

【土木学会論文集 第 345 号／II-1 1984 年 5 月】

# 研究展望

## 海浜変形シミュレーションの適用性

APPLICABILITY OF SIMULATION MODELS  
FOR BEACH EVOLUTION

堀川清司\*

By Kiyoshi HORIKAWA

### 1. 緒論

現在みられる海岸地形は、地質学や地理学で対象とするような長い時間スケールの間に、自然の外力の作用を受けて形成されたものである。しかしながら、われわれが現実に対象とする時間的なスケールは、長短さまざまである。特に工学的な観点から海浜の変形過程を考えるときには、長期的には年のオーダー、短期的には1つの時化の前後の数日間ということになるであろう。

さて海岸便覧(1984)によれば、わが国の海岸線の総延長は34 064 kmであり、そのうち海岸保全区域に指定する必要があると目されている海岸線延長は全体の47%に達するという。このような統計からも、かつては白砂青松と詠歌されたわが国の自然の海浜がいかに急速に失われてしまったかを推察できる。このような事態に至ったのは、わが国の置かれている国情によるところが大きいと思われる。すなわち、国土総合開発、沿岸域開発が明治以来、特に戦後急速に展開されてきたことによるのであり、このような事情は他の先進諸国においてもみることができる。

海岸あるいは沿岸海域の利用を促進するために、何らかの構造物を海岸に建設することが多い。海岸における土砂移動の状況にもよるが、過去の経験から、防波堤のような構造物を海岸に建設すると、少なくともその周辺の海浜に著しい変化を起こすという事例は数多い〔田中(1978)〕。したがって、構造物の建設による長期的な海浜の変化を予測しようとする試みはかなり以前からなされてきたが、それに対する需要は近年になって急速に増

大している。このような動向の背景には、海浜変形の基本をなす漂砂現象に対するわれわれの知識が定量的なレベルにまで高められてきたという事実がある。かつて漂砂現象は海岸工学において、最も定量化の困難な分野であるといわれてきたし、したがって定性的な取扱いにとどまっていた。上記のように、現在定量的な評価へと急速に発展しつつあるとはいえ、漂砂問題はなお依然として解明の困難な分野であることに変わりはない。

本論の目的は、海浜変形シミュレーション手法の発展の過程をたどり、その中に含まれている問題点を指摘し、かつその適用性について解説することにある。そこで、まず海浜変形機構に関する研究の過程を概観する。ついで海浜変形シミュレーション手法の開発の経過を回顧し、かつ将来への展望について述べることにする。

### 2. 海浜変形機構

海浜の変形はなぜ起るのかといえば、基本的には海底質の移動に起因するのである。すなわち、対象とする区域に運び込まれる土砂量と、運び去られる土砂量の差し引きの結果生じるのである。それでは、土砂の移動量とその移動方向は、何によって左右されるのかといえば、主として海浜に襲来する波浪に伴う流体運動によるのである。したがって、波浪の流体力学的な特性を正しく評価し、それと土砂の移動量、移動方向との関連を明らかにする必要がある。上記のことを定式化するために、図-1のように水平座標 $x$ 軸、 $y$ 軸をとり、それぞれの方向の単位幅、単位時間当たりの土砂輸送量(以後漂砂量フラックスという)を $q_x$ および $q_y$ 、土砂の空隙率を $\lambda$ とすれば、水深 $h$ の時間的変化は、底質の質量保存の原理によって、次のように表わされる。

\* 正会員 工博 東京大学工学部長

(〒113 文京区本郷 7-3-1)

$$(1-\lambda) \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} \quad \dots \dots \dots \quad (1)$$

ここで問題になるのは、 $q_x, q_y$  の表示である。漂砂量は、輸送される土砂の特性(たとえば、粒径、密度など)と、流体特性とによって規定されるはずである。このような観点から漂砂量を評価しようとする努力が多くて研究者によってなされてきた(榎木(1980))。

図-2 は海浜における土砂移動(漂砂)に関する要

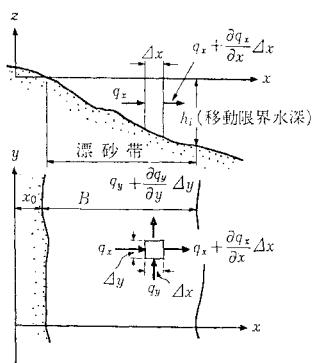
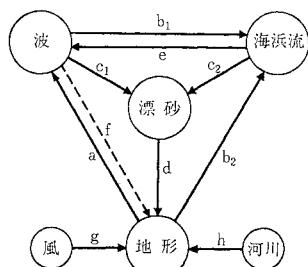


図-1 漂砂量フラックス定義図



- a : 屈折・回折・反射等の波の変形
- b : 海浜流
- c : 漂砂量(浮遊砂、掃流砂)
- d : 砂移動による地形変化
- e : 波と流れの干渉
- f : 洗掘等(碎波点、swash zone)
- g : 飛砂
- h : 河川の流送土砂

図-2 波・流れ・漂砂・地形の相互作用(模式図)

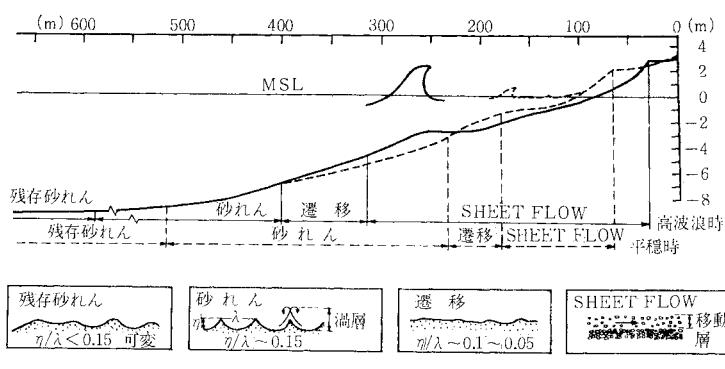


図-3 海浜縦断形状と微地形 (Dingler-Inman, 1976)

素の間の関係を模式的に示したものである。多くの要素、特に波浪、海浜流、海底地形と漂砂とは相互に複雑に絡み合っているので、計算を行うにしても、原則的には繰返し計算を行う必要のあることを示唆している。

前述のように  $x, y$  軸方向への漂砂量フラックスとして取り扱うのが一般的であるが、沖から来襲する波浪は、水深の変化に伴って浅水変形や屈折作用を受け、漂砂活動の最も活発な碎波帯を含めたごく浅い海域では、多くの場合に波向は汀線に対してほぼ直角になっている。そこで、 $x$  軸を汀線に直交する岸沖方向に、 $y$  軸を汀線方向にとって、便宜上それぞれの方向の漂砂量、すなわち岸沖漂砂量と沿岸漂砂量に分けて取り扱うことが多い。

### (1) 岸沖漂砂量

図-3 は Dingler-Inman (1976) が海浜縦断地形での微地形ならびに土砂の移動形態を、荒天時と静穏時に分けて模式的に示したものである。対象とする領域によって、このような相違を生じるのは、基本的には水深変化に伴い波浪特性が変化するからであり、このような現象を理解するためには、それぞれの領域における波動場、流速場の特性を的確に評価する必要がある。そのうえで土砂の移動形態、正味の岸沖漂砂量とその方向とを算定しなければならない。このような観点からの定量的な研究は近年精力的に推進されつつある。その一例として、渡辺・利穂・堀川 (1979) が実験水路の海浜縦断地形の変化から岸沖漂砂量を算定した結果を図-4 に示す。ここで縦軸は無次元化した岸沖漂砂量  $\phi$ 、横軸は Shields 数  $\psi_m$  であり、それぞれ、次の式によって定義される。

$$\phi = \frac{\bar{q}}{w_0 d}, \quad \psi_m = \frac{\tau_{bm}}{s \rho g d} \quad \dots \dots \dots \quad (2)$$

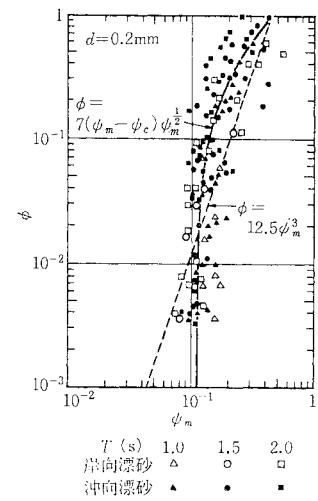


図-4 無次元岸沖漂砂量  $\phi$  と  
Shields 数  $\psi_m$  の関係  
(渡辺・利穂・堀川, 1979)

ここで、 $\bar{q}$  は単位幅、単位時間当たりの正味の漂砂量、 $d$  は粒径、 $w_0$  はその粒子の沈降速度、 $s = (\rho_s - \rho)/\rho$ 、 $\rho_s$  は粒子の密度、 $\rho$  は流体の密度、 $\tau_{bm}$  は底面せん断応力の最大値である。 $\tau_{bm}$  は波形記録をもとに微小振幅波理論によって底面近傍の水粒子速度の最大値  $u_{bm}$  を計算し、さらに Jonsson (1966, 1976) による波の運動の摩擦係数  $f_w$  を用いて、次の式

から推算している。したがって、その計算の過程と、測定にあたっての精度上の問題もあってか、実験データはかなりばらついているが、大局的には普遍的な関係を導き出すことが可能と思われる。ここで  $\psi_c$  は当該底質の全面移動限界 Shields 数である。

次に、図-5は同じく渡辺・利穂・堀川(1979)が実験結果をもとにして、正味の移動方向を判定した結果である。ここで、 $\eta$ 、 $\lambda$ は砂れんの波高、波長、 $H$ は波高、 $T$ は波の周期、 $\tan \beta$ は海底勾配である。なお、砂村(1982)は水平床の条件下で実験を行い、移動方向についての新たな判定条件を提示しているが、比較的海底勾配の緩やかな所に限定して使用すべきであろう。

上記はいずれも碎波前、すなわち主として沖浜帯での現象を対象としたものである。碎波帯内での岸沖漂砂に関する研究はまだ少ないが、樋木・出口・岡田(1979)は実験結果をもとに、碎波帯内での岸沖漂砂量と、その方向を求める関係式を提案している。さらに前浜部分になると土砂の移動状態は sheet flow となるが、その漂砂量を詳細に観測した結果は香取・渡辺・堀川(1980)が報告している。

以上の取扱いは、いずれも基本的にはパワーモデルと称されるものである。しかしながら、より詳細に沖浜領域での土砂の移動を取り扱うには砂れんとの関連を考慮すべきである〔沢本・山口(1979)〕。波の非線形性の影響を受けて正味の掃流砂は岸向きとなるが、砂れんの非対称性によって、砂れんの前後に形成される渦の規模、またそこに巻き込まれた後に流れによって移動させられる浮遊砂量は相違する。したがって正味の移動量とその方向は、掃流砂量と浮遊砂量との兼ね合いで定められることになる。このような観点から行われた研究としては、砂村・阪東・堀川(1978)および Shibayama・Horikawa(1982)によるものがある。

## 海浜縦断形状の変化を予測しようと

する試みは、最初 Eagleson・Glenne・Dracap (1963) によってなされたが成功しなかった。Shibayama・Horikawa (1982) は上述した最近の研究成果を用いて海浜断面形状の変化を求め実験結果や現地観測の結果と対比している。図-6 はその一例を示したものであり、実線は実験結果、破線は計算結果である。碎波帯内の地形についての予測はまだ不十分ではあるが、全体的には比較的よく一致した結果が得られている。今後は、各領域、特に碎波帯内での漂砂量の評価式の精度を向上させることに努めることによって、一層の成果を挙げることが可能となるであろう。

岸沖漂砂による海浜縦断形状の変化は、比較的短い期間に、波浪の作用を受けて生じる現象であり、潮位の変化による水深の変化、それに伴う波浪の作用の変化を無視して議論してもよい程度の期間を対象としていると考えてよいであろう。これをもう少し長い期間にまで拡張するためには、潮位の変化による効果を導入する必要があるが、この問題について具体的に予測を行った事例は

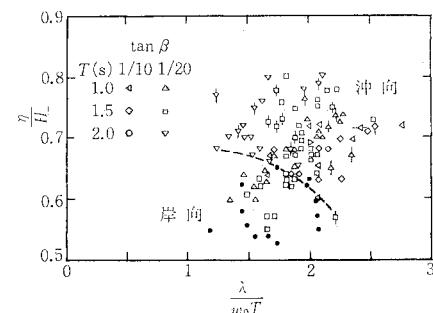


図-5 正味の漂砂量の移動方向  
(渡辺・利穂・堀川, 1979)

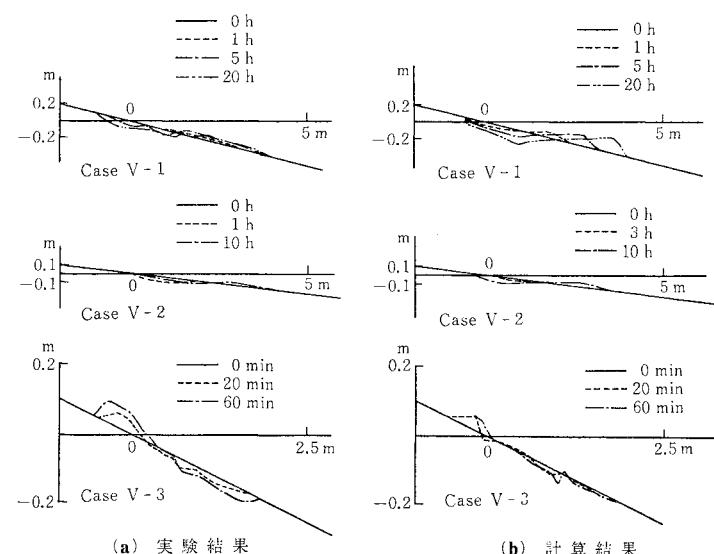


図-6 海浜縦断形状変化の比較 (Shibayama・Horikawa, 1982)

まだないようである。

## (2) 沿岸漂砂量

先にも述べたように、通常碎波角は小さいが、その波向きによって若干とはいへ沿岸方向の成分をもって碎波し、沿岸方向成分の頤在する海浜流を形成することが多い。Harris (1969)によれば、このような蛇行流(図-7)を呈するのはほぼ52%にも達するという。もっともこの割合は個々の海浜地形や波浪の特性に左右されることはいうまでもない。また、このような蛇行流にしても季節的に変化を生じるので、それに伴って沿岸漂砂の方向も変化する。しかしながら、空間的、時間的なスケールをやや大きくとり、ややマクロ的に現象を把握すると漂砂の卓越方向が明らかになることが多い。このようにして、沿岸漂砂量をもとにして現象を把握しようとするのは、年を単位として取り扱うことに相当し、したがって比較的長期的な観点から海浜変形をみるとことになる。

さて、沿岸漂砂量を評価する経験公式は、従来多くの研究者によって提案された〔堀川(1973)〕。これらは、碎波点での波のエネルギーfluxの沿岸方向成分  $P_t$  と、容積で示した沿岸漂砂量  $S_t$  との間に

の関係が成立すると仮定し、実験あるいは現地での実測資料を用いて係数  $\alpha$  と指数  $n$  を定めたものである。ここで  $P_t = (\bar{E} C_g)_b \sin \theta_b \cos \theta_b$ ,  $\bar{E} = (1/8) \rho g H^2$ ,  $\rho$  は流体の密度,  $g$  は重力加速度,  $H$  は波高,  $C_g$  は群速度,  $\theta$  は波峰線と等深線とのなす角度, 添字  $b$  は碎波点での値を示す。当然のことながら  $S_t$  と  $P_t$  は異なった次元をもった量であり、上式は普遍的な関係を表わすものとしては合理的とはいえない。このような欠陥を除去するために、Inman・Bagnold (1963) は  $S_t$  の代わりに次式で定義される沿岸漂砂量の水中重量  $L_t$

を用いることを提案した。ここで  $\alpha'$  は空隙率を考慮した補正係数で大略 0.6 の値をもつ。Komar・Inman (1970) は、

と表わされるとし、多くの実験値および現地観測の資料を用いて、比例係数  $K=0.77$  とした。

これに対して、Bagnold (1963) は波の運動のもとで

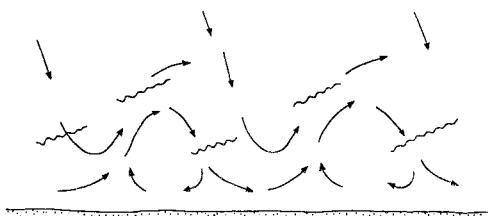


図-7 蛇行性海浜流 (Harris, 1969)

の砂移動について新たなモデルを提案し、これに基づいて Inman・Bagnold (1963) は沿岸漂砂量を表わす関係式として

$$I_l = K' (\bar{E} C_g)_b \cos \theta_b \frac{\bar{V}}{u_{bm}} \dots \dots \dots \quad (7)$$

を与えた。ここで  $\bar{V}$  は沿岸流速の代表的な値、 $u_{bm}$  は碎波点における底面近くでの水粒子速度の最大値、 $K'$  は無次元の係数である。Komar・Inman (1970) は現地海岸での観測資料を用いて、上式の妥当性を検討し、 $K'=0.28$  の値を与えた。

その後 Kraus・Isobe・Igarashi・Sasaki・Horikawa (1982)は蛍光砂を用いた沿岸漂砂の綿密な調査を各地の海岸で行い、碎波帯内の沿岸漂砂量の平面分布を求め、これを積分して全沿岸漂砂量を求める、現地観測の困難

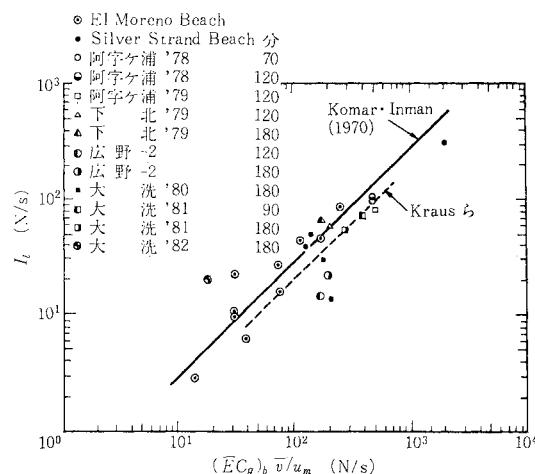


図-8 沿岸漂砂量の予測式と観測データの比較  
(Kraus・Isobe・Igarashi・Sasaki・  
Horikawa, 1982)

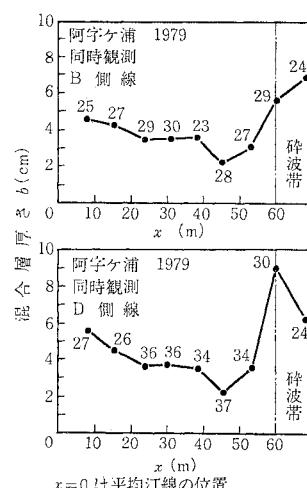


図-9 混合層厚さの岸沖方向分布 (Kraus・Farinato・堀川、1980)

さを考慮すれば、これらのデータには精度的に問題がないわけではないが、従来の取扱いに比較すれば格段に信頼性の高い資料である。これを図示したのが図-8であり、従来の値よりもやや小さい  $K'=0.21$  を与えている。これらの現地観測の結果からみると、波浪の条件に大いに左右されると考えられるが、碎波線付近と汀線付近の2か所に沿岸漂砂量のピークが認められた。図-9はサンプルより求めた混合深さの岸沖方向分布で、これからも2つのピークの存在が推測される〔Kraus・Farniato・堀川(1980)〕。

上記の取扱いは、パワー モデルに属するものであるが、これに対して沿岸漂砂は、沿岸流によって運ばれると考えて計算する方法がある。岩垣・樋木(1960)が最初にこの考え方を適用した。これは沿岸流の平均流速公式と、河川における土砂量に関する Kalinske・Brown 型公式とを結びつけたものである。その後、Longuet-Higgins・Stewart(1962)が導入した radiation stress を用いて、Bowen(1969), Longuet-Higgins(1970), Thornton(1970)によって沿岸流速の分布が計算によって求められるようになった。そこで土屋・安田(1978)は沿岸流速  $v$  および沿岸漂砂量  $q_y$  の岸沖方向の分布を無次化して表示し、樋木・出口(1977)の実験結果と対比して図-10をえた。これによると、沿岸漂砂量のピークの位置は沿岸流速のピークの位置よりも碎波点に近く、上述の現地観測によって得られた結果と定性的には一致しているが、汀線付近でのピークの存在は説明できない。これは、いわゆる浜漂砂としての移動によるもので、別途の取扱いをする必要があると思われる。

式(4)あるいは式(6)は、碎波のエネルギー フラックスの沿岸方向成分により、漂砂量が生じるとする考え方である。これに対して、たとえば防波堤周辺あるいはその背後では、屈折と回折の効果を受けて波向が変化するとともに、沿岸方向に顕著な波高の変化を生じる。したがって沿岸方向に radiation stress の勾配が生じ、これが海浜流を誘起し、沿岸漂砂を生じると考えられる。このような観点から、式(4)は次のように修正される〔Ozasa・Brampton(1980)〕。

$$S_t = \frac{H_b^2 C_{gb}}{16(\rho_s/\rho - 1)(1-\lambda)}$$

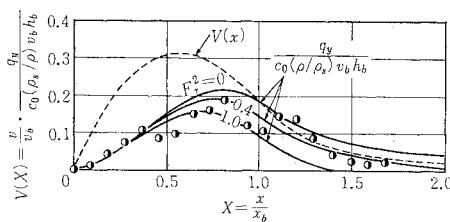


図-10 沿岸漂砂量および沿岸流速の岸沖方向分布  
(土屋・安田, 1978)

$$\cdot \left[ K_1 \sin 2\theta_{bs} - 2K_2 \frac{\partial H_b}{\partial x} \cot \beta \cos \theta_{bs} \right] \quad \dots \dots \dots \quad (8)$$

ここで、 $\theta_{bs}$  は碎波波峰線と汀線とのなす角、 $\tan \beta$  は海浜勾配、 $K_1$  および  $K_2$  は経験的に定められる無次元係数である。

### (3) 一般化された漂砂量

海浜での漂砂現象をより現実的な姿として把握するために、渡辺(1981, 1984)は次のような取扱いを行った。すなわち漂砂量フラックス  $q_x, q_y$  をそれぞれ、流れによるもの ( $q_{cx}, q_{cy}$ ) と波浪によるもの ( $q_{wx}, q_{wy}$ ) に分離して取扱うこととした。すなわち、

$$q_x = q_{cx} + q_{wx}, \quad q_y = q_{cy} + q_{wy} \quad \dots \dots \dots \quad (9)$$

とおく。まず流れによる漂砂量フラックスを次のように表わすこととする。

$$\left. \begin{aligned} q_{cx} &= Q_c U, \quad q_{cy} = Q_c V \\ Q_c &= A_c (u_*^2 - u_{*c}^2)/g \quad (u_* > u_{*c}) \end{aligned} \right\} \quad \dots \dots \dots \quad (10)$$

ここで、 $U, V$  は平均流速成分、 $u_*$  は波と流れが共存する場での底面摩擦速度、 $u_{*c}$  は底質粒子の移動限界摩擦速度、 $A_c$  は無次元係数であって 1 のオーダーの正の値をとる。

これに対して、波による漂砂量フラックスに対しても、同形の漂砂量式を適用することとして

$$\left. \begin{aligned} q_{wx} &= Q_w u_{bm}, \quad q_{wy} = Q_w v_{bm} \\ Q_w &= A_w (u_*^2 - u_{*c}^2)/g \end{aligned} \right\} \quad \dots \dots \dots \quad (11)$$

と表わす。ここで、 $u_{bm}, v_{bm}$  は波による底面附近の軌道流速の  $x, y$  成分、 $A_w$  は無次元係数である。波による漂砂量を考える場合に、正味の移動量の符号の判別をする必要がある。そのために、式(11)に次式で定義される方向関数  $F_D$  をかけたものを現実の漂砂量フラックスとする(渡辺, 1984)。

$$F_D = \tanh \left[ \kappa_d \frac{\pi_c - \pi}{\pi_c} \right] \quad \dots \dots \dots \quad (12)$$

$$\pi = \frac{u_{bm}^2}{sgd} \frac{h}{L_0} \leq \pi_c \quad \begin{array}{l} (\text{岸向き}) \\ (\text{沖向き}) \end{array} \quad \dots \dots \dots \quad (13)$$

ここで  $\kappa_d, \pi_c$  はともに 1 度程の値をとり、 $h$  は水深、 $L_0$  は沖波波長、 $d$  は粒径、 $s = \rho_s/\rho - 1$  である。

## 3. 海浜変形シミュレーションの手法

海浜の変化過程を予測しようとする場合に、まず関心的となるのは、海岸線(汀線)の前進、後退である。しかしながら、海浜変形は土砂収支の結果として起こるのであり、当然のことながら海底地形の変化に関する情報なしに海岸線の変化を求めるることは不可能である。そこでいくつかの仮定を導入したモデルが提案された。これをわれわれは「海岸線変形モデル」と名づけている。このモデルは、沿岸漂砂量と底質の質量保存の式から海岸線の変化を予測しようとするものであり、したがって

比較的長期的な海浜変形の予測手法であるともいえる。この場合に、基本的には岸沖漂砂量の影響を無視することになり、それは必ずしも正しくはない。そこでその影響を取り入れようとする試みが、いくつかなされている。

上記に対して、最も本質的な取扱いは、対象とする海浜域全体にわたって波浪や海浜流を計算し、これをもとに各点の漂砂量フラックスを評価し、海浜地形の時間的变化を求めようとするものである。これをわれわれは、「三次元海浜変形モデル」と称し、比較的短期的な海浜変形の予測手法としている。

上記2つのモデルは、それぞれ長所と短所をもっている。すなわち、「海岸線変形モデル」では現象を非常に単純化して取り扱っているので、計算に要する時間は短くてすむが、海底地形の変化や局所的な海浜変形まで計算することはできず、また複雑な構造物が配置されているような所には適用できない。これに対して、「三次元海浜変形モデル」では、海底地形の変化を計算することができるという大きな特色をもつ反面、計算に要する時間は前者に比して著しく長くなり、長期間にわたる海浜変形の予測に適用するには現状ではまだ問題が多い。したがって、目的に応じてこれら2つのモデルを使い分ける必要があると考えられる。図-11は以上の考察をふまえて、時間的および空間的スケールによって各種予測手法の大まかな適用範囲を示したものである。

### (1) 海岸線変形モデル

海岸線に沿って沿岸漂砂量を求め、その変化から海岸

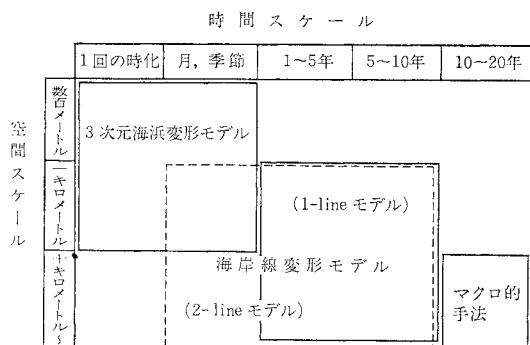


図-11 海浜変形モデル適用範囲の概要

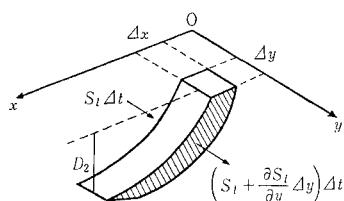


図-12 one-line model の模式図

線の前進、後退を求める試みは Pelnard-Consdére (1956) によって開始された。この取扱いを模式的に示すと 図-12 のようになる。すなわち、海浜縦断形状はその勾配を変化することなく平行移動するものと仮定し、そのような状態は漂砂帯外縁水深  $D_l$  にまで及ぶと考える。このように仮定すれば、岸沖方向にとった2つの断面を通しての土砂の収支量から海岸線の前進あるいは後退量を求めることができることになる。これは、one-line model と名づけられ、その後多くの研究者によって適用され、現在では実用モデルと称されるようになっていている。

さてここで問題となるのは、① 海浜断面がいつでも海浜勾配を変えることなく、平行して前進、後退すると考えてよいか、② 漂砂帯外縁水深  $D_l$  をどのようにして決定するか、である。①の項目は one-line model の根幹にかかる問題であり、このような前提がほぼ成立すると考えられる所以外には適用できないということになる。次に②の項目に関しては、基本的には波浪条件や海岸線変化の資料のある地点において、 $D_l$  の値を種々に変えて追算を行い、現実の海岸線変化に最も近い結果を与える  $D_l$  の値を求め、これをその後の推算に用いるのが適当と思われる。しかしながら、このような過程を、どの海岸でもとれるとは限らない。このような場合には、たとえば佐藤・田中 (1962) による完全移動限界水深を用いることもあるが、あるいは Hallermeier (1978) の算定式

$$\frac{D_l}{H_s} = 2.28 - 10.9 \frac{H_s}{L_0} \quad \dots \dots \dots (14)$$

が参考となろう。ここに、 $H_s$  は局所的な有義波高である。Kraus・Harikai (1983) が茨城県大洗海岸において  $H_s$  として水深 20 m での有義波高を用いて海岸線変化を計算し、実測値と比較したところ、両者の一致度はかなり良好であった。いま式(14)中の波高  $H_s$  を沖波の波高  $H_0$  に置き換えるものとすれば、

$$\frac{D_l}{H_0} = 2.28 - 10.9 \frac{H_0}{L_0} \quad \dots \dots \dots (15)$$

となる。その後 Hallermeier (1983) は底質の密度の効果を考慮した式を提出したが、上記と同じように波高を置き換えると

$$\frac{D_l}{H_0} = \frac{2.9}{\sqrt{(\rho_s/\rho)-1}} - 17.5 \frac{H_0}{(\rho_s/\rho-1)L_0} \quad \dots \dots \dots (16)$$

と書ける。砂粒子を対象とする限りにおいては、式(15)と式(16)は全く一致するとみてよい。

われわれにとって最も関心のあるのは、防波堤、突堤、離岸堤などの海岸構造物の周辺での海岸線の変化の様相を予測することである。たとえば離岸堤の背後では舌状地形がしだいに形成されるが、このような海岸線の変化過程を one-line model で計算することができるで

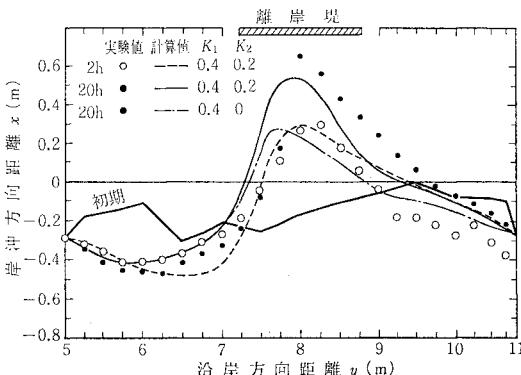


図-13 離岸堤背後の汀線変化 (Kraus, 1982, 1983)

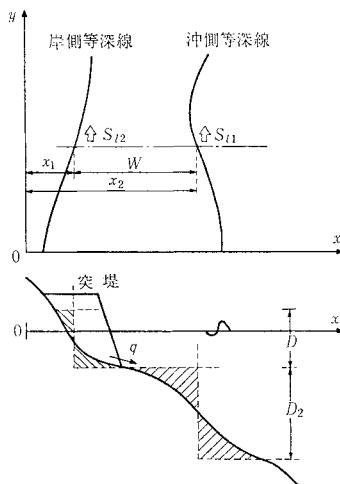


図-14 two-line model 模式図

あらうか。まずは波浪場を計算する必要があるが、屈折、回折、反射、碎波を伴うので計算は予想外に複雑である。もし海岸線に沿って碎波の条件を確定することができたとすれば、沿岸漂砂量式として式(7)を適用すればよい。しかしながら  $D_t$  をどのようにして定めればよいかは必ずしも明らかではない。ここには、橋本・宇多・竹渕(1981)の行った離岸堤の設置による海浜変形の実験に対比させて Kraus(1982, 1983)が行った計算結果を図-13に示す。沿岸漂砂量式の係数  $K_1$ ,  $K_2$  の選定にやや任意性が残されているが、これは全域にわたって  $D_t$  を一様にとったためと考えられ、 $D_t$  および  $K_1$ ,  $K_2$  の選定は互いに関連していると考えられる。

これまでの取扱いでは、岸沖漂砂の効果を全く無視してきた。そこで Bakker (1968) は one-line model を発展させて two-line model を開発した。図-14 はそれを模式的に示したものであり、基本の関係式は

のように書き表わされる。ここで、添字  $n$  は等深線の番号、 $q$  はこれら 2 つの等深線の間で交換される岸沖漂砂量、 $D_n$  は各等深線によって代表される水深である。ここにおいて問題になるのは 2 つの等深線をどのように設定するか、また  $q$  をどのように評価するかである。これらの問題については、その後何人かの研究者によって検討が行われた〔西村 (1978)〕。また、Perlin・Dean (1983) は  $n$ -line model にと拡張した。このように岸沖方向に細分化して取扱いを進めるためには、沿岸漂砂量の分布や岸沖漂砂量についてより詳細な情報をもつている必要がある。このような意味で、実用化モデルというにはまだほど遠い感がある。

上記のほかに、経験的固有関数法による海岸線変形モデルがある。これは、実験や現地の海浜地形の測量結果を解析して経験的固有関数を求めておき、これと海岸線変形モデルと組み合わせて計算を進めるものであって、岸冲漂砂の効果に経験的な関係を導入して、海岸線の変化を予測しようとするものである〔橋本・宇多・竹渕（1981）〕。

## (2) 三次元海浜変形モデル

渡辺 (1981) は平

面水槽で行われた海浜変形に関する実験条件を対象に、図-15に示す手順で計算を行い、前述の三次元海浜変形モデルの適合性について調べた。すなわち、まず波の場を、ついて海浜流の流れの場を計算し、式(9)、(10)、(11)を用いて漂砂量フラックスを求め、沿岸流の上手側から下手側にかけての海浜縦断形状の

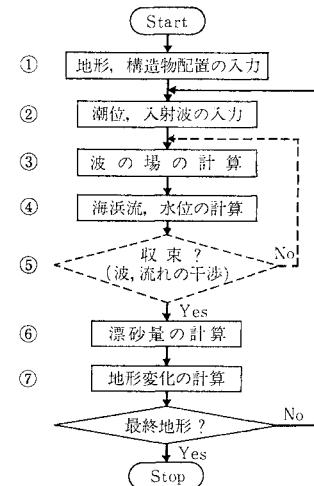


図-15 三次元海浜変形 モデル 計算  
フロー図（渡辺, 1984）

変化を求める結果が、図-16に示されている。これは自然海浜に波が斜めに入射するという、きわめて単純な条件に対してのものであり、図中の実線は計算結果であり、実験結果とかなり良好な対応を示している。これに對して図中の○印は  $A_w=0$ 、すなわち波による漂砂量フラックスを無視し、流れによる効果のみを考慮した結果である。この場合に注目すべきは、中央部分での海浜断面は初期の一様勾配の地形とほとんど変化していないことである。つまり沿岸漂砂量が平衡して地形変化を生じないからである。しかしながら、これは事実と異なり、

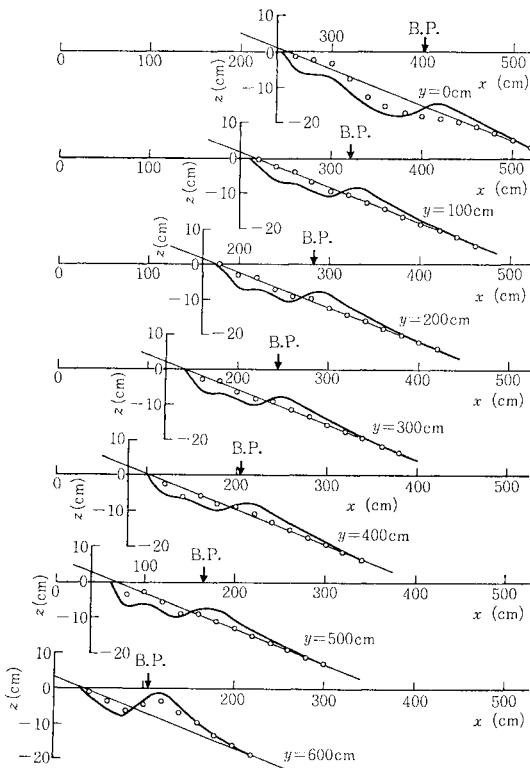


図-16 三次元海浜変形モデルによる計算結果  
(渡辺, 1981)

波による漂砂量フラックスをどうしても考慮しないと、実体に則した計算を行い得ないことを示している。

その後渡辺(1984)は先に示したように計算モデルを改良した。まず、底面摩擦速度  $u_*$  を求めるにあたっては Tanaka・Shuto(1981)に求められた、波と流れの共存する場の値を用い、また方向関数  $F_D$  を導入して、波による漂砂量フラックスの方向を明らかに示し得るようとした。このモデルを、平面水槽内に離岸堤を設置し、波を直角に入射させた場合について計算を行い、実験結果と対比したが、両者はほとんど一致した結果を得ることがわかった。詳細については近く論文としてとりまとめられる。

以上述べたように、構造物の設置された近傍での海底地形の変化過程まで計算することができるようになったのは、多くの研究成果の累積の結果といえ、目覚ましい進歩といえる。今後はさらに計算手法に改良を加え、実用的なモデルにと発展させていく必要がある。

#### 4. 結 論

海浜の変化過程をシミュレーション計算によって予測したいというのは、われわれの長年にわたっての夢であった。現在なお種々の問題を抱えているとはいって、その

夢はかなりの程度まで実現させるに至った。本論では、ここに至るまでの概要を記したが、眞の意味での実用化モデルとするには、最も重要な外力である波の特性をどのようにして代表させるのか、潮汐による水位や汀線位置の変化をどのようにして計算に取り込んでいくのかは大きな課題であり、今後の研究に待たねばならない。

本論をまとめるにあたっては、著者が中心となり共同研究を行ってきた。海岸研究会での討議内容に負うところが大きい。したがってここに研究会の構成員に対して心から感謝の意を表する。

#### 参考文献

- 1) Bagnold, R.A. : Mechanics of marine sedimentation, The Sea, ed. M.N. Hill, Vol. 3, pp. 507~528, Interscience, New York, 1963.
- 2) Bakker, W.T. : The dynamics of a coast with a groyne system, Proc. 11th Conf. on Coastal Eng., pp. 492~517, 1968.
- 3) Bowen, A.J. : The generation of longshore currents on a plane beach, Jour. Marine Res., Vol. 37, pp. 206~215, 1969.
- 4) Dingler, J.R. and Inman, D.L. : Wave-formed ripples in nearshore sands, Proc. 15th Conf. on Coastal Eng., pp. 2109~2126, 1976.
- 5) Eagleson, P.S., Glenne, B. and Dracup, J.A. : Equilibrium characteristics of sand beaches, Proc. Am. Soc. Civil Eng., Vol. 89, No. Hy 1, pp. 35~57, 1963.
- 6) Hallermeier, R.J. : Uses for a calculated limit depth to beach erosion, Proc. 16th Conf. on Coastal Eng., pp. 1493~1512, 1978.
- 7) Hallermeier, R.J. : Sand transport limits in coastal structure design, Proc. Coastal Structures '83, Am. Soc. Civil Eng., pp. 703~716, 1983.
- 8) Harris, T.F.W. : Nearshore circulations; field observation and experimental investigations of an underlying cause in wave tanks, Symposium on Coastal Eng., South Africa, 1969.
- 9) 横木 宏・宇多高明・竹瀬 勉：経験的海浜変形モデルによる構造物周辺の地形変化予測、第28回海岸工学講演会論文集、pp. 300~304, 1981.
- 10) 堀川清司：海岸工学—海洋工学への序説、東京大学出版会、pp. 225~227, 1973.
- 11) Inman, D.L. and Bagnold, R.A. : Littoral processes, The Sea, ed. M.N. Hill, Vol. 3, pp. 529~553, Interscience, New York, 1963.
- 12) 岩垣雄一・樋木 亨：沿岸漂砂量の新算定法について、第7回海岸工学講演会講演集、pp. 59~67, 1960.
- 13) Jonsson, I.G. : Wave boundary layers and friction factors, Proc. 10th Conf. on Coastal Eng., pp. 127~148, 1966.
- 14) Jonsson, I.G. : Discussion of "Friction factor under oscillatory waves" by J.W. Kamphuis, Proc. Am. Soc. Civil Engrs., Vol. 102, No. WW 1, pp. 108~109, 1976.
- 15) 香取完和・渡辺 晃・堀川清司：シート・フロー状態の底質移動に関する研究、第27回海岸工学講演会論文集、pp. 202~206, 1980.
- 16) 建設省河川局海岸課監修：海岸便覧、昭和59年版、全国海岸協会、331 p., 1984.
- 17) Komar, P.D. and Inman, D.L. : Longshore sand

- transport on beaches, *Jour. Geophys. Res.*, Vol. 75, No. 30, pp. 5514~5527, 1970.
- 18) Kraus, N.C., Farinato, R.S., 堀川清司：沿岸漂砂量に関する現地観測, 第27回海岸工学講演会論文集, pp. 245~249, 1980.
- 19) Kraus, N.C. : 構造物背後の碎波波高と碎波角の実用的計算手法, 第29回海岸工学講演会論文集, pp. 95~99, 1982.
- 20) Kraus, N.C., Isobe, M., Igarashi, H., Sasaki, T.O. and Horikawa, K. : Field experiments on longshore sand transport in the surf zone, *Proc. 18th Conf. on Coastal Eng.*, pp. 969~988, 1982.
- 21) Kraus, N.C. and Harikai, S. : Numerical model of the shoreline change at Oarai Beach, *Coastal Eng.*, Vol. 7, No. 1, pp. 1~28, 1983.
- 22) Kraus, N.C. : Application of a shoreline prediction model, *Proc. Speciality Conf. on Coastal Structures '83*, Am. Soc. Civil Eng., pp. 632~645, 1983.
- 23) Longuet-Higgins, M.S. and Stewart, R.W. : Radiation stress and mass transport in gravity waves, with application to "surf beat", *Jour. Fluid Mech.*, Vol. 13, pp. 481~504, 1962.
- 24) Longuet-Higgins, M.S. : Longshore currents generated by obliquely incident sea waves, 1 and 2, *Jour. Geophys. Res.*, Vol. 75, No. 33, pp. 6778~6789 and 6790~6801, 1970.
- 25) 西村仁嗣：海浜変形の数値シミュレーション, 1978年度(第14回)水工学に関する夏期研修会講義集, B, 5.1~5.14, 1978.
- 26) Ozasa, H. and Brampton, A.H. : Mathematical modelling of beaches backed by seawalls, *Coastal Eng.*, Vol. 4, No. 1, pp. 47~64, 1980.
- 27) Pelnard-Considère, R. : Essai de théorie de l'évolution des formes de rivage en plages de sable et de galets, IVmes Journées de l'Hydraulique, Les Energies de la Mer, Question III, Rapport No. 1, pp. 289~298, 1956.
- 28) Perlin, M. and Dean, R.G. : A numerical model to simulate sediment transport in the vicinity of coastal structures, *Coastal Eng. Res. Center*, MR No. 83-10, 119 p. 1983.
- 29) 佐藤昭二・田中則男：水平床における波による砂の移動について, 第9回海岸工学講演会論文集, pp. 95~100, 1962.
- 30) 沢本正樹・山口清一：波によって生じる砂疊近くの流れのモデル化と浮遊砂濃度の算定法, 土木学会論文報告集, No. 283, pp. 107~114, 1979.
- 31) 横木 亨・出口一郎：碎波帶における掃流漂砂の挙動について, 第24回海岸工学講演会論文集, pp. 152~156, 1977.
- 32) 横木 亨・出口一郎・岡田 孝：二次元海浜の碎波帶における漂砂移動について, 第26回海岸工学講演会論文集, pp. 167~171, 1979.
- 33) 横木 亨：漂砂の運動機構, 1980年度水工学に関する夏期研修会講義集, B, 1.1~1.21, 1980.
- 34) Shibayama, T. and Horikawa, K. : Sediment transport and beach transformation, *Proc. 18th Conf. on Coastal Eng.*, pp. 1439~1458, 1982.
- 35) 砂村継夫・阪東浩造・堀川清司：非対称砂疊上の砂移動機構と漂砂量に関する実験的研究, 第25回海岸工学講演会論文集, pp. 250~254, 1978.
- 36) 砂村継夫：浅海域の岸沖漂砂量に関する実験的研究, 第29回海岸工学講演会論文集, pp. 239~243, 1982.
- 37) 田中則男：汀線変化の変遷, 1978年度水工学に関する夏期研修会講義集, B, 4.1~4.21, 1978.
- 38) Tanaka, H. and Shuto, N. : Friction coefficient for a wave-current coexistent system, *Coastal Eng. in Japan*, Vol. 24, pp. 105~128, 1981.
- 39) Thornton, E.B. : Variation of longshore current across the surf zone, *Proc. 12th Conf. on Coastal Eng.*, pp. 291~308, 1970.
- 40) 土星義人・安田孝志：海浜変形の簡単なモデル, 第25回海岸工学講演会論文集, pp. 189~193, 1978.
- 41) 渡辺 晃・利穂吉彦・堀川清司：二次元海浜変形と岸沖漂砂量分布, 第26回海岸工学講演会論文集, pp. 172~176, 1979.
- 42) 渡辺 晃：海浜流と海浜変形の数値シミュレーション, 第28回海岸工学講演会論文集, pp. 285~289, 1981.
- 43) 渡辺 晃：個人的な情報による, 1984.

(1984.2.21・受付)