

バームの形成と沿岸漂砂を同時に考慮した 海浜変形モデル

THREE DIMENSIONAL PREDICTIVE MODEL OF BEACH CHANGES WITH BERM FORMATION UNDER THE ACTION OF LONGSHORE SAND TRANSPORT

宇多高明¹・口石孝幸²・見附敬三²・加藤憲一²・谷口 丞²・赤松直博³

Takaaki UDA, Takayuki KUCHIISHI, Keizo MITSUKE,
Ken-ichi KATO, Susumu TANIGUCHI and Naohiro AKAMATSU

¹正会員 工博 国土交通省土木研究所河川部長 (〒305-0804 茨城県つくば市旭1)

²正会員 工修 日本建設コンサルタント株式会社(〒105-0004 港区新橋6-17-19)

³日本建設コンサルタント株式会社(〒105-0004 港区新橋6-17-19)

Three dimensional predictive model of beach changes with berm formation under the action of longshore sand transport was developed by applying the contour line change model. On the Toban coast, beach nourishment using gravels was carried out in 1990 and 1991, and subsequent beach changes by longshore and cross-shore sand transport was measured. Based on these field data, a new model to predict three dimensional beach changes with berm formation was developed.

Key Words : Contour line change model, Toban coast, berm formation, longshore sand transport, cross-shore sand transport

1. まえがき

門松ら¹⁾および坪香ら²⁾は、東播海岸の西島地区において礫養浜を行い、波浪による海浜変形を調べた。これによると、1990年の観測では礫は波の作用により岸向きに運ばれ2次元的なバームが形成された。一方1991年の観測では、波が斜め入射したために投入礫は沿岸漂砂によって西向きに運ばれると同時に、岸向きにも移動して高いバームが形成された。最近、筆者ら^{3), 4)}は沿岸漂砂に起因する3次元的な海浜変形予測モデルとして、等深線変化モデルのさらなる工夫を進めているが、このモデルでは沿岸方向の土砂移動は当然として、海浜勾配がある限界勾配より急になった場合に起こる冲向きの土砂移動のモデル化も行っている。しかし東播海岸で観測されたように、バームの形成を伴う場合の海浜変形予測については等深線変化モデルにとどまらず、現在まで予測モデルは開発されていない。比較的粒径の大きな養浜材は安定性が良好なことから礫養浜はしばしば行われており、その場合、一般にはバームの形成を伴う

ことから、そのような条件下での海浜変形を予測可能とすることは実用的に見て非常に重要である。このことから、ここでは東播海岸での観測データを参考として等深線変化モデルを拡張し、バームの形成を伴いながら沿岸漂砂によって生じる地形変化の予測モデルを開発する。

2. 東播海岸での礫養浜の現地実験の要約

礫養浜は播磨灘に面した東播海岸の西島地区で行われた。図-1には西島地区での養浜直後の1990年11月15日の深浅図とともに平面形状を示す。南端の赤根川河口導流堤と、その北約200mにある不透過突堤の間で養浜が行われた。養浜には中央粒径25mmの礫が用いられ、1990年9月に初期勾配1/10の一樣斜面が造成された。追跡測量は、図-1に示すように20m間隔で設けた8本の測線で行われた。

1990年9月30日から1991年1月11日までの期間における海浜縦断形の変化を図-2に示す。No.2は導流堤に、No.7は突堤に隣接する測線であり、No.5

はほぼ中央に位置する。図-2 によれば、いずれの断面においてもほぼ-3.5m から平均汀線の間が侵食され、侵食された底質が前浜へうちあげられたことがわかる。この結果、ほぼ 1/10 の一様勾配の海浜縦断面形は、ほぼ 1/3 勾配へと急になると同時に、高さ約 3m のバームが形成された。これら 3 断面の海浜縦断面形の変化がよく似ていることは、養浜後の縦断面形変化が岸向き漂砂によるものであることを示している。また、形成された縦断面形はバームから-2m 付近まではほぼ 1/3 の一定勾配であるが、-2~-3.5mの間ではほぼ 1/15~1/20 と、前浜勾配より緩い一定勾配とな

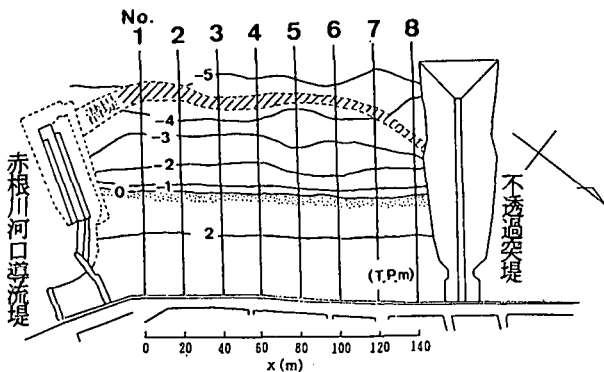


図-1 西島地区の養浜直後の深浅図
(1990年11月15日測量)

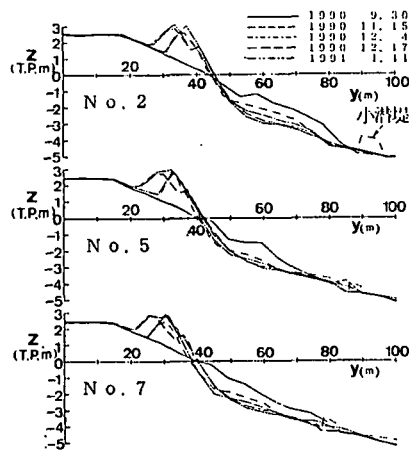


図-2 測線 No. 2, 5, 7 における海浜縦断面形の変化

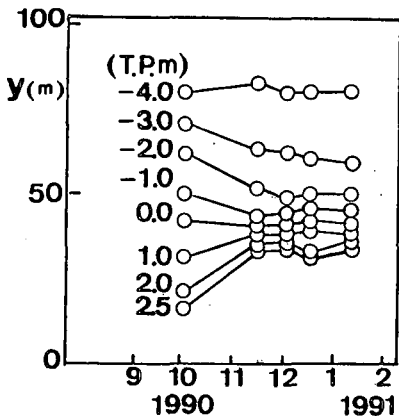


図-3 測線 No. 5 における等深線距離の経時変化

って縦断面形は「く」の字形に近似される。

図-3 は No. 5 における基準点から代表的な等深線までの冲向き距離の経時変化を示す。-4m の等深線にはほとんど動きがないが、-3m から汀線の間では全般に右下がりの変化を示し、陸上部の等高線の動きと全く逆モードである。このような変形の結果として-2.0~2.5m の等深線の間隔が非常に密になった。また、時間応答性としては9月30日から11月15日までの46日以内で地形変化は収束している。

1991年10月27日、バームが形成された状態において台風9119号が来襲し、最大有義波高1.9m(周期6.3s)の波浪が最大126cmの潮位偏差を伴って作用したため著しい地形変化が生じた。1991年3月と10月の深浅図を図-4, 5に示す。1991年3月では北側に比較して南側の汀線がやや沖に位置し、しかもバームの標高の高い部分が中央より南側にあった。これに対して北側の No. 7 付近ではバーム高も低く汀線は凹状であった。1991年10月の高波浪作用後の海浜形状を示す図-5では図-4に示した特性が南北で逆転し、北側ほど汀線が冲向きに突出し、バームの標高の高い部分が突堤の近傍に形成されるとともに、-2m 以浅の等深線も全体に北側ほど突出した。以上のシーソーモードの地形変化は、高波浪の入射方向が測線方向に対して時計回りの方向より反時計回りの方向へと変化したため生じたと言える。

図-6 には汀線変化を示す。高波浪の作用前、汀線は南側で前進、北側で後退傾向を示していたが、高波

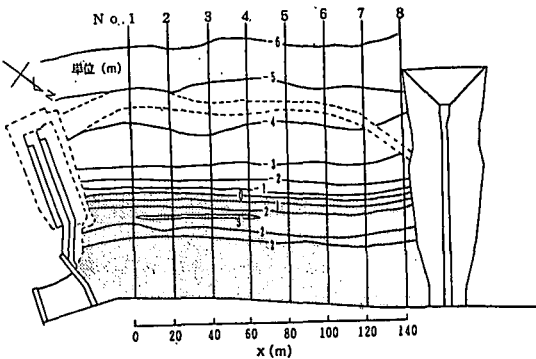


図-4 西島地区の深浅図 (1991年3月測量)

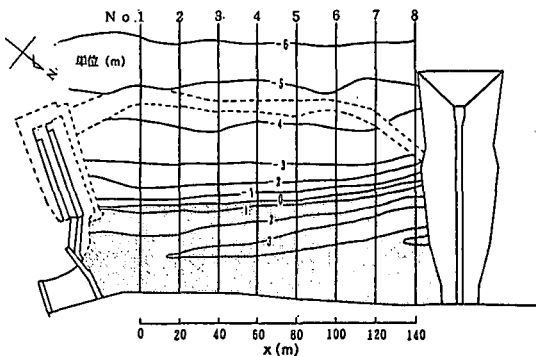


図-5 西島地区の深浅図 (1991年10月測量)

浪の作用後特性が大きく逆転した。図-6 によると汀線前進域の面積 166m^2 に対し、侵食域の面積は 466m^2 と侵食域の面積の方が圧倒的に大きい。この結果、汀線が前進も後退もしない中立断面は突堤間の中央ではなく、それよりも 31m 北側に移動している。これは、海浜変形が沿岸漂砂によるものだけではなく、岸向き漂砂が同時に作用したことを意味する。そしてこのような海浜変形には、通常の汀線変化モデルや、沖向き漂砂のみ考慮した等深線変化モデルの適用は困難である。

図-7 には、導流堤に隣接する No. 1, 突堤に隣接する No. 8, そして汀線が前進も後退もしない中立断面を挟む No. 5, 6 の海浜縦断面形の変化を示す。No. 1 では、高波浪の作用前 3.0m の高さを持つ高いバームが発達し、汀線付近の勾配が $1/2.7$ であったが、高波浪の作用によりバームは大きく削られた。このとき侵食域の沖合限界は -2.9m にある。旧バームは大きく削られたが陸側には高さ約 3.0m の新バームが形成された。中立断面に近い No. 5, 6 では汀線付近の断面形はほとんど同一であって、前浜勾配にも変化が見られない。汀線変化を示した図-6 によれば、No. 5 はわずかに侵食域に、そして No. 6 は堆積域に入るから、No. 5, 6 断面の汀線付近でそれぞれ侵食、堆積傾向を示すことは十分説明がつく。したがって汀線が前進も後退もしない位置では主として沿岸漂砂が西向きに通過するのみであったことがわかる。しかし前浜上のバームの形態を見ると、旧バームの標高 2.9m に対して新バームでは 3.4m と標高が高く、またかなり多くの礫が前浜上へうちあげられている。しかしそれに見合う侵食量は断面内には見られない。以上の点は、この付近では沿岸方向に運ばれてきた

礫の一部が岸向き漂砂によってうちあげられたことを意味する。No. 8 では、旧バーム上に大量の土砂がのり新バームが形成された。汀線付近の勾配は高波浪の来襲前が $1/2.7$ 、来襲後が $1/4.3$ とやや緩くなったが、バームの標高は 2.7m より 3.8m へと 1.1m 高まった。汀線付近には大量の土砂が堆積したが堆積域の沖側限界はほぼ -3.0m にある。また堆積域ではバームの発達が良いであるが、侵食域ではそれと比較してバームの発達は悪い。このことは沿岸漂砂による土砂供給または侵食量とバームの形成とが深く関係していることを示している。

3. モデル化の基本

宇多ら³⁾⁴⁾の等深線変化モデルでは海底勾配が限界勾配を越えるほどに急な断面内では、土砂の連続条件を保ちつつ土砂が沖向きに移動する条件が組み込まれている。一方ここで取り上げる問題は岸向きの土砂移動であって、重力の作用により砂礫が深い方へと移動するのは逆方向の現象である。いま、理解を容易にするために、直角入射条件を想定して図-8 の模式図をもとに考える。

図-8 は岸向き漂砂によってバームが形成される場合の海浜縦断面形変化の模式図である。バームの形成は、汀線付近の勾配が海浜材料の粒径に応じたある勾配へと推移する現象と考えられる。その場合、土砂収支が成立することが必須の条件となる。簡単のために、図-8 において初期海浜は一様勾配で与えられるとし、汀線付近の勾配が粒径に見合った安定勾配より緩かったとする。その場合、東播海岸での実測データをもとにすれば、海面下のある遷急点の水深 h_1 と、波による地形変化の限界水深 h_c 、および波のうちあげ高に応じた陸側の地形変化の限界点の高さ h_R が既知とすると、汀線付近の勾配が次第に急になるには、侵食域における三角形 CDE の面積と同一の面積を持ったバームが形成される必要がある。実際には図示するようにバーム頂より陸側では逆勾配となるために、ある任意の等高線が 3 価となり等高線位置の追跡が難しくなるので、AB で与えるような形

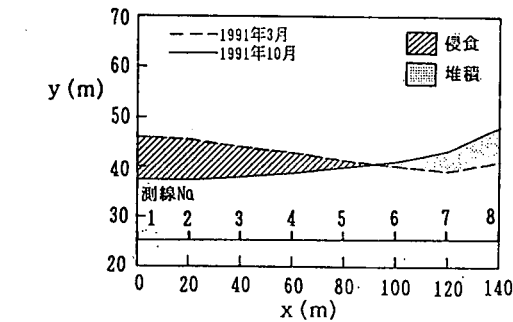


図-6 1991年3月から10月の汀線変化

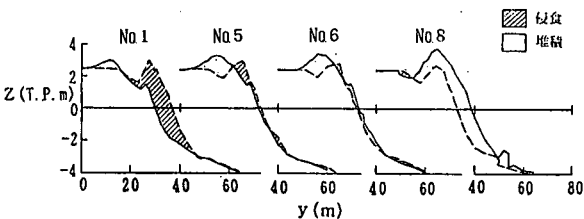


図-7 海浜縦断面形の変化

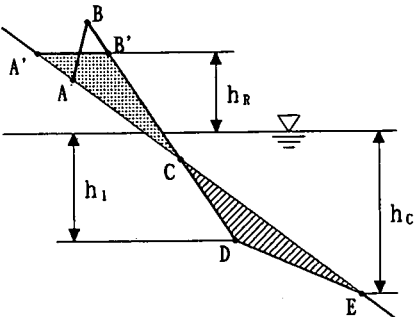


図-8 バーム形成の模式的説明図

状の予測は困難である。しかし、現実問題としてバームの詳細形状の予測よりも、沖合から岸向きに運ばれ、その後沿岸漂砂によって土砂が運ばれる現象を平均的意味から予測可能とすることが重要と考えられるので、ここでは図-8 の A'B' で示すように、バームの形成を A'B'C により近似することにする。したがって計算範囲の陸側の上限は h_R (浜崖の形成を伴う場合を除く)、沖側の限界は h_c となる。なお、図-8 は最終的な計算結果を示す模式図であって、三角形 CDE の面積と三角形 A'B'C の面積が釣り合うようにして、一度に海浜縦断形を変化させるものではなく、実際には多くの等深線の変化を繰り返し計算した結果が図-8 の模式図に近いものとなる。

実際の計算は図-9 の模式図に示すようにして行う。まず、 h_1 から h_R の間の等深線の岸向き漂砂による変化を考える。例えば、この区間に 7 本の等深線がある場合を想定する。まず沖側の等深線⑤、⑥を対象とすると、等深線⑤、⑥間の初期勾配が限界勾配より緩やかなために、四角形 $ab'eb$ と四角形 $ecdc'$ の面積が等しくなるようにして b を b' に、そして c を c' に移動させる。この手法自体は宇多ら³⁾⁴⁾と基本的には同一である。ただし砂礫が冲向きに移動するのではなく、岸側に移動する点に違いがある。次に、等深線位置⑤、⑥の新しい位置を初期値として、等深線④、⑤について同様な操作を行う。以下、次々と陸側へと同様な操作を繰り返す。これによって h_R と h_1 間の海浜勾配が全てある時刻ごとに与えられたバーム勾配となれば計算は終了する。なお、バーム勾配の時間的变化は、初期勾配からある限界勾配まで指数関数的に漸近線と与えられるとする。

h_1 と h_c の間の変形については次のようにして計算を行う。図-10a を参照したとき、 h_R 、 h_c の間に図示するような数の等深線があったとし、点 A~F を図のように配置する。このときすでに BD 間（すなわち高さ h_R と h_1 の間の区間）での断面形の変化は上述の計算で完了している。 h_1 から h_c の間については、水深 h_1 にある点 D が後退するにしたがい新たに DF 間から土砂が発生し、その土砂もまた岸向きに移動してバームの形成に使われることになる。その場合、DF 間を直線で近似し、それより突き出た部分の土砂量を積算し、その土砂量に等しい分だけ図-10b のようにしてバームを冲向きに平行移動させる。図-10a において、DF 間の等深線位置は沿岸漂砂に伴って変動するが、DF 間を直線で結んだ線より深く掘れている場合には過剰土砂の一部はその埋め戻しに使われ、その分図-10b のような形でのバームの前進量は小さくなるとする。

以上の計算により、あるタイムステップにおける岸向き漂砂に伴うバームの計算が完了する。実際の計算では、まず沿岸漂砂に起因する計算を従来の等

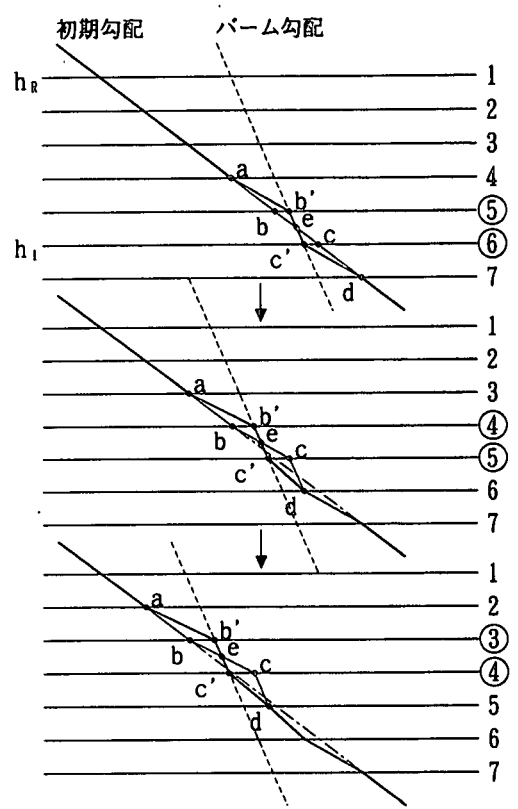


図-9 h_1 から h_R の間での縦断形変化計算の考え方

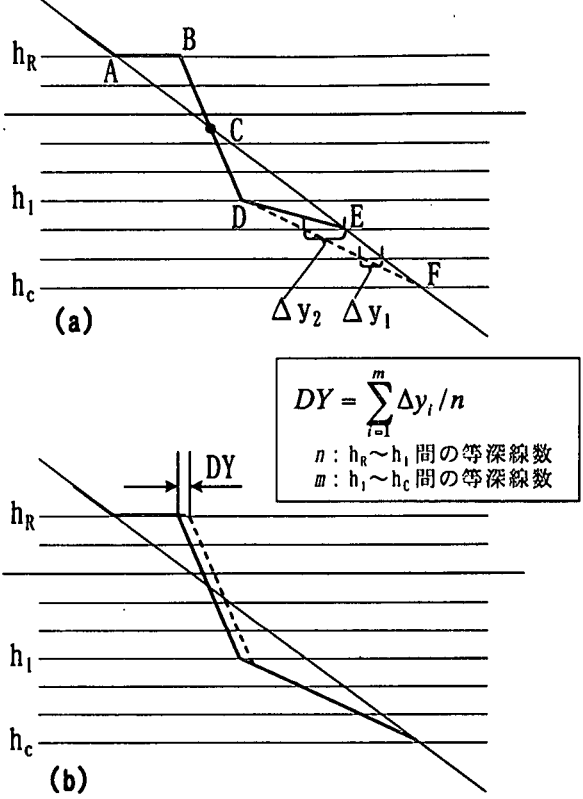


図-10 h_1 から h_c の間での縦断形変化計算の考え方

深線変化モデルと全く同様に行い、それに引き続いて上記の計算を行う。沿岸漂砂が作用した結果、海浜断面の位置によっては浜崖などが形成され、砂礫の冲向きの移動が起こることもあるが、それは従来のモデルと同様である。

4. 計算条件の設定

モデル計算は直角入射と斜め入射の場合、合わせて 6 ケース行ったが、ここでは斜め入射の場合の結果のみを示すことにする。いずれの場合にも西島地区と同様、左右を不透過性の壁で区切られた沿岸方向に 200m の区域を設定し、この間に 1/10 勾配の初期勾配海浜を考える。以下に示すケースは砕波波向が初期海岸線に対して 10° のものであり、 Δx は 20m、砕波波高は沿岸方向に一定の 1.7m とする。この砕波波高は、西島地区における地形変化の限界水深を地形変化の実態より $h_c=4m$ とみなし、 $h_c=2.3H_b$ より $H_b=h_c/2.3=1.7m$ と設定したものである。各ケースの相違は、バーム勾配の時間的変化を与える場合の時間係数をケース 1, 2, 3 の順に、 1.0×10^{-5} , 1.5×10^{-6} , 7.0×10^{-7} と変えたことにある。その他の条件は同じである。選急点の水深 h_1 は $0.5h_c$ 、バーム高は 2.0m とする。また等深線の鉛直方向の分割間隔は 0.2m、計算時間間隔は 600s とする。

5. 計算結果

図-11 には斜め入射波条件下におけるケース 1, 2, 3 の平面等深線の経時的変化を示す。図の右端には、限界勾配への時間的変化を指数関数で与えたときの漸近曲線を示す。限界勾配への応答はケース

1, 2, 3 の順に緩やかになる。直角入射波条件においては、限界勾配への応答の緩急はあっても、最終の海浜縦断形は同一になる。しかし、沿岸漂砂が同時に作用する場合には両者の地形変化の時間応答関係が重要となる。岸向き漂砂による地形変化の時間スケールが沿岸漂砂による地形変化の時間スケールより短ければ、海浜の各断面において、まず岸向き漂砂によってバームが急速に形成され、その後沿岸漂砂の作用を緩やかに受ける。逆の場合には沿岸漂砂によって砂礫が運ばれた後にバームの形成が起こる。したがって岸向き漂砂による地形変化の時間スケールが相対的に長い場合には、沿岸漂砂の下手端では上手側から沿岸漂砂によって運ばれてきた砂礫もまた堆積するのに対し、上手端ではバームの形成が起こる前に沿岸漂砂による砂礫の流出が起こり、その後バームの形成が起こる。したがって両者の差は上手側境界の隣接区域で目立つことになる。図-11 によれば波の作用日数の増加とともに、汀線付近の等深線は波の入射方向と直角となって安定する。+2m の等高線についてはケース 1 では平行線を保っているが、ケース 3 では浜崖の形成が進むために上手側で等高線の後退が見られる。また、60 日後の等深線図には初期汀線を破線で示しているが、いずれの場合も汀線前進域の面積は汀線後退域の面積よりも大きい。これは岸向きに運ばれてきた砂礫が汀線付近に

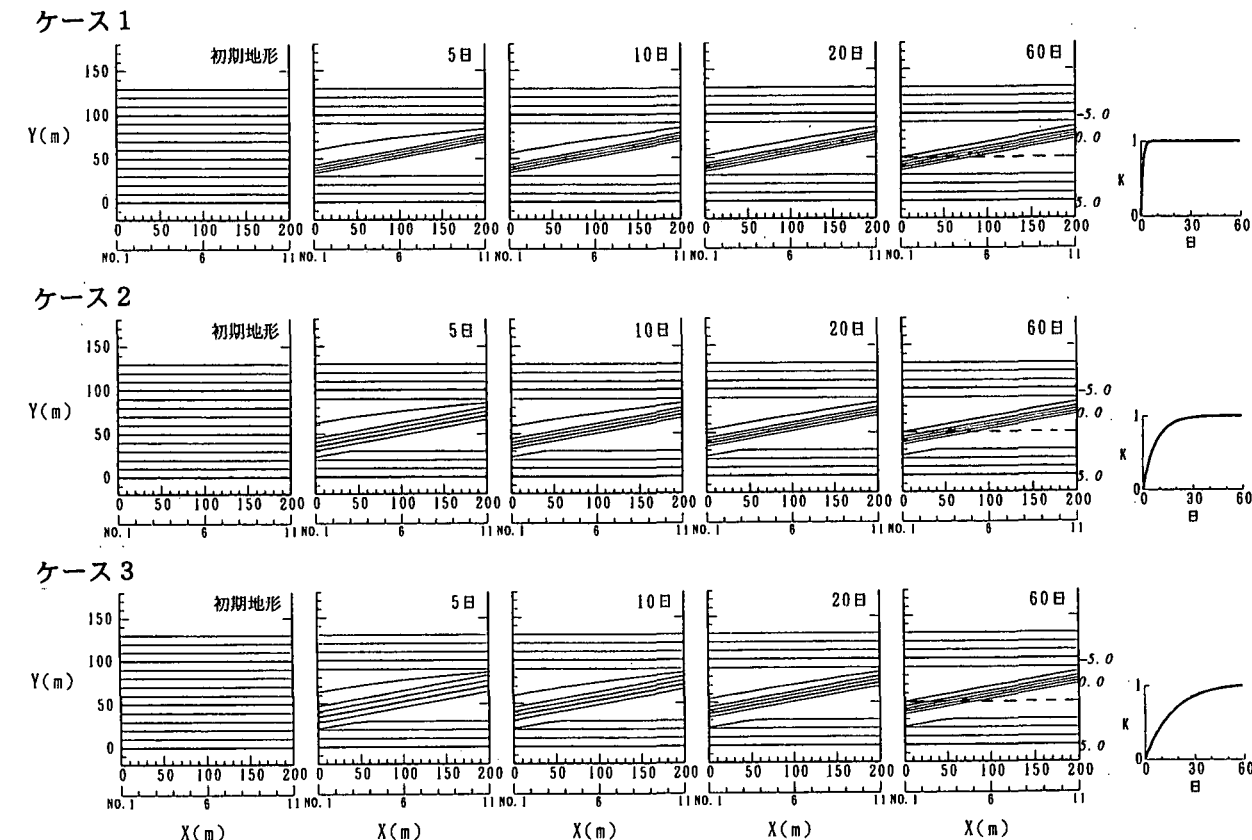
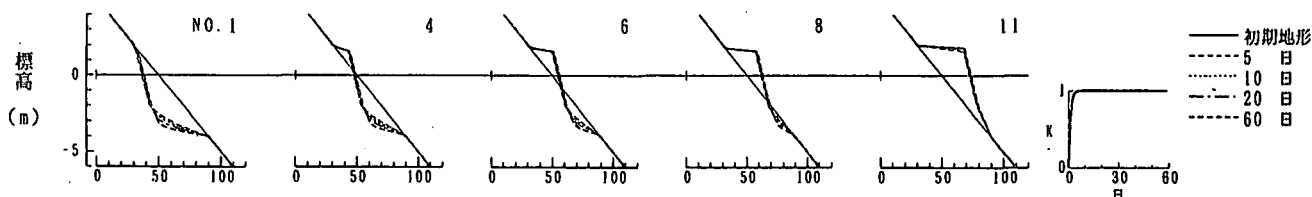
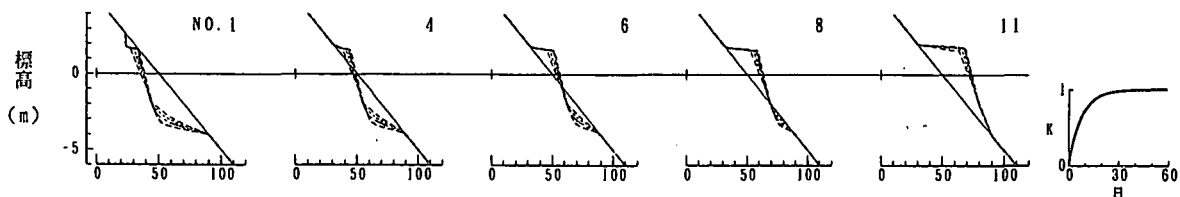


図-11 60 日間の平面等深線の変化

ケース 1



ケース 2



ケース 3

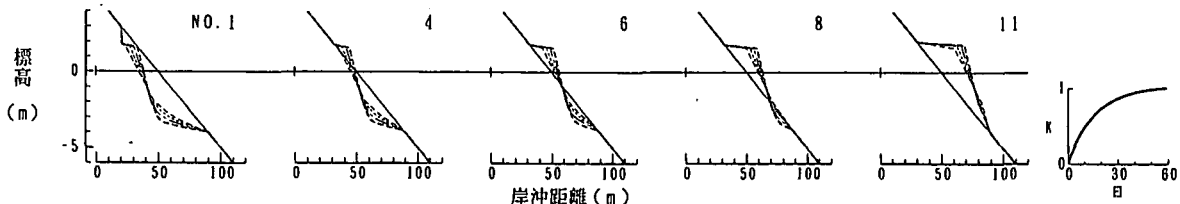


図-12 代表測線に沿った海浜縦断形の経時変化

堆積したためである。図-6 に示した東播海岸での実測値ではこれと逆の傾向であったが、図-6 の変化は潮位偏差 1.26m と異常に高い潮位条件であったために、平均汀線付近はむしろ砂礫の供給源となったのに対し、計算では平均潮位を想定しているため、そこは土砂の堆積域となったことによると考えられる。

図-11 に対応する海浜縦断形の変化を図-12 に示す。図には代表的に 5 断面の変化を示す。最も上手側の No. 1 は侵食断面である。初期の直線状の縦断形が侵食されて次第に凹状となる。ケース 1 では縦断形は単調であり、バームの形成も見られないのに対し、ケース 2, 3 ではバームの陸側に浜崖の形成を伴うことが特徴である。例えば、ケース 3 を詳細に検討すると、初期にまず浜崖が形成され、その後にバームの形成が進んでいる。これに対してケース 1 では岸向き漂砂によって砂礫が運ばれてバームを形成する間もなく、その砂礫が沿岸漂砂によって下手側に運び去られたと言える。また、No. 4, 6, 8, 11 の順に、すなわち沿岸漂砂の下手側へいくにしたがいバームの形成が進み、下手端では規模の大きなバームが形成される。

東播海岸の実測値は、かなり大きな潮位変動があり同時に波浪条件も時間的に変化している中で取得された。一方、計算では潮位および波浪条件は一定としている。したがって両者の定量的比較はかなり難しいが、西島地区での海浜変形との比較によれば、少なくとも原理的にはバームの形成を伴いながら沿岸漂砂によって礫が運ばれた現象について、かなりよい対応を示していると考えられる。

6. 結論

等深線変化モデルの拡張を行い、岸向き漂砂によるバームの形成と、沿岸漂砂による地形変化が同時に起こる場合の海浜変形を予測可能なモデルを開発した。これにより東播海岸で観測された現象について、少なくとも原理的には説明が可能となった。なお、このモデルにおいては、岸向き漂砂による地形変化が生じる場合、前浜勾配が指数関数的にある限界勾配に漸近すると考えてモデル化を進めている。したがって時間係数については経験的に定める必要があり、その点については現地データなどによる検証が必要である。

参考文献

- 1) 門松 武・宇多高明・大杉広徳・伊藤弘之 (1991) : 東播海岸の西島地区における礫養浜の現地実験, 海岸工学論文集, 第 38 巻, pp. 301-305.
- 2) 坪香 伸・宇多高明・谷 宗彦・大杉広徳・伊藤弘之 (1992) : 東播海岸の西島地区における礫養浜の追跡調査, 海岸工学論文集, 第 39 巻, pp. 361-365.
- 3) 宇多高明・加藤憲一・石孝幸・赤松直博 (2000) : 沿岸漂砂による海浜縦断形変化に及ぼす波浪の履歴効果, 海洋開発論文集, 第 16 巻, pp. 541-546.
- 4) 宇多高明・加藤憲一・見附敬三・山形 宙・赤松直博 (2000) : 突堤の陸側端を沿岸漂砂が通過する場合の海浜変形予測モデル-現地実測に基づく等深線変化モデルの拡張-, 海洋開発論文集, 第 16 巻, pp. 589-594.