

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

関本 恒浩¹・中嶋 さやか²

¹フェロー 五洋建設株式会社 技術研究所 (〒329-2711 栃木県那須塩原市四区町1534-1)

E-mail: Tsunehiro.Sekimoto@jmail.penta-ocean.co.jp

²正会員 五洋建設株式会社 技術研究所 (〒329-2711 栃木県那須塩原市四区町1534-1)

E-mail: Sayaka.Nakajima@mail.penta-ocean.co.jp

中嶋ら(2011)による急勾配斜面に接続するリーフラットの長いリーフ地形に対する水理模型実験データを用い、リーフ上における規則波の変形と wave set-upについて詳細に解析を行った。本研究では波高として水位変動のrms値から算出したrms波高 H_{rms} を用いて波浪エネルギーの評価を行った。リーフ長が長い条件では、平均水位は時間的空間的に変動するが、長周期変動も含む全水深 d ($d = \bar{\eta} + h$, $\bar{\eta}$ はwave set-upを含む長周期変動, h は静水深)で無次元化した波高 H_{rms}/d に着目すると、リーフ上における波の再生条件として 0.28 ± 0.1 を得た。また、 H_{rms}/d を用いて波の減衰過程についても評価した。さらに、流れのある場合の碎波に伴うリーフ上の波の特性についても調べた。

Key Words : wave set-up, wave deformation, wave energy, wave breaking, reef with steep slope

1. はじめに

太平洋の島嶼国の多くはサンゴによる環礁とサンゴ礫が堆積したサンゴ州島により島が形成されている。このような太平洋の島嶼国は、地球温暖化に伴う海面上昇の影響により国の水没が懸念されており、その対策が求められている。この対策の一つとしてサンゴ州島の形成による国土保全の可能性が検討されており、サンゴ州島の形成メカニズムに関する研究が現在進められているところである¹⁾。

サンゴ州島の形成にはリーフ周辺の波と流れを適切に評価することが必要である。一般にリーフ地形は、急勾配斜面からリーフラットと呼ばれる水深の浅い地形に接続している。このような急勾配リーフ地形における波の変形については、水理模型実験や数値計算等による研究が行われているものの、詳しい現象の解明には至っていない。リーフ上では碎波に伴う wave set-upを含む長周期の水位変動が存在するとともに、これらによって発生する流れが存在し非常に複雑な様相を呈する。また、リーフ周辺の波浪場は非常に非線形性が強いことも、理解を妨げる原因となっている。そこで本研究は、リーフ上における波浪の変形についての理解を深めることを目的として、リーフ前面に急勾配斜面を有するリーフラットの長い地形に対して規則波を長時間作用させた実験デ

ータを用い、 wave set-upと波の変形について詳細に調べた。リーフ周辺の波浪場のように非線形性が非常に強い場合でも、波をエネルギー評価することによって線形理論を用いても比較的精度よく波浪場を評価できることから²⁾、本研究ではエネルギーに基づく波浪場の評価を行った。

2. 水理模型実験

(1) 水理模型実験

水理模型実験は中嶋ら³⁾により実施されたものであり、実験の詳細はそちらに譲るが、中嶋らの実験はリーフラットの長い地形条件を対象とし、規則波の場合であっても比較的長時間のデータを取得している。本研究では、中嶋らの実験データのうち、1段斜面で斜面勾配が1:1の条件を対象とし、波高の大きい規則波による実験結果を用いて詳細な解析を行った。本研究においては、図-1に示す模型地形を対象とし、容量式波高計によって沖側一様水深部3地点、斜面上3地点およびリーフラット上18地点において水位変動を計測している。また、実験条件は表-1に示すように潮位2種類、波高2種類、周期3種類の12ケースである。

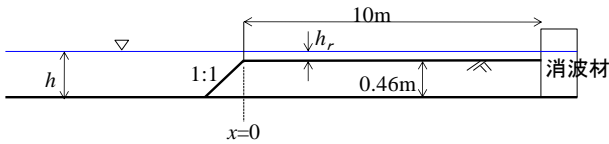


図-1 解析対象としたリーフ模型地形

表-1 実験条件

斜面勾配	水深 h (m)	波高 H_{rms} (m)	周期 T (s)
1:1	0.50 (LWL)	0.085	1.4
			1.6
			1.8
	0.53 (HWL)	0.12	1.4
			1.6
			1.8

(2) データ解析

本研究で対象としたようなリーフフラットが長い地形の場合、後述するように規則波実験であっても wave set-up は動的に変動する。そこで、水口⁴⁾と同じ数値ローパスフィルターを用いた移動平均によって長い周期の変動を含む wave set-up を評価した。ここでは、波浪成分の漏れがほぼない条件として 5s 以上の長周期成分を抽出した。また、水位変動については上記の wave set-up 成分を除いた平均水位周りのデータとし後の解析に用いた。リーフ上においては、伝播に伴い波の分裂が生じていたため、5波分の時間平均による水位の rms 値 η_{rms} を求め、これを $\sqrt{8}$ 倍して rms 波高 H_{rms} の時系列を算出した。なお、波高の空間分布を議論する際は、ある時間内を対象とした rms 波高として評価した。本研究ではまず平均水位変動に着目し、リーフ上における平均水位の時間・空間挙動について調べた。ついで、 H_{rms} の時間空間挙動について調べるとともに、リーフ上における規則波の再生条件および波浪変形と wave set-up に対する流れの影響について調べた。

3. データ解析結果

(1) 水位変動と平均水位の時間・空間挙動

図-2は水位時系列の空間分布の例を示したものである。本研究では、リーフエッジ位置を水平距離の起点 $x=0$ としている。まず、リーフより沖側 ($x < 0$) の一様水深部の水位変動に着目すると、入射波がリーフ斜面で反射され重複波が形成されていることがわかる。また、造波機の反射波吸収制御によって造波板からの再反射による波高の増大はほとんど見られない。ただし、後述するように、リーフエッジ付近では、引き波時に強い冲向き流れ

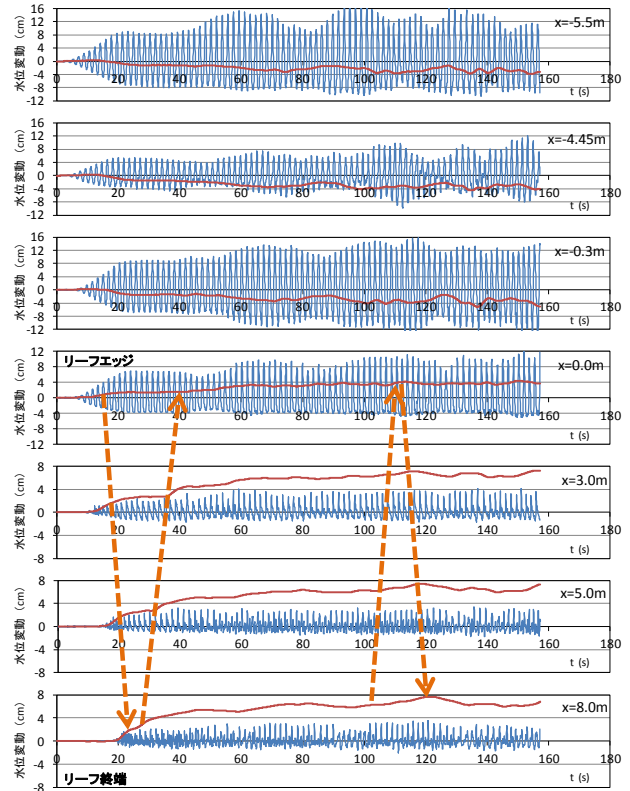


図-2 水位変動と平均水位の時系列の例 ($H_{rms}=12\text{cm}$, $T=1.8\text{s}$, LWL)

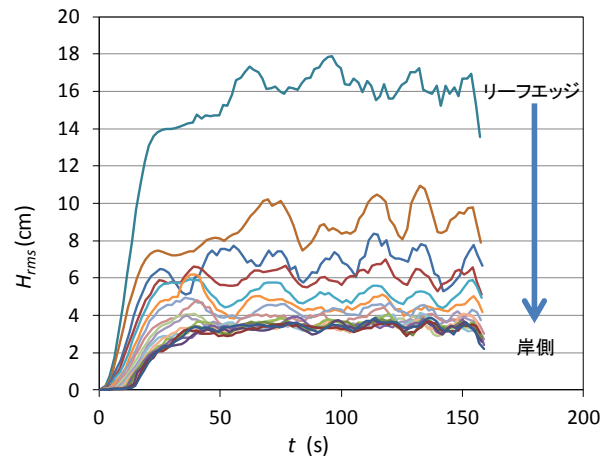


図-3 H_{rms} の時系列の例 ($H_{rms}=12\text{cm}$, $T=1.8\text{s}$, LWL)

が生じ、平均水位は動的に変動する。リーフ斜面からの反射率は、平均水位が変化する効果と強い冲向き流れと波との相互作用効果により時間的に変化するため、沖側一様水深部の水位振幅は時間的に変動すると考えられる。なお、リーフエッジにおける水位振幅の変動は、沖側一様水深部と比べて小さいが、沖側一様水深部の水位振幅変動に影響を与えている様子がわかる。

本実験のように、リーフフラットが長い条件の場合、リーフ上の wave set-up は、波浪とともにまず長周期段波として長波の波速で伝播する。リーフの終端で反射され

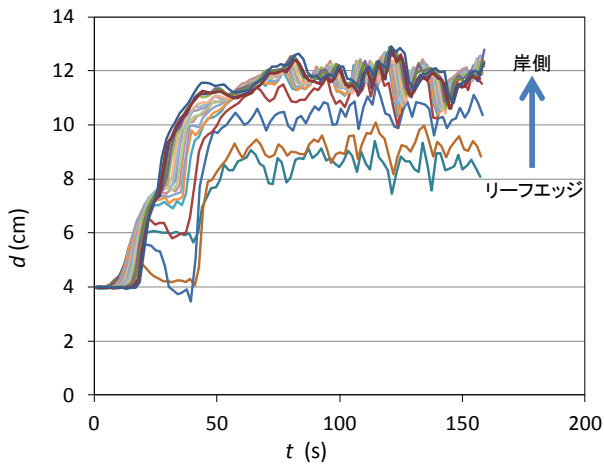


図-4 リーフ上における全水深 d の時系列の例 ($H_{ms}=12\text{cm}, T=1.8\text{s}, \text{LWL}$)

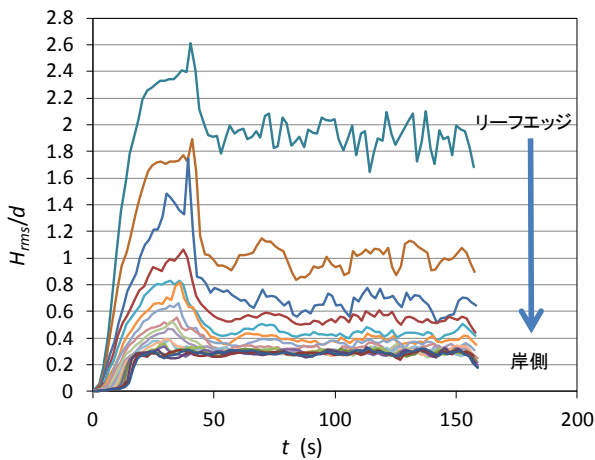


図-5 リーフ上における全水深 d で無次元化した波高 H_{ms} の時系列の例 ($H_{ms}=12\text{cm}, T=1.8\text{s}, \text{LWL}$)

た長周期段波が再びリーフエッジまで達して、ようやくほぼ定常な wave set-up が形成される。また長周期段波は、リーフエッジで一部が再反射され、再びリーフ上を伝播することが確認できる。

図-3は、 H_{ms} の時系列の空間分布を示したものである。リーフエッジにおける H_{ms} の変動は、入射波高の10%程度であった。波はリーフ上を砕波減衰しながら伝播し、ある H_{ms} 値に収束する様子が見て取れる。また、その伝播過程においても、リーフエッジにおける基本的な波高の時間変動構造は保持されていることがわかる。

図-4は式(1)で定義する全水深 d の時系列を示したものである。

$$d = \bar{\eta} + h \quad (1)$$

ここで、 $\bar{\eta}$ は wave set-up を含む長周期変動、 h は静水深である。全水深 d は、リーフエッジ近傍での変動が特に大きく、この変動は図-3に示したリーフエッジにおける H_{ms} の変動と概略対応していた。また、 H_{ms} と同様に d もリーフ上を進むにつれてある値に収束する傾向を示した。このようにリーフ上では rms 波高 H_{ms} は全水深 d と密接な

関係を有することから、全水深で無次元化した rms 波高 H_{ms}/d について、時空間変化を調べた。その結果を図-5に示す。 H_{ms}/d の時間変動は、 H_{ms} そのものの変動に比べて小さく抑えられていることが確認でき、リーフ上の波高を評価する上で有効と考えられる。また、リーフエッジでの波高に変動があっても、リーフ上を伝播するにしたがって H_{ms}/d は一定値に収束し、時間的な変動もほとんどなくなることがわかる。同時に、このときの H_{ms}/d は一様水深における波の再生条件と考えられる。

(2) 波高の空間変化

前節で H_{ms}/d による波浪特性の評価の有効性を示した。ここでは、wave set-upが比較的安定していた $t=70\sim 150$ 秒間におけるデータから H_{ms} を算出し、その空間変化の検討を行った。

図-6は、 H_{ms}/d の空間分布を示しており、横軸は沖波波長 L_0 で無次元化したリーフエッジからの距離とした。

まず、 H_{ms}/d で整理することによって、波高、周期や静水深に係らず統一的にリーフ上の波浪変形を評価できることがわかる。さらに、岸側に着目すると、各ケースとも同一の値に収束していることがわかる。ここで、前項で述べたように波の再生条件である H_{ms}/d の収束値を γ とすれば、 $\gamma=0.28\pm 0.1$ が本実験より得られた。また、中嶋ら³⁾が示した通り、リーフエッジから1波長の地点ではほぼ完全に砕波は終了し、波の再生位置とみなせることを確認した。

砕波帯における波の再生条件として、水口ら⁵⁾は波の振幅 a と静水深 h を用いて $ah=0.5$ すなわち $H_{ms}/h=0.5$ という条件を、泉宮・堀川⁶⁾は $(H_{ms}/d)^2/8=0.009$ すなわち、 $H_{ms}/d=0.268$ を与えている。また、丸山・清水⁷⁾、Dibajinia・渡辺⁸⁾および岡安ら⁹⁾は、砕波点における振幅水深比 $(a/h)_b$ を用いて流速波速比の再生条件を与えており、長波近似によって波高換算すればそれぞれ $1.0(a/h)_b$ 、 $0.8(a/h)_b$ 、 $0.9(a/h)_b$ 、 $(a/h)_b$ は0.25~0.5程度の範囲で変化するので、 $(a/h)_b=0.35$ 程度として H_{ms}/d に換算すれば、それぞ

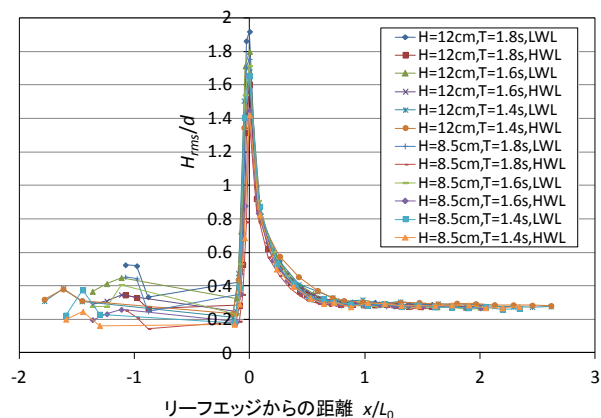


図-6 全水深 d で無次元化した波高 H_{ms} の空間分布

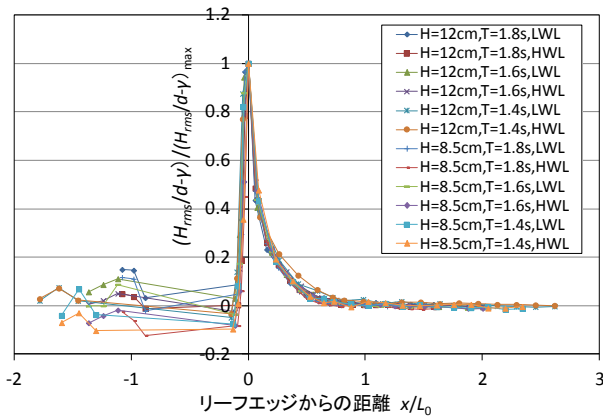


図-7 全水深 d で無次元化した波高 H_{rms} の空間分布

れ0.35, 0.304, 0.315となる. 田島・Madsen¹⁰⁾は $H_{rms}/d = 0.3$ としている. 本研究で得られた値は, これら既往の研究とほぼ同じであるものの, このようにきれいに整理された例はない.

図-7は砕波による波浪減衰の実質部分である H_{rms}/d から本研究で得られた一様水深部における再生条件 $\gamma = -0.28$ を差し引き, そのピーク値で正規化したものである. これによると, 波高, 周期および潮位によらず, ほぼ統一的にリーフ上の砕波による波高変化を示すことができる. このことは波の再生に必要なエネルギーを越える部分は, 砕波に伴う大規模渦に移行してエネルギーを失うことを意味しており, このエネルギー減衰過程は波高やリーフ上の水深に係らず単一の過程であることを意味する.

なお, リーフエッジ近傍では, 引き波時に干出に近い状態となり, 強い沖向き流れによる back wash vortex が形成され, 押し波時にはこれが砕波による乱れと一体となってリーフ上に押し出し・伝播することが確認されている³⁾. 図-7において, 沖波波長で正規化した距離によって砕波変形が説明できることから, 急勾配斜面にリーフが接続する場合, 砕波に伴う大規模渦は概ね沖波の波速でリーフ上に投げ出されるものと考えられる. また, この砕波に伴う大規模渦は back wash の影響を受けて強化されるとともに, 前述の back wash vortex と重なり合うため, リーフ上では急激なエネルギー損失が発生するものと考えられる.

(3) 波高と wave set-up に及ぼす流れの影響

(1) で述べたように, リーフ上に波が作用し始めた段階では wave set-up は長周期段波としてリーフ上を伝播する. したがって, wave set-up がほぼ定常状態に達するまでの間は, リーフ上には, ほぼ長波の流速の流れが存在している. そこで, (2) で検討した wave set-up が十分に発達した条件と上記の wave set-up が十分に発達していない条件について, wave set-up および H_{rms} について比較を

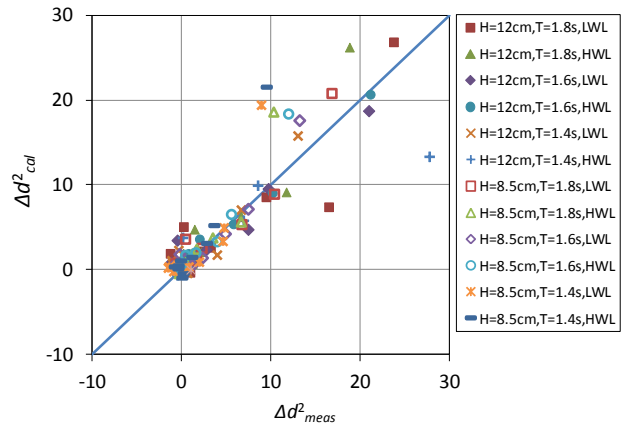


図-8 全水深の2乗値の差分 Δd^2 に関する実験結果と計算結果との比較

行った. ここでは, 初期段階に発生する岸向き流れがある状態を「流れあり」, wave set-up が十分に発達した状態を「流れなし」とした. なお, wave set-up が十分に発達した状態でもリーフ上で質量輸送に伴う沖向きの戻り流れが発生するが, 本実験条件の場合リーフエッジ付近に限定される.

十分に発達していない条件については, 水位変動波形の時系列をもとに陸側境界から反射した長周期段波が戻るまでの時間帯から5波平均の H_{rms} およびその期間の平均水位変動量を算出して用いた.

まず, 流れのない条件における H_{rms} と wave set-up の関係について確認を行った. 平均量の連続式と海底摩擦と水平拡散項を無視した運動方程式は次式で表される.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho d) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho du) = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho du) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho du^2) + \rho g d \frac{\partial \bar{\eta}}{\partial x} + \frac{\partial S_x}{\partial x} = 0 \quad (3)$$

ここで, ρ は水の密度, g は重力の加速度, d は全水深, u は流速, $\bar{\eta}$ は平均水位の変動量, S_x は radiation stress である. 定常で流れのない場合を考え, リーフ上の一様水深を仮定すると式(2), (3)は次式のように書き換えられる.

$$\frac{\rho g}{2} \frac{\partial d^2}{\partial x} + \frac{\rho g}{8} \frac{\partial}{\partial x} \left[H_{rms}^2 \left(\frac{1}{2} + \frac{2kh}{\sinh(2kh)} \right) \right] = 0 \quad (4)$$

式(4)より Δ を差分演算子として差分化した次式

$$\Delta d^2 = -\frac{1}{4} \Delta \left[H_{rms}^2 \left(\frac{1}{2} + \frac{2kh}{\sinh(2kh)} \right) \right] \quad (5)$$

の関係を利用し H_{rms} を用いて計算した結果と実験値との比較を行った. ただし, リーフエッジ付近は, 強い流れが存在することから, リーフエッジから岸側80cmの位置より岸側のデータを用いた. 図-8は比較結果を示したものである. 波高の変化が大きいリーフエッジから岸側

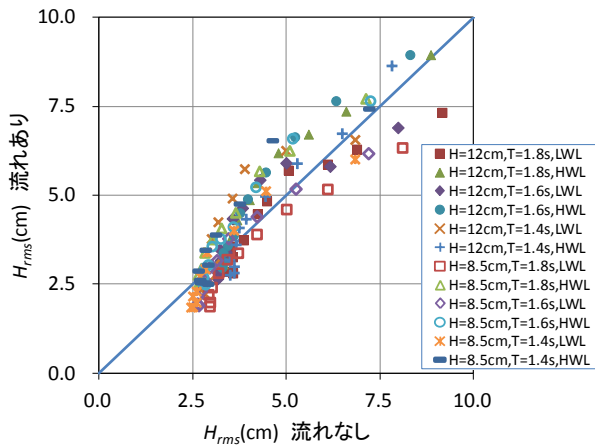


図-9 流れがある場合とない場合の波高 H_{rms} の比較

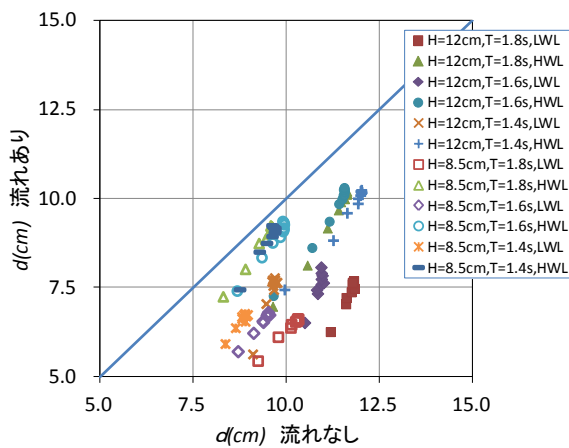


図-10 流れがある場合とない場合の全水深 d の比較

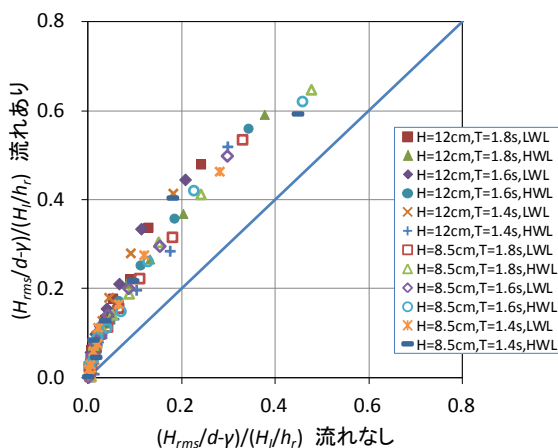


図-11 流れがある場合とない場合の正規化した波高 H_{rms} の比較

80cmの位置のデータについては式(5)の近似精度の低下によるばらつきが大きかったが、それ以外のデータは実験値と計算値がよく対応することがわかり、一般的な評価式でwave set-upを算出可能であることが確認できた。

次に、rms波高 H_{rms} および全水深 d について流れのない

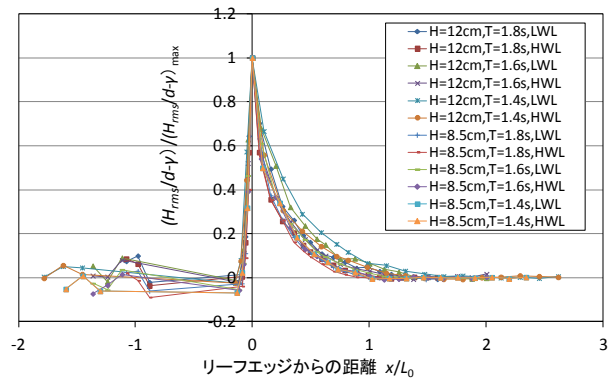


図-12 全水深 d で無次元化した波高 H_{rms} の空間分布：流れあり

条件と流れのある条件について比較を行った。図-9はrms波高 H_{rms} について、図-10は全水深 d についてそれぞれ比較したものである。rms波高については流れがある場合と流れがない場合で大きな差異は見られないが、流れがある場合の方が若干波高は大きくなる傾向を示した。当然ではあるが全水深 d については、流れがない場合に比べ流れがある場合の方が、全水深 d すなわち水位上昇量が小さくなった。特に流速が速くなると考えられる水深が浅く、波高が大きいケースにおいて顕著であった。

流れのあるケースでは、全水深 d が小さいにもかかわらず、 H_{rms} は流れのない場合とほぼ変わらないかあるいはやや高くなっていった。このことは、岸向きの流れがある条件では碎波減衰が遅れることを意味している。この理由としては、wave set-upが安定する前ではback washやback wash vortexが未発達であり、これらによるエネルギー損失が期待できないこと、また岸向き流れによる大規模渦の移流の効果があるものと考えられる。

また、波の再生条件に着目すると、流れがある場合もある値に収束する様子が見て取れる。そこで、波の再生条件を $\gamma=0.28$ として、図-7と同様に H_{rms}/d から γ を差し引いたものについて流れがある場合とない場合について比較を行った。なお、流速の効果を考慮するため入射波の代表流速の振幅として波高 H_l とリーフ水深 h_l の比で正規化した。図-11に比較した結果を示す。上記のような基準化を行うことによって、波高、周期およびリーフ上の水深によらず統一的にデータが整理できる。また、全水深の効果を明確に表すことができる。なお、この図から波の再生条件は、流れのあるなしによらず $\gamma=0.28$ となることもわかった。

図-12は、岸向き流れが有りの条件のときの H_{rms}/d の空間変化を表したものである。図-7に比べ波高の減衰が遅いのが分かる。また、図-10において、流れありの場合で岸向き流れが強い条件、すなわちwave set-up量の小さい条件のときでは、図-12に示されるように波高減衰の遅れが顕著であることが確認できる。なお、一様水深リーフ上ではエネルギーや大規模渦は長波の波速で輸送さ

れることから長波の波長を用いて整理を試みたが、この遅れについては十分に説明できなかった。したがって、砕波減衰の遅れは上述のようにback washによる大規模渦の強化がほとんどなくなることに、岸向き流れによる大規模渦の移流の効果が含まれていることが推察される。この詳細については今後の課題である。

4. おわりに

急勾配を有するリーフ上の波の砕波変形とwave set-upについて実験結果を詳細に解析し、その特性を明らかにした。本研究で明らかになった知見を示すと、リーフ上における波の再生条件は、

$$\gamma = \frac{H_{rms}}{d} = 0.28 \pm 0.1 \quad (6)$$

であることを明らかにした。また、リーフ上の波の変形においては、リーフエッジから沖波波長1波長の間に

$$E = \frac{\rho g}{8} (H_{rms}^2 - (\gamma d)^2) \quad (7)$$

に相当するエネルギーが波高、周期およびリーフ水深の影響を受けずにロスされることがわかった。さらに、流れがある場合、次に示すパラメータ α によって波高減衰の鈍化を評価することができる。

$$\alpha = \left(\frac{H_{rms}}{d} - \gamma \right) \frac{h}{H_I} \quad (8)$$

参考文献

- 1) 高橋 研也・片山 裕之・関本 恒浩・青木 健次・茅根 創・磯部 雅彦：サンゴ礁州島形成に及ぼす波・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, 2011.
- 2) Dibajnia, M.・磯部雅彦・渡辺晃：有限振幅波および微小振幅波の浅水変形の比較，土木学会年次学術講演会講演概要集第2部，43巻，pp.580-581, 1988.
- 3) 中嶋さやか・関本恒浩・片山裕之・高橋研也：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, 2011.
- 4) 水口優：砕波帯付近の長周期変動のダイナミクスについて，第 29 回海岸工学講演会論文集，pp.130-134, 1982.
- 5) 水口優・辻岡和男・堀川清司：砕波後の波高変化についての一考察，第 25 回海岸工学講演会論文集，pp.155-159, 1978.
- 6) 泉宮尊司・堀川清司：砕波帯における波のエネルギー方程式のモデリング，第 30 回海岸工学講演会論文集，pp.15-19, 1983.
- 7) 丸山康樹・清水隆夫：海浜断面の時間変化に対応する波浪変形計算手法，第 33 回海岸工学講演会論文集，pp.109-113, 1986.
- 8) Dibajnia, M.・渡辺晃：波浪場と海浜縦断地形変化の数値計算モデル，第 34 回海岸工学講演会論文集，pp.291-295, 2000.
- 9) 岡安章夫・磯部雅彦・渡辺晃：砕波帯におけるエネルギー収支と戻り流れのモデリング，海岸工学論文集，第 36 巻，pp.31-35, 1989.
- 10) 田島芳満・Madsen, O. S. : 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, 2005.

EXPERIMENTAL STUDY ON WAVE SET-UP AND WAVE DEFORMATION OVER SHALLOW REEF WITH STEEP SLOPE

Tsunehiro SEKIMOTO and Sayaka NAKAJIMA

Regular wave data over the shallow reef with steep slope were analyzed using data of experiments conducted by Nakajima et al.(2011). We selected root mean square wave height H_{rms} as wave height in our analysis for wave energy evaluation. By using a parameter H_{rms}/d , d is mean water depth, we estimate the parameter for the reborn wave height on the reef as 0.28 ± 0.1 . We investigate wave energy decay process using the parameter. We also study wave characteristics after wave breaking under the condition of flow existence.