

砂浜海岸における三次元地形変化予測に関する研究

水 口 優*・岡 田 一 郎**・森 寿 文***

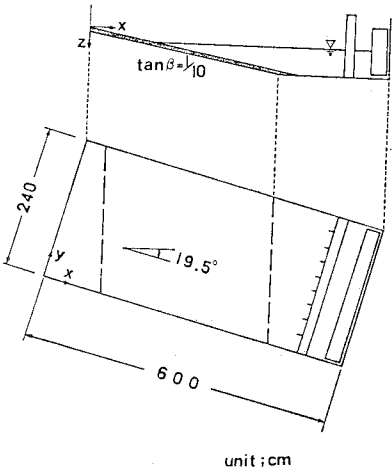
1. ま え が き

近年、海浜地形変化を扱った研究は、数多く行なわれている。汀線変化は、Pelnard-Considère¹⁾ によって開発された one-line theory によってある程度予測できる。しかし、この方法は海浜断面形状の予測ができないという欠点を有している。一方 Winant ら²⁾ が提案した empirical eigenfunction (経験的固有関数, EEF) を応用した経験的海浜変化モデルが橋本ら³⁾ によって提案されているがまだ地形を予測できる段階ではない。

本論文は、EEF を用いることによって室内実験における三次元的な地形変化に対し断面の変化をも考慮した汀線変化モデルの可能性を追求するものである。

2. 実 験 方 法

実験には、図—1 に示すような幅 240 cm、長さ 600 cm、深さ 50 cm の小型平面水槽を使用した。尚、波向きを得るため、造波板に対し 19.5 度の斜面を設置しその上に砂を敷きつめた。用いた砂は、比重 2.69、中央粒径 0.19 mm、均等係数 1.56、淘汰係数 1.17 の小名浜砂である。



図—1 実験水槽概略図

実験ケースの設定については、二次元的な海浜変化の過程の重要性を考慮して、堀川・砂村ら⁴⁾による c 値と沖波入射角をいくつか変えることで定めた。岸沖方向の初期勾配は 1/10 とした。(表—1 参照)

表—1 実験条件

ケ ー ス	1	2	3	4	5	6
沖 波 波 高 (cm)	1.3	2.3	2.8	4.2	2.5	3.8
周 期 (s)	0.71	0.70	0.81	0.80	0.80	0.72
沖波入射角 (°)	20.8	19.5	9.9	5.5	0.0	17.3
勾 配	1/10.1	1/9.6	1/10.5	1/9.9	1/9.9	1/9.9
c 値	2.4	4.1	4.6	5.3	4.2	6.8

実験においては、入射波高、砕波帯付近の波高分布、流況及び地形を測定した。また、高さ約 3 m の位置にカメラをセットし砕波角を読み取った。地形は等深線上に糸を置いてゆき、それをカメラで撮影する方法と連続式砂面計とを併用して測定した。地形のデータとしては、沿岸方向に 20 cm 間隔、岸沖方向に 5 cm 間隔とした。

実験は原則として汀線が変化しなくなりかつ岸沖方向にもほぼ平衡状態となるのををもって終えた。地形変化を調べるために等深線を引く際、一度波を止めた。

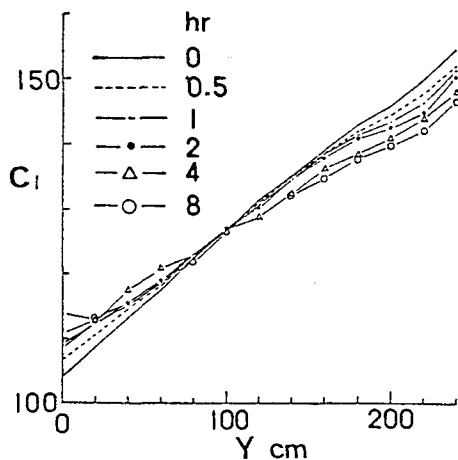
3. 実 験 結 果

海浜断面の変化特性を知るため、EEF による解析を行った。各ケースにより岸沖方向のデータ数が異なるが $y=0$ cm, $x=100$ cm の地点をゼロとしてある時間の地形を水深 $h(t, x, y)$ に換算し、それを次のように展開した。

$$h(t, x, y) = \sum_{n=1} c_n(t, y) e_n(t, x) \dots\dots\dots (1)$$

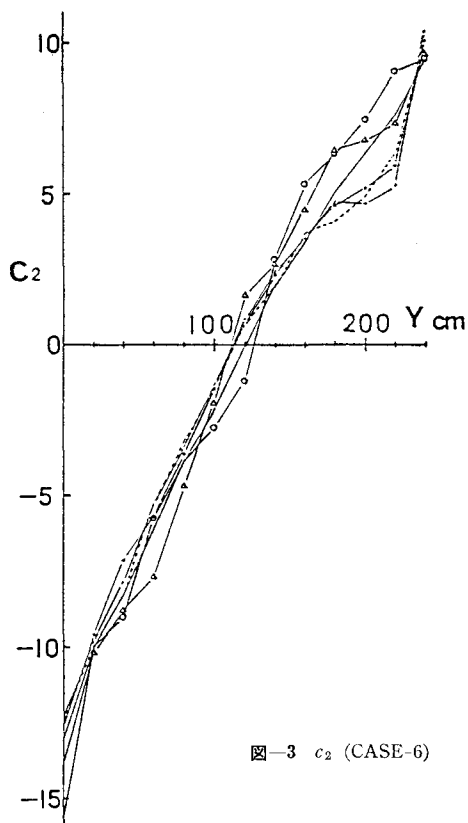
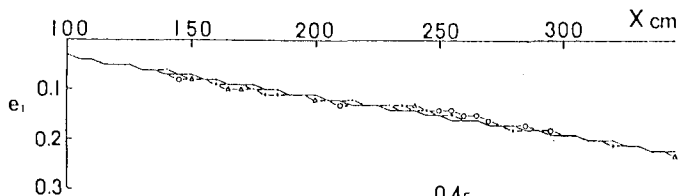
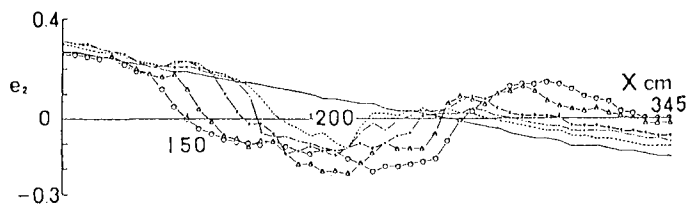
ここで、 x, y は水槽に沿った座標系であり、等深線は y 軸とある角度をなす。また、 $e_n(t, x)$ は EEF である。図—2～5 にケース 6 の c_1, c_2, e_1, e_2 を示す。各ケースとも e_3 以下は、その固有値(寄与)が小さくかつ δ 関

* 正会員 中央大学助教授 理工学部土木工学科
** 日本シールドエンジニアリング(株) 設計第5部
*** 正会員 中央大学技術員 理工学部土木工学科

図-2 c_1 (CASE-6)

数形のものとなるために無視するものとする。また、 e_1 はケース 5〔二次元〕を除いて時間によらないことが言えた。

砂の移動状況を知るために、地形図より侵食、堆積図(砂の体積変化量が正であればその地点で堆積、負であれば侵食を表す。)を作成した。図-6 は(その 1 例で)、上流側で侵食、下流側で堆積となっており両者の分離が可能である。よって、上流側で侵食を受けた砂は、中央部を通過して下流側に堆積したと考えられ、中央での沿

図-3 c_2 (CASE-6)図-4 e_1 (CASE-6)図-5 e_2 (CASE-6)

岸漂砂量が算定できる。

4. 経験的固有関数 (EEF) 展開について

一様勾配地形(計算)と c_1 , c_2 , e_1 , e_2 の傾きとの関係を 図-7, 8 に示す。図中には、各ケースの実際の初期地形における値もプロットしてある。

e_1 , e_2 は岸沖方向の勾配には関係がなく沖波入射角に、 c_1 , c_2 (の傾き) は沖波入射角と岸沖方向の勾配によることがわかる。一般に c_1 , c_2 は波向きによっていわれるが岸沖方向の勾配にも関係することに注意すべきである。又、データ数の取り方との関係で次の事が判明した。図-9, 10 は、ケース 6 において沖方向ヘダミーのデー

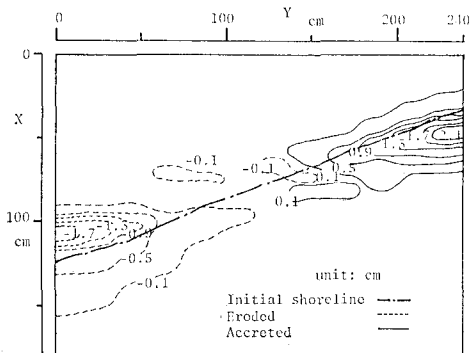
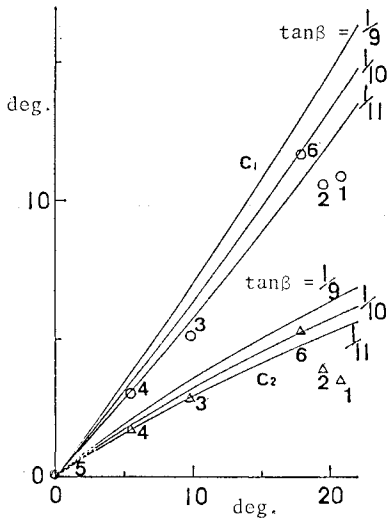
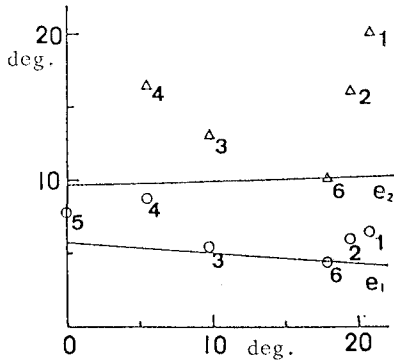
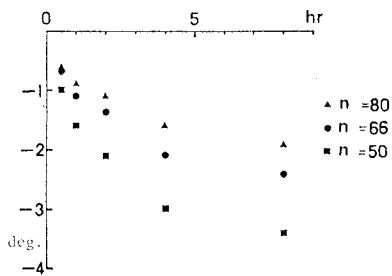
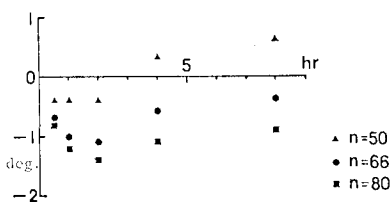


図-6 侵食・堆積図 (CASE-1)

図-7 沖波入射角度と c_1 , c_2 の傾き図-8 沖波入射角度と e_1 , e_2 の傾き図-9 データ数による c_1 の傾き変化図-10 データ数による c_2 の傾き変化

タを作成していった時の c_1 , c_2 の傾き変化である。データを無限に取れば c_1 の傾きは一定となり c_2 の傾きの変化が大きくなることが予想される。即ち、沖波入射角に対する汀線変化と同じ変化を示す部分と移動しない部分の比によって c_1 , c_2 の傾きの変化への比率が決まるということである。移動しない部分のデータをふやせば c_1 の傾きの変化が少なくなり、ほとんど一様斜面とみなせるということである。そして、その斜面からのずれを補正するのが第2成分の c_2 , e_2 であると考えられる。従って、データ数には注意を払うことが必要である。

5. 地形予測について

地形を EEF により展開したわけであるがさらに上記の結果より地形 $h(t, x, y)$ は次のようになる。

$$h(t, x, y) = c_1(t, y)e_1(x) + c_2(t, y)e_2(x) \dots (2)$$

既にのべたように、データ取得範囲と地形変化の生じている範囲との比により各量は変化する。ここでは、有意な地形変化の生じている範囲ぎりぎりまでデータを取得するものとする。その結果、 $c_1(t, y)$ は、地形変化に有意でないと思われるので $c_1(t, y) = c_1(t_0, y)$ で代用するものとし、 $e_2(t, x)$, $c_2(t, y)$ を各ケースにおいて予測する。まず、 $e_2(t, x)$ については、次式の $e_2'(t, x)$ を予測することにした。

$$\begin{aligned} e_2'(t, x) &= e_2(t, x) - e_2(t_0, x) \\ &= \eta(t) - \beta(t)x e^{-\alpha(t)(x - X_0(t))^2} \dots (3) \end{aligned}$$

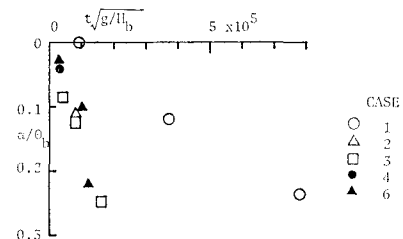
ここで、 t_0 は初期地形の値を取る。今 $e_2'(t, x)$ のパラメータは、各ケースにより多少の変化を示しているが実験条件の範囲が狭いこと ($c = 4.1 \sim 6.8$) から同一であると考えると、ケース 1 を除いては次の様に定まった。

$$\left. \begin{aligned} \eta(t) &= -0.25e^{-0.24t} + 0.22 \\ \beta(t) &= -0.45e^{-0.11t} + 0.73 \\ X_0(t) &= 0.52e^{-0.33t} + 0.69 \\ \alpha(t) &= 4.6e^{-0.10t} + 3.2 \end{aligned} \right\} \dots (4)$$

また、 $c_2(t, x)$ は次の関係式を用いて予測した。(図-11 参照)

$$\alpha/\theta_0 = 5.7 \times 10^{-3} t \cdot \sqrt{g/H_b} + 0.01 \dots (6)$$

ここで、 α : c_2 の傾き、 θ_0 : 碎波角、 g : 重力加速度、 H_b : 碎波波高、 t : 経過時間である。以上の結果を用いて計算したものと実験結果と比較したものの例が 図一

図-11 c_2 の傾き変化 (α) と波のエネルギーの関係

12~20 である。今、データの取得範囲が狭いものの、 $c_1(t, y)$ はわずかながら時間によるために全体的にずれるのは当然である。結果は $e_2(t, x)$ の関数形は侵食型海浜形状によく適合すると言えるが砕波点付近の局所的な

凹凸, bar などを表現することはできない。尚、堆積型(ケース 1) の $e_2(t, x)$ は別の関数形によるあてはめを考える必要がある。侵食、堆積型のタイプ別に関数形を考えかつそのパラメーターを c 値により変える必要がある

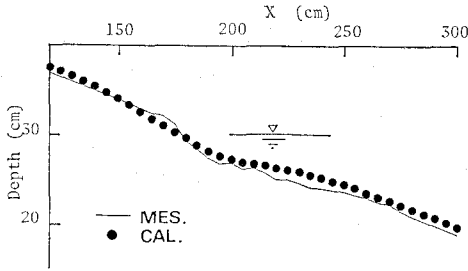


図-12 断面図 (CASE-2, $y=20$ cm, $t=4$ hr)

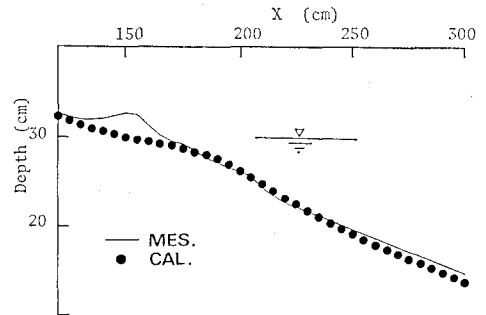


図-13 断面図 (CASE-2, $y=220$ cm, $t=4$ hr)

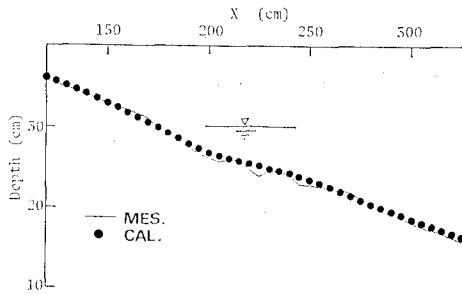


図-14 断面図 (CASE-3, $y=20$ cm, $t=2.7$ hr)

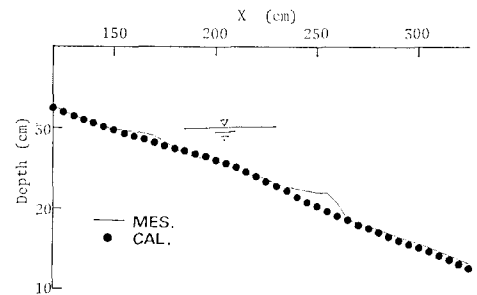


図-15 断面図 (CASE-3, $y=220$ cm, $t=2.7$ hr)

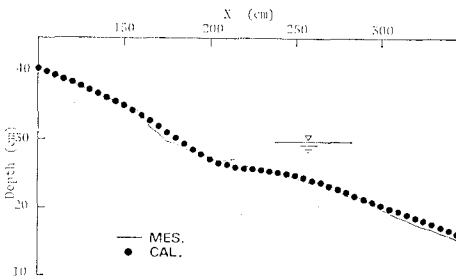


図-16 断面図 (CASE-6, $y=20$ cm, $t=2$ hr)

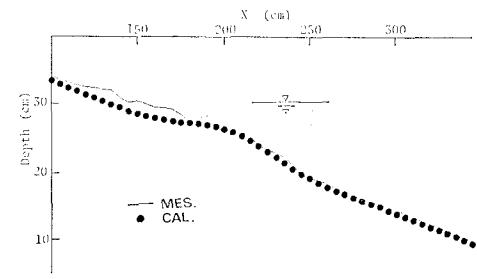


図-17 断面図 (CASE-6, $y=220$ cm, $t=2$ hr)

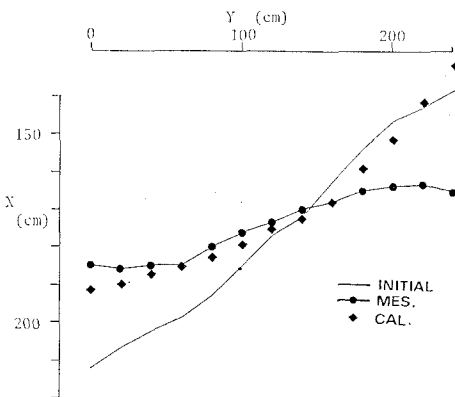


図-18 汀線変化図 (CASE-2, $t=4$ hr)

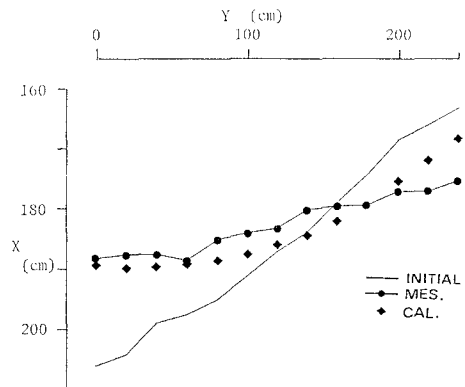
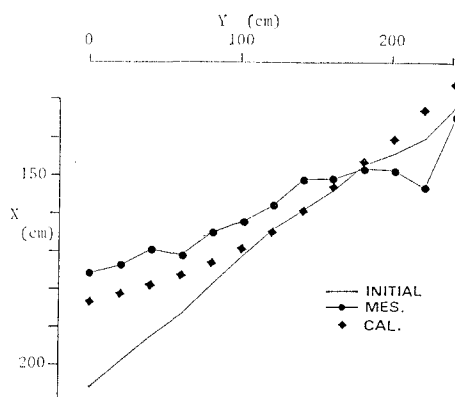


図-19 汀線変化図 (CASE-3, $t=2.7$ hr)

図-20 汀線変化図 (CASE-6, $t=2$ hr)

とも言えよう。今回は、データ数を有意な点までにとどめて予測を行なったわけであるが、 $e_2(t, x)$ の推定が精度よく出来ればかなりうまくいくと思われる。

6. 沿岸漂砂量と EEF について

Shore protection manual に提案されている沿岸漂砂量公式を $\text{cm}\cdot\text{s}$ に換算すると次式を得る。

$$S_t = 0.41(1/16 \cdot H_{1/3}^3 c_g \sin 2\theta)_b \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここで、 S_t : 単位時間当たりの沿岸漂砂量、 $H_{1/3}$: 有義波高、 c_g : 群速度、 θ : 波向き角、添字 b は砕波点での値を示す。実験結果は、それに比べてやや小さめながらよく一致するとも言えよう (図-21 参照)。EEF と沿岸漂砂量とは次の様に考えられる。

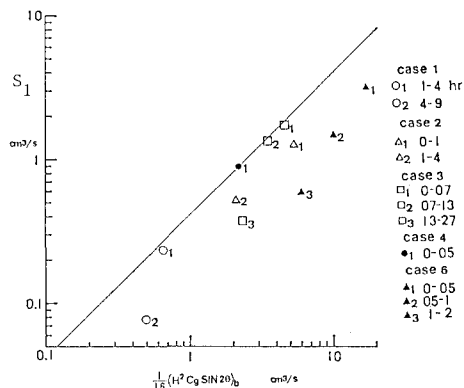


図-21 沿岸漂砂量 (実線は (6) 式を表す)

今地形は、初期地形からの変化が小さければ、 $c_2(t, y) \doteq c_2(t_0, y)$ とでき次式で与えられる。

$$h(t, x, y) \doteq c_1(y)e_1(x) + c_2(y)e_2'(t, x) + c_2(y)e_2(t_0, y) \quad \dots\dots\dots (7)$$

汀線と y 軸のなす角度が小さく、かつ沿岸方向に運ばれたものは、ただちに 2 次元的に分配されると仮定すると砂の連続式は次のようになる。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q_y}{\partial y} = 0 \quad \dots\dots\dots (8)$$

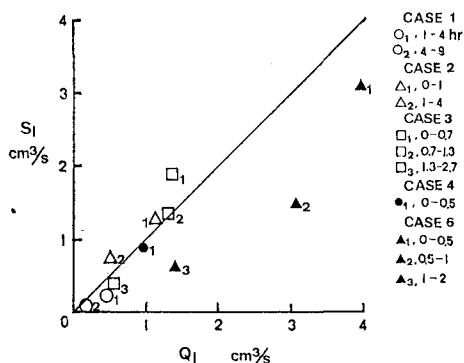
(7), (8) 式より次式を得る。

$$q_y = - \int_y c_2(y) dy \frac{\partial}{\partial t} e_2'(t, x) \quad \dots\dots\dots (9)$$

総沿岸漂砂量を Q_t とすると、次のようになる。

$$Q_t = - \int_y c_2(y) dy \int_x \frac{\partial}{\partial t} e_2'(t, x) dx \quad \dots\dots\dots (10)$$

(10) 式において沿岸漂砂量を算定して、 S_t (実測) と比較した (図-22 参照)。図-22 はよく合っていると言える。すなわち、 $c_2(y)$ は沿岸漂砂量の勾配と e_2' の形状から計算できることがわかる。

図-22 EEF 解析より求めた沿岸漂砂量 Q_t と実測値 S_t との関係 (実線は $Q_t = S_t$ を示す)

7. ま と め

経験的固有関数展開を応用することによって 3 次元的地形変化を推定することを試みた。原理的に言っている時間にある地形が与えられ、波が作用した時の地形変化は、断面変化の特性 (例えば c 値) より e_2' が定まり、初期地形と波向きより c_1, e_1 が沿岸漂砂量より c_2, e_2 が定まると言う形で推定が可能と言える。しかし、本研究は小型平面水槽を用いた単純な実験に基づくものであり今後現地海岸への適用可能性については調べていく予定である。

参 考 文 献

- 1) Pelnard-Considère, R.: Essai de théorie de l'évolution des formes de rivages en plages de sable et de galets. IVème Journées de l'Hydraulique, 1954.
- 2) Winant, C. D., D. L. Inman and C. E. Nordstrom: Description of seasonal beach changes using empirical eigenfunctions, J.G.R., Vol. 80, No. 15, pp. 1979~1986, 1975.
- 3) 橋本 宏・宇多高明・竹岡 勉: 経験的の海浜変形モデルによる構造物周辺の地形変化予測, 第 28 回海岸工学講演会論文集, pp. 300~304, 1981.
- 4) 堀川清司・砂村継夫・近藤浩右・岡田 滋: 波による二次元汀線変化に関する一考察, 第 22 回海岸工学講演会論文集, pp. 329~334, 1975.