

等深線距離を用いた三次元経験的固有関数展開による 仙台海岸海浜変形解析

永 澤 豪*・田 中 仁**

1. はじめに

海岸構造物による沿岸漂砂の遮断や河川から海浜への土砂供給量の減少から、海岸侵食が各地の海岸で進んでいる。近年、仙台海岸でも、仙台新港、閑上漁港等の港湾構造物による沿岸漂砂の遮断により海岸侵食が進んでおり自然海浜の消失が危惧されている(宇多ら, 1990)。このような背景から、著者らは仙台海岸の海浜地形の変化を通年の観測によって捉え、その成果を蓄積してきた。それらのデータを用いて森・田中(1998)(以下、前報と呼ぶ)は、汀線位置の時系列データに経験的固有関数法を適用した解析を行い、汀線変動に対する岸沖漂砂・沿岸漂砂による寄与の分離を行った。しかし、現実の海浜では汀線のみで海浜地形を十分に代表している訳ではない。複雑な海岸地形の変化を捉えるためには、三次元的な地形情報を考慮する必要がある。そこで、本研究では、鉛直方向の地盤高さを考慮し、汀線以外を含めた等深線距離データに経験的固有関数解析を適用し、その有効性について詳細に検討した。

2. 観測概要

(1) 現地観測

現地観測地域は、宮城県仙台湾の仙台港から閑上漁港南方 1 km 及び全長約 14 km の砂浜海岸である。図-1 に観測地域の概略図及び測点を示す。この地域には、仙台港から約 2 km 南方の地点に二級河川七北田川の河口、約 12 km 南方には一級河川名取川の河口が存在している。また、調査海浜の中央部分に位置する荒浜海岸の前面には、長さ 120 m、開口幅 60 m の離岸堤が 6 基設置されている。その背後には砂が堆積し、顕著な汀線の前進が見られる。

現地観測では、汀線にほぼ直角な測線を 0.5~1.5 km 間隔で計 16 本設置し、海浜の縦断面を測量している。これらの測線のうち、1~5 の測線については 1993 年から、5~14 は 1996 年の 10 月から、閑上漁港南方の測線 15, 16 については 1998 年 8 月から 2~3 週間に一回の

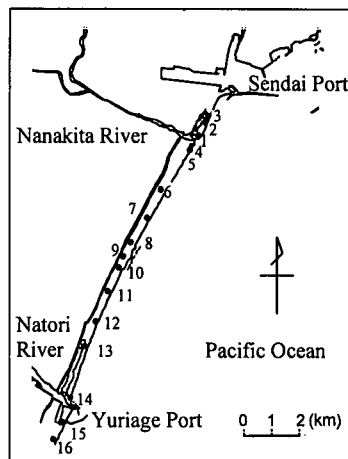


図-1 調査海浜

ペースで測定を行った。今回の解析には、1996 年 10 月から 1999 年 10 月までの三年間のデータを用いている。

(2) 波浪データ

観測地域のデータ解析の波浪条件に用いたデータは、仙台港沖で運輸省が測定している波高、周期、波向き角である。これらのデータから浅水変形、屈折変形を考慮して砕波点での波エネルギーフラックスを求めて解析に用いている。

3. 観測結果

一般に海浜の侵食及び堆積は、岸沖漂砂に起因するものと沿岸漂砂に起因するものに分けられ、前報で、調査海浜では両方が重畳した海浜変形が起きていることが報告されている。継続した観測においても同様の傾向が観測された。その特徴として、岸沖漂砂に起因する侵食は、台風などの高波浪時に見られ、調査海浜全域において一様に急激に侵食し、その後、ほぼ一定の速度で回復するという挙動を示す。沿岸漂砂に起因する侵食堆積現象としては、特に海岸構造物周りに見られ、荒浜の離岸堤、閑上漁港付近の南北で汀線の前進後退が逆になる傾向がある。仙台海岸においては波向き ESE が最多出現階級であるため、北向きの漂砂が卓越している。この北向きの

* 正会員 修(工) パシフィックコンサルタンツ株式会社 港湾部

** 正会員 工 博 東北大学大学院教授 工学研究科 土木工学専攻

沿岸漂砂を海岸構造物が捕捉している。

4. 経験的固有関数による解析

(1) 解析方法

ここでは、経験的固有関数を用いて、調査海滨の地形データの解析を行う。経験的固有関数解析とは、Winant *et al.* (1976) によって用いられた海滨変形を時間と場所の固有関数の積で表現する主成分分析の一種である。この手法は、取り扱うのが地形データとその時系列データのみであるために独自の発達を遂げ、その有効性が認められている。

前報では、汀線の時系列変化に着目し、解析を行った。しかし、汀線変化のみが海滨形状の変化を代表しているとは言い難い。そこで、本研究においては水深方向を含め、三次元の解析を行うこととする。三次元の経験的固有関数解析は、2つの正規直交関数の組を用いて次のように書ける。

$$y(x, z, t) = \sum_n c_n(t) e_n(x, z) \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 $y(x, z, t) = y'(x, z, t) - \bar{y}(x, z)$ 、 $y'(x, z, t)$ ：基準線からの等深線距離（鉛直座標 z は水深 z の等深線であることを表す）、 $\bar{y}(x, z)$ ：基準線からの等深線距離の平均値、 n ：測線数、 $c_n(t)$ ：時間に関する固有関数、 $e_n(x, z)$ ：場所に関する固有関数である。通常、三次元の経験的固有関数展開は二次元平面内における海底高さに対して適用されるが、ここでは、深浅測量から得られるような広範囲の水深データに代わり、その変化量として基準線からの等深線距離を用い、これを沿岸方向に展開した。現在蓄積されている測量データの特性を考慮して、その水深方向の解析範囲は T.P.+1.0 m から T.P.-1.0 m までの範囲とした。

ここで、加藤・吉松 (1984) の手法を用い、 $(x, z) \rightarrow (x')$ のように座標変換を行うと (1) 式は (2) 式のように書き直せる。

$$y(x', t) = \sum_n c_n(t) e_n(x') \dots\dots\dots (2)$$

この方法で行った解析を以下、「Method 1」と呼ぶこととする。

また、「Method 2」として、標高ごとの変化に寄与する成分の違いを見るために、標高ごとに、すなわち各等深線において別々に経験的固有関数解析を行う。この方法では、標高ごとに別々に時間の固有関数が得られることになるため、Method 1 に比べて展開の自由度が高い特徴を有する。

(2) 解析結果 (Method 1)

河川などの地形的影響を考慮し、測定回数が 43 回の 10 本 (図-1、測線 3, 2, 5, 6, 7, 8, 10, 11, 12, 13)

の測線を用いて解析を行った。解析期間は、1996 年の 10 月から 1999 年の 10 月である。第一成分と第二成分について場所の固有関数分布を図-2 に、時間の固有関数の時系列変化を図-3 に示す。第一成分と第二成分の寄与率はそれぞれ 41.4% と 15.6% で、合わせて現象の 57.0% を説明することができる。図-2 から $e_1(x, z)$ は、調査海滨全域で正の値をとっており、 $c_1(t)$ の値によって、全海滨が一様に前進後退することを示している。従って観測結果の考察から岸沖漂砂を表現していると考えられる。特徴的なのは、離岸堤付近と七北田川付近の T.P.±0.0 m 以下での値が大きいことである。これは、河口の近傍や離岸堤部では海滨勾配が緩く、砂移動に対する等深線距離の移動量が大きいからである。第二成分を見ると、離岸堤の南北及び、七北田川河口の南北で $e_2(x, z)$ の値の符号が変化している。調査海滨では、北向きの漂砂が卓越している。従って、離岸堤と七北田川の河口テラスが沿岸漂砂を遮断し、南北で侵食堆積傾向が逆になっていると考えることができる。特に七北田川左岸で負の値が大きいのは、沿岸漂砂を動かす北寄りの波が卓越すると、仙台港南防波堤の反射波で侵食が生じること

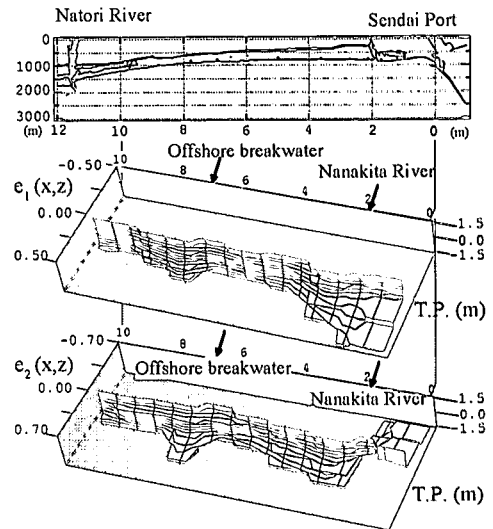


図-2 場所の固有関数の分布 (Method 1)

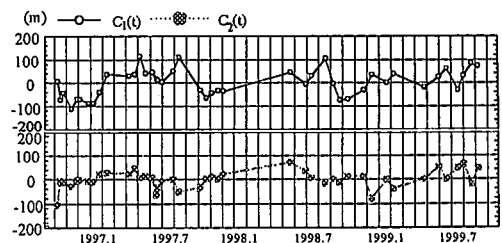


図-3 時間の固有関数の分布 (Method 1)

を表していると考えられる。仙台港南防波堤から南に2 kmに渡って反射波により侵食が生じることは、森下ら(1995)によって報告されている。

(3) 解析結果 (Method 2)

標高ごとの場所の固有関数の分布を図-4に、時間の固有関数の時系列変化を図-5に示す。また、各標高の第一成分、第二成分の寄与率を表-1に示す。Method 2の第一・第二成分の寄与率は、Method 1と比べて大きくなっていることがわかる。また、各標高によってその変化に及ぼす成分の寄与率構成が異なっていることがわかる。

次に、図-4、図-5をみると、 $e_1(x)$ は、全標高で同じ傾向を示しているが、 $e_2(x)$ では、T.P.0.0 m以下とT.P.0.0 m以上では、符号が逆になっている。対応する $c_2(t)$ の値を見ると、T.P.0.0 m以下とT.P.0.0 m以上で同符

号と異符号の場合がある。 $c_2(t)$ の符号が同じ場合はT.P.0.0 m以下とT.P.0.0 m以上で侵食堆積傾向が全く逆なことを示している。これは勾配が変化するような海浜変形を表現していると考えられる(図-6a)。また、 $c_2(t)$ の符号が異なる場合には、T.P.0.0 m以下とT.P.0.0 m以上で侵食堆積傾向が同じになり、勾配があまり変化しない海浜変形を表現していると考えられる(図-6b)。

このように、標高によってその変形に寄与する成分の寄与率が異なる。しかしMethod 1の解析ではこれらの標高による差異を一つの時間の固有関数で捉えており、このために、Method 2の解析と比べて表現の自由度が小さく、第一成分と第二成分の寄与率の和が小さくなっていると考えられる。

5. 解析結果と外力との関係

(1) 場所の固有関数と外力

第一成分は岸沖漂砂による汀線変化と考えられた。従って、波エネルギーフラックスとの対応が考えられる。そこで、波向線法(丸山・鹿島, 1983)を用い、調査海浜における砕波点での波エネルギーフラックス分布を計算した。入射波は、波高0.6 m, 周期7.5 sとした。調査海浜における砕波点での波エネルギーフラックスの分布、及びMethod 1の場所の固有関数の対応を図-7に示す。これから、場所の固有関数と波エネルギーフラックスの分布が非常によく一致しているのが分かる。

(2) 時間の固有関数と外力

ここで、時間の固有関数と対応する外力を考える。岸

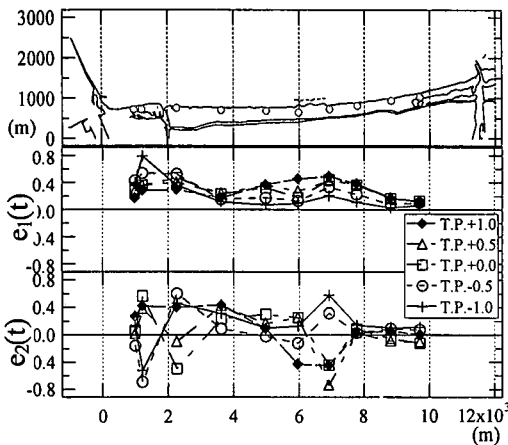


図-4 場所の固有関数の分布 (Method 2)

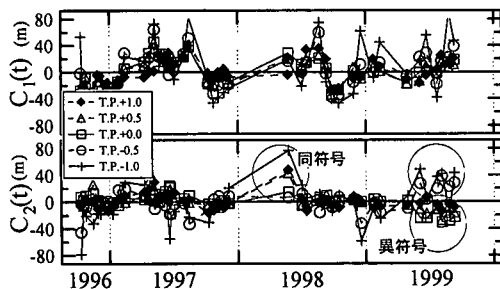


図-5 時間の固有関数の分布 (Method 2)

表-1 各標高の寄与率 (Method 2)

	T.P.-1.0 m	-0.5	0.0	0.5	1.0
1st. Comp.	0.4598	0.4995	0.5222	0.5241	0.4750
2nd. Comp.	0.2264	0.1599	0.1548	0.1727	0.1879
1st.+2 nd.	0.6862	0.6594	0.6770	0.6968	0.6629

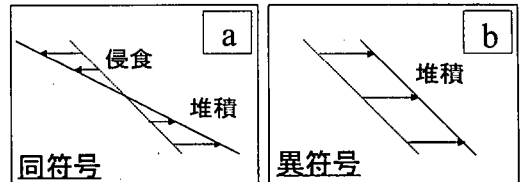


図-6 海浜断面変形の略図

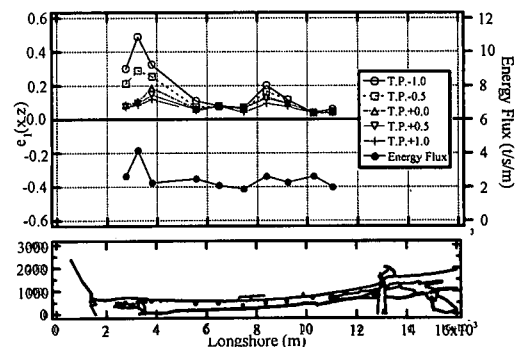


図-7 $e_1(x, z)$ と波エネルギーフラックスの分布

沖波砂は、高波浪時に明確に現れることから、波浪条件と対応している。そこで、Sunamura and Horikawa (1974)によって考案され、波浪条件と海浜形状の変形を関連づけた C_s パラメータとの対応が考えられる。 C_s パラメータは次のような (3) 式で表される。

$$C_s = \frac{\frac{H_0}{L_0}}{\tan \beta^{-0.27} \left(\frac{d}{L_0} \right)^{0.67}} \dots \dots \dots (3)$$

ここで、 H_0 : 沖波波高、 L_0 : 沖波波長、 $\tan \beta$: 海浜勾配 (1/30) d : 底質粒径 (0.2 mm) である。Sunamura・Horikawa によると、海浜縦断形状分類の境界は、現地では $C_s=18$ とされており、 $C_s>18$ で侵食、 $C_s<18$ で堆積となる。ここでは、その境界を $C_{s0}=23.8$ とした。ここで、 C_s パラメータは、平衡状態での海浜形状を表す指標であるが、 $c_n(t) \cdot e_n(x, z)$ は海浜形状変化量を表すため、直接関連づけることができない。そこで、前報にならない、 $dc_1(t)/dt$ と C_s を関連づける。しかし、二週間に一回の観測では $dc_1(t)/dt$ の精度が低いため、さらに $dc_1(t)/dt$ と C_s 両方を積分した形 C_s^* で比較した。

$$C_s^* = \int (C_s - C_{s0}) dt \quad (s) \dots \dots \dots (4)$$

図-8 に $c_1(t)$ と C_s^* の相関を示す。分布をみると C_s^* の値が大きいき、すなわち高波浪時に $c_1(t)$ が負の値をとる傾向が見られる。 $e_1(x, z)$ は海浜全域で正の値を取っていることから、高波浪時には、 $c_1(t)e_1(x, z)<0$ となり、汀線が後退することが説明でき、物理現象に対応していることがわかる。

次に、Method 1 の解析では、第二成分が沿岸漂砂と関連していると考察された。そこで、第二成分の時間の固有関数 $c_2(t)$ と、沿岸漂砂と密接な関係を持つ沿岸方向のエネルギーフラックス E_L との対応について考える。ここでも、 C_s パラメータと同様に、 $dc_2(t)/dt$ と沿岸方向の波エネルギーフラックス E_L との関連づけ、一度積分した形で対応をみた。ここで、沿岸方向の波エネルギーフラックスを南北方向のエネルギーに分ける境界を $\theta_0=113^\circ$ とし、その積分値を E_L^* と表すことにする。

$$E_L^* = \int E_L dt \quad (\text{ton} \cdot \text{m/m}) \dots \dots \dots (5)$$

図-9 に Method 1, 10 測線の解析結果の $c_2(t)$ と E_L^* の相関を示す。これを見ると、非常にばらつきは大きいものの、 E_L^* が大きくなると $c_2(t)$ の値が正となる正の相関を示している。図-2 から、 $e_2(x, z)$ は離岸堤の南北で正負が逆転する傾向を示す。従って、 E_L^* の値が大きく、北向きの波エネルギーフラックスが大きくなると、

- ・ 離岸堤南部が正 $e_2(x, z) \rightarrow c_2(t)e_2(x, z) > 0$ 堆積
- ・ 離岸堤北部が負 $e_2(x, z) \rightarrow c_2(t)e_2(x, z) < 0$ 侵食

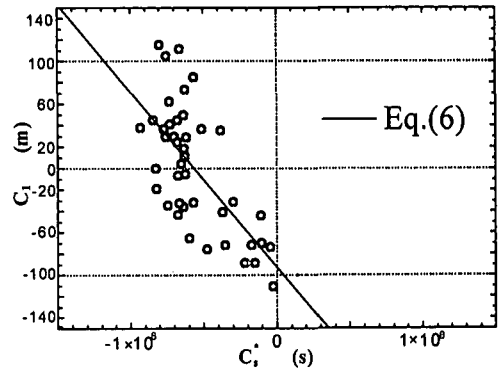


図-8 c_1 と C_s^* の関係

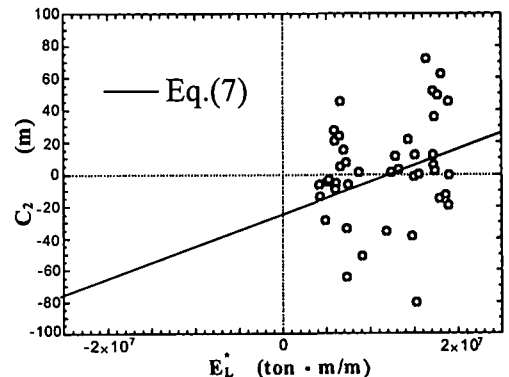


図-9 c_2 と E_L^* の関係

となり、北向きの波浪で生じた沿岸漂砂が離岸堤で遮断されて、離岸堤南部で堆積、離岸堤北部で侵食するという物理現象に対応していることが分かる。

6. 海浜地形シミュレーション

これまでに、第一成分 $c_1(t)$ は C_s^* と、第二成分 $c_2(t)$ は E_L^* と物理現象に符合した相関が見られた。従って、これらに最小自乗法を用いて近似曲線を引いて外力で時間の固有関数を表すことにする。以下に時間の固有関数と外力の関係を表した式を示す。

$$c_1 = -1.65 \times 10^{-6} C_s^* - 92.8 \dots \dots \dots (6)$$

$$c_2 = 2.04 \times 10^{-6} E_L^* - 23.6 \dots \dots \dots (7)$$

これらの式を用いて解析を行う。ここで、沿岸漂砂と関連づけた第二成分は、沿岸方向の波エネルギーフラックスと関連づけて計算する際に注意する必要がある。調査海浜は、図-1 で示したとおり、円弧状の形をしており、沿岸方向の波エネルギーの方向を分ける境界値は、測点によって異なる。従って、入力する沿岸方向の波エネルギーフラックスについては、測点ごとに、北向き・南向きのフラックスを決める境界の角度を変えて計算したものを入力した。Method 2 の解析結果を用いた場合も

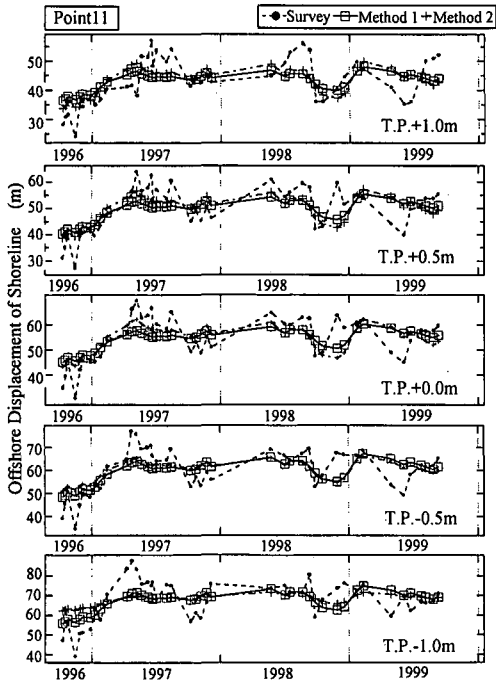


図-10 シミュレーション結果 (測線 11)

含んだ計算結果の一例を図-10に示す。計算結果は、海浜変形の変形の傾向を大まかに捉えてはいるものの、高波浪による急激な後退や、大幅な前進を再現できていない。この原因としては、まず、Method 1の解析の第一・第二成分の寄与率が小さいことが上げられる。しかし、寄与率が68%のMethod 2の解析と、その再現性に大きな差がないことから、Method 1の解析でも、岸沖・沿岸漂砂は良好に分離していると考えられる。

7. ま と め

(1) Method 2の方がMethod 1の経験的固有関数解析の第一成分・第二成分の寄与率が大きくなった。Method 1は、標高ごとに異なる海浜変形を一つの時間の固有関数で表現するのに対して、Method 2は、標高ごとに時間の固有関数を持つため表現の自由度が大きいためと考えられた。

(2) 場所に関する固有関数の第一成分の分布は波エネルギーフラックスの分布と高い相関関係にあることが示された。

(3) 岸沖漂砂に起因した海浜変形は、 C_s パラメータと、沿岸漂砂に起因した海浜変形は、沿岸方向の波エネルギーフラックスと相関があることが示された。

(4) 時間に関する固有関数を外力で表現し、海浜地形シミュレーションを行った結果、侵食・堆積のおおよその傾向と勾配の変化を捉えることができた。

(5) Method 1の解析結果を用いたシミュレーションの再現性とMethod 2の解析結果を用いたシミュレーションの再現性を比較した結果、寄与率の差ほどの大きな再現性の差は見られなかった。従って、寄与率は低いものの、Method 1の解析結果も岸沖・沿岸漂砂による成分を良好に分離していると考えられる。

謝辞：本研究を行うにあたり、運輸省第二建設局塩釜港工事事務所、宮城県仙台北土木事務所から貴重な資料を提供して頂いた。また、本研究の地形調査を行うに際し、東北大学工学部土木工学科環境水理学研究室の諸兄から協力を得た。ここに記して深く謝意を表する。本研究に対して文部省科学研究費の補助を受けたことを付記する。

参 考 文 献

- 宇多高明・小俣 篤・奉松麻成 (1990): 仙台湾沿岸における砂浜消失の危機, 海岸工学論文集, 第37巻, pp. 479-483.
- 加藤一正・吉松 晃 (1984): 三次元の経験的固有関数による深浅図解析法, 港湾技術研究所資料, No. 248.
- 丸山康樹・鹿島遼一 (1983): 波向線法による屈折計算法の検討, 電力中央研究所報告.
- 森 俊哉・田中 仁 (1998): 岸沖漂砂・沿岸漂砂に起因する汀線変動の分離, 海岸工学論文集, 第45巻, pp. 551-555.
- 森下保壽・高橋次郎・川又良一・坂井隆行・片野明良 (1995): 構造物の反射波による海浜地形の制御効果, 海岸工学論文集, 第42巻, pp. 711-715.
- Sunamura, T. and K. Horikawa (1974): Two-dimensional shore transformation due to waves, Proc. 14th Conf. Coastal Eng., pp. 920-938.
- Winant, D. C., D. L. Inman and C. E. Nordstrom (1976): Description of seasonal beach changes using empirical eigenfunction, J. G. R., Vol. 80, No. 15, pp. 1979-1986.