

不規則波によるリーフ上の平均水位上昇に関する研究

磯部 雅彦*・柴田 洋三**・泉宮 尊司***・渡辺 晃****

1. 序 論

我が国では沖縄県を中心としてリーフを有する海岸が見られる。このような海岸では礁原上に水深の小さな領域がある程度の幅で存在するため、砕波によって波高が減少し、構造物を建設する際の設計波力を小さくとることができるという利点を有する。しかし、リーフ上では荒天時に顕著な水位上昇が起きるという問題が起こっている。平均水位上昇に波動成分が重なることにより、瞬間的には推算潮位上 4 m にも海面が達した例も報告されているが、これには低気圧による吸い上げ、風による吹き寄せ以上に、wave set-up が影響していると考えられる。

不規則波によるリーフ上の wave set-up に関しては高山ら¹⁾が実験的な研究を行っており、波高分布を表す実験式を提案するとともに、平均水位上昇量に及ぼす潮位(すなわちリーフ上の静水深)や環礁の存在の影響を調べている。また、津嘉山・仲座²⁾は規則波を用いてリーフ上の波高分布および平均水位分布を詳細に調べた。そして、高山らによって提案された実験式の係数を精度よく求めるとともに、波高分布からラディエーションストレスを評価して平均水位分布の変化が精度よく予測できることを示した。これらの結果を見ると、平均水位の上昇量に対してはリーフ前面の地形の影響が大である。従って、一般的な地形に対する平均水位上昇量の予測を可能にすることが必要であると考えられる。

本研究においては、リーフ前面の海底勾配を変化させた場合の、不規則波による水位上昇量を実験水槽において測定し、その結果に基づいて予測モデルを提案する。予測モデルにおいては、波の浅水・砕波変形の取り扱いとラディエーションストレスの評価が重要な課題であり、従来の浅水・砕波変形モデルと関連させた議論を行う。

2. 実 験

(1) 実験装置および方法

実験は 2 次元不規則造波水槽を用いて行った。図-1 に示すのがリーフ地形のモデルであり、リーフ前面の海底勾配を 1/10, 1/5, 1/2.5, および直立とした場合の、合計 4 種類を用いた。

作用させた波は規則波および不規則波であり、不規則波の周波数スペクトルは Pierson・Moskowitz 型と JONSWAP 型のものの 2 種類である。不規則波の信号は、周波数を等分割した成分波の振幅を正規乱数から求め、逆 FFT 法を用いて時系列に変換することによって作成した³⁾。この方法によると、ある時間間隔で繰り返し信号ができることになるが、ここでの繰り返し時間間隔は 204.8 s とした。従って、この間隔以上の測定を行っても意味がないことになる。しかし、逆にこの不規則波を作用し続ける限り、204.8 s ずつの測定を行えば、波を止めることなしに同一の不規則波に対する測定を行ったことになる。そこで、容量式波高計の 1 本を沖側一様水深部に固定し、他の 1 本を移動させながら 204.8 s ずつの測定を行い、それぞれの点における波形記録を得た。

(2) 実験条件

表-1 に入射波の諸元を、リーフ前面が直立したステップ型リーフに対する場合について例示する。規則波について、先頭からの 3 ケースは入射波高 H_i のみを変化させたものであり、4 番目のケースはリーフ上の静水深 h_f を変えたもの、5 番目のケースは周期 T を変えたものである。波作用前のリーフ上の初期水深は、1/100 程度の縮尺を念頭におき、2 cm または 3 cm とした。しかし、波作用後にリーフ上の水位が上がり、そこに水がたまった分だけ沖側の水位が下がるので、沖側の平均水位

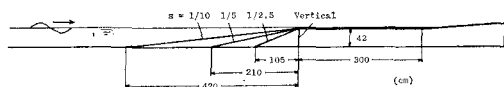


図-1 2次元不規則造波水槽とリーフ地形モデル

* 正会員 工博 東京大学助教授 工学部土木工学科

** 工修 JR 東海

*** 正会員 工博 新潟大学助手 工学部土木工学科

**** 正会員 工博 東京大学教授 工学部土木工学科

表-1 実験条件の一例 (ステップ型リーフの場合)

規則波			
CASE	波 高 H_i (cm)	周 期 T (s)	リーフ上静水深 h_f (cm)
1-4-1	1.8	1.32	1.8
1-4-2	4.9	1.32	1.9
1-4-3	9.0	1.32	1.8
1-4-4	5.5	1.32	2.9
1-4-5	4.8	1.86	1.8
不規則波			
CASE	有義波高 $H_{1/3i}$ (cm)	有義波周期 $T_{1/3}$ (s)	リーフ上静水深 h_f (cm)
2-4-1	4.8	1.32	1.9
2-4-2	6.6	1.29	1.8
2-4-3	9.0	1.30	1.8
2-4-4	7.8	1.33	1.9
2-4-5	6.6	1.31	2.9
2-4-6	5.9	1.79	1.9

を改めて静水位ととりなおす必要がある。このため、実質的なリーフ上の静水深は初期水深よりも数 mm 小さくなっている。

不規則波については、4 番目のケースのみが JON-SWAP 型スペクトルで、残りは Pierson-Moskowitz 型スペクトルである。先頭からの 3 ケースは入射有義波高 $H_{1/3i}$ を変化させたもの、5 番目のケースはリーフ上の静水深を変えたもの、および 6 番目のケースは有義波周期 $T_{1/3}$ を変えたものである。

他のリーフ前面地形についても原則として同様な入射波を用い、リーフ前面海底勾配 1/10, 1/5, 1/2.5 に対してケース番号の 2 番目の数値をそれぞれ 1, 2, 3 とした。ただし、1/10 勾配についてはリーフ上水深および周期を変えた 2 ケースの実験を行っていない。

(3) 実験結果

図-2 (a)~(b) は実験結果の例を示すものである。ステップ型リーフに対する規則波および不規則波の実験結果が、波高 H (または有義波高 $H_{1/3}$)、水面変動の rms (自乗平均平方根) 値 η_{rms} 、および平均水位 $\bar{\eta}$ の分布として表されている。ステップ型リーフでは特に反射が顕著であることがわかり、腹において水位が相対的に高くなっている。

図-3 はリーフ上の $x=230$ cm における水位上昇量 $\bar{\eta}_f$ の実験結果を、

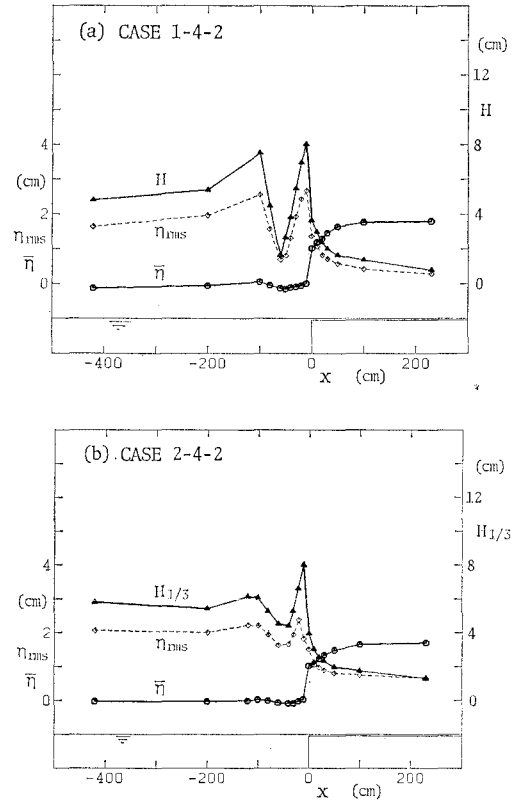


図-2 波高, 水面変動 rms 値, 平均水位の実測例

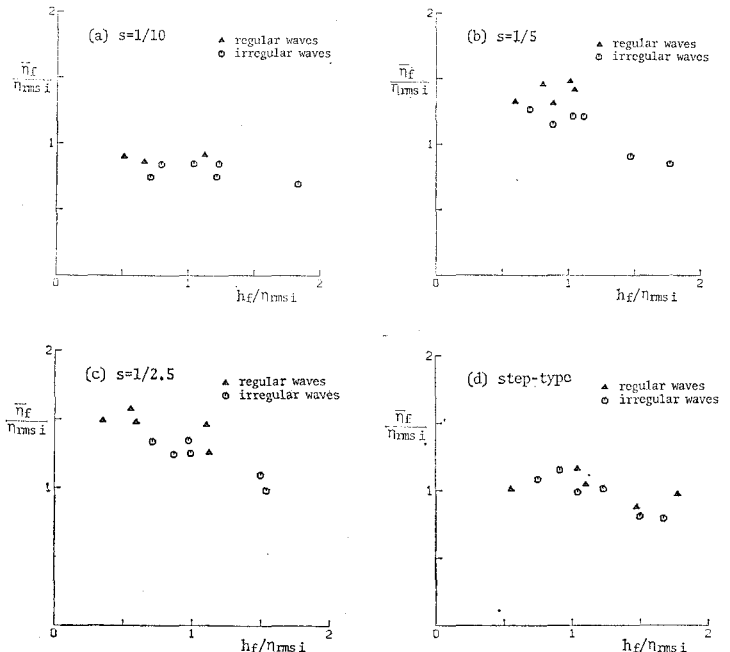


図-3 入射波と水位上昇量との関係

リーフ上の静水深 h_f との関係で図示したものである。 Δ で表される規則波と $\circ$ で表される不規則波を同等の基準で見るために、両軸は η_{rms} で無次元化してある。規則波の波高に変換するには約 $2\sqrt{2}$ 倍、不規則波の有義波高に変換するには約 3.8 倍すればよい。図より、不規則波の方がわずかに小さくなるのがわかる。また、類似した波浪条件ならば、リーフ上静水深が大きいほど水位上昇量が減少すると考えられる。しかし、正弦波形のあてはめにより、波形勾配を $2\sqrt{2}\eta_{rms}/L_0$ と定義して波形勾配別に見たが、その傾向はあまり明確にならなかった。これは、一度砕波した波はある程度の波高まで減少するため、水位上昇量があまり変わらないのであると解釈される。

3. 数値モデル

実験結果で見たように、リーフ前面の勾配が急な場合には、反射が無視できなくなる。従って、従来のようにエネルギー方程式によって波の浅水・砕波変形を解析する方法は適当でない。厳密には、反射を含む有限振幅波の浅水・砕波変形を計算すべきであるが、現状では不可能である。緩勾配方程式は微小振幅波に対して誘導されたものであるが、Booij⁴⁾ によれば直立壁がある場合に至るまで反射率をある程度の精度で計算できる。そこで、この方程式を基本として、平均水位の予測の目的に沿った数値モデルを組み立てる。

(1) 基礎方程式

岸沖方向の1次元問題に対して、水面変動 η を

$$\eta = \text{Re}(\phi e^{-i\omega t}) \quad \dots\dots\dots (1)$$

と表す。ここに、 ω は角周波数、 t は時間である。このとき複素水面変動振幅 ϕ は、微小振幅・緩勾配の仮定の下に、次の緩勾配方程式によって支配される。

$$\frac{d}{dx} \left(c_g \frac{d\phi}{dx} \right) + (k^2 c_g + i\omega f_D) \phi = 0 \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 c は波速、 c_g は群速度、 k は波数、 $i = \sqrt{-1}$ 、 f_D はエネルギー減衰係数であり、 x は岸沖座標である。

(2) 一定係数に対する解

式(2)における係数が一定の場合、すなわち一定水深でエネルギー減衰係数が一定の場合には、解は入射波成分 ϕ_I と反射波成分 ϕ_R の重ね合わせとして簡単に表される。

$$\begin{aligned} \phi &= \phi_I + \phi_R \\ &= a_I e^{ikx} + a_R e^{-ikx} \quad \dots\dots\dots (3) \end{aligned}$$

$$\lambda = k \sqrt{1 + i f_D / n\omega} \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$n = c_g / c \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここに、 a_I 、 a_R は複素定数である。次に、 ϕ が与えられた場合、式(3)の関係より、 ϕ_I および ϕ_R は

$$\phi_I = (\phi + \phi) / 2 \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$\phi_R = (\phi - \phi) / 2 \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$\phi = (d\phi/dx) / (i\lambda) \quad \dots\dots\dots (8)$$

と求められる。

(3) 境界条件

沖側境界においては入射波の振幅 a_i が与えられる。また、沖側境界では $f_D = 0$ であるから、式(6)に式(4)および(8)を代入して

$$\phi + (d\phi/dx) / (ik_i) = 2a_i e^{ik_i x_0} \quad \dots\dots\dots (9)$$

となる。ここに、 x_0 は沖側境界の x 座標、 k_i はそこでの波数を表す。

岸側境界もリーフ上の一様水深部であるため、沖側と同様な境界条件を考える。岸側境界では反射波成分が0であるから、式(7)より次式を得る。

$$\phi - (d\phi/dx) / (i\lambda) = 0 \quad \dots\dots\dots (10)$$

(4) 砕波点

合田⁵⁾の砕波指標のうち、砕波水深 d_b を与える実験曲線を近似した式は、

$$\begin{aligned} \frac{d_b}{H_0} &= 0.63 + \frac{0.1}{-0.77 - \log_{10}(H_0/L_0)} \\ &+ 0.22 \left\{ 1 - \frac{0.184 s_1^2}{s_1^2 - 0.107 s_1 + 0.0054} \right\} \left(\frac{H_0}{L_0} \right)^{-0.37} \quad \dots\dots\dots (11) \end{aligned}$$

となる。ここに、 H_0 は沖波波高、 L_0 は沖波波長であり、 s_1 は海底勾配である。この式は $s_1 \leq 0.1$ で用いるべきものであり、本研究のように急勾配の場合には適用できない。本実験の結果からは、 s_1 に対し d_b/H_0 がわずかな減少傾向を示すように見うけられるものの、ばらつきが非常に激しい。そこで、 $s_1 \geq 0.1$ に対しても、 $s_1 = 0.1$ として計算した d_b/H_0 を用いることとした。なお、不規則波は規則波よりも砕波しやすい⁶⁾ ので、砕波水深を 1.2 倍にした。

(5) 砕波減衰係数

砕波点から岸側では $f_D > 0$ とするが、その値は Pibajnia・渡辺⁷⁾ と同様

$$f_D = \alpha_D \sqrt{\frac{g}{d}} \sqrt{\frac{\gamma - \gamma_r}{\gamma_s - \gamma_r}} s_3 \quad \dots\dots\dots (12)$$

$$\gamma_s = 0.4(0.57 + 5.3s_2) \quad \dots\dots\dots (13)$$

$$\gamma_r = 0.4(a_b/b_b) \quad \dots\dots\dots (14)$$

$$\gamma = a/d \quad \dots\dots\dots (15)$$

$$a = |\phi| \quad \dots\dots\dots (16)$$

と評価する。ここに、 d は平均水深、 $a = |\phi|$ は波の振幅、 s_2 および s_3 は海底勾配、 g は重力加速度であり、添字 b は砕波点における値を示す。実験式(13)についても、 s_2 が大きいときに用いることはできない。右辺の()内は波高水深比を表すものなので、2を限度とし、計算値がそれ以上になるような s_2 に対しては、()内の値を2でおきかえた。式(12)における s_3 は砕波の強さを表すものであるから、実際の値を用いるが、ステップ型リ

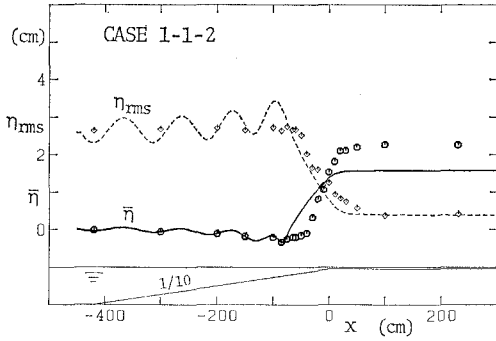


図-4 水位上昇量の実測値と計算値との比較
(砕波後の $\alpha_D=2.5$)

ーフの場合には0.4とした。 α_D は、砕波点から砕波による乱れが十分に発達する地点までの間のエネルギー減衰係数を除々に増大させるための係数である。通常のように砕波直後からエネルギー減衰が顕著であるとして、砕波直後から理論的な定常値 $\alpha_D=2.5$ をとるものとして計算した例が図-4である。この場合、水位上昇量が過小評価となるとともに、実際以上の反射が起こってしまう。エネルギー減衰は乱れの生成によって起こるものであるから、 f_D は突っ込み点付近から、いわゆる inner region で増加すべきである。そこで、砕波水深の0.8倍の水深地点から始めて、砕波水深の8倍の区間で α_D を0から2.5まで直線的に増加させた。

(6) ラディエーションストレス

部分重複波のラディエーションストレス S_{xx} は

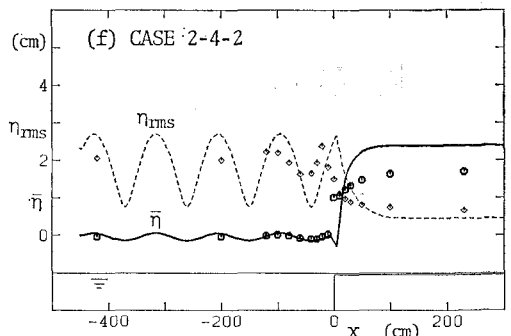
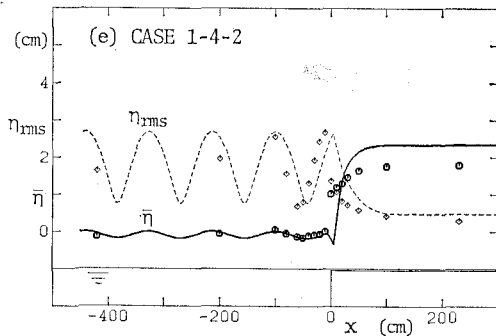
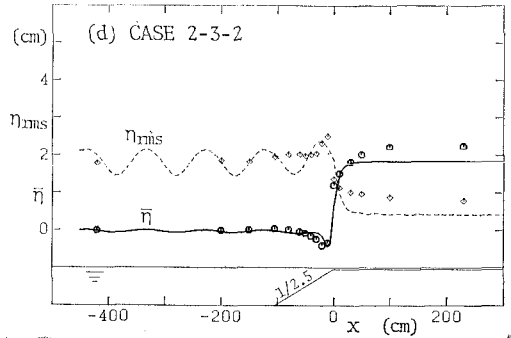
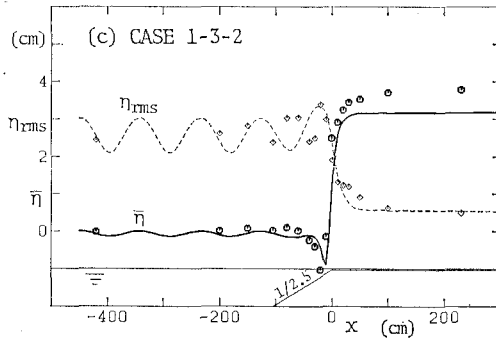
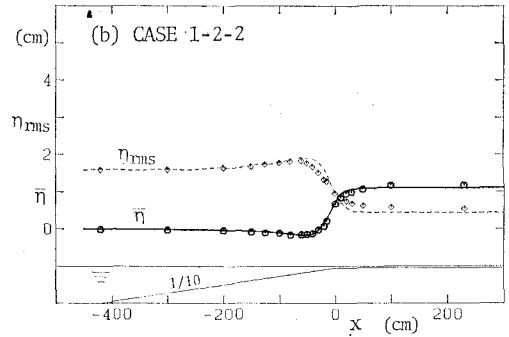
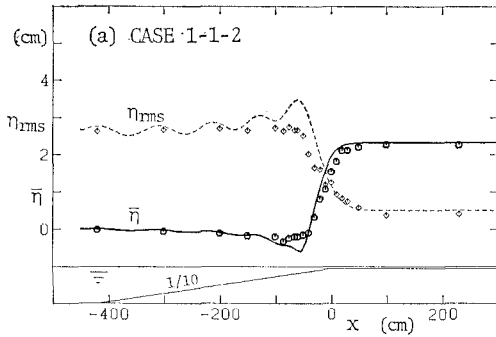


図-5 水位上昇量の実測値と計算値との比較 (砕波水深の0.8倍から α_D を直線的に増加させた場合)

$$S_{xx} = \frac{\rho g a^2}{2} \left[(1+r^2) \left(\frac{2kd}{\sinh 2kd} + \frac{1}{2} \right) - \frac{2kd}{\tanh 2kd} r \cos 2kx \right] \quad (17)$$

$$r \cos 2kx = Re(\phi_R/\phi_I) \quad (18)$$

$$r = |\phi_R/\phi_I| \quad (19)$$

と表され、これより平均水位 $\bar{\eta}$ は、

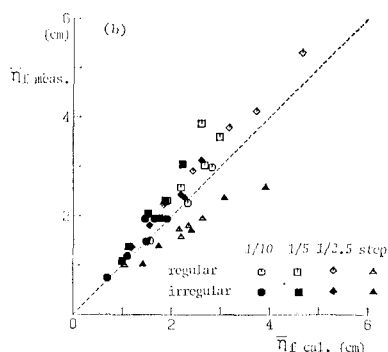
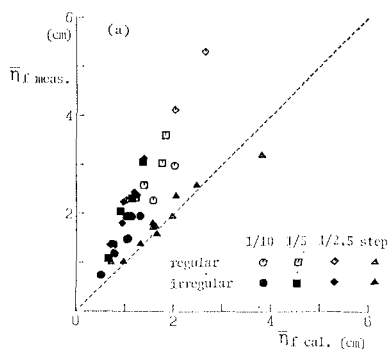
$$\frac{d\bar{\eta}}{dx} = -\frac{1}{\rho g d} \frac{dS_{xx}}{dx} \quad (20)$$

によって求められる。

(7) 不規則波の取り扱い

不規則波の取扱いは波別解析法により、個々の波の変形を計算してラディエーションストレスを計算した後、これを加え合わせることとした。波高分布は Rayleigh 分布を用い、周期は単に有義波周期のみをとった。

なお、数値計算では碎波減衰係数を補正しながら収束計算を行う。碎波減衰係数は、波高変化に対して敏感に変化するので、収束させるためには補正量を本来の 1/2 あるいは 1/3 にする必要がある。



図—6 平均水位の計算値と実測値との比較 ((a): 碎波直後から $\alpha_D=2.5$, (b): 碎波後 α_D を直線増加)

(8) 計算結果

図—5 は、水面変動の rms 値 η_{rms} 、および平均水位 $\bar{\eta}$ の分布について、実測値と計算値を比較したものである。碎波減衰が始まる点を碎波点より岸側にずらし、さらに α_D を直線的に増加させているので、碎波後の減衰域での η_{rms} は過大評価となる。しかし、平均水位上昇量では、ほぼ妥当かむしろ若干過小評価となる。これは、碎波直後では位置エネルギーが運動エネルギーに変換されるだけであることを示すものである。なお、ステップ型リーフでは、リーフ端において η_{rms} の実測値が既に減少しているのに対し、計算ではリーフ端以降で減少することになるから、両者の水位変化の差は大きい。しかし、反射波の分布については計算精度がある程度よくなっている。ただし、CASE 2-4-2 の計算値で、波高変動が見られるのは、周期を単一にしているためである。図—6 は、リーフ上の平均水位上昇量の計算値と実測値を比較したものであるが、(b) に示す本研究のモデルではステップ型リーフを除いて、両者がほぼ一致する。

4. 結 論

リーフ上の平均水位上昇について実験を行ったところ、リーフ前面勾配が 1/2.5 の場合に最も水位上昇が大きかった。水位上昇予測のための数値モデルを構築する際、エネルギー減衰は波高あるいは位置エネルギー減衰と異なると考えて、減衰区間を岸側にずらしたところ、水位上昇の計算値と実測値とがほぼ一致した。なお、ステップ型リーフについては、リーフ端で既に碎波が始まっていることを考慮したモデルが必要である。

なお、図面の作成に際して東京大学工学部土木工学科の小林智尚助手の助力を得たことをここに記し、謝意を表する。

参 考 文 献

- 高山知司・神山 豊・菊地 治: リーフ上の波の変形に関する研究, 港湾技研資料, No. 278, pp. 1~32, 1977.
- 津嘉山正光・仲座栄三: 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, pp. 76~80, 1987.
- 磯部雅彦・古市耕輔: 不規則波に対する統計量の変動に関する理論的考察, 第33回海岸工学講演会論文集, pp. 159~163, 1986.
- Booij, N.: A note on the accuracy of the mild-slope equation, Coastal Eng., Vol. 7, pp. 191~203, 1983.
- 合田良実: 碎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.
- 木村 晃・瀬山 明: 斜面上の不規則波の碎波限界について, 第33回海岸工学講演会論文集, pp. 174~178, 1986.
- Mohammad Dibajnia・渡辺 晃: 波浪場と海浜縦断地形変化の数値計算モデル, 第34回海岸工学講演会論文集, pp. 291~295, 1987.