

ダム再編事業に伴う天竜川河口デルタの長期変化予測

Prediction of Long-term Evolution of Tenryu River Delta Associated with Sand Bypassing at Upstream Dams

宇多高明¹・古池 鋼²・宮原志帆²・芹沢真澄³・三波俊郎²・石川仁憲⁴

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

The long-term evolution of the Tenryu River delta associated with the sand bypassing at several dams was investigated using the contour-line-change model considering the change in grain size. The effect of the increase in sediment yield from the river mouth to the nearby coasts was numerically predicted. When the sediment yield is artificially increased, the supplied sediment is mainly deposited around the mouth, resulting in a large shoreline advance, but it takes a longer time for the sandy beach far from the river mouth to recover. Another measure such as the sand bypassing of the coast is required to recover sandy beaches downcoast.

1. まえがき

中部山岳地帯から発生し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より明らかにするには、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(2008)は、ダム再編事業の効果を天竜川河口以西の海岸を対象として検討した。この計算では河口デルタの半分のみを対象とし、流出土砂が東西に1/2ずつ流れるとしたが、実際には離岸堤があるためこの仮定は正確さに欠ける。そこで本研究では天竜川河口デルタ全域を対象として熊田ら(2003)の粒径を考慮した等深線変化モデルを用いた予測計算を行った。まず自然状態にあった1890年当時の河口デルタを再現し、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。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)。この間には福田漁港、天竜川河口、および中田島海岸などが位置する。

2. 天竜川河口デルタの変遷

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。計算ではこれら各時期の海岸線形状を再現対象とする。図-2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の汀線後退が起きている。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 $X=-5\text{km}$ 以东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、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(古池ら, 2008)が現れていることによる。さらに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、

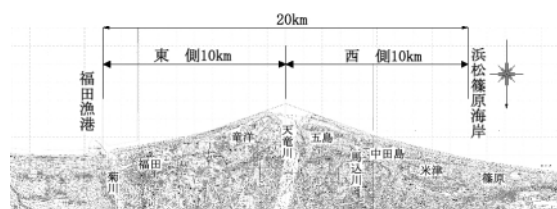


図-1 天竜川河口デルタの形状と境界条件の設定

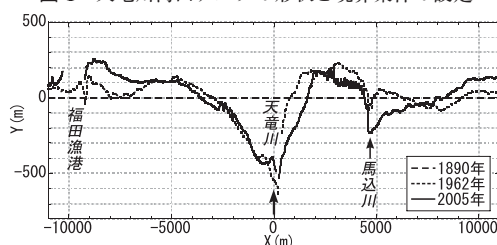


図-2 1890年基準での汀線変化

1 正会員	工博	(財)土木研究センター常務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		海岸研究室(有)
3 正会員		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

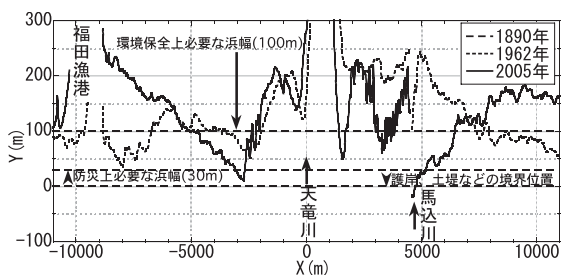


図-3 浜幅の沿岸分布

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。図-3は、土堤や護岸などから沖向きに測った浜幅の沿岸方向分布を示す。事実上浜幅が0の場所が2箇所あり、西側では馬込川河口右岸が、東側では竜洋海岸の離岸堤の東端位置がそれに該当する。このように、現況の遠州灘海岸は過去の供給土砂量が潤沢にあり、沿岸漂砂が単調に流れていた時代とは全く異なり、既に海岸線には多数の構造物が設置され、それらの各場所において漂砂の連続性が絶たれてその下手側では浜幅が著しく狭いという状態となっている。

3. 海岸への土砂供給の考え方

河川からの土砂供給を前提として河口デルタは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(古池ら, 2008)。中部地方整備局(<http://www.cbr.mlit.go.jp/>)では、天竜川からの流出土砂量についてダム建設・砂利採取前には94万 m^3/yr であったが、ダム建設・砂利採取後には流出土砂量が24万 m^3/yr にまで減少したとしている。この公表値によれば、ダム建設・砂利採取後の流出土砂量は自然状態の25.5%にまで低下したことになる。一方、海岸側から見た土砂供給量は上記公表値と異なる。天竜川からの流出土砂量について、過去1万年スケールで考えた沖積地の発達から推定した流出土砂量は60万 m^3/yr とされている(宇多ら, 2008)。この土砂量は流出土砂量のうち、海浜形成に役立つ粒径がほぼ0.1mm以上の粒径成分を対象とし、いわゆる wash load として浮遊状態で流れ下るシルト・粘土分は除いている。このように、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・砂利採取前には平均で60万 m^3/yr であったが、ダム建設・砂利採取後には0万 m^3/yr にまで激減したとして海浜変形計算が行われ、海岸部での海浜変形(浜松五島海岸および竜洋海岸)では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(宇多ら, 2008)。

河川流出土砂量は、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求められたが、実際の河口部での堆積土砂量などとの比較は行われていない。しかし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60万 m^3/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・砂利採取前の60万 m^3/yr がダム建設・砂利採取後には15万 m^3/yr (25.5%)となったと仮定する。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る。予測計算では、ダム再編事業の効果が長期に及ぶことから予測期間は100年とする。

4. 計算条件

表-1には計算条件を示す。再現計算は3ケース行った。1890年地形の再現は、自然状態にあった当時の60万 m^3/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33万 m^3/yr 、中粒が26万 m^3/yr および粗粒が1万 m^3/yr である。60万 m^3/yr の流入土砂量を与えて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)。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考えられる。2005年の再現は、ダム建設により流下土砂量15万 m^3/yr (細粒5万 m^3/yr + 中粒9万 m^3/yr + 粗粒1万 m^3/yr)が減った場合である。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条件と定数をまとめて示す。

5. 計算結果

(1) 再現計算

平行等深線を与え9000年間の土砂流入を与えて1890年の地形を再現し、これを初期地形とした。1956年の河口デルタの再現地形を図-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

表-1 粒径別の土砂供給量

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

ケース	細粒 0.1<d<0.25mm	中粒 0.25<d<0.85mm	粗粒 0.85mm<d	総量
現状維持	5	9	1	15
ケース1	14	11	1	26
ケース2	19	14	1	33
ケース3	21	17	1	39
ケース4	28	24	1	52

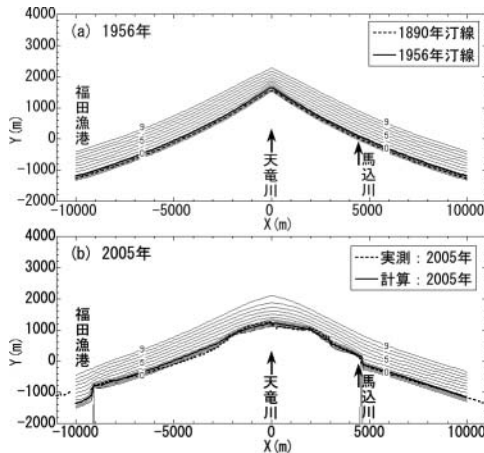


図-4 1956, 2005年地形の再現

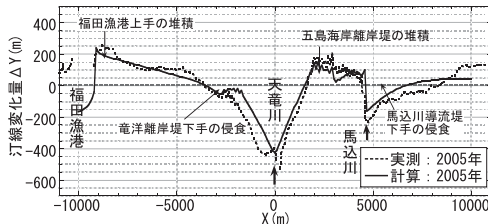


図-5 1956年基準の汀線変化（実測と予測の比較）

等辺三角形形状の等深線形状となる。河口デルタの頂点を中心とした突出地形の詳細形状を調べると、陸上部から-3mまでは海底勾配が急であるが、沖合の海底勾配は緩くなっている。これは平衡勾配の大きな粗粒の土砂は汀線付近に集まり、沖合は平衡勾配の小さな細粒の土砂が移動していることによる。

図-4 (a) に示す1956年地形を初期値として与え2005年地形を予測した結果を図-4 (b) に示す。1956年には突出していた河口デルタ等深線が、流出土砂量の減少とともに先端部がつぶれ、同時に海岸に設置された構造物の影響が海岸地形に現れ、各所で不連続な地形となった。2005年における実測・予測汀線を図-5に示す。浜松海岸の離岸堤群と馬込川河口導流堤が西向きの沿岸漂砂を阻止した結果、馬込川河口の西側隣接部で楔状の汀線後退が起こるが、この侵食域より西側では汀線がほぼ平行に前進する状況が再現できている。また、福田漁港防波堤による東向きの沿岸漂砂の阻止に伴って上手側の広い区域で汀線が前進すること、さらには竜洋海岸の離岸堤で汀線の向きが急に変わることなど、実測の特徴が再現できている。

(2) 予測計算

図-6には現状維持の場合における50, 100年後の水深変化量の分布を示す。河口部を中心として両翼の海岸が侵食傾向となるが、東側では福田漁港の防波堤による沿岸漂砂の阻止に伴い河口から4km付近までは侵食される

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 (熊田ら, 2003) 回折計算: 方向分散法
計算対象区域	天竜川河口両翼10km: 海岸線延長20km
計算番号	1. 現状維持 2. ケース1 3. ケース2 4. ケース3 5. ケース4
初期地形	直線平行等深線
入射波条件	沖波波高 $H=1.6\text{m}$, 周期 $T=7\text{s}$ (エネルギー平均波) 波向: S 1890年初期汀線への波の入射角 $\theta_w = 20^\circ$, $S_{\max} = 10$ 波高の低減率の最小しきい値: 0.4 波の抽出回数: 1step/毎
潮位条件	M.S.L. = T.P. $\pm 0.0\text{m}$
計算等深線	$z = +3\text{m} \sim -9\text{m}$ $h_c = 9\text{m} \sim \text{バーム高}$ $h_R = 3\text{m}$
計算空間メッシュ	沿岸方向 $\Delta X = 100\text{m}$, 鉛直方向 $\Delta Z = 1\text{m}$
計算時間間隔	$\Delta t = 200\text{hr}$
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: $d_{50} = 0.25\text{mm}$, $\tan\beta = 1/100$ 粒径2: $d_{50} = 0.425\text{mm}$, $\tan\beta = 1/40$ 粒径3: $d_{50} = 2.0\text{mm}$, $\tan\beta = 1/20$ ・ 交換層厚: 底面長単位幅あたり 勾配1/100: 0.5m, 勾配1/40: 1.25m, 勾配1/20: 2.5m ・ 含有率: 1) 交換層A粒径1: $\mu_1 = 0.483$ 粒径2: $\mu_2 = 0.483$ 粒径3: $\mu_3 = 0.033$ 2) 交換層B (岸沖方向に分布あり) 粒径1: $\mu_1 = 0.0 \sim 1.0$, 粒径2: $\mu_2 = 0.9 \sim 0.0$, 粒径3: $\mu_3 = 0.1 \sim 0.0$
漂砂量	・ 沿岸漂砂量係数 粒径1: $K_s = 0.0440$ 粒径2: $K_s = 0.0338$ 粒径3: $K_s = 0.0156$ ※ $K_s = A/\sqrt{(d_{50})}$ 係数 $A=0.0220$ ・ 小笹・Brampton係数: $K_2 = 1.62K_s$ ($\tan\beta = 1/30$) ・ 岸沖漂砂量係数: $K_c = 0.15K_s$ ・ 重力係数: 0.2 ・ 安息勾配 (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 $q_m = 60\text{万}\text{m}^3/\text{yr}$ (底質は一次元河床変動計算の含有比) 左端 $q_{\text{out}} = 15\text{万}\text{m}^3/\text{yr}$ (底質は同地点の含有比) ※ 右端 $q_{\text{out}} = 15\text{万}\text{m}^3/\text{yr}$ (底質は同地点の含有比) ※ 岸沖端: $q_z = 0$ (漂砂の流入出なし) ・ 2005年再現, 将来予測 河口 $q_m = 15\text{万}\text{m}^3/\text{yr}$ (底質は一次元河床変動計算の含有比) 左端 $q_{\text{out}} = 15\text{万}\text{m}^3/\text{yr}$ (底質は同地点の含有比) ※ 右端 $q_{\text{out}} = 15\text{万}\text{m}^3/\text{yr}$ (底質は同地点の含有比) ※ 岸沖端: $q_z = 0$ (漂砂の流入出なし) ※ 左右端部境界条件 $15\text{万}\text{m}^3/\text{yr}$ は、静岡県 の保全事業における竜洋海岸の計算実績 から推定した値である。

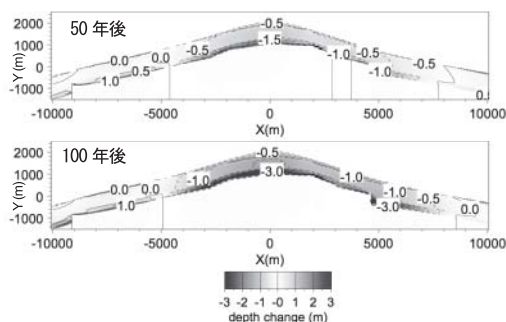


図-6 水深変化量の予測結果 (現状維持)

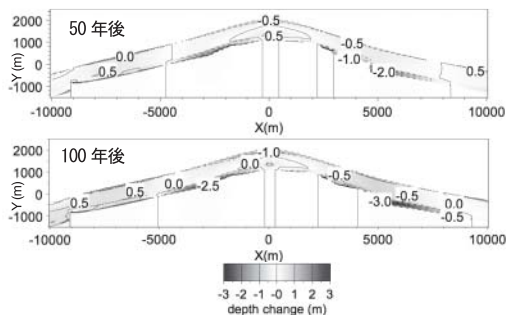


図-7 水深変化量の予測結果 (ケース1)

が、その東側では堆積傾向となる。これに対し、西側では沿岸漂砂を阻止する施設がないため河口から7km付近まで侵食域が広がる。このような特徴は時間経過とともに顕著となる。一方天竜川河口の西約5kmに位置する馬込川河口の西側では天竜川河口部と匹敵する侵食が起こる。これは浜松五島海岸の離岸堤による沿岸漂砂阻止効果が顕著に現れたためである。100年後には50年後の予測結果をより顕著にしたものとなる。また侵食はいずれも汀線の近傍で大きいことが分かる。

ケース1 (供給土砂量26万 m^3/yr , 細砂・中砂・粗砂以上の含有率:55%, 43%, 2%) の水深変化量の予測結果を図-7に示す。図-6の放置の計算結果と比較すると、土砂供給量が増加したために河口の両側1.5km以内はいずれも堆積傾向に変わる。しかし河口より東側区域ではこの堆積域の東側隣接域で著しい侵食が起こる。同様にして馬込川河口の西側では、河口から土砂が供給されたにもかかわらず侵食が進んでいく。このケースでは、供給土砂量が26万 m^3/yr と少ないため土砂供給量の増加による効果は限定的である。

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-8に示す。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量は増加する。この結果竜洋海岸の侵食量は軽減され、同時に侵食域が狭まった。これに対して浜松五島海岸では既設離岸堤群が西向きの沿岸漂砂を阻止する結果、馬込川河口以

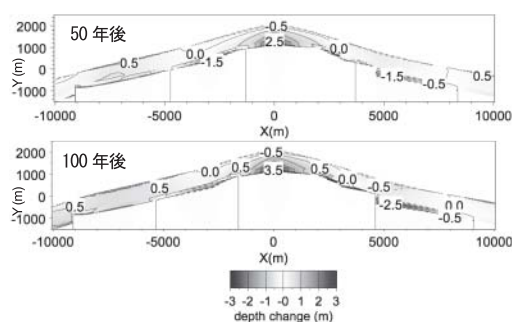


図-8 水深変化量の予測結果 (ケース2)

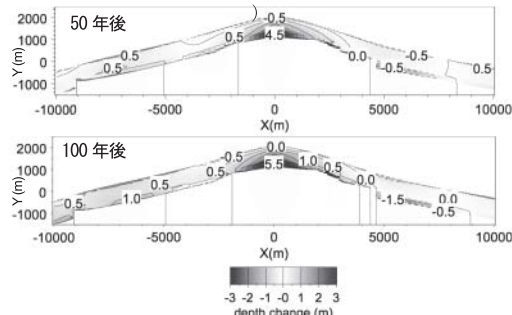


図-9 水深変化量の予測結果 (ケース3)

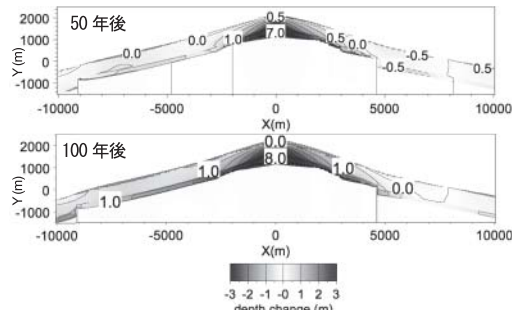


図-10 水深変化量の予測結果 (ケース4)

西では現状維持の場合と同様侵食が進み、供給土砂量の増加の効果が出ない。

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-9に示す。ケース2と比較すると、供給土砂量が33万 m^3/yr から39万 m^3/yr まで増加した結果、河口東側にあった侵食域はほぼ消失し、河口西側では浜松五島海岸の離岸堤群を通り過ぎて砂が西側へと供給され、馬込川河口西側の侵食量を軽減するまでの効果が出始める。

ケース4 (供給土砂量52万 m^3/yr , 細砂・中砂・粗砂以上の含有率:53%, 46%, 2%) の水深変化量を図-10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60万 m^3/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。

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ふ変化が起こる。また、馬込川河口の西側で集中的な汀線後退が起こる。ケース1では(図-11(b)), 流出土砂量が現状の15万 m^3/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形状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、馬込川河口以西での汀線の後退状況は、現況およびケース1の場合と変わらない。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。また馬込川河口付近での汀線後退量の絶対値が小さくなり、全体に汀線が後退する。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450m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。

6. まとめ

現状維持では福田漁港から西に4km区間では明瞭な堆積傾向を示す一方、天竜川河口の西約5kmに位置する馬込川河口西側では著しい侵食が起こる。ケース1では、土砂供給量が少ないので効果は限られる。ケース2では、河口を中心とするデルタ状区域の土砂堆積量が増加する。この結果竜洋海岸の侵食量は軽減されるが、浜松五島海岸では同様侵食が進む。ケース3では、河口東側にあった侵食域はほぼ消失し、河口西側では浜松五島海岸の離岸堤群を通り過ぎて砂が西側へと供給され、馬込川河口西側の侵食量を軽減するまでの効果が出始める。ケース4では河口を中心として両翼の海岸線全域が堆積傾向に変わることから効果が明瞭に出ており、馬込川河口以西にも顕著な形で土砂が供給される。また浜松五島海岸の施設群は、西向きに沿岸漂砂の流れにくくする一方、東向きの沿岸漂砂を増大させるよう作用していることが分かる。これよりダム再編事業の効果は確認できるが、ダム再編事業さえ行えば遠州灘海岸全体の砂浜が広がると短絡的に捉えるのは誤りであり、ダム再編事業に加え河川と海岸を一体として捉え、海岸でのサンドバイパスや海岸施設の一部撤去など、海岸域においても適切な対応を取る必要があることが分かった。

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

- 宇多高明・長島郁夫・古池 鋼・宮原志帆・石川仁憲(2008)：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。
- 熊田貴之・小林昭男・宇多高明・芹沢真澄(2003)：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。
- 国土交通省中部地方河川整備局浜松河川国道事務所：第6回天竜川ダム再編事業環境検討委員会資料http://www.cbr.mlit.go.jp/hamamatsu/gaiyo_dam/tenryu.html
- 古池 鋼・宇多高明・芹沢真澄・三波俊郎・石川仁憲(2008)：河口デルタ海岸線における侵食域の圧縮現象，海洋開発論文集，第24巻，pp.1267-1272。

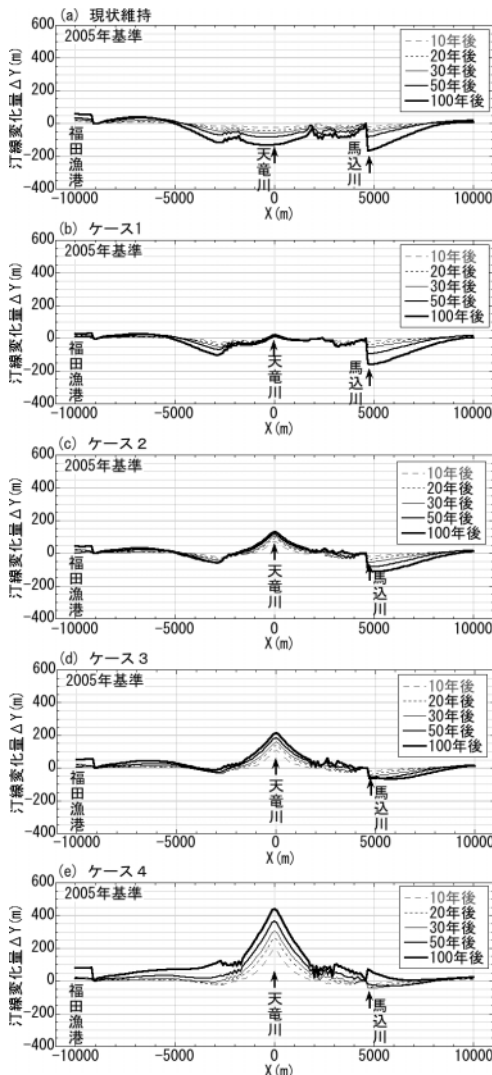


図-11 2005年基準での汀線変化量の比較