

複雑なリーフ地形における波浪変形

WAVE TRANSFORMATION ON COMPLICATED CORAL REEFS

福山貴子¹・秋山真吾¹・池谷毅²

Takako FUKUYAMA, Shingo AKIYAMA and Tsuyoshi IKEYA

¹正会員 工修 鹿島建設株式会社 技術研究所 (〒171-0052 東京都調布市飛田給2-19-1)

²フェロー会員 工博 鹿島建設株式会社 技術研究所 (〒171-0052 東京都調布市飛田給2-19-1)

The characteristics of wave transformation on coral reefs change complicatedly under the influence of submarine topography. This study investigated the characteristics of wave transformation when topography changes in the alongshore direction by the hydraulic model experiment and inspected the accuracy of the Boussinesq model equation used for calculation of wave transformation on complicated coral reefs.

It is found that the wave height changes complicatedly under the influence of the alongshore changes of submarine topography. The spatial distribution of long period constituent is represented by the equation for the amplitude of surf beat. The wave height distribution calculated by the Boussinesq equation gave good agreement with the value from experiment.

Key Words : wave transformation, complicated coral reefs, hydraulic model test, numerical analysis, Boussinesq model

1. はじめに

リーフ海岸における波浪特性は、海底地形の影響を受けて非常に複雑に変化する。このため、リーフ地形における波浪現象を予測することは極めて困難である。リーフ地形による波浪変形については、高山ほか¹⁾が2次元造波水路による一方向不規則波実験から評価方法を提案しており、実務上用いられている。また、池谷ほか²⁾は単純なリーフ地形を対象に多方向不規則波を用いた平面実験から詳細な検証を行い、有義波高や長周期成分の分布を、既往の評価式を用いて概ね評価することができることを示している。さらに、秋山ほか³⁾は、複雑なリーフ地形を対象に波浪変形の検証を行い、比較的断面形状が単純な地形では高山式で概ね再現することができるが、横断方向の地形変化がある場合には適用が難しいことを示している。また、平山ほか⁴⁾は、ブシネスク方程式のリーフ上での適用性を検討し、再現性の得られる波浪条件を確認している。

本研究では、秋山ほかが行った複雑リーフ地形における多方向不規則波実験の結果を用い、縦断方向および横断方向に地形が変化する場合の波浪変形の特性を評価した。さらに、ブシネスク方程式による複雑海底地形上での波浪変形の再現性についても検証を行った。

2. 実験方法及び計算方法

(1) 実験方法

実験は多方向不規則波造波装置を有する平面水槽を用いて行った。水槽内に鋼製の斜面を設置し、その上にモデルでリーフ地形を製作した。実験の詳細については秋山ほか³⁾が述べている。図-1に地形模型の概略図および模型中央部のくぼみ付近の状況を、図-2に代表的な測線での断面図を示す。Y軸の原点は図-1に示す水槽の下端、X軸の原点は水深60cmの位置とし、一番沖側の計測地点がX=1.0m地点にあたる。

横断方向の断面形状、特に中央部付近について見てみると、測線 a (X=6.0m)、測線 b (X=8.0m)、測線 c (X=10.0m) とくぼみの奥に近づくにつれて、地形変化が大きくなっている。特に、測線 c では、Y=9.0~12.0m付近で地形が急激に変化しており、横断方向に傾斜を持つ非常に複雑な形状になっている。また、縦断方向の地形変化について見てみると、測線 1 (Y=13.0m) はリーフフェイスが前面にある場所であり、比較的単純な断面形状で、水深40cm付近から斜面勾配約1/15でリーフクレストに達している。一方、測線 3 (Y=9.0m) は平面的にくぼんだ場所でリーフフェイスが後方にあり、斜面勾配は約1/10である。この2測線の中央に位置する測線 2

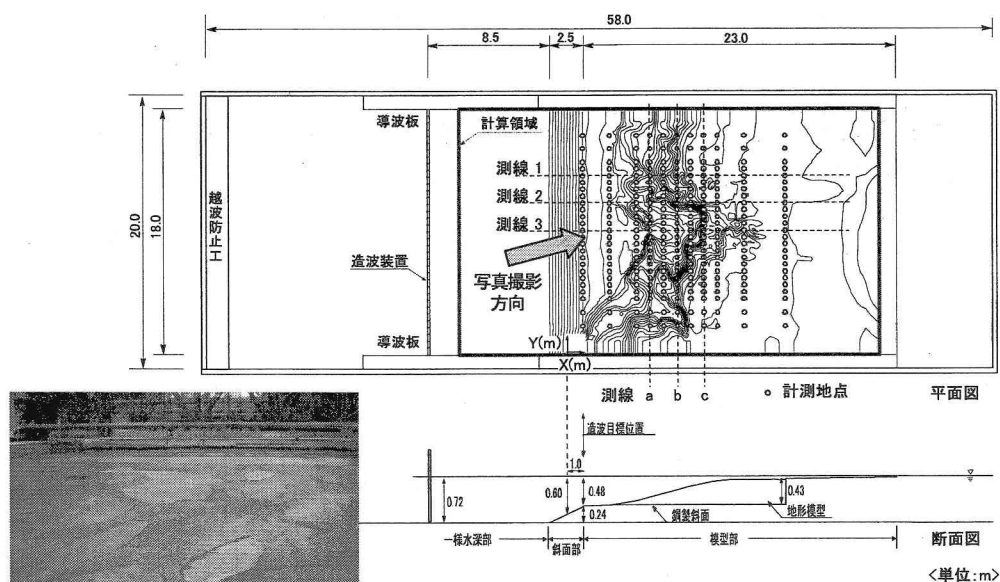


図-1 地形模型概略図

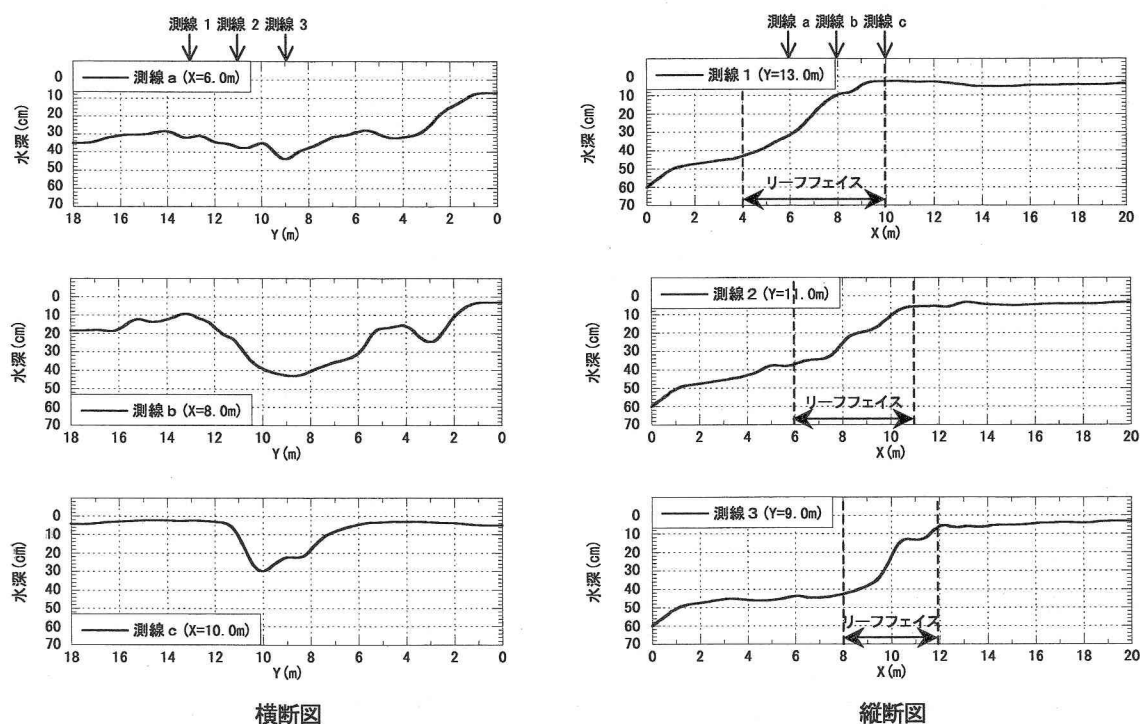


図-2 地形断面図

(Y=11.0m)は、横断方向に水深が急変する場所である。実験では、表-1の海象条件を対象とし、図-1に示す多数の計測地点において水位変動を計測した。

(2) 計算方法

波浪場の計算には、港湾空港技術研究所で開発された、「非線形波浪モデルNOWT-PARI Ver. 4.6」を用いた。水槽内の地形模型のうち、図-1に示す31.0m×18.0mの範囲を計算領域とし、実験と同じ波浪条件を入射波として計算を行った。格子間隔は10cmとし、計算時間は有義波周期で200波までとした。また、リーフトップ上の水深は実験と同様に3cmとした。

表-1 海象条件

Case	H'_0 (cm)	T_0 (s)	H_0/L_0	S_{max} (目標値)
1	5.6	1.18	0.026	∞
2	8.1	1.07	0.045	∞
3	7.8	1.28	0.031	∞
4	7.2	1.52	0.020	∞
5	9.4	1.28	0.037	∞
6	5.5	1.24	0.023	30
7	8.5	1.16	0.040	10
8	8.0	1.30	0.030	30
9	7.6	1.64	0.018	45
10	10.4	1.32	0.038	15

3. リーフ地形における波浪変形特性

本章においては、実験を実施したケースのうち、特徴的な2ケースの結果について述べる。1つはCase1で、これは一方向不規則波であり、波形勾配が小さくリーフクレスト付近で砕波するケースである。もう1つはCase8で、多方向不規則波であり、波形勾配が大きくリーフフェイスで砕波するケースである。

これらのケースについて、得られた水位変動データをゼロアップクロス法により統計処理を行った結果を示す。また、長周期成分と短周期成分は、水位変動データから周波数スペクトルを求め、スペクトルのピークが長周期側にかけて最も下がった周波数において分離した。以降の断面分布には地形の断面形状もあわせて示す。

(1) 有義波高の分布

図-3に有義波高を沖波波高で無次元化したものの断面分布を、Case1およびCase8について示す。秋山ほかは、測線1および測線3について比較を行っている。本研究では、この間の横断方向に地形の変化する場所における波高分布を検討するため、測線1 (Y=13.0m)～測線3 (Y=9.0m)の間の波高分布を1m間隔で示す。また、測線1、測線3については、Case1の条件において高山式によって求めた計算結果もあわせて示す。さらに、横断方向の地形変化の影響を検討するため、測線b (X=8.0m)、測線c (X=10.0m)における波高分布も示す。

縦断方向分布については、測線1では高山式と比較的一致するが、測線3ではリーフクレストでの波高が計算に比べて小さく高山式では表現するのが難しいという結果が得られている。さらにその間について見てみると、測線1から模型中央部に近づくにつれてリーフフェイスが後退するために、波高増大のピークも後方へ移動すること、ピークが崩れて明瞭でなくなることが確認された。

また、横断方向分布について見てみると、測線bではリーフクレストにあたる部分 (Y=6.0m, 12.0～15.0m付近)において有義波高が大きくなるなど地形と対応した波高分布となっている。一方、くぼんだ地形の奥に位置する測線cでは、比較的小さいピークが2箇所見られるが、その片方はリーフクレストではなくくぼみの中央部にあり、地形により変化した周囲の波の影響を受けた複雑な分布特性となっている。

(2) 有義波周期の分布

図-4に、各縦断測線における有義波周期を沖波の有義波周期で無次元化したものの断面分布をCase1, Case8について示す。有義波周期の分布については、池谷ほかの実験では、リーフクレストから汀線に近づくにつれ周期が増大する結果が得られている。

測線1においてはX=11.0m付近で急に短くなった後にリーフトップの奥に向かって長くなる傾向がある。一方測線3ではリーフトップ上でほぼ一定となっている。こ

れらの間の測線2ではリーフクレスト付近であるX=11.0mに値が小さくなる点が見られるが、全体的にはリーフトップ上で長くなった後に短くなる傾向が見られる。このように測線2では両側の測線とは異なった分布特性を示しており、有義波周期の分布は地形の影響を受けて複雑な分布特性を示している。

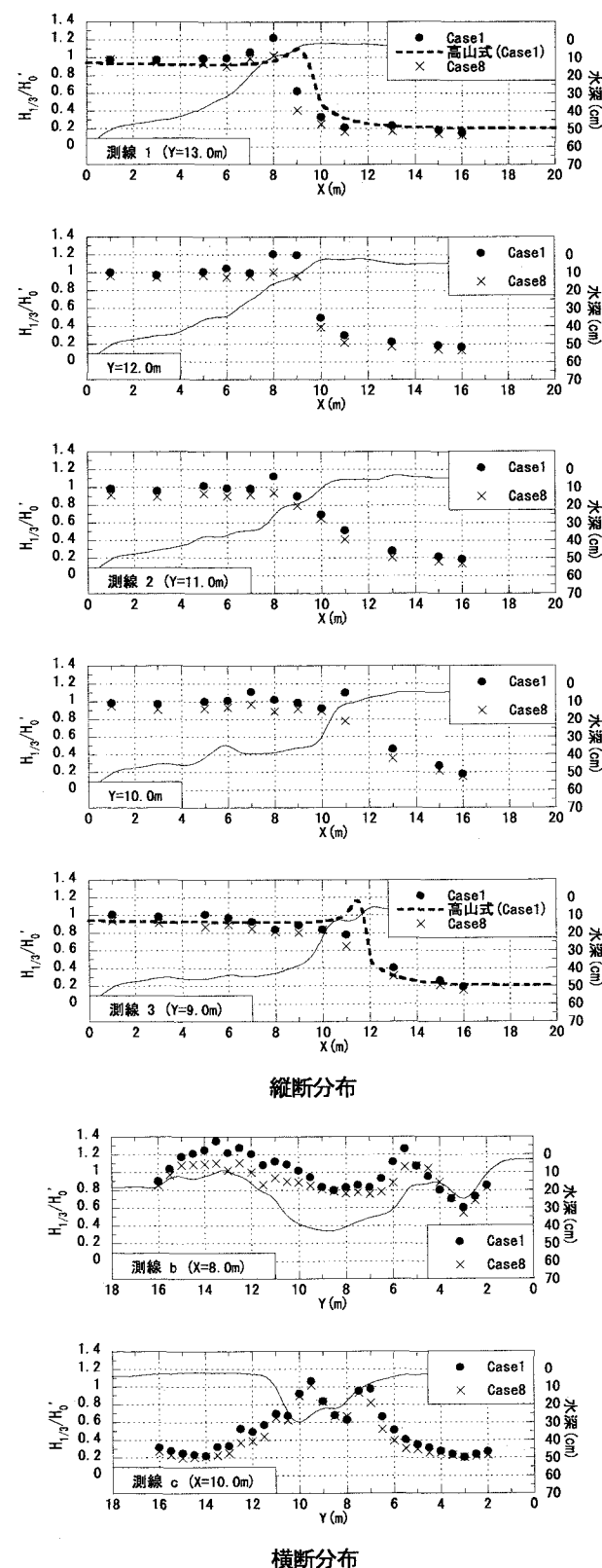


図-3 有義波高の空間分布

(3) 長周期成分の分布

図-5にCase1およびCase8の、各縦断方向測線における長周期成分rms値の空間分布を示す。図中には、サーフビートの振幅を表す、合田⁵⁾が提案した次式(1)の計算値を併せて示す。

$$\zeta_{Goda} = \frac{0.01H'_0}{\sqrt{H'_0/L_0(1+h/H'_0)}} \quad (1)$$

これらの結果を見ると、一方向不規則波であるCase1については、各測線ともに非常に良く一致している。一方、多方向不規則波であるCase8については、実験値に比べて計算値が大きくなっているものの、リーフフェイスに向かって増大、リーフトップ上で一定の傾向となる分布特性は再現されている。これらの傾向は、他の波浪条件においても同様であった。これより、横断方向に地形が変化する場合においても、長周期成分の分布は合田の式を用いて概ね表現できることが分かった。

4. 実験結果と計算結果の比較

本章においては、ブシネスク方程式を用いた計算において有義波周期で200波までの計算が終了したケース(Case1, Case6)について実験結果と計算結果の比較を行う。

(1) 有義波高の平面分布

図-6に有義波高の平面分布の実験結果および計算結果を示す。Case1及びCase6ともに、有義波高の平面分布特性、すなわち、中央部のくぼみの両サイドにおけるリーフフェイスで波高が大きくなり、リーフトップ上では小さくなるといった特徴を再現しており、ブシネスク方

式を用いた本計算により、一方向不規則波、多方向不規則波のどちらのケースにおいても、実験結果と計算結果が概ね一致していることが分かる。

(2) 有義波高および平均水位の空間分布

図-7にCase6の有義波高と平均水位の空間分布を、前章で述べた代表的な横断測線b, cおよび縦断測線1, 3について示す。

有義波高の横断方向分布を測線b (X=8.0m) について見てみると、リーフクレスト付近にあたるY=12.0~15.0m地点において計算結果では実験結果よりも波高が小さいものの、模型中央部のくぼんだ部分であるY=6.0~12.0m付近においては実験結果に良く一致している。一方、測線c (X=10.0m) について見ると、中央のくぼみ(Y=7.0~11.0m) 部分に両サイドで砕波した波が回り込んでくるために、非常に複雑な現象を示しており、ここでは実験結果と計算結果に差が見られる。

縦断方向分布については、測線1のリーフクレストにおける波高の増大がやや小さいものの、その後方での急激な減衰や、測線3における緩やかな減少傾向など、横断方向に地形の変化する場所での分布特性を精度良く再現できていることが分かる。

一方、実験結果における平均水位の分布特性については、波浪条件、測線位置による大きな違いは見られず、リーフクレスト近傍でセットアップした後、リーフトップ上で一定となる傾向がある。実験結果と計算結果を比較すると、リーフ前面では両者はほぼ一致しているが、リーフトップ上では実験値に比べ計算値は小さくなっていることが分かる。これは、実験では側壁が完全反射で閉じられた空間であるのに対し、計算ではエネルギー吸収帯を設けているなどの境界条件の違いによるものと考えられる。

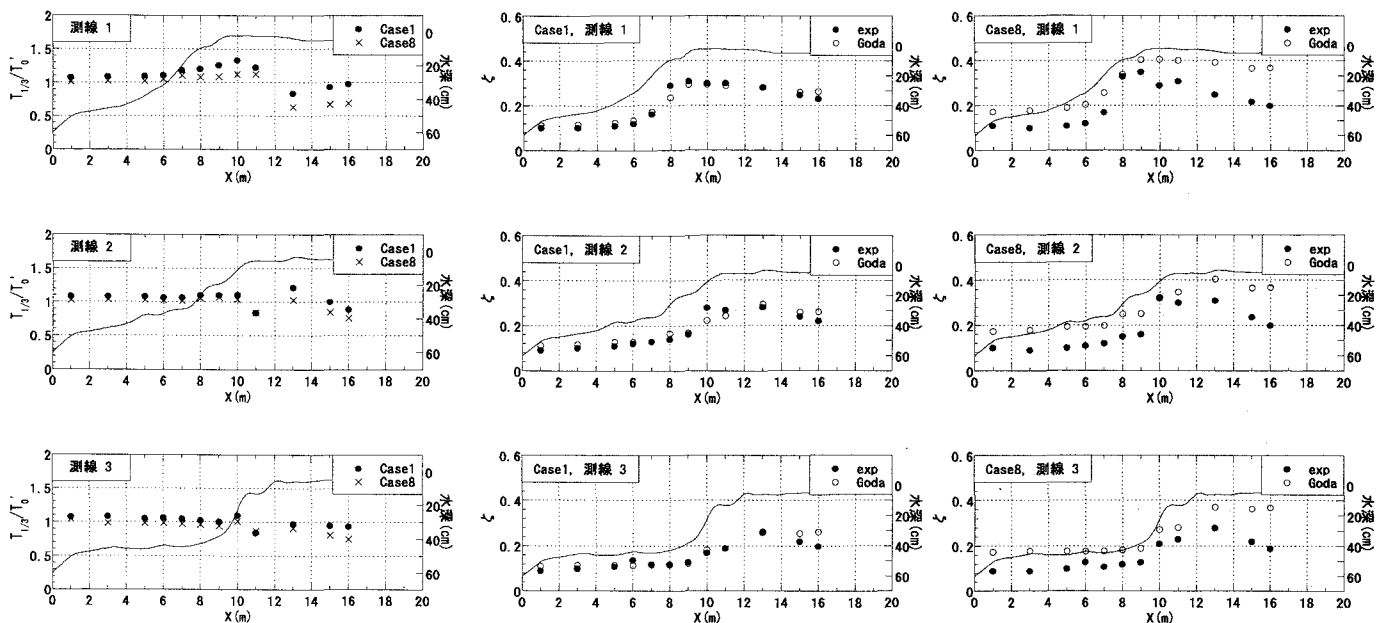


図-4 有義波周期の空間分布

図-5 長周期成分の空間分布

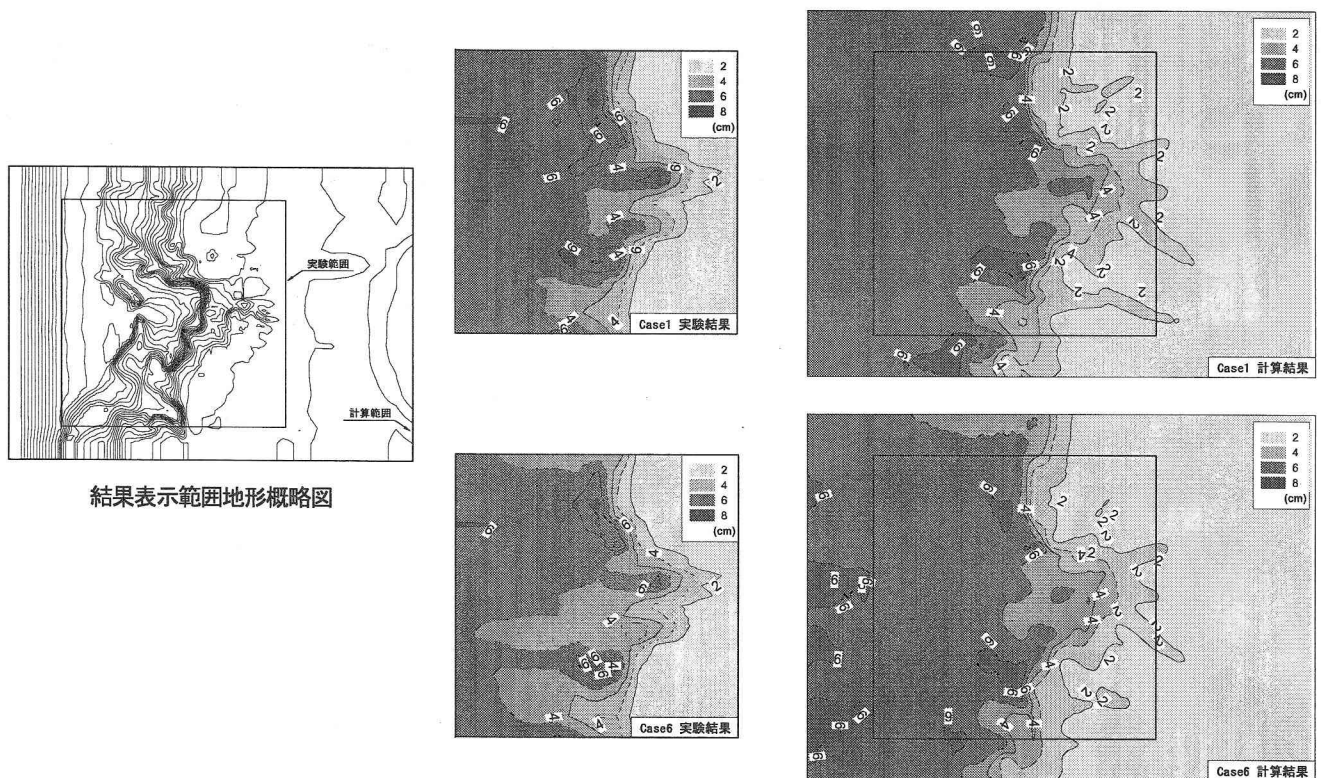


図-6 有義波高の平面分布

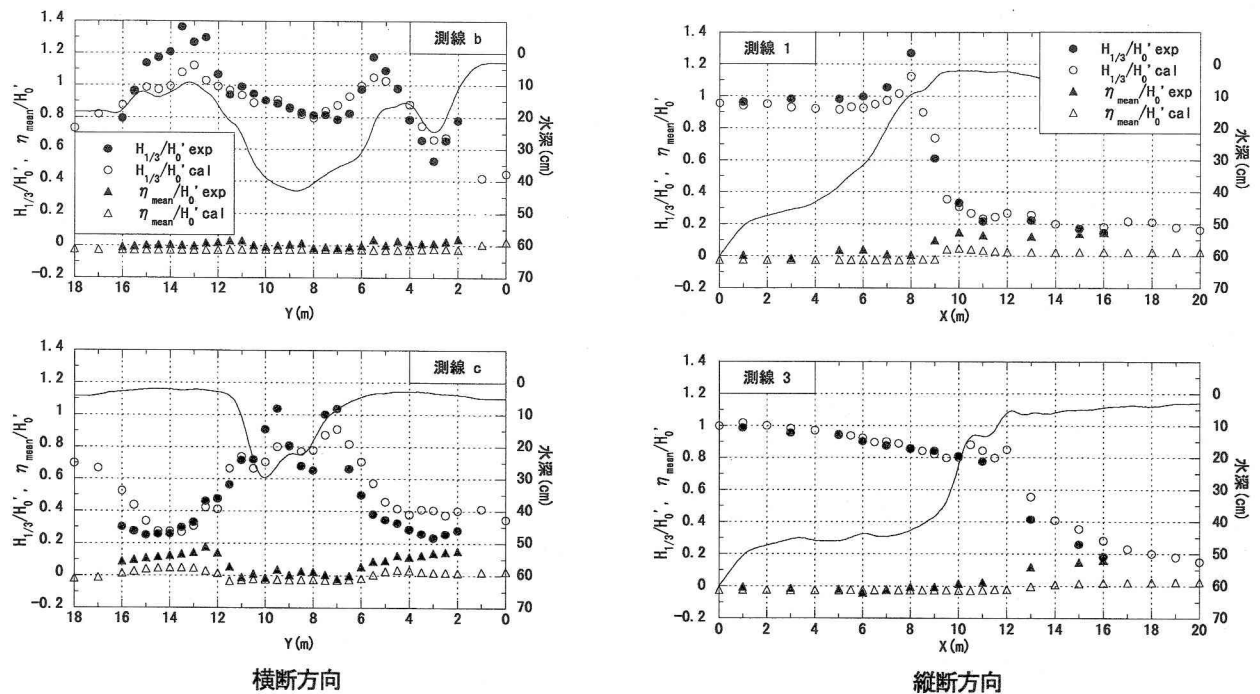


図-7 有義波高と平均水位上昇量の空間分布 (Case6)

(3) 有義波周期の空間分布

図-8に、Case6の有義波周期の縦断方向空間分布について示す。実験結果では、リーフトップ上においてCase1, 8と同様の特性を示している。計算結果と比較すると、リーフクレスト付近までは良く一致しているものの、リーフトップ上で実験結果が小さくなっており、計算結果との違いが見られる。

(4) 長周期成分の空間分布

図-9に、Case6の長周期成分rms値の縦断方向空間分布について示す。各測線とも、リーフクレストに向かって増大する傾向が見られる。リーフトップ上での計算結果が実験結果よりもわずかに小さくなっているが、全体的には、沖からリーフクレスト手前までの分布はほぼ一致しており、長周期成分の分布特性を概ね再現している。

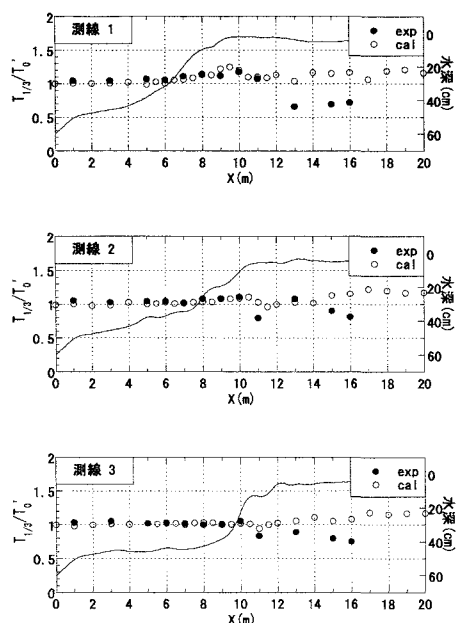


図-8 有義波周期の空間分布 (Case6)

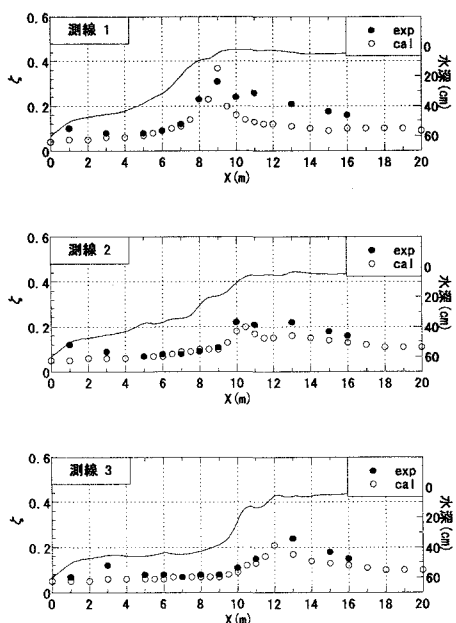


図-9 長周期成分の空間分布 (Case6)

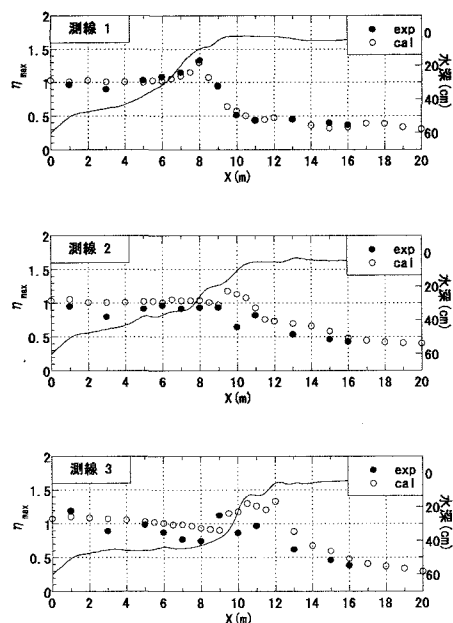


図-10 最大波頂高の空間分布 (Case6)

(5) 最大波頂高さの空間分布

図-10に、最大波頂高さの実験値 η_{max} と、ブシネスク方程式の計算結果から池谷ほかの提案した次式(2)により算出した計算値を示す。

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

ここで、 $H_{L1/3}$ は長周期成分の有義値、 $H_{S1/3}$ は短周期成分の有義値であり、 $a=1.8$ 、 b はリーフクレストより沖側では0.6、リーフトップ上では0.8とした。測線1、2においては実験結果と計算結果はほぼ一致しており、また測線3については、計算値が実験値よりもやや大きいものの、その分布特性を概ね再現することができた。

6. 結論および今後の課題

複雑なリーフ地形を対象に、横断方向の地形変化による波浪変形について検討を行った。また、ブシネスク方程式により波浪場の計算を行い、実験結果との比較を行った。以下に知見をまとめる。

- ・有義波高および有義波周期の分布特性は、縦断方向だけではなく横断方向の地形の影響も強く受ける。
- ・長周期成分の分布については、合田の式により概ね評価できる。
- ・ブシネスク方程式により、複雑なリーフ地形での有義波高の平面分布および断面分布、有義波周期および長

周期成分の空間分布について概ね再現することが可能である。

- ・ブシネスク方程式の計算結果を用いて最大波頂高さを概ね推定することが可能である。

また、ブシネスク方程式を用いた計算を行う際、波形勾配が大きいケースでは、水深が小さくなる領域において計算が安定しないケースが見られた。また、計算が可能であったケースでも、地形の複雑に変化する領域における計算精度が低かった。このため、今後の課題として、計算の安定性および精度の向上を図るため、砕波などの計算モデルの改良を行う必要があると考える。

参考文献

- 1) 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, 港湾技術研究所資料, No. 278, 1977.
- 2) 池谷 毅, 岩瀬浩二, 漆山 仁, 滝本邦彦, 秋山義信: リーフ海岸における多方向不規則波の波浪変形実験, 海岸工学論文集, 第46巻, pp. 201-205, 1999.
- 3) 秋山真吾, 福山貴子, 池谷 毅: 複雑なリーフ海岸を対象とした波浪変形実験, 土木学会第59回年次学術講演会, 2-180, pp. 359-360, 2004.
- 4) 平山克也, 上原 功, 永松宏一, 平石哲也: 珊瑚礁リーフにおける波と流れの計算法の適用性, 海岸工学論文集, 第45巻, pp. 161-165, 1998.
- 5) 合田良實: 浅海域における波浪の砕波変形, 港湾技術研究所報告, 第14巻, 第3号, 1975.