き上げ限界におけるせん断力 (τ_e) との大小関係により、次の3領域に分けて底面での沈降・堆積量 ($D-P$) を評価している。

・ $\tau < \tau_d$ の場合 [沈降領域]

$$(D-P) = w_f \cdot C_{bed} (1 - \tau/\tau_d) \dots\dots\dots (6)$$

⇒底泥は底面に沈降

・ $\tau_d < \tau < \tau_e$ の場合 [平衡領域]

$$(D-P) = 0 \dots\dots\dots (7)$$

⇒平衡状態にあり、洗掘も堆積も生じない

・ $\tau_e < \tau$ の場合 [洗掘領域]

$$(D-P) = -M(\tau/\tau_e - 1) \dots\dots\dots (8)$$

⇒底面は洗掘 (巻き上げ)

ここに、 M は経験定数であり、 C_{bed} は底面における濃度である。

ii) Sheng モデル

Sheng らは、底面に作用するせん断力 (τ) と洗掘限界におけるせん断力 (τ_e) との大小関係により次の2領域に分け、それぞれの領域での巻き上げ量 (P) と沈降量 (D) を分離して評価している。

・ $\tau < \tau_e$ の場合 [巻き上げがない領域]

$$D = \beta \cdot C_{bed}, P = 0$$

$$\Rightarrow D - P = \beta \cdot C_{bed} \dots\dots\dots (9)$$

ここに、 β : 堆積速度 (≒沈降速度 w_f)

・ $\tau > \tau_e$ の場合 [巻き上げがある領域]

$$\left. \begin{aligned} D &= \beta \cdot C_{bed}, P = -E_z \frac{\partial C}{\partial z} \Big|_{bed} \\ &= M(\tau/\tau_e - 1)^n \\ &= \beta \cdot C_{eq} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (10)$$

$$\Rightarrow D - P = \beta(C_{bed} - C_{eq}) \dots\dots\dots (11)$$

ここに、 C_{eq} : 底面における平衡濃度

(10) 式は、乱れ拡散による成分を底面に作用する流体力の大きさ (τ) と底泥特性 (τ_e, M) によって決まる固有の量と考えたことに対応し、底面でのネットのフラックスは重力による沈降成分 ($D = -w_f \cdot C_{bed}$) との和として評価される。

b) モデルの比較検討

上述の Owen モデルと Sheng モデルを用いて、トレンチを含む簡単なモデル形状 (図-2) に対して単層一次元のモデル計算を実施し、モデルの特性について検討を加えた。計算は外力として潮流のほかに時化時の波浪モデル (図-3) を想定して行なった。左右の境界では、一つ内側の点の前時間ステップの濃度を与えた。初期濃度は全領域で 0 ppm ($0 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^3$) とし、底面濃度 (C_{bed}) と平均濃度 ($\bar{C}$) との比率 α は 5.0 とした。沈降速度は $20 \mu\text{m}$ ($2 \times 10^{-5} \text{ m/sec}$) とし、また、沈降限界せん断力は 0.8 N/m^2 、巻き上げ限界せん断力は Owen モデルの場合は 1.0 N/m^2 、Sheng モデルの場合は 0.2 N/m^2 とした。経験定数 M は $0.18 \text{ kg/m} \cdot \text{min}$ とし、 n は 1.0 とした。また、底泥の見かけの比重は 1.2 とした。

上記の計算条件に対するせん断力 (τ)、上層濃度 (C) と底面の洗掘・堆積量 (h) の経時変化の計算例を、Owen モデルおよび Sheng モデルについてそれぞれ図-3~5 に示す。

Owen モデルの場合、暴波浪の通過時に巻き上がった

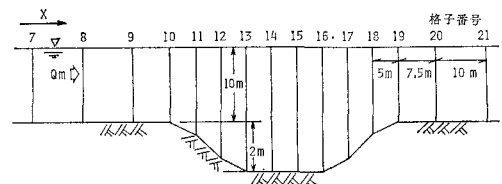


図-2 モデル形状

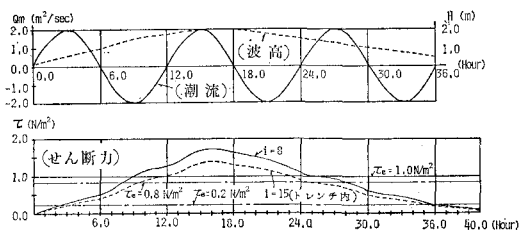


図-3 外力およびせん断力

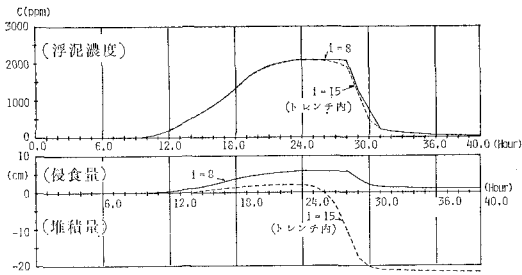


図-4 Owen モデルによる計算例

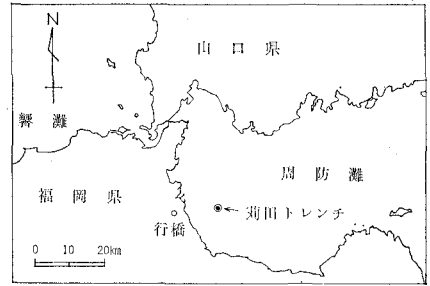


図-6 トレンチ位置

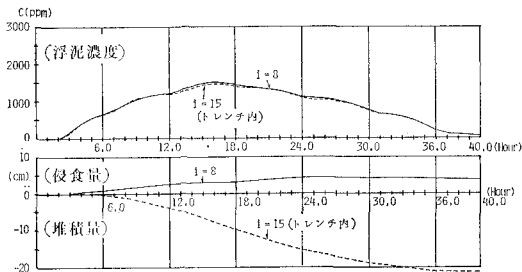


図-5 Sheng モデルによる計算例

大量の底泥が、波浪の通過後にトレンチ内に堆積する基本的な堆積現象は説明できるが、底面せん断力が巻き上げ限界値以上であれば上層の濃度とは無関係に常に巻き上げが生じ、その結果沈降が急激に生じる等の現実的でない点があることがわかる。

一方、Sheng モデルでは、巻き上げ限界以上になるとトレンチ外 ($i=8$) では巻き上げが生じ徐々に洗掘を受けるが、逆にトレンチ内 ($i=15$) では流入する浮泥が沈降し、連続的な堆積が生じている。これらの傾向は Owen モデルの場合と比較してより現実的と考えられ、本報告では底面の巻き上げ・沈降量の評価モデルとして Sheng モデルを採用し、現地トレンチへの適用を行なった。

3. 現地浮泥堆積問題への適用

ここでは、2. で得られた浮泥堆積量予測モデルを苅田トレンチに適用してトレンチ内堆積状況の追算を行ない、その有効性を検討した。位置図を図-6 に、平面図および断面図を図-7 に示す。

3.1 計算条件

a) 諸条件

計算範囲は、トレンチを中心に北西～南東に伸びる約 1.5 km の範囲である。計算格子は可変格子で、水平・鉛直方向ともトレンチに近づくにつれて細メッシュになるように設定した。水深は 10 m で、トレンチ内水深は 12 m である。初期濃度は 0 ppm ($0 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^3$) とし、

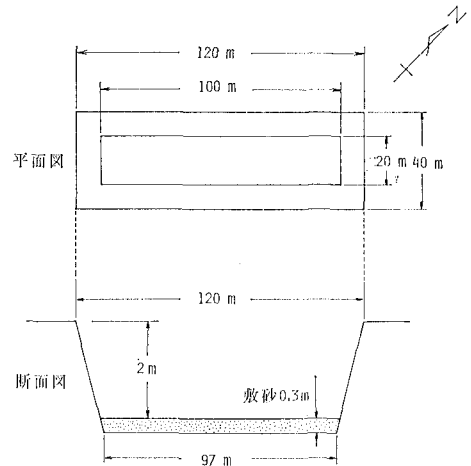


図-7 トレンチの平面図および断面図

水平・鉛直拡散係数はそれぞれ $K_x=1000$, $K_z=1 \text{ cm}^2/\text{sec}$ とした。また、底泥の見かけの比重は 1.2 g/cm^3 とした。

堆積量予測計算における流れの場としては、平均流速が十数 cm 毎秒となるように潮流計算を行ない、この結果を用いた。

b) 諸パラメーターの設定

底泥の堆積・洗掘量を精度よく求めるには、モデル化に際して必要なパラメーター（浮泥の沈降速度 w_f , 限界せん断力 τ_c , 経験定数 M ）について検討する必要がある。

i) 沈降速度 w_f

沈降速度を推定する方法として、ストークス式によって推定する方法、楠田ら⁶⁾の提案式を用いる方法および Owen, Krone ら⁷⁾の提案式を用いる方法等があるが、ここでは浮泥粒子の粒径を $20 \mu\text{m}$ ($2 \times 10^{-5} \text{ m}$) とし、ストークス式より $w_f=3.6 \times 10^{-4} \text{ m/sec}$ とした。

ii) 経験定数 M

巻き上げの評価式 (10) において、楠田ら⁶⁾がまとめた M , n の値のうち、貯水池泥における $M=0.18$,

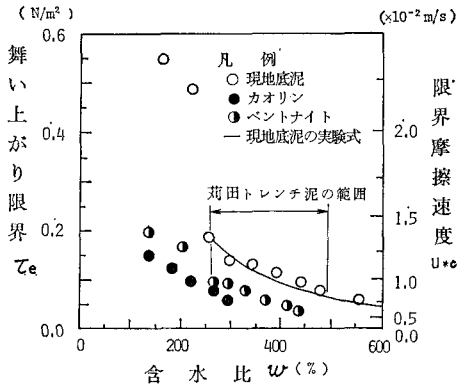


図-8 含水比と限界せん断力

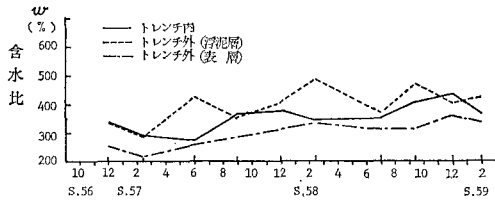


図-9 トレンチ周辺底泥の実測含水比の推移

$n=1.0$ の値を用いた。

iii) 限界せん断力 τ_e

洗掘限界におけるせん断力 (τ_e) は浮泥が巻き上げられ始めるときせん断応力である。しかし、測定が困難なことから、この定義には曖昧さがあり、提案者により定義は異なる。運輸省第四港湾建設局の調査によると、刈田港沖の現地泥を用いての円形水槽実験より、舞い上がり限界の掃流力（限界せん断力）と含水比との関連性（図-8）を指摘しており、含水比が256%以上の場合、次式で表わされとしている。

$$\frac{\tau_e}{\tau_0} = \alpha \left(\frac{w}{w_0} \right)^{-1.35} \quad \dots\dots\dots (12)$$

ここに、 $\alpha \tau_0 w_0^{-1.35} = 3300$

τ_0, w_0 : それぞれ限界せん断力と含水比の初期値

図-9 および 10 にトレンチ周辺の含水比およびこれを用い、式 (12) によって求めた限界せん断力の経時変化を示す。ここでは、堆積厚は時化の直前の含水比に左右されと考え、限界せん断力は時化によってその含水比に対応した値を用いた。また、限界せん断力が一定の場合 ($\tau_e=0.1 \text{ N/m}^2$) についても計算し、堆積厚の比較を行なった。

c) 底面せん断力および計算ケース

調査期間中の主な時化の底面せん断力を、田中・首藤⁴⁾の抵抗則を用いて計算した。同期間中の $H_{1/3} \geq 1.0 \text{ m}$

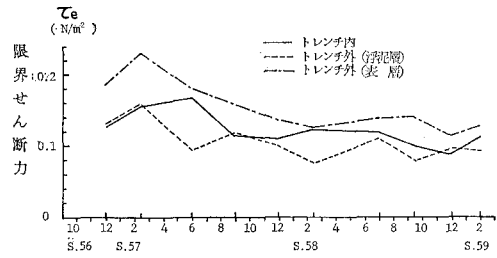


図-10 トレンチ周辺底泥のせん断力の推移

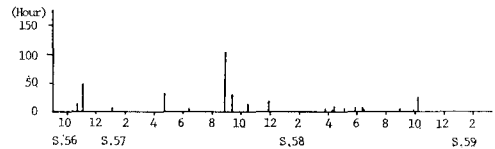


図-11 各時化の $\sum(\tau/\tau_e - 1) \cdot dt$

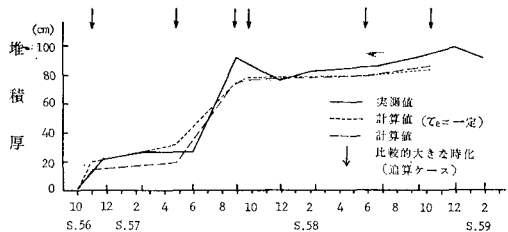


図-12 堆積厚の比較

となるすべての時化の底面せん断力より、巻き上げ量の大きさの目安として $\sum(\tau/\tau_e - 1) \cdot dt$ を求め、プロットしたものを 図-11 に示す。これより、トレンチ内の浮泥堆積量の追算には、昭和 56 年 10 月～昭和 59 年 2 月までの間の 6 回の時化を対象にした。

3.2 計算結果

調査期間中の 6 回の時化の追算を行なった結果を実測値とともに 図-12 に示す。一定の限界せん断力で追算した場合、計算値は実測の堆積厚に近い値を示している。また、各時化毎に限界せん断力を変えた場合はさらにトレンチの堆積状況を良く説明できる。

実測の堆積厚をみると、トレンチ掘削後昭和57年6月までは約 23 cm の堆積、9月までにさらに約 69 cm 堆積し、それ以後はほぼ横這いとなっている。昭和 56 年 10 月～昭和 57 年 5 月の間に大きな時化が 2 回発生しているにも拘わらず 23 cm の堆積にとどまっているのは、トレンチ外底泥の含水比が小さかったことによるものと考えられる。昭和57年6月～8月の間に約 69 cm 堆積したことについては、底泥の含水比が大きいことにより巻き上げられ易い状態にあったことおよび8月末に来襲

した台風の規模が大きかったことによるものと考えられる。また、昭和57年9月以降は堆積厚が90cm前後の状態が続いているが、これは、トレンチ深さが浅くなったことによりトレンチ内外の底面限界せん断力の差が小さくなったこと、および昭和57年8月までの大きな時化に匹敵する時化が発生しなかったことが原因と考えられる。

4. あとがき

以上、本報告では巻き上げ・沈降量の評価モデルとして Sheng のモデルを採用し、浮泥堆積量予測モデルを作成した。さらに、このモデルを用いて荻田港における波浪データをもとに主な時化について荻田トレンチにおける浮泥堆積厚の追算を行なった。この際の重要なファクターとしては現地の波浪条件が上げられる。このほかに沈降速度 w_f 、限界せん断力 τ_e および経験定数 M 等のパラメーターも重要であり、既往の調査・研究事例を参考に検討を行ない妥当と考えられる値を設定した。これらの結果から、波浪データおよび底泥の含水比とでトレンチ内堆積厚の推移についての追算は可能であり、本モデルの堆積量の量的な推定に有効性が確かめられた。

今後の課題としては、これまで巻き上げの主な要因となる波作用下でのトレンチ内への堆積機構に関する水理実験・実測の報告例は見られないことから、今後水理実験等による堆積機構の検討が必要と考えられる。また限界せん断力の定義は曖昧であり、その値にはある幅が

存在する。従って室内実験、実測から、より詳細な検討が必要である。

本報告は、運輸省第四港湾建設局が実施している周防灘における底質浄化実施設計調査の一部をとりまとめたものである。本調査の実施に当たり、運輸省港湾局の御指導、御助言を頂いたほか、現地調査および資料収集に際して、運輸省第四港湾建設局荻田港工事事務所の方々の多大な御協力を得ました。ここに記して謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) Bijker E. W.: Sedimentation in channels and trenches, Proc. Coastal Engineering, Vol. 1, pp. 1708~1718, 1980.
- 2) 入江 功・栗山善昭: 底質の移流・沈降過程を入れた航路・港内埋没の予測, 港研報告 Vol. 24, No. 2, pp. 157~204, 1985.
- 3) Sheng Y. P. and W. Lick: The transport and resuspension of sediments in a shallow lake, Jour. of Geophysical Research, Vol. 84, No. C4, 1979.
- 4) 田中 仁・首藤伸夫: 波と流れの共存時の底面摩擦係数に関する実験, 第27回海岸工学講演会, 1980.
- 5) Odd N. V. M. and Owen M. W.: A two-layer model of mud transport in the Thames estuary, Proc. of the Institute of Civil Engineering, 1972.
- 6) 楠田哲也: 底泥の輸送現象と水質に及ぼす影響, 水工学シリーズ, 83-A-7, 1980.
- 7) The Task Committee on Causes and Effects of Shoaling in Navigable Waters of the Committee on Waterways of the Waterway, Port, Coastal and Ocean Division: Shoaling processes in navigable waters, Proc. W. W. of A.S.C.E., pp. 199~221, 1983.