

海浜粒度組成変化の予測モデル

田 中 仁*・鈴 木 正**

1. はじめに

海岸侵食の対策として養浜が行われる機会が増えている。この際、土砂の投入後、汀線形状の安定化とともに粒径組成についても平衡状態への変化が生じる。このうち、汀線の変化過程については one-line model などの既存の海浜変形モデルにより予測が可能であるが、このモデルでは底質の淘汰過程を予測することは出来ない。近年、海浜の環境要素の一つとして底質粒度の重要性が認識されており、このため、養浜後の安定海浜での粒度組成の予測手法の確立が望まれる。

宇多らは (1997) は自身の等深線変化モデル (宇多・河野, 1996) に岸沖方向の底質の淘汰過程を組み込み、これを考慮した場合と考慮しない場合との比較を行っている。本研究では、沿岸方向の底質淘汰過程に着目し、one-line model と組み合わせる沿岸方向の粒径変化を予測するためのモデルを構築した。まず、二つの突堤にはさまれた仮想的な海浜での計算結果をもとにモデルの基本特性について考察を行った後、実海岸への適用を試みた。

2. 予測モデル

本研究では one-line model とリンクさせた底質淘汰予測モデルを考えることとし、沿岸方向の粒度分布変化を対象とする。通常の汀線変化モデルと同様に、ここで提案するモデルも波動場計算と土砂移動計算の二つ部分からなる。ただし、後者の中に各粒度毎の保存則が付加されており、この点が既存の汀線変化モデルとの相違点である。

2.1 波浪変形計算

まず、波浪変形の計算には波向き線法を採用し、合田 (1970) の碎波指標により碎波点位置を求めた。

2.2 漂砂量式

上で得られた碎波点での波の諸元から、沿岸漂砂量を計算する。ただし、従来良く用いられる CERC 式型の沿岸漂砂量公式には、粒径の効果が粒度毎の移動限界が

含まれていない点で今回の計算に使用することは出来ない。特に、後者は粒度の相違による選択輸送を支配する重要な因子である。そこで、ここでは粒度の効果があらわに含まれた Kamphuis et al. (1986) による次式をベースとする。

$$Q_y = 0.001 \rho \left(\frac{g}{2\pi} \right)^{1/2} \frac{m H_b^{7/2}}{d} \sin 2\alpha_b \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 Q_y : 沿岸漂砂量 (kg/s 単位)、 ρ : 海水の密度、 g : 重力加速度、 m : 前浜勾配、 H_b : 碎波波高、 d : 底質粒径、 α_b : 碎波角である。上式に Kamphuis and Sayao (1982) による海浜勾配に対する実験式、

$$m = 1.8 \left(\frac{H_b}{d} \right)^{-1/2} \dots\dots\dots (2)$$

を代入すれば、次のように変形される。

$$Q_y = 2.3 \frac{H_b^3}{d^{1/2}} \sin 2\alpha_b \dots\dots\dots (3)$$

さて、すでに指摘されているように、沿岸漂砂量式中に移動限界を考慮したものはきわめて少ない (堀川, 1985)。ここでは、Kraus et al. (1988) を参考に、式 (3) を次の様に拡張する。

$$Q_y = 2.3 \frac{H_b^3}{d^{1/2}} \sin 2\alpha_b \left(1 - \frac{1.75 m \gamma^{1/2}}{H_b^{5/2} \sin 2\alpha_b} \right) \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 $\gamma = H_b/h_b = 0.73$ (h_b : 碎波水深) である。式 (4) で、流砂における「相似仮説」(平野, 1971; 芦田・道上, 1971) を適用し、さらに体積表示 (m^3/s) の漂砂量 Q_v に変換して、次式のような各粒径毎の漂砂量式が得られる。

$$i_b Q_y = \frac{0.0014 H_b^3}{d_i^{1/2}} \sin 2\alpha_b \times \left\{ 1 - \frac{1.75 m \gamma^{1/2}}{H_b^{5/2} \sin 2\alpha_b} \left(\frac{d_i}{d_m} \right)^{0.08} \right\} \dots\dots\dots (5)$$

ここで、 d_m : 平均粒径、 d_i : i 番目のランクの底質粒径、 i_b : 全漂砂量中に占める粒径 d_i の底質の存在率である。上式で、底質移動限界の粒径依存性を表す $(d_i/d_m)^{0.08}$ については、Tanaka (1988) を参考にして与えた。

実際の計算では、式 (5) の係数を、現地での実測汀線を再現できるように調節した。具体的には、下記の実海岸を対象にすでに CERC 型の式の係数をキャリブ

* 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
** 正会員 工修 JR 東海 リニア開発本部

レーションしている(田中, 1991)ので, この係数の CERC 式標準係数に対する比率を式(5)に乗じたものを以下の計算で使用した。

2.3 各粒度の保存則

平野(1971)は「交換層」の概念を用いて, 河床における混合砂の粒度組成の変化を求めるための基礎式を導いた。その後, このモデルは岸沖漂砂による海浜変形の計算に拡張された(田中・吉竹・首藤, 1989)。ここでは, 同様の考え方を汀線変化に対して用い, 粒度の変化は厚さ A の「交換層」内で生じるものとする。

底質の全粒度を n ランクに分割したとき, 交換層内のそれぞれの粒度に対する保存則は, 平野(1971)を参考にして次のように書き表される。

汀線前進の場合:

$$\frac{\partial i_b}{\partial t} = -\frac{m}{AD} \left\{ \frac{\partial(i_b Q_y)}{\partial y} - i_b \frac{\partial Q_y}{\partial y} \right\} \quad \dots\dots\dots (6)$$

汀線後退の場合:

$$\frac{\partial i_b}{\partial t} = -\frac{m}{AD} \left\{ \frac{\partial(i_b Q_y)}{\partial y} - i_{b0} \frac{\partial Q_y}{\partial y} \right\} \quad \dots\dots\dots (7)$$

ここで, i_b : 交換層内での i 番目の粒度(粒径 d_i) の存在率, i_{b0} : 交換層より下層での i 番目の粒度の存在率, y : 沿岸方向の座標, D : 沿岸漂砂の移動高さである。上式中の $i_b Q_y$ については前節に述べた式(5)により評価する。また, A については Kraus(1985)を参考に 10 cm とした。

汀線位置 x_s は, トータルの漂砂量 $Q_y = \sum i_b Q_y$ を用いて次式により得られる。

$$\frac{\partial x_s}{\partial t} = -\frac{1}{D} \frac{\partial Q_y}{\partial y} \quad \dots\dots\dots (8)$$

本研究では, 以上の基礎式を陽形式の差分法により解いた。粒度組成の基礎式(6), (7)と全漂砂量の保存式(8)はそれぞれ, 一次元の波動方程式および拡散方程式に類似した式形を有することから, それぞれの安定条件が定まり, そのうちの小さい方をモデル全体の安定条件として使用すれば良い(田中・吉竹・首藤, 1989)。

3. 計算対象

3.1 仮想海岸

現地への適用の前に, より単純な条件のもとでの計算を行い, モデルにより得られる解の基本特性を検討した。適用された海浜地形を図-1に示す。2000 m の間隔で突堤が設置され, その中央部(A)に養浜がなされたものとして, 両端の(B)区間と異なる粒度を与えた。これに, 入射角 10° , 碎波波高 1 m の波が作用して砂移動が生じるものとした。また, $m=1/40$ とした。底質粒径を一定とする計算も実施し, 粒度の効果について検討を行った。

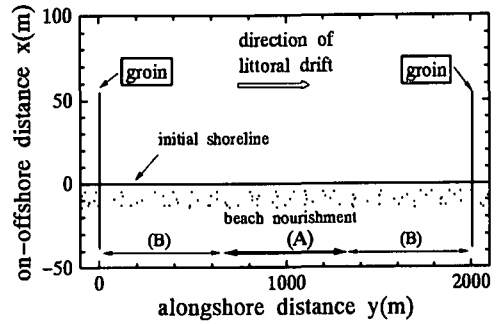


図-1 仮想海浜

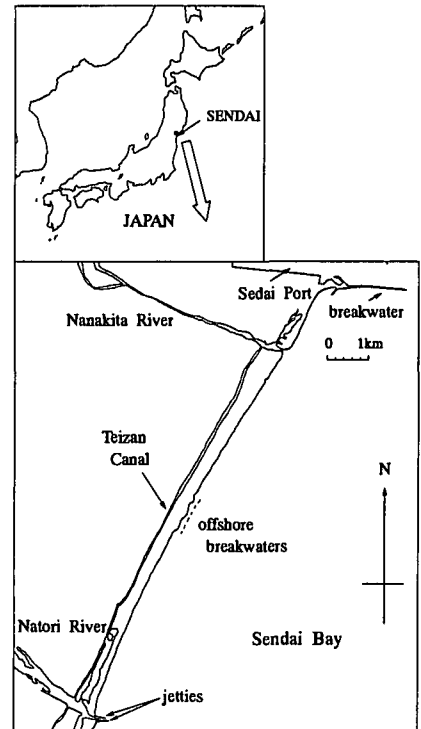


図-2 仙台海浜

3.2 現地海岸

次に, 現地海岸として仙台海浜北端の 11.5 km の海浜を対象とした計算を行った。地形の概要を図-2に示す。同海岸では河口からの流出土砂の減少および各種海岸構造物による沿岸漂砂の遮断により海岸侵食が顕在化してきている(宇多ら, 1990)。すでに, 佐藤ら(1966)が指摘するように, この海岸では基本的に北上する漂砂が卓越しているが, 名取市関上港において沿岸漂砂が遮断されている(真野・Hasanudin・沢本, 1996)ので, 図-2に示す計算領域の両端において漂砂移動が完全に阻止されるものとした。

4. 計算結果

4.1 仮想海岸への適用結果

モデルの基本特性を調べるために、まず単純な海浜形状を想定して検討を行った(図-1参照)。ここでは、二本の突堤に挟まれた海浜の一部(図-1の(A)の部分)に養浜がなされたとした。計算における境界条件として、

表-1 初期粒度組成

	d_i			
	0.1 mm	0.3 mm	0.6 mm	1.0 mm
Region (A)	30%	50%	20%	0%
Region (B)	0%	20%	40%	40%

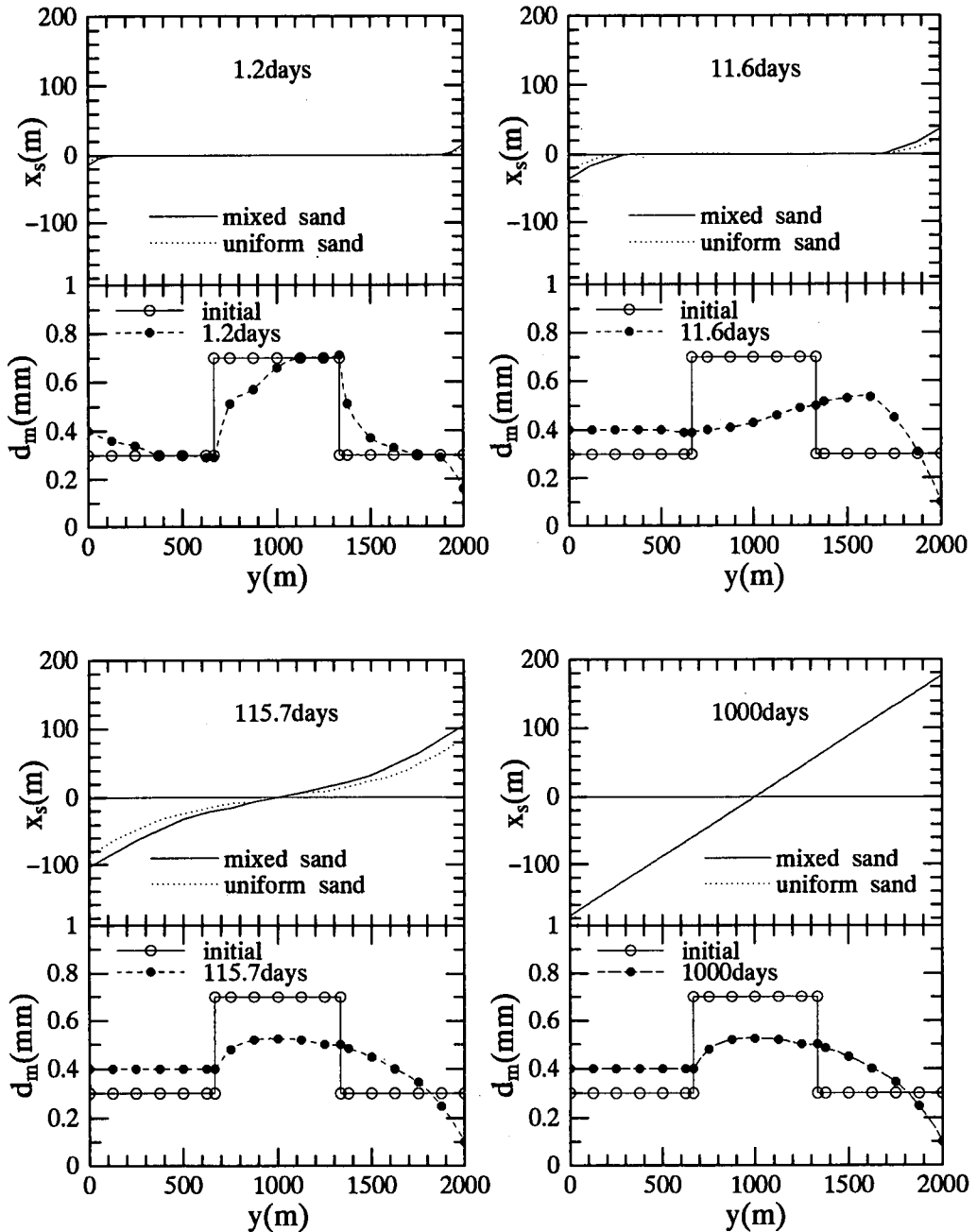


図-3 汀線・平均粒径の変化

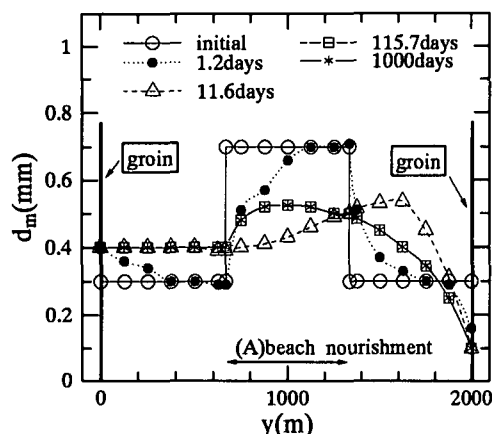


図-4 沿岸方向平均粒径分布の変化

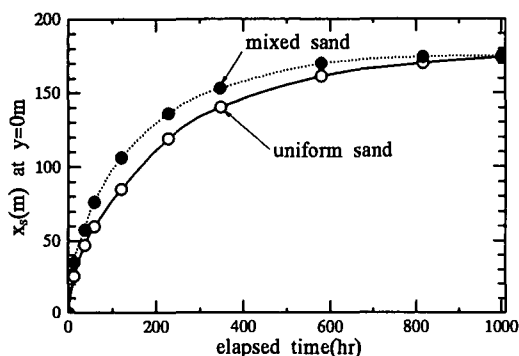


図-5 突堤付け根での汀線の変化

漂砂量については突堤位置で漂砂量ゼロとし、粒度組成については外挿して求めた。粒度分布の初期条件は表-1のように与えた。

図-3は計算により得られた汀線と平均粒径の変化を示したものである。また、図-4は各時刻の平均粒径分布 d_m の時間変化を重ねて示したものである。養浜がなされた(A)では、初期に他より粒径が大きく凸状の分布を持っている。左からの波浪により右に向かう漂砂が生じる。これに伴い、凸状の粒径の分布が徐々に変形しながら右に伝播する。初期には細粒分が選択的に輸送されるため、漂砂上手の左端で粗粒化が進み、逆に右端では細粒化が起こる。粒度分布については $t=115.7$ 日にすでに平衡状態に至っているのに対し、汀線はまだ変化の途上にあることが分かる。1000日の段階では汀線が波向きに対して直交し、粒度・汀線ともに平衡状態にある。

突堤付け根での汀線変化量の時間変化を図-5に示す。図には均一粒径とした結果も示した。いずれも波向きに直交するように汀線の変化が起こり平衡に到るが、その変化の速さに差がある。混合粒径モデルでは、上述

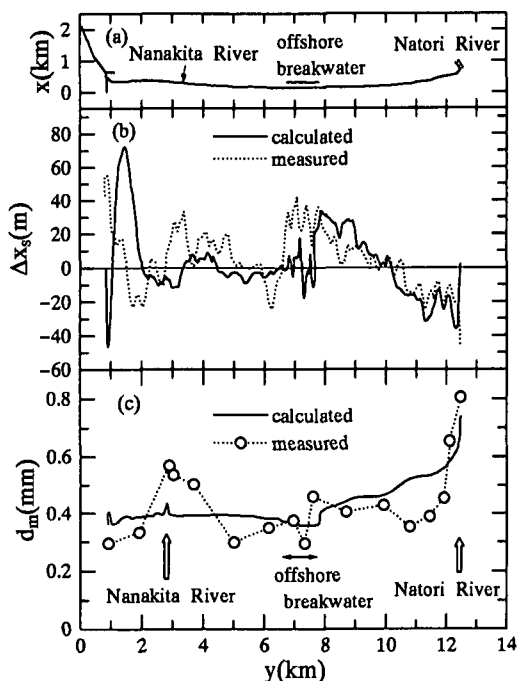


図-6 仙台海岸における汀線・平均粒径の変化

のように細粒分の移動しやすさのために変化がより速い。

4.2 仙台海岸への適用結果

同海岸では、初期条件として用いる汀線・底質粒径のデータで同時期に取得されたものが得られなかったため、時期的にずれている資料を使用した。まず、汀線については、1983年を初期条件として、1990年における実測汀線を再現することとした。一方、粒度については佐藤ら(1966)による仙台海岸での平均粒径を使用し、粒度分布については筆者らが現地で得た粒度分布を参考にして与え、これを1983年の分布に等しいものと仮定した。

仙台海岸には2つの河川が注いでおり、計算では実測(小野田ら, 1990)に基づく流出土砂量・粒度分布を与えた。また、波浪条件としては、仙台湾での実測値(運輸省塩釜港工事事務所, 1974)から季節毎の平均的な諸元を求め、これを用いた。

上記の様に、今回の計算では粒度について厳密な初期条件を与えておらず、この意味で完全に定量的な検討は行えない。ここでは、本モデルを現地海岸へ適用した際の問題点等を明らかにし、モデルのフレームワーク構築を目的とした。

図-6に計算結果を示した。図-6(b)の汀線変化については、右端での侵食、離岸堤右側の堆積の傾向について良好な一致が見られる。なお、上記の計算条件のうち

で底質条件のみを一樣粒径とし、他の条件は全く同一に保った計算も実施した。その結果、得られた海浜形状は混合砂とした計算結果と見分けがつかないほど良く一致していた。

平均粒径 d_m に関する計算と実測との比較を図-6(c)に示した。二つの河口近辺での底質の粗粒化、漂砂下手へ向けての粒径の低減や、離岸堤背後での細粒化など、現地で見られる特性を再現している。

ただし、実際の海浜では砂粒の摩耗による細粒化や、宇多ら(1997)によりモデル化されている沖方向への細粒分の移動が発生しており、この点に本モデルの改良の余地が残されている。

5. おわりに

海浜における汀線変化と粒度組成の変化を求めるモデルを提案した。主な結論は以下のとおりである。

(1) 流砂の基礎式をもとに、海浜での混合砂保存則を得た。また、漂砂量式として、粒径に対する依存性を持ち、かつ粒径毎の移動限界の相違を含むものを導いた。これを one-line model に組み込むことにより、粒度組成の計算が可能となった。

(2) 得られたモデルを二つの突堤にはさまれた仮想的な海浜に適用し、別途行われた均一粒径とした計算との比較を通して、混合砂の移動の特徴を明らかにした。その結果、汀線の変化速度に両者の相違が認められた。

(3) 粒度組成変化予測モデルを仙台海岸に適用した。汀線変化については良好な結果が得られたが、均一砂とした計算とほとんど差違が見られなかった。漂砂供給源近傍での粗粒化、漂砂下手へ向けての粒径の現象を再現することが出来た。

謝辞：本研究を行うに際し、岩手県立大学首藤伸夫教授、東北大学澤本正樹教授ならびに(株)テトラ水理研究所佐藤勝弘氏から有益なご教示を頂いた。また、建設省東北地建仙台工事事務所から貴重な資料を提供頂いた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 芦田和男・道上正規(1971): 混合砂れきの河床変動と armoring について, 第15回水理講演会講演集, pp. 31-36.
- 宇多高明・小俣 篤・峯松麻成(1990): 仙台海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.
- 宇多高明・河野茂樹(1996): 海浜変形予測のための等深線変化モデルの開発, 土木学会論文集, No. 539/II-35, pp. 121-139.
- 宇多高明・小杉俊夫・平岡孝恵・加藤憲一・山形 宙(1997): 波による粒径の淘汰を考慮した養浜時海浜変形モデル, 海岸工学論文集, 第44巻, pp. 516-520.
- 運輸省塩釜港工事事務所(1974): 塩釜港(仙台港区)の波と風(その3), 283 p.
- 小野田章男・横山喜代太・渋谷昭人(1990): 仙台湾における海浜変化シミュレーションについて, 土木学会東北支部技術研究発表会概要集, pp. 146-147.
- 合田良実(1970): 浅海域における波浪の碎波変形, 港研報告, 第14巻, 第3号, pp. 59-106.
- 佐藤昭二・庄司忠夫・田中則男(1966): 仙台海岸の漂砂について, 第13回海岸工学講演会論文集, pp. 176-182.
- 田中 仁・吉竹豊尚・首藤伸夫(1989): 波・流れ共存場における底質分級の数値計算, 海岸工学論文集, 第36巻, pp. 264-268.
- 田中 仁(1991): 七北田川の河口閉塞と河口砂州フラッシュ, 水工学論文集, 第35巻, pp. 275-280.
- 平野宗夫(1971): Armoringをともしう河床低下について, 土木学会論文集, 第195号, pp. 55-65.
- 堀川清司編(1985): 海岸環境工学—海岸過程の理論・観測・予測方法—, 東京大学出版会, 582 pp.
- 真野 明・Muhammad Hasanudin・沢本正樹(1996): 沿岸漂砂量式に用いる年平均波, 海洋開発論文集, 第12巻, pp. 55-59.
- Kamphuis, J. W. and Sayao, O. J. (1982): Model tests on littoral sand transport rate, Proc. 19th Int. Conf. Coastal Engineering, pp. 1305-1325.
- Kamphuis, J. W., Davies, M. H., Narim, R. B. and Sayao, O. J. (1986): Calculation of littoral sand transport rate, Coastal Engineering, Vol.10, pp. 1-12.
- Kraus, N. C. (1985): Field experiments on vertical mixing of sand in the surf zone, J. Sedimentary Petrology, Vol.55, pp. 3-14.
- Kraus, N.C., Hanson, H. and Larson, M. (1988) Threshold for longshore sand transport and application to a shoreline change simulation model, Proc. Symposium on Mathematical Modeling of Sediment Transport in the Coastal Zone, pp. 117-126.
- Tanaka, H. (1988): Bed load transport of sediment with non-uniform grain size due to wave motion, Coastal Engineering in Japan, Vol. 31, No. 2, pp. 265-276.