

リーフ海岸における多方向不規則波の波浪変形実験

池谷 毅* ・岩瀬浩二**・漆山 仁***
滝本邦彦****・秋山義信*****

1. 序 論

リーフ海岸は、砕波、平均水位上昇、長周期水位変動、海浜流等の様々な現象が通常の海岸に比べて大きく複雑に出現するため、波浪条件を予測することが難しい場所である。リーフ地形による波浪の変形については、高山ら (1977) が 2 次元造波水路において一方向不規則波を用いて水理実験を行い、その結果をもとに評価方法を提案した。この評価方法における係数の選び方について、江頭ら (1985)、津嘉山ら (1989) は、現地計測結果をもとに検討を加えている。その後、現地計測に基く研究 (例えば日野ら (1989)) や、リーフ状の地形を人工的に海岸線近傍に建設し、波浪場、海浜流場を制御しようとする研究 (例えば仲座ら (1997)) が数多くなされてきている。

我が国では、高山ら (1977) が提案した方式が、設計業務に用いられてきた。しかしながら、実業務においては、この方式が導かれる元となった 2 次元実験の条件と、波浪条件、地形条件が大きく異なるリーフ海岸において、構造物の設計/施工を行なう場合が少なくない。本研究では、こうした背景のもとに、周波数スペクトルの尖鋭度や方向集中度等の入射波条件、およびリーフフェースの勾配、リーフロックの有無、汀線の有無 (堡礁か環礁) 等の地形条件の違いがリーフ内の波浪変形に与える影響を、実験的に検討する。リーフ地形上の波浪変形実験としては、従来ほとんど例が無い多方向不規則波造波装置を用いた平面実験と断面実験の結果から明らかにする。

2. リーフ地形海岸の部位名称

リーフ海岸は、サンゴ虫の石灰質骨格や石灰藻が堆積して生じた岩礁に特徴がある暖かい海の浅い部分に見られる地形である。我が国では沖繩諸島、南鳥島、沖の鳥島等に見られる。リーフの形状は、場所により大きく異なることが知られている。Gourlay (1996a, 1996b) は、世界各地に見られるリーフ海岸の断面地形を紹介し、同

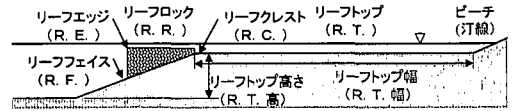


図-1 リーフ地形に関する用語

時にリーフ地形の各部分の名称を定義している。ここでは、この定義を参考に、図-1 に示す名称を用いる。

3. 実験条件・実験ケース

3.1 地形条件

実験に用いた主要な地形の条件を表-1 に示す。これらの地形は、我が国のリーフ海岸の海底データを参考に決定した。リーフフェース勾配、リーフロックの有無、ビーチの有無を実験パラメータとして変化させている。

3.2 海象条件

海象条件を表-2 に示す。実験波は、周波数スペクトルに JONSWAP 型を、方向関数に光易型を用いた。実験では、有義波高、有義周期、周波数スペクトルの尖鋭度パラメータ (γ)、方向集中度パラメータ (S_{max})、静水位を変化させている。

4. 実験方法

4.1 実験装置

平面実験は、多方向不規則波造波装置を有する平面水槽 (長さ 58 m × 幅 20 m × 深さ 1.6 m) を、断面実験は一方向不規則波造波装置を有する造波水路 (長さ 60 m × 幅 0.7 m × 深さ 1.5 m) を用いて行った。実験では、水槽および水路内にリーフ地形モデルを設置した後、多数の点での水位変動を容量式波高計で計測した。平面実験の計測点のセットアップを図-2、図-3 に、断面実験のセットアップを図-4 に示す。

なお、平面実験は、両岸に反射壁を設けており、多方向不規則波の造波信号の作成は、Dalrymple (1989) の方法に従っている。波浪条件を水槽横断方向で一様とする位置は、リーフ模型の法尻付近とした。

4.2 データ処理

得られた水面変動データを、平均成分、長周期成分と

* 正会員 工博 鹿島技術研究所 グループ長
 ** 正会員 鹿島技術研究所 主任研究員
 *** 正会員 鹿島建設総事業本部
 **** 正会員 工修 鹿島土木設計本部 設計長
 ***** 正会員 工修 鹿島土木設計本部 設計主査

表-1 地形条件一覧

地形条件	R.F. 勾配	R.T.高 (m)	R.T.幅 (m)	ビーチ勾配	R.R.の有無
1	1:8	0.5	6.0	1:8	無
2	1:8	0.5	6.0	1:8	有
3	1:8	0.5	6.0	無し	無
3	1:5	1.0	11.0	1:20	無
4	1:2	1.0	11.0	1:20	無

表-2 一様水深部の波条件一覧

海象条件	R.T.上水深 (cm)	H_0 (cm)	T_0 (s)	S_{max} 目標値	γ 目標値
1	2.0	12.7	1.97	40	1
2	2.0	15.5	1.84	40	1
3	2.0	16.2	1.96	40	1
4	2.0	15.9	2.05	40	7
5	2.0	15.9	2.11	∞	1
6	2.0	16.3	2.08	∞	7
7	2.0	14.3	2.17	40	1
8	2.0	16.3	1.99	40	1
9	4.0	16.3	2.01	40	1
10*	1.0~6.0	6.6~19.7	1.31~2.39	∞	1

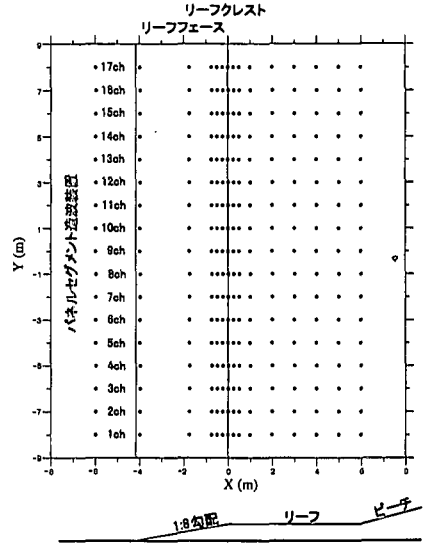


図-2 平面実験セットアップ (地形条件-1)

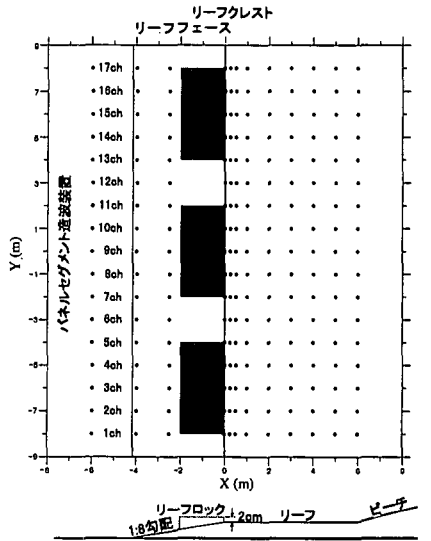


図-3 平面実験のセットアップ (地形条件-2)

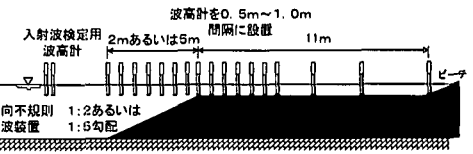


図-4 断面実験のセットアップ

短周期成分に分離した。長周期成分は周期5秒以上の成分とした。生データ、短周期成分、長周期成分に対してゼンログダウンクロス法による統計処理、およびスペクトル解析を行った。平均水位、有義波高、有義周期、最大波高、長周期波有義波高、最大波頂高、反射率等について整理した。以下、平均成分には mean, 長周期成分には L, 短周期成分には S のサフィックスを記号に付加する。

5. 実験結果および考察

5.1 入射波スペクトル形状の影響

計測された生データの有義波高と有義周期の水槽中央の岸沖方向断面 (図-2 における ch 9) の分布について考察する。図-5 に有義波高 ($H_{1/3}$) と平均水位上昇量 (η_{mean}) の岸沖方向の分布を示す。これをみると、多方向不規則波と一方向不規則波とで、有義波高、平均水位上昇量には大きな違いは見られない。また、同図中の実線は、勾配を 1:8 と考えて高山ら (1977) の方法で計算した有義波高分布である。これをみると、高山らの方法でもかなり良く有義波高分布を計算できることがわかる。

次に、図-6 に有義周期の分布を示す。これをみると、リーフ内の有義周期は、リーフクレストから汀線に近づくにつれて増大することがわかる。長周期化する度合いは、 S_{max} が小さいほど、また γ が大きいほどその割合が大きいことがわかる。すなわち、入射波の特性として、

非線型性が強いほど、リーフ内の有義周期を長周期化させる度合いが大きいことがわかる。

このことをより明確に確かめるために、図-7, 図-8 に、一様水深部、リーフクレスト、ビーチ部で計測され

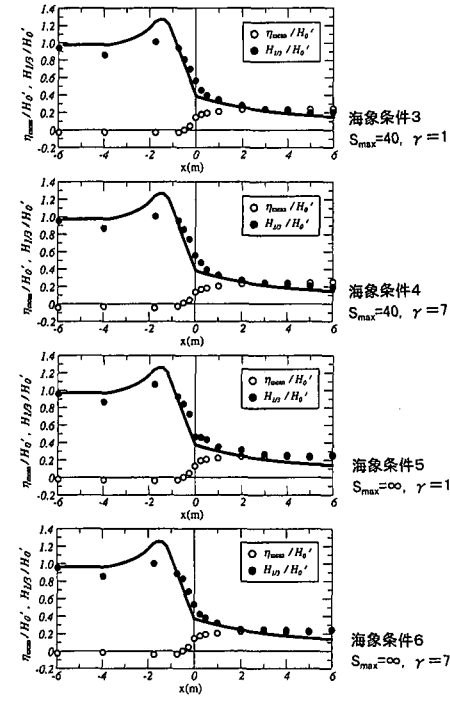


図-5 有義波高、平均水位上昇の空間分布

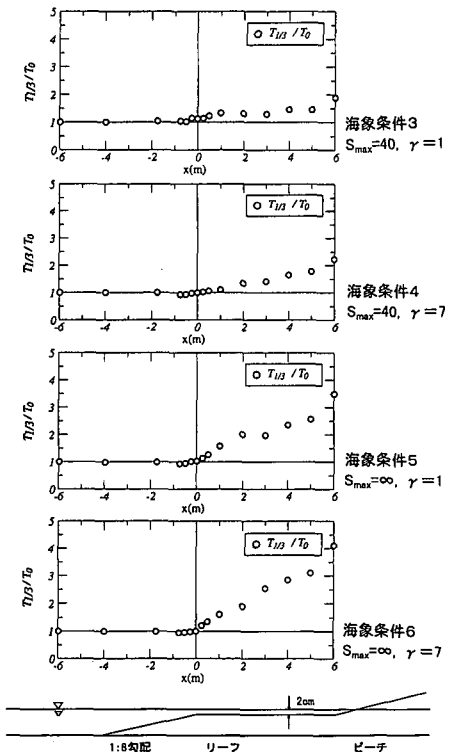


図-6 有義周期の空間分布

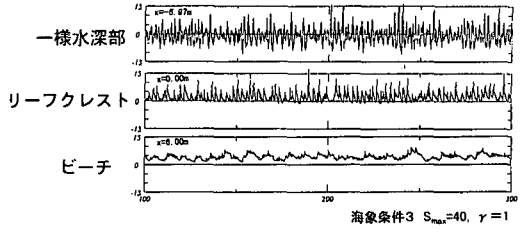


図-7 水面波形時系列 (海象条件3, 地形条件1)

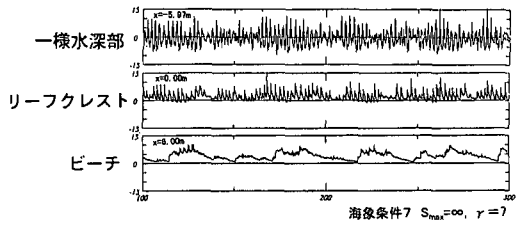


図-8 水面波形時系列 (海象条件6, 地形条件1)

た水面変動の時系列を示す。これを見ると、方向スペクトル形状の差異が、リーフ内で計測された水面波形、に大きく影響することがわかる。海象条件6 (一方向不規則波 ($\gamma=7$)) の場合には、水位が上昇するときの波面勾配が大きく、日野ら (1989) の報告した Bore 状サーフビートに似た波形となっている。こうした波面勾配の差異は、例えば波力等についてもかなり大きな違いを与えると思われる。リーフ内の波浪条件を考える場合、単に入射波の有義波高と有義周期だけ与えたのでは不十分で、方向スペクトル形状を与えることが必要と思われる。

5.2 長周期成分の分布

図-9 に長周期波成分の r.m.s. 値の分布を示す。図中の計算値は、合田 (1975) のサーフビート振幅を示す式を示している。

$$\zeta_{surf} = \frac{0.01 H_0}{\sqrt{\frac{H_0}{L_0} \left(1 + \frac{h}{H_0} \right)}} \dots\dots\dots (1)$$

これより、非線型性の強いケースでは、リーフ内で実測値の方が計算値に比べて大きくなるが、多方向不規則波のケースでは、概ね合田の式で表現できることがわかる。

5.3 最大波高の分布

図-10 に最大波高と有義波高との比および長周期波成分の最大波高と有義波高との比の分布を示す。ばらつきはあるものの、最大波高と有義波高の比は概ねリーフ外で 1.6~1.8 倍、リーフ内で 1.8~2.2 倍程度の値をとることがわかる。最大波高を求める際に、有義波高の 1.8 倍と碎波限界波高の小さい方で決める場合がある (例えば高山ら (1991))。しかし、リーフクレストからリーフトップにおける最大波高は、水深から決まる碎波限界波

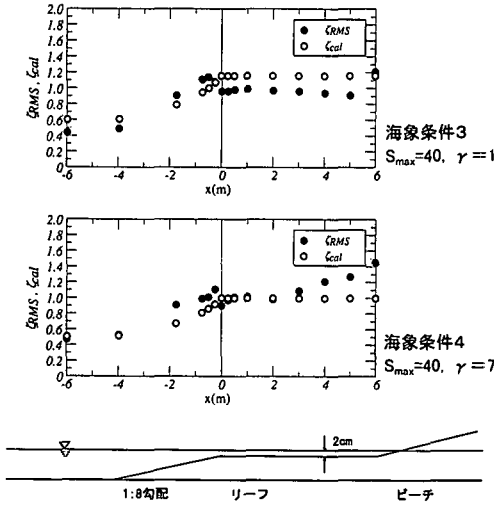


図-9 長周期成分の分布

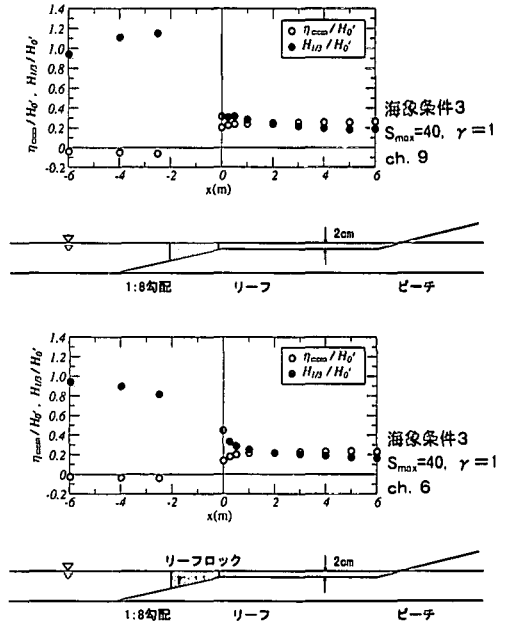


図-12 リーフロックの影響

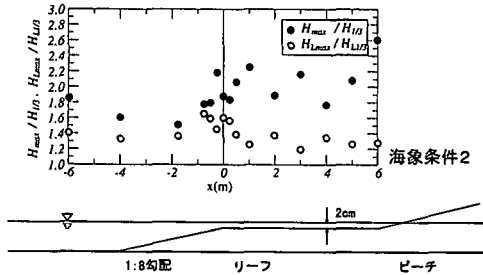


図-10 最大波高と有義波高との比

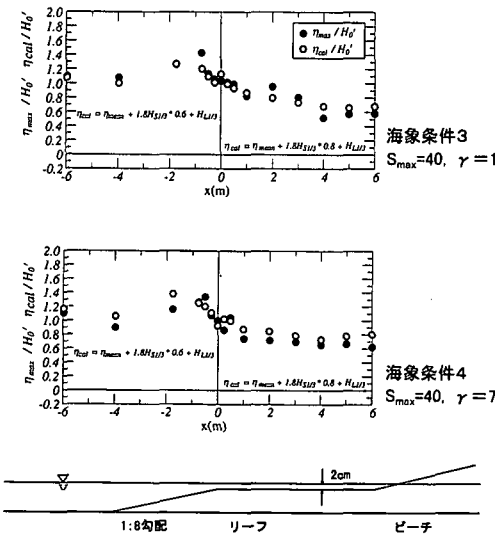


図-11 最大波頂高さの実測値と観測地

高より明らかに大きく、砕波限界波高で最大波を決定すると、過小評価となる可能性がある。また、長周期波成分の最大波高と有義波高との比は、1.4 倍程度である。

5.4 最大波頂高の概略評価

自己昇降式足場(SEP)や棧橋式の構造物をリーフ海岸に設置する際には、衝撃力の発生を抑制する意味から、床板部分には、水塊が衝突しないように床版の下端高さを決定する。この際、最大波頂高に関する情報が必要となる。

最大波頂高を評価する方法には、種々のものが考えられるが、ここでは、簡便に得る方法として、平均水位上昇量に長周期変動を加え、さらに個々波の最大波高による上昇を足し合わせる考え方をとった。すなわち、

$$\eta_{max} = \eta_{mean} + H_{L1/3} + abH_{S1/3} \dots\dots\dots (2)$$

である。ここに、 a は、有義波高と最大波高との比の値であり、ここでは、1.8を用いる。また、 b の値は、平均的な水面から波頂までの高さと波高との比の値であり、リーフクレストより沖側で0.6、リーフトップ上で0.8をとるものとした。この評価式の値(η_{mean} , $H_{L1/3}$, $H_{S1/3}$)の評価には実測値を使用)と実測結果との比較を図-11に示す。これより、各ケースとも実測値と予測値は、概ね一致しており、この評価方法は、妥当な結果を与える判断できる。ただし、この評価は、実測値をベースにしており、すべての評価を計算値から行う場合には、特に長周期変動の大きさを精度良く求めることが重要となる。これには、多方向不規則波の砕波モデルの性能が結果を大きく左右すると思われる。

5.5 リーフロックの影響

リーフロックを設置した場合(地形条件2)の有義波

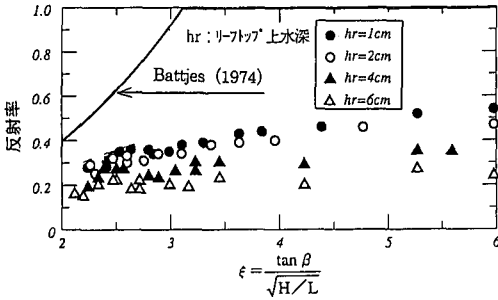


図-13 急勾配リーフからの反射率

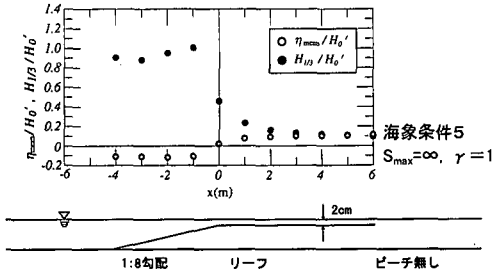


図-14 汀線の無いリーフ上の有義波高分布

高、有義周期の分布を図-12に示す。この図より、リーフロックが存在する断面(図-3のch.9)では、リーフロックからの反射波の影響でリーフ外での波高が増大し、リーフロックの間の断面(図-3のch.6)では、リーフロック間に生じる沖向きの流れの影響により、リーフフェース上での波高の減衰が沖合いから発生している。

5.6 急勾配リーフフェースの影響

リーフフェースの勾配が1:5程度より大きくなるとリーフクレストからの反射が目立つようになる。図-13に勾配1:2の場合(地形条件-5)の反射率を示している。図の横軸は、Battjes (1974)の提案した surf similarity parameter である。急勾配のリーフフェースを有するリーフからの反射率は、リーフトップ上水深が小さいほど大きくなる傾向がある。反射率の値は、一様勾配斜面からの反射率に関する Battjes (1974)の式に比べると小さくなる。

5.7 汀線の有無の影響

図-14に汀線が無い場合(地形条件3)の有義波高、平均水位上昇の計測結果を示す。この図から、汀線が無い場合のリーフ内の有義波高および平均水位上昇量は、汀線のある場合の約半分程度に低下することがわかる。

これは、仲座ら (1997)の実験結果と同一の傾向である。

6. 結 論

リーフ地形による多方向不規則波の変形に関して水理実験を行なった結果、以下の知見を得た。

入射波のスペクトル形状は、有義波高分布には影響をほとんど与えない。しかし、リーフ内の長周期水位変動の振幅は、入射波の周波数スペクトルの尖鋭度が大きいほど、また方向分散性が小さいほど大きくなる。非線型性の小さい場合は、概ね合田の式で評価することができる。汀線付近の波形は、沖波の方向スペクトル形状により、波形が大きく異なるため、リーフ海岸において海岸構造物を設計する場合、沖波の方向スペクトルを規定する必要がある。最大波頂高は、式(2)で概ね評価することができる。

参 考 文 献

江頭和彦・福田 功・岸良安治・西村達郎 (1985): リーフによる波浪変形の現地観測, 第32回海岸工学講演会論文集, pp. 90-94.
 合田良実 (1975): 浅海域における波浪の碎波変形, 港湾技術研究所報告, 第14巻, 第3号, pp. 59-106.
 高山知司・池谷直太・平石哲也 (1991): 碎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, 1号, pp. 21-67.
 高山知司・神山 豊・菊地 治 (1977): リーフ上の波の変形に関する研究, 港湾技研資料, No. 278, 32 p.
 津嘉山正光・河野二夫・仲座栄三・大城真一・福田孝晴 (1995): リーフ上の波の変形に関する研究, 海岸工学論文集, 第42巻, pp. 176-180.
 津嘉山正光・仲座栄三・我喜谷邦浩 (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.
 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, pp. 75-79.
 仲座栄三・津嘉山正光・川中匠・玉城重則・大城真一 (1997): 潜堤背後の水位水位上昇量と海浜流の制御に関する研究, 海岸工学論文集, 第44巻, pp. 755-760.
 Battjes, A.J. (1974): Surf similarity, Proc. 14 th Coastal Eng., ASCE, pp. 466-480.
 Dalrymple, R. A. (1989): Directional wavemaker theory with sidewall reflection, Jour. Of Hydr. Res., Vol. 27, No. 1, pp. 23-34.
 Gourlay, M.R. (1996a): Wave set-up on coral reefs. 1. Set-up and wave-generated flow on an idealised two dimensional horizontal reef, Coastal Engineering, Vol. 27 pp. 161-193.
 Gourlay, M.R. (1996b): Wave set-up on coral reefs. 2. Set-up on reefs with various profiles, Coastal Engineering, Vol. 28 pp. 17-55.