

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

EXPERIMENTAL STUDY ON WAVE TRANSFORMATION ON STEEP CORAL REEF

中嶋さやか¹・関本恒浩²・片山裕之³・高橋研也⁴

Sayaka NAKAJIMA, Tsunehiro SEKIMOTO, Hiroyuki KATAYAMA and Kenya TAKAHASHI

¹正会員 修(農) 五洋建設株式会社 技術研究所 (〒329-2746 栃木県那須塩原市四区町1534-1)

²フェロー 博(工) 五洋建設株式会社 技術研究所 (〒329-2746 栃木県那須塩原市四区町1534-1)

³正会員 博(工) 五洋建設株式会社 技術研究所 (〒329-2746 栃木県那須塩原市四区町1534-1)

⁴正会員 修(工) 五洋建設株式会社 技術研究所 (〒329-2746 栃木県那須塩原市四区町1534-1)

Hydraulic model test has been carried out in order to study the characteristics of wave breaking, wave fission and wave regeneration on coral reefs which have steep slope in front. The two types of coral reef model, which have single and double step-like topography, are installed in wave flume. The wave transformation on coral reef is investigated in detail. The broken wave height and period on the coral reef are varied spatiotemporally due to wave breaking and wave fission.

In this study, we found that wave regeneration point can be estimated by ratio of distance from reef edge to wavelength of deepwater wave. The wave regenerated under the condition that the ratio was almost unity in these experiments.

Key Words : Wave transformation, Coral reef, Steep slope, Wave regeneration, Wave fission

1. はじめに

現地観測や水理模型実験により、リーフ地形における多様な複雑な波の諸現象が報告されている。例えば、津嘉山ら¹⁾はリーフエッジ前面が1:10の斜面勾配を有する地形において、リーフ上に流れが生ずる場合と生じない場合について実験を行い、平均水位の上昇はリーフ上で流れの有無によって大きく異なるのに対して、波高の変化に影響は現れないことを示した。高山ら²⁾は同斜面勾配条件において不規則波実験を実施し、リーフ上の不規則波の変形と平均水位の上昇について簡便な算定式を提案した。これに続き、佐藤ら³⁾・津嘉山ら⁴⁾は、リーフ前面の斜面勾配が1:10あるいは直立となる条件について規則波実験を実施し、高山ら²⁾による算定式の係数について検討を行っている。一方、磯部ら⁵⁾はリーフ前面の斜面勾配が1:10, 1:5, 1:2.5および直立の場合について不規則波を用いた実験からリーフ上の碎波変形と平均水位の上昇について検討するとともに、これらに対する数値計算モデルを提案している。

多方向不規則波を用いた平面実験は、池谷ら⁶⁾によって行われており、リーフ上の最大波頂高の評価

法が提案されている。

現地観測を用いた例としては、江頭ら⁷⁾および津嘉山ら⁸⁾が現地観測の結果に基づき、高山ら²⁾の算定式の補正を行っている。

これらの研究はいずれもリーフ上での波高変化と平均水位の上昇に着目したものであるが、実際の構造物の設計に当たっては、リーフ上の波の波高だけでなく、周期に関する知見も重要である。

リーフ上の周期の変化については、高山ら²⁾が、リーフ上の波の周期は長くなる場合も短くなる場合もあり一般的な傾向を見いだせないことを指摘しているほか、谷本・宇多⁹⁾は碎波の乱れによってリーフ上では周期が短くなること、仲座ら¹⁰⁾は人工リーフ背後では、波の分裂によって周期が短くなることを指摘するなど、いくつかの知見は得られているものの、リーフ上の周期の変化に関する議論は未だ十分とは言いがたいのが現状である。また、波の変形過程を詳細に調べたものや碎波後の波の再生について研究されたものはほとんどない。

そこで本研究では、リーフ上の波の変形に関する基礎的な知見を得ることを目的に、急勾配斜面を有するリーフ地形を対象とした水理模型実験を実施した。

2. 水理模型実験

(1) 実験概要

無反射装置を有する二次元断面水槽（長さ50m，幅0.6m，深さ1.2m）を用いて実験を行った。実験には，リーフ前面の斜面が1段である地形（地形①）と2段斜面を有する地形（地形②）の2つの模型を用いた（図-1）。波が一番初めに接する斜面を「斜面1」とし，この斜面勾配は地形①，②とも1:0.5，1:1，1:3の3ケースを用意した。また地形②においては，リーフエッジ前面の斜面「斜面2」の勾配を1:10と固定させた。

容量式波高計は，「斜面1」の法尻から入射波の約1波長沖の地点に3本，リーフ上には30cm～50cmの間隔で27本設置した。また，斜面上の波の変形を捉えるため，「斜面1」および「斜面2」の法尻，法肩および斜面を三等分する位置にも設置するとともに，地形②においては，「斜面1」から「斜面2」の間に位置する一様水深部にも3本設置した。このように比較的密に波高計を設置することで，斜面からリーフ上の波の変形過程を詳細に追跡した。

実験縮尺は1/100とし，表-1に示す実験ケースについて規則波を造波させた。なお，本文中の数値はすべて実験スケールで表記している。

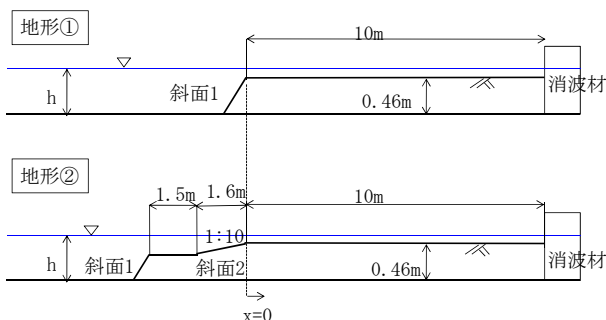


図-1 地形条件

表-1 実験ケース

地形	斜面1 勾配	斜面2 勾配	水深 h (m)	波高 H (m)	周期 T (s)
地形①	1:0.5 1:1 1:3	—	0.5 0.53	0.02	1.0
				0.045	1.3
				0.12	1.4, 1.6, 1.8
				0.168	1.4, 1.6, 1.8
地形②	1:0.5 1:1 1:3	1:10	0.5 0.53	0.02	1.0
				0.045	1.3
				0.12	1.4, 1.6, 1.8
				0.168	1.4, 1.6, 1.8

(2) 目視観察

実験時の波の様子を簡単に述べる。地形①および地形②いずれの条件においてもリーフ上では Wave setup が見られ，時間とともに水位は上昇していた。その結果，リーフから戻り流れが発生し，これが斜面上の碎波形状を時間的・空間的に変化させていた。一例として，地形①，斜面勾配が1:3の条件のものを写真-1に示す。①平均水位の上昇段階では，リーフエッジでは碎波の打ち込みによる射流が発生し，下流側の平均水位が十分に大きくなった場所で跳水現象が見られた。この跳水現象は，岸側の平均水位が安定するに従って沖側へと移動し，平均水位が十分に発達するとリーフ上での跳水現象は見られなくなった。②平均水位が十分に上昇した後は，リーフエッジから斜面に向かって顕著な戻り流れが発生した。リーフエッジへの来襲波は，この強い戻り流れによって碎波点を沖側へと移し，斜面上で巻き碎波となった。その後，リーフエッジからリーフ上にかけてエネルギーを消費しながら bore 状となって進行した。③波が十分に減衰したところで波は再生するとともに分裂を生じることが確認された。

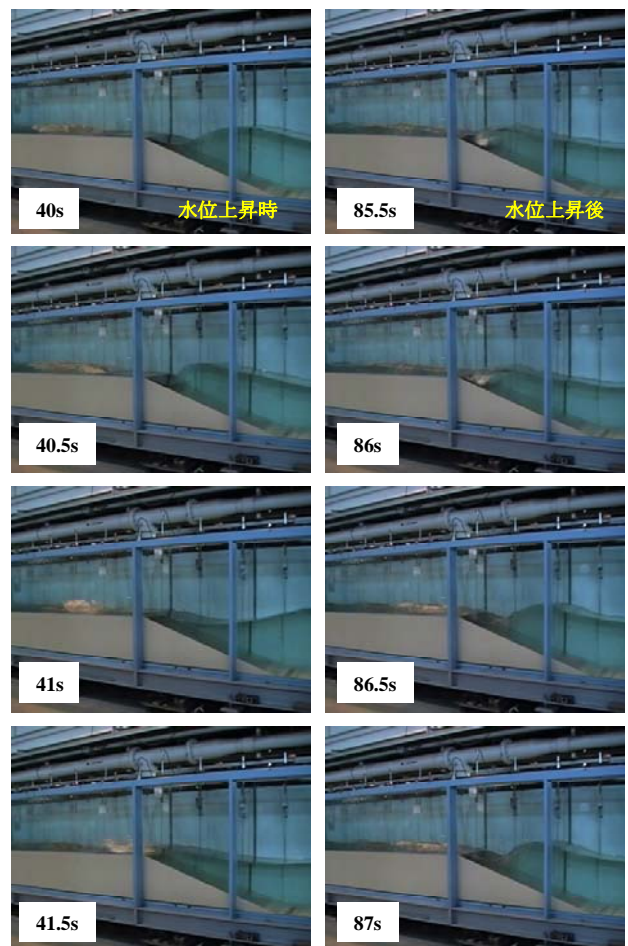


写真-1 波の時間変化（実験条件：地形①，斜面勾配=1:3，水深h=0.5m，波高H=0.12m，周期T=1.6s）
*時間は，造波開始からの経過時間を示す。

このように、波は時間的・空間的に大きく変動していた。

(3) 解析

実験では、砕波による乱れや波の分裂・再生など波の変化が時間的・空間的に著しいため、まず波の平均量を用いてその変化特性を調べた。波の平均量としてSIWEH¹¹⁾ (平滑化された波エネルギーの時間変化曲線) を求めたところ、図-2に示すようにSIWEHの時間・空間的な変動は平均水位の変動に強く規定されていることが分かった。つまり、リーフ上の波は、Wave setupによって大きく特徴づけられていることを示す。しかしながら、リーフ内の水位が一旦上昇してしまえば、水位時間変動はなだらかとなり、SIWEHも、時間的・空間的にも比較的安定することが確認された(図-3)。したがって解析にあたっては、十分に水位が上昇した以降のデータを用いてリーフ周辺の平均的な波の変形について調べた。

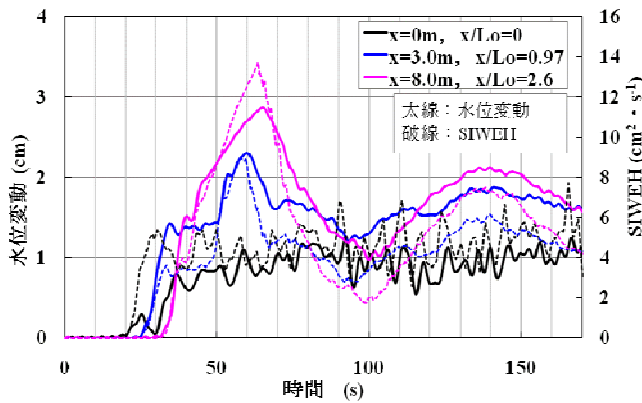


図-2 水位とSIWEHの経時変化 (実験条件: 地形②, 斜面勾配=1:1, 水深 $h=0.5\text{m}$, 波高 $H=0.12\text{m}$, 周期 $T=1.6\text{s}$)

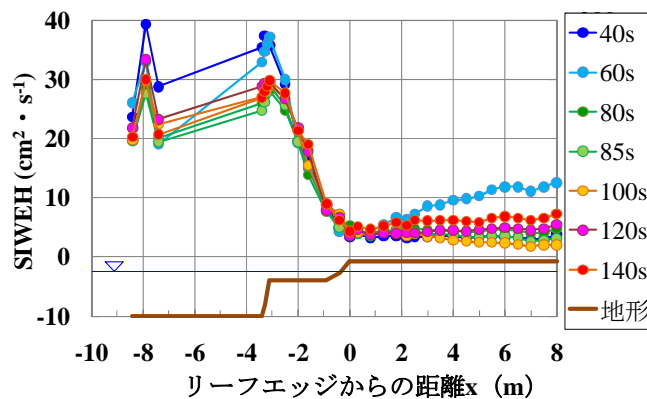


図-3 SIWEHの時空間分布図 (実験条件: 地形②, 斜面勾配=1:1, 水深 $h=0.5\text{m}$, 波高 $H=0.12\text{m}$, 周期 $T=1.6\text{s}$)

3. 実験結果および考察

(1) リーフ上の波の変形

水理模型実験より、リーフ内へ進入した波は、砕波によって急激に波高を減衰させながら、リーフを進行し、いずれの実験ケースにおいても波が分裂する様子が観察された。そこで、リーフ上における空間的な波の特徴を捉えるため、パワースペクトルを求めた。砕波、非砕波のいずれの実験ケースにおいても、リーフ上では基本周波数の倍周波数成分が発生していることが捉えられた。一例を図-4に示す。リーフエッジからの距離 x と沖波波長 L_0 との比である x/L_0 が0.58程度までは、ほぼ基本周期の整数倍の周波数成分が見られ、砕波を生じながらも、波として拘束波的に一体となって伝播している様子がうかがわれた。 x/L_0 がほぼ1に近づくと、基本周期の整数倍の周波数以外の周波数帯にもエネルギーが見られ、波の分裂が生じていることが示された。図-5はこのときの水位時系列を示したものである。

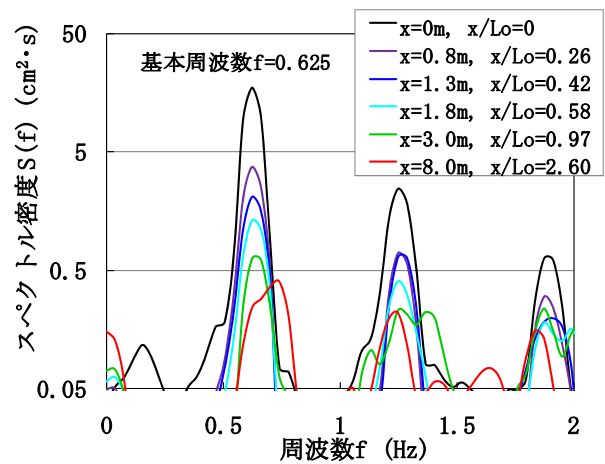


図-4 パワースペクトルの変化 (実験条件: 地形②, 斜面勾配=1:1, 水深 $h=0.5\text{m}$, 波高 $H=0.12\text{m}$, 周期 $T=1.6\text{s}$)

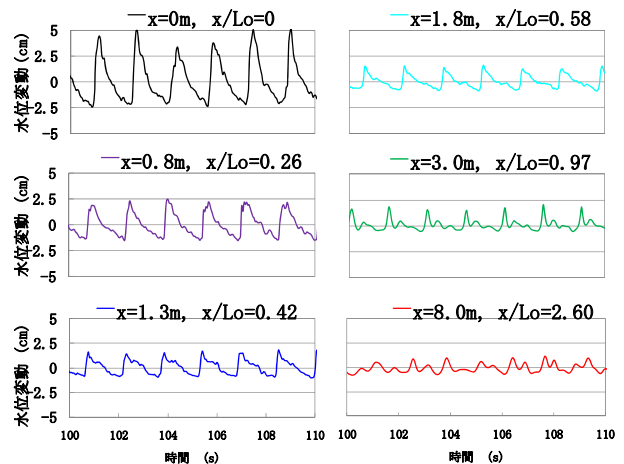


図-5 リーフ上の水位の時系列波形 (実験条件: 地形②, 斜面勾配=1:1, 水深 $h=0.5\text{m}$, 波高 $H=0.12\text{m}$, 周期 $T=1.6\text{s}$)

$x/L_0=0.58$ までは、砕波による減衰は見られるものの、砕波による強い乱れも含めて組織的に波として存在していることが分かる。 $x/L_0=0.97$ では、波形からみると砕波は完了し、波の再生域に入っていること、波の分裂により新たな自由波が顕著となっていることが分かる。さらにこのケースでは、 $x/L_0=2.60$ の地点においてより分裂が顕著となっていた。以上のことから、リーフ近傍では波の非線形干渉による拘束波成分が、リーフを進行するにつれて自由波の発生、すなわち波の分裂がみられ、リーフ上における波は、空間的に大きく異なることが明らかとなった。

(2) リーフ上における波の再生

図-6に、平均波で整理した地形②の条件における沖波との波高比・周期比の空間分布を示す。横軸は、リーフエッジからの距離 x を沖波波長 L_0 を用いて無次元化している。リーフ上では、波形勾配(H_0/L_0)が1.31%の条件を除いて明瞭な波高減衰が認められた。また、波形勾配(H_0/L_0)が3%未満の条件では、それ以上の条件に比べて波高減衰はやや小さく、周期比では空間的なばらつきが目立った。一方で、波形勾配(H_0/L_0)が3%以上の条件であれば、波高比はほぼ同値を示すとともに、空間的にも均一であった。周期に注目すると、リーフエッジから急激に周期が短くなったのち、再び基本周期へと回復する傾向が認められた。さらに x/L_0 が概ね1となる地点において最も周期が短くなる傾向がみられた。この地点では、図-5に示すように自由波の発生が顕著となること、さらに砕波はこの位置でほぼ終了することから、波の再生位置と考えることができる。なお、「斜面1」の勾配が異なる条件においても波高比、周期比の空間分布図は本条件と同様の傾向を示し、斜面勾配の違いによる影響は認められなかった。

続いて、1段斜面である地形①において、同様の整理をしたものを図-7に示す。図-6との比較により、地形条件が大きく異なっても、リーフ上の波の波高比、周期比の空間分布傾向に大きな違いがないことが分かる。詳しく見ると、波形勾配(H_0/L_0)が3%以上の条件では、地形②に比べ、波高比が大きくなっていたが、波形勾配(H_0/L_0)が3%未満の条件では、地形の違いによる影響は見られなかった。次に周期についてみると、地形②では、周期比の低下はリーフエッジよりもやや沖の地点からみられるのに対し(図-6)、地形①では、ほぼリーフエッジ部から低下していた(図-7)。さらに波の再生位置も地形②に比べやや岸側へ移動し、 x/L_0 が1.2~1.5程度の位置で最も周期が短くなっていた。

目視観測によると、波形勾配(H_0/L_0)が3%以上の条件においては、地形の違いに起因する明瞭な波浪場の違いがみられた。地形②では、「斜面1」から「斜面2」にかけて波は砕波し、bore状を呈したままリーフ内に進行していたが、地形①では、リーフエッジ近傍で砕波するため、地形②と比べてリー

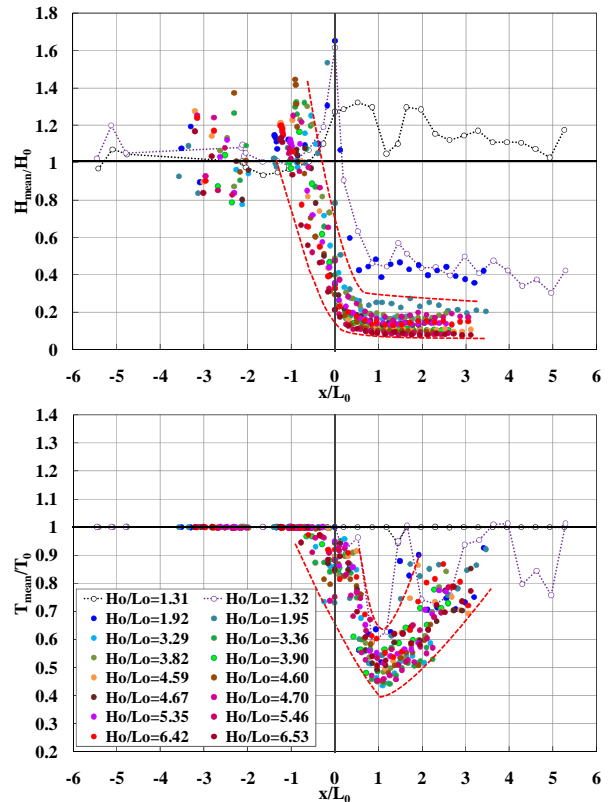


図-6 波高比および周期比の空間分布 (実験条件: 地形②, 斜面勾配=1:0.5) *中抜き: 非砕波条件, **波形勾配 H_0/L_0 (%)

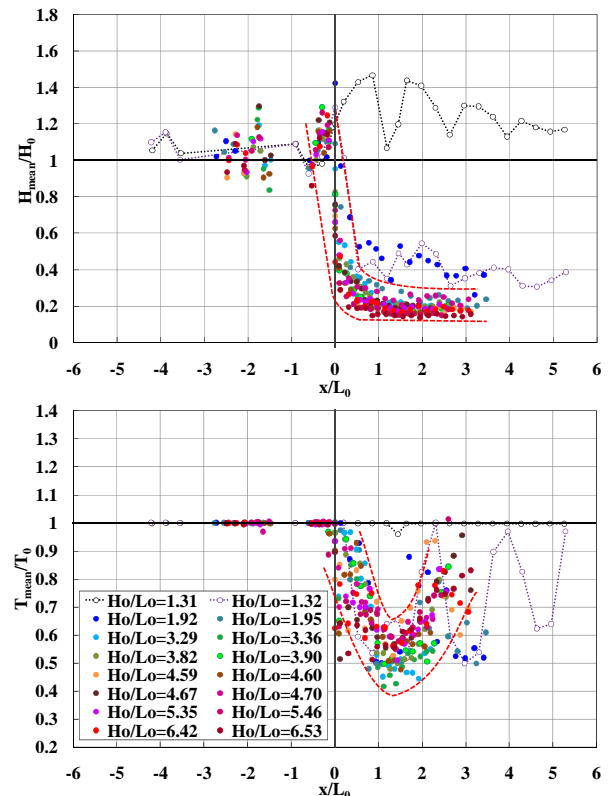


図-7 波高比および周期比の空間分布 (実験条件: 地形①, 斜面勾配=1:3) *中抜き: 非砕波条件, **波形勾配 H_0/L_0 (%)

フ上に大きな乱れが生じていた。このことを踏まえると、地形①ではリーフエッジにおける乱れが大きいため、波の再生までに距離を要するものと考えられる。またリーフ上での短周期化も地形②に比べて大きく、このことから地形②に比べて乱れが大きいたことが推察された。なお、地形①においてもリーフ前面の斜面勾配による影響は認められなかった。

以上の結果より、斜面勾配や地形条件が大きく変わっても、リーフ上の波高比、周期比の空間分布はほぼ同様な結果を示すことから、リーフ上の波の再生位置は、 x/L_0 が1~1.5程度を目安に評価することができると考えられる。

(3) 主要な波に着目した検討

平均波は、砕波に伴う乱れを小さな波として評価していることが考えられるため、平均波ではなく、「主要な波」の成分に着目した。ここでは、不規則波における有義波高の評価と同様に波高の上位1/3に着目して、その平均値を「主要な波」と定義した。図-8に図-7と同条件の実験結果を「主要な波」として整理したものを示す。リーフエッジからリーフ上における波高比の空間分布については、「主要な波」と平均波との間に大きな違いは認められなかった。しかし、周期比をみると、「主要な波」の場合では、平均波に比べてリーフエッジからやや岸側より周期の短周期化がはじまり、その後一気に周期が短くなる傾向が認められた。その後再び基本周期へと回復するが、平均波と比べ空間的な周期の変化は著しく、全体としてばらつきが大きかった。

主要な波と平均波の周期比の空間分布の違いから、砕波に伴う乱れの範囲と波の再生位置を分離して考えることができる。すなわち、平均波は、砕波に伴う小さな乱れも評価しているため、全体的に周期の空間変動は緩やかな傾向を示すため、「主要な波」では捉えられない平均波の短周期化の空間分布は、砕波による乱れを、平均波よりも明瞭に示される「主要な波」の短周期化は、波の再生位置をより強く示すと考えられる。

(4) 砕波条件の整理

表-2は、実験で作用させた全波浪条件と砕波の有無についてまとめたものである。砕波現象の有無は、地形①・②、ならびに斜面の勾配に関わらず全て同じ結果を示した。非線形性を表すパラメータ、アーセル数 Ur が0.37以下の条件では非砕波条件を示した。一方、砕波が認められた条件は、アーセル数 Ur は1.6~17.1の範囲に入っていた。また、1.32%の波形勾配 (H_0/L_0) を境に、砕波の有無を分けることができた。さらに、同じ非砕波の条件であっても、リーフ上で砕波減衰を示すケースとそうでないケースがあること、また非砕波条件でかつ波高減衰が認められるケース ($H_0/L_0=1.32\%$) は、砕波条件である $H_0/L_0=1.91\%$ と同様の波高の空間分布を示すなど興味深い現象が捉えられた。これらの現象が何の要

素に起因しているのかまでは分からなかったが、非砕波から砕波への遷移を表すような実験結果が得られたことは非常に興味深いと考える。

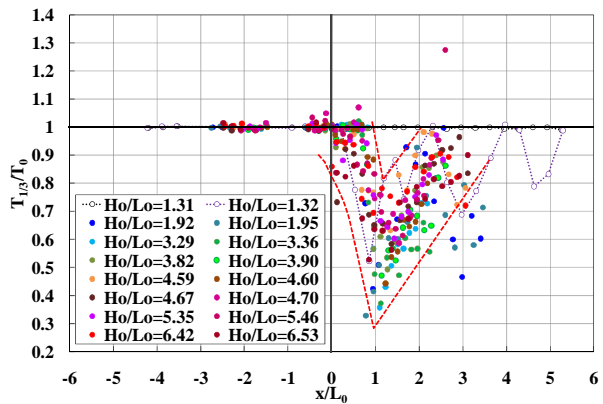
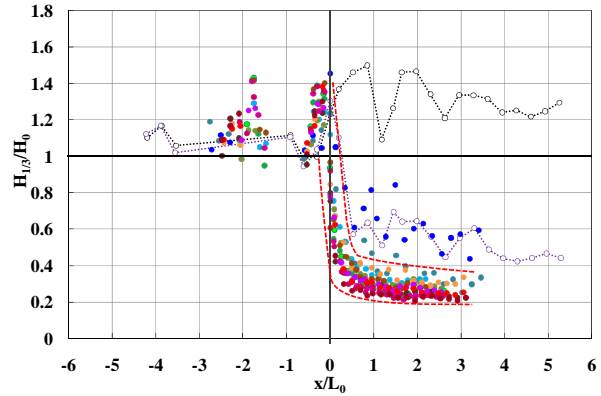


図-8 波高比および周期比の空間分布（実験条件：地形①，斜面勾配=1:3）*中抜き：非砕波条件，**波形勾配 H_0/L_0 (%)

表-2 波浪条件と砕波の有無

水深 h(m)	波高 Ho(m)	周期 T(s)	沖波波 長Lo	波形勾 配Ho/Lo	相対水 深h/Lo	相対波 高Ho/h	アーセ ル数Ur	砕波の有無
0.53	0.02	1.00	1.52	1.31	0.35	0.04	0.31	砕波なし (波高減衰無)
0.50	0.02	1.00	1.51	1.32	0.33	0.04	0.37	砕波なし (波高減衰あり)
0.53	0.05	1.30	2.35	1.91	0.23	0.08	1.67	波高比の 空間分布 が類似
0.50	0.05	1.30	2.31	1.95	0.22	0.09	1.92	
0.53	0.120	1.40	2.62	4.59	0.20	0.23	5.51	
0.50	0.120	1.40	2.57	4.67	0.19	0.24	6.35	
0.53	0.120	1.60	3.14	3.82	0.17	0.23	7.95	
0.50	0.120	1.60	3.08	3.90	0.16	0.24	9.09	
0.53	0.120	1.80	3.65	3.29	0.15	0.23	10.75	
0.50	0.120	1.80	3.57	3.36	0.14	0.24	12.24	
0.53	0.168	1.40	2.62	6.42	0.20	0.32	7.72	
0.50	0.168	1.40	2.57	6.53	0.19	0.34	8.88	
0.53	0.168	1.60	3.14	5.35	0.17	0.32	11.13	砕波あり
0.50	0.168	1.60	3.08	5.46	0.16	0.34	12.72	
0.53	0.168	1.80	3.65	4.60	0.15	0.32	15.05	
0.50	0.168	1.80	3.57	4.70	0.14	0.34	17.14	

4. おわりに

急勾配斜面を有するリーフ地形を対象に水理模型実験を実施し、リーフ上の波の変形に着目してデータ整理・解析を行った。その結果、(1)リーフ上で

は波の分裂・再生が生じており、リーフエッジ近傍では波の非線形干渉による拘束波が、リーフ後方では自由波の発生が認められたとともに、(2)リーフ上における波の再生位置は、リーフ地形やリーフ前面の 1:0.5~1:3 程度の斜面勾配に関わらず、リーフエッジからの距離と沖波の波長の比が概ね 1~1.5 程度となる位置で評価できることを明らかにした。また、(3)アーセル数 U_r では 0.37, 波形勾配 (H_0/L_0) では 1.32%を境界に碎波条件が分けられた。

参考文献

- 1) 津嘉山正光, 仲座栄三, 我喜屋邦浩: 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, 1989.
- 2) 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, 港研技研資料, No. 278, 32p., 1977.
- 3) 佐藤道郎, 羽田好勝, 中江周作, 吉松秀雄: 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, 1985.
- 4) 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.
- 5) 磯部雅彦, 柴田洋三, 泉宮尊司, 渡部晃: 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, 1988.
- 6) 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.
- 7) 江頭和彦, 福田功, 岸良安治, 西村達郎: 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, 1985.
- 8) 津嘉山正光, 河野二夫, 仲座栄三, 大城真一, 福田孝晴: 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, 1995.
- 9) 谷本修志, 宇多高明: サンゴ礁海岸における波, 流れ, 地形変化に関する研究, 土木研究所報告, 第181号, pp. 85-182.
- 10) 仲座栄三, 津嘉山正光, 川満康智, 竹内理佳, 渡真利尚樹, 崎浜秀哉, 野村幸士郎: リーフ上伝播波の周期変化について, -非線形分散波の成分波間エネルギー授受の観点から-, 海岸工学論文集, 第47巻, pp. 731-735, 2000.
- 11) 間瀬肇, 古室健史, 岩垣雄一: 伝播に伴う Wave Group 特性の変化, 海岸工学論文集, 第31巻, pp. 158-162, 1984.