

海浜変形の数値予測モデル

渡 辺 晃

1. はじめに

夏の日射しを浴びながら、子供達が浜で遊んでいる。砂山を築きトンネルを掘り棒を立てて、自分達のお城を造って喜ぶ。やがてそれにも飽きると、海に入ってひとしきり波とたわむれる。次第に潮が満ち、彼等のつくった砂の城は波に洗われて形を失う。戻ってきた子供達は、小さな高まりとしてだけ残った砂山を見てちょっとがっかりするが、すぐに忘れてまた波とたわむれ始める。彼等は、寄せては返す波がどのようにして砂山の砂を運び去ったかには、一向に頓着しない様子である。

沿岸域では波や流れの作用を受けて常に海浜の砂が移動しており、海浜の地形は波浪の変化につれて変動する。自然海浜においては、このような変化は一般に季節的なもので、数年間を通してみれば平衡状態にあることが多い。しかし沿岸域に防波堤などの構造物が造られたり、海岸への主要な土砂供給源である河川にダムが建設されたりすると、このバランスが崩れて周辺の家浜の侵食や欠壊が生じ、海岸保全の観点から重大な問題となることも稀ではない。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、自然条件の変化や構造物の設置に伴う海浜地形の変動を定量的に予測することが不可欠である。ここに、科学者の視点と頭脳、工学者の経験と判断が、無邪気な子供達の心にとって代る。

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に頼ることが多かったが、最近になって数値シミュレーションによる海浜変形予測手法が急速に発達してきた。この背景には、近年の構造物の大規模化に伴い精度の高い海浜変形予測に対する需要が著しく増大してきたことや、海岸工学において定量化が最も困難であると従来されてきた漂砂現象に対する研究が精力的に行われ大きな進展をみせてきたことがある。

海浜変形の予測手法に関しては、この水工学シリーズにおいても筑波大学の西村仁嗣氏¹⁾、建設省土木研究所の橋本宏氏²⁾らにより述べられているが、それらは「海岸線変化モデル」を中心に扱ったものであった。本稿では、筆者らが最近開発した「三次元海浜変形モデル」を取り上げる。このモデルそのものについては既に第31回海岸工学講演会等において発表し^{3),4)}、より詳しい説明も他書⁵⁾においてなされているので、以下では、筆者がこのモデルを考案するに到った過程などを紹介して、読者の参考に供したいと思う。

2. 海浜変形数値モデルの概観

2.1 海浜変形予測手法の分類

海浜変形の予測に用いられる数値モデルは、通常、「海岸線変化モデル」と「三次元海浜変形モデル」の2つに大別される。前者は汀線変化モデルともよばれ、その名の通り、基本的には沿岸漂砂の海岸線に沿う分布から海岸線の変化に代表される海浜変形を予測する手法であり、最も良く用いられているのはいわゆる1-lineモデル^{1),2)}である。このモデルでは、漂砂量の算定の前提となる波浪や海計算においても、海岸線に沿う碎波波高や波向の評価のみが対象となり、また海浜流の計算は必要でない。

これに対し以下で取り上げる「三次元海浜変形モデル」は、対象海浜全域にわたって波浪や海浜流場を計算し、それより各点の漂砂量を求めて三次元的な海浜地形の時間変化を予測するモデルであり、平面二次元モデルや水深変化モデルなどによばれることもある。

これら2つのモデルは、それぞれ長所と短所をもっている所以で目的に応じて使い分ける必要がある。「海岸線変化モデル」は、実際現象をかなり単純化しているため、局所的な海浜変形までは計算できないし、構造物配置が複雑な場合には適用できない。その反面、短い計算時間で結果を与えることができるという長所を有するので、長時間・広領域の海浜変形の把握に適しており、実際にも多くの事例に引用されてきた。「三次元モデル」はこれに対し、海底地形の変化をも計算でき、少なくとも原理的には汎用性において優れているが、計算所要時間は前者に比べて相当に大となる。また応用実績が乏しいことから、長時間の海浜変形への適用にはまだ問題が多い。

図-1は、対象とする海浜域の空間スケールと予測期間の時間スケールにより、各予測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手法であり、数値モデルとは異なり定量的予測への適用は一般に困難であるが、新港湾のマスタープランを立案する際などにはよく利用されている。なお、図-1はあくまでも現時点での各モデルの適用範囲の目安を与えるものであり、将来においては各手法の改良によりそれぞれの適用範囲が拡大していくことになる。

2.2 三次元海浜変形モデルの構成

このモデルは、対象海域の波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、底質量の保存則から各位置の底面高の時間変化を推算することにより三次元的な海浜変形を予測するものである。このようなモデルは過去に、Wangら⁶⁾、筆者⁷⁾、山口・西岡⁸⁾などにより提案されているが、漂砂の外力となる波浪・海浜流の計算法や漂砂量算定式に問題があり、また実測結果との比較に基づく検証もなされていなかった。まえがきでも述べたように、以下では筆者ら³⁾により新たに開発されたモデルについて、基本的な考え方を中心に説明する。

モデルは大きく分けて、波浪場の計算、海浜流場の計算、地形変化の計算の3つのサブモデルにより

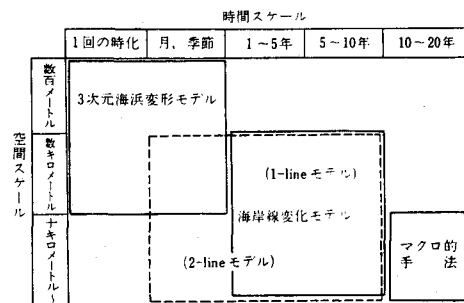
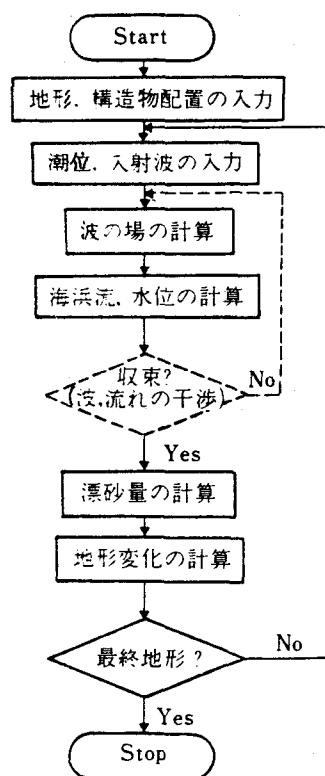


図-1 海浜変形予測モデルの適用範囲

構成される。図-2にモデル全体の概略の流れ図を示す。ここで波浪、海浜流、海浜地形の相互の干渉について触れておく必要がある。波浪はそれ自身ラディエーション応力を通して海浜流の起因力となるが、海浜流は逆に波浪場に影響を及ぼす。また、入射波条件が仮に一定であったとしても、海浜地形の変化に伴って沿岸域の波浪や海浜流の場も時々刻々と変化するはずである。このような影響を計算に取り込むためには、波浪、海浜流、地形変化の計算を、短い時間間隔で反復しなければならない。しかしながら各サブモデルの計算量がかなり大きいので、反復計算を頻繁に行うことは余り実際的ではなく、実用上は、最終時に目標とする海浜変形の予測精度や計算所要時間などをにらみあわせて、反復計算の間隔を設定する必要がある。このような相互干渉の影響は、実際の海浜過程ではもとより移動床水理模型実験においてもいわば自動的に包含されているわけであり、それを厳密に評価再現し得ない点が少なくとも現段階における数値モデルの1つの弱点といえよう。



3. 波と海浜流の計算モデル

図-2 三次元海浜変形モデルの流れ図

3.1 波浪場の計算手法

従来のこの種の三次元海浜変形モデルにおける波浪場の計算には、波動エネルギー平衡方程式^{6),7)}と波向線法と回折波理論を組み合わせた手法等⁸⁾が用いられてきたが、任意の地形や構造物配置に対する波浪場を精度良く計算する手法としては充分ではなかった。筆者自身、以前に波浪、海浜流から地形変化の計算に到る一連のモデル⁷⁾を作ってみた経験から、実用上十分な精度をもつ波浪場の計算法を先ず確立しないことには、それに続く海浜流や漂砂量の評価もいわば砂上の楼閣になりかねないという感を強めていた。そこで、漂砂量の算定法について検討するのと併行して、波浪場の計算法を考えることを始めた。

そもそも波浪場の計算において、実用上十分な精度というのはどの程度をいうのであろうか。近頃では、波の有限振幅性を考慮した屈折・回折の計算手法も提案されているし、有限振幅波のもとでの軌道流速の非対称性が底質移動に及ぼす効果なども研究されている。また、不規則波についても同様の課題に対する検討がなされている。しかしながら筆者は、「三次元海浜変形モデルの中のサブモデル」としての波浪場計算においては、当面は有限振幅性も不規則性も考慮しないことにした。これらを考慮した計算手法の確立には相当の期間を必要とすること、計算所要時間も極めて大となるであろうことなどが、消極的な意味での理由であり、他方、積極的な理由としては、規則波を対象とした方が検証データが得られやすいことや、微小振幅波理論で通しても、海浜流の起因力となるラディエーション応力や漂砂に

直接関係する底面流速と底面摩擦力をかなりの精度で評価できると見込んだことなどが挙げられる。⁵⁾ よって当面の課題は、任意の地形と構造物配置条件に対して、碎波帯内までもを含む波浪場を微小振幅波理論に基づいて計算する手法を開発することに帰着した。

以前の筆者のモデル⁷⁾で用いたエネルギー平衡方程式に基づく手法に代るべき波浪場計算手法を考え始めたのは、もう4年ほど前になる。その頃までに既にいくつかの平面二次元波浪場の解析手法が提案されていた。⁵⁾ 例えば、伊藤・谷本^{9),10)}による数値波動解析法や、Berkhoff¹¹⁾の緩勾配方程式などであるが、前者は浅水変形の評価に、後者は境界条件の設定の困難さなどに問題があった。緩勾配方程式を簡単化した放物型方程式¹²⁾に関する研究も進展しつつあったが、反射波成分を同時に計算し得ないことなどから、適用条件がかなり制限されると危惧された。また何といても碎波後の波の変形をも是非とも合理的に評価する必要がある、それにふさわしい手法の必要性を痛切に感じた。

これらのことをつらつら考えるうち、結局のところ、数値波動解析法を出発点にして、それに改良を加えていくのが一番手取り早いのではないかと思われた。数値波動解析法ならば境界条件の扱いも容易であるし、水面変位と線流量という直観的に物理的意味を捉えやすい変量を直接扱えるからである。そして先ず取っかかりとして試みたのが、離岸堤周辺の波浪場と海浜流場の解析である。¹³⁾ この段階では、数値波動解析法をそのまま適用し、碎波点の決定や碎波帯内の波浪場の評価に旧来の碎波限界波高の考え方をういたために、満足のいく波浪場算定モデルには未だ遠かった。しかし、その過程で重合波浪場におけるラディエーション応力を比較的簡便でかつ合理的に評価するための表示式を得ることができたのは1つの収穫であった。これについては次の項でまたふれることにする。

このようなわけで、次の目標を重合波浪場に適用可能な碎波条件すなわち碎波位置の判定法に定めた。斜面上を伝播する単一進行波の碎波条件としては、合田¹⁴⁾による碎波指標が用いられることが多い。この碎波指標では碎波条件が碎波点での水深や波高によって規定されている。ところで、構造物からの反射や回折などのために進行方向の異なる複数の波が重合する場合には、相互の位相関係により波高が局所的に変動する。例えば、同一波高、同一周期の2つの波が交差する時、同位相線上では見かけの波高はほぼ倍になる。しかしながら、交差角が小さく両者の進行方向が平行に近い場合には、交差角が大きい場合に比して小さな波高で碎波を生じる。¹⁵⁾ このような現象は従来の碎波指標では直接には説明できない。それではどのように扱ったら良いのであろうか。

このように一見厄介な問題にぶつかったときには、一旦もとの現象に立返って、現象を素直な気持ちで考えなおしてみると解答が見つかることが多い。重合波の碎波条件に関しても、筆者はそのような考え方をとってみることにした。斜面上の碎波は、浅い水域への波の進行につれて波速が減じ波高は逆に増大して、波峰での水平流速が波速を越えるような条件で波形が不安定となって生じると考えるのが、簡単ではあるが実際現象に近い解釈であろう。とすると、複数の波が重合している場合でも、同様に波峰での合成水平流速が水面波形の伝播速度を越える条件で碎波が生じると考えたらどうだろうか。こう考えて、碎波条件を規定するパラメーターとして波峰での水平流速 u_B と波速 c_B の比を選んで、合田の碎

波指標を表現し直したのが図-3である。¹⁶⁾このパラメータを選んだことに加えてのもう1つのミソは、砕波指標の変換に微小振幅波理論を用いたことである。複雑な地形と構造物条件に対する波浪場計算は当分は線形理論に基づいてなされるものと考えられ、それと合わせて用いる砕波指標への変換も微小振幅波理論によって行うのが合理的である。(有限振幅の波浪場解析を行う際には、図-3の砕波指標を使ってはならない!) この砕波指標の検証実験のため、平面水槽の中で斜交重合波浪場をつくったが、もともとあった造波板の前に合板を2枚直交させてつけるだけで、お金もかけずに振幅・周期・位相のそろった2組の波を起こすことができた。手前ミソながら、工夫によってお金を節約できる例として付け加えておく。

次に取りかかったのは数値波動解析法の改良である。¹⁷⁾従来の数値波動解析法では浅水変形が正しく計算できないために補正が必要であった。砕波変形まで包含できるように拡張することを考えると、この補正はわずらわしい。そこで導いたのが次式である。

$$\frac{\partial \mathbf{Q}}{\partial t} + \frac{c^2}{n} \nabla(n\zeta) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{Q} = 0 \quad (2)$$

c は波速、 $\nabla = (\partial/\partial x, \partial/\partial y)$ 、 ζ は水面変位であり、 $\mathbf{Q}$ は線流量ベクトルで、 u 、 v を水平流速、 h を水深とすると、

$$\mathbf{Q} = \int_{-h}^0 (u, v) dz \quad (3)$$

で与えられる。また、 $n = c_g / c$ (c_g は群速度)である。式(2)は連続式を水底から水面まで積分して直接求めるのに対し、式(1)はエネルギーの輸送現象を運動方程式の形を保ったまま表現しようとして直観的に思いついたものである。幸い、式(1)、(2)を多少いじってみると、これらがBerkhoff¹¹⁾の緩勾配方程式とはほぼ等価であり、浅水変形を正しく表現できることがわかった。¹⁷⁾

さて今度は砕波減衰を扱えるようにしなければならない。バーなどが存在する地形に対しても適用可能な砕波減衰モデルとしてすぐ思い出したのは、水口らのモデルであった。¹⁸⁾彼らのモデルは一次元のエネルギー方程式の中に砕波後の乱れによるエネルギー逸散の項を導入したものである。そこで、運動方

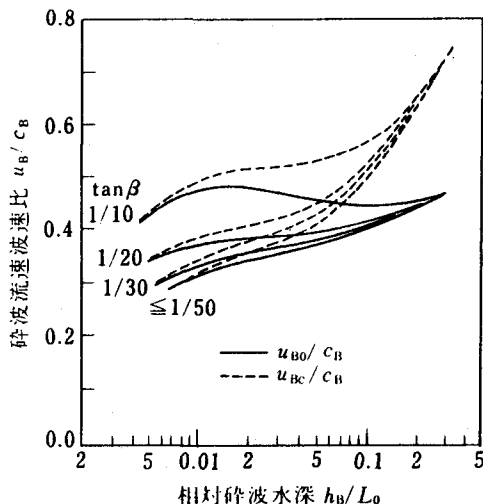


図-3 流速波速比を用いた砕波指標

程式(1)に碎波減衰項を付け加えた式として、

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{c^2}{n} \nabla(n\zeta) + f_D Q = 0 \quad (4)$$

なる形を採用することを先ず定めておいて、一次元の場合にこれと連続式(2)を組み合わせた方程式系が水口らのエネルギー方程式と等価になり得るか、また等価になるためには係数 f_D がいかなる関数形をとらなければならないかを考えるという手順で机上の作業を進めた。これも今から考えると運よく、数時間の試行錯誤の後に、 f_D の合理的な表現を見つけることができた。その結果については紙幅の都合で文献5)、17)に譲るが、目標を絞り込むことによって予想外に簡単に有用な結果を得ることが多いことを強調しておきたい。

このようにして作っていった波浪場計算の数値モデルの適用例として、勾配1/50の固定床上に離岸堤が置かれそれと直角に沖波波高2.0 cm、周期1.2 sの規則波が入射したときの碎波位置と波高分布を実験結果と比較したものを、図-4~6に示す。なお、数値計算手法の詳細については、文献5を参照願いたい。

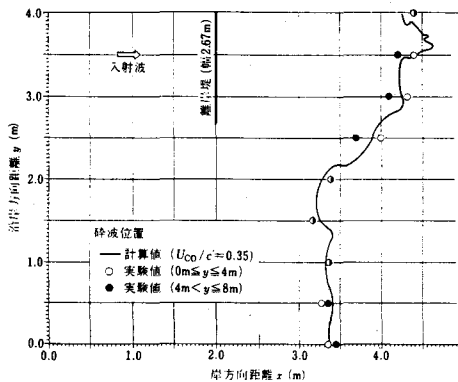


図-4 碎波位置の比較

3.2 海浜流場の計算手法

海浜流および平均水位変化の起因力となるのは、ラディエーション応力の平面分布（水平勾配）である。筆者らは、上述の数値波動解析の解である水面変位 ζ と線流量 Q から、ラディエーション応力を直接的に評価するための表示式を求めた。¹³⁾（ただし、文献13では論文を書く際に式表現を簡潔にしようとした余り必要な項まで落してしまった。正しい表示式は文献5、17に与えられている。）この表示

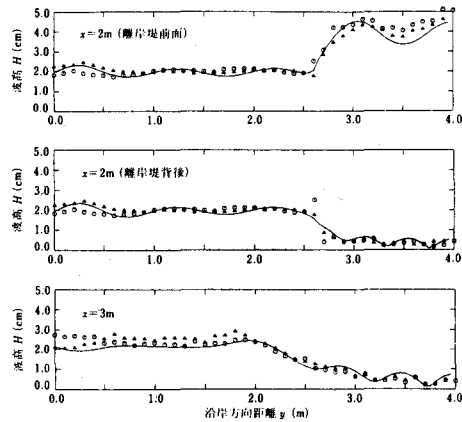


図-5 波高の沿岸方向分布

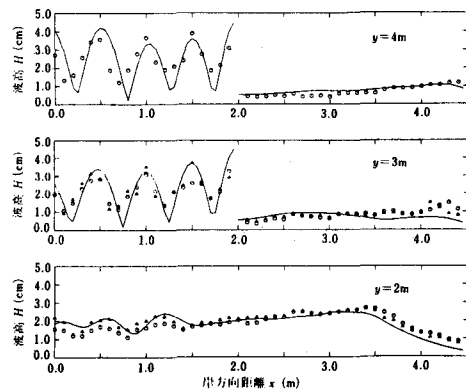


図-6 波高の岸沖方向分布

式を考えるに到った過程についても説明を加えたいところだが、それには数ページを要する。重合波浪場に対するラディエーション応力の表示式がいずれは必要になるであろうと思って早目に準備しておいたことと、完全重複波という極端な場合を考えることによって複雑な問題を比較的扱い易い問題に縮退させたことのみを指摘しておこう。

海浜流場の計算手法については、基礎方程式、数値計算の各種アルゴリズム、各スキームの得失等々に関し、文献5の中で西村仁嗣氏が詳しく紹介しておられるので、関心をお持ちの読者は同書を参照していただきたい。ただし汀線近傍の流れの解析に関しては、筆者は西村氏と見解を異にする。西村氏は同書254～255ページにおいて、「水深のきわめて小さい領域の計算では、数値計算技法上の困難のみならず、ここで用いる運動方程式が実際の現象を適確に記述しているかという疑義も生じる。このような状況下での計算は物理的に意味をもたないので、ある一定の実質水深を限度とし、対応する等深線に沿って壁面境界を想定するのが現実的である。」と述べている。これに対し筆者は、運動方程式によって wave setup の上限までをかなり精度良く評価できることから判断すると、wave setup によって岸側に移動した平均汀線のぎりぎりのところまで運動方程式を適用してもかまわない、あるいは少なくとも客観性の乏しい実質水深⁷⁾の位置に壁面境界を仮定するよりは実際現象に近い解が海浜流に対しても得られると考えている。そう考えて試みたのが海浜流場の計算における移動境界の導入であり、その手法を前節で述べた波浪場解析モデルと組み合わせた海浜流場の計算をそのうちやってみたいと思う。またその際には、底面摩擦項の評価に、田中・首藤¹⁹⁾による波・流れ共存下の摩擦則を重合波浪場の場合に拡張して用いるのも面白そうである。

4. 漂砂量と地形変化の計算モデル

4.1 漂砂量の算定式

「海浜変形の数値予測モデル」と銘打ちながら、波と流れのことを書き過ぎたかもしれない。しかし繰り返しになるが、まず外力である波と流れの評価をきちんとできないことには、漂砂と海浜変形の予測は覚束ないのである。

地形変化の計算に用いられる底質量の保存式は、それ自身はきわめて簡単で、次式により与えられる。

$$\frac{\partial z_b}{\partial t} = - \frac{\partial h}{\partial t} = - \frac{\partial q_x}{\partial x} - \frac{\partial q_y}{\partial y} \quad (5)$$

図-7に示すように、 z_b は任意の水平面を基準にした底面高、 h は水深であり、 t は時間を表わす。 q_x と q_y は各点ごとの漂砂フラックスの x 、 y 方向成分であるが、波の計算における線流量と同様に水底から水面まで積分した単位時間単位幅当りの漂砂量を意味し、しかも堆積時の空隙を含む有効体積で表示すべきことは、上式より明かであろう。いいかえれば底面高の変化に寄与する漂砂量だけが問題なのであって、たとえいくら高濃度の浮遊底質があっても仮にそれが浮遊状態のままでいるならば上式中の漂砂フラックスには含まれない。また、単位時間当りの漂砂量といっても、波の1周期間の刻一刻

の値が問題になるのではなくて、少なくとも上式中では波の周期のオーダー以上の時間にわたって平均した量が対象となる。時間スケールのみならず空間スケールについても同様であって、局所的な底面高や漂砂量とはいっても、例えば砂れん1波長内の各点での値を意味するものではないことはいうまでもなからう。これらはいわれてみれば当然のことばかりであろうが、地形変化計算に用いることを目的とした漂砂現象のモデル化においては常に心に留めておくべきことである。

さて、上式は極めて簡単に表示されているが、問題は漂砂フラックス q_x 、 q_y の評価である。漂砂現象についてはこれ迄に数え切れない程の研究がなされているものの、碎波帯内外を通しての、あるいは

波・流れ共存下での局所的な漂砂量を、各点での水理条件から合理的に算定し得る普遍的な式は確立されていない。(文献20には過去に提案された数多くの漂砂量算定式がまとめられている。) 漂砂量の算定は考えれば考える程に難しい問題である。砂れんがある時には砂れん周辺に周期的に発生する渦が重要な役目を果たすようだ、碎波帯内では碎波による乱れが支配的となるだろうし、そういえば戻り流れもききそうだ、swash zoneのあたりではシートフローとよばれる移動形態もあるらしい、それよりも平衡地形に近づくとも波浪場には余り変化はないのに正味の(1周期平均の)漂砂量はどんどん小さくなる、……。まるで「どんぐりと山猫」の話に出てくるどんぐり同士の議論のように、いろんなことが頭の中に際限もなく浮んできて、ついには普遍的な漂砂量算定式などできるわけがないとまで思えてくる。

そう、ひょっとするとそこに答えがあるのではなからうか。あらゆる条件を網羅でき全ての場合の漂砂現象を忠実に表現する漂砂モデルや漂砂量算定式が出来そうにもないのならば、いっそのこと思いきり単純なモデルにして、漂砂の本質的な特徴のみを取り上げたらどうであろうか。このような発想から生まれたのが以下に示す局所漂砂量算定式である。

まず、現象を根本的に単純化し従来の研究成果の取込みを容易にするために、局所的漂砂量 $q = (q_x, q_y)$ を平均流の寄与分 q_c と波の作用に直接起因する成分 q_w に分離して扱う。そしてそれぞれをいわゆるパワーモデルで評価することにする。即ち、流れによる漂砂量 q_c は、

$$q_c = A_c \frac{(\tau - \tau_{cr}) U}{\rho g} \quad (6)$$

で算定する。ここで、 A_c ：無次元係数(0.1～1)、 τ ：波・流れ共存下の底面摩擦応力の最大値、

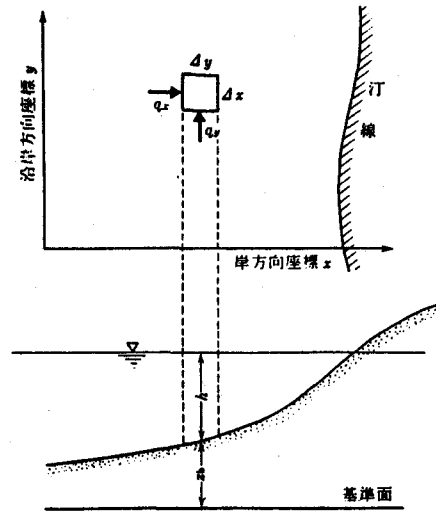


図-7 座標系と諸量

τ_{cr} : 底質の移動限界摩擦応力, U : 海浜流の流速ベクトル, ρ : 海水の密度, g : 重力加速度である。この式は, Komar²¹⁾の沿岸漂砂量算定式を一般の海浜流場に拡張し, 更に移動限界摩擦応力をも考慮したものであり, その妥当性は過去の研究である程度確かめられている。幸い, 波・流れ共存下の底面摩擦応力を評価するための手段として, 田中・首藤¹⁹⁾の摩擦則が提案されたのでそれを用いることができる。砕波帯内のように砕波による乱れが卓越している場への摩擦則の適用性は確認されていないし, また砕波帯内の底質移動の起因力を底面摩擦と考えることには多少無理があるかも知れないが, 底質に作用する外力の大小の尺度には少なくともなり得るであろう。そう考えるのがまさに現象の単純化であり, これで良いか否かは結果をみてから判断すれば良い。

波による漂砂フラックス q_w は, 往復運動の差としての正味の量を対象としなければならないので, 流れによる漂砂以上に評価が困難であることが予想された。種々の算定式が提案されているが, 筆者が以前に提案した式⁷⁾は自分達の実験データに基づいて作ったものなので, 何となく安心感があるし, 親しみがあるだけにもう少し育ててやりたい気がした。それに, 大型造波水路による実験結果²³⁾や不規則波のもとでの実験データ²⁴⁾との適合性も, まあまあ悪くない。ただし式(7)との対応を考え, パワーモデルの考えを徹底させて多少修正し, 波によるネットの漂砂量の絶対値 q_w を次式で評価することにした。

$$q_w = A_w \frac{(\tau - \tau_{cr}) u_b}{\rho g} \quad (8)$$

ここで, A_w : 無次元係数 (0.1 ~ 1), u_b : 底面軌道流速振幅であり, τ は式(7)におけると同様に波・流れ共存時の底面摩擦応力の最大値である。

ところで, 上式で評価される q_w はネットの漂砂フラックスの絶対値であり, 地形変化の計算に用いるためにはその正負すなわち正味の漂砂の向きを判定しなければ, いくら絶対値ばかりがわかっても意味がない。そこで岸沖漂砂の卓越方向に関する研究を探してみると, いくつかの論文があるが, 筑波大学の砂村氏が水平床上での岸沖漂砂の向きを次式で定義される2つのパラメーターで規定されると報告しておられるのが印象に残った。²⁵⁾

$$I_f = u_b^2 / sgd, \quad U_r = HL^2 / h^3 \quad (9)$$

ここで, $s = (\rho_s - \rho) / \rho$: 底質の水中比重, d : 底質粒径, H : 波高, L : 波長, h : 水深。砂村氏ならば実験も緻密にやられるし, 物理的視点からの直視力でも比類ないから, そのアイデアを利用しない手はない。ただし, これらのパラメーターで表示された岸沖漂砂の方向判定式自身は, 斜面上, 特に砕波帯内へは直接は適用できないだろうと考えた。(閑話休題: Parameter を日本語表示するときは, パラメーター, パラメター, パラメータ, パラメタのいずれが最適でしょうか。東北大の首藤教授は「パラメタ」を用いておられるようで, もとの発音 (parameter) に一番近く, また原稿用紙のマス目の節約にもなるのがこれですが, 何となくぶっきらぼうな感じがするものですから, 筆者はもっぱら「パラメーター」と書くことにしています。「パラメータ」と書く癖をつけると, 英語で発音すると

きにもつい〔parameter〕とやってしまうことがあるので避けた方が良いでしょう。)

そこで思い出したのは、Sunamura・Horikawa²⁶⁾による二次元海浜変形の分類式である。それは次式で与えられる。

$$H_0/L_0 = C_s (\tan\beta)^{-0.27} (d/L_0)^{0.67} \quad (10)$$

$C_s > 8$: 侵食型 (沖向き漂砂が卓越)

$C_s < 4$: 堆積型 (岸向き漂砂が卓越)

ここで、 $\tan\beta$: 初期海浜勾配, H_0 , L_0 : 沖波の波高と波長。この判定式は広範囲の条件の実験結果に基づいているので信頼性は高いと思われるものの、局所的な漂砂の向きの判定には直接は応用できない。そこで式(10)とできるだけ矛盾がないような局所漂砂方向判定式を求めることを試みた。詳細は他書⁵⁾に譲るが、式(10)を碎波指標の式によって碎波点での量で書き直し、更に式(9)で定義されるパラメータで表示した後で若干の近似を行って次式を得た。

$$\begin{aligned} \Pi &= I_f h / L_0 < \Pi_c \quad (\text{岸向き}) \\ &> \Pi_c \quad (\text{沖向き}) \end{aligned} \quad (11)$$

ただし Π_c はネットの漂砂量がゼロとなるいわゆる null-point での Π の値であり、現段階ではモデルの検定を通して経験的に定める必要がある。要するに、マクロにみたときの全体的な漂砂の卓越方向、あるいは地形変化に支配的な碎波点近傍での漂砂の向きをおさえてやるというアイデアに基づいて求めたのが式(11)であり、軌道流速変化の非対称性、砂れん周辺の渦の効果、戻り流れの影響などは全て1つのパラメータ Π の中に押し込められている。(なお、直観的には、式(11)の Π に更に摩擦係数を乗じた方が、漂砂方向判定子としての普遍性が改良されそうである。)

更に null-point をはさんで漂砂量が正から負へ不連続に変化するのを避けて実際現象により近い漂砂量分布を与えるために、値が-1から1に滑らかに変化する双曲線正接関数の特性を利用することにし、次式で表示される漂砂方向関数 F_D を導入した。

$$F_D = \tanh \left(\kappa_d \frac{\Pi_c - \Pi}{\Pi_c} \right), \quad \kappa_d \sim 1 \quad (12)$$

方向関数 F_D は正の値が波の進行方向、負の値が逆方向へのネットの漂砂に対応する。

結局、平面的な波浪場での漂砂フラックス q_w は次式で評価することになる。

$$q_w = F_D A_w \frac{(\tau - \tau_{cr}) u_b}{\rho g} \quad (13)$$

なお一般の波浪場では、回折や反射による波の重合のため底面軌道流速ベクトルが水平面内で周期的に向きを変え楕円軌道リサージュを描くことになるので、上式中の流速振幅ベクトル u_b をどのように定

めるかが問題となる。取りあえず今回のモデルでは重合波浪場を各点において2方向の進行波成分に分離し、各々に対し式(3)を適用したのち $\mathbf{q}_w$ をベクトルの的に加える手法を用いたが、⁵⁾ 筆者自身やや場当り的な手法であると思っている。

4.2 地形変化の計算式

こうして求まる漂砂フラックス $\mathbf{q} = (q_x, q_y) = \mathbf{q}_c + \mathbf{q}_w$ を式(5)に代入すれば、各点での底面高の時間変化量が算定できる。とここまで考えたとき、大事なことを一つ忘れていることに気がつかなければならない。即ち、上式で評価される $\mathbf{q}_c$ と $\mathbf{q}_w$ には底勾配の影響が少なくとも直接には含まれていないことである。底勾配の影響を定量的に調べた研究は殆どないと思われたので、ここでもまた直観（物理的考察に基づく）に頼ることにした。実際現象においては、底勾配が局所的に急になった場合には底質が勾配方向に移動し易くやるであろう。しかもその効果は底面での agitation の程度に応じて増減すると考えるのが素直であろう。更に、agitation の大小は底勾配の影響を無視した時の底質の移動程度つまり $|\mathbf{q}|$ によって代表させるのが簡単だし合理的であろう。このように考えて、本モデルでの局所底面高 z_b の時間変化の計算には、式(5)に代えて次式を用いることにした。

$$\begin{aligned} \frac{\partial z_b}{\partial t} = & -\frac{\partial}{\partial x} \left(q_x - \varepsilon_s |\mathbf{q}_x| \frac{\partial z_b}{\partial x} \right) \\ & -\frac{\partial}{\partial y} \left(q_y - \varepsilon_s |\mathbf{q}_y| \frac{\partial z_b}{\partial y} \right) \end{aligned} \quad (14)$$

ここで ε_s は正の定数であり、その値は試行計算によって定めるものとする。上式は底面高 z_b に関する拡散方程式の形をとっているので、当然ながら底面の極端な凹凸の発生は抑制される効果がある。なお、上記の思考プロセスによれば、式(14)中の $|\mathbf{q}_x|$ と $|\mathbf{q}_y|$ は共に $|\mathbf{q}|$ で置き換えた方が合理的とも思える。これもそのうち試みて結果を比較してみたいことの1つである。

5. 三次元海浜変形モデルの適用例

こうして海浜変形の数値モデルができあがったが、その妥当性を検証しておかないことには、実際の予測にはこわくて使えない。以下には、平面波動水槽内に中央粒径 0.2 mm の砂で 1/20 勾配の斜面を作り、その上に離岸堤模型を設置して、周期 0.87 s、入射波高 4.5 cm の規則波を作用させた時の海浜変形の実験結果との比較例を示す。離岸堤模型としては長さ 150 cm、高さ 50 cm の鋼板を鉛直に立て前面に消波工としてフィルム屑を入れたかごを取りつけたものが用いられている。（図-8 参照）

今回の条件では離岸堤の中心を通る測線（図中 x 軸）に対して現象がほぼ対称とみなせるので、上半面の領域のみを計算および比較の対象域とする。図-9 は初期の一樣勾配地形に対する碎波線位置および波高分布の計算結果である。碎波位置については実験結果とも比較されており、固定床実験の場合（図-4）より一致度は低下しているものの、両者は全体的に良く対応しているといえよう。この波浪

場に対応する海浜流場の計算結果は図-10に示されており、離岸堤の背後に明瞭な循環流が形成されている。

さて、前述の漂砂量算定式中には種々の係数が含まれているが、現段階ではこれらの係数値を所与の条件から予め決定することはできない。しかし現地海岸に構造物を設置した際に生じる海浜変形の予測等を扱う場合を考えれば、構造物設置前の自然海浜の変形データに対するデータは得られていることが多いと思われる。そのような場合を想定し、離岸堤より遠くほぼその影響が無視し得る測線上での初期1時間の地形変化実測データを用いて係数値を同定し、その値を用いて以後の漂砂量と海浜変形の計算を行った。(詳細は文献3, 5を参照)

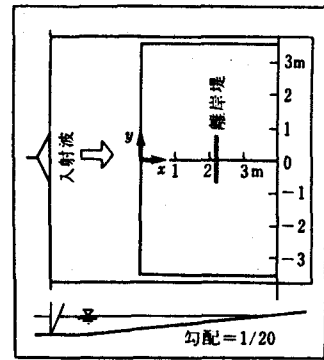


図-8 計算領域と座標系

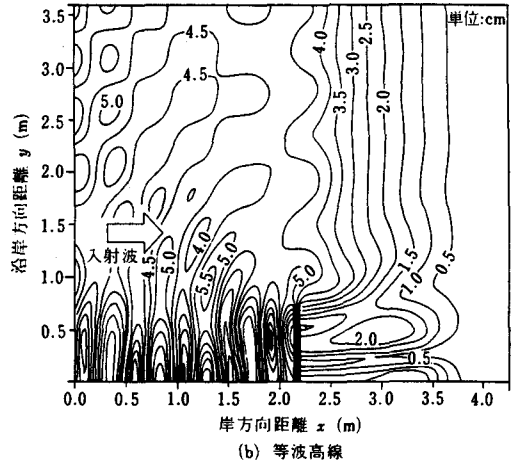
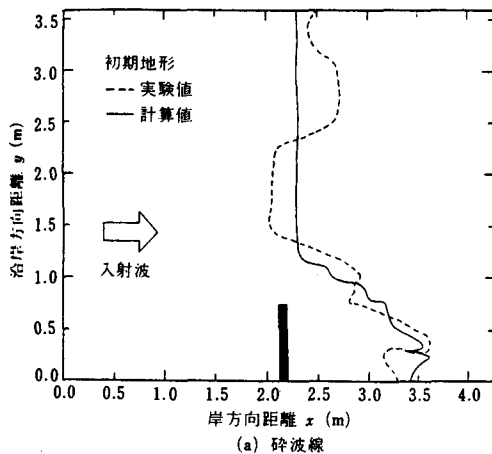


図-9 波の場の計算結果(初期地形)

図-11と12は、こうして計算された波作用2時間37分後と6時間55分後の地形変化の結果を、等深浅図の形で実験結果と比較したものである。また図-13は、2時間37分後の岸沖方向縦断地形について同様の比較を行ったものである。離岸堤背後への砂の堆積、堤側方におけるテラス状地形の形成、堤前面での波状地形の発達などの様子が、このモデルによりかなり良く再現されているといえよう。

なお、ここに示した例は水理模型実験との比較で

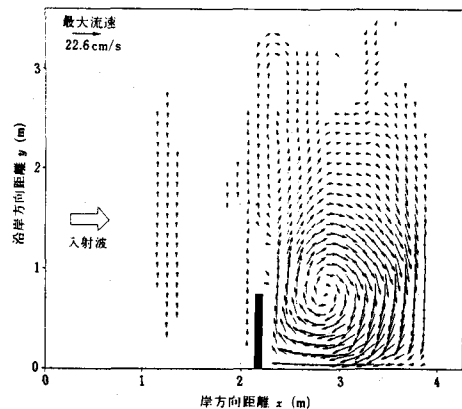


図-10 海浜流計算結果(初期地形)

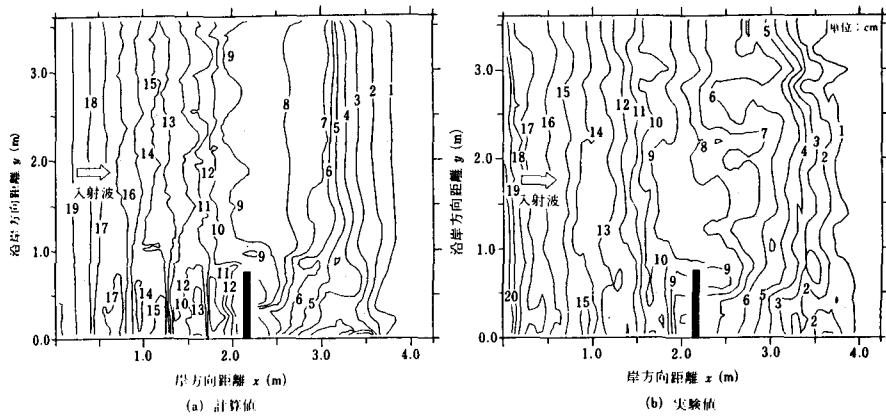


図-1 1 等深浅図の比較 (2 時間 3 7 分後)

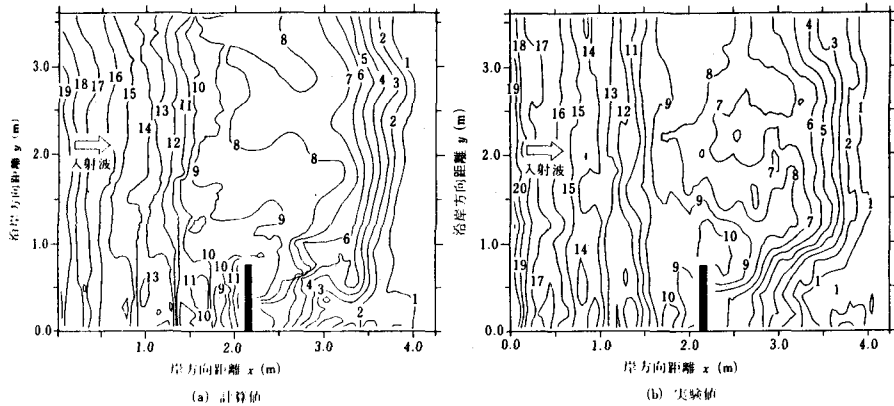


図-1 2 等深浅図の比較 (6 時間 5 5 分後)

あるが、実規模で考えれば粒径数ミリの砂浜に延長 100～200 m 程度の離岸堤が設置されたところに周期約 10 秒、波高約 5 m の暴浪が数日間継続したときの海浜変形に相当する。

6. おわりに

海浜変形の数値シミュレーション手法に関し、筆者らが最近開発した三次元予測モデルを中心に概説した。このモデルが構造物設置に伴う周辺地形の変化に対してかなりの程度に有効であることがわかりただけたことと思う。ただし今回のモデルでは、流れや平均水位の上昇が波浪場に及ぼす影響を考慮していないこともあり、汀線付近の地形変化計算には問題が残っている。また漂砂量算定式の改良や不規則波の扱いなども今後の検討課題であるが、それらが解決され数値モデルが真に実用的な海浜変形予測手法として確立される日も遠くないものと期待したい。

本稿では筆者がこのモデルを開発してきた経過や、基礎とした考え方に的を絞って説明した。このた

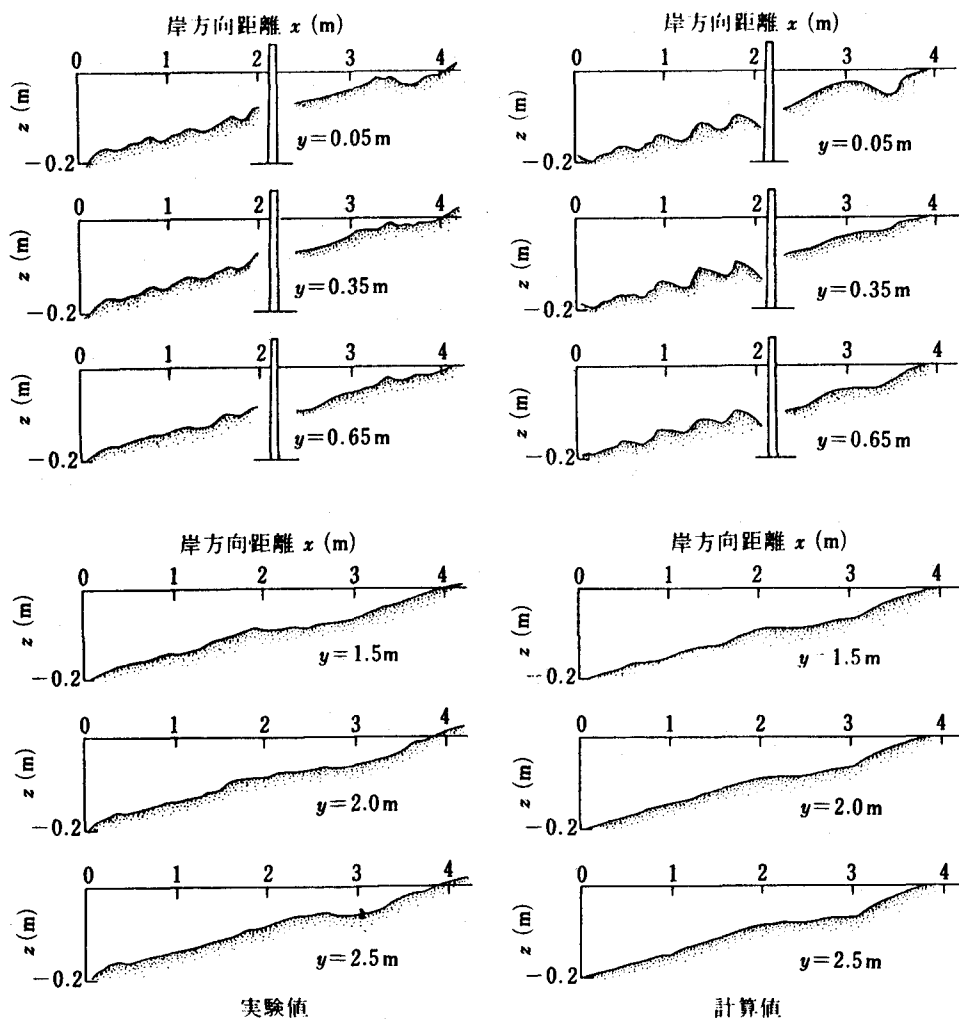


図-13 岸沖方向断面地形の比較（2時間37分後）

め、実際にこのモデルを応用してみようと思われる読者には不親切なものとなってしまったが、数値計算の手法やモデル適用上の留意事項等の詳細については文献5を参照して戴きたい。筆者の研究の楽屋裏の一部をお見せした本稿が、複雑な個々の物理現象を簡潔にモデル化し更にそれらを総合することによって全体の現象を把握するという、研究上の1つの取組み方を理解してもらうのに役立てたならば、筆者にとって望外の喜びである。また同時に、このモデルが大胆ないくつかの仮定にいわば手を引かれながらヨチヨチ歩きを始めたばかりであることもおわかりいただけたことと思う。早く成人させたいものである。あの砂浜で遊んでいた子供達がおとなになるよりも早く。

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：海浜変形の数値計算，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) 渡辺 晃・丸山康樹・清水隆夫・榊山 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回海岸工学講演会論文集，pp. 406~410, 1984.
- 4) Watanabe, A : Three-dimensional predictive model of beach evolution around a structure, Proc. Water Wave Research Symp. , Hannover, 1985. (in press)
- 5) 堀川清司（編）：海岸環境工学 — 海岸過程の理論・観測・予測方法，第3編「海浜地形変化の予測モデル」，東京大学出版会，pp. 211~301, 1985.
- 6) Wang, H. , R. A. Dalrymple & J. C. Shiau : Computer simulation of beach erosion and profile modification due to waves, Proc. Symp. Modeling Technique, ASCE, pp. 1369~1384, 1975.
- 7) 渡辺 晃：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, 1981.
- 8) 山口正隆・西岡洋一：離岸堤および突堤群による3次元海浜変動の数値計算法，第30回海岸工学講演会論文集，pp. 239~243, 1983.
- 9) 伊藤喜行・谷本勝利：数値波動解析法とその応用 — 構造物周辺の波，第18回海岸工学講演会論文集，pp. 67~70, 1971.
- 10) 谷本勝利・小舟浩治：数値波動解析法による港内波高分布の計算，第22回海岸工学講演会論文集，pp. 249~253, 1975.
- 11) Berkhoff, J. C. W. : Computation of combined refraction-diffraction, Proc. 13th Coastal Eng. Conf. , ASCE, pp. 471~490, 1972.
- 12) Radder, A. C. : On the parabolic equation method for water-wave propagation, Jour. Fluid Mech. , Vol. 72, pp. 373~384, 1979.
- 13) 渡辺 晃・塩崎正孝：構造物周辺の波浪・海浜流場について，第29回海岸工学講演会論文集，pp. 110~114, 1982.
- 14) 合田良実：砕波指標の整理について，土木学会論文報告集，No. 180, pp. 39~49, 1970.
- 15) Watanabe, A. , T. Hara & K. Horikawa : Study on breaking condition for compound wave trains, Coastal Eng. in Japan, Vol. 27, pp. 71~82, 1984.
- 16) 渡辺 晃・原 哲・堀川清司：重合した波浪場における砕波について，第30回海岸工学講演会論文集，pp. 5~9, 1983.

- 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回海岸工学講演会論文集，pp. 103～107，1984.
- 18) 水口 優・辻岡和男・堀川清司：碎波後の波高変化についての一考察，第25回海岸工学講演会論文集，pp. 155～159，1978.
- 19) 田中 仁・首藤伸夫：波・流れ共存場の抵抗則と境界層の区分，土木学会論文報告集，No. 342，pp. 10～25，1984.
- 20) 前掲5) 第2編「海浜地形と漂砂」第4章「漂砂量算定式」，pp. 170～190.
- 21) Komar, P. D. : Beach sand transport — Distribution and total drift, Proc. ASCE, Vol. 103, No. WW2, pp. 225～239, 1977.
- 22) 香取完和・榊山 勉・渡辺 晃：定常流・振動流交差装置による漂砂量の測定，第30回海岸工学講演会論文集，pp. 204～208，1983.
- 23) 鹿島遼一・清水隆夫・丸山康樹・斉藤昭三：大型造波水路による岸沖漂砂の実験的研究，第29回海岸工学講演会論文集，pp. 228～232，1982.
- 24) 大塚行則・三村信男・渡辺 晃：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. 321～325，1984.
- 25) 砂村継夫：浅海域の岸沖漂砂量に関する実験的研究，第29回海岸工学講演会論文集，pp. 239～243，1982.
- 26) Sunamura, T. & K. Horikawa : Two-dimensional beach transformation due to waves, Proc. 14th Coastal Eng. Conf. , ASCE, pp. 920～938, 1974.