

粒径分級も考慮した河口テラスの形成・消失・砂州復元の予測モデル

Model for Predicting Formation, Disappearance and Recovery of a River Mouth Terrace Considering Sorting Effect of Sand with Different Grain Sizes

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

A model for predicting the formation, disappearance and recovery of a river mouth terrace was developed based on the contour-line-change model considering grain size changes. The topographic changes and grain size changes associated with the flushing process of a flood were first investigated, taking the mouth of the Abe River as the example. Predicted change in the river mouth terrace and grain size changes around the river mouth were in good agreement with the measured, showing the effectiveness of the numerical model.

1. まえがき

一般に、大河川では間欠的に生じる洪水により土砂が海域へ供給され、それが河口部に一度堆積した後、波の作用により分級されつつ漂砂によって運ばれ、河口周辺海岸へ供給される。この場合、河口部では時間スケールの異なる現象が起こるため、河口での土砂移動について質（粒径）をも考慮しつつ定量的な予測を行うレベルまでは至っておらず、また河川流と波の両者の作用を考えなければならないことから、その実態分析も十分とはいえない。このことから、各地の河川で洪水時の土砂流出に伴う河口テラスの形成と、漂砂によるその変形が現地調査により調べられてきた。目黒ら（2006）は、安倍川河口を対象として2003年12月から2004年12月15日までに7回の集中的深浅測量を実施し、河口テラスの地形変化を明らかにするとともに、海域をブロック別に分けて土砂変動量を算出した。この手法はしばしば用いられている手法であるが、ブロックの設定に任意性があるため、波による河口部の地形変化機構は十分明らかにできていない。本研究では、目黒ら（2006）が扱った安倍川河口を対象とし、洪水による砂州フラッシュ時に形成される河口テラスの発達と消失、さらには砂州の復元過程

を熊田ら（2005）の粒径を考慮した等深線変化モデルを用いて予測する。

2. 河口砂州フラッシュ時の地形変化と底質特性

安倍川河口において著しい地形変化が観測された2004年10月の台風22、23号による土砂フラッシュとその後の土砂の回帰過程（目黒ら、2006）を再現対象とする。図-1(a)は台風襲来前の2004年9月における河口部地形を示す。河口砂州は河口中心に対し東西非対称であり、西側は直線状なのに対し東側は凹状であった。このように直線状に伸びた汀線は、卓越波浪が右回りの方向、すなわち開口部西側の汀線とはほぼ直角方向から入射していることを強く示唆する。また、-4m から+3m までの等深線は密に並び、勾配が1/9と急なのに対し、-6~-10m の海底勾配は1/50と汀線付近の勾配と比べて緩やかである。図-1(b)は台風22号来襲後の10月の地形であるが、河口中心部の-2~-4m には洪水流による河口砂州のフラッシュによって舌状の河口テラスが形成された。2005年2月では、図-1(c)のように突出していた河口テラスは侵食されてつぶれ、河口テラスを囲む等深線がなだらかになった。同時に右岸砂州が河道を塞ぐよう東向きに大きく伸び、図-1(a)に示した洪水前の形状がほぼ復元された。

図-2は、図-1の測線 a-a' に沿う縦断形変化を示す。2004年9月には高さ2.7m のバームが発達し、そこから1/10勾配で-3m まで落ち込んだのち、-3m 以深では1/60と次第に緩くなる勾配を持った縦断形であった。しかし洪水後の2004年10月の縦断形ではバームは消失し、砂州を横切って運ばれた砂礫が堆積して河口テラスが形成された。河口テラスの上面水深はほぼ-2m であり、-2m 以深では1/30勾配で落ち込んでいる。このように

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

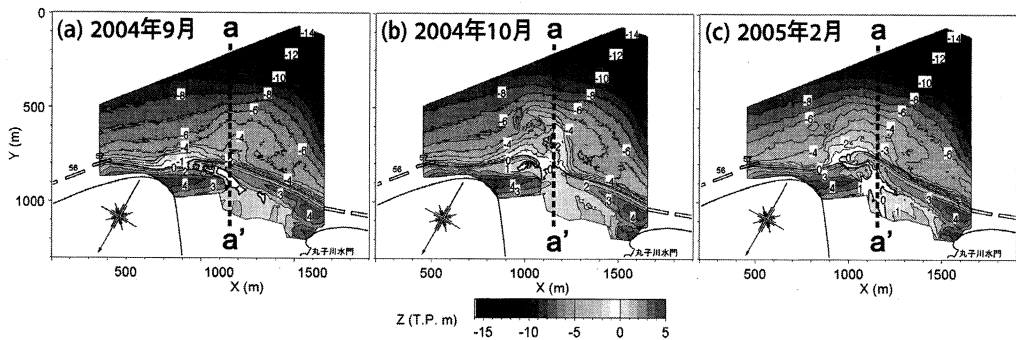


図-1 安倍川河口部の地形 (2004年9月, 10月, 2005年2月)

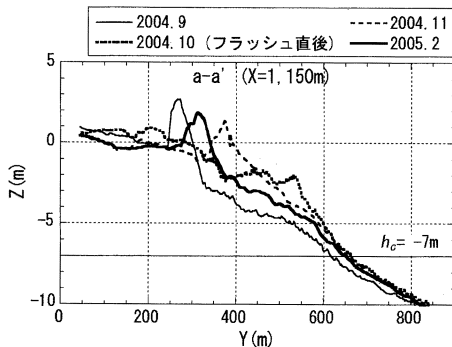


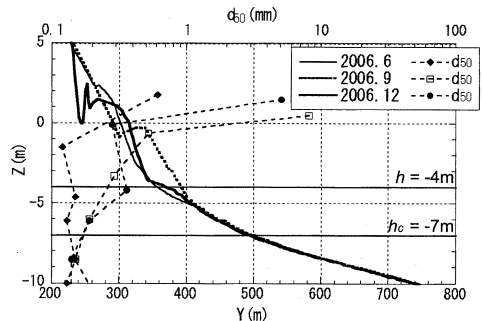
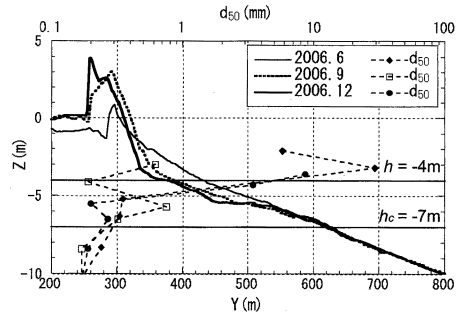
図-2 測線 a-a'におけるフラッシュ前後の縦断面形変化

して形成された河口テラスも、その後の波の作用で砂礫が岸向きに運ばれ、11月ではバームの成長が進んだ。さらに2005年2月にはバーム高は1.9mとなり、縦断面形は2004年9月の形状を全体的に40m 沖出した形となった。またこの断面での h_c はほぼ-7mにある。

安倍川河口沖では、図-1に示す $X=560, 1,000\text{m}$ 断面において2006年に3回の底質採取が行われた。図-3は $X=560\text{m}$ 断面における縦断面形と d_{50} の水深方向分布を示す。6月には滑らかな縦断面形であったが、9月にはフラッシュにより河口テラスを形成していた土砂が運ばれ堆積した。この場合、ほぼ-4m以浅では粗粒材が堆積したが、-4mより深い場所では0.2mm程度の細砂で覆われている。その後12月までに堆積土砂の大部分は運び去られたが、粒径的には9月の分布とほぼ同様である。 $X=1,000\text{m}$ 断面でも図-4に示すように、-4m以浅で礫が堆積しているのに対し、-4m以深の海底面は0.2mm程度の細砂で覆われている。また波による地形変化の限界水深はほぼ-7mにあることも分かる。

3. 洪水による河口テラスの形成予測モデル

洪水流による河口砂州のフラッシュ時、河川流は砂州を越流し次第に水深を増加させながら海へと流出する。しかし淡水と海水の密度差のために河川水は表層に集中して流れ易く、また河口砂州は水深が増加するに従いそ


 図-3 $X=560\text{m}$ 断面における縦断面形と d_{50} の水深方向分布

 図-4 $X=1000\text{m}$ 断面における縦断面形と d_{50} の水深方向分布

の幅が大きくなるので、洪水のように一時期に急速に水位が上昇して流れる場合、砂州はバーム頂から削り取られるが、ある深さまで侵食されると下方への侵食は弱まり、むしろ側方侵食が活発になると考えられる。2004年に安倍川河口で観測された砂州フラッシュもこれに相当し、上面がほぼ-2mの一定水深の河口テラスが形成された。このような砂州フラッシュでは、洪水流の作用により水面からある深さ、ここでは-2mまでに集中した冲向きの流砂量が与えられることになる。このようにして河口から集中的な土砂移動が起こり、しかも短時間の作用のため土砂の分級が進まずそのまま堆積すると考える。この時水面近くに投入された土砂が重力作用を受けて海底面へ落ち込むという現象となる。この現象は海蝕崖からの崩落土砂が海岸へ供給される過程 (芦沢ら, 2007) と全く同様である。

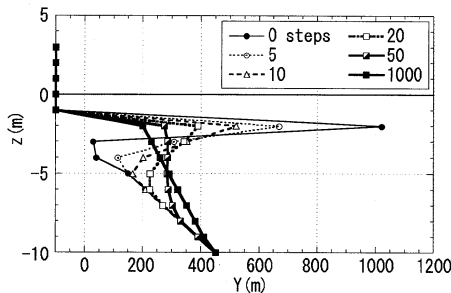


図-5 河口テラス形成のモデル化

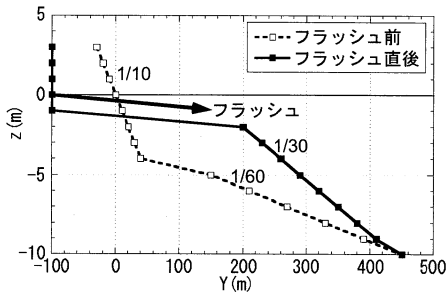


図-6 フラッシュ前後の縦断面形

予測は等深線変化モデル(芹沢ら, 2002)を用い, 現象を岸沖方向の一次元問題として扱い, 砂州断面積と, 砂州単位幅あたりの河川流出土砂量の和をフラッシュ土砂量とする. この土砂量を, 初期地形における水深2mの等深線で代表され, 鉛直方向に単位長さを有する区間に集中的に注入する. 注入された土砂は重力作用により海底面に落ち込み, 同時に波の作用によりテラス地形を形作ると考えられる. この考えにしたがい, フラッシュ前の地形を固定床(護岸)扱いとして, 芹沢ら(2002)に従い安息勾配の代わりに河口テラスの沖側斜面の限界勾配を与え, 重力作用による下向き漂砂式と連続式(原論文の式(14)~(21), 式(9))を連立して安定地形が得られるまで繰り返し計算を行う. 図-5は計算結果を示す. 土砂は重力作用で下方へと落ち込み, 最終的に土砂の平衡勾配を有する河口テラスが形成される(図-6).

4. 計算条件

熊田ら(2005)による粒径分級を考慮した等深線変化モデルを用い, 台風22号時のフラッシュ地形を初期地形とし, その後の土砂の回帰を再現対象とした. 安倍川河口では, 細長い河口砂州が右岸側から伸びており, 過去の調査からこの砂州の汀線は安定していることが分かっている. これより, この砂州と直交方向($S5^\circ E$)が卓越波向を与える. そこで図-7のように, 河口(a-a')で汀線の方向が 25° 曲がり, その右側, 左側とも直線状の汀線となる初期地形を設定し, この初期地形に洪水流によって土砂が堆積して河口テラスが形成される場合を考

表-1 計算条件

数値計算手法	等深線・粒径変化モデル(熊田ら, 2005)
計算対象範囲	安倍川河口部: 1.1km
計算期間	4000 hr (5.5 カ月): 2004年9月~2005年2月のフラッシュ前後の地形変化実施の再現
初期地形	交差角 25° を有する直線状等深線でモデル化 海底勾配: -4m 以浅 1/10, -4m 以深 1/50~1/70
粒径構成	$N=3$ 粒径 (第3の粒径は不動の仮想粒径とし, 漂砂係数=0) 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 $\mu_1=0.0$, $\mu_2=0.0$, $\mu_3=1.0$ (フラッシュ土砂の堆積域では $\mu_1=0.5$, $\mu_2=0.5$, $\mu_3=0$)
交換層の幅	$B=1\text{m}$ ($B=\Delta h/\tan\beta$; 混合層厚 $\Delta h=0.03H_b \approx 0.1\text{m}$, $\tan\beta=1/10$)
入射波条件	砕波波高 $H_b=0.7\text{m}$ (2004年10月~2005年2月のエネルギー平均波高) 入射波向=右回りに 25° から入射 ($S5^\circ E$: 河口砂州汀線に直角)
潮位条件	M.S.L. $\approx$ 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 $A=0.08$, 岸沖・沿岸漂砂量比 $\gamma=0.2$, 小径・プランプトン項の係数 $\zeta=0$
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	$z=+3.5\text{m} \sim -10.5\text{m}$
計算メッシュ	沿岸方向 $\Delta X=50\text{m}$, 鉛直方向 $\Delta Z=1\text{m}$
計算時間間隔 Δt	$\Delta t=1\text{ hr}$ (20,000 ステップ=20,000hr まで計算)
境界条件	右端(上手端): $Q=0$ 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
河口フラッシュの計算条件	フラッシュ区間: $x=1000 \sim 1200\text{m}$, フラッシュ水深=-2m 以深, 安定限界勾配=1/30, フラッシュ時の縦断面地形の安定勾配=1/30

えた. また沖合等深線は実測地形をもとに河口沖で緩やかに突出する条件とした. さらにフラッシュ土砂の堆積空間である初期地形は固定床と考え, フラッシュ土砂のみの移動予測を行う方式とした. 表-1には計算条件を示す. 波高は2004年10月の台風22号によるフラッシュ以降から2005年2月の測量時までのエネルギー平均波高として $H_b=0.7\text{m}$ とした. 波向は 25° 右寄り ($S5^\circ E$) とし, 波による地形変化の限界水深とバーム高はそれぞれ $h_c=-7\text{m}$, $h_R=3\text{m}$ とし, 計算時間間隔は $\Delta t=1$ 時間とした.

5. 計算結果

(1) 河口テラスの平面形状の変化

河口テラスは, 図-7の初期地形に3.で述べた計算法により土砂をフラッシュさせて形成させた. 具体的には, 実態とはほぼ同様な開口部幅 ($X=1000 \sim 1200\text{m}$, 図-1参照) を考え, その間で沿岸方向には一様で, 鉛直方向には単位長さを有する部分に集中的に土砂を注入して, これを条件として前述のモデルを用いて繰り返し計算を行い, フラッシュ後の平面地形を求めた. 計算は試行的に行い, 実態と同様な河口テラスが再現でき, かつ $h_c=-7\text{m}$ 以深まで土砂が落ち込むような土砂量は 25万 m^3

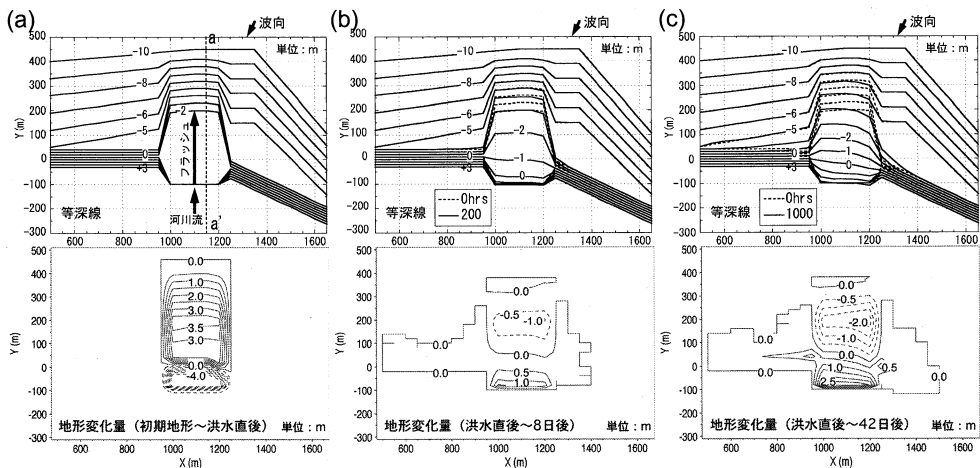


図-8 計算結果（等深線および水深変化量）

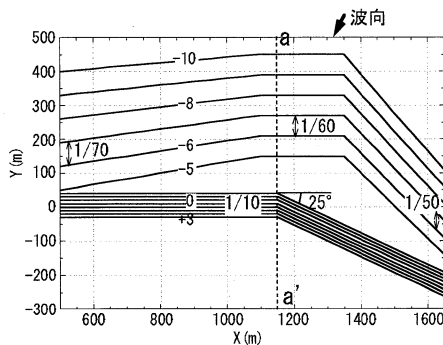


図-7 洪水前初期地形

であった。ここに25万 m^3 の内訳は、砂州の水深1m以浅がフラッシュされることから供給される土砂量が11万 m^3 、上流からの土砂供給量が14万 m^3 であって、両者の和が河口沖に流れ込んだ条件となる。

図-8(a)はフラッシュ直後の河口テラスの初期地形と初期からの地形変化量を示す。図-2の実測結果と同様、高さ3mのバームが削り取られ、上面水深が2m、沖側斜面勾配1/30のテラス地形が形成されている。波の作用による砂州の復元では、実測砂州幅が100mであることを考慮し、新たに形成された開口部において砂州の陸側100mに仮想壁を設け、そこで砂州の発達が始まると考えた。地形変化図によれば、フラッシュ前の河口砂州が最大4mまで掘られ、侵食土砂が沖合に堆積し河口テラスを造っている。この状態で波の作用があると、沖合に流出した土砂（ $d_1=0.2\text{mm}$ 、 $d_2=2\text{mm}$ ）はそれぞれの平衡勾配1/10、1/35となって初めて安定となり、局所勾配が平衡勾配より小さければ土砂移動が継続的に起こる。

図-8(b)は前述の熊田らのモデルによって予測した波作用後8日後（200時間）の河口テラスの形状と地形変化量分布を示す。突出した河口テラスの上面ではフラッシュ

直後2mの平坦面であったが、8日後にはテラスの沖側端を示す-2mの等深線が急激に後退する一方、陸側にも土砂が運び込まれて砂州の復元が進んだ。初期との地形変化量の平面分布で見ても、フラッシュされた河口砂州部分で集中的な堆積が起こり、土砂が岸向き漂砂によって開口部へと運び込まれたことが分かる。一方、 $h_c=-7\text{m}$ より沖へと運ばれ堆積した部分はそのまま残された。

フラッシュ後42日後（1000時間）では、図-8(c)のように河口テラスの沖側斜面がさらに削られ、そこから土砂が岸向きに運ばれ砂州の復元がさらに進む。岸向き漂砂が卓越するだけではなく、河口テラスに対して右斜めの方向から波が作用しているため、河口テラスの右側領域で侵食速度が大きい。侵食土砂は右側に一部逆流して堆積するが、波の入射角が小さいため逆流量は大きくない。これと対照的に、左側区域ではより広い区域まで砂礫が運ばれているのが分かる。同時にフラッシュした河口砂州部分においても土砂は左右非対称形を持って堆積している。

(2) 汀線と4, 5m等深線の平面的変化

図-9には汀線の平面的変化を示す。初期汀線に対して凹状の窪みが形成された後、波の作用により土砂が急速に堆積し、元の汀線形状へと復元していく。窪みの大半が土砂で埋められるのに要する時間は1000時間と短い。フラッシュ後の汀線はこのように急速に復元が進むことが特徴である。同様にして-4mの等深線の時間的変化を図-10に示す。当初大きく突出していた河口テラスが沖合から削られるとともに-4mの等深線が後退していく。汀線変化では1000時間までに大部分の変化が収束したのに対し、-4mの等深線では変化が遅く、大半の変化が終了するのに6000時間と6倍長い時間を要している。そのほか汀線変化では開口部より右側区域の汀線には全く変化が生じていなかったが、図-10では一部の砂が逆

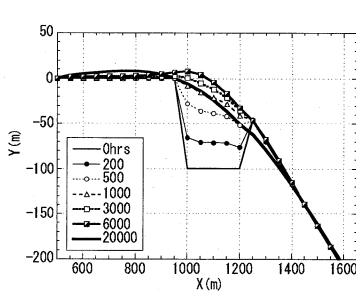


図-9 汀線変化

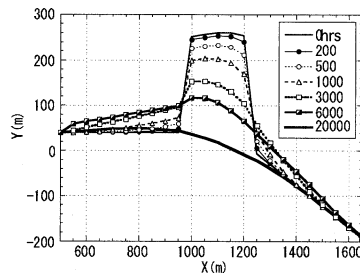


図-10 -4m等深線の変化

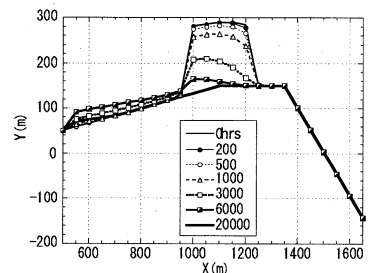


図-11 -5m等深線の変化

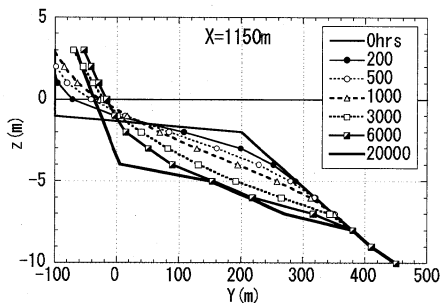
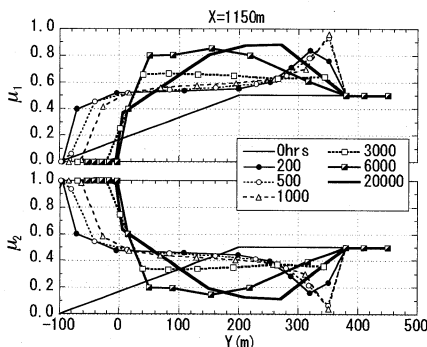


図-12 海浜縦断面形変化

図-13 細粒と粗粒の含有率 μ_1 , μ_2 の岸沖分布の変化

流する形で堆積し、河口テラスの右側領域でも等深線が前進するが、その堆積土砂も時間とともに削られている。図-11は-5mの等深線の変化である。水深が大きくなると漂砂量が小さくなるために、突出した河口テラスが削られる場合、-5mの等深線の変化は-4mの等深線と比べてさらに遅くなる。また-5mでは河口テラスの右側区域へ土砂が運ばれることなく、侵食土砂は岸向きに打ち上げられると同時に、一部の土砂は左側区域へと流出している。

(3) 縦断面形変化と粒径含有率の岸沖分布

図-12には $X=1,150\text{m}$ 断面の海浜縦断面形の変化を示す。洪水によって上面が平坦な河口テラスが形成された後、テラスの沖側の肩の部分から侵食され始め、土砂が岸向きに急速に運ばれ勾配が次第に急になる。2005年2月の測量時に該当する4ヶ月後(3000時間)では、-1、-2m

以深のテラスが削られバームが発達している。この特徴は図-2で示した実測断面変化とよい対応を示す。1000時間までに河口テラスの突出部分はほとんど削り取られ、鉛直上方に凹な縦断面形となった。この時間までに河口砂州は復元されるが、その後は沿岸漂砂の作用で土砂が運び去られるために、縦断面形がほぼ平行移動しながら後退する。

$X=1,150\text{m}$ 断面における細粒 ($d_1=0.2\text{mm}$) と粗粒 ($d_2=2\text{mm}$) の土砂に対応する含有率 μ_1 , μ_2 の岸沖分布を図-13に示すが、河口砂州の復元が進む際、そこでは粗粒分で埋められ、細粒分はほとんどないことが分かる。これと対照的に、沖合では細粒分の割合が増加し、粗粒分の含有率の低下が起こる。

6. まとめ

本研究では、安倍川河口を対象として、河口砂州フラッシュ時の地形変化と底質特性を分析し、等深線変化モデルを用いてフラッシュ土砂の堆積空間である初期地形は固定床と考えフラッシュ土砂のみの移動予測を行う方式により予測を行った。その結果、洪水による砂州フラッシュ時に形成される河口テラスの発達と消失、さらに砂州の復元過程に見られる地形変化および底質特性の特徴が再現され、本研究の予測手法の有効性が示された。

参考文献

- 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.
- 目黒嗣樹・沖 岳大・山本浩一・山本幸次・末次忠司 (2006) : 出水による安倍川河口部の土砂動態, 海洋開発論文集, 第22巻, pp.427-432.
- 芹沢真澄・宇多高明・星上幸良 (2007) : 等深線変化モデルによる海岸崖～海浜系の地形変化予測, 海洋開発論文集, 第23巻, pp.1069-1074.
- 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, 49, 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.