

海浜変形シミュレーション

Numerical Simulation of Beach Evolution

清水 琢三

Takuzo SHIMIZU

1. はじめに

近年、砂浜海岸の海岸侵食ならびに港湾、漁港などの構造物建設に伴う海浜変形が、海岸保全のみならず、海岸環境の観点からも大きな社会問題の一つになっている。前者は、ダムの建設、河川改修による河川からの流送土砂の減少、海崖の侵食防止対策工の建設による供給土砂の減少など漂砂供給源の減少がその原因であり、後者は漂砂の連続的な流れの遮断がその原因であるが、海岸侵食に拍車をかける要因ともなっている。

現在では、漂砂活動の活発な砂浜海岸に港湾や埋立地を建設して沿岸域の開発を行う場合には、環境アセスメントの一環として、海岸構造物の建設に伴う海浜変形を予測し、海岸保全の立場から周辺海岸への影響について事前に把握することが必要不可欠になっている。また、発電所専用港湾や漁港などのように比較的小さな港を建設する場合には、防波堤周辺の堆積とともに、港口・港内航路の埋没に悩まされることが多い。したがって、周辺海岸への影響に十分配慮しつつ、港湾の機能維持という観点から航路埋没対策についても検討し、防波堤や埋立地などの平面レイアウトを適切に計画する必要がある。そのためには、構造物建設に伴う海浜変形を数値シミュレーション等により事前に適切に予測・評価する手法を確立する必要がある。

海浜変形は、古くから海岸工学の重要な研究課題であったが、現象の複雑さ故に、今もなお未解決の課題が多く、定量的な評価方法が確立されたとは必ずしも言えない現状にある。わが国では、昭和50年代に大規模な現地観測と水理実験ならびにそれらに立脚した数値シミュレーション手法の開発に関する研究プロジェクトが精力的かつ組織的に実施され、その研究成果は「海岸環境工学—海岸過程の理論・観測・予測手法—(堀川清司編, 1985)」にまとめられている。この研究プロジェクトを契機として、従来行われてきた経験的な手法や相似則に問題のある移動床水理模型実験に代わって、数値シミュレーションによる海浜変形モデル、特に3次元海浜変形モデルの実際問題への適用が盛んに試みられるようになってきた。

著者は、ちょうどその研究プロジェクトの最中に大学院で海浜変形を勉強し、たまたま社会人になってからも海浜変形モデルを数多くの実際問題に適用しながらモデルの現地適用性を検討する機会を得た。本稿では、そのような経験からできるだけ実際問題への適用を念頭に、物理機構に忠実な一般的な海浜変形モデルの構築に向けての最近の研究動向を紹介するとともに、現在のところ実用的に現地に適用可能な海浜変形モデルの現状について述べたい。

2. 海浜変形モデルの分類と適用範囲

2.1 海浜変形問題の分類

わが国の砂浜海岸は、現在では自然海岸と呼べるところはほとんどなく、漂砂源の減少と海岸構造物の建設により海岸侵食が顕在化しているところが多い。したがって、海浜変形シミュレーションの検討対象は構造物建設に伴う海浜変形が中心となる。しかしながら、漂砂のメカニズムを理解した上で有効な海岸保全対策を検討するためには、自然海岸における地形変化をできるだけ忠実に再現できるモデルであることが望ましい。そこで、海浜変形の問題を構造物建設に伴う海浜変形と自然海岸の地形変化に分けて、時間スケールで整理したものを表-1に示す。

(1) 構造物建設に伴う海浜変形

構造物建設に伴う海浜変形は、①外力場の変化に伴う構造物近傍の比較的小規模に急激に生じる海浜変形と②沿岸漂砂の遮断による土砂収支の不均衡に起因する長期的かつ広範囲の海浜変形の複合現象と考えられるが、これまで両者を十分区別することなく議論されてきたように思われる。確かに、漁港や港湾などが徐々に拡張される場合にはそれらが同時進行するため、区別がつかない場合も多い。

わが国では一方向の沿岸漂砂が卓越する海岸は比較的稀で、卓越波向は存在するものの、汀線に対して逆方向からの入射波も存在する海岸が多い。例えば、そのような砂浜海岸に港を建設した場合を考えてみよう。港の主防波堤は卓越波向に対して港口が遮蔽されるように建設されるのが一般的であるので、漂砂の下手側に港口が建設される場合が多い。すると、主防波堤の遮蔽域では波向によらず港口へ向かう海浜循環流が発達し、顕著な堆積を生じるとともに、隣接海岸では逆に侵食が生じる。このような外力場の変化に伴う海浜変形は、建設開始とともに急激に生じるが、港の規模と外力に応じて侵食範囲も比較的限定され、しかも短期間に平衡状態となる場合が多い。さらに港による沿岸漂砂の遮断が重なると、漂砂の下手側海岸では供給土砂がないため、前述の主防波堤の遮蔽の影響

による侵食が徐々に下手側に拡大し、下手側に海浜変形の境界がなければ無限に進行することになることから大スケールかつ長期間の海浜変形が生じる。このような海岸侵食の機構については、既に土屋ら(1991)により解説されている。また、宇多(1993)は、海岸構造物建設に伴う海岸侵食機構として、両者を分けて同様の説明を行っているが、遮蔽域の形成による海浜変形の場合でも、堆積砂の維持浸漬を繰り返すと土砂の不均衡が生じて侵食域が拡大することを指摘している。

(2) 自然海岸の地形変化

自然海岸では、高波浪時には波と戻り流れによる汀線直角方向の漂砂と斜め入射波に起因する汀線平行方向の沿岸漂砂が共存している。前者による縦断地形変化は、高波浪による汀線の前進・バーの形成とその後の汀線の回復・前進ならびにバーの移動・消滅で特徴づけられ、古くからの研究課題であった。このような縦断地形変化は、高波浪時の短期的な地形変化に対しては無視し得ないものの、長期的にはキャンセルする考えられている。すなわちバーは高波浪時に汀線付近から運搬されてきた土砂の一時的な貯蔵庫と考えられている(砂村ら, 1985)。しかしながら、異常波浪によりそのようなバーを越えて砂が沖に運ばれる場合やバーが消滅する場合には、その後の堆積性の波浪によっても沖合に流失した砂の回復は期待できず、長期的にみれば土砂の不均衡の原因となる。また、Sunamura・Horikawa(1974)のCパラメータによれば現地では $C > 18$ で侵食型海浜となるが、海底勾配1/100の緩勾配海岸であっても有義波高1.1m、周期8 s程度に対して侵食型となる。したがって、わが国の外洋に面した砂浜海岸は、平均的な波浪条件(エネルギー平均有義波で概ね1.5m程度)でも侵食型となるので、構造物建設による影響がなくとも、土砂の供給がなければ長期的には侵食傾向になると考えられる。

また、沿岸方向の砂移動による長期的な地形変化は、河川からの流送土砂量の減少に起因する土砂収支の不均衡が原因で生じることが多く、河口デルタの縮小や砂嘴地形の侵食が代表例として挙げられる。

2.2 海浜変形モデルの分類と適用範囲

平面的な地形変化予測手法は、「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(表-2)。

(1) 海岸線変化モデル

「海岸線変化モデル」は、さらに汀線の変化のみを扱った「汀線変化モデル」と、水深の深いところまで予測可能な「等深線変化モデル」に分けられるが、いずれも沿岸流による砂移動を碎波点における波高と波向でマクロ的に取り扱っており、実際現象をかなり単純化したモデルである。したがって、構造物近傍の沖

表-1 海浜変形問題の分類

(1) 構造物建設に伴う海浜変形	
① 比較的小スケール・短期間の海浜変形 (数 km, 1 ~ 5 年)	・ 外力場の変化に伴う地形変化 (海浜流による漂砂が支配的) → 遮蔽域形成に伴う遮蔽域内の堆積とその隣接海岸の侵食 (漂砂の卓越方向に関係なく生じる)
② 大スケール・長期間の海浜変形 (数十 km, 5 ~ 30 年)	・ 土砂収支の不均衡 (漂砂の遮断, 供給源の減少) に伴う地形変化 (沿岸漂砂が支配的) → 漂砂の下手側侵食域の拡大
(2) 自然海岸の地形変化	
① 短期間の地形変化 (一時化 ~ 数年)	・ 縦断地形変化 (波と戻り流れによる漂砂 / 長周期波) → 汀線の侵食とバーの形成 (一時化) ・ 汀線の回復とバーの移動・消滅 (1 ~ 数年) ・ 異常波浪による沖合への流失 (一時化) ・ 平面地形変化 (長周期波, 遡上波 / 離岸流を含む海浜流系) → ビーチカスプ, メガカスプ, ジャイアントカスプの形成
② 長期間の地形変化 (沿岸漂砂が支配的)	・ 供給土砂量が豊富な場合 (数十年以上) → 河口デルタの発達 ・ 砂嘴地形, 島の遮蔽による舌状砂州地形の発達 ・ 供給土砂量の減少に伴う地形変化 (数年 ~ 数十年) → 河口デルタの縮小 ・ 砂嘴地形の侵食 (海岸侵食の漂砂下手側への拡大)

向き流れや循環流を考慮できないため構造物周辺の地形変化の予測精度には限界があるものの、沿岸漂砂の遮断や供給源の減少に伴う広域的かつ長期的な海浜の土砂収支を議論するには十分な精度を有している（例えば、土屋ら、1993）。なかでも汀線変化モデルは、計算時間が比較的短いこともあって、現在、環境アセスメント等に応用的に広く用いられている。汀線変化モデルの詳細については、堀川編(1985)に詳しいので本稿では省略する。また、等深線変化モデルとしては、宇多・河野(1996)のモデルが提案されており、自然海岸での突出地形、突堤、護岸、防波堤周辺の海浜変形や海底谷周辺の海浜変形に対して、主として平面移動床実験結果に基づき検討されている。このモデルも基本的には沿岸流場を対象にモデル化されているため、汀線変化モデル同様、広域的かつ長期的な地形変化の検討に適している。また、構造物周辺での冲向き流れや循環流など平面的な海浜流場の影響が反映できるわけではないので、構造物近傍の外力場の変化に伴う海浜変形は精度良く評価できない。また、宇多・河野(1996)は、実験の海浜地形変化より経験的に仮定した沿岸漂砂量の岸沖分布は実験条件から判断してバー・トラフの形成が顕著でない比較的急勾配の海岸に限定されると述べている。したがって、沿岸漂砂量の岸沖分布を物理的なメカニズムに基づき汎用化することが今後の課題である。既に合田・渡辺(1990)の不規則波の沿岸流速公式を用いて沿岸漂砂量の岸沖分布を評価する試みも行われている(土木学会, 1996)。一方、山下ら(1992)は、波浪・海浜流場の計算結果より等深線間の沿岸漂砂量ならびに岸沖漂砂量を評価し、nラインモデルと組み合わせることによって等深線変化を求めるモデルを提案しており、汎用性の高い等深線変化モデルへと発展する可能性がある。しかしながら、現在、海浜流場の計算に最も計算時間がかかることを考えると、等深線変化モデルは海浜流場の計算を何らかの形で簡略化したモデルとする方が実用的であると判断される。

(2) 3次元海浜変形モデル

「3次元海浜変形モデル」は、海浜変形予測手法として物理的なメカニズムに基づく最も本質的なモデルである。まず地形変化の外力となる波浪と海岸付近で高波浪時に顕著に生じる海浜流の平面分布を計算し、その外力に応じた砂移動の収支として生じる地形変化を平面的に計算するモデルである。汀線変化モデルで考慮される沿岸方向の砂移動のみならず、海浜循環流による冲向きの砂移動や波による岸沖方向の砂移動も考慮して平面的な地形変化の予測ができるため、構造物建設に伴う外力場の変化に起因する地形変化を精度良く計算できるという点で汀線変化モデルに比べて優れている。ただし、計算時間がきわめて長いことから、従来は構造物近傍における比較的短期間の海浜変形予測手法として位置づけられてきた(堀川編, 1985)。し

表－2 海浜変形予測手法の比較

	水理模型実験	数値シミュレーション			
		海岸線変化モデル		3次元海浜変形モデル	
		汀線変化モデル	等深線変化モデル	長期予測モデル	短期予測モデル
目的	複雑な海底地形に対する ・波浪・流況場の定量的評価 ・地形変化の定性的傾向の把握	・長期的な汀線変化の予測 ・広範囲の周辺海浜への影響評価	・長期的な平面地形変化の予測 ・広範囲の周辺海浜への影響評価	・長期的な平面地形変化の予測 ・構造物の比較的近傍の海浜への影響評価と対策工の検討 ・航路埋没と対策工の検討	・短期的な平面地形変化の予測 (一時化の縦断地形変化予測) ・比較的確率論的周辺海浜への影響評価と対策工の検討
特徴	・固定床実験： 波浪・海浜流場の定量的な把握が可能 ・移動床実験： 相似則に問題があるため、地形変化の定性的な変化傾向を把握するにとどまる	・沿岸漂砂のみを考慮 ・海浜縦断地形変化の平行移動を仮定 ・計算所要時間が短いので10年程度の長期予測が可能 ・各種パラメータは過去の地形変化の追算により決定	・沿岸漂砂のみを考慮 ・沿岸漂砂量の岸沖分布を考慮することにより等深線変化を予測 ・計算所要時間が比較的短いので10年程度の長期予測が可能 ・各種パラメータは過去の地形変化の追算により決定	・波浪場、海浜流場、地形変化の3つの計算モデルで構成 ・定常解析：ある地形、波浪条件下での地形変化傾向の定性的把握 ・非定常解析： 1～数年程度の長期の地形変化の定量的予測 ・海浜流による漂砂のみを考慮した長期的かつ平面的な地形変化の予測	・非定常解析： 1時化～1年程度の短期の地形変化の定量的予測 ・海浜流による漂砂のみならず波および戻り流れによる漂砂による縦断地形変化を考慮した短期的かつ平面的な地形変化の予測
問題点	・労力と費用がかかる ・構造物の変更など追加実験が容易ではない ・漂砂に関する相似則が確立していない ・微観の影響を受け易い	・海浜循環流等による岸沖方向の砂移動を考慮できない ・波と戻り流れによる縦断地形変化を考慮できない ・各種パラメータの設定に大きく依存	・海浜循環流等による岸沖方向の砂移動を考慮できない ・波と戻り流れによる縦断地形変化を考慮できない ・各種パラメータの設定に大きく依存	・計算所要時間が比較的大 ・汀線が張り出しすぎた場合の汀線変化の計算精度に課題が残されている	・計算所要時間が膨大 ・自然海岸の縦断地形変化の現地検証例はあるが、平面的な地形変化の現地検証は十分行われていない ・縦断地形変化に伴う汀線変化を適切に評価できない

かしながら、構造物建設に伴う海浜変形に着目すると、高波浪時に発達する海浜流による砂移動が支配的であり、岸沖方向の縦断地形変化は高波浪時の一時化から数ヶ月といった短期的な地形変化に対しては無視し得ないものの、年間を通してみるとキャンセルされると考えられるので、実用的には海浜流のみを考慮することにより1～数年の長期的な地形変化（表－1の構造物の建設に伴う海浜変形からみれば短期的な地形変化）を予測することが可能である。また、3次元海浜変形モデルでは、汀線を固定境界として取り扱われることが多いため、汀線の前進は計算できても、後退を評価することが困難であり、航路埋没などの予測には適しても海浜変形予測モデルとしては不適切であるとの指摘もあった。著者ら(1994)は、最近、この点を克服し、海浜流場の計算結果を用いて沿岸漂砂量の岸沖分布を評価することにより汀線変化モデルと3次元海浜変形モデルを結合し、沿岸流場に対しては従来の汀線変化モデルと整合のとれた新しい海浜変形モデルを提案した。海浜流のみを考慮した3次元海浜変形モデルは、縦断地形変化を考慮しないという点で汀線変化モデルと同じであり、構造物周辺の複雑な海浜流況や地形変化を精度良く計算できるという点では汀線変化モデルを平面的に改良・拡張したモデルと位置づけることができる。

このように3次元海浜変形モデルは、海浜流による漂砂のみを取り扱った構造物建設に伴う数年オーダーの地形変化を扱う「長期予測モデル」と、戻り流れや波による縦断地形変化も同時に考慮した一時化から1年程度の「短期予測モデル」に分けられる。また、短期予測モデルのうち沿岸方向の現象を無視したモデルが「縦断地形変化モデル」である。

また、3次元海浜変形モデルは、①波浪場の計算、②海浜流場の計算、③漂砂量と地形変化の計算の3つのサブプログラムから構成され、通常この3段階に分けて計算が行われる。著者は、ある地形、外力条件下に対して①～③の計算を1ステップだけ実施することを「定常解析」、地形変化が波浪・海浜流場に及ぼす影響ならび入射波浪条件の変化を考慮するため、①～③の各ステップの計算を繰り返し実施することを「非定常解析」と呼んでいる(清水ら, 1989)。ヨーロッパでは、前者を初期堆積・侵食モデル(I S E-model: initial sedimentation/erosion model)、後者を中期間の地形変化モデル(M T M-model: medium-term morphodynamic model)と呼んでいる(de Vriend, 1992; de Vriendら, 1993)。定常解析は、定性的な地形変化傾向を把握し、構造物や対策工の平面配置を比較する際に用いられることが多い。また、実際の海浜変形を定量的に再現あるいは予測する際には非定常解析が行われるが、現状では日々の波浪条件を入力して1年程度の地形変化を計算することは計算時間の面から現実的ではない。したがって、最終的に目標とする地形変化とその予測精度、計算時間などを総合的に勘案して、対象期間の波浪条件を可能な限り簡略にモデル化せざるを得ないのが現状である。すなわち、航路埋没を対象とする場合は、小さな波浪条件では航路埋没は生じないので、そのような波浪は省略してモデル化されるが(清水ら, 1989, 1992b, 1993)、汀線変化を考慮する場合や縦断地形変化も併せて評価する場合は、侵食性の高波浪から堆積性の低波浪まで含めた波浪のモデル化が必要である。

海浜変形モデルを流れの計算モデルと対象とする砂移動の観点から再整理した結果を表－3に示す。3次元海浜変形モデル(長期予測モデル)は、海浜流場の計算に断面平均流に対する平面2次元モデルが用いられるので、ヨーロッパでは、2 D H M T Mモデルと呼ばれる(例えば、

表－3 流れの計算から見た海浜変形モデルの分類

海浜変形モデル	時・空間 スケール	流れの計算**	砂移動		地形 変化
			沿岸	岸沖	
海岸線変化モデル (Coastline Model)	large-scale long-term	×	○	×	汀線
縦断地形変化モデル (Coastal Profile Model) ・半経験モデル* ・岸沖定常流速モデル	medium-scale medium-term	×	×	○	縦断
3次元海浜変形モデル (Coastal Area Model) ①長期予測モデル ・平面2次元モデル(2DH) ②短期予測モデル ・半経験モデル* ・準3次元モデル(Quasi-3D) ・3次元モデル(Fully-3D)	medium-scale medium-term	2DH 2DH 2DH +断面平均, 1DV, 2DV 3DV	○ ○	×	平面 平面

*)漂砂量算定式に戻り流れの効果を含むモデル。

○：考慮、×：考慮せず

**)2DH：平面2次元、1DV：鉛直1次元、2DV：鉛直2次元、3DV：3次元

de Vriendら, 1993). 実用的に用いられている3次元海浜変形モデルは、わが国でもヨーロッパでもほとんどがこのモデルに分類される。また、短期予測モデルは、砕波帯内の流れの鉛直分布をどのような形でモデル化するかによって、①平均流しか解かないが、漂砂量式の中に戻り流れの効果を含む半経験的なモデル(例えば、渡辺ら, 1984)、②断面平均流である海浜流場の計算結果と鉛直1次元モデル(1DV)あるいは鉛直2次元モデル(2DV)で評価した戻り流れの鉛直分布を組み合わせた準3次元モデル(例えば、de Vriend・Ribberink, 1988)および③3次元モデルに分類される。現在、準3次元モデル(例えば、de Vriend・Stive, 1986; 岡安ら, 1993)および3次元モデル(例えば、Péchon・Teisson, 1994)の研究が盛んに進められているが、現地の複雑な海底地形上に任意の構造物が存在する場に適用可能な手法が確立するまでには、まだ相当の時間と計算機の能力アップが必要である。したがって、現状では、佐藤ら(1987)のように砕波に伴う大規模水平渦による戻り流れを断面平均流速で与える経験的なモデルあるいは鉛直1次元モデル(1DV)を海浜流モデルに組み合わせて便宜的に評価せざるを得ない状況にある。

長期予測モデルについては、波浪場、流況場、地形変化の各計算モデル毎に現地データに基づき定量的な検証が行われるとともに、モデルの精度向上が図られ、最近では数年間という長期の海浜変形に対しても現地適用性が確認されつつあり、実際問題に適用可能な段階にある(例えば、清水ら, 1993, 1995)。一方、短期予測モデルの現地適用性に関しては、縦断地形変化のみを取り出せば、シートフロー漂砂と戻り流れによる漂砂を考慮することにより大型造波水路実験や現地海岸の地形変化が再現可能である(例えば、Dibajniaら, 1992, 1993)。平面モデルの検証例としては、半経験的なモデルである渡辺ら(1984)のモデルを約1ヶ月間の地形変化の再現に適用した例(丸山, 1987)と戻り流れを定常岸沖流速の断面平均値で代表させて海浜流場の計算結果と組み合わせて1年間の地形変化の再現を試みた例(清水ら, 1992b)が挙げられる。最近、準3次元モデルを用いた海浜変形モデルが、Nairn・Southgate(1993)、Briand・Kamphuis(1993a, b)により提案されているが、いずれも沿岸方向には一様な自然海浜を仮定しており、構造物建設に伴う海浜変形の予測に適用できる段階には至っていない。

以上の議論を踏まえ各予測手法の適用範囲の目安を時・空間スケールに分けて示すと図-1のようである。

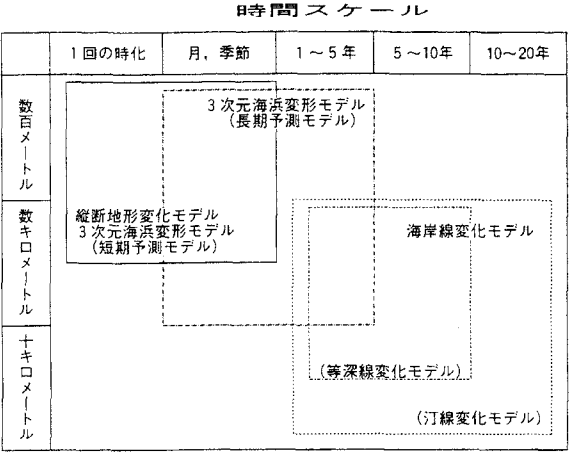


図-1 海浜変形モデルの適用範囲

3. 局所漂砂量算定式の現地適用性

3.1 現地海岸の漂砂移動機構

(1) シートフロー漂砂と戻り流れによる縦断地形変化

図-2は現地海岸の岸沖方向の漂砂の模式図(Watanabeら, 1991)を示している。縦断地形変化は、主として漂砂形態に応じた波による砂移動と砕波帯内の戻り流れによる冲向き漂砂のバランスによって生じる。

波による漂砂の移動形態は、掃流状態(BL)、浮遊状態(SL)ならびにシートフロー状態(SF)の3つに大別され、底面剪断応力が大きくなるにつれて順次遷移する。また、移動形態は砂連の有無と密接に関係しており、BLからSLへの遷移条件は砂連の生成条件に、SLからSFへの遷移条件は砂連の消滅限界に対応している。また、各移動形態のネットの漂砂の方向は、通常、砂移動が活発な浅海域では、波が非対称で底面軌道流速振幅は岸向き流速最大時の方が大きいため、BL、SF状態では岸向き、SL状態では冲向きとなる。Shibayama・Horikawa(1982)、土屋・坂野(1987)は、移動形態の遷移条件を与える分類図をシールズ

数 ψ との関係で整理しており、それらによれば、BLからSLへの遷移条件は $\psi=0.1\sim0.2$ 、SLからSFへの遷移条件は $\psi=0.5\sim0.6$ である。

図-3は、現地海岸におけるシールド数の岸沖方向変化のモデル計算例（海底勾配1/100、粒径0.25mm）を示したものである（清水ら、1990）。波高変化は、合田（1975）の砕波変形モデルの簡略式を用いて、また、底面剪断応力は田中・首藤（1980）の波・流れ共存場の評価式で流れをゼロとして評価した。太平洋岸を例にとると、年間の平均有義波高が約1mであるので、水深4m以浅では常にシールド数がシートフローの発生条件に相当する0.5を越えている。また、沖波有義波高が2mを超える高波浪が来襲すると、水深10m以浅全域でシールド数が0.5を超えており、現地においてはシートフロー状態が容易に発生することがわかる。

高波浪時には、図-2に示すように、砕波帯外ではシートフローによる岸向き漂砂が、砕波帯内では戻り流れによる沖向き漂砂が卓越し、これらが砕波点近傍でぶつかってバーが形成される。また、高波浪後の小さい波高の時には砕波帯内の戻り流れが相対的に小さいため、シートフロー漂砂によって岸向きに砂が運ばれて砂浜が回復すると考えられる。後述するように、このような考え方に立脚した縦断地形モデルは大型造波水路実験ならびに現地の縦断地形変化を十分な精度で再現できることがわかっている（例えば、Dibajniaら、1992, 1993）。また、清水ら（1985）も電力中央研究所で実施された大型造波水路を用いた縦断地形変化の実験結果に基づき、砕波帯外と汀線にピークを持つ波による岸向き漂砂と砕波帯内で生じる戻り流れに起因する沖向き漂砂をそれぞれ別個にモデル化して重ね合わせることを提案しており、上述の縦断地形変化のメカニズムの妥当性を証明する結果となっている。

(2) その他の重要な漂砂のメカニズム

現地海岸の砂移動にとって重要なメカニズムをまとめると、前述した①シートフロー漂砂と②戻り流れの他に、③砕波による乱れ、④長周期波および⑤swash zoneの漂砂（遡上波）が挙げられる。

③の砕波による乱れは砕波による浮遊にとって重要であり、柴山・Winyu（1993）は基準点濃度を評価する際の底面剪断応力ならびに鉛直拡散係数に砕波によるエネルギー逸散に比例する形で砕波の影響を考慮している。また、沿岸流速分布に対しても砕波による乱れの影響は重要で、Church・Thornton（1993）は乱れの影響を底面摩擦項に考慮している。Kuriyama・Ozaki（1993）は砕波によって生じる波峰前面の水平渦による運動量フラックスの形で乱れの影響を考慮し、バー・トラフ地形による沿岸流速分布の現地再現性を高めている。

④の長周期波は、砕波帯外では波群拘束波が卓越するため波高が大きいときに沖向きの流速となるため沖向きの輸送に寄与し、砕波帯内では拘束を解かれて自由波として伝播するため位相

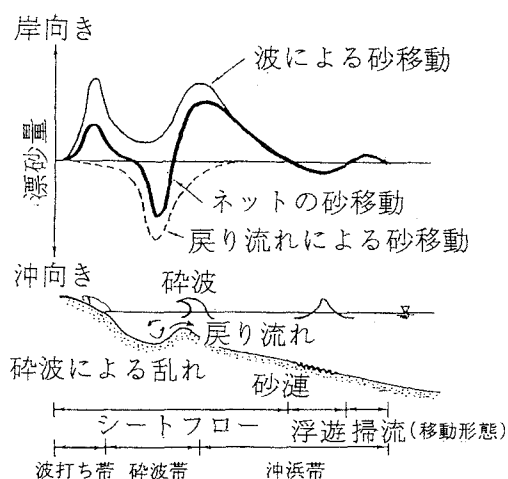


図-2 現地海岸の漂砂の模式図(Watanabeら、1991)

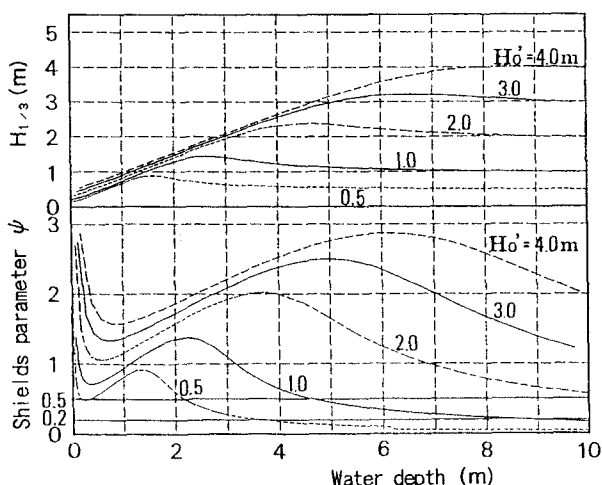


図-3 現地海岸のシールド数の岸沖分布の計算例(Watanabeら、1991)

がずれて波高が大きいときに岸向き流速となる傾向があり、汀線付近では岸向きの輸送に寄与する傾向があるといわれている（例えば、佐藤ら、1992）。また、前浜のバームの侵食に対しては長周期波が主要な外力として作用することが知られている（加藤・柳島、1992）。Roelvink・Stive(1989)および佐藤・光信(1990)は長周期波を考慮した縦断地形変化モデルを提案している。

⑤のswash zoneの漂砂は、沿岸漂砂と岸沖漂砂のいずれに対してもその重要性が古くから認識されており、何らかの形で海浜変形モデルに取り込むことが望ましいが、メカニズムが複雑なこともあって定量的な評価法は必ずしも確立していない。沿岸漂砂量の岸沖分布は碎波帯の中央付近と汀線付近に2つのピークを持つことが知られており（例えば、Kamphuis, 1991）、Briand・Kamphuis(1993b)は沿岸流によるswash zoneの漂砂を考慮した海浜変形モデルを提案している。また、河田・土屋(1990)はswash zoneの漂砂は遡上時に汀線に対して入斜波の進む方向に斜めに運ばれ、流下時には汀線にはほぼ直下に沖方向に戻る、いわゆる saw tooth 運動するため、遡上時の半周期分の漂砂が沿岸漂砂として寄与することから、swash zoneの漂砂量が無視できないことを指摘している。最近では、浅野・末富(1994)は斜め遡上波のsaw tooth 運動を平面2次元非線形長波方程式を解いて底面流速を計算し、Kobayashi(1982)の漂砂量式を用いて swash zoneの漂砂量を評価することを試みている。一方、2次元な縦断地形変化においても汀線付近に漂砂量のピークが存在することが知られている（例えば、清水ら、1985）。海浜変形モデルでは、最大遡上点で漂砂量がゼロになるように、静水汀線から遡上点まで漂砂量を直線的に減衰させたり（例えば、佐藤・Kabiling, 1994）、遡上域の水深を最大遡上点でゼロになるよう静水汀線での wave set-up量から直線的に減衰させて仮想の水深を考慮したり（例えば、清水ら、1994）、何らかの形で便宜的に考慮されているのが実状である。以上は、通常の短周期波浪による漂砂について述べたが、現地海岸の遡上波には重複波構造を有する長周期波が含まれており、前浜の侵食に重要な役割を果たすことは既に④の長周期波で述べた通りである。長周期波によるswash zoneの漂砂を考慮した海浜変形モデルは今のところ見当たらない。

3.2 渡辺モデルとその現地適用性

(1) 渡辺モデルの概要

3次元海浜変形モデルへの適用を念頭に置くと、簡便かつ実用的に十分な精度を持つことが要求されるが、そのような観点から渡辺ら(1984)のモデル（以下、渡辺モデル）は現在のところ最も実用的に優れたモデルの一つであると考えられる。渡辺モデルは、元々は実験室の規則波による縦断地形変化の実験結果に基づき導かれた波によるネットの漂砂量モデル（渡辺、1981）をベースとしており、シートフロー漂砂を対象として提案されたわけではないが、その後、現地スケールの実験や数多くの現地に適用され、妥当性が検証されている（例えば、清水、1990, 1996）。渡辺モデルは、パワーモデルの概念に基づき、式(1)の流れによる漂砂量フラックスと式(2)の波による漂砂量フラックスのベクトル和として評価される。

$$\vec{q}_c = A_c (\tau_m - \tau_c) \vec{u}_c / \rho g \quad (1)$$

$$\vec{q}_w = A_w F_D (\tau_m - \tau_c) \vec{u}_b / \rho g \quad (2)$$

ここに、 q_c :流れによる漂砂量フラックス、 q_w :波による漂砂量フラックス、 τ_m :波・流れ共存場の最大剪断応力、 τ_c :移動限界剪断応力（ $\tau_c = \phi_c \cdot \rho s' g D$ ）、 ϕ_c :限界シールズ数、 s' :水中比重、 g :重力加速度、 D :粒径、 u_c :平均流速、 u_b :波の底面軌道流速振幅、 A_c 、 A_w :無次元定数である。移動限界シールズ数は細砂のとき0.11、粗砂のとき0.06である（渡辺、1979）。また、 F_D は漂砂の移動方向を示すパラメータで、岸向きのとき+1、冲向きのとき-1をとる。

また、式(2)は、式(3)で表される渡辺（1981）の波による漂砂量算定式と等価な関係にある。

$$\phi = B_w (\phi_m - \phi_c) \phi_m^{1/2} \quad (3)$$

$$\text{ここに、} \phi = (1 - \lambda) q_w / w_o D \quad (4)$$

$$\phi_m = \tau_m / \rho s' g D \quad (5)$$

であり、 B_w :無次元定数、 ϕ_m :最大シールズ数、 ϕ_c :限界シールズ数、 λ :空隙率、 w_o :沈降速度である。

渡辺ら(1984)は小スケールの実験で得られる単峰型の漂砂量分布を念頭に、岸側からnull-point（漂砂量の向きが変わる点）までは岸向き漂砂が、その沖で冲向き漂砂が生じると考え、Sunamura・Horikawa(1974)

の汀線の侵食・後退を表すパラメタを参考に F_D を定式化した。渡辺モデルは、最初に述べたように、元々は規則波の縦断地形変化より求めたネットの漂砂量に基づいており、戻り流れによる冲向き漂砂の影響を陰に含むモデルであった。

しかしながら、大型造波水路実験の結果によれば、図-2に模式的に示したように、侵食型であっても碎波点の沖ではシートフロー漂砂による岸向き漂砂が生じ、双峰型の漂砂量分布となるため(清水ら, 1985)、現地では null-point を一つで表すことはできない。そこで Watanabeら(1991)は、漂砂の移動形態によって向きは異なるものの、式(2)で表される波による漂砂と式(3)で表される戻り流れによる冲向き漂砂の相対的な大きさによって縦断地形変化が生じると考えた。このように考えることで、多くの null-point をもつ現地の岸沖漂砂量分布を一般的に表現できる。なお、渡辺モデルのように、波と流れが任意角度で斜交する場合の漂砂量を波による漂砂量と流れによる漂砂量のベクトル和で表すことの妥当性については、柴山ら(1989)により海浜流場のみならず、冲向きの戻り流れ存在下に対しても実験的に確認されている。

波による漂砂の移動方向関数 F_D は、移動形態に応じて掃流とシートフローで岸向き、浮遊で冲向きとなるように、次式で連続的に滑らかに変化させる(清水ら, 1996)。

$$F_D = 1 - [1 + \tanh\{\alpha(\phi_m - \phi_{c1})\}] \times [(1 + \tanh\{\alpha(\phi_m - \phi_{c2})\})] / 2 \quad (6)$$

ここに、 ϕ_m は最大シールズ数、 ϕ_{c1} は掃流から浮遊への遷移限界、 ϕ_{c2} は浮遊からシートフローへの遷移限界、 α は定数である。清水ら(1996)は、既往の研究成果を参考に ϕ_{c1} 、 ϕ_{c2} をそれぞれ 0.2、0.5、 α を 20 としている。

式(2)の漂砂量係数 A_w は式(3)の漂砂量係数 B_w と式(7)で結びつけられる。また、 B_w は A_w に比べて普遍的な定数と考えられるので、式(7)で各地点毎に A_w を求め、その定数倍として A_c を評価している。

$$A_w / B_w = w_0 \sqrt{0.5 f_w} / \{(1 - \lambda) s' \sqrt{s' g D}\} \quad (7)$$

$$A_c = \beta A_w \quad (8)$$

ここに、 f_w : 摩擦係数、 β : 定数である。

底面剪断応力の算定には、田中・首藤(1980)の波・流れ共存場の摩擦則が用いられる。田中・Thu(1993)は全ての flow regime に適用可能な陽形式近似を提案しているが、Ahmad・田中(1993)によれば、既往の波・流れ交差場の最大底面剪断応力を過小評価する。現地で地形変化が顕著になる浅海域では粗面乱流と考えられるので、陽形式近似式を用いる場合には、田中(1990)の粗面乱流に対する陽形式近似式のみを用いる方が妥当である。

(2) 渡辺モデルの漂砂量係数

表-4は、渡辺モデルの漂砂量係数について既往の研究成果をまとめた結果である。

まず、式(3)の無次元定数 B_w について考察する。渡辺(1981)は規則波による2次元傾斜海浜に対する実験結果を基に $B_w = 7$ を得た。また、佐藤ら(1984, 1985, 1986)は、2次元的な砂漣が形成される場合には、非対称な規則振動流のみならず不規則振動流に対しても B_w が7となることを示している。これに対して、大塚ら(1984)と入江ら(1985)は不規則波を用いた2次元傾斜海浜における実験結果に対して $B_w = 3$ を得た。また、佐藤ら(1985, 1986)は、現地のように3次元的な砂漣が形成される場合には、規則振動流、不規則振動流を問わず、 B_w は3程度と小さくなることを明らかにした。電力中央研究所で行われた大型造波水路実験の結果によっても B_w は3~5であり(清水ら, 1985)、不規則波や実規模スケールの実験では、 B_w は小さくなるのがわかる。

現地への適用例をみると、中央粒径が0.16~0.20mmの細砂に対しては B_w は4程度の値をとることが多いが(清水ら, 1991, 1993, 1994, 1995, 1996; 清水, 1996; Dibajniaら, 1993)、0.25~0.35mmとやや大きくなると、 B_w は2.0~2.5と小さくなる傾向が認められる(清水ら, 1990, 1992)。大型造波水路実験の結果でも、シールズ数が1以上の大きいところに着目すると、粒径0.47mmの結果が0.27mmの結果に比べて係数が小さくなる傾向がみられ、 B_w は1程度である(清水ら, 1985)。また、大塚(1984)の不規則波の実験でも0.75mmのケースは1程度である。そこで、漂砂量係数 B_w に粒径の影響を反映させることを試みた(清水ら, 1996)。

沢本・山下(1985)は、シートフロー状態の半周期漂砂量 ϕ が、粒径、比重に関係なく、次式で統一的に表

表-4 渡辺モデルの漂砂量係数に関する既往の研究成果一覧

	Bw	Aw	Ac/Aw	粒径(mm)	検証データ
大塚ら(1984)	3 1	— —	— —	0.18 0.75	2次元造波水路実験(不規則波) 同 上
佐藤・堀川(1984)	7	—	—	0.18	非対称規則振動流
佐藤ら(1985)	7	—	—	0.18	非対称規則・不規則振動流(2次元砂漣)
佐藤ら(1986)	3	—	—	0.18	同 上 (3次元砂漣)
清水(隆)ら(1985)	3~5 1	— —	— —	0.27 0.47	大型造波水路実験(規則波) 同 上 *1
清水ら(1989)	—	0.2	10	0.25	港口周辺の地形変化 *2(全域で一定)
清水ら(1990)	2.5	—	—	0.25	港口堆積土量
清水ら(1991)	3~5	—	—	0.20	港内堆積土量(約1年×2回)
清水ら(1992)	2	—	10	0.35	港口周辺の地形変化(1年間) *2
清水ら(1993)	4 4	— —	10 10	0.16 0.16	港口・港内の堆積(6年間) *2 外力勾配調査(約1ヶ月)
清水ら(1994)	4	—	10	0.20	突堤周辺の堆積(約9ヶ月) *2
清水ら(1995)	0.5 or 4	—	10	0.20	島式漁港背後の堆積(4年間) *2 (係数は海浜流場による違い)
清水ら(1996)	4	—	10	0.20	Dibajnia・Watanabe(1992)の実験
清水(1996)	4 4	— —	10 10	0.22 0.22	大型造波水路実験(SUPERTANK) *2 大型造波水路実験(MAST) *2
丸山ら(1987)	—	0.2	10	0.21	現地地形変化 *2
渡辺(1981)	7	—	—	0.20	2次元造波水路実験(規則波)
渡辺ら(1984)	—	0.15	3.33	0.20	平面水槽実験(規則波) *2
Dibajniaら(1993)	4	—	10	0.18	自然海岸の縦断地形変化(2週間) *2
Watanabeら(1991)	3	0.2	10	0.22	取水港湾の港内堆積土量(約1年半)

なお、不規則波実験および現地に対しては有義波を用いた場合の漂砂量係数を表している。

*1: シールズ数が1以上のところではBwは1程度, *2: 海浜変形モデルによる再現計算結果。

されることを示している。

$$\phi = 2.2 \left[\frac{u_{*m}}{w_0} \right]^3 = 2.2 \left[\frac{w_0}{\sqrt{s' g D}} \right]^{-3} \phi_m^{1.5} \quad (9)$$

シートフローが卓越する条件では $(\phi_m - \phi_c) \approx \phi_m$ と近似できるので、式(4)と式(9)はいずれもシールズ数の1.5乗に比例することを示している。式(3)はネットの漂砂量式であり、式(9)と等値できないが、両者を比較すると、次式の関係が得られる。

$$B_w \left[\frac{w_0}{\sqrt{s' g D}} \right]^3 = \text{const.} \quad (10)$$

底質粒径0.2mmのとき $B_w = 4$ を仮定し、砂と海水の比重をそれぞれ2.65および1.03、重力加速度を9.8とすると、次式に書き改められる。

$$B_w = 19.55 \left(\sqrt{D} / w_0 \right)^3 \quad (11)$$

したがって、 B_w は、粒径0.25mmのとき2.5、0.5mmのとき1.0、1.0mmのとき0.7となる。

図-4は、非対称振動流に平均流を加えたDibajnia・Watanabe(1992)のシートフロー漂砂の実験データ(粒径0.2mm)に対して渡辺モデルの適用性を検討した結果である。シールズ数は波峰流速で評価した。実験結果によれば、周期が2s以下の短い場合にネットの移動方向が逆転する場合があるが、現地の波浪条件では現実的ではないので、周期2sを除けば多少ばらつきはあるものの、 B_w を4とすれば概略評価できることがわかる。このように、渡辺モデルは、砂漣上での浮遊移動のみならず、シートフローに対してもネットの漂砂量を実用上十分な精度で統一的に評価できることがわかる。

また、流れによる漂砂量係数 A_c は、図-4 に示した Dibajnia・Watanabe(1992) のシートフロー漂砂の実験に対する検討結果(清水ら, 1996)、取水港湾の港内堆積土量(Watanabeら, 1991)、図-5 に示す外力勾配と地形変化に関する現地調査結果(清水ら, 1993)、後述する縦断地形変化モデルの大型造波水路実験に対する適用結果(清水, 1996)ならびに現地海岸への適用結果(Dibajniaら, 1993)、3次元海浜変形モデルの現地適用結果(清水ら, 1992, 1993, 1994, 1995)から判断して、 A_c を A_w の10倍とすることはほぼ妥当であると考えられる。しかしながら、その理論的根拠については残された課題であり、そのためには今後とも質の高い実規模実験、現地データの蓄積が不可欠である。なお、渡辺モデルを不規則波浪場に適用する際には、これまでのところ有義波で代表させているが、不規則波の水位変動あるいは底面流速変動の時系列を入力する際には、波別解析により一波毎に渡辺モデルを適用することも考えられる。また、浅海域では波形の非対称性が顕著になるので、有限振幅性を考慮した波峰流速を用いる方が望ましい。波浪場の計算モデルが微小振幅波によるものであれば、首藤(1974)の非線形波の浅水係数あるいはクノイド波の1次近似解(例えば、Isobe, 1985)を用いて有限振幅性を考慮して波高を評価するか、Dibajniaら(1992)のように微小振幅波の波高から磯部・堀川(1981)の方法を用いて有限振幅性を考慮した波峰流速を評価するなどの便宜的な方法が考えられる。

3.3 その他の実用的な局所漂砂量モデル

縦断地形変化モデルあるいは3次元海浜変形モデルに用いられている局所漂砂量モデルで、汎用性が高いと思われるモデルをいくつか紹介する。

(1) Shibayama・Horikawaモデル

Shibayama・Horikawa(1982)は、シールズ数と底面流速振幅と底質沈降速度の比を用いて漂砂の移動形態を判定した上で、各漂砂形態毎に半周期漂砂量を与える式を提案している。佐藤・光信(1990)は、浮遊移動からシートフロー漂砂への遷移を連続的に滑らかにするための係数 Λ (後出の式(21))を導入するとともに、半周期毎に流れを含めた最大流速からシールズ数を評価することにより波・流れ共存場へ拡張している。改良モデルの妥当性は、渡辺ら(1989)の波・流れ共存場の非対称振動流に対する実験結果に対して検証されている(Sato・Mitsunobu, 1991)。佐藤・光信(1990)は、半周期毎に戻り流れと長周期波を含む波砕波帯内の底面流速場から漂砂量を評価することにより不規則波に対する縦断地形変化を計算している。ただし、波と流れが斜交する場合への適用は難しい。

(2) 柴山・Winyuモデル

柴山ら(1995)は、浮遊砂は濃度 $c(z)$ と流速 $u(z)$ の積を境界層外縁高 δ_s から波谷 δ_b まで積分したフラックスモデルで、掃流砂は渡辺(1981)のモデルで評価し、両者の和として評価している。このモデルは、従来

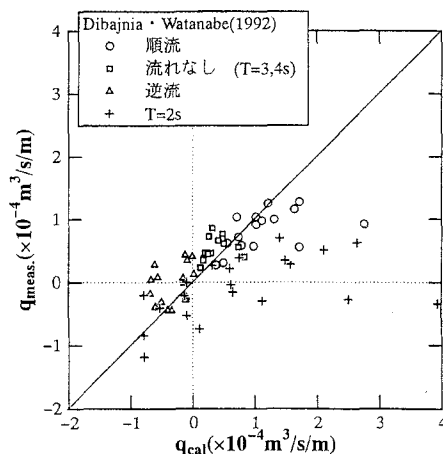


図-4 渡辺モデルのシートフロー漂砂への適用性
(清水ら, 1993)

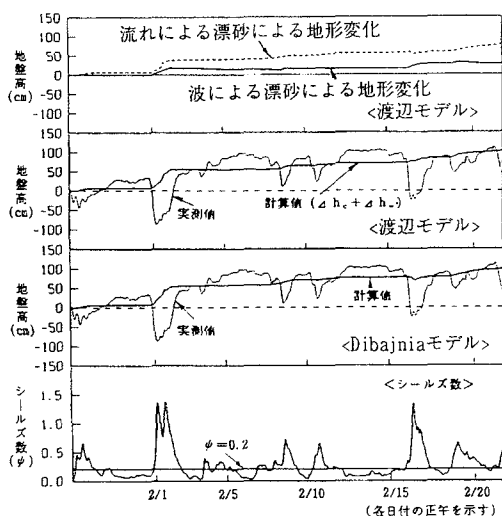


図-5 渡辺モデルとDibajniaモデルによる地盤高変化の
計算値と実測値の比較(清水ら, 1993)

の渡辺モデルに、浮遊砂の効果を加えたモデルと理解される。

$$q = \int_{\delta_s}^{\delta_t} c(z) u(z) dz + B_w (\phi - \phi_c) \phi^{0.5} w_0 D \quad (12)$$

浮遊砂の底面基準点は、砂漣床では砂漣頂部から砂漣高さ η の1/2の高さの点に、またシートフローや碎波点直下の平坦床では底質粒径 D の100倍の高さの点に選び、基準点濃度を以下のように与えた。また、シールズ数に巻き波砕波時の碎波の影響も考慮されている。

$$C_a = \frac{10 (\phi - 0.05) v}{3 \sqrt{s' g D} z_a} \quad (13)$$

ここに、 $z_a = \eta/2$ (砂漣床), $100D$ (平坦床) (14)

$$\phi = \begin{cases} [u_* + 0.01(D_B/\rho)^{1/3}]^2 / (s' g D) & (\text{巻き波砕波}) \\ u_*^2 / (s' g D) & (\text{その他}) \end{cases} \quad (15)$$

である。また、 u_* は摩擦速度で、 $u_*^2 = f_w u_b^2/2$ 、 D_B はエネルギー逸散率で、 $D_B = \rho g H^3/(4 T d)$ 、 H は波高、 T は周期、 d は水深である。

また、濃度の鉛直分布は碎波帯外では指数関数則で、碎波帯内ではべき乗則で与えられる。その際の碎波帯内の鉛直拡散係数にも碎波形態に応じて碎波による影響が考慮されている。

浮遊砂モデルは、大型および小型の造波水路、振動流装置も含めて合計139ケースの規則波および不規則波に対する実験結果に基づき定式化されており(柴山・Winyu, 1993)、電力中央研究所で行われた大型造波水路実験の結果や現地データに対しても妥当性が検証されている(Winyu・Shibayama, 1994)。

(3) 佐藤・Kabilingモデル

佐藤・Kabiling(1994)は、平面波浪場の計算結果から評価される底面流速と底面剪断応力の時系列から各瞬間の掃流砂と浮遊砂を個別に計算し、輸送方向は各瞬間の底面流速 $\vec{u}_b(t)$ の向きと同じとするモデルを提案している。掃流砂成分 $\vec{q}_s(t)$ 、浮遊砂成分 $\vec{q}_B(t)$ は次式で表される。

$$\frac{\vec{q}_B(t)}{\sqrt{s' g D^3}} = \alpha_B |\phi(t)|^{0.5} \max(\phi(t) - \phi_c, 0) \frac{\vec{u}_b(t)}{|\vec{u}_b(t)|} \quad (16)$$

$$\frac{\vec{q}_s(t)}{w_0 D} = \alpha_s \max(\phi(t) - \phi_c, 0) \frac{\vec{u}_b(t)}{|\vec{u}_b(t)|} \quad (17)$$

ここに、 D :底質粒径、 s' :水中比重、 $\phi(t)$:シールズ数 $[(f_w/2)(u_b(t)^2/s' g D)]$ 、 f_w :Jonssonの摩擦係数、 w_0 :沈降速度、 α_B :掃流砂の係数(=1.0)、 α_s :浮遊砂の係数(=3.5)である。論文の中では碎波帯内で限界シールズ数 ϕ_c をゼロとしている。

本モデルは、規則波に対してしか適用されていないが、ブシネスク方程式などの非線形波動方程式により流速波形の非対称性や戻り流れの効果を含み底面流速の時系列が計算される場合には、不規則波に対してもモデルの適用が比較的簡単であり、縦断地形変化と沿岸漂砂の両者を同時に取り扱うことができるので将来性のあるモデルである。しかしながら、摩擦係数としてJonssonの波による係数が用いられており、任意角度で交差する波・流れ共存場に対する適用性には問題が残る。田中・Thu(1993)の波・流れ共存場の摩擦則の陽形式近似を用いてシールズ数の大きさと向きの時間変化を精度良く評価することも可能である。掃流砂については基本的には渡辺モデルと同様の形をしていることから現地適用性が期待できるし、浮遊砂についても柴山・Winyu(1993)を参考に碎波による乱れの効果を取り込むことにより現地適用性の向上が期待できる。また、佐藤・Kabiling(1994)によれば粒径の粗い場合の浮遊砂の寄与については改良の余地が残されている。今後は実規模実験や現地への適用を通して、漂砂量係数などモデルの検証を重ねる必要がある。

(4) Dibajniaモデル

Dibajnia・Watanabe(1992)は、非対称振動流と定常流が共存する場でのシートフロー漂砂に関する精度の高い実験データに基づき、底面軌道流速の非対称性と平均流を考慮したネットのシートフロー漂砂量の算定式(以下、Dinajniaモデル)を提案している。

$$\phi = q / w_0 D = a \cdot \text{sign}(\Gamma) \cdot |\Gamma|^{0.55} \quad (18)$$

ここで、 a は係数で0.0015、 Γ は砂の移動のメカニズムを表すパラメタで次式で定義される。

$$\Gamma = \frac{u_c T_c (\Omega_c^3 + \Omega_c'^3) - u_t T_t (\Omega_t^3 + \Omega_t'^3)}{(u_c + u_t) T} \quad (19)$$

ここで、 T は周期、 T_c 、 T_t は岸向き、沖向きの継続時間、 u_c 、 u_t はそれぞれ岸向き、沖向きの平均流を含む自乗平均流速である。 Ω_j は岸向き($j=c$)あるいは沖向き($j=t$)の流速時の半周期間に移動状態で運ばれ、その半周期間に沈降する砂の総量を、 Ω_j' は流速反転後に沈降する砂の総量を表している。 Ω_j 、 Ω_j' は、巻き上がった砂が沈降するまでの時間と流速の継続時間の比を表すパラメタ ω_j [$= u_j^2 / (2 s g w_0 T_j)$]によって次式で評価される。なお、次式は種々の底質条件(粒径、比重)に対して適用できるように、沢本・山下(1985)の波によるシートフローの半周期漂砂量式を参考に改良された式である(高沢ら, 1996)。

$$\begin{cases} \omega_j \leq \omega_{cr} \text{ のとき, } \Omega_j = \omega_j T_j (s g / D)^{0.5}, \Omega_j' = 0 \\ \omega_j > \omega_{cr} \text{ のとき, } \Omega_j = \omega_{cr} T_j (s g / D)^{0.5}, \Omega_j' = (\omega_j - \omega_{cr}) T_j (s g / D)^{0.5} \end{cases} \quad (20)$$

また、佐藤・光信(1991)のパラメタ Λ を導入し、 ω_{cr} を1から掃流移動の条件である0.01に徐々に変化させることにより、浮遊漂砂と掃流漂砂にも拡張されている(Dibajniaら, 1993)。

$$\Lambda = [1 - (\phi_{rms}/0.6)^2] \cdot \min(1, 2\lambda/d_0) \quad (21)$$

$$\omega_{cr} = 1 - 0.99 \Lambda^{0.5} \quad (22)$$

ここに、 ϕ_{rms} は底面軌道流速波形の自乗平均平方根を用いて評価したシールズ数、 λ は砂連波長、 d_0 は底面付近の水粒子の軌道直径である。

Dibajniaモデルは、元々シートフロー漂砂に対して導かれたモデルであるため、渡辺モデルに比べて現地条件への適用性が高いことが期待され、既に大型造波水路実験や現地海岸の縦断地形変化に対してモデルの現地適用性が確認されている(例えば、Dibajniaら, 1992, 1993)。また、砂の動き易さを摩擦係数を用いなくて底面流速のみで評価しているため、底面流速の時系列が与えられれば、不規則波浪場に対しても流れや長周期波を考慮しやすいと判断される。さらに、波・流れ交差場に対してもモデルの拡張が行われ、図-5に示すように現地検証も行われている(Dibajnia・渡辺, 1994)。

(5) Bailardモデル

Bailard(1981, 1982)は、底面流速変動を用いて波の非対称性と波・流れの相互作用ならびに海底勾配の影響を考慮し、掃流砂と浮遊砂の和として次式で表される漂砂量式を提案している。

$$\begin{aligned} i = \rho s' g (1 - \lambda) q = \rho C_t \frac{\varepsilon_B}{\tan \phi} [u(t) |u(t)|^2 - \frac{\tan \beta}{\tan \phi} |u(t)|^3] \\ + \rho C_t \frac{\varepsilon_S}{w_0} [u(t) |u(t)|^3 - \frac{\varepsilon_S}{w_0} \tan \beta |u(t)|^5] \end{aligned} \quad (23)$$

ここに、 ϕ : 水中内部摩擦角、 $\tan \beta$: 海底勾配、 w_0 : 沈降速度、 ε_B : 掃流砂の係数($=0.025$)、 ε_S : 浮遊砂の係数($=0.21$)である。

Bailardモデルはヨーロッパでは最もポピュラーな漂砂量式であり、Stive(1986)やNairn・Southgate(1993)は多少の改良を加えて縦断地形変化モデルに適用している。またRoelvink・Stive(1989)とRoelvink(1991)は長周期波を考慮したモデル化を行っている。

佐藤・Kabiling(1993)は、Bailardモデルを用いて離岸堤設置海浜に対する実験結果の再現計算を試みているが、碎波点付近で漂砂量を過大評価する傾向があり、離岸堤背後の堆積を再現できていない。Roelvinkら(1995)も、斜め入射波に対しては岸沖漂砂、沿岸漂砂ともに満足のいく結果が得られなかったことを報告しており、最近では彼らの海浜変形モデルにも用いられなくなっている。

4. 縦断地形変化モデル

4.1 縦断地形変化モデルの概要

(1) 半経験モデル

波浪変形のみを計算し、戻り流れの影響を陰に含むネットの漂砂量式を用いて縦断地形変化を計算するモデルのことを半経験モデルと呼ぶ。渡辺ら(1984)、大中・渡辺(1989)のモデル(渡辺モデル)は平面的な地形

変化モデルであるが、縦断地形変化だけを計算する場合にはこれに分類される。O'Connorら(1992)ならびにNicholson・O'Connor(1996)は、大中・渡辺モデルをベースに、漂砂方向関数の改善や平衡地形への移行に伴う漂砂量低減係数の導入を行うとともに、不規則波に対しても適用性を高めている。また、アメリカのCERCのSBEACHモデル(Larsonら, 1988; Larson, 1994)もこの分類に属し、碎波帯内での漂砂量を碎波エネルギーと関連づけるとともに、平衡漂砂量と海底勾配による冲向き漂砂を考慮している。また、swash zoneの漂砂、沖浜帯での漂砂量の低減なども考慮されており、規則波、不規則波を問わず、大型造波水路実験の再現性が良好であることが複数の研究者により確認されている(Larson, 1994; Wuら, 1994)。西村・砂村(1985)や清水・丸山(1987)のモデルもこの範疇に入る。

(2) 戻り流れを考慮したモデル

半経験的な縦断地形変化モデルに代わり、わが国ではじめて碎波帯内の冲向き定常流(戻り流れ)を評価して縦断地形変化を計算するモデルを提案したのは佐藤・光信(1990)である。戻り流れは、鉛直分布までは考慮せず、佐藤ら(1987)にならい、大規模渦による質量輸送が波高の2乗に比例すると考えて、それを補償する形で簡便に評価している。

$$U_0 = -A \frac{H^2}{d \cdot T} \tag{24}$$

ここで、 H :波高、 d :水深、 T :周期、 A :無次元定数である。これに波による質量流束を補償する冲向き流れ U_0 と底面層流境界層外縁でのオイラー的な質量輸送速度 U を加えて戻り流れの総和を評価している。なお、不規則波に対しては、碎波した波だけが戻り流れに寄与すると考えている。式(24)の妥当性は、小型水理実験(佐藤ら, 1987)、大型水理実験(Dibajniaら, 1992)ならびに現地(清水ら, 1992b; Dibajniaら, 1993)で確認されている。また、岡安ら(1989)の1DVモデルを用いて、鉛直分布も含めて戻り流れを評価した例もある(Dibajniaら, 1992; 柴山ら, 1995)。ただし、岡安モデルは不規則波浪場へそのまま適用できないので、現地への適用を考えると、現状では佐藤ら(1987)の方法が簡便でしかも実用上十分な精度を持っている。またDibajniaら(1993)は、戻り流れの大きさが碎波の強さに関係あると考えると碎波点近傍の海底勾配により評価した surf similarity パラメタに比例する形で係数 A を与えている。

波浪場の計算には、碎波減衰項を考慮したエネルギー方程式が用いられることが多いが、最近では碎波による運動量の拡散項を考慮したブシネスク方程式により radiation stress項を介さずに平均水位の上昇や戻り流れも含めて非線形波浪場を計算する方法が用いられている(例えば、佐藤・鈴木, 1990)。また、佐藤・Kabiling(1994)や丸尾ら(1995)はブシネスク方程式を用いて波の遡上も評価している。

Dibajniaモデルを用いた電力中央研究所の大型造波水路実験(規則波)に対する再現計算結果によれば、侵食型のケースの再現性は高いが(Dibajniaら, 1992; 芝ら, 1993)、堆積型のケースの再現性は必ずしもよくなかった(Dibajnia, 1992)。これに対して丸尾ら(1995)は、遡上域の計算精度を上げることにより堆積性のケースの再現精度を向上させている。侵食型のケースの再現計算結果の一例(Dibajniaら, 1992)を図-6に示す。また、柴山ら(1995)は、実験スケールによらず柴山・Winyu(1994)の浮遊砂モデルが適用できることを

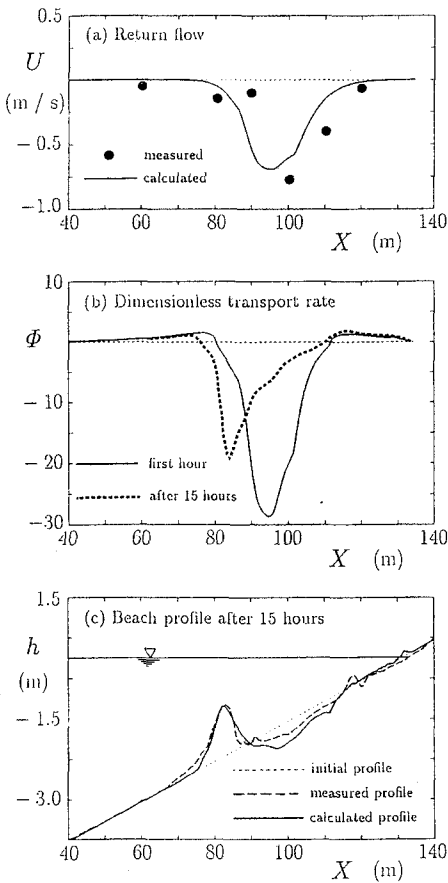


図-6 大型造波水路実験結果の再現計算例 (Dibajniaら, 1992)

示している。さらに、佐藤・光信(1990)は長周期波の影響についても検討しており、砕波帯内では岸向き漂砂に寄与する結果を示している。

4.2 縦断地形変化モデルの適用例

局所漂砂量式として渡辺モデルとDibajniaモデルを取り上げ、縦断地形変化モデルの実規模実験ならびに現地へ適用した結果を紹介する。検証データとしては、できるだけ現地条件に近く(実規模スケール実験でしかも不規則波を対象とした実験)、しかも外国のモデルと比較が可能なデータとして次の2ケースを選定した。①アメリカのSUPERTANKプロジェクトの実験結果の中からバーが発達したケース(Kraus・Smith, 1994; Smith・Kraus, 1995)と②ヨーロッパのMASTプロジェクトの実験結果の内、ヨーロッパのモデルの相互比較に用いられたケース(Roelvink・Brøker, 1993)である。また、Kuriyama(1991)の現地海岸の高波浪時の地形変化の再現も試みた。

検討に用いた縦断地形変化モデルは、基本的にはDibajniaら(1993)と同じであり、波浪場は磯部(1986)の砕波減衰項を考慮したエネルギー方程式で、戻り流れは佐藤ら(1987)にならい、式(24)で評価した。Swash zoneの漂砂は地形変化の再現上重要であるので、便宜的ではあるが、図-7に示すように、最大遡上高を最大波に対してHuntの式で求め、汀線でのwave set-up高と最大遡上点を直線で結んで遡上域に仮想水深を設定し、再度波浪変形計算をやり直した。最大遡上高は、前浜の勾配に対して求めた。なお、漂砂量算定式については3.2, 3.3で述べた通りである。

(1) SUPERTANK

オレゴン大学大型造波水路で実施された侵食型(ケースSt_10)のケースについて検討した。初期海底勾配は1/10, 中央粒径は0.22mmで、入射波浪条件は $H_{1/3}=0.8\text{m}$, $T_{1/3}=3.0\text{s}$, 波作用時間は1285分(21.4時間)である。計算格子間隔は0.5mで、2分毎に波浪場と地形変化の計算を繰り返した。式(24)の戻り流れの係数Aは戻り流れの実測値との対応から4.0で一定値とした。

図-8(a)は400分後の地形変化の計算値と実測値の比較を示している。図中には、Larson(1994)の結果も示している。Larson(1994)により不規則波に拡張されたSBEACHモデルは、実測値とバーの位置、高さ、前浜の侵食状況ともに非常によく一致している。これに対して、Dibajniaモデルの結果は変化が小さく、渡辺モデルの結果は前浜の侵食がやや小さく、バーの位置は沖にずれている。しかしながら、図-8(b)の最終地形を比較すると、前浜の侵食は両モデルとも足りないが、バーの位置、高さはやや異なるものの、概ね実験値に一致する結果が得られている。

(2) MAST

ハノーバー大学大型造波水路で実施された不規則波の実験結果について検討した。初期海底勾配は1/20, 前浜勾配は1/4と比較的急で、中央粒径は0.22mm, 入射

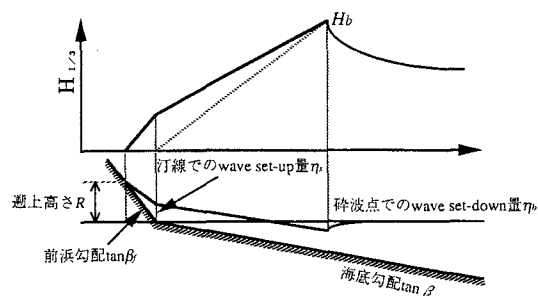
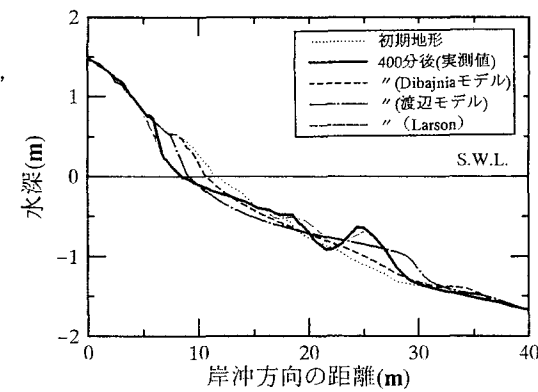
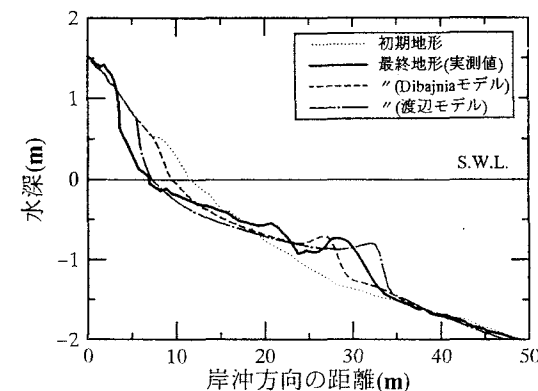


図-7 遡上域の波高、水位評価法の模式図



(a) 400分後



(b) 最終地形

図-8 SUPERTANKの実験結果の再現

波浪条件は $H_{1/3}=1.5\text{m}$, $T_{1/3}=6.0\text{s}$, 波作用時間は6.9時間である。計算格子間隔は0.5mで、1分毎に波浪場と地形変化の計算を繰り返した。

MAST-G6Mでは5つの研究機関の縦断地形変化モデルが相互比較されている (Roelvink・Brøker, 1993; Brøkerら, 1992)。イギリスのWallingfordのNPM(Nearshore Profile Model) (Southgate・Nairn, 1993; Nairn・Southgate, 1993), オランダのデルフト水理研究所のUNIBEST(Roelvink・Stive, 1989), デンマーク水理研究所のLITCROSS(Brøkerら, 1991), フランスの国立水理研究所のSEDITEL(Péchon, 1992), イギリスのリヴァプール大学のWATAN3 (O'Connorら, 1992)である。このうち、SEDITELは鉛直2次元の流れを解いて戻り流れが評価されるが、不規則波に適用できないので、比較からは除かれている。また、UNIBEST

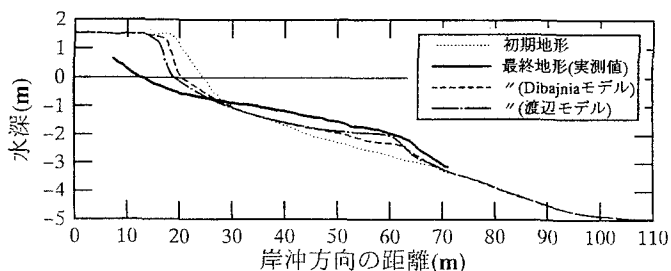
は、計算された初期の漂砂量が小さかったため最終地形は計算されていない。なお、NPMモデルは沿岸方向に一様性を仮定して沿岸流の影響も考慮できるようにモデル化されている。漂砂量算定式は、NPM, UNIBESTはBailard(1981)のモデルを基本としており、LITCROSSは浮遊砂のフラックスモデルを、WATAN3は大中・渡辺(1989)の戻り流れの効果を含むモデルを用いている。

図-9(a)は最終地形の計算値と実測値の比較を示している。前浜の侵食が計算では十分再現できていないものの、Dibajniaモデル、渡辺モデルによる計算結果はテラスの沖端の位置と高さについては概ね良好に再現できている。これに対して、図-9(b)はMASTで実施されたヨーロッパのモデルの計算結果であるが、LITCROSSの結果がテラスの形状を最もよく再現している。

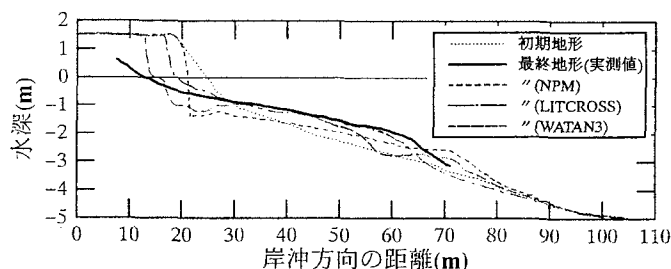
(3) 現地海岸への適用

Dibajniaら(1993)は、Kuriyama(1991)により報告されているピーク有義波高5.4m, 11sの高波浪が来襲したときの約2週間の現地海岸の縦断地形変化の再現を試みている。図-10は、時化のピークを挟む3つの時刻の波高分布、戻り流れの分布と、Dibajniaモデルによる漂砂量分布、シールズ数分布ならびに海底地形変化の計算結果を示している。それぞれの波高は1.5m, 5.4mおよび1.9mである。シールズ数は大部分で0.5を越えており、シートフロー漂砂が支配的であることがわかる。波高がピークとなる前後で水深4m付近のバーは最も侵食しており、沖のバーの消滅には高波浪の役割が大きいことがわかる。ところが、水深2m以浅では波高2m前後の場合と5mを越える場合で波高、戻り流れともに大差はない。したがって、2m以浅の地形変化には高波浪のピークが効いているのではなく、大きな時化が来襲して2m程度以上の侵食性の高波浪が長時間継続したことが重要なのである。その結果として水深2m付近に形成され岸側のバーは高波浪のピークが過ぎてから形成されている。

図-11は、再現期間の最終地形を実測値と比較した結果であるが、Dibajniaモデル、渡辺モデルともに沖のバーの消滅ならびに岸側のバーの移動などが定量的にも再現されている。しかしながら、岸側の小さなバーが形成される際にその岸側にトラフ地形が形成されているが、この点は再現できていない。岸側のバーの沖側斜面はかなり急勾配になっており、巻き波型の碎波が生じると考えられるので、バーの岸側は碎波によって乱れが底面にまで達し、底質が巻き上げられた結果である。このような現象を再現するためには、柴



(a) 渡辺モデル, Dibajniaモデル



(b) ヨーロッパのモデル

図-9 MASTの実験結果の再現

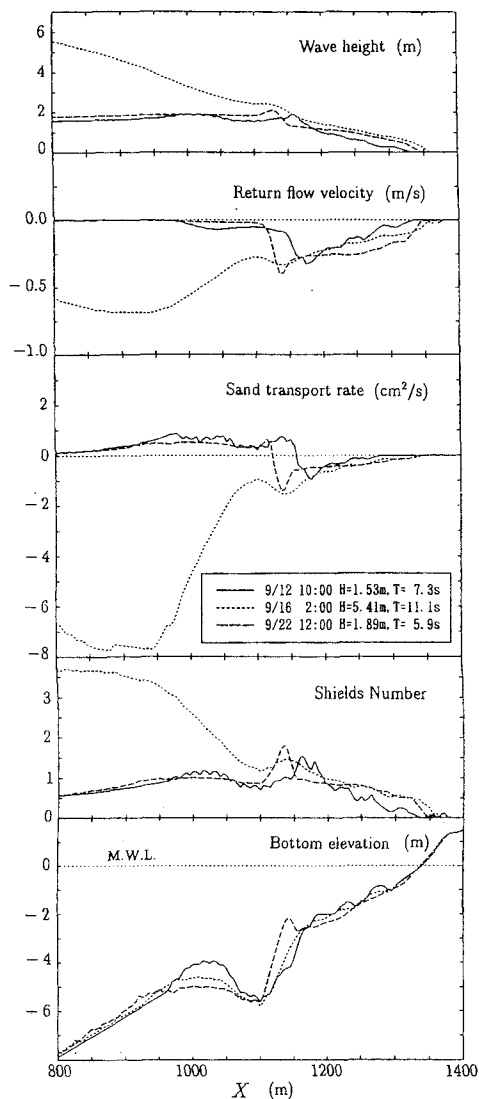


図-10 代表時刻における有義波高、戻り流れ、漂砂量、シールドズ数、地形変化の縦断方向分布(Dibajniaら, 1993)

いるが(de Vriendら, 1993), 平面 2 次元の海浜流場だけを考慮したモデルであっても, 波, 流れ, 地形変化を繰り返し計算する非定常解析モデル (いわゆる 2DH-MTMモデル) は未だ研究段階にあると考えられており, 現地の実測の海浜変形を定量的に再現した例は報告されていない。研究の興味は, 縦断地形変化も含めた漂砂のダイナミクスに立脚した海浜変形モデルの確立にあり, 最近では, もっぱら海浜流と戻り流れの鉛直分布を考慮した準 3 次元あるいは完全 3 次元の流れの計算モデル, あるいは長周期波を含む波浪変形モデルに関心が集まっている。しかしながら, 現在のところ実際問題に適用できる段階には至っていない。したがって, 3 次元海浜変形モデルの現地への適用という観点からはわれわれの方が経験が豊富であると思われる。逆に言えば, それだけ身近に海浜変形の問題が生じているということかもしれない。ここでは, 著者らの研

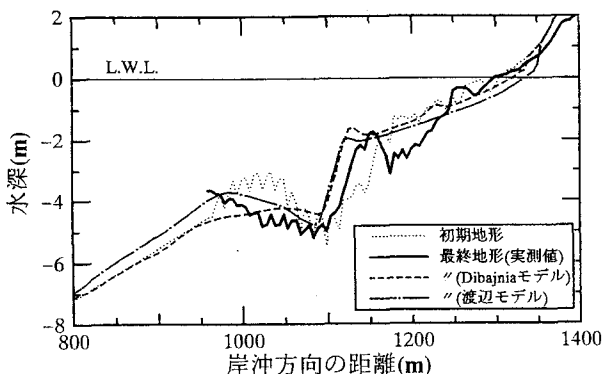


図-11 現地海岸の縦断地形変化の計算結果
—Kuriyama (1991)の現地データ—

山・Winyuモデルのように, 浮遊砂モデルを導入し, 碎波形態によって巻き上げ濃度や鉛直拡散係数を変化させる必要がある。

以上のように, 大型造波水路実験ならびに現地海岸の地形変化の再現計算を行った結果, 現地の高波浪時の縦断地形変化は, 碎波帯外のシートフローによる岸向き漂砂と碎波帯内の戻り流れによる冲向き漂砂を考慮すれば, 基本的には説明できることが明らかになった。しかしながら, 今回検討したモデルだけでなく, ヨーロッパの各モデルも前浜の侵食を十分表現できていない。このことはswash zoneの漂砂を適切に扱うことの重要性を示している。また, 不規則波を扱う以上, 長周期波は無視できず, 前浜の侵食に大きな影響を及ぼすことが知られているので, 長周期波をモデルに取り込むことも今後の重要な課題である。さらには, 碎波による巻き上げ機構をモデルに取り込むことも精度を上げる上で重要である。

5. 3次元海浜変形モデル

5.1 汀線変化を考慮した3次元海浜変形モデルの概要

ヨーロッパでは, 3次元海浜変形モデルについても, 各研究機関がモデルケースに対して相互比較を試みて

究を中心に3次元海浜変形モデルの現状について紹介する。

現在、我が国で問題となっている海岸侵食はほとんどが何らかの土砂収支の不均衡に起因するものであり、我々の関心事は海岸に構造物を建設する際にどのような外力場の変化あるいは土砂収支の変化が生じるかを事前に適切に予測することである。しかも、平面的な地形変化、特に汀線付近の砂浜の変化が重要である。3次元海浜変形モデルで対象とするのは、前者の外力場の変化による地形変化であり、検討範囲はせいぜい5kmの範囲である。それより広域かつ長期的な変化は汀線変化モデルあるいは等深線変化モデルで検討せざるを得ないし、またその方が計算時間も短く、計算も安定であるので現実的な答えが得られる。このように海浜変形モデルは、現実的には、検討対象の空間スケールならびに時間スケールで適切に使い分けなければならないので、両モデルが構造物の影響の少ないところでは、ある程度整合がとれたものであることが望ましい。そのような観点から、著者ら(1994, 1995)は、3次元海浜変形モデルと汀線変化モデルを組み合わせた実用的な海浜変形モデルを考えた。

汀線変化を考慮できる3次元海浜変形モデル(3D SHORE)の計算フローを図-12に示す。従来のモデルと同様、①波浪場の計算、②海浜流場の計算、③地形変化の計算の3つの計算モデルに大別されるが、汀線変化を精度よく推定するためにはswash zoneの漂砂も便宜的ではあれ考慮する必要があるので、遡上域の波浪場の計算が新たに追加され、海浜流場は遡上域を含めて計算する。次に、各地点の波・流れの諸量から局所漂砂量を計算して平面的な地形変化を計算するとともに、図-13に模式的に示すように、汀線平行方向の局所漂砂量フラックスを岸沖方向の測線毎に碎波点から遡上点まで積分して沿岸漂砂量の総量を評価し、汀線変化モデルと同様の考え方で汀線変化を評価する。

(1) 波浪場の計算

3次元海浜変形モデルの現地適用性を高めるためには、海浜流が発達し、漂砂の活発な碎波帯内を含む現地多方向不規則波浪場を精度良く再現することがまず重要である。したがって、平面波浪場計算法としては、多方向不規則波の屈折、回折、浅水・碎波変形を同時に考慮でき、なおかつ広範囲の計算が比較的短時間に

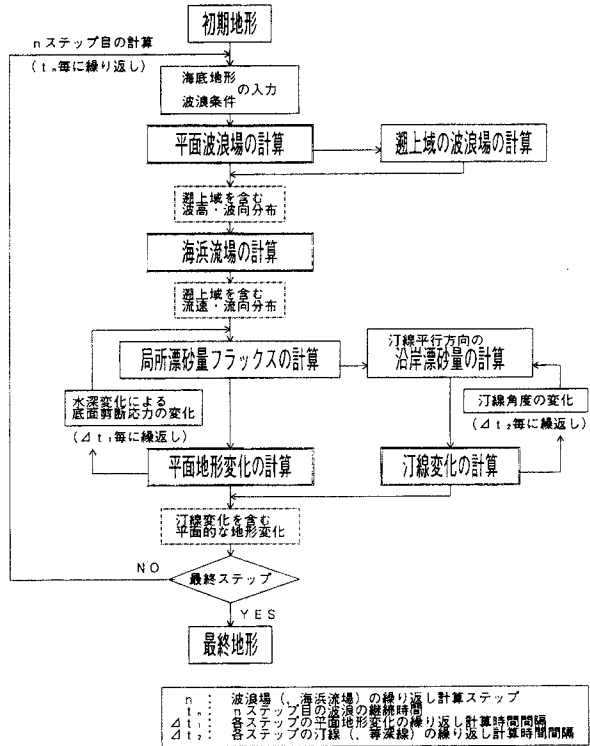


図-12 汀線変化を考慮した3次元海浜変形モデルの計算フロー

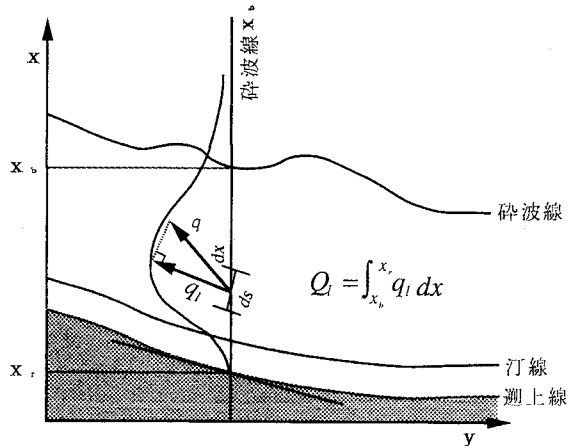


図-13 沿岸漂砂量の算定法の模式図

可能な方法を用いる必要がある。このような平面波浪場計算法としては、現在のところ、種々の平面波浪場計算の中でも、Karlsson(1969)のエネルギー平衡方程式に碎波減衰項を考慮した方法ならびに磯部(1986)の緩勾配方程式の放物型近似による方法が実用的な方法と考えられている(土木学会, 1994)。これらの計算法は、現地観測ならびに多方向不規則波を用いた水理実験により、現地の複雑な海底地形に対しても適用性がある程度確認されている(清水ら, 1992a; Shimizuら, 1994)。特に、エネルギー平衡方程式による方法は、回折を厳密に取り扱えない欠点はあるものの、方向スペクトルを直接計算できるため広範囲の計算が比較的短時間に計算できるという利点がある。したがって、対象地点で回折が顕著に効くか否かを目安に、両者を使い分けることが実用的である。いずれの方法も海浜変形予測にとって重要な波高・波向分布という観点からはきわめて高い計算精度を有する。

また、汀線変化にとって重要な遡上域の波浪場は、厳密には、波浪・海浜流場の計算を繰り返して平均水位上昇ならびに波の遡上を評価しなければならないが、計算時間短縮のため以下に述べる便宜的な方法を用いている(図-7参照)。

- ①碎波帯外および碎波帯内の平均水位の変化は、一様勾配斜面上で理論的に求まる近似式(Longuet-Higgins・Stewart, 1962)を用いて評価する。その際、波高水深比 γ は平面波浪場の計算結果を用いる。
- ②平面波浪場の計算結果を基に、碎波点における換算沖波波高を求める。この換算沖波波高を用いてHuntの式により遡上高を評価し、汀線の wave set-up高と遡上高を直線的に結んで遡上域における仮想水深を設定する。なお、遡上域の前浜勾配はSunamura(1984)の経験式を用いて外力により変化させている。
- ③碎波帯内の波高は静水深に対して合田(1975)の碎波変形モデルの簡略式を用いて評価し、遡上域の波高は汀線における波高から遡上点まで直線的に減衰させる。

(2) 海浜流場の計算

海浜流場の計算に当たっては、波の遡上高に応じて汀線境界を移動し、上述の方法で遡上域の仮想水深を設定して、遡上域も含めて海浜流場を計算する。

まず、radiation stress項であるが、エネルギー平均波高と有義波周期、主波向から規則波近似して進行波として与える方法や方向スペクトルから周波数・波向毎に独立にradiation stressを計算して線形重ね合わせする方法が考えられるが、両者の差は比較的小さく、むしろ摩擦項と水平拡散項の評価法による影響の方が大きい。また、歌川・西村(1995)は、周波数毎に成分波間の干渉を考慮すると、一様海浜に斜め入射する場合でも沿岸方向に非一様な起流力が生じ、沿岸流の蛇行や離岸流の発生など現実の複雑な流れが計算できることを示している。しかしながら、3次元海浜変形モデル(長期予測モデル)にこの効果を取り入れると、かえって計算される地形変化が不安定になる可能性が高い。全体のモデルのレベルとバランスがあるので、あるところだけ精度を上げてミスマッチを起こすことは避けなければならない。

次に、摩擦項についてであるが、従来の海浜流計算では定常流に対する評価式を準用しており、流速変化としてしか波の影響は考慮されていない。また、摩擦係数は波高分布や水深変化などにより空間的に変化するものであるが、通常は、それを空間的に一様であると仮定しており、実測値に合うように調整すべき係数として取り扱われる場合が多い。清水ら(1995)は、田中・Thu(1993)の波・流れ共存場の摩擦則を用いて、流れ方向の平均剪断応力を直接評価し、摩擦項を場所的に変化させている。この摩擦則は遷移領域を含む全て

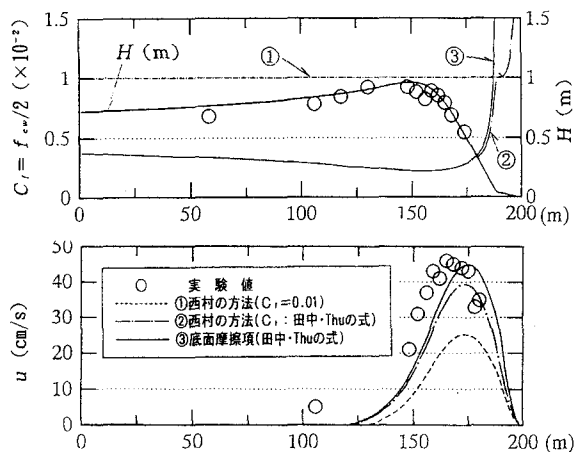


図-14 底面摩擦項の違いが沿岸流速分布に及ぼす影響
—Thornton・Guza(1986)の現地データ—
(清水ら, 1995)

の flow regime に対して適用可能で、しかも陽形式近似されているため、数値計算モデルに取り込むことが容易で、計算時間の面でも実用的である。図-14は、Thornton・Guza(1986)の沿岸流の現地観測結果の再現を試みた結果を示しているが、従来のよく用いられている西村(1982)の方法で摩擦係数を0.01で一定とした場合は、実測値ならびに底面摩擦項を波・流れ共存場の摩擦則で直接評価した場合に比べて過小評価していることがわかる。Visser(1982)の室内実験結果に対しても同様の結果が得られている。したがって、田中・Thuの摩擦則を用いることにより、実測値に基づくキャリブレーションを行わなくとも、外力と底面条件に応じて適切な沿岸流速分布を評価することが可能である。

また、水平拡散項についてであるが、一般的には、Longuet-Higgins(1970)の表示で、係数として0.01程度の値が用いられることが多い。また代表長さとして汀線からの距離あるいは水深から海底勾配を仮定して仮定の離岸距離が用いられることが多いが、構造物近傍では流速を過小評価することが知られており、構造物近傍では、代表渦径として構造物からの距離と汀線からの距離の短い方をとる方が再現性が高い(清水ら, 1989, 1993)。また、池野ら(1993)の人工島設置海浜の平面実験結果によれば、遮蔽域でかなりシャープな速い循環流が計測されているが、底面摩擦項を場所的に変化させても再現性は向上しない。乱れを場全体ではなく、ローカルの外力に応じて、代表長さを波高、代表流速を波による軌道流速振幅で与えるLarson・Kraus(1991)の評価法を用いたところ、再現性は向上した。その結果を図-15に示す。Larson・Kraus(1991)の評価法は一樣勾配海岸ではLonguet-Higginsの評価法に一致するため汎用性の高い評価法であると考えられる。しかしながら、両者を一致させるように係数を設定すると、係数が海底勾配によって変化し、しかも係数がLarson・Kraus(1991)が現地で採用した値や池野ら(1993)の実験の再現に用いた値に比べてかなり大きくなる。係数については今後の課題である。

最後に、バー・トラフ地形に対する海浜流場の計算法の適用性であるが、底面摩擦項を場所的に変え、水平拡散項としてLarson・Krausの評価法(かれらは元々バー・トラフ地形での海浜流の再現性向上を目指して提案した)を用いても、残念ながら、Kuriyama・Ozaki(1993)などが報告しているバーの岸側のトラフでかなり速い流速が存在するという観測結果を再現

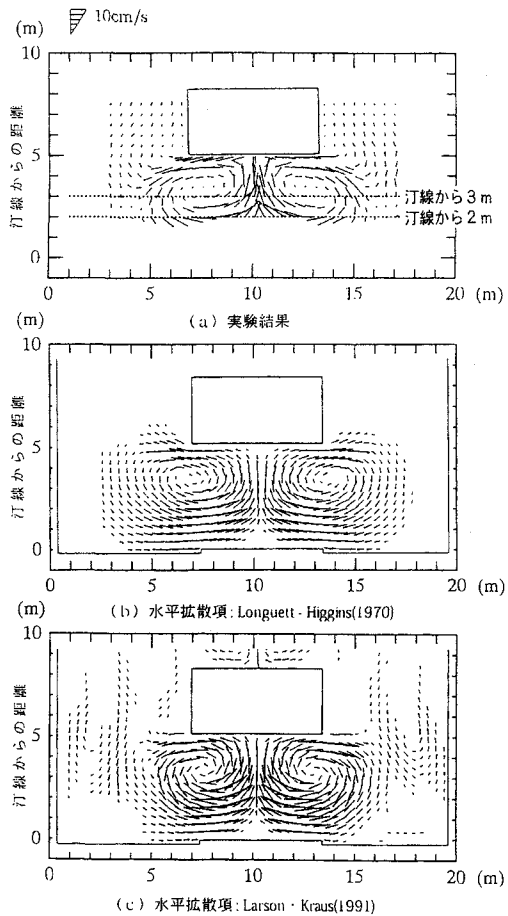


図-15 水平拡散項が海浜流場の計算結果に及ぼす影響
—池野ら(1993)の平面実験(多方向不規則波)—
(清水ら, 1995)

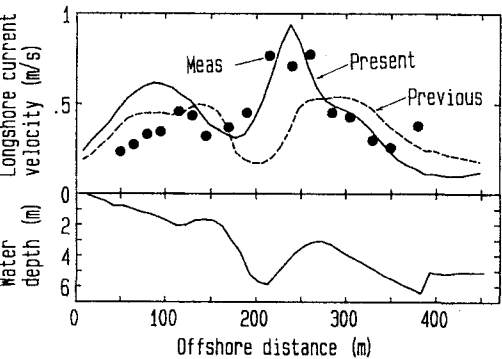


図-16 バー・トラフ地形上の沿岸流速分布の再現
(Kuriyama・Ozaki, 1993)

することはできない。Kuriyama・Ozaki(1993)は、図-16に示すように、碎波による大規模水平渦の運動量フラックスを考慮することにより再現性を向上させている。岡安(1993)もこのような大規模水平渦による運動量フラックスを考慮した準3次元の海浜流モデルを提案しており、今後、戻り流れも含めた準3次元モデルの研究の発展が待たれる。

(3) 地形変化の計算

汀線変化については、汀線平行方向の局所漂砂量フラックスを岸沖方向の測線毎に碎波点から遡上点まで積分して沿岸漂砂量の沿岸分布を求め、汀線変化モデルと同じ方法で計算する。汀線変化を表す漂砂の連続式の解法には陽解法を用いたが、数値計算上の安定条件の範囲内で繰り返し計算を行う際に、汀線変化による汀線平行方向の局所漂砂量フラックスの変化を考慮している。平面地形変化と汀線変化の計算結果を合成する際には、汀線が後退する場合は平面地形変化の計算で水深変化が得られている最も岸側の点と汀線位置の間を線形補間した。汀線が前進する場合には特に補正は行われていない。現段階では、汀線付近の土砂収支について多少ラフに取り扱っており、今後の課題としたい。

5.2 沿岸漂砂量

3次元海浜変形モデルにより局所漂砂量を積分して得られる全沿岸漂砂量とCERC公式による全沿岸漂砂量を比較し、3次元海浜変形モデルによる結果が従来の沿岸漂砂量の研究と整合するかどうかを検討した。

沿岸漂砂量の算定には戻り流れを考慮した。戻り流れは、清水ら(1992b)の現地観測結果ならびにSvendsen・Lorenz(1989)の研究を参考に、戻り流れの大きさは式(24)で評価し、向きは波の進行方向と逆に与えて、海浜流ベクトルと単純にベクトル合成した。Dibajnia・渡辺(1994)も指摘している通り、岸沖漂砂の影響は沿岸漂砂量にも無視できないからである。清水ら(1996)の検討条件では戻り流れの分だけ平均流が大きくなり、結果として底面剪断応力が増大するため、流れの向きが異なるものの、沿岸漂砂量が増加する結果となっている。

外洋に面した一様海底勾配の海岸を想定し、現実的な外力および海浜の条件に対して局所漂砂量を積分して得られる沿岸漂砂量の総量とCERC公式による沿岸漂砂量を比較した。検討条件は、有義波高・周期として、 $1\text{m} \cdot 8\text{s}$ 、 $2\text{m} \cdot 10\text{s}$ 、 $4\text{m} \cdot 14\text{s}$ の3種類、海底勾配は $1/20$ 、 $1/50$ 、 $1/100$ の3種類および底質粒径は 0.2 、 0.5 、 1.0mm の3種類、合計27ケースである。波向は水深 20m 地点で 15° の斜め入射とした。図-17は、戻り流れを考慮した場合の計算結果とCERC公式の比較を示している。

CERC公式の漂砂量係数 K は $0.2 \sim 1.0$ であり、特に粒径 0.2mm のケースではCERC公式の係数 0.77 とほぼ同程度の結果が得られている。平均的には、Schoonees・Theron(1994)が既往の現地データを再整理して得た係数 0.4 と同程度である。Watanabe(1992)やDibajnia・渡辺(1994)が同様の検討で得た $K=0.05 \sim 0.2$ に比べると既往の現地データやCERC公式に近い結果が得られた。その理由としては、沿岸流の計算で波・流れ共存場の摩擦則から摩擦項を直接評価し、沿岸流速の現地再現性を向上させたことが考えられる。また今回の検討では、戻り流れを考慮した方がCERC公式の係数に近い結果が得られたが、これはCERC公式の基礎となる現地データには当然戻り流れと波による漂砂の影響も含まれているので、それらを考慮した方が実測値との対応が良好になったものと考えられる。

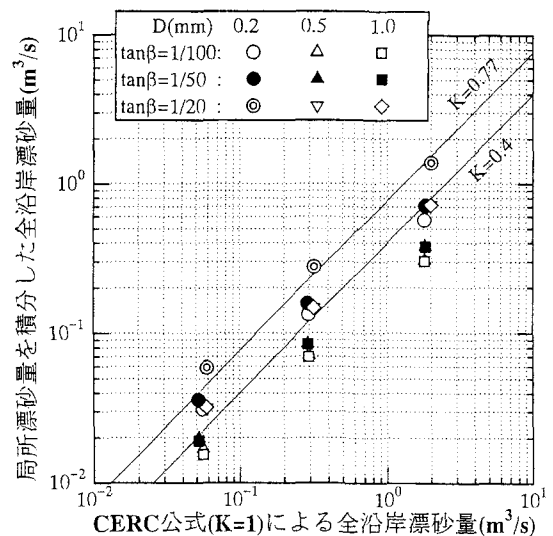


図-17 局所漂砂量を積分した沿岸漂砂量の総量とCERC公式の比較(清水ら, 1996)

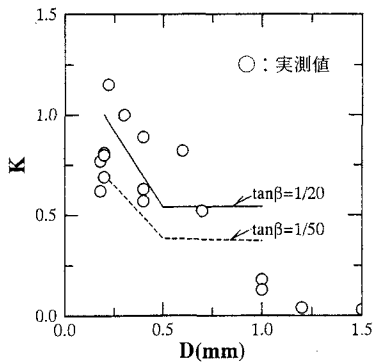


図-18 CERC公式の漂砂量係数に及ぼす
粒径の影響(清水ら, 1996)

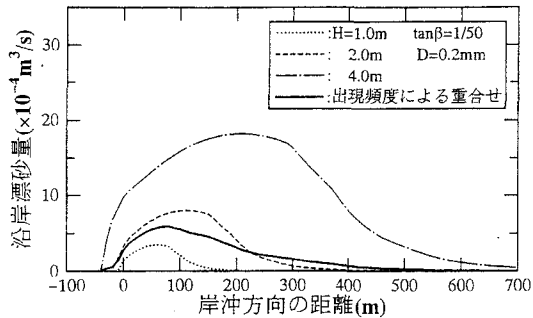


図-19 年間の波高の出現頻度を考慮した沿岸漂砂量の
岸沖分布(清水ら, 1996)

また、CERC公式の漂砂量係数 K は、底質粒径に依存し、粒径が大きくなると小さくなる傾向を示すことが知られている(例えば、Deanら, 1982)。Komar(1988)は現地データを再吟味した結果として、粒径 $0.18 \sim 0.6$ mmの範囲では平均的には $K = 0.77$ であり、粒径に対する依存性は既存の現地データから判断する限り認められないと述べている。最近、Valleら(1993)は過去の地形変化から粒径 $0.4 \sim 1.7$ mmの現地海岸における係数 K を評価し、Deanら(1982)と同様の粒径依存性を得ている。図-18は、有義波高 1 mの場合の海底勾配 $1/20$ と $1/50$ に対する粒径依存性を調べた結果である。図中には、Komar(1988)およびValleら(1993)に記載されている現地データも併せてプロットされている。全体的には、粒径が大きくなると K は小さくなる傾向を示すが、粒径 0.5 mm以上では波高と海底勾配に応じてほぼ一定値に落ち着く。過去の現地データは主としてトレーサーによるものであり、波高はせいぜい 1 m程度のときのデータと考えられるが、粒径 $0.2 \sim 0.5$ mmの範囲では、 K は海底勾配 $1/20$ のとき $0.6 \sim 1.0$ 、 $1/50$ のとき $0.4 \sim 0.7$ であり、既往の現地データも概ねこの範囲に含まれている。また、海底勾配に対しては、Kamphuisら(1990)と同様、海底勾配が急峻になるにしたがって戻り流れの影響により、係数 K が大きくなる傾向が認められる。

図-19は、波高の年間出現頻度を考慮して年間の沿岸漂砂量の岸沖分布を求めた一例である。波高が大きいつきは遡上域も広がるため汀線付近でもかなり多くの沿岸漂砂量が存在する。年間総計で見ると汀線付近ではピークは現れないものの、水深 $1.5 \sim 2.0$ mのごく浅いところに沿岸漂砂量のピークが現れている。既往の研究によれば汀線付近に漂砂量のピークがあると言われているが、それを再現するためには長周期波の影響も含めてswash zoneの漂砂の取り扱いが課題である。

5.3 平面地形変化

最後に、汀線変化を考慮した3次元海浜変形モデルの適用性の検証結果について述べる。

まず、三村ら(1982)の離岸堤設置海浜に対する移動床水理実験結果の再現計算結果について述べる。離岸堤設置6時間後の地形変化の再現を試みたが、波浪・海浜流場の計算は、海底地形変化の影響を適切に反映するため、20分毎に18ステップの繰り返し計算を行った。また、平面的な地形変化は各ステップをさらに5等分し、4分毎に地形変化に伴う底面剪断応力の変化を考慮した。また汀線変化は汀線の変化に応じて3秒毎に汀線平行方向の漂砂量フラックスを変更し、繰り返し計算した。また、汀線変化を計算する際の移動高さは碎波水深に遡上高を加え 10 cmとした。なお、計算格子間隔は 15 cmである。

図-20は、汀線、水深 2 および 4 cmの等深線位置の計算値を実験値と比較した結果を示している。汀線には、波高分布の影響を考慮できる小笹・Brampton(1979)の沿岸漂砂量公式を用いた場合の汀線変化モデルによる計算結果も併せて示されている。汀線変化を考慮した3次元海浜変形モデルは、水深 2 、 4 cmの等深線変化のみならず、汀線変化についても離岸堤背後で汀線の前進をやや過大評価するものの、トンボロ地形が

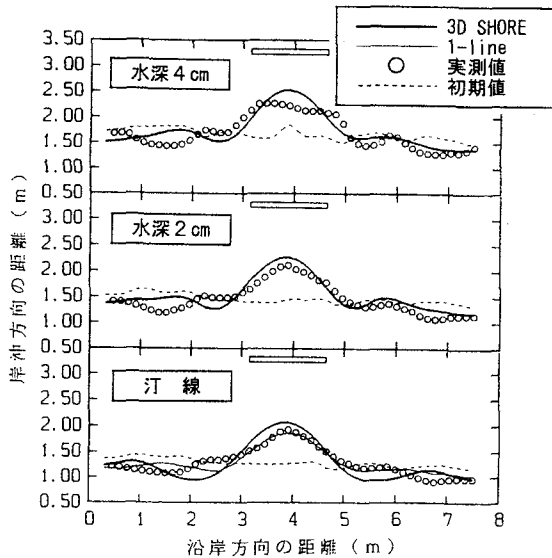


図-20 等深線位置の計算値と実験値の比較(清水ら, 1994)

形成される様子がよく再現されている(清水ら, 1994)。

図-21は、汀線と水深2 cmの等深線変化の計算結果を1時間毎に示したものである。汀線変化モデルによる計算では初期に汀線変化が大きく、3時間後にはほぼ最終地形に近くなっているが、3次元海浜変形モデルでは1時間後には離岸堤背後でほとんど汀線が張り出さず、5時間後になってようやく平衡状態になる結果が得られている。汀線変化モデルでは汀線変化に伴う碎波波向の変化を通して平衡状態に達し、汀線に対して碎波波向がほぼ直角になると沿岸漂砂量がほぼゼロになることで平衡状態になる。これに対して3次元海浜変形モデルでは海底地形変化に伴う波浪・海浜流場の変化を通して平衡状態になり、汀線が張り出しすぎて起因力であるradiation stressの勾配が小さくなって海浜流が弱くなるか、汀線に沿って平行な流れが生じて動的な平衡状態になるかのいずれかである。前者は汀線変化モデルで考慮されるメカニズムと同じで、いわば静的な平衡状態である。このように3次元海浜変形モデルでは動的な平衡状態も物理的な機構を介して評価できるため、地形の時間的な変化についても精度の高い予測が可能であると考えられる。

図-22は、島式漁港の建設に伴う4年間の地形変化(Kawaguchiら, 1994)の再現計算結果である。背後のトンボロが最も発達した1年間の地形変化は、汀線変化も含めて精度よく再現できたが、長期的には現実のシャープなトンボロは再現できなかった。初期汀線に対して直交した岸沖方向の測線で汀線平行方向の沿岸漂砂量を評価しているため、トンボロが発達した後はその精度が低下したものと考えられ、汀線変化の計算に際しては、例えば宇多(1982)のように直交曲線座標を採用するなどの工夫が必要である。

以上は、漂砂量算定式として掃流砂と浮遊砂を併せた平衡状態における全漂砂量を表す渡辺モデルを用いた場合の適用例を示したが、碎波帯内の碎波による浮遊砂が卓越する場合や航路などの水深急変部の堆積、河口流出土砂の堆積など非平衡状態の漂砂を精度よく評価するためには、浮遊砂の移流・拡散・沈降過程を考慮する必要がある。浮遊砂の移流・拡散方程式を解いて平面地形変化を計算するモデルはフラックスモデルと呼ばれ、わが国では、樫木ら(1984)のモデルがよく用いられている(例えば、中田ら, 1992)。しかしな

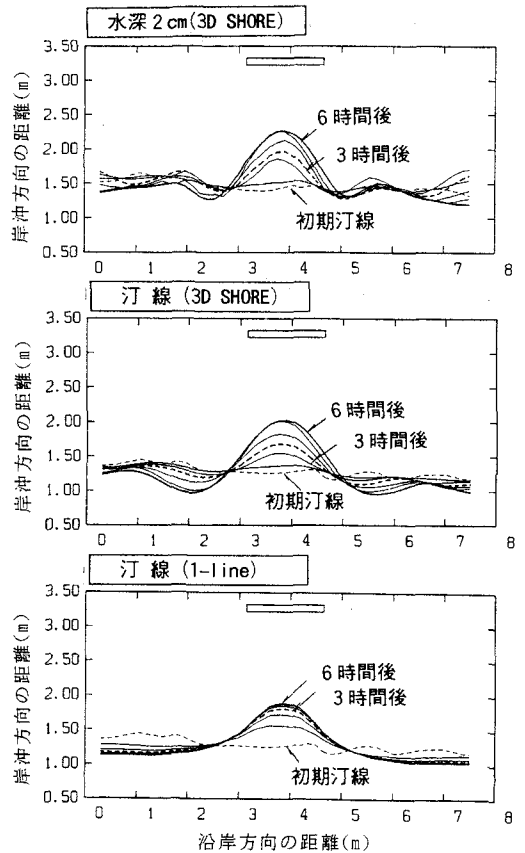


図-21 汀線変化モデルと3次元海浜変形モデルの
等深線位置の時間変化の比較

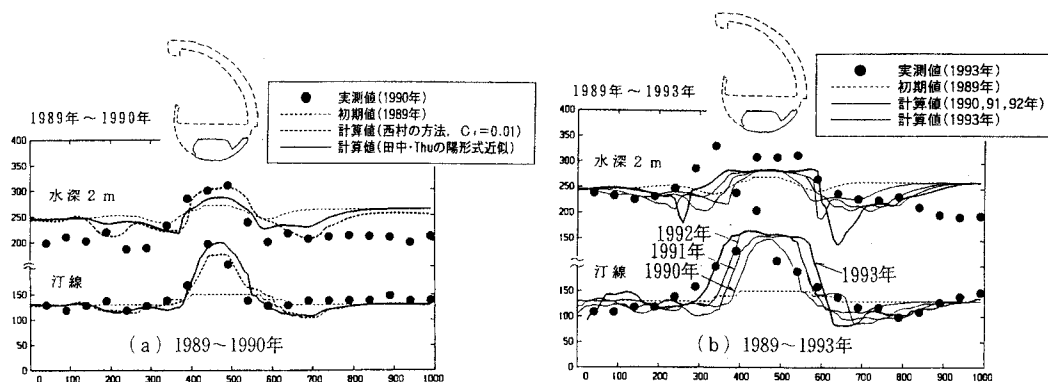


図-22 島式漁港建設に伴う地形変化の再現(清水ら, 1995)

がら、基準点濃度や水平および鉛直方向の拡散係数の与え方、濃度の鉛直分布の考慮の仕方など汎用化に向けては多くの課題が残されている(出口ら, 1991)。

6. あとがき

海浜変形シミュレーションに関する最近の研究動向と、縦断地形変化モデルならびに3次元海浜変形モデルの現状と現地適用性について紹介した。海浜変形シミュレーションは、計算機の発達のもとより、波、流れ、砂移動とその結果生じる海浜変形に関する各分野の研究の進展に合わせて徐々にではあるが確実に発展してきた。漂砂現象の物理的機構の解明という点では各分野に多くの研究課題が残されているが、構造物建設に伴う海浜変形を評価するという観点からは、海浜変形シミュレーションは実用上十分な精度が得られる段階に入っていると判断される。では、海底地形と底質条件、波浪条件などが入力されれば誰でもポンと正しい(と考えられる)計算結果が得られるのかといえ、まだその段階にはない。シミュレーションを行う前に現地データに基づいて現地の波浪条件、漂砂や海浜変形の実態を十分に把握した上で、定性的に、短期的には外力場が変わるからこういう変化が生じ、長期的には土砂収支が崩れてこうなるであろう、したがってこの現象を評価するためには、こういう海浜変形シミュレーション手法が適切で、計算範囲は境界条件がおかしくならないようにこの範囲にして、といったポイントを十分理解している必要がある。これがなかなか難しいのが現実である。また、数値計算結果は、波浪、海浜流および底面剪断応力などの外力場の評価法ならびに漂砂量算定式によって大きく異なる結果が得られるので、今後ともモデルの各ステップで詳細な現地検証が必要であり、質の高い現地データの蓄積に努める必要があろう。駄文を書き連ねすぎたきらいもあるが、これから海浜変形シミュレーションの実務に取り組もうとする方々の参考になれば幸いである。

なお、本稿をまとめるに当たり、平成6年度から2年間にわたり実施されてきた研究現況レビュー小委員会海浜変形WGでの議論が有益であったことを付記し、委員の方々に深甚なる謝意を表します。

参 考 文 献

- 浅野敏之・末富博文(1994)：斜め週上波の下での波打ち帯の漂砂の解析，海岸工学論文集，第41巻，pp. 396-400。
池野正明・鹿島遼一・松山昌史・柳山 勉・窪 泰浩(1993)：人工島式発電所背後の波浪場・海浜流場に関する実験的研究，海岸工学論文集，第40巻，pp. 621-625。
磯部雅彦(1986)：放物型方程式を用いた不規則波の屈折・回折・砕波変形の計算法，第33回海岸工学講演会論文集，pp. 134-138。
磯部雅彦・堀川清司(1981)：砕波帯付近における流速場の浅水変化に関する研究，第28回海岸工学講演会論文集，pp. 5-9。
入江 靖・柴山知也・渡辺 晃(1985)：不規則波による二次元海浜変形と岸沖漂砂量，第32回海岸工学講演会論文集，pp. 316-320。
宇多高明(1982)：新しい海浜変形モデルによる河口砂州周辺の変形予測，土木学会論文報告集，No. 322，pp. 77-88。
宇多高明(1993)：日本の海岸侵食，水工学に関する夏期研修会講義集，pp. B-3-1~B-3-20。
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.

- 歌川紀之・西村仁嗣(1995): 不規則波浪場にラディエーション応力の評価法について, 土木学会論文集, No.509/II-30, pp.203-210.
- 大塚行則・三村信男・渡辺 晃(1984): 不規則波による二次元海浜変形と岸沖漂砂, 第31回海岸工学講演会論文集, pp.321-325.
- 大中 晋・渡辺 晃(1989): 波・流れ相互干渉を考慮した波動場・海浜流場・地形変化の数値計算, 海岸工学論文集, 第36巻, pp.399-403.
- 岡安章夫・磯部雅彦・渡辺 晃(1989): 砕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, pp.31-35.
- 岡安章夫・瀬尾貴之・柴山知也(1993): 砕波による運動量輸送を考慮した海浜流の準3次元モデル, 海岸工学論文集, 第40巻, pp.251-255.
- 小笹博昭・Brampton, A.H.(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.
- 加藤一正・柳島慎一(1992): 長周期波によるバームの侵食, 土木学会論文集, No.452/II-20, pp.41-50.
- 河田恵昭・土屋義人(1990): 岸沖・沿岸漂砂量則の統一表示, 海岸工学論文集, 第37巻, pp.259-263.
- 合田良實(1975): 浅海域における波浪の砕波変形, 港研報告, 第14巻, 第3号, pp.59-106.
- 合田良實・渡辺則行(1990): 沿岸流速公式への不規則波モデルの導入について, 海岸工学論文集, 第37巻, pp.210-214.
- 佐藤慎司(1992): 不規則波による漂砂と海浜変形, 水工学に関する夏期研修会講義集, pp.B-8-1~B-8-18.
- 佐藤慎司・堀川清司(1984): 非対称振動流下における砂連上の砂移動に関する実験的研究, 第31回海岸工学講演会論文集, pp.286-290.
- 佐藤慎司・伊藤春起・渡辺 晃(1985): 非対称振動流下における砂の移動機構と漂砂量に関する実験的研究, 第32回海岸工学講演会論文集, pp.283-287.
- 佐藤慎司・美谷邦章・渡辺 晃(1986): 不規則振動流下における砂連形状と漂砂量, 第33回海岸工学講演会論文集, pp.228-232.
- 佐藤慎司・福濱方哉・堀川清司(1987): 斜面上における不規則波の砕波変形と底面流速に関する実験的研究, 第34回海岸工学講演会論文集, pp.36-40.
- 佐藤慎司・鈴木秀典(1990): 砕波帯における底面流速変動波形の評価法, 海岸工学論文集, 第40巻, pp.386-390.
- 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・Michael Kabiling(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.
- 佐藤慎司・Michael Kabiling(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.
- 沢本正樹・山下俊彦(1985): 波による半周期漂砂量, 土木学会論文集, 第363号/II-4, pp.195-204.
- 榎木 亨・李 宋婁・出口一郎(1984): 河口周辺の海浜流及び地形変動モデルに関する研究, 第31回海岸工学講演会論文集, pp.411-415.
- 芝 和彦・磯部雅彦・渡辺 晃(1993): 波浪場と海浜縦断地形地形変化の非線形数値計算法, 海岸工学論文集, 第40巻, pp.306-310.
- 柴山知也・浅田英幸・天明敏行(1989): 波と流れが任意角度で斜交する場合での漂砂量, 海岸工学論文集, 第36巻, pp.304-308.
- 柴山知也・Rattanapitikon Winyu(1993): 砕波帯を含む浮遊砂濃度の鉛直分布の評価, 海岸工学論文集, 第40巻, pp.306-310.
- 柴山知也・Rattanapitikon Winyu・岡安章夫(1995): 浮遊漂砂量を取り入れた2次元海浜変形モデル, 海岸工学論文集, 第42巻, pp.446-450.
- 清水隆夫・斎藤昭三・丸山康樹・長谷川寛・鹿島達一(1985): 大型造波水路実験による岸沖漂砂量分布形のモデル化, 電中研報告, No.384028, 60p.
- 清水隆夫・丸山康樹(1987): 岸沖海浜変形予測モデルと実規模データによる適用性の検討, 第34回海岸工学講演会論文集, pp.286-290.
- 清水琢三(1996): 海浜変形シミュレーション, 水工学に関する夏期研修会講義集.
- 清水琢三・野谷 斎・近藤浩右・西 裕司・山本正昭(1989): 海浜変形予測手法の現地適用性に関する研究, 海岸工学論文集, 第36巻, pp.404-408.
- 清水琢三・近藤浩右・渡辺 晃(1990): 局所漂砂量算定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・野谷 斎・坂野雅人・水流正人・杉本雅一・長野 章(1991): 富岡漁港建設途上における港口および港内埋没, 海岸工学論文集, 第38巻, pp.406-410.
- 清水琢三・鶴岡亮行・原 基久・磯部雅彦(1992a): 多方向不規則波の屈折・回折・砕波変形計算法の現地適用性, 海岸工学論文集, 第39巻, pp.181-185.
- 清水琢三・水流正人・渡辺 晃(1992b): 3次元海浜変形モデルによる長期的な地形変化予測, 海岸工学論文集, 第39巻, pp.416-420.
- 清水琢三・水流正人・嶋田昌義・窪 泰浩・山田富朗(1993): 取水港港口部の長期的な地形変化の再現, 海岸工学論文集, 第40巻, pp.496-500.
- 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.
- 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・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(印刷中).
- 首藤伸夫(1974): 非線形長波の変形—水路幅, 水深の変化する場合—, 第21回海岸工学講演会論文集, pp.57-63.
- 砂村継夫(1985): 海浜地形, 海岸環境工学, 第2編, 第2章, 東京大学出版会, pp.130-146.
- 高沢大志・Mohammad Dibajnia・渡辺 晃(1995): シートフロー漂砂量公式の改良, 土木学会第51回年次学術講演会講演概要集, 第2部(B)(印刷中).
- 田中 仁(1990): 波・流れ共存場における底面摩擦係数の陽型式近似式, 土木学会論文集, 第417号/II-13, pp.285-288.

- 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・A.Thu(1993): 全ての flow regime に適用可能な波・流れ共存場抵抗則, 土木学会論文集, 第467号/II-23, pp.93-102.
- 土屋義人・坂野雅人(1987): 漂砂形態とその発生領域, 第34回海岸工学講演会論文集, pp.222-226.
- 土屋義人・山下隆男・都丸徳治(1991): 大規模海岸構造物による海岸侵食の機構, 海岸工学論文集, 第38巻, pp.436-440.
- 土屋義人・山下隆男・泉 達尚・鳥取一雄(1993): 大規模海浜過程の予測—上越・大潟海岸の場合—, 海岸工学論文集, 第40巻, pp.456-460.
- 出口一郎(1991): 波と流れと漂砂, 波と漂砂と構造物, 第3章, 榎本編著, 技報堂出版, pp.163-177.
- 土木学会(1994): 平面波浪場計算法, 海岸波動, 波・構造物・地盤の相互作用の解析法, 第1編, 海岸工学委員会研究現況レビュー小委員会, pp.1-141.
- 土木学会(1996): 周辺海域の波・流れ・海浜変形の評価, 人工島式海上立地技術, 第3.4節, 原子力発電所の立地多様化技術, 第4編, 原子力土木委員会(印刷中).
- 中田博昭・鈴木 勝・阿部豊・川又良一・南 将人(1992): 潜堤周辺の地形変化に関する数値モデルと現地観測結果との比較, 海岸工学論文集, 第39巻, pp.431-435.
- 西村仁嗣(1982): 海浜循環流の数値シミュレーション, 第29回海岸工学講演会論文集, pp.333-337.
- 西村仁嗣・砂村継夫(1985): 二次元海浜変形の数値シミュレーション, 第32回海岸工学講演会論文集, pp.340-343.
- 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.
- 丸尾 剛・Mohammad Dibajnia・渡辺 晃(1995): 週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.
- 丸山康樹(1987): 海底地形変化予測モデルの現地適用性, 電力中央研究所報告, 研究報告: U87012, 35p.
- 三村信男・清水琢三・渡辺 晃(1982): 離岸堤による波浪・海浜流場の変化と海浜変形, 第29回海岸工学講演会論文集, pp.299-303.
- 山下隆男・土屋義人・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.
- 渡辺 晃(1979): 振動流域境界と海浜過程, 水工学に関する夏期研修会講義集, pp.B-3-1~B-3-13.
- 渡辺 晃(1981): 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.
- 渡辺 晃(1992): 局所漂砂量算定式による沿岸漂砂の総量と岸沖分布の検討, 海岸工学論文集, 第39巻, pp.306-310.
- 渡辺 晃・丸山康樹・清水隆夫・柳山 勉(1984): 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回海岸工学講演会論文集, pp.406-410.
- 渡辺 晃・先瀬正成・磯部雅彦(1989): 波・流れ共存場における砂連形状と漂砂量, 海岸工学論文集, 第36巻, pp.299-303.
- Ahmad Sana・田中 仁(1994): 交差する波と流れによる底面剪断力に関する研究, 海岸工学論文集, 第41巻, pp.416-420.
- Mohammad Dibajnia・清水琢三・渡辺 晃(1992): シートフロー状態が卓越する海岸の縦断面地形変化の数値計算, 海岸工学論文集, 第39巻, pp.301-305.
- Mohammad Dibajnia・清水琢三・渡辺 晃(1993): 現地海岸における縦断面地形変化の再現, 海岸工学論文集, 第40巻, pp.406-410.
- Mohammad Dibajnia・渡辺 晃(1994): シートフロー漂砂量式の波・流れ交差場への拡張と沿岸漂砂量の検討, 海岸工学論文集, pp.366-370.
- Bailard, J.A.(1981): An energetics total load sediment transport model for a plane sloping beach, J.Geophys.Res., Vol.82, No.C11, pp.10938-10954.
- Briand, M.H.G. and J.W.Kamphuis(1993): Waves and currents on natural beaches: a quasi 3-D numerical model, Coastal Eng., Vol.20, pp.101-134.
- Briand, M.H.G. and J.W.Kamphuis(1993): Sediment transport in the surf zone: a quasi 3-D numerical model, Coastal Eng., Vol.20, pp.135-156.
- Brøker Hedegaard, I., R.Deigaard and J.Fredsøe(1991): Onshore/offshore sediment transport and morphological modelling of coastal profiles, Proc. Coastal Sediments'91, pp.643-657.
- Brøker Hedegaard, I., J.A.Roelvink, H.Southgate, P.Péchon, J.Nicholson and L.Hamm(1992): Inter-comparison of coastal profile models, Proc.23rd Int.Conf.on Coastal Eng., pp.2108-2121.
- Church, J.C. and E.B.Thornton(1993): Effects of breaking wave induced turbulence within a longshore current model, Coastal Eng., Vol.20, pp.1-28.
- Dean, R.G., E.P.Berek, C.G.Gable and J.Seymour(1982): Longshore transport determined by an efficient trap, Proc.18th Int. Conf.on Coastal Eng., pp.954-968.
- De Vriend, H.J.(1992): Mathematical modelling of 3-D coastal morphology, Proc. Short Course on Design and Reliability of Coastal Structures attached to 23rd ICCE, pp.259-283.
- De Vriend, H.J. and M.J.F.Stive(1987): Qasi-3D modelling of nearshore currents, Coastal Eng., Vol.11, pp.565-601.
- De Vriend, H.J. and J.S.Ribberink(1988): A quasi 3D mathematical model of coastal morphology, Proc.21st Int.Conf.on Coastal Eng., pp.1689-1703.
- De Vriend, H.J., J.Zyerman, J.Nicholson, J.A., Roelvink, P.Péchon and H.N.Southgate(1993): Medium-term 2DH coastal area modelling, Coastal Eng., Vol.21, pp.193-224.
- Isobe, M.(1985): Calculation and application of first-order cnoidal wave theory, Coastal Eng., Vol.9, pp.309-325.
- Kamphuis, J.W.(1991): Alongshore sediment transport rate distributions, Proc.Coastal Sediments '91, pp.170-183.
- Karlsson, T.(1969): Refraction of continuous ocean wave spectra, Proc.ASCE, Vol.95, No.WW4, pp.437-448.
- Kamphuis, J.W.(1990): Littoral transport rate, Proc.22nd Int.Conf.on Coastal Eng., pp.2402-2415.
- Kawaguchi, T., O.Hashimoto, T.Mizumoto and A.Kamata(1994): Construction of offshore fishing port for prevention of coastal erosion, Proc.24th Int.Conf.on Coastal Eng., pp.1197-1211.
- Kobayashi, N.(1982): Sediment transport on a gentle slope due to waves, J.Wtrway.Port, Coast.and Oc.Eng., Vol.108, No.3, pp.254-271.
- Komar, P.D.(1988): Environmental controls on littoral sand transport, Proc.21st Int.Conf.on

- Coastal Eng., pp.1238-1252.
- Kraus, N.C. and J.M.Smith(1994): SUPERTANK laboratory data collection project, Volume I: Main text, Coastal Research Center, Waterways Experiment Station, US Army Corps of Engineers, Technical Report CERC-94-3, 274p.
- Kuriyama, Y. (1991): Investigation of cross-shore sediment transport rates and flow parameters in the surf zone using field data, Rep. of the Port and Harbour Res. Inst., Vol. 30, No. 2, pp. 3-53.
- Kuriyama, Y. and Y. Ozaki (1993): Longshore current distribution on a bar-trough beach -Field measurements at HORF and numerical model-, Rep. of the Port and Harbour Res. Inst., Vol. 32, No. 3, pp. 3-37.
- Larson, M. (1994): Predictive beach profile change at mesoscale under random waves, Proc. 24th Int. Conf. on Coastal Eng., pp. 2252-2266.
- Larson, M., N.C. Kraus and T. Sunamura (1988): Beach profile change: morphology, transport rate, and numerical simulation, Proc. 21st Int. Conf. on Coastal Eng., pp. 1295-1309.
- Larson, M. and N.C. Kraus (1991): Numerical model of longshore current for bar and trough beaches, J. Waterway, Port, Coast. and Oc. Eng., Vol. 117, No. 4, pp. 326-347.
- Longuet-Higgins, M.S. and R.W. Stewart (1970): Radiation stress and mass transport in gravity waves, with application to "surf beat", J. Fluid Mech., Vol. 13, pp. 481-504.
- Longuet-Higgins, M.S. (1970): Longshore currents generated by obliquely incident wave, J. Geophys. Res., Vol. 75, No. 33, pp. 6778-6789.
- Nairn, R.B. and H.N. Southgate (1993): Deterministic profile modelling of nearshore processes, Part 2, Sediment transport and beach profile development, Coastal Eng., Vol. 19, pp. 57-96.
- Nicholson, J. and B.A. O'Connor (1996): Development of a one-dimensional cross-shore transport model, Abstracts-in-depth, Final Overall Meeting of Coastal Morphodynamics, MAST-G8M, pp. 7-53 ~ 7-60.
- O'Connor, B.A., J. Nicholson, N. MacDonald and K.O'Shea (1992): Application of the Watanabe cross-shore transport model to prototype-scale data, Proc. 2nd Int. Conf. on Hydraulic and Environmental Modelling of Coastal, Estuarine, and River Waters, Vol. 1, pp. 337-348.
- Péchon, P. (1992): Numerical modelling of wave-driven currents and sediment transport in the surf zone, Internal report EDF-LNH HF.42/92.15.
- Péchon, P. and C. Teisson (1994): Numerical modelling of three-dimensional wave-driven currents in the surf zone, Proc. 24th Int. Conf. on Coastal Eng., pp. 2503-2512.
- Roelvink, J.A. (1991): Modelling of cross-shore flow and morphology, Proc. Coastal Sediments '91, pp. 603-617.
- Roelvink, J.A. and M.J.F. Stive (1989): Bar-generating cross-shore flow mechanisms on a beach, J. Geophys. Res., Vol. 94, No. C4, pp. 4785-4800.
- Roelvink, J.A. and I. Broker Hedegaard (1993): Cross-shore profile models, Coastal Eng., Vol. 21, pp. 163-191.
- Roelvink, J.A., A.J.H.M. Reniers and D.J.R. Walstra (1995): Medium-term morphodynamic modelling, Abstracts-in-depth, Final Overall Meeting of Coastal Morphodynamics, MAST-G8M, pp. 7-3 ~ 7-6.
- Sato, S. and N. Mitsunobu (1991): A numerical model of beach profile change, Coastal Eng. in Japan, Vol. 34, No. 2, pp. 191-204.
- Shibayama, T. and K. Horikawa (1982): Sediment transport and beach deformation, Proc. 18th Int. Conf. on Coastal Eng., pp. 1439-1458.
- Shimizu, T., A. Ukai, Y. Kubo and M. Shimada (1994): Field applicability of wave models to estimating the wave fields outside and inside a harbor, Proc. HYDRO-PORT '94, pp. 303-315.
- Shoonees, J.S. and A.K. Theron (1994): Accuracy and applicability of the SPM longshore transport formula, Proc. 24th Int. Conf. on Coastal Eng., pp. 2595-2609.
- Smith, J.M. and N.C. Kraus (1995): SUPERTANK laboratory data collection project, Volume II: Appendices A-I, Coastal Research Center, Waterways Experiment Station, US Army Corps of Engineers, Technical Report CERC-94-3, 153p.
- Southgate, H.N. and R.B. Nairn (1993): Deterministic profile modelling of nearshore processes, Part 1, Waves and currents, Coastal Eng., Vol. 19, pp. 27-56.
- Stive, M.J.F. (1986): A model for cross-shore sediment transport, Proc. 20th Int. Conf. on Coastal Eng., pp. 1550-1564.
- Sunamura, T. and K. Horikawa (1974): Two-dimensional beach transformation due to waves, Proc. 14th Int. Conf. on Coastal Eng., pp. 920-938.
- Sunamura, T. (1984): Quantitative predictions of beachface slopes, Geol. Soc. Am. Bull., Vol. 95, pp. 242-245.
- Svendsen, I.A. and R.S. Lorenz (1989): Velocities in combined undertow and longshore currents, Coastal Eng., Vol. 13, pp. 55-79.
- Thornton, E.B. and R.T. Guza (1986): Surf zone longshore currents and random waves, J. Phys. Oceanography, Vol. 16, pp. 2192-2207.
- Visser, P.J. (1984): Uniform longshore current measurements and calculations, Proc. 19th Int. Conf. on Coastal Eng., pp. 2192-2207.
- Valle, R.D., P. Medina and M.A. Losada (1993): Dependence of coefficient K on grain size, J. Waterway, Port, Coast. and Oc. Eng., Vol. 119, No. 5, pp. 568-574.
- Watanabe, A. (1992): Total rate and distribution of longshore sand transport, Proc. 23rd Int. Conf. on Coastal Eng., pp. 2528-2541.
- Watanabe, A., T. Shimizu and K. Kondo (1991): Field application of a numerical model of beach topography change, Proc. Coastal Sediments '91, pp. 1814-1828.
- Winyu, R. and T. Shibayama (1994): Suspended sediment concentration profiles under non-breaking and breaking waves, Proc. 24th Int. Conf. on Coastal Eng., pp. 2813-2827.
- Wu, Y., H.-H. Dettle and H. Wang (1994): Cross-shore profile modelling under random waves, Proc. 24th Int. Conf. on Coastal Eng., pp. 2843-2855.