

海岸の地形環境モデル

Models of Coastal Morphology

佐藤 慎司

Shinji Sato

(sato@pwri.go.jp)

目次	
1. はじめに	1
2. 数値モデルの現状	2
3. 数値モデルの改良に向けて	4
3.1 汀線変化モデルにおける波浪条件の設定	4
a) 汀線変化モデルの概要	4
b) 波浪の変動と代表値	5
3.2 沿岸の強い流れ	7
a) 季節風による流れ	7
b) 密度界面の運動による流れ	10
3.3 長周期波の役割	11
3.4 流域一貫した土砂管理計画の支援	13
4. 物理モデルの新たな試み	15
4.1 混合粒径の扱い	15
4.2 微細粒径底質の利用	17
5. おわりに	18
参考文献	18

1. はじめに

平成9年6月に環境影響評価法(いわゆる環境アセスメント法)が公布され、大規模な開発事業の実施に伴う周辺地域環境への影響評価が今まで以上に重要となった。同法では、スクリーニングやスコーピングなどの手続きが正式に位置づけられ、計画の早い段階からの検討と情報公開が求められている。海岸域においても、開発に伴う環境変化を、波や流れ場・水質・底質・地形・生態系などの項目について予測することが必要となり、個々の対象事業ごとにさまざまな予測モデルによる検討を行なうことがこれまで以上に重要となろう。本研修会では「沿岸域における環境評価技術としてのモデリング」が総合テーマとして設定されており、その目的の一つは、沿岸環境の変化に対する各種の予測モデルの現状についての認識を深め、今後の技術開発の指針を得る一助とすることであろう。海岸の環境影響評価の対象となる項目は前述のように多岐にわたるが、本稿では、これらの海岸環境の基盤となる海岸地形や底質の変化について、モデルの現状と課題を解説する。

日本では古くから沿岸域に人口が集中してきたため、海岸線の変形を容認しにくい環境に置かれている。一方、国土の大半が山がちな地形であるために、急流河川が多く、水害や土砂災害防止の観点から治山・治水工事が進められたため、海岸への流出土砂量が減少し、各地で海岸侵食問題が顕在化してきた。海岸侵食の原因としてはこの他に、河川や沿岸域からの土砂採取、海底谷や深海部への土砂流出、大規模な港の建設などによる沿岸漂砂の遮断、崖侵食防止対策に伴う周辺海域への土砂供給の減少などさまざまなものが考えられる(例えば、宇多, 1997)。侵食の速度は近年増加する傾向にあり、田中ら(1993)が新旧の地形図を比較して推定したところ、最近15年間に全国で年間160haの海浜が失われている。やや粗い計算であるが、海浜の移動高さを5mと見積もると約800万m³の土砂が沿岸域から失われていることになり、土砂の価格を3000円/m³とすると年間240億円の損失が生じている計算になる。長期にわたって進行する海浜変形の予測は、後述するように沿

岸漂砂量の評価に基づいて行なわれることが多いが、上記のような正味の土砂損失と海岸侵食は、沿岸漂砂の不均衡だけでは説明できず、海岸における土砂移動は消耗型のシステムで、供給がない限り総土砂量は減少するものであることを示唆している。地形環境の変化を予測する中長期モデルではこのような土砂の全体量の変化も含めたモデルを構築する必要がある。

このような海岸地形の変化を予測するためのモデルには、大きく分けて、概念(思考)(conceptual)モデル、物理(physical)モデル、数値(numerical)モデルの3種類がある。概念モデルとは、収集した海岸の諸特性をもとにあらゆる要因を分析し、理論的または経験的な法則を組み合わせることで机上で海岸地形の変化を解釈するものである。現地踏査に基づいて侵食原因を考察することや、土砂収支の推定を試みるなどがこれに含まれる。物理モデルでは、海浜変形の主たる要因を理想的に抽出した条件で水理実験が行われる。条件の設定と変更が比較的容易に行えるが、主要要因の抽出過程で漂砂機構に対する深い洞察が必要である。また、小規模の装置で移動床実験を行なう場合などには、相似性の確保が困難で結果の解釈に注意が必要である。数値モデルは、海浜の変形を記述するための基礎方程式系を構築し、適切な初期条件と境界条件のもとでこれらを解くものである。汎用的なモデルが構築できれば、諸条件の変化にともなう感度分析などが容易に行なえて強力な道具となるが、モデルの構築のためにはそれを検証するデータが不可欠となるため、完備されたデータが少ない現地条件への適用には制限を受けることが多い。このように、これら3種類のモデルにはそれぞれ得失があるので、実際には組み合わせて用いることが多い。

海岸の地形環境変化に対しては、古くは概念モデルによる現象の解明が進められ、その後、物理モデルと数値モデルが併用されるようになった。近年計算機の高速化が加速度的に進み、海岸の地形環境の変化に対しても数値実験が頻繁に行われるようになってきた。数値モデルには、模型縮尺の影響を受けない、各種パラメータを容易に変更できる、などの利点があるが、その反面、複雑な機構が重畳した現象に対してはモデルの構成則を確立することが困難で検証も難しい、などの課題も有しており、数値モデルの結果のみを過信することは危険である。

一般的な数値計算の落とし穴の例として「桁落ち」が挙げられる。これは、ほとんど等しい2つの数の差をとることによって有効数字が減少してしまうことである(例えば、宇野, 1963)。例えば、 $123.45 - 123.12 = 0.33$ の例ではもともと5桁の有効数字があったものが2桁に落ちてしまう。地形変化を予測する際に最も本質的となる正味の漂砂量の評価においてもこれに似たことが起こる。岸沖漂砂では通常、波の峰の通過とともに岸向きに移動した砂が、波の谷のもとでは沖向きに移動する。正弦的な流速変動のもとでは岸向き・沖向きに輸送される砂の量は等しいが、波の軌道流速の非対称性や平均的な流れの存在などが、両者の差を生み出し、これが実質的な地形変化に寄与する正味の漂砂量となる。それぞれの半周期間における砂移動量はたかだか2桁程度の有効数字でしか評価できないのが現状であり、しかも条件によってはほぼ等しい量となることから、それらを差し引きすることにより評価される正味の漂砂量はさらに精度が落ちることになる。このような「桁落ち」はさらに長い時間スケールの現象でも生じる。波浪の季節的な変化が繰り返される海岸では、高波時には沖向きの漂砂が卓越し、バーが形成され、静穏時には、岸向きの漂砂が卓越し、ステップやバームが形成される。これが可逆的に繰り返されれば長期的な変形は生じないが、わずかでも差があると徐々に変形が進むことになる。また、沿岸方向についても、波向が季節的に変動する海岸では、波向の変化に応じて海岸線がシーソーのように変形し、条件によっては、その差が残留変形となって残る場合もある。海浜の変形はこのように大きな振幅の変動を伴いながらある方向へ進行していくことが多いため、その予測に際してはまず、対象とする海浜変形の時空間スケールを正しく理解することが必要となる。

2. 数値モデルの現状

前節で海岸の地形環境モデルには3種類のモデルがあることを述べたが、その中で近年最も進歩したのは数値モデルであろう。海浜地形変化に関する数値モデルの現状については、本研修会においても、清水(1996)、

渡辺(1996)らにより詳細な現況レビューが行われているので、ここではモデルの基本的な考え方と最近の研究成果を簡単に紹介するとともに、主として実際の海岸への適用に当たって留意すべき点を述べる。

沿岸域では、波や流れの作用により底質の移動が生じる。その移動量や移動方向は、対象地点の波や流れなどの水理条件、底質粒径、海底地形などの特性によって決定されることになり、これらの諸特性と漂砂量との関係を表したものが漂砂量則である。沿岸域における漂砂は、その卓越方向に応じて、海岸に直交する方向への岸沖漂砂と海岸に平行な方向への沿岸漂砂に分類される。また、移動を引き起こす支配外力に応じて、波による漂砂と流れによる漂砂に分類されることもある。さらに、底質の移動機構に基づく分類として、掃流漂砂、浮遊漂砂、シートフロー漂砂などに分類され、それぞれの移動形態に対して漂砂量則の解明が進められ、各種の漂砂量モデルが提案されている。

海浜地形の変形は、正味の漂砂量の空間的な非均衡が原因となって生じ、地形変化の進行に伴って漂砂量も変化するため、地形変化を予測するためには、正味の漂砂量の時空間分布を推定する必要がある。岸沖漂砂の不均衡は断面地形の変化を引き起こし、沿岸漂砂の不均衡は主として平面的な等深線の移動や変形となって現れる。これらの海浜の変形には、一回の高波浪の来襲で生じる地形変化、季節的な海象条件の変化に伴う地形変化、漂砂系の環境変化に伴って数年から数十年かけて生じる変化、などさまざまな時間スケールがあり、これに対応して空間スケールも広い範囲にわたっている。対象とする地形変化のスケールに応じてモデルで考慮すべき支配外力も異なることがあるため、地形変化を正しく予測するためには、その時空間スケールに応じた適切な漂砂量モデルを用いる必要がある。

現在広く用いられている海浜地形変化モデルには、大きく分けて沿岸漂砂量の推定に基づくものと局所漂砂量の推定に基づくものがあり、前者は比較的長期にわたって進行する広領域の海浜変形予測に用いられ汀線変化モデルなどと呼ばれ、後者は短期間に生じる局所的な海浜変形予測に用いられ三次元モデルと呼ばれている。海浜の地盤高 z_b を計算するには、局所漂砂量ベクトル $\vec{Q}$ の推定値に基づき、次式の底質の連続式を解けば良い。

$$\frac{\partial z_b}{\partial t} = -\frac{1}{1-\lambda_v} \nabla \cdot \vec{Q} \quad (1)$$

ここで、 λ_v は地盤の空隙率である。三次元モデルは局所漂砂量ベクトル $\vec{Q}$ の分布を詳細に推定することにより、上式を直接解いて海浜地形変化を計算するもので、通常は波・流れ・砂移動のサブモデルで構成されている(例えば、本間・堀川, 1985)。de Vriend(1993)やNicholson et al.(1997)は、ヨーロッパの研究機関で開発された4~5種類の三次元海浜変形モデルの相互比較を行っている。最近のモデルでは、戻り流れの評価、波の軌道流速の非対称性の評価などが取り込まれ、主として波によって生じる断面地形変化と主として流れによって生じる平面的な地形変化の両方を統一的に扱えるようになってきた。三次元モデルは、年数回来襲波に対する構造物周辺の地形変化の予測などの短・中期変形の予測に使用される。

計算の労力さえ惜しまなければ、短・中期の変形予測ができる三次元モデルを力づくで走らせれば、原理的には長期予測が可能なはずである。しかし、現実には任意地点の局所漂砂量ベクトルを波や流れの特性などを用いて統一的に表現することは困難であるため、長期間の予測では前述の「桁落ち」の部分の誤差が蓄積され、不合理な結果となることがある。そのため、三次元モデルを長期予測に用いる際には、海浜の長期変形を引き起こす成分のみを抽出したモデル化を行い、計算の条件も長期変形の再現性を考慮して設定する必要がある。また、地形変化と外力場の計算をそれぞれどのような間隔で行うかも問題となる(例えば、高木, 1991)。実用的な観点では海浜の長期変形予測には、岸沖方向に積分した形の総沿岸漂砂量を用いて海浜地形変化を計算する手法が用いられている。沿岸漂砂量式を用いて地形変化の計算を行なううえでは、通常、断面形状は変化せずに岸沖方向に平行移動するのみであるという仮定が用いられる。このような仮定のもとでは、海浜地形の等深線形状は汀線と同様に移動することになるため、これらのモデルは汀線変化モデルまたはone-lineモデルと呼ばれる。

沿岸漂砂量の推定に基づく汀線変化モデルは、数ヵ月から数十年程度の中・長期の海浜地形変化の予測モデルとして実用に供されている。汀線変化モデルでは、長期的に見ると海浜断面に平衡断面が存在し、沿岸漂砂

量が碎波点での波高と波向によって決定されることを仮定して、漂砂量の過不足が断面の平行移動を引き起こすとして汀線の変形を予測する。適用の際には、対象地点の波浪特性から沿岸漂砂量を評価し、断面変形の仮定に基づいて汀線や等深線の移動を計算することになる。構造物周辺では、沿岸方向の波高分布の影響を考慮した漂砂量公式(例えば小笹・Brampton, 1979)を用いることにより、構造物による波浪変形効果を取り込んだ地形変化予測が行える(例えば, Hanson・Kraus, 1991)。

100年以上のさらに長いスケールで進行する超長期の地形変化を扱う場合には、既述のように、短期スケールでは無視しえた現象が支配的な影響を持つことがある。しかし、予測結果を検証するデータはほとんど無く、簡単なモデル化しか行えないのが現状である。例えば宇多(1989)は九十九里海岸において、崖の侵食量から約6000年間に進行した海岸の形成過程を推定しており、真野・沢本(1998)は、阿武隈川の供給土砂による過去5000年間の仙台海岸の形成機構を推定している。また、de Vriend et al.(1993)は、超長期モデルを構成するうえで注意すべき点について議論している。このような長いスケールの海浜変形は、地球温暖化による気候変化や海面上昇問題への対応を考える際にも重要となる。

これらの数値モデルの最近の進展で特筆すべき点は、(1) 三次元モデルで有限振幅性を考慮できるようになったこと(例えば、佐藤・Kabiling, 1994; 丸尾ら, 1995), (2) 沿岸漂砂量モデルと局所漂砂量モデルの長所を活かす形で、物理過程に立脚したモデルの開発が進められたこと(例えば、清水ら, 1995), (3) 汀線変化モデルが拡張され、等深線形状の変化や構造物周辺の海浜変形問題にも応用できるようになったこと(宇多・河野, 1996), などであろう。(1)により、非対称な波動流速による砂移動や波打ち帯の砂移動が取り込めるとともに、長周期波の発達を含めて波と流れを同時に解析できるようになり、モデルの適用範囲が広がった。また、

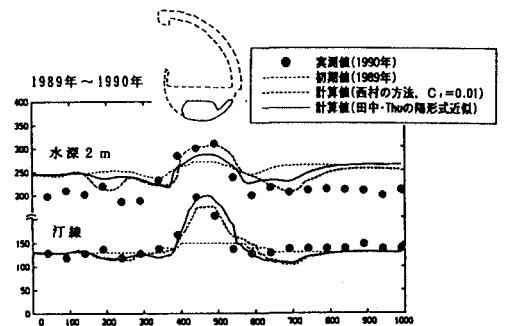


図-1 島式漁港背後の海浜地形変化

(2)により流れの評価を介した局所漂砂量を用いて中長期の予測ができるようになった。(3)により、沿岸漂砂量の推定に基づく海浜変形モデルが、海浜の断面変形や構造物周辺の海浜変形予測へも拡張されるとともに、混合粒径海浜や養浜砂の挙動把握(例えば、宇多ら, 1997)などにも適用範囲が広がった。図-1に清水ら(1995)による島式漁港背後の海浜変形予測結果の一例を示す。漁港背後に発達する循環流の影響により土砂の堆積が進むことが予測されている。構造物近傍に発達する海浜流による地形変化は、従来のモデルでは波高の沿岸方向への勾配を用いていわば沿岸漂砂量を補正する形で予測されていたが、清水ら(1995)のモデルでは海浜流場の評価を介して物理過程に立脚した形のモデルに整理され、モデルの汎用性が高まったと言える。

3. 数値モデルの改良に向けて

3.1 汀線変化モデルにおける波浪条件の設定

a) 汀線変化モデルの概要

Pelnard-Considére (1954)は、海浜の断面はほぼ平衡状態で平行移動すると仮定し、沿岸漂砂量の非一様性が海浜地形の変化を引き起こすと考えた。沿岸方向に x 軸をとり、海岸線を $y = y_0(t)$ で表すと、底質の連続式は以下ようになる。

$$\frac{\partial y_0}{\partial t} + \frac{1}{(1 - \lambda_v)h_i} \frac{\partial Q_x}{\partial x} = 0 \quad (2)$$

ここで、 Q_x は沿岸漂砂量、 λ_v は地盤の空隙率、 h_i は地形変化が生じる海浜の移動高さである。沿岸漂砂量は碎波点における波の入射角 α_b を用いて一般に次式で与えられる。

$$Q_x = F \sin \alpha_b \cos \alpha_b \quad (3)$$

ここで、 F は波の条件によって定まる定数であり、沿岸漂砂量公式として Komar・Inman(1970) による Shore Protection Manual 公式 (CERC, 1984) を用いると

$$F = 0.77 \frac{(Ec_g)_b}{(\rho_s - \rho)g} \quad (4)$$

で評価できる。ここで、 E は波のエネルギー密度、 c_g は群速度、 ρ_s 、 ρ はそれぞれ底質粒子および海水の密度、 g は重力加速度であり、添字の b は碎波点での値を表す。これらを(2)式に代入すると、波の入射角が小さい場合には若干の近似計算の後、次式が得られる(野田・橋本, 1981)。

$$\frac{\partial y_0}{\partial t} - A_0 \frac{\partial^2 y_0}{\partial x^2} = 0, \quad A_0 = \frac{F}{(1 - \lambda_v)h_i} \quad (5)$$

上式は拡散方程式であるから、適当な初期条件と境界条件のもとに解を求めることができる。係数 A_0 は沿岸方向の拡散係数を表し、来襲波のエネルギーが大きい時に大きな値となる。係数 A_0 の値が大きい程地形変化の影響が遠くまで及ぶことになる。

b) 波浪の変動と代表値

上述の(3)、(4)式で与えられる沿岸漂砂量はほぼ碎波波高の2.5乗に比例するため、波高の大きな期間の漂砂量が極めて大きくなる。時々刻々の漂砂量を全て積分して平均したものが正味の沿岸漂砂量であり、地形変化に寄与することになるが、実際の計算では効率の点から代表波の条件を単純化して設定することになる。沿岸漂砂量が碎波点のエネルギーで評価されているため、通常は波のエネルギーを重みとして平均した波(いわゆるエネルギー平均波)を代表波として用いることが多い(例えば、建設省河川局海岸課, 1994)が、茨城県鹿島灘海岸や三重県七里御浜のように波向が季節により変動する海岸などでは特に、代表波浪の設定法が問題となる。Bodge(1994)は、沿岸漂砂の向きが変動する海岸において、変動を考慮した場合と変動を差し引きした正味の漂砂のみを考える場合とでは、特に河口周辺の地形変化が大きく異なることを示した。また、真野ら(1996)は、エネルギーフラックスを正確に代表する波向の代表値の決定法を検討している。

波浪条件の設定法が地形変化の予測結果に及ぼす影響を、モデル条件を設定して検討する。ここでは、沿岸漂砂が活発な海岸を想定し、碎波波高1m、碎波波向5度、海浜の移動高さ10mを代表値として選ぶ。この条件の波浪が1年間継続したとすると、SPM公式((3)、(4)式)による沿岸漂砂量は93万 m^3 /年となり、宇多(1997)により整理されている日本全国の沿岸漂砂量の実態より1オーダー大きい程度となる。波浪条件としては、頻繁に生じるものであるが、実際の海岸ではこのような波浪条件が続くことは少なく、季節によって波向特性の異なる波浪が来襲することもあるため、年間で平均すると1オーダー小さな沿岸漂砂量となるものと考えられる。汀線変化モデルの波浪条件を設定する際には、設定作用日数を考慮して波条件を設定するなどの対応が取られるが(例えば、粕谷ら, 1997)、この際、汀線変化の拡散方程式の拡散係数が設定波浪の大きさに応じて変化するため、最終的な予測結果は波浪の設定法に敏感な影響を受けることになる。それまで変形が生じていなかった直線上の海岸に、沿岸漂砂を完全に捕捉する突堤を建設した場合を想定して、以下の条件で10年後の汀線の変形を計算した。

- (I) 1年の前半と後半で波向が変化する場合(正味の漂砂量はゼロ)
 - (II) (I)の前半がやや長く、正味の砂移動が生じる場合
 - (III) (II)と同量の沿岸漂砂が単一の代表波(波向角が小さい)で生じる場合
 - (IV) (II)と同量の沿岸漂砂が単一の代表波(波高が小さい)で生じる場合
- (II)~(IV)の条件における直線状海岸での沿岸漂砂量は、いずれも9.3万 m^3 /年である。図-2に10年後の1年間における汀線変化の計算結果を示す。(I)のケースでは、正味の漂砂量はゼロであるにも関わらず地形変動が生じる。変形は突堤から2km程度の領域にまで及び、突堤近傍の汀線の変動幅は100m程度である。これに対し、正味の漂砂が生じる(II)のケースでは、1年間の変動に加えて、図の左側の上手側で堆積、下手側で侵食が生じ、突堤から2km離れた地点でも20m程度の汀線の前進・後退がみられる。単一の代表波で計算した場合には、(III)の波向を小さく設定した場合には、1年間の変動はみられず、(II)の条件の平均的な変形のみが予測さ

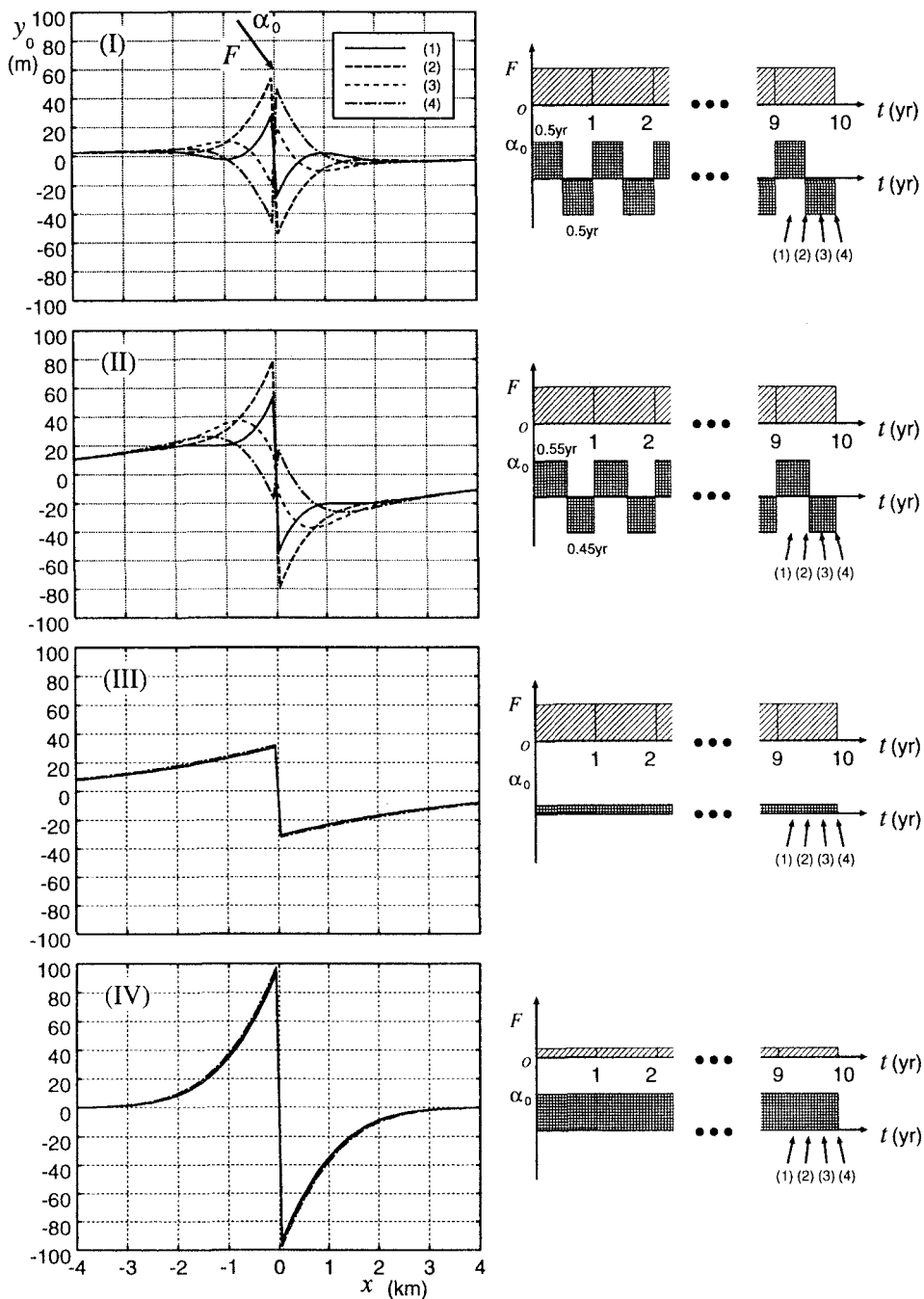


図-2 突堤周辺の汀線変化

れているのに対して、(IV)の波高を小さく設定した場合には、変形が及ぶ範囲は狭くなるが、突堤近傍での変形量は逆に大きく評価される結果となる。このように、正味の沿岸漂砂量が同じでも設定する波浪条件によって汀線の変形はかなり異なる。実際には、構造物周辺の波浪場の変化も設定条件の影響を受けるので、さらに

複雑な結果となると考えられる。

このように、汀線変化モデルの適用にあたっては、波向を含めた波浪条件を合理的に設定する必要があるが、実際には波向が16方位程度でしか記録されていないことが多いため、現地波浪データから波向を合理的に設定しようとしても、基礎データが不足していることになる。宇多・畑中(1993)も指摘しているように、海浜変形の予測に用いる基礎データとしては16方位による波向は不十分であり、さらに分解能の高いデータの保存が求められている。建設省では、このような目的に応えるため、1996年度より1度単位の波向データの分析と海象情報のCD-ROMによる保存と利用を進めており(加藤, 1998)、今後これらのデータを活用してさらに合理的な条件設定法を確立する必要がある。

3.2 沿岸の強い流れ

a) 季節風による流れ

石川海岸は、北に滝崎、南に加佐ノ岬を有する延長74kmの海岸である。手取川扇状地が侵食されて形成された海岸として古くから侵食を受けていることで知られており、過去80年間に200m以上もの侵食を受けた箇所もある。海岸のほぼ中央部には昭和39年から45年にかけて金沢港が建設されており、同港の波浪観測記録によると沖波の最頻入射方向はNNWで、これにより海岸線を南へ向かう沿岸漂砂が卓越するとされている。昭和44年以降、建設省の直轄事業で離岸堤が建設され、現在はその区間での海岸線の後退はほぼ抑えられている。しかし、近年の調査で沖合いにおける侵食は続いていることがわかってきた(田中ら, 1996, 1997)。図-3は、手取川周辺海岸の各ブロックにおける土砂量の経年変化を示したものであり、汀線から1km以上離れた沖合い領域での土砂量が長期的に減少していることがわかる。本海岸の平均勾配はほぼ1/100であることを考慮すると、水深10mを超える沖合いで地盤が低下している傾向があることになる。

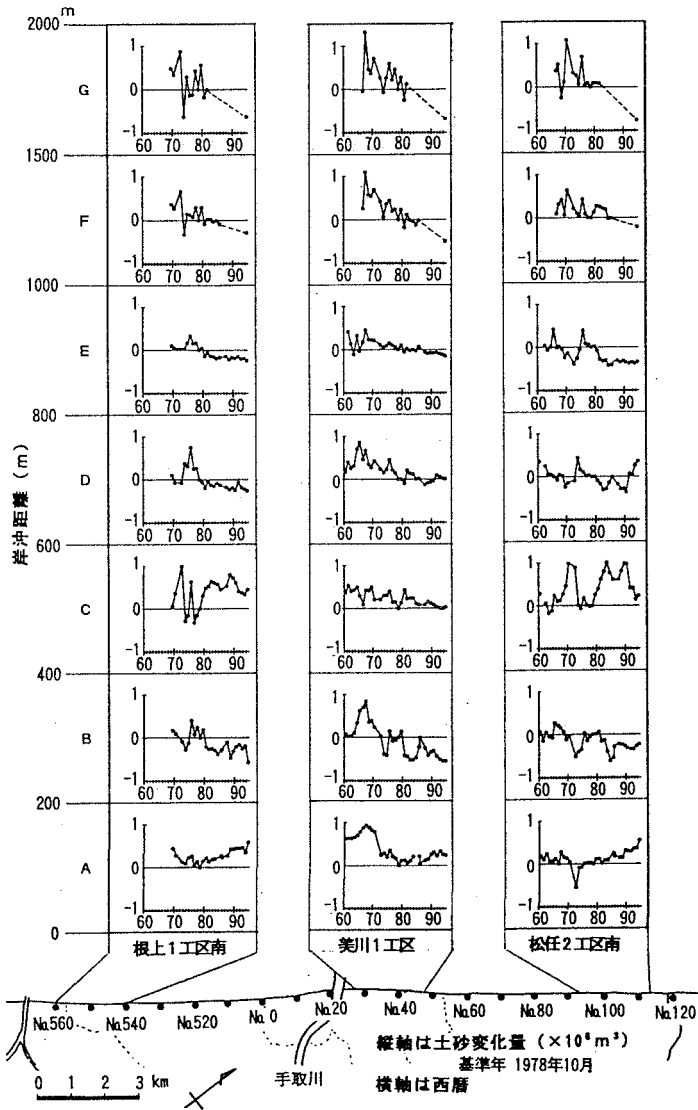


図-3 石川海岸の土砂量の経年変化

図-4は石川県南部の表層地質を示したものである(経済企画庁, 1974)。手取川扇状地に砂礫が広く分布し、砂浜は南部の福井県境付近と北部の羽咋付近で広い幅を有している。図-5は海域の表層底質の中央粒径分布を示したものであり、図-6、図-7は金沢港より南部の海域の砂層厚とAA', BB'断面における地質構造を示したものである(田中ら, 1997)。南部海域では南端の加佐ノ岬付近に露岩域が見られ、底質の中央粒径が粗いうえに砂層厚も薄い。北に向かうにつれて粒径が細くなり砂層厚も厚くなる傾向がある。佐藤(1995)や田中ら(1996, 1997)によれば、石川海岸の沖合いでは冬季風浪時に北東向きの強い流れが観測され、底質の浮遊と地盤高変化が生じている。沖合いの流れは強風と高波の作用で発達するものであり(佐藤, 1996a), 季節風の特徴からほぼ常に北東向きの流れが発達するため、その流れによる土砂の輸送方向は、前述した砕波帯内の沿岸漂砂と逆向きである。

海岸の形成過程における沖合い流れの貢献度を把握するために、局所漂砂量公式で沖合いでの砂移動量を評価してみる。波浪条件としては、観測データを参考にして、平均的な時化の条件から $H_{1/3}=4\text{m}$, $T_{1/3}=8\text{s}$ とし、沖合いの流れは場所によらず海岸線に平行で 30cm/s の強さをもつものとした。また、海底勾配 $1/100$ 、底質粒径 0.2mm として、先述の諸元で海岸に直角に入射する規則波の変形を首藤(1974)の浅水理論式で計算し、底面摩擦応力を田中・首藤(1980)の摩擦係数により評価することにより砕波帯外における局所漂砂量を評価した。用いた漂砂量公式は現地条件への適用性が確かめられている次式を用いた。

$$q_c = A_c(\Psi_m - \Psi_c)u_c s D \quad (6)$$

ここで、 q_c は体積漂砂量、 Ψ_m は波・流れ共存場におけるシールズ数、 Ψ_c は移動限界シールズ数、 u_c は流れの速度、 s は底質の水中比重、 D は中央粒径であり、 A_c は無次元定数である。係数 A_c や Ψ_c の値は清水ら(1990)を参

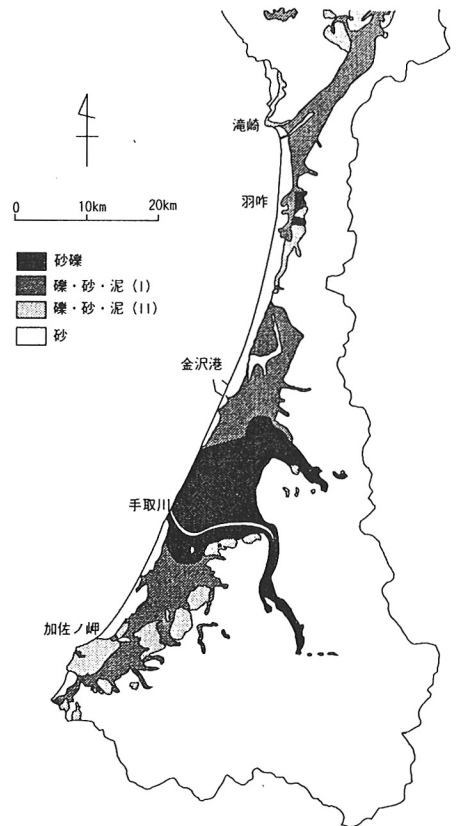


図-4 石川海岸周辺の表層地質

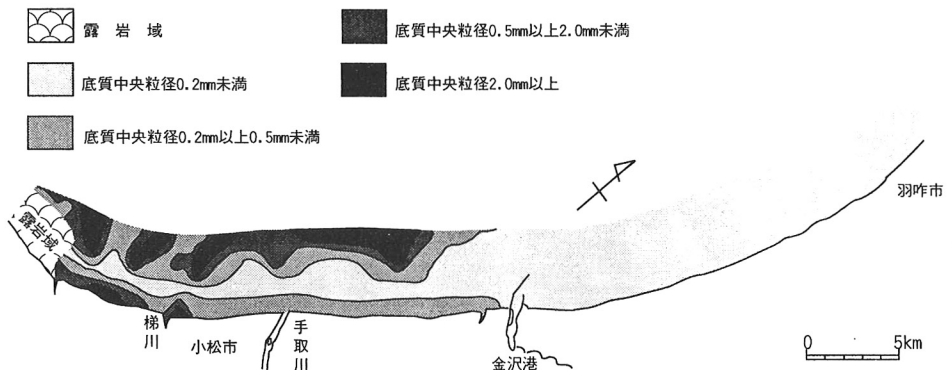


図-5 石川海岸の表層底質の中央粒径分布

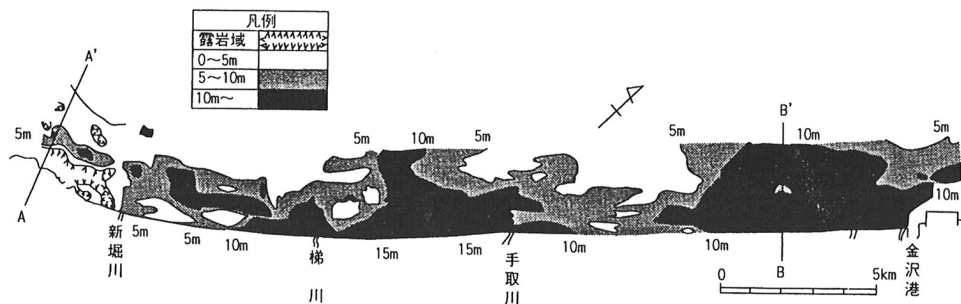


図-6 石川海岸の砂層厚の分布

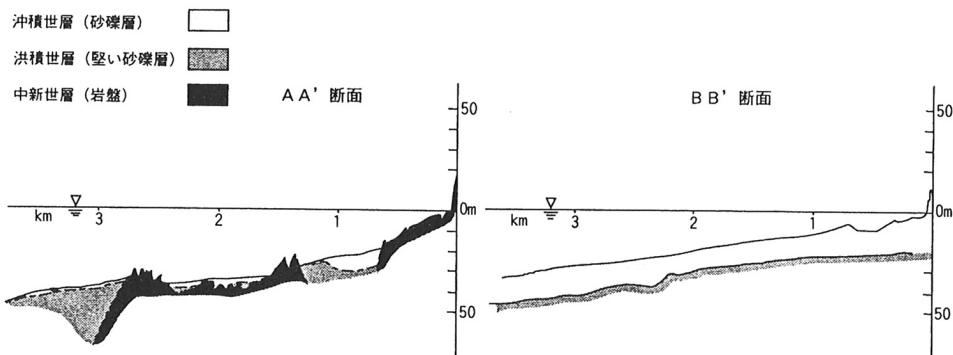


図-7 石川海岸の地質構造の断面分布

考にして、 $A_c = 3$ 、 $\Psi_c = 0.11$ とした。

図-8は波高の変化と局所漂砂量の分布を示したものである。水深30m付近から砂移動が生じ、砕波点となる水深6m地点に向けて徐々に漂砂量が大きくなっていることがわかる。大水深の領域で流れによる砂移動が生じていることは、田中ら(1997)が報告した石川海岸の観測で、水深30m地点でも実質的な地形変化が起きていたこととも整合する。図の漂砂量分布を岸沖方向に積分して沖合いにおける総漂砂量 Q_c を計算すると、 $Q_c = 0.49\text{m}^3/\text{s}$ となる。1回の時化の継続時間を24時間とし、さらにこのような時化が一年に10回あるとすると、年間の総土砂移動量は約42万 m^3 となり、砕波帯内の沿岸漂砂量に匹敵するオーダーとなる。石川海岸や新潟海岸の観測例からもわかるように、季節

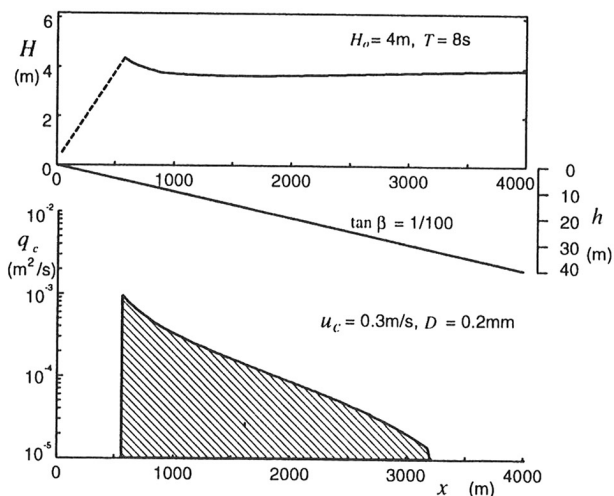


図-8 沖合い流れによる土砂移動

風に伴う沖合いの流れはほとんど常に一方向へ(北東向き)の流れであるため、波向のわずかな変化に応じて移動方向が変動する砕波帯内の沿岸漂砂に比べて、効率的な土砂輸送が実現している。

これらから石川海岸の土砂動態を推定すると、主としてNNW方向から入射する波による沿岸漂砂で汀線付近の砂は南西へと輸送されるが、冬季高波浪時には北東向きの強い流れが同時に発生するため、碎波点より沖側では浮遊した細かな底質が北東向きに輸送される。沖合いで輸送された細かな底質は、滝崎付近で石田ら(1984)が示した南向きに反転する流れによって北側の海岸に漂着し、多段砂州と渚ドライブウエーを有する特徴的な海岸と幅の広い砂浜を形成してきたものと考えられる。このように、石川海岸の海岸過程では、大規模な流れの発達による砂輸送を考える必要があり、海岸保全対策を検討する際にも大規模流れの影響を組み込んだモデルを用いた検討が必要である。

b) 密度界面の運動による流れ

駿河湾は最深部が2000m以上の湾で、西側の海岸ではいくつかの海底谷が海岸に迫っている。海岸侵食の激しい海岸が多く、各種の対策がとられてきた。波は湾口の南側から入射するため、沿岸漂砂は南から北へ向かう。漂砂源は、大井川、安倍川、富士川からの流出土砂と数箇所の崖侵食で、海岸は玉石から砂までの広い範囲の粒度組成を有する底質で構成されている。駿河湾では相模湾とともに沖合いで極めて速い流れが観測されることが多く、「急潮」と呼ばれて水産施設などに被害を与えることがある(木村, 1942)。

図-9は駿河海岸の大井川河口周辺の表層底質の分布を示したものである。海岸付近は礫で構成されているが、河口周辺の沖合いには中砂や細砂が分布しており、北へと広がっている。ところが、図の上部の海底谷付近では、砂は海岸線付近の極めて狭い帯状の領域に見られるのみである。海底谷へはかなりの量の土砂が落ち込んでいると考えられるが(宇多ら, 1988)、谷の深部では少なくとも表層には細砂はみられない。当海岸の土砂収支を考える上では、汀線付近を移動する礫成分と水深2~20m付近で移動していると考えられる細砂の両者を考える必要があり、両者の輸送機構に支配的な役割を果たしていると考えられる波と流れの特性を把握することが重要である。

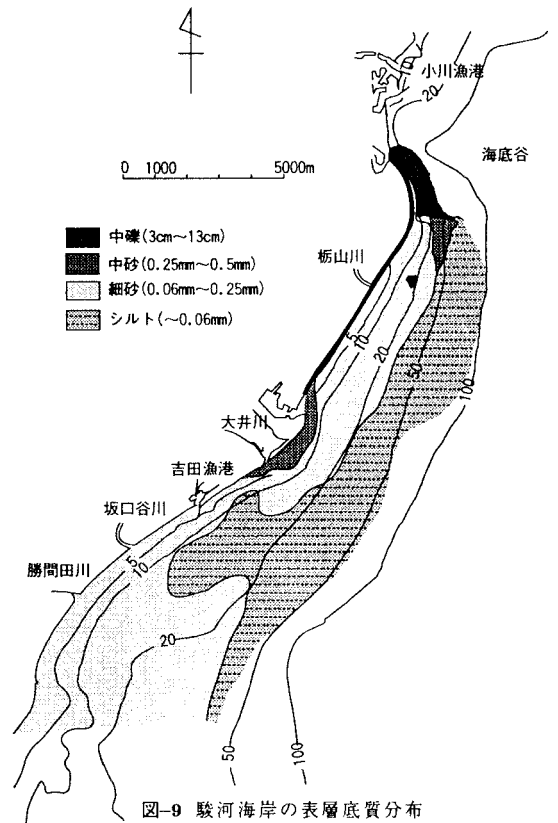


図-9 駿河海岸の表層底質分布

図-10は駿河海岸の海底谷南側の水深7m地点における1996年10月の流れの観測結果である。図には上から順に、潮汐等による平均水深変化、有義波高、平均波向、有義波周期、海底付近の流れ、風速・風向、水温の変化が描かれている。波浪が穏やかな期間においても海底付近には海岸線にはほぼ平行な向きの強い流れが発達している。流れの向きは南へ向かうものが卓越しており、50cm/sを超える強さの流れが発達することもある。流れの発達は、風の発達との対応が良い期間もあるが、両者の相関関係が不明瞭な期間も多い。また、流れの強さはほぼ1日周期で変動しており、その変動に対応して水温に若干の変動がみられることもある。このような南向きの流れは、Inaba(1981)らによっても報告されているが、近年の富士海岸や清水海岸における調査で、海岸近くでは1m/sに近い強さの流れが発達することがあることがわかってきた(佐藤, 1997a)。流れの発達機構としては、潮汐、風の連吹、黒潮の差し込みなどの要因が考えられるが、これらの要因が重合していることもあり、それぞれの要因の貢献度は明らかになっていない。図-11は駿河海岸におけるADCPによる観測結果を示したものである。観測は1997年10月に行われ、大井川河口から北に向けて、海底谷付近までの7測線で流れの鉛直構造を測定した。図には左から、表層の流れ、最下層の流れが示されており、その右には各測線の観測

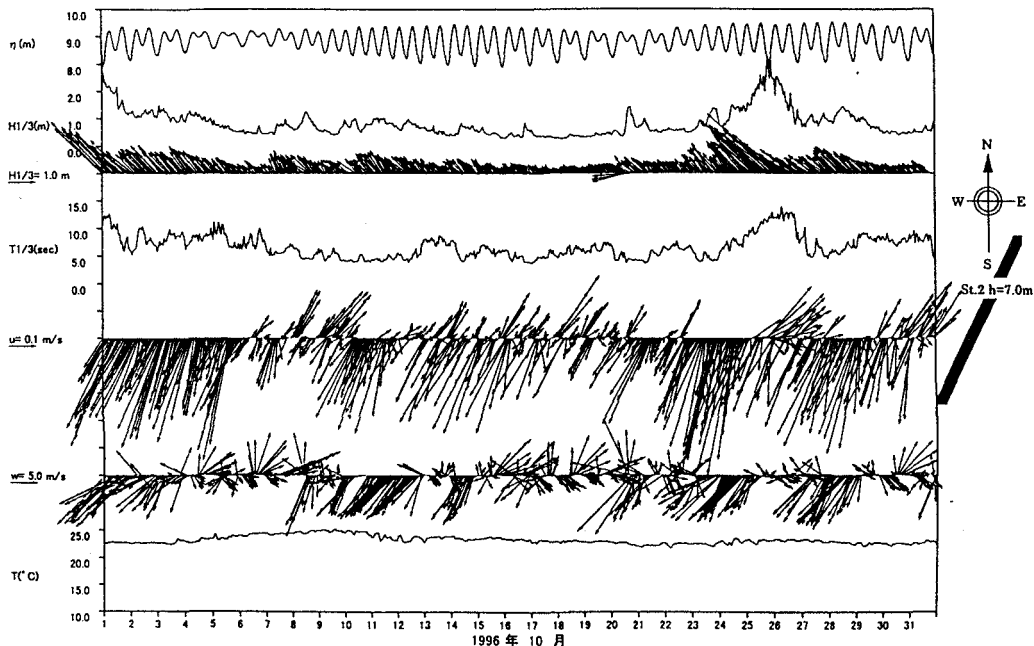


図-10 駿河海岸における波・底層流・海上風の観測結果

時の潮位と水温・塩分の鉛直分布が示されている。観測時の水温分布をみると、深さ20m付近に温度差約4度の温度躍層が確認されている。流れの特性をみると、上層では図上部の海底谷周辺では南向き、その他の領域では北向きの流れがみられるのに対し、下層ではほぼ全域で南向きの流れが卓越している。これらの観測結果は、駿河海岸の流れの特性を検討する際には、鉛直方向への水理特性の変化を把握することが不可欠であり、密度成層の発達状況と成層界面の運動を考慮する必要があることを示している。

図-12は、1996年9月の台風17号の通過に伴って発生したと考えられる密度成層の挙動を σ 座標系を用いた数値モデルにより計算した例である(佐藤, 1997a)。図は、20mの深さにおける海水温の分布を描いたもので、9月22日の午前中に強い北風が継続して吹いたことにより湾奥部で発生した冷水塊が、約2日間かけて反時計回りに伝播していく様子がシミュレートされている。冷水塊の移動は、内部ケルビン波の伝播としてとらえられ、強い流速の変動を伴うものである。駿河海岸の海底谷付近では海岸線の凸部から南へ向かう濁水の潮目が見られることが多いことや表面の底質が図-9に示した分布となっていることを合わせて考えると、これらの強い流れは、浮遊細砂の輸送に支配的な役割を果たしているものと考えられる。このような流れの発達には、胆振海岸、高知海岸などの太平洋側のいくつかの侵食が進んだ海岸でも観測されており、現地データをさらに蓄積することによりその発生機構を解明し、海岸の地形変化過程との関連を明らかにする必要があると考えられる。

3.3 長周期波の役割

海岸では、通常の波浪に加えて周期数十秒以上の長周期波が観測される。通常の波浪は碎波により碎波帯で波高を減じていくのに対し、長周期波は汀線に近づくにつれて増大するため、汀線付近では特に長周期波の影響が支配的となる可能性がある。海浜変形に及ぼす影響についても、現地調査結果をもとに、前浜の侵食、多段砂州の形成との関連が検討され(加藤, 1994)、数値モデルでその断面変形に及ぼす影響が検討されている(佐藤・光信, 1990; Roelvink, 1993)。また、高波浪時には、遡上波が沿岸方向に1~2分おきに変動し、それと

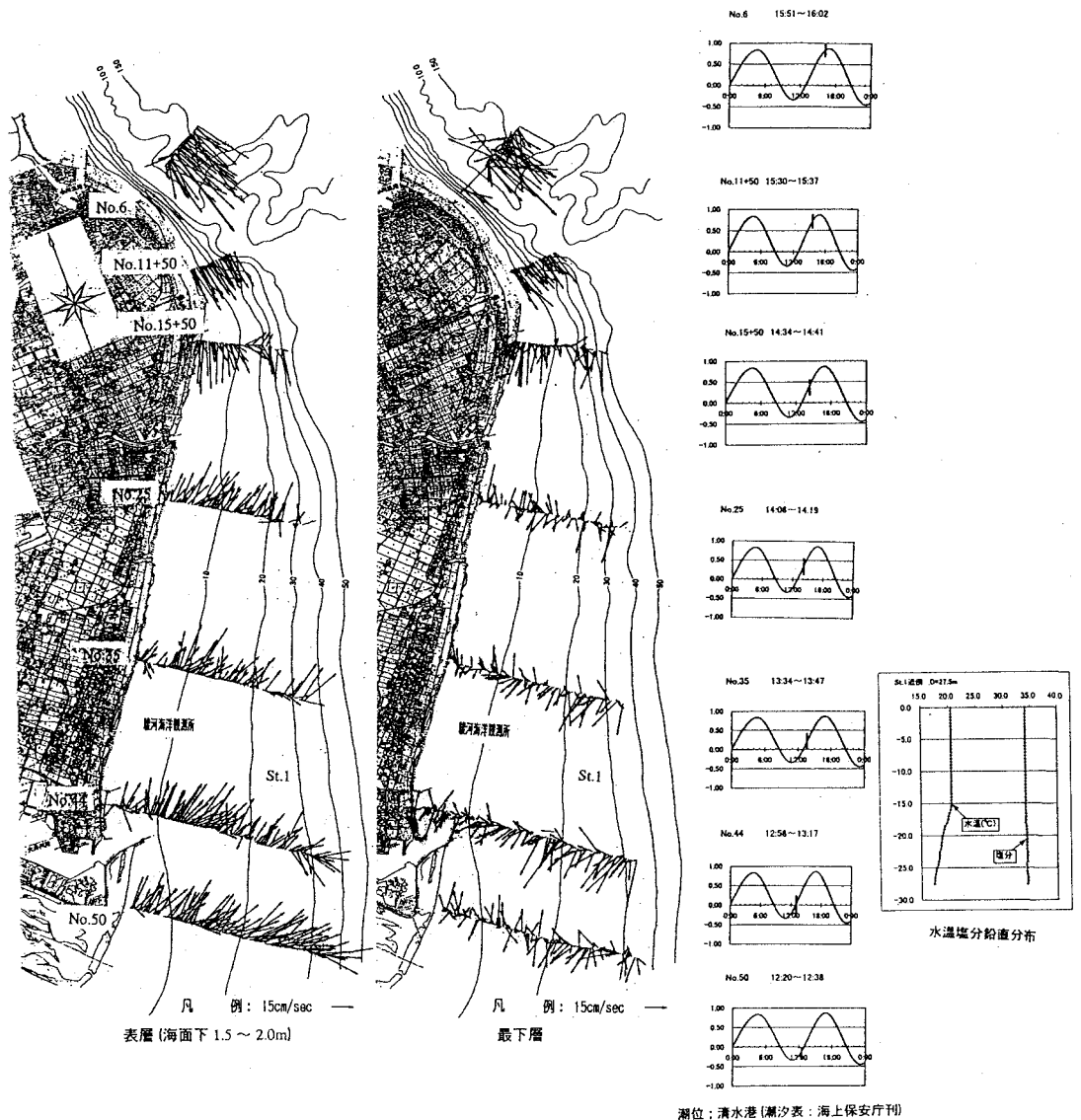


図-11 駿河海岸における ADCP による観測結果

対応して突堤周辺などで強い冲向き流れが観測されることがあり、これは、長周期波が沿岸方向に分布形を持って発達していることを示唆している。長周期波の発生・発達機構については現在も精力的な研究が進められているが、今後は平面的な発達機構も含めて沿岸における挙動を解明する必要がある。

砂移動機構に与える影響を考えると、通常の波浪による強い底面摩擦力の作用で移動しやすくなった底質が、長周期波などによる流れの影響を受けて輸送されると考えられるため、長周期変動流速の強さと短周期波の包絡波との位相関係が重要となる。佐藤(1997b)は日本海側の観測データをもとに、二次干渉理論に基づいて長周期変動流速の大きさと包絡波に対する位相をある程度評価できることを示した。図-13は振幅、図-14は位相関係を示したものである。図中の実線は、二次干渉理論に基づく数値計算の結果から求めた回帰曲線である。日本海側では大陸からの季節風により発達した波が観測されるため、波の特性に大きな変化はないが、太

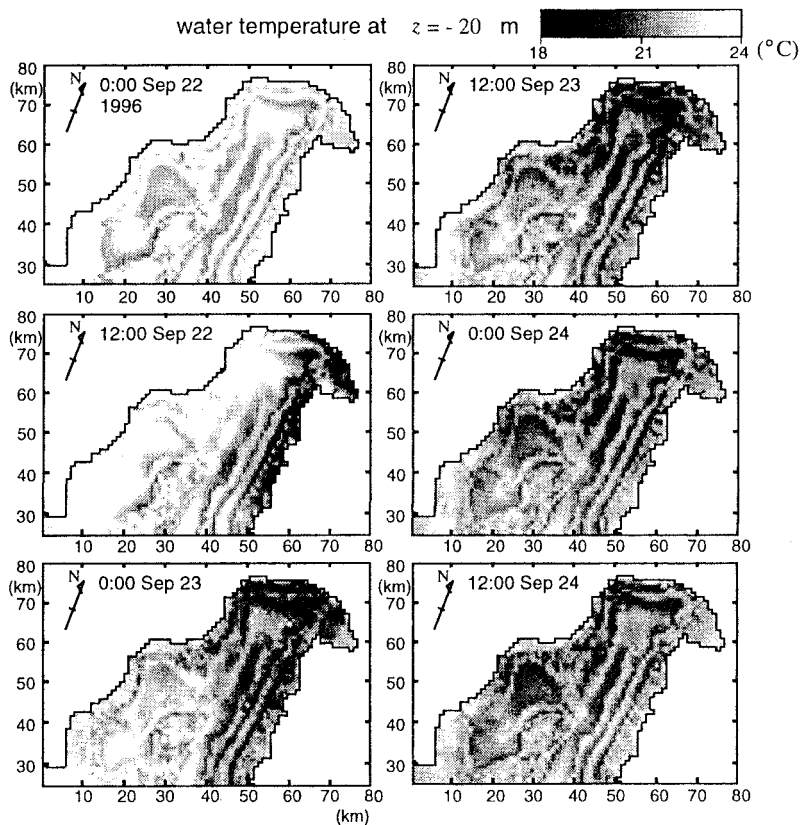


図-12 台風通過後の水深20m地点における水温分布の計算結果

平洋側では、気象条件の変動により、さまざまな特性を持った波が来襲する。図-15は1997年9月に来襲した台風18～20号により発生した長周期波の駿河海岸における観測値を示したもので、図-13と比較すると、太平洋側では短周期波の波高が小さな時にも振幅の大きな長周期波が観測されることが多く、また、図-16に示したように経路の異なる3つの台風により、長周期波の発達特性が大きく異なることがわかる。このような台風経路と長周期波の発達特性との関係を整理し、海浜変形への影響を解明することも今後の課題として残されている。

3.4 流域一貫した土砂管理計画の支援

昭和30年前後に頻発した海岸災害を契機に海岸事業が進められ、狭隘な沿岸域に人口が集中するという日本の特殊性のもとで各種保全施設が導入され、多大な効果を挙げてきた。しかしその一方で、コンクリート製の諸施設で覆われた人工的な海岸が増え、施設の建設が漂砂下手側に新たな侵食域の拡大をもたらすといった弊害が出ている所もある。このような問題の発生は、海岸における計画では漂砂系全体を視野に入れることが重要であることを示しており、各種構造物によるハードな対策のみでなく、海岸域の土砂を管理するという視点からサンドバイパスや養浜などのソフトな対応を一層推進していく必要性を示唆している。一方、河川流域内の土砂の制御についても、山岳地における土砂災害、ダム堆砂、河床低下、河口閉塞などの問題が発生しており、海岸で侵食が加速していることと合わせて考えると、流域における土砂管理を最適化して総合的な国土保全を図ることが緊急の課題である。

流域一貫した土砂管理システムを構築するためには、海岸においては、河川からの流出土砂量の変動を想

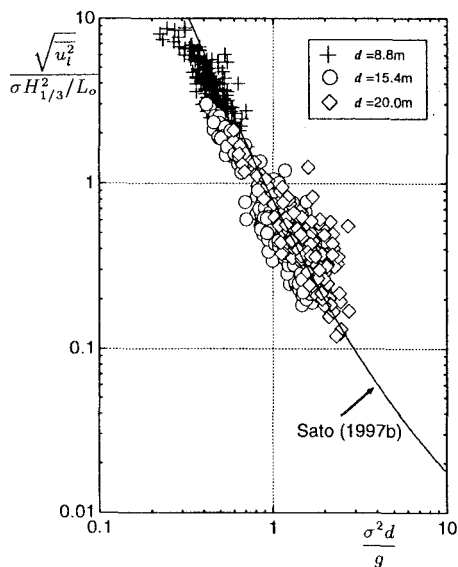


図-13 長周期流速変動の rms 値と無次元水深との関係 (新潟海岸)

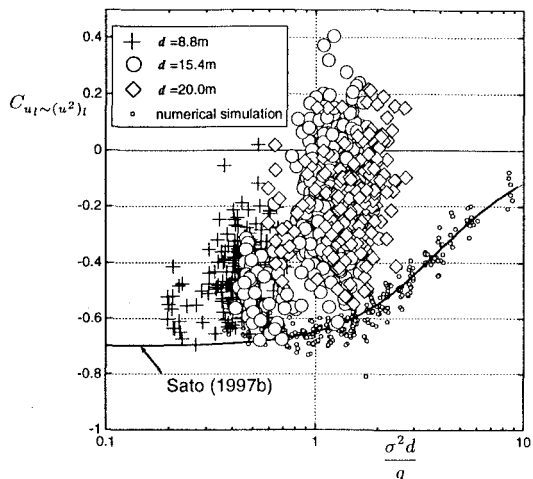


図-14 長周期流速変動と流速の自乗との相関係数 (新潟海岸)

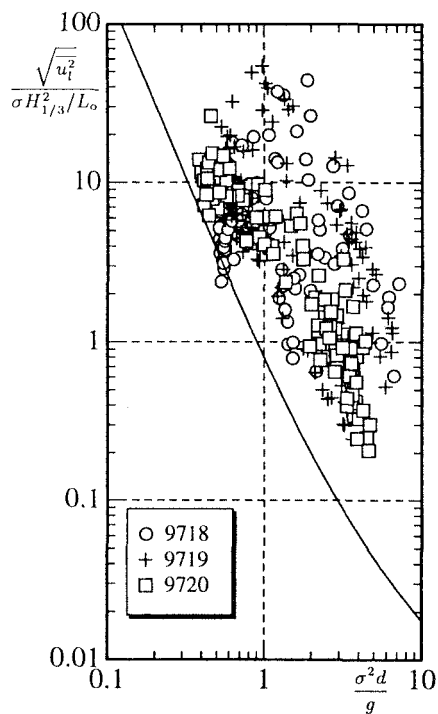


図-15 長周期流速変動の rms 値と無次元水深との関係 (駿河海岸)

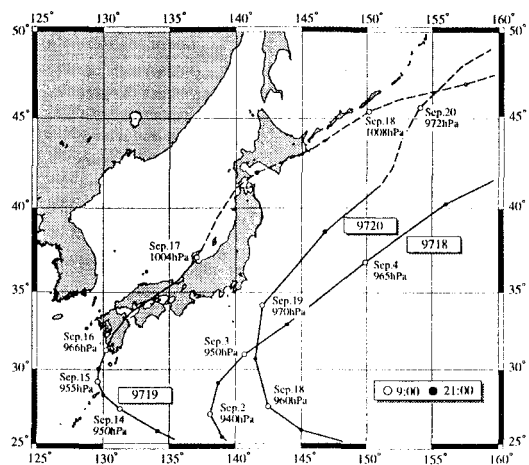


図-16 1997 年 9 月に来襲した台風の経路

定したうえでの海岸計画の最適化が求められる。図-17は河川からの想定流出土砂量の変化に伴う海岸における対応を模式的に表したものである。岬に囲まれた閉じた漂砂系を考え、片側端に河川が流入し、河口からの流出土砂の一部が左に向かう沿岸漂砂となり弓状の海岸が形成されている条件を考える。(a)図は豊富な流出土砂のもとに弓状の海岸線が安定して形成されている場合で、河口からの流出土砂の40%が安定な海岸地形の

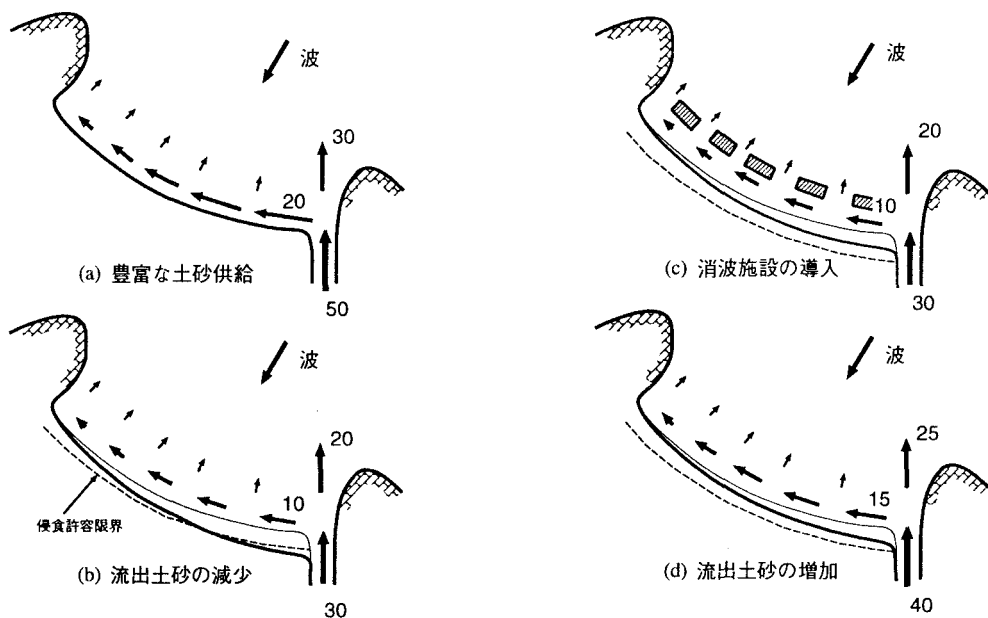


図-17 流域一貫した土砂管理のもとでの海岸計画

形成に寄与する沿岸漂砂となっている。同図は、沿岸漂砂の移動に伴い分級が進むとともに砂粒子が摩耗し、細粒分が沖合いへ流出することにより、供給土砂量とつり合って安定な海岸線が維持されている状態を表している。(b)図では流出土砂量が減少し、(a)図と同じ海岸線形状では沿岸漂砂量に不均衡が生じるため、新たな平衡状態へと移行する過程で海岸が侵食された場合を示している。通常は(b)図の平衡状態まで放置されることは少なく、侵食が進む前に何らかの対策が取られる。(c)図は、沖合い消波施設の導入により沿岸漂砂量を低減し、沿岸漂砂量分布を変化させることにより平衡状態における侵食量を減少させた場合である。また、(d)図の例では、河川からの流出土砂量の増大により、施設を導入することなく(c)図とほぼ同じ海岸線が維持されることを示している。

海岸においては、図-17に示したような各種のシナリオに対する海岸地形の応答を精度良く予測することが求められ、これに対しては汀線変化モデルや等深線変化モデルを適用してある程度の予測が可能である。佐藤ら(1998)は、日野川流域における土砂収支の検討に基づき、想定流出土砂量の変化に伴う海岸地形変化の将来予測を実施している。現状では海岸の地形環境変化を粒径の変化まで含めて予測することが困難なため、流域におけるマクロな土砂収支とその変化を海岸地形変化と関連づけることは難しい。流出土砂の質(粒径)の変化が、水質環境や生態系に与える影響を予測するモデルを開発するとともに、海岸地形変化に与える影響を解明するための基礎データの蓄積を図る必要がある。

4. 物理モデルの新たな試み

4.1 混合粒径の扱い

混合粒径底質の漂砂機構については、流域土砂管理システムの構築の観点からも数値モデルの開発が求められるが、現在のところ海岸における土砂の質に関するデータが乏しいため、混合粒径の影響を取り込んだ数値モデルは少ない。海岸の変形予測モデルでは物理モデルにおいても、底質粒径は均一であるとして扱うことが多い。これは、小規模実験では、模型縮尺の制限により底質の粒径を広い幅で設定できないこと、混合粒径底質を用いて実験すると、分級が起こった後で初期状態に戻すのが極めて困難で、実験条件を制御するのが難

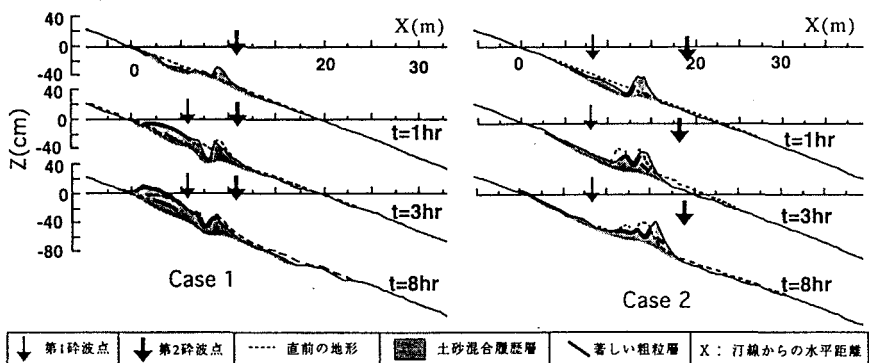


図-18 混合砂海浜の断面変形

しいこと、などによる。一方現地では、前節で述べた駿河海岸のように、汀線部と沖浜では 10^2 オーダーの粒径の違いがある海岸も多く、また、移動に伴い分級が生じることも知られている(山本, 1977; 山本ら, 1995)。

混合粒径の影響を取り込んだ数値モデルとしては、平衡海浜で表面に留まる底質は移動限界状態のものであると仮定して、波の軌道流速の変化から岸沖方向の粒径変化を推定するHorn(1991)のモデル、粒径別漂砂量の仮定から掃流漂砂量と底質の分級を推定する田中ら(1989)、伊福・住井(1993)らのモデル、細・粗混合砂の海浜断面地形変化と混合率の変化を計算した乾ら(1995)のモデルなどがあるのみである。モデルを検証するデータが少ないことが一因と考えられるため、漂砂の分野では、混合粒径砂を用いた実験によるデータ取得と現地調査による漂砂機構の推定に精力が注がれている。田中ら(1988, 1989)は、造波水槽における移動床実験により、主として掃流砂が卓越する条件での混合砂の移動機構を検討し、底質の分級モデルを提案している。鈴木ら(1994)、乾ら(1995)、後藤ら

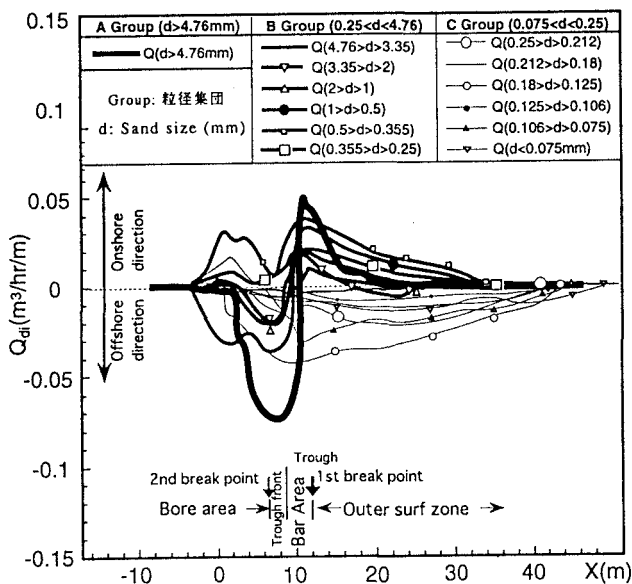


図-19 混合砂海浜における粒径別漂砂量の岸沖分布

(1996)は振動流装置を用いて、主としてシートフロー状態の混合砂の移動機構を検討している。張ら(1995, 1996)は、大型水路で混合砂海浜の断面変形実験を行い、砂の分級と地形変化過程を追跡するとともに粒径別漂砂量を評価している。図-18に張ら(1996)の実験における断面変化の一例を示し、図-19にケース1の波作用後1時間の粒径別漂砂量の岸沖分布を示す。張らの実験では、表面付近に粗い粒径の砂が覆うアーモアコートがみられること、碎波波高のオーダーの深さまで土砂の混合が起こり、土中に粗粒層が形成されること、混合砂では砂漕が形成されにくいこと、粒径別の砂の移動特性はお互いの干渉を受けること(例えば浮遊砂の移動方向が大粒径の砂の移動方向である岸向きになること)、などの混合砂海浜の断面変形過程における特徴的な現象が確認された。数値モデルでこのような過程のすべてを予測することは、現状では困難であるが、混合砂

の漂砂モデルでは、細粗互層の形成や、細粗砂の移動機構の干渉などを組み込む必要性が示されている。河川工学の分野でも、粒径集団の概念を用いた流砂現象の理解が進められており(山本, 1994; 藤田ら, 1995), 流域土砂管理の観点からも海岸における混合粒径の扱いを進める必要がある。現地観測や室内実験によるデータ取得を進め、汎用的なモデルの確立を目指す必要がある。

4.2 微細粒径底質の利用

海岸地形変化に関する物理モデルでは通常、フルードの相似則を用いて模型や波浪の諸元が決められるが、底質は現地と同程度のものを使うため、現地条件に比べて無次元掃流力が小さく沈降速度が大きい条件となる。そのため、例えば底質の浮遊量が小さく、浮遊砂による輸送が過小評価され、現地とは異なる海浜変形特性を示す傾向にある。石炭粉などの比重の小さい底質を用いることもあるが、粒子の形状が異なるため、海浜の変形特性が異なることがある。模型縮尺に関わるこれらの問題を解決するためには、実大規模の施設を用いた検討を進めるとともに、現地で見られる浮遊砂の輸送・堆積現象を再現する底質材料を選定した実験を行うことが必要である。ここでは、小規模の物理モデルにおける海浜変形の再現性を検討した取り組みとして、微細粒径底質を用いた山本ら(1997)の実験結果を紹介する。

山本ら(1997)は、粘着性の影響が少ない範囲で粒径の小さな底質を用いて実験を行い、浮遊砂が卓越すると考えられる細粒径現地海岸での海浜変形機構を実験室でどの程度再現できるか検討した。用いた底質は中央粒径 $D = 0.22\text{mm}$ の細砂と硬質砂岩を粉砕して作成された $D = 0.05\text{mm}$ 、比重 2.7 の微細粒径底質である。これらの底質を初期勾配 1/20 の模型海浜に敷きつめ、離岸距離 3m の位置に長さ 2m の堤頭部を有する T 型突堤周辺の海浜地形変化を測定した。実験に用いた波浪は、沖波波高 6cm、周期 1.13 秒の規則波で、入射角 15 度で斜めから入射させて沿岸漂砂が卓越する条件としている。

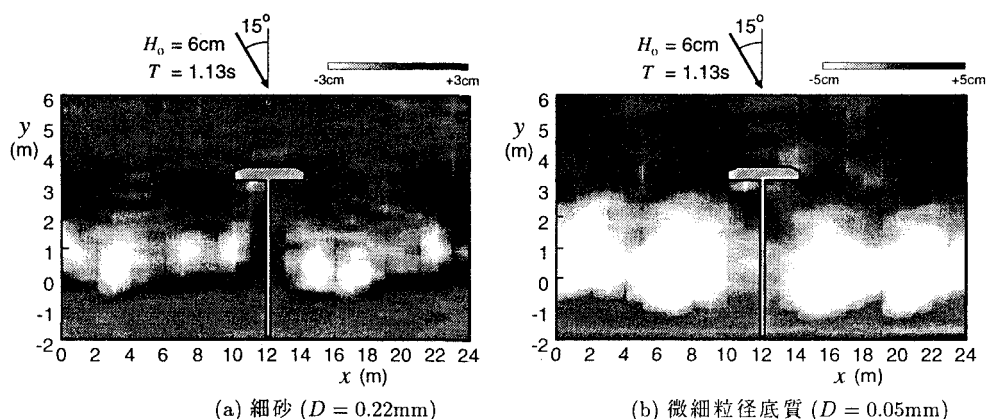


図-20 10時間後の地形変化量

図-20は10時間の波作用後における海浜地形変化を示したものである。細砂を用いたケースでは、突堤上手($x < 12\text{m}$)側の堆積、下手($x > 12\text{m}$)側の侵食がみられるのに対し、微細粒径底質では碎波帯では一様に侵食され、汀線部に浜崖の形成がみられた。これは、微細粒径底質に対しては用いた波浪条件が侵食性の波となっているためであると考えられる。

横堤背後の堆積状況を見ると、細砂のケースでは横堤背後の汀線付近に顕著な堆積がみられるのに対し、微細粒径底質を用いたケースでは突堤先端部付近の遮蔽域に堆積がみられる。これは、微細粒径底質を用いたケースでは底質の浮遊が卓越するため、浮遊粒子が横堤背後の流れの死水域で沈降して堆積するためと考えられる。これは、現地における防波堤背後や港口部の滞留域における堆積現象に対応する現象である。底質の浮遊

が卓越する条件での海浜変形に関するデータは現地海岸の変形予測を行ううえで極めて重要であり、今後これらのデータを蓄積するとともに浮遊底質の拡散・沈降過程を取り込んだ数値予測モデルを開発する必要がある。

5. おわりに

海岸の地形環境モデルに関する研究の state of the art を書くつもりが to do list とその解説となってしまった。自らの処理能力を超えて課題が山積してしまう筆者の最近の環境にもよるが、それだけ奥深いテーマであることも意味していると思う。課題の中には、近年の現地観測で新たに注意が喚起されたものや、越波対策から土砂管理へと変化してきた海岸保全の変遷に連れて必要性が指摘されたものが含まれている。また、海岸保全を巡る新たな視点としては、コスト縮減や利用の多様化への対応、生態系との調和などが求められており、これらに対応した技術開発も一層進めなければならない。残された課題に対しては、本稿で解説したさまざまなモデルを駆使して対応していくことになり、技術的な問題を解決していく楽しみが多く残された分野であると思う。

最近の数値モデルの進歩はめざましく、今後も数値モデルが強力な道具となるのは間違いないと思われるが、モデルの良否は特定の条件のもとでの最終的な地形変化の再現性のみで判断すべきではない。波と流れの相互作用により砂礫が輸送されるという漂砂の物理過程に立脚したモデル化を進め、汎用化の努力を継続していくことが重要である。また、冒頭でも述べたが海岸変形においては対象とする時空間スケールの決定が重要であり、その点からはモデルの適用に至るまでの思考実験の過程がむしろ本質的である。生態系を含めた沿岸域環境変化の予測・評価モデルを検討するとともに、その基盤となる地形変化モデルの汎用性を高め、土砂の質(粒径)の変化を含めた地形環境モデルの実用化を目指していきたい。そのためには、数値モデルの開発を支援する現地調査と室内実験をこれまで以上に戦略的に展開する必要がある。

参考文献

- 石田 啓・高瀬信忠・長原久克・浦 良一(1984): 渚ドライブウエーを有する千里浜海岸の現況と侵食対策, 第31回海岸工学講演会論文集, pp. 355-359.
- 乾 武史・Mohammad Dibajnia・磯部雅彦・渡辺 晃(1995): 細粗混合砂のシートフロー漂砂量の算定式について, 海岸工学論文集, 第42巻, pp. 521-525.
- 伊福 誠・住井勝彦(1993): 波による底質の移動に及ぼす粒径の影響, 海岸工学論文集, 第40巻, pp. 316-320.
- 宇多高明・堤 博志・小俣 篤・酒井佳治(1988): 海底谷周辺での土砂移動機構, 第35回海岸工学講演会論文集, pp. 327-331.
- 宇多高明(1989): 九十九里海岸における過去6000年間の海浜形成と近年の海浜変形との関係, 地形, 第10巻第4号, pp. 343-355.
- 宇多高明・畑中達也(1993): 波向データの16方位分割の持つ問題点, 土木学会第48回年次学術講演会講演概要集, II-403, pp. 902-903.
- 宇多高明・河野茂樹(1996): 海浜変形予測のための等深線変化モデルの開発, 土木学会論文集, No.539/II-35, pp. 121-139.
- 宇多高明(1997): 日本の海岸侵食, 山海堂, 442p.
- 宇多高明・小杉俊夫・平岡孝恵・加藤憲一・山形 宙(1997): 波による粒径の淘汰を考慮した養浜時海浜変形モデル, 海岸工学論文集, 第44巻, pp. 516-520.
- 宇野利雄(1963): 計算機のための数値計算, 応用数学力学講座14, 朝倉書店, 265p.
- 小笹博昭・A. H. Brampton(1979): 護岸のある海浜のてい線変化数値計算, 港湾技術研究所報告, 第18巻, 第4号, pp. 77-103.
- 粕谷晋一・藤間 稔・片野明良・川又良一・土屋義人(1997): 異常波浪を考慮した長期汀線変化モデル, 海岸工学論文集, 第44巻, pp. 511-515.
- 加藤一正(1994): 漂砂と海浜地形変化に及ぼす長周期波の影響に関する研究, 東京工業大学学位論文, 120p.
- 加藤史訓(1998): CD-ROM版海象年表, 土木技術資料, Vol. 40, No. 4, p. 9.
- 木村喜之助(1942): 沿岸の大急潮に就いて, 中央気象台彙報, 第19巻, pp. 1-85.
- 経済企画庁(1974): 土地分類図17(石川県).

- 建設省河川局海岸課監修(1994): 海岸保全計画の手引き, (社) 全国海岸協会, 170p.
- 後藤仁志・酒井哲郎・豊田泰晴・多田哲也(1996): 振動流下の混合漂砂の鉛直分級機構, 海岸工学論文集, 第43巻, pp. 456-460.
- 佐藤慎司・光信紀彦(1990): 不規則波による海浜断面地形変化の数値計算, 海岸工学論文集, 第37巻, pp. 309-313.
- 佐藤慎司・Kabiling, M. (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.
- 佐藤慎司(1995): 日本海沿岸で観測された流れの特性, 土木学会論文集, No. 521/II-32, pp. 113-122.
- 佐藤慎司(1996a): 強風と高波によって発達する沿岸域の大規模流れに関する研究, 海岸工学論文集, 第43巻, pp. 356-360.
- 佐藤慎司(1996b): 現地海岸における波・流れと漂砂機構, 1996年度(第32回) 水工学に関する夏期研修会講義集, B-4, 19p.
- 佐藤慎司(1997a): 台風9617号による駿河湾の波浪と密度成層の挙動, 土木学会論文集, No. 579/II-41, pp. 151-161.
- 佐藤慎司(1997b): 浅海域における長周期流速変動の発達特性, 海岸工学論文集, 第44巻, pp. 256-260.
- 佐藤慎司・古屋隆男・見附敬三・谷口 丞(1998): 日野川流域の土砂収支と海浜変形, 海岸工学論文集, 第45巻(印刷中).
- 清水琢三・近藤浩右・渡辺 晃(1990): 局所漂砂量公式の現地適用性に関する研究, 海岸工学論文集, 第37巻, pp. 274-278.
- 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.
- 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.
- 首藤伸夫(1974): 非線形長波の変形, 第21回海岸工学講演会論文集, pp. 57-63.
- 鈴木高二朗・渡辺 晃・磯部雅彦・Mohammad Dibajnia(1994): 振動流作用下における混合粒径底質の移動現象について, 海岸工学論文集, 第41巻, pp. 356-360.
- 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, 海岸工学論文集, 第38巻, pp. 396-400.
- 田中茂信・佐藤慎司・川岸眞一・石川俊之・山本吉道(1996): 石川海岸の沖合いにおける漂砂機構, 海岸工学論文集, 第43巻, pp. 551-555.
- 田中茂信・佐藤慎司・川岸眞一・石川俊之・山本吉道・浅野 剛(1997): 石川海岸における漂砂機構, 海岸工学論文集, 第44巻, pp. 661-665.
- 田中茂信・小荒井 衛・深沢 満(1993): 地形図の比較による全国の海岸線変化, 海岸工学論文集, 第40巻, pp. 416-420.
- 田中 仁・首藤伸夫(1980): 波・流れ共存時の底面摩擦に関する実験, 第27回海岸工学講演会論文集, pp. 163-167.
- 田中 仁・片山裕貴・加賀正之・須賀亮三(1988): 混合砂海浜における漂砂量則, 第35回海岸工学講演会論文集, pp. 307-311.
- 田中 仁・吉竹豊尚・首藤伸夫(1989): 波・流れ共存場における底質分級の数値計算, 海岸工学論文集, 第36巻, pp. 264-268.
- 張 達平・佐藤慎司・戸崎正明・田中茂信(1996): 混合砂海浜の断面変形と粒径別漂砂量に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第43巻, pp. 461-465.
- 張 達平・山本幸次・佐藤慎司・田中茂信(1995): 混合砂の分級過程に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第42巻, pp. 481-485.
- 野田英明・橋本 宏(1981): 漂砂と海岸保全施設, 土木学会編 新体系土木工学 79, 技報堂出版, 152p.
- 藤田光一・宇多高明・服部 敦(1995): 水系土砂収支分析のための「有効粒径集団」の考え方の提案, 土木技術資料, 第37巻第2号, pp. 34-39.
- 本間 仁・堀川清司(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.
- 真野 明・Muhammad Hasanudin・沢本正樹(1996): 沿岸漂砂量公式に用いる年平均波, 海洋開発論文集, Vol. 12, pp. 55-59.
- 真野 明・沢本正樹(1998): 阿武隈川河口周辺の土砂環境, 「日本の河口」, 科学研究費研究成果報告書, pp. 49-63.
- 丸尾 剛・Mohammad Dibajnia・渡辺 晃(1995): 遡上域に拡張したブシネスク方程式と漂砂量式を用いた海浜断面変形モデル, 海岸工学論文集, 第42巻, pp. 611-615.
- 山本晃一(1977): 波による底質のふるい分け作用, 第24回海岸工学講演会論文集, pp. 142-146.
- 山本晃一(1994): 沖積河川学—堆積環境の視点から, 山海堂, 470p.
- 山本幸次・張 達平・田中茂信(1995): 富士海岸における底質の分布特性について, 土木学会第50回年次学術講演会講演概要集, II-434, pp. 868-869.
- 山本幸次・佐藤慎司・田中茂信(1997): 海岸過程における底質の浮遊と分級に着目した実験的研究, 海岸工学論文集, 第44巻, pp. 471-475. pp. 868-869.
- 渡辺 晃(1996): 海岸過程の研究の展望, 1996年度(第32回) 水工学に関する夏期研修会講義集, B-6, 16p.
- Bodge, K. R.(1994): The extent of inlet impacts upon adjacent shorelines, *Proc. 24th Conf. on Coastal Eng.*, pp. 2943-2957.
- Coastal Engineering Research Center (1984): Shore Protection Manual, Vols. 1 & 2.
- de Vriend, H. J., J. Zyserman, J. Nicholson, J. A. Roelvink, P. Pechon and H. N. Southgate (1993): Medium-term 2DH coastal area modelling, *Coastal Eng.*, Vol. 21, pp. 193-224.

- de Vriend, H. J., M. Capobianco, T. Chesher, H. E. de Swart, B. Latteux and M. J. F. Stive (1993): Approaches to long-term modelling of coastal morphology: a review, *Coastal Eng.*, Vol. 21, pp. 225-269.
- Hanson, H. and N. C. Kraus (1991): Numerical simulation of shoreline change at Lorain, Ohio, *J. Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engrg.*, Vol. 117, No. 1, pp. 1-18.
- Inaba, H.(1981): Circulation pattern and current variations with respect to tidal frequency in the sea near the head of Suruga bay, *J. Oceanogr. Soc. Japan*, Vol. 37, pp. 149-159, 1981.
- Komar, P.D. and D.L. Inman (1970): Longshore sand transport on beaches, *J. Geophys. Res.*, Vol. 75, No. 30, pp. 5914-5927.
- Nicholson J., I. Broker, J. A. Roelvink, D. Price, J. M. Tanguy and L. Moreno (1997): Intercomparison of coastal area morphodynamic models, *Coastal Eng.*, Vol. 31, pp. 97-123.
- Pelnard-Considère, R.(1954): Essai de théorie de l'évolution des formes de rivages en plages de sable et de galets, IVème Journées de l'Hydraulique, pp. 289-298.
- Roelvink, J.A.(1993): Surf beat and its effect on cross-shore profiles, Ph. D. thesis, Delft University of Technology, 116p.