

等深線変化モデルによる海食崖～海浜系の 地形変化予測

PREDICTION OF TOPOGRAPHIC CHANGES ON CLIFFY COAST AND SANDY BEACH USING CONTOUR-LINE-CHANGE MODEL

芹沢真澄¹・宇多高明²・星上幸良³

Masumi SERIZAWA, Takaaki UDA and Yuki Yoshi HOSHIGAMI

¹正会員 海岸研究室(有) (〒160-0011 東京都新宿区若葉1-22 ローヤル若葉301)

²正会員 工博 (財) 土木研究センター理事なごさ総合研究室長兼日本大学客員教授理工学部海洋建築
工学科 (〒110-0016 東京都台東区台東1-6-4 タカラビル)

³正会員 博(工) 国際航業(株) 防災・海洋部 (〒183-0057 東京都府中市晴見町2-24-1)

A model for predicting the topographic changes of both cliffy coast and sandy beach is developed using the contour-line-change model. In this model, recession of the cliff due to waves is modeled, and sediment supplied from the cliff is transported downcoast by longshore sand transport, resulting in the formation of a sandy beach. Predicted results were compared with a movable bed experiment.

Key Words : *Cliff erosion, predictive model, contour-line-change model*

1. まえがき

わが国太平洋岸の千葉、茨城、福島沿岸には未固結の砂岩・泥岩からなる海食崖が発達しているが、近年ではこれら海食崖の防護工事の結果崖からの供給土砂量が激減し、そこからの漂砂供給を前提として成立していた海浜で顕著な侵食が起きている。典型例は九十九里浜とその北端に連なる屏風ヶ浦に見られる。一般に、海食崖の侵蝕速度は崖の地質強度に依存し、後退速度の大きな海食崖では周辺海岸への土砂供給量も大きいので海食崖の防護工事の影響も場所ごとに異なる。このような海食崖の侵蝕現象については従来2次元変形として捉えられてきた。

堀川・砂村¹⁾は空中写真の比較から海食崖の後退過程を整理し、侵蝕過程は、侵蝕と同時に海食崖の崩落が起こるタイプAと、波食窪(ノッチ)が形成されるタイプBがあり、崖を構成する岩石の力学的性質および層理、節理、断層等の岩石構造によってこれらの差異が生じるとした。タイプA、Bの共通点は、基部の波による侵蝕→崖の崩落→崖錐の形成→波による崖錐の運搬・除去→基部の波による侵蝕という循環過程の存在である。タイプAでは海食崖の基部が侵蝕されて崩落が起こり基部に崖錐

(テラス)が形成される。崖錐が残されている間は崖の基部は波の侵蝕から免れるが、波の作用によってそれが運び去られると海食崖の基部は再び波による侵蝕作用を受ける。タイプBは、海食崖を構成する地盤の強度が相対的に大きいために、その基部に海食窪が形成される場合であり、海食窪がさらに発達すると崩落が起こり、崖錐が形成される。これが波の作用によって運び去られると再び海食窪が形成される。さらに堀川・砂村¹⁾は海食崖の後退速度は、波による侵蝕力と密接に関係し、岩石の侵蝕されやすさは岩石強度と逆比例の関係にあることを示し、侵蝕力と海食崖基部に作用する碎波後の波高、碎波点までの距離および作用時間等から海食崖の後退速度を求める式を提案した。また堀川・砂村²⁾は、二次元水路実験において早強ポルトランドセメント・砂・水を適当な重量配合で混合した固結砂を用いて、海食崖の侵蝕時の断面変化を実験的に調べた。実験では崖の基部に崩落土砂の堆積が見られたが、現地では崩落物が崖の基部にあまり存在していないことを指摘し、波の運搬作用が絶えず働き崩落土砂が沖へ運ばれていると結論づけた。

これらの研究は海食崖の侵蝕を2次元断面で捉えたものであるが、既往研究では問題を2次元的に扱

うために、海食崖前面の崩壊土砂は波の運搬作用により沖へと運ばれる。しかし、沿岸漂砂の作用を考慮すれば、海食崖基部の土砂の存在・消失は沿岸方向の土砂バランスとして自動的に評価可能となる。このような視点から宇多・山本³⁾は、崖海岸の浸蝕とそこから漂砂の供給を受けて発達する砂浜の関係を3次元移動床平面実験によって調べ、崖と海浜の境界部での海浜変形を実験的に明らかにした。しかしその予測までは行っていない。本研究では、芹沢ら⁴⁾の等深線変化モデルを発展させ、海食崖の後退と崩落土砂の沿岸方向への移動を同時に取り込んだモデルを作成する。

2. 海食崖の浸蝕予測モデル

(1) 崖浸蝕モデルの考え方

等深線変化モデルでは沿岸方向に x 軸、鉛直上向きに z 軸を取り、海浜断面を標高 $z = z_1 \cdots z_k$ に対応する等深線までの冲向き距離 $Y(x, z_b, t)$ によって表わす。海食崖についても同様にして基準点から崖面の等高線・等深線までの冲向距離 $Y_w(x, z_b, t)$ で表現する。また岸側・沖側の2組の等深線により、海食崖・海食台の岩石構成部分と、波により移動可能な砂から構成される海浜部を表す。これらのうち海浜変形は海食崖を護岸と見なせば従来の等深線変化モデルと同様に計算できる(芹沢ら⁴⁾の図-3参照)。海食崖は波の浸蝕作用により時間とともに岸側へ後退するので、海浜部の計算では護岸境界位置も後退させる必要がある。また崖浸蝕により削り取られた土砂は海浜に供給され漂砂源となる点も考慮しなければならない。

一方、海食崖は、堀川・砂村²⁾が示したように、波力の集中する水面近くが集中的に削られる。水面付近に楔状のノッチが刻まれ、それが深まるとその上部の崖が重力に対して不安定となり崩落する。このように浸蝕の直接的外力は水面付近のごく一部にしか作用しないが、結果的に崖面全体が崩落する。また崩落土砂の全てが海浜に寄与するのではなく、泥岩層から発生するシルト質などの細粒分は拡散して沖合に流出するため、波による地形変化の限界水深以浅の海浜形成には寄与しないと推定される。

土砂の寄与率は崖の地質構成に依存する。細粒分を除くある程度粒径の粗い材料の含有率が海浜への寄与率を与えられと考えられる。崖の後退速度も崖の地質強度によって変化し、波力とその作用範囲によっても変化する。さらには崖直下に砂浜があるか否かによっても浸蝕速度は大きく異なる。波の打ち上げが砂浜で阻止され、崖面に波が作用しなくなれば波食は止まることになる。これらの断面2次元問題での海食崖の特性は地形学ではよく知られていることである。以上を念頭に置いて海食崖の浸蝕のモ

デル化を行った。各地点の崖の後退は断面2次元問題として扱う。計算は海浜部の計算と崖部分の計算とを交互に行い、海浜部の計算を1ステップ行うごとに崖の後退計算を行った。

(2) 崖の後退

海食崖の各点の後退速度 V_e が既知の場合、崖位置の時間変化は式(1)で表される。式(1)より Δt 後の崖位置の変化量は $-V_e \Delta t$ で与えられるから、 Δt 後の崖位置 Y_w' は式(2)より計算できる。ただし前記の特性を考慮し V_e は式(3)のように崖前面に砂浜がない場合における崖の後退速度 $V(z)$ と、砂浜の存在に応じた崖の露出率 μ_w の積で表すことにする。 $V(z)$ は崖の後退範囲 $Z = -h_{cw} \sim h_{Rw}$ に対して与えるものとするが、本研究では簡単のため式(4)のように一定値 V_0 で与えた。

$$\frac{\partial Y_w}{\partial t} = -V_e \quad (1)$$

$$Y_w^{(k)'} = Y_w^{(k)} - V_e^{(k)} \cdot \Delta t \quad (2)$$

$$V_e = \mu_w \cdot V(z) \quad (3)$$

$$V(z) = V_0 \quad (-h_{cw} \leq z \leq h_{Rw}) \quad (4)$$

砂浜による被覆率 μ_c は、崖の露出率 μ_w と式(5)の関係にある。被覆率 μ_c は等深線変化モデルで護岸境界を表す場合の漂砂低減率 μ と同様に扱うことができ、式(6)で与えられる(芹沢ら⁴⁾図-4参照)。崖および海浜の等深線の鉛直分割幅 Δz の区間を考え、崖前面の浜幅 ΔY に比例させて μ_c を1~0の間で変化させる。等深線変化モデルと同様の幾何学的考察より、式(6)のように浜がその平衡勾配角 β_c で高さ Δz の三角形になった状態が浜幅の臨界値 ΔY_c となるとして、これより幅が狭まると崖面が露出し始め、浜幅が0になると全部露出するとして式(6)のように浜幅に比例し低減させる。

$$\mu_c = 1 - \mu_w \quad (5)$$

$$\mu_c^{(k)} = \frac{\Delta Y^{(k)}}{\Delta Y_c^{(k)}} \quad (0 \leq \mu_c^{(k)} \leq 1) \quad (6)$$

$$\Delta Y_c^{(k)} = \frac{1}{2} \cot \beta_c^{(k)} \cdot \Delta z \quad (7)$$

(3) 重力による崖の崩壊の扱い

崖基部の侵食が進むと崖は崩落するが、これは崖の勾配が安息勾配を越えることで生じる。したがって等深線変化モデルでの重力による海浜斜面の崩壊と同様に扱うことができる。崖の勾配角を β_w 、崖の安息勾配角を β_{wc} とし、 β_w が β_{wc} を越えた時に下向き漂砂が発生して崖が崩壊すると考えると、下向

き漂砂量 q_w は式 (8) で、 β_w は式 (9) と表せる。

$$q_w = \min \left\{ B_g (\cot \beta_w - \cot \beta_{wg}), 0 \right\} \quad (8)$$

$$\cot \beta_w = -\frac{\partial Y_w}{\partial z} \quad (9)$$

崖の崩落は海浜変形や崖の侵食に比べてごく短時間で生じると考えられるので、式 (8) の係数 B_g は数値計算が発散しない範囲内でできるだけ大きな値として設定する。芹沢ら⁴⁾と同様に B_g は式 (10) で与える。式 (8) の下向き漂砂量を崖面に関する断面 2 次元の連続式 (式 (11)) に代入して差分法で解く。このとき、境界条件は式 (12), (13) のように上端で土砂流入なし、下端では崖位置を固定する条件を用いる。これにより崩壊後の崖形状を求め、崩壊前後の断面変化から崩壊土砂量を算出し、崩壊土砂のうち海中に拡散するものを除く、海浜に寄与する土砂量を海浜に供給させる。

$$B_g = R_s \frac{(\Delta z)^2}{\Delta t} \quad (R_s = 0.2) \quad (10)$$

$$\frac{\partial Y_w}{\partial t} = -\frac{\partial q_w}{\partial z} \quad (11)$$

$$B.C. \quad q_w = 0 \quad (\text{at } z = z_{top}) \quad (12)$$

$$B.C. \quad \frac{\partial q_w}{\partial z} = 0 \quad (\text{at } z = z_{bottom}) \quad (13)$$

(4) 崖から海浜への土砂の供給

崖から海浜へ供給される土砂量に見合った分、等深線・等高線位置を次のように前進させる。鉛直単位高さ、単位時間での各点の崖の後退速度 V_e を、上記の崖侵食の計算を行う前後の崖位置の変化から求め、これに海浜への寄与率 γ を考慮し崖前面の海浜位置を修正する。まず崖の後退により崖の前面に式 (14) 相当の土砂が加わる。 γ が 1 ならば崖の後退分がそのまま砂の供給量になる。1 以下では空隙ができるのでその分を補正する。この関係は式 (15) で与えられ、差分表示した式 (16), (17) で崖侵食起源の土砂供給による等深線変化を計算する。

$$V_a = \gamma \cdot V_e \quad (14)$$

$$\frac{\partial Y}{\partial t} = \frac{\partial Y_w}{\partial t} + V_a = -(1 - \gamma) V_e \quad (15)$$

$$\Delta Y_a^{(k)} = \gamma \cdot \Delta Y_w^{(k)} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} Y^{(k)'} &= Y^{(k)} + \Delta Y_w^{(k)} + \Delta Y_a^{(k)} \\ &= Y^{(k)} - (1 - \gamma) \cdot \Delta Y_w^{(k)} \cdot \Delta t \end{aligned} \quad (17)$$

(5) 海浜変形計算

海食崖からの供給土砂は下手方向へ運ばれ、そこでの海浜形成に役立つことから、海食崖の後退問題

では現象の 3 次元性を考慮する必要がある。ここでは海食崖の下手側における海浜の形成も予測可能とするために、海浜変形計算には芹沢ら⁴⁾の等深線変化モデルを用い、これに崖浸蝕モデルを組み込んだ。モデルの基礎式は芹沢ら⁴⁾と同一なので省略する。

等深線変化モデルでは、等深線上の各点での沿岸漂砂量 q_x 、岸沖漂砂量 q_z を算定し、これを用いて x - z 空間の 2 次元の連続式を解くことにより等深線変化量が計算される。数値計算では、スタッガードメッシュを用いた陽形式の差分法と宇多ら⁵⁾の展開座標を用い、曲線状の等深線を直線状に展開した座標系を用いて計算を行う。バーム高より高い領域と限界水深以深の領域で安息勾配を越えた場合に生じる重力による落ち込みの取り扱いには芹沢ら⁴⁾と同様である。海浜背後の海食崖は護岸として扱い、芹沢ら⁴⁾による護岸境界処理法を用い、等深線が護岸に接近した場合低減率を乗じて漂砂量を低減する方法を用いた。従来の計算と異なる点は、海食崖の後退により護岸位置が岸側に後退していくことである。

3. 海食崖の後退と海浜変形

(1) 計算の目的

本研究では、研究の第一歩として、上記モデルによって海食崖の後退と海浜変形とを連動させた計算が実際に可能であるかどうかを定性的な意味で確認することを目的とする。このため、まず崖の後退に伴う土砂供給によって形成された前浜の有無がもたらす崖浸蝕状況の差異を、供給土砂の寄与率を変えて調べた (2 次元計算)。次に、九十九里浜のように、崖浸蝕に伴う供給土砂が沿岸漂砂の作用によって運ばれた結果、下手海岸に砂浜が形成しうるかどうかを調べた (3 次元計算)。これらの計算条件を表-1 に示す。なお、今回の計算は本モデルによる計算可能性の確認を目的とするため、各種パラメータの設定、時空間スケールの設定などは今後の検討課題である。また波浪場の計算は行わず、碎波波高、バーム高 h_R (遡上高)、 h_c は一定値で与えている。

(2) 2 次元計算の結果

図-1 (a), (b), (c) は、断面内での海食崖の後退について土砂の寄与率 γ を 0, 0.5, 1.0 とした場合の計算結果である。 $\gamma=0$ の場合、崖からの崩落土砂は前面海浜に全く堆積せず沖合へと流出する。この場合崖の後退速度はほとんど変化せず、崖が後退した後の水面付近に海蝕ベンチのような平坦な地形が残される。図-1 (b), 1 (c) に示すように $\gamma=0.5$, 1.0 の場合、 γ が大きくなるほど崖前面の堆積断面積が大きくなり、前浜が形成されることによって波の遡上が抑制され崖が削られにくくなる。結果的に崖下の地盤高が徐々に高くなり崖の後退速度も低下することが分かる。

(3) 3次元計算の結果

図-2に示す初期地形と入射方向に対し、 $h_c=10\text{m}$ 、 $\gamma=1.0$ の場合の海食崖の後退と隣接海岸の海浜形成

について、初期 (1×10^4 ステップ) と崖後退がかなり進んだ 5×10^4 ステップの計算結果を図-3、4に示す。初期には隅角部が削られ海食崖からの崩落土砂

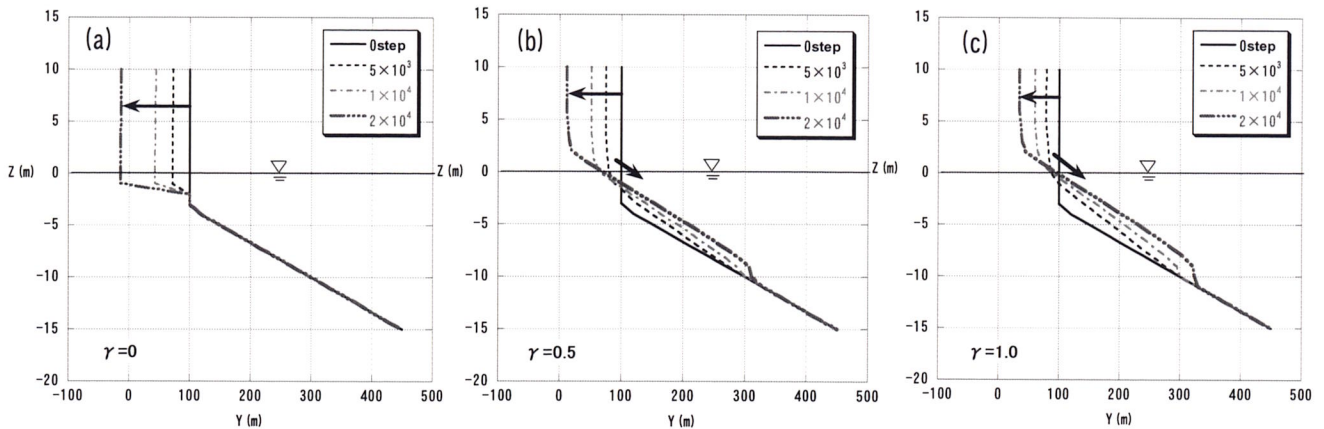


図-1 海食崖の2次元後退予測計算の結果 (a: $\gamma=0$, b: $\gamma=0.5$, c: $\gamma=1.0$)

表-1 計算条件

- ・ 崖の後退範囲: $h_{RW}=+2\text{m}$, $h_{CW}=-1\text{m}$
- ・ 後退速度: $V_\sigma=50\text{m}/500\text{steps}$ ($50\text{m}/8760\text{steps}$)
- ・ 崖崩落土砂の海浜への寄与率: $\gamma=0, 0.5, 1.0$
- ・ 崖の安息勾配の逆数: $\cot \beta_R=0$
- ・ 碎波波高: $H_b=1\text{m}$, 初期碎波角: $\alpha_b=0\text{deg}$.
- ・ $h_c=9\text{m}$, $h_R=3\text{m}$
- ・ 漂砂の水深方向分布: 一様 (宇多・河野⁶⁾ の3次式)
- ・ 沿岸漂砂係数: $K_x=0.2$, 岸沖漂砂係数: $K_z=0.1K_x$
- ・ 平衡勾配: $\tan \beta_c=1/30$
- ・ 土砂の安息勾配: $1/3$ (水中), $1/2$ (陸上)
- ・ メッシュ: $\Delta Z=1\text{m}$, $\Delta X=200\text{m}$, $\Delta t=17.52\text{hr}$ (1hr)
- ・ 計算ステップ数: $50,000\text{steps}$ ($20,000\text{steps}$)

備考: () 内は断面2次元計算時の値。他は2・3次元計算共通。

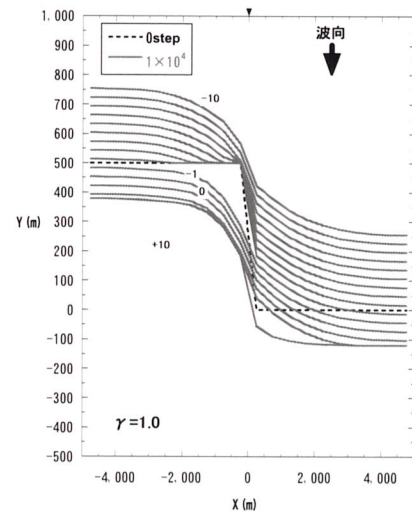


図-3 海食崖の後退と下手側における海浜形成予測 ($\gamma=1.0$, 1×10^4 ステップ)

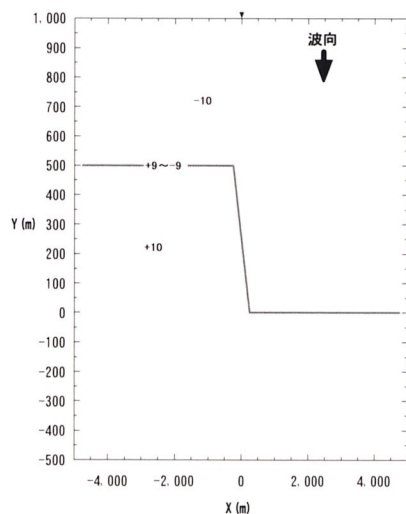


図-2 海食崖の後退と下手側における海浜形成予測 ($\gamma=1.0$, 初期地形)

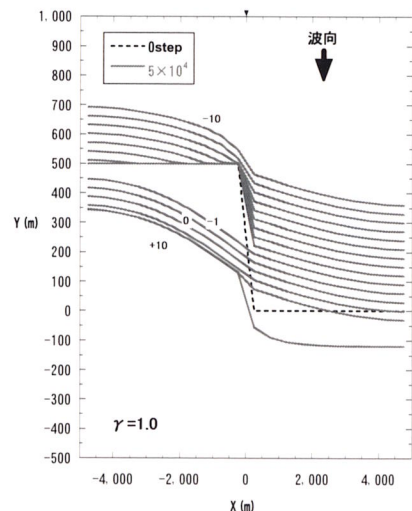


図-4 海食崖の後退と下手側における海浜形成予測 ($\gamma=1.0$, 5×10^4 ステップ)

の一部は海食崖の沖合に堆積するとともに、右向きの沿岸漂砂により湾入部へ運ばれ前浜が形成される。崖浸蝕が進むと崖の沖合に形成された海食台が広がる。図-5は図-4の±4250m断面の縦断形変化を示す。海食崖から沖合へと運ばれて堆積した土砂のうち h_c 以浅の土砂は海食台を回り込んで流出し、平衡勾配に見合った一様斜面を形成して土砂が堆積する。

同様に $\gamma=0.5$ の場合の計算結果を図-6, 7に示す。図-8は図-7の±4250m断面の縦断形変化である。-4250m断面では崖前面に小規模な前浜を残しつつ後退を続ける。これに対し+4250m断面では沿岸方向に運ばれてきた砂が沖合部も含めて堆積し海浜が広がる結果、海食崖の後退速度は時間経過とともに低下、あるいは途中で停止する。-4250m断面では海食崖は後退を続け、浸蝕開始後初期に海食崖沖に堆積した砂まで削り取られ縦断形が後退する結果となった。

(4) 実験結果との比較

一般に、海食崖の後退は長期間を要するために、

上述の数値計算の検証データを得ることは容易ではない。そこでここでは宇多・山本³⁾が実施した $\gamma=1.0$ 、すなわち海食崖からの供給土砂量の全量が砂浜形成に使われる場合の実験結果と比較する。図-9, 10は宇多・山本による移動床実験の初期海浜形状と造波8時間後の海浜形状である。また図-11は代表位置における縦断形変化である。なお、移動床模型実験の場合、 h_c はほぼ15cmにあり沖浜はこれより深い条件であるが、計算では沖合の水深は $h_c=10$ mの平坦面としている点が相違する。また実験では海食崖を含む全ての海岸が砂で造られているので、海食台は形成されない。実験的に得られた等深線の平面形状については、海食台の形成は見られず、また実験では冲向きの砂移動により $h_c=15$ cm以深の領域へと砂が落ち込んだために海食崖の沖合に急勾配の海底面が形成されたが、計算では沖合が $h_c=10$ mの平坦面としたためにこのような土砂の落ち込みは計算されていない。このような相違はあるが、海食崖前面で次第に等深線が後退し、右側区域へと砂が運ばれ堆積

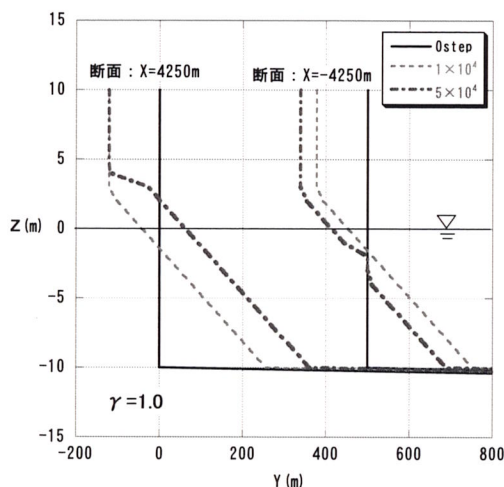


図-5 縦断形変化 ($\gamma=1.0$)

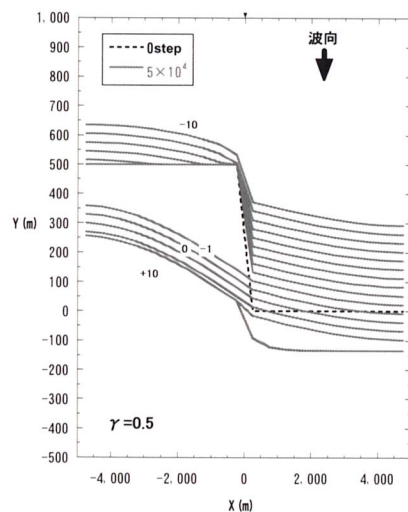


図-7 海食崖の後退と下手側における海浜形成予測 ($\gamma=0.5$, 5×10^4 ステップ)

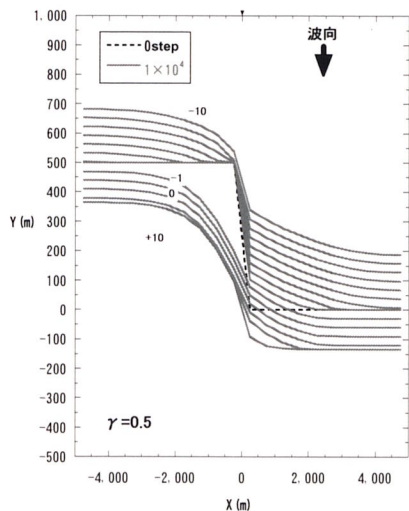


図-6 海食崖の後退と下手側における海浜形成予測 ($\gamma=0.5$, 1×10^4 ステップ)

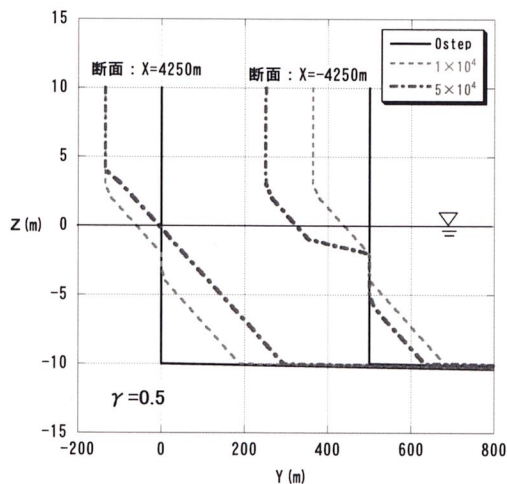


図-8 縦断形変化 ($\gamma=0.5$)

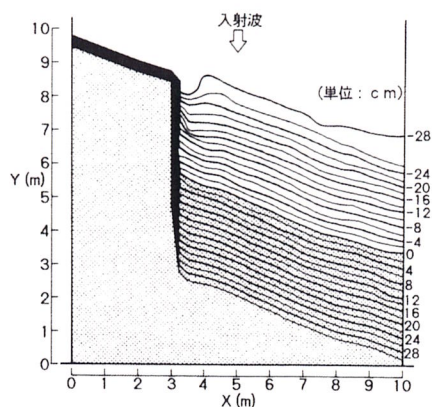


図-9 突出した崖と砂浜からなる海浜変形実験時の初期地形³⁾

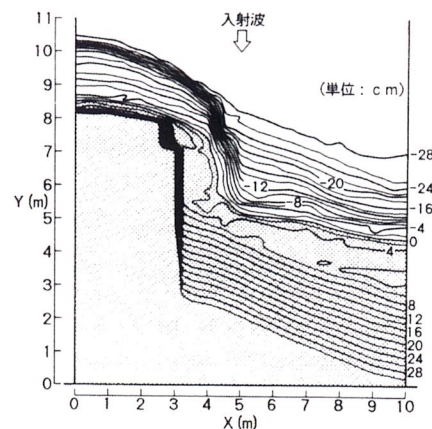


図-10 造波後8時間の海浜形状³⁾

していく状況はうまく計算されている。また海食崖前面の $X=0.5\text{m}$ 断面の縦断形変化は、計算による-4250m 断面の変化とほぼ対応しており、初期に海食崖からの崩落土砂が沖合へと運ばれた後、波の作用で h_c (模型実験では-15cm, 現地海岸では 10m) 以浅の区域で沿岸漂砂によって砂が運び去られ侵食が進んでいる状況はうまく計算できている。

4. まとめ

等深線変化モデルを基本とし、海食崖の浸蝕過程とそこからの供給土砂による海浜の発達を同時に計算可能なモデルを開発した。従来のモデルは、海食崖の2次元変形モデルのみであったが、本研究によりその3次元化が可能となった。ここでは現象を表す基本的モデルを提示した。なお、本モデルでは、現実には崖の崩壊は間欠的に発生するが、長期の平均値を扱うことで式(1)のように連続的に侵食が進むとしている。また、堀川・砂村²⁾が明らかにしたように、崖前面に少量の土砂が存在することによるノッチの発達、およびその結果として崖浸蝕の加速現象も考慮していない。これらの相違はあるものの、沿岸漂砂の作用を考慮し、海食崖の後退と海浜変形とを同時に計算できるという利点を有している。今後、現地海岸を対象として時空間スケールを考慮した検証計算を行うことで、各種パラメータの設定方法、モデルの適用性を検討し、九十九里浜のように海食崖の崩落防止が周辺海岸へ及ぼす影響の再現や予測に使えるものとしていきたい。海食崖からの供給土砂は河川供給土砂と同様、広域的な土砂管理の観点から重要である。例えば、九十九里浜の自然状態の海食崖の後退速度は 1m/yr のオーダーであり、100年間で100mとなることから、工学的に見ても無視できない大きさとなる。今後、こうした海食崖—海浜が一体となった地域での侵食問題の解決に役立つように、モデルの改良を加えていきたい。

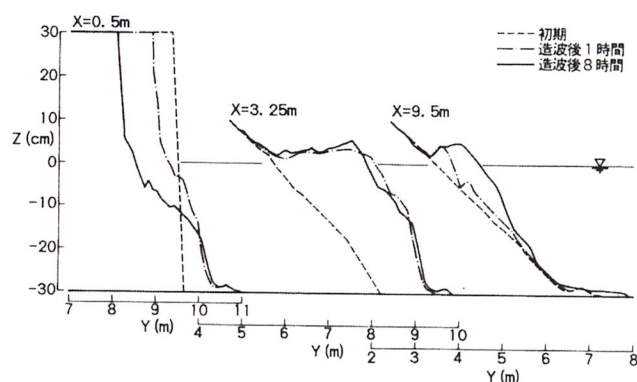


図-11 代表測線に沿う縦断形変化³⁾

参考文献

- 1) 堀川清司, 砂村継夫: 航空写真による海蝕崖の後退に関する研究, 海岸工学論文集, 第14巻, pp. 315-324, 1967.
- 2) 堀川清司, 砂村継夫: 海蝕崖の侵蝕に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第15巻, pp. 149-157, 1968.
- 3) 宇多高明, 山本幸次: 海食崖と砂浜の境界部付近における海浜変形に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第40巻, pp. 396-400, 1993.
- 4) 芹沢真澄, 宇多高明, 三波俊郎, 古池 鋼, 熊田貴之: 海浜縦断形の安定化機構を組み込んだ等深線変化モデル, 海岸工学論文集, 第49巻, pp. 496-500, 2002.
- 5) 宇多高明, 住谷勉夫, 矢澤 肇, 大谷靖郎, 厚坂祐次: 展開座標を用いた汀線変化モデルによる親沢鼻砂嘴の地形変化予測, 海岸工学論文集, 第45巻, pp. 541-545, 1988.
- 6) 宇多高明, 河野茂樹: 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, 1996.