

サンゴ礫による地形変化の基礎的検討

岩塚 雄大¹・琴浦 毅²・片山 裕之³・田島 芳満⁴・茅根 創⁵

¹正会員 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)
E-mail: Yuudai.Iwatsuka@mail.penta-ocean.co.jp

²正会員 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)
E-mail: Tsuyoshi.Kotoura@mail.penta-ocean.co.jp

³正会員 五洋建設株式会社 名古屋支店 (〒460-8614 愛知県名古屋市中区錦3-2-1)
E-mail: Hiroyuki.Katayama@mail.penta-ocean.co.jp

⁴正会員 東京大学大学院教授 工学系研究科 (〒113-0033 東京都文京区本郷7-3-1)
E-mail: yoshitaji@coastal.t.u-tokyo.ac.jp

⁵東京大学大学院教授 理学系研究科 (〒113-0033 東京都文京区本郷7-3-1)
E-mail: kayanne@eps.s.u-tokyo.ac.jp

サンゴ礁州島の形成・維持機構の解明は、我が国島嶼部や温暖化により水没が危惧される太平洋島嶼国の保全の観点から非常に重要である。従来より、メカニズム解明のための実験や数値計算モデルの構築が進められているが、スケールの都合上、砂をサンゴ礫に見立てており、サンゴ礫の移動形態とは異なるものと考えられる。本研究では、実サンゴ砂礫を用いた2次元移動床水理模型実験を行い、通常の砂浜海浜の地形変化との相違点を考察した。さらに堆積地形を考慮した波浪場、流速場の再現計算を行い岸沖漂砂メカニズムの解明を試みた。研究の結果、サンゴ礫の見かけの比重が小さい効果から既往の砂浜や礫浜とは移動形態が異なること、数値計算モデルにより地形遷移過程においてもリーフ上の波高分布が精度よく再現可能なことが明らかとなった。

Key Words : coral reef, movable bed model experiment, steep slope reef, gravel transport

1. はじめに

サンゴ礁州島(写真-1)はサンゴ礁上に形成された標高数 m 程度の低平な島であり、静水面上に干出する。それらは主に環礁上に分布するが、環礁自体が世界で480ほどあり、1つの環礁に数10の州島が分布することや環礁のみならず孤立したリーフ(パッチ礁)上にも州島が形成されることから、その数は数1000以上にも達する。サンゴ礁州島の形成・維持メカニズムの解明は我が国島嶼部の保全のみならず、温暖化により水没が危惧される太平洋島嶼国の保全にも資することが出来る¹⁾。

礫によって形成された地形には、礫浜海岸や沖縄などの島嶼部においてサンゴ礫で形成された海岸、それらが固化して形成されるビーチロック海岸などが存在する。一般に、礫によって形成された海岸は礫の持つ透水性や礫の形状効果など通常の砂浜海岸とは異なる特性を持つことが知られており²⁾、礫浜海岸の海浜変形を対象とした研究³⁾が行われている。しかし、前述のような礫浜海岸は通常背後に陸地を形成しており、孤立リーフ上に単独で存在するサンゴ礁州島とは移動形態が異なる。

一方、サンゴ礁州島を対象とした既往研究では、その

初期形成や維持メカニズムの解明のための断面水槽実験⁴⁾や平面水槽実験⁵⁾⁶⁾が進められてきているものの、スケールの都合上、砂をサンゴ礫に見立てて検討されている。しかし、実際のサンゴ礁州島の形成物であるサンゴ礫は砂と異なり枝状やテーブル状で内部に空隙を含む構造を持つため、移動形態が異なるものと考えられる。

本研究では、サンゴ礁州島の形成・維持機構の解明を目的として、実サンゴ砂礫を用いた2次元移動床水理模型実験を行うことにより、通常の砂の場合の移動形態との相違点を考察した。さらに実験より取得した堆積地形



写真-1 サンゴ礁州島 (Tuvalu) (撮影日: 2013/4/11)

を考慮した波浪場の再現計算を行うことにより実験時のデータを補完し、岸沖漂砂メカニズムの解明を試みた。

2. 2次元移動床水理模型実験

(1) 実験模型

図-1に2次元移動床水理模型実験時のリーフ模型と計測器配置を示す。実験縮尺は1/10を想定し、反射波吸制御造波装置を有する断面水槽(長さ50m×幅0.6m×深さ1.2m)に一般的なサンゴ礁州島を模擬した固定床急勾配リーフ地形(リーフ天端部:延長8m, 高さ0.4m, 斜面部:1/5勾配)を設置した。リーフ地形は、リーフエッジ部を強固な岩礁を想定した固定式とし、リーフ上はリーフエッジ付近の底質への影響を抑制するため掘込み式とした。リーフ面は底質の透水性を考慮するため、底質を10cm厚で掘込み内部に様に敷設した。また、リーフ上の水深は実験条件に合わせ5cmから15cmの範囲で変化させた。

実験では、造波開始10分後、20分後、30分後、45分後、60分後、120分後に造波を一旦停止させ、超音波式砂面計にてリーフ縦断方向に2測線以上の地形測量を行い、底質の移動量を評価した。実験中はリーフ内外の波浪場・流速場の把握のために波高計を底質の移動に影響を与えないリーフ沖側に2点、リーフ勾配上に3点、リーフ上に2点の合計7点、同様に流速計をリーフ中央部に1点設置し、サンプリング周波数20Hzにて同時計測した。また、砕波の状況は断面水槽側面よりビデオカメラにて連続撮影した。なお、リーフ上の外力場を詳細に計測するために、サンゴ礫敷設部分を固定床として、リーフ上に波高計を4点、流速計を2点追加した固定床実験(図-2)を別途実施した。

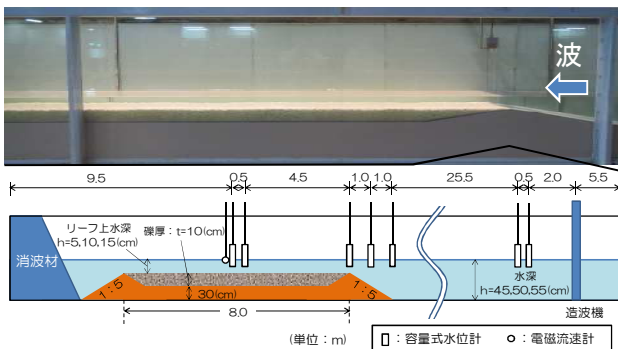


図-1 移動床実験時のリーフ模型と計測器配置

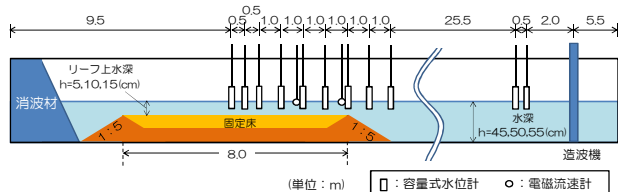


図-2 固定床実験時の計測器配置

(2) 実験条件

a) 底質材料

写真-2に実験で使用した実サンゴ砂礫(以下、サンゴ礫)と4号硅砂、参考としてサンゴ礫に近い粒径を持つ玉砂利、碎石を示す。また、諸元を表-1に示す。各諸元は実験に先立ち測定した。実験では一般的な州島の現地サンゴ礫の1/10を想定した代表寸法9.1mm×5.1mmのサンゴ礫を用いた。サンゴ礫群による堆積層の間隙率は4号硅砂、玉砂利より大きく、碎石と同等である。またサンゴ礫を構成する石灰質骨格の比重は2.81であり、4号硅砂や玉砂利、碎石よりもやや大きい。サンゴ礫はポーラス構造で内部に空隙を持つため、空隙を水で満たされた状態を想定した見かけの水中比重は0.89程度となり、通常の砂浜や礫浜の底質よりも大幅に小さく、その移動形態も大きく異なることが想定される。

b) 波浪条件

表-2に波浪条件を示す。表中の波高および周期は造波機の入力値であり、実験結果は沖側の波高計にて取得した実測値を入射波分離して整理した。実験では現地で想定される常時波浪を模した規則波を用い、波高12cm, 周期3s(いずれも実験スケール)を基本ケースとして設定し、波高、周期、水深をパラメーターとして数種類変化させた。さらに、サンゴ礫と砂の移動形態の違いを比較するため、同一波浪条件下で底質を4号硅砂(以下、

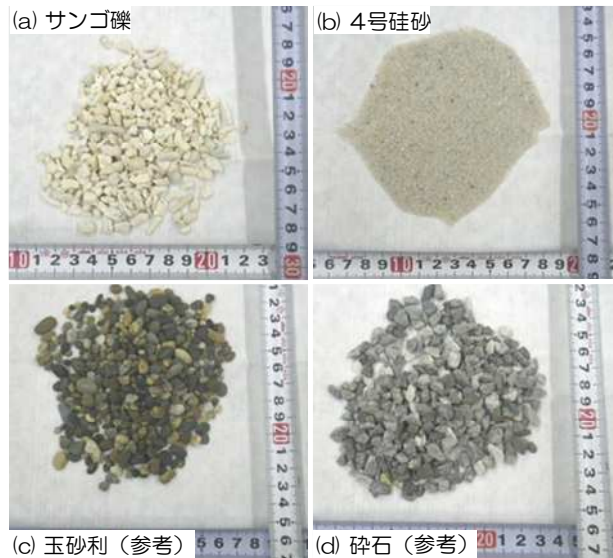


写真-2 実験で使用したサンゴ礫と4号硅砂

表-1 実験で使用したサンゴ礫、砂の諸元

	代表寸法 (mm)	粒子単体比重	間隙率 (%)	内部空隙率 (%)	見かけの水中比重	静水中の水中安息勾配 (tanβ)
サンゴ礫	9.1×5.1	2.81	45.9	32.7	0.89	0.61
4号硅砂	0.79	2.62	36.9	0.0	1.62	0.55
玉砂利※	3~8	2.65	35.2	0.0	1.65	0.46
碎石※	2.5~5	2.73	44.6	0.0	1.73	0.55

※: 参考値

砂)としたケースを行った。また、表-2の波浪条件とは別に、波高4 cm以下の波浪条件を作用させた実験を行い、サンゴ礫の移動限界を目視で確認した。

(3) 実験結果

a) 地形の経時変化

図-3に各ケースの初期砂面からの堆積断面の経時変化と平均波高、水位の関係を示す。図中の堆積高さは移動床実験で所得したデータを、静水位、平均水位、平均波高は固定床実験で取得したデータを用い整理した。また、

表-2 波浪条件

case	波高 (cm)	周期 (s)	リーフ上水深 (cm)	備考		
1	8	2	10	波高：小、周期：短		
2	12			周期：短		
2-S	12			周期：短、4号珪砂		
3	16	3	10	波高：大、周期：短		
4	8			波高：小		
5	12			基本ケース 4号珪砂		
6	16	2	5	波高：大		
7	12			3	15	水深変化
8	12					
9	12	3	5	水深変化		
10	12					

静水位は造波開始前の初期水位を、平均水位は造波中の水位変動の平均値を示し、漂砂収束・進行は造波開始120分以降の漂砂の状況を表す。

基本ケース(Case5)では造波開始後から時間経過とともに岸向漂砂量が大きくなり、静水面上への干出が確認された。その後、岸向漂砂量、干出高さは大きくなり造波開始120分後も岸向漂砂が進行した。波高16 cmとしたCase6では、Case5と比較してさらに岸向漂砂量、干出高さは大きくなり、造波開始120分後も岸向漂砂は進行した。一方、波高や周期を小さくしたCase2、Case4では岸向漂砂量は小さくなり造波開始120分後で安定地形となり収束した。なお、リーフエッジの効果から、いずれのケースでもリーフ沖側への底質の流出は見られなかった。

b) 岸沖漂砂量と最高標高の出現地点

図-4に波高別の累積岸向漂砂量と最高標高の出現位置を示す。累積岸向漂砂量は造波開始からの堆積高の岸沖方向分布を岸側から順に積分して算出し、その極大値を出力した。また最高標高位置は堆積高が最大となる地点をリーフエッジからの距離で示した。周期2秒と3秒いずれのケースでも波高増大に伴い漂砂量が増加し最高標高位置も後退するが、周期3秒の場合より顕著であった。

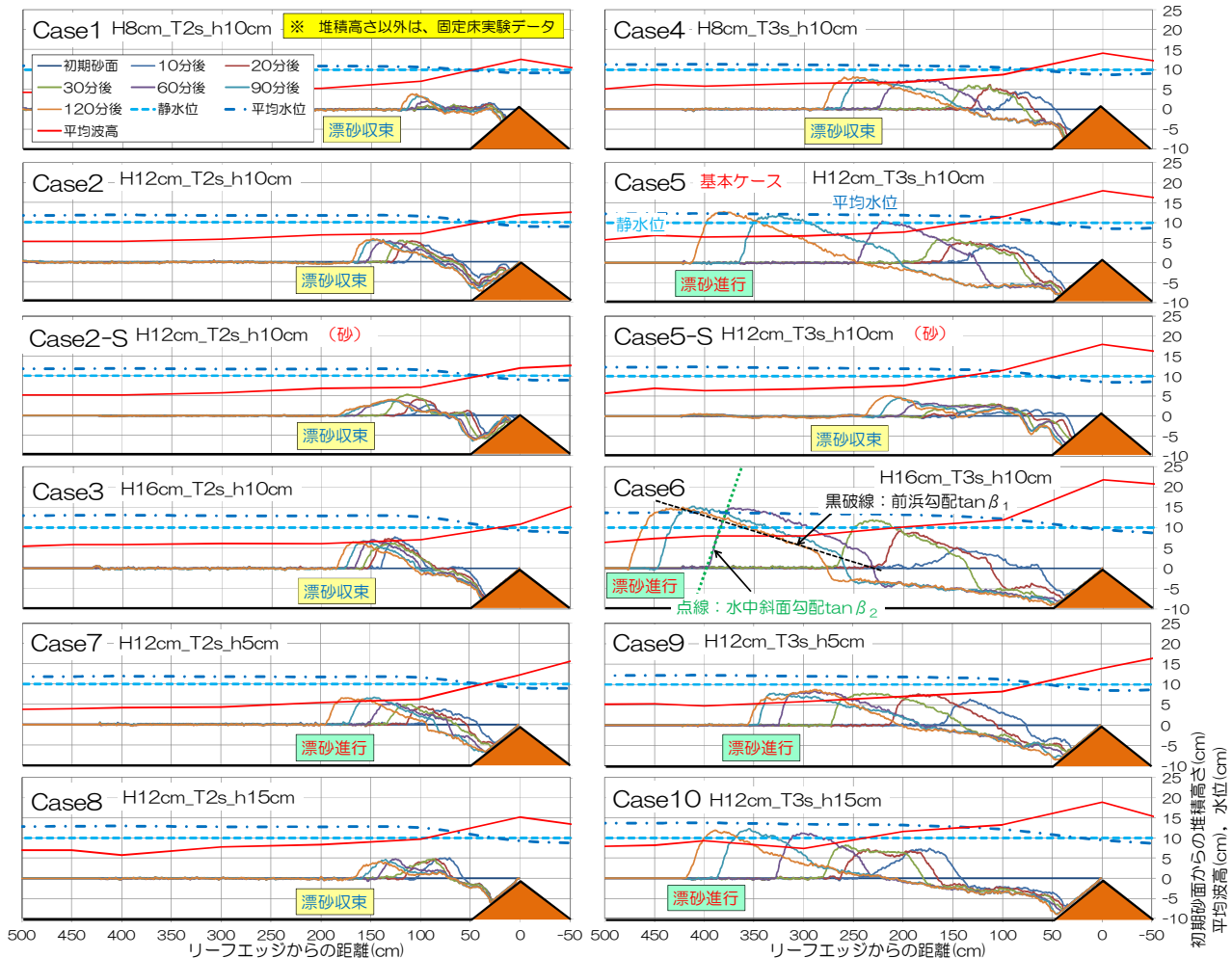


図-3 初期砂面からの堆積断面の経時変化と平均波高、水位の関係

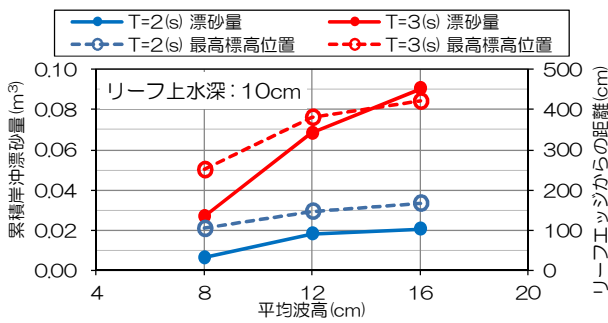


図-4 造波開始120分後の波高別累積漂砂量と最高標高位置

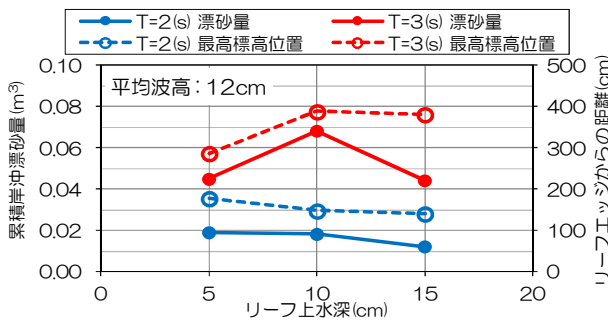


図-5 造波開始120分後の水深別累積漂砂量と最高標高位置

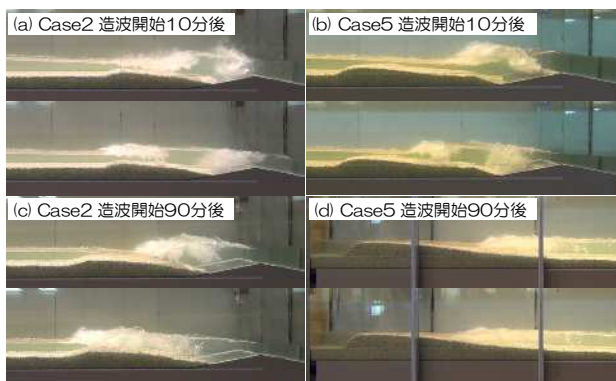


図-6 周期別の砕波状況

図-5にリーフ上水深別の累計岸向漂砂量と最高標高の出現位置を示す。周期2秒では水深増加に伴い漂砂量は減少し最高標高位置は後退するが、周期3秒では漂砂量は水深10cmでピークを示すものの最高標高位置は水深10cmと15cmは同等であった。水深が小さい条件では砕波点がリーフ沖側に移動することから、リーフ上の波高減衰が顕著に働いたことが要因であると考えられる。

c) 周期による影響

図-6にCase2, Case5実験時の砕波の状況を示す。実験条件より砕波形態はいずれも砕け寄せ波砕波となるが、Case2と比較して周期が大きく波長の長いCase5は砕波水深が大きくなり、リーフエッジ沖側で砕波した後も2次砕波を伴いながらサンゴ礁前浜上を伝播する。この状況は地形の後退に追従しながら継続され、造波開始より120分経過後でも見られた。これに対してCase2ではリーフエッジ直近で乱れを伴いながら砕波し、リーフエッジ付近でエネルギーが大幅に逸散する状況が見られた。これらが要因となり岸向漂砂量は周期3秒のCase5では大き

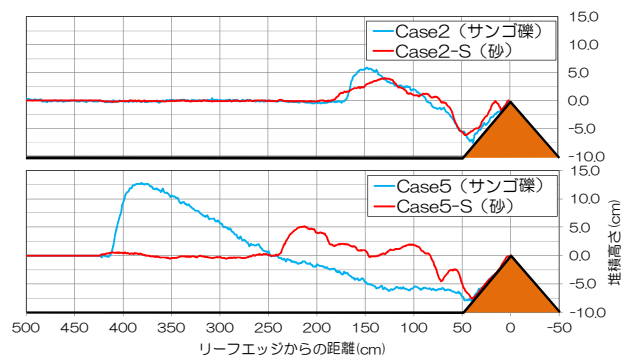


図-7 サンゴ礁と砂の堆積形状の違い (造波開始120分後)

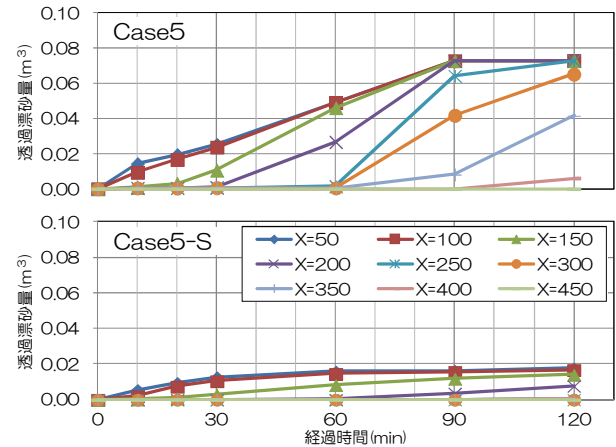


図-8 リーフエッジからの距離別の透過漂砂量の比較

いが、周期2秒のCase2では小さくなったと考えられる。

d) 底質材料による移動形態と勾配の違い

図-7にCase2, Case5の造波開始120分後のサンゴ礁と砂の堆積形状を示す。造波開始120分後ではCase2はサンゴ礁, 砂ともに、Case5は砂のみ地形は平衡状態になっている。なお、Case5 (サンゴ礁) では造波開始120分以降も岸向漂砂が進行した。リーフエッジで砕波の起こるCase2では周期が短く波高減衰が大きいことからサンゴ礁, 砂ともにリーフ上の外力が小さくなり堆積形状に有意な差異は認められないが、Case5ではサンゴ礁と比較して砂の移動量は大幅に小さい。これは表-1で示したようにサンゴ礁は砂粒子よりも見かけの水中比重が小さいため、砕波に伴う乱れや流れ、波動流速によって運ばれやすいことが要因であると考えられる。

図-8にCase5における累積岸向漂砂量の時間変化を示す。累積岸向漂砂量は、岸側から任意地点xまでの堆積量の積分値であり、xはリーフエッジからの距離を示す。Case5 (サンゴ礁) では累積岸向漂砂量は各地点とも時間経過によって単調増加するのに対し、Case5-S (砂) では値が小さく、造波開始60分後には、x=50cm, 100cmの各地点で収束している。

底質の侵食・堆積の傾向は一般的に(1)式に示されるCパラメーターにて検討されるが、本研究では底質比重による影響が無視できないため、(2)式に示す等価粒径の概念を考慮した本田ら⁸⁾のCパラメーターを用いた。等

価粒径の概念により通常の砂と同様に $C=8$ を閾値として堆積・侵食傾向の推定が可能となる。

$$C = (H_0/L_0) \cdot (\tan\beta)^{0.27} \cdot (d_r'/L_0)^{0.67} \quad (1)$$

$$d_r' = d_r \cdot (S_r - 1) / (S_s - 1) \quad (2)$$

ここで、 d_r' はサンゴ礫の等価粒径、 d_r はサンゴ礫の粒径、 S_r および S_s はそれぞれサンゴ礫と砂の比重を示す。 S_r を見かけの比重とした場合、サンゴ礫は $C=1\sim 2.5$ (タイプ III (堆積型))、砂は $C=6\sim 8$ (タイプ II (平衡型)) と分類でき、実験時の移動形態ともよく対応した。

図-9にCase1~Case6の前浜勾配 $\tan\beta_1$ の経時変化を示す。前浜勾配 $\tan\beta_1$ と水中斜面勾配 $\tan\beta_2$ の定義は図-3 (Case6)に示した。各ケースを比較した結果、造波開始0~60分後までは前浜勾配 $\tan\beta_1$ にばらつきが見られるものの、時間経過とともに収束し、造波開始120分後にはサンゴ礫、砂ともに $\tan\beta_1=0.1\sim 0.15$ となった。同様に、水中斜面勾配 $\tan\beta_2$ を比較した結果、サンゴ礫では $\tan\beta_2=0.4$ となり、表-1に示す静水中の水中安息勾配より小さい値を示すものの、既往の礫浜海岸の前浜勾配とよく対応した。

e) サンゴ礫移動限界シールズ数

図-10に実験時のシールズ数の比較を示す。図中の黒丸は既往の一樣流を用いた断面水槽実験結果⁷⁾を示す。シールズ数の算定に際してサンゴ礫の水中比重は見かけの水中比重である0.89を用いた。また、底面摩擦係数は波・流れ共存場におけるMadsenの底面境界層モデル⁹⁾より算出した。その結果、本実験と既往の実験⁷⁾より推定されるサンゴ礫移動限界シールズ数はおよそ0.03~0.08となった。これは、粒径0.61 mmの粗砂を使用した高

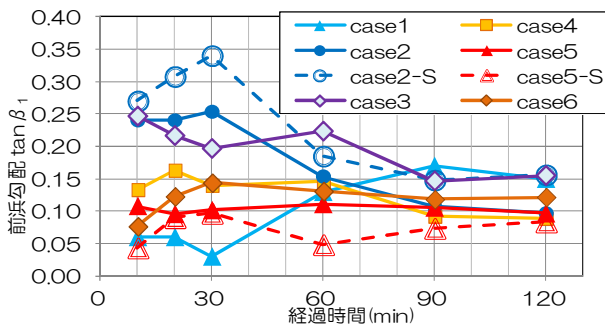


図-9 前浜勾配の経時変化

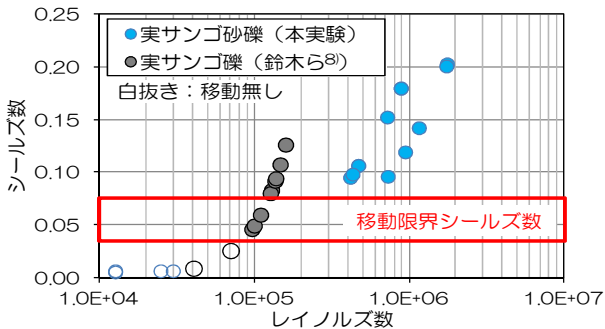


図-10 実サンゴ礫によるシールズ数の比較

橋ら⁴⁾の移動限界シールズ数0.06と同程度である。サンゴ礫においても、みかけの水中比重に基づくシールズ数の導入により、通常海浜砂と同様の限界シールズ数に基づき移動限界を評価できることが明らかとなった。

3. 数値モデルによる波浪場の再現計算

(1) 計算手法と計算条件

リーフ周辺の波浪変形の数値計算には実務への適用性が比較的容易であり、計算の安定性に優れたエネルギー平衡方程式を用いた。数値計算モデルは急勾配リーフ上での碎波変形を考慮した田島らのモデル¹⁰⁾を元に急勾配断面実験によってリーフ上の波高分布の適応性が確認された関本らのモデル¹¹⁾を用いた。本検討では移動床実験時に取得できない地形遷移過程の波高分布、底面流速分布の推定を目的とすることから、実験時に計測した地形データ (造波開始 10 分後, 60 分後, 120 分後) を計算地形として参照し、各時刻における波高分布、底面軌道流速分布を計算した。

(2) 数値計算結果

図-11に基本ケース(Case5)の計算結果を示す。なお、図中の実験値は固定床実験結果を示した。初期地形での数値計算の波高分布は実験結果とよく対応する。さらに、遷移過程の波高分布に着目すると岸向漂砂の進行に伴いリーフ上の波高値のピークもリーフ後方へシフトする傾向が示され、実験時に見られるように波が時間経過とともにサンゴ前浜上を遡上し波高が高くなる状況と一致した。底面軌道流速振幅は、リーフエッジ、リーフ上ともにおよそ一致するものの、実験時の計測点数が少なく精度検証が不十分であるため今後の課題である。

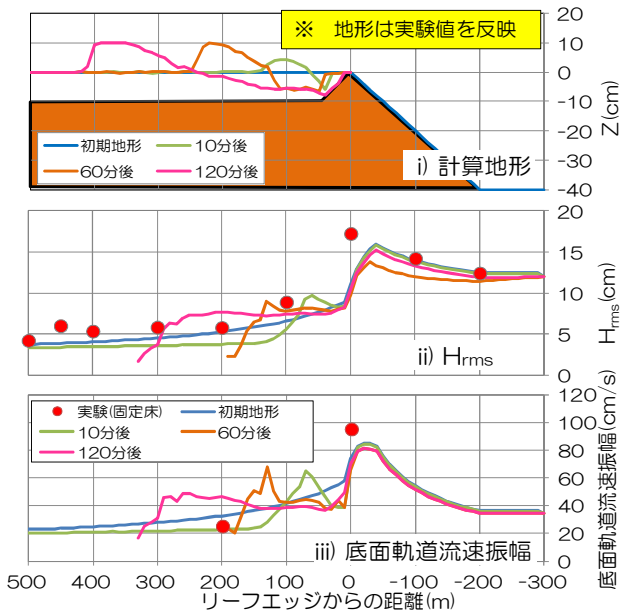


図-11 エネルギー平衡方程式による計算結果

4. まとめ

サンゴ礫による地形変化メカニズム解明のための2次元移動床水理模型実験と数値計算を行った結果以下の結論を得た。

- (1) サンゴ礫は通常の砂と比較し見かけの水中比重が非常に小さく、リーフエッジ近傍での岸向漂砂量が相対的に大きい。
- (2) 平衡状態における前浜勾配は砂とサンゴによる違いは比較的小さく、 $\tan\beta_f=0.1\sim 0.15$ となった。
- (3) サンゴ礫の見かけの水中比重を用いることにより、移動限界シールド数は通常の砂と同様に0.03~0.08となった。
- (4) 波浪変形計算を行った結果、急勾配リーフ上の地形遷移過程でもリーフ上の波高分布は精度よく再現可能なことを確認した。しかし底面軌道流速振幅は精度検証が不十分であり今後の課題である。

今後は、形状効果や噛合せ効果も勘案したサンゴ礫と砂の移動形態の違いをより明確にし、数値計算モデルへのサンゴ礫の適応を目標としたい。

謝辞：本研究は、国土交通省河川砂防技術研究開発で採択され、国土技術政策総合研究所から委託された「サンゴ礁海岸保全モデルの開発」により得られた委託研究成果の一部である。また、東京大学海洋アライアンスイニシヤティブ（日本財団）の協力を得た。ここに記して関係各位に謝意を表す。

参考文献

- 1) 茅根 創：サンゴ礁・州島の生体工学的保全・創成—生物が造る島の生体工学的保全・創成技術—，土

木技術，66巻，11号，pp.53-58，2011。

- 2) 和泉恵之，伊藤一二三，武笠裕美，宇多高明，酒井和也，石川仁憲，袴田 代，菅原健太郎：礫浜の有する優れた護岸根固め機能の現地実測，土木学会論文集 B3（海洋開発），Vol.69，No.2，I_862-867，2013。
- 3) 小野正順，出口一郎，荒木進歩：礫浜上の礫の挙動と礫浜の変形に関する研究，海岸工学論文集，第44巻，pp.526-530，1997。
- 4) 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。
- 5) 片山裕之，高橋研也，関本恒浩，茅根創，磯部雅彦：急勾配リーフ上のサンゴ礁州島形成・維持過程の研究，土木学会論文集 B2（海岸工学），Vol.69，No.2，pp.I_726-I_730，2013。
- 6) 岩塚雄大，片山裕之，関本恒浩，青木健次，茅根創，磯部雅彦：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_480，2012。
- 7) 鈴木拓也，茅根創，岩塚雄大，片山裕之，関本恒浩，磯部雅彦：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_843，2013。
- 8) 本田隆英，本多弘明，佐藤慎司，渡辺晃，磯部雅彦：底質比重による海浜断面変形の差異に関する研究，海岸工学論文集，第51巻，pp.501-505，2004。
- 9) Madsen,O.S.：Spectral wave-current bottom boundary layer flows, *Proc. 24th Int. Conf. on Coast. Eng.*, ASCE, pp.384-398, 1994.
- 10) 田島芳満，Ole Secher Madsen：碎波帯内外における底面流速波形の非対称性とそのモデリングについて，海岸工学論文集，第51巻，pp.21-25，2004。
- 11) 関本恒浩，中嶋さやか，片山裕之，高橋研也：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_55，2012。

(2015.3.18 受付)

FUNDAMENTAL STUDY ON TOPOGRAPHY CHANGE OF CORAL CAYS

Yuudai IWATSUKA, Tsuyoshi KOTOURA, Hiroyuki KATAYAMA,
Yoshimitsu TAJIMA and Hajime KAYANNE

Coral Cays are low lying island formed on the reef with height of about several meters above the mean sea level. It is crucially important for many island countries to understand the physical mechanisms of topography change of such coral cays for better coastal zone management strategy especially under the risk of sea level rise. While several laboratory experiments have been carried out to capture the deformation of such coral cays, many of them applied sand grains instead of coral grains, whose behavior may be significantly different. This study applied both sand and coral grains and aimed to capture how the different bed materials behave and eventually form cays on the reef. It was found through the experiment that, shoreward transport rates of coral gravels tended to be greater than those of sand grains while formed equilibrium beach slopes of either coral gravels and sand grains were nearly the same with each other. It was also found that the critical Shields parameters of coral gravels were consistent to those of sand grains if the porosity of coral grains was properly accounted for in the estimation of specific gravity of grains.