

高知県安芸海岸の汀線変動シミュレーション

大年 邦雄
(農学部生産環境工学科)

Numerical Simulation on the Shore-line Variation of Aki Beach in Kochi Prefecture

Kunio OHTOSHI

Chair of Maritime Environmental Engineering, Faculty of Agriculture

Abstract: The long-range condition of a beach depends on the rates of supply and loss of littoral materials. The shore accretes when the rate of supply exceeds the rate of loss. The shore is considered stable when the long-term rates of supply and loss are equal. Thus, conservation of sand is an important aspect of shore protection.

Before embarking upon any method of coastal protection, it is important to identify and understand both the short- and long-term causes of coastal erosion. Failure to do this may result in the design and placement of shore protection measures which actually accelerate the process that the protection measure was intended to alleviate. Although the most serious incidents of coastal erosion occur during storms, there are many other causes, both natural and man-induced, which need to be examined.

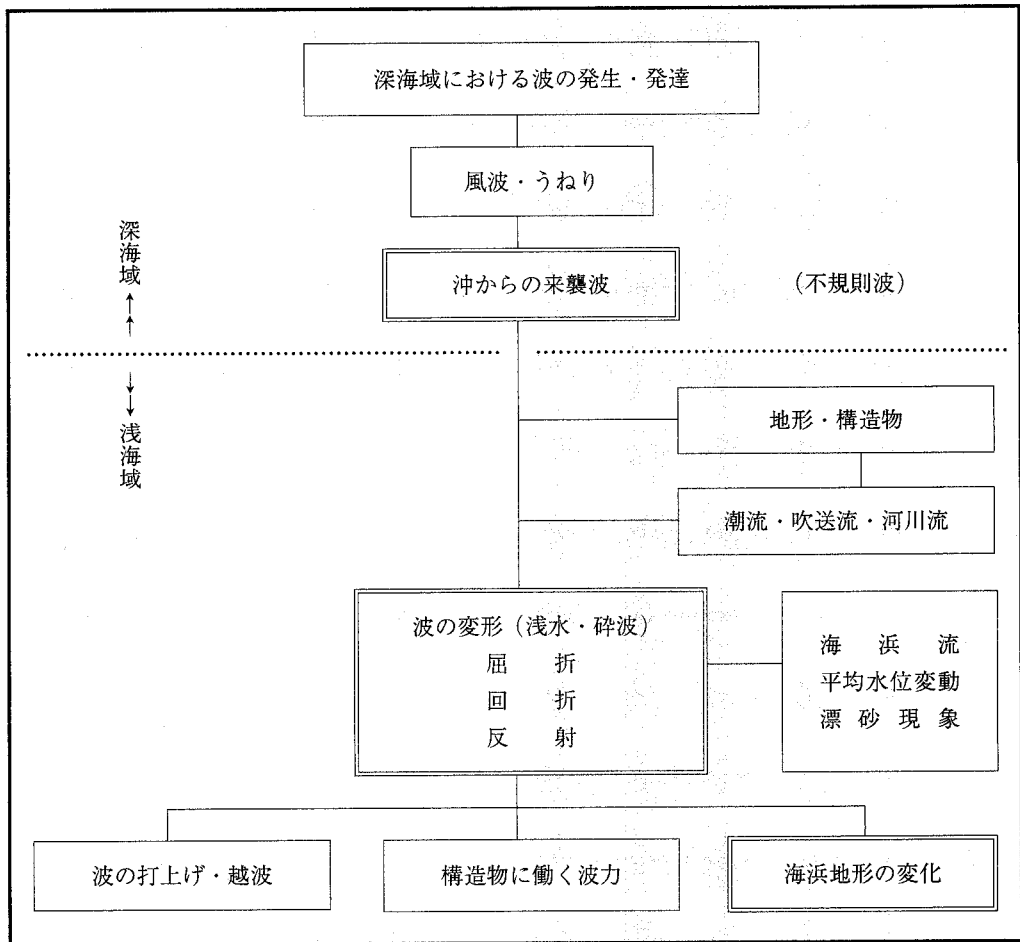
In this paper, a numerical scheme of 1-line theory that predicts the long-term variation of a shore line is described. The results of numerical simulation dealing with the Aki Beach in Kochi prefecture was compared with the data taken by the aerial photographs. It was verified that the numerical scheme presented is effective in qualitative prediction, but it needs several improvements to be applied in the actual field.

キーワード：安芸海岸，汀線変動，1ラインモデル，数値シミュレーション

はじめに

沖で発生した波浪が浅海域に伝播するまでに生じる変形，および変形した波浪によって生じる種々の現象を要約すると，第1図のようである。通常，波浪は潮流に比べて浅い領域，とくに碎波帯内で種々の現象を引き起こす。伝播に伴って生じる代表的な波浪変形には，水深変化による浅水・屈折・碎波変形，構造物周辺での回折と反射，海底摩擦によるエネルギー逸散に起因する減衰等がある。

入射波が空間的に一様でない場合には，波浪に起因する radiation stress の空間勾配が推進力となって海浜流（沿岸流，離岸流）および平均水位変動が生じる。これらの流れは，極浅海域（碎波帯内）における漂砂移動と海浜変形に大きな影響を及ぼす。



第1図 波の変形とそれに伴う現象

古くから問題となってきた波浪によって引起こされる現象として漂砂問題がある。海岸侵食，河口閉塞，航路・港湾の埋設といった問題がこれに該当する。本調査研究は，高知県下における海浜変動を把握する研究計画の第一段階として，土佐湾の安芸海岸の汀線変動を航空写真を用いて整理し，1ラインモデルによる汀線変化のシミュレーションとの比較検討を実施したものである。

海浜変形予測手法の分類¹⁾

沿岸の浅海域から汀線にかけては波や流れの作用が大きな領域であり，そこでは海底の砂礫が大かれ少なかれ常に移動している。波浪条件が変化すると海浜流場も変化し，それらが複合して漂砂の量や方向を変化させ，海浜変動となって現われる。自然海浜においては，このような変化は主に季節的なもので，数年間を通してみれば土砂量の収支はほぼバランスしており海浜の地形も安定な状態にあることが多い。しかし，沿岸域に防波堤などの構造物が造られたり，海岸への主要な土砂供給源である河川にダムが建設されたりすると，このバランスが崩れて周辺の海浜の侵食や決壊を生じ，海岸保全の観点から重大な問題となることもありえる。

海浜変形の予測は、これまで過去の事例に対する経験や水理模型実験に頼ることが多かったが、近年、数値シミュレーションによる海浜変形予測手法が急速に発達してきた。

対象海岸における過去の海浜変形の傾向から将来の変化を予測したり、類似の自然条件や構造的な条件を有する他の海岸での過去のデータから対象海岸の海浜変形を類推する経験工学的手法は、その簡便性および現実のデータによる裏付けからくる信頼性の点で優れている。しかしながら、このような経験的手法のみによって定量的な海浜変形予測を行うことは、現段階ではほとんど不可能といえる。

また、古くから実施されてきた水理模型実験は、対象海岸の模型を用いて、制御された種々の波浪条件での現象を調べることが可能であるという特徴をもっている。しかし、移動床実験の相似則そのものが未だ確立されていないことに加え、移動床模型実験には一般に大規模な実験施設を必要とし、しかも多大の労力と時間を要するという問題点がある。

数値シミュレーションによる海浜変形予測は、大型電子計算機の普及、より精度の高い予測が要求されているという現状、および漂砂現象に関する研究の進展等を背景に、最近盛んに行われている。数値シミュレーションの基本は、現象のモデル化と定式化にある。海浜変形の数値予測モデルは、予測の対象を何に設定するか、あるいは海浜変形現象をいかにモデル化するかによって、海岸線変化モデルと3次元海浜変形モデルに大別される。

「海岸線変化モデル」は汀線変化モデルとも呼ばれ、海浜変形を海岸線位置の時間的変化によって代表させ、その変化を沿岸漂砂量の分布に基づいて予測する手法である。したがって、漂砂量の算定の前提となる波浪場の計算においても、海岸線に沿っての碎波波高や波向の評価が主たる対象となる。海岸線変化モデルとして最もよく用いられているのは1-ラインモデルであるが、それを発展させた2-ラインモデルなども提案されている。

これに対し「3次元海浜変形モデル」は、

空間スケール	10 km 以上	海岸線変化モデル (1-line モデル)			マクロ的手法
	数 km	3次元海浜変形モデル			
	数百 m	日・週	月・季節	1～5年	5～10年
時間スケール					

第2図 海浜変形予測モデルの適用範囲の目安

第1表 海浜変形予測モデルの概要

予測モデル	長 所	短 所
海岸線変化モデル	<ul style="list-style-type: none"> ・ 実際現象を単純化しているので、短い計算時間で結果が得られる。 ・ 長期間および広領域の海浜変形を把握するのに有効である。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 海浜縦断形状の変化や局所的な海浜変形までは計算できない。 ・ 構造物の配置が複雑な場合、信頼性の高い結果を得ることが一般には困難である。
3次元海浜変形モデル	<ul style="list-style-type: none"> ・ 海底地形の変化が計算でき、少なくとも原理的には、汎用性において優れている。 ・ 比較的短期間の局所的な地形変化の予測に適している。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 計算に要する時間が極めて長い。 ・ 使用実績が乏しいことより、長期間の海浜変形予測への適用にはまだ問題が多い。

対象海浜全域にわたって波浪や海浜流場を計算し、それらより各点の漂砂量を求めることによって3次元な海浜地形の時間変化を予測するモデルである。このモデルは平面2次元モデルあるいは水深変化モデルなどとも呼ばれる。

これら2種類のモデルは、第1表に示すような長所と短所、および第2図に示すような適用範囲をもっているため、予測の目的や対象によって使い分ける必要がある。

汀線変化モデルの構成

1. 汀線変化の基礎方程式

2次元な海浜断面は平衡勾配に達しているとの仮定の下で、岸沖漂砂を無視すると、海浜変動の連続式次のようになる。

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{1}{(1-\lambda)} \cdot \frac{\partial q_y}{\partial y} \dots\dots\dots (1)$$

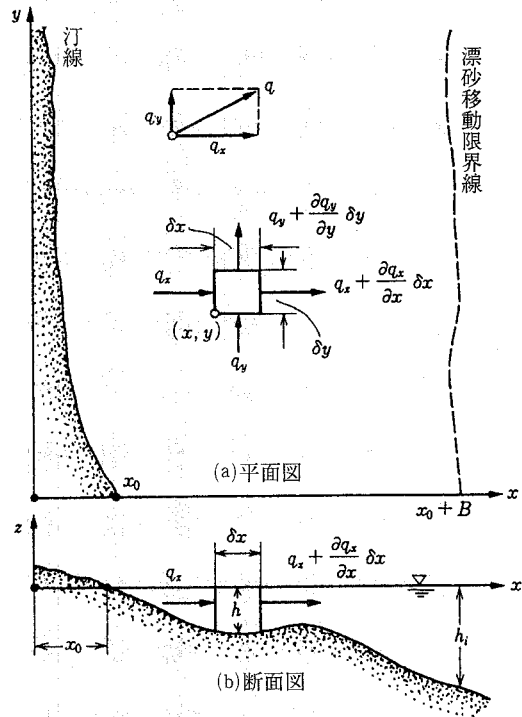
ここに、hは水深、tは時間、λは砂の空隙率、q_yは沿岸方向の漂砂量である。

第3図に示すように、汀線位置をx₀、漂砂帯の幅をB、漂砂帯外縁における水深(移動限界水深)をh_i、漂砂帯全域の沿岸漂砂量をQ_y、漂砂帯の平均水深をh̄とすると、汀線位置の時間的変化を記述する基礎方程式は次式で与えられる²⁾。

$$\frac{h_i}{B} \cdot \frac{\partial x_0}{\partial t} = - \left(1 - \frac{\bar{h}}{h_i} \right) \frac{\partial h_i}{\partial t} - \frac{1}{B(1-\lambda)} \cdot \frac{\partial Q_y}{\partial y} \dots\dots\dots (2)$$

上式は以下のことを意味している。

- (1) 沿岸漂砂による汀線の変動は、海岸線に沿う全漂砂量Q_yの場所的変動と移動限界水深h_iの時間的変化の両者に支配される。
- (2) 直線海岸で∂Q_y/∂y=0であっても、波高が増大してh_iが大きくなる場合には、∂h_i/∂t>0であるから、∂x₀/∂t<0となり、時間の経過とともに汀線は後退する。このような漂砂の移動限界に基づく汀線変動は、漂砂の移動限界水深が波の特性に依存することから、波の特性が変化するとまた元の汀線にもどることになり、地形変化は短期間のもと考えられる。
- (3) h_iが時間的に変化しなければ、汀線の変動は∂Q_y/∂yに依存し、漂砂方向にQ_yが増大する場所では∂x₀/∂t<0となって汀線は後退するが、逆にQ_yが減少する場所では∂x₀/∂t>0となり汀線は前進する。Q_yの場所的変化が支



第3図 漂砂量と海底変動との関係を導く説明図

配的要因となる地形変化は長期間にわたることが多い。

2. 移動限界水深

式(2)に基づいて汀線の時間変化を計算する場合、移動限界水深 h_i を決定する必要がある。 h_i は沿岸漂砂が活発な範囲 (漂砂帯) の沖側の限界水深を意味する。

汀線変化モデルの限界水深 h_i と、いわゆる砂移動の初期移動限界水深とは異なるものと考えられる。後者の限界水深は、本来、岸沖方向の砂移動に関係するのに対し、前者の限界水深は、沿岸流で運ばれる砂の沖側の限界に対応する。

沿岸漂砂帯の幅は波浪条件に依存するので、 h_i には波浪特性、中でもとくに波高の影響が大きい。Hallermeier³⁾ は、次式を提案している。

$$h_i = (2.28 - 10.9H_0/L_0) H_0 \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 H_0/L_0 は沖波の波形勾配である。その後、Hallermeier⁴⁾ は次式を提案しているが、砂の密度の影響を考慮している点で式(3)よりは物理的に妥当であると考えられる。

$$h_i = 2.9H_0/\sqrt{\rho_s/\rho - 1} - 110H_0^2/\{(\rho_s/\rho - 1) g T^2\} \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 ρ_s 、 ρ はそれぞれ砂および海水の密度、 g は重力加速度、 T は周期である。

上記の2式は、構造物と沿岸漂砂との相互作用の観点から、海岸構造物の先端水深を合理的に設計する必要から導かれた経験式で、汀線変化モデルに適用するのに都合がよい。本研究では、式(4)を用いる。

3. 沿岸漂砂量の推定式

沿岸漂砂量の推定式として頻繁に用いられている Savage 型の表現をここでも用いることとする (第4図参照)。すなわち、

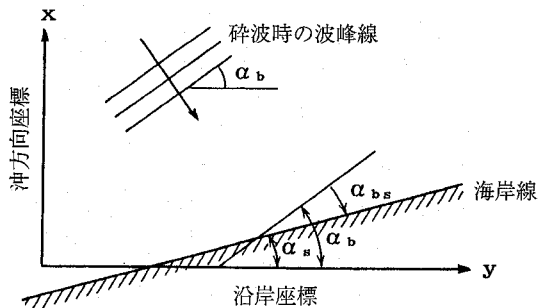
$$Q_y = A \cdot E_b \cdot C_b \cdot \sin \alpha_{bs} \cdot \cos \alpha_b \dots\dots\dots (5)$$

$$\alpha_{bs} = \alpha_b - \alpha_s = \alpha_b - \tan^{-1} (\partial x_0 / \partial y) \dots\dots\dots (6)$$

ここに、 Q_y : 碎波帯における全漂砂量、
 C_b : 碎波点における波速 ($= L_b / T$)、 E_b : 碎波点における波のエネルギー ($= \rho g H_b^2 / 8$)、
 E_b 、 C_b : 碎波線を通して波峯単位幅あたり単位時間に伝達されるエネルギー、
 α_b : 碎波角、 α_{bs} : 海岸線が y 軸となす角である。

係数 A は、海底勾配、底質粒径、摩擦係数等により変化するが、ここでは、Savage が経験的に求めた $A = 0.217$ を用いる。また、 Q_y の単位は ($m^3/day/m$) である。

碎波線を通して波峯単位幅あたり単位時間に伝達されるエネルギー ($= E_b \cdot C_b$) と碎波角 ($= \alpha_b$) を評価するためには、波の屈折計算が必要である。



第4図 α_{bs} の定義

4. 波の屈折計算

一様な海底勾配をもつ海岸では、海岸線に斜めに入射する波の波峯線は海岸に近づく汀線に平行に並ぶようになる。これは水深変化によって波の位相速度が変わることによるもので、この現象を波の屈折という。屈折現象を説明する基礎式は、以下に示す波向線方程式である⁵⁾。

$$\frac{d\alpha}{ds} = \frac{1}{C} \left(\sin \alpha \frac{\partial C}{\partial x} - \cos \alpha \frac{\partial C}{\partial y} \right) \dots \dots \dots (7)$$

上式の誘導過程においては、波高の変化は波浪の屈折に何の影響も与えないとして取り扱っている。これは線形理論を用いているためで、そこでは微小な振幅を仮定している。微小な振幅とは、 H/L (波形勾配) あるいは H/h (水深・波高比) で定義される量が小さいという仮定であり、この場合には分散関係式からもわかるように波速は波高の影響を受けない。

工学的実用面では、波高がどのように変化するかは極めて重要な問題である。波高の変化は波浪エネルギーの保存則から計算される。鉛直2次元場では、水深の減少にともなって波高が変化する(浅変変形)。これは水深が変化するとエネルギーの伝播速度(群速度 C_g) が変化するということ、波長 L が変わるため1波長内の波浪エネルギー密度が変化するとの両方に依存する。また、波浪エネルギー保存を3次的に考えると、波向き線間でのエネルギーの移流が無いと仮定して、単位時間あたりに単位断面を通して運ばれるエネルギーの量(エネルギーフラックス)は波向き線間で保存される。このことより、屈折による波向き線間隔の変化を考慮して波高の変化が計算され、屈折係数 K_r および浅水係数 K_s が次式のように定義される。

$$\frac{H}{H_0} = \sqrt{\frac{C_0}{2nC}} \cdot \sqrt{\frac{\ell_0}{\ell}} = K_s \cdot K_r \dots \dots \dots (8)$$

式(8)を用いて波高の変化を計算することになるが、そのためには、以下に示す波向き線間隔方程式⁵⁾が必要である。

$$\frac{d^2 \ell}{ds^2} - p(s) \frac{d\ell}{ds} + q(s) \ell = 0 \dots \dots \dots (9)$$

ここに、 s は波向き線に沿う長さであり、係数 $p(s)$ と $q(s)$ は波向き線に沿って計算される。

$$p(s) = \cos \alpha \left(\frac{1}{C} \cdot \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \sin \alpha \left(\frac{1}{C} \cdot \frac{\partial C}{\partial y} \right) \dots \dots \dots (10)$$

$$q(s) = \sin^2 \alpha \left(\frac{1}{C} \cdot \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \right) - \sin 2\alpha \left(\frac{1}{C} \cdot \frac{\partial^2 C}{\partial x \partial y} \right) + \cos^2 \alpha \left(\frac{1}{C} \cdot \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \right) \dots \dots \dots (11)$$

したがって、 $x-y$ 平面上における波速 C の分布を計算しておけば、式(9)により特定の波向き線上での ℓ の値も計算されることになる。上式は2階の微分方程式であるから、 $s=0$ (計算開始点) における ℓ_0 と $(d\ell/ds)_0$ が与えられるとその後の ℓ が決まることになる。

5. 碎波条件

碎波条件は次の2つに大別される。

(1) 沖波の条件とは無関係に、碎波点における波の諸元、すなわち、周期・碎波水深・碎波波高の間の関係を与えるものとして、例えば下に示す合田⁶⁾の碎波条件式がある。

$$\frac{H_b}{L_0} = 0.17 \left\{ 1 - \exp \left(-1.5 \pi \frac{h_b}{L_0} (1 + 15 \tan^{4/3} \beta) \right) \right\} \dots\dots\dots (12)$$

ここに、 H_b は碎波波高、 h_b は碎波水深、 L_0 は沖波波長、 $\tan \beta$ は海底勾配である。

(2)沖波の条件、すなわち、周期および沖波波高と碎波水深や碎波波高との関係を与えるものとして、例えば次に示す山口ら⁷⁾の碎波条件式がある。

$$\frac{H_b}{h_b} = 0.85 (0.7 + 5 \tan \beta) \dots\dots\dots (13)$$

海底勾配を考慮しない場合には、

$$\frac{H_b}{h_b} = 0.78 \dots\dots\dots (14)$$

いずれの碎波条件式を用いても、結果には大きな差異はないことが知られている。

6. 構造物の影響

汀線付近に防波堤や突堤などの構造物が存在する場合、漂砂の分布に影響があるため、その効果をモデルに組み込む必要がある。厳密には、波浪の回折等の変形計算を行う必要があるが、ここでは、簡便的に次式を用いて評価する。

$$Q_y(\text{structure}) = \gamma Q_y \dots\dots\dots (15)$$

$\gamma = 0$ 構造物が漂砂帯の外側まで存在する場合

$\gamma = 1$ 構造物がない場合

汀線変化シミュレーション

1. 差分化

式(2)において、移動限界水深は時間的に変化せず、汀線の変動は沿岸漂砂量の空間分布に基づくものとして、次式を基礎式とする。

$$\frac{\partial x_0}{\partial t} = - \frac{1}{h_i(1-\lambda)} \cdot \frac{\partial Q_y}{\partial y} \dots\dots\dots (16)$$

上式の差分表示は、陽形式を用いて次のようにする。

$$x_{0j}(t + \Delta t) = x_{0j}(t) + \frac{\Delta t}{h_i(1-\lambda)\Delta y} \cdot (Q_{yj} - Q_{y,j+1}) \dots\dots\dots (17)$$

2. 境界条件

(1) 固定境界

計算領域両側における海浜が沿岸方向に一様であれば、沿岸漂砂量は存在するものの単に通過するだけなので、海岸線は変化しないことになる。この場合の境界漂砂量は次式のように設定すればよい。

$$Q_b = Q_{b+1} (\text{左境界}), Q_b = Q_{b-1} (\text{右境界}) \dots\dots\dots (18)$$

ここに、 Q_b は境界漂砂量で、 Q_{b+1} および Q_{b-1} は境界に隣接する計算領域内の沿岸漂砂量である。式(18)を式(17)に代入すると、海岸線位置の時間変化は0となる。

(2) 自由境界

計算領域を無限に広く設定することは一般に不可能なので、沿岸方向の一様性が保証されない位置に境界を設定せざるをえないことが多い。この場合、最も簡便な境界漂砂量の設定法は次式のようになる。

$$Q_b = 2 Q_{b+1} - Q_{b+2} \text{ (左境界)}, Q_b = 2 Q_{b-1} - Q_{b-2} \text{ (右境界)} \dots\dots\dots (19)$$

この境界条件を用いると、境界における海岸線が計算領域内の海岸線と同じ時間変化をすることになり、数値計算上の開境界の取り扱いと同一である。

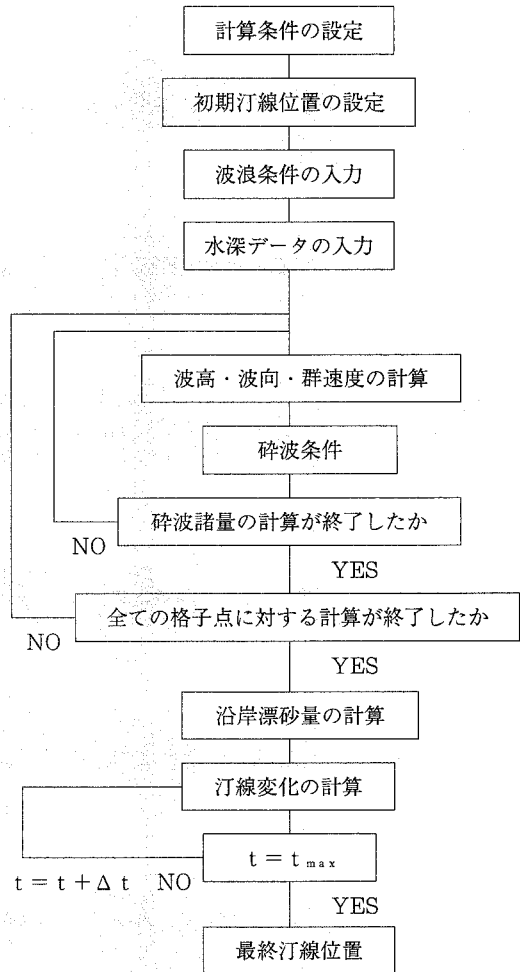
3. 計算のフローおよび計算条件

汀線変化モデルの計算フローを第5図に示す。本フローに従い、第6図に示す土佐湾の安芸海岸を対象として、汀線変化シミュレーションを実施した。

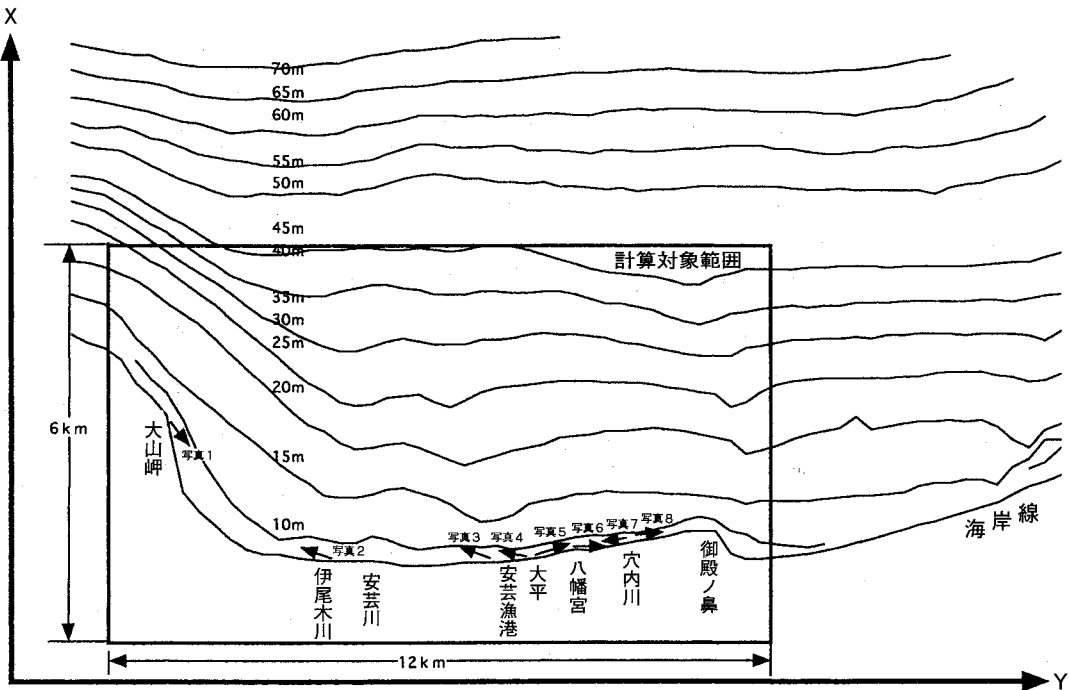
- (1) 計算対象領域は深浅測量の実施されている範囲とし、次のように設定した。
 - ・沿岸方向に 12,000m (格子間隔 300m), 岸沖方向に 6,000m (格子間隔 100m)
- (2) 波浪条件は次のように設定した。
 - ・沖波波高: $H_0 = 1.0\text{m}$
 - ・入射角: $\alpha_0 = 0^\circ$ (S と SSW の中間)
 - ・周期: $T = 10 \text{ sec.}$
- (3) 初期汀線
 - ・1961年の汀線を初期汀線とした。水深分布も同年のものを用いた。
- (4) 計算期間
 - ・対象海岸における波浪条件のデータが十分でなかったため、定量的な予測が困難であることを考慮して、(2)の条件の一定の波浪を1年間連続的に作用させた。
- (5) 安芸漁港防波堤の影響
 - ・安芸漁港防波堤を考慮した場合としない場合を対象とした。

4. 計算結果

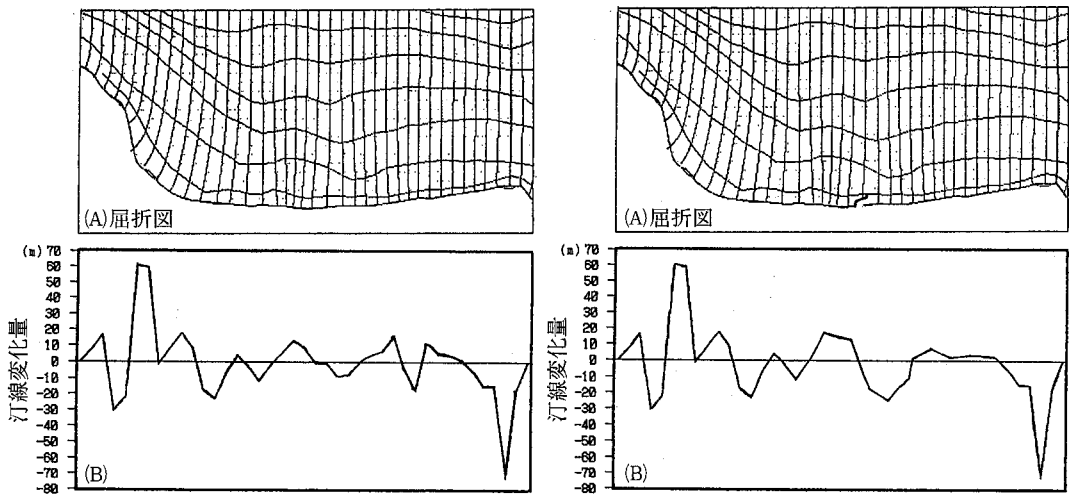
安芸漁港防波堤を考慮しない場合の汀線変化の計算結果を第7図に、した場合のそれを第8図に示している。漁港防波堤の存在によって、西側で堆積(汀線の前進)、東側で洗掘(汀線の後退)となることがわかる。この計算結果は、第9図に示してい



第5図 汀線変化シミュレーションの計算フロー



第6図 計算対象領域

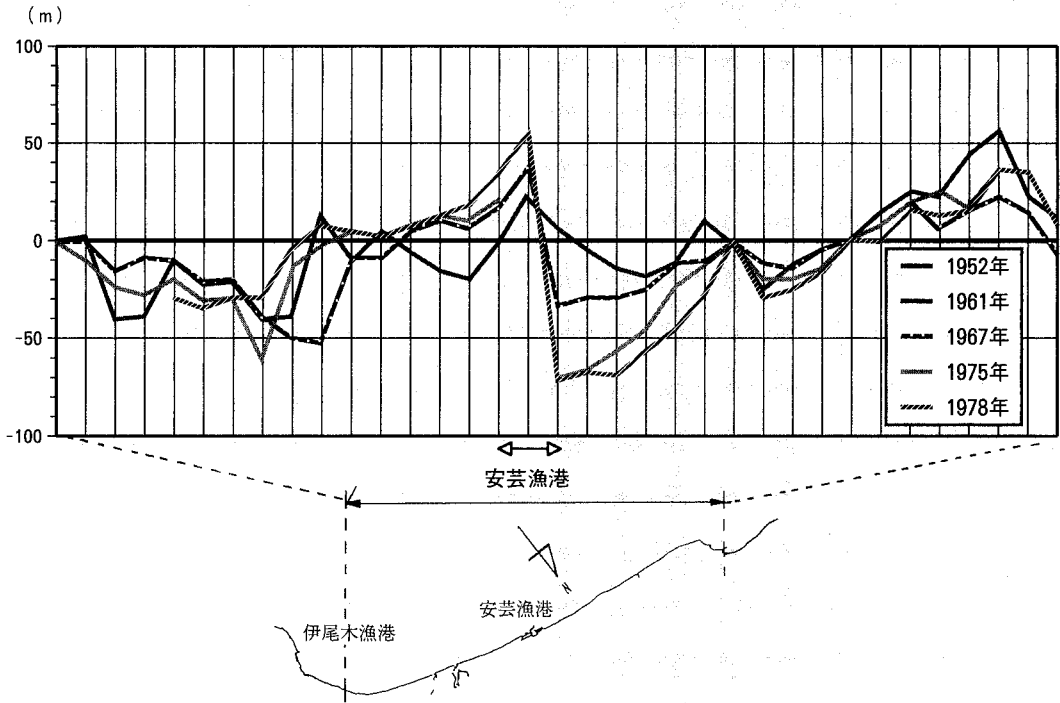


第7図 安芸漁港防波堤を考慮しない場合の汀線変化の計算結果

第8図 安芸漁港防波堤を考慮した場合の汀線変化の計算結果

る航空写真からの見取り結果と広域的に定性的な一致を示してはいるが、定量的には不一致な箇所が多々ある。

なお、当該海岸における海岸構造物の建設記録を第2表および第10図に取りまとめている。

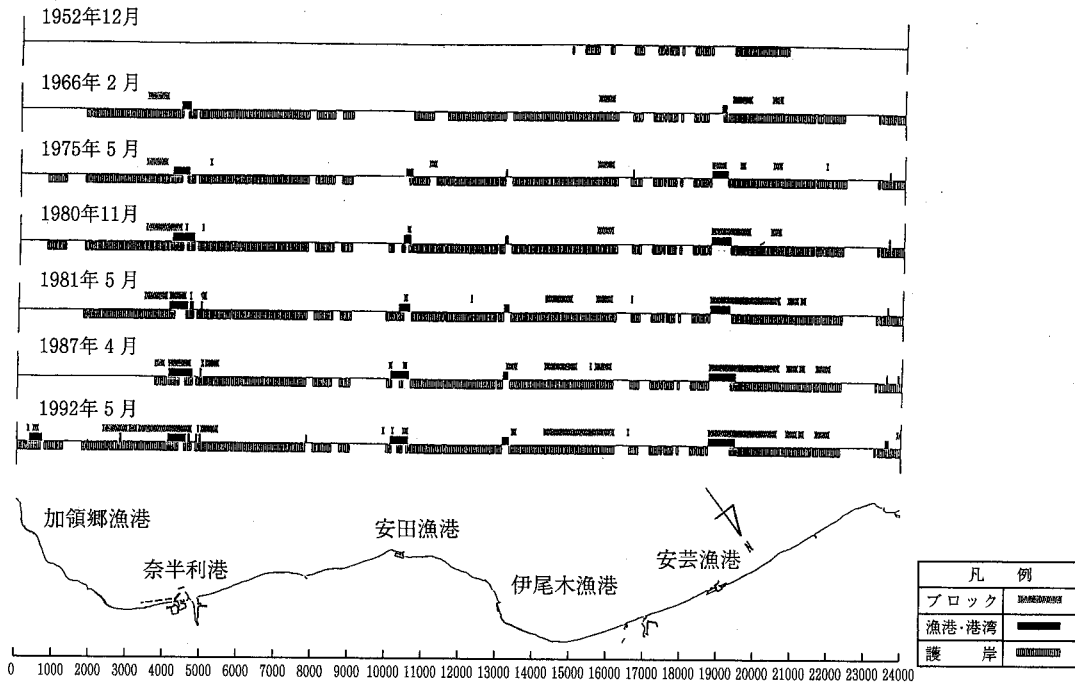


第9図 航空写真から見取った汀線の変動(1952年を基準)

第2表 海岸構造物の建設記録

施設名		年次							
		1947	52	67	75	80	81	87	92
加領郷漁港	防波堤								●
	沖防波堤								●
奈半利港	防波堤	←		●	→				
	沖防波堤						●	→	
	東浜離岸堤						●	→	
	河口導流堤							●	→
安田川河口	左岸導流堤			●					
安田漁港	防波堤			●	→				
伊尾木漁港	防波堤						●	→	
川北海岸	護岸						●	→	
安芸漁港	防波堤			←	●	→			
	沖防波堤							●	→
	西浜護岸						●	→	
御殿ノ鼻	突堤				←	●	→		

● 初めて航空写真に出現 建設開始時期の不明な期間 ——— 建設中



第10図 航空写真から見取った海岸構造物の建設記録

おわりに

1-ラインモデルによる自然海岸の汀線変動シミュレーション手法は今や確立された感があるが、それを実海岸に適用する場合には、波浪条件の与え方(不規則波の取扱いや波浪特性量の設定)や海岸構造物の影響評価などに問題点を残している。

今回の安芸海岸を対象としたシミュレーションにおいても上述の問題点を解決しておらず、今後とも引き続き手法の適用性や検証等を行っていく必要がある。

参考文献

- 1) 本間 仁監修/堀川清司編：海岸環境工学，東京大学出版会，1985.
- 2) 岩垣雄一・榎木 亨：海岸工学，共立出版，p.358, 1979.
- 3) Hallermeier, R. J.: Oscillatory bed load transport-Simple rate equations, U.S. Army Corps of Engineers, Coastal Eng. Res. Center, p.62, 1981.
- 4) Hallermeier, R.J.: Oscillatory bed load transport-Data reviewans simple formulation, Continental Shelf Research, Vol. 1, No. 2, pp. 159-190, 1982.
- 5) 井島武士：海岸工学，朝倉書店，p. 110, 1970.
- 6) 合田良實：不規則波の碎波指標について，第20回海岸工学講演会論文集，pp. 571-577, 1973.
- 7) 山口正隆・西岡賢嗣・田中浩二：構造物が存在する場合の不規則波に伴う海浜流の数値モデル，海岸工学論文集，第37巻，pp.205-209, 1990.

平成10(1998)年9月18日受理

平成10(1998)年12月25日発行

