

南九十九里浜における侵食対策としての養浜の効果検討

Evaluation of Effect of Beach Nourishment as a Measure against Beach Erosion on South Kujukuri Beach

宇多高明¹・古池 鋼²・星上幸良³・長山英樹⁴

Takaaki UDA, Kou FURUIKE, Yuki Yoshi HOSHIGAMI and Hideki NAGAYAMA

The effect of the offshore nourishment using sand with several grain sizes was investigated on south Kujukuri Beach. Beach profiles were first measured along four survey lines of the coast as well as the sampling of sea bottom materials. Based on these field data, beach changes were predicted using the contour-line-change model which considers the sorting effect owing to different grain size. It is concluded that the most appropriate method to recover the foreshore and to prevent further beach erosion is to carry out the beach nourishment using sand with mixed grain sizes at a rate of $2 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{yr}$.

1. まえがき

延長約60kmと長大な海岸線を有する九十九里浜は、わが国を代表する砂浜海浜の一つであるが、近年侵食が急速に進んできている(宇多, 1997; 宇多ら, 2000)。主な侵食原因は、北東端から東に約10kmの長さを持つ屏風ヶ浦の海蝕崖と、南端の太東崎の海蝕崖を含むそれ以南の海岸からの漂砂供給が大きく減少したこと、同時に屏風ヶ浦にあってはその西端にある飯岡漁港により、また南部にあっては太東漁港の防波堤によって沿岸漂砂が阻止されたこと、さらには九十九里浜南部で進む地盤沈下(宇多ら, 2008)などが挙げられる。したがって侵食は漂砂バランスの崩れた九十九里浜北部と南部で著しい。これらのうち南九十九里浜では、ヘッドランド10基を初めとして侵食対策が行われてきているが、対策が侵食に追いつかず、浜崖侵食が急速に広がっている。こうした状況のもと、南九十九里浜では北向きに流出した砂のうち片貝漁港の波の遮蔽域へ堆積した細砂を南部海岸へ戻す手法(サンドリサイクル)の検討が進められている。しかしながら、細砂養浜では投入後細砂が急速に拡散し、汀線より陸域での保全効果が発揮されない可能性が高く、したがって海岸保全としての事業継続が危ぶまれる可能性もある。これに答えるには、細砂によるサンドリサイクルを前提としつつも、様々な粒径を用いた養浜の効果を明確にしなければならない。このことから、本研究では、熊田ら(2003)の粒径を考慮した等深線変化モデルを用いた予測計算を行うものである。本研究では、南九十九里浜の一部区域を対象とした養浜検討であるために、南九十九里浜全域を対象としてまず芹沢らの

等深線変化モデルを適用して当該地点の沿岸漂砂量を算出し、それを条件として狭域において粒径を考慮したモデルを用いて地形変化を予測するという2段階の計算を行った。ここでは狭域の計算結果について述べる。

2. 海浜縦断形と底質粒径の実測

2007年6月13日～18日、図-1に示すように九十九里浜のほぼ中央に位置する片貝漁港から南端の太東漁港まで約23.5km区間に4測線を設けて縦断測量と底質採取を行い、海浜縦断形、中央粒径・粒径含有率の水深方向分布を測定した。測線は、調査区間をほぼ均等に区分した $X=2.6, 8.1, 14.5, 19.4\text{km}$ に配置し、陸上部の標高5mから水深15mまではほぼ1m間隔で底質サンプリングを行った。ここに、沿岸距離 X は片貝漁港に原点を取っている。

図-2は、九十九里浜における波による地形変化の限界水深 $h_c=9\text{m}$ (宇多ら, 2000)より沖の縦断形がほぼ重なるようにして縦断形を岸沖方向にずらして重ね合わせた結果である。これによれば、侵食の著しく進んだ $X=19.4\text{km}$ では汀線から水深約7mまで1/40勾配で落ち込む断面形であるが、水深7m以深では海底勾配が1/300と非常に緩やかとなる。これと対照的なのが片貝漁港南側の堆積域に位置する $X=2.6\text{km}$ 断面であり、汀線から水深5mまでは1/100、水深5mより沖は1/200の緩やかな勾配と

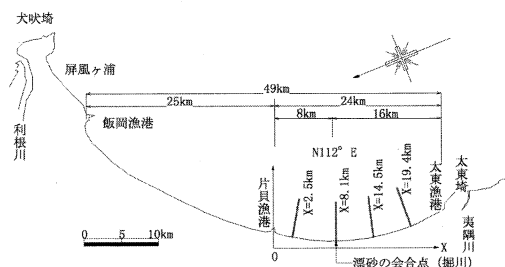


図-1 南九十九里浜と測線配置

1 正会員 工博

(財)土木研究センター理事なぎさ総合
研究室長兼日本大学客員教授理工学部
海洋建築工学科

2

海岸研究室(有)

3 正会員 博(工)

国際航業(株)

4

(財)土木研究センター

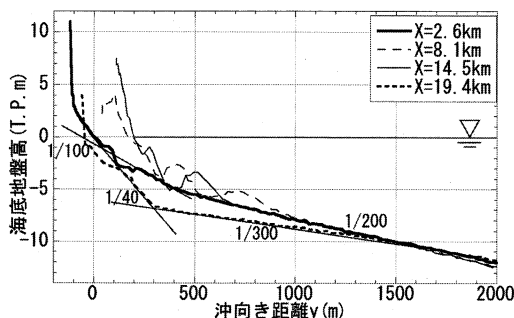


図-2 X=2.6, 8.1, 14.5, 19.4km測線における海浜縦断形

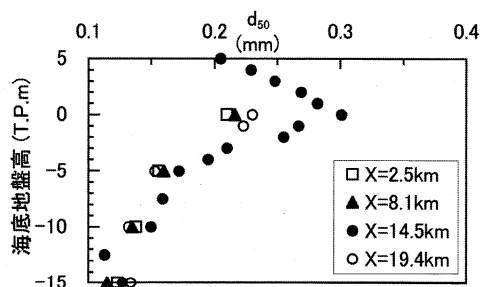


図-3 底質中央粒径の水深方向分布

なっている。X=19.4kmと2.6kmの間の縦断形は一樣ではなく、2段のバートラフを有することで特徴付けられる。

図-3は d_{50} の水深方向分布である。 d_{50} は汀線で0.3mmの最大値を示し、陸側および水深方向に減少し、とくに水深5m以下では0.15mm以下の細粒となる。さらにX=14.5km測線のデータから、中砂(0.25~0.85mm)、細砂(0.075~0.25mm)、シルト・粘土(0.075mm以下)の粒径含有率の水深方向の変化をまとめたのが図-4である。中砂の含有率は汀線で最大値74%を取り、陸側では標高の増加とともに減少し、標高5mでは32%となる。同様に水深方向にも減少し、水深5mで11%となり、それ以深では中砂の含有率はほとんど0となる。一方、細砂は汀線では25%と最小値を取り、陸側にも海側にも増大し、水深7.5m以下では含有率が82%以上まで増加する。さらにシルト・粘土は中砂の分布と対照的に、水深が小さい場所では含まれておらず、水深7.5m以上となってようやく含有率が大きくなる。この海岸における h_c はほぼ9mにあることを考慮すると、海浜構成材料は中砂と細砂のみで構成されているといえる。

3. 粒径を考慮した等深線変化モデルによる計算

(1) 計算条件

混合粒径砂の分級を考慮した等深線変化モデル(熊田ら,2003)を用い、まず1990年当時の構造物未設置の条件下において、広域を対象とした等深線変化モデルによ

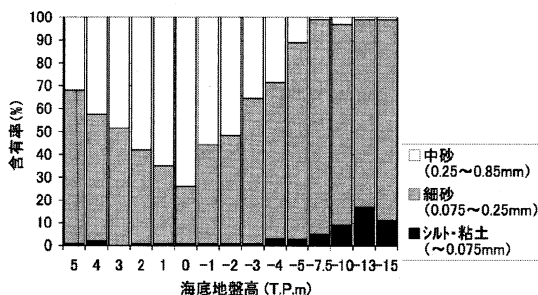


図-4 粒径含有率の水深方向の変化 (X=14.5km 測線)

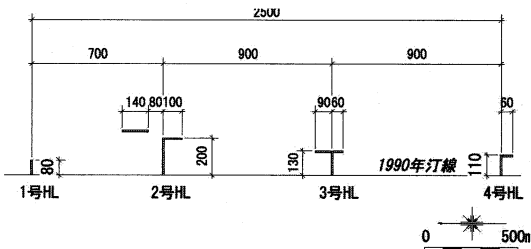


図-5 構造物の配置

る計算結果をもとに、南端境界から10万 m^3/yr の沿岸漂砂が流入し、この沿岸漂砂が北端境界からそのまま流出する動的平衡状態を再現した。計算対象は一宮海岸の1~4号ヘッドランド(HL)間の2.5km区間である。入射波条件には、片貝漁港沖での波浪観測結果より年間のエネルギー平均波を求め、沖波波高1.25m、周期7.8sとした。波向は図-1に示すように堀川付近の海岸線に直交する波向ESEとした。この入射波条件ではX=20km地点付近の等深線への入射角は 20.5° 、砕波角は 5° となる。不規則波計算における方向集中度係数 S_{max} は10とし、離岸堤の透過率 K_t は0.4、HLのヘッド部の K_t は0.2とし、波の回折効果は酒井ら(2003)の方向分散法を用いて求めた。地形変化の生じる範囲はバーム高3mから $h_c=9\text{m}$ までとする。粒径は3成分(0.15, 0.25, 1.0mm)の組み合わせとし、平衡勾配はそれぞれ1/100, 1/40, 1/20と仮定する。また交換層厚、各粒径の含有率などは表-1に示す。

(2) 再現計算と無対策の場合の計算結果

再現された動的平衡海浜では全ての等深線は平行となり、各地点で10万 m^3/yr の沿岸漂砂が通過している。この海岸において右端からの沿岸漂砂流入を0とするとともに、図-5のように4基のHLと、2号HLの北側に堤長140mの離岸堤を設置し、それによる地形応答を求めた。なお、2,3号HLのうち、2号の南半分と3号の北半分はほぼ完成形である。2007年までの予測結果のうち、等深線形状を示すのが図-6である。また対応する実測値として図-7には1983, 2005年の深浅図を示す。HL間で湾入し

表-1 計算条件

計算対象区域	1~4号HL：延長2.5km
計算ケース	1) 再現1：HL建設前（1990年） 2) 再現2：1990年（HL設置後） → 2007年（現在） 3) 放置 4) 養浜対策1（細粒材2万m ³ /yr） 5) 養浜対策2（中粒材2万m ³ /yr） 6) 養浜対策3（粗粒材2万m ³ /yr） 7) 養浜対策4（細粒材0.8+細粒材0.6万+ 細粒材0.6万m ³ /yr）
座標系	展開座標
初期地形	再現：直線平行等深線 将来：再現結果
入射波条件	沖波波高 $H=1.25\text{m}$ ，周期 $T=7.8\text{s}$ （エネルギー平均波） 波向：堀川付近の海岸線に直交する波向ESE $X=1.8\sim 2.2\text{km}$ 付近の等深線への波の入射角 $\theta_0=20.5^\circ$ $\alpha_0=5^\circ$ ， $S_{\max}=10$ 離岸堤 $K_F=0.4$ ，ヘッド部 $K_F=0.2$ 波高の低減率の最小しきい値：0.3 波の抽出回数：1step 毎
潮位条件	$\text{M.S.L.}=\text{T.P.}\pm 0.0\text{m}$
計算等深線	$z=+3\text{m}\sim -9\text{m}$ $h_c=9\text{m}\sim \text{バーム高}$ $h_R=3\text{m}$ ，
計算メッシュ	沿岸方向 $\Delta X=100\text{m}$ ，鉛直方向 $\Delta Z=1\text{m}$
計算時間間隔	$\Delta t=30\text{hr}$
計算ステップ数	292 ステップ/yr
粒径	粒径数（3成分）と平衡勾配 粒径1： $d_{50}=0.15\text{mm}$ ， $\tan\beta=1/100$ 粒径2： $d_{50}=0.25\text{mm}$ ， $\tan\beta=1/40$ 粒径3： $d_{50}=1.0\text{mm}$ ， $\tan\beta=1/20$ 交換層厚：底面長単位幅あたり 勾配1/100：0.5m，勾配1/40：1.25m， 勾配1/20：2.5m 含有率： 交換層A 粒径1： $\mu_1=0.7$ ，粒径2： $\mu_2=0.3$ ， 粒径3： $\mu_3=0.0$ 交換層B 粒径1： $\mu_1=0.7$ ，粒径2： $\mu_2=0.3$ ， 粒径3： $\mu_3=0.0$
漂砂量	沿岸漂砂量係数 粒径1： $K_x=0.0258$ ，粒径2： $K_x=0.0153$ ， 粒径3： $K_x=0.0071$ ※ $K_x=A/\sqrt{d_{50}}$ 係数 $A=0.010$ 小笹 Brampton 係数： $K_2=1.62K_x(\tan\beta=1/30)$ 岸沖漂砂量係数： $K_x=0.20K_x$ 重力係数：0.2 安息勾配（土砂落ち込みの限界勾配）： 陸上1/2，水中1/3
境界条件	再現計算（1990年） 両端部の汀線固定：全漂砂量が推定値と一致する係数 A を同定 再現計算（2007年） 右端 $q_x=0$ （土砂供給なし） 左端 漂砂量通過境界
地盤沈下量	2cm/yr

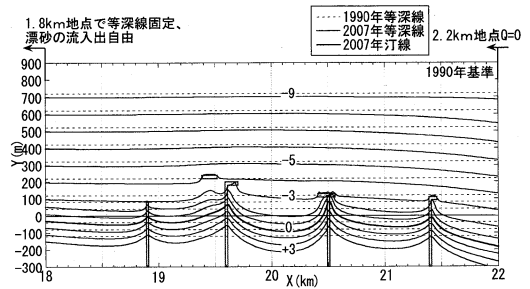


図-6 2007年までの予測等深線

た等深線形状や、2,3号HL間での等深線の湾入度が他の場所より大きいことなど、計算は実測値をほぼ再現している。

図-8は、1990～2007年の計算地形変化量と1983～2005年の実測地形変化量を比較したものである。比較期間が少しずれているが、汀線に沿って帯状に著しい侵食区域が広がること、堆積はHL周辺に留まることなど、地形変化から見てほぼ特性が再現されている。

次に、現況のまま10年間放置した2017年の予測結果と現況との差として求めた地形変化量を図-9に示す。時間経過とともに侵食域は左側へと広がっていく。放置の場合、右端からの沿岸漂砂供給が枯渇するため右端部に近い場所ほど侵食が著しい。HLはあってもその先端沖を通過して沿岸漂砂が流出するため侵食が続く。

(3) 養浜効果の検討

侵食対策として沖合の矩形領域（水深4～6m， $X=20\sim 22\text{km}$ 区間）において2万m³/yrの養浜を想定する。粒径を変えて4ケースの計算を行うものとし、細粒，中粒，粗粒および混合砂を用いた養浜を検討対象とし、いずれの場合も現況から10年後で評価を行う。計算結果の一例として、主に沖合の海底面を覆う細砂を投入した場合の等深線の計算結果を図-10に示す。細砂では投入点を中心として沖合の等深線が突出することが分かる。

各ケースについて初期からの地形変化量を算出し、それらの比較を行ったのが図-11である。細砂養浜では養浜砂は沖合ではほぼ同心円状に広がる（図-11(a)）。砂の広がりがあるため北向きの沿岸漂砂が低減し、養浜区域南側での侵食が幾分軽減される。しかし汀線近傍での砂の堆積は期待できない。中粒材を投入すると粒径が大きくなり平衡勾配が増大する結果、投入砂は岸向きに移動し、2号HLの上手側に多く堆積してHL間の海底地盤高の上昇に繋がる（図-11(b)）。この場合でも放置の場合と比較すれば上手側区域での侵食をある程度まで軽減する効果がある。粗粒材を投入した場合粗粒材は直ちに岸側へと運ばれ、汀線付近に集中的に堆積する（図-11(c)）。汀線近傍での海底地盤の上昇には効果があるものの上手側海浜の安定化効果は低い。混合材養浜ではこれらの中

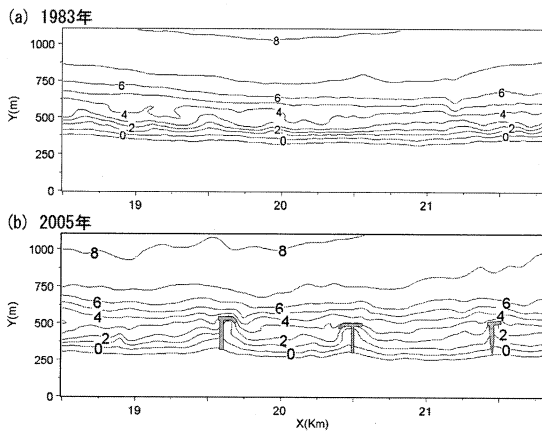


図-7 1983, 2005 年の深浅図

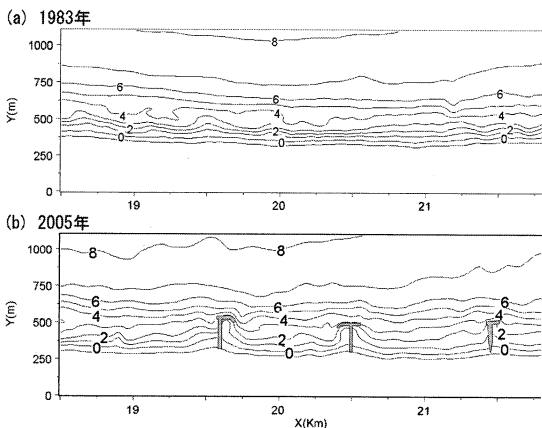


図-8 1990~2007 年の計算地形変化量と1983~2005 年の実測地形変化量の比較

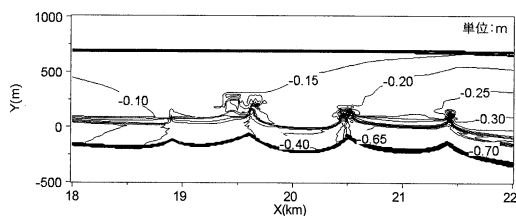


図-9 現況のまま10年間放置した場合の予測結果と現況との地形変化量の差

間的な結果となる (図-11(d)).

4. 養浜効果の評価

検査領域内の土砂量変化から養浜効果について検討した。まず図-12に示すように、沿岸方向には $X=19.7 \sim 20.4$ kmの区域を対象とし、2, 3号HLの先端を結ぶ直線を境界線としてそれより岸側・沖側の矩形領域を切り出し、これらの領域内における2007年から10年間の土砂量

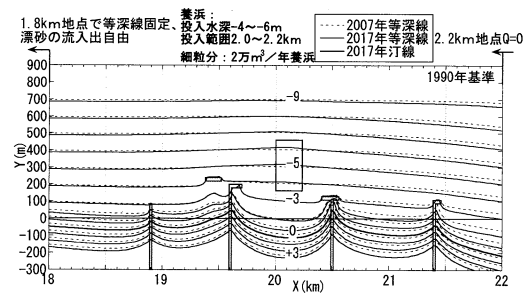


図-10 細砂を投入した場合の等深線の計算結果

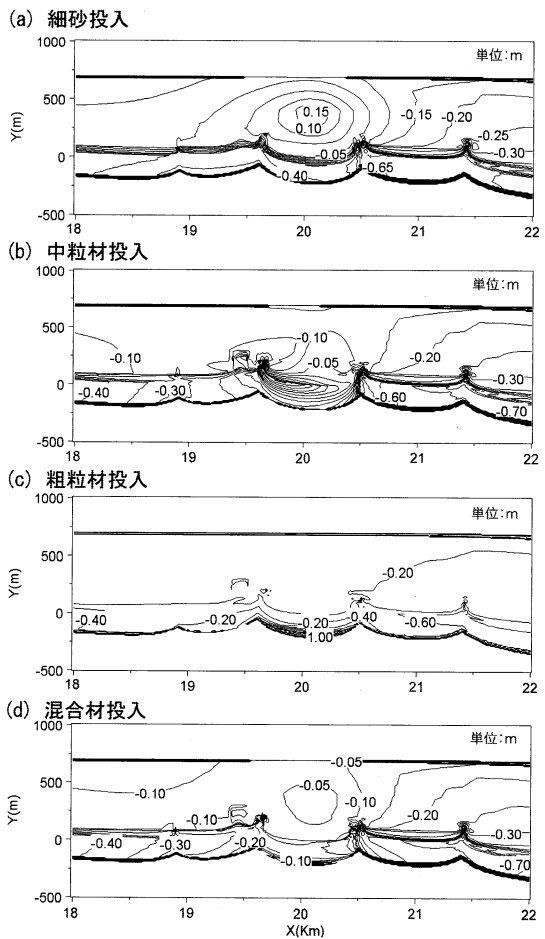


図-11 各ケースの初期からの地形変化量

変化を算出した。その上で放置の場合との差を改善量とし、さらに放置の場合の土砂変化量に対する比 (改善率) を求めた。改善量を図-13(a)に示す。全域での改善量は、中粒材を用いた場合が最大となる。しかしその大半は岸側領域での土砂量増加に起因する。一方、細粒材の場合には主として沖側領域での土砂量の増加が全域での改善量の増加に寄与している。これに対し粗粒材の場合には

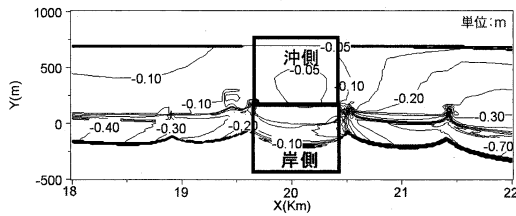


図-12 土砂量変化算定のための岸側沖側の領域設定

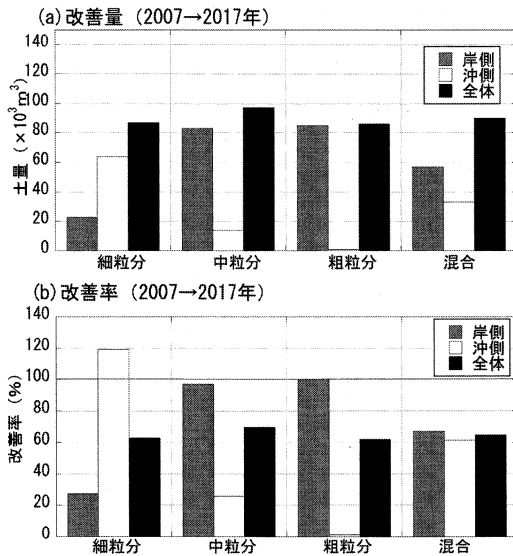


図-13 沖合養浜時における土砂量増加の改善量と改善率

沖側領域での改善量はほぼ0で、放置の場合と変わらない。混合材の場合は全体を平均化したものとなる。

歩留まり率を改善量と投入量の比として定義すると、歩留まり率が最も高いのは中粒材の場合で48%の歩留まり率となる。図-13(b)に示す改善率で見ると、ほぼ100%の改善率を達成しているのは細粒材の場合の沖合領域、中粒材の岸側領域、粗粒材の岸側領域である。細粒、中粒、粗粒の場合には岸側領域と沖側領域の差が大きいのにに対し、バランスがよいのは混合材の場合である。

図-14は1990年を基準とした各ケースの汀線変化量の比較である。各ケースの予測計算のうち細粒材養浜では放置の場合と同様な汀線の後退が起き、汀線の前進効果は見られない。粗粒材や混合材養浜では中央部における汀線の後退量が放置の場合の1/2まで軽減できる。最も効果があるのは中粒材養浜であり、この場合には汀線は現況護岸線ぎりぎりまでとすることが可能である。

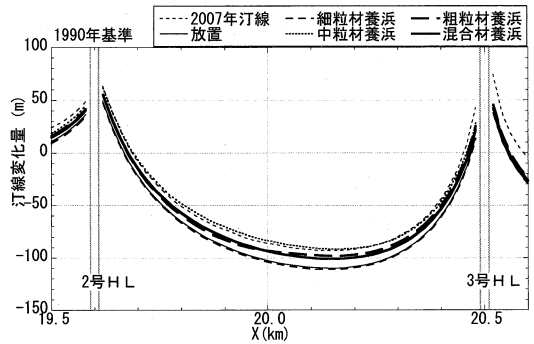


図-14 1990年基準の各ケースの汀線変化量比較

5. 結論

南九十九里浜の2, 3号HL周辺は過去から侵食が進んできたが、このまま放置すればHLは完成形であるにもかかわらずHLの先端を沿岸漂砂が通過し、次第に侵食が進んでいくことが予測された。このため2, 3号HLの開口部沖での養浜を行うことによって砂浜の回復を図る計画を立て、粒径を考慮した等深線変化モデルを用いてその効果について検討した。この結果、毎年2万m³の混合材を投入すれば前浜の復元と沖合侵食の防止を同時に進めることが可能になったことが明らかになった。混合材のうち細粒分は主として片貝漁港の浚渫土砂の利用が可能であり、また相対的に粗粒な材料は太東漁港の南側堆積土砂の利用が考えられる。両者とも漁港へ堆積したか、あるいは堆積の恐れのある土砂であることから、漁港の維持と海岸保全を同時に解決する上でもこれらの土砂を利用することが有効である。

参考文献

- 宇多高明(1997):「日本の海岸侵食」, 山海堂, p.442.
- 宇多高明・高田 修・星上幸良・芹沢真澄・三波俊郎・古池 鋼(2000): 九十九里海岸における地質年代スケールの沿岸漂砂量の推定, 海岸工学論文集, 第47巻, pp.686-690.
- 宇多高明・三波俊郎・古池 鋼・星上幸良・長山英樹(2008): 南九十九里浜の侵食と堆積の実態, 海洋開発論文集, 第24巻, pp.1321-1326.
- 熊田貴之・小林昭男・宇多高明・芹沢真澄(2003): 沿岸・岸沖漂砂による粒径分級を考慮した等深線変化モデル, 海岸工学論文集, 第50巻, pp.481-485.
- 酒井和也・小林昭男・宇多高明・芹沢真澄・熊田貴之(2003): 波の遮蔽構造物を有する海岸における3次元静的安定海浜形状の簡易予測モデル, 海岸工学論文集, 第50巻, pp.496-500.