

石巻湾におけるヘッドランド施工による漂砂制御効果

高橋 徹*・田中 仁**

海岸侵食対策としてヘッドランドは有効な手法であるが, 海浜変形には沿岸漂砂による成分と岸沖漂砂による成分が混在しており, 深浅測量結果を一瞥しただけではその効果を確認することが難しい. 本研究では1991年以降ヘッドランドが施工された石巻湾を例にとり, 深浅測量から得られたデータから経験的固有関数による解析を実施し, ヘッドランドの施工時期・波浪条件との関連性を経験的に推算し, 沿岸漂砂・岸沖漂砂に起因する現象の特定を行なった. また, 抽出した沿岸漂砂による海浜変形からヘッドランド施工による沿岸漂砂量の減少を定量的に評価することが出来た.

1. はじめに

石巻湾においては, 近年, 防波堤により湾内の漂砂(西向き)が阻害され, 海岸侵食が問題となってきた. 宮城県は1980年から海岸侵食防止のため離岸堤7基, 突堤8基を設置し, 2000年に現在の形で概成(図-1)したが, 問題の解決には至っていない. 本研究では港の増設に伴う汀線変化を把握し, その防護施設として作られた海岸構造物による海浜変形への影響を把握することを目的とし, 雲雀野防波堤から宮戸島までの12 kmの範囲において経験的固有関数 (Empirical eigenfunction method : EOF) による解析を実施し, 海浜変形を引き起こす原因について考察をおこなった. また, 上記方法にて求められた沿岸漂砂成分の抽出により, 土砂収支図を作成し, 特に突堤施工に伴う沿岸漂砂の変化について解析を行った.

2. 研究対象領域

本研究の対象領域は図-1に示す仙台湾沿岸北部に位置する延長約20 kmの砂浜海岸であり, 東端に渡波港, 西端に宮戸島が位置している. 本研究ではまず航空写真による領域全体における汀線変化状況の把握を実施し, 次に現在大きな侵食の発生している雲雀野防波堤から宮

戸島の領域に着目し, 詳細な解析を実施した.

3. 航空写真による汀線変化の把握

1952年以降, 6年分の航空写真を入手し, 100 m 毎に1952年汀線との比較を実施した. なお, 汀線位置を平均水面付近に統一するために, 写真の撮影日時を参考にして当時の潮位を推算した. また, 1990年以降の汀線位置は, 後述する深浅測量によるものである. 結果を図-2に示す. これによると近年侵食の激しい, 雲雀野防波堤西側では1964年以降の防波堤の延伸に伴い西向きの漂砂が阻害され侵食が進んでおり, 現在もその傾向が進んでいることが理解される.

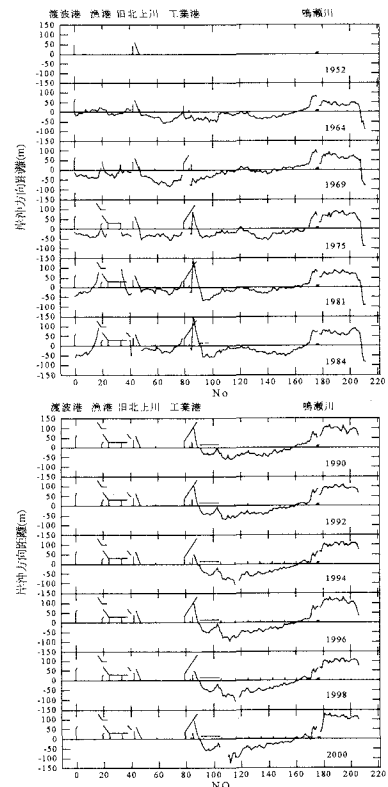


図-2 汀線変化図 (1952年汀線基準)

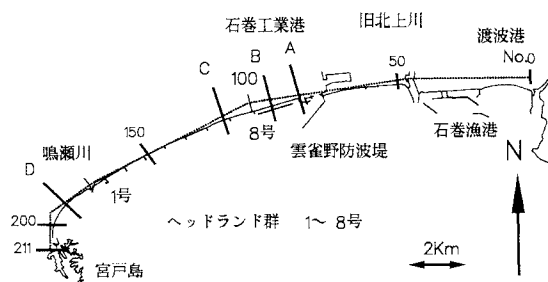


図-1 対象領域

* 正 会 員 修(工) 宮城県大河原土木事務所
** フェロー 工博 東北大学教授 工学研究科土木工学専攻

また、図-1に示した雲雀野防波堤西側区域における代表的地点、A～D点における経年汀線変化図を図-3に示す。

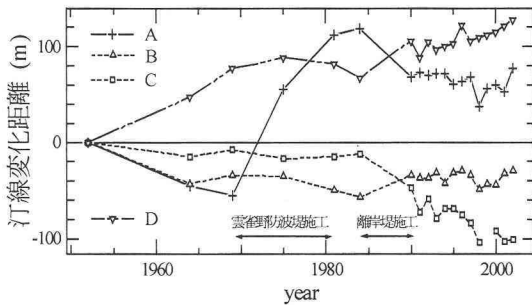


図-3 各地点における経年汀線変化図

雲雀野防波堤遮蔽域であるA点では雲雀野防波堤延伸に伴い1975年から顕著な堆積が生じ、1984年には1951年比で約120 mの汀線前進が生じている。その後、1990年までに離岸堤が設置され、前進傾向は緩和された。また離岸堤背面部であるB点では1984年以降、離岸堤設置による汀線前進が確認できる。また近年侵食の激しい7号突堤付近のC点では、離岸堤施工に伴う侵食が続いていることが確認できる。一方、漂砂終点のD点では一貫して堆積傾向であることが分かる。

4. 深淺測量による海浜変形の把握

望月ら(1990)によると当海域での移動限界水深は8 mであり、石巻湾西側における雲雀野防波堤完成後の漂砂移動領域は、雲雀野防波堤から宮戸島で定義される。宮城県石巻港湾事務所が1990年より毎年冬季に実施している深淺測量のデータは、上記領域をカバーしているため、これを用いて詳細な海浜変形の解析を実施することとした。

(1) 海浜変形実測結果

石巻湾における海浜変形の現状を示すために、図-4に1990年～2002年にかけての平均標高、図-5に標準偏差、図-6に各点における最小二乗法による一次回帰式の傾き、図-7にその相関係数を示す。図-4によると離岸堤の北側(岸側)は-5 m～-3 mのほぼ平坦な地形を有し、離岸堤による海岸防護機能が確認できる。また鳴瀬川河口部には河口テラスの発達を確認できる。図-5によると汀線からバームやステップの発達する部分(水深0 m～5 m付近)での変動が激しく、沖合いでは少ないこと、河口では沖合い部でも変動している状況が確認できる。図-6、図-7によると鳴瀬川河口部での河口テラスの発達や7号堤付近、1号堤から鳴瀬川河口部での侵食が確認できる。

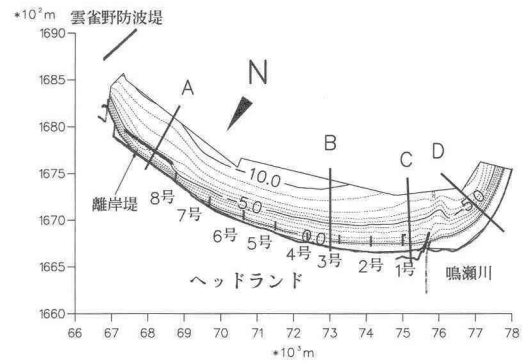


図-4 石巻湾の平均水深 (1990～2002年) (TP 値)

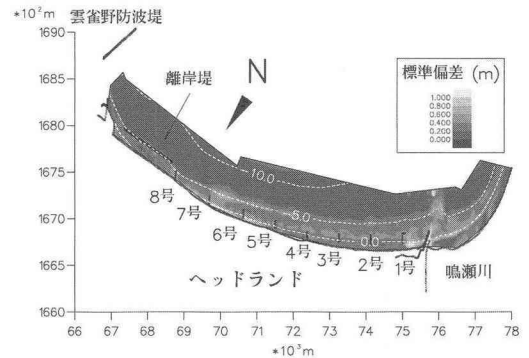


図-5 石巻湾地形変化の標準偏差 (1990～2002年)

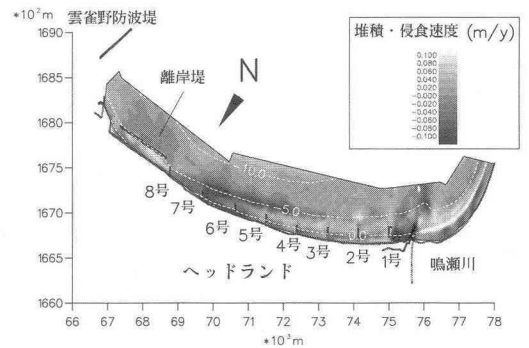


図-6 最小二乗法による1次回帰式の傾き

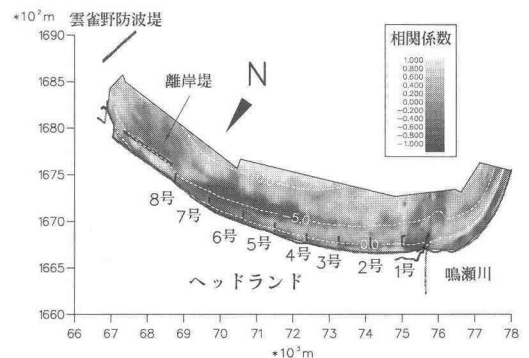


図-7 最小二乗法による相関係数

次に、突堤施工に伴う影響を確認するために、図-4に示した各側線における等深線距離図を図-8に示す。なお図中の点線は隣接する構造物の各年ごとの延長を示す。また前述した解析期間においては海岸保全のためにヘッドランドが施工されているため、図-9に突堤施工時期を示す。

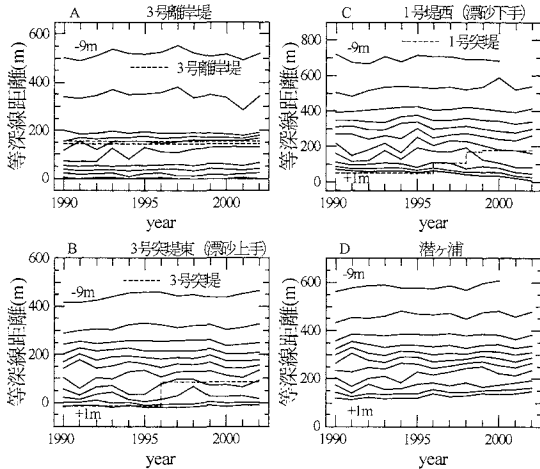


図-8 等深線距離の経年変化

図-8によるとA地点(離岸堤)では離岸堤背面部での堆積、B地点(3号突堤東)では突堤施工に伴う堆積、C地点(1号突堤西)では突堤施工に伴う侵食、D地点(潜ヶ浦)では、漂砂終点部に伴う各水深での堆積が確認され、各構造物施工に伴う海浜変形への影響を確認することができた。したがって本現象をより理解するために経験的固有関数による解析を実施した。

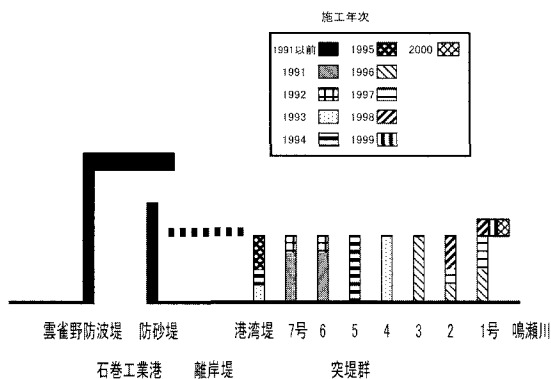


図-9 突堤群施工時期

(2) 経験的固有関数法による海浜変形の解析

a) 解析手法

経験的固有関数(以下 EOF と表記)とは、地形等の空間座標と時間の関数として表された変数を時間と場所

の固有関数の積で示す主成分分析の一種である。この手法は Winant ら (1975) により開発され、主に地形の時系列データを解析する有効な手段として用いられてきた。本研究では以下の式に示すように、各ピクセルでの平均標高を差し引いた新たな変数を以下のように展開した。

$$H'(x,y,t) = (Hx,y,t) - \bar{H}(x,y) = \sum_{n=1}^{n_x} c_n(t) e_n(x,y) \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 $\bar{H}(x,y)$ は平均標高 (m)、 $c_n(t)$ は時間に関する固有関数 (m)、 $e_n(x,y)$ は場所に関する固有関数、 n_x は測点数である。

b) 対象領域および解析結果

1991年以降順次施工された突堤に伴う影響を抽出するために、8号堤～1号堤(水深5mまで)の区域において経験的固有関数による解析を実施した。EOFによる時間関数 c_n 時系列を図-10に、空間関数 e_n の空間分布を図-11に示す。また石巻湾沖合い約7kmの水深20m地点における1989年～2002年の日平均波高を図-12に示す。なお、第一成分、第二成分、第三成分の寄与率はそれぞれ63.9%、11.8%、8.0%であり、この三つで現象の83.7%を説明できる。

第一成分の時間関数 c_1 についてはおおむね一様に増加しており、特に6、7号堤の完成した93年に大きく増加し、突堤の概成した98年以降は比較的緩い勾配を示している。また対応する空間関数 e_1 によると8号堤～5号堤で負の値、4～1号堤で正の値を示しており、時間関数とあわせて考えると港湾堤～5号堤においては一様な侵食を、また4～1号堤では一様な堆積を表しており沿岸漂砂による成分であると推察される。なお空間関数の分布をみると、侵食域と堆積域がきれいに色塗りされて定在波的に振動するという EOF 特有の変化パターンが現われている。

第二成分の時間関数 c_2 については周期的に増減しており、特に高波浪が来襲した91年、94年、98年で負の値を示している。また対応する空間関数 e_2 によると岸側で正の値、沖側で負の値を示しており、時間関数とあわせて考えると、高波浪に伴う岸側の侵食、沖側の堆積といった岸沖漂砂を示していると考察できる。

第三成分の時間関数 c_3 については周期的に増減しており、特に高波浪が来襲した91年、94年で正の値を示している。また対応する空間関数 e_3 によると岸側で負の値を示しており、時間関数とあわせて考えると、第二成分と同様に高波浪に伴う岸側の侵食、沖側の堆積といった岸沖漂砂を示していると考察できる。

5. 沿岸漂砂成分による土砂収支の算出

石巻湾全体における経験的固有関数による解析を行い、

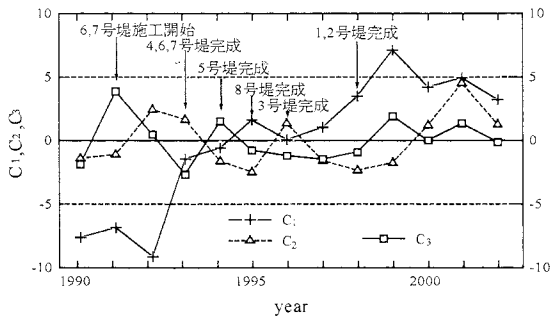
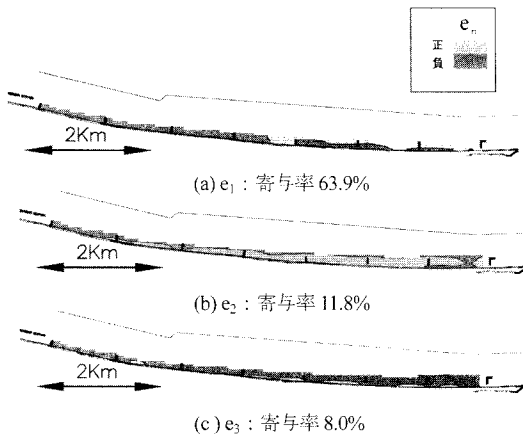
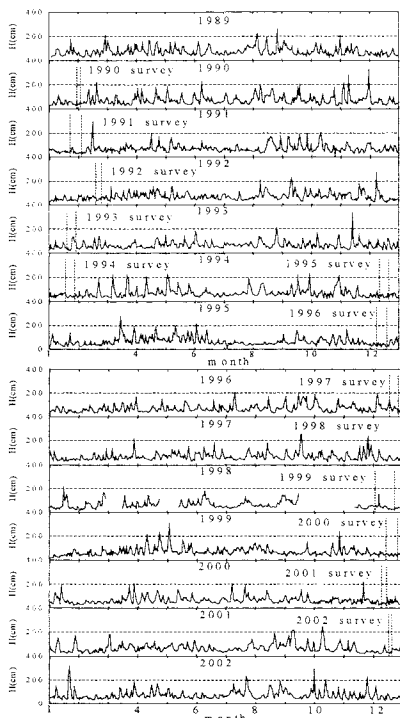
図-10 EOF による時間関数 $c_n(x)$ の時系列図-11 EOF による固有関数 e_n の空間分布

図-12 石巻湾日平均波高

沿岸漂砂に起因する成分と岸沖漂砂に起因する成分に分離することができた。したがって次に、沿岸漂砂成分のみによる海浜変形を抽出し、突堤施工前後による土砂収支の変化について算出を行なうこととした。

(1) 解析手法

図-13 に示すように座標を取り、単位幅単位時間あたりの沿岸漂砂量を q_x 、汀線と直角方向の岸沖漂砂量を q_y とする。連続式によりある地点における標高 h の時間変化は次のように示される。

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{1}{(1-\lambda)} \left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} \right) \dots \dots \dots (2)$$

ここで、 λ : 砂の空隙率である。

したがって、ある区間内の土量 V の時間変化は、

$$\frac{\partial V}{\partial t} = \int_0^{y_L} \int_x^{x+\Delta x} \frac{\partial h}{\partial t} dx dy \dots \dots \dots (3)$$

ここで、空隙を含んだ全体の沿岸漂砂量を Q_x とし、

また q_{yL} は Δx の区間で一定と考えると、

$$\frac{\partial V}{\partial t} = Q_x - Q_{x+\Delta x} + q_{y0}\Delta x - q_{yL}\Delta x \dots \dots \dots (4)$$

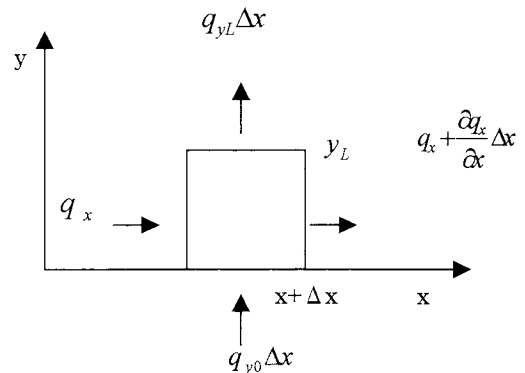


図-13 底質輸送概念図

したがって式(4)を用いて、各区域ごとの沿岸漂砂量を求めることとした。なお、今回は経験的固有関数による沿岸漂砂成分である第一成分を用いて算出することとしたため、次式にて沿岸漂砂による海浜地形を近似している。

$$h(x, y, t) \cong c_1(t) \cdot e_1(x, y) \dots \dots \dots (5)$$

(2) 土砂収支図の作成方法

①図-14 のように EOF における時間関数 c_1 の各期間における最小二乗法による近似曲線を算出する。

②①で算出された時間関数 c_1 の増加速度 (m/year) を固有関数 e_1 の空間分布と乗じ、各点における標高変化速度 (m/year) を算出する。(式(5) 参照)

③図-15 のように各突堤間で区域を分け、②で算出し

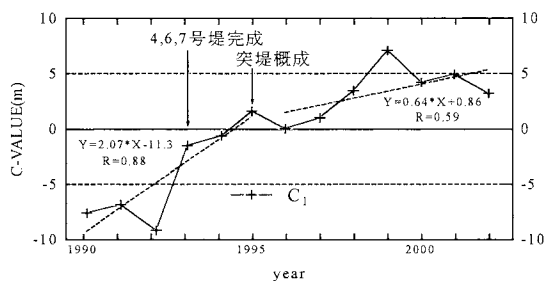
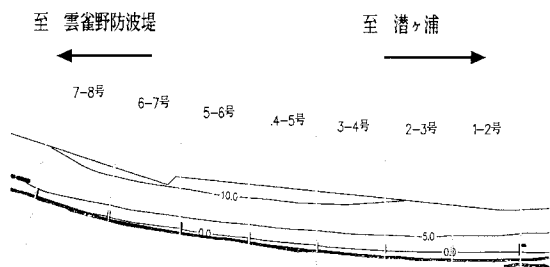
図-14 時間関数 C_1 の変化

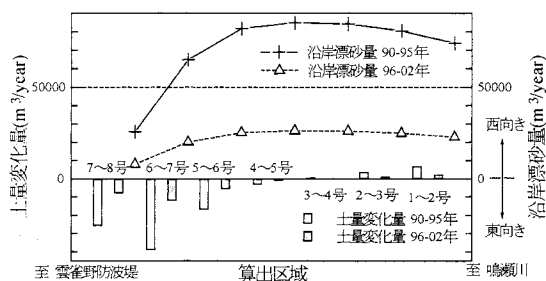
図-15 土砂収支算出における区域分割図

た標高変化速度から各区域ごとの土量変化速度を求める。

④式(4)を用いて、各区域ごとに沿岸漂砂量を算出する。なお、雲雀野防波堤遮蔽域にあたる8号堤より東側については漂砂系の端部として設定し、漂砂の移動はないものとした。なお、経験的固有関数により岸沖成分をカットしたため、 q_y については0とした。なお飛砂については0と仮定して計算を行なった。

(3) 解析結果

突堤完成前の1990年～1995年、突堤完成後の1996年～2002年の沿岸漂砂による土砂収支図を、図-16に示す。沿岸漂砂の卓越方向は西向きであり、航空写真による漂砂の卓越方向と等しい。また突堤施工前の1990年～1996年の沿岸漂砂量は最大約70,000 m^3 程度であり、汀線変化量から算出した井上ら(2002)及び佐藤ら(1998)の沿岸漂砂量算出結果ともオーダー的に等しい。突堤施工後の1996年～2002年の沿岸漂砂量は最大約25,000 m^3 程度であり、突堤完成に伴う海岸保全効果が理解できる。

図-16 沿岸漂砂による土砂収支図
(1990年～2002年)

6. おわりに

経験的固有関数解析によって、この海岸における海浜地形変化の特性を抽出することができた。最も大きい成分は沿岸漂砂に関連するものであり、次いで岸沖漂砂に関連するものであった。また経験的固有関数を用いることにより当海岸における沿岸漂砂量を算出し、特に解析期間中に完成した突堤に伴う沿岸漂砂量の変化を把握することができた。

謝辞：本研究を実施するにあたり、国土交通省東北地方整備局塩釜港湾空港事務所、宮城県石巻港湾事務所、宮城県石巻土木事務所から貴重な現地資料を提供いただいた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 井上かおり・田中 仁・泉 典洋(2002)：野蒜海岸を中心とする石巻湾西部沿岸の長期土砂移動量の評価，海岸工学論文集，第49巻，pp. 516-520。
- 佐藤慎司・山本幸次・和田一範・伊澤武二・大谷靖朗・橋本 新(1998)：大曲海岸におけるヘッドランド周辺の漂砂観測と海浜地形変化予測，海岸工学論文集，第45巻，pp. 556-560。
- 望月倫也・宇田高明・大類光男・大谷靖朗(1990)：仙台湾北部の海浜変形の実態，海岸工学論文集，第37巻，pp. 369-373。
- Winant, D.C., D.L. Inman and C.E. Nordstrom(1975)：Discription of seasonal beach changes using empirical eigenfunction, J.G.R., Vol.80, No.15, pp. 1979-1986。