

Fluid mud を考慮した三次元シルテーション 予測モデルについて

鶴谷 広一* ・村上 和男** ・入江 功***
笹嶋 博**** ・糸井 正夫*****

1. ま え が き

シルテーションによる港湾・航路の埋没問題に対処するため、熊本港では現地観測や数値計算による検討の結果、潜堤方式が採用され、高さ1~1.5mの潜堤が約2,000mの航路の両側に設置された。引き続き潜堤の埋没軽減効果の確認のための現地観測が行われ、貴重なデータが得られつつある。しかし、平成12年の本格開港まで、今後も熊本港の建設は進められ、航路の水深も現在の4.5mから10mへと深くなり、土捨て場の確保が困難となる。したがって、浚渫による航路水深の維持も難しくなることから、将来の埋没量の正確な予測と、必要ならば埋没対策案を立案することが今後の緊急の課題となっている。これまでの現地観測の結果から、特に時化のときに高濃度な浮泥流動層が形成され、これが航路・泊地に堆積する主要因であることがわかっている。しかし、これまではこの高濃度浮泥流動層 (fluid mud) を扱うことのできる妥当な数値モデルがなかったために、今後の埋没予測と合理的な埋没対策案を精度良く検討するには問題が生じる。そこで、本研究では、既存の多層レベルモデルに fluid mud の流動計算を組み込み、より現実的な問題に対処し得る汎用性の高いシルテーション予測モデルを開発した。

2. モデルの概要

既存の三次元シルテーション予測モデルとしては、港湾技術研究所で開発された多層レベルモデル (港研モデル, 鶴谷ら (1989)) と二層流としての取り扱いをした第四港湾建設局のモデル (四建モデル, 渡邊ら (1993)) がある。本研究では、港研モデルを主体として、これに fluid mud の流動計算を組み込んだ合成モデルを新たに作成した。fluid mud の運動の計算には、ビンガム流体としての特性を考慮に入れた Odd and Cooper (1989) のモデル

を用いた。合成モデルの構成を図-1に示す。潮流による流れの場の計算には、鶴谷ら (1989) と同じ多層レベルモデル (本研究では7層) を用いた。これに、別途求めておいた波の分布を考慮して波と流れの共存場でのせん断応力を求め、底泥の巻き上げ量を計算した。fluid mud は、浮遊状態の泥の沈降によって形成されるとした。図-2に底泥の移動形態と、本モデル内での位置づけを示す。

本モデルでは fluid mud を考えているので、底泥と水層間での泥の交換機構についての考え方を再整理しておく必要がある。以下に、各段階ごとの底泥の移動形態の本モデルでの考え方を、図-1, 2に基づいて述べる。

(1) 沈降による fluid mud の形成

浮遊状態から泥が沈降することによって fluid mud が形成されるとした。泥の沈降速度 w_s は濃度の関数であり、鶴谷ら (1989) と同様に与えられるとした。ただし、hindered settling となる高濃度域については沈降速度は一定とし、濃度の上昇による沈降速度の減少については

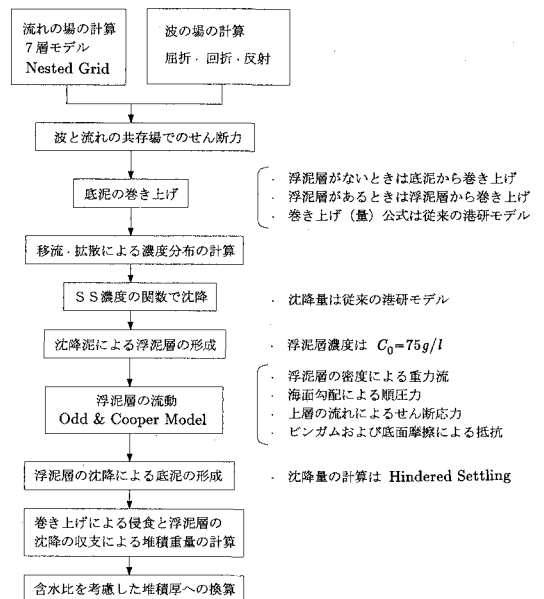


図-1 合成モデルの構成

* 正会員 工博 運輸省港湾技術研究所海洋水理部水理研究室長
 ** 正会員 工修 運輸省港湾技術研究所海洋水理部海域環境研究室長
 *** 正会員 工博 九州大学教授 工学部建設都市工学科
 **** 工修 前運輸省第四港湾建設局下関調査設計事務所長
 ***** 新日本気象海洋株式会社沿岸域技術部部長

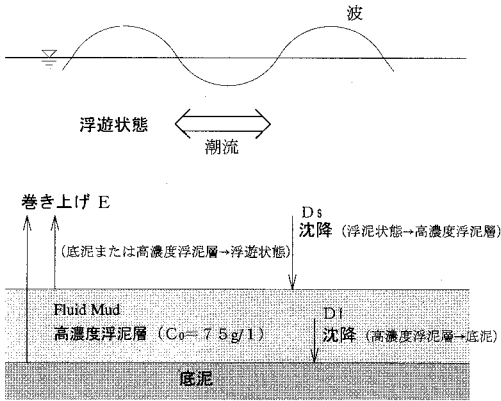


図-2 底泥の移動形態の模式図

取り入れていない。沈降速度 w_s を式で書くと次のように表される。

$$w_s = A_1 C^{B_1}, \quad (C < C_H)$$

$$= A_1 C_H^{B_1} [1 - A_2 (C - C_H)]^{B_2}, \quad (C \geq C_H) \dots (1)$$

ここに、 $A_1 = 0.6 \times 10^{-3} \text{ m}^4/\text{kg/s}$, $B_1 = 1$, $C_H = 4.3 \text{ kg/m}^3$ であり、本モデルでは C_H 以上の濃度で $w_s = 0.26 \text{ cm/s}$ の一定値である。

(2) fluid mud から底泥への沈降

波と流れの共存場で底面に作用するせん断応力と浮泥層の流動による底面せん断応力が小さいとき、浮泥層からの沈降が起こり、沈降した泥は底泥化するとした。沈降量 D_f は次の式で表されるとした。

$$D_f = w_s \left(1 - \frac{\tau_b}{\tau_a} \right) C_0 \dots (2)$$

ここに、 τ_b は底面に作用するせん断応力、 τ_a は沈降に関する限界せん断応力（四建モデルと同様に 0.07 Pa とした）、 C_0 は底層の SS 濃度、 w_s は沈降速度（Hindered Settling を仮定して 0.01 cm/s とした）である。また、fluid mud の沈降に関する底面せん断応力 τ_b を評価する場合には、fluid mud が厚い場所では底面せん断応力が上の水層からかかるせん断応力よりも小さくなることを考慮して、四建モデルで用いたのと同様に、Tanaka・Shuto (1981) から求まるせん断応力 τ_i と、浮泥層の流れのみによって決まるせん断応力 τ_0 (マンシングの粗度公式) を用いて、以下のように評価した。

$$\tau_b = \tau_0, \quad (\eta \geq 30 \text{ cm}) \dots (3)$$

$$\tau_b = \tau_i - \frac{\eta}{30} (\tau_i - \tau_0), \quad (0 \leq \eta < 30 \text{ cm}) \dots (4)$$

この式の意味は、浮泥層厚が 30 cm より大きいときは、底面せん断応力は τ_0 となり、浮泥層厚が 0 のときは、底面せん断応力は波と流れの共存場でのせん断応力 τ_i になるということである。中間の厚さではこれらの間を線形に補間したことになる。

(3) 底泥および浮泥層の巻き上げ

Odd and Cooper のモデルでは、浮泥層が底泥面を侵食するとしているが、ここでは底泥の侵食に関しては、従来の港研モデルと同様の以下の公式を用いた。

$$E = M \left(\frac{\tau_i}{\tau_e} - 1 \right) \dots (5)$$

ここに、 τ_e は巻き上げに関する限界せん断応力、 M は巻き上げ定数、 τ_i は上の水層の波と流れの共存場での底面せん断応力であり、fluid mud の流動による底面せん断応力ではないと考えた。

巻き上げられた底泥は、直接 fluid mud ではなく、上の水層に浮遊状態に入るものとした。この巻き上げによって侵食される SS は、浮泥層があるときは浮泥層から、浮泥層がないときは底泥から供給されるものとした。

(4) fluid mud の流動計算

流動計算の基礎方程式は Odd and Cooper (1989) が与えたビンガム流体に対する連続の式と、運動量の保存式を用いる。

連続の式

$$\frac{\partial d_m}{\partial t} + \frac{\partial u_m d_m}{\partial x} + \frac{\partial v_m d_m}{\partial y} - \frac{1}{C_0} \frac{d m}{d t} = 0 \dots (6)$$

ここに、 d_m は fluid mud 層の厚さ、 u_m と v_m はそれぞれ x, y 方向の平均流速成分、 $d m / d t$ は正味の泥の質量の変化量、 C_0 は fluid mud 層の泥の濃度で一定値と仮定するが、ここでは Odd and Cooper と同様に 75 kg/m^3 とした。 $d m / d t$ は巻き上げ ($d m / d t$ には負に寄与する) と、浮遊状態から浮泥層への沈降 ($d m / d t$ には正に寄与する)、および浮泥層から底泥への沈降 ($d m / d t$ には負に寄与する) のバランスによって決まる。

運動量の保存式

移流項と渦動拡散項が他の項に比べて小さいとすると、 x, y 方向の運動方程式はそれぞれ次のように表される。

$$\frac{\partial u_m}{\partial t} + g \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{g \Delta \rho}{(\rho_0 + \Delta \rho)} \left(\frac{\partial \eta_m}{\partial x} - \frac{\partial \eta}{\partial x} \right) + \frac{1}{d_m (\rho_0 + \Delta \rho)} \left(\tau_0 + \tau_B \frac{u_m}{(u_m^2 + v_m^2)^{1/2}} - \tau_i \right) = 0 \dots (7)$$

$$\frac{\partial v_m}{\partial t} + g \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{g \Delta \rho}{(\rho_0 + \Delta \rho)} \left(\frac{\partial \eta_m}{\partial y} - \frac{\partial \eta}{\partial y} \right) + \frac{1}{d_m (\rho_0 + \Delta \rho)} \left(\tau_0 + \tau_B \frac{v_m}{(u_m^2 + v_m^2)^{1/2}} - \tau_i \right) = 0 \dots (8)$$

ここに、

$$\tau_0 = \rho_m f u_m (u_m^2 + v_m^2)^{1/2}$$

$$\tau_i = \rho_m f \Delta u (\Delta u^2 + \Delta v^2)^{1/2}$$

である。また、 $\Delta u = u - u_m$, $\Delta v = v - v_m$, f は摩擦係数、 η は基準面からの水面の高さ、 η_m は基準面からの浮泥層の高さ、 τ_B はビンガム降伏値、 $\rho_m = \rho_0 + \Delta \rho$ は fluid mud の

密度、 ρ_0 は上層の水の密度である。

浮泥層に作用する圧力勾配と水の層からのせん断応力の和（これが浮泥層に対する駆動力である）がビンガム降状値 τ_B より大きいときに浮泥層が流動するものとした。ここでは $\tau_B=0.1$ Pa とした。

3. ポケット浚渫の再現計算

(1) 異常時の埋没再現計算

熊本港での事前調査で得られたポケット浚渫の埋没データ（昭和62年8月29日から9月2日までの時化の期間の埋没量）の再現を行った。波浪については、従来の港研モデルでは一定の波高が6時間継続するものとしたが、今回は、**図-3**に示すように実測の有義波高の経時変化を与えた。各ポケットごとの実際の埋没量を**表-1**に示す。ポケット3が高さ1mの潜堤で囲まれたもので、埋没量が小さい。詳細は、鶴谷ら（1989）を参照されたい。今回の合成モデルの再現計算において、巻き上げを支配する式(5)の中の定数を $M=0.09$ kg/m²/min, $\tau_e=0.13$ Pa とした結果が**表-2**である。

従来の港研モデルでは、泥の沈降量に関しては式(2)と異なり、沈降確率 $(1-\tau_b/\tau_d)$ を考慮していない。これは、沈降量を大きく与えることになるため、ポケット内の埋

没量を計算で再現するためには巻き上げに関する式(5)の中の定数 M を 1.2 kg/m²/min と大きく与える必要があった。van Leussen and Dronkers (1988) によれば、通常 M の値は $0.006\sim 0.24$ (kg/m²/min) の範囲にあるとされているが、今回の合成モデルで用いた M の値はその範囲内に入っている。**表-1**と**2**を比較すると、合成モデルはほぼ妥当な結果を与えていると言える。ただし、今回の計算では波による底泥の質量輸送量は考慮していない。従来の港研モデルは底泥の移動を全て移流・拡散で扱い、fluid mud による移動は考慮されていなかった。したがって、潜堤のような構造物による底泥の移動を抑制する効果を小さめに評価する傾向にあった。一方、四建モデルでは二層流の上層は泥を含まず、底層が泥を含む層であるとした扱いをしているため、底層厚が潜堤の高さを超えなければ泥は潜堤を全く通過できないことになる。今回の合成モデルは両者の欠点を補ったものであり、より実際の現象に近付いたモデルであると言える。**図-4**は低潮時（18時、**図-3**参照）の fluid mud の流動ベク

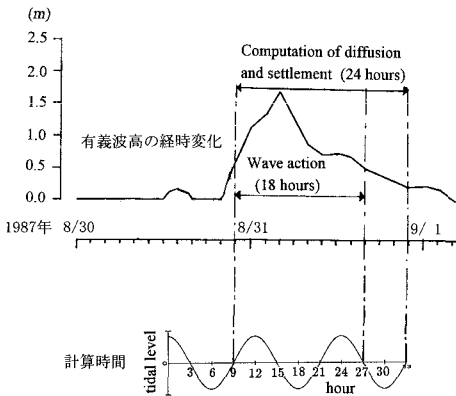


図-3 潮位変動および有義波高と波の作用時間の関係

表-1 実測の各ポケット内の埋没量と含水比 (昭和62年8月29日～9月2日)

	ポケット1	ポケット2	ポケット3
埋没量 (cm)	63	60	-2
含水比 (%)	231	189	192

表-2 埋没量の計算結果

	ポケット1	ポケット2	ポケット3
埋没量 (cm)	87.6	53.6	4.5

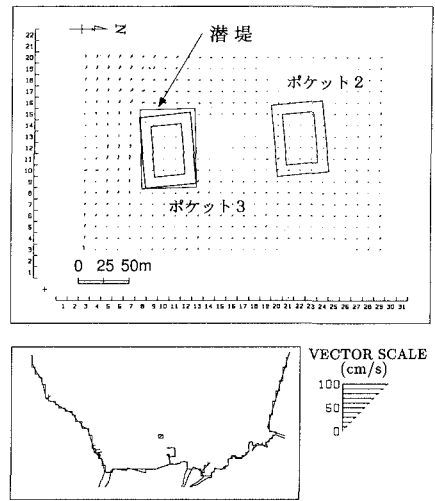


図-4 fluid mud の流動ベクトル図 (低潮時, 18時)

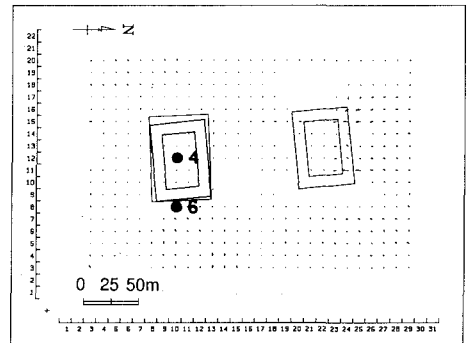


図-5 fluid mud の流動ベクトル図 (上げ潮時, 21時)

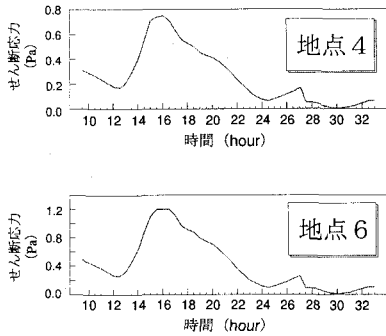


図-6 せん断応力の経時変化図 (地点4, 6)

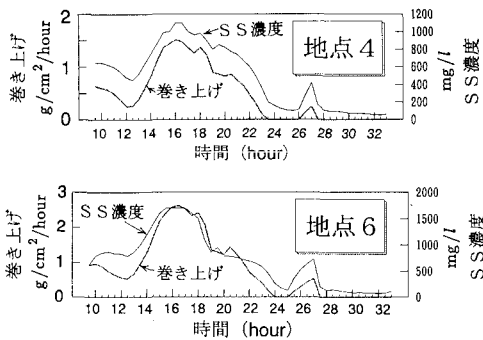


図-7 巻き上げ量とSS濃度の経時変化図

トル図で, fluid mud がポケット3の潜堤に止められて回り込む状況が見られる。また, 図-5は上げ潮時(21時)のもので, ポケット2に fluid mud が流れ込むのがわかる。

図-6は, 図-5に示されているポケット3の中央の地点4と外の地点6での底面せん断応力の経時変化図である。地点4の方が地点6より水深が約2m深いために, せん断応力は約半分程度になっている。図-7は, 同一地点での巻き上げ量とSS濃度の変化を示したものである。潜堤に囲まれ, ポケットの中央である地点4では, 潜堤の外側の地点6より巻き上げ量とSS濃度共に, かなり小さくなっている。

(2) 平常時の埋没再現計算

ポケット浚渫内では, 表-1に示されているように異常時の波高の高い時に60cm以上の埋没が見られた。一方, 波の大きくない平常時には埋没量は非常に少ない。しかし, 鶴谷ら(1989)の図-4に示されているように, 平常時での長期間で見ると埋没量を無視できなくなる。しかも, 潜堤で囲まれているポケットも, 囲まれていないポケットもほぼ同一の速度で埋没しているようである。これは, 潮流によって巻き上げられ, 運ばれた非常に微細な底泥粒子が沈降・堆積しているためであろうと推察され, このような fluid mud ではなく単なる移流・拡散・沈降による埋没形態のもとでは潜堤は異常時ほどには有効に機能しないものと考えられる。将来の埋没予測では, 平常にどの程度埋没するかを評価することも必要である。そこで, ポケット浚渫での平常時の埋没の再現を試みる。表-3の上段は, 平常時1日当たりの埋没高さの実測値である。下段は, 大潮の条件で波がない場合の1日当たりの埋没量の計算結果である。

計算において, 式(5)の M, τ_e やその他の定数は異常時と同一にしている。ポケット2と3については計算値の方が実測値よりも2~6倍程度大きい。しかし, 実際には潮汐は大潮の場合も小潮の場合もあるので, 計算値と実測値を比較する場合は計算値を半分程度にすべきであろう。そうすると, オーダー的には計算値はかなり実測値に近い値になっていると言える。なお, 小潮の条件でも計算を行ってみたが, このときは埋没量は0であった。また, 巻き上げに関するせん断応力 τ_e を0.3 Pa とした場合にも埋没はなかった。

4. 9313号台風の再現計算

浚渫を行っていなかった1993年8月から10月の間の水深の変化を図-8に示す。泊地中央部で50cm以上の堆積が見られるが, 最大でも1m程度であったことが確

表-3 平常時の埋没量

	ポケット1	ポケット2	ポケット3
実測値 (cm)	0.106	0.182	0.061
計算値 (cm)	0.130	0.408	0.354

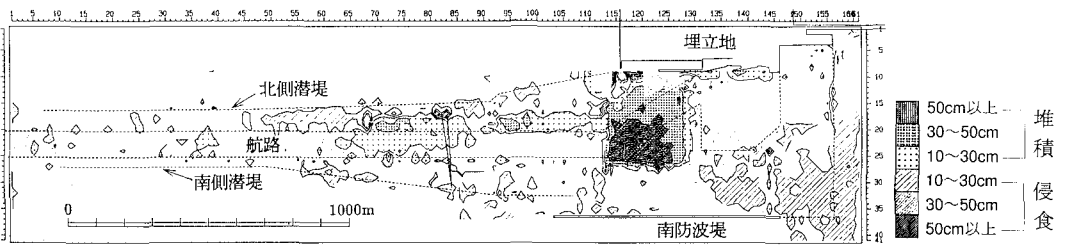


図-8 平成5年8月から10月の地形変化

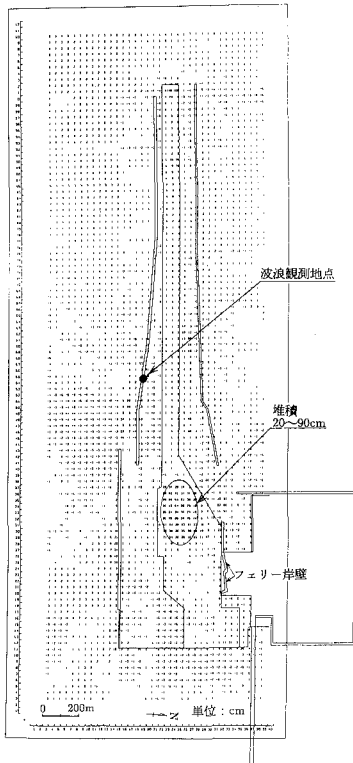


図-9 堆積厚 (単位: cm)

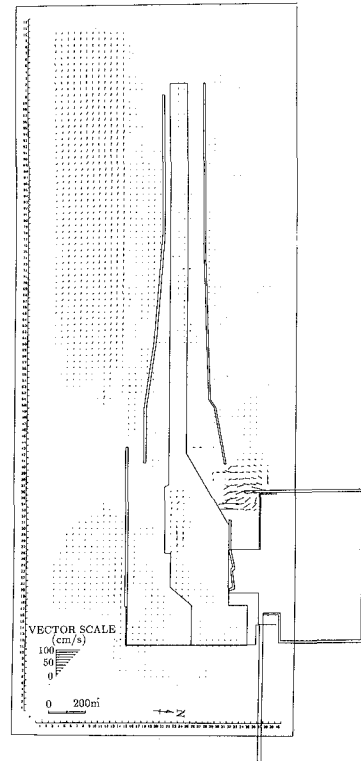


図-10 fluid mudの流動ベクトルの分布

認されている。9月3日から4日にかけては9313号台風が来襲したので、図-8の堆積の大部分はこの台風の影響によるものと思われ、計算のチェックには好都合である。計算で用いた波の諸元としては、実測のデータから波向きはWNW、周期($T_{1/3}$)6秒、観測地点での波高($H_{1/3}$)1.8mとした。波の作用時間は19時間である。計算で得られた堆積厚を図-9に示す。図中の楕円で囲った部分では20~90cmの堆積が見られるので、本合成モデルでほぼ妥当な結果が得られることが確認できた。また、計算開始から18時間目のfluid mudの流動ベクトルの分布を図-10に示す。埋め立て地の南西の角と、北側潜堤との間に開口部があり、波向きがWNWであったことから、この開口部が9313号台風時の泊地の堆積の主要因であったと考えられる。

5. あとがき

従来の港研モデル(多層レベルモデル)に改良を加え、fluid mudの流動を含めた計算モデル(複合モデル)を開発した。事前調査で行われたポケット浚渫のデータ(昭和62年8月29日から9月2日までの期間の埋没量)の

再現計算を行い、ほぼ妥当な結果が得られた。また、平常時の埋没予測を可能にした。さらに、9313号台風の来襲時の堆積再現実験も行った。

本モデルを用いて今後の埋没予測を行うと共に、効果的な埋没対策の策定に積極的に利用していきたい。

参考文献

- 鶴谷広一・村上和男・入江 功(1989): 多層レベルモデルによる航路埋没の予測計算, 海岸工学論文集, 第36巻, pp. 379-383.
- 渡邊具能・小笹博昭・吉永清人・岩崎峯夫(1993): 軟弱な干潟における港湾の建設, 土木学会論文集, No. 480, IV-21, pp. 13-22.
- Odd, N. V. M. and A. J. Cooper (1989): A two-dimensional model of the movement of fluid mud in a high energy turbid estuary, Jour. of Coastal Res., Special Issue No. 5, High Concentration Cohesive Sediment Transport, pp. 185-193.
- Tanaka, H. and N. Shuto (1981): Friction coefficient for a wave-current coexistent system, Coastal Engineering in Japan, Vol. 24, pp. 105-128.
- van Leussen, W. and J. Dronkers (1988): Physical processes in estuaries: An introduction, in Dronkers, J. and W. van Leussen (Eds.), Physical processes in estuaries, Springer-Verlag, pp. 1-18.