

波浪場と海浜縦断地形変化の数値計算モデル

Mohammad Dibajnia*. 渡辺 晃**

1. はじめに

人為的要因や自然外力条件の変化に伴う海浜変形の予測は、海岸工学上極めて重要な課題であり、近年特に数値計算モデルによる予測手法に関する研究が活発に行われている。例えば著者の一人らは、屈折・回折・碎波変形を包含する一般性の高い平面二次元浅海波浪場の計算モデルを開発し¹⁾、それを更に新しく導いた漂砂量算定式と組み合わせることによって、構造物周辺の三次元海浜変形の数値モデルを提案した²⁾。そのモデルは平面水槽での離岸堤模型周辺の地形変化の実測結果によってある程度検証されており、現地海浜の地形変化予測にも応用され始めている。

しかしながら、モデル中では汀線付近では平均水位上昇の影響が考慮されていないために静水汀線より陸側では地形変化が生じ得ないといった不都合があることや、碎波帯内の漂砂の評価方法、ならびにネットの漂砂の移動方向を求めるために導入された支配パラメータ II_0 の決定方法など、いくつかの不十分な点があることは、前報²⁾でも指摘されている通りである。これらの点を改良してモデルの普遍化と実用化を図っていくためには、数値解析上の工夫や数多くの条件への適用等も有用であろう。しかし、モデル中の基礎式の信頼性を向上させるには、現象の素過程が理解し易いできるだけ単純な条件について、力学的物理的視点から検討を深めることが、より重要であろう。

このような視点から、本研究では、戻り流れは別として海浜流の影響を直接考慮する必要がなく、波の回折や沿岸漂砂の影響もないような単純な条件であり、しかも実験データの豊富な、二次元波動水路での実験に対応する一次元の波浪場および海浜縦断形状変化を対象として選ぶ。そして、現象への考察や実験結果との比較等に基づいて、上述の波浪場および海浜変形の両モデルに改良を加え、それらの信頼性と実用性を向上させることを目的とする。

2. 波浪場の計算モデル

碎波帯をも包含する一次元の微小振幅の波浪場に対する非定常緩勾配方程式は、水面変化と線流量 Q を用いて次式で与えられる¹⁾。

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + c^2 \frac{\partial \zeta}{\partial x} + f_D Q = 0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{1}{n} \frac{\partial (nQ)}{\partial x} = 0 \quad \dots\dots\dots (2)$$

t は時間、 x は水平座標、 c は波速であり、波動流速の x 成分を u 、水深を h 、波数を k とすれば、

$$Q = \int_{-h}^0 u dz, \quad n = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{2kh}{\sinh 2kh} \right) \quad \dots\dots\dots (3)$$

また、 f_D は碎波減衰係数であり、前報¹⁾によれば、

$$f_D = \alpha_D \tan \beta \sqrt{(g/h)(\hat{Q}/Q_r - 1)} \quad \dots\dots\dots (4)$$

で与えられる。ただし、 $\tan \beta$ は碎波帯近傍沖側の平均底勾配、 $\hat{Q}$ は Q の振幅、 $Q_r = \gamma' \sqrt{gh^3}$ で、前報では、 $\alpha_D = 2.5$ 、 $\gamma' = 0.25$ を用いた。なお碎波帯外の領域および $\hat{Q} < Q_r$ となる波の再生域では $f_D = 0$ とおく。また反射波を無視できる場合には、上式 (1)、(2) より波動エネルギー E に対する方程式が次式のように導かれる。

$$d(EC_g)/dx = -nf_D E \quad \dots\dots\dots (5)$$

ただし、 C_g は群速度である。よって $nf_D E$ が単位面積単位時間当りの碎波によるエネルギー減衰率を与える。

本論文では、磯部³⁾の研究等をも参考にして、一様勾配上での碎波減衰や一様水深式での波の再生等の現象との対応をより明確にするために、碎波減衰係数 f_D に対する表示を式 (4) に代えて次式で与えることにする。

$$f_D = \alpha_D \tan \beta \sqrt{\frac{g}{h}} \sqrt{\frac{\hat{Q} - Q_r}{Q_s - Q_r}} \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここで Q_s と Q_r はそれぞれ一様勾配上減衰域と一様水深再生域での線流量の振幅で、次式で与えられる。

$$Q_s = \gamma_s ch, \quad Q_r = \gamma_r ch \quad \dots\dots\dots (7)$$

定数 γ_s については磯部³⁾、 γ_r については丸山・清水⁴⁾にならって、それぞれ次式で評価する。

$$\gamma_s = 0.4(0.57 + 5.3 \tan \beta) \quad \dots\dots\dots (8)$$

$$\gamma_r = 0.4(a/h)_b \quad \dots\dots\dots (9)$$

ただし、 $(a/h)_b$ は碎波点での波振幅水深比である。式

* 学生会員 工修 東京大学大学院 土木工学専攻

** 正会員 工博 東京大学教授 工学部土木工学科

(9) 中の定数は、丸山・清水⁴⁾は 0.5 としているが、後述する波動エネルギーに対する検定から、0.4 に変えてある。(波高に対する実験結果との一致度は 0.5 の方がよい、式 (9) については更に実験的検証が必要である。)

砕波位置の決定には、前報¹⁾と同じく渡辺ら⁵⁾により提案された流速波速比表示の砕波指標を用いる。また従来の同種の計算では、汀線での扱いは仮想的な一様水深部を設けて無反射性境界条件を用いることが多かった^{1), 4), 6)}。今回は、一様水深域の設定を避け、より一般的な地形条件にも適用し易くするために、波動場の計算中で砕波点の決定を自動化し、最初の計算ステップから砕波減衰を考慮することによって、汀線では波高が自動的に 0 に近づくようにし、汀線条件は $Q=0$ で与えることにした。また沖側入射境界条件は $\eta=0$ で与えるようにした。更に前報¹⁾で示した式からラディエーション応力を評価し、波浪場の計算中に平均水位の変化の計算も組入れた。

このように改良を加えた波浪場の計算モデルの妥当性を検証するために、図-1~3 に示すように、一様勾配、ステップ型、バー型の 3 種の典型的な地形条件に対する実験結果⁷⁾と本モデルによる計算結果の比較を行った。それぞれの図には、波高 H およびポテンシャルエネルギーを水の密度で除した E_p/ρ の 2 つの量の岸沖分布の計算と実験との比較が示されている。砕波減衰ならびに再生や二次砕波がよく表現されており、数値モデルが微小振幅の仮定に基づいていることを考慮するならば、満足すべき一致度が得られているといつてよい。

3. 漂砂と縦断地形変化の計算モデル

上述の波浪場モデルで計算された海浜上各点での波の

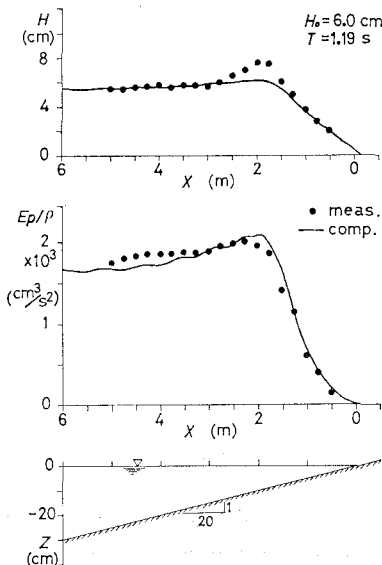


図-1 一様斜面上の波高とエネルギーの変化

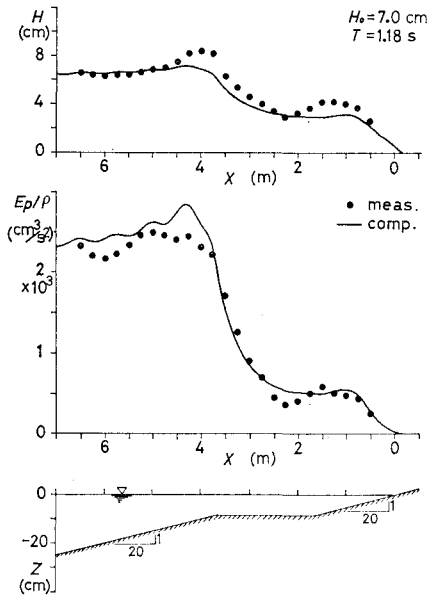


図-2 ステップ型地形上の波高とエネルギーの変化

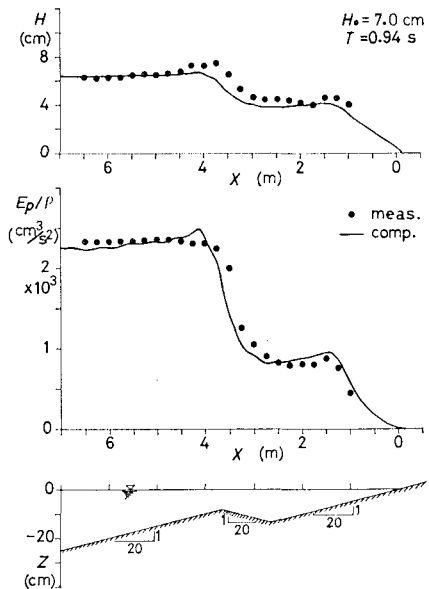


図-3 バー型地形上の波高とエネルギーの変化

諸元から、波による局所漂砂量 q'_w を算定し、更に次式の底質量保存則から底面高 z_b の時間変化を求めることになる。

$$\frac{\partial z_b}{\partial t} = -\frac{\partial q'_w}{\partial x} \quad (10)$$

ここで q'_w は、局所底面勾配の影響をも考慮して求める単位幅当りの x 方向への波による漂砂量フラックスである。

(1) 波による漂砂量

まず、底面勾配の影響を無視した際の波による漂砂量

q_w の算定式を検討する。前報²⁾においては、 q_w に対し次式を提案した。

$$q_w = A_w \frac{(\tau - \tau_{cr})}{\rho g} \hat{u}_b F_D \quad \dots\dots\dots (11)$$

ここで、 A_w は正の無次元定数、 τ は底面摩擦応力の振幅、 τ_{cr} は全面移動限界に対応する τ 、 ρ は水の密度、 $\hat{u}_b$ は微小振幅波理論で算定される底面近傍軌道流速振幅であり、 F_D は無次元のネット漂砂方向関数である。本論文の問題では海浜流はないので、 τ は波のみによる底面摩擦であるが、一般性を考慮して田中・首藤⁹⁾による波流れ共存時の摩擦抵抗則で流れなしとして算定することにする。

さて、上式の基礎となっているのは、パワーモデルの概念と碎波帯外沖浜領域での実験データであるが、前報²⁾では碎波帯内に対しても適用した。しかしながら、上式で評価されるのは、基本的には底面波動境界層での摩擦応力による漂砂量であり、碎波帯内のように碎波によって上方から供給される乱れの効果が卓越する領域への適用性は疑わしい。

そこで本論文では、沖浜領域には式 (11) をそのまま適用するが、碎波帯内の漂砂量の評価には更に碎波による乱れの効果をも考慮することにする。ただし碎波による乱れならびにその乱れが漂砂に及ぼす影響を定量的に評価する方法は、現在までのところ得られていない。ここでは最も簡単な仮定として、碎波により失われる波動エネルギーに比例したエネルギーが、碎波帯内の乱れによる底質移動に寄与するという考え方をとることとする。これは、式 (11) の前提となっているパワーモデルの概念とも矛盾しない仮定である。

式 (5) で示されるように、碎波帯内各点で単位面積単位時間当たり失われる波のエネルギーは $nf_D E$ で与えられる。従って、碎波帯内各点での漂砂量は、次式で評価することにする。

$$q_w = \left\{ A_w \frac{(\tau - \tau_{cr})}{\rho g} \hat{u}_b + A_{wb} \frac{nf_D E}{\rho g} \right\} F_D \quad \dots\dots\dots (12)$$

ただし、無次元係数 A_{wb} は、碎波による乱れが漂砂に及ぼす影響の程度を表わす係数であり、従って碎波形態等によって異なる値をとる可能性が高い。また、碎波帯内の各位置毎にも変化する可能性も充分に考えられる。しかしここでは、モデルを簡単にするために、 A_{wb} は A_w と同じく、全域で一定の値をとるものと仮定する。

(2) ネットの漂砂の方向

式 (11)、(12) 中の漂砂方向関数 F_D は、ネットの漂砂の方向を与えるものであり、前報²⁾では、軌道流速の相対的強度ならびに軌道運動の非対称性を考慮した次式を提案した。

$$F_D = \tanh \left(\kappa_a \frac{\Pi_c - \Pi}{\Pi_c} \right) \quad \dots\dots\dots (13)$$

$$\Pi = \frac{\hat{u}_b^2}{sgd} \frac{h}{L_0} \quad \dots\dots\dots (14)$$

ただし、 s は底質の水中比重、 d は粒径、 L_0 は沖波波長である。また、 Π_c はネットの漂砂量が 0 となるいわゆる null-point での Π の値。大型波動水路による実験結果等をも用いたその後の検討により、軌道流速の相対的強度 ($\hat{u}_b^2/sgd$) の代りに底面摩擦の相対強度 (Shields パラメーター) を用いた方が、データのまとまりがよいことがわかった。そこで式 (13) に代えて次式を用いる。

$$F_D = \tanh \left[\kappa_a \frac{(f_w \Pi)_c - f_w \Pi}{(f_w \Pi)_c} \right] \quad \dots\dots\dots (15)$$

ただし、 f_w は摩擦係数で、添字 c は null-point での値を意味する。

実際の地形変化予測にあたっては、 $(f_w \Pi)_c$ の値を予め設定する必要がある。二次元海浜変形に関する渡辺⁹⁾の実験結果を用いて、上述の波浪モデルと田中・首藤の抵抗則より $(f_w \Pi)_c$ の値を求めたところ、その値はケースによって異なり、底質・入射波条件や初期勾配によって変化し、特に地形変化が侵食性か堆積性かに対する依存度が強いことがわかった。さて Sunamura・Horikawa¹⁰⁾は、二次元海浜変形が次式で分類できることを見出している。

$$\left. \begin{aligned} C^* &= (H_0/L_0)(d/L_0)^{-0.67}(\tan \beta)^{0.27} \\ C^* &\geq 8: \text{侵食型} \\ 8 > C^* &\geq 4: \text{遷移型} \\ C^* &< 4: \text{堆積型} \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (16)$$

以上のことから、 $(f_w \Pi)_c$ の値は C^* の値との相関が高いことが予想される。

図-4 は、渡辺⁹⁾の実験結果から求めた $(f_w \Pi)_c$ と C^* の関係を示すものである。ただし堆積型の場合は null-point は現れないので、漂砂量分布から判断できる可能最小の $(f_w \Pi)_c$ の値で示してある。また、凡例中

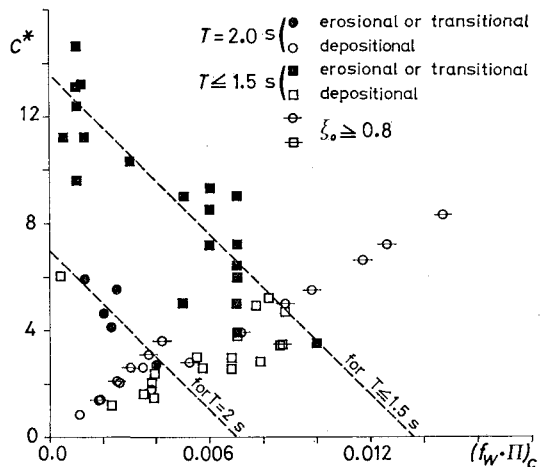


図-4 C^* と $(f_w \Pi)_c$ との関係

の記号 ξ_0 は、沖波の波高 H_0 と波長 L_0 を用いて表わした碎波帯相似パラメーターで、次式で定義される。

$$\xi_0 = \tan \beta / \sqrt{H_0/L_0} \quad \dots\dots\dots (17)$$

$\xi_0 \geq 0.8$ の場合は全て堆積型（全域で岸向き漂砂）であるので、これらのデータ（ $\ominus$, $\square$ ）を除いて考えれば、図中に示す2本の破線で C^* と $(f_w II)_0$ の関係が与えられる。周期 T による差異が現われており、一般的な $(f_w II)_0$ の算定図を作るためには、更に実験データが必要である。

(3) 漂砂量に及ぼす斜面勾配の影響

式(11), (12)では局所的な斜面勾配（重力）が漂砂量に及ぼす効果は考慮されていない。これを考慮するために、式(12)に代入する q'_w としては次式で与える²⁾。

$$q'_w = q_w - \varepsilon_s |q_w| \frac{\partial z_b}{\partial x} \quad \dots\dots\dots (18)$$

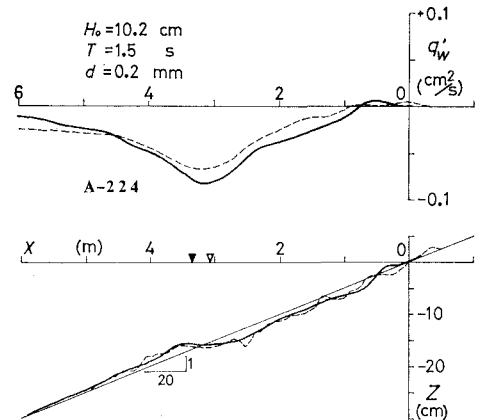
底質の動摩擦角を $\varphi = 30^\circ$ と仮定し、この角以上の底勾配上では上り勾配方向にはネットの漂砂が存在し得ないものとすれば、 $\varepsilon_s = 1/\tan \varphi = 1.73$ となるので、 ε_s は1～2程度の値をとると期待される。前報²⁾では $\varepsilon_s = 10$ としたが、これは重複波の影響等による局所地形の変動を抑制する必要によるものである。なお、現象面からすれば、底勾配が直接効くのは掃流漂砂のみであると思われるので、 ε_s は掃流砂の相対的重要性を支配するパラメーター（例えば $\hat{u}_b/w_0$, w_0 は沈降速度）の関数として、各点毎に異なる値を与えるのが更に合理的であろう。

(4) 計算結果と実験との比較

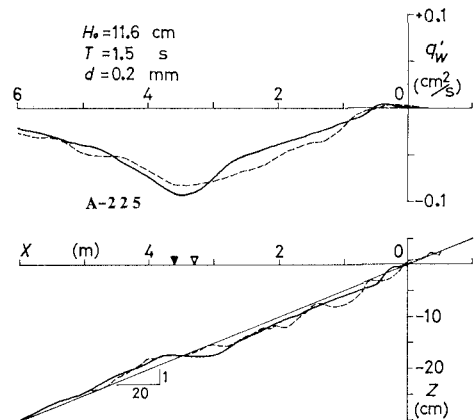
渡辺ら⁹⁾の実験（58 ケース）と本モデルによる試行計算結果の比較により、モデル中の各係数の値としては、 A_w は碎波帯内で0.15、碎波帯外では初期勾配 1/20 で0.45、1/10 で0.25、 A_{wb} は侵食型では0.0015、堆積型では0.004程度が適当であることを見出した。 ε_s の値は全ケース共通に2とした。地形変化の大きい典型的な6

ケースを選び、漂砂量、波作用1時間後の地形と碎波点位置（▼：計算，▽：実測）を比較したのが、図—5～10である。

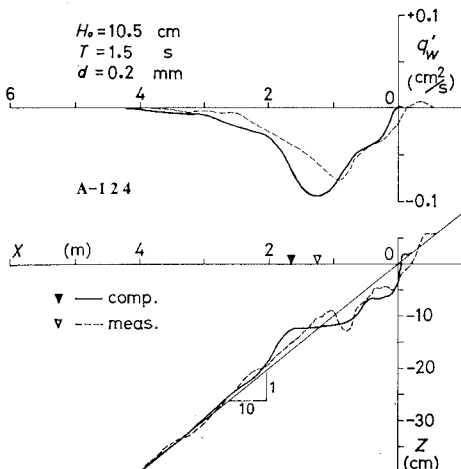
いずれのケースについても、本モデルは漂砂量分布と地形変化の両者に対して、全体的には合理的な算定値を



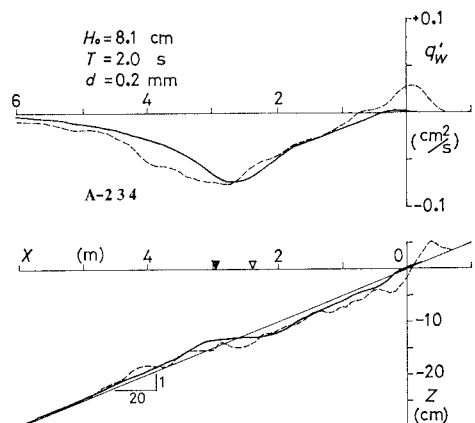
図—6 漂砂量分布と地形変化 (2)



図—7 漂砂量分布と地形変化 (3)



図—5 漂砂量分布と地形変化 (1)



図—8 漂砂量分布と地形変化 (4)

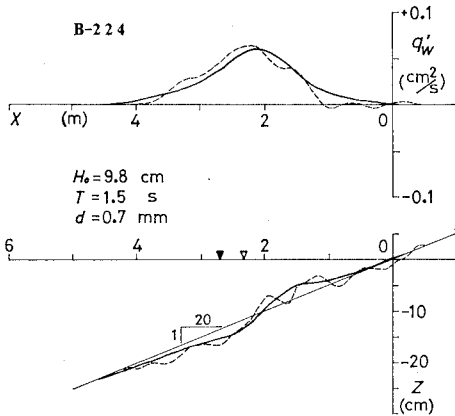


図-9 漂砂量分布と地形変化 (5)

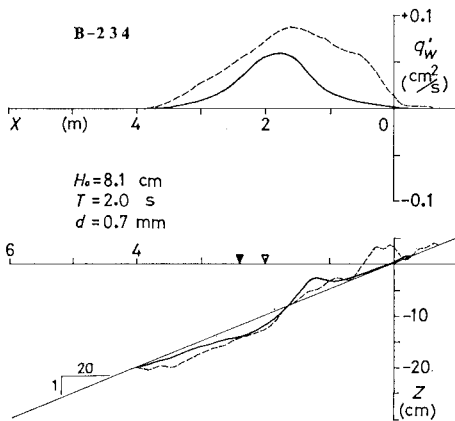


図-10 漂砂量分布と地形変化 (6)

与えている。計算と実測との差異がやや目立つ点の1つは碎波帯近傍であり、これは主に碎波位置算定上の誤差ならびに計算では戻り流れを無視していることによるものと考えられる。もう一つは汀線近傍において、実測結果に現われている岸向き漂砂 ($q'_w > 0$) が計算モデルでは充分に評価できていない点である。この領域は swash zone であり、抵抗則の適用性など種々の問題が考えうるが、とりわけ重要なのは、水深や波高が岸沖方向に大きく変化する領域であるために、本モデルでは考慮されていない底質の Lagrange 運動が漂砂量に及ぼす効果が卓越することであろうと思われる。

4. おわりに

渡辺らによる波浪変形モデル¹⁾ および海浜変形モデ

ル²⁾を一次元波浪場に適用することを通して、両モデルに改良を加えた。この結果、波浪場、漂砂量、地形変化のいずれに対しても、モデルの精度と信頼性・実用性を向上させることができた。

しかしながら、今後の研究に残された課題も多い。まず第一は swash zone の漂砂量の扱いであり、現象に対する理論的考察ならびに移動床実験を通して改良を加えていく予定である。また、特に本研究で扱っているような海浜縦断形状の変化に対しては、一般的な三次元海浜変形に対する以上に、戻り流れの効果が顕著に現われるものと思われ、その点もモデルに組込んでいく必要がある。更に A_w 、 A_{wb} の評価や $(f_w II)_c$ と ε_s の値の決定の方法についても、大型水槽による実験結果をも含む実験データとの比較を通して、改良をはかって行きたいと考えている。

最後に、本研究を遂行するにあたり、東京大学の堀川清司教授、磯部雅彦助教授、泉宮尊司助手他との議論が大いに有意義であったことを付記し、感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 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。
- 2) 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。
- 3) 磯部雅彦：放物型方程式を用いた不規則波の屈折回折碎波変形の計算法，第33回海岸工学講演会論文集，pp. 134～138，1986。
- 4) 丸山康樹・清水隆夫：海浜断面の時間変化に対応する波浪変形計算手法，第33回海岸工学講演会論文集，pp. 109～113，1984。
- 5) 渡辺 晃・原 哲・堀川清司：重合した波浪場における碎波について，第30回海岸工学講演会論文集，pp. 103～107，1984。
- 6) 堀川清司 編：海岸環境工学，第3編第2章，pp. 217～248，東大出版会，1985。
- 7) 永山 聰：碎波後の波の波高およびエネルギー変化に関する研究，横浜国大卒論，80 p. + 付録，1983。
- 8) 田中 仁・首藤伸夫：波流れ共存時の底面摩擦に関する研究，第27回海岸工学講演会論文集，pp. 163～167，1980。
- 9) 渡辺 晃・利徳吉彦・堀川清司：二次元海浜変形と岸沖漂砂量分布，第26回海岸工学講演会論文集，pp. 172～176，1979。
- 10) Sunamura, T. and K. Horikawa: Two-dimensional beach transformation due to waves, Proc. 14th ICCE, ASCE, pp. 920～938, 1974。