

混合粒径砂の分級過程を考慮した海浜変形モデルの開発

熊田 貴之* ・ 小林 昭男** ・ 宇多 高明***
芹沢 真澄**** ・ 星上 幸良***** ・ 増田 光一*****

海岸環境の変化を考える場合、海浜地形の変化に劣らず底質の質的变化が重要である。本研究では、Kamphuis (1986) の漂砂量係数 K_1 と底質粒径 D の関係 ($K_1 \propto D^{-1/2}$) 及び海底の交換層内での粒径毎の含有率を漂砂量式に組み込むことにより、汀線形状の変化と底質の分級効果を同時に予測可能なモデルを開発した。数値実験の結果、汀線変化は粒度構成に応じて異なることが明らかとなり、粒径の分級作用が再現できた。さらに、現地データによりモデルの妥当性が確認され、本モデルが十分に実用に供せられることが示された。このモデルにより沿岸方向各地点の粒度組成の予測も可能となった。

1. ま え が き

近年、生態系を含む海岸環境への各種開発の影響予測、および評価に対する社会的要請が高まっている。それは単に海浜形状だけではなく、底質の質的变化をも対象とする。すなわち海浜変形予測に加え、海浜底質の分級効果を含む粒径変化を予測可能なモデルが必要とされている。田中・鈴木 (1998) は、沿岸方向の底質淘汰過程に着目し、汀線変化モデルと組み合わせて沿岸方向の粒径変化を予測するモデルを構築した。このモデルは、粒径毎の漂砂量式と、平野 (1971) の交換層の概念を用いた各粒度の保存則を使用し、沿岸方向の粒径変化を予測するものであるが、混合粒径砂を考慮した汀線変化の再現結果には課題が残されている。本研究では、交換層内での粒径毎の含有率を漂砂量式に組み込むことで、混合粒径砂を考慮した汀線変化および粒度組成変化を予測可能な実用モデルを開発した。

2. モデルの基本構成

2.1 混合粒径を考慮した汀線変化モデル

a) 粒径毎の沿岸漂砂量式

粒径の分級作用を考慮するため、本モデルは均一砂を仮定している従来の汀線変化モデルを、熊田ら (2002) の概念に従い混合粒径が考慮できるように拡張した。混合粒径砂の分級過程を考慮するには、粒径毎の沿岸漂砂量の算定が必要である。そこで従来の CERC 型漂砂量式に、漂砂量係数 K_1 と底質粒径 D に関して Kamphuis (1986) の与えた関係 ($K_1 \propto D^{-1/2}$) を取り込んだ。この場合、 K_1 は砂の動き易さを表す係数となり、粒径が大きいと砂は動きにくくなるので、 K_1 および沿岸漂砂量 Q は小さくなる。

さらに図-1 に示すように、海岸線の長さの割合は、粒

径毎 (N 粒径) の体積含有率 $\mu^{(K)}$; $K=1, 2, \dots, N$ に等しいと仮定すると、粒径毎 $D^{(1)}, D^{(2)}, \dots, D^{(N)}$ に作用する波エネルギーフラックスは、 $F_x \mu^{(1)}, F_x \mu^{(2)}, \dots, F_x \mu^{(K)}$ となる。ここに、 F_x は、海岸線単位幅当りの波エネルギーフラックスの沿岸方向成分であり、 α_{Bs} は波峰線が海岸線となす角である。したがって混合粒径砂中の粒径毎の沿岸漂砂量 $Q^{(K)}$ は次式となる。

$$Q^{(K)} = \mu^{(K)} K^{(K)} F_x, \quad K=1, 2, \dots, N \quad (1)$$

$$F_x = (EC_g)_B \sin \alpha_{Bs} \cos \alpha_{Bs} \quad (2)$$

$$K^{(K)} = A(D^{(K)})^{-1/2} \quad (3)$$

式 (3) では、対象海岸の変形過程に応じて A を設定できるようにした。田中・鈴木 (1998) は、漂砂量式に粒径毎の含有率を考慮していないために、ある粒径成分が侵食の結果移動できなくなったとしても、汀線が安定するまで同量の土砂流出が進むことになる。これに対し、式 (1) はある粒径が少なくなればそれに応じて漂砂量も減少するように考慮されている。

b) 粒径毎の土砂量保存則

粒径毎の汀線変化量 $y_s^{(K)}$ は、粒径毎の土砂量保存則 (連続式) により次式で算定する。

$$\frac{\partial y_s^{(K)}}{\partial t} = -\frac{1}{D_s} \left(\frac{\partial Q^{(K)}}{\partial x} \right), \quad K=1, 2, \dots, N \quad (4)$$

x は沿岸方向座標、 D_s は漂砂の移動高を示す。混合粒径 (全粒径) の汀線変化量 Y_s はこれらを合計して次式となる。

$$\frac{\partial Y_s}{\partial t} = \sum_{K=1}^N \frac{\partial y_s^{(K)}}{\partial t} \quad (5)$$

式 (4)、(5) は、田中・鈴木 (1998) と実質的には同じ式である。

c) 粒径毎の含有率変化の計算式

波の作用により砂は混合され、粒度の変化はある厚みをもつ交換層内で生じるという、平野 (1971) の「交換層」の概念を用いて砂粒径の含有率変化の計算を行う。波による混合が生じる交換層は、図-2 のように汀線変化モデルに則って、漂砂の移動高 D_s 、海浜勾配 $\tan \beta$ の一様勾配斜面の海浜断面を考え、岸沖方向の幅 B 、 D_s の範囲を交換層と定義する。交換層の幅 B は、混合深さ

* 学生会員 工修 日本大学大学院理工学研究科海洋建築工学専攻
** 正 会 員 工博 日本大学専任講師 理工学部海洋建築工学科
*** 正 会 員 工博 国土交通省国土技術政策総合研究所研究総務官
**** 正 会 員 海岸研究室 (有)
***** 正 会 員 国際航業 (株) 海洋エンジニアリング部
***** 工博 日本大学教授 理工学部海洋建築工学科

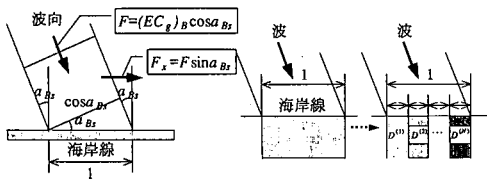


図-1 海岸線単位幅当りに作用する波エネルギーフラックス

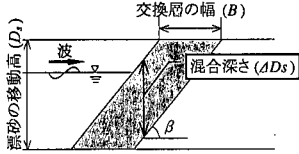


図-2 波の作用により混合される交換層の定義

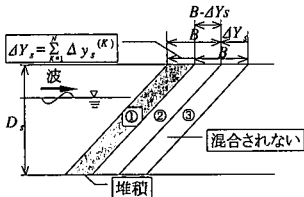


図-3 堆積域での汀線変化後の粒径混合範囲

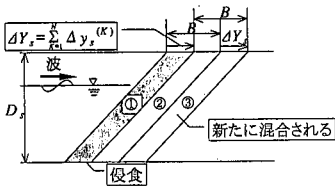


図-4 侵食域での汀線変化後の粒径混合範囲

ΔD_s と幾何学的に次式で関連付けられる。

$$B = \Delta D_s \frac{1}{\tan \beta} = \Delta D_s \cot \beta \quad (6)$$

ここで、 B はKraus (1985)を参考に ΔD_s を与えることにより算出する。

汀線変化モデルでは、汀線の前進・後退に応じてこの海浜断面が岸沖方向に平行移動する。汀線変化後、交換層 B 内の土砂が直ちに混合するが、混合状態は堆積域と侵食域とで異なる。変化後の汀線位置から岸側に幅 B 内の範囲で混合が起こるとするので、堆積域では図-3に示すように、新たに層①が堆積して層①、②が混合され、 B 内の岸端の層③は混合されずにそのまま残る。この時、堆積域では式(1)～(4)より小粒径が多く堆積するため平均粒径は細くなる。一方侵食域では、層①が削り取られ、 B 内の岸端の層②よりさらに岸側の層③に混合域がくい込む。このくい込み分が新たに混合される(図-4)。この時侵食域では小粒径が多く流出するため少なくなり、結果的に交換層内で大粒径が多く残され平均粒径は粗くなる。

交換層内での粒径毎の含有率 $\mu^{(K)}$ の算定には、各時刻の汀線変化による土砂流入・流出による層内での粒径毎の土砂収支を定式化した。以下、時刻 $t \sim t + \Delta t$ の変化量に Δ をつけて記すことにする。堆積域での汀線変化後の粒径毎の土砂量 $V^{(K)}$ と全土砂量 V の計算式を次式に示す(図-3参照)。

$$V^{(K)} = \{(B - \Delta Y_s) \mu^{(K)} + \Delta y_s^{(K)}\} D_s, \quad K=1, 2, \dots, N \quad (7)$$

$$V = \sum_{K=1}^N V^{(K)} = B D_s \quad (8)$$

したがって、堆積域での新たな含有率の計算式は次式となる。なお、以後の説明では便宜上プライムを付した変数は時刻 $t + \Delta t$ の値を意味するものとする。

$$\mu^{(KY)} = \frac{V^{(K)}}{V} = \mu^{(K)} + \frac{1}{B} \{\Delta y_s^{(K)} - \Delta Y_s \cdot \mu^{(K)}\} \quad (9)$$

式(9)は差分表示なので解析的表示に改めると次式となる。

$$\frac{\mu^{(KY)} - \mu^{(K)}}{\Delta t} = \frac{1}{B} \left\{ \frac{\Delta y_s^{(K)}}{\Delta t} - \frac{\Delta Y_s}{\Delta t} \cdot \mu^{(K)} \right\} \quad (10)$$

$$\therefore \frac{\partial \mu^{(K)}}{\partial t} = \frac{1}{B} \left\{ \frac{\partial y_s^{(K)}}{\partial t} - \frac{\partial Y_s}{\partial t} \cdot \mu^{(K)} \right\} \quad (11)$$

同様に、侵食域での汀線変化後の土砂量の計算式を次式に示す(図-4参照)。

$$V^{(K)} = \{B \cdot \mu^{(K)} + \Delta y_s^{(K)} - \Delta Y_s \cdot \mu_B^{(K)}\} D_s \quad (12)$$

$$V = \sum_{K=1}^N V^{(K)} = B D_s \quad (13)$$

ここに、 μ_B は汀線変化前の交換層より岸側の含有率を示す。侵食域での新たな含有率は次式で与えられる。

$$\mu^{(KY)} = \mu^{(K)} + \frac{1}{B} \{\Delta y_s^{(K)} - \Delta Y_s \cdot \mu_B^{(K)}\} \quad (14)$$

解析的表示に改めると次式となる。

$$\frac{\partial \mu^{(K)}}{\partial t} = \frac{1}{B} \left\{ \frac{\partial y_s^{(K)}}{\partial t} - \frac{\partial Y_s}{\partial t} \cdot \mu_B^{(K)} \right\} \quad (15)$$

式(11)、(15)は田中・鈴木(1998)と表示は異なるが、同じ意味を持つ。

2.2 基礎方程式の差分式と境界条件

a) 差分式

差分化にあたっては、式(1)、(4)の変数 $\{y_s\}$ 、 $\{\mu\}$ 、 $\{Q\}$ の計算点をスタッガードメッシュ上で定義した。この方法では、 i 番目のセルに対応する海岸線、交換層内での粒径毎の含有率の計算点 $\{y_{si}, \mu_i\}$ と沿岸漂砂量の計算点 $\{Q_i\}$ とを互いに $\Delta x/2$ だけ離れた位置で定義した。本モデルでは陽解法を採用した。式(1)～(5)および含有率変化の式(11)、(15)の差分式を以下に順に示す。

$$Q_{(i)}^{(K)} = \mu_{(i-1)}^{(K)} K^{(K)} (EC_g)_{B(i)} (\sin \alpha_{Bs(i)} \cos \alpha_{Bs(i)}), \quad i=2, 3, \dots, NY, \quad K=1, 2, \dots, N \quad (16)$$

$$\Delta y_{s(i)}^{(K)} = \frac{\Delta t}{D_s \Delta x} (Q_{(i)}^{(K)} - Q_{(i+1)}^{(K)}),$$

$$i=1, 2, \dots, NY, K=1, 2, \dots, N \quad (17)$$

$$\Delta Y_{s(i)} = \sum_{K=1}^N \Delta y_{s(i)}^{(K)} \quad (18)$$

$$Y'_{s(i)} = Y_{s(i)} + \Delta Y_{s(i)} \quad (19)$$

$$\mu_{(i)}^{(K')} = \mu_{(i)}^{(K)} + \frac{1}{B} \{ \Delta y_{s(i)}^{(K)} - \Delta Y_{s(i)} \cdot \mu_{(i)}^{(K)} \},$$

$$i=1, 2, \dots, NY, K=1, 2, \dots, N \quad (20)$$

$$\mu_{(i)}^{(K')} = \mu_{(i)}^{(K)} + \frac{1}{B} \{ \Delta y_{s(i)}^{(K)} - \Delta Y_{s(i)} \cdot \mu_{(i)}^{(K)} \} \quad (21)$$

式 (16) では、ある位置での粒径含有率を漂砂量式にそのまま適用すると計算上振動が起こるため、沿岸漂砂方向の上手側の含有率を使用する風上差分を適用した。すなわち右向の沿岸漂砂方向 (正の方向) の場合は $\mu_{(i)}^{(K)}$ を適用する。一方、左向の沿岸漂砂方向 (負の方向) の場合は $\mu_{(i)}^{(K)} = \mu_{(i)}^{(K)}$ を適用する。

b) 境界条件

計算領域両側における海浜が沿岸方向に一様であれば、沿岸漂砂量は存在するものの単に通過するだけなので海岸線は変化しない。この場合の境界漂砂量は次式のように粒径毎に設定する。

$$\text{左境界: } Q_{(1)}^{(K)} = Q_b^{(K)}, K=1, 2, \dots, N \quad (22)$$

$$\text{右境界: } Q_{(NY+1)}^{(K)} = Q_b^{(K)} \quad (23)$$

突堤などの海岸構造物がある場合は構造物位置での沿岸漂砂量を 0 に設定する。また、境界において沿岸漂砂量が粒度組成を変えずに存在する場合には、その通過漂砂量 Q_b を次式のように与える。

構造物により沿岸漂砂が完全に遮断される場合:

$$\text{左境界: } Q_{(1)}^{(K)} = 0, K=1, 2, \dots, N \quad (24)$$

$$\text{右境界: } Q_{(NY+1)}^{(K)} = 0 \quad (25)$$

$$\text{境界内: } Q_{(i)}^{(K)} = 0,$$

$$i=2, 3, \dots, NY, K=1, 2, \dots, N \quad (26)$$

境界において通過漂砂量が存在する場合:

$$\text{左境界: } Q_{(1)}^{(K)} = Q_b^{(K)}, K=1, 2, \dots, N \quad (27)$$

$$\text{右境界: } Q_{(NY+1)}^{(K)} = Q_b^{(K)} \quad (28)$$

図-5 に、以上の計算フロー図を示す。

3. モデルの検証

3.1 仮想海岸への適用

モデルの基本特性を確認するため、まず両端を突堤に囲まれた仮想海岸へ適用した。粒径は 0.1 mm と 1.0 mm の 2 粒径が均一に養浜された勾配 1/100 の海岸に入射角 10° , $H_b = 2$ m の波を作用させた (表-1 参照)。モデルと従来の均一砂のモデルの違いを明らかにするため、2 粒径の平均値 0.55 mm を均一砂とした場合と比較した。

図-6 に汀線変化を示す。0.01~0.2 年においては両者

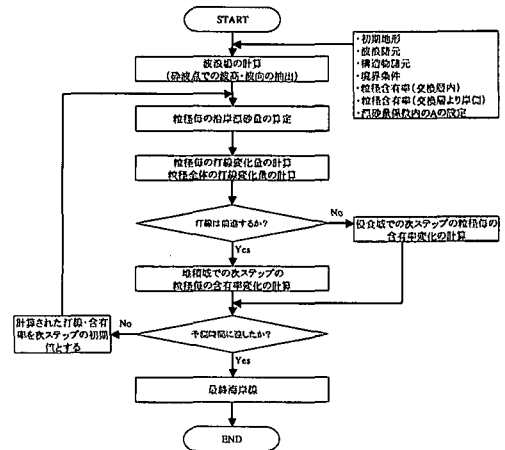


図-5 計算のフローチャート

にはほとんど差は見られないが、1.1 年以降本モデルの汀線変化が早くなった。これは 2 粒径のうち、細砂の移動の早さが汀線変化に影響しているためであり、海浜粒度組成に応じて変形過程に差が生じる結果が得られた。モデルは CERC 型沿岸漂砂量式を基礎としているため、安定汀線はいずれも波向に直角となった。

図-7 には平均粒径の沿岸方向分布の変化を示す。漂砂上手側の左端部では 0.78 mm と一定値を上限に時間経過とともに粗粒化が伝播し、一方右端部では細粒化が進行し 1.1 年以降汀線変化が大きくなると同時に細粒化が上手側に若干広がった。

図-8 に波の作用により砂が混合される交換層内の粒径毎の含有率を示す。漂砂上手側から粗粒化が下手側へと伝播していく状況がよく分かる。注目されるのは、侵食域では平均粒径変化同様、粗粒分と細粒分の含有率の比が一定値となることである。この粒度構成比は計算式上の特性であり、以下にその特性を計算式より導く。図-9 に示すように、突堤横の 1 メッシュについて考える。突堤横の粒径毎の汀線変化量は式 (29) となる。

$$\Delta y_{s(i)}^{(K)} = \frac{\Delta t}{D_s \Delta x} (Q_{(i)}^{(K)} - Q_{(i+1)}^{(K)})$$

$$= -\frac{\Delta t}{D_s \Delta x} Q_{(i)}^{(K)}, K=1, 2 \quad (29)$$

したがって、粒径毎の汀線変化量の比は、次式より漂砂量の比と等しい。

$$\frac{\Delta y_{s(i)}^{(1)}}{\Delta y_{s(i)}^{(2)}} = \frac{Q_{(i)}^{(1)}}{Q_{(i)}^{(2)}} = \frac{\mu_{(i)}^{(1)} K_{(i)}^{(1)}}{\mu_{(i)}^{(2)} K_{(i)}^{(2)}} = \text{const.} \quad (30)$$

侵食域での粒径含有率は式 (14) であり、粒径含有率の比が一定値となるには $\mu^{(K')} = \mu^{(K)}$ が成立し次式となる。

$$\Delta y_{s(i)}^{(K)} = \Delta Y_{s(i)} \cdot \mu_{(i)}^{(K)} \quad (31)$$

$$\therefore \frac{\Delta y_{s(i)}^{(1)}}{\Delta y_{s(i)}^{(2)}} = \frac{\mu_{(i)}^{(1)}}{\mu_{(i)}^{(2)}} \quad (32)$$

表-1 計算諸元

	初期地形 (海底勾配)	波浪諸元		交換層の 幅 B (m)	漂砂の移動 高 D_s (m)	粒径数 N	初期粒度構成(%) (交換層内・外とも同じ)							漂砂量係 数内の A
		H_0 (m)	a_0 (°)				0.1mm	1.0mm	—	—	—	—	—	
仮想海岸	1/100	2.0	10	5.5	7.0	2	50.00	50.00	—	—	—	—	0.50	
東条・前原海岸	1/20	H_0 (m)	T_{10} (sec)	a_0 (°)	1.3	7	0.074mm	0.106mm	0.250mm	0.425mm	0.850mm	1.200mm	2.000mm	0.55
		2.2	9	0			0.28	0.96	42.80	7.43	15.40	20.28	12.84	

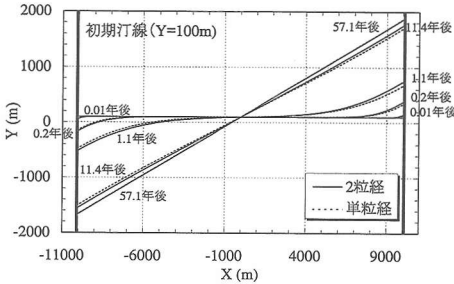


図-6 単粒径と2粒径の汀線変化の比較

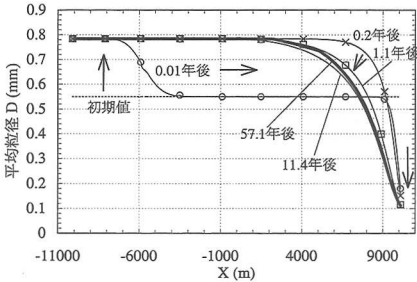


図-7 粒径変化の沿岸方向分布

式 (30), (32) より次の関係が導かれる。

$$\begin{aligned} \mu^{(1)} : \mu^{(2)} &= \frac{\mu_B^{(1)}}{K_1^{(1)}} : \frac{\mu_B^{(2)}}{K_1^{(2)}} \\ &= \mu_B^{(1)} \sqrt{D^{(1)}} : \mu_B^{(2)} \sqrt{D^{(2)}} \dots \dots \dots (33) \end{aligned}$$

本計算では $\mu_B^{(1)}/\mu_B^{(2)}=1$ を仮定しているため、侵食域での粒径含有率の比は、 K_1 の逆数の比、即ち $\sqrt{D}$ の比となり安定することが分かった。したがって、平均粒径の沿岸方向分布の最終形は、含有率変化の計算式の持つ特性であり、初期の各粒径とその含有率に強く依存する。

3.2 実海岸への適用

計算対象海岸として、元々自然海岸として粒径が全体的に淘汰された海岸に、人工構造物を建設したために海浜変形と粒度組成が変化した千葉県東条・前原海岸を選定した。千葉県鴨川市の東条・前原海岸の位置を図-10に示す。鴨川市は房総半島南部に位置し、太平洋に面している。当海岸は北東側を葛ヶ崎により、南西側を弁天島などの岩礁群によって挟まれた延長 3.9 km のポケットビーチである。南西端（右端部）には鴨川漁港の防波堤があり、海浜はそこより北東側に広がっている。当海岸における 1966 年から 1998 年までの 32 年間の海岸状況の変化は、海域での人工構造物の建設に起因すること

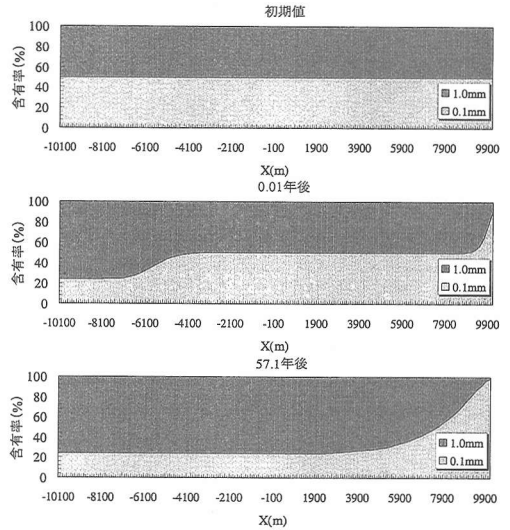


図-8 交換層内の粒径含有率の沿岸方向分布

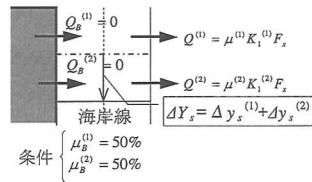


図-9 左突堤横の計算メッシュ

が宇多ら (2000) により見出されている。海浜変形に最も大きな影響をもたらしたのは、前原海岸に建設された 2 基の堤長 200 m の離岸堤である。これらの離岸堤は、背後地の越波対策として建設されたが、結果的に背後に規模の大きな舌状砂州を形成することとなり、舌状砂州の形成に預かる砂はポケットビーチ北東部の海浜から運び込まれたため、北東部では侵食が進み汀線が後退した。この時、侵食域においては主に細砂が流出して粗粒径堆積物が残されたため平均粒径は粗くなり、堆積域ではその細砂が堆積した結果平均粒径は小さくなった。

本研究では、このような沿岸漂砂特性を裏付けるべく、2001 年 4 月 14 日、海浜地形測量と共に離岸堤背後の舌状砂州のある場所において等間隔で岸沖方向の砂の材料を採取し、乾燥後篩い分け分析を行い、本モデルの検証データとした。計算諸元を表-1 に示す。初期汀線は空中写真の汀線変化解析より得られた構造物設置前の 1975

