

浮遊漂砂量予測を取り入れた二次元海浜変形モデル

柴山 知也*・Rattanapitikon Winyu**・岡 安章夫***

1. 緒 言

地形変化を引き起こすような漂砂移動の内、碎波帯内では浮遊漂砂の割合が大きくなることが知られている。特に碎波点近傍では水表面から供給される強い乱れのために浮遊砂濃度の非常に高い領域が形成されることが指摘されている（例えば Shibayama et al., 1986）。しかし現行の地形変化予測モデルには碎波帯内の浮遊漂砂の移流の効果が必ずしも正確に取り込まれているとは言い難い。そこで本研究では浮遊漂砂量を浮遊砂濃度の鉛直分布と碎波帯内定常流の分布より正確に見積り（柴山ら, 1994）、海浜縦断面変化の予測モデルに取り込むことを目指した。

これまで漂砂量式については実験規模によるスケール効果の存在が指摘されてきた。小型の造波水路を用いた計測結果のみではなく、大型水路を用いた実規模実験の計測結果をも含めて説明できるモデルを提示することも本研究の目的である。

2. 予測モデルの構成

浮遊砂と掃流砂をそれぞれに評価し、それらの和で全漂砂量を算定する場合には二つの形態をそれぞれに定義する必要がある。本研究では全水深を底面波動境界層外縁を境として上層の漂砂を浮遊漂砂、下層の漂砂を掃流漂砂と定義することとした。図-1 に概念図を示す。図で掃流漂砂は砂層中で移動を開始する層から底面境界層外縁までを含むこととなる。境界層厚さの算定には柴山ら（1994）と同様の方法により、碎波帯内では砂澁が発達しないとの仮定の下に求めている。

予測モデル全体の算定流れ図を図-2 に示す。碎波帯内のエネルギー減衰を算定することによって波の場を計算し、浮遊砂濃度・定常流速・境界層厚さを順次算定する。さらにそれらを用いて掃流漂砂・浮遊漂砂を算定し、地形変化を求める。ここで変化した地形を用いて同様の計算を繰り返すことにより二次元地形変化を経過時間毎

に求めることができる。以下ではこの流れ図にそって算定方法について略述する。

(1) 浮遊砂濃度

まず浮遊砂濃度の推定法については Shibayama and Winyu (1993) にならって基準点濃度と渦動粘性係数をそれぞれ算定した。底面付近での基準濃度については、次元解析および実測データの比較から碎波帯内について底質粒径の 100 倍の高さの点を基準点として選んでいる。渦動粘性係数の算定に当たっては底面からの乱れと碎波による上方からの乱れの影響の両者を考えて定めてある。

(2) 定常流速度

次に碎波帯内定常流については Okayasu (1988, 1990) の方法を改良し、定常流速を陽形式で表して用いた。以上の浮遊砂濃度分布と定常流分布を掛け合わせ、鉛直方向に積分することにより、各断面における浮遊漂砂総量を求めることができる。

(3) 全漂砂量

全漂砂量 q_t は浮遊漂砂量と掃流漂砂量の和として以下の式で与える。

$$q_t = \int_{\delta_s}^{d_t} c(z)u(z)dz + K_b(\psi - \psi_c)\sqrt{\psi}w_s d \quad \cdots (1)$$

ここで δ_s : 境界層外縁高さ、 d_t : 波谷の高さ、 c : 濃度、 u : 流速、 K_b : 掃流漂砂式の係数、 ψ : シールズ数、 ψ_c : 限界シールズ数、 w_s : 沈降速度、 d : 底質粒径である。

この評価式で掃流漂砂量の算定には渡辺 (1981) のモ

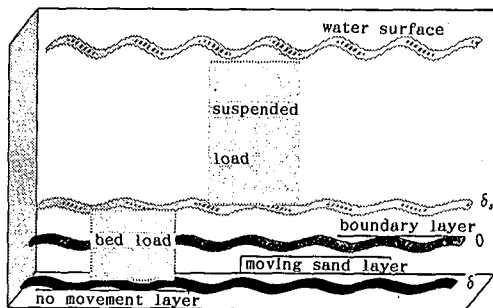


図-1 漂砂形態分類の概念図

* 正会員 工博 横浜国立大学助教授 工学部建設学科

** 工博 タイ国立タマサート大学講師 工学部土木工学科

*** 正会員 工博 横浜国立大学助手 工学部建設学科

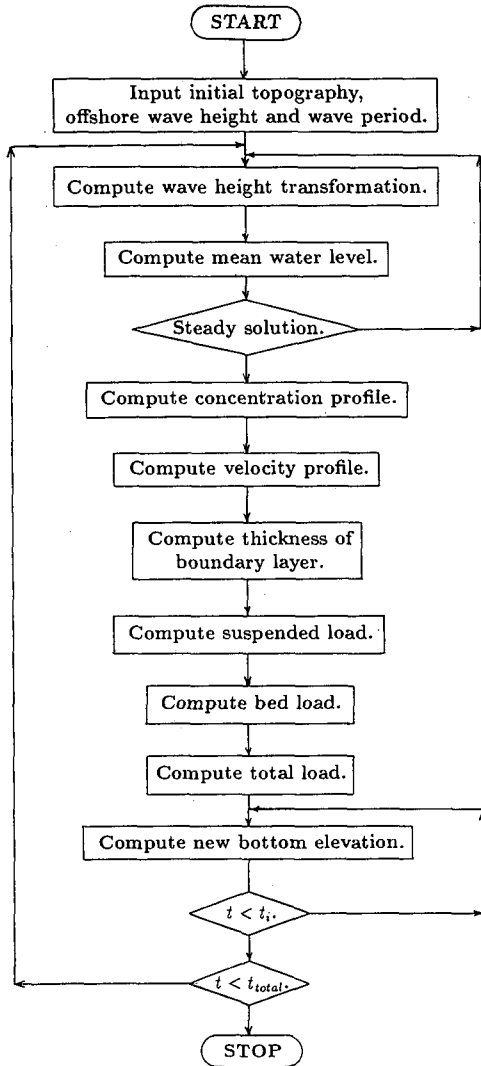


図-2 モデル全体の概念図

デルで係数 K_b を 2 とした式を用いている。渡辺モデルでは一般に係数として 7 を用いるが、これは掃流砂のメカニズムを基礎とした全漂砂量の予測モデルとなっているため、今回はこのうちの仮定の掃流砂の寄与分を与えるものとして、係数 2 を用いた。

図-3 に計算した浮遊漂砂量、掃流漂砂量、全漂砂量と地形変化から求めた全漂砂量の比較を示す（実験結果は鹿島ら, 1984）。図より碎波帯内において本漂砂量推定法が良い精度で実験結果を推定できることが解った。図より漂砂移動の方向が沖向きの浮遊漂砂と岸向きの掃流漂砂のバランスによって決定され、浮遊漂砂が大きい場合には全漂砂の移動方向は沖向き、掃流漂砂が大きい場合には全漂砂の移動方向は岸向きとなる傾向が読みとれる。

(4) 碎波帯内波高減衰モデル

二次元海浜変形の数値モデルを作成する際には岸沖方向の波高変化を計算する必要があるが、本研究では Dally et al. (1985) のモデルを変形することにより、碎波帯内乱流場での波高減衰を見積もっている。碎波減衰率 D_b はエネルギー密度 E 、群速度 c_g を用いて以下のようにならされる。

$$\frac{\partial E c_g}{\partial x} = -D_b \dots \dots \dots (2)$$

$$D_b = \frac{0.15 c_g \rho g}{8h} [H^2 - (\Gamma h)^2] \dots \dots \dots (3)$$

ここで係数 Γ は以下で与えられる。

$$\Gamma = \exp \left[-0.36 - 1.25 \frac{h}{\sqrt{LH}} \right] \dots \dots \dots (4)$$

h , L , H はそれぞれ局所的な水深、波長、波高である。このモデルでは碎波後の波の再生域において波高減衰が停止する領域があることを再現することができる。また、碎波位置の検出は Goda (1970) の碎波指標に基づき、Isobe (1987) が流速波速比を用いた表示に改めたものを用いている。

図-4 に碎波帯内の波高減衰について鹿島ら (1983) の実測と比較したものを示す。図より波高が大きく変動している場合 (Case 2.1) を除けば、本モデルが現地規模の実験において良い予測を与えることが解る。

(5) 地形変化の算定

地形変化の算定には以下の式を用いた。

$$q_t = \int_{\delta_s}^{\delta_t} c(z) u(z) dz + q_{bs} - C_1 |q_{bs}| \frac{\partial z_b}{\partial x} \dots \dots \dots (5)$$

すなわち掃流漂砂に対してのみ底面の勾配の影響を取り入れている。ここで C_1 の値は粒径によって変化させ、粒径 0.27 mm に対しては 10.0、0.47 mm に対しては 5.0 を与え、これらの中間の値に対しては線形補間を行って係数を与えている。岸側の境界に対しては波のはいがり高さを以下の式で与えている。

$$Z_R = 1.47 H_0 \xi_0^{0.79} \dots \dots \dots (6)$$

ここで Z_R ははいがり高さ、 ξ_0 は surf similarity parameter である。swash zone における地形については Larson and Kraus (1989) にならって、砂面勾配が安息角 (28 度) を越えると剰余角度 (18 度) 以下となるように再配置されるとして地形を求めている。

全体の地形変化モデルとしてはまず与えられた地形に対して波浪変形モデルを用いて波高分布を算定し、平均水位変動等も算定する。次に本モデルにより浮遊砂濃度分布、定常流分布、境界層厚さ、層流砂移動量分布などの諸量を算定し、総漂砂量分布を算定する。さらに底質の連続式より海浜の縦断面変化を算定することができる。本モデルではさらに算定結果の新たな地形を入力条

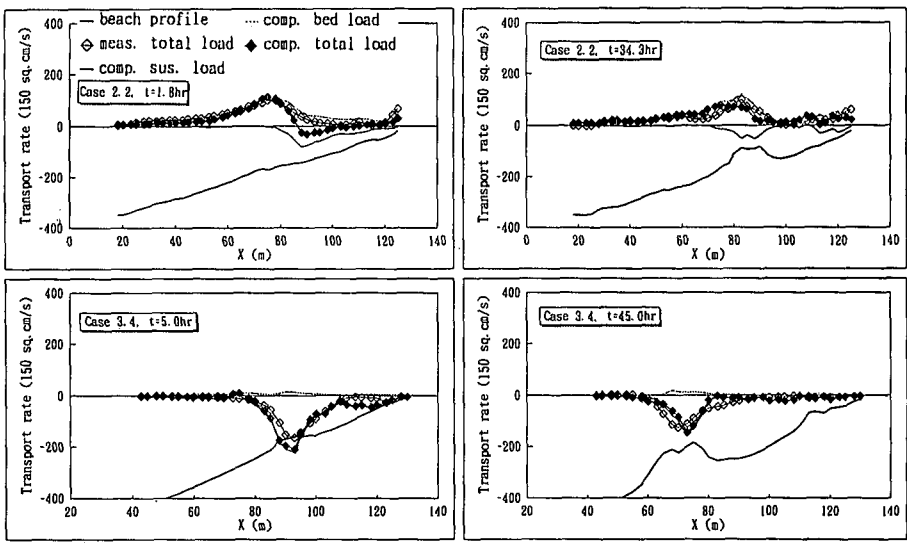


図-3 漂砂量の算定値と実測値の比較 (地形変化データは鹿島ら, 1983)

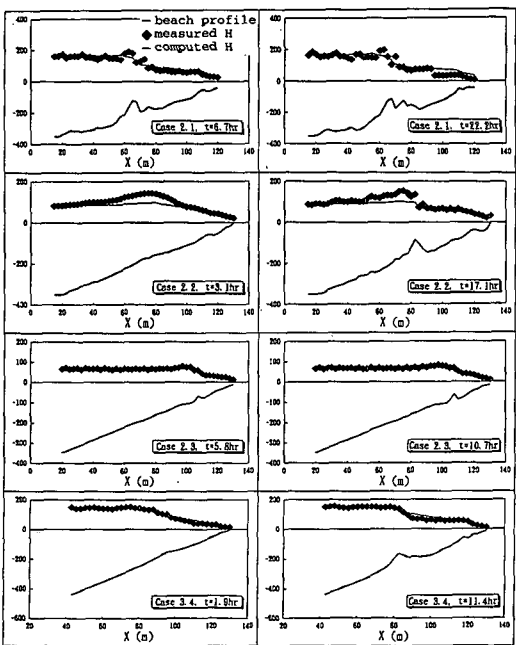


図-4 碎波帯内波高変化の算定値と実測値の比較 (実測データは鹿島ら, 1983)

表-1 鹿島ら (1983) の現地規模実験の条件
 d_{50} : 中央粒径, m_b : 勾配, H_i : 入射波高 (一様水深部),
 h_i : 一様水深部水深

Case	d_{50} (cm)	m_b	T (s)	H_i (cm)	h_i (cm)	Initial beach profile
1.1	0.047	5/100	6.0	44.0	450.0	uniform slope beach
1.2	0.047	5/100	6.0	92.0	450.0	irregular beach
1.3	0.047	5/100	9.0	105.0	450.0	uniform slope beach
1.4	0.047	5/100	3.0	53.0	450.0	irregular beach
1.5	0.047	5/100	4.5	23.0	450.0	irregular beach
1.6	0.047	5/100	6.0	51.0	450.0	irregular beach
1.7	0.047	5/100	4.5	30.0	450.0	irregular beach
1.8	0.047	5/100	3.0	81.0	450.0	uniform slope beach
2.1	0.047	3/100	6.0	180.0	350.0	uniform slope beach
2.2	0.047	3/100	9.0	86.0	350.0	uniform slope beach
2.3	0.047	3/100	3.1	66.0	350.0	uniform slope beach
3.1	0.027	5/100	9.1	107.0	450.0	uniform slope beach
3.2	0.027	5/100	6.0	105.0	450.0	uniform slope beach
3.3	0.027	5/100	12.0	81.0	450.0	uniform slope beach
3.4	0.027	5/100	3.1	154.0	450.0	uniform slope beach
4.1	0.027	3/100	3.5	31.0	350.0	uniform slope beach
4.2	0.027	3/100	4.5	97.0	400.0	uniform slope beach
4.3	0.027	3/100	3.1	151.0	400.0	uniform slope beach
4.4	0.047	3/100	9.0	100.0	400.0	irregular beach
5.1	0.027	2/100	5.8	29.0	350.0	uniform slope beach
5.2	0.027	2/100	3.1	74.0	350.0	uniform slope beach
6.1	0.027	10/100	5.0	166.0	400.0	uniform slope beach
6.2	0.027	10/100	7.5	112.0	450.0	uniform slope beach
6.3	0.047	10/100	9.0	78.0	450.0	irregular beach

件として与えることにより同様の計算を進め、海浜縦断面の時間変化を追跡することができる。

3. 予測モデルの実験データとの比較

以上により構成した二次元海浜変形モデルを鹿島ら (1983) の現地規模実験の地形変化計測結果, Kraus and Larson (1988) によって収集された現地規模実験データ

集の地形変化, Shibayama and Horikawa (1985) の小規模実験の結果と比較した。表-1に鹿島らの実験条件を、表-2に Larson and Kraus の条件を、表-3に Shibayama and Horikawa の条件を示す。これらの実験条件は波高、周期、水深、深さの条件にわたって非常に広範な範囲を含んでいる。

表-2 Kraus and Larson (1988) によって収集された現地規模実験データ集の条件 (*: 潮位変化シミュレーションのため潮位が3.5m から4.4m の間で変化する)

Case	d_{50} (cm)	m_b	T (s)	H_i (cm)	h_i (cm)	Initial beach profile
100	0.022	1/15	11.33	128.0	457.0	uniform slope beach
200	0.022	1/15	11.33	55.0	457.0	uniform slope beach
300	0.022	1/15	11.33	168.0	427.0	uniform slope beach
400	0.022	1/15	5.60	162.0	442.0	uniform slope beach
500	0.022	1/15	3.75	152.0	457.0	uniform slope beach
510	0.022	1/15	3.75	152.0	457.0	irregular beach
600	0.022	1/15	16.00	61.0	457.0	uniform slope beach
610	0.022	1/15	3.75	152.0	457.0	irregular beach
700	0.022	1/15	16.00	162.0	411.0	uniform slope beach
101	0.040	1/15	11.33	128.0	457.0	uniform slope beach
201	0.040	1/15	11.33	55.0	457.0	uniform slope beach
301	0.040	1/15	11.33	168.0	427.0	uniform slope beach
401	0.040	1/15	5.60	162.0	442.0	uniform slope beach
501	0.040	1/15	3.75	152.0	457.0	uniform slope beach
601	0.040	1/15	16.00	61.0	457.0	uniform slope beach
701	0.040	1/15	16.00	162.0	381.0	uniform slope beach
801	0.040	1/15	3.75	76.0	457.0	uniform slope beach
901	0.040	1/15	7.87	134.0	396.0	uniform slope beach
911	0.040	1/15	7.87	134.0	396.0*	uniform slope beach

合計 45 ケースについて算定結果と計測結果の比較を行った。図-5 は鹿島らとの比較を、図-6 は Larson and Kraus との比較を、図-7 は Shibayama and Horikawa との比較を示している。いずれの場合にも地形変化の比較においては良好な一致を得ている。ただし計算結果は計測結果より平滑化されており、細かな地形変化の構造は再現されていない。推定の精度は大型実験の場合の方が小型実験の場合よりも良いようである。沿岸砂州の形成場所は碎波位置の推定に依存しており、砂州の形成位置がずれている場合は碎波位置推定の精度が悪い場合である。

本モデルではいずれの予測においても共通の係数を用

表-3 Shibayama and Horikawa (1985) の実験条件

Case	d_{50} (cm)	m_b	T (s)	H_i (cm)	h_i (cm)	Initial beach profile
1	0.02	1/10	1.5	9.7	45.0	uniform slope beach
2	0.02	1/20	1.2	5.7	45.0	uniform slope beach
3	0.07	1/10	1.5	8.5	45.0	uniform slope beach

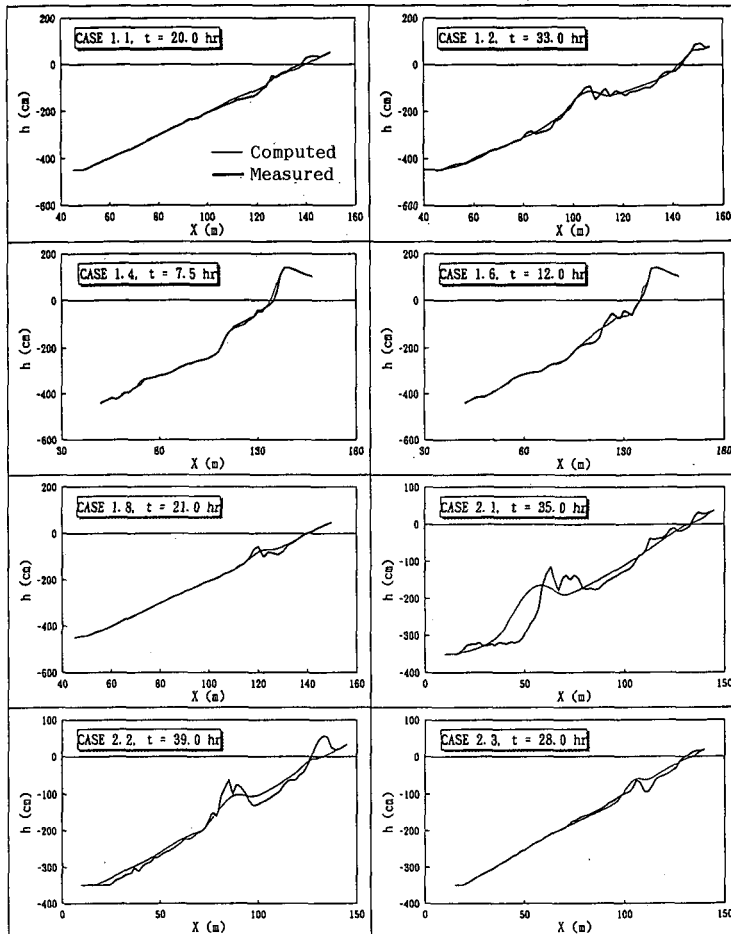


図-5 鹿島ら (1983) の現地規模実験結果との比較

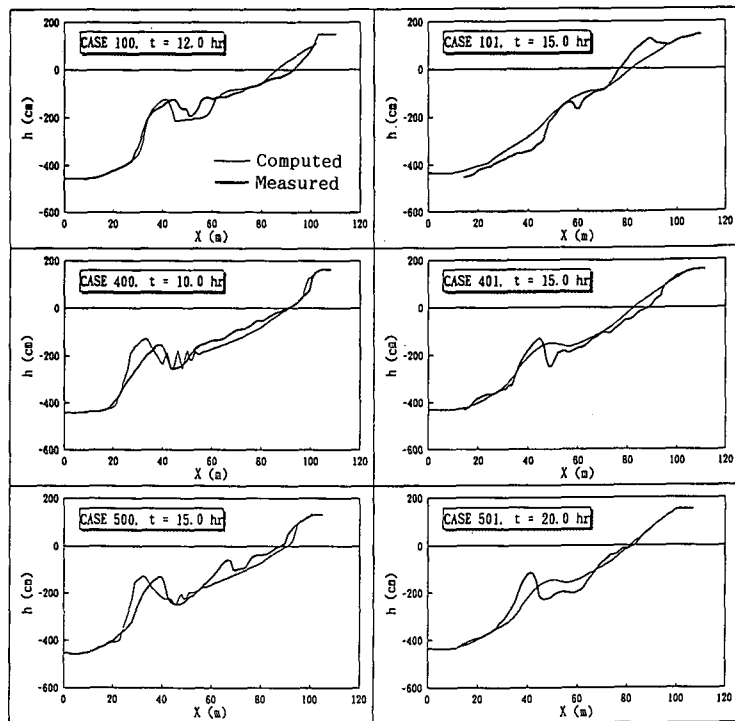


図-6 Kraus and Larson (1988) によって収集された現地規模実験データとの比較

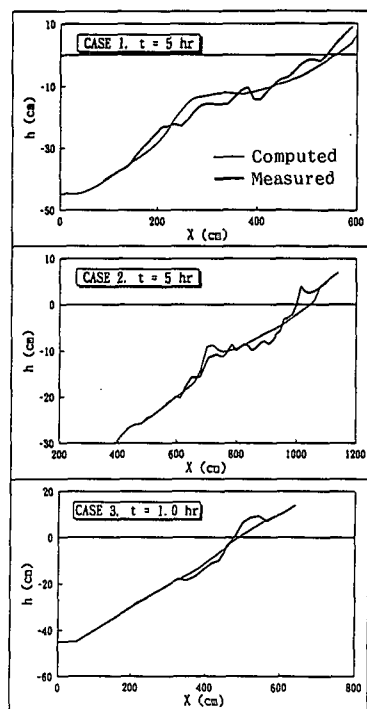


図-7 Shibayama and Horikawa (1985) の実験結果との比較

いてモデルの算定を行っており、物理過程を数値モデルに正確に取り組むことにより、いわゆる漂砂モデルにおけるスケール効果により実験定数が実験の規模によって異なってしまう現象は生じていない。

4. 結 論

碎波帯内浮遊砂輸送量を精密に見積り、海浜縦断面の変化予測数値モデルに取り込んだ。このモデルは現地規模実験、小型造波水路実験のデータを含めて過去の二次元海浜変形データを精度良く再現することができる。

本研究は五洋建設(株)の研究費助成により行われたことを付記する。

参 考 文 献

- 鹿島遼一, 斉藤昭三, 清水隆夫, 丸山康樹, 長谷川寛, 榊山勉(1983): 大型造波水路による岸沖漂砂の実験, 電力中央研究所土木研究所環境部データ集。
- 柴山知也, W. Rattanapitikon (1993): 碎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。
- 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。
- Dally, W. R., Dean, R. G. and Dalrymple, R. A. (1985): Wave height variation across beaches of arbitrary profile, JGR, Vol. 90, No. C6, pp. 11917-11927。
- Goda, Y. (1970): A synthesis of breaking indices, Trans. of JSCE, Vol. 2, Part 2, pp. 227-230。
- Isobe, M. (1987): Parabolic equation model for transformation of irregular waves due to refraction, diffraction and breaking, Coastal Engineering in Japan, Vol. 30, No. 1, pp. 33-47。
- Kraus, N. C. and Larson, M. (1988): Beach profile change measured in the tank of large waves, Tech. Rep., CERC-88-6, US Army Eng., Waterways Exp., Station。
- Larson, M. and Kraus, N. C. (1989): Numerical model for simulating storm-induced beach change, Tech. Rep., CERC 89-9, US Army Eng., Waterway Exp. Station。
- Nielsen, P. (1992): Coastal bottom boundary layers and sediment transport, Adv. Series on Ocean Eng., Vol. 4, World Scientific, USA。
- Okayasu, A., T. Shibayama and K. Horikawa (1988): Vertical variation of undertow in the surf zone, Proc. 21st Coastal Eng. Conf., ASCE, pp. 478-491。
- Shibayama, T., A. Higuchi and K. Horikawa (1986): Sediment transport due to breaking waves, Proc. 20th Coastal Eng. Conf., ASCE, pp. 1509-1522。
- Shibayama, T. and K. Horikawa (1985): Numerical model for two-dimensional beach transformation, Proc. of JSCE, No. 357/II-3, pp. 167-176。
- Shibayama, T. and W. Rattanapitikon (1993): Vertical distribution of suspended sediment concentration in and out surf zone, Coastal Eng. in Japan, JSCE, Vol. 36, No. 1, pp. 49-65。