

ダム再編事業に伴う天竜川河口デルタの長期 変形予測-海岸構造物なしの条件

LONG-TERM PREDICTION OF TOPOGRAPHIC CHANGES OF TENRYU RIVER
DELTA ASSOCIATED WITH SAND BYPASSING AT DAMS IN UPPER BASIN-
NO COASTAL FACILITY CONDITIONS

宇多高明¹・石川仁憲²・宮原志帆³・古池 鋼³・芹沢真澄⁴

Takaaki UDA, Toshinori ISHIKAWA, Shiho MIYAHARA, Kou FURUIKE and
Masumi SERIZAWA

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 (〒110-0016 東京都台東区台東1-6-4カカレビル)

²正会員 工修 (財) 土木研究センターなぎさ総合研究室 (〒110-0016 東京都台東区台東1-6-4カカレビル)

³海岸研究室 (有) (〒160-0011 東京都新宿区若葉1-22 ローヤル若葉301)

⁴正会員 海岸研究室 (有) (〒160-0011 東京都新宿区若葉1-22 ローヤル若葉301)

The long-term topographic changes of the Tenryu River delta were predicted using the contour-line-change model considering the change in grain size. Given the annual discharge of sediment with three grain sizes, the recovery of the delta topography and nourishment effect to the nearby coasts were predicted. Under the imaginary conditions that various coastal structures had not been constructed along the coast, the effect of the artificial sand supply from the river mouth was studied. The model was applied to the coast with a 20 km length on both sides of the river mouth and the beach changes after 100 years from the present were predicted.

Key Words: River delta, Tenryu River, contour-line-change model, sand bypassing at dams

1. まえがき

中部山岳地帯で生産された大量の土砂を海まで運び、河口部に広大なデルタを発達させてきた天竜川では、上流部におけるダム群の建設などにより流出土砂量が激減した結果、近年では突出してきた河口デルタの先端部で汀線の後退が顕著になった。こうした状況の下で、中・下流部の洪水被害の軽減を目的としたダム再編事業が計画され、ダム上流部の堆積土砂を下流に流す計画が進められている。この計画の事業効果を明らかにするには、土砂供給が行われた場合の海岸での効果予測が必要である。宇多ら¹⁾は、天竜川河口デルタの変形に熊田ら²⁾の粒径を考慮した等深線変化モデルを適用して地形変化予測を行った。平行等深線から出発し、河口から毎年一定量の土砂が供給される条件を与え、河口デルタがその形状を保ちつつ一定速度で成長する過程を予測し、自然状態にあったと考えられる1890年当時の河口デルタとの比較からモデルの再現性を確認した。その上でダム建設に伴って河川流出土砂量が減少した場合と、対策により流下土砂量が増加した場合の海岸に及ぼす影響・効果について検討した。この検討は、海岸に各種構造物が設置された条件で行われた。このため構造物と河川流出土砂量の急減の影響

が同時に生じており、個々の影響の区分が難しかった。本研究では、沿岸に各種人工構造物が建設されていない仮想的状態の下で河口から土砂が供給された場合の地形変化予測を行った。予測期間は2005年から100年後までとし、計算範囲は河口両翼の延長20kmの海岸線とする(図-1)。

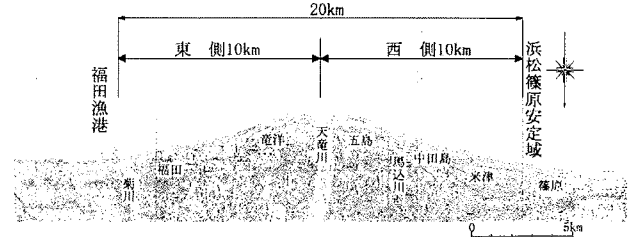


図-1 天竜川河口デルタの形状と境界条件の設定

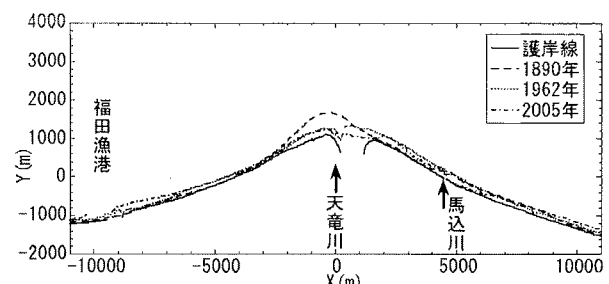


図-2 天竜川河口デルタの汀線変化

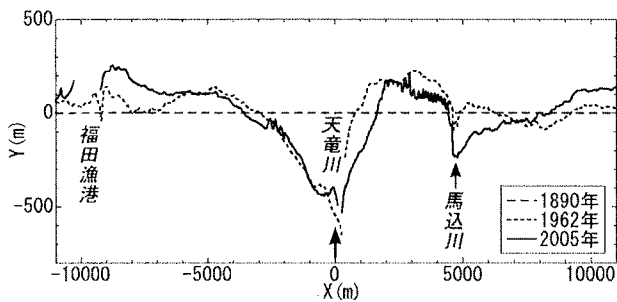


図-3 1890年基準での汀線変化

2. 天竜川河口デルタの変遷と海岸への土砂供給

天竜川河口部海岸線の長期的変遷を示すデータとしては、1890年（明治22年）の地形図が最初であり、その後天竜川からの流出土砂量の減少が始まっていた1962年、そして現況の2005年がある（図-2）。計算ではこれら各時期の海岸線形状を再現対象とした。図-3は1890年基準での汀線変化量であるが、1890年基準では河口中心部で2005年までに最大約600mの汀線後退が起きた。また汀線後退区域は、河口中心部に対してほぼ三角形に分布する。一方、 $X=10\text{km}$ 以西や $X=-5\text{km}$ 以東の汀線はほぼ平行に前進している。これは河口デルタの変形が起こる際、河口中心部では汀線が後退しても過去に河口から供給された土砂が沿岸漂砂によって運ばれ堆積するため、河口から十分離れた場所では汀線が単調に前進するという河口デルタの特徴³⁾が現れていることによる。また2005年の汀線変化に顕著に現れているように、竜洋海岸に5基、馬込川河口以東に22基の離岸堤群が設置されているため、そこを境として汀線に段差が付いている。

ダム建設・砂利採取前における天竜川からの流出土砂量については既に宇多ら¹⁾で考え方について述べたのでそれを参照した。天竜川からの流出土砂量については、河川側では一次元河床変動計算をもとに、ダム建設前の流域からの流出土砂量がダム建設によってカットされた流域を除く残留域からの流出土砂量まで減少するという考えのもとで計算が行われ、ダム建設・砂利採取前後で $94\text{万 m}^3/\text{yr}$ から $24\text{万 m}^3/\text{yr}$ まで減少したとされている。一方、海岸では過去1万年間での扇状地の発達などを基にした推定値として、ダム建設・砂利採取前後で平均 $60\text{万 m}^3/\text{yr}$ から $0\text{万 m}^3/\text{yr}$ まで激減したとして海浜変形計算が行われ、海浜部での海浜変形でこの値を用いたとき再現性がよいことが明らかになっている⁴⁾。ダム建設前の流出土砂量の絶対値については不明確さが残されるものの、ダム建設前後における流出土砂量の比（25.5%）はかなり信頼性が高いと考えられる。そこで流入土砂総量については扇状地形成から推定され、海浜変形との対応も確認されている流出土砂量 $60\text{万 m}^3/\text{yr}$ を用い、一方、ダム建設・砂利採取前後の流出土砂量については、上記の比（25.5%）が維持されていると考え、ダム建設・砂利採取後には $15\text{万 m}^3/\text{yr}$ となったと仮定した。ダム

排砂量と排出土砂の質は様々設定できるが、これらについては天竜川ダム再編事業において計画されている条件を用いた。

3. 計算条件

表-1には計算条件を示す。再現計算は2ケース行なった。1890年地形（国土地理院の旧版地形図初版当時）の再現は、自然状態にあった当時の $60\text{万 m}^3/\text{yr}$ の土砂が供給される場合である。この場合の粒径別供給土砂量は、細粒が $33\text{万 m}^3/\text{yr}$ 、中粒が $26\text{万 m}^3/\text{yr}$ および粗粒が $1\text{万 m}^3/\text{yr}$ である。河口デルタは、河川からの土砂供給を前提として長い年月をかけて発達を続け、汀線が一定速度で前進するという特性を有している³⁾。そこで平行等深線形状を初期値として、Furuie *et al.*³⁾の方法で海岸線が $1.5\text{m}/\text{yr}$ の定速で前進するとして海岸線の単位長さ当たり $15\text{m}^3/\text{m}/\text{yr}$ の土砂を差し引くことによりデルタが一定形状を保ちながら一定速度で前進する状況を再現した。 $60\text{万 m}^3/\text{yr}$ の流入土砂量を与えるとともに左右岸の海岸線へ入射角 20° で波を作用させ、この計算により各種係数の同定を行った（図-1参照）。なお、表-1に示す粒径別の土砂供給量は100年間の平均値とする。表-2には計算で与えた具体的な条件と定数をまとめて示す。1956年は佐久間ダムが建設された時期であり、この時期まで自然状態の海岸線は前進していたと推定されるので、この間の汀線前進状況の再現を行った。将来予測は100年後までとし4ケースの計算を行った。供給土砂量と含有率は天竜川ダム再編事業において計画されている条件を用いた。

表-1 流出土砂量（海岸への供給土砂量）

単位： $\times 10^4 \text{ m}^3/\text{yr}$

ケース	細粒 $0.1 < d < 0.25$ mm	中粒 $0.25 < d < 0.85$ mm	粗粒 $0.85 \text{ mm} < d$	総量
1.自然状態 1890年 (明治23)	33	26	1	60
2.自然状態 (ダムなし) 1956年 (佐久間ダム建設時)	33	26	1	60
3.現状再現 2005年	5	9	1	15
4.現状維持	5	9	1	15
5.ケース1	14	11	1	26
6.ケース2	19	14	1	33
7.ケース3	21	17	1	39
8.ケース4	28	24	1	52

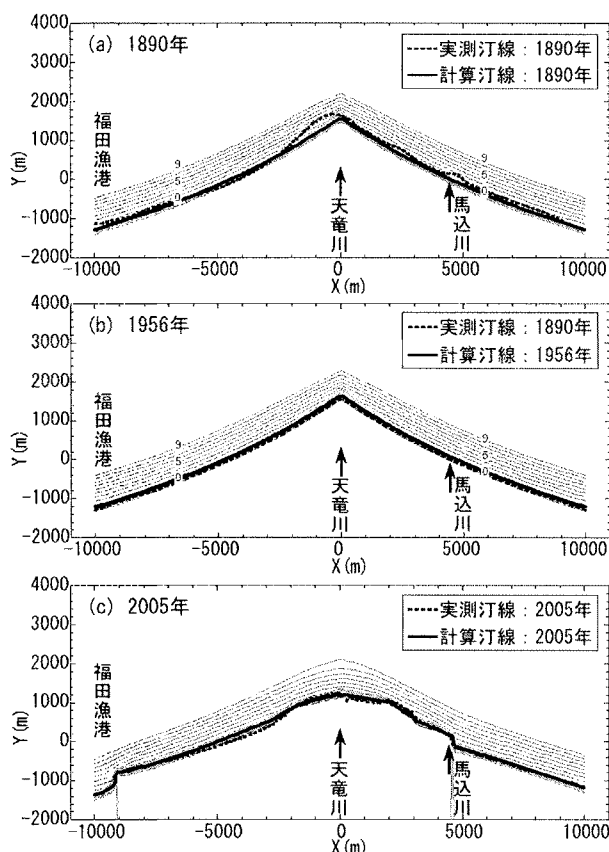


図-4 1956, 2005年地形再現

4. 再現計算の結果

平行等深線を与え 9000 年間の土砂流入を与えて予測した 1890 年の河口デルタの地形を図-4 (a) に示す。天竜川からの土砂供給により河口デルタが発達し、河口を中心とする二等辺三角形形状の等深線形状となる。図-4 (b) は、佐久間ダム建設直前の 1956 年までの地形の再現結果を示す。1890 年から 1956 年の汀線変化量はわずかであり、この時点まで動的平衡状態を保って等深線が前進していたと考えられる。図-4 (c) は、2005 年現況地形の再現結果であり、河口周辺でデルタがつぶれる状態が計算できている。

5. 予測計算の結果

5.1 水深変化量

図-5には現状維持（供給土砂量15万 m³/yr、細砂・中砂・粗砂以上の含有率：35%，61%，4%）の場合における10, 50, 100年後の水深変化量の分布を示す。宇多ら¹⁾と異なり、海岸には沿岸漂砂を阻止する構造物がないため、河口中心に対して東西で線対称の結果となる。10年後では河口部を中心として両翼の海岸が侵食傾向となる。この特徴は時間経過とともに顕著となり、50年後では河口の両側4km 区間では顕著な侵食が起こる。100年後には50年後の予測結果がより顕著となり、河口の東西5km 以内で著しい侵食が生じる。一方、両翼の5km 以上離れた海岸では河口中心での侵食傾向と逆に堆積傾向を示す。

表-2 計算条件

計算モデル	混合粒径砂の分級過程を考慮した海浜変形モデル ²⁾
計算対象区域	天竜川河口両翼10km
計算番号	1. 1890年再現（自然状態） 2. 1956年再現（佐久間ダム建設直前） 3. 2005年再現 4. 現状維持 5. ケース1 6. ケース2 7. ケース3 8. ケース4
初期地形	直線平行等深線
入射波条件	沖波波高 $H=1.6$ m, 周期 $T=7$ s 波向： S 1890年初期汀線への波の入射角 $\theta_w=20^\circ$, $S_{\max}=10$, 波の抽出回数：1step毎
潮位条件	M.S.L.=T.P. ± 0.0 m
計算等深線	$z=+3$ m $\sim$ -9 m $h_c=9$ m バーム高 $h_R=3$ m
計算空間メッシュ	沿岸方向 $\Delta X=100$ m, 鉛直方向 $\Delta Z=1$ m
計算時間間隔	$\Delta t=200$ hr
計算ステップ数	43.8ステップ/yr
粒径	・ 粒径数（3成分）と平衡勾配 粒径1： $d_{50}=0.25$ mm, $\tan\beta=1/100$ 粒径2： $d_{50}=0.425$ mm, $\tan\beta=1/40$ 粒径3： $d_{50}=2.0$ mm, $\tan\beta=1/20$ ・ 交換層厚：底面長単位幅あたり 勾配1/100：0.5 m, 勾配1/40：1.25 m, 勾配1/20：2.5 m ・ 含有率： 交換層A $\mu_1=0.483$, $\mu_2=0.483$, $\mu_3=0.033$ 交換層B（岸沖方向分布あり） $\mu_1=0.0\sim 1.0$, $\mu_2=0.9\sim 0.0$, $\mu_3=0.1\sim 0.0$
漂砂量	・ 沿岸漂砂量係数 粒径1： $K_x=0.0440$ 粒径2： $K_x=0.0338$ 粒径3： $K_x=0.0156$ ※ $K_x=A/\sqrt{d_{50}}$ 係数 $A=0.0220$ ・ 小笹・Brampton 係数： $K_2=1.62K_x$ ($\tan\beta=1/30$) ・ 岸沖漂砂量係数： $K_z=0.15K_x$ ・ 土砂落ち込みの限界勾配 陸上 1/2, 水中 1/3
境界条件	・ 自然状態, 1890年再現 河口 $q_{in}=60$ 万m ³ /yr 左端, 右端 $q_{out}=15$ 万m ³ /yr （底質は同地点の含有比）※ 岸沖端： $q_z=0$ ・ 2005年再現, 将来予測 河口 $q_{in}=15$ 万m ³ /yr, その他条件は自然状態と同一 ※左右端部境界条件15万m ³ /yrは、静岡県保の保全事業における竜洋海岸の計算実績からの推定値。

また侵食・堆積の境界位置は時間的にほぼ一定である。

ケース1(供給土砂量26万m³/yr、細砂・中砂・粗砂以上の含有率：55%，43%，2%)の水深変化量の予測結果を図-6に示す。放置の結果(図-5)と比較すると、土砂供給量が増加した効果もあって10年後には河口の両側2km以内の浅海部ではわずかな堆積傾向を示すが、時間経過とともに堆積域も消失し、侵食の程度は軽減されるものの河口両側の砂浜を復元させる効果は出ない。また侵食量は汀線付近で大きい。過去からの天竜川の流出土砂量60万m³/yrの43%の土砂供給量では河口デルタの侵食は止まらないことが分

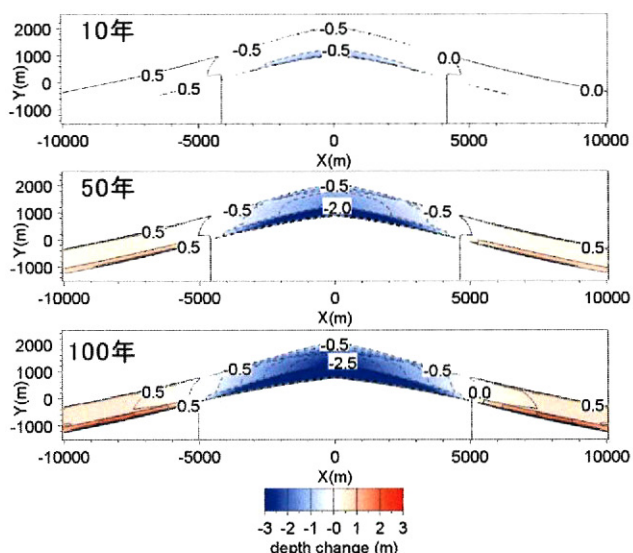


図-5 水深変化量の予測結果（現状維持）

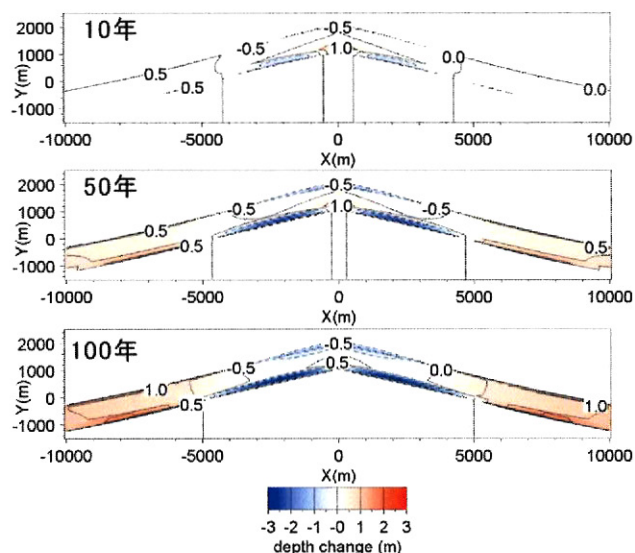


図-7 水深変化量の予測結果（ケース2）

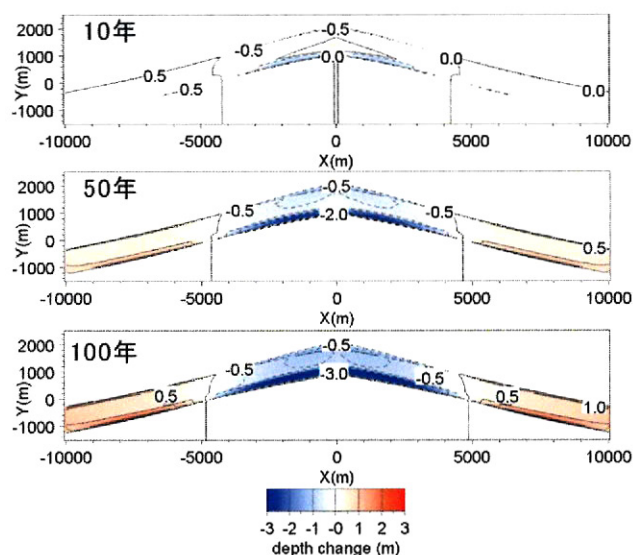


図-6 水深変化量の予測結果（ケース1）

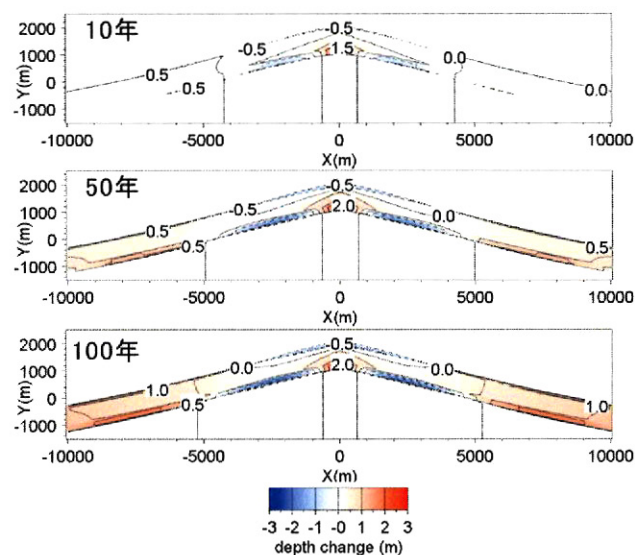


図-8 水深変化量の予測結果（ケース3）

かる。

ケース2（供給土砂量33万 m^3/yr ，細砂・中砂・粗砂以上の含有率：57%，41%，2%）の水深変化量の予測結果を図-7に示す。ケース1より流入土砂総量が7万 m^3/yr 増加したのみであるが，結果にはかなり大きな違いが出ている。供給土砂量の増加によりケース2と比較して河口を中心とするデルタ状の土砂堆積域は広がる。ケース1では河口部が堆積傾向となるのは10年目までであったが，流入土砂量の増加によって河口部にあつては100年後まで堆積傾向が続いている。またケース1では河口の両翼の5km以遠でのみ堆積傾向であったが，ケース2では堆積域と侵食域の境が河口から3.5km付近まで接近し，堆積域が拡大した。

ケース3（供給土砂量39万 m^3/yr ，細砂・中砂・粗砂以上の含有率：55%，43%，2%）の水深変化量を図-8に示す。ケース2より土砂総量がさらに6万 m^3/yr 増加したため，河口部を中心とする土砂堆積傾向が更に顕著になった。この場合河口両翼の1km

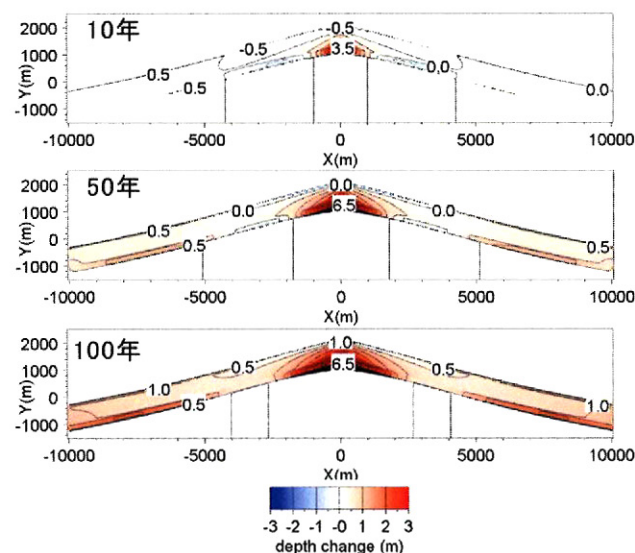


図-9 水深変化量の予測結果（ケース4）

区間では著しい堆積を示すが、その両側の汀線付近では侵食傾向のままである。

ケース4(供給土砂量 $52\text{万m}^3/\text{yr}$ 、細砂・中砂・粗砂以上の含有率：53%、46%、2%)の水深変化量を図-9に示す。供給土砂量が自然状態における天竜川の流出土砂量 $60\text{万m}^3/\text{yr}$ に近づいたため、河口を中心として両翼の海岸線全域が堆積傾向に変わった。過去天竜川の流出土砂量に近づいたことにより河口デルタの再生が進む。それに比べケース2のように流入土砂量が当初の1/2程度では時間経過とともに効果が薄れていくことが分かる。

5.2 河口部等深線形状の比較

天竜川からの土砂供給量が増加するという条件のもとで予測した、100年後における河口を中心として東西10km区間の等深線形状を図-10(a)～10(e)に示す。図には比較のために現況再現計算で求められた2005年の汀線を重ねて示す。総量 $15\text{万m}^3/\text{yr}$ の土砂が流れる現状維持の場合では、図-10(a)に示すように時間経過とともに河口部を中心とした等深線の後退が起こり、汀線後退量は河口で最も大きい。汀線後退量は河口から離れると小さくなる。総量 $26\text{万m}^3/\text{yr}$ の土砂が流れるケース1の場合(図-10(b))、河川流出土砂量が増加したため現状維持の場合と比較すれば汀線の後退量は小さいが、それでも等深線は全体として後退傾向のままである。等深線の後退は河口両翼の5km以内で著しい。総量 $33\text{万m}^3/\text{yr}$ の土砂が流れるケース2の場合(図-10(c))、流出土砂量が増加した結果河口では汀線が現状と比較して後退せず、河口から2～4km離れた区域で汀線が後退傾向となる。総量 $39\text{万m}^3/\text{yr}$ の土砂が流れるケース3の場合(図-10(d))、ケース2に見られた特徴がさらに顕著となり、いままで後退傾向にあった汀線が三角形の突出地形が見られるようになる。全体的に見ればほぼ現状汀線の維持が可能となるためには総量 $39\text{万m}^3/\text{yr}$ の土砂供給量が必要なが分かる。さらに総量 $52\text{万m}^3/\text{yr}$ の土砂が流れるケース4の場合(図-10(e))、河口デルタの突出地形の再生が進み、河口両翼の全域で等深線の前進が起こる。

5.3 汀線変化量の比較

100年後における河口を中心として東西10km区間の、2005年基準での汀線変化量の沿岸分布を図-11(a)～11(e)に示す。現状維持の場合(図-11(a))、河口から5km区域内では河口を中心として窪みができ、その窪みの深さが増すとともに窪みの区域が両翼へと広がるという変化が起こる。しかし河口の西5kmに位置する馬込川河口の西側に典型的に見られるように、河口部での汀線の窪みの形成と裏腹に、馬込川河口以西では汀線の前進が起こる。河口から5km以上離れた場所では河口デルタの本来の特性である汀線が次第に前進するという特性³⁾が維持される。このように河口部の汀線変化は、後退ならどこも後退、前進ならどこも前進と

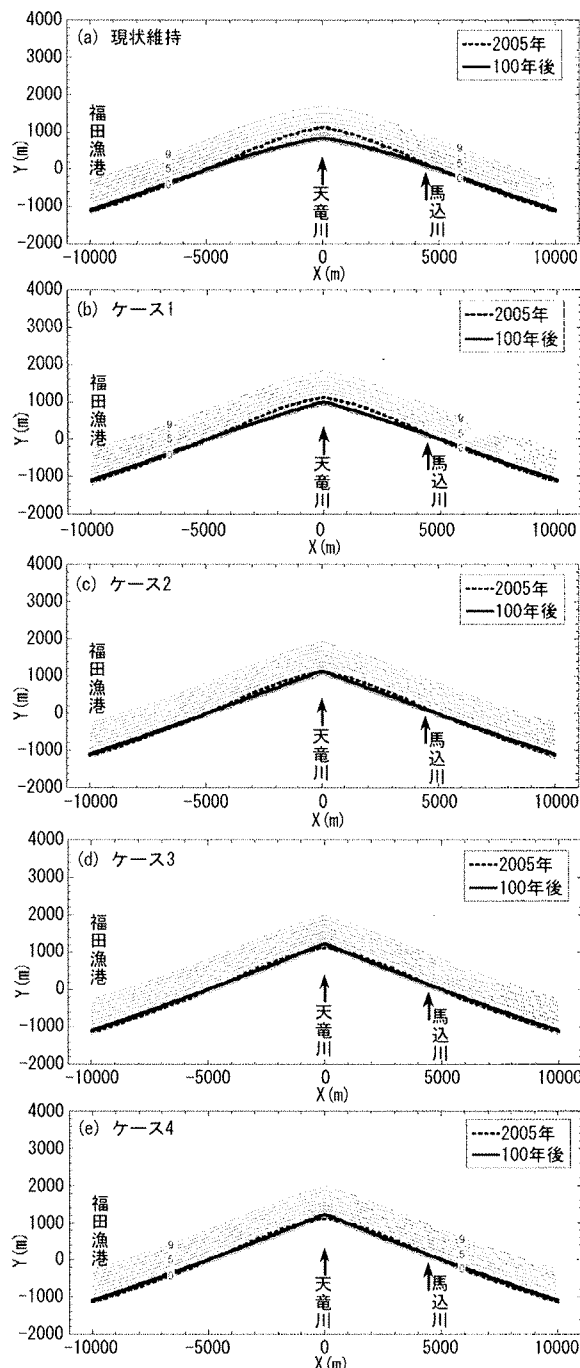


図-10 等深線形状

いう単調な変化ではないことが注目される。

ケース1では(図-11(b))、流出土砂量が現状の $15\text{万m}^3/\text{yr}$ より増加したため、河口での汀線後退量は小さくなる。また現状との比較では、天竜川河口先端部の汀線を「つまんで持ち上げる」ような、局所的汀線前進が起こり始める。ケース2では(図-11(c))、ケース1で見られた特徴が更に明瞭になり、天竜川河口部汀線が三角形を保ったまま前進し、現況より汀線が前進することになる。一方、河口から5km以上離れた場所での汀線の前進状況は、現況およびケース1の場合と変わりがない。総量 $39\text{万m}^3/\text{yr}$ の土砂が流れるケース3では(図-11(d))、土砂供給量の増加により河口デルタの突出が明瞭とな

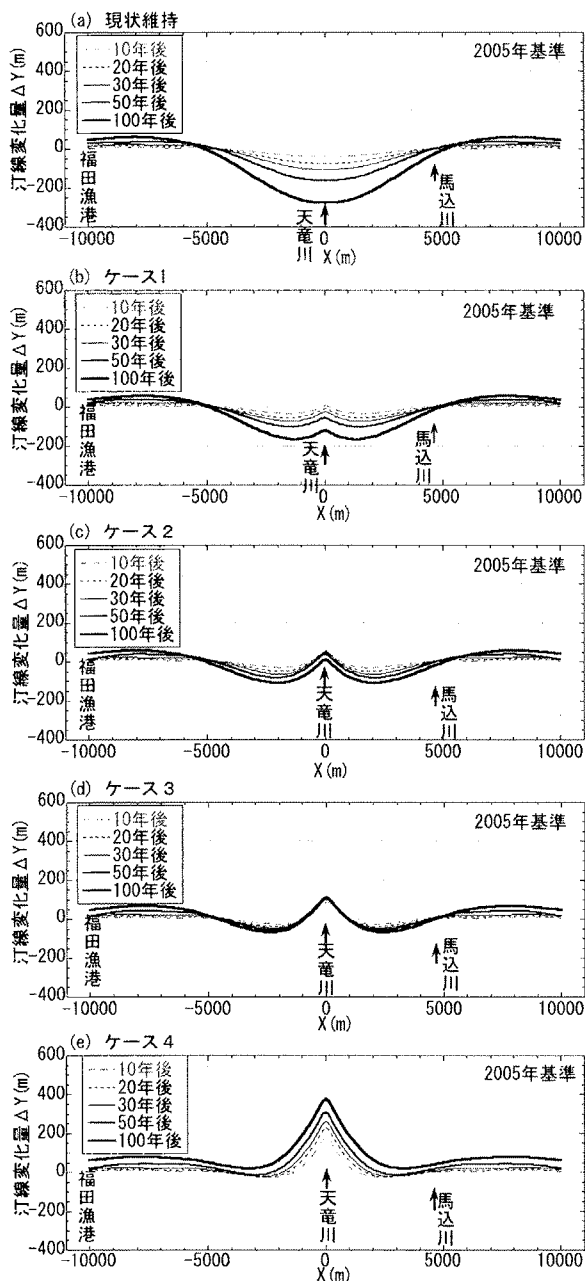


図-11 2005年基準での汀線変化量の比較

り、現況と比較して河口中心から両翼に1km以内ではデルタの突出が顕著となる。また河口中心から両翼に14km離れた区間での汀線後退量の絶対値が小さくなり、全体に汀線の前進と後退が平滑化される。総量52万 m^3/yr の土砂が流れるケース4では（図-11(e)）、河川流出土砂量の増加の効果が顕著となる。河口中心では100年間で370mもの汀線前進が起こる。このような河口部での汀線前進とは別に、5km以遠でも汀線前進傾向が続くのに対し、河口か

ら3.5km付近では汀線が現況と比較してほとんど変化しないという区域も出てくる。河川流出土砂量の増加の効果が顕著となり、大規模な砂利採取や佐久間ダム建設前の1956年当時の姿に近くなる。

6. まとめ

自然状態で60万 m^3/yr の土砂が供給され、沿岸漂砂量により東西に砂が運ばれつつ河口デルタが全体に前進し、動的平衡状態にあったと考えられる1890年と1962年、および土砂供給量が激減した2005年地形の再現を行いモデルの適用性を確認した。その上で海岸に種々の施設が存在しない仮想的状態を考えて天竜川ダム再編事業により土砂が河口に供給された場合の河口部海岸での効果を予測した。この結果、現状のままでは河口から5km以上離れた区域では汀線前進が続くのに対して河口部では著しい汀線後退が起こることが分かった。また現状汀線の維持を図る上では、総量39万 m^3/yr の土砂供給量が、また河口デルタの突出地形を再生し、河口両翼の全域で等深線の前進が起こるようにするには総量52万 m^3/yr の土砂供給量が必要なことが分かった。

謝辞：本研究を進めるにあたって、国土交通省中部地方整備局浜松河川国道事務所から資料の提供を受けた。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 宇多高明, 古池 鋼, 宮原志帆, 芹沢真澄, 三波俊郎, 石川仁憲: ダム再編事業に伴う天竜川河口デルタの長期変形予測, 海岸工学論文集, 第 56 巻, pp. 651-655, 2009.
- 2) 熊田貴之, 小林昭男, 宇多高明, 芹沢真澄: 沿岸・岸沖漂砂による粒径分級を考慮した等深線変化モデル, 海岸工学論文集, 第 50 巻, pp. 481-485, 2003.
- 3) Furuike, K., Uda, T., Serizawa, M., San-nami, T. and Ishikawa, T.: Model for predicting long-term beach changes originating from accretive features of a natural delta coast, Asian and Pacific Coasts 2009, Proc. 5th Inter. Conf., Vol. 4, pp. 266-272, 2009.
- 4) 宇多高明, 長島郁夫, 古池 鋼, 宮原志帆, 石川仁憲: 天竜川ダム再編事業による流出土砂量の増加が海岸に及ぼす影響, 海岸工学論文集, 第 55 巻, pp. 656-660, 2008.
- 5) 酒井和也, 小林昭男, 宇多高明, 芹沢真澄, 熊田貴之: 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, 2003.