急勾配リーフ上のサンゴ礁州島形成・維持過程の研究

Study on Formation Mechanism and Maintenance Process of Coral cays on a Steep Slope Reef

片山裕之¹・高橋研也²・関本恒浩³・茅根 創⁴・磯部雅彦⁵

Hiroyuki KATAYAMA, Kenya TAKAHASHI, Tsunehiro SEKIMOTO
Hajime KAYANNE and Masahiko ISOBE

Coral cays may be formed by the high waves in about several days. If the initial formation mechanism of coral cays can be understood, it will be useful for protection, the environmental preservation, and use of the coral reef seashore. Moreover, it can contribute also to protection of islands in Japan and the Pacific Ocean archipelagic country where the sea level rise due to global warming may result in submersion. In this paper, 3-dimensional hydraulic movable bed model tests were conducted to clarify the coral cays formation and maintenance process. Consequently, it turned out that wave breaking at leaf edge, the relative relation between leaf size and wavelength, and the cover effect of the wave and current by formation of the coral cays are important for the coral cays formation and maintenance process.

1. はじめに

サンゴ礁州島とは、サンゴ礁上に波・流れによりサンゴ礁等が堆積して形成される標高数mの低平な島である。サンゴ礁州島はインド洋や太平洋島嶼国で多く見られ、その数は200以上にも及ぶ。その形成・維持機構の解明は、我が国島嶼国だけに留まらず温暖化により水没が危惧されている太平洋島嶼国の国土保全にも役立てると考えられる(岩塚ら, 2012)。

サンゴ礁州島は、高波浪により短期間に形成、消失されることが既往の研究から明らかとなっている(例えば、宇多(1988)や鈴木(2013))。また鈴木ら(2013)は、サンゴ礁州島として西表島北方のバラス島の地形変化を調査し、ある程度の規模の台風が来襲する度に島の形状や高さの変化を伴う地形変化が生じていることを測量を実施して確認している。

サンゴ礁州島の形成機構については、過去に宇多ら(1990, 1992, 1995)、高橋ら(2011)が2次元水槽を用いた水理模型実験により検討をしている。また岩塚ら(2012)は3次元水槽を用いた水理模型実験により波・流れの影響によるサンゴ州島の形成メカニズムを検討しており、既往の知見からも州島形成機構は定性的には解明されているものの、維持過程も含めて定量的な解明にはまだ至っていない。

またサンゴ礁海域では、リーフ前面の急勾配斜面と水深の浅いリーフフラットが接続された地形がよく見られ

る。その地形の特徴から波の分裂や再生、海浜流の発達など複雑な波浪場が形成され、サンゴ州島形成の定量的な評価にはこの波浪場の評価が重要となる。例えば関本ら(2011, 2012)は、急勾配リーフ地形の波浪場評価をするために、位相平均モデルであるエネルギー平衡方程式の改良を行い波浪場予測精度の向上を試みている。

本研究では、リーフ上の波浪場・流速場、それらに伴う底質の移動について、3次元水理模型実験と数値計算により評価することにより、急勾配リーフ上の州島形成機構および維持過程の解明を試みたものである。

2. 平面水槽実験の概要

実験模型は、高橋ら(2011)、岩塚ら(2012)と同様に、反射波吸収制御を有する平面水槽(幅30m×奥行20m×深さ1.2m)に一般化したサンゴ礁州島を模擬した固定床開放型リーフ地形(リーフ天端部:長軸5m×短軸2m, 高さ0.7m, 斜面部:全周1/5勾配, 実験縮尺1/100を想定)を有する急勾配リーフ模型を用いた(図-1)。

リーフ面についても、高橋ら(2011)、岩塚ら(2012)と同様にパッチ状サンゴによる粗度を模擬しモルタル粗仕上げとし、現地サンゴ礁を想定した中央粒径0.61mmの珪砂を敷き均し初期砂面を形成した。

波浪条件、リーフ上水深、初期砂層厚の条件を変化させ表-1に示す計6ケースの実験を行った。なおCase-6は、基本ケース(Case-1)と総波浪エネルギーが等しくなるように設定した一方向不規則波の条件で、表中には有義波諸元を示した。実験では、各波浪条件の規則波を15分間作用させた後、超音波式砂面計にて平面的な地形測量を行った。更に波を15分ずつ作用させた30分後、45分後、60分後の地形測量を行い、底質の移動量を評価した。60分後でも平衡地形に達していないと考えられるケースで

1 正会員	博(工)	五洋建設(株)	担当部長
2 正会員	修(工)	五洋建設(株)	
3 フェロー	博(工)	五洋建設(株)	技術研究所長
4	理博	東京大学教授	大学院理学系研究科 地球惑星科学専攻
5 フェロー	工博	高知工科大学	副学長

図-1 平面水槽断面とリーフ模型(単位: m)

表-1 実験条件

Case	波高 (cm)	周期 (s)	水深 (cm)	砂層厚 (cm)	備考
1	1.8	0.8	2.5	2.0	基本ケース
2	1.8	0.8	3.5	2.0	水深変化
3	3.6	0.8	2.5	2.0	波高変化
4	1.8	1.2	2.5	2.0	周期変化
5	1.8	0.8	2.5	1.5	砂層厚変化
6	2.5 ^{注1)}	0.8 ^{注1)}	2.5	2.0	一方向不規則波

注1) 有義波の諸元

は最大180分後まで波を作用させた。

入射波条件やリーフ上の波や流れについては、砂を敷設しない固定床モルタル面の状態で、リーフ上の水位・流速を測定した。固定床実験では、容量式波高計を21箇所、電磁流速計を8箇所設置し、水位および流速をサンプリング周波数20Hzにて計測した。移動床実験では、底質の移動を妨げないようにリーフ上の計測器は全て撤去して波を作用させた。

3. 実験結果

(1) 地形変化

写真-1は、基本ケースであるCase-1における造波開始後15分後から180分後までの底質の移動状況を示したものである。15分経過後には前面のリーフエッジから約50cm後退した位置からつながるようにリング状の堆積が形成され、堆積頂部は静水面上に干出していた。15分後ではリーフ中央から後方にかけての堆積はわずかであったが、時間が経過するとともにリング上の堆積地形が拡大し、120分後にはほぼ完全につながったリング状の干出地形が完成し、リーフエッジ側の堆積位置は少しずつ後退をしたが180分経過後も維持されていた。

写真-1 リーフ上地形の時間変化(Case1)

写真-2 各ケースの60分後の地形変化

岩塚ら(2012)は、台風による高波浪(実験室スケールで波高3.6cm, 周期1.2s)を想定した移動床実験を行い、リーフ上の底質がリーフエッジの強い碎波の影響で岸側に輸送される過程で一時的にリーフ中央部に干出地形が形成されたものの、時間の経過とともにリーフ後方へ流出していた。しかし本条件では、波高が小さく周期が短いことでリーフエッジの碎波の影響が軽減し、また波長に対してリーフサイズが相対的に大きくなったことで環礁リーフ特有の回折波の寄与が拡大し、写真-1に示すようなリング状の堆積が形成されたものと考察される。

次に、各ケースの60分後の地形を写真-2に整理した。砂層厚が少ないCase-5は基本ケースと類似した地形となっているが、水深が深いCase-2、波高が大きいCase-3、周期が長いCase-4でリーフエッジ後方の堆積位置の後退が見られ、Case-3がリーフ外への流出量とあわせ最も大きくなっている。Case-6ではリーフエッジ後方の堆積位置は若干後退しているものの、全体的に堆積幅が広く安

図-2 各ケースの60分後の初期砂面からの変化量

定した堆積となっている。これは高波浪による掃流効果だけでなく、低波浪時の堆積前面側斜面を急勾配化させる効果も影響していると考えられる。

図-2には、各ケースの60分後の底質の移動状況を初期砂面からの変化量で示した。地形変化を比較すると、どのケースもリーフエッジ側では侵食されているが、後退量としては波高の大きいCase-3と周期が長いCase-4が大きい。なお、波高が大きいと後退とともに堆積高さも小さくなっているが、周期が長いと後退するものの堆積部分の幅だけでなく堆積高さも基本ケースより大きくなった。また、リーフ水深が深いCase-2のみ、堆積が見られなくなるだけでなく、リーフエッジに加えてリーフ内でも侵食が見られる。これはリーフ水深が深くなることでリーフ内に存在する波浪が大きくなり、リーフ内の底質に作用する掃流力が大きくなるためと考えられる。リーフ内の底質がリーフ外に流出しないためには、リーフエッジで十分な碎波により波高を減衰させる必要がある。一方向不規則波を作用させたCase-6では、波浪エネルギーの等しいCase-1より堆積の幅、高さとも大きく、リング上の堆積形状が他のケースに比べて安定していた。堆積高はCase-4と同程度であるが、リーフ後方の地形をみるとCase-6でも堆積は見られるがCase-4の方が顕著である。これは、周期が長く波形勾配が小さくなることで比較的リーフ後方のリーフエッジまで碎波せずに到達していることが影響していると考えられる。

次に、リーフ長軸上の縦断地形変化について整理した。図-3には、Case-1の15分後から120分後までの縦断地形変化を示した。この図から、リング上の堆積が形成される

図-3 リーフ長軸上の縦断地形変化 (Case1)

図-4 各ケースのリーフ長軸上の60分後の縦断地形

図-5 各ケースのリーフ長軸上の60分後の侵食堆積

ことで、リーフ内への波や流れの外力作用が遮蔽され、リーフ内では地形変化が生じず、リーフエッジ付近でのみ底質の移動が生じていることがわかる。図-4には、同様に各ケースの60分後の縦断地形変化を示した。図中、Case-3のみ静水面が35mmの位置になる。この図より、Case-2からCase-4ではCase-1より堆積位置が後退していることと、Case-3の堆積高さが他のケースより低いことがわかる。初期砂面からの変化量でみると、Case-3を除き、堆積高さはほぼ同じであるが、Case-3やCase-4ではリーフエッジ側の底質がほぼ掃流されてしまった状態であり、底質の供給がない限りこれ以上の堆積地形の拡大は生じないことがわかる (図-5)。

(2) リーフ上の水位・波浪・流れ

リーフ上の波・流れについて、固定床条件で図-1に示

図-6 リーフ長軸上の平均水位・Hrms・平均流速

図-7 各ケースの平均流速分布

す波高計21箇所、流速計8箇所において測定を行った。なお計測は、条件がCase-1と同じになるCase-5を除いた5ケースについて行った。図-6には、各ケースのリーフ長軸上の平均水位、2乗平均波高 H_{rms} 、平均流速を示した。この結果をみると、本研究で用いた周囲に海に囲まれた開放型リーフ地形ではリーフ上の平均水位上昇量は小さく、今回の入射波浪条件では波高はリーフエッジから1mの位置までに十分砕波減衰していること、リーフ内の流れは10～20cm/s程度であったことがわかる。波高については、一旦砕波により減衰した後、リーフ内またはリーフ後方で波高が増大している部分が見られる。これは、回折波の影響でリーフ側方からの波の影響や、リーフエッジを後方まで伝播してくる波も見られ、これらがリーフエッジで減衰した波に合成されて再生されているものである。リーフの最後方では、両サイドからの回折波とリーフ内を伝播してきた波の焦点が形成され砕波する様子も見られた。60分後の地形変化で最もリーフエ

ジ側の堆積位置の後退が見られたCase-4において、リング状の堆積位置がリーフエッジからおおよそ1mである。リーフ内の平均流速分布（図-7）をみると、固定床の条件であるが、リーフエッジ付近では砕波によるリーフ内に向かう強い流れが見られるが、リーフ内では基本的にリーフ後方に向かう流れが卓越している。移動床実験では流速を測定していないが、リーフエッジ後方に堆積が形成される遮蔽効果によりリーフ内の流れが減衰すると考えられる。このことからリーフ内の堆積は、リーフエッジにおける砕波による波高減衰と、リーフサイズと波長との相対関係が影響し、堆積地形形成によるリーフ内への波・流れが遮蔽される効果とあわせ干出地形が形成・維持されたものと考察される。

3. 位相平均型波浪変形モデルによる再現計算

急勾配リーフ地形の外力場は、砕波を含む非常に非線形性の強い現象で、高波浪時にはリーフエッジの干出もあり、ブシネスク方程式に代表される高精度時間領域モデルでも適用が難しいと考えられる。特にリーフ岸側の回折領域の波浪変形の評価においては、既往の波浪変形モデルでは評価が難しいと思われる。

本研究では、関本ら（2012）により2次元断面急勾配リーフ地形における波浪変形への適用性が確認された、エネルギー平衡方程式にサーフェスローラーの砕波減衰を考慮した田島ら（2005）の改良モデルを用いて再現計算を試みた。リーフ内の流れについては、計算された波高分布から海浜流として評価した。

なお、関本ら（2012）の検討でも、潮位が低く、リーフエッジでバックウォッシュが生じるようなケースではまだ課題が残されている。また田島ら（2005）のモデルも基礎方程式はエネルギー平衡方程式であるのでリーフ後方の回折波の影響は評価が難しい。ここでは、底質移

図-8 リーフ長軸上の平均水位・Hrms・平均流速の実験結果と計算結果の比較 (Case1)

図-9 平均流速分布の実験結果と計算結果の比較(Case-1)

動が卓越する前面側のリーフエッジ付近の外力場を評価することを念頭に検討を行った。

図-8にCase-1のリーフ長軸上の平均水位、 H_{rms} 、平均流速の実験結果(固定床)と計算結果を比較した。この結果、リーフ内の平均水位やリーフエッジでの碎波による波浪減衰については、リーフ後方の回折波が支配的となる領域の波高増大を除けば概ね再現できている。また平均流速については、計算の方がやや過大評価ではあることや、実験で生じているリーフエッジ付近の碎波による強い岸向き流速が再現できないこと等の課題はあるものの、リーフ後方に向けて平均流速が増大する様子やリーフ長軸から側方に向かい流速が減衰する点等が表せていることがわかる(図-9)。回折域の波高評価が課題であるが、今回の方法でリーフエッジ付近の底質移動の外力場の概略の傾向評価は可能であると考えられる。

6. まとめ

サンゴ礁州島の形成および維持機構について、外力場として重要となるリーフ上の波浪場・流速場、それらに伴う底質の移動について3次元水理模型実験により検討を行った。また外力場についてエネルギー平衡方程式を基本とする田島ら(2005)の改良モデルを適用した結果、以下の結論が得られた。

- (1) 開放型急勾配リーフ上で、リーフエッジの碎波により静水面から干出する環礁州島に見られるようなリング状の堆積地形が形成され、その遮蔽効果も伴い干出地形が維持される現象を再現した。
- (2) リーフ上のサンゴ礁州島の形成・維持過程には、

リーフエッジにおける碎波による波高減衰とリーフサイズと波長との相対関係および堆積地形形成によるリーフ内への波・流れの遮蔽効果が重要である。

- (3) 急勾配リーフ地形への適用を念頭に改良したエネルギー平衡方程式により、回折波の影響が支配的なリーフ後方を除き、リーフエッジの碎波からリーフ内への波浪減衰および流れを概ね再現できた。

今後は、数値モデルの精度向上と併せ、地形変化モデルの構築に取り組む予定である。

謝辞：本研究は建設技術研究開発助成制度(国土交通省)、および東京大学海洋アライアンスイニシアティブ(日本財団)の協力を得ました。ここに記して関係各位に謝意を表します。

参考文献

- 岩塚雄大・片山裕之・関本恒浩・青木健次・茅根 創・磯部雅彦(2012)：急勾配リーフ上のサンゴ礁州島形成メカニズムに関する研究，土木学会論文集B2 (海岸工学)，Vol. 68, No. 2, pp.I_476-I_480.
- 宇多高明(1988)：モルディブにおける高潮災害の現地調査，第35回海岸工学講演会論文集，第35巻，pp. 212-216.
- 宇多高明・谷本修志・坂野 章・高木利光(1990)：リーフ上およびリーフギャップ周辺におけるサンゴ島の移動機構，海岸工学論文集，第37巻，pp. 215-219.
- 宇多高明・小菅 晋・伊藤弘之・山崎順一(1992)：サンゴ洲島の形成・消失機構に関する研究，海岸工学論文集，第39巻，pp. 376-380.
- 宇多高明・小菅 晋・鈴木将之(1995)：サンゴ洲島の形成機構に関する実験的研究，海洋開発論文集，Vol. 11, pp. 73-78.
- 鈴木拓也(2013)：サンゴ礁州島形成における外力条件の評価，東京大学大学院理学系研究科修士論文。
- 鈴木拓也・茅根 創・岩塚雄大・片山裕之・関本恒浩・磯部雅彦(2013)：サンゴ礁州島の地形変化メカニズムに関する研究，土木学会論文集B3 (海洋開発)，Vol. 69, No. 2, pp.I_838-I_843.
- 関本恒浩・中嶋さやか・片山裕之・高橋研也(2011)：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，土木学会論文集B2 (海岸工学)，Vol. 67, No. 2, pp.I_11-I_15.
- 関本恒浩・中嶋さやか・片山裕之・高橋研也(2012)：急勾配を有するリーフ地形上の波浪エネルギーによる波浪場評価に関する研究，土木学会論文集B2 (海岸工学)，Vol. 68, No. 2, pp.I_51-I_55.
- 高橋研也・片山裕之・関本恒浩・青木健次・茅根 創・磯部雅彦(2011)：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.
- 田島芳満・Madsen, O. S. (2005)：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.