

沿岸漂砂量の岸沖分布を考慮した海岸線変化モデルの構築と 阿字ヶ浦海岸への適用

南 陽介*・横木裕宗**・三村信男***

阿字ヶ浦海岸で生じている海浜変形を再現し, 効果的な侵食対策工に資するため, 本研究では沿岸漂砂量の岸沖分布を考慮した海岸線変化モデルを構築し, 汀線付近の詳細な地形変化の再現を試みた. その結果, 前浜の急勾配化に伴う断面地形変化の傾向を捉えることに成功した. また, 侵食対策工を想定して計算した結果, 離岸堤背後で地形変化が抑制され, 海浜地形が安定するという結果が得られた. さらに, 養浜砂が汀線付近に留まることを計算で確認できたことから, 今後も定期的な養浜を継続していくことで砂浜を保持できる可能性が示唆された.

1. はじめに

茨城県ひたちなか市に位置する阿字ヶ浦海岸では常陸那珂港の建設とともに砂の移動傾向が変化し, 近年, 砂が海岸北部へと一方的に運ばれるようになっている. その結果, 海岸南部で侵食が進み, 2002年には砂浜の消失によって階段護岸の一部が陥没するという事態に至った. これを受けて2003年には離岸堤や養浜を中心とした侵食対策が実施された.

阿字ヶ浦海岸では, 1-line モデルが長期的な海浜変形現象を表せることが示されている (宇多ら, 1991). また, 佐藤ら (1999) の解析によって, 常陸那珂港建設後の主たる地形変化が沖防波堤の据え付け開始後から顕著になり始めたことが確認されている. 1-line モデルを用いた将来計画形状に対する汀線変化計算では, 砂が北へと移動して南部が侵食するという結果も得られている. 近年の地形変化については, 横木ら (2003) が地形測量データおよび外力データを解析し, 汀線付近の急激な侵食が, 前浜の急勾配化に伴う碎波形式の変化と, 南よりの高波浪との相乗効果によるものであるとしている.

以上のように, 阿字ヶ浦海岸では, データ解析による特性の把握や海岸線変化モデルによる汀線変化計算などが行われてきている. しかし, 碎波点における沿岸漂砂量を用いた1-line モデルでは, 近年生じている勾配の変化を伴うような侵食過程を再現することはできない. 今後も養浜などの対策を効果的に進めていくためには, 広範囲にわたる汀線付近の詳細な地形変化計算が必須となる.

そこで本研究は, 沿岸漂砂量の岸沖分布を考慮した海岸線変化モデルを構築し, 阿字ヶ浦海岸の汀線変化および前浜勾配の変化を含む海浜変形計算を精度よく行う

ことを目的とした. さらに, モデルに侵食対策工を組み込んで計算し, 現状の対策効果や養浜砂の動向についても検討した.

2. 沿岸漂砂量の岸沖分布モデル

常陸那珂港の建設開始後より, 阿字ヶ浦海岸では卓越した北向きの沿岸漂砂による地形変化が生じてきている. 侵食域においては水深 3 m 付近の砂が沿岸方向に流されて勾配が急になり, その後, 汀線付近の急激な侵食に至った. 本研究では, この様な侵食過程に着目して沿岸漂砂量の岸沖分布を設定し, 海岸線変化モデルに組み込むことにした.

本モデルでは, 碎波によって放出される大量のエネルギーが底質移動の原動力になっているとして, 図-1 にしめすような分布を設定した. 碎波点を中心とした底質の移動は, 漂砂帯縁端から遡上点の間で生じると仮定し, この範囲内で分布を持たせることとした. ここで, 遡上高 (h_R) および漂砂帯縁端水深 (D_{SH}) は, 波浪・地形条件を用いて次式で定義した.

$$h_R = 1.86 \xi_0^{0.71} H_0, \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\xi_0 = \frac{\tan \beta}{\sqrt{H_0/L_0}} \quad \dots\dots\dots (2)$$

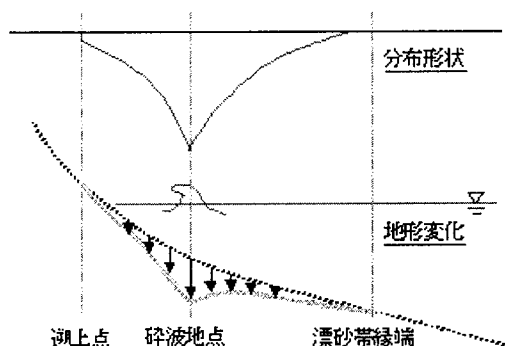


図-1 沿岸漂砂量の岸沖分布概念図

* 正会員 修(工) (株)復建技術コンサルタント

** 正会員 博(工) 茨城大学助教授 広域水圏環境科学教育研究センター

*** 正会員 工博 茨城大学教授 広域水圏環境科学教育研究センター

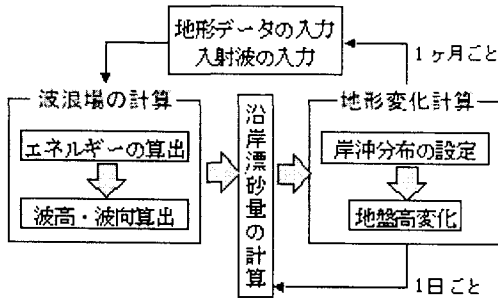


図-2 数値計算の手順

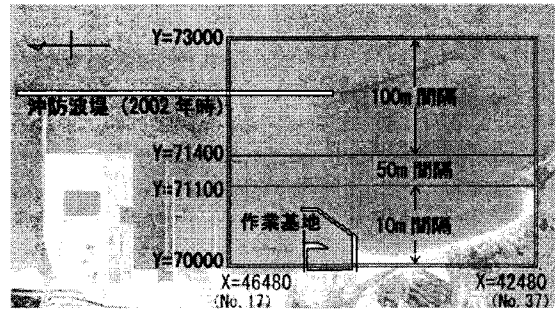


図-3 計算対象範囲と岸沖方向格子間隔

$$D_{SH} = \frac{2.9H_0}{\sqrt{\rho_s/\rho - 1}} - \frac{110H_0^3}{(\rho_s/\rho - 1)gT^3} \quad (3)$$

ここで、 H_0 は沖波波高（有義波高）、 H_0/L_0 は沖波波形勾配、 T は周期、 ρ_s 、 ρ はそれぞれ砂および海水の密度、 g は重力加速度である。また ξ_0 は Surf-similarity parameter、 $\tan \beta$ は海底勾配で、ここでは碎波点から汀線までの平均勾配とした。

沿岸漂砂量分布は、波浪変形計算より求めた碎波地点におけるエネルギーを基準とし、Deanの平衡海浜地形の考え方を参考に、碎波点より沖側では碎波点からの距離の2乗に反比例し、岸側では水深の2乗に比例するものとした。この分布形では、地形変化の最も激しい地点が波浪や地形条件によって変化するので、波浪に変化がなくても侵食が沖の方から徐々に進行していく過程を再現することができる。

3. 数値計算方法

本研究では、沖防波堤の遮蔽域における回折効果も含めて、阿字ヶ浦海岸全体の波浪場を計算するため、間瀬ら（1999）が提案したエネルギー平衡方程式モデルを採用した。また、波浪計算および地形変化計算を交互に行なうことにより、地形変化に伴う波浪場の変化を表現できるようにした。計算の時間間隔は図-2に示すように、比較的時間のかかる波浪場の計算間隔を地形変化計算よりも長めに設定した。

(1) 計算対象範囲

計算領域は、現在建設中の常陸那珂港沖防波堤の影響を反映させるため、図-3に示す岸沖方向 $Y=70000 \sim 73000$ 、沿岸方向は測線番号 No.17～No.37 ($X=46480 \sim 42480$) とした。ここで X 、 Y は公共座標第 IX 系の座標値である。また、作業基地および磯崎漁港を越えて砂が流出入することは無いとし、地形変化計算を作業基地以南の No.25+100 から No.36 に限定した。

計算格子間隔は、地形変化の生じる浅海域で沿岸方向 50 m、岸沖方向 10 m と細かくした。その他は、沿岸方

向 100 m、岸沖方向は変化の少ない沖の方で 100 m、水深 10 m 付近の $Y=71100 \sim 71400$ で 50 m とした。地形測量は、沿岸方向 100 m、岸沖方向 20 m 間隔で実施されているため、足りない部分については線形補間によりデータを作成した。以上のようにして設定した全ての格子点上に水深および地盤高を入力して計算を行なっている。従来の海岸線変化モデルのように等深線位置の前進・後退ではなく、格子点上の地盤を上下させることで地形変化を表現しているため、格子間隔を適切にとることで、より詳細な地形変化を計算で示すことができる。

(2) 入射波、碎波などの計算条件

入射波には、NOWPHAS で得られた有義波高、有義波周期、代表波向を用いて算出した方向スペクトルを用いた。周波数方向は、等エネルギー分割で 15 成分とし、波向方向には 35 成分とした。

碎波は、波高が水深の 0.78 倍より大きくなった場合に生じることとした。この碎波波高および碎波地点は合田（1970）の提案した碎波指標で計算した値の範囲内に入っていた。また、一度碎波した後も上記の条件を満たした場合には再び碎波するとして波浪エネルギーを減衰させた。背後に遮蔽域を形成する東防波堤や磯崎漁港防波堤、離岸堤などは、該当セルのエネルギーを 0 とすることで影響を組み込んだ。東防波堤建設に伴う延伸も、計算中で考慮した。

地形の凹凸が激しいと波浪変形計算が不安定になり、発散してしまうことがあった。そこで、地形変化の活発な水深 5 m から地盤高 1.5 m までの地形を年 1 回平滑化した。平滑化は、周辺セルを含めて重み付け平均をとることで行なった。

(3) 沿岸漂砂量および地形変化の計算

沿岸漂砂量 Q の算定には、式（3）で表される小笹・Brampton 式を用いた。

$$Q = \frac{(EC_0)_b}{(\rho_s - \rho)g(1 - \lambda)} \left(K_1 \sin \alpha_{bs} \cos \alpha_{bs} \right)$$

$$-K_2 \cot \beta \cos \alpha_{bs} \frac{\partial H_b}{\partial y} \dots \dots \dots (4)$$

ここで、 $(EC_\theta)_b$ は砕波点における波浪エネルギーフラックス、 λ は空隙率、 α_{bs} は砕波点における汀線と波向のなす角度、 $\cot \beta$ は海底勾配の逆数、 H_b は砕波波高である。漂砂量係数は再現性の高かった $K_1=0.18$ 、 $K_2=0.10$ を採用した。値が小さいのは、地形変化が移動限界水深ではなく漂砂帯縁端水深との間で生じるとした結果、1-line モデルに適用する場合よりも範囲が狭くなったためである。

地形変化計算には、沿岸漂砂量より求めた測線上の地形変化量（断面積変化量）を用いた。岸沖分布を設定する手順としては、まず分布形状を決定し、分布形の面積と断面積変化量との比を求めた。そして、その割合を分布形状に掛け合わせることで各セルの地形変化量を算出した。地形変化は、この値を現在の地盤高に加えることで生じさせた。

4. 過去の侵食過程の再現計算

阿字ヶ浦では、1997年以降南部で侵食、北部で堆積が生じており、その傾向は1997年以降顕著になっている（横木ら、2003）。これを踏まえ、計算期間は比較的海浜の安定していた1994年から最も侵食の激しかった2002年までとした。入力地形には1994年に実施された2回分の測量データを平均し、さらに局所的な地形の凹凸を除去した値を使用した。波浪データは阿字ヶ浦沖で観測されているNOWPHASのデータから算出した月平均値を入力した。また、常陸那珂港で観測されている1999年から2002年の潮位データを用いて月ごとの平均潮位を求め、4年間の平均潮位との差をとって水深に加えた。以上の様に、月ごとの波浪・潮位データを入力することで計算中に外力の季節変化を取り入れている。また、計算開始時の1994年には、計算範囲のすぐ外側まで沖防波堤が設置されているため、防波堤より陸地側では北端からのエネルギー流入は無いものとして計算した。

（1）波浪場の変化

沖防波堤の遮蔽域の影響を計算できているか確かめるため、波高分布図を作成したところ、防波堤が計算領域の外側までしか設置されていない状態でも海岸北部で波高が減衰していることを確認した。また、防波堤が作業基地の沖合まで延びてきた2002年には、南寄りの入射波であるにも関わらず、波高の低い領域が海岸全域に拡大していることが判明した。

（2）砂の移動

図-4は、沿岸漂砂量の沿岸方向分布を描いたものである。沿岸漂砂量が正の値は南向きの移動、負の場合は北向きの移動を表している。図より、1997年においては

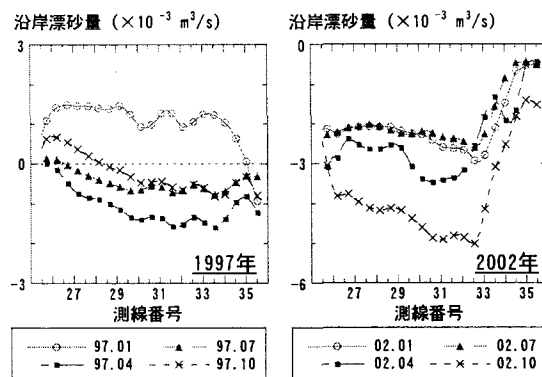


図-4 沿岸漂砂量の平面分布

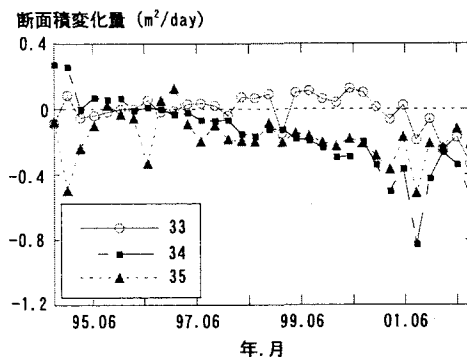


図-5 海岸南部における断面積変化量の経時変化

北よりの波の多い1月に南向きの漂砂が卓越しており、砂移動の季節変化が表れている。これが2002年になると、年間を通して常に北側へと砂が流れるようになっている。

図-5は、海岸南部における1日あたりの断面積変化量の経時変化を示したもので、ここでは3ヶ月分の移動平均値をプロットしている。

南部では磯崎漁港に近いほど侵食の始まる時期が早くなっており、1997年頃までは比較的稳定した状態が続いている。しかし、2000年頃よりNo.33でも侵食が始まり、侵食域が海岸南部全域に拡大したことが計算で確認できた。

（3）縦断面地形の変化

構築した岸沖分布モデルでは、砕波点を中心に地形変化が生じるため、堆積傾向が続くと海水面付近にテーブル状の地形を形成し、海面より高い位置の地形がほとんど変化しないことが分かった。同時期の深浅測量データを解析した結果、堆積域における断面地形変化は、宇多ら（1991）が示しているように、1-line モデルを用いた方が良好な計算結果が得られた。そこで、該当する測線で堆積が生じる場合には1-line モデル、侵食する場合には構築した岸沖分布モデルを適用して地形変化計算を行

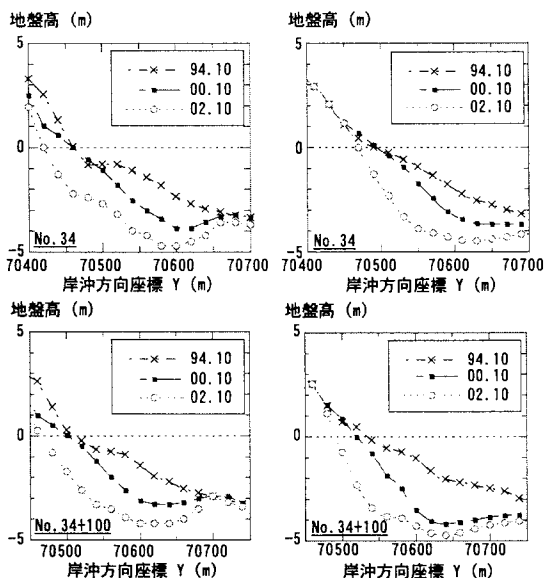


図-6 汀線付近の縦断面地形変化
(左:実際の地形, 右:計算地形)

なった。

図-6は、横軸にY座標、縦軸に地盤高をとった汀線付近の縦断面図である。左側は深浅測量データより描いた縦断面図、右側は計算結果である。

計算開始から6年後の2000年までに、水深5mより浅い領域で侵食が進んでいる。このとき汀線位置がほとんど変化していないという状態も計算で再現できた。その後、汀線付近を中心に大量の砂が消失し、汀線の後退が生じていることから、阿字ヶ浦海岸で生じた侵食過程を再現することが出来たと言える。しかし、汀線の後退量が実際より少ないという課題は残った。

5. 侵食対策工による地形変化の検討

2003年夏、約6万 m^3 の養浜と2基の離岸堤設置、3基の砂止堤設置といった侵食対策が海岸の南部で実施された。この対策前後の深浅測量データを解析したところ、実施後の海浜が安定したことが分かった。そこで、今後も小規模の養浜を定期的に実施していくことで砂浜が維持されるか検討するため、離岸堤と養浜を組み込んで計算した。計算期間は再現計算の終了時である2002年10月から2005年10月までの3年間とした。その間の入射波浪データは2000年から2002年の月平均値を、潮位データは再現計算と同じものを用いた。離岸堤は、施工の完了した6月に計算上に設置した。養浜は、海水浴シーズン前に大量の砂を投入していることから、計算では毎年7月に実施することとした。実施範囲は、侵食が進む海岸南部のNo.33~No.36とした。養浜の断面形状は、Rector

表-1 養浜実施量 (単位: 千 m^3)

年度	No.33~34	No.34~35	No.35~36	合計
2003	4.32	7.06	6.53	17.9
2004	5.39	3.16	4.74	13.3
2005	9.81	3.74	7.55	21.1

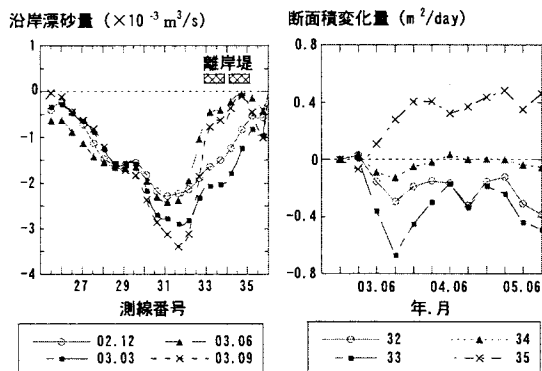


図-7 沿岸漂砂量の平面分布と断面積変化量の遷移

や砂村の推定式を使用して決定した。この推定式には阿字ヶ浦に入射する平均的な波浪(波高1.2m, 周期8秒)を代入した。こうして求めた値と阿字ヶ浦における養浜事業の状況を考慮し、地盤高2m位置を起点として浅瀬まで勾配0.05となるように地盤高を上昇させることで養浜を表現することとした。表-1に、計算で実施した養浜量を示す。

(1) 離岸堤による土砂移動傾向の変化

離岸堤の効果を明らかにするため、図-7に底質移動の推移を示した。左図は、離岸堤設置前後の沿岸漂砂量の平面分布を示したもので、右図は1日あたりの断面積変化量の移動平均(3ヶ月)をプロットしたもので、計算開始直後の断面積変化量を基準としている。

離岸堤が設置された6月以降、その背後で北向きの漂砂量が減少している。そのため、離岸堤背後でも北側の測線で土砂の流出量が増えている。開口部のNo.34は、ほとんど変化しておらず、南側の離岸堤の背後では砂の流出が食い止められる傾向が見られた。南離岸堤は北向きの沿岸漂砂が弱まったことにより安定し、北側は海岸北部へ供給する砂の負担が増加して侵食が激化していることが計算結果より読みとれた。

(2) 汀線位置の変化

海岸南部における汀線位置の時間変化を図-8に示す。縦軸に2002年10月の汀線位置を基準とした汀線変化量、横軸に時間をとっている。

離岸堤北側のNo.32, No.33は、離岸堤設置前まで安定していたが、その後、後退が続いている。土砂移動傾向の変化と同様、汀線位置についても離岸堤の遮蔽効果

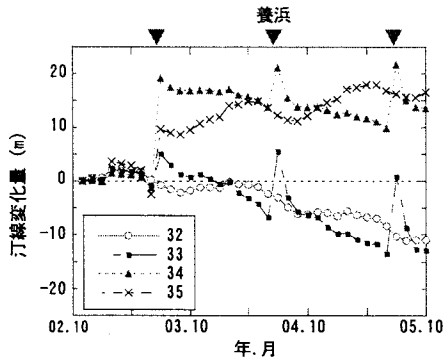


図-8 侵食対策による汀線位置の変化

が示された。No.34では2003年の養浜時に約20 mの前進が見られ、その後も後退傾向にはあるものの定期的な養浜によって安定している。南離岸堤背後のNo.35は、2003年の養浜によって大きく前進し、その後は養浜以上に離岸堤の効果によって汀線が少しずつ前進している。

(3) 養浜の効果

養浜の効果をより細かく把握するため、図-9のような縦断面地形図を描いた。左図は養浜直前・直後および1年後の養浜直前の断面地形、右図は養浜を実施した場合としなかった場合の2004年6月における断面地形の違いを示している。

養浜直前・直後の地形を比較すると、養浜することによって地盤高2 mから水深2 m付近までの地形が回復していることがわかる。また、養浜後1年経過しても汀線付近の砂は保持されていることがわかった。さらに養浜の有無による違いを調べてみたところ、汀線付近で養浜の効果が見られているが、水深2 m以深では実施の有無による有意な差は見られなかった。このことは、養浜後も汀線付近に養浜砂が留まり、沖へと流出することはないことを示している。したがって、定期的な養浜によって汀線付近の地形を安定させることが可能であると考えられる。

6. 結 論

本研究は、特に汀線付近での縦断面地形変化を精度よく再現できるよう、沿岸漂砂量の岸沖分布を考慮した汀線変化モデルを構築し、阿字ヶ浦海岸に適用した。研究成果を以下に示す。

1. 構築したモデルで阿字ヶ浦海岸南部の急勾配化を伴

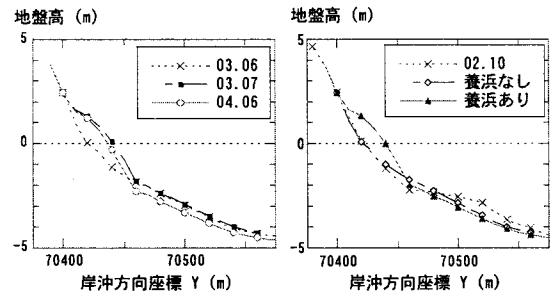


図-9 養浜による断面地形の変化

う断面変化の傾向を捉えることに成功した。

2. 侵食対策を組み込んで計算した結果、離岸堤背後で土砂の流出を食い止める効果が見られた。
3. 養浜によって汀線位置は10~20 m前進したまま安定し、さらに汀線付近の砂は養浜後の1年間保持されることが確認できた。

以上の結果より、今後も定期的に養浜を実施していくことで砂浜を保持できること、また、離岸堤の北側で侵食が激しくなることから、その地点に投入する養浜砂の量を増やしていく必要があることが分かった。

謝辞：本研究を遂行するにあたり、茨城県常陸那珂港湾事務所から深浅測量、汀線測量データなどを提供頂いた。ここに記して謝意を表する。

参 考 文 献

- 宇多高明・伊藤弘之・斉藤友伸(1991)：波高・周期・波向の時系列変動に対する汀線の線形応答解析，海岸工学論文集，第38巻，pp. 381-385。
- 佐藤孝夫・八木橋貢・黒木敬司・片野昭良・栗山善昭(1999)：沖合大規模構造物による海浜変形，海岸工学論文集，第46巻，pp. 621-625。
- 高山知司・池田直太・平石哲也(1991)：砕波および反射を考慮した波浪変形計算，港湾技術研究所報告，第30巻第1号，pp. 21-67。
- 間瀬 肇・高山知司・国富将嗣・三島豊秋(1999)：波の回折を考慮した多方向不規則波の変形計算モデルに関する研究，土木学会論文集，No.628/II-48，pp. 177-187。
- 丸山康樹・平口博丸・鹿島遼一(1987)：不規則波に対する屈折計算法の適用性，電力中央研究所報告，研究報告：383034，47p。
- 横木裕宗・南 陽介・信岡尚道(2003)：阿字ヶ浦海岸における最近の急激な海岸侵食の実態解明，海岸工学論文集，第50巻，pp. 526-530。