

経験的海浜変形モデルの小川原湖海岸への適用

橋 本 宏*・宇 多 高 明**

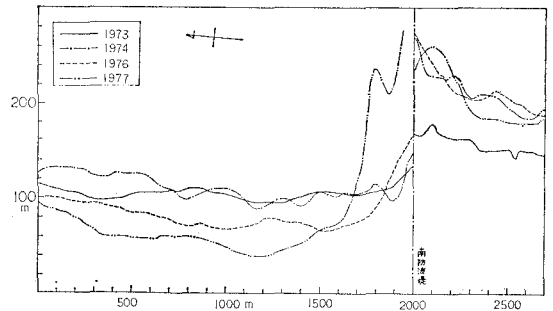
1. ま え が き

近年、産業活動の活発化に伴い、沿岸部に大規模な海岸構造物が造られることが多くなったが、砂浜海岸においては、構造物の周辺の海岸侵食が問題となっている箇所も多い。このような漂砂による地形変化の予測手法は現在その発達段階にあり、十分な予測精度を持つには至っていないが、いくつかのモデルが提案されている。Pelnard-Considère¹⁾は one-line theory を提案し、突堤の回りの汀線変化予測を行い、また Bakker²⁾ は更にこれを two-line theory に発展させた。著者らも one-line theory を用いて現地海岸の汀線変化予測³⁾や、人工海浜計画への応用⁴⁾を図ったが、これによれば係数値及び境界条件を適切に選択すれば、現地海岸の汀線変化も一応予測可能であることを示している。

しかし、one-line theory の基本問題として、断面形状の変化や、岸沖漂砂の扱いなど多くの検討すべき課題がある。本論文ではこれらの点を考慮して青森県の小川原湖海岸に造られた漁港周辺の地形変化をまず one-line theory を用いて解析し、モデルの問題点について検討した。更に、地形変化を詳細に論ずるために、empirical eigenfunction⁵⁾ の応用を図った。これにより、沿岸漂砂と岸沖漂砂による地形変化を分離することによって、two-line theory の実際的な根拠を明らかにした。更にこの結果を利用すれば、汀線と岸沖漂砂を代表する等深線の変化が予測あるいは与えられたとき、沿岸及び岸沖漂砂による三次元的海浜形状変化の予測も不可能ではないことを明らかにした。

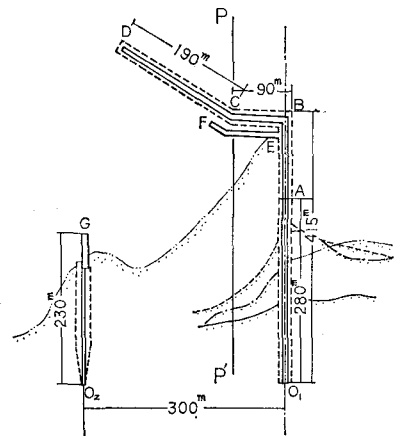
2. 三 沢 漁 港 の 建 設 に よ る 海 浜 地 形 変 化

小川原湖海岸は青森県の太平洋岸にあり、八戸市より泊町の間に広がっている。この海岸の三沢北方に 1973 年より漁港の建設が始まった。当地域の漂砂特性は佐藤ら⁶⁾ が論じたように、北上する漂砂が卓越しており、このため漁港防波堤の南側は堆積、北側は侵食という典型的な地形変化が生じた。



図—1 汀線の経年変化

その特性のうちまず汀線変化を示すのが 図—1 である。図には 1973 年より 1977 年まで 4 年間の変化が示してある。ほぼ直線状であった汀線は、防波堤南側では約 60m ほど前進し、一方北側では広範囲で約 60m の後退が生じている。ただし防波堤近傍では回折波の影響などによって 100m 以上の前進がみられる。



図—2 三沢漁港の形状 (汀線の区別は 図—1 と同様)

表—1 建設年月日

1973 年 11 月	$\overline{O_1A}$
1974 年 12 月	$\overline{AB}$
1975 年 11 月	$\overline{BC}$
1976 年 12 月	$\overline{CD}$
1977 年 12 月	$\overline{EF}, \overline{O_2G}$

ところで、この漁港の形状は 図—2 に示す通りであり、その建設は 表—1 に示すように経年的に行われた。この建設に伴って近傍の汀線も 図—2 に示したように変化した。更に代表断面として $P-P'$ 断面を選んで図示すると 図—3 の

* 正会員 建設省土木研究所海岸研究室長
** 正会員 工修 建設省土木研究所海岸研究室

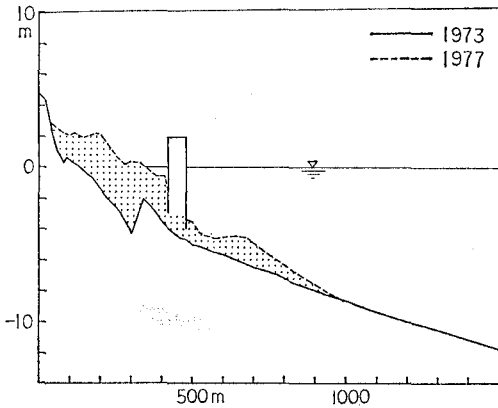


図-3 断面形状の変化

ようになるが、防波堤内では堆積厚は4m以上に達している。また地形変化の生じている高さは全体で約11mであることがわかる。

次に、図-4は、深浅図より40m間隔で平面的に水深を読みとり、これより各点の水深変化を計算したものである。この図は1973年より1年間の変化を示し、図中の正値は侵食を、負値は堆積を表わしている。防波堤北側の侵食、南側の堆積、及び防波堤先端を回り込む

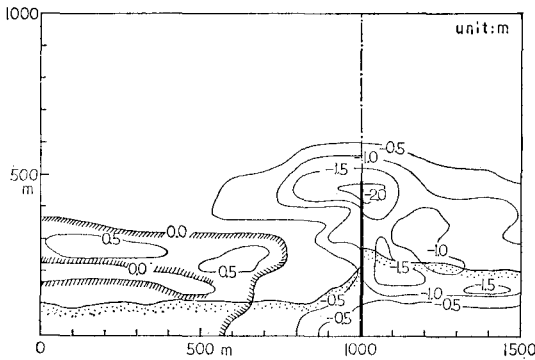


図-4 平面的地形変化(正値は侵食、負値は堆積を表す)

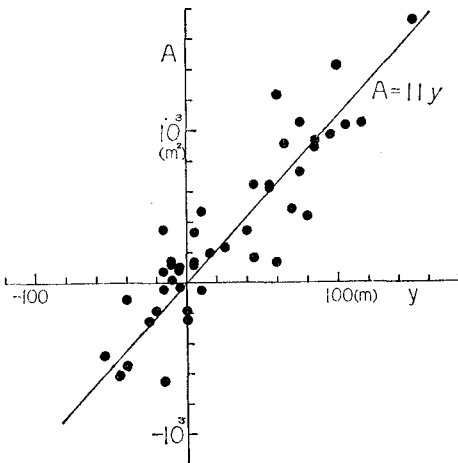


図-5 $A \sim y$ 特性

漂砂の特長が表われている。

また、図-5は断面積の変化量(A)と基準点より汀線までの距離(y)との関係を調べたものである。 A と y の間にはほぼ $A=11y$ の関係が成立し、したがって断面変化の代表高さ h としてはほぼ11mとすることができよう。

3. 小川原湖海岸の波浪特性

小川原湖海岸の気象海象については、運輸省⁷⁾が小川原湖北方の鷹架において調査している。このうち波高測定は、水深17.5mの地点で超音波式高計によって行われている。図-6は、この資料を再整理して波向別の波

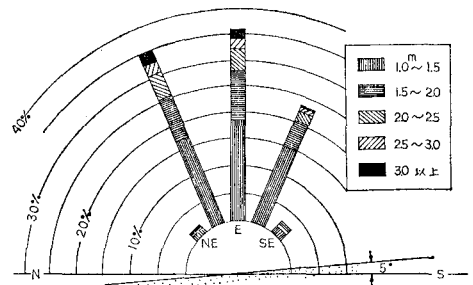


図-6 波向別波高頻度分布図(鷹架)⁷⁾

高頻度を求めたものである。図より卓越波向としてはほぼENE, E, ESEの三方向であることがわかる。この地点では汀線はN軸と約5°反時計回りに傾斜しているために、沿岸方向のエネルギーフラックスは北向成分の方が大きくなっている。また波向別の周期についても同様な整理を行ったところ、卓越周期としてはENEとEが9.0秒、ESEが7.5秒という結果が得られた。

ところで、小川原湖海岸で利用可能な波浪資料は鷹架における観測値以外に存在しないので、この地点の資料より小川原湖海岸全域の波浪条件を逆算することにした。このためまず鷹架において代表波を設定した。すなわち、図-6の結果を用いて三方向別に年間の総エネルギーフラックスを計算し、一方、代表波は各方向別に1/3年の継続期間を有すると仮定すると、代表波高としてENEが1.45m、Eが1.37m、ESEが1.17mという値が得られた。

小川原湖海岸は南部ほど海底勾配が小さいために、同一の沖波であっても屈折特性は場所的に相当の変化が生ずる。このため鷹架で求めた代表波から逆に沖波を設定し、この波を各地点に入射させて各点ごとの波向と波高を算出した。この結果が表-2であり、これは鷹架から八戸港までを11区間に分割して計算してある。ただし H_i は水深17.5mにおける入射波高、 α_i は入射角、 α_b は砕波点の入射角、更に E_x はエネルギーフラックスの沿岸方向成分を表わし、正の値は北向き、負の値は南向

表-2 各地点のエネルギーフラックス

地 区	区間長 (km)	波 向	H_t (m)	α_t (°)	α_b (°)	E_x^* ($\times 10^6$)
1 鷹 架 市 柳 河 口	4.08	ENE E ESE	1.44 1.37 1.17	-17.5 4.7 27.3	-8.0 2.1 11.6	-3.03 0.78 2.08
2 市 柳 河 口 高瀬川放水路	4.60	ENE E ESE	1.44 1.36 1.15	-16.8 5.2 27.8	-7.7 2.3 11.7	-2.93 0.85 2.03
3 高瀬川放水路 砂 森 (南)	3.45	ENE E ESE	1.45 1.34 1.15	-16.0 6.0 28.3	-7.3 2.7 11.9	-2.84 0.95 2.04
4 砂 森 (南) 織 笠	2.78	ENE E ESE	1.44 1.34 1.16	-15.0 7.0 29.0	-6.9 3.1 12.2	-2.65 1.10 2.08
5 織 笠 和 谷 (南)	4.62	ENE E ESE	1.44 1.35 1.15	-14.3 8.0 30.0	-6.5 3.6 12.5	-2.56 1.26 2.07
6 細 谷 (南) 四 川 目 (比)	4.62	ENE E ESE	1.44 1.35 1.13	-13.8 9.0 31.0	-6.3 4.0 12.8	-2.47 1.42 2.01
7 四 川 目 (比) 鹿 中 (南)	2.26	ENE E ESE	1.43 1.35 1.12	-10.8 12.0 34.0	-4.9 5.3 13.9	-1.93 1.85 2.01
8 鹿 中 (南) 二 川 目	3.02	ENE E ESE	1.43 1.35 1.11	-9.8 12.5 34.0	-4.5 5.5 13.9	-1.78 1.92 1.98
9 二 川 目 深 沢 (南)	3.98	ENE E ESE	1.44 1.34 1.08	-6.5 15.7 38.0	-3.0 6.9 15.2	-1.23 2.31 1.85
10 深 沢 (南) 五 戸 川 河 口	3.42	ENE E ESE	1.45 1.32 1.02	-4.0 18.7 43.5	-1.9 8.1 16.6	-0.77 2.52 1.53
11 五 戸 川 河 口 八 戸 港	2.90	ENE E ESE	1.44 1.31 0.96	-3.3 19.0 46.0	-1.5 8.2 17.0	-0.63 2.52 1.28

E_x^* の単位は ton-m/m/year である。

きのフラックスを示している。各点のフラックスの総和は、八戸へ接近するほど大きな正值、すなわち北向きの漂砂が卓越するという特性を示している。なお、ここで解析を進めている三沢漁港は No. 7 の位置にあり、この地点でも北向きのフラックスが卓越している。しかし南向きのフラックスも無視できる値ではなく、このことが港周辺の海浜地形変化を複雑なものとしている一因である。

4. 一次元モデルによる再現計算

汀線変化計算は、漂砂量公式 (Savage 公式) と土砂の連続式を連立させて解くものである。ただし公式の係数値については再検討することにする。すなわち、単位時間当りの土量変化 (Q_x) と沿岸方向のエネルギーフラックス (E_x) の間には、

$$Q_x = \alpha E_x \quad (1)$$

の関係が成立するので、実測値を基にして式 (1) より α を求め、Savage 公式の係数値と比較することにする。

このために防波堤によって土砂の北上が阻止されたと仮定して堆積土量を求めた。ただし測定範囲が狭いので、測定値がない部分では汀線変化が指数関数的に減少すると仮定して計算を行った。この結果、1973 年から 4 年

間で $Q_x = 1.56 \times 10^6 \text{ m}^3$ という結果が得られた。

一方、表-2 の No. 7 地点のエネルギーフラックスは、北向きに $1.93 \times 10^6 \text{ ton-m/m/year}$ であるから、式 (1) によって α を求めると、 $\alpha = 0.20$ となる。実際には防波堤は完全に土砂を阻止しないために、いく分 α は小さい値をとると考えられる。しかし、 $\alpha = 0.20$ という値は、Savage の 0.217 とほぼ一致と言っても良いであろう。

さて、計算は式 (2), (3) を差分法によって差分化して行う。ただしここでは文献 4) と同様に Implicit 法を用いた。

$$\frac{\partial q}{\partial x} + h \frac{\partial y}{\partial t} = 0 \quad (2)$$

$$q = F \left(-\frac{\partial y}{\partial x} - \tan \theta \right) \quad (3)$$

ただし $F = 1/8 \cdot \alpha w_0 K_r^2 H_t^2 C_{gt}$ である。

境界条件は防波堤では $q = 0$ 、防波堤より充分離れた地点で $y = 0$ とした。計算条件としては、 $\Delta x = 50 \text{ m}$ 、 $\Delta t = 10$ 日、 $h = 11 \text{ m}$ とおき、また防波堤周辺では初期地形に対して回折係数を求めて F の場所的分布形を定めた。更に、季節ごとの波向変化に対しては、12 月より翌年の 11 月までを 1 年間として、各月ごとに卓越した波高及び波向を与えた。また初期条件としては 1973 年のデータを用いた。

図-7 は、防波堤北側の計算結果と、それに対応する

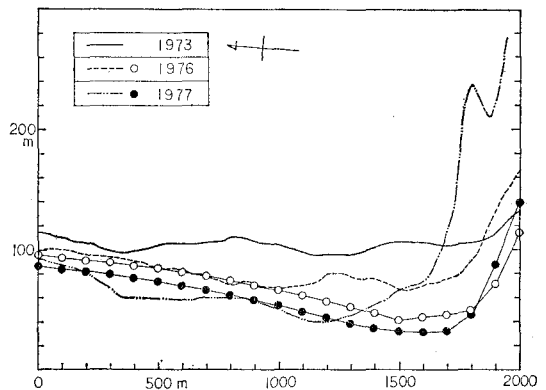


図-7 汀線変化 (計算と実測値の比較)

測定値を示したものである。ただし計算では先に求めた $\alpha = 0.20$ では地形変化が過大であったために、 $\alpha = 0.18$ とおいた。まず 1976 年について比較すると、1000m 付近までは比較的良好な一致を示すが、防波堤に接近するほど誤差が拡大する。また 1977 年では $x = 1300 \text{ m}$ 付近まではほぼ一致するが、防波堤近傍ではその差が急激に拡大する。計算値も防波堤近傍は汀線が前進する傾向があるが、その変化速度は実測値の方がはるかに大きい。

計算値と測定値の相違する原因として、まず最初に南防波堤より 300m の所には 図-2 に示したように 1977 年に北防波堤が造られており、南防波堤の複雑な形状と

併せて考えると、この付近の地形変化は極めて三次元的であったと考えられる。このため南防波堤より300mの範囲では比較自体が相当困難であり、このような範囲での地形変化を考慮するには波と流れと地形との相互作用を考慮した一般化されたモデルが必要であろう。また、計算に使用した回折係数が初期地形に対するものであり、その後の地形変化に対して一定とおいたことも問題点の一つであろう。

以上のように、一次元モデルでは係数値さえ決定されれば計算は可能であるが、断面変化や岸沖方向の漂砂についての情報は得られない。次節ではこの点を改良するために、empirical eigenfunctionの応用を図ることにした。

5. 経験的海浜変形モデル

Winant ら⁵⁾は empirical eigenfunction を用いて海浜地形解析を行った。その計算では、水深データを場所と時間の関数の積に分離しているが、ここでは計算法を次のように変える。すなわち、水深 h は離岸距離 y^* 、沿岸方向距離 x^* 、及び時刻 t の関数として $h = h(x^*, y^*, t)$ の形に与えられているので、これを式(4)のように展開する。

$$h(x^*, y^*, t) = \sum_{i=1}^n e_i(y^*, t) \cdot c_i(x^*, t) \dots \dots \dots (4)$$

式(4)では e_i, c_i 共に時刻 t を含んでいるために、このままの形では解析してもその解釈が難しいと考えられるが、もし沿岸漂砂や岸沖方向漂砂による地形変化の岸沖分布が典型的な変化をするとすれば、 e_i については時刻 t にそれほど依存しない分布形が得られるはずである。

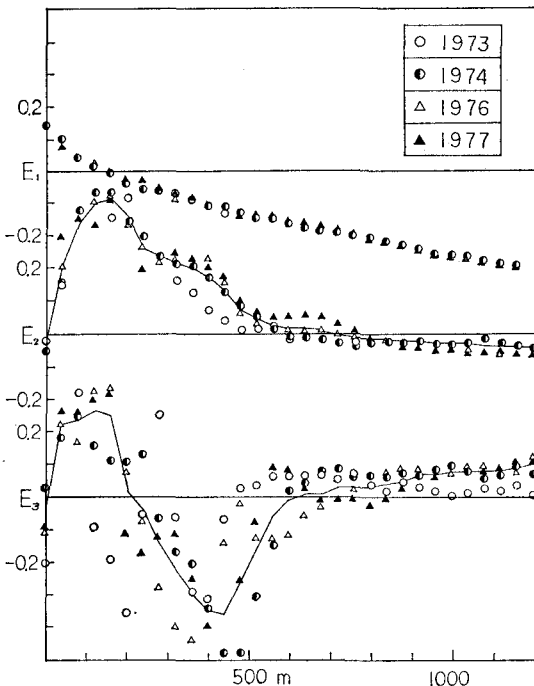


図-8 岸沖方向固有ベクトル e の分布形

さて、以上の方法によって岸沖方向固有ベクトル e の分布形を求めたのが 図-8 である。上より順に e_1, e_2, e_3 を示し、また実線は4年間の平均値を表わしている。 e_1 はほぼ完全にデータが重なっており、また e_3 については1973年のデータに多少のバラツキがあるが、 e_2 と共にほぼ実線で示された形状で定義される。以上の点より、 e_i は平均的には時刻 t によらないと言っても良いであろう。

次に沿岸方向の分布としてはまず 図-9 が $c_1(x^*, t)$ の

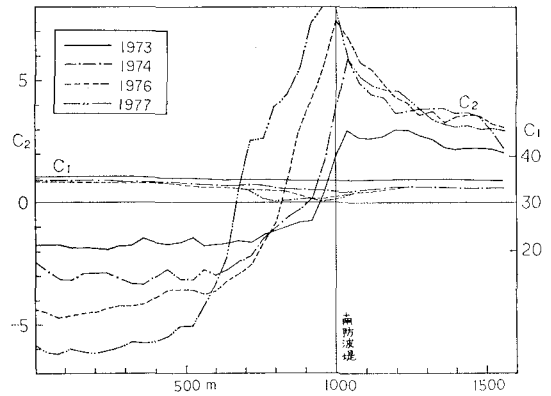


図-9 沿岸方向固有ベクトル c_1, c_2 の分布形

分布形を表わしている。1973年には変化は存在しなかったが、経年的にみると防波堤北側での比較的小さな値を示す範囲が次第に拡大している。このことは防波堤北側約300mの範囲では平均的に海底勾配が緩くなったことを示している。また 図-9 には $c_2(x^*, t)$ の分布形も示されている。この図は先に示した汀線変化図と極めて形状が似ていることが特長である。このため c_2 と汀線長 (y) との相関を調べると 図-10 のようになる。 c_2 と y との間には図中実線で示されるように次の関係が成立する。

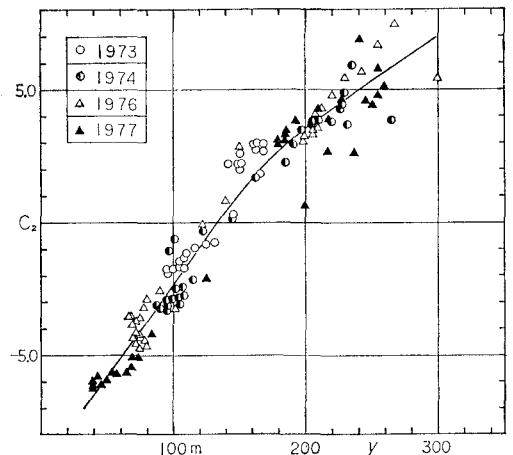


図-10 沿岸方向固有ベクトル c_2 と汀線長との相関 (記号の区別は 図-9 と同様)

$$c_2 = \begin{cases} 0.069(y-134) & (y \leq 134) \\ 0.15(y-134)^{0.75} & (y \geq 134) \end{cases} \quad (5)$$

一方、 c_2 に対応する e_2 は 図-10 で示されたように、汀線付近で正の極値をとり、また海浜のほとんど全域で正の値となっていることを考慮すれば、これは主として沿岸漂砂による地形変化を表わすと考えられる。ところで、汀線長 y は前節で述べたように、一応計算が可能であるから、それによって得られた y を式 (5) へ代入すれば、 c_2 が求まる。更に e_2 の岸沖方向の分布形は既知であるから、汀線長を用いて沿岸漂砂に起因する三次元的な地形変化の予測が可能となろう。

次に、図-11 は $c_3(y, t)$ の分布形を示している。 c_2 と

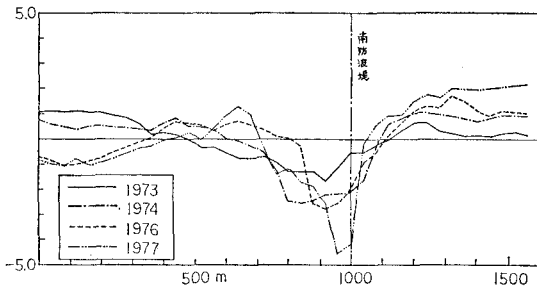


図-11 沿岸方向固有ベクトル c_3 の分布形

比較すると全体的に絶対値は小さくなっている。ところで 図-8 に示したように、 e_3 はほぼ汀線付近で正、沖合で負の値を有するので、 c_3 が正のときは岸側に堆積、沖合に侵食部分が存在することになる。 c_3 が負のときはその逆である。すなわち、これらは主に岸沖方向の漂砂による地形変化を表わしていると考えられる。このとき、 c_3 の変化は汀線付近と、沖合の変化を代表する二つのパラメータで表示されると考えられるので、図-8 の e_3 のグラフにおいて約 400 m 付近の極値に対応する水深 ($h=4.0$ m) の等深線と汀線間の距離 (y') を代表値として、その変化と c_3 との関係を調べた。この結果が 図-

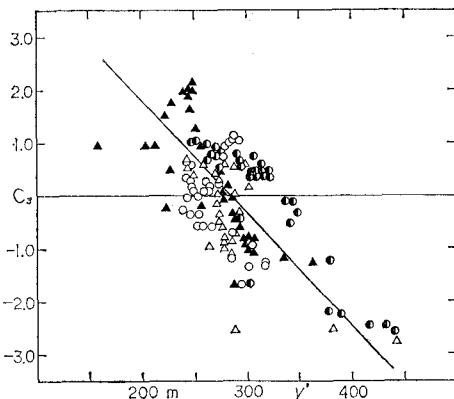


図-12 沿岸方向固有ベクトル c_3 と y' との相関 (記号の区別は 図-9 と同様)

12 である。データは多少バラツキがあるが、両者の間にはほぼ式 (6) の関係が成立する。

$$c_3 = 0.0215(285 - y') \dots \dots \dots (6)$$

以上の結果は 2 本の線の時空間的变化によって岸沖漂砂がモデル化される可能性を示していると考えられる。したがって、 y' が two-line theory などによって予測されたとすれば、これより c_3 が計算され、また e_3 の形状はほぼ与えられているので、これらより岸沖漂砂による三次元的な地形変化の予測が可能となろう。なおここで述べた c_3 による変化は防波堤によって阻止された土砂が防波堤を回り込む運動を示していると考えられる。

以上主な固有値に対応するベクトルについて考察したが、固有値の相対的大きさは、 $\lambda_2/\lambda_1 = 2.25 \times 10^{-3}$ 、 $\lambda_3/\lambda_1 = 2.38 \times 10^{-3}$ 、 $\lambda_4/\lambda_1 = 7.38 \times 10^{-4}$ であった。ただし解析では λ_4 以下のものは、物理的条件と有意な関係が見出せなかったため、一応誤差と考えて省略した。

6. ま と め

本論文では三沢漁港の地形変化データに対して海浜変形モデルの適用を図り、実測値との比較を行い、また経験的に海浜変形を論ずるために empirical eigenfunction の応用を図った。この結果、2-line theory の実際的な根拠が明らかになるとともに、汀線変化モデルと組合せることによって、一次元的予測計算から三次元的な地形変化予測への発展の可能性が明らかになった。ただし、計算は限られたデータで行っているために、方式を一般化するには他の例についても検討する必要がある。

謝 辞： 本研究に際して、資料収集に当っては建設省東北地方建設局高瀬川総合開発工事事務所及び青森県三八地方港湾事務所の諸氏の御協力をいただいた。これらの方々に深甚の謝意を表します。

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) Bakker, W. T.: The dynamics of a coast with a groyne system, Proc. 11th Conf. on Coastal Eng., pp. 492-517, 1968.
- 3) 橋本 宏: 海浜変形モデルの富士海岸への応用, 第 23 回海浜講演集, pp. 218-222, 1976.
- 4) 田中常義・野呂清司・末広忠雄・宇多高明: 海浜変形モデルの人工海浜計画への応用, 第 25 回海浜講演集, pp. 213-217, 1978.
- 5) 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.
- 6) 佐藤昭二・河西輝夫・田中則男・入江 功: 小川原湖海岸の漂砂について, 第 19 回海浜講演集, pp. 7-11, 1972.
- 7) 小川原地区気象海象観測報告書, 運輸省第二港湾建設局八戸港工事事務所, 1976.