

駿河海岸の過去 9,000 年間における海浜変形の 再現計算と将来予測

宇多高明*・山本幸次**・岡本俊策***・河野茂樹***

1. ま え が き

現在の海浜地形は過去における様々な外的作用の結果として存在するものであり、その形成に至る機構を解明することは将来の地形変化を予測する上で極めて重要である。海浜変形を生じさせる主な要因には、構造物による沿岸漂砂の阻止や河川からの供給土砂量の急激な減少など、主として人為的なものと、地盤の隆起や海水準の変動などの地球物理学的現象とがある。海岸工学では、前者の要因による地形変化が主な研究対象とされてきたが、最近ではこれらに加えて地球温暖化に伴う海水準の上昇が海浜変形に及ぼす影響なども問題とされるようになった。それゆえ、将来の海浜地形変化の予測では、長期的な地形変化を引き起こす要因についても検討することが求められる。

筆者らは、沿岸漂砂量の水深方向分布を一般的な関数で与えることにより、3次元的な海浜地形変化を予測可能なモデルを開発した(宇多ほか, 1990, 1991)。本研究では、駿河海岸を取り上げ、この等深線変化モデルによる計算により、過去 9,000 年間における海水準の上昇による地形形成を再現し、このモデルが長期的な地形変化予測に有効なことを確認する。次いで近年における沿岸漂砂量の減少や海水準の上昇が海浜地形に及ぼす影響をこのモデルを用いて予測し、当海岸の海岸侵食の本質的問題点について論ずる。

2. 駿河海岸沖の地形特性と海水準変動

駿河海岸は駿河湾の西岸に位置し、小川漁港から勝間田川河口に広がる延長約 18 km の砂礫海岸である(図-1)。この海岸はその中央部に流入する大井川からの土砂供給により形成された扇状地の一部である(例えば、吉か, 1973)。海岸北部の大井川から小川漁港の間では近

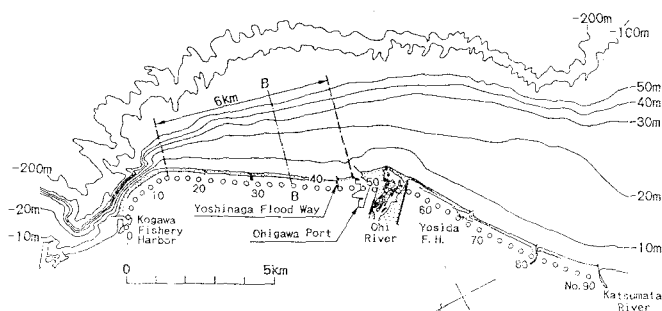


図-1 駿河海岸沖の等深線図

川は年侵食が著しく、また海岸北端には海底谷があり、そこを経由して土砂が深海へと流出している(宇多・小俣, 1989)。ここで、図-1に示した No. 46~No. 0 の区域に着目する。No. 46~No. 14 の区域を見ると、汀線と -10m の等深線はほぼ平行であるが、汀線と -20m および -30m の等深線の間隔は河口に近い No. 46 で広く、和田鼻のある No. 14 に向かって狭くなっている。-30m から -50m の等深線は各々平行で、その間隔もほぼ等しい。そして、和田鼻から小川漁港に至る No. 10~No. 0 では海底勾配が非常に急である。

過去に行われた波浪観測によると、駿河海岸への入射波の卓越方向は、SE である(宇多ほか, 1986)。No. 46~No. 14 の区間の平均的な汀線の方向は N32° E であるため、この海岸では北向きの沿岸漂砂が卓越することになる。

駿河湾においても、過去数千年間で見るとかなり大きな海水準の変化が起きており、図-1 に示す海底地形はこの海水準変動の影響を受けている。ところで、井関(1978)によると、海水準の上昇は 7,000~6,000 年 B.P. 以前の急速な上昇期と、それ以降の小規模な海面変動は明らかに区別でき、後者の方が現在の海浜地形に関係が深いと指摘している。太田ほか(1990)によって与えられた東海、近畿地方の海水準変動曲線(図-2 参照)によれば、現在の海水準は 7,000~6,000 年 B.P. 以前と比較して数 10m は高い。したがって、これ以降に形成された地形は海面下のみ残されていることになる。

* 正会員 工博 建設省土木研究所海岸研究室長

** 正会員 建設省土木研究所海岸研究室研究員

*** 技研興業(株) (元建設省土木研究所海岸研究室部外研究員)

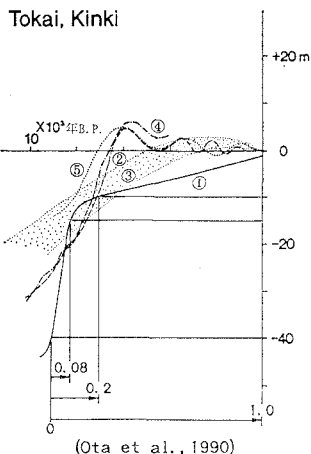


図-2 東海、近畿地方における海水準変動曲線

以上のような地形、卓越波向および海水準の上昇を考え合わせると、駿河海岸においては、大井川からの流出土砂により形成された扇状地が海水準の上昇により波の作用を受けるようになり、No. 46～No. 14の区域が北向きの沿岸漂砂により侵食され、汀線から-20mの等深線の間には侵食緩斜面が形成されたことを示している。図-1においてNo. 36を通る測線B-B'の断面形を図-3に示す。これによると0～-5mは急勾配斜面、-5～-20mは緩勾配斜面、-20～-40mはやや急勾配斜面となっている。

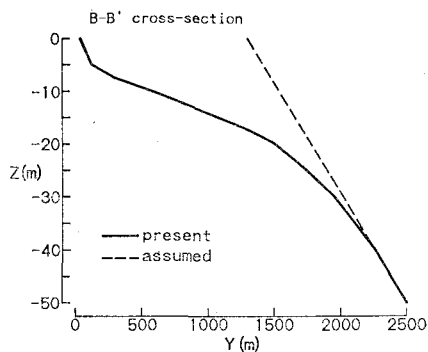


図-3 測線B-B'に沿う断面形

3. 等深線変化モデル

沿岸漂砂量の水深方向分布を考慮することにより海浜断面形の変化を予測可能な等深線変化モデルの詳細な内容については前報(宇多ほか, 1990, 1991)に譲り、ここでは計算に用いる沿岸漂砂の水深方向分布についてのみ示す。

沿岸漂砂量の水深方向分布は、陸上部で週上波によ

て地形変化の生ずる限界高さ(h_R)と限界水深(h_c)の間で分布形を持つとし、その分布形を碎波波高で無次元化した相対水深の関数として設定する。本研究では、実験値との比較検証が行われ、その妥当性が確かめられている次の簡単な近似式を仮定する(宇多ほか, 1991)。ここで、

$$z^* = z/H_b, \quad h_c^* = h_c/H_b$$

とおく時、 $-h_c \leq z \leq h_R$ では、

$$\xi(z^*) = 2/h_c^{*3} (h_c^*/2 - z^*)(z^* + h_c^*)^2 \quad \dots\dots\dots (1)$$

$z < -h_c$ および $z > h_R$ では、

$$\xi(z^*) = 0 \quad \dots\dots\dots (2)$$

と仮定する。ここで、 h_R 、 h_c は実験結果をもとに便宜上次式で与える(図-4 参照)。

$$h_R = 1.0H_b; \quad h_c = 2.3H_b \quad \dots\dots\dots (3)$$

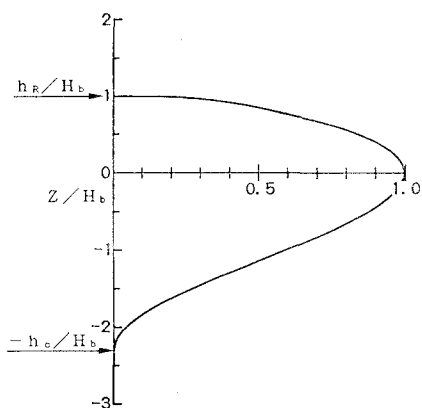


図-4 等深線変化モデルにおける沿岸漂砂量の水深方向分布

4. 計算条件

海水準の上昇に関して、図-2を参照すると、最も単純な海水準変動曲線は曲線①で与えられる。この曲線は約9,000年B.P.～7,000年B.P.では急激な海水準の上昇を示すが、7,000年B.P.以降では単調な上昇となる。これ以外の海水準変動曲線は、7,000年B.P.以降小規模な変動を示す。しかし、海水準を入射波の波高と同じオーダー上昇・下降させた実験では、侵食域の断面形には大きな違いが見られない(宇多・坂野, 1991)ことから、砂礫海岸の侵食域においては小規模な海面変動の影響は海面下の地形にはほとんど残されないと考えられる。このことから、計算では海水準変動曲線をいくつかの直線で近似した(図-5 参照)。9,000年B.P.を基準年としてそれから年数を測ったとき、0年～720年の間には3.5 cm/yrで、720年～1,800年の間には0.46 cm/yrで、そして1,800年以降は0.14 cm/yrの割合で海水準が上昇したことになる。

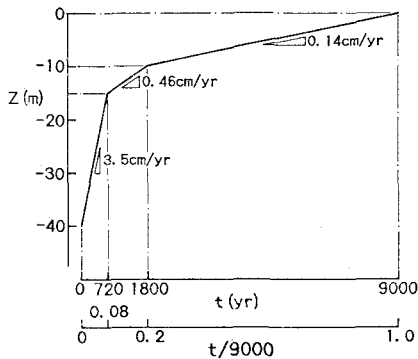


図-5 海浜変形計算に用いる海水準変動曲線

次に、波浪条件に関しては、駿河海岸のある駿河湾は最深部が約 -2000 m に達する急深な湾であるため、数 10 m の海水準の変動があっても来襲する波浪条件は大きく変わらないと考えられる。そのため海水準の変動にかかわらず波浪条件は一定とする。駿河海岸での卓越波である SE 方向からの入射波に関しては、碎波点での碎波角は汀線に対して約 10° である (宇多ほか, 1986)。しかし、図-1 より海水準が -40 m の時の汀線と近い形を持つと考えられる -40 m の等深線は、現在の汀線に対してさらに 18° 傾いているため、初期地形に対する碎波角は $\theta_b = 28^\circ$ とした。波高に関しては、この海岸で地形変化が収束する限界水深を与える碎波波高を用いることとする。駿河海岸においては、顕著な地形変化の収束する限界水深は約 -7 m である (村田ほか, 1991) ので、碎波波高の値は $H_b = 3.04\text{ m}$ となる。

No. 46~No. 14 の区域においては、北向きの沿岸漂砂が卓越している。武内ほか (1984) は、深浅測量データをもとにこの区間の海浜土砂量の経年変化より、駿河海岸の No. 20 地点では約 $8.0 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{yr}$ の沿岸漂砂量が北向きに移動していることを明らかにした。沿岸に漂砂を阻止する構造物がなければ、現在の海岸線形状に対して波が斜め入射することにより、同量の土砂が下手側へ流出していたはずである。したがって、ここでは大井川から当海岸へ流入する土砂量を $8.0 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{yr}$ とし、この供給土砂が連続的に存在するで計算を行うものとする。また、等深線変条件化モデルにおいて使用する漂砂量係数 f は、前述した波浪条件 $\theta_b = 10^\circ$ 、 $H_b = 3.04\text{ m}$ で沿岸漂砂量が $8.0 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{yr}$ となるよう $f = 0.002$ と定めた。

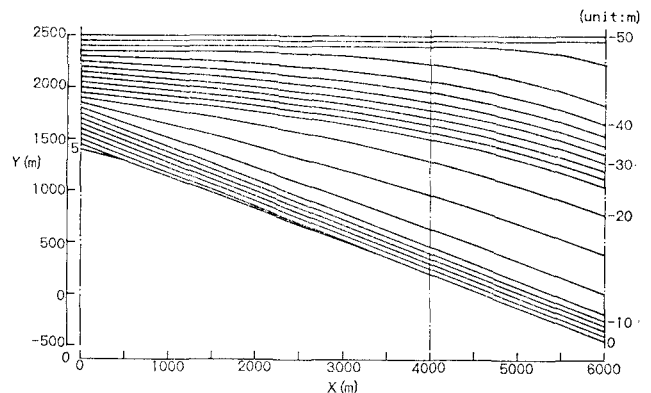
計算の対象区域は図-1 に破線で示した沿岸方向 6 km の範囲であり、水深方向の計算範囲は海水準の上昇による影響と現地

の地形を考慮し、 $5\text{ m} \sim 50\text{ m}$ とする。時空間の計算ステップは沿岸方向間隔が $\Delta X = 500\text{ m}$ 、水深方向間隔が $\Delta Z = 2.5\text{ m}$ 、時間間隔が $\Delta t = 1\text{ 年}$ として、海水準の上昇とともに漂砂量の水深方向分布を平行移動させつつ計算を行う。

5. 検証計算

最初に、 $9,000$ 年間の海水準の上昇による現地形の再現計算を行った。海水準変動曲線は図-5 の関数系を用いる。境界条件に関しては、河口近くの上手境界からは $8.0 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{yr}$ の土砂が常に供給されるものとし、下手境界は海底谷を経由して沖合へと土砂が流出できるよう自由境界とする。次に初期地形について考える。十分に水深の大きい $-40 \sim -50\text{ m}$ に扇状地の安定勾配が保たれていると仮定すると、扇状地は海水準の上昇とともに堆積を続けていくので、波の作用を考えない場合、 $t = 9,000$ 年の地形は図-3 に破線で示された $1/23$ 勾配の斜面となる。そこで計算に用いる初期地形としては、扇状地の時間変化は考慮せずに沿岸方向に一樣に続く $1/20$ 勾配の斜面とし、この地形が波の作用により受ける侵食状況を再現するものとする。

検証計算の結果を図-6, 7 に示す。図-6 は $t = 9,000$ 年での等深線図である。図-6 によれば、汀線よりすぐ沖の等深線の間隔が密になり、その沖に緩勾配斜面が、さらに沖側で再び密な等深線形となる点は、図-1 と良い一致を示す。図-7 は測線 $B-B'$ ($X = 4,000\text{ m}$) での断面形の時間変化を海水準とともに示したものである。図-7 と初期の断面形とを比較すると、 -45 m 以浅で侵食が生じ、 $0 \sim -12.5\text{ m}$ が急勾配斜面、 $-12.5 \sim -20\text{ m}$ が緩勾配斜面、 $-20 \sim -40\text{ m}$ がやや急勾配斜面となっており、図-3 に示した断面変化の特徴を良く表現している。また時間経過による侵食状況を見ると、海水準が急激に上昇した時期 ($t \leq 720$ 年) では海底形状が初期状

図-6 等深線図 (検証計算, $t = 9,000$ 年)

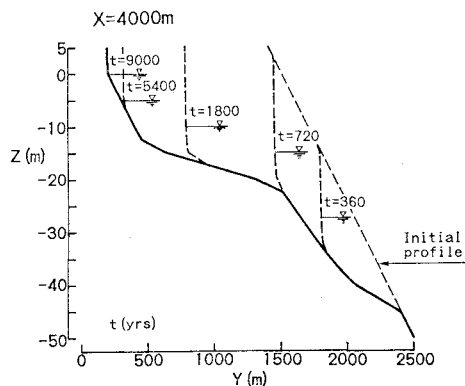
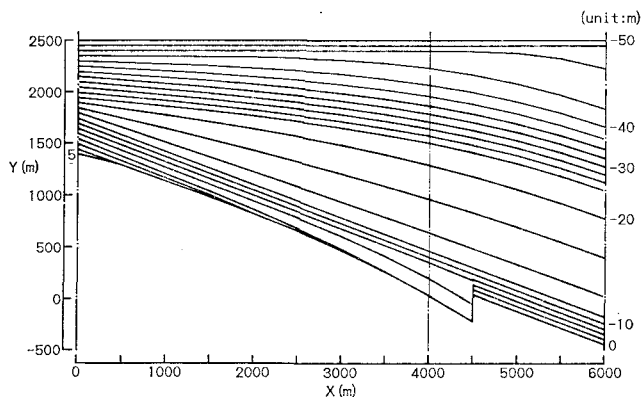


図-7 測線 B-B' での断面形の時間変化 (検証計算)

図-8 等深線図 (ケース①, $t=9,040$ 年)

態とはほぼ平行となり、その後の海水準の変化率が小さい時に侵食が著しく進んだことが分かる。 $t=720$ 年以降の侵食速度の変化を見ると、侵食速度は次第に遅くなっており、 $t=9000$ 年においては沿岸漂砂量と大井川からの供給土砂量が動的に均衡状態に達していると考えられる。これを現実にあてはめると、駿河海岸においては構造物が何もなく沿岸漂砂が影響を受けない限り、動的に安定した状態にあったと考えられる。

6. 沿岸漂砂の阻止および海水準上昇が地形変化に及ぼす影響の検討

検証計算の結果が現実の地形を良く表現し得たことから、沿岸漂砂の阻止や海水準上昇が生じた場合における長期的な3次元的海浜変形の予測を行う上でも、この等深線変化モデルが有効と思われる。そこで以下では2ケースの条件を設定して予測計算を行った。

ケース①では、大井川港の防波堤によって大井川からの土砂供給が断たれた時に生ずる海浜変形を9,000年～9,040年の期間で計算する。海水準は0mで一定とし、初期地形は検証計算の結果を用いるものとする。上手境界の境界条件は土砂供給量を0とする。下手境界は検証計算と同様に自由境界とする。ただし、大井川港と吉永放水路の間の海岸線は吉永放水路のために安定形になっており、また吉永放水路からNo.48付近までの海岸線は護岸と消波工により固められ、地形変化の収束する限界水深(-7m付近)まで海浜変形がほとんど生じ得ない状況になっている。そこで、このケースにおいては上手境界を $X=4,500$ mに置き、 $X=4,500\sim 6,000$ mの範囲では海浜変形は起こらないものとする。

ケース②では、ケース①と同様に土砂供給量の停止による9,000～9,040年の海浜変形計算を行うが、さらに海水準が40年間に1m上昇(2.5 cm/yr)するとし、これによる影響を調べる。その他の計算条件と計算範囲はケ

ース①と同じである。

まずケース①の計算結果を示す。図-8は $t=9,040$ 年の等深線図であり、図-9には $t=9,000$ 年から9,040年までのB-B'断面の時間変化を10年ごとに示す。図-8より、 $X\leq 4,500$ mの範囲で沿岸漂砂の供給を断たれた上手側の-7.5m以浅の等深線が後退していることより、この部分が侵食を受けていることが分かる。汀線に注目して図-6と比較すると、その侵食範囲は約3,000m $\leq 4,500$ mにあり、 $X=4,500$ mで最大の後退量を示し下手にいくほど後退量は小さくなる。B-B'断面の汀線後退量を図-9より読み取ると、10年ごとに平均約50mずつ後退し、40年で約170mの後退となる。これは検証計算で示した過去9,000年における侵食量と比較すると、かなり急速な変化であり、人為の影響がかなり大きな効果を持つことを示している。すなわち、防波堤延長などにより沿岸漂砂が阻止されると、動的な安定状態が崩れ、激しい海岸侵食が引き起こされることを示している。

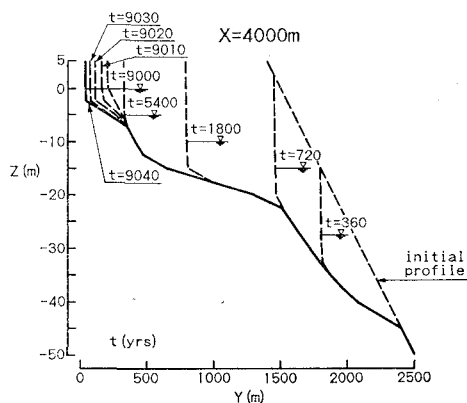


図-9 測線 B-B' での断面形の時間変化 (ケース①)

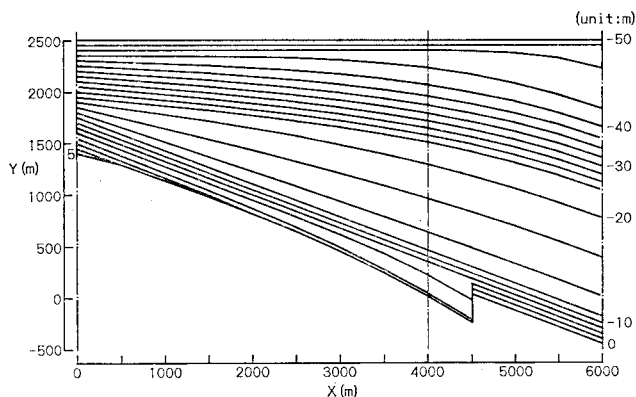
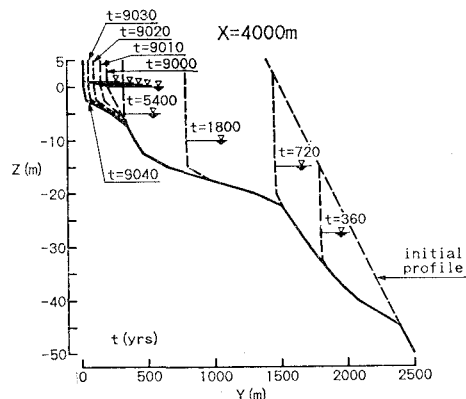
図-10 等深線図 (ケース②, $t=9,040$ 年)

図-11 測線 B-B' での断面形の時間変化 (ケース②)

同様に ケース② の計算結果のうち, $t=9,040$ 年の等深線図を 図-10 に, B-B' 断面の時間変化を 図-11 に示す. 図-8 と 図-10, 図-9 と 図-11 を比較すると B-B' 断面の時間変化において ケース② の方が汀線後退量が若干大きい反面, -2.5 m での侵食が少ないという以外, はほとんど明瞭な差は見られない. このことから, 40年間で 1 m 程度の海水準の上昇では海岸侵食にあまり大きな影響は与えないものと判断できる.

ケース①, ②の計算結果から, 沿岸漂砂の上手から起こる海岸侵食に対して護岸などで海浜変形を阻止しようとする, その下手側で侵食が起こり, 結局全ての海岸に何らかの対策を講じざるを得なくなることが分かる.

7. 結 論

① 筆者らの開発した等深線変化モデルは, 海水準が上昇する場における長期的な 3 次元的海浜変形の予測にも有効である.

② 駿河海岸では, 過去数千年間の地形変化により, 海浜形状が動的な安定状態に近づきつつあった. この海岸では沿岸漂砂が急に阻止されると, 漂砂の上手側境界より汀線の激しい後退が始まり, 侵食域は急速に下手側へと波及する. このとき生ずる汀線変化は, 長期間の汀線変化と比較してもかなり急激なものとなる.

③ 40年間で 1 m 程度の割合 (2.5 cm/yr) で海水準が上昇する条件では, 上昇が無い場合と比較して海岸侵食

状況に明瞭な違いは見られず, 短期的な海浜変化を考える場合には海水準の上昇はあまり重要な要因とはならないことが分かった.

参 考 文 献

- 井関弘太郎(1978): 日本における海水準変動研究の展望, 地理学評論, 第51巻, 第2号, pp. 188-196.
- 宇多高明・小俣 篤・山本幸次(1986): 駿河海岸安定化手法調査報告書, 土木研究所資料, 第2285号, 67p.
- 宇多高明・小俣 篤(1989): 海岸から深海への土砂損失機構調査報告書, 土木研究所資料, 第2730号, 80p.
- 宇多高明・山本幸次・河野茂樹(1990): 沿岸漂砂量の水深方向分布を考慮した海浜変形モデル, 海岸工学論文集, 第37巻, pp. 304-308.
- 宇多高明・山本幸次・河野茂樹(1991): 沿岸漂砂による3次元海浜地形変化の予測法, 海岸工学論文集, 第38巻, pp. 386-390.
- 宇多高明・坂野 章(1991): 潮位(海水準)変動と沿岸漂砂による海浜地形変化の関係, 土木技術資料, Vol. 33, No. 2, pp. 32-36.
- 太田陽子・海津正倫・松島義章(1990): 日本における完新世相対的海面変化とそれに関する問題, 第四紀研究, Vol. 29, pp. 31-48.
- 武内達夫・宇多高明・中島秀樹・青山森男(1984): 駿河海岸における海浜地形変化の解析, 第31回海岸工学講演会論文集, pp. 360-364.
- 村田 守・宇多高明・片岡賢一・大石英雄・山本幸次(1991): 駿河海岸の海浜変形と土砂収支, 海岸工学論文集, 第38巻, pp. 281-285.
- 吉川虎雄・杉村 新・貝塚泰平・太田陽子・阪口 豊(1973): 新編「日本地形論」, 東京大学出版会, 329p.