

沿岸過程の数理モデルの将来

渡 辺 晃

1. はじめに

今回の水工学研修会の共通テーマは「ウォータ・フロント」ということである。確かにこの頃、新聞やテレビでも「ウォータ・フロント」ということばを目にすることが多い。多くの場合は東京湾の例に代表されるように大都市域での水辺地区の整備再開発プロジェクトに関するニュースであるが、現実にはほとんど全ての都道府県でさまざまな計画が進められており、話題は日本全国に広がっているといっても過言ではない。「ウォータ・フロント (waterfront)」という語はそもそも河岸、湖岸、海岸の全てを含む「水辺地区」という日本語に相当し、本来は水辺の陸域を指す。しかし水辺地区の開発利用や保全に絡む多くの問題に対して沿岸の水域をも一緒に考える必要があることはいうまでもない。そのような広い意味では陸域と水域を総称する「沿岸域」ということばの方がふさわしいように思える。

前置きはさておいて、今回の研修会での特別講演を依頼され引き受けてはみたものの、一体何を話題に取り上げようかと随分迷った。「海のウォータ・フロント＝沿岸域」の利用と保全の実状や問題点については他の講師の方々が話されるようなので、それを支える研究全般の現況と課題についてでもと一度は思ったが、これは一寸ばかり対象が広すぎて筆者の力の及ぶところではないと諦めざるを得なかった。そのようなわけで結局かなり対象を絞り、「沿岸過程の数理モデル」をテーマに取り上げることにした。筆者が現在関心をもっている研究テーマの1つであることにもよるが、沿岸域の適正な利用や保全を進めて行こうとする際には、ほとんどの場合そこで生じるさまざまな沿岸過程を評価予測することが不可欠であり、その手段として数理モデルが果たす役割は今後ますます大きくなるものと予想されるからである。

「沿岸過程」と一口にいっても、それには波の変形や海浜流の発生、漂砂や海浜変形、海水交換や物質拡散など、多様な現象が含まれる。ここでは海浜変形の予測を目的とした数理モデルに主眼を置きつつ、そのために必要となる範囲で波や流れの場のモデリングについても対象とする。既存のモデルの解説は他でなされているので¹⁾⁻⁵⁾ 詳細はそれらに譲り、本稿では沿岸過程 (海浜変形) の数理モデルの将来へ向けての可能性や具体的課題などのあれこれについて、筆者がこの頃考えていることを多少気ままに述べてみたい。

2. 海浜変形数理モデルの全体像

2. 1 物理モデルから数理モデルへ?

砂浜海岸では波や流れの作用を受けて常に砂が移動しており、海浜の地形は主に入射波浪の変化につれて変動する。自然海浜の地形変化は一般に季節的ないわば可逆的な変動であり、数年間を通してみれば安定な状態にあることが多いので、直接に工学的な問題となることは余りない。しかもこれ迄の研究成果の蓄積により、入射波や底質の特性に応じた平衡地形や、入射波浪の周期的変動に対する地形の応答サイクル等については、実験や数値計算をあらためて行うことなしにかなりよい精度で予測できる段階に近づきつつあるといってもよい。もっとも、そう遠からぬ将来に予想されている大規模な海面上昇や波候変動に対する海浜の応答については別であろうが。

他方、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、自然の土砂収支のバランスが崩れて周辺の高浜の侵食や欠壊が生じ、海岸保全上の重大な問

題となることも稀ではない。逆に砂浜海岸に建設された港で航路や泊地の埋没が問題となっている例も少なからずある。このような問題を未然に防ぎあるいは適切な対策を講じるためには、構造物の設置などに伴う海浜地形の変化を事前に予測しなければならない。また、各地で実施されつつある海浜の拡幅や人工海浜の造成を取り上げても、効率のよい養浜や構造物の組み合わせとか周辺域への影響等を考える上で、海浜変形を中心とした沿岸過程の予測が必要とされている。

海浜変形の予測は近年までは過去の事例に対する経験や水理模型実験（物理モデル）に頼ることが多かったが、最近になって数値モデルの研究が進み、数値計算による海浜変形予測が盛んに行われるようになってきた。物理モデルを数値モデルが取って代ろうとしているかにも見えるこの趨勢の背景には、1）計算機の発達と普及により物理モデルに比して数値モデルのコストが急速に低減したこと、2）沿岸の施設や工事の大規模化に伴い対象域の空間スケールも大きくなり、大縮尺の物理モデルによる実験が困難となったこと、3）数値モデルの基礎となる漂砂現象ならびにその外力である波や流れに対するわれわれの知見が大いに向上したこと、等がある。

この趨勢はまだしばらくは続きそうであるが、果して数値モデルが物理モデルを駆逐する日が到来するか、換言すれば数値モデルが海浜変形予測手法として不動の王座を占めることができるのか、については疑問の余地を無しとしない。少なくとも、数値モデルがかなりの可能性をまだ秘めていることは確かであり、その可能性を探ったあとで、第4章でもう一度この問題を考え直してみたい。

2. 2 海浜変形数値モデルの分類

前報⁵⁾にも示したように、海浜変形の数値モデルは「汀線（海岸線）変化モデル」、「縦断地形変化モデル」、「三次元海浜変形モデル」の3つに大別できよう。図-1は、対象とする海浜変形の沿岸距離スケールと時間スケールにより、各モデルの適用範囲の目安を示したものである。図中の「マクロ的手法」は、過去の海浜変形の事例データに基づいて将来の変形を予測する経験的あるいは統計地理学的手法であり、数値モデルには属さないが、海浜変形の将来傾向の予測に現実に利用されており、また大スケールの海浜変形を評価する手法としての有効性は否定できないので、物理モデル以外の手法の1つとして図に加えてある。3つに大別した数値モデルのそれぞれに関する基本的考え方やこれ迄の研究については前報⁵⁾でも紹介したので、本稿では簡単に復習しておくにとどめよう。

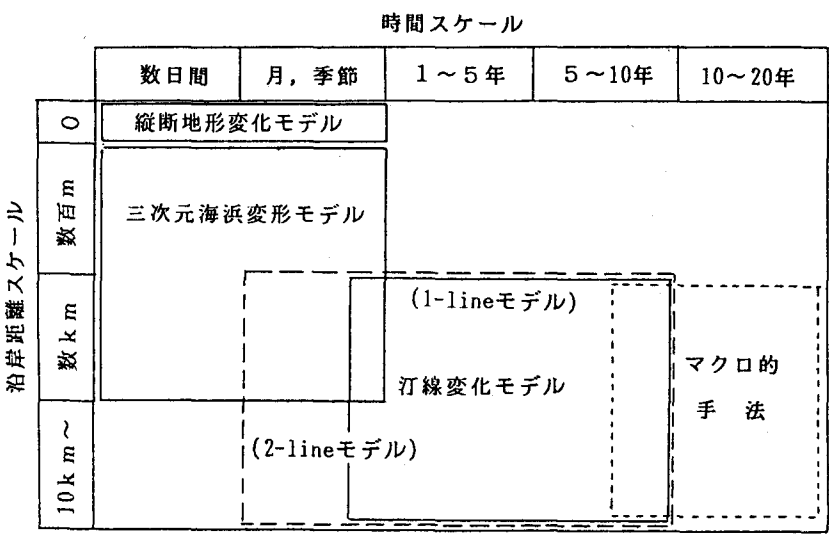


図-1 海浜変形予測モデルの適用範囲

先ず「汀線変化モデル」は、沿岸漂砂量の海岸線に沿う分布から算定される汀線変化によって海浜変形を代表させるものであり、最もよく用いられているものとしてI-lineモデルがある。沿岸漂砂以外に河口からの流送や養浜あるいは海谷への流失などによる岸沖方向の土砂の流入出をある程度まで考慮することも可能であり、突堤群や離岸堤群が存在するようかなり一般的な条件にまで適用可能な実用性の高いモデルも開発されている⁶⁾。図-1に示したように比較的スケールの大きい海浜変形の予測に適しており、岸沖漂砂による短期的な地形変化の予測や沿岸漂砂以外の要素が支配的な港内堆砂の計算などには使えない。

「縦断地形変化モデル」は、逆に岸沖漂砂のみによって生じる海浜縦断形状の変化を対象とするものである。前報⁵⁾で紹介したものの他に、Larsonら⁷⁾のモデルやデルフト水理研究所が開発したCROSTRAN⁸⁾などがある。筆者らも1つのモデルを提示したが⁹⁾、そのモデルでは進行波による岸沖漂砂しか考慮されていないので、戻り流れや構造物による反射波の影響をも含めることによってモデルの精度と実用性を向上させることを目指している。

「三次元海浜変形モデル」は、対象海浜全域にわたって波浪と海浜流の平面分布を計算したのち、各点の波と流れの条件等より局所的な漂砂量を算定し、更に底質量の保存則から各点の底面高の時間変化を計算することによって三次元的な海浜変形を予測しようとするものである。筆者ら¹⁰⁾が開発したモデルを基にした予測計算が実際の海岸を対象にしてなされているようであるが、このモデルの不充分さを一番よく認識している筆者としては正直なところ複雑な気持ちである。また筆者らのモデルは、海浜流の鉛直分布等を見逃していることからすれば、三次元モデルというよりも平面二次元モデルと呼んだ方が適当であり、この点でDe Vriend・Ribberink¹¹⁾等の準三次元モデルに遅れをとっていることは認めざるを得ない。

以上の3つに大別したモデルのそれぞれには、図-1に示したように対象とする海浜変形の時空間スケールに応じた適用範囲があり（図-1はあくまでも目安にしか過ぎないが）、おのおの長所と短所を持っているので、目的に応じて使い分ける必要があることは繰り返すまでもなからう。ここでは、「三次元海浜変形モデル」が一般的な条件のもとでの海浜変形を対象としているので少なくとも原理的には汎用性の点で優れていることと、波浪場と流れの場の計算も含んでいるので沿岸過程の数値モデルと呼ぶのに最もふさわしいこと等の理由から、それに主眼を置いて数値モデルとしての課題や将来性に関する本題の話を進めることにしたい。

3. 三次元海浜変形モデルの改良に向けて

3.1 先ずは縦断地形変化モデルの改良から

三次元海浜変形モデルに主眼を置いて話を進めるといっておきながら早速ではあるが、先ず「縦断地形変化モデル」の改良の可能性についての検討から始めることにする。縦断地形変化モデルは沿岸流や波の回折等の影響を考慮しなくともすむのでかなり単純化された条件で扱うことができる一方、波の有限振幅性や戻り流れ、砕波による乱れ等が漂砂量に及ぼす影響など、三次元海浜変形モデルの改良を考える際にも考慮する必要が生じるであろういくつかの重要な課題を含んでいるからである。

先ず、砕波点のやや外から岸側の領域で通常顕著となる波の有限振幅性は、流速の時間波形の歪みを通して、正味の岸沖漂砂の量や向きに影響を及ぼすものと考えられる。有限振幅波の変形計算手法は多々提案されているが、余りに精巧な手法は計算所要時間や必要精度の点で海浜変形モデルとは馴染まない。三次元海浜変形モデルで必要となる平面波浪場の計算への拡張を考えると、目下のところはやはり非定常緩勾配方程式をベースにするのが適当ではないかと思い、それに非線形項を導入することを試みているところである。これがうまくいって各点での流速波形の歪みの特性が評価できるようになれば、その影響を取り入れて漂砂量算定式（や漂砂方向関数）を改良することになる。

砕波帯内の戻り流れや乱れに関してはかなり合理的なモデル化ができ¹²⁾、海浜縦断形状と入射波の条件が与えられれば戻り流れと乱れ強度の分布がある程度まで評価できるようになった。このモデルでは波の変

形の解析に非定常緩勾配方程式を用いているので他の部分との整合性もよい。問題はこうして評価された戻り流れや乱れ強度を漂砂量とどのように関連づけるかである。波と流れが共存する場での漂砂量についてはこれ迄にもいろいろと研究がなされており、筆者らの三次元海浜変形モデルで用いられている漂砂量算定式はそれらを参考にしながら波・流れ共存の効果を最も簡単な形で表現しようとしたものであった。その漂砂量算定式をそのまま波動流プラス戻り流れの場に適用するだけでも、現在の縦断地形変化モデルよりはもっともらしい結果が得られるであろうことは予想できる。とはいっても、単純化し過ぎたきらいがあるため、もう一度実際の現象に立ち戻った検討を開始したところである。これについては3、4節でももう少し詳しく述べようと思う。一方、砕波による乱れが漂砂量に及ぼす効果については、筆者らの縦断地形変化モデル⁹⁾の中でも考慮されているが、今になってみると考え方と定式化にやや問題があった。この点についても3、4節で説明する。

戻り流れや乱れの影響を考慮することにより砕波帯内の地形変化の算定精度が向上できれば、次なる問題はswash zoneの漂砂と地形変化の評価である。swash zoneでは波の打上げ時には浮遊やシートフローのモードの底質移動が卓越し、引き波時には掃流形式の移動も重要になると思われる。従来の境界層理論に基づく抵抗則を適用したのでは底面摩擦応力の精度のよい評価は無理かも知れない上、水深や波高の岸沖方向の相対的变化が大きい領域であるので底質のLagrange運動が漂砂量に及ぼす効果も無視できない程度になるであろう。swash zoneの漂砂はこのように現象そのものが複雑である上に、最も目立つ汀線付近の地形変化を支配するというように、なかなか厄介な代物である。筆者が当面やってみようと考えているのは、最初に述べた非線形効果を含む非定常緩勾配方程式の解として求まる流速の時空間分布を用い、従来の抵抗則を準用してLagrange的に底質移動を追いかけたときに求まる正味の漂砂量の分布によって、どの程度まで汀線付近の地形変化が再現できるか（または、できないか）を確認することである。

局所的な底面勾配が漂砂量に及ぼす影響についても、縦断地形変化モデルの中で考えた方が検討が容易である。移動形態別の底勾配の影響を扱った従来のいくつかの研究等も参考にしながら検討を進めようと思う。

以上の諸点に関してある程度の改良がなされたとして、縦断地形変化モデルがクリアしなければならない大きな課題は、果して平衡地形までの計算が可能か否かであろう。平衡地形なるものが厳密な意味で存在するかという疑問もあるので、これを換言すれば、モデルがかなり長期間の地形変化を対象とした計算に耐え得るか、あるいは入射波を一定にしたとき時間の経過と共に地形変化量がうまく減少していくかが、モデルの実用性を判断する上で重要なポイントとなる。幸い縦断地形変化に関しては実測データも豊富にあるので、試行計算結果を実測データと比較しながら各素過程のモデルに修正を加えていくのが有効と思われる。

構造物の存在や波の不規則性の影響については、次節以降で考えることにする。

3. 2 波浪場の計算モデル

この節では、三次元海浜変形モデルの中で必要とされる波浪場の計算を主目的としたモデルを考える。前節でも述べたように、一般的な地形や構造物配置での波浪場の計算手法としては非定常緩勾配方程式をベースにするのが最善ではなかろうかというのが筆者の目下の考えである。ただしそれを前提にしたとしても、波と流れの干渉や波の不規則性と有限振幅性をどのようにモデルに取り入れたらよいのであろうか。

先ず波と流れの干渉に関しては、筆者らは既に波・流れ共存場に拡張した非定常緩勾配方程式を導き¹³⁾、流れの共存下での砕波条件についても検討を加え¹⁴⁾、それらを組み合わせたモデルにより波と流れの計算を試みた¹⁵⁾。この種の計算に内在する問題の1つは、入射波の他に反射波や回折波等が重合している波浪場において波向をどう評価するかである。つまり一般的な条件下ではいくつもの成分波が存在しているにも拘らず、各点で唯一の波向を定義しなければならない。重合波浪場では水粒子が水平面内で楕円軌道を描くので、現在はその楕円軌道の長軸方向を波向と定義しているが、このようにして定義された波向が空間的にかなり急激な変化を示す場合が少なくないので、波と流れの計算それ自体には余り支障を来さないものの、どうも気持ちが悪い。何らかの工夫をしたいところである。またこれ迄は、波の場の定常解と流れの場の定

場の定常解を交互に計算する方法で、波・流れの干渉を含む最終的な解を求めている。これは余り能率的な計算法ではない。少なくとも波の場合は非定常計算により求めるのであるから、流れの場合も非定常計算を行うことにして、波と流れの繰り返し計算の頻度を増した方が（例えば波の周期の数倍程度の時間間隔で）、計算の安定性がよくなり、ひょっとしたら最終解を得るに要する計算時間も短縮される可能性は充分ある。ただし、繰り返しごとの各点の初期値として、流れや平均水位の方は前のサイクルの値がよい近似を与えるであろうが、波の方についてはそうもいかないかも知れない。水面変動の振幅や位相角の平面分布を補正して初期値を与えるといった工夫が必要であろう。波と流れの干渉に関してもう1つ問題を挙げるとすれば、離岸流のように砕波帯の中から外へ出ていく流れが砕波による乱れを輸送し、それが砕波帯外の波の変形にも影響することである¹⁴⁾。現象としては格別に複雑でもなさそうなので、モデルの中にこの効果を取り入れることはそれ程難しくはないと思うが。

有限振幅性の効果については、前節で述べた非線形の非定常緩勾配方程式の成否にもよるが、平面波浪場に対して流れとの干渉項や非線形項を同時に含む計算を行うのは当面無理であろう。恐らくは線形の方程式のままで計算しておいて、有限振幅性はアーセル数や波高水深比等を媒介として漂砂量式に反映させるといった手法を用いるのが現実的と思われる。

現地海岸への適用を前提としたときに、流れとの干渉や有限振幅性の影響以上に重要となるのは、間違いなく波浪の不規則性である。さまざまな周波数成分と方向成分からなる不規則波を考えることの重要性は、単にその方が現実の海の波の特性をよりよく再現できるという点にのみあるのではない。それも勿論大事だが、その結果として求まる浅海域の平面波浪場が規則波の場合に比して相当程度に平滑化されることが重要なのである。これは取りもなおさず海浜流や漂砂に対する外力場が平滑化されることを意味し、その結果として海浜流や地形変化の計算が楽になり（精度や安定性を余り低下させずに計算格子を疎くとれ）、しかもそれらの計算結果は実際現象をよりよく再現する筈であるから、こんなうまい話はない。

では波の計算で非定常緩勾配方程式をベースとするという方針は変えないものとして、不規則波浪の浅海域でのさまざまな変形、つまり屈折、回折、反射、砕波等々をどのようにして扱えばよいのであろうか。筆者らは¹⁶⁾ 単一方向の不規則波の浅水砕波変形を非定常緩勾配方程式で計算する際に周波数成分に分離して扱う方法をとったが、砕波なる非線形現象を含むが故に各周波数成分を完全に独立には計算することができないため、簡単な条件に対してであるにも拘らず相当の計算時間を要した。この経験から判断して、平面波浪場の計算において周波数・波向成分に分離して扱うという手法をとることはまず現実的ではない。特に海浜変形モデルの中では、波の計算を何度も繰り返して行う必要があるのではなさである。とすると結局は、不規則波を単一の規則波で代表させて扱う以外に手はなさそうである。その場合、不規則性の結果として最も顕著に現われる平面波浪場の平滑化は、非定常緩勾配方程式の中にエネルギーあるいは運動量の疑似的な水平拡散項を導入することにより、かなり適切に表現できるのではないかと筆者は考えている。砕波減衰係数の平滑化も同時に取り入れることも考えうるが、恐らくは水平拡散項の導入だけで十分であろう。方向スペクトルを有する波が直線平行等深線の海岸に垂直な主方向で入射してくるという単純なケースを考えても、このような取り扱い方では真の解が得られないのは明白であるが、三次元海浜変形モデルに組み込む波浪場モデルとしては充分実用に耐え得るものと期待している。拡散係数の値を周波数帯域幅や方向集中度パラメータ等とどう関連づけて定めるか、等方的な（スカラーの）拡散係数でよいのか、といった点について今後充分に検討する必要があることはいうまでもない。

流速波速比を用いた砕波指標がかなり複雑な波浪場に適用でき¹⁷⁾、波・流れ共存場に拡張できることも既に示したが^{14), 15)}、構造物からの反射のために重複的な砕波をする場合には適用できないので、目下この問題についても検討中である¹⁸⁾。

3. 3 海浜流場の計算モデル

鉛直方向には流速分布が一様と仮定した平面的な海浜流場の計算に関する限り、本質的な部分に対する計

算手法の改良の余地も必要性も余りないように思える。

汀線境界付近の扱いに対する筆者の見解は前報⁴⁾で述べたのでここで繰り返すことはせず、汀線の付近の swash zone における底面摩擦項の評価が問題となるであろうことを指摘しておくにとどめる。摩擦項に関しては、既存の波・流れ共存下の摩擦則を重合波浪場に拡張することと、更にそのような場合の摩擦応力の時間平均値を合理的に算定する手法を開発することが必要となろう。現地海浜の条件では砂漣等が存在しても滑面乱流として扱って大過ないと思われるが、実験室規模では粗度の評価も問題である。

水平拡散項に関しては、波と海浜流の他に河口流などそれ自身が強い乱れを伴っている流れも共存する場合も含む一般的な条件下での拡散係数の見積りが1つのポイントになる。代表長さとして局所水深を用い、速度のスケールとしては波・流れの合成流速に比例させる程度の扱いが最も簡単であり、当然ずといえども遠からずではないかと思うがいかなものか。

さて、海浜流場の三次元構造つまり流速の鉛直分布はどのように扱うべきであろうか。三次元場の方程式を解くのが正統的であることは当然だが、やはり海浜変形モデルの一部として使うことを考えると非現実的である。結局、従来の方法で平面的な海浜流場を計算しておいて、それに流速の鉛直分布を重ねるといった方法が実際的なように思える。流速の鉛直分布の評価には、例えば前述の戻り流れのモデル¹²⁾を拡張して用いることができよう。あるいはそれでも計算時間がかかり過ぎるようであれば、代表的な条件に対して鉛直分布を計算しておいて、それをいくつかのパターンに分類すると共に、パターン毎に適当なパラメータを用いて基準化するなどの工夫が必要になるかも知れない。いずれにせよ、海浜流場の三次元構造が計算できたとしても、その結果を漂砂量の評価の段階で利用しなければ無意味なわけであるから、漂砂量算定式の開発改良の進展にとらみあわせながら、検討を進めることになる。

3. 4 漂砂量と地形変化の計算モデル

先ず、最も単純な条件の1つである進行波のみのもとでの漂砂について考えてみる。筆者らがもっぱら用いてきた漂砂量算定式は、簡単にいえば正味の漂砂量が底面摩擦応力と底面軌道流速の積にはほぼ比例するとし、正味の漂砂の向きを漂砂方向関数で評価するものであった。漂砂方向関数は同時に正味の漂砂の向きが逆転する地点の近傍での漂砂量を補正する役目も担っている。このようなパワーモデルの概念に基づく漂砂量算定式は、掃流砂や浮遊砂のみならずシートフローの状態で移動する底質量の評価にも使えることがある程度確かめられており、今後もベースにしていってもよいのではないかと考えている。ただし例えば波の有限振幅性により生じる流速波形の歪みが漂砂量式中の係数値にどのように関わってくるかについては、実験的研究や理論的考察がなお必要とされる。特に漂砂方向関数に関しては未だ改良の余地が多く、流速の非対称性や底面微地形の影響等をもっと合理的に取り入れていかなければならない。

重合波浪場の漂砂についてはなかなかよいアイデアが思いうかばない。現在のモデルでは^{3), 10)}、波浪場の各点ごとに波を2方向成分に分離してそれぞれに対する漂砂量を算定したのち和をとるという方法を用いているが、これはあくまでも窮余の一策に過ぎない。重合波浪場では一般に各点で水粒子が水平面内の楕円軌道を描く。やはりこのような流速場での底面摩擦応力の時間変化や底質の運動を一度きちんと考え直して、現象をもっとしっかり理解した上での新しいモデル化を行う必要があるようである。この時に忘れてならないことは、重合波浪場の極端な場合として重複波が含まれることである。重複波のもとでは、掃流砂が卓越する場合には節の部分へ砂が集まり浮遊砂が卓越するときには腹の部分で堆積が生じるといった具合に、底質の移動形態によって漂砂の方向が強く影響を受けることが知られている。このような現象には鉛直断面内の循環流や底面境界層内の流速分布等も関係しているものと思われるが、そこまでは実際の計算に含めないにしても、重複波のもとでの漂砂量がきちんと評価できることが重合波浪場の漂砂量算定式の重要な必要条件の1つであることに留意しておかなければなるまい。

さて次に波・流れ共存下の漂砂量についてはどうであろうか。筆者らのモデルでは、波・流れ共存時の底面摩擦応力が底質の攪乱力として作用すると考え、それに軌道流速の振幅または平均流速を乗じることに

より波を主因とする漂砂量と平均流による漂砂量を評価するという、やはりパワーモデルの概念に基づいた漂砂量算定式を用いている。流れの寄与分についてのこのような扱いの妥当性を補強するデータも報告されているが¹⁹⁾、この漂砂量算定式に全幅の信頼を寄せることはまだちょっと無理である。やはり基礎データを更に集める必要があると考えて循環流装置付きの振動流水槽を用いた実験的研究も進めており、振動流と定常流を合成した流れのパワーが正味の漂砂量とよい相関をもつことを見出したが²⁰⁾、一般的な条件へ適用可能な漂砂量算定式を得るには到っていない。更に、前節で述べた流れの鉛直分布が与えられたとして、それを漂砂量の評価にどのように生かすかが問題である。浮遊砂の鉛直分布の計算までを組み入れるのはまず無理であるとする、底面よりある高さでの流速を平均流の代表流速として漂砂量式の中で用いるといった程度が妥当なところではないだろうか。まずは海浜縦断地形変化モデルに戻り流れの影響を加味した試行計算を行い、この点の見極めをつけたいと思っている。

砕波による乱れが漂砂量に及ぼす効果について、著者らの縦断地形変化モデル⁹⁾では、砕波後のエネルギー減衰率に比例した漂砂量が生じると仮定した。パワーモデルの概念を考え直してみるとこの扱いは不適切である。エネルギー減衰率から乱流応力の強度に相当する量を求め、それと軌道流速あるいは平均流速との積が波または流れによる漂砂量中の乱れの寄与分に比例すると考えた方が合理的であろう。そのような砕波による乱れの効果や波・流れの干渉効果を取り入れた海浜変形計算も行って見たが²¹⁾、実測データによる検証がなお必要とされている。

局所的な底勾配の影響について3. 1で述べたことに付け加えるならば、底質の移動形態により影響の仕方や程度が変化するのでそれぞれの計算点ごとに各移動形態の相対的重要性を考慮できるようにすること、乱れも含めた応力作用下での底質の安息角等に関するデータを得て局所勾配の制約条件の中に組み込むことが必要であろう。swash zoneの漂砂に関しては、3. 1で述べた岸沖方向漂砂量に加えて、底質がジグザグ運動をしながら汀線付近を移動する浜漂砂の沿岸方向成分を評価しなければならない。

漂砂量算定式が少なからぬ数の未知係数を含むことは残念ながら当分は避けられそうもない。しかも数が多いので各対象海浜に対してキャリブレーションで係数値を決めてやるのもなかなか困難である。できるだけ単純な条件を選ぶことにより関係する因子や未知係数の数を減らした上で係数値に関するデータを蓄積すること、結果を見ながら係数の変化ができるだけ小さくおさまるように漂砂量式自身を修正することが重要である。例えば縦断形状の変化のみが生じる場合や、逆に沿岸漂砂のみが卓越するようなケースが、このような係数値の同定にふさわしい条件といえる。

混合粒径の効果あるいは波と流れによる底質のふるい分け作用の効果も忘れてはならないことであろうが、三次元海浜変形モデル自体がそれらを考慮する段階にはまだ達していないのではなかろうか。

3. 5 三次元海浜変形過程の全体モデル

以上の波浪場、海浜流場、漂砂と地形変化の3つのサブモデルを組み合わせることにより、三次元海浜変形過程の全体モデルが形を成す。ここで問題となるのが波と流れと地形の相互作用、もっと簡単にいうならば、地形変化の、波および流れの場へのフィードバック効果である。沖波条件が一定であったとしても、海浜地形の変化につれて沿岸域の波浪や海浜流の場も時々刻々と変化する。この時々刻々の変化をも取り入れた非定常モデルは計算量等の点で非現実的であろうということで、従来のモデルでは相当に長い時間にわたってたとえ地形が変化しても波と流れの場は変化しないと仮定する準定常の扱いをしていた。果してこれではよいのかという疑問がわいてくる。準定常の扱いで求めた海浜変形の計算結果は十分な精度をもち得るであろうか。また非定常モデルは本当に非現実的であろうか。筆者は答をもちあわせていない。今せいぜい言えることは、波・流れ・漂砂と地形の計算効率を向上させ、できるだけ短い時間間隔で反復計算をやって様子を見ることが先ず必要である、といった余りにも常識的な答しかない。

三次元海浜変形モデルの改良を考えていく場合に大事なことは、常に全体の構成を忘れないことである。例えば波浪場の計算モデルを改良するにしても、その改良点が漂砂量や海浜変形の計算の中でどう生きてくる

かが重要であるし、逆に漂砂量公式を改良するにしても、改良した結果として新たに必要となる諸量が前段の波や流れの計算でうまく得られるかがポイントとなる。これは極く当り前のことであるが、部分のことを研究しているとつい全体像を忘れてしまうといったことがありがちなので、自戒も込めて念を押しておく。

4. どこまでの予測が可能か

沿岸過程もしくは海浜変形の数理モデルによってどの程度（期間、範囲、精度など）までの将来予測が可能であろうか。これにはさまざまな不確定要素が絡んでくるので明確な解答を与えるのは無理といわざるを得ない。主な不確定要素は、前章で列挙したような数理モデルの改良がどれくらい実現されるか、モデルの検定あるいは係数値の同定に使い得る実海岸でのデータが入手可能か否か、波候に代表されるような外力条件の方の将来予測の可能性はどうか、等である。わからないとばかりいっては話にならないので、個々の数理モデルについてももう少しだけ突っ込んで考えてみよう。

先ず本稿では簡単にしか触れなかった「汀線変化モデル」であるが、代表的な1-lineモデルに関する限りそれ自身の改良の余地は余りないまでに成熟した段階にあるといってもよい。例えば突堤が沿岸漂砂を部分的にしか捕捉しない場合とか離岸堤の沖側で波が砕ける場合などを考えると、沿岸漂砂の岸冲方向分布等を何らかの形でもう少しきちんと取り入れれば、精度や適用範囲が更に向上すると思われるが。できるだけ多くの実海岸に対する汀線変化の追算を行って、沿岸漂砂量式中の係数や漂砂帯外縁水深と波浪・底質・海浜勾配等との関連を明らかにすることも大事である。現時点では対象海岸ごとにモデルの検定をしなければならないが、それを前提にすれば波浪等の外力条件の将来変動を考慮しても、数年間までの汀線変化予測は可能であろう。生じうる汀線変化をある幅の中で把えるという程度であれば、平均的な波候と極端的な波候に対して計算を行うことにより、図-1に示したように10年程度の予測にも適用できよう。沿岸距離スケールについて図-1では10km以上まで適用可能としてあるが、利用の実績からいっても、またそれ以上に通常は10km以上も離れた地点の海浜過程は互いに独立していると考えて差し支えない場合がほとんどなので、数kmの範囲内で適用するのが妥当と考えた方がよいのではなかろうか。

「縦断地形変化モデル」の適用性は今後の改良の進み具合によるところが大きいが、砕波による乱れや戻り流れの効果まで含めた漂砂量算定手法の改良がその1つであるが、実用性の観点からすれば3.1節では指摘するとどめた波浪の不規則性および構造物による波と流れの変化の影響を取り込むことがそれに劣らず重要である。これらの課題のクリアーが前提であるが、入射波浪の変化にともなう縦断地形の季節変化までを再現可能な段階までもって置いておいて、実際には主に1回の時化による変形とその後の数週間での回復等の予測に適用するということになるだろう。

さて「三次元海浜変形モデル」であるが、やはり今後の改良の進展によるところが極めて大きく、検定に使える実海岸データが充分に得られるか否かもこのモデルについては特に不確定である。現段階では現地スケールで数百mの範囲を対象にした数日間の地形変化の予測すら危なっかしいというのが率直なところである。前章で見たように改良を必要とする点は余りにも多く、個々の課題も相当に難しいように思える。特に重要なのは漂砂量算定式の改良と不規則波の変形計算モデルの開発であろう。前者については大型水路や振動流水槽等を用いた現地スケールに近い条件での実験ならびに現地観測を通してデータの収集と現象の理解につとめることが先ず必要であるし、現象の理解のためには底質運動の数値シミュレーション等も有効と思われる。これに対し後者の不規則波の変形計算の方は意外に簡単に進む可能性がある。現象把握と検証のためにはやはり実験や現地観測が重要なことはいうまでもないが。これから5年間程度で上述の全ての課題にはば満足のいく解決策が見つかり、その後の5年以内には三次元海浜変形モデルが実用に耐えうるものになるであろうというのが、筆者の現時点での予想である。確度の高い予想というよりは努力目標といった方が当たっているかもしれないが。その段階では図-1に示したように空間スケール数km、時間スケール数か月程度の三次元的な海浜変形の予測計算が可能となるとみたい。さて10年後にどのような気持ちで本稿を読み

返すことになるであろうか。

ここで物理モデル（水理模型実験）と数値モデルとの関係についてもう一度考えてみよう。第1章でも述べたように、対象海浜域が広くなればなるほど移動床実験による現象の再現は困難になる。移動床実験における時間縮尺のとり方や縮尺効果の問題がそう簡単に解決されるとは思えない。数値モデルの方が長足の進歩をとげ、海浜変形の予測手法としての主役をつとめることになるであろうことはほぼ間違いない。これはしかしながら水理実験の役目がなくなっていくことを意味するのではなく、その役割が変化していくと考えるべきである。沿岸過程という複雑な現象をコントロールされた条件の下で近似的にでも再現できるという物理モデルの長所を生かして利用していかなければならない。特に沿岸過程に含まれる個々の素過程に着目して抽出した局所的な現象を現地スケールで再現したり、波の不規則性の影響が海浜変形にどのように現われるかを大局的に把握したりするのに有効であろう。物理モデルと数値モデルは競合関係にあるのではなく共存共栄の関係を保っていくべきことをあらためて強調しておきたい。

図-1で「マクロの手法」として分類した経験工学的あるいは統計地理学的手法の重要性も低下することはないであろう。実海岸でのデータが蓄積整理され、物理モデルや数値モデルを通して現象への理解が深まっていくにつれて、数値モデルではカバーしにくい時空間スケールの大きな沿岸過程の予測に今以上に利用される可能性は充分にある。

沿岸過程の長期予測、例えば数十年後の海浜地形の予測ということになると、数値モデルにせよマクロの手法にせよ、モデルに入力すべき外的条件の予測精度が支配的になる。海水準の変化や波候の大規模な変動、河川流域や沿岸陸域の都市化あるいは砂漠化といった、現在のわれわれの知識では信頼のできるシナリオを設定できない事象がまだまだ多い。時空間スケールの大きなこれらの事象に対する研究の進展も、ミクロな素過程の研究に劣らず急がれているのである。

5. おわりに

いよいよ結語を書くに到って本文を読み直してみても、内容がいささかお粗末に過ぎるのでうんざりしているところである。思いつくままをただひたすら書き並べただけのものになってしまった。いろいろと課題は取り上げてはみたものの十分な解決の方向を示せずに終わってしまったり、直観的なあるいは楽観的な見解をくどくどと述べてみたり等々、何とも不出米である。といってももう今更書き直している余裕もない。ただ、海浜変形を中心とした沿岸過程の数値モデルについての筆者の目下の考えは未だ混沌としている部分も含めてかなりの程度まで述べさせて戴いたつもりであり、この方面のテーマに関心をお持ちの読者の方々にほんの少しでも参考になれば筆者にとって望外の喜びである。

参 考 文 献

- 1) 西村仁嗣：海浜変形の数値シミュレーション，1978年度水工学に関する夏期研修会講義集，pp.B-5-1～14，1978.
- 2) 橋本 宏：海浜変形の数値形算，1981年度水工学に関する夏期研修会講義集，pp.B-8-1～12，1981.
- 3) 堀川清司（編）：海岸環境工学，第3編，pp.211～301，第4編，pp.303～363，1985.
- 4) 渡辺 晃：海浜変形の数値予測モデル，1985年度水工学に関する夏期研修会講義集，pp.B-9-1～16，1985.
- 5) 渡辺 晃：海浜変形のモデリング — 海岸，第1回河川・海岸シンポジウム講演集，pp.38～51，1986.
- 6) Hanson, H., M. B. Gravens & N. C. Kraus: Prototype applications of a generalized shoreline change numerical model, Proc. 21st ICCE, pp.1265～1279, 1989.
- 7) Larson, M., N. C. Kraus & T. Sunamura: Beach profile change: morphology, transport rate, an

- numerical simulation, Proc. 21st ICCE, pp. 1295~1309, 1989.
- 8) De Vriend, H. J.: Two and three-dimensional mathematical modelling of coastal morphology, Rep., Delft Hydraulics Laboratory, 37p., 1986.
 - 9) Dibajnia, M.・渡辺 晃: 波浪場と海浜縦断地形変化の数値計算モデル, 第34回海溝論文集, pp. 291~295, 1987.
 - 10) 渡辺 晃・丸山康樹・清水隆夫・榑山 勉: 構造物設置に伴う三次元海浜変形の数値予測モデル, 第31回海溝論文集, pp. 406~410, 1984.
 - 11) De Vriend, H. J. & J. S. Ribberink: A quasi-3D mathematical model of coastal morphology, Proc. 21st ICCE, pp. 1689~1703, 1989.
 - 12) 岡安章夫・磯部雅彦・渡辺 晃: 碎波帯におけるエネルギー収支と戻り流れのモデリング, 海岸工学論文集, 第36巻. (印刷中)
 - 13) 大中 晋・渡辺 晃・磯部雅彦: 波・流れ共存場に拡張した非定常緩勾配方程式による波浪場の数値計算, 第34回海溝論文集, pp. 91~95, 1987.
 - 14) 渡辺 晃・大中 晋・磯部雅彦: 流れの影響を受ける斜面上の波の碎波条件, 第43回年講概要集, II, pp. 18~19, 1988.
 - 15) Ohnaka, S., A. Watanabe & M. Isobe: Numerical modeling of wave deformation with a current, Proc. 21st ICCE, pp. 393~407, 1989.
 - 16) 渡辺 晃・磯部雅彦・泉宮尊司・中野英樹: 非定常緩勾配方程式による不規則波の浅水碎波変形の解析, 第35回海溝論文集, pp. 178~181, 1988.
 - 17) 渡辺 晃・丸山康樹: 屈折・回折・碎波減衰を含む波浪場の数値解析法, 第31回海溝論文集, pp. 103~107, 1984.
 - 18) 筒井純一・磯部雅彦・渡辺 晃: 急勾配斜面上における碎波条件に関する実験的研究, 第44回年講概要集, II. (印刷中)
 - 19) Kraus, N. C., K. J. Gingerich & J. D. Rosati: Toward an improved empirical formula for longshore sand transport, Proc. 21st ICCE, pp. 1182~1196, 1989.
 - 20) 渡辺 晃・先灘正成・磯部雅彦: 波・流れ共存場における砂澱形状と漂砂量, 海岸工学論文集, 第36巻. (印刷中)
 - 21) 大中 晋・渡辺 晃: 波・流れ相互干渉を考慮した波動場・海浜流場・地形変化の計算, 海岸工学論文集, 第36巻. (印刷中)