

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

Model for Predicting Large-scale Terrace Topography off River Mouth under Combined Action of Waves and Currents

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

Beach changes off Imakiri-guchi training jetty of Lake Hamana were investigated on the basis of the soundings data. A river mouth terrace topography protruding offshore was formed by the combined effect of waves and offshore currents through this inlet. A model for predicting formation of the terrace topography under the combined effect of waves and offshore currents was developed based on the model given by Serizawa *et al.* (2006) with the analogy of the velocity distribution to the wave diffraction coefficient, which is calculated using the angular spreading method of irregular waves. Predicted results were in good agreement with the measured values.

1. はじめに

河川流やインレットにおける入退潮流（以下、河口流と呼ぶ）の作用による地形変化を考えたとき、それによって沖向きに運ばれる砂が波による地形変化の限界水深 h_c 以浅に留まるならば、運ばれた砂は再び岸付近へ戻ることができる。しかし h_c 以深へと運ばれた場合、砂は波の作用では岸へ戻れず砂の欠損が起こる。通常の外力条件下ではこのような現象は起こりにくいと考えられるが、新たに河口を開削して導流堤を建設した場合や、入退潮流の作用が著しく大きい場所では土砂損失の一因となりえる。沿岸漂砂が卓越した海岸に導流堤が造られた場合、沿岸漂砂の阻止により上手側の汀線は前進し、やがて導流堤先端を回り込んで砂が水路に落ち込む。その際、強い沖向き流れの作用により沖に運ばれるので、従来にないほど沖合へと運ばれ、海岸の土砂の損失を招く可能性が高い。このような場合の地形変化予測に関し、宇多ら(2004)は、2次元ポテンシャル流とのアナロジーに基づいて動的安定状態にある海浜形状の予測手法を考案した。このモデルでは、一對の砂の吸い込み・湧き出しを与えることにより、動的平衡状態にある海浜形状を予測可能とした。この場合、砂の吸い込みは河口にあっては洪水による強い沖向き流れによって起こることを想定している。沖に運び去られた砂は沖合のある場所に置かれ（砂の湧き出し）、その後波の作用で岸向きに戻るといったものであった。しかしこのモデルは分布型で与えられる河川流やインレットにおける入退潮流の作用下で

の予測には使えない。このことから、本研究では波と強い河口流の作用が伴う場合に関し、浜名湖今切口の実態解析を基礎として新しい海浜変形予測モデルを開発する。

2. 今切口導流堤周辺の長期的地形変化

浜名湖と遠州灘とを結ぶ今切口河口導流堤は、舞坂漁港を出入りする船舶の安全航行を目的として造られたものであるが、導流堤はこの海岸で卓越する西向きの沿岸漂砂を阻止したため導流堤の東側では汀線の前進が、西側では汀線の後退が生じてきている。また浜名湖からの退潮流により、東側から沿岸漂砂により運ばれてきた砂が水深の大きな海底へと運び去られている。ここでは1964～2005年に取得された8組の深浅データにより導流堤周辺の地形変化を明らかにする。

(1) 深浅図の比較

1964年(図-1(a))では、浜名湖と遠州灘を結ぶ水路とそれを守る平行導流堤は完成していたが、導流堤の先端が海岸線から沖に大きく突き出る状況にはなかった。当時の滞筋は左岸に沿って延びており、河口沖にもほぼ直線状の流路が伸びていた。河口沖には半径約500mのほぼ半円形状の等深線の突出が見られ、規模の大きな河口テラスができていた。テラスの沖側斜面ののり先水深はほぼ6mにある。この水深はこの海岸の h_c 約10mより浅いので、西向きの沿岸漂砂はテラスの沖側斜面を迂回して下手側へと流れることができた。しかし沿岸漂砂が流れにくくなったために、河口の東西の汀線位置を比較すると、西側の汀線は東側と比較して後退している。

1973年(図-1(b))では、1968年までに完成した左岸導流堤の先端にわずかな隙間を設けて、長さ200mの斜め導流堤が建設された。この斜め導流堤は退潮流の流下方向を時計回りの方向に傾けることとなり、斜め導

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
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

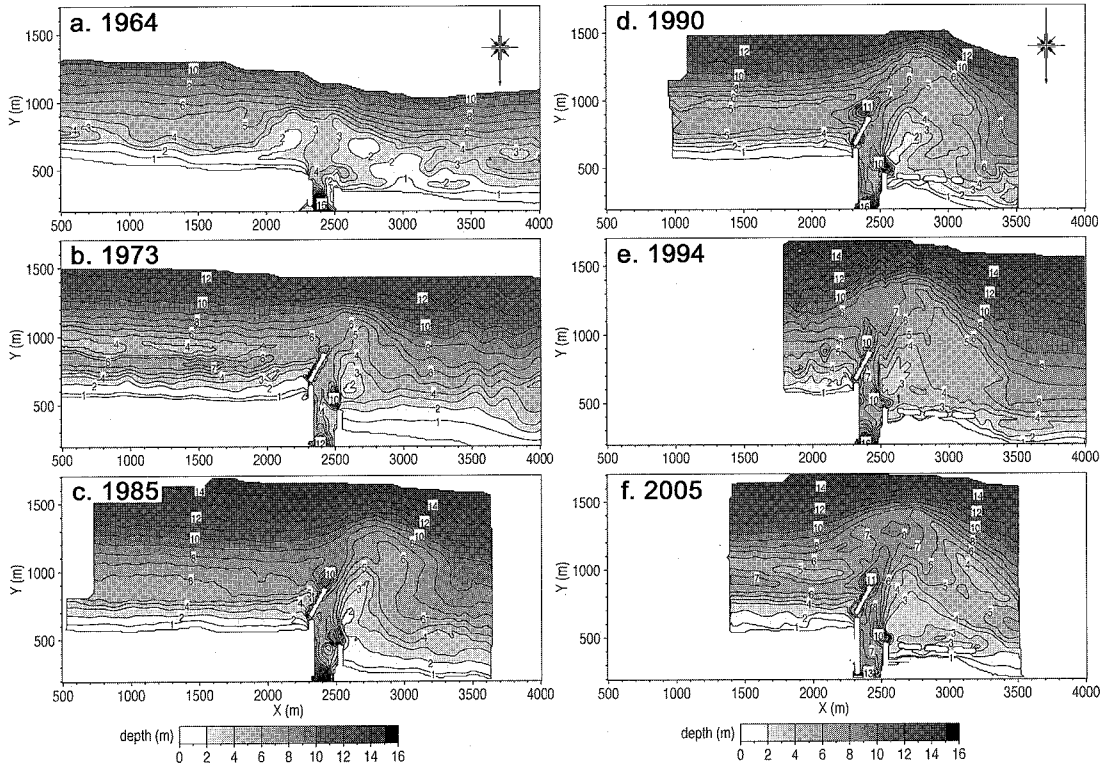


図-1 今切口導流堤周辺の海底地形(a: 1964年, b: 1973年, c: 1985年, d: 1990年, e: 1994年, f: 2005年)

流堤に沿った滞筋の沖合までの発達を促し、逆に右岸沖に浅瀬を形成させる結果となった。また河口テラスの前置斜面のさらなる発達が続く、そのり先水深は -10 m にまで達した。この水深はこの海岸の h_c にほぼ等しいので、沿岸漂砂の阻止率が高まり下手側の海岸線の後退を招いた。一方、右岸導流堤の先端においても -10 m に達する著しい局所洗掘が生じた。

1985年(図-1(c))では、1973年には河口右岸において海岸線とほぼ直角方向に伸びていた浅瀬が導流堤とほぼ平行に伸びた。また河口テラスが水深の大きな場所まで発達し、少なくとも -13 m まで土砂の落ち込みが見られる。一方、冲向きに大きく突出した舌状砂州の西側隣接部では逆に大きな窪み地形が形成された。このような凹凸地形が安定的に保たれる事実は、河口の西側近傍において時計(右)回りの渦の発達を示唆する。

1990年(図-1(d))では新たに河口右岸に2基の離岸堤が建設され、また西端に別の離岸堤が建設途中にあった。これらによりこの付近での境界条件が大きく変化した。離岸堤群の背後では汀線が前進し、それらの西側隣接部では逆に汀線の後退が生じている。離岸堤とその周辺での地形変化と同期して、1985年に見られた河口右岸の舌状浅瀬の発達が続き、沿岸方向の幅が増大した。この結果1985年に見られた凹状の深みの規模は縮小し

ている。また斜め導流堤の先端では -11 m に達する深掘れが生じている。

1994年(図-1(e))では、1990年と比較して河口から3基目の離岸堤が完成し、3基とも堤長が 150 m となった。これと同期して1985年以降続いていた河口右岸での浅瀬の発達が一層顕著となり、岸近くまで伸びる楔状の深みが消失した。河口テラスの冲向きの発達はさらに続き、 -14 m 付近まで土砂の落ち込みが見られる。また右岸導流堤の先端の局所洗掘は1985、1990年も連続的に生じていたが、局所洗掘の規模が大きくなり、かつ河口を横断して斜め導流堤に接続するまでになった。

2005年(図-1(f))では、離岸堤群の沖合には -3 m の等深線形状に見られるように、三角形の浅瀬が発達し、従来平坦であった河口右岸の浅瀬を斜めに横切る深みが形成された。また斜め導流堤の先端の局所洗掘も著しい。河口テラスの前置斜面の外縁水深は -14 m にまで達し、西向きに沿った漂砂が流れにくくなっていることが分かる。

(2) 地形変化量の平面分布

今切口導流堤周辺の地形変化は、斜め導流堤が建設された1973年以降著しい。そこで1973年を基準として1985、1994、2005年まで約10年間隔で地形変化量の平面分布を算出した。図-2には結果をまとめて示すとともに、比較年の深浅図を重ねて示す。図-2(a)に示す

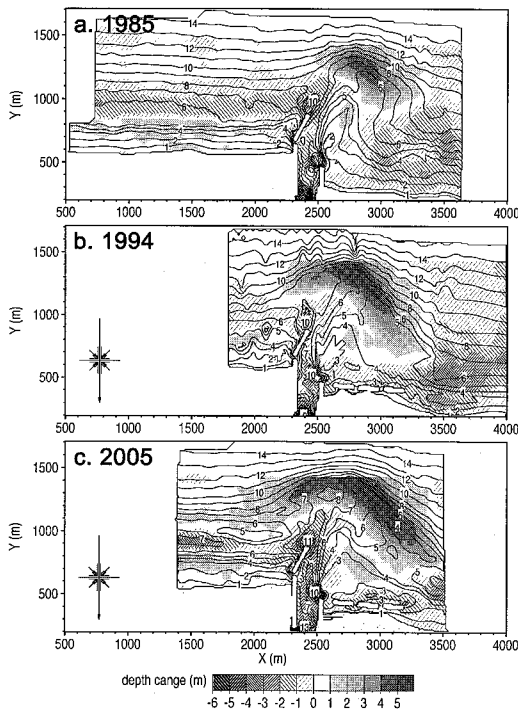


図-2 1973年を基準とした水深変化量の平面分布
(a: 1985年, b: 1994年, c: 2005年)

1985年では、主な堆積域は斜め導流堤からの退潮流が沖合で減速すると考えられる区域にあり、-6mから-12mまでの範囲で楕円形状に堆積している。これと対照的に河口右岸の浅海域では侵食が起きている。図-2(b)に示す1994年では、堆積を示す帯状区域が大きく広がり、斜め導流堤沖までが堆積域に入った。また離岸堤群の西側直近で侵食が激化した。図-2(c)に示す2005年では、堆積域は斜め導流堤沖を超えて河口東側区域にまで達した。あわせて河口右岸にあっては堆積域が離岸堤沖を包み込むように大きく広がった。

3. 波と河口流の作用下での河口地形変化予測モデル

(1) 地形変化予測モデル

まず全漂砂量が波による漂砂量($\vec{q}_w$)と河口流による漂砂量($\vec{q}_R$)の線形和として、式(1)により表されたとする。

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

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。いま、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 $\tan \beta$ 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 $\vec{q}_w = (q_{wx}, q_{wy})$ は式(2)で与えられる。

$$\vec{q} = \frac{G_w}{\tan \beta_c} [\tan \beta_c \vec{e}_w - \nabla Z] \quad (2)$$

ここに、 G_w については式(3)~(6)が成立する。

$$G_w = C_0 K_1 \Phi = C_0 K_1 \varepsilon(Z) (EC_s)_b \cos^2 \alpha_b \tan \beta_c \quad (3)$$

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

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

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

なお、 $\vec{e}_w = (\cos \theta_w, \sin \theta_w)$ は波向方向の単位ベクトル、 θ_w は波向角、 $\nabla Z = (\partial Z / \partial x, \partial Z / \partial y)$ 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。 Φ は単位時間、単位長さ当りの波のエネルギー逸散率、 $(EC_s)_b$ 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_1 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漂砂量の比、 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 は波の打ち上げ高に対応するバーム高である。 $\varepsilon(Z)$ は沿岸漂砂量強度の水深方向分布で、本研究では一樣分布とし、 h_c から h_R までの積分値が1となるよう式(5)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。次に、河口流による漂砂については、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。

$$\vec{q}_R = \frac{G_R}{\tan \phi} [\tan \phi \vec{e}_R - \nabla Z] \quad (7)$$

ここに添字 R は河口流の値を表す。 $\vec{e}_R = (\cos \theta_R, \sin \theta_R)$ は河口流速の単位ベクトル、 $\tan \phi$ は土砂の安息勾配である。Bailard and Inman (1981) の原式は式(7)中の係数 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、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。右辺カッコ内の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 G_R を次式で表す。

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

$$F_w = \frac{(EC_s)_b}{h_c + h_R} \quad (9)$$

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

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

ここに、 K_R は河口流の漂砂量係数、 K_V は河口流の流速

比 V/V_0 , V は河口流速, 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河口流速と, 河口での基準流速に対する比である. h_{c2} , h_{R2} は河口流作用時の地形変化の限界水深及び限界高さである.

Bagnold (1963) および Bailard and Inman (1981) によれば, 式(8)の G_R は河口流による土砂移動に要する仕事を表し, 流れの失うエネルギー逸散率に比例する. 本研究では河口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 $(EC_g)_{b0}$ に比例する形とした. 河口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. 流速場については流速比を用いることを基本とし, さらに Bagnold (1963) および Bailard and Inman (1981) の原式と同様, エネルギー逸散率が流速の3乗に比例するという性質を反映させるように流速比の3乗に比例させた. 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, 後述のように, K_{V1} は不規則波の方向分散法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. 以上より, 式(8)の河口流の流砂量係数 K_R は, 波浪作用に対する河口流の作用の強さの比率も含めた係数となる. 計算では, 芹沢ら(2002)と同様, 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. 海浜変形は連続式を解いて求める.

計算領域は Δx と Δy のメッシュで分割する. Z と漂砂量 $\vec{q}=(q_x, q_y)$ は $1/2$ メッシュずつずらして配置し, 陽形式差分法で解く. 初期地形と H_b , α_b , h_c , h_R , 平衡勾配, および河口流に関する諸条件を与えると, 漂砂フラックスが式(2)で, 河口流による流砂量フラックスが式(7)によって計算され, 両者の和の漂砂フラックス(式(1))が計算されると Δt 後の地形変化量が連続式から求められる. これらの計算が繰り返される. 境界条件としては構造物境界では漂砂量を0と置く. 以上のように, 本モデルは波の作用と河口流を各時刻同時に作用させて計算するものであるが, 河口では河口流の作用のみ考え, 海岸への土砂供給源としては考慮しない.

計算では, 単純化のため式(3)において波の屈折に伴う波エネルギー強度変化は無視し, $\cos \alpha_b=1$ と置いた. また河口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. 河口流による地形変化の限界高さ h_{R2} は静水面に取った. 式(10)の右辺の分母

の水深 h には下限値を設けた.

(2) 方向分散法の応用による河口噴流の計算法

本研究で対象とする河口流は河口噴流とする. 噴流の流速場が防波堤開口部の回折波の波高比分布と相似なことに着目し, 式(11)の水深変化のない場合の流速比 K_{V1} の計算に, 不規則波作用下での防波堤による回折係数の簡便計算法である方向分散法(合田, 1980; 酒井ら, 2003)を応用した. 酒井らの方向分散法において, まず波エネルギーの方向分布関数 $G(\theta)$ を河口での噴射流速の方向分布関数と考え, また波エネルギー比(回折係数の2乗)を流速比と考えれば, 流量保存則を満足しつつ, 噴流拡散による流速の低減が表現できる. このとき流心を基準とした流向の範囲を $\theta=-\theta_{\max}\sim\theta_{\max}$ とすると, 不規則波であれば $\theta_{\max}=\pi/2$ (90 deg) であるが, 河口噴流ではこれよりずっと狭く $\theta_{\max}=11$ deg 程度の値をとればよいと考えられる. また, 波エネルギーの方向分布関数の方向集中度を表す酒井らのパラメータ A_0 の強弱により噴流の拡散係数の強弱を表現できる. 以上より, 河口部を防波堤開口部と見做し, 河川流に見立てた不規則波を冲向きに入射させて, 酒井らの方向分散法を適用し, 計算された波エネルギー比(回折係数の2乗)を流速比, 回折波向を流向とした. 本研究では, $\theta_{\max}=15$ deg, $A_0=5$ と与えた.

(3) 計算例

図-3は河口の両側に導流堤があり, 上手側導流堤が斜めであることを考慮して河口流が斜めに流出する場合の流速分布の計算例である. 計算条件を表-1に示す. この流速分布を与えて波が左から斜め入射する条件で平行等深線地形から出発して河口沖テラスの計算を行った結果が図-4である(漂砂フラックス併記). 図の漂砂フラックスにあるように土砂は絶えず移動しつつも見かけ上地形変化のない状態, つまり動的安定状態の海浜地形が計算されている. 主軸が斜めの河口テラスが発達し,

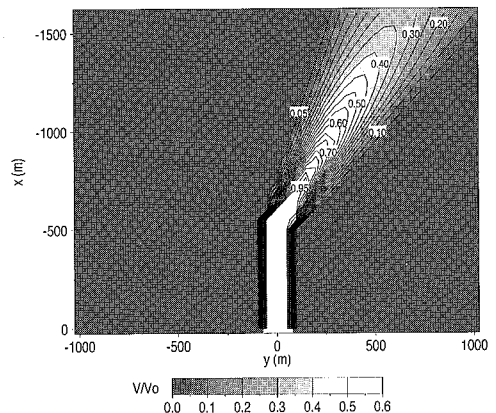


図-3 計算例：流速分布

表-1 計算条件

初期地形	一樣勾配斜面 (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 $\theta_w = 10^\circ$ (BC_0) ₀ 算出用の碎波波高 $H_{b0} = 3$ m
漂砂量の水深方向分布	一樣分布
沿岸漂砂量係数	$K_1 = 0.2$
バーム高	$h_R = 3$ m
波による地形変化の限界水深	$h_c = 10$ m
河川流の流砂係数	$K_R = 8.0$
河川流の作用限界高さ	$h_{R2} = 0$ m
河川流の作用限界水深	$h_{c2} = 10$ 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	$\Delta t = 0.2$ hr
計算ステップ数	250,000 steps
境界条件	岸沖端 $q_x = 0$, 左右端 $dq_y/dy = 0$

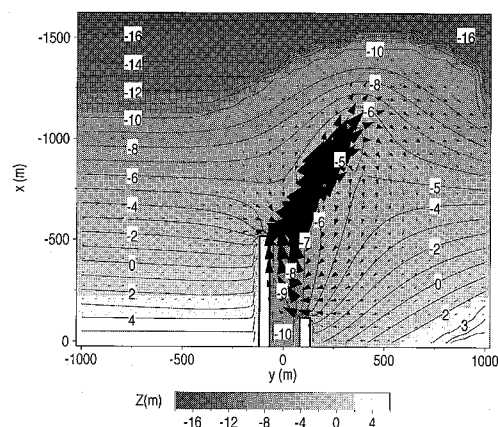


図-4 計算例：地形変化

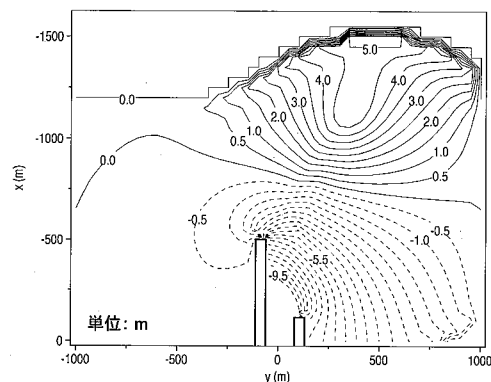


図-5 水深変化量の平面分布

うな動的安定状態には至っていない。沿岸漂砂によって運ばれてきた土砂が強い河口流の作用によって今後も h_c 以深に落ち込み続けることは、下手海岸の侵食原因となるので、今後広域的な土砂管理の観点から対策検討を行う必要がある。

謝辞：本研究を進めるにあたって静岡県浜松土木事務所より資料を提供していただいた。ここに謝意を表します。また本研究の一部は、文部科学省科学技術・学術政策局の科学技術振興調整費による重要課題解決型研究等の推進「先端技術を用いた動的土砂管理と沿岸防災」の研究成果であることを付記し、研究の推進に預かった方々に感謝の意を表します。

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・古池 鋼・三波俊郎(2004)：2次元ポテンシャル流とのアナロジーに基づく動的安定海浜形状の予測法，海岸工学論文集，第51巻，pp. 491-495.
- 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.
- 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.
- 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.

4. 結 論

波と河口流の作用がある場合の河口テラスの発達予測モデルを開発した。これにより今切口での河口テラスの発達と導流堤先端での局所洗掘をうまく説明できた。今切口沖のテラスは現在も発達中であり計算結果にあるよ