

ステップおよびスロープ型リーフ上での碎波変形と最大波

筒井茂明*・大城真一**・鈴山勝之***

1. 緒 言

亜熱帯および熱帯地方に発達しているサンゴ礁は、自然の造形物として水産資源の保護あるいは高波からの海岸線の防御に役立っている。近年、沿岸での波浪制御の1手法としてリーフの波浪制御機能の利用が考えられている。しかし、リーフ海岸においても海岸浸食に悩まされている場合もあり (Syamsudin, 1993), その原因の解明とともにリーフの利点・欠点を調べ、リーフの波浪応答を明確にする必要がある。

本研究では、まず、リーフ海岸において留意すべき水理量としての平均水位上昇について述べる。水位上昇については Goda (1975) や日野ら (1989) による研究等がある。また、リーフ上での不規則波の波高分布が推算されれば、水位上昇量はラディエーション・ストレスとの関係式より求められる (津嘉山・仲座, 1987; 磯部ら, 1988)。しかし、ここでは水理実験結果に基づき、ステップおよびスロープ型リーフ上での水位上昇の岸沖方向分布を考慮した簡便な評価式を提案する。

次に、リーフ上での碎波変形時の波高推算に対して、緩勾配方程式および KdV 方程式が適用可能となるように各種の係数を水理実験結果および現地観測資料に基づき定める。また、リーフ上で観測され、漂砂にとって最も影響を及ぼすと考えられる碎波後の再生波の最大波について、不規則波浪を用いた実験結果に基づき述べる。

2. 水理実験

本研究で対象するリーフ海岸の地形は、図-1に示すように、その先端部がステップおよびスロープ状となっているリーフである。実験には2次元不規則波浪水槽(長さ27 m, 幅0.7 m, 高さ1 m)を用いた。鋼製のリーフモデルの水平部の長さは7 mで、背後に消波用のスロープが設置されている。スロープ型リーフの勾配は1/10, 1/20である。実験時の水深は沖側水深 h_1 とリーフ上の水深 h_2 との水深比 $\varepsilon = h_2/h_1$ が0.15, 0.2, 0.3の3ケース

である。入射波浪条件はステップ先端部での碎波率の大小に応じて、有義波に相当する個々波が碎波する場合、一部が碎波する場合、および非碎波の場合を対象とする。水位観測点は、入射波浪用に沖側に2点、リーフ上に0.5-1 m間隔で8-9点設けた。なお、造波水槽の長さの制約により水位計測の時間が短いため、波数が300-500程度になるように繰り返し造波し、実験を行った。

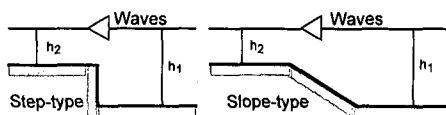


図-1 ステップおよびスロープ型リーフモデル

3. リーフ上での平均水位上昇

3.1 水位上昇の分布特性

リーフ上での各測点で得られた水位データより平均水位上昇の極大値を求め、それらの繰り返し実験による平均値を水位上昇量 Δh と定義する。

図-2はステップおよびスロープ型リーフ上での各種の水深比と波浪条件による水位上昇分布を例示するものである。ただし、 (H_0, L_0) は有義波に対する深海波高と波長、 x はリーフ先端からの距離である。同図から判るように、同じ水深比では水位上昇に対して浅水度 h_2/L_0 の影響が顕著で、長周期波による水位上昇量が大きい(例えば、図-2(1)の□)。一方、リーフ上の水深が深く浅水度 h_2/L_0 が大きい場合には、リーフ奥部に向かって漸増する水位上昇分布形となっている。

このようにリーフ上での水位上昇に対して、海底地形条件と各種の波浪条件が強く影響を及ぼしている。図-2中の曲線群はこれらを踏まえて得られた水位上昇の推算曲線を示しているが、以下ではこれについて述べる。

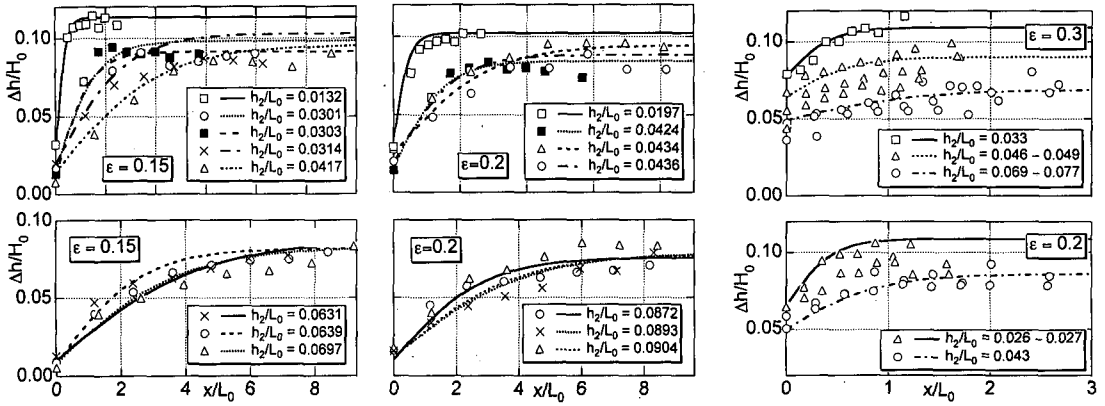
3.2 リーフにおける水位上昇推算

水位上昇に関する研究 (Goda, 1975; 日野ら, 1989) では、水位変動の自乗平均値の平方根 η_{rms} と波浪条件との関係を用いているが、水位上昇量 Δh を直接与えた方が実用的である。図-3はステップおよびスロープ型リーフ上での η_{rms} と水位上昇 Δh の関係を示すもので、両

* 正 会 員 工博 琉球大学教授 工学部環境建設工学科

** 正 会 員 工修 海岸環境調査研究所

*** 学生会員 琉球大学大学院工学研究科



(1) ステップ型リーフ

(2) スロープ型リーフ

図-2 ステップおよびスロープ型リーフ上での水位上昇分布

者の間には次の関係が成立している。

$$\Delta h/\eta_{rms} = \begin{cases} 2.0 & \text{Step-type reef} \\ 2.3 & \text{Slope-type reef} \end{cases} \quad (1)$$

スロープ型リーフに対する水位上昇 Δh の換算値はステップ型に対するよりも大きい。これは両リーフにおける碎波および波浪伝播特性の相違による。ここでは、図-2 に例示したリーフ上での水位上昇 Δh の分布を次式で仮定する。

$$\frac{\Delta h}{H_0} = (a-b) \tanh\left(c \frac{x}{L_0}\right) + b \quad (2)$$

係数 a はリーフ奥部で一定となる水位上昇量の最大値、 b はリーフ先端部での水位上昇量、 c は水位上昇分布の勾配を表わしている。

図-4 はステップ型リーフにおける水位上昇 $\Delta h/H_0$ と波浪条件 $(H_0/L_0)(1+h_2/H_0)$ との関係を示す。各水深比 ε に対するリーフ上の水位上昇は白抜き記号 $\circ, \triangle, \square$ 、リーフ先端での水位上昇は $\bullet, \blacktriangle, \blacksquare$ でそれぞれ示され

ている。

図中の勾配 1/2 の鎖線は Goda (1975) による傾斜海岸に対する η_{rms} を式 (1) により換算したものである。この推算結果は水位上昇の実験値とほぼ一致するが、短周期波に対しては水位上昇量を過小評価する。したがって、図-2 に例示したリーフ奥部での最大水位上昇量は、図中の勾配 1/4 の実線で評価するのが妥当であると考えられる。その近似式は次式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} a &= (\Delta h/H_0)_{\max} = 0.046 X^{-1/4} \\ X &= (H_0/L_0)(1+h_2/H_0) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

図-5 はリーフ先端部での水位上昇量の変化を示すもので、係数 b として次の近似式が得られる。

$$b = (\Delta h/H_0)_{\min} = 0.035 \varepsilon^2 X^{-1} \quad (4)$$

図-4 中には実験値 ($\bullet, \blacktriangle, \blacksquare$) に対する近似結果が点線で示されている。水位上昇は式 (3), (4) で与えられる曲線間に分布する。ただし、横軸の値が、入射波浪条件により、式 (3), (4) の 2 直線の交点の値よりも

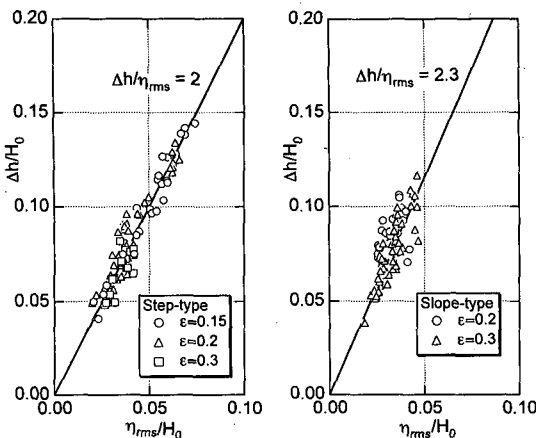


図-3 水位上昇 Δh と η_{rms} との関係

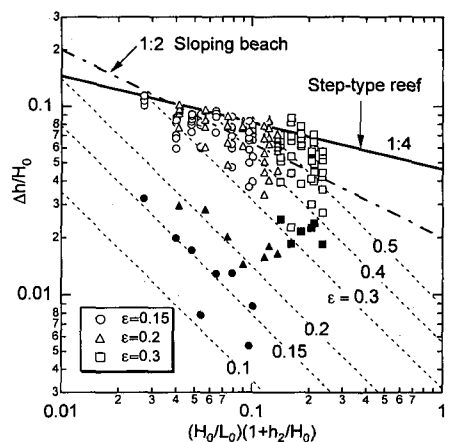


図-4 ステップ型リーフでの水位上昇と波浪条件の関係

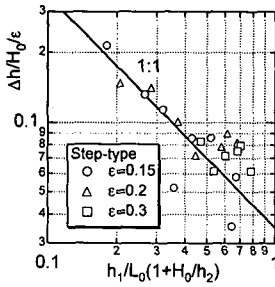


図-5 ステップ型リーフ先端部での水位上昇と波浪条件との関係

小さくなる場合には、水位上昇はリーフ先端部を除きリーフ全体に一樣に分布することを意味する。同様に、水位上昇分布の勾配を表わす係数 c は、次式 (筒井・鈴山, 1995) で与えられる。

$$c = 0.353 \epsilon^{3/2} X^{-3/2} \cdot H_0/h_2 \quad \dots\dots\dots (5)$$

スロープ型リーフに対して同様の整理を行った結果が図-6 に示されている。リーフ奥部で一定となる水位上昇を表わす係数 a は、リーフ先端部のスロープの影響により、傾斜海岸と同様に勾配 1/2 の実線で評価することができ、

$$a = (\Delta h/H_0)_{\max} = 0.023 X^{-1/2} \quad \dots\dots\dots (6)$$

が得られる。係数 b に対する近似式は

$$b = (\Delta h/H_0)_{\min} = 0.03 \epsilon^{1/2} X^{-1/2} \quad \dots\dots\dots (7)$$

である。なお、係数 c はステップ型リーフの場合と同じ式 (5) で与えられる。

式 (2)～(7) を用いてリーフ上での水位上昇 Δh の分布を推算した結果が、図-2 中の曲線群である。

4. 砕波変形時の波高推算

以下では、代表長 h_0 、時間 $\sqrt{h_0/g}$ および速度 $\sqrt{gh_0}$ (h_0 : 基準点での水深、 g : 重力加速度) により無次元化された物理量を用いる。座標原点は静水面に置き、水平座標を

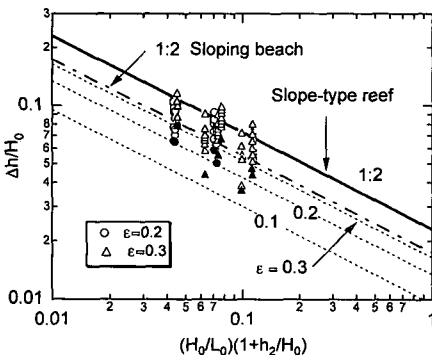


図-6 スロープ型リーフでの水位上昇と波浪条件の関係

(x, y) 、鉛直座標を z 、時間を t とする。

砕波、海底摩擦などによるエネルギー減衰を考慮した緩勾配方程式は次式 (Dalrymple ら, 1984) で与えられる。

$$\nabla (cc_g \nabla \eta) + \{ (c_g/c) \sigma^2 - i \sigma f_d \} \eta = 0 \quad \dots\dots\dots (8.1)$$

ここに、

$$f_d = \left[\frac{1}{2} f + \frac{\beta_0}{8} \left\{ \left(\frac{H}{h} \right)^2 - \left(\frac{H}{h} \right)_s^2 \right\}^{1/2} \right] \frac{H}{h} \frac{c_g}{h} \quad \dots\dots\dots (8.2)$$

$\nabla = (\partial/\partial x, \partial/\partial y)$, h : 水深, η : 水位, c : 波速, c_g : 群速度, $\sigma = 2\pi/T$: 周波数, H : 波高, T : 周期, f_d : エネルギー減衰係数, f : 海底摩擦係数, β_0 : 砕波によるエネルギー減衰を表わす無次元係数, $(H/h)_s$: 波の再生限界を表わす波高水深比である。式 (8.2) は Izumiya・Horikawa (1984) によるエネルギー減衰係数の線形近似である。

エネルギー減衰を含む KdV 方程式は次式 (筒井, 1986; 安田・西尾, 1990) で与えられる。

$$\eta_x + (3/2) h^{-3/2} \eta \eta_x + (1/6) h^{1/2} \eta_{xxx} + (1/4) h^{-1} h_x \eta = (1/2) \kappa h^{-3/2} \eta_{xx} - (1/2) f h^{-2} \eta |\eta| \quad \dots\dots\dots (9)$$

ここに、 $\xi = \int h^{-1/2} dx - t$, κ : エネルギー減衰を表わす無次元係数で、添字は偏微分を表わす。

海底摩擦がほぼ無視できる鋼製模型を用いた規則波実験資料により、ステップ型リーフに対すると同様に (Tsutsui・Zamami, 1993), スロープ型リーフ上での砕波減衰係数 β_0 を評価した結果が図-7 に示されている。個々の近似式は、 $T\sqrt{g/h_2} > 5$ の下に、以下の諸式で表わされる。

ステップ型リーフ :

$$\beta_0 = 4.48 \exp(-0.0921 T\sqrt{g/h_2}) + 0.12 \quad \dots\dots\dots (10)$$

スロープ型リーフ :

$$\beta_0 = \begin{cases} 3.27 \exp(-0.1027 T\sqrt{g/h_2}) + 1.73, & 1/20 \text{ Slope} \\ 4.26 \exp(-0.0896 T\sqrt{g/h_2}) + 0.74, & 1/10 \text{ Slope} \end{cases} \quad \dots\dots\dots (11)$$

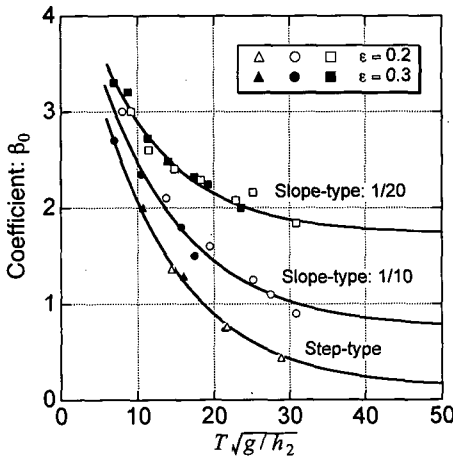
波の再生限界を表わす波高水深比はステップ型リーフでは Yamashita ら (1984) の近似値

$$(H/h)_s^2 = 0.072 \quad \dots\dots\dots (12.1)$$

を採用することができる (Tsutsui・Zamami, 1993)。しかし、スロープ型リーフ上では、波浪伝播特性が異なるため、この限界値を定める必要がある。リーフ先端部から離れた領域で妥当な結果となるように定めると、次式が得られる。

$$(H/h)_s^2 = 0.17 \quad \dots\dots\dots (12.2)$$

KdV 方程式 (9) においては砕波によるエネルギー減衰は拡散項で表わされている。この係数 κ については各種の近似式 (例えば、青野・服部, 1988; 安田ら, 1991) が提案されているが、数値計算上、この係数 κ も上記の


 図-7 碎波減衰係数 β_0 とリーフ上での無次元周期との関係

f_d を用いて評価できることが望ましい。上述の規則波を用いた実験結果に対する評価によると

$$\kappa = f_d/4 \quad \dots\dots\dots (13)$$

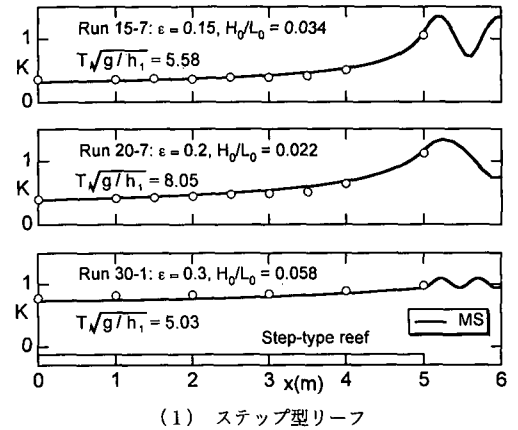
が妥当である。

以上の係数を用いたステップおよびスロープ型リーフ上での有義波の碎波波高分布の推算結果を図-8 に例示する。縦軸は入射波浪の有義波高に対する波高比を表わす。緩勾配方程式は断面 2 次元の式に変形して用いられ、ステップ型リーフに対しては先端部での不連続境界条件 (Tsutsui・Zamami, 1993) が考慮されている。KdV 方程式は差分法により計算された。緩勾配方程式による推算結果は、リーフ上での実験値の波高分布とよく一致し、ここでの波高推算法が妥当であることを示している。スロープ型リーフに対する KdV 方程式による結果は、リーフ上では碎波直後より良い推算結果が得られている。しかし、沖側のスロープ上では、式 (9) の左辺第 4 項の浅水効果が実験範囲内の比較的周期の短い波に対して過大で、推算値が実験値より大きくなっている。

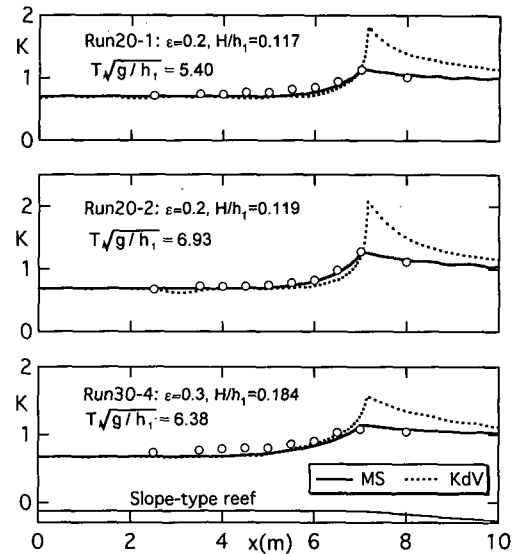
インドネシア・バリ島のサヌール海岸はリーフ先端部の勾配が 1/20 から 1/50 に変化するスロープ型リーフ海岸である。現地のリーフ海岸における海底摩擦係数に関しては未知な点が多いが、上述の波高推算法をこの海岸での碎波後の波高分布の推算に適用した結果、良好な結果が得られている (Sulaiman ら, 1994)。

5. 最大波

漂砂対策上、リーフ内で観測される碎波後の最大波が重要である。図-9 はステップおよびスロープ型リーフ上とバリ島サヌール海岸での碎波減衰後の全ての個々波の波高水深比 H/h_2 と浅水度 h_2/L_0 の関係を示す。図中の上側の点線は一定水深域 ($\epsilon=1$) での進行波の碎波指標 (合田, 1970)、下側の実線はステップ型リーフ上での進



(1) ステップ型リーフ



(2) スロープ型リーフ

図-8 リーフ上での有義波の碎波波高分布

行波の碎波限界 (Tsutsui・Zamami, 1993) をそれぞれ表わしている。ただし、後者では、§3 で述べたリーフ上での水位上昇が勘案されている。

図-9, (1), (2) の上段に示されているリーフ先端部での碎波率が小さい場合には、最大波はステップ型リーフ上での進行波の碎波限界で与えられる。しかし、通常のようにほとんどの波がリーフ先端部で碎波するときには、下段の図に示されるようにステップおよびスロープ型リーフのいずれの場合にも、一定水深域での碎波限界曲線は再生波の包絡線となり、再生波の最大波を与えることが判る。

サヌール海岸での観測時の入射波浪は $H_{1/3}/h_2 = 0.29$ で、図-9, (1), (2) の上段の波浪条件と同程度である。したがって、この場合の最大波は、ステップ型リーフ上での進行波の碎波限界で与えられている。

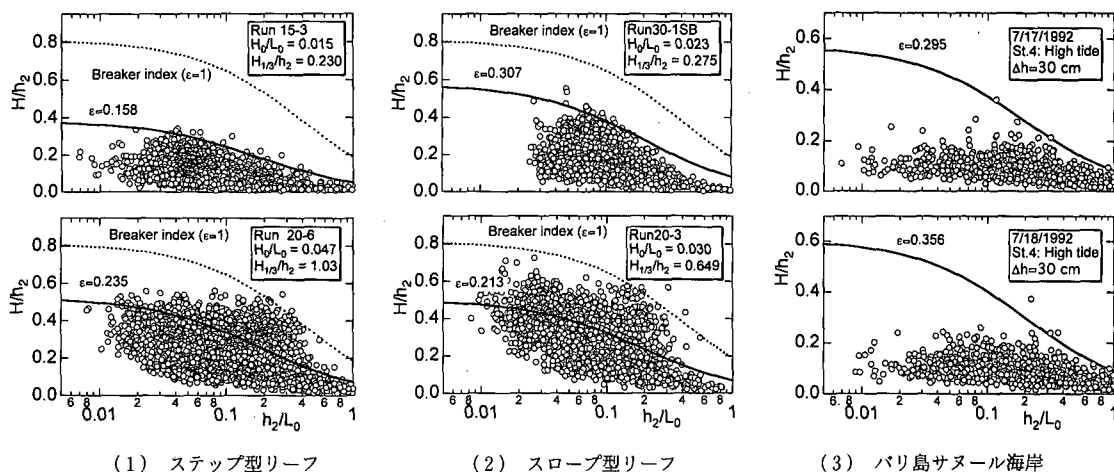


図-9 ステップおよびスロープ型リーフ上での最大波

6. 結 言

以上を要約すると以下ようになる。

(1) ステップおよびスロープ型リーフ海岸での水位上昇を推算するための近似式を提案した。

(2) 不規則波浪の代表波の推算に対して緩勾配方程式および KdV 方程式を適用するための碎波減衰係数などの係数を決定し、その有用性が確認された。

(3) リーフ上で観測される碎波後の再生波の最大波は一定水深域での碎波限界波で与えられる。

最後に、本研究で用いたサヌール海岸での資料は京都大学防災研究所を中心とする海外共同研究によるものであることを記して、関係各位に謝意を表する。

参 考 文 献

- 青野利夫・服部昌太郎 (1988): 碎波帯内のエネルギー逸散過程に関する実験的研究, 第 35 回海岸工学講演会論文集, JSCE, pp. 59-63.
- 磯部雅彦・柴田洋三・泉宮尊司・渡辺 晃 (1988): 不規則波浪によるリーフ上の平均水位上昇に関する研究, 第 35 回海岸工学講演会論文集, JSCE, pp. 192-196.
- 合田良実 (1970): 碎波指標の整理について, 土木学会論文集, Vol. 180, pp. 39-49.
- 津嘉山正光・仲座栄三 (1987): 2次元リーフによる波の変形と平均水位変化, 第 34 回海岸工学講演会論文集, JSCE, pp. 76-80.
- 筒井茂明 (1986): ソリトン変形に及ぼす風の影響, 第 33 回海岸工学講演会論文集, JSCE, pp. 61-65.
- 筒井茂明・鈴山克之 (1995): ステップ型リーフでの水位上昇,

土木学会西部支部研究発表会, II-66, pp. 282-283.

日野幹雄・仲座栄三・与儀実和 (1989): リーフ地形海岸における Bore 状サーフビートに関する研究, 海岸工学論文集, 第 36 巻, JSCE, pp. 75-79.

安田孝志・西尾保之 (1990): 碎波帯を進む現地波浪のモデル化, 海岸工学論文集, 第 37 巻, JSCE, pp. 66-70.

安田孝志・西尾保之・山本康裕 (1991): 碎波帯における現地波浪の拡散係数について, 海岸工学論文集, 第 38 巻, JSCE, pp. 66-70.

Dalrymple, R. A., J. T. Kirby and P. A. Hwang (1984): Wave diffraction due to areas of energy dissipation, Jour. Waterway, Port, Coastal, and Ocean Eng., ASCE, Vol. 110, pp. 67-79.

Goda, Y. (1975): Irregular wave deformation in the surf zone, Coastal Eng. in Japan, JSCE, Vol. 18, pp. 13-26.

Izumiya, T. and K. Horikawa (1984): Wave energy equation applicable in and outside the surf zone, Coastal Eng. in Japan, JSCE, Vol. 27, pp. 119-137.

Sulaiman, D. M., S. Tsutsui, H. Yoshioka, T. Yamashita, S. Oshiro, and Y. Tsuchiya (1994): Prediction of the maximum wave on the coral flat, Proc. 24th ICCE (in Press).

Syamsudin, A. R. (1993): Beach Erosion in Coral Reef Beaches and its Control, Doctoral Dissertation at Kyoto University, 221 p.

Tsutsui, S. and K. Zamami (1993): Jump condition of energy flux at the line of bathymetric discontinuity and wave breaking on the reef flat, Coastal Eng. in Japan, JSCE, Vol. 36, pp. 155-175.

Yamashita, T., Y. Tsuchiya, M. Matsuyama and T. Suzuki (1990): Numerical calculation of linear wave propagation in the coastal zone, Bull. Disas. Prev. Res. Inst., Kyoto Univ., Vol. 40, pp. 15-40.