

岸沖漂砂・沿岸漂砂に起因する汀線変動の分離

森 俊 哉*・田 中 仁**

1. はじめに

一般的に漂砂による地形変化は非常に複雑であり、外力と地形変化の因果関係を的確に捉えることが困難な場合も多い。そこで、支配外力やタイムスケールに応じて現象を単純化し、それぞれに対してこれまでに多くのモデルが提案されてきた。このうち、長期的汀線変動を予測するためのモデルの代表的なものに one-line モデルが挙げられる。このモデルの現地適用性は実測汀線データとの比較によって判断される。この際、現地データは岸沖漂砂と沿岸漂砂に起因する汀線変化が重畳したものであるが、one-line モデルの検証ではこの事実を考慮していない。場合によっては、主に岸沖漂砂に起因する汀線変化が支配的な現地資料をモデルの検証データに使用していることもあり得、モデルの適用性の検討や漂砂量係数の同定に際し、誤った判断をしかねない。

そこで本研究では、仙台港南部海岸を対象として、経験的固有関数を用いて岸沖、沿岸漂砂に起因する海浜変化を定量的に分離することを試みた。従来、経験的固有関数による解析は岸沖方向の測線の展開に利用されてきた(たとえば、Winant ら, 1976) が、ここでは沿岸方向の汀線位置データを展開しており、この点が大きな相違点である。さらに、分離して得た成分と外力との対応を調べ、簡単な予測モデルを構築した。

2. 仙台湾岸の概要

本研究の対象領域は、仙台港から名取川河口に至る約 12 km の砂浜海岸であり、仙台港南部約 2 km の位置で二級河川七北田川が、対象領域南端で一級河川名取川がそれぞれ仙台湾に注いでいる。1990～1997 年の波浪データを基に仙台湾岸での波浪統計を調べた結果、波高 0.5～0.7 m, 周期 7～8 s, 波向き ESE が最多出現階級であった。調査海岸における各地点の位置を表現するために、図-1 に示すように (x, y) 座標系を設定した。標高は、T.P.を基準とした。現地測量及び、航空写真の海岸線を表現する場合にもこの座標系を用いている。そして、

汀線付近に汀線変動調査の基準点(図-1 参照)を設け、これらの地点について岸沖方向の汀線変動を調べた。

3. 仙台湾岸での汀線変化の特徴

3.1 岸沖漂砂に起因する汀線変化

C, G 地点における、1993 年からの汀線変動とその期間の波エネルギーフラックスを図-2 に示す。下段には、現地測量で得られた海浜断面において T.P.=0.0 m のレベルが交差する位置で定義された汀線の変化を示した。

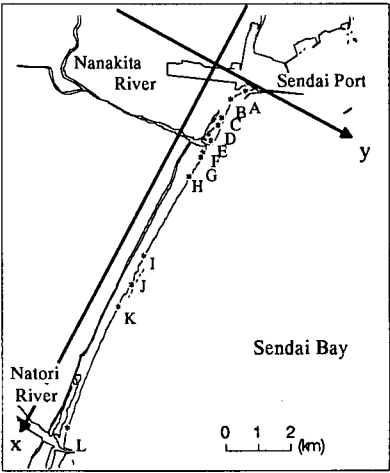


図-1 仙台湾岸と使用した座標系

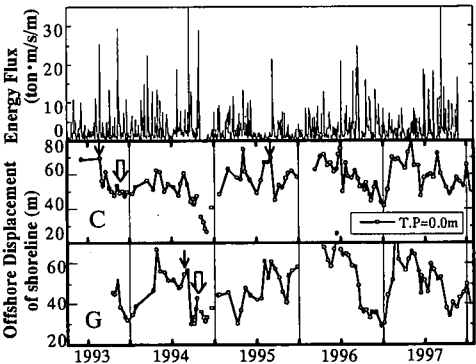


図-2 汀線変動と波エネルギーフラックス (C, G 点)

* 正会員 工修 日本道路公団大阪管理局吹田管理事務所
** 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

上段には、観測期間に対応する波エネルギーフラックスを示した。図中で波エネルギーフラックスが大きい期間に着目してみると以下のことがわかる。

堆積の過程では、汀線がほぼ一定の勾配で前進し、侵食過程では急激に、かつ大きく後退する(図中→部)。また、侵食過程は入射波のエネルギーフラックスが大きい期間、つまり高波浪時に生じる傾向が見られる。しかし、すでに汀線が後退しているときに高波浪が来襲しても、汀線位置が大きく変化することはない(図中⇐部)。これより、汀線の後退はエネルギーフラックスの大きさだけでなく波が入射するときの汀線位置にも関係があることがわかる。このような地形変化は加藤ら(1987)による鹿島海岸での観測においても報告されており、岸沖漂砂に起因する地形変化と考えられる。

3.2 沿岸漂砂に起因する汀線変化

図-3に航空写真から読みとった汀線位置の時系列変化を示す。また、1992年～1994年の波高と波向き角の関係を図-4に示す。

図-3からC,D両地点とI地点の1992年から1994年の汀線変動を見ると、ほぼ正反対の傾向を示していることが分かる。またI,K地点もほぼ対称な汀線変動を示すことも分かる。ここで、図-4から海浜変形に大きな影響を持つ高波浪の入射方向を見てみると、1992,1993年(点線部)には北寄りの波が卓越し、1994年(実線部)には南寄りの方向から高波浪が来襲していることが分かる。つまり、この期間の汀線変化は波向きによる影響が大き

いことが推察できる。

これらのことから次のことが分かる。北寄りの波が卓越する期間は、仙台新港よりのC地点では侵食過程にあり、離岸堤よりのI地点では堆積過程にある。反対に南寄りの波が卓越する期間は、C地点では堆積、I地点では侵食の過程にある。これより、仙台港防波堤～荒浜海岸離岸堤の海浜がポケットビーチに似た汀線変化を示していることが分かる。そして、離岸堤により沿岸漂砂の移動が阻止されるため、漂砂移動の下手側で侵食が見られることも確認される。従って、ここに示された汀線変化は沿岸漂砂に起因するものであることが分かる。

以上の様に、一般に現地で見られる汀線変動は、岸沖漂砂と沿岸漂砂の両者によるものが重畳している。以下では、経験的固有関数法により、この二つの成分の分離を試みる。

4. 経験的固有関数による展開

4.1 解析方法と地形データ

経験的固有関数解析は、地形変化を場所の関数と時間の関数との積に分離して表現する手法である。従来のこの手法による地形変化の解析は、岸沖方向への展開であり、海底の断面形状の変化を対象としたものであった(Winantら, 1976)。しかし、本研究では沿岸方向の地形データを用いており、経験的固有関数を用いた解析は沿岸方向への展開となる。この点が従来の研究との大きな相違点である。

経験的固有関数は、二つの正規直交関数の組を用いて次のようにおける。

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

ここで、 $y(x,t)$: 平均汀線位置からの変動量測定値(= $y'(x,t) - \bar{y}(x)$)、 $y'(x,t)$: 基準線からの汀線位置、 $\bar{y}(x)$: 平均値)、 n_x : 測線数、 $c_n(t)$: 時間に関する固有関数、 $e_n(x)$: 場所に関する固有関数である。経験的固有関数を求めるには、まず実測データから次のような要素を持つ相関行列Aを計算する。

$$a(i,j) = \frac{1}{n_x n_i} \sum_{t=1}^{n_t} y(i,t) y(j,t) \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 $a(i,j)$: 相関行列の要素、 n_t : 測定回数である。なお、本研究では二種類の海浜地形データを用いている。航空写真から読みとった汀線位置を用いたものと、現地観測から得たデータを用いたものである。前者は1990～1997年までの約8年分で、1～2ヶ月に一度現地を撮影した写真を用いた。デジタイザで汀線を読みとった後、座標変換及び潮位補正を行っている。後者については、1996年10月～1998年1月までのデータを用いた。対象海浜に基準点を設け、二週間に一度程度の割合で現

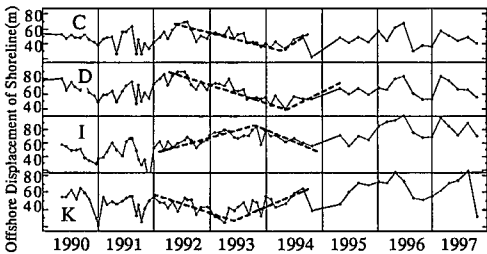


図-3 航空写真から読み取った汀線位置

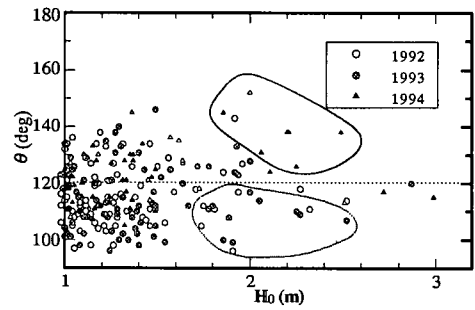


図-4 波高と波向き角の関係

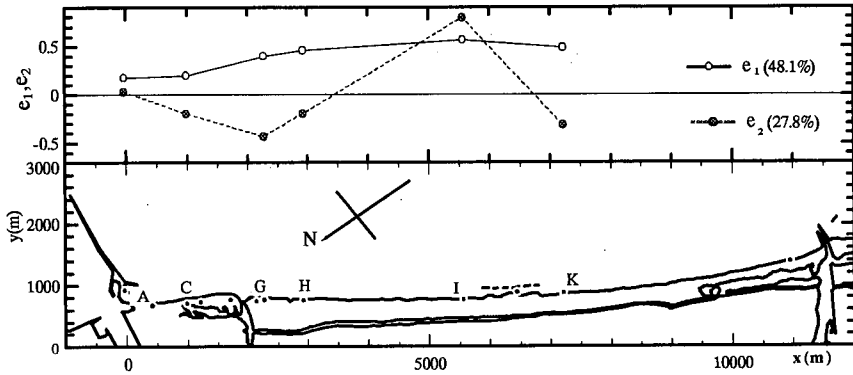


図-5 航空写真による場所に関する固有関数の分布

地観測を行った。汀線位置は、両者とも T.P.=0.0 m で定義した。

4.2 航空写真を用いた解析

場所に関する固有関数の分布を図-5 に、時間に関する固有関数の分布を図-6 に示す。固有値の大きいものから二つ (大きい方から順に添字 1, 2 をつける) を選んで示した。寄与率は第一成分で 48.1%, 第二成分で 27.8% であり、この二つで現象の約 75% を説明できる。よって、式 (1) は式 (3) のように近似出来る。

$$y(x, t) \approx c_1(t)e_1(x) + c_2(t)e_2(x) \quad \dots\dots\dots (3)$$

以下に各成分の固有関数の持つ物理的意味を考察する。

第一成分の $c_1(x)$ については調査海滨の全域で正の値をもつことが分かる。このことから汀線位置は $c_1(t)$ が正の時には沿岸方向に一樣に前進し、負の時には後退するといえる。この現象は岸沖漂砂に起因する汀線変化を表していると推察できる。そこで時間に関する固有関数の時間変化率 $dc_1(t)/dt$ と Sunamura and Horikawa (1974) によって示された C_s パラメータとの対応を考えた。ところで、航空写真は 1~2ヶ月の撮影間隔であるため $dc_1(t)/dt$ の計算精度が不十分である。そこで $dc_1(t)/dt$ と C_s パラメータをそれぞれ一度積分した形で調べた。結果を図-7 に示す。Sunamura and Horikawa (1974) によれば、海滨縦断形状分類の境界は $C_s=18$ であり、 C_s

>18 で侵食型、 $C_s<18$ で堆積型としている。ここでは、実測値を基にその境界値を $C_{s0}=23.0$ とし、 C_s 値から C_{s0} を差し引いたものを積分し、次のパラメータを定義した。

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

図-7 から、 C_s の値が大きいと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。これより、高波浪時には $c_1(t)e_1(x) < 0$ となり、汀線が後退することを説明できる。

次に第二成分の $e_2(x)$ は、仙台湾南防波堤、測点 H、荒浜離岸堤付近で正負が逆転することが特徴的である。これは離岸堤をはさんで、その南北で汀線の前進、後退が対称的であることを意味する。ところで、3.2 で述べたように、調査海滨では波向きによってこれと類似した汀線変化が起こることが分かっており、この現象は沿岸漂砂に起因する汀線変化を示すものと推察できる。そこで $dc_2(t)/dt$ と沿岸方向の波エネルギーフラックス E_L との対応を考えた。ただし、第一成分と同様に一度積分して、 $c_2(t)$ と

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

の関係を調べた。ここで、エネルギーの南北方向の境界となる波向きを $\theta_* = 116^\circ$ とし、平行等深線の仮定のもとに式 (5) のエネルギーを計算した。

結果を図-8 に示す。図中で正の波エネルギーフラックスは南寄りの波浪に対応している。これより北寄りの波浪が来襲したときに $c_2(t) > 0$ となる傾向が見られる。このとき、七北田川河口付近 (測点 C, G, H) および離岸堤南部 (測点 K) においては $c_2(t)e_2(x) < 0$ となり、汀線が後退することとなる。一方、仙台湾防波堤付近 (測点 A) と離岸堤北部 (測点 I) では $c_2(t)e_2(x) < 0$ であり、このとき汀線は前進することになる。そして、仙台湾〜七北田川右岸〜離岸堤北部の二領域では、あたかもポケッ

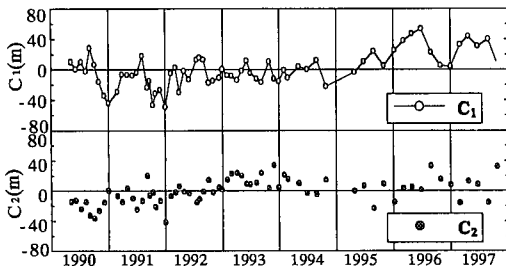


図-6 航空写真による時間に関する固有関数の分布

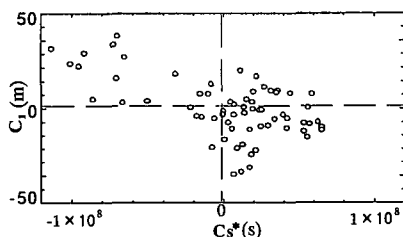
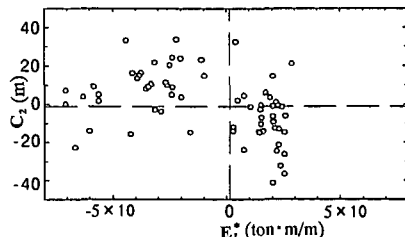
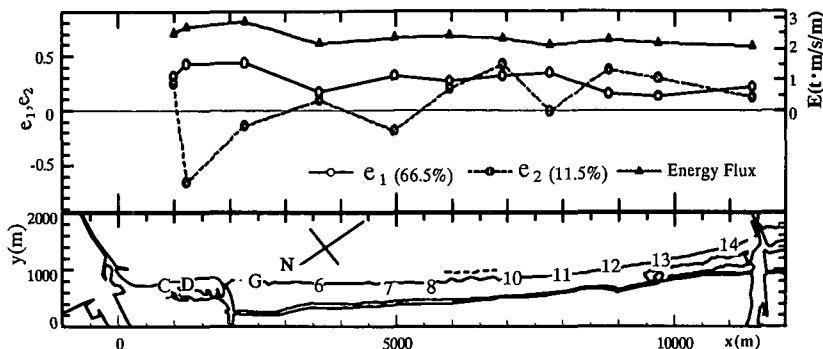
図-7 航空写真から得られる C_1 と C_s^* との関係図-8 航空写真から得られる C_2 と E_1^* との関係

図-9 実測データから得られる場所に関する固有関数の分布

トビーチのような海浜変化が生じていることがわかる。

4.3 実測データを用いた解析

場所及び時間に関する固有関数の分布をそれぞれ図-9, 図-10に示す。また寄与率は第一成分で66.5%, 第二成分で11.5%であった。第一成分 $e_1(x)$ は対象海浜の全領域で正の値をとることは航空写真データによる解析と同様であるが、七北田川河口付近(測点C, D, G)と離岸堤付近(測点7, 8, 10, 11)では $e_1(x)$ の値が大きく、測点6, 12, 13では小さい値をとっていることがわかる。

第一成分で表される汀線変化は、岸沖漂砂に起因するものと推定しており、 $e_1(x)$ の値は、波エネルギーフラックスの大きさに関係が深いと考えられる。そこで、波向き線法(たとえば、丸山・鹿島, 1983)を用いて、対象海浜における砕波点でのエネルギーの分布を調べることとした。なお、砕波指標には合田の式(1975)を用いた。入射波の諸元は、波浪統計結果から波高0.6 m, 周期7.5

sとして計算した。

図-9上段図に砕波点での波エネルギーフラックス E の分布を示した。これからわかるように、 $e_1(x)$ は波エネルギーフラックスと高い相関関係にある。

第二成分については、汀線の前進、後退の境界となる $e_2(x)$ の符号が逆転する位置が、測点C, D間, G, 6間, 6, 7間, 7, 8間及び測点11付近にみられる。航空写真を用いた解析では、仙台港～七北田川右岸～離岸堤北部の二領域でポケットビーチ状の汀線変化がみられるという結果を得たが、実測データの解析ではその領域が細分化され、仙台港～蒲生干潟北端(測点C付近)～測点6, 7付近～離岸堤南部～名取川河口の四領域でポケットビーチ状の汀線変化が起きていると推察できる。これは、航空写真を用いた解析に比べて観測点が増え、海浜変化の分解能が上がったためと考えられる。

外力との対応として、航空写真を用いた解析と同様に、

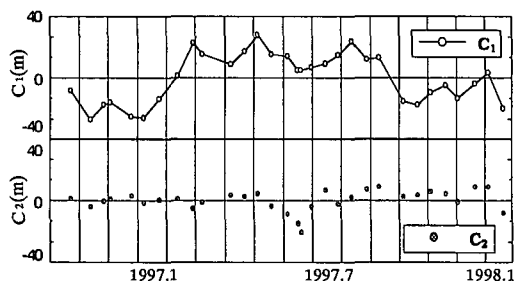
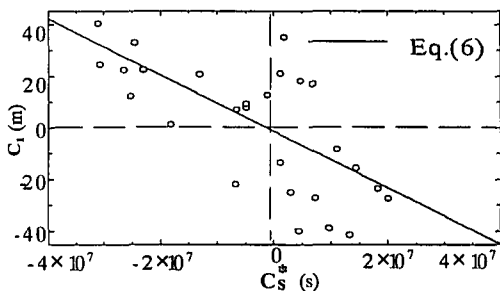


図-10 実測データによる時間の固有関数の分布

図-11 実測データから得られる C_1 と C_s^* との関係

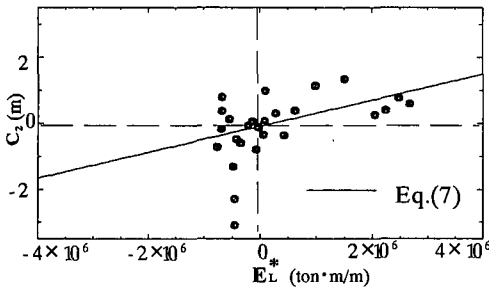
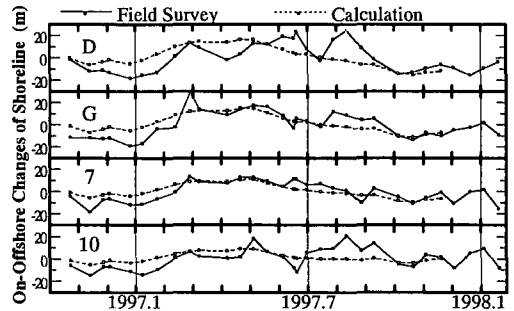
図-12 実測データから得られる C_2 と E_L^* との関係

図-13 汀線位置の時系列変化

$dc_1(t)/dt$ と C_s パラメータ, $dc_2(t)/dt$ と沿岸方向の波エネルギーフラックスの関係を調べた。ここでも各項を一度積分した形で解析した。ここでは, C_s パラメータの境界を $C_{s0}=21.5$, 波向きの境界を $\theta_*=118^\circ$ とした。それらの結果を図-11, 図-12 に示す。

第一成分については, 航空写真を用いた解析と同様に C_s の値が大きいくとき, すなわち高波浪時に $c_1(t)$ が負の値をとる傾向が確認された。第二成分については, 北寄りの波浪が来襲したときに $c_2(t)<0$ となる傾向が見られた。これは航空写真を用いた解析とは反対の傾向を示しているが, 図-5 と図-9 から, $e_2(x)$ の分布は航空写真を用いた解析と, 実測データを用いた解析とで反対の傾向にあることがわかる。つまり, 汀線変化を示す $c_2(t)e_2(x)$ の形で考えると, 航空写真データの解析と同様の結果を得ていることになる。

波浪統計から, 1997 年 6, 7 月には南からの波浪が卓越していることがわかっていて, このとき測点 C, 及び 6 付近, 離岸堤南部では $c_2(t)e_2(x)>0$ となり, 汀線が前進することになり, 測点 D, G, 7 付近では反対に $c_2(t)e_2(x)<0$ となり, 汀線が後退することになる。図-13 は汀線位置の時系列変化について実測値と計算値(後述)を示したものである。上述の解析結果は現地観測で得られた汀線変化と一致している。

4.4 汀線変化のシミュレーション

以上の様に, 時間に関する固有関数について, その第一成分の時間変化率 $dc_1(t)/dt$ と C_s パラメータ, 第二成分の時間変化率 $dc_2(t)/dt$ と沿岸方向の波エネルギーフラックスとの対応を考え, これらの間に相関関係を見いだすことが出来た。そこで, これらの時間に関する固有関数を外力によって表現し, 汀線変化のシミュレーションを試みる。シミュレーションには実測データによる解析結果を用い, 時間に関する固有関数と外力との関係は

最小二乗法により以下のように定めた。

$$C_1 = -1.09 \times 10^{-6} C_s^* - 1.27 \dots \dots \dots (6)$$

$$C_2 = 3.95 \times 10^{-6} E_L^* - 0.788 \dots \dots \dots (7)$$

図-13 の結果から, 計算結果は汀線変化の概略を捉えていることがわかる。

5. 結 論

本研究で得られた結論は以下のとおりである。

(1) 沿岸方向の地形データを用いた経験的固有関数解析で, 岸沖漂砂に起因する汀線変化と沿岸漂砂に起因する汀線変化とを分離することが出来た。

(2) 岸沖漂砂に起因する汀線変化は, C_s パラメータと密接な関係があることを示した。実測データを用いた解析では, 場所に関する固有関数の第一成分が, 砕波点での波エネルギーフラックスと高い相関がある。

(3) 沿岸漂砂に起因する汀線変化は波エネルギーフラックスの沿岸方向成分と良い対応があることが示された。

(4) 外力データを基に汀線変化のシミュレーションを行い, 海浜変化の概略的な傾向を予測した。

参 考 文 献

- 加藤一正・柳嶋慎一・村上裕幸・末次広児 (1987): 汀線位置の短期変動特性とそのモデル化の試み, 港湾技術研究所報告, 第 26 巻, 第 2 号, pp. 63-96.
- 合田良実 (1975): 浅海域における波浪の砕波変形, 港湾技術研究所報告, 第 14 巻, 第 3 号, pp. 59-106.
- 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, 40 p.
- 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.