

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

Wave breaking on the reef with steep forereef slope
 and wave deformation model based on energy balance equation

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

Hydraulic model tests of wave deformation on the reef with steep forereef slope by using irregular waves were conducted. Two types of the reef topography were inspected. It is confirmed that wave deformation near the reef has very strong nonlinearity near the reef edge. Hydraulic jump at the wave front in times of buckrush and wave breaking in times of uprush coexist at the reef edge. Numerical model based on wave energy balance model developed by Takayama et al. (1991) was modified in order to estimate extreme wave condition inside and outside the reef. The comparison of the numerical simulation result with the experimental one demonstrates that Takayama's model improved in this study provides very good agreement with the experimental data.

1. はじめに

リーフ地形に代表される急勾配斜面を有する地形に波浪が入射する場合、碎波を含む非常に非線形性の強い現象がみられる(佐藤ら, 1985; 津嘉山ら, 1989). 特に設計波のような非常に大きな波浪がリーフ上に入射する際には、リーフエッジの干出など極めて非線形性の強い波浪場となっており(例えば, 中嶋ら, 2011), 数値波動水路のような高精度波浪場解析法であっても、このような現象を精度よく評価することは難しい. また、ステップ地形に近いリーフ地形においては、ブシネスク方程式では減衰定常波が考慮できないため、このような地形への適用には理論的に問題がある. 一方、波をエネルギー表示した場合、かなり非線形性が強い領域でも、線形理論に基づくエネルギー評価によって精度よくエネルギーの変化を評価できることが知られている(Dibajiniaら, 1988). したがって、リーフ斜面からの反射波の考慮はできないものの、位相平均モデルであるエネルギー平衡方程式を用い、適切に碎波変形を考慮することによって、設計波級の波浪変形に対し計算精度を確保しつつ実務に耐え得る計算が可能であることが期待できる.

本研究では、岸側にリーフを有する急勾配地形を対象に、不規則波を用いた基本的な断面波浪変形実験を実施し、リーフエッジ周辺の碎波現象に対し、エネルギー平衡方程式を基本とした既往の研究成果を修正・援用した波浪変形評価モデルを提案するものである.

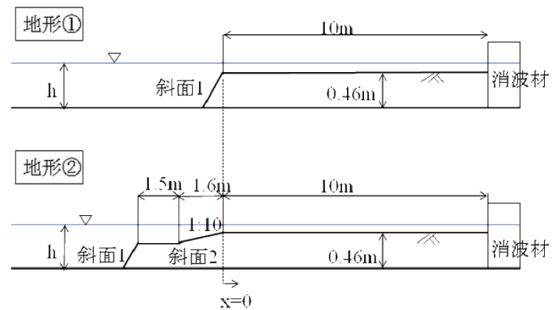


図-1 実験に用いたリーフ地形

表-1 地形条件

地形	斜面1 勾配	斜面2 勾配	一様水深部地盤高(cm)		
			-50.0	-20.0	-4.0
地形①	1:0.5 1:1 1:3	—	-50.0	-20.0	-4.0
地形②		1:10			

2. 水理模型実験

(1) 実験概要

リーフ地形を用いた水理模型実験を二次元断面水槽(長さ50m, 幅0.6m, 高さ1.2m)にて実施した. 対象としたリーフ地形は中嶋ら(2011)と同様に、一段リーフ地形(地形①)と二段リーフ地形(地形②)の2種類とした. 図-1に実験に用いたリーフ地形の断面図を示す. 沖側の一様水深部から続く斜面1の勾配を1:0.5, 1:1, 1:3の3種類とした. また、地形②の二段リーフの場合、岸側の一様水深部に続く斜面2は実験を通して1:10勾配に固定した. 一様水深部の地盤高は、沖側で-50cm, リーフ上で-4cm, 地形②の場合斜面1と斜面2の間に位置す

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 フェロー 博(工) 五洋建設(株)技術研究所
 4 フェロー 修(工) 五洋建設(株)技術研究所

表-2 実験条件

水深 (cm)	リーフ上水深(cm)	潮位 (cm)	有義波高 (cm)	有義波周期 (s)
50.0	4.0	+0.0 (L.W.L.) +3.0 (H.W.L.)	2.0	1.0
			4.5	1.3
			12.0	1.4
				1.6
				1.8



写真-1 実験状況 (地形①, 勾配1:1, $H_{1/3}=12\text{cm}$, $T_{1/3}=1.6\text{s}$, L.W.L.)

る一様水深部の地盤高は-20cmとした。なお、表-1に地形盤条件をまとめた。

実験ではリーフ周辺の水位変動を容量式波高計を用いて計測した。容量式波高計の配置も、中嶋ら(2011)と同様であり、斜面1の法尻より約1波長沖に3本、リーフ上に50cmの間隔で18本設置した。また、斜面1と斜面2にはそれぞれ法尻と法肩および斜面上に斜面を3等分する場所2か所に容量式波高計を設置するとともに、地形②では、斜面1と斜面2で挟まれる一様水深部にも3本の容量式波高計を配置した。

表-2に実験条件を示す。模型縮尺は1/100程度を考え、潮位をL.W.L. (+0.0cm)とH.W.L. (+3.0cm)の2ケースとし、それぞれBretschneider-光易型スペクトルを有する5種類の不規則波を用いた。

(2) 実験結果

水理模型実験により急勾配斜面を有するリーフ地形周辺の不規則波の波浪変形は、以下のような現象であることが明らかとなった。

外洋における設計波クラスの波のように非常に大きな波浪がリーフ上に入射する際には、引き波時には、リーフエッジが干出に近い状態になり、波の谷に伴う沖向き流れが斜面により強化されフロント部分に跳水現象が生じる。引き波時にフロント部で生じた跳水による渦が押し波時に岸側に運ばれるとともに、波自体が碎波により強い渦を発生させ、この渦と跳水による渦とが重畳した。このようにリーフエッジ周辺では非常に非線形性の強い波浪場となることを確認した。写真-1は不規則波群中の波高の大きな波が急勾配斜面に入射する様子を示したものであり、引き波として作用している例を示したもので

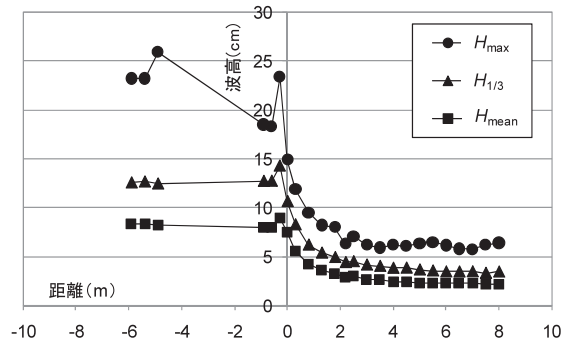


図-2 代表波高の空間分布の例 (地形①, 勾配1:3, $H_{1/3}=12\text{cm}$, $T_{1/3}=1.6\text{s}$, H.W.L.)

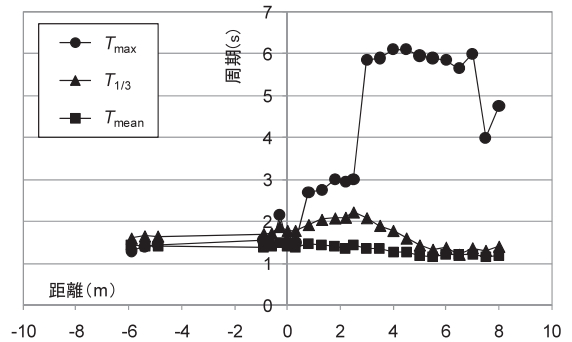


図-3 代表波周期の空間分布の例 (地形①, 勾配1:3, $H_{1/3}=12\text{cm}$, $T_{1/3}=1.6\text{s}$, H.W.L.)

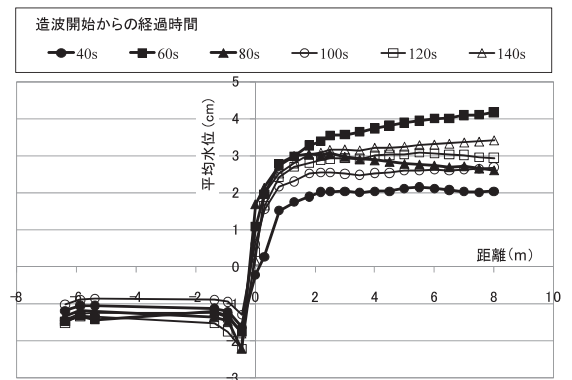


図-4 平均水位の空間分布の例 (地形①, 勾配1:3, $H_{1/3}=12\text{cm}$, $T_{1/3}=1.6\text{s}$, H.W.L.)

ある。フロント部分には斜面からの波の谷に伴う沖向き流れによって跳水が発生し、激しく気泡が発生している様子がわかる。

不規則波の代表波高 (最高波高 H_{max} , 有義波高 $H_{1/3}$, 平均波高 H_{mean}) の空間分布を図-2に、代表波周期 (最高波周期 T_{max} , 有義波周期 $T_{1/3}$, 平均周期 T_{mean}) の空間分布を図-3に示す。リーフ周辺の波浪変形において代表波高に極端な空間的変動は見られず最高波高も含め安定した波浪統計量が得られた。代表波周期については、最高波

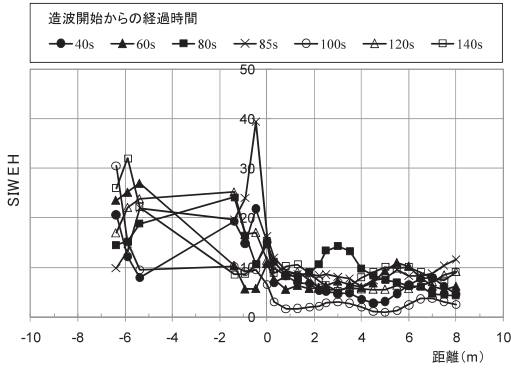


図-5 SIWEHの空間分布の例
(地形①, 勾配1:3, $H_{1/3}=12\text{cm}$, $T_{1/3}=1.6\text{s}$, H.W.L.)

周期が長周期波の影響を受けて変動が大きくなっているが、それ以外については比較的安定していた。リーフ上ではリーフエッジから概ね1波長程度で砕波は完了するが、中嶋ら(2011)が規則波実験で示した、波の分裂に起因するリーフエッジから2波長程度の区間における周期の特徴的な空間変化は見られなかった。すなわち、波の分裂については波の不規則性のためあまり顕著とはならなかった。

図-4に波群のスケールより長い平均水位の空間分布を示す。リーフ延長が10mと長かったことから、リーフ上の平均水位が安定するまでに数波群程度の時間を要するが、それ以降は時間的・空間的に比較的安定していた。SIWEH (Smoothed Instantaneous Wave Energy History; 例えば間瀬ら, 1985) の時間空間分布を図-5に示す。リーフ上に着目すると、波群としては時間的、空間的に変動することがわかる。また、これに対応して波群スケールの平均水位は時間的・空間的に変動するダイナミックな現象であると言える。このリーフ上における変動は、長周期波成分に起因するものと考えられる。

3. エネルギー平衡方程式による数値計算

水理模型実験により急勾配斜面を有するリーフ地形周辺の波浪変形は、非常に非線形性の強い現象であることはすでに述べた。小竹ら(2010)は、数値波動水路を用いてリーフ地形における波浪の変形を調べ、津嘉山ら(1989)のデータと比較しているが、リーフ前面の海底勾配が1:10と比較的緩いにもかかわらず、再現性は十分ではない。また、平山(2007)、Nowgu・Demirbilek(2008)は、ブシネスク方程式をリーフ地形に適用し、計算の妥当性を示しているものの、これらはリーフ前面勾配が比較的緩い条件における検討結果であり、本研究で対象とするリーフ前面勾配が急勾配の場合は、前述のようにブシネスク方程式では減衰定常波を考慮できないため、ブシネスク方程式本来の解析精度の良さによって逆に大き

な誤差を生む可能性がある。本研究ではこれらを踏まえ、位相平均モデルであるエネルギー平衡方程式を用いて適用性の検討を行った。

(1) 砕波モデル

エネルギー平衡方程式は高山ら(1991)のモデルを用いた。

$$\frac{d(C_g E)}{dx} = -\frac{\varepsilon_b E C}{\bar{c}} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 E は波のエネルギー、 C_g は波の群速度であり、 ε_b は単位時間内に砕波によって失われるエネルギーの散逸率を表す。高山ら(1991)は、砕波後も波高はRayleigh分布に近いと仮定し、水深に対応した砕波限界波高を超える部分が砕波するとして、各計算格子におけるエネルギー散逸率を式(2)で評価した。

$$\varepsilon_b = \frac{\int_0^{H_{bi}/H_{1/3}} P_E(H_S^*) dH_S^* - \int_0^{H_{bo}/H_{1/3}} P_E(H_S^*) dH_S^*}{\int_0^{H_{bi}/H_{1/3}} P_E(H_S^*) dH_S^*}$$

$$= 1 - \frac{\left\{1 + \frac{\pi}{4}(\alpha H_{bo}/H_{1/3})^2\right\} \exp\left[-\frac{\pi}{4}(\alpha H_{bo}/H_{1/3})^2\right]}{\left\{1 + \frac{\pi}{4}(\alpha H_{bi}/H_{1/3})^2\right\} \exp\left[-\frac{\pi}{4}(\alpha H_{bi}/H_{1/3})^2\right]} \dots\dots\dots (2)$$

$$H_S^* = H/H_{1/3}, \quad \alpha = H_{1/3}/\bar{H} \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 H_{bi} および H_{bo} は計算対象格子に入る位置および出る位置における砕波波高であり、次式で与えられる。

$$H_{bo} = H_b + \delta H_b/2 \dots\dots\dots (4)$$

$$H_{bi} = H_b - \delta H_b/2 \dots\dots\dots (5)$$

なお、砕波波高 H_b と波が δx 進む間の砕波波高の変化率 δH_b は次式で表される。

$$H_b = AL_0 \left\{1 - \exp\left[-1.5 \frac{\pi \bar{h}}{L_0} (1 + 15\beta^{4/3})\right]\right\}, (\beta \geq 0) \dots\dots (6)$$

$$H_b = AL_0 \left\{1 - \exp\left[-1.5 \frac{\pi \bar{h}}{L_0}\right]\right\}, (\beta < 0) \dots\dots\dots (7)$$

$$\delta H_b = -1.5\pi\beta\alpha(1 + 15\beta^{4/3}) \exp\left[-1.5 \frac{\pi \bar{h}}{L_0} (1 + 15\beta^{4/3})\right] \delta x, \quad (\beta \geq 0) \quad (8)$$

$$\delta H_b = 0, \quad (\beta < 0) \dots\dots\dots (9)$$

ここで、 L_0 は沖波波長、 β は海底勾配、 \bar{h} は計算格子中央における平均水深である。

本手法は、海底勾配として計算格子位置における勾配をとるため、一樣水深では $H_{bi}=H_{bo}$ となり、リーフ上では

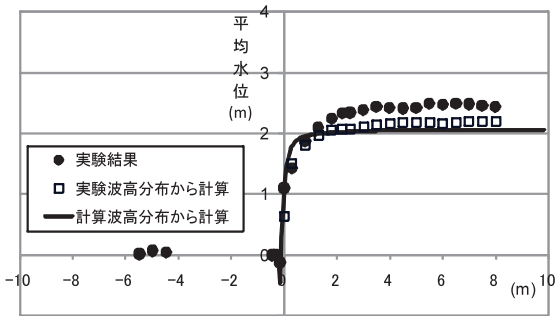


図-6 平均水位の計算値と実測値の比較
(地形①, 勾配1:3, $H_{1/3}=12\text{cm}$, $T_{1/3}=1.6\text{s}$, H.W.L.)

エネルギー散逸を正確に考慮することが難しい。

(2) 数値計算の方法

ここでは、二つの方法を提案する。まず、一様水深部でも碎波に伴うエネルギーの消費が継続したのち波が再生すること、リーフ上での水位上昇の影響が考えられることを考慮し、高山ら(1991)による碎波変形モデルの修正を提案する。高山ら(1991)らは碎波波高 H_b を求める際に計算対象位置における局所的な海底勾配を用いている。しかしながら、波の変形の水平スケールは沖波波長で1波長程度であることから、海底勾配として局所勾配ではなく計算対象位置から沖側に沖波1波長間の平均勾配を考えるものである。二つ目は、碎波後のセットアップの影響を考慮するため、波浪場を次に示す二段階で評価する評価法を提案した。まず第一段階として、上記碎波モデルによる波浪の変形計算と海浜流の数値計算による平均水位の変化量の評価を行う。第二段階として第一段階で求められた平均水位の変化量を含めた水深を実水深とみなし、再度上記波浪変形モデルにより波浪場を評価するものである。

(3) 実験結果との比較

図-6は第一段階で計算した波高分布から求められる wave setup の計算結果を確認したものであり、実測された波高値から同様に wave setup を計算したのも併せて示した。2種類の計算結果は概ね一致するものの、ケースによって実験結果をやや過小あるいはやや過大に評価した。ただし、ここに示した結果は、磯部ら(1988)の計算と同程度の精度を有するものと考えられる。なお、実験ではリーフ上での setup に要した水のボリュームだけ沖側の水位が低下したため、数値解析では初期水深から沖側の水位低下分だけ水深を下げて計算を行った。

本研究で提案した2つの手法について実験結果と比較した結果を図-7および図-8に示す。また、図には高山らの方法(1991)による計算結果も同時に示した。

高山らの方法(1991)では、局所海底勾配を用いて碎波限界波高を評価しているため、リーフ上のような平坦

な場所では碎波減衰が見られず、実験データと大きく乖離した結果となっていることがわかる。一方、碎波波高の評価の際に1波長平均の海底勾配をとったもの(本モデル-1)とさらに平均水位の上昇の効果を考慮したもの(本モデル-2)はリーフ上でも碎波減衰による波高変化が見られることがわかる。これらの結果を全体的にみると水位上昇の影響を考慮しない方が実験データに対する適合度が高い。これは、津嘉山ら(1989)が指摘したリーフ上の波高は平均水位の上昇量に無関係であることに符合する結果となった。

詳細に結果をみると1段リーフ地形の条件に対して、リーフ前面勾配が1:1よりも急な条件では、計算はリーフエッジにおける波高を過小評価している。これは、リーフエッジ付近における反射波の影響と考えられる。すなわち、エネルギー平衡方程式では、斜面からの反射を考慮できないのに対し、リーフ前面の勾配が急な場合はその影響が顕著となったためと考えられる。このことはリーフ前面勾配が1:1よりも急な条件では、沖側一様水深部における波高が入射条件よりも大きくなっていることから裏付けられる。

リーフ上の水深が小さいケースでは、計算値のほうが実験値よりリーフエッジ近傍の波高減衰が急激に生じていることがわかる。これは、2段リーフ地形の条件でも若干見られた。その理由として、リーフ上の水深が浅い場合、リーフ前面で発生した跳水による渦と碎波による渦が重畳し、大規模な乱れとしてエネルギーが増加した可能性が考えられる。また、このような乱れの大きい場所では水位変動自体も正確に計測できていない可能性もあり、波高の計測精度も含め今後詳細な検討が必要である。

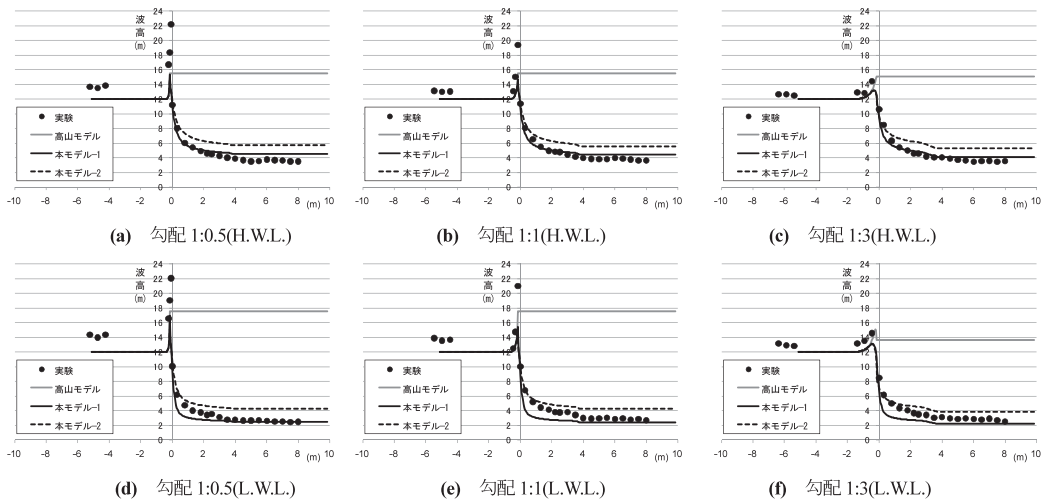
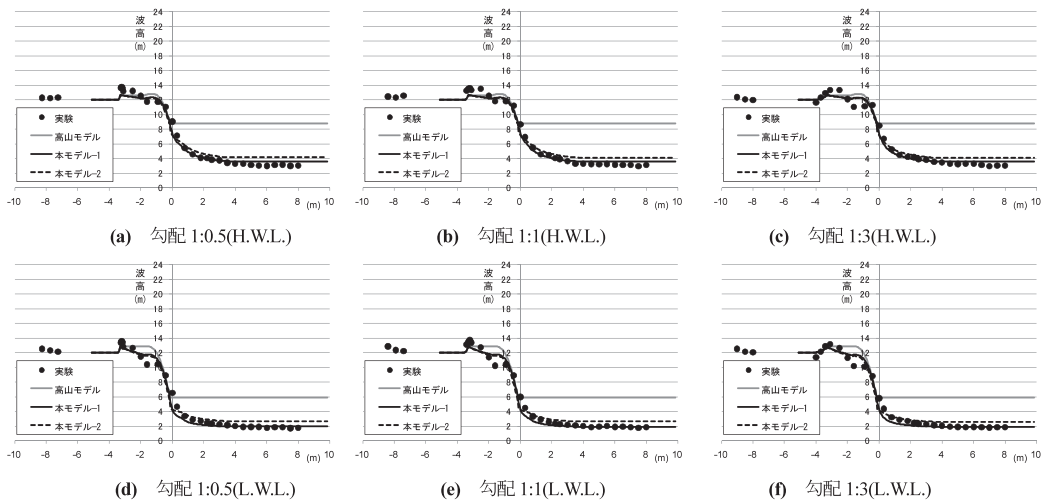
しかしながら、本研究で提案した高山ら(1991)の手法を修正する方法は、リーフ周辺の波浪変形を非常に精度よく再現できており、上記のような解決すべき課題はあるものの、実務への適用には十分と言える。

4. おわりに

本研究では、急勾配斜面を有するリーフ周辺の波浪変形に関する水理模型実験を実施するとともに、高山ら(1991)の手法を修正したエネルギー平衡方程式による波浪場評価を行った。

水理模型実験ではリーフ周辺の波浪変形は非常に複雑であり非線形性の非常に強い現象であることが確認できた。このような波の場では従来計算精度が高いと言われていた数値波動水路やブシネスク方程式などの波動を表現する方程式系では、現象を十分に再現できない可能性があることを指摘した。

本研究で提案した波浪変形評価手法のうち、リーフ上の平均水位の影響を考慮しないモデル、すなわち1波長

図-7 1段リーフ地形における波高分布の比較 ($H_{1/3} = 12\text{cm}$, $T_{1/3} = 1.6\text{s}$)図-8 2段リーフ地形における波高分布の比較 ($H_{1/3} = 12\text{cm}$, $T_{1/3} = 1.6\text{s}$)

程度の平均海底勾配により砕波波高を評価したモデルはリーフ周辺の波浪変形を極めて精度よく評価できることがわかった。ただし、リーフ上の水深が極めて浅い条件ではやや計算の再現性が十分でなく今後の課題であるが、本研究で提案した方法は実務上十分な計算精度を有していると言える。

参考文献

- 磯部雅彦・柴田洋三・泉宮尊司・渡部 晃 (1988)：不規則波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，pp.192-196。
- 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，Vol.26，pp.321-326。
- 佐藤道郎・羽田好勝・中江周作・吉松秀雄 (1985)：ステップ型リーフ上での波の変形に関する実験的研究，第32回海

- 岸工学講演会論文集，pp.85-89。
- 高山知司・池田直太・平石哲也 (1991)：砕波および反射を考慮した波浪変形計算，港湾技術研究所報告，第30巻，第1号，pp.21-67。
- 津嘉山正光・仲座栄三・我喜屋邦浩 (1989)：リーフ上の波の変形に関する研究，海岸工学論文集，第36巻，pp.70-74。
- 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，(印刷中)。
- 平山克也 (2007)：ブシネスモデル (NOWT-PARI) を用いた高精度港内静穏度解析法の提案，港湾空港技術研究所資料，No.1159，90p。
- 間瀬 肇・古室健史・岩垣雄一 (1984)：伝播に伴う Wave Group 特性の変化，第31回海岸工学講演会論文集，pp.158-162。
- Dibajnia,M・磯部雅彦・渡辺 晃 (1988)：有限振幅波および微小振幅波の浅水変形の比較，第43回土木学会年次学術講演会講演概要集第2部，pp.580-581。
- Nwogu,O. and Z. Demirbilek(2008)：Nonlinear wave transformation and runup over fringing coral reefs, Proc. 31st ICCE, pp.242-254。