

遡上・反射波分布の予測モデル

久保田 進*・水口 優**・竹澤三雄***

1. はじめに

最近、景観性やレクリエーション性を持たせる侵食対策施設や工法が望まれ、養浜工や緩傾斜堤はその利点があるとして施工され始めている。このような施設や工法を計画する場合、遡上波や反射波の波高・周期分布を予め知っておくことは極めて有用である。遡上波の波高分布（または遡上高分布）や周期分布あるいはそれらの結合分布を求めるモデルはこれまでにいくつか提案されているが、これらのモデルでは個々の入射波と遡上波は規則波とし、入射波と遡上波の波の数は変化しないとして扱われている。波群を考慮した岩田ら（1981）のモデルにしても入射波から遡上波に至る間で波の数が減少することを考慮しているわけではない。

著者らがこれまでに実施してきた種々の海岸での遡上波に関する現地観測（久保田ら、1988；Takezawa ら、1990；Kubota ら、1990；Nagasawa ら、1990）の結果では、入射波に対して遡上波の波の数は 10～60% の減少を示した。この主な原因は遡上斜面において前後の波が吸収や追いつきによって合併するためである。また、前浜勾配が急でうねり性の入射波条件のときには有意な反射波が観測された。そこで本論文では、遡上域での波の吸収と追いつきによる波の数の減少を考慮するとともに、現地データから遡上波高と反射波高の算定式を求め、これらを組み合わせた遡上・反射波分布の予測モデルを作成して現地データによる検証を行った。

2. 遡上波の現地観測の概要

観測地点は、前浜勾配が比較的急な（約 1/10）茨城県の大洗海岸（茨城県大洗町成田地区海岸）と前浜勾配が比較的緩い（約 1/20）波崎海岸（茨城県波崎町須田浜）の、2つの砂質自然海岸および法面勾配約 1/3 のブロック張り傾斜堤の存在する千葉県北九十九里海岸（千葉県旭市椎名内地区海岸）である。各観測ケースの海浜断面と計測機器の配置は図一1に示す通りである。以下では

表一 各観測時の地形と波浪の条件

CASE	beach slope		breaking wave height H_0 (m)	wave period T (s)	wave condition
	foreshore	surf zone			
OA87	1/8	1/36	1.0	11.1	swell
OA88	1/11	1/40	1.3	7.8	wind wave
HA87	1/16	1/80	1.0	11.3	swell
KU89	1/3	1/35	1.4	8.6	swell

これらの海岸での観測のケースを、図中に示すように OA87, OA88, HA87, KU89 と略記する。また観測時の波浪条件と地形条件は表一の通りである。

3. 遡上波分布のモデル化

このモデルは波の吸収と追いつきのモデルと遡上波高と反射波高の算定式とから構成されている。

（1）波の吸収と追いつき（周期の変化）のモデル

現地遡上域においては、図一2に示すように後続の波が前の波に吸収されたり、先発の波が後の波に追いつかれたりすることによって波の数が減少する。

モデルの前提条件として、遡上域において後の波が前の波に吸収される現象が生じるのは前の波の波高 H_1 が後の波の波高 H_2 よりも大きい場合とし、後の波が前の波に追いつく現象が生じるのは前の波の波高 H_1 よりも後の波の波高 H_2 のほうが大きい場合とする。

遡上開始点を原点として遡上斜面に沿って X 軸をとると、波の吸収と追いつきの遡上波先端の軌跡は図一3に示す通りとなる。

遡上波先端位置 x は、放物運動を仮定すると次のように表せる。

$$x = -\frac{1}{2} g \sin \beta \cdot t^2 + at + b \quad \cdots \cdots (1)$$

ここに g は重力加速度、 β は斜面が水平面となす角度、 t は時間であり、 a, b は係数である。

遡上開始点での波高 H_m と波先端移動速度 U_0 との間には次式のような関係が得られている。

$$U_0 = \alpha \sqrt{g H_m} \quad \cdots \cdots (2)$$

ここに α は係数であり遡上波先端の放物運動を仮定すると理論的に 2.5 となり、小川ら（1982）の実験等から

* 正会員 工博 日本大学専任講師 理工学部土木工学科

** 正会員 工博 中央大学教授 理工学部土木工学科

*** 正会員 工博 日本大学教授 理工学部土木工学科

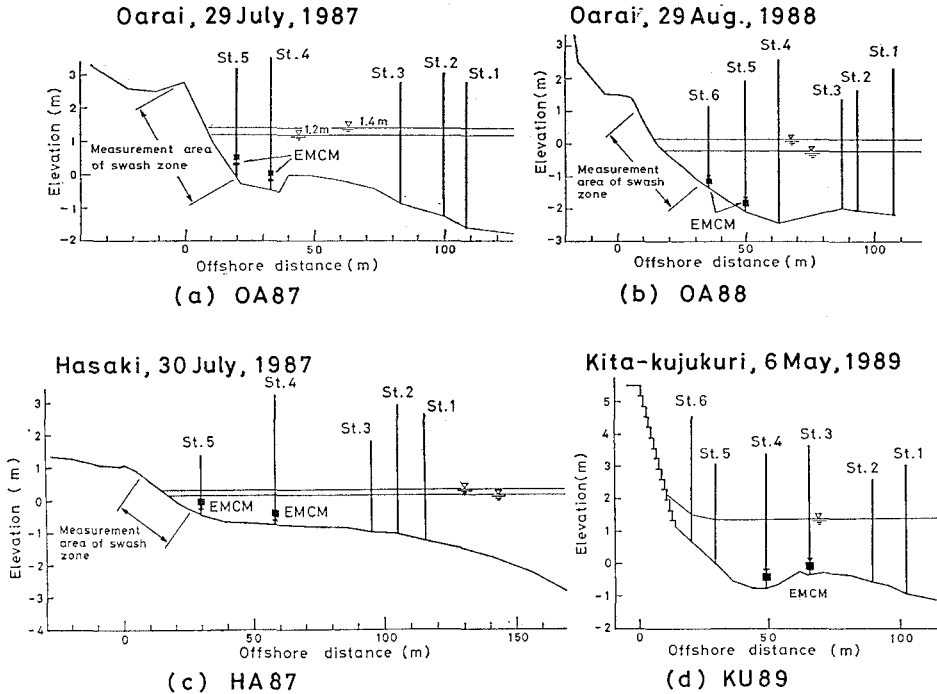


図-1 各観測地点の海岸断面と計測機器の配置

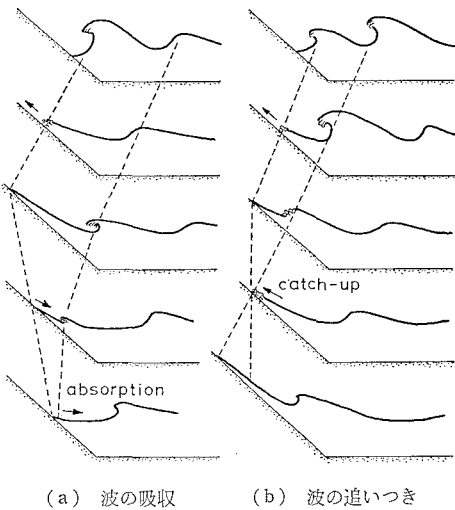


図-2 波の吸収と追いつきの模式図

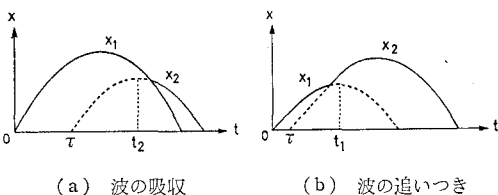


図-3 波の吸収と追いつきの定義図

は2.2の値が得られているが、本モデルでは後述のように実測データに基づく検討の結果3.5とした。また、 H_m については、遡上域のすぐ沖側での波高観測点を遡上開始点として $H_m = h + H_0$ (h は平均水深、 H_0 は波の峰高) とした。

係数値 α についてはモデルの予備計算において値を変化させて実測遡上波の平均周期と比較した。実測値に合う α の値は OA87 が $\alpha = 3.2$ 、HA87 が $\alpha = 4.0 \sim 4.3$ 、OA88 が $\alpha = 3.7 \sim 4.1$ であり、KU89 ではさらに大きい。KU89 は傾斜堤のある場合であって、法面が階段状であることと、透過率が大きいこと等から遡上波先端の運動が放物型となっていないことによるものと考えられる。KU89 を除くと実測の平均波高との比較では $\alpha = 3 \sim 4$ でほぼ一致している。この値は理論値や実験値よりも若干大きい。この原因としては、1) 遡上開始点よりも沖側に入射波の測定点があり、遡上開始点ではさらに波高が大きくなっていたと予想されること、および2) 波の数の減少は長周期波の影響による部分もあるが、これも含めて全ての波の数の減少分を係数 α で表現したことなどが考えられる。

さて、前の波が $t=0$ で初速 U_{01} で遡上始めるとすると、

$$U_{01} = \alpha \sqrt{g H_{m1}} \dots \dots \dots (3)$$

$a = \alpha \sqrt{g H_{m1}}$ 、 $b = 0$ より前の波の先端軌跡 x_1 は

$$x_1 = -\frac{1}{2} g \sin \beta \cdot t^2 + \alpha \sqrt{g H_{m1}} t \dots \dots \dots (4)$$

ピークとなる時間 t_1 は

$$t_1 = (\alpha / \sin \beta) \sqrt{H_{m1} / g} \quad \dots\dots\dots (5)$$

となる。

また、時間 τ の遅れで後発の波が遡上し始めるとすると、 $t = \tau$ で $x = 0$ より、前の波と同様に式 (1) の係数 a , b を求めると、後発の波先端軌跡 x_2 は

$$x_2 = -\frac{1}{2} g \sin \beta \cdot t^2 + (g \sin \beta \cdot \tau + \alpha \sqrt{g H_{m2}}) t - \frac{1}{2} g \sin \beta \cdot \tau^2 - \alpha \sqrt{g H_{m2}} \tau \quad \dots\dots\dots (6)$$

後の波がピークとなる時間 t_2 は

$$t_2 = \tau + (\alpha / \sin \beta) \sqrt{H_{m2} / g} \quad \dots\dots\dots (7)$$

x_1 と x_2 の交点の t を求めると

$$t = \left(\frac{1}{2} g \sin \beta \cdot \tau_2 + \alpha \sqrt{g H_{m2}} \tau \right) / (g \sin \beta \cdot \tau + \alpha (\sqrt{g H_{m2}} - \sqrt{g H_{m1}})) \quad \dots\dots\dots (8)$$

以上より、前の波が後の波を吸収する条件は

$$t_2 \leq t \quad \dots\dots\dots (9)$$

後の波が前の波に追いつく条件は

$$t_1 \geq t \quad \dots\dots\dots (10)$$

式 (9) と (10) を τ について書き直すと、吸収の条件は

$$\tau \leq [\alpha / (\sqrt{g} \sin \beta)] (\sqrt{H_{m1}} - \sqrt{H_{m2}} + \sqrt{H_{m1}} - H_{m1}) \quad \dots\dots\dots (11)$$

追いつきの条件は

$$\tau \geq [\alpha / (\sqrt{g} \sin \beta)] (\sqrt{H_{m2}} - \sqrt{H_{m1}} + \sqrt{H_{m2}} - H_{m1}) \quad \dots\dots\dots (12)$$

となる。

なお、 τ は波の峰と峰の間の時間を採れば良いが、本モデルにおいては入射波をゼロダウncross法で定義しているため、後の波の周期としている。

遡上域からの波の反射については、遡上域すぐ沖側の

測点において観測された水位変動と岸沖流速変動のデータを使って、疑似非線形長波理論に基づく入・反射波の分離方法 (久保田ら, 1989) により入射波と反射波の分離を行い検討した。その結果、遡上波と分離後の反射波の波の数はほぼ等しく、周期の分布形状も大略同様であったことから、このモデルにおける反射波の周期は遡上波の周期と同じとした。

(2) 遡上波高と反射波高の算定式

遡上波高の算定式について述べる。まず入射波を遡上波に対応するように定義し直す。1 波の遡上波に複数の入射波が対応する場合、これらの入射波の周期 T_I の合計値を周期 T'_I とし、これらの入射波の期間の最高水位から最低水位までの距離 H'_I を波高とする波を新たな入射波とする。こうして得られた T'_I とこれに対応する遡上波の周期 T_s の関係は 4 ケースともにほぼ満足すべき結果となった。

つぎに、 H_s と H'_I の関係を遡上波パラメータ ϵ_s と碎波帯相似パラメータ ξ (Battjes, 1974) によって整理する。 ϵ_s は Guza ら (1984) によれば次式で示される。

$$\epsilon_s = a_0^2 \sigma^2 / (g \tan^2 \beta) \quad \dots\dots\dots (13)$$

ここで、 a_0 は遡上波の半振幅 ($= H_s/2$) である。前浜勾配 $\tan \beta_f$ を $\tan \beta$ として、再定義した T'_I を用いて $\sigma^2 = 2\pi g/L'_0$ ($L'_0 = gT'^2_I/2\pi$) とすると、式 (13) は

$$\epsilon_s = \pi H_s/L'_0 / \tan^2 \beta_f \quad \dots\dots\dots (14)$$

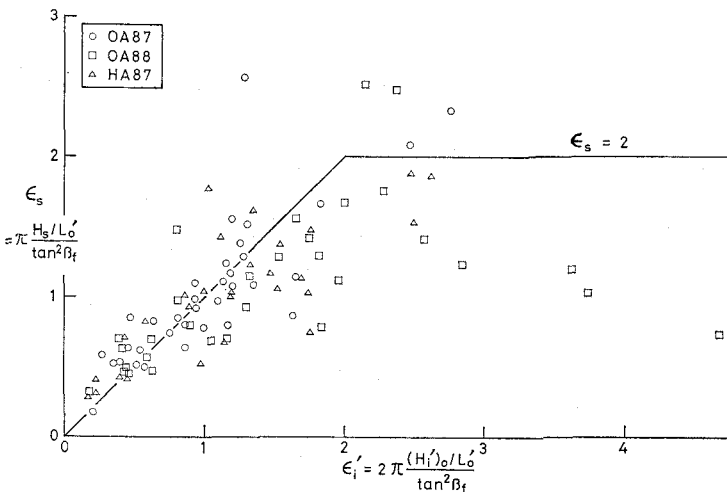
となる。

一方、入射波の代表量としては、碎波帯相似パラメータ ξ の自乗の逆数に比例するパラメータ ϵ'_i を用いた。

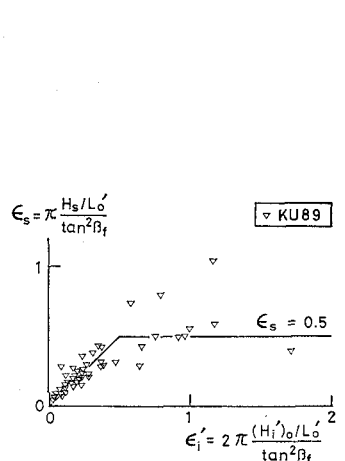
$$\epsilon'_i = 2\pi (H'_I)_0/L'_0 / \tan^2 \beta_f \quad \dots\dots\dots (15)$$

ここで、 $(H'_I)_0$ は H'_I を微小振幅波理論により沖波換算したものである。

以上の ϵ_s と ϵ'_i により遡上波と再定義された入射波



図—4 ϵ_s と ϵ'_i の関係 (自然海岸)



図—5 ϵ_s と ϵ'_i の関係 (傾斜堤のある海岸)

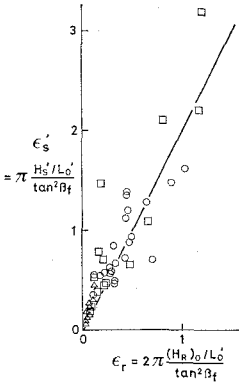


図-6 ϵ_r と ϵ'_s の関係 (自然海岸)

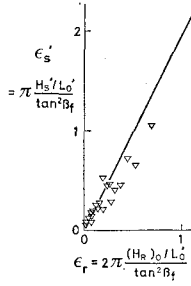


図-7 ϵ_r と ϵ'_s の関係 (傾斜堤のある海岸)

とを整理すると、図-4, 5 の通りとなる。図より ϵ'_i の小さいところでは $\epsilon_s = \epsilon'_i$ がほぼ成立している。 ϵ'_i が大きくなると ϵ_s の値にはばらつきが見られる。 ϵ_s の上限値については、理論的に1になる説と2になる説とがあり、また既往の規則波を用いた水理実験によれば1.25~3.0の値が得られている。これらのことを勘案して自然海岸のケースについては ϵ_s の上限値を2とした。また傾斜堤のあるケースについては人工粗度の影響を考慮して ϵ_s の上限値を0.5とし、次式を得た。

$$\epsilon_s = \begin{cases} \epsilon'_i, & \epsilon'_i \leq 2 \\ 2, & \epsilon'_i > 2 \end{cases} \quad (\text{自然海岸}) \quad \dots\dots\dots (16)$$

$$\epsilon_s = \begin{cases} \epsilon'_i, & \epsilon'_i \leq 0.5 \\ 0.5, & \epsilon'_i > 0.5 \end{cases} \quad (\text{傾斜堤}) \quad \dots\dots\dots (17)$$

反射波についても入射波から遡上波と同様に ϵ'_s と ϵ_r を次のように定義する。

$$\epsilon'_s = \pi H_s^2 / L_0^2 \tan^2 \beta_f \quad \dots\dots\dots (18)$$

$$\epsilon_r = 2\pi (H_R)_0 / L_0^2 \tan^2 \beta_f \quad \dots\dots\dots (19)$$

再定義された遡上波と反射波をこれらのパラメータで整理すると、図-6, 7の通りとなり、ほぼ次式の関係が成立している。

$$\epsilon_r = (1/2)\epsilon'_s \quad \dots\dots\dots (20)$$

4. モデルの検証

検証計算結果の例を図-8~10に示す。遡上波分布の形状は、全ケースを通して実測と良く似ている。反射波分

布については、実測の分布(分離後の反射波分布)の方が周期の短い範囲に波の頻度が高くなっており、また全ての周期帯で波高値が高くなっている。これは、入・反射波の分離の際に入射波の峰が過小評価となり反射波に入射波のものが含まれることによって架空の波が生じているためである。

次に、遡上波の波高と周期の各代表値について実測と予測の結果を比べると、図-11, 12の通りとなる。波高の代表値については非常に良い一致が見られる。周期については平均周期や有義波周期の一致は良いものの、HA87やKU89の1/10最大波周期において過小評価となっている。高波高側の周期が重要となる予測を行う場合には注意が必要となる。

5. 結 論

本研究で得られた結論は次の通りである。

- ① 本モデルにより、遡上域での波の数の減少を精度よ

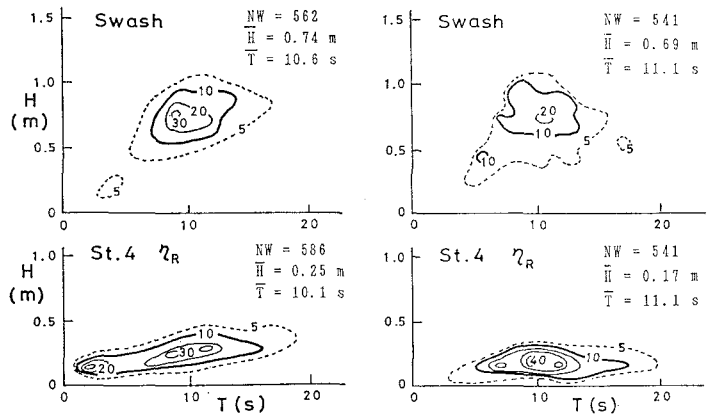


図-8 遡上・反射波分布モデルの検証結果 (OA87)

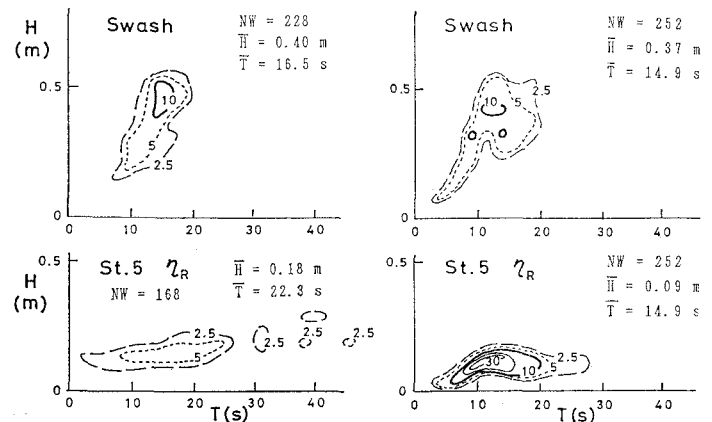


図-9 遡上・反射波分布モデルの検証結果 (HA87)

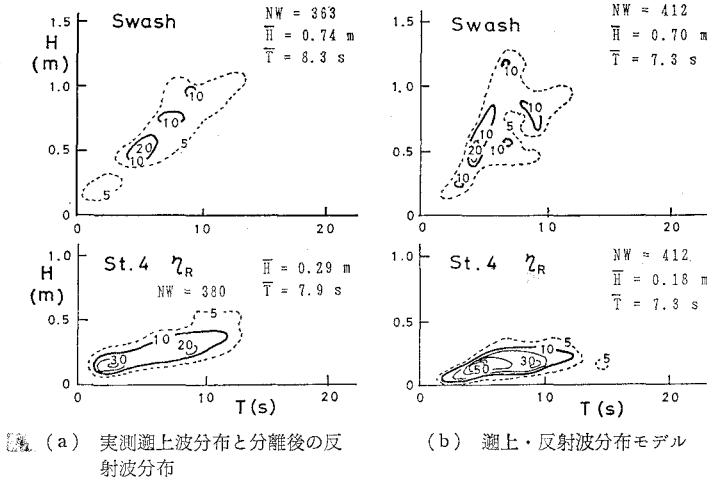


図-10 遡上・反射波分布モデルの検証結果 (KU89)

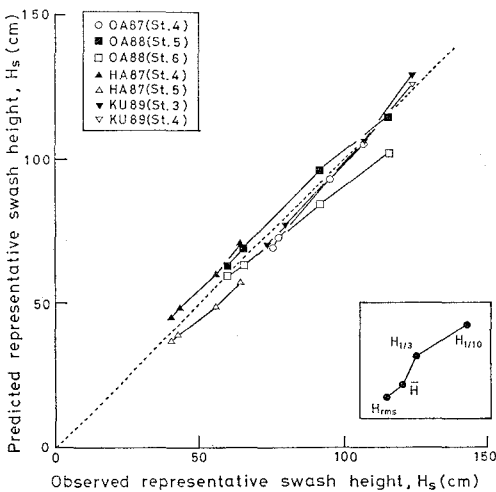


図-11 遡上波高の代表値の予測結果

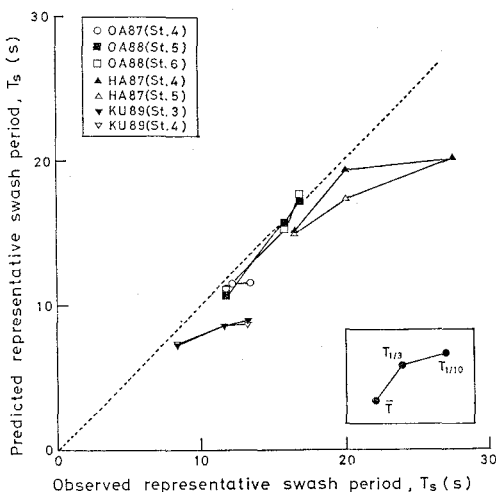


図-12 遡上波周期の代表値の予測結果

く予測できた。

② 予測された遡上波と反射波は、波高、周期の範囲と分布形状において観測結果と良い一致を示した。

③ 予測された遡上波高、周期の各代表値は実測値と極めて良い一致を示した。周期の代表値については平均周期や有義波周期の一致は良いものの、さらに高波高側の周期はやや過小評価となる。

謝 辞

波崎の砕波帯総合観測用栈橋の利用にあたっては運輸省港湾技術研究所の加藤一正漂砂研究室長以下職員各位にお世話になった。日本大学堀田新太郎博士には観測時の16 mm カメラの撮影をして頂いた。また観測とデータ整理・読み取りにあたっては、中央大学日と本大学の学生に多大な協力を得た。

参 考 文 献

- 岩田好一朗・榎木 亨・信田 亘 (1981): 緩斜面における不規則波の遡上高さと遡上周期, 第28回海岸工学講演会論文集, pp. 330-334.
- 小川由信・首藤伸夫 (1982): 波打帯の水理特性について, 第29回海岸工学講演会論文集, pp. 135-139.
- 久保田 進・水口 優・堀田新太郎・竹澤三雄 (1988): 急勾配前浜海岸における遡上波の現地観測, 第35回海岸工学講演会論文集, pp. 118-122.
- 久保田 進・水口 優・堀田新太郎・竹澤三雄 (1989): 現地遡上域における反射波の特性, 第36回海岸工学論文集, pp. 120-124.
- Battjes, J. A. (1974): Surf Similarity, Proc. 14th ICCE, Vol. 1, ASCE, pp. 466-480.
- Guza, R. T., E. B. Thornton, and R. A. Holman (1984): Swash on steep and shallow beaches, Proc. 19th ICCE, Vol. 1, ASCE, pp. 708-723.
- Kubota, S., M. Mizuguchi, and M. Takezawa (1990): A field study of swash oscillation on a gentle beach face, Proc. 4th Pacific Congress on Marine Science and Technology, Vol. I, pp. 282-289.
- Nagasawa, D., S. Kubota, S. Hotta, and M. Takezawa (1990): Waves in front of permeable sloping sea walls, Proc. 4th Pacific Congress on Marine Science and Technology, Vol. I, pp. 298-304.
- Takezawa, M., S. Kubota, and N. Nakamura (1990): A field study of swash oscillation on a steep beach face, Proc. 4th Pacific Congress on Marine Science and Technology, Vol. I, pp. 290-297.