

急勾配を有するリーフ地形上の波浪エネルギーによる 波浪場評価に関する研究

Study of wave field estimate by using wave energy on reef with steep slope

関本恒浩¹・中嶋さやか²・片山裕之³・高橋研也⁴

Tsunehiro SEKIMOTO, Sayaka NAKAJIMA, Hiroyuki KATAYAMA and Kenya TAKAHASHI

We investigate wave height change on the coral reef which has steep front slope. Data of both regular and irregular wave experiments were used in order to study characteristics of wave deformation including wave breaking. By using a parameter H_{rms}/d , properties of energy loss by wave breaking on the reef can be obtained. We modified wave energy balance equation model developed by Tajima and Madsen (2005) in order to estimate wave energy on the coral reef. Calculation results show good agreement with experimental data.

1. はじめに

近年、海岸工学的立場からサンゴ州島の形成メカニズムに関する研究が進められており（高橋ら，2011），リーフ地形周辺における広域の波浪場を精度よく評価する数値解析手法の構築が望まれている。

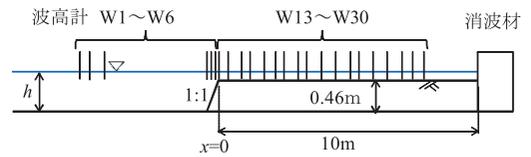
一般に、サンゴ礁では、リーフ前面の急勾配の斜面と水深の浅いリーフフラットが接続した地形が形成されている。リーフ上では水深が非常に浅いことから、非線形性が強く、波の分裂や再生、さらには海浜流の発達など、複雑な波浪場が形成されることが知られている。このように水深変化が大きく、非線形性の強い現象に対して広域の波浪場評価を試みる場合、一般に用いられる非線形波動方程式を用いた手法では、計算労力や適用範囲の面で大きな困難を伴うことが考えられる。そこで本研究では、簡便で、かつ比較的精度良く波の変形を評価する方法として、波浪エネルギーに着目した。本稿では、規則波および不規則波を用いた水理模型実験結果を詳細に分析するとともに、エネルギー平衡方程式を用いた合理的な波浪場評価法について考究した。

2. 水理模型実験

実験は、中嶋ら（2011）および関本ら（2011）の水理模型実験のうち、図-1に示す沖側一様水深部から1:1の勾配を経て長さ10mのリーフフラットへ続くリーフ地形モデルを用い、沖側一様水深部に3地点、斜面上に3地点、リーフ上に18地点、計24本の容量式波高計を設置し水位変動を計測した。

実験条件を表-1および表-2に示す。規則波実験は、潮位

2種類、波高2種類、周期3種類の12ケース、不規則波実験は、潮位2種類、波高1種類、周期3種類の6ケース実施した。規則波実験では、0.05sのサンプリング間隔で約3分間のデータを取得し、リーフ上において安定したwave setupが形成される時間帯のデータを用いた。不規則波実験ではBretschneider-光易型スペクトルを有する不規則波を



波高計位置 (m)	波高計位置 (m)	波高計位置 (m)	波高計位置 (m)
W1 -5.50	W13 0.00	W19 2.50	W25 5.50
W2 -4.95	W14 0.30	W20 3.00	W26 6.00
W3 -4.45	W15 0.80	W21 3.50	W27 6.50
W4 -0.45	W16 1.30	W22 4.00	W28 7.00
W5 -0.30	W17 1.80	W23 4.50	W29 7.50
W6 -0.15	W18 2.20	W24 5.00	W30 8.00

図-1 実験に用いたリーフ地形と波高計の位置

表-1 規則波実験条件（関本・中嶋，2012）

斜面勾配	水深 h (m)	波高 H_{rms} (m)	周期 T (s)
1:1	0.50 0.53	0.12	1.4
			1.6
			1.8
		0.168	1.4
			1.6
			1.8

表-2 不規則波の実験条件

斜面勾配	水深 h (m)	波高 H_{rms} (m)	周期 $T_{1/3}$ (s)
1:1	0.50 0.53	0.85	1.4
			1.6
			1.8

1 フェロー 博(工) 五洋建設(株) 技術研究所
 2 正会員 修(農) 五洋建設(株) 技術研究所
 3 正会員 博(工) 五洋建設(株) 技術研究所
 4 正会員 修(工) 五洋建設(株) 技術研究所

入射波として与え、サンプリング間隔0.05sで約8分30秒間の水位変動データを取得した。データ解析には、造波開始から75s以降のデータを用いた。

3. 水理模型実験データの解析

(1) 水理模型実験データの解析方法

本論文では、リーフ上を対象として波のエネルギーに着目しその空間分布特性を調べた。実験ではwave set-upを含む長周期の平均水位の変動が見られたことから、規則波実験も含め、まず数値フィルターによって5s以上の定常成分ならびに長周期変動成分を分離した水位変動のrms値 η_{rms} を求め、それ $\sqrt{8}$ を倍してrms波高値 H_{rms} を算出した。また、不規則波についてはパワースペクトル解析(データ数: 8192, 片幅16個の三角形フィルター)を実施した。

(2) スペクトル解析結果

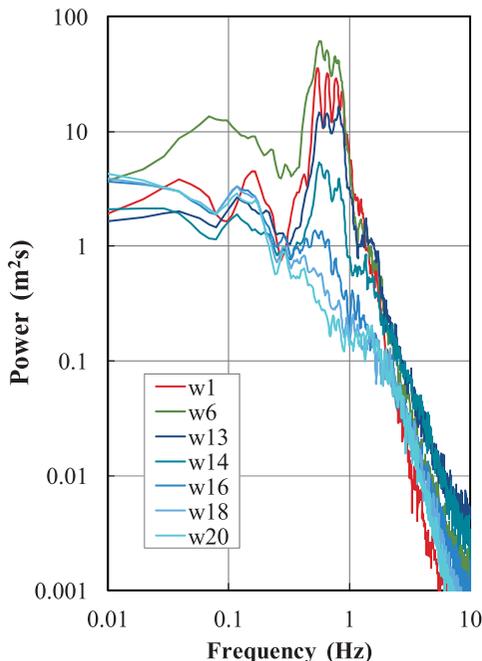
図-2にパワースペクトル解析の一例を示す。斜面上(図中W6)では、エネルギーの増大が見られることから、斜面からの反射の影響が認められる。なお、このときの反射率は概ね0.5~0.6程度であることを確認した。さらに、波のエネルギーは、リーフエッジ前面で最大になった後、リーフ上を伝播するにつれて減衰しており、主としてメインの周波数帯で顕著に碎波減衰が見られる。一方、高周波数側に着目すると、オーダー的には小さいもののエネルギーの増大がみられる。リーフエッジ周辺では引き

波に伴うバックウォッシュなどの影響を受けて大規模な渦が斜面上で形成され、リーフエッジ付近で碎波による乱れと一体となってリーフ上を伝播・減衰する様子が目視より観察されており、この乱れが高周波数側のエネルギー増大要因となっていると考えられる。

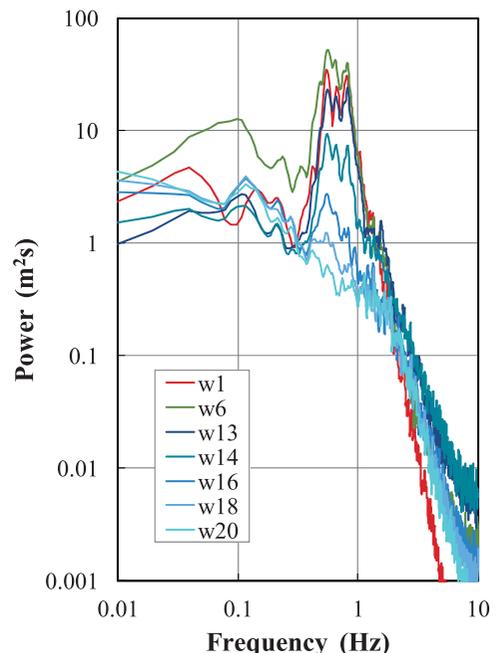
以上のように、リーフ上ではメインの周波数帯域全体でほぼ一様にエネルギーの減衰が見られることから、エネルギー平衡方程式による波の評価が可能であるといえる。

(3) H_{rms} の空間分布

H_{rms} をwave set-upを含む全水深 d で無次元化した波高全水深比 H_{rms}/d を用いて空間分布の評価を行った。まず、図-3は規則波を対象とした実験結果であり、関本・中嶋(2012)から引用したものである。規則波の場合、リーフ上では H_{rms}/d の空間分布におよぼす波高、周期、水深の影響は小さく、碎波の完了とともに H_{rms}/d はある一定値 γ_r に収束する。これは、波の再生条件を表すものであり、 $\gamma_r = 0.28 \pm 0.01$ である(関本・中嶋, 2012)。図-3(2)は、リーフ上における碎波変形過程を詳しく見るため、 H_{rms}/d から γ_r を差し引き、これをリーフ上における空間の最大値で規格化したものである。このような整理により、リーフ上の波浪減衰はほぼひとつの過程によって表記できることがわかる。したがって、本実験条件のように入射波高がリーフ水深に対して十分に大きい場合では、波の再生条件を超えるエネルギー、すなわち H_{rms}/d から γ_r を差し引いた値は、リーフ上の碎波減衰で失われるエネルギー

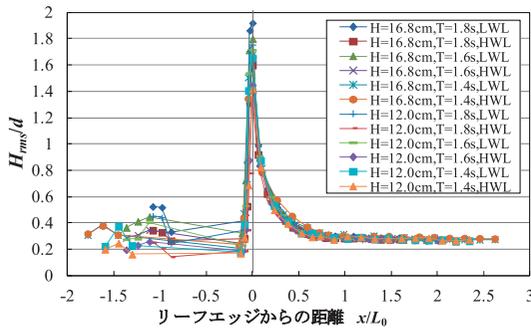


(1) $h=0.50\text{m}$, $H_{rms}=0.85\text{m}$, $T_{1/3}=1.8\text{s}$

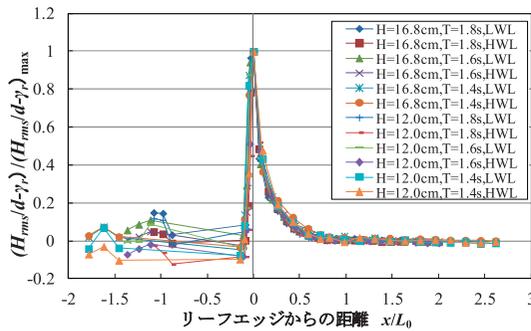


(2) $h=0.53\text{m}$, $H_{rms}=0.85\text{m}$, $T_{1/3}=1.8\text{s}$

図-2 パワースペクトルの例

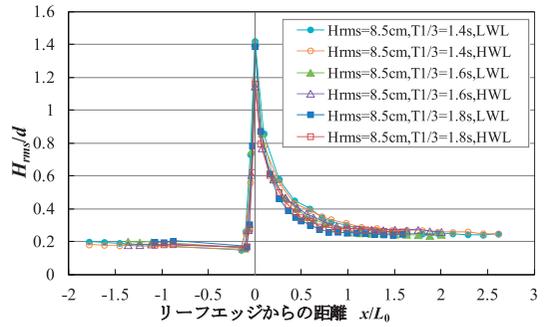


(1) 波高全水深比 H_{rms}/d

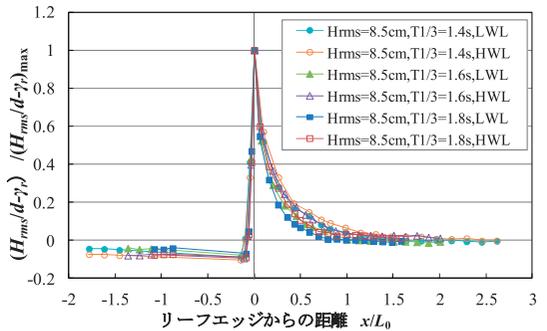


(2) 規格化した波高全水深比 $(H_{rms}/d - \gamma) / (H_{rms}/d - \gamma)_{max}$

図-3 規則波の波高 H_{rms} と全水深 d の比の空間分布特性 (関本・中嶋, 2012)



(1) 波高全水深比 H_{rms}/d



(2) 規格化した波高全水深比 $(H_{rms}/d - \gamma) / (H_{rms}/d - \gamma)_{max}$

図-4 不規則波の波高 H_{rms} と全水深 d の比の空間分布特性

部分を表しているといえる。

次に、不規則波について同様の整理を行った。図-4にその結果を示す。図-3と比較すると、不規則波の方が規則波に比べ周期や水深によってデータにばらつきがみられることがわかる。また、不規則波では、規則波に比べて波浪減衰は緩やかであるとともに、波の再生域はリーフエッジからより離れた地点で認められた。なお、不規則波の場合も碎波完了後は H_{rms}/d がほぼ一定値に収束するものの、この場合 $\gamma_r = 0.25 \pm 0.01$ と規則波に比べて小さい値であった。リーフ上における不規則波の碎波変形過程に、規則波の場合に見られなかった水深や周期の影響が表れたのは、不規則波には波群中に碎波していない小さな波高の波が含まれていること、さらにその碎波限界条件が水深や周期に依存することによる。このことは、リーフエッジにおける H_{rms}/d の値が規則波に比べて小さいことから明らかである。また、波の再生条件である γ_r が規則波に比べて不規則波の場合では小さくなっているのもこの理由によると考えられる。なお、紙数の関係で示していないが、リーフ上における不規則波の波高の出現確率密度は、リーフエッジ近傍をのぞき、Rayleigh分布で近似できることを確認している。

以上のことから、リーフ上における基本的な碎波変形

モデルは、図-3 (2) に示した変形過程にしたがうものとし、また不規則波への拡張は、波の出現分布特性を考慮して碎波するものは図-3 (2) に示した変形過程を適用すればよいと考えられる。そこで、4章ではこれらの結果を反映させた数値解析手法について検討を行った。

4. 数値解析

(1) リーフ周辺の数値解析

リーフ周辺の数値解析は、エネルギー平衡方程式を用いる方法 (関本ら, 2011)、プシネスク方程式を用いる方法 (平山・平石, 2005)、数値波動水路による検討 (小竹ら, 2010)、本多・間瀬 (2006) による KP 方程式に基づく方法などがある。本研究では、前章での議論より波高全水深比 H_{rms}/d が、リーフ上の波の再生条件 γ_r よりも大きな部分についてエネルギーが失われること、さらに碎波に伴う大規模な乱れの影響を考慮すべきであることから、田島・Madsen (2005) のモデルを改良し、不規則波への適用を試みた。

(2) 田島・Madsenのモデル

田島・Madsen (2005) は、Dallyら (1985) のモデルをベースに底面流速や戻り流れを考慮したエネルギー平衡方程式を提案している。このモデルは、surface rollerを

用いることによって碎波による大規模乱れを評価しつつ、波のエネルギー変化や戻り流れを精度よく評価できる手法である。基本式は式 (1) に示すとおりである。

$$\nabla \cdot (EC_g \vec{n}) = -D_b = -\frac{K_b}{d} C_g \max(E - E_r, 0) \dots\dots (1)$$

ここで、 $\nabla = (\partial/\partial x, \partial/\partial x)$, C_g : 群速度, \vec{n} は単位波向きベクトル, E は波のエネルギー, E_r は再生領域における波のエネルギーである。また、彼らは碎波条件として次式を用いている。

$$\frac{H_b}{h_b} = \frac{\tanh k_b h_b}{k_b h_b} \left\{ 1.07 - 0.59 \exp\left(-8.6 \frac{h_b}{L_0}\right) + 2.59 \tan \beta \exp\left[-15.1 \left(\frac{h_b}{L_0}\right)^{1.5}\right] \right\} \dots (2)$$

H_b は相当線形波の碎波波高, h_b は碎波水深, L_0 は沖波波長, $\tan \beta$ は海底勾配である。また、エネルギー減衰係数 K_b を斜面勾配 $\tan \beta$ にほぼ比例する係数として次式で提案している。

$$K_b = \frac{5}{2} \cdot \frac{\gamma_s^2 \tan \beta}{\gamma_s^2 - \gamma_r^2} \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 γ は全水深 d で除した波高 H_{rms} を表し, γ_r は一様水深部における波高全水深比の収束値, また γ_s は次式である。

$$\gamma_s = \gamma_r + 4 \tan \beta = 0.3 + 4 \tan \beta \dots\dots\dots (4)$$

Surface roller のエネルギー E_{sr} は次式で定義される。

$$E_{sr} = \frac{\rho S_{sr} C^2}{2L} = \frac{\rho S_{sr} C}{2T} \dots\dots\dots (5)$$

S_{sr} は一波長あたりの Surface roller の断面積, T は波の周期である。また、Surface roller の変形は以下のエネルギー平衡方程式にしたがう。

$$\frac{1}{2} \nabla \cdot (EC_g \vec{n}) + \nabla \cdot (E_{sr} C \vec{n}) = -\frac{K_{sr}}{h} E_{sr} C \dots\dots\dots (6)$$

田島・Madsen (2005) は波の不規則性を考慮するため、Rayleigh 分布を仮定し、 $\xi_b = H_b/H_{rms}$ として式 (1) を以下のように書き換えて用いている。

$$\nabla \cdot (EC_g \vec{n}) = -\frac{K_b C_g}{d} \exp\left(-\xi_b^2\right) \left[E(1 + \xi_b^2) - E_r\right] \xi_b \dots (7)$$

(3) 数値モデルの改良

3章で検討したように、リーフ上の波の変形は全水深で無次元化した波高と深く関係している。本研究では、Battjes・Janssen (1978) のボアモデルが波高の3乗に比例することを参照しつつ式 (3) を次式のように改良した。

$$K_b = \frac{5}{2} \cdot \frac{\gamma_s^2 \tan \beta}{\gamma_s^2 - \gamma_r^2} \alpha \gamma_m \dots\dots\dots (8)$$

ここで、 γ_m は各地点における波高 H_{rms} と全水深 d の比であり、また α は h を静水深, L を波長とすると概ね $\alpha = 25h/L$

となる。なお、式 (4)、式 (8) の γ_r は規則波実験の結果から0.28を用いた。

ここでは、急勾配斜面の条件をそのまま用いると波高を過大に評価する可能性があるため、規則波の実験結果より碎波条件を検討した。本研究では、エネルギー平衡方程式を用いることから、進行波としての碎波限界を評価する必要がある。リーフエッジ前面では重複波が形成されるものの、リーフエッジにおける碎波によって水塊が進行波的にリーフ上に投げ出される様子が目視観察されたこと、および基礎式である式 (7) との適合性を考え、式 (2) で与えられる田島・Madsenの碎波限界式を援用した。なお、急斜面上での碎波の開始が適切に評価できれば、それ以外は海底勾配のないリーフ上での進行波性の波の碎波条件を考えればよいので、ここでは海底勾配の上限を与えることで便宜的に評価した。図-5はその結果である。実験データは必ずしも最大波高を捉えきれていないことを勘案し、ここでは海底勾配の最大値を1/5とすることにした。

(4) 数値計算結果

図-6および7に式 (7) および式 (6) を用いた不規則波の計算結果と実験結果の比較を示す。ここでは、非線形性の最も顕著な $T_{1/3} = 1.8s$ の条件について示した。これらの図には波高分布と併せて計算される wave set-up について比較した結果も示した。リーフエッジより沖側では実験データに本モデルでは対象としていない反射波の成分が含まれるため計算値との差異が生じているが、本研究で対象とするリーフ上では全体的に計算結果と実験結果の対応は良好である。ただし、潮位の低いケースでは波高については実験結果との対応がかならずしも良いわけではない。また、wave set-up についてはいずれのケースもリーフエッジからの立ち上がりの部分の対応が不十分である。これは、潮位の低いケースはリーフエッジ付近でバックウォッシュが見られたが (関本・中嶋, 2012) その影響が十分にモデルに反映されていないためと考えら

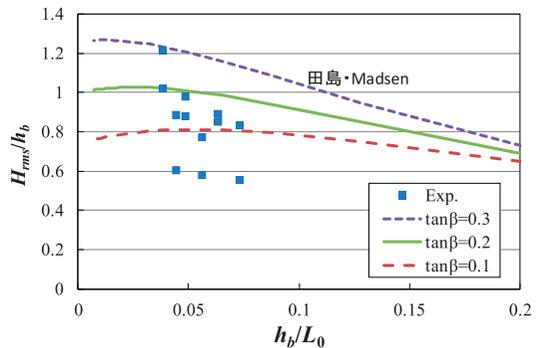


図-5 田島・Madsen (2005) の碎波指標と実験結果との比較 (tan β = 0.1, 0.2, 0.3)

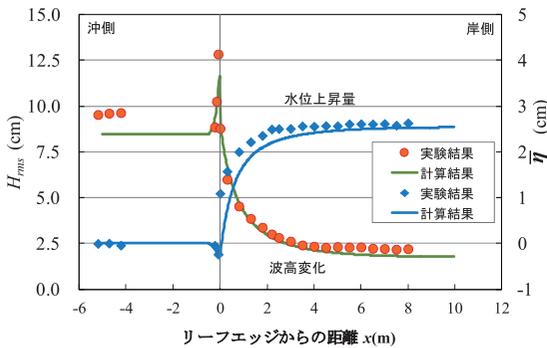


図-6 波高変化と平均水位変化の実験値と計算値の比較 (不規則波: $h=53\text{cm}$, $H_{rms}=8.5\text{cm}$, $T_{1/3}=1.8\text{s}$)

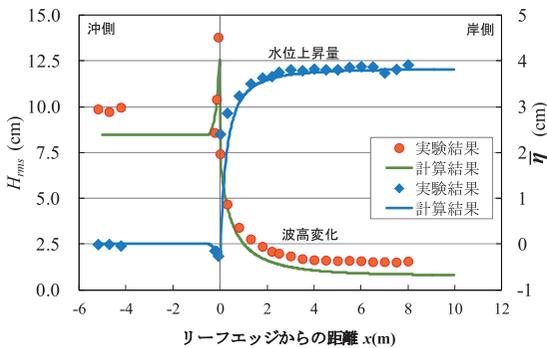


図-7 波高変化と平均水位変化の実験値と計算値の比較 (不規則波: $h=50\text{cm}$, $H_{rms}=8.5\text{cm}$, $T_{1/3}=1.8\text{s}$)

れる。バックウォッシュの影響については、渦の評価も含め今後の課題であるとともに、他の実験との比較により式 (8) で示された碎波減衰係数の精度を高める必要がある。

5. おわりに

水理模型実験結果をもとにリーフ上の波の特性を明らかにし、リーフ上における波の変形を評価する計算手法として、田島・Madsen (2005) のモデルを改良したもの

を提案した。本研究によりリーフ上の波の変形について、碎波の物理過程をある程度反映したモデルが構築できた。ただし、碎波限界条件やバックウォッシュの影響など検討の不十分なところもあり、これについては今後の課題である。

謝辞: 本研究は建設技術研究開発助成制度 (国土交通省) の協力を得ました。ここに記して関係各位に謝意を表します。

参考文献

- 小竹康夫・荒木進歩・松村章子 (2010): リーフ上の波浪変形に対する数値波動水路の適用性検討, 海洋開発論文集, 第26巻, pp.321-326.
- 関本恒浩・中嶋さやか・片山裕之・高橋研也 (2011): 急勾配リーフ地形における碎波現象と実務に向けた位相平均型波浪変形モデル, 土木学会論文集B2 (海岸工学), Vol.67, No.2, pp.I_11-I_15.
- 関本恒浩・中嶋さやか (2012): 急勾配斜面を有するリーフ地形における wave set-up と波の変形に関する実験的研究, 土木学会論文集B3 (海洋開発), Vol.68, No.2 (投稿中)
- 高橋研也・片山裕之・関本恒浩・青木健次・茅根創・磯部雅彦 (2011): サンゴ礁島形成に及ぼす波・流れ・礫供給の影響に関する基礎的研究, 土木学会論文集B2 (海岸工学), Vol.67, No.2, pp.I_636-I_640.
- 田島芳満・Madsen, O. S. (2005): Surface Rollerによる影響を考慮した戻り流れの鉛直分布のモデリング, 土木学会論文集, No.803/II-73, pp.133-144.
- 平山克也・平石哲也 (2005): 平面2次元ブシネスクモデルによる碎波・遡上計算法の開発と現地適用, 海岸工学論文集, 第52巻, pp.11-15.
- 本多和彦・間瀬 肇 (2006): 入・反射波の干渉を考慮した周波数領域波浪変形予測モデル, 土木学会論文集B, Vol.62, No.3, pp.284-293.
- 中嶋さやか・関本恒浩・片山裕之・高橋研也 (2011): 急勾配リーフ地形におけるリーフ上の波の変形に関する実験的研究, 土木学会論文集B3 (海洋開発), Vol.67, No.2, pp.I_244-I_249.
- Battjes, J. A. and J. P. F. M. Janssen (1978): Energy loss and set-up due to breaking of random waves, Proc. of 10th International Conference on Coastal Eng., pp.569-587.
- Dally, W. R., R. G. Dean and R. A. Dalrymple (1985): Wave height variation across beaches of arbitrary profile, J. Geophysical Research, Vol. 90, No. C6, pp.11917-11927.