

多層レベルモデルによる航路埋没の予測計算

鶴谷 広一*・村上 和男**・入江 功***

1. ま え が き

現在建設中の熊本港は、軟着定式防波堤の据え付けが始まり、フェリーパースがほぼ完成するなど、平成2年度供用開始に向けての準備が進みつつある。有明海沿岸は日本でも有数の遠浅の干潟海岸であり、非常に微細な粘土やシルトが堆積した底泥層が形成されている。底泥層は容易に巻き上げ・移動をくり返すため、新たに浚渫した航路や泊地に堆積しやすく、この現象はシルテーション (Siltation) と呼ばれている。シルテーションが多いと、港湾の機能を確保するために航路・泊地の維持浚渫量が多くなり、財政的負担が大きくなる。従って、このような地域で港湾を新しく建設しようとする場合には、埋没に関する十分な知識と、その対策について事前に考えておく必要がある。熊本港は、シルテーション対策を考えなければならない日本で最初の本格的な港であるが、外国ではこの問題に古くから悩まされてきたところが多い。特に、熱帯モンスーンの東南アジア地域や中国は、流出土砂量が世界的にみてもきわめて多い (Dyer, 1986)。これらの国々では流通経済に占める港湾の比重が高いこともあって、最近では航路埋没の軽減対策のための技術協力要請がわが国に多く寄せられるようになってきた。こうした背景のもとで、港湾技術研究所では第四港湾建設局と共同してシルテーション予測のためのプログラム開発を行ってきた。本報告は、今回新しく開発されたシルテーション予測モデルの概要と、これを熊本港に適用した結果について述べたものである。

2. モデルの概要

本プログラムは鉛直方向を水平な多層に分けて計算する多層レベルモデルを基本としている。多層レベルモデルを採用したのは以下の理由による。埋没が激しいときは底面近くの泥の濃度がかなり高い層があるが、その場合でも水面近くでは濃度が低い。このような濃度分布を

再現する必要がある。さらに、熊本港で埋没対策の一つとして考えている潜堤を考慮した計算ができなければならない。潜堤は、現地の海底面上から一様に1m程度の高さで設置されるので、航路に沿って深くなる地形上に設置された潜堤の天端高も地形と共にだんだん深くなる。モデルの中でこのような複雑な境界条件を再現するためには層数をなるべく多くしてやればよい。そこで、ここでは潜堤が設置される部分は少なくとも2層が入るように最小の層厚を50cmとし、総数を7層とした多層レベルモデルを採用した(図-1)。しかし、層数を多くすると演算時間がそれに比例して大きくなるので、これまでは広い範囲を多層で(少なくとも三層以上)計算することは実際上不可能に近かった。今回は港湾技術研究所のスーパーコンピュータ SX-1E (演算速度 286 MFLOPS) を使用して演算時間の高速化を計り、このような多層の計算が初めて可能となった。しかし、SX-1E を使用した場合でも、例えば現地で24時間の潮流・拡散計算に240分のcpu timeを要している。7層で直接の比較はしていないが、1層の潮流計算の比較によるとSX-1Eとこれまで使用していたACOS 1000/10との演算速度の比は約9.5倍あるので、熊本港の計算をACOS 1000で行うと約38時間かかることになる。

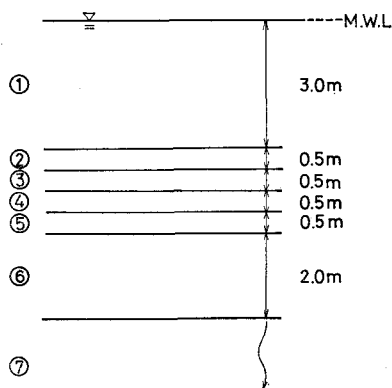


図-1 層分け

* 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 工学部水工土木学科

本プログラムは、大きく分けて次の三つの部分よりなる。

(1) 干潟上の潮流計算プログラム

有明海沿岸は、わが国で最も潮汐の大きいところとして知られ、熊本港付近では大潮時に約4.5mの潮位差がある。しかも、遠浅の海岸であるために、汀線は干潟上を2~3kmも移動する。このモデルではこのような移動境界を扱えるようになっている。ただし、移動境界は層をまたぐようには設定できないので、図-1の第①層のみが移動境界を扱う部分になっている。

今回の埋没計算では、最終的に現地で起こった埋没量に合うようにキャリブレーションを行っている。現地に掘ったポケット浚渫で埋没量の観測を行っているが、ポケット浚渫の大きさは海底面のレベルで50m×70mあるので、実際に計算を行う場合にはこの部分もある程度の格子分割をする必要がある。そこで最小の格子幅を100/9m(=11.1m)と設定した。そして、それを取り巻くように順に100/3(=33.3), 100, 300mと格子を大きくした。このように、粗・細格子の比は3の一定であるが、段数は任意なので、さらに細かい格子を組むことも可能である。しかも、このように大ききの混在した格子分けでも、従来のように大領域だけ計算して、その結果を境界条件として与えながら改めて小領域の計算をするといった面倒なことをする必要はなく、1タイムステップ毎に全領域をまとめて計算できるようになっている。このような格子分けで計算するモデルは、Nested Grid Modelと呼ばれている。格子図を図-2に示す。総格子数は

6,700で、陸地を除く実格子数は4,100である。一番大きな格子の幅が300mで、順に3倍ずつ細かくなっている。300mの領域を第1領域、100mの領域を第2領域、33.3mの領域を第3領域とし、一番細かい11.1mの領域の陸側を第4領域、沖側を第5領域とする。図中に示すように、埋没量測定用のポケット浚渫が第4領域に約100m離れて2つ、第5領域に1つある。ポケット③は、高さ1mの潜堤に囲まれている(木原ら, 1987)。

その他の機能としては、次の(2)で述べる波の場の計算プログラムの結果を用いて海浜流の計算および波と流れの共存場でのせん断応力の計算を行う。そして、移流・拡散計算では、せん断応力から底泥の巻き上げ量を求め、沈降・堆積量を計算する。泥の濃度と塩分濃度は密度の変化として考慮できる。せん断応力の計算には、Tanaka and Shuto(1981)の式を用いる。巻き上げ量 $E(\text{kg/m}^2/\text{min})$ は、Odd and Owen(1972)と同様に次式を用いる。

$$E = A \left(\frac{\tau}{\tau_c} - 1 \right) \dots\dots\dots (1)$$

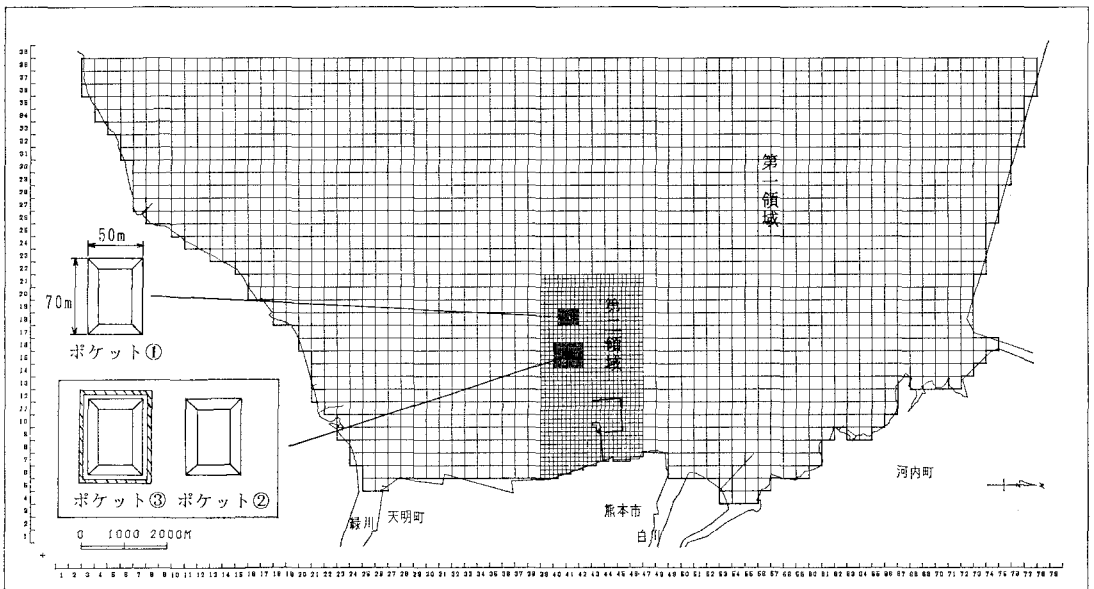
ここに、 τ は底面にかかるせん断応力($\text{Pa} = \text{N/m}^2$)、 τ_c は巻き上げに関する限界せん断応力(Pa)、 A は定数である。

沈降量 $D(\text{kg/m}^2/\text{min})$ はSheng and Lick(1979)と同様の考え方で、次式を用いて与える。

$$D = w_s C_{bed} = w_s \beta \bar{C} \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 w_s は泥の沈降速度、 C_{bed} は底面での泥の濃度、 β は最下層の泥の平均濃度 $\bar{C}$ から底面付近での濃度に換

4111T 6302199. SILT.R



格子図(第1領域)

図-2 格子図

算するための係数で、観測塔と鋼管杭（木原らの図—1参照）の2地点の実測の分布形から次のように与えた。

$$\beta = \begin{cases} 1.0 & (\Delta z_b \leq 0.05 \text{ m}) \\ 3.90 \Delta z_b + 0.805 & (0.05 \text{ m} < \Delta z_b \leq 2.36 \text{ m}) \\ 10.0 & (\Delta z_b > 2.36 \text{ m}) \end{cases} \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 Δz_b (m) は各格子点の最下層の厚さである。

沈降速度 w_s は濃度の関数で、図—3 の実線のように与えた。濃度が低いところでは、濃度の増加と共に沈降速度も大きくなるが、濃度がさらに大きくなり数千 mg/l 程度になると、hindered settling のために沈降速度は小さくなり始める (Leussen, 1988)。図中の破線は、Thorn (1981) が Severn Estuary で得たデータに対して Mehta (1986) が与えたものである。しかし、巻き上げ量が大きくなって濃度が増加し、hindered settling の領域にはいると沈降速度が減少するので、式 (2) から堆積量も減少することになる。そのために下層の濃度はさらに大きく

なり続け現実的でなくなる。このため、本モデルではある限界値を設けて濃度の濃いところでは一定の沈降速度とした。その結果が図中の実線である。熊本での SS の鉛直分布の時間変化の実測値から、移流項と拡散項を無視した拡散方程式を解いて求めた沈降速度も図—3 にプロットされているが、他のデータと大きな違いは認められない。本研究では濃度に対する沈降速度の変化を線形と仮定したが、Mehta は w_s が C の 1.29 乗で変化している。両者とも実測データのばらつきの範囲内にあるが、その違いが図に現れている。

潮流計算のタイムステップは、一番格子の小さい第 4, 5 領域に規定されて 0.72 s である。また、拡散計算のタイムステップは 7.2 s である。

(2) 波の場の計算プログラム

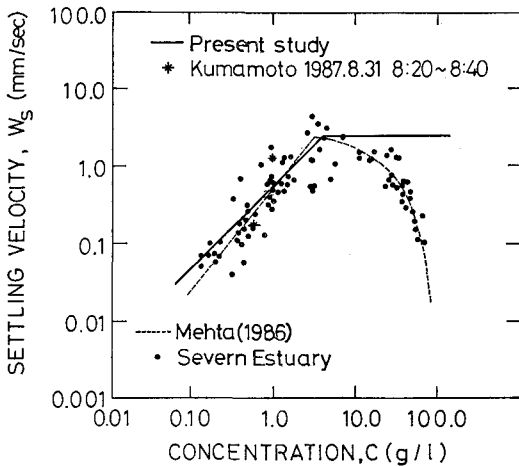
不規則波の屈折・回折計算と碎波による波の減衰の計算を行う。さらに、中野ら (1987) による粘性流体多層モデルで、波の減衰と底泥の質量輸送量も計算できるようになっている。あらかじめ行った計算で、現地で測定された波の減衰に合うためには、底泥の含水比を 200%、層厚を 10 cm にすれば良いことがわかった。

(3) 堆積量予測プログラム

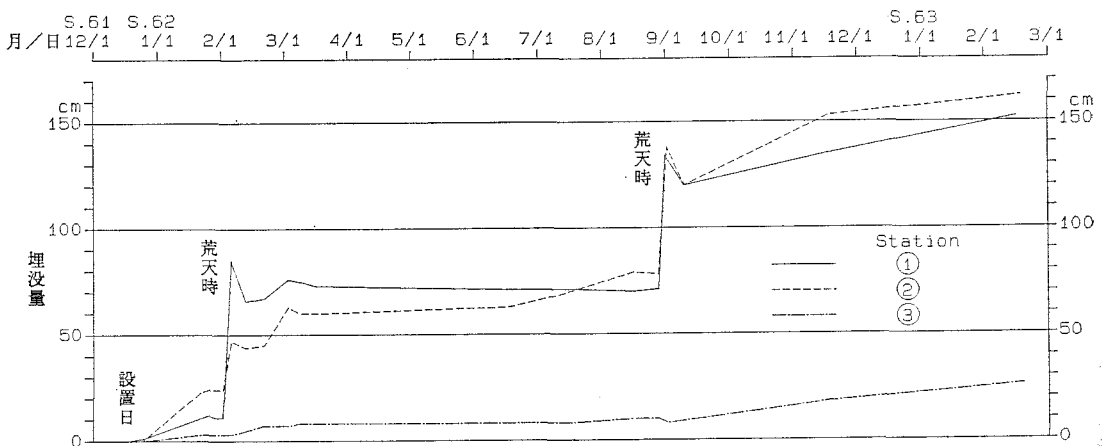
(1) で求めた底泥の巻き上げと沈降による一次堆積量と、(2) で求めた波による質量輸送量から埋没量 (厚さ) を求めるものである。

3. 現地の埋没量

昭和61年12月18日から63年2月17日まで数々の調査が行われたが、各ポケット浚渫の中央で測定された埋没量を図—4 に示す。観測期間中2回の大きな時化があり、ポケット①と②はそのときに数十 cm ずつ埋まっているが、ポケット③は潜堤に囲まれているために埋没量は著しく小さい。



図—3 泥の濃度と沈降速度の関係



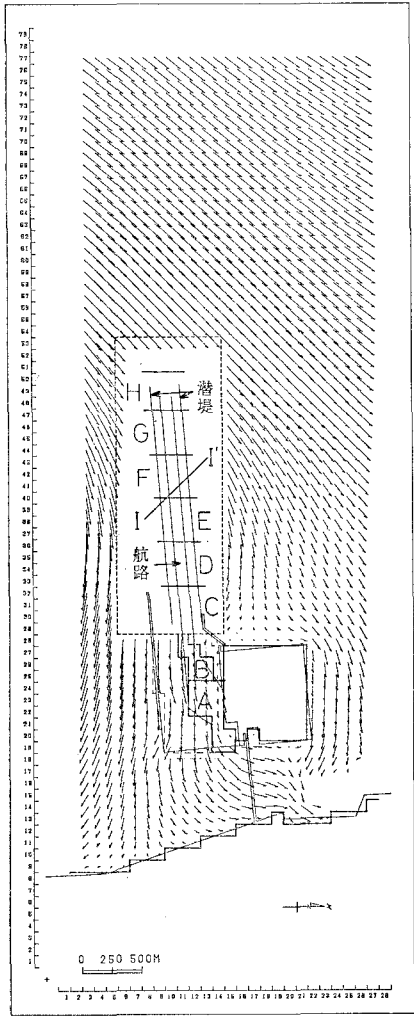
図—4 ポケット浚渫での埋没量

表—1 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)

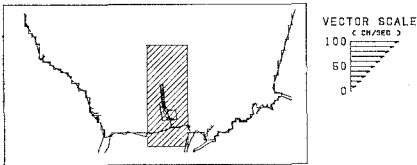
	ポケット①	ポケット②	ポケット③
埋没量 (cm)	63	60	-2
含水比 (%)	231	189	192

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
沈降のみ (cm)	63.4	39.8	4.0
波による質量輸送を考慮 (cm)	74.6	53.4	4.0



ベクトル図 (第2領域・第1層・21.00HOUR)



図—5 将来地形の潮流図と領域分け

4. 再現計算

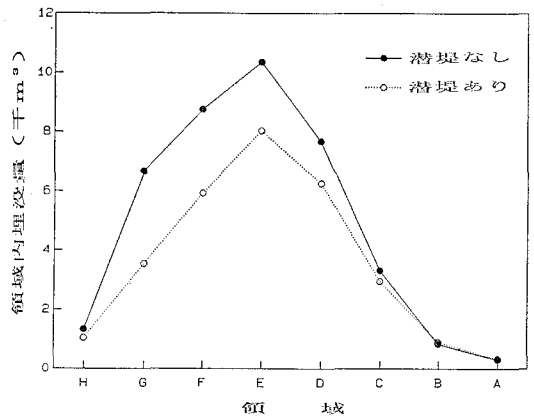
ここでは昭和62年8月29日から9月2日までの期間の埋没を再現することにする。波浪条件は、水深4mの位置にある観測塔で測定したものを参考にして、 $H_{1/3}=$

1.25 m, $T_{1/3}=4$ s, 波向は WSW, 継続時間は6時間とした。波の大きい場合は干潮時であったので、計算は満潮時から開始して初めの15時間は潮流のみ計算し、15時から21時まで波をかけ、同時に拡散と巻き上げ・沈降堆積計算を開始した。計算をすべて終了するのは、27時間後である。

埋没量のキャリブレーションでは式 (1) の中の A と、 τ_o をいろいろ変えて埋没量を計算した。各ポケット内の期間中の埋没量と含水比を表—1 に示す。そして、計算で求めた埋没量を、沈降のみと波による質量輸送を考慮したものに分けて表—2 に示す。このとき $A=1.2$ kg/m²/min とし、限界せん断応力は村上ら (1989) の実験から $\tau_o=0.1$ Pa を与えた。波による質量輸送も含めると、実測と比較してポケット①ではやや大きめの埋没量が得られたが、②、③についてはほとんど同じと考えてよく、現況はほぼ再現できたと考えられる。

5. 将来地形の埋没予測

平成2年度の供用開始時における港の形状を図—5 に示すが、同時に上げ潮最大時 (21時) の第1層の潮流ベクトルも示してある。図—5 は、港の建設地点付近を図—2 の第1領域から接続して3倍細かい格子で計算した領域 (第2領域、格子間隔は 100 m) である。埋立地は正方形に近い白抜きの部分で、陸地とは橋で結ばれている。この南側に沖に向けて水深4.5mの航路が延びている。航路を含む部分は長方形の白抜きになっているが、ここは実際にはさらに3倍細かい格子 (第3領域、格子



図—6 各領域毎の埋没量

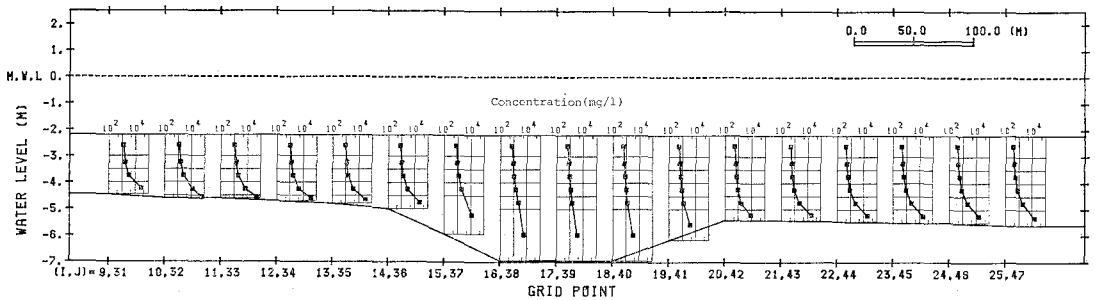


図-7 濃度分布図

間隔は33.3m)で計算している。中央の内側2本の線が幅100mの航路を表し、その両側にそれぞれ75mずつ離れて高さ1mの潜堤が2,000mの長さにならって設置されている。航路内の埋没の傾向を見るために潜堤のあるなしの比較をするために、図-5に示すように航路内と泊地をAからHまで領域分けして、4.の再現計算をしたときと同じ条件で埋没計算をした結果が図-6である。航路の沖側(領域H)と港の泊地内(領域A, B)では埋没量が少なく、中間の領域の埋没量が一番多い。潜堤を設置すると、航路のDからHの領域近くまで埋没低減効果があり、領域Eで、23%、領域Gで47%埋没量が減少する。

図-7は、潜堤の設置されていないケースで、図-5に示すように航路を横切る測線I—I'に沿う泥の濃度分布の計算値を示したものである。時刻は18時で最干時であるが、流れの方向はほぼこの測線の方に右上に向かって流れている。航路の上手側では底面付近で 10^5 (mg/l)程度の濃度であるが、水面付近では2桁小さくなる。これが、航路に入ると、鉛直方向に一樣に近ずき、上層と下層の濃度は一桁のオーダーの差になる。

6. あとがき

今回開発したモデルは、底泥層から巻き上げられた泥が移流・拡散し、沈降・堆積するという過程を再現したものである。しかし、一旦巻き上げられた泥は、波が静かになると沈降して密度の高い浮泥流(fluid mud, 比重は1.05~1.20程度)を形成するともいわれている。しかし、fluid mudについてはまだ不明な点が多く、本モデルでは取り入れているので問題は少ないが、潜堤のような構造物はfluid mudを阻止するのに有効な手段と考えられ、これを考慮すれば図-6の潜堤の効果はさ

らに大きくなるものと考えられる。今後は、この点に関して引き続き検討する予定である。最後に、本研究の実施にあたり、ご協力いただいた第四港湾建設局の各位に感謝します。また、当研究所に3カ月間滞在し、現地データの解析にご協力いただいた中国交通部、天津水運工程科学研究所、曹祖德主任工程師に感謝します。

参考文献

- 木原 力・高橋 誠・松本正昭・養父恒夫・川又良一(1987): 干潟海岸における底泥移動の現地観測, 第34回海岸工学講演会論文集, pp. 397~401.
- 中野 晋・鶴谷広一・鷹濱 潤(1987): 波と底泥の相互干渉による波高減衰と底泥の流動について, 港研報告, 第26巻, 第2号, pp. 171~212.
- 村上和男・菅沼史典・佐々木均(1989): 円形回転水路による底泥の巻き上がりと沈降に関する実験的研究, 港研報告, 第28巻, 第1号, pp. 43~76.
- Dyer, K. R. (1986): Coastal and Estuarine Sediment Dynamics, Wiley, 342 p.
- Leussen, W. Van (1988): Aggregation of particles, Settling velocity of mud flocks a review, in Dronkers, J. and Leussen, W. Van (Eds.) Physical Processes In Estuaries, Springer-Verlag, 560 p.
- Odd, N. V. M. and M. W. Owen (1972): A two layer model of mud transport in the Thames estuary, Proc. Inst. Civil Eng., Supp. 9, Paper 75175.
- Sheng, Y. P. and W. Lick (1979): The transport and resuspension of sediments in a shallow lake, J. Geophys. Res., Vol. 84, pp. 1809~1826.
- Mehta, A. J. (1986): Characterization of cohesive sediment properties and transport processes in estuaries, in Mehta, A. J. (Ed.) Estuarine cohesive sediment dynamics, Lec. Notes Coastal Estuarine Stud. 14, pp. 290~325.
- Tanaka, H. and N. Shuto (1981): Friction coefficient for a wave-current coexistent system, Coastal Engineering in Japan, Vol. 24, pp. 105~128.
- Thorn, M. F. C. (1981): Physical processes of siltation in tidal channels, Proc. Hydraulic Modelling Applied to Maritime Engineering Problems, ICE, London, pp. 47~55.