

静岡海岸における sand body の発達と移動および沖合での細砂移動の予測

Development and Movement of Sand Body on Shizuoka Coast and Prediction of Fine Sand Movement in Offshore Zone

福濱方哉¹・山田浩次²・宇多高明³・芹沢真澄⁴・三波俊郎⁵・石川仁憲⁶

Masaya FUKUHAMA, Koji YAMADA, Takaaki UDA, Masumi SERIZAWA, Toshiro SAN-NAMI
and Toshinori ISHIKAWA

On the Shizuoka coast, many detached breakwaters have been constructed since 1970 as a measure against beach erosion. After their construction, sand movement as a sand body which is mainly composed of gravel and has a movement velocity of 260 m/yr was observed in the zone shoreward of these detached breakwaters. Due to the analysis of bathymetric survey data, fine sand movement was also found in the zone offshore of the detached breakwaters apart from the gravel movement near the shoreline. In this study, a model for predicting both the movement of a sand body and fine sand movement in the zone off the detached breakwaters is proposed.

1. まえがき

静岡・清水海岸は、図-1に示すように駿河湾西岸に位置し、安倍川河口から三保松原砂嘴まで延長17.8kmを有する海岸であり、主に安倍川からの流出土砂により形成されてきた。このうち、静岡海岸は安倍川河口から滝ヶ原川河口までの7.8kmを指し、その北側、三保松原砂嘴の外縁に沿って延びる海岸が清水海岸と呼ばれる。静岡海岸では、安倍川河道において1967年まで行われた大規模な砂利採取により河川流出土砂量が激減し、これに伴って安倍川河口から三保松原砂嘴先端へと向かう北向きの沿岸漂砂とのバランスが失われ、侵食域が河口部から北向きに広がっていった(宇多, 1997)。しかし砂利採取の禁止とともに1982/1983年頃から河口流出土砂量が再び増加し、過去に激しく侵食されて護岸が波に曝された地先においても再び土砂の堆積がみられるようになった。一方、静岡・清水海岸では1970年代から始まった激しい侵食への対策として多数の離岸堤が設置されたが、離岸堤群の設置区域にあっては土砂が塊となって北向きに移動し、その移動速度が約260m/yrであることが明らかにされた(宇多, 1997)。土砂堆積は「砂の塊」

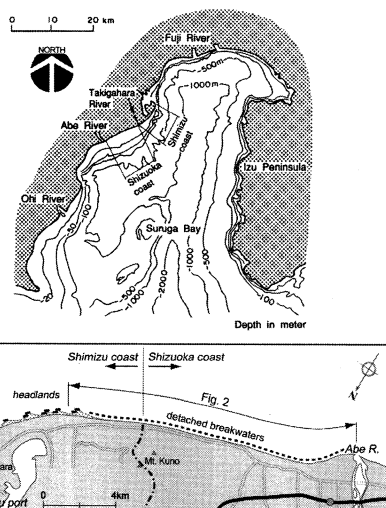


図-1 静岡清水海岸の位置

が空間的に移動するという特徴を示すことから、sand body の移動現象として捉えることが可能である。このような sand body の移動について、宇多ら(2007)は、芹沢ら(2002)の等深線変化モデルを用いてその発生と移動機構を明らかにした。一方、宇多らの示した海浜縦断面形と底質粒径の水深方向分布によれば、sand body の移動が起きている離岸堤群の岸側は粗粒の底質からなるが、これとは別に、沖合には細砂の流れがあり、sand body の移動よりも速い速度で移動・拡散している可能性が示された。本研究では両者を区別し、前者を sand body と呼ぶ。しかしながら宇多ら(2007)のモデルは単一粒径を対象としているため、このような離岸堤沖での細砂の移動機構の解明は課題として残されていた。本

1 正 会 員	工修	国土交通省国土技術政策総合研究所海岸研究室長
2 正 会 員		国土交通省国土技術政策総合研究所海岸研究室主任研究官
3 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
4 正 会 員		海岸研究室(有)
5		海岸研究室(有)
6 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

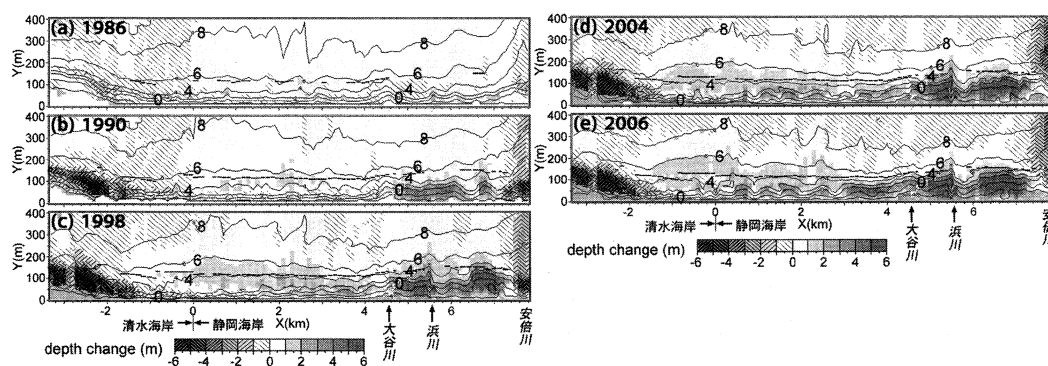


図-2 静岡清水海岸の水深変化量 (1985年基準)

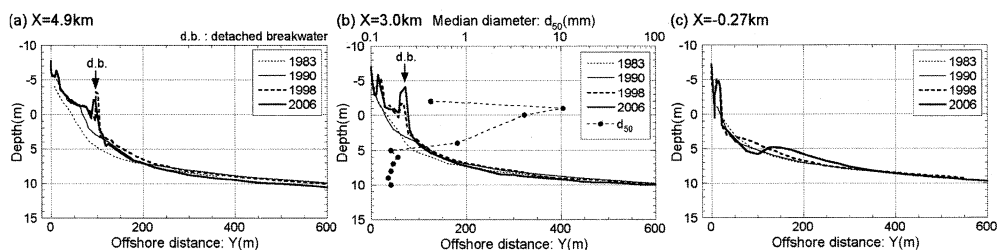


図-3 海浜縦断形の変化

研究は、離岸堤群の岸側での sand body の発達と移動とともに、離岸堤群沖での細砂の流れを予測するモデルの構築を行うものである。

2. Sand body の発達と移動の実態

(1) 海底地形の平面変化

宇多ら (2007) は、静岡・清水海岸における1985年基準での海底地形変化量を算出した。ここではこの結果を抜粋し、sand body の発達と移動の実態を明らかにする。図-2には各時期の地形変化量と、比較年のうち後者の時期の等深線形状も示す。なお座標系としては海岸線に沿って定めた展開座標 (宇多ら, 1998) を用いる。1986年まで (図-2(a)) では、 $X=-2\text{km}$ と右端の安倍川河口付近で集中的な侵食が始まった。またこの当時 $X=0-4\text{km}$ 区間の水深6mの等深線は離岸堤を連ねる線と平行に伸びていた。1990年まで (図-2(b)) では、 $X=-2\text{km}$ と安倍川河口付近での集中的な侵食が顕著となり、 $X=-2\text{km}$ 以北 (図では左側) の全域で著しい侵食が起きた。その際の地形変化は水深4m以浅で顕著である。安倍川河口でも侵食が起きているが、ここでの侵食は水深3m以浅の集中的な侵食と、沖合を含む広い区域での侵食とに区別される。一方、 $X=4.7-6.4\text{km}$ の離岸堤群の岸側では連続した砂の堆積域 (sand body) が見られる。以後この堆積域は変動を示しつつも北側へと広がって行く。また図-2(a)では $X=0-4\text{km}$ 区間の水深6mの等深線は離

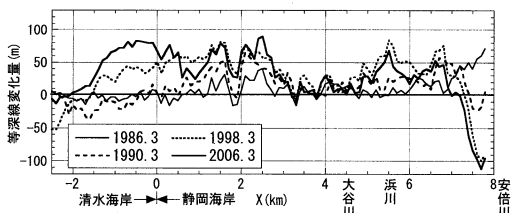
岸堤を連ねる線と平行に伸びていたが、図-2(b)ではこの区域の6mの等深線が1985年と比較して約30m沖方向へ前進している。

1998年まで (図-2(c)) では、安倍川河口での侵食が一層激しくなる一方、大谷川河口を先端とする sand body が $X=4.5\text{km}$ から $X=7.2\text{km}$ まで連続的に繋がった。また $X=0-4\text{km}$ 区間の水深6mの等深線が前進し、離岸堤群沖での砂の堆積が明瞭に見られるようになった。2004年まで (図-2(d)) では、 $X=-1.4-2\text{km}$ 区間の離岸堤沖の水深6mの等深線の膨らみ位置が2002年の $X=0.5\text{km}$ 付近からさらに北側へと移り、沖合での堆積域もまた時間経過とともに北側へと移動したことが分かる。2006年まで (図-2(e)) では、sand body 本体が安倍川河口から $X=3\text{km}$ 付近まで進んできた。また $X=-1.4-0.5\text{km}$ 区間では離岸堤群沖の水深6mの等深線の前進が続き、1985年当時と比較して最大80mもの等深線の前進が見られ、離岸堤群の沖合が浅くなったことが分かる。

(2) 海浜縦断形の変化と d_{50} の水深方向分布

代表測線に沿う縦断形変化と d_{50} の水深方向分布として、 $X=4.9\text{km}$ の縦断形変化を図-3(a)に示す。この測線では、離岸堤の岸側沖側を連ねるようにしてほぼ水深7m以浅において堆積が生じている。これより波による地形変化の限界水深 (h_c) がほぼ7mにあることが分かる。砂の堆積域の北進とともに2006年には離岸堤群背後

(a) -6m等深線の変化量



(b) 汀線変化量

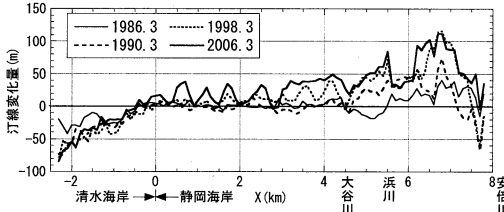


図-4 水深6mの等深線と汀線の変化量 (1983年基準)

が砂で埋め尽くされた $X=3.0\text{km}$ の縦断形変化を d_{50} の水深方向分布とともに図-3(b)に示す。ここでも水深7m以浅で顕著な堆積が生じたが、汀線付近は礫を主成分とし、 $h_c=7\text{m}$ 以深の $d_{50}=0.15\text{mm}$ とは大きな違いを示す。すなわち離岸堤の岸側に堆積した土砂は礫を主とする粗粒な底質であり、その沖の細砂の堆積域とは明確に区分されることが分かる。

図-3(c)は $X=-0.27\text{km}$ の縦断形変化である。ここでは顕著な堆積が始まっていないため鉛直上方に凹な縦断形が保たれている。各時期の縦断形を注意深く調べると、2006年には水深5m付近にバーが形成されている。隣接の $X=0.5\text{km}$ における d_{50} の水深分布によれば、水深5m付近は $d_{50}=0.2\text{mm}$ 程度の細砂であった。これより主に礫から構成される顕著な堆積域の北進が始まる前に細砂が移動して離岸堤沖に堆積した結果、バーが形成されたと推定できる。

3. 離岸堤群の岸側と沖合領域での海浜変形の比較

図-2では、離岸堤群沖の水深6mの等深線が細砂の堆積とともに次第に前進するという特性が見出された。そこで水深6mの等深線の変化の詳細を調べるために、1983年における水深6mの等深線位置を基準として各年の水深6mの等深線の変化量を算出し、沿岸方向分布として整理したのが図-4(a)である。比較のために1983年の汀線を基準とした各年の汀線変化量の分布も図-4(b)に示す。

汀線変化には安倍川河口から sand body の進行とともに堆積域が次第に北側に広がるという変化が現れているのに対し、水深6mの等深線の変化では、sand body の移動より早い時期に静岡海岸北部から清水海岸付近で堆積

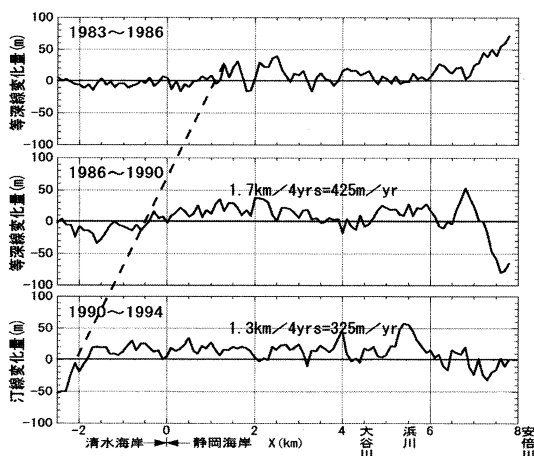


図-5 水深6mの等深線の変化量 (4年おきの差分)

域が北側へと広がっている。図-5は1983年から4年おきに水深6mの等深線位置の変化量を算出し、それらの沿岸方向分布をまとめたものであるが、1983~1986、1986~1990、1990~1994の3時期には図中に破線で示すように堆積域の北側への広がりが起きている。このことから各4年間の堆積域の移動をもとに移動速度を算出すると、1983~1986年と1986~1990年の比較から堆積域の広がりは速度は425m/yr、1986~1990年と1990~1994年の比較では325m/yrとなり、平均移動速度は375m/yrとなった。この値は sand body の移動速度260m/yrと比較すると1.44倍である。

4. 粒径を考慮した等深線変化モデルの適用

宇多ら (2007) では離岸堤より岸側で起こる sand body の発達と移動に関する予測モデルの構築に力点が置かれている。一方、実態データから明らかにように、離岸堤沖の水深4m付近より大きい沖合では $d_{50}=0.2\text{mm}$ 程度の細砂が堆積している。これを考慮すると、離岸堤群の陸側での粗粒土砂の sand body としての移動過程と、離岸堤沖を細砂が移動する過程を同時にモデル化することが必要となる。本研究では、熊田ら (2005) の粒径を考慮した等深線変化モデルを用いてこのモデル化を行った。

まず、計算対象の海岸線は元々ほぼ直線状であることから、現況再現計算では sand body の発達が見られる以前の1983年測量の海底地形を展開座標の手法により直線平行等深線に置き換えた。計算区域は静岡海岸の $X=6.0\text{km}$ から清水海岸の $X=-2.0\text{km}$ までの区域である。この区間には現在合計67基の離岸堤が設置されている。初期海底地形については、実測縦断形を参考とし、水深4m以浅を1/10、水深4m~6mを1/30、6m以深を1/70と、

表-1 計算条件

計算対象範囲	静岡海岸・清水海岸の離岸堤群区間 9.1km: (静岡海岸 No.60~清水海岸 No.65)
計算期間	1983~2006 年 (23年間)
初期地形	1983 年地形を展開座標でモデル化した直線平行等深線 (海底勾配: 4m以浅=1/10, 4m~6m=1/30, 6m以深=1/70)
粒径構成	$N=3$ 粒径 (ただし第3の粒径は不動の仮想粒径とし漂砂係数=0と置く) - 代表粒径 細粒 $d^{(1)}=0.2\text{mm}$, 粗粒 $d^{(2)}=2\text{mm}$, 大粒 $d^{(3)}=100\text{mm}$ - 初期粒径含有率: $\mu_1=0.0$, $\mu_2=0.0$, $\mu_3=1.0$
交換層の幅	$B=1\text{m}$ ($B=\Delta h/\tan\beta$: 混合層厚 $\Delta h=0.03 \times H_b \approx 0.1\text{m}$, $\tan\beta=1/10$)
入射波条件	- 砕波波高 $H_0=3\text{m}$, 初期砕波角 $\theta_w=10^\circ$ (5%程度出現頻度波: $H_0=3\text{m}$, $T=9\text{s}$, 波向 S に沖から砕波点の屈折考慮).
潮位条件	M.S.L. T.P.+0.0m
限界水深・バーム高	地形変化の限界水深 $h_c=7\text{m}$ バーム高 $h_R=3\text{m}$
漂砂量係数	漂砂量係数内の $A=0.0092$ 岸沖・沿岸漂砂量比 $\gamma=0.2$ 小笹・ブランプトン項の係数 $\zeta=3.24$
沿岸・岸沖漂砂の水深分布	宇多・河野 (1996) の3次式
平衡勾配	$\tan\beta_c^{(1)}=1/35$ (細粒), $\tan\beta_c^{(2)}=1/10$ (粗粒), $\tan\beta_c^{(3)}=1/3$ (大粒)
土砂落ち込みの限界勾配	陸上: 1/2, 水中: 1/2
計算等深線範囲	$z=+3.5 \sim -7.5\text{m}$
計算メッシュ	沿岸方向 $\Delta X=40\text{m}$, 鉛直方向 $\Delta Z=1\text{m}$
計算時間間隔	$\Delta t=1\text{hr}$
境界条件	- 右端 (上手端): $Q_m^{(1)}=7 \text{ m}^3/\text{yr}$ (細粒), $Q_m^{(2)}=7 \text{ m}^3/\text{yr}$ (粗粒) - 左端 (下手端): 漂砂通過境界 (沿岸漂砂の沿岸方向変化率 $dq_s/dx=0$) - 岸沖端: $q_s=0$ (漂砂の流出入なし)
数値計算法	陽解法による差分法
波浪計算法	方向分散法 (酒井ら, 2002) $S_{\text{max}}=25$

水深の増加とともに海底勾配が緩くなる鉛直上方に凹な縦断面とし、海浜形状は沿岸方向に一樣とした。粒径構成としては3粒径を考え、第1は細粒、第2は粗粒、第3は移動ができない大粒径 (漂砂量係数=0) とした。これらの代表粒径は0.2mm, 2mm, 100mmとし、初期における各粒径の含有率は $\mu_1=0.0$, $\mu_2=0.0$, $\mu_3=1.0$ とする。また各粒径に対応する平衡勾配はそれぞれ1/35, 1/10, 1/3とした。一般に、海浜変形は年数回の発生頻度となるような高波浪時に著しくなるので、出現頻度がほぼ5%の波浪 ($H_0=3\text{m}$, $T=9\text{s}$) を考え、この波が卓越方向であるSから入射するとし、沖合から砕波点までの屈折を考慮して初期汀線に対して $\theta_w=10^\circ$ の入射角で作用するとした。境界条件として、宇多ら (1997) による自然状態の沿岸漂砂量 $1.3 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{yr}$ を目安にして、計算領域の右 (南) 端から細粒分、粗粒分がそれぞれ $7.0 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{yr}$ の流入を仮定し、左端では沿岸漂砂がそのま

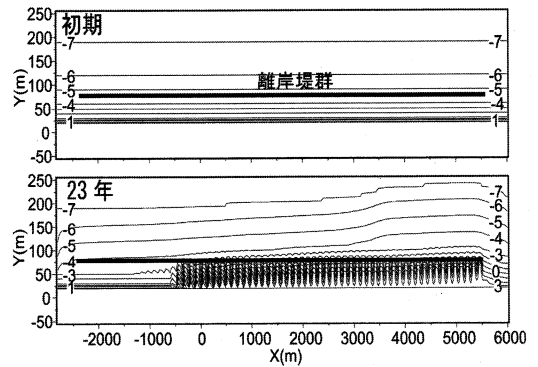


図-6 Sand body の移動を表す等深線

ま流出するという通過境界を設けた。 h_c とバーム高 h_R は実測値をもとにそれぞれ7m, 3mとした。離岸堤の堤長は80m, 透過率は $K_t=0.5$, 開口幅は40mで、離岸距離は80mとした。設置基数は実績にあわせて沿岸方向に67基とした。再現期間は顕著な sand body の発達が見られた1983年から2006年までとした。そのほか漂砂量係数などは表-1に示すとおりである。

離岸堤群が設置された海岸における sand body の移動のモデル化にあっては、離岸堤をモデルに組み込む必要がある。このためまず開口部を有する多数の透過堤を並べた離岸堤群に対して、酒井ほか (2002) の方向分散法により離岸堤背後の回折係数、回折波向の分布を求めた。この結果を用いて離岸堤なしの場合の砕波波高に回折係数を乗じて波高を低減させた。一方、離岸堤より岸側の砕波波向には回折波向を用いた。離岸堤の沖側・岸側を連続領域として扱い、離岸堤群の効果は背後の波浪場の静穏化効果のみで考慮した。

5. 計算結果

図-6には初期形状と23年後の計算結果を示す。右端から流入した沿岸漂砂は沿岸に並ぶ多数の離岸堤によって自由な移動が妨げられる。このため個々の離岸堤の陸側で次第に舌状砂州が形成される。汀線付近から水深4mまでは海底勾配が1/10と急なため、平衡勾配の大きな礫が集中的に堆積し、sand body を形成しながら北向きに進んでいく。一方、離岸堤沖では平衡勾配の小さな細砂が選択的に移動し、sand body よりも速い速度で下手方向へ移動することが分かる。海浜変形はこれらが重合した形で起こり、sand body が左方向へと移動しつつ、離岸堤沖での細砂の堆積域が北向きに広がっていく。

図-7(a)には、計算開始後23年間における離岸堤群背後の sand body の発達と移動状況をまとめて示す。Sand body は安倍川河口側から時間経過とともに進行し、その

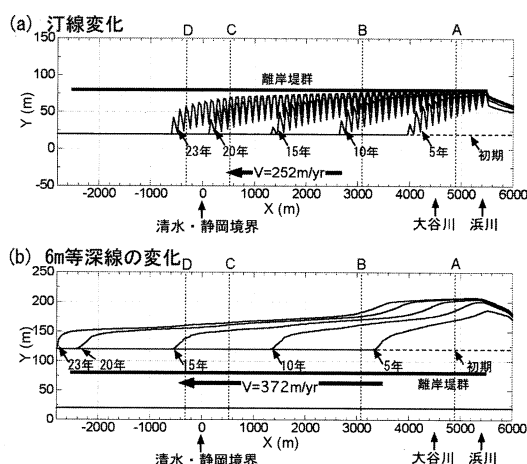


図-7 計算開始後23年間の汀線と水深6m等深線の変化

移動速度は252m/yrとなる。これは実測移動速度260m/yr (宇多, 1997) と非常によく一致する。また図-7(b)には水深6mの等深線で表される堆積域の先端部の移動速度も示すが、この移動速度は372m/yrであり、sand bodyの移動速度の1.48倍となった。これは図-6で求めた移動速度比1.44と非常によい一致を示す。

X=4.88, -0.32kmに位置するA, D断面の縦断面変化と対応する含有率の岸沖分布を示す。まず、A断面では、図-8のように離岸堤を貫いて急傾斜で礫が堆積すると同時に、離岸堤沖には細砂が緩やかな傾斜を持って堆積する。D断面では図-9のように離岸堤の岸側ではsand bodyが到着していないことから礫の堆積は起こらず、離岸堤沖において細砂が緩勾配をなして堆積するのみである。以上の結果は実測縦断面の変化に見られた特徴と非常によい一致を示す。

6. あとがき

本研究では、異なる粒径の土砂が河口から流入した場合の砂移動予測を行った。この場合、沖合の緩勾配の海底面を細砂が移動するが、それが沿岸漂砂として移動するには、細砂の堆積が起きている区域を代表する沖合の等深線、例えば水深6mの等深線が沿岸方向に勾配を持つことが必要とされる。これを実測値で確認するため図-2を再度参照すると、安倍川河口近傍では河口に近接するほど6mの等深線が沖向きに突出し、沿岸方向勾配が大きくなっている。このような等深線の沿岸方向勾配があるからこそ細砂の沿岸方向移動が可能となる。したがってこの種の問題について考える場合には、汀線の沿岸方向勾配に加えて沖合の等深線の沿岸方向勾配に着目することが重要となる。

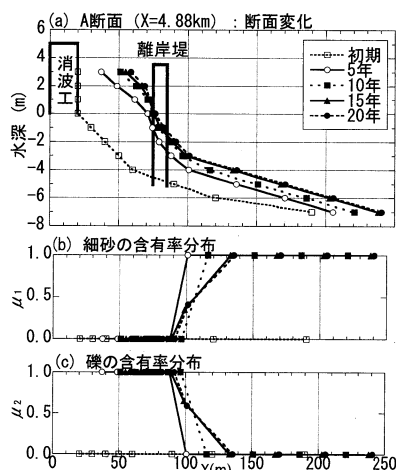


図-8 縦断面変化と礫・細砂の含有率分布 (A断面)

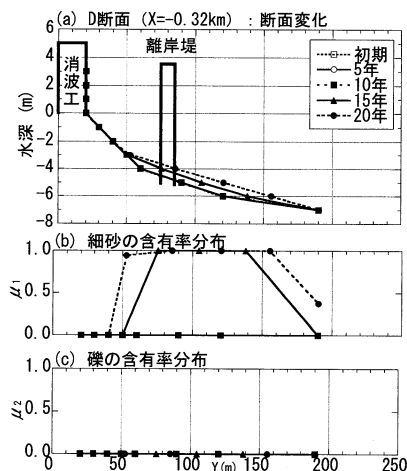


図-9 縦断面変化と礫・細砂の含有率分布 (D断面)

参考文献

- 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, 539/II-35, pp.121-139.
- 宇多高明 (1997) : 「日本の海岸侵食」, 山海堂, p.442.
- 宇多高明・住谷迪夫・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.
- 宇多高明・西谷 誠・芹沢真澄・三波俊郎・石川仁憲 (2007) : 等深線変化モデルによる sand body 移動の数値解析, 地形, Vol. 28, pp. 399-414.
- 熊田貴之・宇多高明・芹沢真澄・三浦正寛 (2005) : 波の遮蔽域形成に伴う3次元地形・粒径変化の予測法, 海洋開発論文集, 第21巻, pp.1029-1034.
- 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.
- 芹沢真澄・宇多高明・三波俊郎・古池 鋼・熊田貴之 (2002) : 海浜縦断面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.