

ebb tidal deltaの地形変化予測と沖への土砂損失防止策の検討

Model for Predicting Evolution of Ebb Tidal Delta and Measure for Preventing Offshore Sand Loss

宇多高明¹・芹沢真澄²・三波俊郎³・古池 鋼³・石川仁憲⁴

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

A model for predicting the evolution of an ebb tidal delta was developed based on the BG model, which was proposed by the present authors using the Bagnold concept of the equilibrium slope. Bathymetric changes around the inlet of Imakiri-guchi during 1978 and 2005 were quantitatively analyzed to investigate the evolution of the ebb tidal delta and sand accumulation offshore of the inlet. The model was applied to this inlet. The predicted bathymetric changes were in good agreement with the measured. Measures for preventing the offshore sand loss were also considered using the model.

1. まえがき

沿岸漂砂が卓越した海岸にtidal inletがあると、入退潮時に強い潮流が沿岸流とほぼ直交して流れるために、規模の大きな突堤の役割を果たし沿岸漂砂のトラップが起る。結果的にebb tidal deltaの発達する分、本来下手側に流れるべき漂砂量が減少する。宇多(2007)は、波の作用する場に噴流を付加することによりebb tidal deltaの発達を予測するモデルを提案した。しかしebb tidal deltaは動的平衡状態に至った姿を予見したにとどまり、その発達過程について実測データとの比較は行われておらず、従って沿岸漂砂量および各種係数の設定に任意性が残されていた。このため退潮流が沿岸漂砂を沖へ流出させる作用を持つことは分かったとしても、その制御方法を定量的意味から検討することは困難であった。このことから、本研究ではSyamsidikら(2007)により潮流特性が明らかにされている静岡県浜名湖今切口を実例として深浅データの定量的比較が可能な1978~2005年の地形変化に着目し、退潮流によるdeltaの発達過程、土砂堆積量とその分布などを定量的意味で再現し、その上で土砂の落ち込み防止策について検討した。

2. 計算の方法と条件

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ebb tidal delta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した。まず全漂砂量が波による漂砂量($\vec{q}_w$)と退潮流による流砂量($\vec{q}_R$)の線形和として式(1)により表されるとする。

$$\vec{q} = \vec{q}_w + \vec{q}_R \quad (1)$$

ここで、漂砂式についてはInman and Bagnold (1963)による平衡勾配の概念と、Bagnold (1963)によるenergetics approachを応用した芹沢ら(2006)のモデルと同様な式を用いる。沖から岸向きにx軸を、汀線とはば平行に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tan β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 $\vec{q}_w = (q_{wx}, q_{wy})$ を式(2)で与える。

$$q_{wx} = \frac{G_{wx}}{\tan \beta_c} \left[\tan \beta_c \cos \theta_w - \frac{\partial Z}{\partial x} \right] \quad (2a)$$

$$q_{wy} = \frac{G_{wy}}{\tan \beta_c} \left[\tan \beta_c \sin \theta_w - \frac{\partial Z}{\partial y} \right] \quad (2b)$$

ここに、 G_{wx} , G_{wy} については式(3)~(7)が成立する。

$$G_{wx} = \frac{K_x}{K_y} G_{wy} \quad (3)$$

$$G_{wy} = C_0 K_y \Phi = C_0 K_y \varepsilon(Z) (EC_g)_b \cos^2 \alpha_b \tan \beta_c \quad (4)$$

$$C_0 = \frac{1}{(\rho_s - \rho)g(1-p)} \quad (5)$$

$$\int_{-h_c}^{h_R} \varepsilon(Z) dZ = 1 \quad (6)$$

$$\varepsilon(Z) = \begin{cases} \frac{1}{h_c + h_R} & (-h_c \leq Z \leq h_R) \\ 0 & (Z < -h_c, h_R < Z) \end{cases} \quad (7)$$

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、 θ_w は波向とx軸のなす角、 ∇Z 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 βに等しい。Φは単位時間、単位面積当りの波のエネルギー逸散率、 $(EC_g)_b$ は砕波点におけるエネルギーフラックス、 α_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体積表示での

1 正 会 員 工 博 (財)土木研究センター理事なごさ総合研究室長
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ごさ総合研究室主任研究員

漂砂量係数の比, ρ_s と ρ 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(7)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となる時の海底勾配である.

式(2), (3)に関連し, 宇多ら(2007)では芹沢ら(2006)の漂砂量式(原論文の式(53))において波向反転指数 $\lambda = 0$ とした式を用いた. これは暗に岸沖・沿岸漂砂係数が等しいと仮定したことに等しい. 本研究では, 岸沖・沿岸の漂砂強度の違いを考慮できるように, 漂砂量係数 K_s , K_y を岸沖・沿岸方向で区別して与えた. 式(2)は, 宇多ら(2007)の式と同様, 等深線が波向に直角になり, かつ局所海底勾配が平衡勾配に一致したときに漂砂=0となる性質を持つ. 本研究では, y 軸を初期汀線と平行方向にとり, また岸沖・沿岸漂砂量係数の比は $K_s/K_y = 0.2$ と与えた. これは, 宇多ら(2007)のように $K_s/K_y = 1.0$ とすると, δ は沖に強く突出して裾野の狭い形状となるが, このように沿岸漂砂の強度を相対的に強め, 岸沖漂砂を弱めることで δ の沖への突出度が小さく, かつ裾野が広い形状が再現可能となり, 等深線が緩やかな曲率をもって沖に張り出す状況が再現できる.

退潮流による漂砂 $\vec{q}_R = (q_{Rx}, q_{Ry})$ については宇多ら(2007)と同一であって, 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(8)を用いる.

$$q_{Rx} = \frac{G_R}{\tan \phi} \left[\tan \phi \cos \theta_R - \frac{\partial Z}{\partial x} \right] \quad (8a)$$

$$q_{Ry} = \frac{G_R}{\tan \phi} \left[\tan \phi \sin \theta_R - \frac{\partial Z}{\partial y} \right] \quad (8b)$$

ここに添字 R は退潮流の値を表す. θ_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. Bailard and Inman (1981)の原式は式(8)の係数 G_R が瞬間流速, 土砂の安息角, 摩擦係数で表示されているが, 宇多ら(2007)と同様, 本研究では波による漂砂式(2)と同形とし, 係数 G_R に全ての効果を含めた. 右辺第一項が流れの作用を, 第二項が重力による斜面下方への作用を表す. 本研究では退潮流の作用をマクロに捉え, G_R を対象海岸の波の作用の強さ $(EC_g)_{b0}$ を基準としたときの対象河川の相対的な強度として表現することとして $(EC_g)_{b0}$ に比例する形としている.

$$G_R = \begin{cases} C_0 K_R F_w K_V^3 & (-h_{c2} \leq Z \leq h_{R2}) \\ 0 & (Z < -h_{c2}, h_{R2} < Z) \end{cases} \quad (9)$$

表-1 条件計算

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

$$F_w = \frac{(EC_g)_{b0}}{h_c + h_R} \quad (10)$$

$$K_V = \frac{V}{V_0} = K_{V1} \left(\frac{h_0}{h} \right) \quad (11)$$

$$K_{V1} = \left(\frac{V_1}{V_0} \right) \quad (12)$$

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, 基準点における碎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(10)). 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. 各パラメータの説明は宇多ら(2007)と同様であり, 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. 本モデルでは, 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. なお, 計算では単純化のため式(4)において波の屈折に伴う波のエネルギー強度変化は無視し, $\cos \alpha_b = 1$ と置く. 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. また, 結果の表示においては沿岸方向にX軸, 直角沖向きにY軸を再

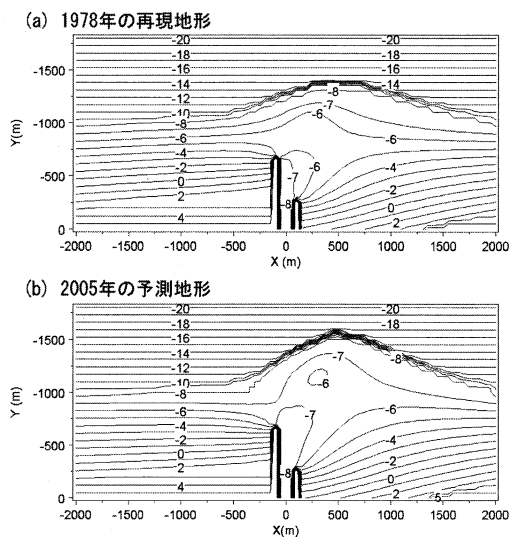


図-1 1978年地形と27年後のdeltaの予測形状

度設定した。さらに、初期地形は勾配1/70の一樣勾配斜面、平衡勾配は1/70とし、水中での砂の安息勾配は1/2とする。そのほかの条件は表-1に示す。

3. 再現計算の結果

$H_b=3\text{m}$, 碎波点の入射角 $\alpha_b=10\text{deg}$ の条件のもとで、自然状態として初期の沿岸漂砂量 $20\text{m}^3/\text{yr}$ が連続的に流れるよう沿岸漂砂量係数 K_s を設定し、動的平衡状態を再現した。その場合、岸沖漂砂係数 K_r は $0.2K_s$ で与えた。

初期等深線は全て平行である。今切口導流堤は左岸導流堤が右岸より長いことを考慮し、導流堤形状は非対称形とした。ただし先端部が斜めになっている点については、噴流を Syamsidik ら (2007) の実測値と一致させるよう右斜め 30° の方向に設定することで考慮した。

今切口においては定量的意味から使用に耐える精度の高い深浅測量は1978年以降行われた。これより1978年から2005年までの地形変化の比較を行った。初期状態から出発してまず1978年地形を求め、次いで1978年から2005年まで27年間の地形変化を計算して実測形状との比較を行った。この間、導流堤間で洗掘が進み退潮流強度が次第に増加したと考えられることから、退潮流強度係数は27年間で $K_r=0.1$ から 0.3 まで直線的に増加させた。図-1(a) は初期の平行等深線地形から出発して計算された1978年地形である。退潮流によって左側から運ばれてきた沿岸漂砂がトラップされ沖合へ流出して堆積し、当初の平行等深線がinlet沖を中心に突出した形状を持つに至る。退潮流によりトラップされた沿岸漂砂が流出し、 h_b より沖に急斜面をつくりながら落ち込んでいく。図-1(a) の状態から27年後の delta の予測結果が図-1(b) である。ebb tidal delta の規模が増大し、沖への突出度が高まった。

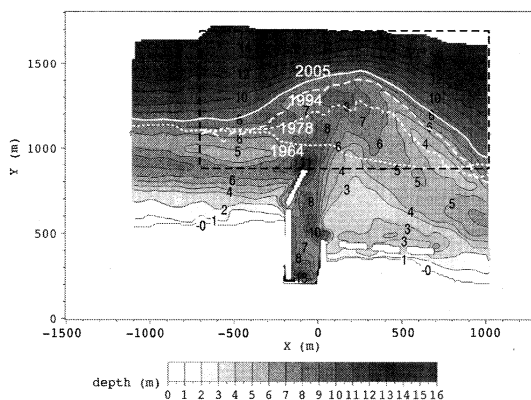
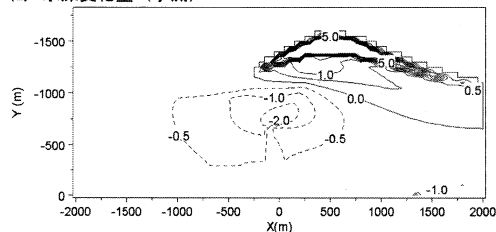


図-2 水深8mの等深線の経年変化と2005年の実測地形

(a) 水深変化量 (予測)



(b) 水深変化量 (実測)

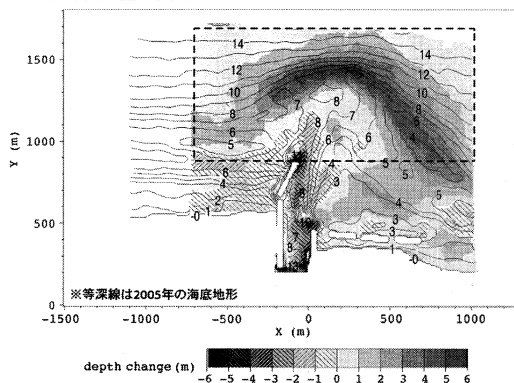


図-3 1978年から2005年までの地形変化量の平面分布

その分西向きに流れるべき沿岸漂砂がトラップされたことになる。図-2は水深8mの等深線の経年変化と2005年の実測海底地形を示すが、ebb tidal deltaが時間経過とともに発達していく状況がかなりうまく再現できている。宇多ら(2007)では単に動的平衡状態にあるebb tidal deltaの地形を示したのみであったが、本研究にあってはdeltaの発達過程を含めて再現が可能になった。

図-3(a)には1978年から2005年までの地形変化量の平面分布を示す。delta外縁に沿って細長く帯状の集中的堆積区域が形成されている。一方、その岸側では導流堤の先端を中心として幅広い区域で侵食が起きている。この分布は、図-3(b)に示す実測値に基づく1978年から2005年

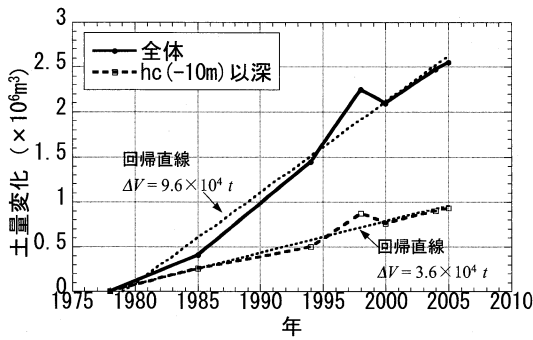


図-4 検査区域内の土砂量変化

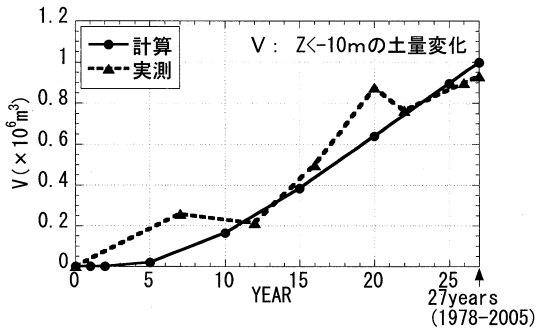


図-5 水深10m以深への落ち込み土砂量の比較

までの地形変化量の平面分布とかなりよい対応を示す。

次に1978年以降の深浅データをもとに、ebb tidal deltaを構成する全土砂量と、 h_c より十分深く波の作用で再び汀線へと戻ることができないと考えられる水深10mより深い部分に落ち込んだ土砂量の変化を求めるために、図-3(b)に破線で示す検査区域を求め、この区域での土砂量変化を調べたのが図-4である。全土砂量は $7.7 \text{ m}^3/\text{yr}$ の割合で増加しており、うち $3.6 \text{ m}^3/\text{yr}$ が水深10m以深に落ち込み、汀線へ戻れなくなっている。図-5は、水深10m以深への落ち込み土砂量について計算と実測の比較を行ったものであるが、両者は定量的に十分な精度で一致している。

4. 対策案の効果検討

delta 沖への土砂損失を防止可能と考えられるいくつかの案について、対策実施後の地形変化をそれぞれ求め、初期地形との比較により対策案の効果検討を行った。初期地形には現況再現結果を与え、10年後レベルでの相互比較を行った。対策案は放置も含めて4ケース考えた。ケース1は放置、ケース2は浜名湖内での導流堤の形状変更などにより退潮流が弱められた場合に相当し、退潮流強度係数 K_v を0.3から0.15に半減させたもの。ケース3は、上手側の水深0~2mから砂を採取し、導流堤のすぐ下手

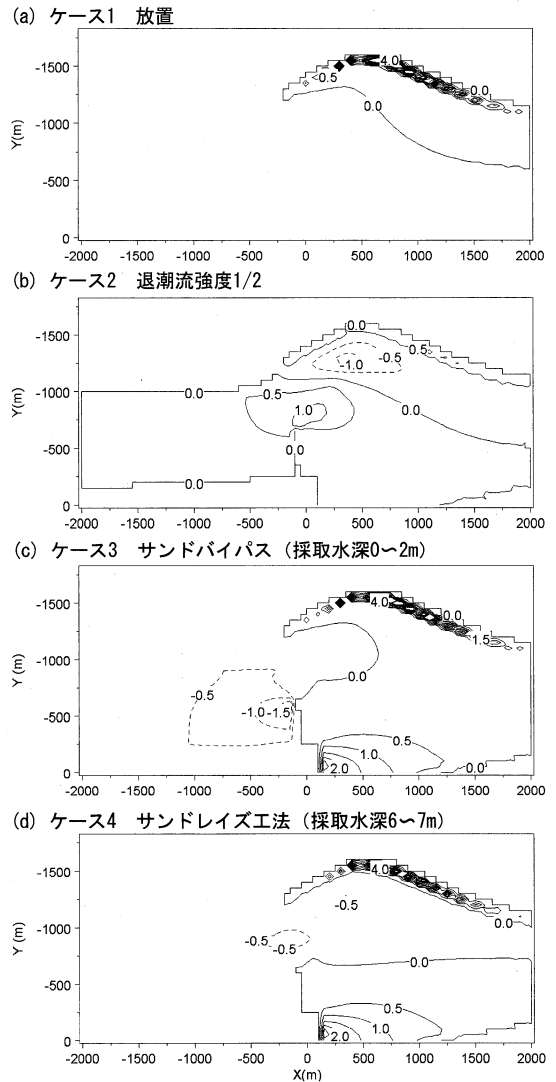


図-6 ケース1~ケース4の地形変化量分布の比較

側の水深0~2mに養浜するというサンドバイパス案である。サンドバイパス量は現実的に可能な量を考慮して $10 \text{ m}^3/\text{yr}$ とする。ケース4は導流堤沖の $250 \text{ m} \times 250 \text{ m}$ 、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に投入するサンドレイズ工法であり、その量はケース3と同一である。

図-6(a)にはケース1(放置)における現況(2005年)からの水深変化量の平面分布を示す。沖合への土砂の落ち込みが継続し、結果deltaの前置層の発達が続く。すなわち上手側からの沿岸漂砂の損失が今後も継続的に起こることが分かる。退潮流強度を1/2に弱めたケース2では、図-6(b)に示すように、退潮流が弱まった結果導流堤のすぐ沖の広い区域が堆積傾向に変わり、同時にさらにその沖合では侵食傾向となった。侵食域はdeltaの沖合部の中

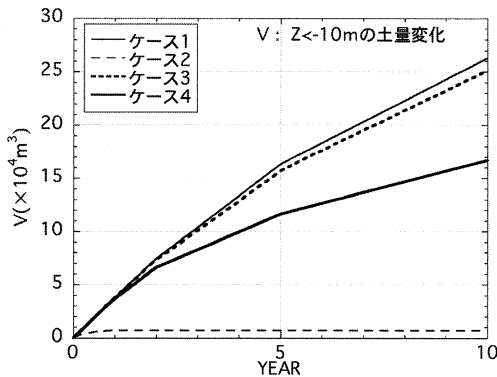


図-7 水深10m以深への土砂損失量の比較結果

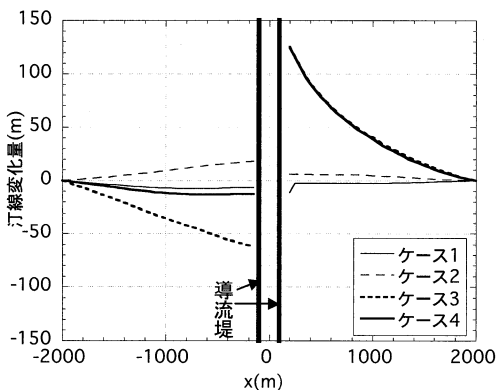


図-8 各ケースの汀線変化の比較

心から下手側へと延び、逆に堆積域は導流堤沖を中心として上手側に伸びるという入れ違いの形状を示す。しかしながら、導流堤の上手下手側の地形には大きな差異が見られない。

導流堤上手側の汀線近傍で砂を採取し、導流堤の下手側に投入したケース3の予測結果を図-6(c)に示す。ケース1, 3の地形変化量を比較すると、沖合に突出したdeltaの形状およびdelta外縁線に沿った堆積状況はほぼ同様であって、沖合への土砂損失の防止の意味からほとんど効果がない。一方、汀線形状を見れば明らかに、導流堤下手側では土砂量が増加していることから汀線後退防止の意味ではそれなりの効果を有している。

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に投入するサンドレイズを行ったケース4の結果を図-6(d)に示す。この場合、delta外縁線に沿った帯状の堆積域での堆積土砂量は減少し、その分土砂投入を行った導流堤の下手側の汀線付近が堆積傾向に変わる。このことから沿岸漂砂の沖への損失を抑制し、下手海岸の侵食防止を図る上で沖合での掘削と導流堤下手での投入は効果的である。

図-7は水深10m以深への土砂損失量の比較結果である。

土砂損失が最も大きい放置案と比較したとき、最も効果的なのはケース2の退潮流強度を1/2にした場合である。次に効果があるのは沖合で浚渫し、その土砂を下手側に投入する案である。実際には今切口の形状を同一に保ったまま退潮流強度を低減させることは浜名湖の tidal prism と潮位偏差が一定のもとではかなり難しい。これに対して、沖合浚渫案は既に静岡県で試験的に実施された案である。これについては過去にはその工学的評価がなされないまま行われたが、今回の計算はその効果を理論的に確認したことになる。図-8には現況再現計算結果との差として求めた各ケースの汀線変化の比較を示す。ケース1の放置案を基準とすると、退潮流強度を変えたケース2では汀線変化から見ると大きな違いはない。導流堤の上手側から下手側へのサンドバイパスでは下手側での汀線前進と上手側での後退がセットで起こる。これに対し下手側の侵食軽減に最も役立つのは沖合掘削の下手側投入のケース4であることが分かる。

5. まとめ

今切口において深淺データの定量的比較が可能な1978～2005年の地形変化に着目し、退潮流によるdeltaの発達過程、土砂堆積量とその分布などを調べた上で、BGモデルを進展させ、実測地形変化を定量的に予測可能な3次元モデルを開発した。これらに加えて退潮流による沖への土砂落ち込みを防止する策についても検討し、対策として沖合浚渫が有効なことを示した。

参考文献

- 宇多高明(2004):「海岸侵食の実態と解決策」, 山海堂, p.304.
- 宇多高明・芹沢真澄・三波俊郎・古池 鋼・石川仁憲(2007): 波と河川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.
- 合田良實(1990):「港湾構造物の耐破設計」, 鹿島出版会, p.333.
- 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.
- Syamsidik・青木伸一・加藤 茂(2007): 河口沖合での潮流と浮遊砂フラックスの特性に関する研究, 海岸工学論文集, 第54巻, pp.601-605.
- 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.
- Inman, D. L. and Bagnold, R. A. (1963): Littoral Processes, in The Sea, M.N. Hill, (editor), Vol.3, pp.529-533, New York, Wiley.
- Komar, P. D.(1998): Beach Processes and Sedimentation - 2nd Edition, M. N. Hill (editor), Vol.3, pp.544, New Jersey, Prentice Hall.