

福井県浜住海岸の侵食実態と離岸堤群の漂砂制御効果

Beach Erosion of Hamaju Coast and Controlling Effect of Littoral Drift by Detached Breakwaters

宇多高明¹・山本 学²・三波俊郎³・古池 鋼³・星上幸良⁴・石川仁憲⁵

Takaaki UDA, Manabu YAMAMOTO, Toshiro SAN-NAMI, Kou FURUIKE
Yukiyoshi HOSHIGAMI and Toshinori ISHIKAWA

The Hamaju coast, located on the west part of a sandy beach with 11 km length extending west from the mouth of the Kuzuryu River in Fukui Prefecture, has been eroded by various anthropogenic factors in recent years. As a measure against beach erosion, 15 detached breakwaters had been constructed between 1973 and 1994. The shoreline advanced behind the detached breakwaters, showing the conservation effect, but in the offshore zone, water depth has been increasing. This caused damages of subsiding concrete armor units. In this study, beach changes of this coast were investigated, and numerical simulation was carried out, using the contour-line-change model. Measured beach changes were well reproduced by the model.

1. はじめに

福井県の浜住海岸は日本海に面し、東端の九頭竜川河口から西端の和布町の岬までの間に広がる長さ約 11 km の砂浜海岸（三里ヶ浜）の西端部に位置する。この海岸は福井県で最も規模の大きな海水浴場であり、夏季には海水浴客で賑わう。過去に、九頭竜川河口の西側で福井港の建設とそれに隣接して石油備蓄基地（以下、備蓄基地と略す）のための埋め立てが行われた結果、現在では砂浜の延長は約 4 km のみとなっている。また浜住海岸の西端は過去には岩礁であったが、この岩礁の沖合には鷹巣港の防波堤が延ばされ、それによって形成された波の遮蔽域へと周辺海岸から一部の土砂が流入堆積している。このようなことから、浜住海岸は過去の自然海浜から、現在の各種人為的改変の影響を強く受けた海岸となっている。人為的改変に伴って浜住海岸では侵食が進んだために、対策として 1973～1994 年に 15 基の離岸堤が建設された。離岸堤群の背後では汀線が前進し一定の効果が上がったが、一方で沖合の水深低下により離岸堤群の被災が相次ぎ、より安定な施設への改良が求められている。本研究ではその実態をまず明らかにした上で、等深線変化モデル（芹沢ら、2002）を用いてその再現を試みる。

2. 広域空中写真の比較と波浪条件

図-1 は三里ヶ浜全域の 2004 年の空中写真である。九頭竜川河口の南約 3 km において福井港の防波堤が建設されており、またこの防波堤の基部から南側には延長約 4 km にわたって埋立地が造成され、その南端から 2.5 km 部分は備蓄基地として利用されている。現況で備蓄基地が立地する埋立地は、1968 年当時の海岸線から約 650 m 沖合に突出している。このため、1968 年当時は緩やかに延びていた汀線が埋立地の隅角部で弓状に持ち上がるように前進している。一方浜住海岸では離岸堤が造られており、その背後では前浜が広がっているが、離岸堤と埋立地の間では埋立地近傍を除いて前浜が狭まった。

福井港沖ナウファス波浪観測データ（1980～2000 年、波高計設置水深 21.3 m）によれば、浜住海岸の波浪特性は、主波向は NW（平均波向 N55°W）であり海岸線に対しほぼ直角方向から入射するが、頻度は低いものの波高の高い西寄り（W, WNW）の入射波と、波高は相対的に低いが高頻度の高い NNW からの入射波によって特徴付けられる。エネルギー平均波は、1980～2000 年の波浪観測データより、通年で $H_m=1.6$ m、季節別では冬期が最も高く $H_m=2.2$ m である。

3. 汀線変化と沿岸漂砂量分布の算定

浜住海岸の離岸堤は西端の 1 号堤から東側へと順に建設された。図-2 は 1968 年を基準とした 2004 年までの汀線変化の沿岸分布である。1985 年までの汀線変化では、長さ約 500 m 沖向きに突出した備蓄基地の隅角部では波の遮蔽効果により最大 110 m 汀線が前進した。また海岸西部では建設工事の進んだ離岸堤の背後で堆砂

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 福井県福井土木事務所
3 海岸研究室(有)
4 正会員 博(工) 国際航業(株)防災・海洋部
5 正会員 工修 (財)土木研究センターなぎさ総合研究室主任
研究員



図-1 2004年の空中写真(国土地理院撮影)

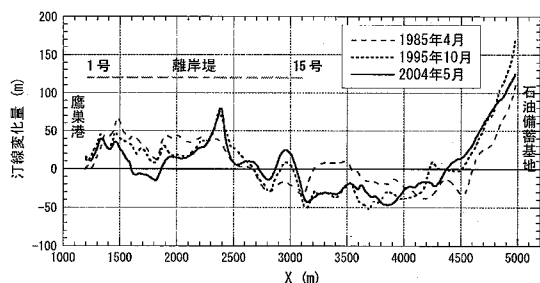


図-2 汀線変化(1968年基準)

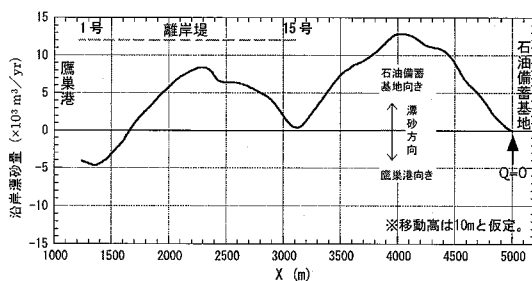
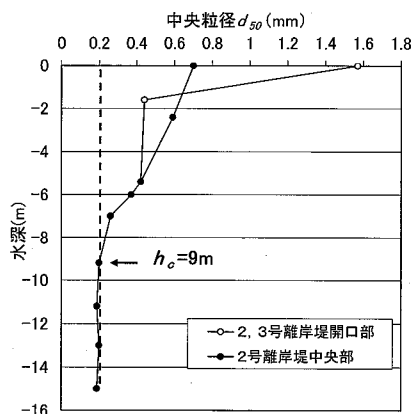


図-4 沿岸漂砂量分布

図-3 d_{50} の水深方向分布

が進んだ。これと対照的に、15号堤と備蓄基地隅角部での汀線前進域の間では汀線の後退が見られる。離岸堤の建設は1994年で終了したが、1995年の汀線変化では離岸堤群の東端部でも堆砂が進み、逆に離岸堤と備蓄基地の間では大きな汀線後退が生じている。また備蓄基地の隅角部での三角形の前浜はさらに発達を遂げた。なお、10号堤背後で鋭く尖った舌状砂州が形成されているが、これは1993年に施工された10号堤が捨石製であり、不透水性であることによる。

一般に、底質中央粒径は汀線付近で最大値を示した後水深方向に減少し、ある水深(粒径変化の限界水深)で0.15～0.2mm程度の一定値となり、この粒径変化の

限界水深が波による地形変化の限界水深 h_c と一致することが、多くの実測データから示されている(宇多, 1997)。そこで本研究でもこの考え方にならない、陸域から海面下まで水深方向に底質サンプリングを行い、それより d_{50} を算定して h_c を推定した。図-3は2号離岸堤付近で行った底質採取結果から求めた d_{50} の水深方向分布である。浜住海岸にあっても d_{50} は汀線で最大値を示した後、水深方向に減少し、-9mで d_{50} はほぼ0.2mmの一定値に漸近している。このことから、浜住海岸における h_c は-9mとなる。

一方、漂砂の移動高は(1.0～1.3) h_c で与えられる(宇多, 1997)ので、漂砂の移動高はほぼ10mとなる。そこで図-2に示した汀線変化をもとに、備蓄基地の護岸位置を横切る沿岸漂砂を0と仮定し、1985～2004年の汀線変化量を沿岸方向に積分した上移動高を乗じて海浜土砂量変化を算出し、その場所的な差から沿岸漂砂量の分布を求めた。結果が図-4である。これによれば、離岸堤群の端部と備蓄基地の間では東向きの沿岸漂砂であり、そのピークは埋立地護岸から1km西で $1.3 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{yr}$ の漂砂量であった。離岸堤群の間でも浜住海岸の西端部を除き、大部分では東向きの沿岸漂砂が生じている。

4. 深浅図に基づく海底地形変化解析

図-5は、1986～2005年の海底地形変化量の平面分布である。図には2005年の深浅図も重ねて示す。これに

よれば、離岸堤沖の -10 m 前後では侵食傾向を示す。備蓄基地南端の隅角部沖の -10 m 付近では、等深線の突出がみられる。この冲向きの突出は隅角部から約 500 m までの範囲で収束していることから、浜住海岸側から埋立地の護岸側面を離岸方向に砂が運ばれ、それが沖合に堆積したものと考えられる。浜住海岸では頻度こそ低いものの W ~ WNW 方向からの高波浪が入射するが、この入射波は海岸線に対して大きく斜め入射となる。このような斜め入射波条件では海岸全体で北東向きの沿岸漂砂が生じるが、東端には備蓄基地の護岸があるためそこで離岸方向へと運ばれ、結果として備蓄基地の隅角部沖の水深の大きな場所で等深線の前進が見られたと考えられる。その場合、堆積域の水深は -10 ~ -20 m と $h_c = -9$ m より深いことから、そこに堆積した砂は波の作用で再び汀線へと戻ることがなく、net で見た海浜土砂量の損失に繋がったと考えられる。離岸堤群の設置後には離岸堤群の東端と備蓄基地の護岸との距離が短くなったことから、北東向きの沿岸漂砂の発達が抑えられ、備蓄基地沖へと砂の流出量も減少しつつあると推定される。

以上の分析によれば、浜住海岸は 1970 年以前、港湾施設等の沿岸漂砂を阻害する構造物はなく九頭竜川からの供給土砂が堆積して安定的な自然海浜が形成されていた。この海岸では、平均波向が海岸線に対しほぼ正面からの入射方向であるが、季節的に見てかなり大きな波向

変動も有している。このような条件下で、1980 年代から福井港の建設が始まった。福井港南防波堤の先端水深は 15 m であり h_c より深いために、九頭竜川から土砂の供給があったとしても浜住海岸には到達できない。その上備蓄基地の建設に伴い埋め立て護岸背後に波の遮蔽域が形成され、西側の海岸の砂が遮蔽域内へ引き込まれた。さらに西寄りの高波浪の作用下で東向きの強い沿岸漂砂が生じ、これによって備蓄基地の隅角部沖へと流出した。この付近は水深が大きいために一旦沖へ流出した土砂は西側へと戻らず、結果として net 土砂損失も生じたと推定される。さらに鷹巣港の南防波堤および離岸堤による波の遮蔽域に土砂が移動し、浜住海岸の土砂量の減少を招いたと考えられる。

5. 等深線変化モデルによる海浜変形の再現

(1) モデルの基本条件

芹沢ら (2002) による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を用いて浜住海岸の海浜変形の再現計算を行った。砂移動は、 h_c と波のうちあげ高で定まるバーム高 h_R で挟まれた区間で生ずるとする。海浜変形は碎波帯や汀線付近では著しく沖合では小さくなるので、岸沖漂砂の強さは水深方向分布を持つ。このため岸沖漂砂の強度分布関数 $\varepsilon_s(z)$ 、岸沖方向の漂砂量係数 K_s を導入する。ただし β_c には構造物設置前の自然状態の海浜勾配角を与える。バーム高より高い領域と限界

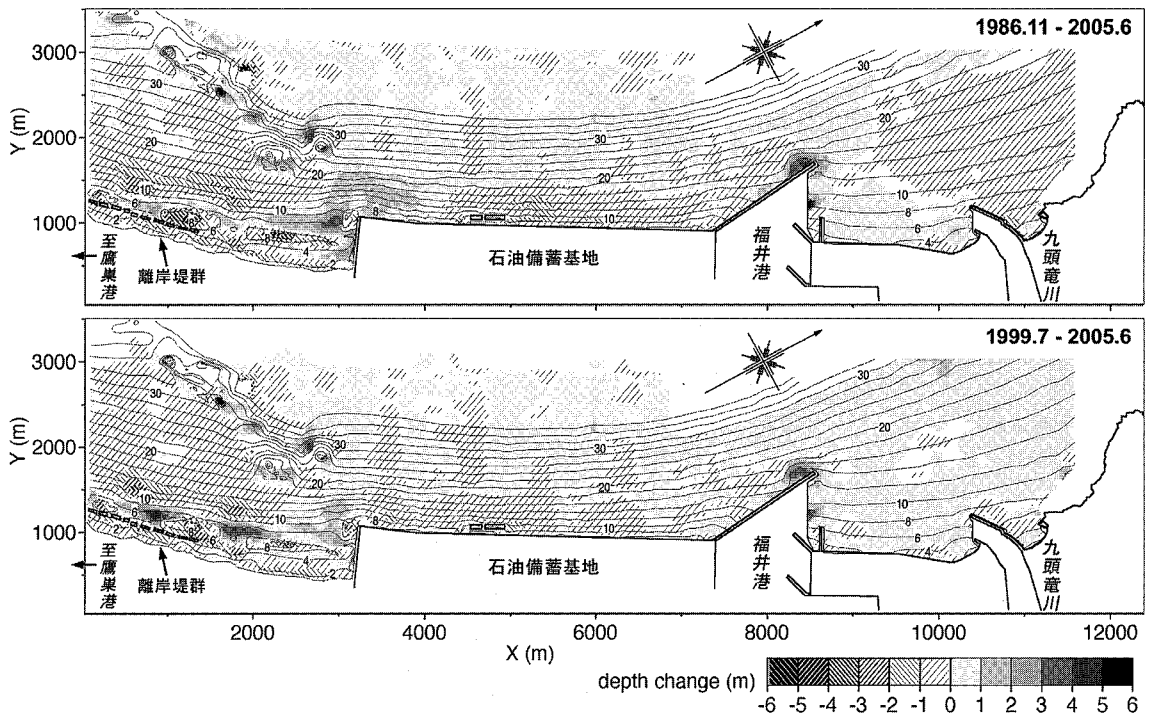


図-5 海底地形変化量の平面分布

水深以深の領域では土砂の落ち込みに対する安息勾配を与える。 $\varepsilon_x(z)$ は、沿岸漂砂量的水深方向分布 $\varepsilon_x(z)$ と等しいとし、一様分布で与える。等深線変化は、沿岸漂砂と岸沖漂砂の両方からなる沿岸・鉛直方向(x - z 空間)の2次元の連続式より計算される。なお計算の手順、陸上の浜崖の形成や限界水深以深への重力による土砂の落ち込みの処理法および構造物周辺の境界の処理法については原論文を参照されたい。このほか計算では宇多ら(1998)の展開座標を用い、曲線状の汀線を直線の座標系に変換して計算した。離岸堤および人工リーフ背後の波浪場は、方向分散法により回折係数 K_d と回折波向 θ_d を計算し、碎波波高 H_b は回折係数を乗じて低減し、碎波波向 θ_b には回折波向を与えた。また離岸堤および人工リーフ背後の h_c 、 h_R は回折係数に比例させて低減させた。

数値解析では、既設離岸堤の透過率 K_t は設計諸元より $K_t=0.6$ を標準とし、消波機能の低下により離岸堤区間の汀線形状が不均衡となっていることから、離岸堤の施工・災害復旧年次を参考に現況汀線に合わせて個々に K_t を適宜設定した。また離岸堤背後に大きなトンボロが形成されている10号堤は不透過堤として $K_t=0.10$ とした。また、既設離岸堤の堤長および開口幅は、深浅測量結果などを参考に設定し、のり先水深は深浅測量結果および対象海岸の平衡勾配と離岸距離を参考に3mとした。

(2) 現況再現と将来予測

対象海岸の海底地盤の低下を招いた要因としては、a)備蓄基地沖側への土砂流出、b)福井港の遮蔽域での堆積、c)鷹巣港沖防波堤による遮蔽域での堆積、d)離岸堤背後への土砂移動の4要因が考えられる。これらのうちa)については、建設当初に計算領域内からの土砂流出があったことから、国土交通省(2003)より流出土砂量を $30 \times 10^4 \text{ m}^3$ として再現計算に考慮した。一方、b)~d)の要因については、計算領域内に構造物を配置することで考慮した。その他の土砂損失要因として、福井港防波堤の建設途中に福井港側に移動した土砂もあるが、これについてはデータがないためこれは考慮しない。計算条件一覧を表-1に示す。

現況再現計算の結果を図-6に示す。実測と計算汀線を比較すれば、4~6号堤背後の汀線後退や10号堤背後のトンボロ形状など離岸堤区間の汀線形状がよく再現されている。また離岸堤未設置区間の汀線後退や、埋立地隅角部の波の遮蔽域での汀線前進など、観測結果の特徴がうまく再現でき、本計算モデルの妥当性が確認された。

次に、備蓄基地と鷹巣港防波堤が完成した状況を想定し、現況のまま放置した場合の等深線と水深変化の予測

結果を図-7に示す。水深変化図を見ると今後も鷹巣港側で若干の地盤高の上昇が生じるものの、海域全体では著しい変化はなく安定地形に近づいていることが予測されている。このことは同時に、既に地盤低下が進んだ4~6号離岸堤付近では地盤の回復が見込めず、離岸堤ののり先が脆弱で堤体の沈下散乱など被災が起きやすい状況は解消されないことを示唆している。こうした状況下で西寄りの高波浪が来襲した場合、離岸堤背後域が急激に侵食され、保全効果が失われる可能性が大きい。また流出土砂は東向きの漂砂によって備蓄基地側へ運ばれ、一部は波の作用で再び海岸に戻ることもない備蓄基地沖の深みへと落ち込むと推定される。この状況は過去の埋立地沖の深浅測量データからも確認されている。

そこでこの状況を予測した。図-7に示す海底地形条

表-1 計算条件

初期地形・構造物	1968年当時の自然地形を展開座標にモデル化した直線平行等深線地形
入射波条件	海浜安定計算：冬期エネルギー平均波 $H_0=2.2\text{ m}$ 、 $T=7.4\text{ s}$ 、波向NW 高波浪時：年数回波 $H_0=5.0\text{ m}$ 、 $T=9.0\text{ s}$ 、波向W
潮位条件	海浜安定計算：M.S.L.(T.P.+0.18 m) 高波浪時：H.W.L.(T.P.+0.5 m)
限界水深・バーム高	地形変化の限界水深 $h_c=-9\text{ m}$ 、 バーム高 $h_R=+3.0\text{ m}$ ($h_R=0.32h_c$)
漂砂量係数	沿岸漂砂量係数 $K_x=0.2$ 岸沖漂砂量係数 $K_z=0.2 K_x$ 小笹・プランプトン項の係数 $K_2=1.62 K_x$
沿岸・岸沖漂砂の水深分布	一様分布
平衡勾配	$\tan \beta_c=1/50$ (h_R-h_c の実測値より)
土砂落ち込みの限界勾配	陸上：1/2、水中：1/6
計算等深線範囲	$Z=+3\text{ m} \sim -10\text{ m}$
計算メッシュ	沿岸方向 $\Delta X=20\text{ m}$ 、鉛直方向 $\Delta Z=1.0\text{ m}$
計算時間間隔 Δt 、ステップ数	$\Delta t=0.5\text{ hr}$ 、8000 steps (将来予測計算は+8000 step)
境界条件	計算領域の左右端・岸沖端で計算領域内外からの土砂流入なし($q_x=0$ 、 $q_z=0$)。現況再現計算では、福井港建設に伴う土砂流出を考慮。高波浪時の計算では右端部自由境界。
構造物の波高伝達率	既設離岸堤： $K_t=0.6$ を標準とし2004年汀線に合わせて適宜設定、人工リーフ： $K_t=0.7$ 、潜り突堤：波浪低減効果なし、地形変化計算時に障害物として考慮
数値計算法	陽解法による差分法
波浪計算法	方向分散法 $S_{\max}=25$

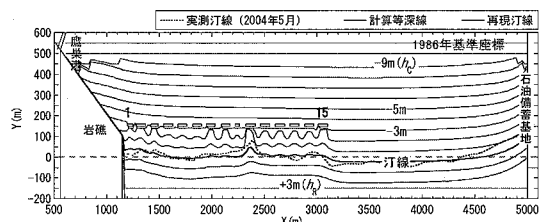


図-6 等深線の予測結果(現況再現)

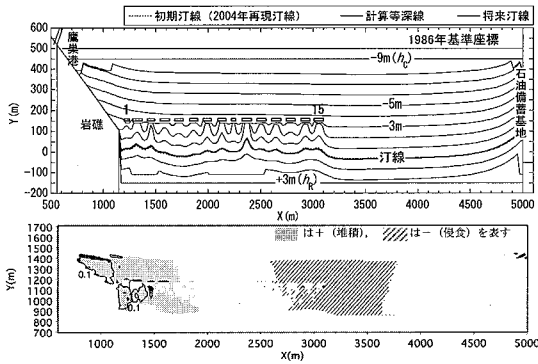
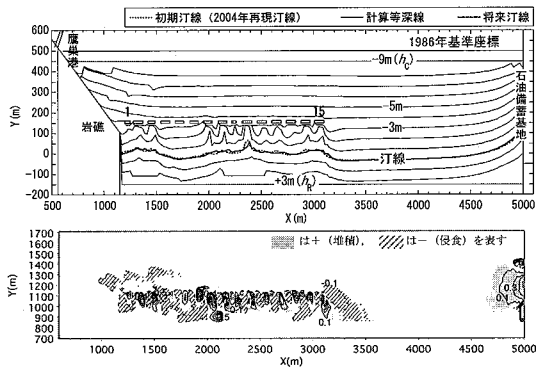
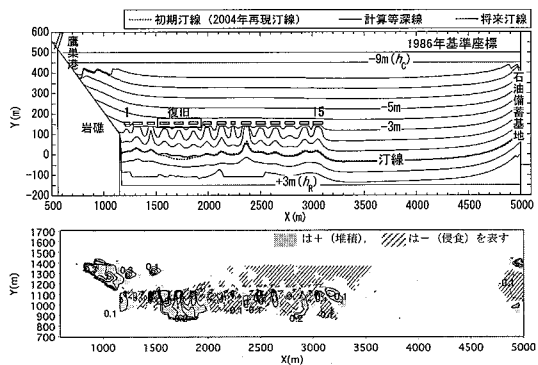


図-7 等深線および水深変化図（現況配置）


 図-8 等深線および水深変化図
（離岸堤3基撤去、高波浪作用時）

 図-9 等深線および水深変化図
（撤去した離岸堤を再度復旧した場合）

件の下で、4～6号離岸堤を撤去して高波浪を作用させた場合の計算結果が図-8である。3基の離岸堤の消波効果が失われた結果、開口部からの波浪侵入度が高まり大きく侵食された。侵食された砂の一部は周辺の離岸堤背後にも堆積するものの、一部は備蓄基地沖にも運ばれる。

図-9は災害後離岸堤3基を復旧した場合の海浜変形である。災害復旧により、離岸堤群の背後では再び砂が

堆積するが、備蓄基地沖に運ばれた砂はそのまま残される。このように、4～6号堤が被災して沈下した上でWからの高波浪が来襲した場合、離岸堤背後域の砂が沿岸漂砂によって福井港埋立地側へと移動し、堆積する。さらに、一部は埋立地沖へと流出する。これは計算領域からの土砂損失に繋がる。このときの離岸堤背後から流出土砂量は $V=1.1 \times 10^4 \text{ m}^3$ であった。また福井港埋立地沖への流出土砂量は $V=0.8 \times 10^4 \text{ m}^3$ であった。その後4～6号堤を復旧し、エネルギー平均波を数年作用させた結果、復旧2年後でも離岸堤背後の土砂は $V=300 \text{ m}^3$ 程度しか戻らない結果となり、災害前の状態に戻るには十数年を要する結果となった。以上より、一度離岸堤の災害が起こると、災害復旧を行っても離岸堤背後の土砂量が災害前に戻るのには長い時間を要し、さらに離岸堤背後に再形成される海浜土砂は埋立地沖を除く海岸全域から集められるので、離岸堤区域外では水深低下が進む。すなわち、被災前に対して離岸堤周辺域の水深は次第に増加し、それが現状以上にブロックの安定性を損なう危険度が上昇するという結果が得られた。

6. ま と め

本研究では、九頭竜川河口から和布町の岬までの間に広がる延長約11 kmの砂浜海岸（三里ヶ浜）の西端部に位置する浜住海岸の海浜変形の実態を現地データをもとに明らかにした。この海岸は近年各種人為的改変の影響を受けて侵食が進んだために、対策として1973～1994年に15基の離岸堤が建設された。離岸堤群の背後では汀線が前進し一定の効果が上がったが、一方で沖合の水深低下により離岸堤群の被災が相次ぎ、より安定な施設への改良が求められている。そこで等深線変化モデル（芹沢ら、2002）を用いて地形変化の再現を試みた。この結果、観測された現象は等深線変化モデルによりうまく再現できた。

参 考 文 献

- 宇多高明(1997)：「日本の海岸侵食」，山海堂，pp. 421-422。
- 宇多高明・河野茂樹(1996)：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。
- 宇多高明・住谷勉夫・矢澤 肇・大谷靖郎・厚坂祐次(1998)：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。
- 国土交通省北陸地方整備局敦賀港湾工事事務所・株式会社エコー「平成14年度 深浅変化検討業務（平成15年3月）」。
- 芹沢真澄・宇多高明・三波俊郎・古池 鋼・熊田貴之(2002)：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。