

# 沖合への土砂損失防止のためのサンドレイズ工法の提案

## A Method Preventing Offshore Sand Loss Owing to Ebb Tidal Currents

宇多高明<sup>1</sup>・芹沢真澄<sup>2</sup>・三波俊郎<sup>3</sup>・古池 鋼<sup>3</sup>・石川仁憲<sup>4</sup>・宮原志帆<sup>3</sup>

Takaaki UDA, Masumi SERIZAWA, Toshiro SAN-NAMI, Kou FURUIKE  
Toshinori ISHIKAWA and Shiho MIYAHARA

In a tidal inlet, a part of littoral sediment is transported offshore owing to the ebb tidal currents, resulting in permanent loss of nearshore sand. The ordinary sand-bypassing method, in which simply sand deposited upcoast is transported downcoast, is ineffective for preventing this sand loss. In this study, a sand-raise method, in which sand is pumped up from an offshore zone and disposed of on downcoast shoreline, is proposed, taking Imakiri-guchi inlet of Lake Hamana as an example. The effectiveness of the method is numerically investigated using the BG model proposed by Serizawa et al. (2006). It is shown that this method can be a practical tool to prevent offshore sand loss.

### 1. はじめに

一方向に卓越した沿岸漂砂が構造物により阻止された場合、構造物の上手側に堆積した砂を下手側へと運ぶ手法はサンドバイパスとして知られており、多数の海岸での実績がある。この手法は文字通り「砂をバイパス」することに主眼があることから、上手側で堆積したと同量の砂が下手側海岸から失われていることを前提としている。しかし海岸の条件によってはこれが必ずしも成立しない場合もある。tidal inletを跨ぐ海岸の場合がこれに該当する。すなわち、tidal inletにあっては入退潮流があり、この流れはその性質上沿岸流とほぼ直交する方向に流れ、結果として強い沖向き、または岸向き漂砂を引き起こし、沿岸漂砂の系からの砂の損失を引き起こすと考えられるからである。とくに退潮流の作用により、沖合に規模の大きなebb tidal delta (以下、沖合デルタと呼ぶ)が形成されることを考えると、沖向き漂砂の発生とそれによる土砂損失は無視できない。このような視点から、宇多ら(2008)は、芹沢ら(2006)によるBGモデル(BaGnold概念に基づく海浜変形モデル)を沖合デルタの発達過程へ応用した宇多ら(2007)のモデルを基本とし、漂砂量式を改良し岸沖漂砂と沿岸漂砂の強度の違いを考慮できるようにすることにより、静岡県浜名湖今切口を対象として沖合デルタの発達を定量的意味から明らかにした。その上でtidal inletにおける沖への土砂損失防止策について検討し、例えば導流堤沖の250m×250m、水深6~7mの矩形領域で浚渫を行い、導流堤のすぐ下手側

の水深0~2mに投入する手法の有効性を示した。この手法を宇多ら(2008:前報)ではサンドバイパスの一タイプとしたが、沖合への砂の損失を防止可能という特徴は従来のサンドバイパスとは意味が全く異なることから、本研究では新たに「サンドレイズ工法」と名づけることとする。この工法は、導流堤上手側の堆積域から砂を掘削して下手側へ投入するのではなく、導流堤沖で砂を掘削し、それを下手側海岸へ投入する手法を用いる。この工法によれば、サンドバイパス工法と相違し、上手側の汀線後退を招くことなしに下手側の汀線を前進させることができる。しかしながら、サンドレイズ工法による砂の掘削位置などを変えた場合の砂の損失防止効果の相違や、周辺地形への影響は明らかではない。そこで導流堤の先端付近から噴流軸線上で掘削位置を変えるとともに、同一水深であるが噴流軸の東西に掘削域がある場合の地形変化予測を行い、掘削域の違いと沖合への砂損失防止効果の関係について調べた。掘削における砂の採取量はいずれも10万m<sup>3</sup>/yrとし、予測期間は前報と同様10年とする。

### 2. 基本式と計算条件

基礎式については、既に宇多ら(2008)に示したので要点のみ示す。沖から岸向きにx軸を、汀線とほぼ平行にy軸をとったデカルト座標(x, y)を考え、高さZ(x, y, t)を解くべき変数とする。波がtanβの一樣勾配海岸に斜め入射する場合、ネットの砂輸送フラックス(q<sub>wx</sub>, q<sub>wy</sub>)は式(1)で与えられる。

$$q_{wx} = \frac{G_{wx}}{\tan \beta_c} \left[ \tan \beta_c \cos \theta_w - \frac{\partial Z}{\partial x} \right] \dots\dots\dots (1a)$$

$$q_{wy} = \frac{G_{wy}}{\tan \beta_c} \left[ \tan \beta_c \sin \theta_w - \frac{\partial Z}{\partial y} \right] \dots\dots\dots (1b)$$

ここに、G<sub>wx</sub>, G<sub>wy</sub>については式(2)~(6)が成立する。

1 正会員 工博 (財)土木研究センター常務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 正会員 海岸研究室(有)  
3 海岸研究室(有)  
4 正会員 工修 (財)土木研究センターなぎさ総合研究室

$$G_{wx} = \frac{K_x}{K_y} G_{wy} \dots\dots\dots (2)$$

$$G_{wy} = C_0 K_y \Phi = C_0 K_y \varepsilon(Z) (EC_g)_{b0} \cos^2 \alpha_b \tan \beta_c \dots (3)$$

$$C_0 = \frac{1}{(\rho_s - \rho)g(1-p)} \dots\dots\dots (4)$$

$$\int_{-h_c}^{h_R} \varepsilon(Z) dZ = 1 \dots\dots\dots (5)$$

$$\varepsilon(Z) = \begin{cases} = \frac{1}{h_c + h_R} & (-h_c \leq Z \leq h_R) \\ = 0 & (Z < -h_c, h_R < Z) \end{cases} \dots\dots\dots (6)$$

なお、 $q_x$ は漂砂フラックスの岸沖成分(岸向きが正)、 $q_y$ は沿岸成分、 $\theta_w$ は波向とx軸のなす角、 $(\partial Z/\partial x, \partial Z/\partial y)$ はZの勾配ベクトルで、その方向は等深線直角方向岸向き、その大きさは $\tan\beta$ に等しい。 $\phi$ は単位時間、単位面積当りの波のエネルギー逸散率、 $(EC_g)_{b0}$ は砕波点におけるエネルギーフラックス、 $\alpha_b$ は砕波角、 $K_x$ は岸沖漂砂量係数、 $K_y$ は沿岸漂砂量係数、 $C_0$ は水中重量表示と砂の堆積表示での漂砂量係数の比、 $\rho_s$ と $\rho$ は砂と海水の比重、 $g$ は重力加速度である。また $p$ は砂の空隙率、 $h_c$ は波による地形変化の限界水深、 $h_R$ はバーム高である。 $\varepsilon(Z)$ は沿岸漂砂量強度の水深方向分布で、本研究では一様分布とし、 $h_c$ から $h_R$ までの積分値が1となるよう式(6)で与える。 $\tan\beta_c$ は平衡勾配であり、直角入射条件の下で岸沖漂砂が0となるときの海底勾配である。

一方、退潮流に伴う漂砂 $\vec{q}_R=(q_{Rx}, q_{Ry})$ についてはBagnold(1963)による掃流砂式を海底勾配に関して線形近似したBailard and Inman (1981)が与えた式(7)を用いる。

$$q_{Rx} = \frac{G_R}{\tan \phi} \left[ \tan \phi \cos \theta_R - \frac{\partial Z}{\partial x} \right] \dots\dots\dots (7a)$$

$$q_{Ry} = \frac{G_R}{\tan \phi} \left[ \tan \phi \sin \theta_R - \frac{\partial Z}{\partial y} \right] \dots\dots\dots (7b)$$

ここに添字Rは退潮流の値を表す。 $\theta_R$ は退潮流の流向とx軸のなす角、 $\tan\phi$ は土砂の安息勾配である。また、係数 $G_R$ は式(8)で与える。

$$G_R = \begin{cases} = C_0 K_R F_w K_V^3 & (-h_{c2} \leq Z \leq h_{R2}) \\ = 0 & (Z < -h_{c2}, h_{R2} < Z) \end{cases} \dots\dots\dots (8)$$

$$F_w = \frac{(EC_g)_{b0}}{h_c + h_R} \dots\dots\dots (9)$$

$$K_V = \frac{V}{V_0} = K_{V1} \left( \frac{h_0}{h} \right) \dots\dots\dots (10)$$

$$K_{V1} = \left( \frac{V_1}{V_0} \right) \dots\dots\dots (11)$$

ここに、 $K_R$ は退潮流の流砂量係数、 $K_V$ は退潮流の流速比 $V/V_0$ 、 $V$ は退潮流速、 $V_0$ は河口での基準流速、 $F_w$ は波浪の作用強度の代表値であり、基準点における砕波点での波エネルギーフラックス $(EC_g)_{b0}$ を移動高で割って与え

た(式(9))。 $V_1, K_{V1}$ は水深変化のない場合の退潮流速と、河口での基準流速に対する比である。 $h_{c2}, h_{R2}$ は退潮流作用時の地形変化の限界水深および限界高である。退潮流による地形変化の限界水深・限界高さの範囲外では $G_R=0$ と置く(式(8))。流速比 $K_V$ は、式(11)の水深変化のない場合の流速比 $K_{V1}$ の平面分布を予め求めておき、予測計算ではそれを利用した。本研究では、宇多ら(2008)と同様、退潮流を噴流と考え、 $K_{V1}$ は不規則波の方向分散法(酒井ら, 2003)を応用して計算した。これに水深変化に伴う流速の変化を考慮するため、流量保存則を満足するよう、地形変化の計算過程で各時刻の水深値を用いて式(10)により補正した。なお、式(10)の右辺の分母の水深 $h$ には下限値を設けた。計算では、海浜の長期的変化予測を考え、人工構造物建設前の平均勾配を平衡勾配と置く。本モデルは、波の作用と退潮流を各時刻同時に作用させて計算するものであるが、河口では退潮流の作用のみ考え、海岸への土砂供給源としては考慮しない。また退潮流による地形変化の限界水深 $h_{c2}$ は波による限界水深 $h_c$ と同じとした。退潮流による地形変化の限界高さ $h_{R2}$ は静水面に取った。主な計算条件として、初期地形は勾配1/70の一様勾配斜面とする。平衡勾配は同じ1/70とし、水中での砂の安息勾配は1/2、 $h_c=8m$ 、 $h_R=3m$ 、 $H_b=3m$ 、砕波点の入射角 $\alpha_b=10deg$ とおく。そのほかの条件は表-1に示す。

表-1 計算条件

初期地形	一様勾配斜面1/70
平衡勾配	$\tan\beta_c=1/70$
安息勾配	$\tan\phi=1/2$
波浪条件	$H_b=3m$ 砕波波向 $\theta_w=10^\circ$ $(EC_g)_{b0}$ 算出用の砕波波高 $H_{b0}=1m$
漂砂量の水深方向分布	一様分布
沿岸漂砂量係数 $K_y$ 岸沖漂砂量係数 $K_x$	$K_y=0.0105$ $K_x=0.2K_y$
バーム高	$h_R=3m$
波による地形変化の限界水深	$h_c=8m$
退潮流の流砂係数	再現： $K_f=0.1\sim 0.3$ 将来予測： $K_f=0.3$
退潮流の作用限界高さ	$h_{R2}=0m$
退潮流の作用限界水深	$h_{c2}=8m$
河口基準水深	$h_0=1m$
流速補正の水深下限値	$h=1m$
計算メッシュ	$\Delta x = \Delta y = 50m$
計算時間間隔	$\Delta t = 5hr$
計算期間	現況再現：27年(1978年→2005年) 将来予測：10年
境界条件	岸沖端 $q_x=0$ 左右端 $dq_y/dy=0$

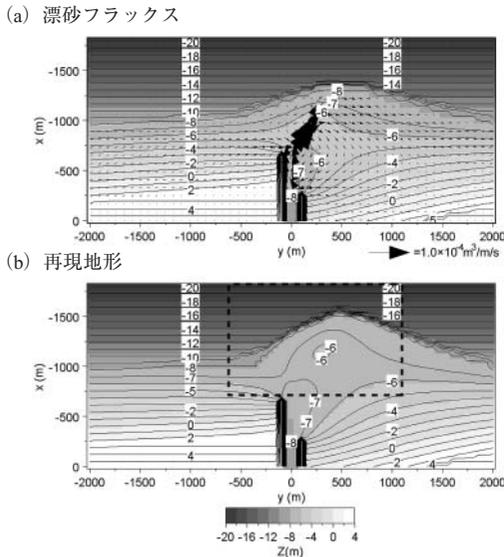


図-1 再現された漂砂フラックスとebb tidal deltaの地形 (1978~2005年)

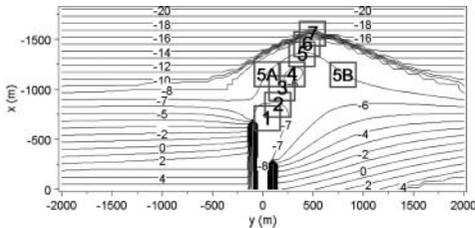


図-2 海底掘削の位置 (噴流軸上: 掘削域1~7, 同一等深線上: 掘削域5, 5A, 5B)

### 3. 沖合デルタの掘削域と海底地形変化

図-1は、初期平行等深線を仮定して動的安定地形を計算し、次に1978年地形を再現し、これを初期地形として、初期の墳流に係る係数を与えて2005年まで計算した結果のうち、2005年の漂砂フラックスと海底地形を示す。前報で明らかにしたように、1978年から2005年にかけて退潮流により西向きの沿岸漂砂がトラップされ、ebb tidal deltaの規模が増大した。またdelta外縁では $h_c$ より深く、波の作用による砂が再び汀線に戻ることができない水深10m以深へと $3.6 \text{ m}^3/\text{yr}$ の割合で土砂が落ち込んだ。これらの実態を、計算結果はよく再現できた(宇多ら, 2008の図-3,4,5参照)。またその際の漂砂フラックスは、導流堤開口部から右斜め沖に向かう噴流の軸(宇多ら, 2007の図-3参照)を境として、漂砂フラックスが一對の循環流を形成し、東側では反時計回りの、西側では時計回りの循環流となる。このように退潮流の作用と沿岸漂砂の作用が重なった形で沖合デルタの定量予測が可能なことから、現況再現結果を初期地形として与え、サンドレイズ工法の効果予測を行った。計算条件を同一として

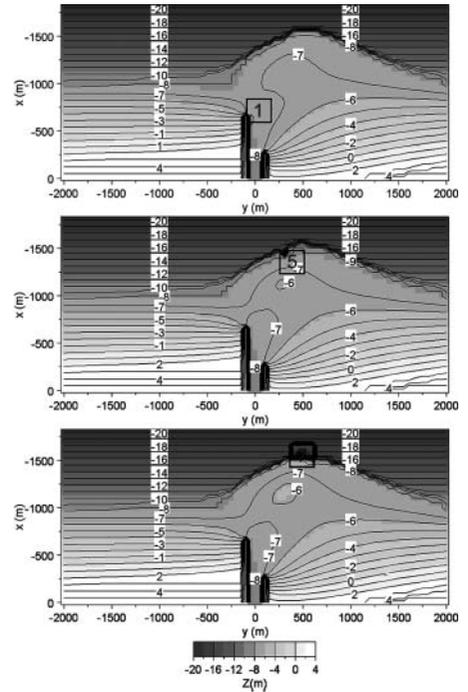


図-3 噴流軸上での掘削水深を変えた掘削域1, 5, 7での掘削後10年の地形比較

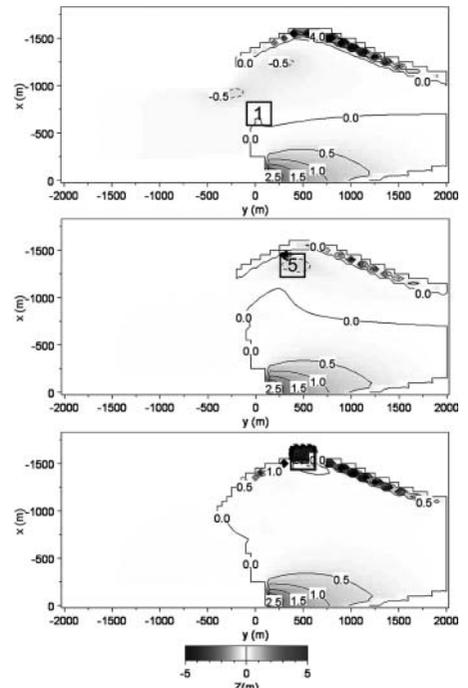


図-4 噴流軸上での掘削水深を変えた掘削域1, 5, 7での掘削後10年の地形変化

新たに掘削穴を設けて予測計算を行った。図-2は、墳流の軸線方向に250m四方の掘削域を配置した掘削域1から

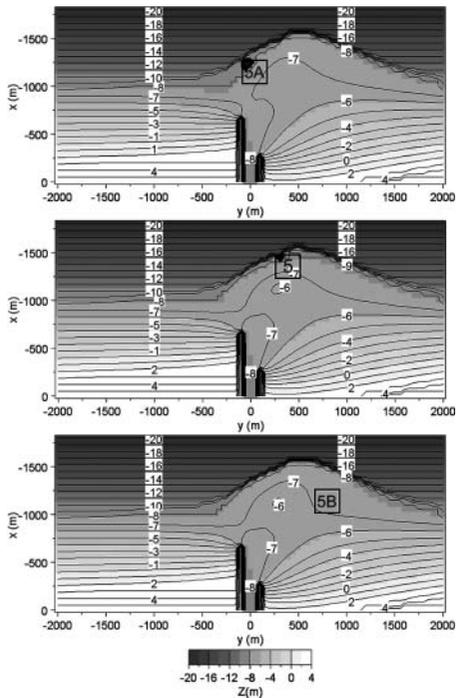


図-5 同一等深線上で掘削位置を変えた掘削域5, 5A, 5Bでの掘削後10年の地形比較

7の配置と、水深7mの等深線形状に合わせて墳流の東西に掘削穴を配置した掘削域5Aと5Bの条件を示す。掘削域5Aと5Bは、墳流軸線上にある掘削域5と同一等深線上に載ることから同じ番号5を付け、さらに沿岸漂砂の上手(A), 下手(B)の区別を付けた。現況地形において図-2に示す掘削域を設定し、現況再現と同一の表-1の条件を与えて各ケースとも10年後までの予測計算を行った。その上で、予測結果から2005年の再現地形を差し引いて地形変化量の平面分布を求めた。なお掘削土砂は導流堤下手側の水深0~2mの区域に投入している。

図-3は、墳流軸上での掘削水深を変えた掘削域1, 5, 7での掘削後10年の地形比較である。沖合のテラス面上の-7m付近を掘削した掘削域5を基準とすると、墳流の出口に近い掘削域1の場合、掘削域5では導流堤脇の-7mの閉じていた等深線が沖合の-7mと繋がり、やや反時計回りの方向に傾いた水路が形成される。掘削域5では沖合の前置斜面の一部が削られたため、そこは埋め戻しを受けることなく一部に深い穴が残される。最も沖合の掘削域7では、テラス面にはほとんど変化が生じない。

同じケースについて2005年再現地形を基準とした地形変化量の平面分布を図-4に示す。いずれの場合もサンドレイズ工法では掘削土砂を導流堤の下手側直近に置くため導流堤下手側での堆積状況はほぼ同一である。しかし掘削穴周辺では著しい相違が見られる。掘削域が墳流の出口に近い掘削域1では、沖合デルタの中央から上手側の

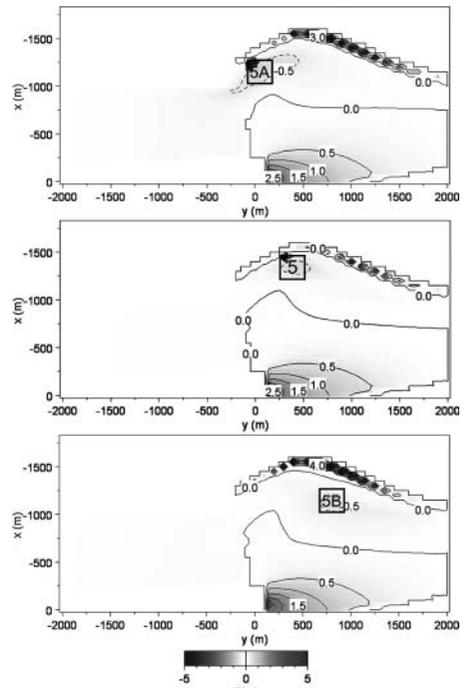


図-6 同一等深線上で掘削位置を変えた掘削域5, 5A, 5Bでの掘削後10年の地形変化

広い区域での地盤高を下げる効果がある。図-1にも示したように、墳流軸の東側では反時計回りの漂砂フラックスがあるので、掘削域外側の広い区域から砂を集める結果となる。これに対して掘削域5では沖合デルタの中央部から下手側区域の地盤高の低下を引き起こす。十分沖合で掘削を行う掘削域7では、テラス面の地盤高の低下ではなく、沖合に-16mに至る非常に深い掘削穴が形成される。

次に、同一等深線上で掘削位置を変えた掘削域5, 5A, 5Bでの掘削後10年の地形を比較したのが図-5である。軸線上の掘削域5を基準と比較すると、上手側の5Aでは図-3の掘削域1とよく似た効果が現れ、図-1に示した現況再現における導流堤脇の-7mの閉じた等深線が沖合の-7mの等深線と繋がり、水路が形成された。このことから墳流の軸線上より東(上手)側で掘削を行うことは、今切口を出入りする漁船の航路維持にも有効なことが分かる。一方、墳流軸線の下手側で掘削を行う掘削域5Bでは、沖合の-7mの等深線の凹みが助長されるのみとなる。図-6は、同一等深線上で掘削位置を変えた掘削域5, 5A, 5Bでの掘削後10年の地形変化量の比較である。5Aでは沖合デルタの最突出点より上手側の広い区域の地盤高の低下が起こる。対照的に下手側の5Bでの掘削では沖合地盤の低下域は沖合デルタの最突出点より下手側となる。

#### 4. 汀線変化比較と沖への土砂損失防止効果

図-7は、掘削域を墳流の軸線方向に並べた掘削域1~5

と、水深7mの等深線上において墳流を跨いで東西に並べた掘削域5A, 5Bの場合において、導流堤を挟む区域における各ケースの汀線変化比較を示す。併せて現状のまま放置した案と前報で示したサンドバイパス案の汀線変化も示す。放置と比較してサンドバイパスは導流堤上手側での一方的な後退を招く。一方サンドレイズ工法は、いずれの場合も上手側で汀線の後退を招くことなしに下手側で三角形状に汀線の前進を図ることが可能であり、サンドバイパスと比較して優位である。

従来のサンドバイパス工法は、沿岸漂砂阻止構造物の上手側から下手側へと砂を移動させることを目的としたものであって、退潮流に伴う沖への砂の損失防止にはほとんど効果がない。これに対し、サンドレイズ工法は、退潮流のある場において沖合への土砂損失を防止することを主眼としている。したがってその効果は沖合への土砂損失量を比較することによってのみ評価される。このため図-1に示したように、デルタの沖側部分を包含する沿岸方向に1.8km、岸沖方向に1.2kmの矩形形状の検査区域を設け、ケースごとにこの区域内で、かつ、水深10m以深の領域を対象に海浜土砂量の変化を算出することで水深10m以深への損失土砂量を求め、現況でそのまま10年間放置した場合と比較した。図-8は、掘削域を墳流の軸線方向に並べた掘削域1～5と、水深7mの等深線上において墳流を跨いで東西に並べた掘削域5A, 5Bの場合における水深10m以深への損失土砂量の経時変化を示す。また、比較のために前報で検討した放置案とサンドバイパス案における損失土砂量の経時変化も示す。図-8によれば、放置案やサンドバイパス案と比較して、墳流の軸線方向に並べた掘削域1～5のいずれも沖合への土砂損失低減効果があるが、デルタの外縁近くの掘削域5の場合が最も効果的である。なお掘削域を6, 7と、さらに沖合にした場合には掘削域が $h_c$ 以深に及び、海底面には掘削穴がそのまま残されてしまい、退潮流による沖合への土砂損失の防止の観点からずれるので比較対象外となる。一方、掘削を水深7mの等深線に沿って中央（掘削域5）および東西（掘削域5A, 5B）に配置した場合を比較すると、最も効果があるのは墳流軸線上に配置した掘削域5であり、これらと比較して墳流軸に対して下手（西）側、上手（東）側とも効果が落ちる。また東西の比較では東側の5Aでの掘削が効果的であり、さらに5Aでは今河口沖の航路維持にも効果がある。

5. 結論

BGモデルを用いて浜名湖今切口のebb tidal delta（沖合デルタ）の地形変化を再現し、それをもとに新たにサンドレイズ工法を提案した。この工法は、導流堤上手側の堆積域から砂を採取し、その砂を下手側へ投入するサン

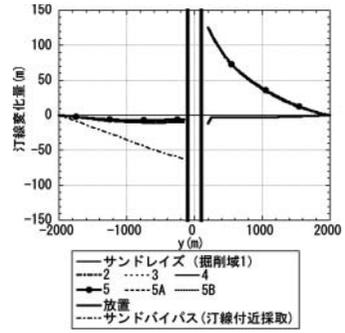


図-7 汀線変化比較

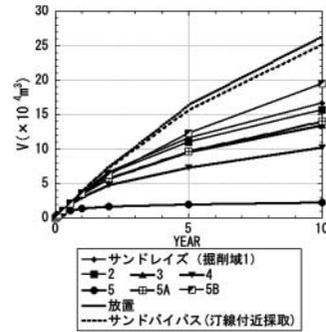


図-8 損失土砂量の比較

ドバイパスと異なり、導流堤沖で砂を掘削し、それを下手側海岸へ投入する手法である。この工法によれば、上手側の汀線後退を招くことなしにネットの土砂損失を防止し、下手側の汀線を前進させることができる。掘削位置を種々変えた予測計算によれば、導流堤の先端付近からの墳流の軸線上の沖合の水深7m付近のテラス面上での掘削が最も有効であること、掘削位置を上手側と下手側にずらす案では上手側のほうが有効でかつ航路維持にも役立つことが明らかになった。

参考文献

宇多高明・芹沢真澄・三波俊郎・古池 鋼・石川仁憲 (2007) : 波と河口流の作用下での大規模河口沖テラスの形成予測モデル, 海岸工学論文集, 第54巻, pp.406-410.  
 宇多高明・芹沢真澄・三波俊郎・古池 鋼・石川仁憲 (2008) : Ebb tidal deltaの地形変化予測と沖への土砂損失防止策の検討, 海岸工学論文集, 第55巻, pp.626-630.  
 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 (2006) : Bagnold概念に基づく海浜変形モデル, 土木学会論文集B, Vol.62, No.4, pp.330-347.  
 Bagnold, R. A. (1963) : Mechanics of Marine Sedimentation, in The Sea, M. N. Hill (editor), Vol. 3, pp. 507-528, New York, Wiley.  
 Bailard, J. A. and D. L. Inman (1981) : An energetics bedload model for a plane sloping beach: Local transport, J. of Geophys. Res., Vol. 86, C3, pp. 2035-2043.