

著しく大きな海岸線曲率を持つ海岸における 地形変化予測手法の開発

渡辺 宗介*・芹沢 真澄**・宇多 高明***・小河 正基****

著しく大きな海岸線曲率を持つ海岸において海浜変形に応じて波浪場も大きく変化する場における海浜変形を決定論的に予測可能なモデルを開発した。このモデルは直交曲線座標系を用いた 1 line モデルを発展させたものであり、計算過程において汀線形状から海底地形を作成・更新し、波浪場の計算を繰り返し行い、汀線変化に伴う海底地形および波浪場の変化を忠実に反映させることができる。実験結果と現地海岸の変形との比較検証により非常に良い再現結果が得られた。

1. ま え が き

砂嘴に代表されるような大きな海岸線曲率を持ち、海浜変形に応じて波浪場も大きく変化するような場における海浜変化予測は、従来の 1 line モデルでは困難であった。宇多 (1982) は汀線に沿った直交曲線座標系を用いた 1 line モデルを作成し、大きな曲率を持つ海岸の変形予測を行った。しかし、このモデルは従来型の 1 line モデルと比較して計算が複雑であって実用的ではなく、また地形変化に伴う波浪場の変化が十分に考慮されていないことが問題点として残されていた。その後、渡辺ら (2001a) は、砂嘴先端部を円弧として近似することにより、土砂収支を満足させつつ砂嘴の変形を予測する方式を示し、砂嘴の変形の概念モデルを作成した。さらに Ashuton らは、海岸線に対する沖波の入射角が 45° を超える場合海岸線は不安定となり、小さな擾乱から砂嘴が発達することを示し、砂嘴の変形予測を行った。この方式では海岸線を x, y 軸方向の微小なメッシュに区分し、一方向的に土砂が流されていく状況を再現している。しかしながらこれらいずれの研究においても、波浪場と漂砂量を決定論的に結びつけたものではない。

本研究では、砂嘴のように著しく大きな海岸線曲率を持つ海浜が波浪場の変化を伴いながら変形する場合でも安定的に汀線形状の予測が可能なモデルを構築する。

2. 計算方法

2.1 計算手順

図-1 に示すように、まず初期条件として海底地形や波の計算条件を与え、波浪場を計算する。

次に、大きな海岸線曲率をもつ海浜での汀線変化計算にも使えるように、宇多 (1982a) と同様、時々刻々と変化する汀線上に直交曲線座標系を設定し、その座標系における碎波波高と碎波波向の沿岸方向分布を求める。求

めた碎波諸元と汀線形状から沿岸漂砂量を計算し、これを用いて 1 line モデルで海浜変形を繰り返し計算する。従来の計算手法では、最初に与えた波浪場の条件で最後まで汀線変化計算を繰り返すことが多いが、本研究では海浜変形過程の中で、汀線変化に伴う海底地形の変化と、それによる波浪場の変化を忠実に反映させるために、計算過程において汀線形状から海底地形を作成・更新し、更新した海底地形を用いた波浪場の計算を繰り返し行う。このように繰り返し波浪場の計算を行うため、短時間で計算が可能で、かつ波向線交差領域も扱える渡辺ら (2001b) の波峰線を用いた不規則波の波向線法を用いた。また計算の安定化のために、汀線形状のスージングや格子点の張り替え等を行う。

2.2 汀線変化の数値計算手法

図-2 に示すように曲率の大きい海岸線の位置が NX 個の点 $P_{(1)} \sim P_{(NX)}$ で与えられたとする。そして汀線への接線の向きに x^* 軸、それと直行する向きに y_s^* 軸をとる。ただし、この x^* 軸と y_s^* 軸は共に、汀線上の各点で異なることに注意する。ここで、図-3 に示すように汀線上の計算点 $P_{(i)}^n(x_{(i)}^n, y_{(i)}^n)$ が、 $P_{(i)}^{n+1}(x_{(i)}^{n+1}, y_{(i)}^{n+1})$ に移

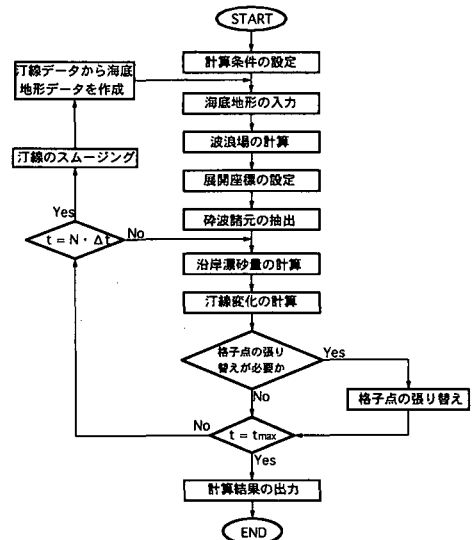


図-1 計算のフローチャート

* 東京大学大学院総合文化研究科
** 正会員 (有) 海岸研究室
*** 正会員 工博 国土交通省研究総務官 国土技術政策総合研究所
**** 正会員 理博 東京大学教授 大学院総合文化研究科

動する場合を考える。

添字 n は計算の時間ステップを表す。また本研究では、あるステップ毎に波浪場を計算し直し、更新していく。以下で出てくる添字 N は、 N ステップ毎に波浪場が更新されると同時に変化する値を表す。図-3 に示した座標・変数配置のもとでの漂砂の連続式は次のようである。

$$\Delta y_{s(i)}^n \cdot D_{s(i)} \cdot D_{x^*(i)} = (Q_{x^*(i)}^n - Q_{x^*(i+1)}^n) \cdot \Delta t$$

$$\therefore \Delta y_{s(i)}^n = \frac{\Delta t}{D_{s(i)} \cdot D_{x^*(i)}} (Q_{x^*(i)}^n - Q_{x^*(i+1)}^n) \cdots \cdots (1)$$

ここに、 Δt は微小時間間隔、 $D_{x^*(i)}$ は計算格子間隔、 $D_{s(i)}$ は漂砂の移動高、 i は計算格子番号を表す。この $D_{x^*(i)}$ は、 $P_{(i)}^n$ と $P_{(i-1)}^n$ の距離 $d_{(i-1)}^n$ 、 $P_{(i)}^n$ と $P_{(i+1)}^n$ の距離 $d_{(i)}^n$ を用いて、次式で近似的に与えられる。

$$D_{x^*(i)} = (d_{(i-1)}^n + d_{(i)}^n) / 2 \cdots \cdots (2)$$

直交座標上で計算する際には、どの計算地点でも同一であった格子間隔が各計算地点で異なることに注意する。図-3 に示すように、点 $P_{(i)}^{n+1}(x_{(i)}^{n+1}, y_{(i)}^{n+1})$ の直交座標上の位置は次のように定まる。

$$\begin{cases} x_{(i)}^{n+1} = x_{(i)}^n + \Delta y_{s(i)}^n \cdot \cos(\pi/2 + \theta_{s(i)}^n) \\ y_{(i)}^{n+1} = y_{(i)}^n + \Delta y_{s(i)}^n \cdot \sin(\pi/2 + \theta_{s(i)}^n) \end{cases} \cdots \cdots (3)$$

ここで、汀線上の各点における接線のなす角度 $\theta_{s(i)}^n$ が求められなければならない。ただし、展開座標上で汀線変化を安定に計算するには、この $\theta_{s(i)}^n$ の取り方が非常に重要になる。そこで $\theta_{s(i)}^n$ をその点と隣り合う左右各2点を含む計5点を最小2乗法により近似した放物線のその点における接線の傾きとして求めた(宇多, 1982a)。

式(1)中の沿岸漂砂量 $Q_{x^*(i)}^n$ は以下のように求まる。

$$Q_{x^*(i)} = K_1 (EC_g)^N_{b(i)} \cdot \cos \alpha_{bs(i)}^n \cdot \sin \alpha_{bs(i)}^n \cdots \cdots (4)$$

$$(EC_g)^N_{b(i)} = \frac{1}{8} \rho g (H_{b(i)}^N)^2 \cdot \sqrt{g \cdot h_{b(i)}^N} \cdots \cdots (5)$$

$$\alpha_{bs(i)}^n = \alpha_{b(i)}^n - \theta_{s(i)}^n \cdots \cdots (6)$$

ただし、 K_2 は漂砂量係数、 ρ は海水密度、 g は重力加速度であり、 $H_{b(i)}^N$ 、 $\alpha_{b(i)}^N$ 、 $h_{b(i)}^N$ はそれぞれ、 $Q_{x^*(i)}^n$ を求める測線上の碎波波高、碎波波向および碎波水深である。従来の手法では更新されなかった碎波諸元 ($H_b \cdot \alpha_b \cdot h_b$) が、 N ステップ毎に更新されるため、本研究の手法では波浪場の変化を考慮することができるようになった。

2.3 碎波諸元の抽出

ここでは沿岸漂砂量 $Q_{x^*(i)}$ を与える測線上での碎波諸元 ($H_b \cdot \alpha_b \cdot h_b$) を求める方法を考える。まず図-4のように、 $P_{(i)}$ と $P_{(i-1)}$ の中点を $P_{M(i)}$ とし、 $P_{M(i)}$ と隣り合う左右各2点 ($P_{(i-2)} \sim P_{(i+1)}$) の計4点を最小2乗法により近似した放物線の $P_{M(i)}$ における法線を、 $Q_{x^*(i)}$ を与える測線 $r_{(i)}$ とした。次に、 $P_{M(i)}$ から測線上を沖向きに進んでいき、各地点での波高と水深を求める。すると水深 D と波高 H の沖合い方向の分布が得られるので、碎波条件を

$$H_b = \gamma D \quad (\gamma = 0.78) \cdots \cdots (7)$$

とすれば、碎波位置が求まる。この方法で碎波位置を求めるため、本研究で波浪場を計算する際は碎波による波高減衰を考慮しないで計算を行う。碎波位置が求まったら、その地点における波高、波向および水深を抽出し、それらを碎波波高、碎波波向、碎波水深とした。

2.4 計算段階における海底地形の更新方法

計算途中の汀線から海浜平面地形の更新を行う際には、汀線上の各地点での断面形を求め、これより平面地形を定めるものとするが、実際の地形変化がうまく再現できるように、縦断面は岸沖方向に平行移動させるのみではなく、侵食域と堆積域で断面形を変化させた。図-5(a)の破線で示す旧海浜断面 ($A'-B'-P_{(i)}'-C'-D'$) と、新たな汀線位置 ($P_{(i)}$) から、侵食後の断面形状を求める。このとき、波の遡上高より高い場所に形成される浜崖 (AB) は垂直、遡上高から移動限界水深までに形成される侵食緩斜面 (BC) は一定勾配 ($\tan \beta_E$) とし、移

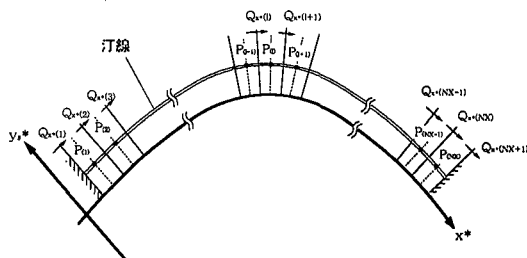


図-2 展開座標の設定

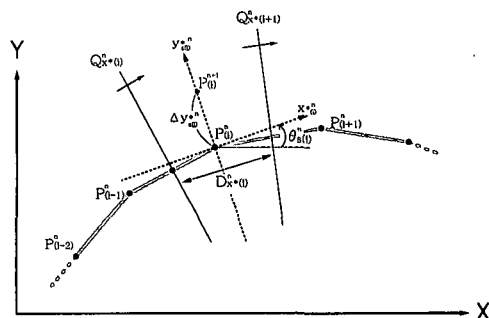


図-3 計算座標および変数配置

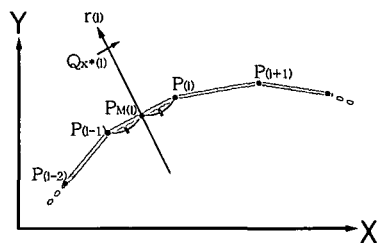


図-4 沿岸漂砂量 $Q_{x^*(i)}$ を与える法線の向き $r_{(i)}$

動限界水深に形成される平坦面 (CD) は水平とした。また ABCD 以外の断面部分では断面形が変化せずに元の断面形が保持されるとした。1 line モデルでは、汀線位置 (P) しか計算できないが、P 点、波の遡上高、移動限界水深および海底勾配 ($\tan \beta_E$) が与えられれば、全ての断面形が定まる。このようにして求めた断面形 $A'-A-B-P_{(i)}-C-D-C'-D'$ を関数 $f_i(r_{(i)})$ と定義する。

堆積後の断面形状を求める際には、図-5(b) に示すように波の遡上高に形成される平坦面 (AB) は水平、堆積急斜面 BC は一定勾配 ($\tan \beta_A$) とし、また侵食断面と同じく ABC 以外の断面部分では断面形が変化せずに元の断面形が保持されるとした。この場合も P 点、波の遡上高、移動限界水深および海底勾配 ($\tan \beta_A$) が与えられれば全ての断面形が定まる。この断面形 $A'-B'-A-B-P_{(i)}-C-C'-D'$ を関数 $f_i(r_{(i)})$ と定義する。

以上で求めた汀線上の各地点 $P(i)$ における断面形 $f_i(r_{(i)})$ をもとにして、地形のメッシュデータを作成する。図-6 (a) に示すように点 $P(i)$ からステップサイズ Δr で岸沖方向 $r_{(i)}$ に進んでいく。

以上で求めた断面形 $f_i(r_{(i)})$ を用いて、図のように点から距離 $k \cdot \Delta r$ だけ離れた点には、水深 $d = f_i(k \cdot \Delta r)$ を落としていく。全ての汀線上の格子点についてこの作業が終わったら、新しい地形のメッシュデータ $D_{(m,n)}$ を作成する。図-6 (b) に示すように、点 (m,n) における水深 $D_{(m,n)}$ を求める際には、その周りのメッシュ4個内に含まれる水深 d_j のデータを集計して求める。集計は次式で行う。

$$D_{(m,n)} = \frac{\sum_j \frac{d_j}{\varepsilon + z_j / \Delta S}}{\sum_j \frac{1}{\varepsilon + z_j / \Delta S}} \dots \dots \dots (8)$$

ただし、 ΔS はメッシュ間隔、 z_j は水深 d_j のデータが落とされた地点と点 (m,n) からの距離である。また ε は、計算が安定するように求めた。本研究で用いた値は 1.0 である。

以上のようにして作成された新しい水深データを用いることで、図-1 に示したような波浪場の繰り返し計算が可能となる。

2.5 汀線形状のスムージング方法

以上で述べたように、本研究では汀線データを用いて海底地形データを作成するため、海底地形および海底地形によって計算される波浪場も汀線形状に大きく依存する。本研究では、数値計算上の理由で生じる汀線形状の細かいノイズを拾わずに海底地形データを作成するため

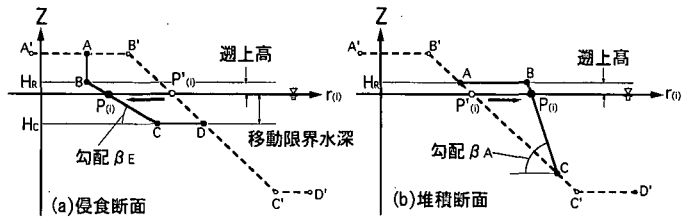


図-5 海浜断面形の決定方法

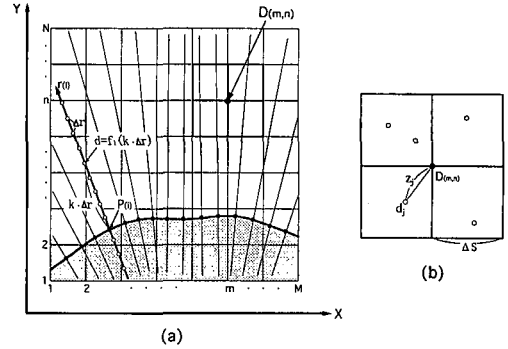


図-6 地形メッシュデータの作成方法

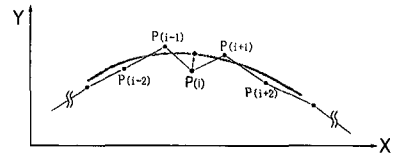


図-7 汀線形状のスムージング

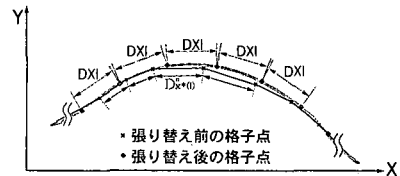


図-8 格子点の張り替え方法

に、図-1 に示したように海底地形データを作成する前に汀線形状のスムージングを行う。

実際には図-7 に示すように、汀線上の格子点 $P(i)$ を、その左右 2 点を含む計 5 点 ($P(i-2) \sim P(i+2)$) を用いて近似した放物線上に移動させることでスムージングを行った。本研究ではこのスムージングによって妥当な海底地形データが得られるようになり、安定な数値計算が行えるようになった。

2.6 格子点の張り替え方法

本研究で用いた直交曲線座標系上での汀線変化計算では、式 (1) 中の格子間隔 $D_{x(i)}$ も時間と共に変化する。格子間隔が小さくなり過ぎると汀線変化計算が不安定になり、また大きくなり過ぎても大きな曲率を持った汀線

の変形がうまく表現できなくなる。このため、格子間隔が大きく変化した際には座標の張り替えが必要になる。図-8のように格子間隔が場所によって大きく変化した場合には、張り替える前の格子点を最小2乗法により近似した放物線上に、等間隔 DXI で格子点を新たに設定することで張り替えを行った。

3. 計算結果

3.1 実験結果との比較

本モデルの妥当性を検証するため、実験結果および現地観測結果との比較を行った。図-9は、宇多・山本(1992)による浅海平坦面上で単純砂嘴が伸びる場合の実験結果との比較である。実験では $X \leq 8.3$ m 区間が沿岸漂砂の供給区域となっており、そこは高さ 10 cm の平坦面となっている。Y 軸方向から波高 4.6 cm、周期 1.27 s の波が入射するため左方向への沿岸漂砂が発達し、砂の供給域から削り取られた土砂は左方向に移動して海岸線の急変点から砂嘴として発達する。

計算では初期海底地形、波浪条件、漂砂の移動高などは全て実験値を用いた。汀線変化計算の時間ステップ Δt は 1.0×10^{-4} hr とし 20000 ステップ (2 hr) まで計算した。式 (4) 中の $K_1 = 0.77$ とし、また 2.6 節で述べた格子間隔 DXI は 0.03 m とした。水深データ (および波浪場) の更新は 250 ステップ (2.5×10^{-2} hr) 毎に計 80 回行った。

図-9 に示すように、実験では $X = 0 \sim 8$ m 区間で汀線が後退し、 $X = 9 \sim 16$ m 区間に存在する水深 5 cm の平坦面上を (図-10 (a) 参照)、この浅海平坦面の沖側の勾配急変点に沿って砂浜幅約 0.7 m の砂嘴が直線的に伸びた。一方計算結果は、汀線の後退状況、砂嘴の伸長方向・速度、および砂嘴先端の半径全てについて実験結果を良く再現できた。図-10 には海底地形の経時変化を示す。初期 (図-1 (a)) に存在していた浅海平坦面に砂嘴が発達したため、1 時間後にはこの付近の海底地形が大きく変化した (図-10 (b))、さらに 2 時間後 (図-10 (c)) には砂嘴先端が $X = 15$ m 付近で X 軸に沿った汀線とながり、背後に lagoon が形成された。これは自然の砂嘴にも良く見られる現象であるが、当モデルはこの変化を良く再現している。このように本研究では、複雑な砂嘴の発達現象を数値計算により決定論的意味から始めて再現可能とした。

図-11 には計算された波浪場の変化を示す。初期 (図-11 (a)) では P 点の下側の汀線が Y 軸と平行となっている場所で波高が低くなっているが、それ以外はほぼ波高・波向は等しい。しかし、1 時間後 (図-11 (b)) になると状況は一変し、P 点から約 $X = 12$ m 地点まで砂嘴が発達した結果、その背後に波高が非常に小さい区

域が形成された。この部分では波のエネルギーがほとんど到達しないため、この後はほとんど地形変化が見られなかった (図-9 参照)。そして 2 時間後 (図-11 (c)) になると、砂嘴の背後に形成された lagoon 内部では波高が完全に 0 となり、砂嘴の前面では波がほぼ一様に作用するようになった。以上のように地形変化に応じて波浪場も大きく変化している状況が明らかであり、地形変化の過程で波浪場の繰り返し計算を導入することで初めて、このような大規模な海浜変形が精度よく計算できたことがわかる。

3.2 現地海岸での変形との比較

現地海岸のデータに対する検証として、アラスカで 1976 年に建設された砂でできた人工島の変形について検証計算を行った。この人工島は水深約 0.91 m のほぼ平坦な浅海域で作られ、その長さは約 137 m、幅が約 99 m の長方形であった。

図-12 (a) は人工島建設直後の 1976 年 12 月と、約 2 年後の 1978 年 9 月の形状比較を行ったものである (宇多, 1982 b)。北東からの卓越波によって北東部では南および西方向へ土砂が運ばれ、運ばれた土砂は南東および北西部にある波の遮蔽域の漂砂量が小さい場所に堆積し

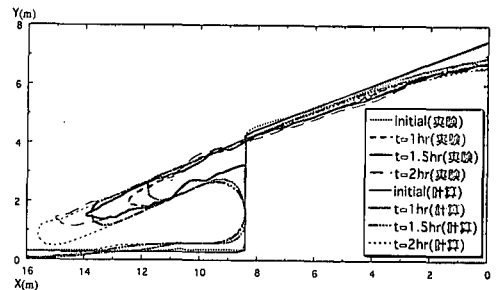


図-9 汀線の経時変化の比較 (実験結果と計算結果)

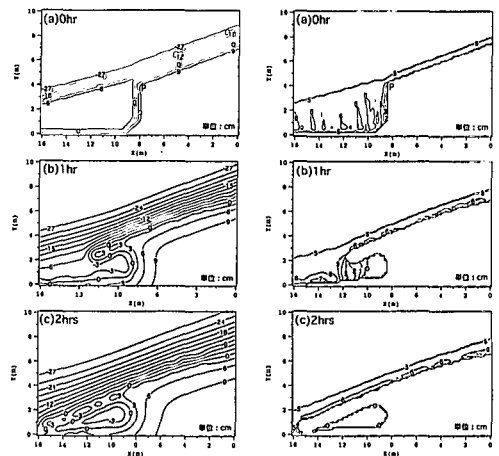


図-10 地形変化 (計算結果)

図-11 波浪場の変化 (計算結果)

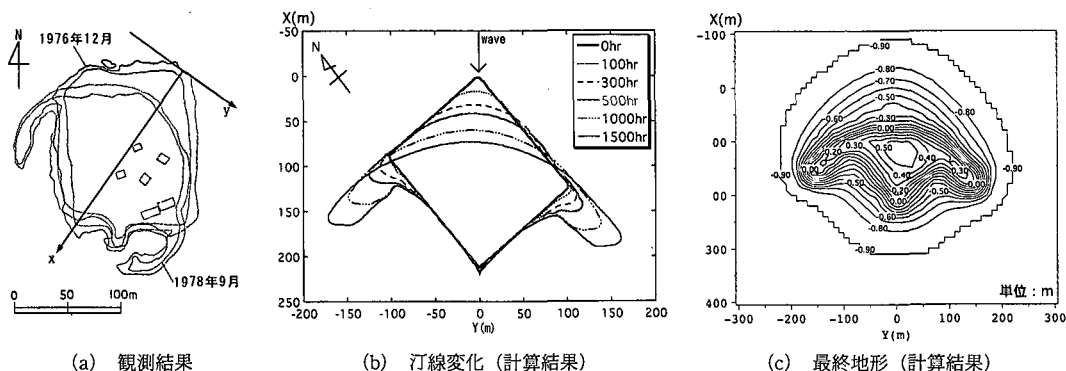


図-12 人工島の変形

た。図-12(b)に計算結果を示す。計算では波高0.3m, 周期3s, $S_{\max}=25$ の不規則波を入射させた。汀線変化計算の時間ステップ Δt は 5.0×10^{-2} hrとし、30000ステップ(1500hr)まで計算した。式(4)中の $K_1=0.1$ とし、また2.6節で述べた格子間隔DXIは3mとした。水深データ(および波浪場)の更新は300ステップ(15hr)毎に計100回行った。また、移動限界水深を40cm, 波の遡上高を20cm, 侵食域での海底勾配 β_e を0.1, 堆積域での海底勾配 β_a を0.3とした。図-12(b)に汀線変化の計算結果を示す。島の北東部が侵食され、沿岸漂砂によってそこから運び去られた砂が島の南部および西部に堆積するという状況が非常にうまく再現できている。図-12(c)には海底地形の最終形状を示す。侵食域には緩斜面が形成され、堆積域の陸側には波の遡上高付近に平坦面が、海中には土砂の落ち込みによる急斜面が形成されている。これらは実際の砂嘴地形にも良く見られるもので、かなり良く再現できている。このように現地海岸のデータに対する適応性も確認された。

4. あとがき

本研究で行った2つの検証計算では、海底地形、波浪場および汀線形状の全てが非常に大きく変化した。本研究の手法によって計算不安定を起こさずにシミュレートできるようになった。これは本研究で考案した安定化手法によるもので、特に海底地形を作成する前に行った汀線形状のスミージングはかなり有効であった。検証計算を行った結果、実際の海浜変形をうまく再現するためには、汀線変化を計算する際の格子間隔DXIの設定方法が重要であることがわかった。格子間隔が大きすぎると、砂嘴の先端などの曲率が大きい場所の汀線形状がうまく表現できなくなる。一方、格子間隔が小さすぎると汀線変化の計算が発散しやすくなると同時に、汀線形状が数値計算上のノイズを拾いやすくなるため汀線から作成される海底地形の誤差も大きくなってしまふ。本研究では

格子間隔を変化させて数ケース計算して経験的に妥当な格子間隔を求めたが、この妥当な格子間隔をどのように求めるかについては今後の課題である。

本研究によって、砂嘴のような大きな海岸線曲率を持つ海岸における海浜変形を精度良く予測できるモデルが構築された。さらに海底地形と波浪場の変化も決定論的手法によって予測可能とし、しかも著しく大きな海岸線曲率を持つ海岸において初期地形に大きな変化が生じる場合の海浜変形予測を可能にした。筆者らの知る限り、このような予測を可能にしたのは本研究が初めてである。さらに、今まで砂嘴の伸張現象のメカニズムには不明確な部分が多かったが、本研究の手法はこれらの解明にも役立つものと期待される。

なお、本研究は第一筆者が東京大学大学院総合文化研究科広域システム科学科の修士論文の一環として進めた研究の成果の一部であることを付記する。

参考文献

- 宇多高明 (1982a): 新しい海浜変形モデルによる河口砂州の変形予測, 土木学会論文報告集, 第322号, pp. 77-87.
- 宇多高明 (1982b): 砂でできた人工島の変形予測, 第29回海岸工学講演会論文集, pp. 289-293.
- 宇多高明・山本幸次 (1992): 砂嘴形成海域の海底地形と砂嘴形態の関係について, 地形, Vol. 13, pp. 19-33.
- 渡辺宗介・宇多高明・芹沢真澄 (2001a): 砂嘴の伸長予測モデル, 海岸工学論文集, 第48巻, pp. 541-545.
- 渡辺宗介・小河正基・芹沢真澄・宇多高明 (2001b): 複雑な海底地形場における波峰線を用いた波高計算法とその適用範囲, 海洋開発論文集, Vol. 17, pp. 37-42.
- Ashuton, A., A. B. Murray and O. Arnault (2001): Formation of coastline features by large-scale instabilities induced by high angle waves, Nature, 414, pp. 296-300.
- Gadd, P. E., C. J. Sonu and M. T. Czerniak (1979): Gravel island slope protection, Beaufort Sea, Alaska, Tetra Tech, Report, TC-3285, 49 p.
- Gadd, P. E., and M. T. Czerniak (1979): Production island slope protection, Beaufort Sea, Alaska, Tetra Tech, Report, TC-3310, 70 p.