

等深線変化モデルによるフラッシュ後の河口砂州の復元予測

宇多高明*・芹沢真澄**・高橋 功***

等深線変化モデルを工夫することにより、砂礫からなる河口砂州が洪水流によってフラッシュされた場合の、波による砂州復元の予測モデルを構築した。実例として四万十川の河口砂州を対象として選び、洪水による河口砂州のフラッシュと、河口砂州の復元現象を時間スケールも含めて斜め写真により明らかにする。それに基づき、洪水によってフラッシュされた河口砂州の 3 次元的復元過程を予測可能なモデルを構築した。さらに河口砂州の復元に対する沿岸漂砂と岸向き漂砂の効果を比較検討した。また河口部での砂の除去は河口砂州幅の減少をもたらすことを定量的に明らかにした。

1. まえがき

一般に、洪水時に河口砂州への越流が起これと砂州のフラッシュが起こり、砂州の構成材料である砂礫が沖へ流出する。しかし沖へ流出した砂は洪水後の波浪作用により岸向きに移動して最終的に砂州の復元が起これとはよく知られている。このような洪水流による河口砂州のフラッシュと波による砂の回帰機構のうち、河口砂州のフラッシュについては既に数値計算で予測可能となっている。しかし、沖へ流出した砂の回帰機構については十分明らかにされておらず、河口砂州復元の定量的予測は不可能と考えられてきた。

高知県西部を流下し、土佐湾に注ぐ四万十川では規模の大きな河口砂州が発達している。この河口砂州について、豊島は 1982 年 8 月 27 日の台風 13 号と、9 月 25 日の台風 19 号に伴う洪水による河口砂州のフラッシュと砂州の復元状況を河口右岸側の高台上からの撮影写真により示している(建設省河川局, 1990)。四万十川河口でのこの実測によれば、フラッシュされた砂州の復元現象については、沿岸漂砂と岸向き漂砂をうまくモデル化すればモデル化が可能と考えられる。そこで、最近様々な条件の下での海浜変形予測に応用されている芹沢ら(2002)の等深線変化モデルを発展させて河口砂州の復元計算モデルの作成を行った。

2. 河口砂州フラッシュの実態

図-1 には四万十川河口の位置を示す。南東方向に流れてきた四万十川の流路は、北側の道崎と南側の小名鹿の岬に挟まれた延長 1.25 km の区域の南端部に流入しており、本川は小名鹿の岬と河口導流堤の間、約 250 m の流路を経て太平洋に流れ込んでいる。また河口部左岸側には竹島川が流入し、その河口部には下田港が位置している。四万十川の河口砂州は大洪水時にはフラッシュされるが、フラッシュ位置はほぼ竹島川と本川とを分ける

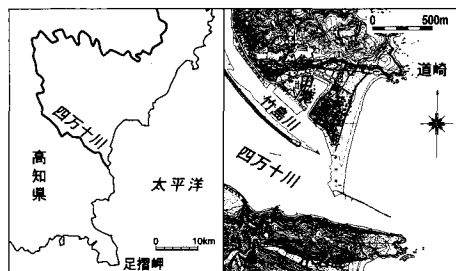


図-1 四万十川河口の位置

る背割堤の延長線より南側であり、この時の最大河口幅は約 500 m となる。

写真-1(a) は 1982 年 8 月 28 日撮影の河口状況である。前日襲来した台風 13 号に伴う洪水(ピーク流量 10,200 m³/s)によって砂州は流出している。フラッシュした砂州の沖合を注意深く観察すると、沖合から河口への入射波の波峰線が凹状となり一部碎波も見られる。砂州の切れていない部分における碎波状況を見ると碎波帯幅は狭いことから、写真-1(a)で観察される碎波波高は高々 1 m 程度であろう。一般に碎波点における波高水深比は海底勾配によって変わるがほぼ 0.5~0.7 程度であるから、これより水深を逆算すれば碎波点の水深は 1.4~2 m 程度となる。また凹状の波峰線が見られることから、海底地形は沖向きに凸状となっている。これらのことから、写真-1(a)によれば洪水によって河口沖には舌状の河口テラスが延びていることがよく分かる。

写真-1(b) は 9 月 2 日の状況である。高波浪が来襲し、河口導流堤の大部分が碎波帯に入った。このとき竹島川と本川とを分ける背割堤の方向に直線的に切られた河口砂州が、その付け根部分から復元し始めている。開口部は河口導流堤側に狭い水路を残して急速に狭まった。このように砂州の復元は急速であり、その場合砂州の切れた場所では岸向き流れが発生し、それが本川を流れ下って全体として循環流が形成されていることが分かる。

写真-1(c) は 9 月 6 日の河口状況である。この段階において洪水によってフラッシュされた河口砂州は河口導

* 正会員 工博 (財)土木研究センター審議役なごき総合研究室長
** 正会員 海岸研究室(有)
*** 正会員 (財)土木研究センター研究開発一部

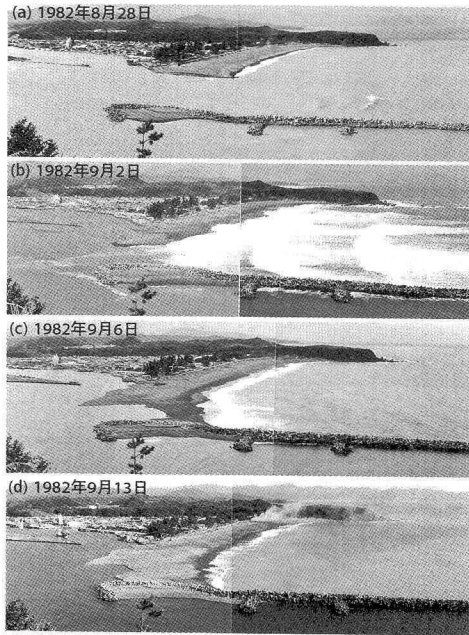


写真-1 四万十川河口砂州の斜め写真

流堤と完全に繋がったが、砂州幅はまだ狭い。9月13日には写真-1(d)に示すように砂州はほぼ完全に復元した。河口砂州のフラッシュから16日間で砂州の復元が終わったことが分かる。写真-1(c), (d)の比較によれば、砂州の復元はまず海側での砂の堆積から始まり、さらに波の打ち上げによって砂州の上流側に土砂が堆積して復元が進むことが分かる。

3. モデルの概要

河口砂州の復元予測には、芹沢ら(2002)の等深線変化モデルを用いた。このモデルには、沿岸漂砂の作用にとどまらず、岸沖漂砂を介した海浜縦断形の安定化機構が組み込まれており、3次元的な海浜変形予測が可能である。このモデルによれば、種々の構造物が設置された一般的な条件下で、沿岸漂砂および岸沖漂砂による長期的・広域的な海浜変形予測が可能である。モデルの基礎式は、式(1)～(6)で与えられる。

$$q_x = \varepsilon_x(z) \cdot K_x \cdot (EC_g)_b \cos a_b \left\{ \sin a_b - \frac{1}{\tan \beta_c} \frac{K_2}{K_x} \frac{\partial H_b}{\partial x} \right\} \quad (1)$$

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

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

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

$$\varepsilon(z) = \begin{cases} = \frac{2}{h_c^3} \left(\frac{h_c}{2} - z \right) (z + h_c)^2 \cdots (-h_c \leq z \leq h_R) \\ = 0 \cdots (z < -h_c, h_R < z) \end{cases} \quad (5)$$

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

ここに、 $q_x \cdot q_z$ は沿岸・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、 $(EC_g)_b$ は碎波点におけるエネルギーフラックス、 a_b は碎波波向と等深線のなす角である。また、式(3)の $\cot \beta$ 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)の宇多・河野(1996)の3次式で与えられる。さらに、 K_x は沿岸漂砂量係数、 K_z は岸沖漂砂量係数、 K_2 は小笹・プランプトン項の沿岸漂砂量係数、 h_c は波による地形変化の限界水深、 h_R はバーム高であり、 $\tan \beta_c$ は平衡勾配である。

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)を解くことにより等深線変化量が計算される。実際の数値計算では、スタッガードメッシュを用いた陽形式の差分法を用いるとともに、宇多ら(1998)の展開座標を用い、曲線状の等深線を直線状に展開した座標系を用いて計算を行う。

4. 砂州の扱い

四万十川河口沖の海浜縦断測量によれば、河口砂州の実質部分はほぼ-3m以浅に堆積した砂礫で構成され、汀線付近の勾配は約1/10で急に立ち上がる。これに対し-3m以深では約1/70と緩勾配となっており、縦断形は-3mを境に明瞭に二分される。砂州の実質部分の粒径は粗いのにに対し、勾配急変点より沖の底質は細砂で構成されている。すなわち、細砂からなる緩勾配斜面の上に、砂礫でできた砂州の実質部分が載っている状態にある。

洪水により河口砂州がフラッシュされる際には、砂州を構成する粗粒成分が沖に運ばれ堆積する。この時、粗粒成分は細砂と比較して平衡勾配が急であるため、細砂からなる緩斜面上に粗砂が載ると、波の作用で岸向きに移動すると考えられる。一方、細砂の平衡勾配はもともと緩勾配なので、波の作用下であっても安定したまま移動せず、結局、粗砂のみが選択的に岸向きに移動し、砂州が復元されると推定できる。このように考えると、沖合の緩勾配斜面は事実上固定床と見なせることになり、固定床上に載る粗粒成分の移動を予測すれば砂州の復元計算が可能になる。

そこで、計算では細砂からなる緩勾配斜面を固定床と見なし、その固定床上に粗砂からなる砂州を配すことにした。洪水流によってフラッシュされた粗砂はこの固定

床上を移動すると同時に、切れた砂州周辺で等深（高）線に沿岸方向勾配が発生することから生じる沿岸漂砂によっても移動し、両者による海浜変形が同時に起こる。等深（高）線に沿岸方向勾配がつくと沿岸漂砂移動が生じるのは、等深（高）線に対して波が斜め入射することによる。この場合、細砂の緩勾配固定床の扱い方は、式（7）～（10）による芹沢ら（2002）の構造物境界処理法を用い、勾配 1/70 の緩傾斜護岸が水没しているとしてこの境界処理法を適用した。

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

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

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

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

ここに、 k は等深線に付けた番号、 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 は構造物と等深線との距離である。

砂州後端部は航路に面するため、そこでの岸沖漂砂量が 0 となるという境界条件を設定した。砂州背面では、水中への土砂の落ち込みを考慮するため、水中の安息勾配が 1/3 の仮想護岸境界を設け、上記の構造物境界処理法を適用した。海岸両端部の境界条件としては、そこを横切る沿岸漂砂量を 0 とした。表-1 には各種計算条件の詳細をまとめて示す。

5. 1次元計算による砂州の復元計算

（1） 計算条件の設定

まず、洪水流により河口砂州がフラッシュされた一次元条件を仮定し、沖合に流出した砂礫の河口砂州への復元過程について検討した。河口砂州は礫を主とする粗な材料でできていることから、洪水流によって流出したとしても河口砂州のすぐ沖に河口テラスを形成して堆積すると考えられること、また南堂崎からの斜め写真による洪水時の河口砂州フラッシュとその復元過程の観察によれば、河口砂州からフラッシュした砂礫は波浪の作用で急速に復元されることが分かっている。これらを考慮して、洪水による河口砂州のフラッシュ地形として図-2 に示すように、上面は平坦で、その沖の海底面が $Y = -3$ m から 1/3 と急勾配の縦断面形を仮定した（ケース 1）。さらにケース 1 を基本として、フラッシュ後の砂州形成に使い得る砂礫量が小さくなった場合の砂州形成状況の相違を調べるために、河口砂州沖への流出砂礫量をケース 1 の 1/2、1/4、1/8 とした条件で計算を行った。

（2） 計算結果

図-3 にケース 1 の縦断面形変化を示す。河口砂州沖に十分な砂礫が存在する場合、砂礫は急速に岸向きに運ば

表-1 計算条件の詳細

対象範囲	下田港防波堤から河口導流堤：延長 250 m 区間
等深（高）線範囲	$z = 5$ m から -15 m
メッシュ間隔	$\Delta x = 20$ m, $\Delta z = 1$ m
時間間隔	$\Delta t = 0.05$ hr
ステップ数	2000 steps
漂砂量係数	$K_x = 0.2$, $K_z = 0.2K_x$, $K_0 = 0$
平衡勾配	$\tan \beta_c = 1/10$
土砂落ち込み時の限界勾配	1/2（陸上）、1/3（水中：砂州背面）
境界条件	両端部で $q_x = 0$ 、岸沖端で $q_z = 0$

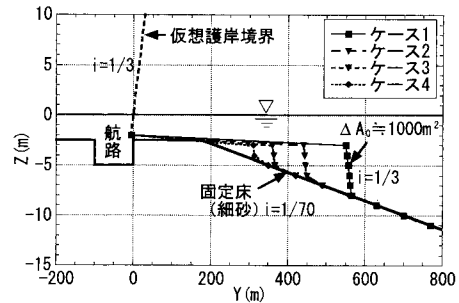


図-2 縦断面形の変化予測において仮定した4種の縦断面形

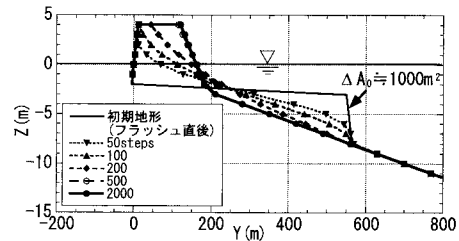


図-3 縦断面形の変化予測（ケース 1： $\Delta A_0 = 1,000 \text{ m}^2$ ）

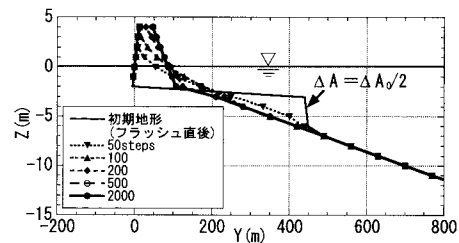


図-4 縦断面形の変化予測（ケース 2： $\Delta A = 1/2 \Delta A_0$ ）

れ砂州の復元が進む。地形変化は初期に急速であるが、時間経過とともに収束する。沖合に流出した砂礫は最終的に全て岸向きに運ばれ、高さ 4 m の河口砂州が復元される。図-4 に示すケース 2 では、河口砂州沖に流出した砂礫量がケース 1 の 1/2 と減少したために、河口砂州の復元は進むものの、砂州幅がケース 1 の 110 m に対し 40 m と大きく狭まった。他のケースも含めると、河口砂州の復元に要する砂礫量が減少すると、河口砂州は一定の高さを持った砂州の復元はできず、復元される砂州の高

表-2 3次元の河口砂州変形予測計算の条件

ケース番号	地形条件	漂砂の条件
5	河口砂州のフラッシュ地形	岸沖・沿岸漂砂考慮
6	河口砂州のフラッシュ地形	沿岸漂砂のみ考慮
7	河口砂州を開削し、土砂を搬出した地形	岸沖・沿岸漂砂考慮

さが次第に減少することが分かった。このことは高波浪時の河口砂州への越流が助長されることを意味する。

6. 河口砂州の復元に関する3次元計算

(1) 計算条件の設定

対象海岸地形は、展開座標を用いてモデル化した直線状等深線形状とした。3次元の河口砂州変形予測については、表-2に示すように4条件を仮定して計算を行った。ケース5は河口砂州フラッシュ後の復元計算の基本となるもので、河口砂州の土砂の一部が沖合に流出して堆積した場合を初期地形条件とする。ケース6は、沿岸漂砂の作用条件のみを変え、その他の条件はケース5と全く同じにした変形予測計算である。これはとくに岸沖漂砂の効果を調べるために、岸沖漂砂にかかる係数 K_s を0とし、沿岸漂砂の作用のみ考えたものである。ケース7は、河口砂州を開削し、土砂を搬出した地形を初期条件としたものであり、開削地形条件は、河口砂州のフラッシュ時に削り取られて形成される河道と同じ条件とした。具体的な初期地形は、ケース5の初期地形からフラッシュによる堆積土砂を除いたものである。

砂州の沖側勾配は、-3mから-10mの範囲での実測値に基づいて1/70、砂州の前浜勾配は1/10とした。砂州フラッシュ時の断面形は、-3mで浅が完全にフラッシュされ、沖端が勾配1/3で落ち込む平坦な河床を仮定した。

計算では、潮位条件は平均水面としT.P.0mとした。また、砂州高は $h_R=4$ mと仮定するとともに、 h_c は高知海岸での実測値と同等と考え、宇多(1997)より $h_c=10$ mとした。砂州形成時、砂州高は波の打ち上げ高で決まり、また波の打ち上げ高はほぼ碎波波高に等しくなることから、 $(EC_0)_0$ の計算に用いる碎波波高 H_0 は、 h_R (砂州高)にほぼ等しいとして $H_0=4$ mとおいた。さらに、波の入射方向は汀線に直角方向とし、碎波角を $\alpha_0=0^\circ$ とした。

(2) 計算結果

a) 河口砂州フラッシュ後地形の復元計算(ケース5)

図-5(a)には、洪水流によって河口砂州がフラッシュされた直後の地形を模した等深線形状を破線で示す。太い矢印で示すように、砂州への越流によって河口砂州が台形状に削り取られ、削り取られた砂礫が沖向きに運ばれ、台形状の等深線で表される形状で堆積したと仮定する。逆に、初期の砂州形状は砂州のフラッシュにより大

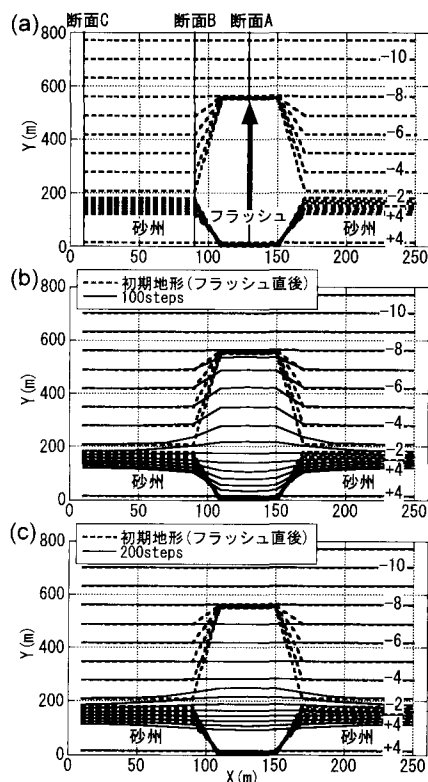


図-5 砂州復元時の等深線変化(ケース5:(a)初期,(b)100 steps,(c)200 steps)

きく窪むため、局所的に等深線形状が台形状となる。波が作用すると図-5(b),(c)に示すように、沖で台形状に突出した等深線は突出量が次第に減少していく。200 stepsまでに沖合の-4m以深の等深線は沿岸方向にほぼ平行となる。切れた砂州部では急激な砂の堆積が起こり、等高線が前進する。最終状態になると、洪水流によって沖向きに運ばれた砂礫は、河口砂州の切れた部分を完全に埋めて安定形状に至る。

b) 河口砂州フラッシュ後地形の復元計算(ケース6)

図-6(a),(b)には海浜形状を示す。岸沖漂砂の作用を無視し、沿岸漂砂の作用のみとしたために、沖合の突出地形では沿岸漂砂によって等深線に沿って両側へと砂が運ばれ、突起部では等深線が後退し、両側では等深線が前進した。また、ケース5と比較して対照的な変化として、砂州の窪みを埋めるために両側の砂州から砂が運ばれてきている。この結果、ケース5の場合には砂州自体の後退はないまま砂州の窪みが砂で埋められて砂州が復元されたが、ケース6では砂州全体の後退が起きた。

c) 河口砂州を開削し土砂を搬出した地形の復元計算(ケース7)

図-7(a),(b),(c)には海浜形状の変化を示す。この

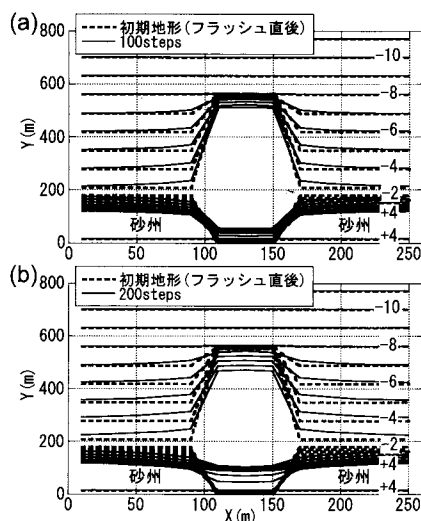


図-6 砂州復元時の等深線変化 (ケース 6 : (a) 100 steps, (b) 200 steps)

ケースでは、初期にはフラッシュに伴う沖合の突出地形は存在せず、砂州の窪みのみ存在する条件である。計算によれば、沖合地形には全く変化が見られず、砂州部でのみ地形変化が生じ、最終段階において沿岸方向に一般的な等深線を有する砂州が形成された。-3 m 以深には土砂が投入されていないから、-3 m 以浅の急勾配斜面の中だけで土砂収支を満足するよう海浜変形が起きた。このケースはフラッシュに伴う砂州上の窪みのみ設定し、そこを埋めていた砂は取り除いた条件であり、この条件は砂州から別の場所へ砂を運んだ結果、砂州を構成する砂量の欠損が起きた場合に相当する。この結果河口砂州の後退が起きたことは、河口砂州の砂の一部を取り去ることは河口砂州の後退を招くことを示している。

7. 結 論

① 四万十川河口砂州のように、砂礫からできた河口砂州が洪水流によってフラッシュされた場合、波浪の作用で砂州が復元することが知られているが、その地形変化は等深線変化モデルにより再現することができる。

② 砂州フラッシュ後の砂州の復元には岸沖漂砂と沿岸漂砂両者の作用が重要であり、沿岸漂砂の作用のみでは沖合へと運ばれた砂礫は沖合にたまるのみであって砂州の復元には結び付かない。

③ 等深線変化モデルによる河口砂州の復元計算では、ステップ数の増加とともに最終的に海浜形状がある一つの安定形状に収束する過程が明らかにできる。波浪作用があっても安定な海浜地形が計算できる点に大きな特徴がある。

④ 一次元計算の結果によれば、河口テラスを構成す

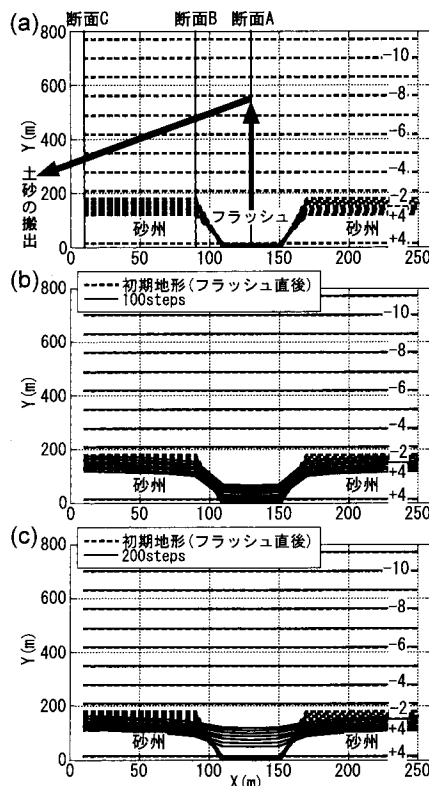


図-7 砂州復元時の等深線変化 (ケース 7 : (a) 初期, (b) 100 steps, (c) 200 steps)

る砂礫量が十分にある場合には天端高さが一定の、ほぼ台形状の河口砂州が復元される。しかし砂礫量が減少すると、フラッシュ以前のような高い砂州の復元が困難となり、砂州の標高が低くなる。このことは高波浪時の砂州越流が生じやすくなることを意味する。

⑤ 砂州フラッシュ時に沖合へと流出して堆積する砂礫が、沖合に堆積しないと仮定した場合 (すなわち人工的に砂州を開削して土砂を除去した場合)、波の作用で河口砂州は全体に後退する。河口砂州を構成する砂礫の除去は、河口砂州の後退を助長することになるので注意が必要である。

参 考 文 献

- 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.
- 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, No. 539, II-35, pp. 121-139.
- 宇多高明・住谷勉夫・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 (1997): 「日本の海岸侵食」, 山海堂, pp. 442.
- 建設省河川局海岸課監修 (1990): 実務者のための海岸工学一豊島 修論文集, (社)全国海岸協会編集, 山海堂, p. 316.