

河口デルタ海岸線における侵食域の圧縮現象

COMPRESSION OF EROSION ZONE ALONG A DELTA COAST

古池 鋼¹・宇多高明²・芹沢真澄³・三波俊郎¹・石川仁憲⁴
Kou FURUIKE, Takaaki UDA, Masumi SERIZAWA, Toshiro SAN-NAMI and
Toshinori ISHIKAWA

¹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)

²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 (〒110-0016 東京都台東区台東1-6-4 タカラビル)

³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)

⁴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 タカ
ラビル)

The characteristics of the long-term shoreline changes around a delta coastline were analyzed using the contour-line-change model, taking the Enshunada coast as an example. The shoreline changes between the mouth of the Magome River and Imakiri-guchi jetty were investigated, where beach changes triggered by the decrease in fluvial sand supply from the Tenryu River has been occurring. It was observed that the shoreline retreated downcoast of the mouth of the Magome River, and at the same time, shoreline advance occurred further downcoast, causing the change in curvature of the shoreline configuration. The cause of this phenomenon was well explained by the numerical model.

Key Words : Delta coastline, shoreline changes, Enshunada coast, contour-line-change model, curvature of shoreline

1. はじめに

河口デルタでは、河川からほぼ連続的に土砂が運ばれ、河口周辺部に堆積する結果、その海岸線は時間的に前進する。しかし、わが国では河川上流域におけるダム建設や砂利採取に起因して河川流下土砂が激減したことにより、河口デルタが前進から後退傾向へと変化した河川も数多い。遠州灘に流入する天竜川もそのような河川の一つである。このような河口デルタの外縁をなす海岸において河口部を含む海岸域での海浜変形予測を行う場合、河口での土砂流入の境界条件を変えるのみでは再現が困難な事態に直面する。自然状態にある河口デルタは堆積性で、海岸線は自らの平面形状を調整しつつ、海岸全体に土砂を堆積させる性質を内在的に有している。この性質をモデルに取り込むには河口デルタの形成に要した非常に長期間、例えば天竜川河口デルタにあっては数千年間の海浜変形を再現することが必要となる。しかし、計算規模や検証データの不足などからこのような検討が行われることはまずない。このた

め等深線変化モデルなどによる予測計算では、曲率を持つ実際の汀線を初期汀線として与え、これに直接波を作用させて漂砂量の沿岸方向分布を表現してきた。しかしこの方法では、海岸線への波の入射角の沿岸方向分布が維持されるという河口デルタの特徴は再現することができない。一方、端部境界条件として汀線固定の条件を用いれば、境界近傍の汀線変化量は0となってしまう。さらに実測汀線を初期状態として与えると、実測汀線に内在する短期的変動をも取り込むことになり、再現誤差が大きく、例えば短期予測であってもその信頼性が低下する。これらのノイズを除去するために、短い区間を選び、その区間内では沿岸漂砂量が一定で、海浜形状が動的平衡状態にあると近似する手法もとられる。しかしこの手法では、本来河口デルタが有している河口デルタの堆積性を排除することになるため、長期予測では無視できない誤差が入り、予測精度の低下要因となる。本研究では、この問題に関し河口デルタ海岸における海岸線の曲率変化の意味を数値モデルにより考察する。

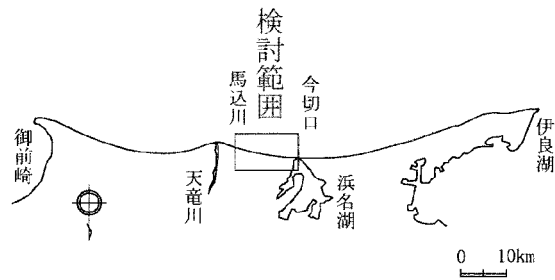


図-1 検討地域

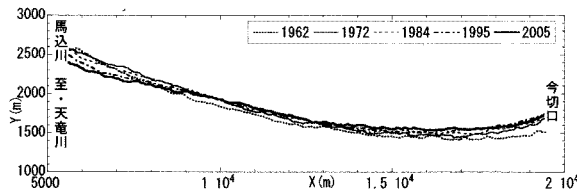


図-2 馬込川河口から今切口導流堤間の汀線変化

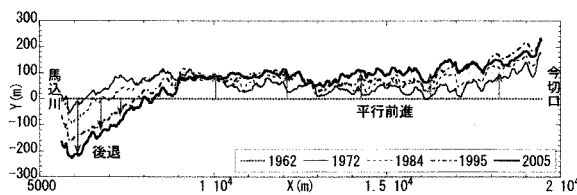


図-3 汀線変化量

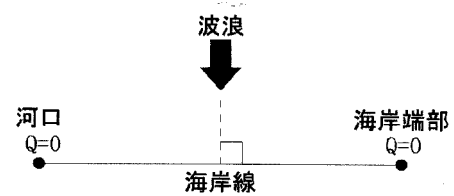
2. 再現対象

研究対象は図-1に示すように遠州灘に流入する天竜川の河口デルタの右岸側区域である。図-2は、浜松側にある馬込川河口から今切口導流堤までの区間の1962～2005年における海岸線の長期的変化である¹⁾。天竜川河口から馬込川河口までの区域には20基の離岸堤群が設置され、汀線が固定されているので無視し、それより西側区域での汀線変化をまとめたものである。天竜川河口デルタの縮小に伴い馬込川河口より下手側の汀線が後退する一方、天竜川河口の西20kmに位置する今切口導流堤では、西向きに沿岸漂砂が阻止された結果、時間経過とともに汀線が前進している。図-3は同じ区域の汀線変化図である。馬込川河口の隣接部では汀線が単調に後退する一方、西側では汀線がほぼ平行移動する形で前進している。これらを再現対象として計算を実施した。

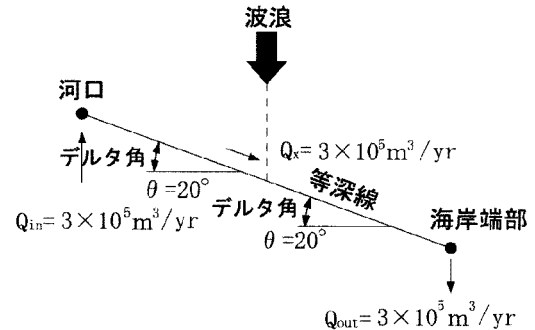
3. 模式化

既に考え方の一部は宇多ら^{2) 3)}で示したが、馬込川河口から今切口導流堤間の汀線変化に関して、河川からの土砂流入による河口デルタの形成は図-4に模式化できる。左端部を河口としたとき、土砂流

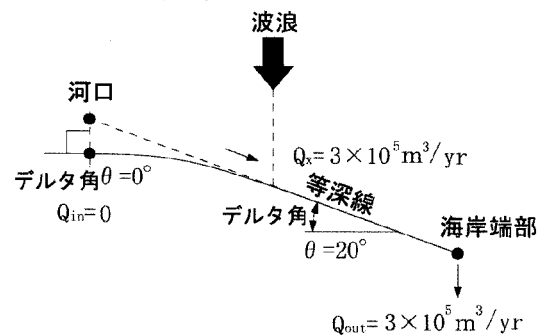
a) 土砂流入なし



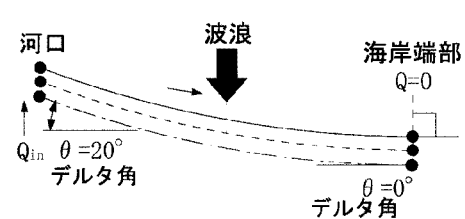
b) 堆積性考慮せず（自然状態）



c) 堆積性考慮（侵食時）



d) 堆積性考慮（自然状態）



e) 堆積性考慮（侵食時）

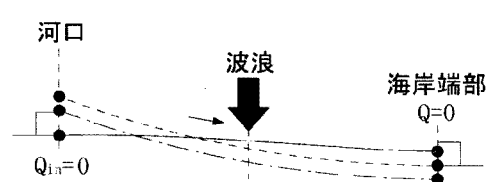


図-4 河口デルタの汀線変化の模式図

入がなければ海岸線は波向に対して直角となる（図-4(a)）。次に河口から一定量（例えば、宇多ら³⁾が与えたように $30 \text{ 万 m}^3/\text{yr}$ ）の土砂が流入し、それと同量の沿岸漂砂が流れ去る条件を考えると、海岸線は波向に対して一定の角度を保つことになる。いま波高・波向が沿岸方向に変わらない場合、河口

表-1 計算条件

数値計算手法	等深線変化モデル ⁴⁾
計算対象範囲	天竜川河口右岸：延長20km
ケース	1: 堆積性を考慮しない沿岸漂砂量一定の計算 2: 堆積性を考慮した沿岸漂砂量漸減の計算
初期地形	直線平行等深線
入射波条件	エネルギー平均波 $H=1.6\text{m}$, 周期 $T=7\text{sec}$, 波向S
潮位条件	M. S. L. =T. P. $\pm 0.0\text{m}$
地形変化の水深範囲	地形変化の限界水深 $h_c=9\text{m}$, バーム高 $h_B=3\text{m}$
漂砂量係数	沿岸漂砂量係数 $K_s=0.018$ 岸沖漂砂量係数 $K_r=0.2K_s$
平衡勾配	$\tan \beta_c=1/50$
土砂落ち込みの限界勾配	陸上：1/2, 水中：1/3
計算等深線範囲	$z = +3\text{m} \sim -9\text{m}$
計算メッシュ	沿岸方向 $\Delta X=500\text{m}$, 鉛直方向 $\Delta Z=1\text{m}$
計算時間間隔 Δt	438hr
計算ステップ数	160000steps (=8000年)
境界条件	ケース1 左端部（河口） $Q_{in}=30\text{万 m}^3/\text{yr}$ 右端部（今切口） $Q_{out}=30\text{万 m}^3/\text{yr}$ ケース2 左端部（河口） $Q_{in}=30\text{万 m}^3/\text{yr}$ 右端部（今切口） $Q_{out}=0\text{万 m}^3/\text{yr}$
数値計算法	陽解法による差分法

を頂点として突出した直線状の海岸線が形成される（図-4(b)）。一方、具体例として取り上げる天竜川河口付近では、海岸線への法線に対し波は斜め 20° の方向から入射する。この角度は、天竜川の河口デルタの頂角が $\phi=140^\circ$ であり、波がデルタの正面から入射すると仮定すれば、 $(180^\circ - \phi)/2=20^\circ$ として求められる。ここで、河口から土砂が流入する条件のもとで、海岸線上の任意点において接線を引き、この接線が入射波向と直交する方向とのなす角をデルタ角と呼ぶこととする。デルタ角は波の作用が強ければ小さくなり、河口デルタは縮小する。逆に、土砂流入が多ければデルタ角は大きく、河口デルタは突出する。河口からの土砂流入がなくなれば河口付近ではデルタ角は 0 となって侵食域は河口から海岸端部へと広がる（図-4(c)）。一定量の土砂が一方向に移動する海岸における侵食域の伝播は、実務上（図-4(c)）のように考えて計算することが多い。この方法の特徴は、土砂を入れ続ける限りにおいて系内の土砂量が変化しないため、

動的平衡状態が達成されることにある。ところが実海岸では、自然状態において長期的・広域的に見ると、流入土砂の堆積により少しずつ汀線の前進が生じている（図-4(d)）。地形学的時間スケールで見ればこの汀線前進によって広大な沖積平野を形成させるのである。そしてこのような堆積性海岸では、工学的時間スケールにおいても無視できない特徴的な海浜変形が生じる。これは主にデルタ角が沿岸方向下手に向かって漸減することにより生じる海浜変形（図-4(e)）である。本研究では、このような問題について検討する。なお、議論をできるだけ単純化して進めるため外力は沿岸方向に一樣とする。

4. 計算条件

前述の模式図で示した現象を芹沢ら⁴⁾の等深線変化モデルを用いて再現した。表-1 に計算条件を示す。天竜川河口右岸を計算対象とする。等深線変化モデルにおける諸係数は既往研究⁴⁾で用いられたものと同様である。安定した河口部汀線を再現するために再現期間は 8000 年と工学的時間スケールよりはるかに長くした。計算は 2 ケースからなる。ケース 1 は、上述の模式図の (b), (c) にあたるデルタ角一定の計算で、波の入射角が沿岸方向に一樣で、動的平衡状態にある河口デルタの計算である。ケース 2 は、デルタ角漸減の場合で、波の入射角が沿岸方向に漸減する堆積性河口デルタの計算である。

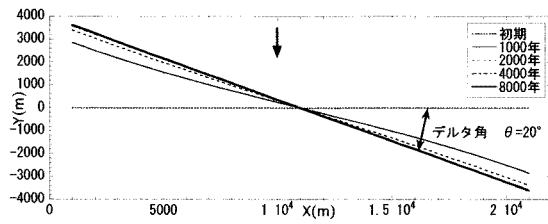
5. 計算結果

(1) 堆積性を考慮しない計算(ケース 1)

安定な河口デルタでは、河川からの土砂流入量と海岸端部からの土砂流出量が均衡することで、沿岸方向各地点における沿岸漂砂の流入・流出量が等しくなると安定化する。図-5 は、土砂流入量と土砂流出量が等しく動的平衡状態にある河口デルタの地形学的時間スケールの予測結果である。(a) は自然状態の汀線形、(b) は沿岸漂砂量の沿岸方向分布である。この場合、海岸端部の境界条件は、左端部の河口から $Q_{in}=30\text{万 m}^3/\text{yr}$ の土砂を流入させ、海岸線右端部では $Q_{out}=30\text{万 m}^3/\text{yr}$ を流出させる漂砂量指定境界である。波向は S として沿岸方向に一樣な波高分布とし、漂砂量係数は波向 S に対してデルタ角が 20° となるよう調整してある。したがって左端部で与えた流入土砂は右端部から同量が流出し、区間内の収支は変化しない。汀線は約 4000 年で安定に達し、それ以降区間内で汀線変化は生じない。沿岸漂砂量も約 4000 年で安定に達し、 $Q=30\text{万 m}^3/\text{yr}$ と沿岸方向に一定値となる。

図-6 は漂砂量係数を 1.5 倍にした場合の計算結果である。(a) の汀線形は約 2000 年で安定に達し

a) 自然状態の汀線形



b) 沿岸漂砂量

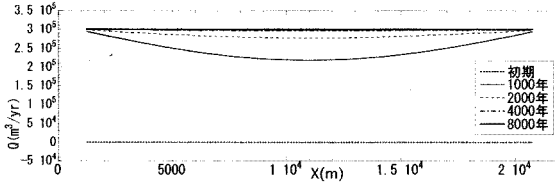
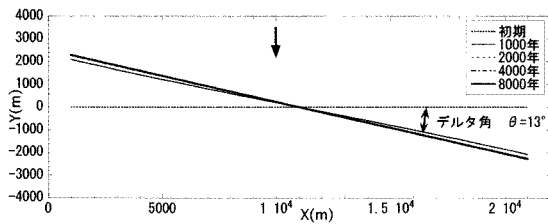


図-5 動的平衡状態にある河口デルタの再現

a) 自然状態の汀線形



b) 沿岸漂砂量

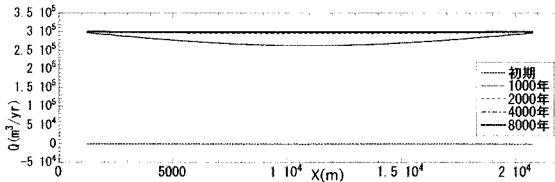
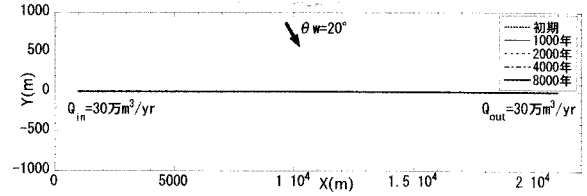


図-6 漂砂量係数が 1.5 倍の計算結果

ているがデルタ角は $\theta = 13^\circ$ と 1962 年当時の自然状態のデルタ角を満足しない。しかしながら沿岸漂砂量はほぼ 2000 年で安定に達し、 $Q = 30 \text{ 万 m}^3/\text{yr}$ で沿岸方向に一定になる。ここで注意すべきは、沿岸漂砂量係数が 1.5 倍も違うにもかかわらず、安定状態に達した場合の沿岸漂砂量の沿岸方向分布が両者で同一となることである。つまり河口デルタでは同じ沿岸漂砂量分布であっても対応する汀線形状は無数に存在することになり、沿岸漂砂量分布が一致したから現象の再現ができたといえないのである。

図-7は、図-5の座標軸を反時計回りに回転させて入射波の波向角をデルタ角と等しいとした場合の計算結果である。沿岸漂砂量は図-5と同じで、波向に対して 20° の凸形状を保つように調整してある。この場合汀線は最初から安定で、図-5と図-7のデルタ角の沿岸方向分布は同じである。このように沿岸漂砂量が一定で、海岸線への波の入射角が沿岸方向に等しい計算では、初期地形として安定地形を直接与えることで動的平衡状態を比較的容易に再現できる。

a) 自然状態の汀線形



b) 沿岸漂砂量

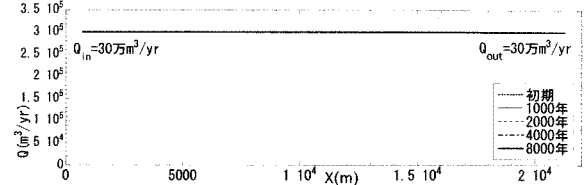
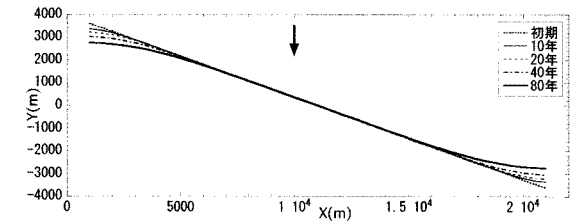
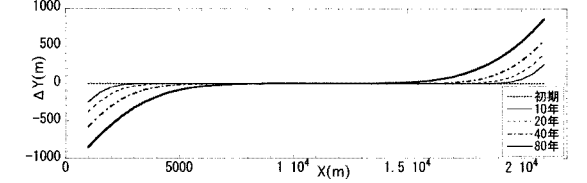


図-7 デルタ角を予め調整した場合の計算結果

a) 両端部 $Q=0$ の場合の汀線形



b) 両端部 $Q=0$ の場合の汀線変化量



c) 両端部 $Q=0$ の場合の沿岸漂砂量

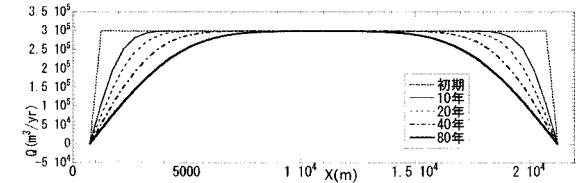
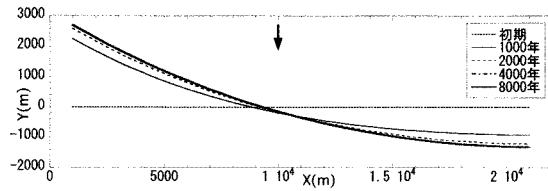


図-8 動的平衡状態にある河口デルタの変形

図-5のような動的平衡海岸において工学的時間スケールで境界条件が変化した場合の海浜変形を図-8に示す。両端部の漂砂量 $30 \text{ 万 m}^3/\text{yr}$ が 0 になった場合の 80 年間の海浜変形予測の結果である。すなわち、左端部はダム建設や砂利採取に起因する土砂流入の遮断、右端部は今切口導流堤の建設による沿岸漂砂の遮断である。(a) は汀線形、(b) は汀線変化量、(c) は沿岸漂砂量分布を示す。侵食域が上手端近傍から下手方向へ広がると同時に、下手端付近では汀線の前進域が上手方向へと広がるといいう結果となる。図-3と比較すると、実測汀線は、今切口導流堤上手側の広い区域で前進しているのに対し、計算では汀線前進域が狭く、その一方で下流端付近での汀線前

a) 定常状態にある弓形汀線形



b) 沿岸漂砂量

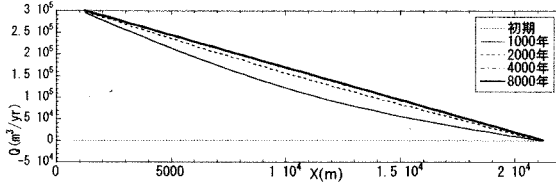
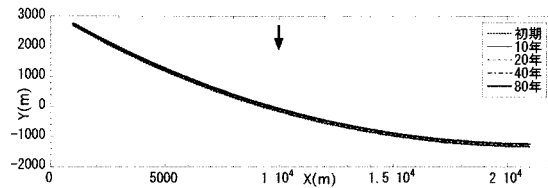
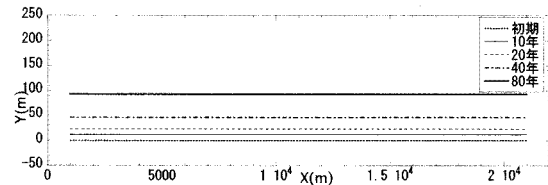


図-9 定常状態にある堆積性河口デルタの再現

a) 自然状態の汀線形



b) 汀線変化量



c) 沿岸漂砂量

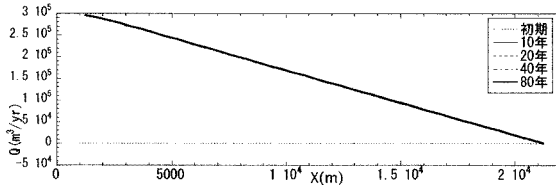


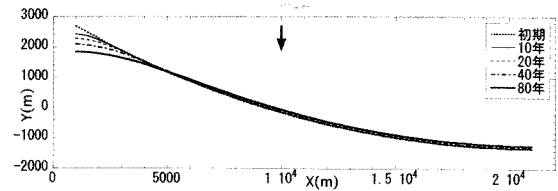
図-10 堆積性河口デルタの再現

進量が過大となる。沿岸漂砂量は、当初 $30\text{万m}^3/\text{yr}$ で沿岸方向一律であったが、海岸中央に向かって漂砂量が低下している。

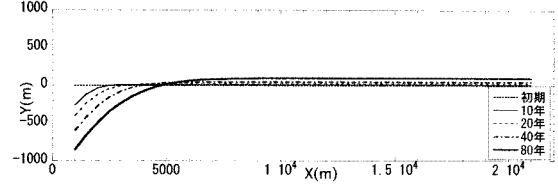
(2) 堆積性を考慮した計算

実際の海岸では、多くの場合自然状態では厳密には安定でなく堆積性で、海岸線は徐々に前進している。図-9は、長期間にわたって河川流入土砂が対象区域全体に配分されるという形で、堆積性を考慮した場合の計算結果であり、海岸線は平均的に前進する。(a)は汀線形、(b)は沿岸漂砂量の分布を示す。この場合、海岸線端部の境界条件としては、左端の河口から $Q_{in}=30\text{万m}^3/\text{yr}$ で土砂が流入する一方、

a) 両端部 $Q=0$ の場合の汀線形



b) 両端部 $Q=0$ の場合の汀線変化量



c) 沿岸漂砂量

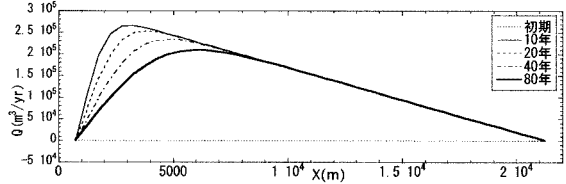


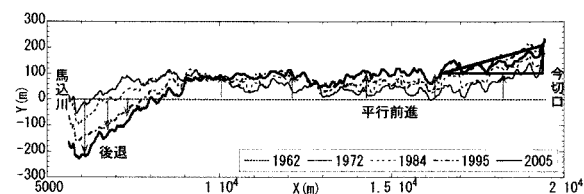
図-11 堆積性河口デルタの変形

右端部では $Q_{out}=0$ としている。また定常状態を保つために河口流入量と釣り合う土砂量を海岸線全域から均一に流出させている(総量 $30\text{万m}^3/\text{yr}$)。初期形状は直線平行等深線を有し、波向は再現対象と同様Sとして沿岸方向に様な波浪分布としている。さらに漂砂量係数は波向Sに対して河口付近が 20° のデルタ角を保つように調整してある。この場合、4000年以降は弓形の汀線形状が保たれたまま前進する。デルタ角は河口付近で最大で、右端部では0となる。沿岸漂砂量は河口から右端まで右下がりの直線分布となる。

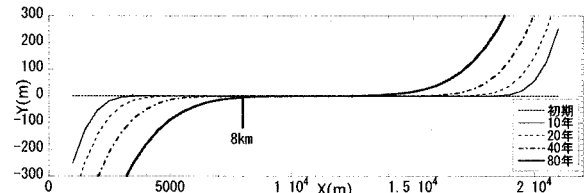
上記の弓形の汀線形が再現できた段階で、 $Q_{in}=30\text{万m}^3/\text{yr}$ を保ったまま海岸線全域からの均一な流出土砂量を0とすると、平行前進する堆積性の河口デルタが再現できる。このようにして求めた過去80年間の再現結果を図-10に示す。(a)は自然状態の汀線形、(b)は汀線変化量、(c)は沿岸漂砂量の分布である。平均汀線前進速度 $1\text{m}/\text{yr}$ は、図-3に示す実測の汀線前進速度 $2\text{m}/\text{yr}$ とオーダーが一致している。

図-11は、堆積性河口デルタにおいて、 $Q_{in}=30\text{万m}^3/\text{yr}$ が0になった場合の80年間の海浜変形予測の結果である。(a)は汀線形、(b)は汀線変化量、(c)は沿岸漂砂量分布を示す。侵食域が上手端近傍から下手方向へ広がるが、下手側では汀線がほぼ平行移動する形で前進している、また図-3に示した実測汀線変化では左端から $X=5\text{km}$ 付近まで汀線が前進していたが、計算での汀線前進域も左端から $X=5\text{km}$ 付近と両者はよく一致している。

a) 実測の汀線変化量



b) 堆積性を考慮しない計算方式による汀線変化量



c) 堆積性を考慮した計算方式による汀線変化量

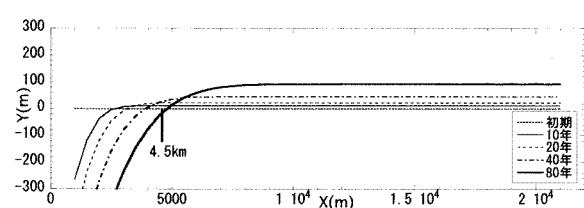


図-12 汀線変化の比較

6. 実測と計算結果の相互比較

実測汀線変化量と、堆積性を考慮した場合、しない場合の予測汀線変化を図-12に示す。堆積性を考慮した計算では実測汀線変化パターンが再現できる。5m以上の汀線後退が生じた区域は、堆積を考慮しない計算では河口から8km地点までであるが、堆積を考慮した計算では河口から4.5km地点までと、侵食範囲が狭まった。同時に下手側では一様な堆積が生じており、実態に近い結果が得られた。河口付近の侵食量が計算では過剰であるが、これはこの地点を河口と見なしたことによる誤差である。また実態の今切口近傍での汀線前進量は周辺部より大きいが、これは同地点において自然状態の漂砂量が0でなかったことに起因する。今切口での自然状態の漂砂量は、計算結果との対比で堆積性の汀線変化に上乗せされている量としてカウントすることができ、実態の汀線変化量から、導流堤に沿った汀線前進量100m×汀線前進域の長さ3000m×移動高10m×1/2を継続期間43年で除すと、3.5万m³/yr程度となる。

7. 結論

等深線変化モデルを用いて河口デルタの発達に関する検討を行った結果、以下の結果を得た。

- ① 河口から海岸への流入土砂量 Q_{in} は、河川上流の地形条件や降雨などの気象条件から一義的に決定され、海岸側の条件とは無関係に定まる。このようにして定まる Q_{in} が増加すると、デルタ角は大きくなり沿岸漂砂量は増加する。
- ② 河口からの流入土砂量 Q_{in} が海岸において沿岸方向に連続的に運び去られるためには、入射波高が小さい条件ではデルタ角が大きくなり、入射波高が大きい条件ではデルタ角が小さくなるような変形が起こる。すなわち動的平衡状態にあるデルタでは、入射波高によらず、沿岸漂砂量は常に一定値を保つ。
- ③ 平衡状態の漂砂量分布は、端部漂砂量を指定することでしか定まらない。平衡状態の漂砂量分布が同じでも動的安定汀線形が異なることはあり得る。
- ④ デルタ角は、海岸端部の沿岸漂砂の流出条件に応じて沿岸方向に変化する。 Q_{in} と海岸端部の流出量 Q_{out} が等しいときはデルタ角の沿岸方向変化はなく、区間内の漂砂量は全地点で等しくなる。
- ⑤ Q_{in} と Q_{out} の差に相当する土砂が区間内に堆積するが、 Q_{in} と Q_{out} の差が大きいほど区間内の堆積量は大きくなり、デルタ角は沿岸方向に大きく変化し、海岸線の曲率が大きくなる。このとき沿岸漂砂量は、 Q_{in} から Q_{out} へ直線的に変化する。
- ⑥ 堆積性を考慮しない沿岸漂砂量一定の計算方式と、堆積性を考慮した沿岸漂砂量漸減の計算方式のそれぞれにより再現計算を行った結果、後者は前者に比べて侵食範囲が狭まることが判明した。

今回の計算では堆積性の海岸の性質を考慮することで、沿岸漂砂を一定と見なす計算時に生じていた計算と実測との不一致原因が明らかになり、予測精度の向上が可能となった。堆積性海岸が侵食される場合の長期的海浜変形の予測精度を上げるには、自然状態における汀線の平行前進状態の再現が必要であるが、本研究によりそれを再現するための手順が明らかになった。

参考文献

- 1) 長島郁夫・岩崎伸昭・宇多高明・有村盾一：遠州灘海岸の天竜川河口以西の侵食実態，海岸工学論文集，第52巻，pp. 596-600，2005。
- 2) 宇多高明・芹沢真澄・古池 鋼・三波俊郎：石川海岸の地形学的変化と手取川河口デルタの変形，海洋開発論文集，第18巻，pp. 485-490，2002。
- 3) 宇多高明・吉添高兆・横山卓司・甲賀 肇・古池 鋼・村井健太・石川仁憲：天竜川からの供給土砂量の増加と遠州灘海岸の侵食の関係，海岸工学論文集，第54巻，pp. 596-600，2007。
- 4) 芹沢真澄・宇多高明・三波俊郎・古池 鋼・熊田貴之：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. 496-500，2002。