

長周期水理特性を考慮した港内堆砂モデルの適用性の検討

松岡道男*・木下勝尊*・山本正昭**・森口朗彦***

1. はじめに

漁港など港口部の設置水深が比較的浅く、碎波の影響を受けやすい場合、港口部の直近傍において浮遊砂濃度の高い領域が存在し得る。このような条件のもとで、港口部が狭く且つ相対的に広い港内水域を有する港形である場合には、潮汐や特に港の副振動などにより誘起された港口部での流れが港内へ多くの浮遊砂を持ち込む輸送外力となる可能性が高い。本研究は、千葉県飯岡漁港を対象にして現地での港口部の流れと浮遊砂の流入過程の数値シミュレーションを行って観測結果と比較し、港内堆砂シミュレーションの適用性について検討を行ったものである。

2. 検討対象地点の自然条件と港内堆砂の状況

2.1 自然条件の概要

今回調査の対象とした飯岡漁港は、房総半島の九十九里海岸の北端、屏風ヶ浦と九十九里浜の接点に位置している。屏風ヶ浦は、高度 10～60m の断崖が続く海蝕崖で九十九里浜への漂砂供給源となっており、また、九十九里海岸は、汀線背後に比高数mの砂丘を有する砂浜海岸である。水深 5m 以浅の海底勾配は、屏風ヶ浦前面で約 1/200、飯岡漁港前面では 1/100～1/200 である。昭和60年9月から61年11月にかけて実施された通年波浪観測（漁港沖合い 6km、水深 16m 地点）の結果によれば、図-1 に示すように通年では 1m 前後の波高、8秒から11秒の周期が卓越している。また、波向きは

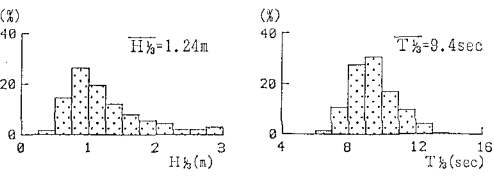


図-1 有義波高および有義波周期の出現頻度分布

ESE～SE 方向に集中している。

2.2 港内堆砂の状況

防波堤の建設初期より港内あるいは航路の埋没が激しく、昭和41年度から62年6月末時点までの累積浚渫土量は約 120万 m³ に達し、そのうち航路維持のための浚渫土量は約 66万 m³ にのぼっている。このように防波堤が次々と延長されているにもかかわらず、漂砂が経常的に大きな影響を与えている。今回の検討では、沖西防波堤建設後の法線形状（昭和61年時点の法線）を対象とし、特に図-2 に示す港口部領域での堆砂について検討を行った。したがって、計算結果と現地データとの比較・検討は、昭和61、62年度に行われた深浅測量成果および浚渫の記録（表-1）に基づいて行った。

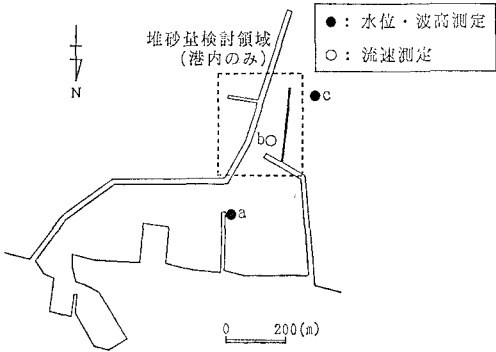


図-2 現地観測実施地点位置図（平成2年時点の法線）

表-1 港口部における土量変化
（昭和61年5月～62年2月）

期 間	(単位：m ³)		
	浚渫土量	深浅測量に基づく変化土量	推定堆砂量
S61. 5- 6	1000	2900	3900
6- 7	---	1800	1800
7- 9	---	6700	6700
9-10	---	6500	6500
10-12	3600	-2400	1200
12-S 62. 2	---	2200	2200

* 正会員 工修 日本テトラポッド(株) 応用水理研究所
** 正会員 工博 水産庁水産工学研究所 漁港水理研究室長
(現開発システム研究室長)
*** 正会員 工修 水産庁水産工学研究所 漁港水理研究室

3. 長周期水理特性の現地観測

現地における長周期の水理特性を調べるために、平成2年11月26、27日に図-2に示す位置において、水位・波高・流速について20時間以上の連続観測を実施した。計測には、水圧式波高計及び電磁流速計を用いた。取得した水位・流速などの時系列データは、風波・うねり成分と長周期変動成分に分けて解析を行い、風波・うねり成分については、波別解析およびFFT法によるスペクトル解析によりその波浪特性を求めた。また、長周期変動成分については、最小自乗法による調和分解(村上, 1981)により潮汐成分を分離し、数値フィルターを用いて300秒以上の周期の水位変動を抽出して、FFT法によるスペクトル解析を行いその特性を検討した。

3.1 風波・うねりの観測結果

観測期間中における20分間隔の港外(c点)および港内(a点)における有義波高、有義波周期の経時変化を図-3に示し、スペクトル解析の結果を図-4に示す。港外では、波高は60~80cmの間で変動していたが、

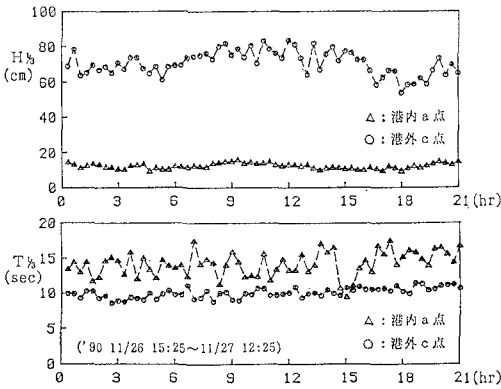


図-3 有義波高および有義波周期の経時変化

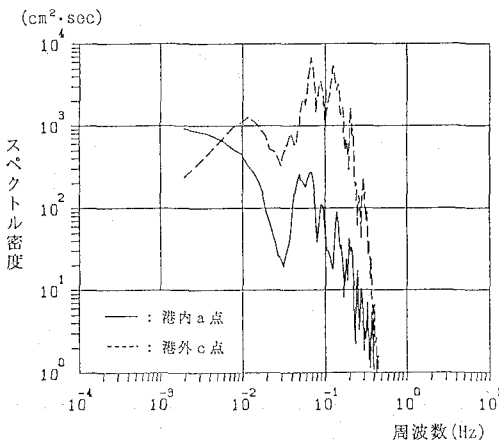


図-4 短周期成分波のスペクトル解析

周期は9~12秒で極めて安定していた。一方、港内においては、波高は10~15cmと低く変化が少なかったが、周期は15秒前後で変動していた。スペクトル解析の結果(11月27日0時)においても、港外では周期10秒付近にはっきりしたピークを持つが、港内では短周期側のエネルギーが大きく減衰していた。

3.2 長周期変動の観測結果

港内・港外で観測された300秒以上の長周期水位変動(潮位変動を除く)および港口部に近い港内b点における流速の長周期変動成分のスペクトル解析の結果を図-5に示す。この図から、港外の長周期変動のうち25~35分の周期帯に相当する長周期成分が港内で選択的に増幅されていることが分かる。これが港の副振動に対応する周期帯で起こっていることは、図-6に示すようにMei, Chenによって開発されたHybrid F.E.M. (Mei & Chen, 1974)を用いた港内の副振動の計算を行って観測結果と比較することにより確認した。また、流速についても港内においては、水位と同じ周期成分が卓越していることが明らかである。流速の絶対値については、計測地点が航路から少し離れた所で波除堤の影響を受ける位置であったため、流速が最大となる領域の値とは云えないが、後述する数値計算により航路部の流速計算を行う時の参照データとして用いた。

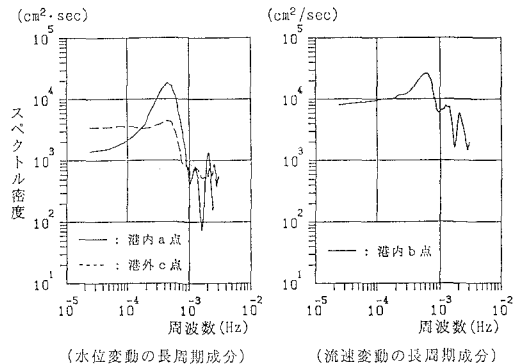


図-5 長周期成分のスペクトル解析

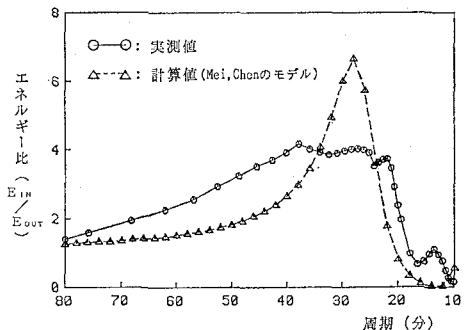


図-6 港内のエネルギー増幅率(a点/c点)

4. 数値計算モデル

エネルギー平衡方程式を用いて波浪場を求め、海浜流の基礎式を解いて流れ場を求めた。また、港口部周辺における潮汐および副振動による長周期の変動流速場については、4.1 に述べる2次元単層潮流モデルを用いて計算し、海浜流場と重ね合わせて全体の流速場を求めた。次に、4.2 に述べる断面平均濃度に関する移流拡散方程式を解いて浮遊砂濃度の平面分布を求め、鉛直方向浮遊砂フラックスと水深変化の関係式を用いて堆砂量の計算を行った。この計算は、変動する流速場に対応して変動周期の1/10程度の間隔で繰り返し行った。計算領域の格子分割を図-7に示す。

4.1 流況計算モデル

基礎方程式である連続式と運動方程式を式(1)、(2)、(3)に示す。対象領域内において水深および構造物の配置と開境界での水位または流速を与え、LeendertseによるA.D.I.法(Leendertse, 1967)を用いた方法によりこれらの方程式を解いて計算領域内の断面平均流速と水位の時間的変動を求めた。

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \{ (h+\eta)u \} + \frac{\partial}{\partial y} \{ (h+\eta)v \} = 0 \quad \dots\dots(1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \\ = f v - g \frac{\partial \eta}{\partial x} + A_h \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) - \frac{g u \sqrt{u^2 + v^2}}{(h+\eta)C^2} \end{aligned} \quad \dots\dots(2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \\ = -f u - g \frac{\partial \eta}{\partial y} + A_h \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) - \frac{g v \sqrt{u^2 + v^2}}{(h+\eta)C^2} \end{aligned} \quad \dots\dots(3)$$

ここに u, v : x, y 方向の断面平均流速

η : 水位上昇量, A_h : 水平混合係数

f : コリオリ係数, g : 重力加速度

h : 水深, t : 時間

C : Chezy 係数

4.2 堆砂量計算モデル

計算で求めた波浪・流況場に対する浮遊砂濃度の平面分布を式(4)に示す断面平均浮遊砂濃度に関する移流拡散方程式を解いて求めた。この時、底面での鉛直方向浮遊砂フラックスは式(5)で与えられるが、このうち沈降フラックスを表す項で用いる底面濃度 C_b は、黒木ら(1988)によって提案された非平衡浮遊砂濃度分布式(6)から平均濃度の関数として表示したものを用いた。また、波動・流速場により規定される砂の巻き上げ量については、榎木らによる算定式(榎木ら, 1984)を用いた。さらに、地形変動量は pick-up 量および沈降フラックスと水深の関係式(5)、(7)を用いて求めた。

$$\begin{aligned} (h+\eta) \frac{\partial \bar{C}}{\partial t} + u(h+\eta) \frac{\partial \bar{C}}{\partial x} + v(h+\eta) \frac{\partial \bar{C}}{\partial y} \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left\{ k_x(h+\eta) \frac{\partial \bar{C}}{\partial x} \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ k_y(h+\eta) \frac{\partial \bar{C}}{\partial y} \right\} + Q_s \end{aligned} \quad \dots\dots(4)$$

$$Q_s = (1-\gamma)C_0 W_f \left(1 - \frac{u_*}{W_f} \right) + C_b W_f \quad \dots\dots(5)$$

$$C(\zeta) = C_b \exp(-R\zeta) + R(C_b - C_e)\zeta \exp\{-(R+1)\zeta\} \quad \dots\dots(6)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{-Q_s}{1-\lambda} \quad \dots\dots(7)$$

ここに、 $\bar{C}$: 断面平均浮遊砂濃度

k_x, k_y : x, y 方向の拡散係数

Q_s : 鉛直方向の浮遊砂フラックス

γ : $u_* > W_f$ で $\gamma=0$, $u_* < W_f$ で $\gamma=1$

C_0 : 基準点濃度 ($=0.347 N_e^{1.77}$)

ここに $N_e = 0.668 a_m^2 / \{1.13(\rho_s/\rho - 1)gW_f T\}$

a_m : 波による水粒子軌道振幅

ρ_s : 砂の比重

T : 周期

u_* : 波・流れによる底面摩擦速度

ζ : z/h

ここに z : 海底からの高さ

C_b : 底面での浮遊砂濃度

C_e : 底面での平衡浮遊砂濃度

R : $W_f h / \varepsilon$

ここに W_f : 砂の沈降速度

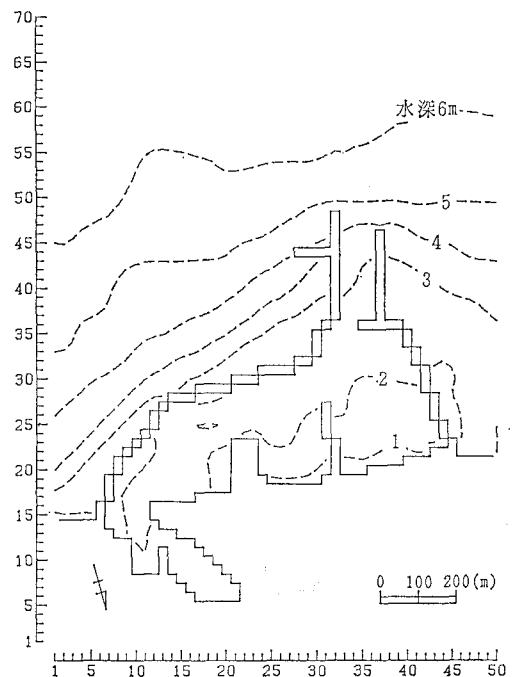


図-7 計算領域図 (昭和61年時点の法線)

ε : 鉛直方向の拡散係数

λ : 砂の空隙率

5. 計算結果と考察

5.1 長周期流速場の再現性

長周期流速場の計算精度を確認するため、港外の観測点で得られた潮汐を含む長周期水位変動の時系列を計算の境界条件として与え、港内の水位および流速場の計算を行った。計算結果と港内での観測値との比較を図-8、図-9に示す。図-8は港内における周期300秒以上の長周期変動の時系列について計算値と実測値を比較したものである。これによれば、周期300秒以上の個々の変動に対する港内の応答がよく再現されていることがわかる。また、図-9は港内の周波数スペクトルについて計算値と実測値を比較したものであり、これによれば、周期30分近傍の周期帯におけるエネルギー増幅率が現地での倍率に近い値で再現されていることがわかる。また、流速の振幅ベクトルの出現頻度分布について計算値と観測値の比較を図-10に示す。波除堤の影響で港外向きの流速が港内向きの流速に比べ小さいことなど現地の特

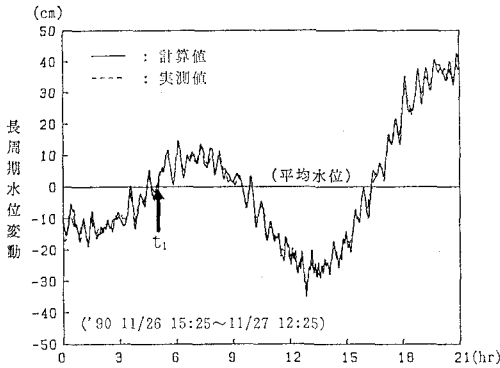


図-8 港内における水位の長周期変動時系列

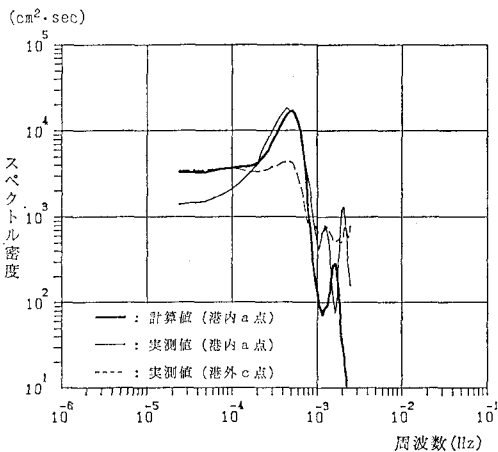


図-9 周波数スペクトルの計算値と実測値の比較

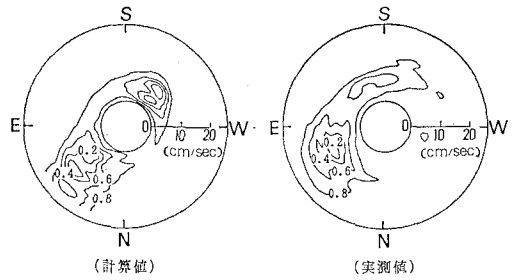


図-10 流速の振幅ベクトルの出現確率分布

徴が計算においても再現されている。なお、図-10中のコンターの数字は、コンターで囲まれた領域内に振幅ベクトルが存在する割合を全振幅ベクトル数に対する比率として示した。

5.2 港内流入砂量の試算

現地において出現頻度の高い波浪条件(波高1m, 周期10秒, 波向きSE)で波および海浜流の計算を行い、港口近傍における波浪場および海浜流の分布を求め、5.1で求めた長周期の流速場を海浜流の流速場に重ね合わせ全体の流速場を求めた。計算で求めた波高分布と流速場の1例(図-8の時刻 t_1 での値)を図-11に示す。次に、4.2で述べた計算手法を用いて、21時間の水位変動時系列に対応した港口部における砂の堆積量の計算を行った。その結果を図-12に示す。副振動による影響を考慮した場合の港口部における堆砂量は、波高の出現率を考慮して1ヶ月あたりに換算すると、2,770 m^3 /月となった。一方、潮汐のみ考慮した場合はその1/2以下の値しか得られなかった。同じ領域において実測された堆砂量のオーダーは、表-1の値から昭和61年5月から62年2月までの実積の平均値で約2,000 m^3 /月

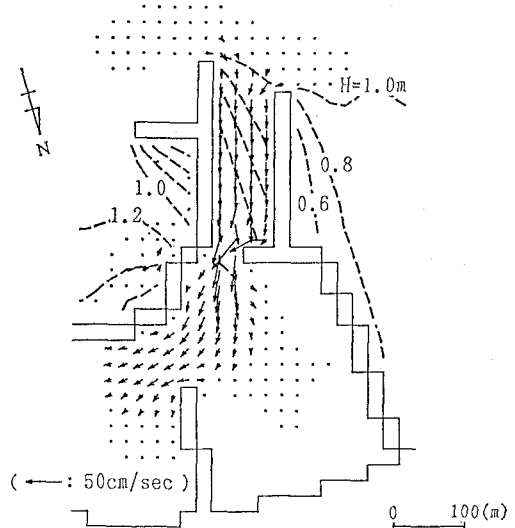


図-11 波高分布および流速場(時刻 t_1)

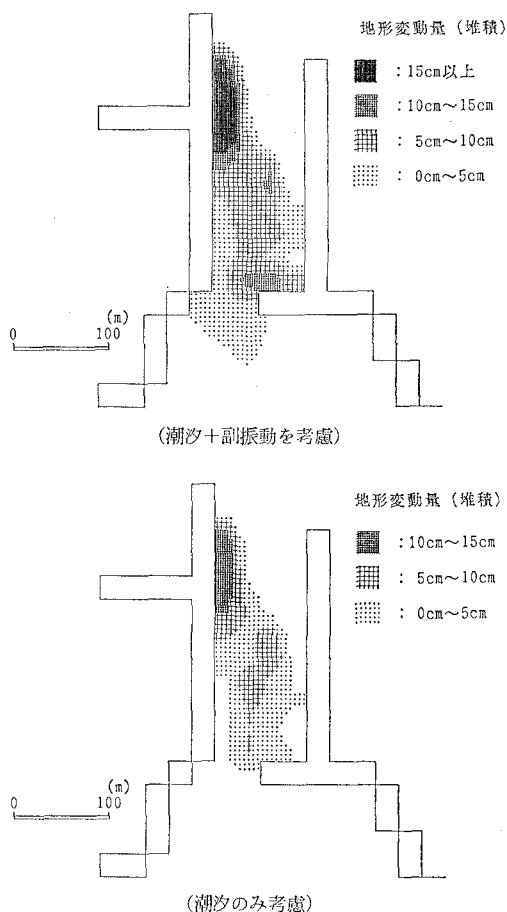


図-12 港口部における砂の堆積分布 (21時間後)

であり、月別には $1,000 \sim 6,700 \text{ m}^3/\text{月}$ とばらついている。今回の計算値は、この変動幅の間ではほぼ平均的な値を与えていた。

6. 結 論

今回の研究で明らかとなった主要な結果は、以下の通りである。

(1) 本研究で対象としたような港口部が狭く、相対的に港内の泊地面積が広い港では、港口部において潮汐と共に港内の副振動により誘起される長周期の流速場が存在する。また、このような流速場を生起するに十分な大きさの長周期成分が入射波エネルギー中に含まれている。

(2) 港の共振周波数成分の増幅を含む港内での応答は、計算によっても再現し得ることが確認され、計算で求められた港口部での長周期の流速変動には、港内の副振動の影響が最も強いことが明らかとなった。

(3) 現地で得られた21時間の水位変動時系列を用いて港内流入砂量の計算を行い、波高の出現率を考慮して1ヶ月あたりの量に換算すると、港口部における砂の堆積量は実測された堆砂量の月別の変動幅の間ではほぼ平均的な値を与えていた。一方、潮汐のみ考慮した場合はその1/2以下の値しか得られなかった。しかし、入射波に含まれる長周期成分の通年の変動特性が把握されていないので、あくまでも試算の域を出ず、長期間の堆定量を求める場合は現地における長周期水位変動の通年の出現傾向を把握することが必要である。

(4) これらのことから、港口における堆砂のメカニズムにおいては、潮汐による流れの上に、特に港の副振動による長周期の流速場が複合的に重なり、浮遊砂の輸送外力として大きな役割を果たしていることが明らかである。また、これらを考慮した港内堆砂シミュレーションを行うことによって、港口部での地形変動の予測精度が向上することが明らかとなった。

謝辞：本研究を行うにあたって、有益な助言を頂いた大阪大学工学部榎本享教授、出口一郎助教授に深く謝意を表します。

参 考 文 献

- 黒木幹男・史 亜傑・岸 力 (1988)：非平衡浮遊砂理論とその応用，第32回水理講演会論文集，pp. 407-412。
- 榎本 亨・李 宗燮・出口一郎 (1984)：河口周辺の海浜流及び地形変動モデルに関する研究，第31回海岸工学講演会論文集，pp. 411-415。
- 千葉県銚子漁港事務所・(財)漁港漁村建設技術研究所 (1988)：昭和62年度飯岡漁港修築測試の内漂砂調査 (数値シミュレーション) 委託報告書，312 p。
- 村上和男 (1981)：最小自乗法による潮汐・潮流の調和分解とその精度，港湾技研資料 No. 369。
- Chen, H. S. and C. C. Mei (1974)：Oscillations and wave forces in an offshore harbor, Ralph M. Parsons Lab., Report No. 190, MIT。
- Chen, H. S. (1986)：Effects of bottom friction and boundary absorption on water wave scattering, Appl. Ocean Research, 8, pp. 99-104。
- Leendertse, J. J. (1967)：Aspects of a computational model for long-period water wave propagation, RM-5295-PR, The Rand Corporation, p. 165。