

沖合投入土砂の養浜効果予測手法の開発

宇多高明* ・ 清野聡子** ・ 大矢忠一*** ・ 安田武夫****
高橋 功***** ・ 古池 鋼***** ・ 星上幸良*****

投入砂の粒径を考慮した沖合養浜時 3 次元海浜変形予測モデルを構築し, 九十九里浜の二宮海岸と北九十九里浜に適用した。海底勾配が比較的急な二宮海岸では, 0.15 mm の細砂は沖合に流出したが, 粒径 0.3 mm 程度の砂は岸へと運ばれるという結果となった。後者の特性は, カラーサンドの投入実験でも確かめられた。一方, 北九十九里浜では沖合勾配が小さいために 0.15 mm 程度の細粒土砂でも投入土砂は岸向きに移動し汀線付近へと運ばれることが分かった。

1. ま え が き

改正海岸法では, 砂浜が一種の保全施設として認められたことから, 従来にも増して養浜の価値が高まりつつある。しかしながら, 波浪条件の厳しい海岸で行われた養浜では, 投入土砂が急速に消失してしまうことから, そもそも養浜効果が現れできないのでは, という指摘がしばしばなされ, これが養浜実現の大きな障害となっている。また, 従来の養浜では, ダンプトラックなどで運んできた砂を汀線付近に盛土し, そこから波の作用で自然流出を期待する方法が用いられているが, 陸上運搬のためコストが高いという問題点がある。後者に関しては, 大量の土砂を運搬するには船舶の利用が有効であり, 例えばバージで投入海域まで土砂を運んで投入すれば養浜コストを大きく減じることが可能である。この場合の問題点は, 沖合養浜を行った土砂が波の作用で岸側に運ばれ, 実際に海岸の保全効果を発揮できるかどうかである。また第 2 の問題点は, 浅海域が漁場である場合, 土砂投入が魚介類にマイナス影響をもたらさないかどうかである。本研究では, 第 1 の問題に着目する。

一般に, 養浜の効果検討には汀線変化モデルが用いられている (Dean, 2002) が, 沖合養浜土砂の挙動追跡は, その特性上汀線変化モデルでは全く不可能である。そこで本研究では, 等深線変化モデルを工夫し, 養浜砂の 3 次元挙動を追跡可能なモデルを開発した。このモデルは 3 次元海浜変形の予測にとどまらず, 従来検討が全く困難であった, 養浜砂の粒径ごとの土砂移動の相違も明らかにすることができる。モデルの妥当性検討のために, 九十九里浜南部の二宮海岸においてカラーサンド

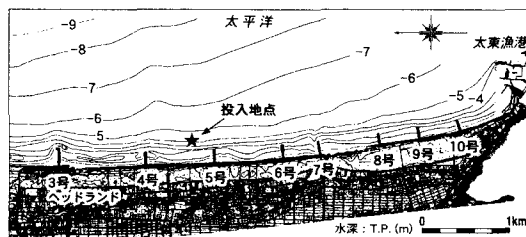


図-1 二宮海岸のヘッドランドとカラーサンドの投入地点

を用いた投入砂の移動実験を行って砂の移動状況を観察し, 数値モデルとの比較を行った。一方, 二宮海岸での養浜砂の移動予測の再現性が良好であったことから, さらに離岸堤群など複雑な構造物群が設置されている北九十九里浜にもこのモデルの適用を図った。

2. 沖合における土砂投入の現地実験

九十九里浜南端に位置する二宮海岸では, 近年侵食が著しく進んできている (宇多ら, 2000; 市川ら, 2001)。このため侵食対策の一環として, 1988年からヘッドランドによる対策が行われてきた。ヘッドランドは二宮川河口の右岸側に隣接して 1 号堤が建設され, それより南側に約 1 km 間隔で合計 10 基が建設されている。現況で, これらのヘッドランドは少なくとも突堤部分が完成するか, あるいはそれに加えてヘッド (横堤) 部の工事も進んでいる。今回, 4, 5 号ヘッドランドに挟まれた 750 m 区間を対象とし, 沖合で養浜した場合の投入土砂の挙動を調べるために, 汀線沖約 250 m の水深約 5 m 地点にカラーサンドを投入し, その移動状況を調べた。

図-1 にはヘッドランドとカラーサンドの投入地点を示す。砂の投入は 2005 年 1 月 31 日に行い, その後投入砂の広がり状況を調べた。カラーサンドはその粒径を現況海底面に存在する粒径 0.15 mm 程度より粗い $d_{50} = 0.28$ mm と, それより 1 オーダー粒径の大きい $d_{50} = 1.33$ mm の砂を 400 kg (約 0.25 m^3) ずつ赤色・黄色に着色し, 2005 年 1 月 31 日に投入した。あわせて投入地点には波高・流速計を設置し, 調査期間中の 2 時間毎の波高・波向・流速を観測した。

* 正会員 工博 (財) 土木研究センター理事なごき総合研究室長

** 正会員 工博 東京大学大学院総合文化研究科

*** 千葉県国土整備部河川環境課防災海岸室長

**** 千葉県国土整備部河川環境課防災海岸室防災海岸室副主幹

***** 正会員 (財) 土木研究センター研究開発一部

***** 海岸研究室 (有)

***** 正会員 国際航業 (株) 河川砂防・海岸部

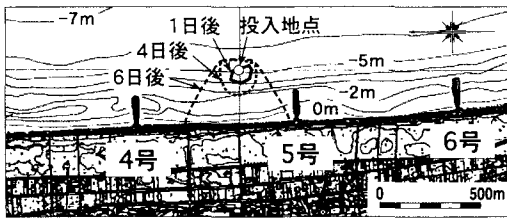


図-2 カラーサンドの拡散状況

観測結果によれば、期間中の波高出現率は有義波高1.0 m未満が52%を占め、2.0 m以上は11%、最大波では1.0 m未満が23%に対し、3.0 m以上が17%であり、有義波高2.0 m以上の時化が4回観測された。海岸線の走行方向からEが直角入射となるが、調査期間中の波向出現率はENE方向の75%、E方向の21%と合わせると96%を占めた。流向はSSW方向が28%と最も多く、S方向の25%、SW方向の14%と合わせると67%を占め、南向きの沿岸流が卓越していた。

砂のサンプリングは6回行った。投入砂は波の作用で次第に拡散することから、採取点の間隔は時間的に広げた。観測結果を図-2に示す。投入後1日の2月1日では、砂の投入時期が冬季であることから北側からの波が入射し、投入砂は全体に南側に多く拡散した。同時に投入砂は斜め岸向きにも移動し、岸向きの移動が確認された。この場合の最大発見個数は 0.01 m^2 ($10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$) 当たり6,800個であった。投入4日後の2月4日では、大量の投入砂が岸向きに釣鐘状に分布しつつ運ばれ、ヘッドランドの先端を結ぶ線上でも最大45個のカラーサンドが発見された。これと対照的に、投入点より沖合での発見個数は少ない。また個数分布の重心点も明らかに岸向きに移動している。投入6日後の2月6日には投入点付近での発見個数は大きく減少し、代わりに汀線付近で多くのカラーサンドが発見された。

結局、 $d_{50} = 0.28 \text{ mm}$ のカラーサンドは拡散しながらも投入後6日後までに汀線に到達したことが分かった。このことより、粒径の選択をうまく行えば、汀線からの土砂投入ではなく沖合での養浜であっても汀線付近に波の作用で投入砂が運ばれうることが明らかである。

3. 沖合投入土砂の養浜効果に関する数値シミュレーション

(1) 計算モデル

一般に、ある海岸を考えたとき、離岸堤やヘッドランドなどの海岸構造物が建設されると波の場が変化し、周辺の海底地形は構造物がある条件のもとで安定な形状へと近づいていく。構造物の建設から十分長い時間が経過したとき、周辺の海底地形は構造物の設置された状態に

おいてほぼ安定状態に達していると考えられる。このようなほぼ安定状態にある海底面上で養浜が行われた場合、原海底地盤は変動せず、原地盤面上にのった養浜砂の層が平衡状態からずれたことに起因して変形することになる。このように考えると、構造物の完成後十分長い時間が経過した場合、原海底面は固定床としての扱いが可能となる。そこで海底面を芹沢ら(2002)の等深線変化モデルを用いて固定床扱いとし、その上で養浜砂の移動を追跡した。芹沢ら(2005)は、同様な考え方に立って前浜養浜時の縦断形予測を行い、これにより浜崖の形成機構がうまく説明できることを明らかにした。本研究では、投入土砂は3次的に広がることを考慮し、平面予測モデルとして展開し沖合養浜を考えた。

以下に計算の基本式を示す。基礎方程式は式(1)～(6)で与えられる。

$$q_x = \varepsilon_x(z) K_x (EC_g)_b \cdot \cos \alpha_b \left\{ \sin \alpha_b - \frac{1}{\tan \beta_c} \frac{K_z}{K_x} \frac{\partial H_b}{\partial x} \right\} \dots \dots \dots (1)$$

$$q_z = \varepsilon_z(z) K_z (EC_g)_b \cos^2 \alpha_b \sin \beta_c \left(\frac{\cot \beta}{\cot \beta_c} - 1 \right) \dots \dots \dots (2)$$

$$\cot \beta = - \frac{\partial Y}{\partial z} \dots \dots \dots (3)$$

$$\varepsilon_z(z) = \varepsilon_x(z) = \varepsilon(z) / \int_{-h_c}^{h_R} \varepsilon(z) dz \dots \dots \dots (4)$$

$$\varepsilon(z) = \begin{cases} \frac{1}{h_c + h_R} \dots \dots \dots (-h_c \leq z \leq h_R) \\ 0 \dots \dots \dots (z < h_c, \quad h_R < z) \end{cases} \dots \dots \dots (5)$$

$$\frac{\partial Y}{\partial t} = - \frac{\partial q_x}{\partial x} - \frac{\partial q_z}{\partial z} \dots \dots \dots (6)$$

ここに、 q_x は沿岸漂砂量、 q_z は岸沖漂砂量、 x は沿岸座標、 z は鉛直座標(地盤高)、 t は時間、 Y は等深線位置、 $(EC_g)_b$ は碎波点のエネルギーフラックス、 α_b は碎波波向と等深線のなす角、 $\cot \beta$ は等深線間隔、 $\varepsilon_x(z)$ および $\varepsilon_z(z)$ は沿岸および岸沖漂砂量の水深方向分布であり、式(5)のように一様で与える。 K_x は沿岸漂砂量係数、 K_z は岸沖漂砂量係数、 K_b は小笹・ブランプトン項の漂砂量係数、 h_c は波による地形変化の限界水深、 h_R はバーム高、 $\tan \beta_c$ は平衡勾配である。等深線変化量は、各等深線上の各点での沿岸漂砂量 q_x 、岸沖漂砂量 q_z を式(1)、(2)で与え、これを用いて x - z 空間の2次元の連続式(6)を解くことで計算される。

数値計算は、スタッガードメッシュを用いた陽形式の差分法を用いた。

固定床に対する境界処理の方法は、芹沢ら(2002)の構造物処理法を応用し、式(7)～(10)のように等深線が固定床に接近すると低減率 μ を乗じて漂砂量を低減させる。

$$q_x^{(i,k)} = \mu^{(i,k)} \cdot q_x^{(i,k)} \dots\dots\dots (7)$$

$$q_z^{(i,k)} = \mu^{(i,k)} \cdot q_z^{(i,k)} \dots\dots\dots (8)$$

$$\mu^{(i,k)} = \frac{\Delta Y^{(i,k)}}{\Delta Y_c^{(i,k)}} \quad (0 \leq \mu^{(i,k)} \leq 1) \dots\dots\dots (9)$$

$$\Delta Y_c^{(i,k)} = \frac{1}{2} \cot \beta_c^{(i,k)} \cdot \Delta z \dots\dots\dots (10)$$

ここに、式中の上添え字の i および k は沿岸方向および鉛直方向のセル番号である。 Δz は一つの等深線で代表する鉛直方向に分割した海浜の厚さ、 ΔY は固定床と等深線との岸沖距離である。なお μ の値は漂砂上手側のセルの値を用いる。

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は芹沢ら (2002) の方法を用いた。

このモデルでは、沿岸漂砂による海浜変形は当然のこととして、砂の平衡勾配より緩やかであれば岸向きの、急であれば沖向きの漂砂が生じ、岸沖漂砂を介した安定化機構が含まれている。このため投入砂の粒径見合いの平衡勾配と、投入海域の局所縦断勾配との関係が重要であり、現地の海底勾配に対して平衡勾配が小さい (粒径が小さい) 砂を投入すればその砂は沖へと流出し、逆に平衡勾配の大きい (粒径が大きい) 砂を投入すればその砂は汀線へと戻ることになる。

(2) 九十九里浜南部一宮海岸への適用

現況の一宮海岸を展開座標で考え、2003年1月の実測深浅図をもとに平行等深線形状に置き換えた。この状態

表-1 計算条件一覧

数値計算手法	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 (芹沢ら: 2002)
計算対象範囲	一宮海岸周辺: 海岸線延長 4 km
計算ケース	1) 現況海浜の再現 2) 養浜砂を追跡する計算 ケース 1: ヘッドランド区間前面に細粒砂を投入 ケース 2: ヘッドランド区間前面に粗粒砂を投入
初期地形	直線平行等深線地形 (勾配 1/50) 構造物: 既設ヘッドランド、護岸
入射波条件	砕波波高 $H_b = 5.4$ m, 砕波波向 $\alpha_b = 0^\circ$
潮位条件	M.S.L
限界水深・バーム高	地形変化の限界水深 $h_c = 9$ m バーム高 $h_R = 2$ m
漂砂量係数	沿岸漂砂量係数 $K_1 = 0.2$ 岸沖漂砂量係数 $K_2 = 0.5 K_1$
沿岸・岸沖漂砂の水深分布	一様分布
平衡勾配	1) $\tan \beta_c = 1/50$ 2) $\tan \beta_c = 1/50$, $\tan \beta_c = 1/20$
土砂落ち込みの境界勾配	1) 陸上: 1/2, 水中: 1/3
計算等深線範囲	$z = +5$ m ~ -15 m
計算メッシュ	沿岸方向 $\Delta X = 10$ m, 鉛直方向 $\Delta Z = 1$ m
計算時間間隔 Δt	$t = 1.0$ hr
計算ステップ数	5,000 steps
境界条件	左右端: $q_x = 0$, 岸沖端: $q_z = 0$
その他	養浜砂を追跡する計算では、1) で再現した地形を固定床として、 $-5 \sim -6$ m 等深線 ($-4.5 \sim -6.5$ m) に $30,000 \text{ m}^3$ の養浜
数値計算法	陽解法による差分法
回折計算法	方向分散法 (芹沢ら, 1993) $S_{\max} = 75$

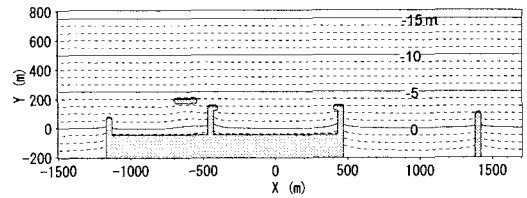


図-3 120日相当ステップの波を作用させて求めた再現地形

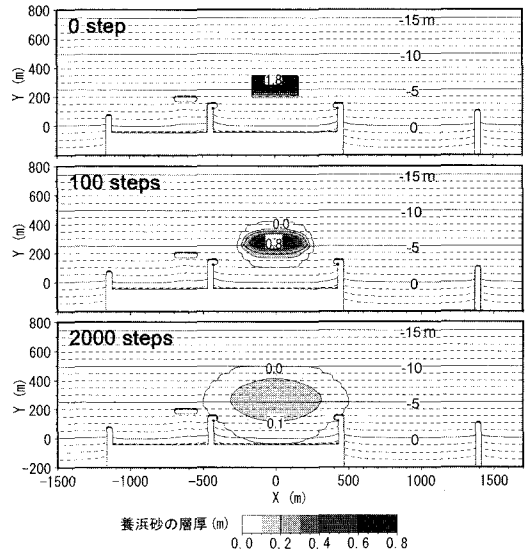


図-4 沖合投入砂の2000ステップ (80日相当) までの移動状況 ($d_{50} = 0.15$ mmの細砂: 平衡勾配 1/50)

でヘッドランドと離岸堤を設置し、施設が設置された条件下での海底地形の再現を行った。表-1 に示す条件を設定し、120日相当ステップの波を作用させた場合の再現結果が図-3 である。ヘッドランド背後の波の遮蔽域での汀線前進や離岸堤背後での舌状砂州の形成などは再現状況が再現できた。

上述の計算で得られた安定した海浜において、 $d_{50} = 0.15$ mm の細砂 (平衡勾配 1/50) を沖合の水深 5 m 付近に長方形に投入し、2000ステップ (80日相当) までの移動状況を調べたのが図-4 である。長方形に投入された砂は沿岸方向に緩やかに拡散している。2000ステップではヘッドランド間の沖合全体に広がっており、汀線付近での養浜効果は現れなかった。このような細粒の土砂を一宮海岸沖に投入しても養浜効果は見られないことになる。

同様にして、中央粒径が約 0.3 mm の中砂 (平衡勾配 1/20) を同じ形状に投入した場合の土砂の拡散状況を調べたのが図-5 である。この場合、投入時の海浜縦断勾配が 1/20 より緩やかなために投入土砂は釣鐘状に岸向きに移動し、最終的にヘッドランド間に帯状に堆積した。

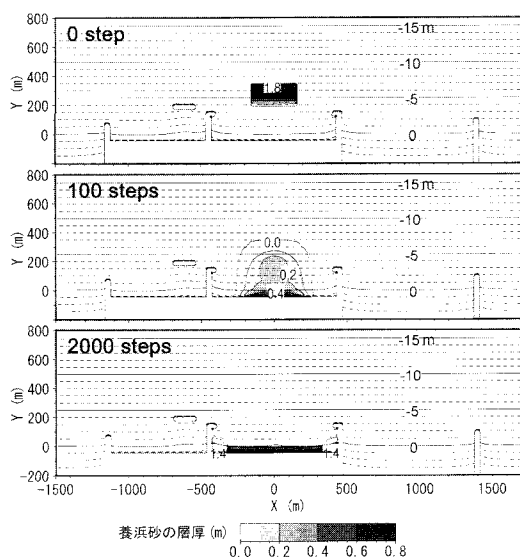


図-5 沖合投入砂の2000ステップ（80日相当）までの移動状況（ $d_{50}=0.3$ mmの中砂：平衡勾配1/20）

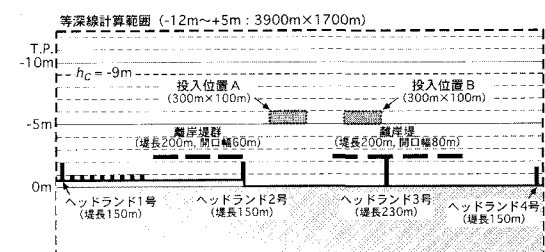


図-7 数値計算の条件設定

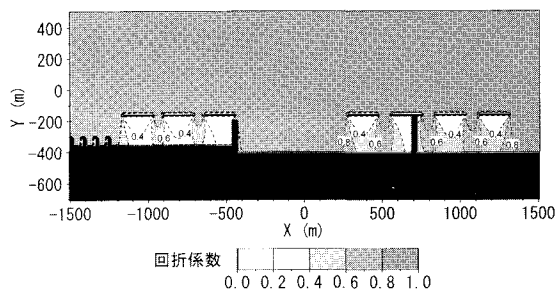


図-8 不規則波の方向分散法によって求めた波高分布

これは前節で述べた観測結果とよい一致を示す。

すなわち、投入土砂の養浜効果は投入土砂の粒径が決定的に重要であり、砂の平衡勾配は粒径に依存するので、現況と同じ粒径の細砂を用いた場合沖合部の海底面を保持する上では役立つものの、汀線付近での保全効果は期待できない。逆に、粗な粒径を用いた場合、その平衡勾配が大きいために岸向きの急速な移動が起こり、汀線付近に帯状に堆積することが分かる。

(3) 北九十九里浜への適用

前節では海底地形が1/50と相対的に急な一宮海岸のヘッドランド群の沖合で養浜を行った場合の計算結果について述べた。ここでは同じ方法を海底勾配が平均で約1/100と緩い北九十九里浜を対象として養浜時投入土砂の移動を予測した。まず図-6は、北九十九里浜の2003年3月の深浅図である。図のように、この海岸にあっては北側には3基の離岸堤が設置されており、またこれら3基の離岸堤の南端には突堤も配置されている。さらにこの突堤の南約720 mには別に4基の離岸堤が設置されている。すなわち、北九十九里浜にあっては、離岸堤群

が設置されていることが一宮海岸との相違である。しかも離岸堤群はほぼ連続して設置された場合（開口幅60～80 m）と、720 mと大きく間隔を開けて設置した場合とがあるので、土砂投入においては土砂の投入位置と離岸堤との相対関係が重要になる。

このことを考慮し、数値計算にあつては図-7に示す条件を設定した。一宮海岸と同様展開座標を用い、図-6から平均的な海底勾配を1/100として養浜砂の移動を追跡した。波は直角入射とした。図-8は不規則波の方向分散法によって定めた波高分布である。計算は2ケース行った。投入土砂の粒径は現況と同じ0.15 mm（平衡勾配1/50）と一定とし、ケース1ではヘッドランド開口部に投入、ケース2では離岸堤群沖に投入して移動状況を調べた。

計算結果を図-9に示す。ケース1のように開口部に養浜した場合、投入土砂はスムーズに岸へ移動し汀線付近に堆積した。一方、離岸堤群沖に土砂を投入したケース2では、離岸堤群により土砂移動が一旦ブロックされ

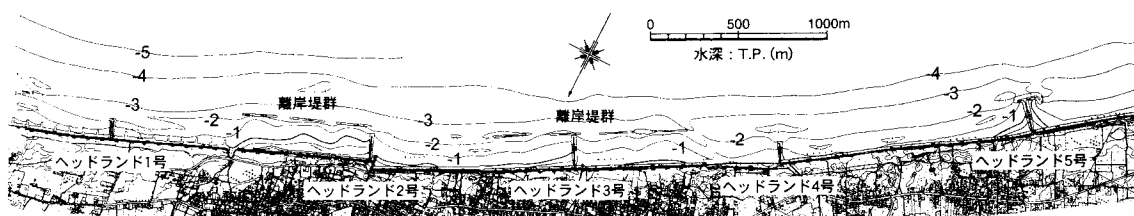


図-6 北九十九里浜の2003年3月の深浅図

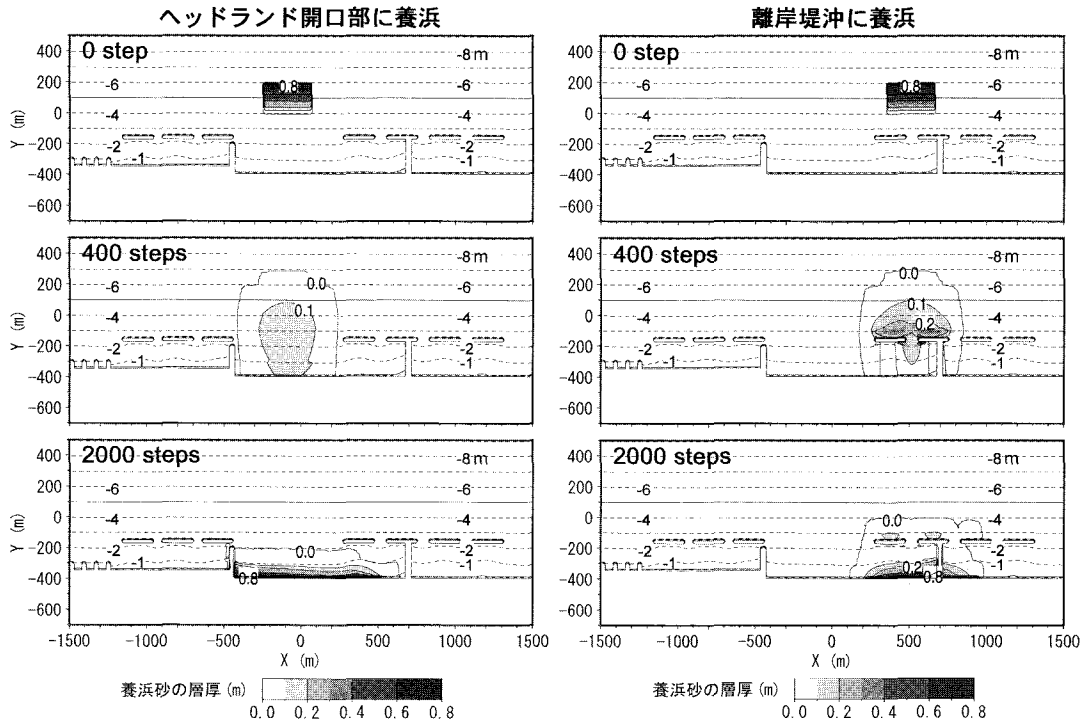


図-9 沖合投入砂の移動状況（北九十九里浜）

るが、開口部から岸向きに運ばれた。このように北九十九里浜にあっては海浜勾配が1/100と緩やかなために、平衡勾配が1/50となる0.15 mmの粒径の土砂であっても十分な養浜効果が発揮されることが分かった。ただし、ここでは直角入射条件としているが、実際には北寄りから入射し、南向きの沿岸漂砂が生じることから、離岸堤群沖に土砂を投入した場合、離岸堤の開口部からの岸向き移動が小さいので、その間に下手側へと流される土砂量が多くなると考えられる。この点については実際には斜め入射波での予測計算が必要となる。

4. 結 論

- ①投入砂の粒径を考慮した沖合養浜時3次元海浜変形予測モデルを構築した。これによれば従来の汀線変化モデルでは予測が全く困難であった、沖合養浜時の海浜変形を予測可能である。
- ②一宮海岸でのカラーサンドを用いた現地実験の結果はモデルによりうまく再現できた。
- ③北九十九里浜の海浜縦断勾配は1/100と、九十九里浜南部の一宮海岸の1/50と比較して緩い。このため北九十九里浜では0.15 mm程度の細粒土砂であっても沖合に投入された土砂は岸向きに移動し、汀線付近に堆積して保全効果が発揮される。これに対して一宮海岸では侵食

によって海底勾配が大きくなってしまっていることから、細粒の土砂では養浜効果が出にくい。

- ④海底勾配の急な一宮海岸にあっては0.3 mm程度の砂は岸へと運ばれるが、0.15 mmの砂は沖合に流出し、保全効果が発揮されない。

- ⑤このことは、細粒成分の多い浚渫土砂を養浜材として用いた場合、粒径に依存した平衡勾配との関係で、投入土砂の歩留まりが北九十九里浜では良好であるが、一宮海岸では歩留まりが悪いことを意味している。

参 考 文 献

- 市川慎一・宇多高明・三波俊郎・古池 鋼・木戸浩彦・星上幸良 (2001)：外洋に面した海岸における河口処理と河口地形の応答—九十九里浜南部に流入する南白亀川および一宮川河口の例—, 海岸工学論文集, 第48巻, pp. 621-625.
- 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.
- 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.
- 芹沢真澄・宇多高明・星上幸良 (2005)：前浜養浜時の浜崖形成のモデル化, 海洋開発論文集, 第21巻, pp. 1011-1016.
- Dean, R. G. (2002)：Beach Nourishment-Theory and practice, World Science, 399 p.