

汀線変化予測モデルの適用性の検討

松岡道男*・越智裕*

1. ま え が き

海浜変形に関する数値モデルは基本的に2つのタイプに分類しうる。その第一は沿岸漂砂量公式と砂量の連続方程式を基本式として汀線変化を予測しようとするものであり、第二は海浜流等の流れの場を計算し、この流れと或る種の流砂量公式と砂量の連続方程式から格子点上の水深変化を求めようとするものである。後者に関しては、波のはい上りに伴う汀線より陸部における底質の移動の取り扱い等、モデル構成上での基本的な資料の欠落している部分もあり、かつ計算プログラムが大きくなりすぎて実用上の問題もある。一方、前者に関しては、漂砂現象のモデルとしては大きな問題点を含みつつも、その実用性が注目されるところであり、さまざまな改良が試みられつつある。本論文は、このような汀線変化モデルの実際問題への適用性を移動床模型実験結果の再現、および現地地形変形(3例)の再現計算を通じて検討したものである。

2. 汀線変化予測モデルの概要

数値モデルは波浪変形計算パートと汀線変形計算パートから成立している。計算領域を沖側計算領域と汀線側計算領域に分割し、領域によりメッシュ間隔を変えて計算を実施する。また、比較的一般的な構造物(突堤、離岸堤およびかき型突堤)を組み合わせることによって、実際の海浜においてみられる構造物配置の多くのパターンに適用し得るように工夫した。なお構造物による漂砂の捕捉率等は入力データとして与えるものとした。また、波と地形の相互作用を計算でもとりいれるため、一定時間間隔で繰り返し計算を行なった。

(1) 波浪変形計算

波浪変形計算では、波向線法¹⁾をベースとして波の峯線上の仮想点の移動とそれとともなう波高、波向きを屈折・回折・浅水変形をそれぞれ独立に計算し、それらを線型に重ね合わせることによって、計算領域での波高、波向き分布と碎波諸元を得る²⁾。波の進行にともなう単位

時間当りの角度 α の変化は、 α を波の進行方向と x 軸のなす角、 C を波速として次式で与えた。

$$D\alpha/Dt = \sin \alpha \cdot (\partial C / \partial x) - \cos \alpha \cdot (\partial C / \partial y) \cdots \cdots (1)$$

また、屈折係数(K_r)は波向線間隔方程式を解いて求め、回折係数(K_d)の算定には三井等による Helmholtz 方程式の厳密解の漸近展開による修正近似解³⁾を用いた。浅水度係数(K_s)は微小振幅波の関係を用いて計算した。

したがって、波高は次式で与えられる。

$$H = K_r \cdot K_d \cdot K_s \cdot H_0 \cdots \cdots (2)$$

碎波条件としては、合田による碎波限界⁴⁾の式(3)を用いる。

$$H_0/L_0 = 0.15 \{1 - \exp[-1.5 \cdot \pi \cdot h_b \cdot (1 + 15 \tan^4 \theta)/L_0]\} \cdots \cdots (3)$$

ここで、 H_0 : 碎波波高、 L_0 : 沖波波長、 h_b : 碎波水深、 $\tan \theta$: 海底勾配である。碎波時の波エネルギーは式(4)により計算した。

$$E_b = \frac{1}{16} \rho \cdot g \cdot \frac{L_b \cdot H_b^2}{T} \cdots \cdots (4)$$

$\rho \cdot g$: 海水の単位体積重量 (1.03 t/m³)

なお多重反射、多重回折は考えず、計算においては碎波諸元が対象領域全体にわたって得られるようにした。

(2) 汀線変形計算

底質の連続方程式において、岸沖方向の漂砂 q_y を考えず、また沿岸方向の漂砂を漂砂帯で積分し、波の条件が定常で汀線の変動にかかわらず海浜の縦断面が一定と仮定した、いわゆる一次元モデルの連続式を用いる。

$$\frac{\partial y}{\partial t} = -\frac{1}{h_M} \cdot \frac{\partial Q}{\partial x} \cdots \cdots (5)$$

ここで、 y : 汀線位置、 Q : 沿岸漂砂量、 h_M : 平均移動高さである。

また、沿岸漂砂量 Q については式(1)の計算で求めた碎波時の波エネルギーフラックスの沿岸方向成分 E_a に Q が線型に比例するという Savage 型の公式を用いた。

$$Q = \alpha E_a \cdots \cdots (6)$$

ここで係数 α は入力データとして与えるものとした。式(5)と式(6)を連立させて解くことにより汀線の時間変化の計算を行なう。

3. 移動床による検証実験

数値モデルの検証のために次のような移動床実験を行った。実験には、日本テトラポッド(株)所有の長さ 11 m, 幅 7 m, 深さ 1 m の屋内平面水槽を用いた。地形モデルは表-1 に示す 5 ケースとした。海底勾配は 1/10 で、水深 30 cm のところからは水平固定床とした。模型底質として

表-1 実験ケース

ケース	地形モデル	固定式トラップ	参照図
1	直線汀線+突堤(2基)	有	図-1
2	直線汀線+離岸堤	有	図-2
3	直線汀線	有	図-3
4	海に向かって凸汀線	無	図-4
5	海に向かって凹汀線	無	図-5

は中央粒径 $d_{50}=0.24$ mm, 比重 $\rho=2.6$ の自然砂を使用した。実験波は波高 5 cm (水深 30 cm), 周期 1.0 秒, 波峯線と汀線のなす角は 20° である。波当て時間はどのケースについても 10 時間とした。地形の測定は造波開始前の初期地形及び造波開始後 1, 3, 6, 10 時間後のものについて行った。なお, 海に向かって凸及び凹地形のケースを除いては沿岸漂砂量を測定するために漂砂下手側の末端部で土砂を採取している。また, 漂砂上手側からの土砂の供給は行わなかった。

4. 実験結果と数値計算結果との比較

検証実験における汀線変化とその数値シミュレーションによる汀線変化を比較したものを図-1~5 に示す。また, 数値計算における沿岸漂砂量の沿岸方向の特性の経時変化を図-6~10 に示した。

ケース 1. 直線汀線地形+突堤 2 基 (図-1)

小突堤の上手側では、水槽壁での汀線の後退は計算でも再現されているが、小突堤の沖に向かって右側の基部においては、計算では汀線が前進するが、実験ではあまり変化しなかった。大小突堤間の汀線は計算でもあまり変化せず、また大突堤下手側の汀線の後退は計算においても再現された。

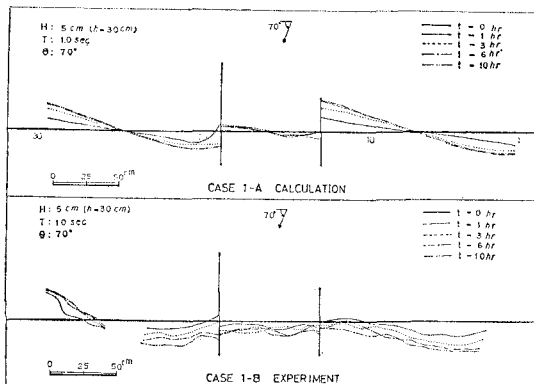


図-1 汀線の経時変化 (ケース 1)

ケース 2. 直線汀線地形+離岸堤 1 基 (図-2)

実験では典型的なトンボロ地形が形成され、その頂部の位置は、離岸堤中央よりやや漂砂の上手側寄りであり、10 時間後には堤体に達する。計算においてもトンボロ地形は再現された。トンボロ頂部の位置が離岸堤中央より漂砂の上手側寄りである傾向等の定性的な地形変形は実験と比較的良好に一致している。しかし、計算においてはトンボロの伸長速度が実験に較べて早く減少し、10 時間経過後もトンボロ頂部は堤体に達していない。

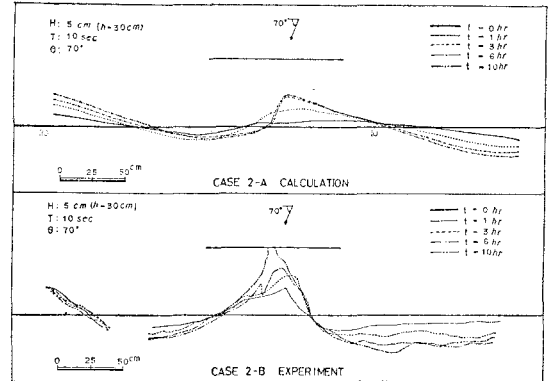


図-2 汀線の経時変化 (ケース 2)

ケース 3. 直線汀線地形 (図-3)

実験では漂砂の上手側で侵食された土砂が、下手側に堆積して、全体として汀線の形状は、波峯線と平行になろうとする傾向を示す。同様の傾向が計算においても再現された。しかし、実験においては固定式トラップにより捕砂を行なっているため汀線全体が後退傾向にあり、下手側での汀線変化を定量的に比較することはできない。

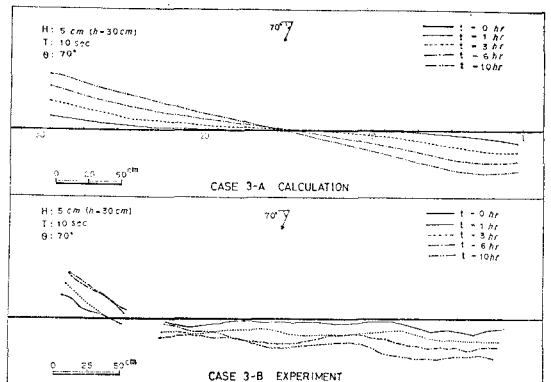


図-3 汀線の経時変化 (ケース 3)

ケース 4. 海に向かって凸な汀線地形 (図-4)

実験では、凸部分の汀線後退量が多く、3 時間後には凸部分はなくなり、10 時間後の汀線形状はケース 3 の場合とほぼよく似た形状となる。計算でも凸形部分の汀線は徐々に後退し、入射波の波峯線と平行な汀線形状に移行して行く様子がよく再現された。造波開始初期の汀線

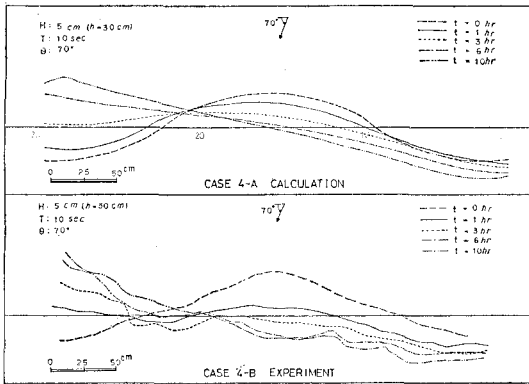


図-4 汀線の経時変化(ケース4)

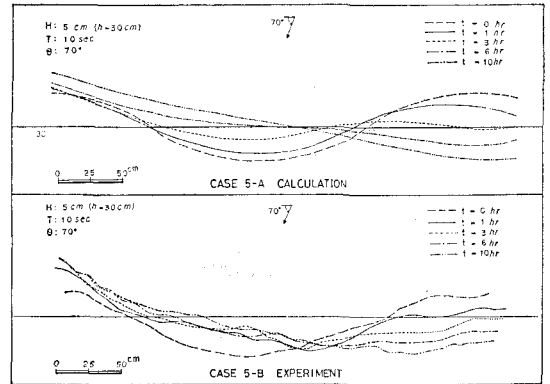


図-5 汀線の経時変化(ケース5)

変化量は、計算値の方が若干少ないようである。また、実験では、汀線が時間的に変化しない点が存在するが、計算でも同様な点が存在する。

ケース5. 海に向かって凹な汀線地形

(図-5)

実験では、漂砂上手側の水槽壁付近の凸部分での汀線後退量が大きく、逆に凹部分の汀線は前進する。10時間後の汀線はケース3, 4の場合とよく似た形状となる。計算結果の汀線変化をみると実験とよく似た変形過程を示しており、安定な汀線形状に収束してゆく様子が再現された。

図-6~10は、各ケースにおける各地点・各時刻での沿岸漂砂量の計算値である。横軸のPOINT No. は、漂砂上手の水槽壁を基準として、下手側の方向に向かって25 cm間隔の地点であることを示し、その地点での沿岸漂砂量を縦軸に示す。

これらを比較すれば明らかなように、構造物の形態や初期地形によって、漂砂量の沿岸特性が異なっていることがわかる。どのケースも時間の経過と共に絶対値は減少

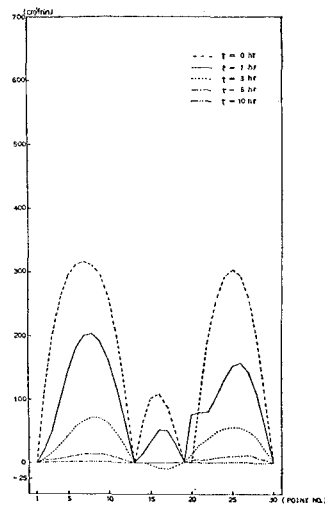


図-6 沿岸漂砂量の計算値(ケース1)

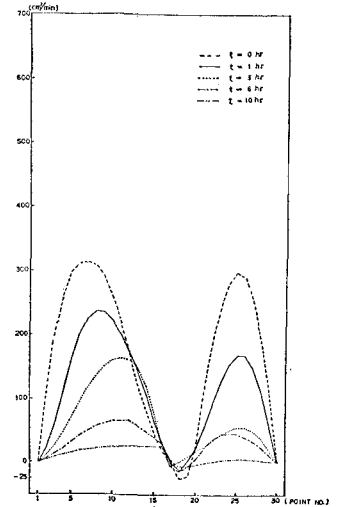


図-7 沿岸漂砂量の計算値(ケース2)

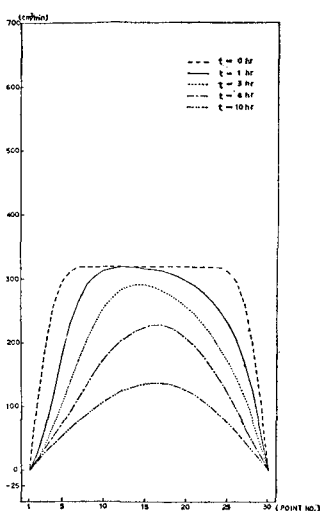


図-8 沿岸漂砂量の計算値(ケース3)

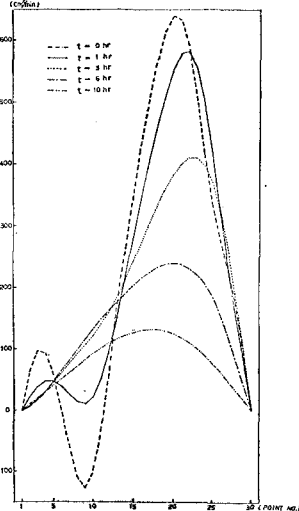


図-9 沿岸漂砂量の計算値(ケース4)

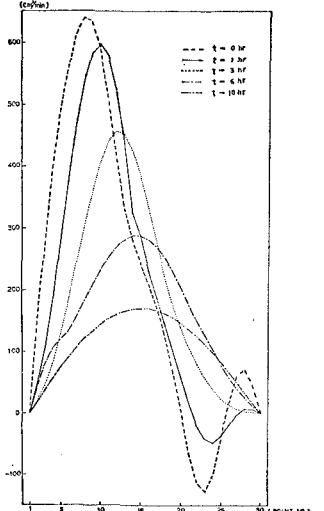


図-10 沿岸漂砂量の計算値(ケース5)

し、減少速度はしだいに緩やかになる。また、場所的な漂砂量も均一化されていく傾向を示す。例えば、ケース 2 の場合、離岸堤の背後では沿岸漂砂の絶対量が少なくその両側では大きい、時間の経過と共に沿岸漂砂量は場所的に均一化されて行く。これは、離岸堤の背後では、トンボロが最も安定な汀線形状であることを示している。また、実験における漂砂量については、ケース 3 の場合、漂砂下手側の No. 25 地点で、造波開始後から 3 時間以内に測定した値は $320 \sim 350 \text{ cm}^3/\text{cm} \cdot \text{min}$ であり、これはケース 3 の場合の計算値最大値である $320 \text{ cm}^3/\text{cm} \cdot \text{min}$ とほぼ一致した。

5. 現地における汀線変化の数値シミュレーション

(1) 突堤 1 基の場合 (大洗海岸)

昭和 52 年 6 月に防砂堤の建設が始まってから、昭和 53 年 10 月までの汀線変化を図-11 で示す領域について数値計算を行なった⁵⁾。入力データとして与えた波浪条件は、先ず、波向に関して年間を通じての卓越方向である ENE, ESE と対象地点に直接入射してくる SSE の波向きを対象⁶⁾とした。また、代表波高は各方向別に 2 時間ごとの波高の自乗和の平均値の平方根で与え、周期は、この代表波高と方向別総エネルギーから逆算された値を代表値とした。また、平均移動高さ h_M は昭和 48 年 12 月および昭和 52 年 6 月の深浅測量図より各測線での海底断面図を作成し、断面土量の変化と汀線変化量の相関を回帰直線より求め、 $h_M = 5.37 \text{ (m)}$ とした。計算の結果を図-11 に示す。防砂堤に砂が堆積し、汀線が前進する傾向が再現されればよく似た汀線形状を得た。

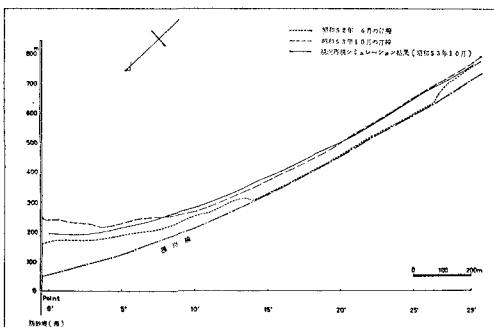


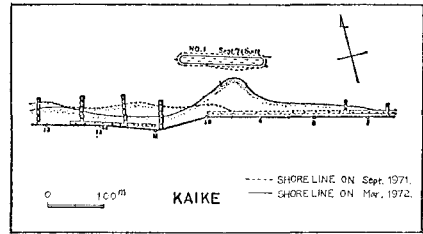
図-11 大洗海岸防砂堤周辺の汀線変化 (現地と計算値)

(2) 離岸堤 1 基の場合 (皆生海岸)

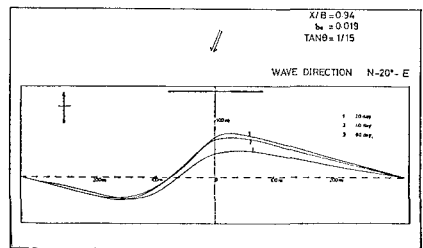
皆生海岸の離岸堤は、既設護岸の前面約 110 m、水深約 5 m の所に設置された。ここで計算対象として第 1 号堤は昭和 46 年 9 月に竣工し、その年の冬に冬期風浪による高波によって一挙に砂が堆積してトンボロ地形が出現した⁷⁾。

この第 1 号堤によるトンボロ地形の形成を本モデルに

よって追跡計算を行なってみた。入力データとしては波高 2.45 m (水深 10 m) 周期 8.9 秒、波向きは図に示した様に与えた。波高は通常毎年観測される最大波高程度の規模であり、波向きは、皆生海岸の漂砂の卓越方向がやや西向きであることを考慮して与えた。波と地形の繰り返し計算の結果、6 ヶ月後には、離岸堤の中央からやや漂砂の卓越方向寄りに頂部を持つトンボロ地形が再現された。図-12 にその結果を示す。侵食・堆積傾向も現地とよく似た結果を得た。



(A) 現地データ

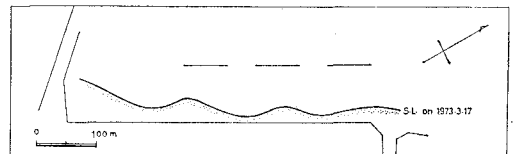


(B) 数値シミュレーション計算結果

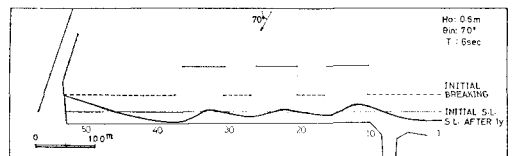
図-12 皆生海岸離岸堤背後の汀線変化 (現地と計算値)

(3) 離岸堤複数基の場合 (二色ノ浜海岸)

図-13 (A) は、現地の汀線形状 (S. 48.3.17) である。昭和 42 年 12 月に三基の離岸堤が完成してから、それぞれの離岸堤の背後にトンボロ地形が発生し、トンボロ群を形成した。この離岸堤群の南側は大規模な埋立地となっている⁸⁾。汀線の変化計算は、初期地形として直線汀線地形を仮定し、波と地形の変形計算を 1 ヶ月ごとに繰り返し行なった。入力データとしては通常波浪と



(A) 現地データ (昭和 48 年 3 月 17 日)



(B) 数値シミュレーション計算結果

図-13 二色ノ浜海岸の汀線変化 (現地と計算値)

してはやや大きめの波高 60 cm, 周期 6 秒, 波向きは年間を通して卓越した NW を与えた. 計算上 1 年後の汀線形状を 図-13 (B) に示した. トンボロの相対的な大きさの違い等細かい点を除けば, 現地のトンボロ群の形状と比較的良好似た形状を再現することができた. 図-14 は, 沿岸漂砂量の経時変化を示したものである. ト

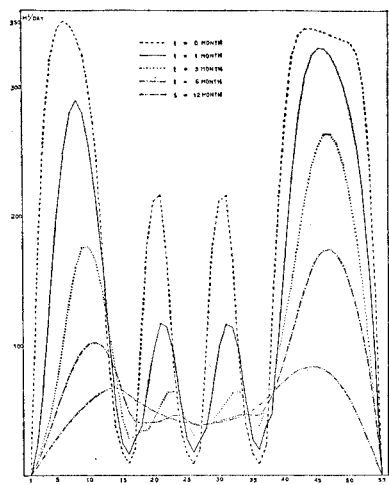


図-14 沿岸漂砂量の計算値 (二色ノ浜海岸)

ンボロの伸長とともに沿岸漂砂量の場所的な差異はしだいに減少し均一化され, また絶対値も減少し安定な形状に収束していく様子を示している.

6. 結 語

検証実験及び現地事例の数値モデルによる計算結果か

ら考えて, 本論文で扱ったようなかなりマクロなモデルを用いても, 定性的には実際の汀線の変形過程をある程度近い形でシミュレートできることがわかった. これは波浪変形計算を行なって, 波エネルギーの沿岸分布特性を計算にとり込んだことによるものと思われる.

したがって, 沿岸漂砂量のほうが岸沖方向の漂砂量に較べ汀線変化に寄与する割合が大きい場合には, この数値モデルが適用できる. しかし, 現地計算では外力の条件・計算の境界条件の設定等多くの問題が残されている.

謝 辞: 本研究は運輸省港湾技術研究所田中則男漂砂研究室長の御指導のもとに進められたものであり, 謹んでここに謝意を表します.

参 考 文 献

- 1) Griswold, G. M.: Numerical calculation of wave refraction, J. Geophys. Res., 68 (6), pp. 1715-1723, 1963.
- 2) 小沢保臣・松岡道男: 構造物を含む海浜における汀線の変動予測, 第 33 回年次講演概要集, pp. 814-815, 1978.
- 3) 三井 宏・越智 裕・川村勇二: 埋立護岸隅角部からの反射波の様相, 第 23 回海講論文集, pp. 395-400, 1970.
- 4) 合田良実: 港湾構造物の耐波設計, 鹿島出版会, pp. 56-58, 1977.
- 5) 茨城県・日本テトラポッド(株): 大洗港湾計画に伴う汀線及び海浜地形の変化について, 昭和 54 年 3 月.
- 6) 第二港湾建設局・横浜調査設計事務所: 首都圏流通港湾計画調査報告書, 1972.
- 7) 豊島 修・定道成美: 皆生海岸におけるトンボロと海底地形, 第 21 回海講論文集, pp. 167-172, 1974.
- 8) 大阪府: 二色海岸漂砂移動調査報告書, 昭和 51 年 3 月.