

長期的汀線変化予測と侵食対策

Prediction of shoreline change in long term and Erosion control

高木 利光

Toshimitsu TAKAGI

1. はじめに

この世の中、予測によりすべてが動いていると言っても過言ではない。予測、すなわち未来を予測するといったことは、占いから始まり、スーパーコンピュータを利用し高度なシミュレーションモデルを駆使した天気予報まで、現在、いろいろな対象に対して、いろいろな方法により行われ、それら予測は人々の生活に密着している。予測が困難なものとして、気象・海象などの自然現象が挙げられる。ただし、潮汐現象はそのメカニズムが明らかであるため、現在では予測が可能な現象のひとつである。また、自然現象以外でも、昨今の不景気から脱しきれない現状を見ると、経済予測などはもっとむずかしい？ものかもしれない。

予測にはその対象に応じて時間と精度が大きく関係する。予測する先が数時間後から明日、1ヶ月後、1年後と、予測する時間もさまざまであり、また、我々が期待している予測精度もさまざまである。例えば、天気予報などは明日の天気はほぼ確実に予測して欲しいし、1年後の今日の天気はそれほど興味はないところである。一方で、海面上昇など、地球の環境に大きく影響する現象については、明日の海面がどうであるかよりは、100年後と遠い将来であるが、我々の興味あるところであり、地球環境を保全していくためにも、かなりの精度で予測しなければならない現象である。

このように、我々の生活にはいろいろな予測があるが、翻って海岸の地形、特に汀線変化の予測はどうであろうか。国土の狭い我が国は、多くの人々が沿岸域に住んでおり、また産業などの活動の場として沿岸域が高度に利用されている。我々は、大波が来て波浪が堤防を越波して浸水したり、また堤防そのものが破壊したりして、初めて海岸の地形変化に気づくことが多い。そのような場合は、砂浜が侵食を受け狭くなっていたり、またまったく消滅していたりする人が多い。砂浜は天然の消波効果を有するからである。したがって、沿岸域を生活の中心としている我が国にとって、このような砂浜の変形をあらかじめ予測、さらにはその予測のもとに適切な対策をとることが重要であることは言うまでもない。特に、国土の保全をその役目としている国の機関にとっては重要な関心事である。また、沿岸域を生活の場としている漁業者にとっても、さらにはレクリエーションの場として利用している人にとっても重要なことである。

人々は、大波が来ると汀線が一時的に後退するものの、その後また回復することを知っている。また、季節により来襲する波浪の違い、例えば夏の日本海は鏡のように静かであるのに対して、冬は季節風により大きく荒れること、また太平洋側では夏は台風等で南寄りからのうねりの影響が強く、冬は季節風による北寄りからの波浪が多いなど、このような波浪の特性により汀線は変化する。しかし、このような変化はもとに戻る可逆的な変化である場合が多く、問題とならない場合がほとんどである。

このような可逆的な地形変化に対し、もとに戻らない非可逆的な地形変化が存在する。この非可逆的な地形変化は、実際は可逆的な現象に埋もれて発生しており、長期的に見て初めて露見する現象である。また、一方向に進行する現象であることから、結果として空間スケールが大きな現象となる。では、なぜこのような非可逆的に地形変化が生じるのか。その要因については本研修会の他で紹介されているの

で省略するが、いわゆる土砂の収支が非平衡状態であることに原因する。自然状態で非平衡な海岸とは、河口部における河口デルタの発達に代表される地形変化であり、中国の黄河河口で見られる。日本では現在このような自然状態において発達過程にある海岸はほとんど見られないが、一方、人為的な要因により非平衡となった海岸は多く見られる。具体的には、河口からの流出土砂がダム等により止められ減少したことにより漂砂のバランスが崩れた海岸、漁港・港湾施設あるいは河口導流堤などで沿岸漂砂が阻止されたことにより漂砂のバランスが崩れた海岸。これら要因によりバランスを崩し非平衡状態となった海岸は、平衡状態を求め地形が変化することとなる。

次に、どのような場合に、このような長期的汀線変化の予測が必要となるか。まず、海岸侵食に対して対策を立てる場合、その対策がどのような効果を発揮するかを評価するために、汀線変化予測、それも現象としてはゆっくりとした変化であることから、長期の予測が必要となる。もちろん、比較のためには、何も対策を施さなかったらどうなるかといった予測も必要となる。また、港湾・漁港等の港湾計画、河口処理のための導流堤等の計画においても、それら構造物が周辺海浜に対して及ぼす影響を評価し、事前に対策を立てるためにも、汀線変化の予測が必要となる。

ここでは主に、砂礫海岸を対象とし、また地盤の沈降・隆起など地質学的外因による地形変化は対象としない。また、汀線変化が地形変化の代表指標となる地形変化を対象とし、漁港・港湾における港内堆砂などの地形変化は対象としない。また、構造物周辺の局所的な洗掘などの地形変化も対象としない。2章で長期的汀線変化をするための準備、3章では長期的汀線変化の予測方法、4章では具体的事例、5章では侵食対策検討の中での汀線変化予測の用い方について示した。

2. 長期汀線変化予測のための準備

2.1 対象範囲

長期的な地形変化を予測する上では、適切な検討範囲を設定する必要がある。適切な範囲とは漂砂系を考慮した範囲を意味する。最近では、海岸への土砂供給源である河川も含めた土砂収支を検討する必要から、広い意味での対象範囲としては河川の上流域も含まれる。ただし、それら供給源については境界条件として考えれば良いことから、現実的には海岸域のみを範囲として良い。そのように設定した漂砂系での土砂の収支を的確に捉えることが、後で述べる長期的汀線変化を予測する上で重要となる。海岸法が改正され、日本の沿岸は、地形・海象面の類似性および沿岸漂砂の連続性を考慮して、71の沿岸に区分された（海岸関係法令例規集、2000年版）。実際には、この沿岸区分を参考に、さらに対象とする海岸で詳細な検討の上、漂砂系を考慮した領域の設定が必要になる。例えば、海岸としては1つであるが、港湾等の大規模構造物で漂砂系が遮断されているとみなされる場合は、そのことを十分地形測量等のデータより確認した上で港湾施設を境界として設定する必要がある。

2.2 漂砂供給源

一般に、自然状態における漂砂の供給源とは、河川からの流出土砂、海食崖の崩落土砂が考えられる。また、人為的なものとして、養浜が考えられる。設定した領域にこれら漂砂源がある場合は、そこからの供給量を見積もる必要がある。河川および海食崖からの供給土砂量については本研修会の他の講演を参照されたい。なお、これら土砂は、海岸の汀線付近への供給土砂から見ると、流出土砂量すべてが海岸に寄与するものでないため、その寄与率を検討する必要がある。特に河川からの流出土砂量には細粒分も含まれていることから、現地海岸と流出土砂の粒径分布を比較し海岸への寄与率を推定したり、実際に周辺海岸の土砂収支から逆解析的に寄与率を求めたりすることもある。

2.3 波浪特性

波浪は汀線変化の要因となる最も大きな外力であることから、長期汀線変化を考える上で、なるべく長期の観測あるいは推算データを収集し、その波浪の特性を把握する必要がある。近年は日本沿岸の大規模港湾・漁港および代表的な海岸での定常的な波浪観測が実施されてきており、またデータの蓄積も10年以上にわたるものが多くなってきた（例えば、全国港湾海洋波浪観測資料、海象年表等）。それらデータから来襲する波浪の波高・周期・波向の特性を解析し、予測に資する。解析方法は波向別に波高および周期の頻度等を求め、卓越波浪を把握する。特に、波向別の波浪エネルギーを計算することにより、波浪の観点からの沿岸漂砂の卓越方向を事前に知っておくことが重要である。この際、波向が重要なデータとなることから、佐藤（1998）も述べているように、16方位の整理ではなく、1度単位の整理が望ましい。また、波高・周期については対象地点と多少離れていても波浪の特性は大きく変わらない場合が多いが、波向は地形により変化するので、注意を要する。波向については、後で紹介する汀線変化モデルを用いた現地地形変化の再現計算から逆解析的に求めることも可能である。また、今までの長期予測では、通常波浪を対象としていたが、今後、海岸を管理する上では計画波も含めた異常波浪に対してもその特性を調べ、汀線変化の予測に資することとなるであろう（鳥居ら、2001b）。

2.4 流況特性

海浜変形に関係する流れの主たるものは、波浪によって発生する海浜流である。特に、構造物周辺では、波浪の回折・反射といった現象により、複雑な流れを呈し、その流れによる海浜変形が生じる。最もよく見られる現象は、防波堤の遮蔽域にできる循環流とそれに伴う地形変化（片トンボロ現象）であり、離岸堤背後に生じるトンボロ地形も離岸堤背後に生じる2対の循環流型の手浜流によって引き起こされる。

一方、碎波帯の沖合では手浜流は顕著でないものの、潮流や海流などの影響により地形変化が生じている場合も見られる。石川県の金沢港防波堤近傍で生じている堆砂はこの沖合の流れで生じていると推定されており、長期的に見た場合には無視し得ない変化である（海岸施設設計便覧、2000、pp. 269-270）。

2.5 底質特性

底質の粒径は砂の動きを知る上で重要である。宇多（1997）は、底質粒径の岸沖方向の分布から、粒径の変化水深と地形変化の限界水深との相関性が高いことから、底質粒径を調べることで移動限界水深を知ることにも可能であるとしている（日本の海岸侵食（1997）、pp. 419-421）。また、一般的には漂砂源から漂砂の移動の下手方向にいくほど粒径は細くなることから、沿岸方向の粒径分布から沿岸漂砂の卓越方向を知ることにも可能である。また、岩礁が点在している海岸では、岩礁の分布域も大切なデータであり、それらデータを用い沿岸漂砂量の低減率を求めることも可能である（海岸環境工学、2000、pp. 335-336）。砂浜海岸においても意外と砂層厚は薄い場合が確認されており（山本ら、1999、2000）、今後これらのデータも長期的な海浜変形を予測する上では重要となる可能性がある。

2.6 潮位特性

潮位そのものは、地形変化の外力ではないものの、波浪などの外力を決める前提条件となる。長期的な地形変化を考える場合は、平均潮位を用いる場合が多い。ただし、長期的に見て海面上昇等の影響を考慮する場合には、上昇量を適切に見積もって水位条件を設定する必要がある。

2.7 地形変化特性

地形変化を最も直接的に把握できるのは、汀線の前進・後退である。そこで、海浜の地形変化を示す

場合、汀線の変化状況を示すことがわかりやすい。汀線位置は深淺測量によって得られるが、そのようなデータがない海岸においても空中写真（国土地理院）などから得られる。古くは 1940 年代の米軍撮影の空中写真が入手可能であり、長期的な汀線変化を把握できる。また、近年では衛星画像データを用いた解析も可能となっている（浅野ら, 2000）。空中写真から汀線情報を得る場合には、撮影年月日時間より当時の潮位を推定し、前浜勾配より汀線位置を補正する必要がある。また、波浪の遡上の影響についても波浪の情報が入手できれば補正することも可能である（青木ら, 1999）。例として、図- 21 に空中写真から得られた北九十九里海岸の汀線変化を示す（鳥居ら, 2001a）。ただし、空中写真は撮影された時期（季節）が異なる場合、あるいは撮影直前に高波浪が来襲した場合は、短期的変動が含まれている場合があるので注意を要する。

深淺測量データから得られる汀線変動については、その精度は高いものの、古いデータがなかったり、測量範囲が限られていたりする場合が多い。この場合もなるべく同じ時期のデータを用いるなど季節的な汀線変動に対しては注意する必要がある。また深淺データからは水面下の地形情報が得られることから、例えば水深方向の水深変化量分布（図- 10）や、海浜断面積の変化と汀線の変化量の相関（図- 9）などの情報が入手でき、これら情報は後に紹介する汀線変化モデルの条件設定にとって重要となる。さらには、対象領域をいくつかの区域に分けて、その区域間での土量変化を求めることで、適切な境界条件を設定することで土砂の収支、すなわち沿岸漂砂量を推定することが可能となる。

この他、地形変化の解析方法には、その目的と入手できる情報に応じていろいろある。宇多（1997）は全国の海岸の侵食事例を基に、その解析方法を提示している。

2.8 その他

汀線変化を最も捉えやすい個所は、海岸構造物周辺であることが多い。したがって、既設の構造物の建設状況を把握しておくことが、漂砂の動きを検討する上で大切な情報である。また、飛砂が顕著な海岸は飛砂も海浜変形の要因となることから、風などのデータも重要である。さらには、土砂の採掘についても、その量、範囲、時期について整理しておく必要がある。

3. 汀線変化予測方法

3.1 予測方法の概要

地形変化を予測する方法としては、大きく分けて、移動床による水理模型実験、経験的モデルおよび数値モデルによる方法がある。水理模型実験は、移動床における相似則が成り立たない場合が多く、実験により長期的な地形変化を予測する場合は注意を要する。また、広範囲な地形変化予測を行う場合には大規模な水槽が必要となる。経験モデルは、現地における地形変化を統計処理して得られる地形変化のトレンドから予測する方法（ただし、この方法では対策の評価は困難）や、既往の地形変化から地形や波浪の特性で整理した図表等を用いる方法であり、概略的な予測をする場合に用いられている。一方、数値モデルによる予測は、近年のコンピューターの進歩と、現地や実験を含めた漂砂研究による地形変化現象のモデル化の発展により、大きくその適用性が高まっている。また、相似則が成立する波や流れを実験で把握した上で、漂砂や海浜変形は数値計算で予測するといった方法もある（例えば入江ら, 1985）。

このようないろいろな予測方法の中で、現地への適用性が高く、今後さらなる発展が予想される数値モデルによる予測方法を主体としてここで取り扱うものとする。

海浜変形モデルについては、清水が「海岸施設設計便覧」（土木学会, 2000, pp.145-156）の中でまとめている。これによると、モデルは大きく、海岸線変化モデルと 3 次元海浜変形モデルに分類される。前者は海岸の地形を汀線あるいは複数の等深線を代表として表現するもので、海岸線方向の 1 次元的な

土砂の収支を基本としたモデルである。一方、3次元海浜変形モデルとは、平面的な波浪場および海浜流場の計算モデルと、それらの結果から求めた局所漂砂量モデルとを組み合わせ、平面的な土砂収支から鉛直方向の標高（水深）変化を求めるものであり、平面2次元海浜変形モデルとも呼ばれる。これらのモデルには、対象とする地形変化の時空間スケールより、その適用範囲がある（図-1）。通常、長期の地形変化を対象とした場合には、海岸線モデルを適用する場合が多い。したがって、ここでは、海岸線モデルを中心に、その適用方法について述べる。

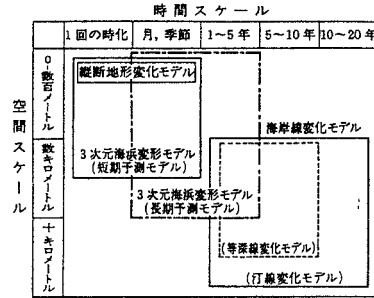


図-1 海浜変形モデルの適応範囲(清水, 1996)

3.2 汀線変化(1-line)モデル

汀線変化モデルは1-lineモデルとも呼ばれ、3つのサブモデルから構成される。波の場の計算、沿岸漂砂量の計算および汀線変化の計算のモデルについて以下に述べる。

(1) 波の場の計算

汀線変化計算においては、次節で述べる沿岸漂砂量を求めるために砕波点での波高および波向を沿岸方向に求める必要がある。波の場の計算手法は、現在、種々提案されているが、汀線変化モデルに適用されているモデルは主に表-1に示す通りである。

クラウスら(1981)は、基本的にはスネルの法則に基づいた波の変形計算により、砕波点における波高および波向を求めている。また、防波堤などの背後における回折領域においては不規則波の回折理論に基づく簡易計算によりそれら諸元を求めている。また田中・灘岡(1982)は波向線方程式と波向線間隔方程式を連立させて解くことにより、波向および屈折係数さらには砕波点での波高を求めている。また、構造物周辺においては、半無限堤に対する三井ら(1976)の修正近似解を用いている。宇多らは初期の段階においては水理模型実験より得られた砕波諸元を用いているが(宇多ら, 1988)、最近では、放物型方程式を用いた平面波浪場の計算手法を用いている(宇多・河野, 1996)。

このように、初期においては、計算機的能力から簡易的な方法により波の場が計算されていたが、近年においては計算機の発達に伴い、平面的な波浪場を適用した手法が用いられている。平面波浪場を利用すれば、平面的に複雑な地形への対応や、波の屈折、浅水・砕波変形および構造物による回折が計算可能であり、なおかつ不規則波への適用が可能であるという点で有利である。長期間の予測のために多くの波の場の計算が必要なことから、計算時間なるべくかからない計算方法であることが望ましい。そのような観点から、現在、エネルギー平衡方程式や放物型方程式を用いた手法が一般的となっている。これらの計算手法の詳細については「海岸波動」(土木学会, 1994)を参照されたい。平面波浪場から直接砕波点を求めることも可能であるが、一般的には移動限界水深付近での沿岸方向の波高および波向分布を求め、それ以降、砕波位置を決め、砕波諸元を求めるところは、従来どおりスネルの方法で波を変形させ求めている場合が多い。砕波位置を求める方法もいろいろあるが、最も簡便な方法としては、波高・水深比で決める方法がある。

$$H_b = \gamma h, \quad \gamma = 0.78 \quad (1)$$

表- 1 汀線変化計算で用いられる波の場の計算方法

手法	適用範囲
スネルの法則	平行等深線地形を仮定，屈折のみ
波向線法	複雑地形，屈折，浅水変形，波向線交差の場合に問題あり
エネルギー平衡方程式	複雑地形，屈折，浅水，碎波変形(擬似的に回折が考慮できる)，不規則波
放物型方程式	複雑地形，屈折，回折，浅水，碎波変形，不規則波不規則波への拡張が可能

(2) 漂砂量の計算

沿岸漂砂量の算定式には表- 2 に示すような方法が提案されている。

表- 2 沿岸漂砂量の算定式

漂砂量式	提案者	式
波浪エネルギー フラックスモデル	CERC(1977)	$I = K(EC_g)_b \sin \alpha_b, \cos \alpha_b$ (2)
沿岸流モデル	Kormar・ Inman(1970)	$I = K'(EC_g)_b V / u_m$ (3)
混合モデル(小笹・ Brampton 式)	小笹・ Brampton(1979)	$I = (EC_g)_b (K_1 \sin \alpha_b, \cos \alpha_b, - \frac{K_2}{\tan \beta} \cos \alpha_b, \frac{\partial H_b}{\partial y})$ (4)

ここに I : 沿岸漂砂の水中重量, $(EC_g)_b$: 碎波点における波浪エネルギー, H_b : 碎波波高, α_{bs} : 碎波点における汀線と波向のなす角度, K, K', K_1, K_2 : 漂砂量係数, $\tan \beta$: 海底勾配, V : 沿岸の流速を代表する値, u_m : 碎波点における海底面上の水粒子軌道流速の最大値である。

実用的には、波浪エネルギーフラックスモデルあるいは小笹・Brampton 式が使われることが多い。特に、構造物周辺で回折波に伴う循環流が生じるような場合においては、小笹・Brampton 式を用いた場合、その流れの効果を碎波波高分布の形で考慮できることから、汀線変化の再現性に優れている。小笹・Brampton は、式(3)中の沿岸流速に Bakker(1971)の沿岸流速分布モデルを導入し、沿岸方向に碎波波高が変化するような状況、すなわち構造物周辺に循環流などの海浜流が生じる場合についてその流れの効果を考慮できる漂砂量式を提案している。式(4)を空隙を含む体積表示で表すと以下ようになる。

$$Q = \frac{(EC_g)_b}{(\rho_s - \rho)g(1 - \lambda)} (K_1 \sin \alpha_b, \cos \alpha_b, - K_2 \cot \beta \cos \alpha_b, \frac{\partial H_b}{\partial y}) \quad (5)$$

ここに K_1, K_2 は無次元係数, $\cot \beta$ は海底勾配の逆数, H_b は碎波波高, ρ, ρ_s は海水と砂の比重, λ は空隙率である。上記式中の代表波浪は規則波であることから、現地において一般に使われる代表波浪である有義波高を用いる場合は次式が便宜的に使える(クラウスら, 1981)。

$$Q = (H_{1/3}^2 C_g)_b (\hat{K}_1 \sin 2\alpha_b - \hat{K}_2 \cos \alpha_s \cot \beta \frac{\partial H_{1/3_b}}{\partial y}) \quad (6)$$

ここに、無次元係数 $\hat{K}_1, \hat{K}_2$ は、

$$\hat{K}_1 = \frac{K_1}{16(\rho_s / \rho - 1)(1 - \lambda)1.416^{5/2}}, \quad \hat{K}_2 = \frac{K_2}{8(\rho_s / \rho - 1)(1 - \lambda)1.416^{5/2}} \quad (7), (8)$$

である。また、 $\cot \beta$: 海底勾配の逆数、1.416 : 有義波からエネルギー平均波高への換算値、 C_g : 波の群速度、である。 α_{bs} は、図-2 に示す通り、砕波点における波峰線と海岸線(汀線)とのなす角度であり、次のように定義される。

$$\alpha_{bs} = \alpha_b - \alpha_s = \alpha_b - \tan^{-1} \frac{\partial x_s}{\partial y} \quad (9)$$

ここに、 α_b : 砕波波峰線と y 軸とのなす角度、 α_s : 海岸線と y 軸とのなす角度、 x_s : 海岸線位置 (y 軸からの沖方向距離) である。

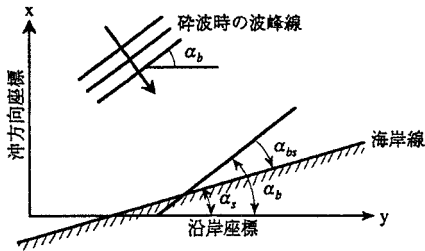


図-2 波向の定義(本間・堀川, 1985)

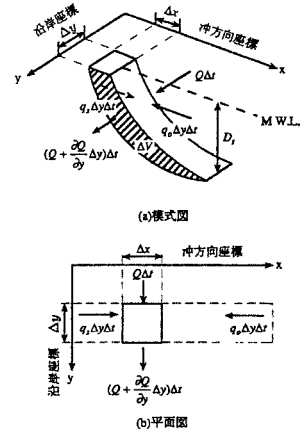


図-3 汀線変化量と土砂収支の関係
(本間・堀川, 1985)

(3) 汀線変化の計算

汀線変化の計算は、先に述べた波の場の計算、その結果から求まるところの沿岸漂砂量を用いて、以下の仮定の基に計算される(図-3)。

- 1) 基本的に沿岸漂砂量の収支により汀線が変化する。
- 2) 沿岸漂砂は漂砂活動が活発な上縁と沖側限界水深で定義される漂砂帯内でのみ生じる。
- 3) 海底断面は漂砂帯内では汀線の前進・後退に合わせて初期断面地形に対し平行に変化する。

基礎方程式は以下に示す砂の連続式で表せる。

$$\frac{\partial x_s}{\partial t} + \frac{1}{D_s} \left(\frac{\partial Q}{\partial y} - q \right) = 0 \quad (10)$$

ここに、 x_s は汀線位置の岸沖変化量、 Q は空隙を含む沿岸漂砂量、 D_s は漂砂移動高さ、 q は岸沖方向の土砂移動量で、河川からの土砂供給量や沖方向への土砂流出等として入力可能である。

(4) 数値計算手法

具体的な計算は図-4 に示す計算フローに従って進められる。まず入力波の条件の基に、波の場の計算を行う。波の場の計算は、先にも述べたように最近では平面波浪場の計算により、限界水深付近の波浪諸元を

求める。次にその波浪諸元からスネルの方法により碎波点を求め、碎波諸元を抽出する。次に碎波諸元および汀線の傾きから沿岸漂砂量を計算し、微小時間間隔内でのその沿岸漂砂の土砂収支より汀線の前進あるいは後退量を求め、汀線位置の更新を行う。汀線位置が更新されると、波向と汀線のなす角度が変化することから、沿岸漂砂量を再計算し、再度汀線位置を計算しなおす。そのような計算をある程度繰り返し、汀線の変形が大きくなった場合、再度、碎波諸元の計算を行う。また、入射波浪条件が変わった場合は、再度波の場の計算からやり直す。波の場の計算手法については他の参考文献(例えば、「海岸波動」(土木学会, 1994))に譲ることとし、次に汀線変化計算の数値計算手法について述べる。汀線変化計算には、式(10)を差分法を用いて計算する方法が一般的である。また、差分方程式の解法では、時間微分を前進差分で表現し、 t 時間の漂砂量を用いて、 $t+1$ 時間の未知量(汀線変化量)を求めると行った、いわゆる陽解法と、 t 時間と $t+1$ 時間の漂砂量を用い、 $t+1$ 時間に関する連立方程式を立てて解くといった陰解法がある。陽解法と陰解法の比較は「海岸環境工学」(本間・堀川, 1985)で検討されており、一般に、陽解法は安定な解を得るのに、陰解法より短い Δt を必要とする。しかし、実際は計算プログラムの簡便さ、種々の境界条件の設定のしやすさなどから、陽解法が多く用いられている。ここでは、陽解法について述べる。図-5 に示す変数配置のもとで(10)式を陽形式の差分式で表すと次のようになる。

$$x_{si}^{n+1} = x_{si}^n - \frac{\Delta t}{D_s \Delta y} (Q_{i+1}^n - Q_i^n - \Delta y q_i^n) = 0 \quad (11)$$

ここに、 Δt は微小時間間隔、 Δy は計算格子間隔であり、 i は計算格子番号、 n は計算時間ステップを表す。図-5 に示すように汀線位置と漂砂量の位置は半格子ずれており、同じ格子番号 i でも位置が異なることに注意を要する。

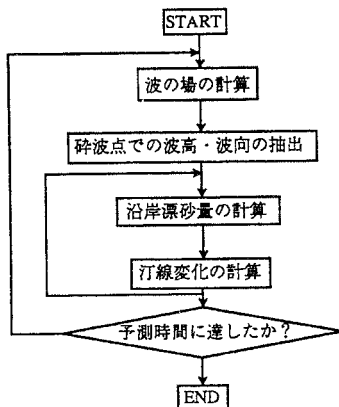


図-4 計算フロー

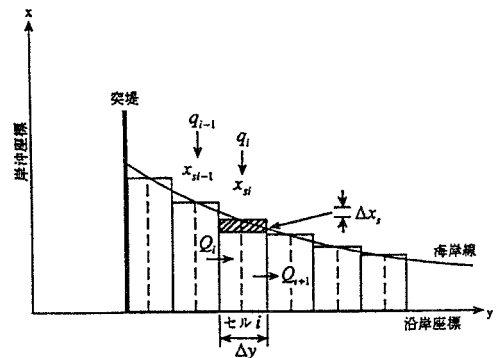


図-5 計算座標系および変数の配置
(本間・堀川, 1985)

(5) 境界条件

当モデルを現地に適用するに当たっては、種々の海岸構造物に適用することが考えられる。ここでは、主な海岸構造物として突堤、離岸堤、護岸についてその一般的な取扱方を示す。

a) 突堤

突堤は沖方向に突出した構造物であり、沿岸漂砂を遮断する効果を持つ。従って、突堤以外の構造物であっても、河口部導流堤、あるいは埋め立て護岸など、沖方向に突出している構造物は同様な取扱いが可能である。一般に、沿岸漂砂量の水深方向分布形を仮定し、突堤により遮断される漂砂の割合を突堤の先端水深

から幾何学的に算出する(図-6)．次に突堤がないとした場合のその地点において算出された沿岸漂砂量 Q_{g0} から遮断される漂砂量を差し引いた量が、突堤先端より沖合いを通過する漂砂量 Q_g と仮定する．今、水深方向の沿岸漂砂量分布形を一樣と仮定すると、通過漂砂量 Q_g は次式で表すことができる．

$$Q_g = \begin{cases} Q_{g0}(1 - h_g/h_c), & h_g \leq h_c \\ 0 & h_g \geq h_c \end{cases} \quad (12)$$

または、水深方向の沿岸漂砂量分布形の関数を ξ とした場合には、

$$Q_g = \begin{cases} Q_{g0}(1 - \mu), & \mu = \int_{h_g}^{h_R} \xi(z) dz / \int_{h_c}^{h_R} \xi(z) dz, & h_g \leq h_c \\ 0 & h_g \geq h_c \end{cases} \quad (13)$$

となる．ここに、 Q_{g0} は突堤がないとした場合の沿岸漂砂量、 h_g は突堤の先端水深である、 h_c は沖側移動限界水深、 h_R は岸側移動限界高さ(遡上高)である．この式からわかるように、突堤が移動限界水深 h_c より延びていた場合は、沿岸漂砂は完全に遮断される．また、突堤の漂砂上手側基部の汀線位置が沖合いに前進してきた場合、それに伴って、突堤の先端水深が浅くなることから、通過漂砂量は徐々に大きくなる．

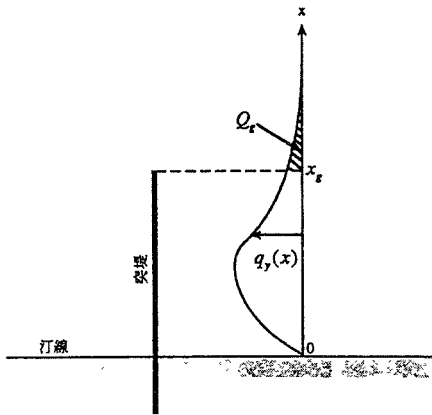


図-6 突堤での沿岸漂砂量の通過率の与え方
(田中・難岡, 1982)

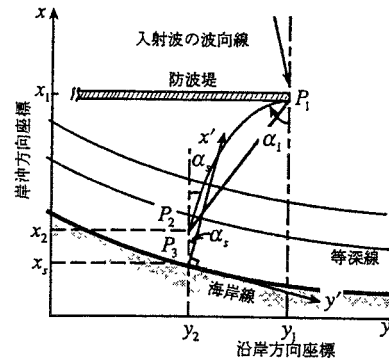


図-7 構造物背後の波浪変形計算
(本間・堀川, 1985)

b) 離岸堤

離岸堤はその背後の汀線が前進し、トンボロ地形を形成することが知られている．離岸堤はその背後に回折領域を作ることから、回折波の計算が必要となる．また、離岸堤の両端から進入する回折波は地形により屈折する．さらに一般に離岸堤は消波ブロックで作られることから透過する波も存在する．このような複雑な波の変形を厳密に解くには多大な計算を必要とする．クラウス(1982)はこのような構造物背後の波の変形計算を次のような簡易的方法を用いている．図-7 に示すように、構造物により影になる部分とそうでない部分を分け、影になる部分における砕波波高を次式により求めている．

$$H_b = K_d(\alpha_D, h_b) K_r'(\alpha_1', h_b) K_s(h_b) H_{tp} \quad (14)$$

ここに、 K_d は回折係数、 K_r' は汀線の傾きを考慮した局所座標系上の屈折係数、 K_s は防波堤先端および砕波水深 h_b の位置にそれぞれ対応する浅水係数の比、 H_{tp} は防波堤先端での波高である． K_d は不規則波のエネルギーの方向分布特性から求めた回折係数(例えば、合田, 1990)である．さらに透過波を考慮する場合については Hanson・Kraus(1989)は式(15)のような回折係数を導入している．

ここに、 R_t は透過率であり、 K_d は不透過の場合の回折係数である。一般に離岸堤は複数の離岸堤の群として設置される場合が多く、このような場合は個々の離岸堤の影にはならない開口部においても互いの離岸堤の回折の影響が及ぶことから、互いの回折係数を乗じたものを新たな回折係数とし碎波波高を求める(図-8)。

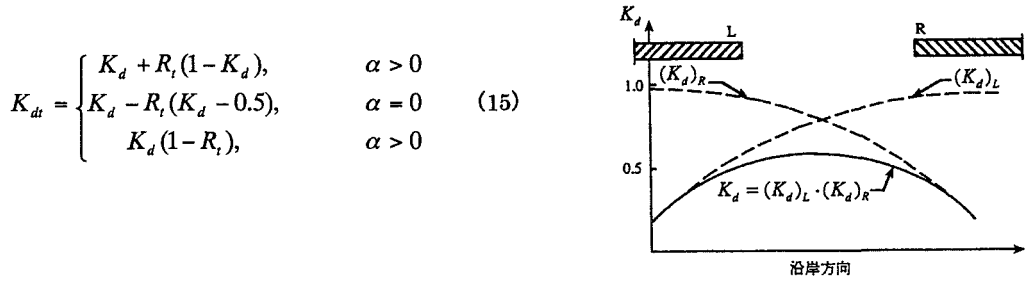


図-8 群堤の場合の波高計算
(Hanson・Kraus, 1989)

c) 護岸

汀線が後退し、護岸等の構造物に達した場合、汀線がそれよりも後退しないよう計算上の処理が必要となる。汀線位置が護岸に達した場合、汀線が前進する場合を除いては、汀線位置が護岸位置に留まるよう漂砂量を補正する(小笹・Brampton, 1979; 田中・灘岡, 1982; Hanson・Kraus, 1985)。補正漂砂量は次式により求められる。ただし、沿岸漂砂の方向は正の場合である。

$$\Delta Q_w = \frac{D_s \Delta y}{\Delta t} (x_{wi} - x'_{si}) \quad (16)$$

ここに、 x_{wi} は護岸の位置、 x'_{si} は護岸がないとした場合の汀線位置であり $x'_{si} < x_{wi}$ の場合に式(16)により求めた補正量を格子*i*から流出する漂砂量 Q_{i+1} から差し引く。実際には沿岸漂砂の方向が一樣でない場合があり、このような場合には補正量を決定することは難しい。この処理についても先に述べた離岸堤同様、現地の現象に則した処理が適宜必要である。また、この方法によると、汀線が護岸に到達した場合、それ以上の侵食は生じず、その地点からの漂砂の供給はなくなる。すなわち、上手からきた漂砂はそのまま素通しする形となる。しかし、実際は海底勾配が急になるなどさらに侵食が進行する現象も見られることから、この適用に当たっては注意を要する。

d) 側方境界

一般に、計算領域は対象海岸をある範囲で切り取るようになることから、その両端に必ず境界が生じる。側方境界が沿岸漂砂を完全に遮蔽するような大規模構造物であったり岬地形である場合、境界での沿岸漂砂量は、

$$Q_B = 0 \quad (17)$$

と設定可能である。しかし、側方境界が砂浜海浜上となる場合には、現地の状況にふさわしい境界条件を設定しなければならない。汀線変化が生じないと仮定できるならば、

$$Q_B = Q_{B+1} \quad (18)$$

すなわち、境界上の漂砂量はその隣の漂砂量と等しいと設定することとなる。また、漂砂量の場地的変化が境界付近で変化しないと仮定できるならば、外挿により

$$Q_B = 2Q_{B+1} - Q_{B+2} \quad (19)$$

と設定できる。

e) 外部からの土砂流入・流出境界

河川など外部から土砂の流入があったり、また人為的な土砂採取などを考慮するには、式(10)中の漂砂量 q を与えれば良い。河口部から流出土砂を考慮する時、河口幅が格子間隔 Δy よりも広い場合には、流出土砂量が河口幅一様に分布していると仮定するなどして与える方法がある(田中・灘岡, 1982)。

f) その他

海底が一部岩礁であったり(海岸環境工学, 2000, pp.335-336)、また汀線が大きく湾曲していたりする場合(宇多, 1982a, b; 宇多ら, 1998)などは、地形変化特性を反映できるようなモデル化が必要である。

(6) 計算条件

a) 波浪条件

入射波浪として必要な条件としては、波高、周期および波向である。現地における予測計算においては、不規則波を対象とすることから、有義波諸元が必要となる。また、クラウス(1982)による簡易的な構造物背後の回折計算やエネルギー平衡方程式による平面波浪場の計算を用いる場合においては、方向分布関数を決定する方向集中度パラメーターが必要となる。次にこれら波浪諸元を時系列で与える必要がある。この場合、実測値が入手可能であるならば、実測値を直接入力することも可能である。実際は、数種類の代表波でモデル化する場合が多い。モデル化の方法として田中・灘岡(1982)は各波向ごとに周期別波高発生頻度が与えられている場合、次のような方法を提案している。

$$\tilde{T}_{ij} = \frac{\sum_k n_{ijk} T_k}{\sum_k n_{ijk}}, \quad \tilde{H}_{ij} = \sqrt{\frac{\sum_k \sum_l (n_{ijkl} T_k H_l^2)}{\sum_k \sum_l n_{ijkl} \tilde{T}_{ij}}} \quad (20), (21)$$

$$\cos \tilde{\alpha}_{ij} \sin \tilde{\alpha}_{ij} = \frac{\sum_m \sum_k \sum_l n_{ijklm} T_k H_l^2 \cos \alpha_m \sin \alpha_m}{\sum_m \sum_k \sum_l n_{ijklm} \tilde{T}_{ij} \tilde{H}_{ij}^2} \quad (22)$$

ここに $\tilde{T}_{ij}$ 、 $\tilde{H}_{ij}$ および $\tilde{\alpha}_{ij}$ は各々期間区別 i 、波向区分 j に対する平均周期、エネルギー平均波高および波のエネルギーフラックスの沿岸方向成分の総和を与える波向に相当する。また、 n は波の発生頻度であり、その添え字 i, j, k, l, m は各々期間区分 i 、波向区分 j 、周期階級 k 、波高階級 l および波向階級 m を表す。上記の方法により代表波を数種類設定することが望ましい。ただし、当モデルにおいてその精度に最も影響の大きい波向は観測されている場合が少なく、また観測データがあったとしても対象範囲が広範囲であったりした場合には沿岸方向に入射波浪が異なる場合も生じてくる。したがって、過去の汀線変化、特に構造物周辺の汀線変化を再現できるように検証計算を行って、適切な入射波浪条件を設定することが望ましい。

b) 漂砂量係数

CERC 公式タイプの漂砂量式の漂砂量係数は表-3 に示すように種々提案されている。 K_1 は概ね 0.1~0.5 の範囲の値である。しかし、底質状況や海底勾配などの漂砂環境が現場毎に異なること、さらには、代表波浪の設定方法などが確立されていないことから、普遍的な係数値を決めることは困難である。したがって、先の代表波浪を設定する場合と同様、現地における過去の汀線変化の再現計算などを通して係数値を決めることが望ましい。清水(1996)は底質粒径との関係を示し、粒径が大きくなると係数値は小さくなる傾向があることを示している。また、佐藤ら(1999)は、現地の礫養浜材(平均粒径 100mm)の流出状況から漂

砂量係数 0.059 を算出している。なお、高木・川原(1995)は汀線変化の実測値を用いて漂砂量係数等を求める逆解析手法の適用性について検討しているが、モデルでの検討段階であり実用レベルには達していない。

表- 3 代表的な漂砂量係数

提案者	係数 K_1	係数 K_2	導出方法
Komar・Inman(1970)	0.77	-----	蛍光砂現地観測
小笹・Brampton(1979)	0.385	1.6	Kormar・Inman(1970)の沿岸漂砂量式と Bakker(1971)の沿岸流速公式
田中・灘岡(1982)	0.5(=0.3×1.65)	-----	苫小牧港東海岸における検証計算
クラウスら(1981)	0.58	0.73	大洗海岸における検証計算
佐藤ら (1999)	0.059	-----	富士海岸における養浜礫の流出状況より

c) 漂砂移動高

漂砂移動高 D_s は、汀線変化モデル特有のパラメータである。汀線変化モデルの基本は沿岸漂砂量の収支モデルであり、収支の差によって発生する土砂の堆積、侵食を汀線の前進、後退量に置き換えるため、その両者の関係をとるもつパラメータである漂砂移動高が必要となる。すなわち、土砂量の変化量を漂砂移動高で割った値が汀線変化量となる。通常、このパラメータは深浅測量データから得られる海浜断面積の変化とそのときの汀線変化量との相関をとることにより得られる (図- 9)。したがって、この相関関係が良くない場合は、汀線変化モデルの適用に問題がある場合があるので、注意を要する。物理的には、漂砂移動の下限値 (移動限界水深) と上限値の差とも定義できるが、通常、汀線付近の水深変化量は大きく、深くなるほどその値は小さくなる (図- 10) ことから、この差よりも移動高は小さい値となる。図- 11 は、宇多 (1997) がこの値の全国の実態を整理した値を図化したものである。ただし、この値は必ずしも先に示した相関関係から得られたものばかりでなく、また一部は堆積域のデータから得た値である。特に防波堤の遮蔽域での堆砂状況から推定した場合には、流れの影響が大きく作用している場合があるので注意を要する。深浅測量データがなく、このような相関関係による方法で値を設定できない場合には、宇多 (1997) がいくつかの方法を提案している。

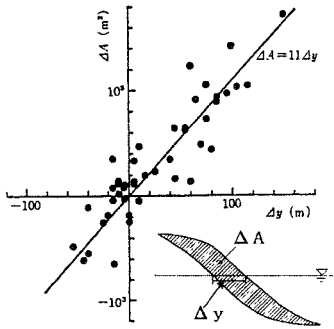


図- 9 海浜断面積の変化量 (ΔA) と汀線変化量 (Δy) の相関 (宇多, 1997)

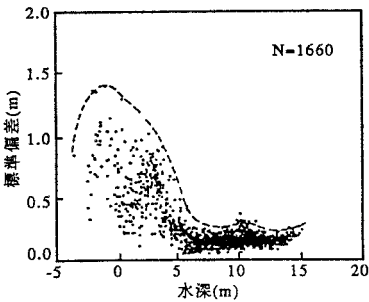


図- 10 水深変動から求めた漂砂移動範囲 (Kraus, 1983)

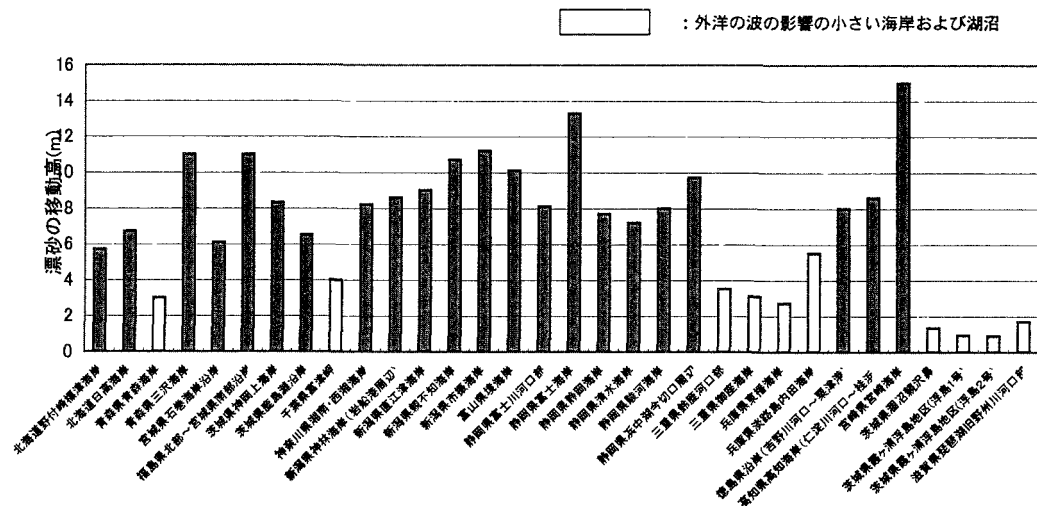


図- 11 漂砂の移動高（宇多，1997 から作成）

3.3 その他モデル

(1) 等深線モデル

等深線（変化）モデルは，一般的に用いられている汀線変化モデル(1-line モデル)を拡張し，汀線変化モデルの仮定の範囲内で複数の等深線の変化，すなわち海浜地形の平面変化の予測が可能となるよう改良されたものであり，n-line モデルとも呼ばれている．このモデルは，汀線変化モデルが汀線を代表とする一本の等深線の変化を計算するのに対し，設定した複数の代表等深線の変化を各等深線毎に沿岸漂砂量の収支を計算することでその前進あるいは後退量を求めることができる．各等深線毎に沿岸漂砂量を設定することが可能なことから，水深方向の沿岸漂砂量分布が考慮できる点が特徴である．2-line モデルが Bakker(1968)により提案され，その後 Perlin(1978)，西村・クラウス(1979)によりその適用性が検討されている．さらに Perlin ら(1983)が n-line モデルを提案している．Bakker(1968)，Perlin(1978)のモデルは，平衡海浜断面形を仮定することで岸沖漂砂をモデルの中に考慮できるようにしている．しかし，岸沖漂砂の取り扱いには現地に適用する際は十分吟味する必要がある．一方，宇多・河野（1996）は従来の汀線変化モデルと同様に碎波諸元によって求めた沿岸漂砂量を，水深方向の沿岸漂砂量分布形にしたがって各等深線に分配して計算する方法を提案している．水深方向の沿岸漂砂量分布形は，現地あるいは水理模型実験から求めた水深変化量から経験的に与えられるとしている．このモデルの説明は，例えば「漂砂環境の創造に向けて」（土木学会，1998）等に譲り，その適用性については後に述べる．

一方，岸沖方向の沿岸漂砂量の与え方として，海浜流場あるいは沿岸流場を計算し，それから求めた局所漂砂量を各等深線間で岸沖方向に積分することで，岸沖方向の沿岸漂砂量分布形を求める方法もある（山下ら，1992；高木，1998；田島ら，1998）．

(2) 3次元モデル

3次元（海浜変形）モデル（平面2次元モデルとも言う）は，先に示した分類（図- 1）では，長期予測への適用には向かないこととなっているが，最近のコンピューターの進歩から，今後，計算範囲および対象期間によっては適用される場合が多くなると予想される．3次元モデルは，平面的な波浪場および海浜流場を解き，それら場から局所漂砂量を求め，その漂砂量の収支から平面的な水深の変化を求める方法である．こ

のモデルについては清水（1996）等に詳しい。この方法は一般的には、水面下の変化しか計算できないが、清水ら（1994）は、波浪の遡上域を便宜的に定め、その遡上域までの計算を行い、さらに岸沖方向に漂砂量を積分し汀線変化モデルと同様の取り扱いを導入することで、汀線の前進・後退を取扱えるようにしている。

(3) 経験モデル

経験モデルとは、離岸堤、ヘッドランド等の侵食対策構造物を設置した場合に予想される地形変化（汀線変化）を、現地構造物設置後の地形変化状況を統計的に集計して作成した図表等である。例えば、離岸堤や人工リーフ設置後の汀線変化については、離岸堤の諸元とその設置する海岸の特性から整理されている（海岸施設設計便覧, 土木学会, 2000）。また、ヘッドランド工法による汀線変化についても、概略の汀線変化の予測が可能である（Hsu・Evans, 1989; 芹沢ら, 1996）。

4. 侵食対策に対する適用例および適用限界

4.1 汀線変化モデル

汀線変化モデルは現在、侵食対策工の効果および港湾等の海岸構造物が建設された場合の影響を広範囲かつ長期にわたって検討するために用いられており、海岸を管理する上で重要な予測モデルとして実用的に用いられている。Kraus ら（1984）は大洗海岸において小笹・Brampton（1979）の漂砂量公式を用いて防波堤背後の回折領域での汀線変化を再現計算し、適切な漂砂量係数を得ている（図- 12）。また、離岸堤背後の汀線変化を水理模型実験結果と比較し、その適用性が高いことを示している（図- 13）。当初、汀線変化モデル中の波浪変形モデルにスネルの方法を適用してため、ほぼ平行等深線であるような単純な地形にしか適用できなかった。しかし、最近では、平面波浪場のモデルを汀線変化モデルに組み込むことが、コンピューターの発達とともに可能となっており、より複雑な地形、あるいは複雑な構造物に対しても汀線変化の再現性は高まってきた。例えば、防波堤の反射波の影響についても平面波浪場の計算結果を汀線変化モデルに取り込むことも可能である（森下ら, 1995）。しかし、やはりこのモデルの基本は沿岸漂砂の収支でなりたっており、さらに汀線など 1 次元の情報にすべてを集約していることなどから、適用範囲に制約があることを認識する必要がある。例えば、構造物付近に生じる循環流によって沖方向に移動する漂砂現象など、岸沖方向に移動する漂砂は基本的には取り扱えない。また、沿岸漂砂量を碎波諸元でのみ決定していることから、例えば離岸堤や防波堤などの沖合いで碎波が生じる場合には、それら構造物の効果・影響が考慮されない結果となる。このような場合には適宜、それら構造物による沿岸漂砂に対する影響を考慮するようモデル化することが必要となる。当モデルを現地に適用するに当たっては、現実の地形変化特性を十分把握した上で、海岸構造物を適切にモデル化し、適切な計算条件を設定すれば、十分汀線変化予測に耐えられるものである。

近年、侵食対策工法として注目されているヘッドランド工法に対して適用した事例を紹介する。ヘッドランド工法は、従来の突堤と異なり、設置間隔が広いことと、突堤先端に横堤を設置するなどして、漂砂の補足率を高める工夫がされている。そのような形状の構造物に対して、適切な漂砂の補足率を設定する必要がある。佐藤ら（1998）は、あらかじめヘッド部があるヘッドランド構造に対して 3 次元モデルを用いて沿岸漂砂の補足率を求めておき、その値を汀線変化モデルに適用している。まず、施設がない場合も含め突堤長およびヘッド部を変えた数種類のパターンで波浪・海浜流計算（図- 14）を実施し、突堤ライン上を通過する沿岸漂砂量を求める。次に、施設がない場合を基準とし、沿岸漂砂量の通過率を求め、突堤長との関係図を作成する（図- 15）。この結果をヘッドランド地点における通過漂砂量として計算を実施している。

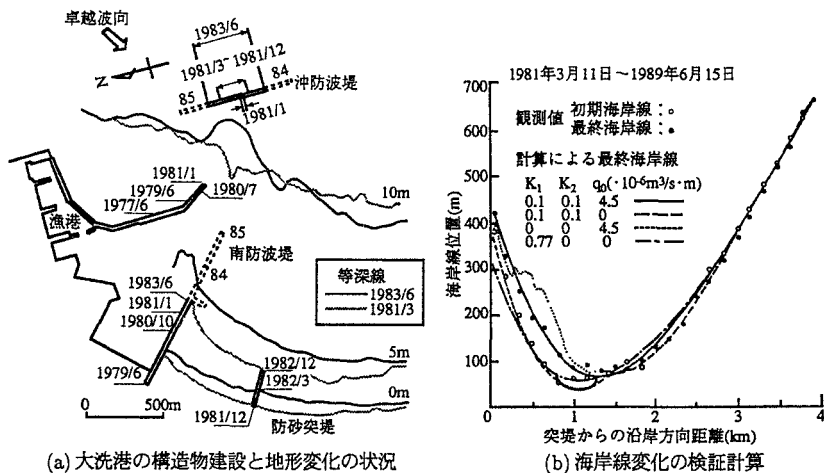
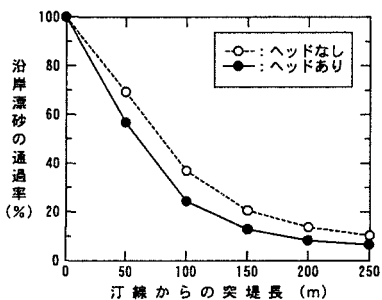
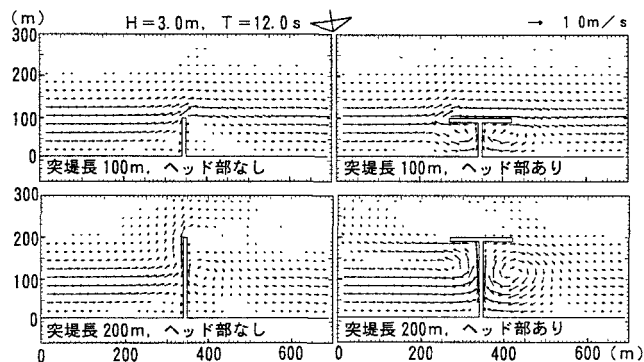
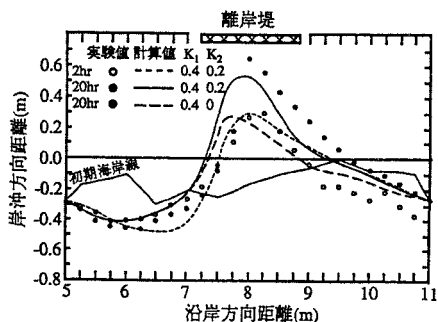


図- 12 大洗海岸の汀線変化計算(Kraus ら, 1984)



4.2 等深線モデル

最近では、宇多がこのモデルの現地への適用を精力的に行っている。宇多・河野（1996）は突出した地形に適用した場合について実験と比較している(図- 16)。汀線付近の等深線が直線形状の地形になろうとしているのに対し、水深の深い等深線は初期の地形のまま変化が少ないなど、特徴的な地形変化傾

向は実験結果と一致しているとしている。また、突堤に適応した場合(図- 17)、漂砂の上手側の突堤先端水深より浅い等深線が前進するのに対し、下手側等深線は後退しているが、突堤先端水深より沖合い部の等深線はほとんど変化していない。漂砂上手側の等深線が前進し、等深線の間隔が狭くなっているが、等深線距離の補正を施すならばより現実的な等深線変化となるとしている。さらに、防波堤および護岸のある場合(図- 18)にも適用している。

このモデルは汀線変化モデルの弱点である平面的な地形変化予測を疑似的に可能としている点で優れている。しかしながら、基本的には各等深線毎の沿岸漂砂量の収支に基づいているため、隣り合う等深線間での漂砂移動、すなわち岸沖漂砂などが存在する場合、特にそれが波によるものでなく、構造物によって作り出される循環流によるものとしたら、その影響を考慮した予測は不可能である。また、汀線変化モデルと同様、砕波点での波浪諸元のみで全沿岸漂砂量を求めていることから、構造物の沖合いで砕波する場合など工夫が必要である。

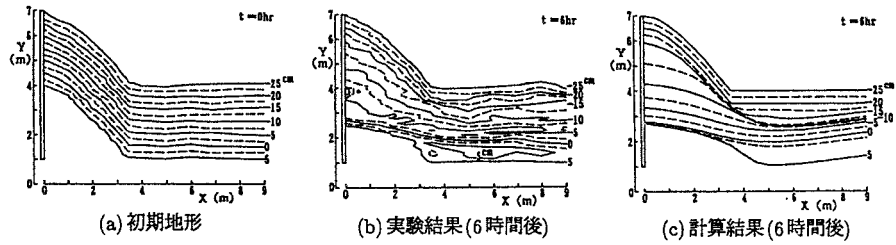


図- 16 等深線モデルによる突出地形の地形変化(宇多・河野, 1996)

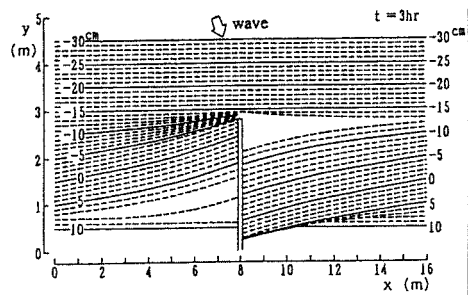


図- 17 等深線モデルによる突堤周辺の地形変化
(宇多・河野, 1996)

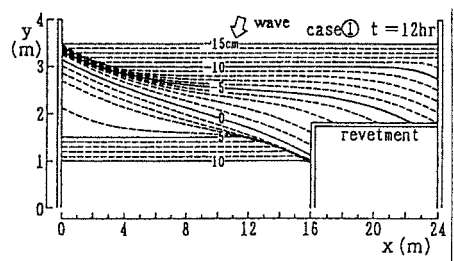


図- 18 等深線モデルによる防波堤周辺の地形変化
(宇多・河野, 1996)

4.3.3 次元モデル

3次元モデルを現地の海岸において比較的長期の予測に用いた事例を紹介する。Maruyama・Takagi(1988)は、日本海に面する港湾防波堤背後に発生した片トンボロ地形の発達過程を一冬期間、再現計算しており、港内に堆砂する土量を検証している。高木(1991)は、離岸堤背後のトンボロ地形の10ヶ月間の発達状況を再現計算している。清水ら(1994)は汀線の移動を考慮できるモデルにより、港湾防波堤背後の9ヶ月間の片トンボロ地形の発達状況を、また清水ら(1995)は同様のモデルにより、島式漁港背後のトンボロ地形の4年間の発達過程を再現している(図- 19, 図- 20)。平面的地形変化を汀線移動も含めて計算できる点で清水らのモデルは優れている。ただし、汀線移動のモデル化には汀線変化モデルのアイデアを取り込んでいることから、汀線が大きく湾曲したりした場合に精度が低下するとしている。また、このようなモデルを適用する場合は、波浪場、海浜流場を適宜地形が変化するたびに

計算しなおすことが定量的・時間的な水深変化に関係しており、地形との相互干渉を適切に評価する必要がある。なお清水ら(1997)は汀線変化モデル、等深線変化モデルおよび 3 次元モデルを相互比較し、各々のモデルの特徴・問題点を整理している。

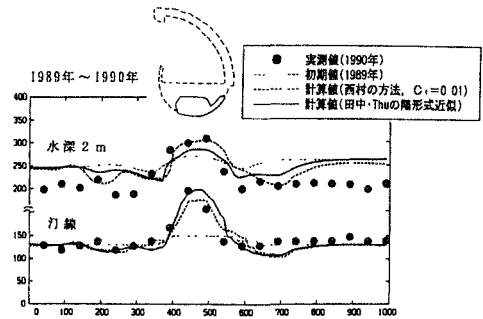


図- 19 島式漁港における 1 年間の地形変化の再現(1989～1990 年)(清水ら, 1995)

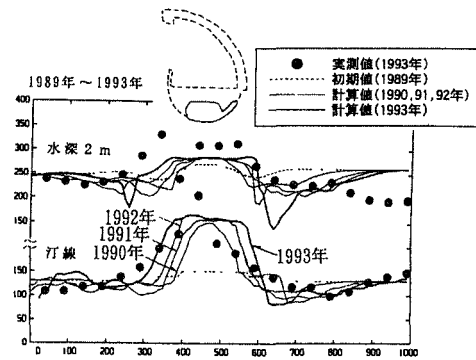


図- 20 島式漁港における長期的な地形変化の再現(1989～1993 年)(清水ら, 1995)

4.4 汀線変化予測モデルの利用の仕方

ここでは、汀線変化モデルの現地侵食対策への利用方法について示す。図- 21、図- 22 には、千葉県の北九十九里海岸における侵食対策検討についての検討事例である(鳥居ら, 2001a)。現地における空中写真から得られた汀線変化状況を再現計算することで得られた現況の沿岸漂砂量分布を基に、ヘッドランド工法とサンドリサイクルによる養浜をあわせることで、汀線の後退を必要最小限に抑え、将来的には供給量にみあった沿岸漂砂量分布に移行させる計画であり、この実現性について、汀線変化モデルで見通しをたてることが可能である。また、図- 23 はヘッドランド工法を侵食対策に適用するに当たり、ヘッドランドの施工順序を漂砂の上手から、下手から、両者の複合した案とした場合の汀線変化と、侵食面積の合計値の時間変化である。このように、施工順序により侵食状況が異なることから、現地の状況に合わせた施工順序の検討も可能である。なお、このようなシミュレーションを実施することにより、計画策定に役立つだけでなく、地元の人にもわかりやすく説明できる。

一方、鳥居ら(2001b)は、現地の波浪条件を異常波浪も含めて統計的性質を満足するように設定し、モンテカルロ法により汀線変動を確率的に評価する方法を提案している。今までの汀線変化予測モデルは設定した条件下での確定値であったのに対し、このような方法を適用すれば将来の汀線位置を確率的に示すことが可能と考えられる。波浪条件も含め、モデルに設定しているいくつかの不確定パラメータについても同様の取り扱い方が今後可能と考えられる。

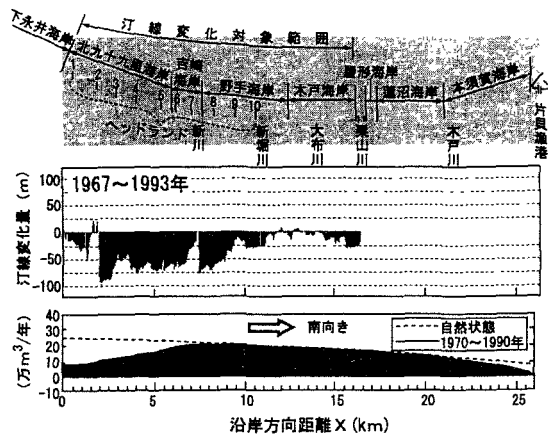


図- 21 北九十九里海岸の現状(鳥居ら, 2001)

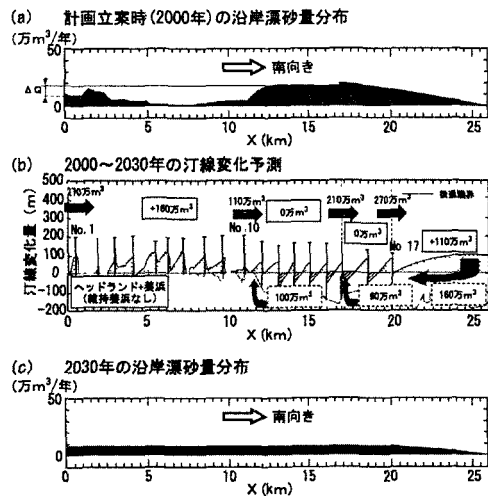


図- 22 北九十九里海岸における侵食対策の効果

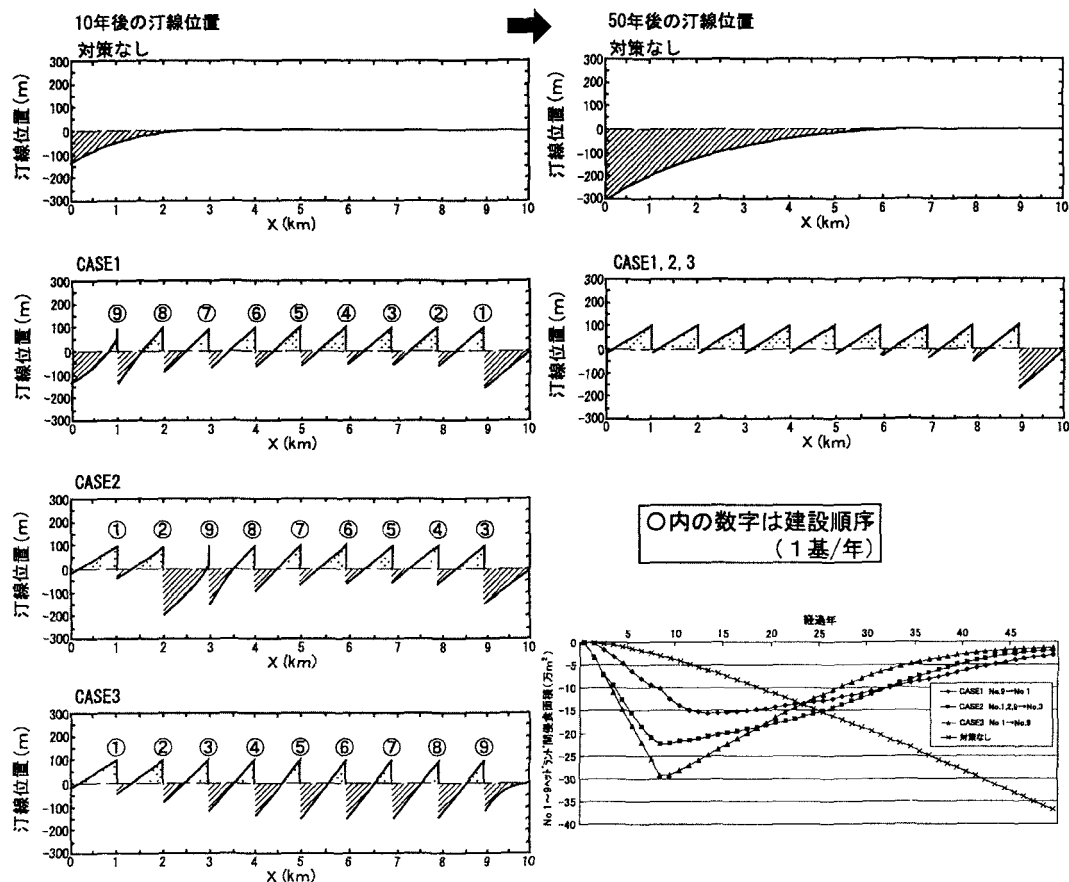


図- 23 ヘッドランド施工順序の検討

5. おわりに

著者は建設コンサルタントとして海岸の漂砂の問題にかかわって 20 年が経つ。入社した当時は、海浜変形を予測する方法として既に、汀線変化モデルが使われ、また 3 次元モデルもまだモデルとしては未熟ではあったが使われていた。そのように考えると、実務における海浜変形の予測方法はこの 20 年で大きく変わったとは言えない。しかし、現在においては、海岸の情報量がその当時と比べ格段の増えたこともあり、モデルに入力する条件の精度は大きく向上している。また、そのような蓄積された観測情報を用いて計算条件をキャリブレーションすることが可能となったことから、予測の精度も向上したと考える。さらに、コンピューターの進歩とともに、20 年前では考えられなかったほどに格子間隔を細かくして計算することが可能になったり、また外力場である波浪場の計算手法についてはより高精度のモデルの開発が進み、それらを利用した地形変化計算も可能となってきている（例えば、佐藤・Kabiling, 1993, 1994）。

しかし、やはり地形変化の予測、特に長期予測は難しい問題が多い。コンピューターが進歩したからといって、実時間レベルでの予測はまだ実用的ではない。例えば実時間の計算が可能となっても、数値計算上のわずかな誤差や数値粘性等により、長時間のシミュレーションにおいて安定な解が得られ続けるかは疑問である。モデルにしても大局的には現象を捉えていても細かな漂砂機構までは把握しきっていないとも言いがたい。また、短期の場合は無視しえた現象が、長期の予測の場合には支配的となる場合もある。さらに土砂の供給源などの、いわゆる境界条件によって予測結果は大きく変化することからも、そのような境界条件を長期的に予測することが必要となってくる。

以上、長期予測には悲観的なことを述べたが、一方、コンピューターはまだまだ進歩することが予想される。特に、並列コンピューターは大規模計算においては主流になりつつある。パソコンを何十台、何百台とネットワークでつないだ PC クラスタなどは比較的安価でスーパーコンピューター並の能力を持つシステムの構築も可能な状況である。このようなコンピューターテクノロジーを駆使すれば、3 次元のモデルにより長期的な地形変化が可能となるであろう。図-24 には 3 次元モデルと等深線モデルをコンパインしたモデルにより、複数の PC で計算するアイデアを示したものである。20 年後にはこのようなモデルが実現しているだろうことは十分予測されることである。

一方、現段階のモデルでも十分その使い方によっては有効な方法であることに違いない。本間は海岸環境工学（1985）のまえがきで次のように述べている。「長期予測については大局的な計算方法によらざるを得ないと思われるが、ただ、海岸地形が収束性のものか、容易に収束しないものであるかの判定が長期予測では重要ではないか」。長期予測モデルを用いれば、侵食海岸において対策の効果を具体的な数値の基に理解することが可能である。また、沿岸域を開発する場合、その開発行為が周辺海浜の変形にどのように影響するかという、アセスメントの手法としての利用が可能である。

このように数値モデルは便利な道具ではあるが、使い方には注意を要する。予測する技術者はまず現状の土砂の収支から、将来の土砂収支の変化を予見した上で、それをモデルで確認するといった手順が必要である。あくまでも数値モデルは予測のための道具の一つであり、数値モデルにのみ頼った予測はしないことが大切である。

我々はこの予測技術を駆使して、日本の海岸を美しい状態で後世に残したいものである。去年まで海水浴で遊んだ砂浜が、今年は忽然と消えてしまう、あるいはブロックで埋もれていることだけは避けたい思いは、筆者だけではないであろう。

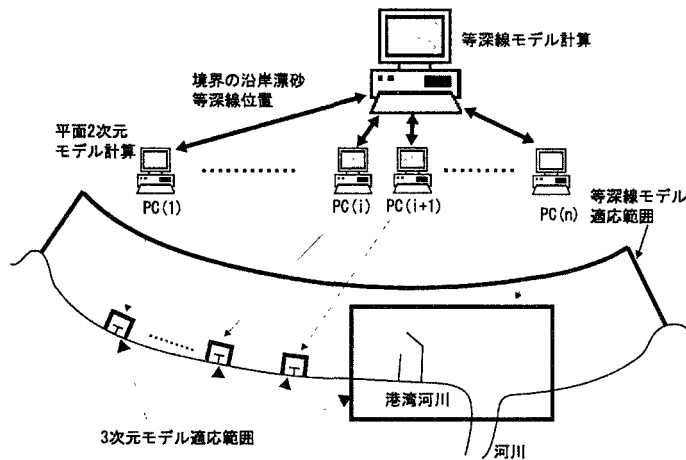


図- 24 長期地形変化モデルのアイデア

参考文献

1. 青木伸一・真田誠至・歌津宏康(1999)：天竜川以西の遠州海岸の汀線変化と沿岸漂砂量分布の推算, 海岸工学論文集, 第 46 巻, pp.661-665.
2. 浅野敏之・幸野淳一・佐藤孝夫・嶺泰宏(2000)：衛星画像データを用いた台風時波浪による汀線変化の解析, 海岸工学論文集, 第 47 巻, pp.671-675.
3. 入江功・栗山善昭・田川昌宏(1985)：物理モデルと数理モデルとの組み合わせによる海底地形の予測, 第 32 回海岸工学講演会論文集, pp.345-349.
4. 宇多高明(1982a)：新しい海浜変形モデルによる河口砂洲の変形予測, 土木学会論文報告集, 第 322 号, pp.77-88.
5. 宇多高明(1982b)：砂でできた人工島の変形予測, 第 29 回海岸工学講演会論文集, pp.289-293.
6. 宇多高明・陶山幸夫・中村正敏・富士川洋一(1988)：皆生海岸沖合部における地形変化とその予測, 第 35 回海岸工学講演会論文集, pp.432-436.
7. 宇多高明・河野茂樹(1996)：浜変形予測のための等深線モデルの開発, 土木学会論文集, No.539/II-35, pp.121-139.
8. 宇多高明 (1997)：日本の海岸侵食, 山海堂, 442p.
9. 宇多高明・住谷迪夫・矢澤肇・大谷靖郎・厚坂祐次(1998)：展開座標を用いた汀線変化モデルによる親沢鼻砂嘴の地形変化予測, 海岸工学論文集, 第 45 巻, pp.541-545.
10. 沿岸開発技術研究センター：全国港湾海洋波浪観測資料, NOWPHAS.
11. 小笹博昭・Alan H Brampton(1979)：護岸のある海浜のてい線変化計算, 港湾技術 研究所報告, 第 18 巻, 第 4 号, pp.77-104.
12. 国土交通省河川局砂防部海岸室・国土交通省国土技術政策総合研究所河川研究部海岸研究室：海象年表.
13. クラウス, N.C.・針貝・久保田(1981)：大洗海岸における汀線変化シミュレーションー防波堤背後の碎波と汀線変化, 第 28 回海岸工学講演会論文集, pp.295-299.
14. クラウス, N.C.(1982)：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.
15. 運輸省河川局海岸室監修(2000)：海岸関係法令例規集, pp.1250.

16. 合田良実(1990)：港湾設計物の耐波設計,波浪工学への序説,鹿島出版会,増補改訂版,pp.49-51.
17. 佐藤慎司・Kabiling,Michael(1993)：Boussinesq 方程式を用いた波浪・海浜流・海浜変形の数値計算,海岸工学論文集,第 40 巻,pp.386-390.
18. 佐藤慎司・Kabiling,Michael(1994)：波打ち帯を含む三次元海浜変形の数値モデル,海岸工学論文集,第 41 巻,pp.401-405.
19. 佐藤慎司(1998)：海岸の地形環境モデル,1998 年度(第 34 回)水工学に関する夏期研修会講義集,B-2,20p.
20. 佐藤慎司・山本幸次・和田一範・伊澤武仁・大谷靖郎・橋本新(1998)：大曲海岸におけるヘッドランド周辺の漂砂観測と海浜変形予測,海岸工学論文集,第 45 巻,pp.556-560.
21. 佐藤慎司・山本幸次・桜井亘・村野幸宏・高木利光・厚坂祐次(1999)：富士海岸における侵食対策としての動的養浜の効果,海岸工学論文集,第 46 巻,pp.676-680.
22. 清水琢三・熊谷隆宏・三村信男・渡辺晃(1994)：汀線変化を考慮した 3 次元海浜変形長期予測モデル,海岸工学論文集,第 41 巻,pp.406-410.
23. 清水琢三・山田晶子・内山一郎・渡辺晃(1995)：汀線変化を考慮した 3 次元海浜変形モデルの現地適用性,海岸工学論文集,第 42 巻,pp.606-610.
24. 清水琢三(1996)：海浜変形シミュレーション,1996 年度(第 32 回)水工学に関する夏期研修会講義集,B-5,26p.
25. 清水琢三・山田晶子・渡辺晃(1996)：沿岸漂砂量の岸沖分布と漂砂量係数,海岸工学論文集,第 43 巻,pp.571-575.
26. 清水琢三・高木利光・佐藤勝弘・山田晶子(1997)：海浜変形モデルの相互比較,海岸工学論文集,第 44 巻,pp.506-510.
27. 芹沢真澄・宇多高明・三波俊郎・古池綱・神田康嗣(1996)：修正 HSU モデルによるヘッドランド周辺の最適安定海浜形状の計算法,第 43 回海岸工学講演会論文集,pp.646-650.
28. 全国港湾海洋観測資料.
29. 高木利光(1991)：地形変化を波・海浜流場に考慮した海浜変形予測システム,第 38 海岸工学講演会論文集,pp.396-400.
30. 高木利光・川原陸人(1995)：汀線予測変化におけるパラメーター逆解析,海岸工学論文集,第 42 巻,pp.626-630.
31. 高木利光(1998)：海岸線変化モデル,漂砂環境の創造に向けて,第Ⅲ編,2.3,土木学会海岸工学委員会研究現況レビュー小委員会編,pp.232-245.
32. 田島芳満・清水琢三・関本恒浩・渡辺晃(1998)：等深線変化モデルの改良とその適用性について,海岸工学論文集,第 45 巻,pp.546-550.
33. 田中則男・灘岡和夫(1982)：汀線変化予測モデルの開発と現地への適応,港湾技術資料,No.436,pp.1-40.
34. 土木学会 海岸工学委員会 海岸施設設計便覧小委員会(2000)：海岸施設設計便覧,(社)土木学会,582p.
35. 土木学会 海岸工学委員会 研究現況レビュー小委員会(1994)：海岸波動ー波・構造物・地盤の相互作用の解析法,(社)土木学会,520p.
36. 土木学会 海岸工学委員会 研究現況レビュー小委員会(1998)：漂砂環境の創造に向けて,(社)土木学会,359p.
37. 鳥居謙一・山本幸次・高木利光(2001a)：沿岸漂砂量分布図を活用した侵食対策計画の評価法の提案,海岸工学論文集,第 48 巻,(印刷中).

38. 鳥居謙一・福島雅紀・佐藤慎司・高木利光・Ding Yan(2001b)：海岸管理のための汀線変動量の確率評価, 海岸工学論文集, 第 48 巻, (印刷中)。
39. 本間仁監修, 堀川清司編(1985)：海岸環境工学, 海岸過程の理論・観測・予測方法, 東京大学出版会, 582p.
40. 三井宏・越智裕・川村勇二(1976)：埋め立て護岸隅角部からの反射波の様相, 第 23 回海岸工学講演会論文集, pp.395-400.
41. 森下保壽・高橋次郎・川又良一・坂井隆行・片野明良(1995)：構造物の反射波による海浜変形の制御効果, 海岸工学論文集, 第 42 巻, pp.711-715.
42. 山下隆男・直屋義人・阿曾克司(1992)：長期海浜変形予測モデル, 海岸工学論文集, 第 39 巻, pp.411-415.
43. 山本幸次・福島雅紀・佐藤慎司(1999)：阿字ヶ浦海岸における長期断面変化と砂層厚, 海岸工学論文集, 第 46 巻, pp.636-640.
44. 山本幸次・鳥居謙一・笠井雅広・佐藤慎司(2000)：柱状コア採取と音波探査に基づく鹿島灘沿岸の堆積物特性の把握, 海岸工学論文集, 第 47 巻, pp.651-655.
45. Bakker, W.T.(1968)：The dynamics of a coast with groyne system, Proc. 11th Coastal Eng. Conf., ASCE, pp.492-517.
46. Hulsbergen, C.H., W.T.Bakker and G.van Bochove(1976)：Experimental verification of groyne theory, Proc. 15th Coastal Eng. Conf., ASCE, pp.1439-1458.
47. Hsu, J. R. C. and C. Evans (1989)：Parabolic bay shapes and applications, Proc. Intn. Civil. Engrs, Part 2, 87, pp.557-570.
48. Kraus, N.C., H.Hanson and S.Harikai(1984)：Shoreline change at Oarai Beach-Past, present and future, Proc. 19th Coastal Eng. Conf., ASCE.
49. Maruyama, K. and T.Takagi(1988)：A Simulation system of nearshore sediment transport for the coupling of the sea-bottom topography, waves and currents, IAHR Symposium on Mathematical Modelling of Sediment Transport in the Coastal Zone, pp.300-309.
50. Perlin, M. and R.G.Dean(1978)：Prediction of beach planforms with littoral controls, Proc. 16th Coastal Eng. Conf., ASCE, pp.1818-1838.
51. Perlin, M. and R.G.Dean(1983)：A numerical model to simulate sediment transport in the vicinity of coastal structures, U.S.Army Corp of Engirs., Coastal Eng. Res. Center Miscel. Rep., No.83-10, P.119.