

# 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

## Study on Formation Mechanism of Coral Cays on a Steep Slope Reef

岩塚雄大<sup>1</sup>・片山裕之<sup>2</sup>・関本恒浩<sup>3</sup>・青木健次<sup>4</sup>・茅根 創<sup>5</sup>・磯部雅彦<sup>6</sup>

Yuudai IWATSUKA, Hiroyuki KATAYAMA, Tsunehiro SEKIMOTO  
 Kenji AOKI, 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 the past research, the formation mechanism of coral cays is performed by 2-dimensional tests. But, it includes neither the influence of 3-dimensional wave and current which were caused by waves equipped with open sea, nor the influence of a steep slope reef. In this paper, 3-dimensional hydraulic movable bed model tests were conducted to clarify the coral cays formation process.

### 1. はじめに

サンゴ礁州島とは、サンゴ礁上に波・流れによりサンゴ礫等が堆積して形成される標高数mの低平な島である。

サンゴ礁州島の形成は、高潮や台風時に発生したわずかな数日程度の非常に短時間の高波浪で形成されることがあると報告されている(宇多ら: 1988; 茅根: 2011)。このサンゴ礁州島の初期形成メカニズムを解明し、その形成・維持過程が制御可能になれば、サンゴ礁海岸の防護・環境保全・利用に留まらず、温暖化に伴う海面上昇により水没が懸念される我が国島嶼部や太平洋島嶼国の国土保全にも資することが可能となる。

州島の形成機構については、宇多ら(1990, 1992, 1995)や高橋ら(2011)が2次元断面実験による検討を行っているが、全周を外洋と急勾配リーフ地形に囲まれる環礁州島の特徴である平面2次元的な波・流れの影響については検討が不十分である。

本研究では、全周を外洋に囲まれた急勾配リーフ地形を対象として、上記の点を補足する平面水槽を用いた移動床水理模型実験により、サンゴ礁州島の初期形成過程について解明しようとしたものである。

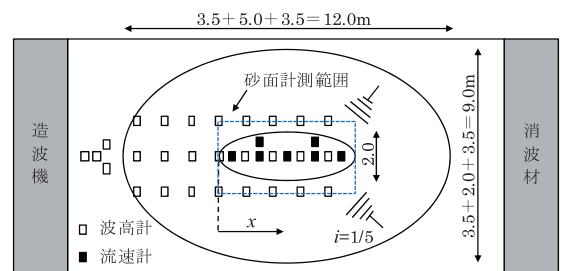
### 2. 実験方法

写真-1および図-1に実験模型を示す。実験模型は、反射

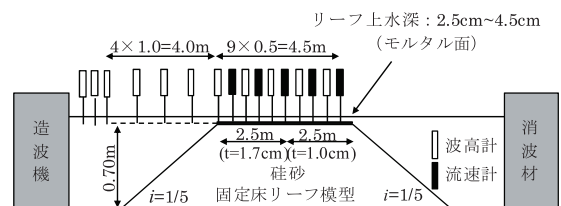
波吸収制御を有する平面水槽(幅30m×奥行20m×深さ1.2m)に一般化したサンゴ礁州島を模擬した固定床リーフ地形(リーフ天端部:長軸長5.0m×短軸長2.0m, 高さ0.7m, 斜面部:全周1/5勾配, 実験縮尺1/100を想定)を有する急勾配リーフ模型を設置した。リーフ上の静水深は高橋ら(2011)と同様3.5cmを基本条件とした。リーフ



写真-1 リーフ模型



(a) リーフ模型平面図



(b) リーフ模型断面図

図-1 平面水槽断面とリーフ模型(単位:m)

1	修(工)	五洋建設(株)	技術研究所
2	正会員	五洋建設(株)	技術研究所
3	フェロー	五洋建設(株)	技術研究所
4		元東京大学大学院理学系研究科	地球惑星科学専攻
5	理博	東京大学大学院理学系研究科	地球惑星科学専攻 教授
6	フェロー	工博	東京大学大学院新領域創成科学研究科 社会文化環境学専攻 教授

面は、パッチ状サンゴによる粗度を模擬するためモルタル粗仕上げとした。移動床実験では、高橋ら (2011) と同様に現地サンゴ礁を想定した中央粒径0.61mmの硅砂を底質として使用した。

茅根 (2011) や宇多 (1988) は、現地調査において、サンゴの白化による死滅後、高潮時の高波浪により大規模に破壊されたサンゴ礁が一時的に底質として多量に供給されることを報告している。したがって、現地ではリーフ上にサンゴ礁が潤沢に存在するものと考え、硅砂をリーフ中央部より造波機側で1.7cm厚、消波材側で1.0cm厚に敷きならし初期砂面を形成した。このリーフ模型に規則波を作用させ、リーフ上に生じる波および流れをフローと目視から、形成された地形を超音波式砂面計により計測し底質の移動量を評価した。

また、入射波やリーフ上の波、流れを詳細に測定するため、移動床実験時とは厳密には硅砂敷設厚分の水深が異なるが、リーフ上の波浪・流れ場をおおよそ再現したモルタル面における固定床実験を別途行った。固定床実験では、容量式波高計を28箇所、電磁流速計を7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入射波測定のために設置した造波機近傍の波高計3箇所を除きすべて撤去した。

表-1に実験条件を示す。予備実験として高橋ら (2011) の条件を参考に波高、周期を変化させた造波を数ケース行い、堆積状況を確認した。予備実験で静水面から干出する堆積が確認されたケースを基本ケース (case4) と設定し、それを元に (a) 波高 (常時波浪～高波浪時)、(b) 周期、(c) 水深 (低潮位～高潮位)、(d) 底質供給の有無をパラメータとし、全11ケースの実験を行った。各波浪条件の波を15分間作用させた後、地形測量を行い、底質の移動が小さいケースにおいては、更に波を15分刻みで造波させ、最大120分作用させた。リーフ上の地形測量は、

造波開始60分後と120分後に行い、地形測量を行っている時刻では目視により地形変化を確認した。

底質供給を行ったcase11では、一般にサンゴ州島ではリーフ上にサンゴが潤沢に生育しており、死滅したサンゴが底質として定期的に供給されると考えられることから、サンゴ礁の生物的供給を想定し、造波開始15分後、30分後、60分後にリーフ前面に底質を途中供給し、地形の安定を促した。なお供給量は、供給なしの基本ケース (case4) においてリーフ上からの底質流出量が20～30kg/15分であったことから、リーフ前面の底質が流失したエリアに1回あたり25kg供給することとした。

### 3. 実験結果

写真-2は、case4における造波開始前および造波開始15分後、60分後、120分後の底質の移動状況を示す。基本ケースであるcase4では、15分経過後では前方リーフエッジ後方に底質の堆積が見られ静水面上に干出した (堆積モードI)。しかし60分経過後では堆積域はリーフ後方へ移動し、堆積高さも減少し静水面から干出が見られなくなった。また、リーフ後方にも静水面近くまでの堆積が見られた (堆積モードII)。この位置はリーフ長軸上を伝播してくる波と両サイドのリーフエッジ外側からの回折波のおおよそ焦点にあたる位置で、目視から底質が集積され堆積している様子を確認できたが、その形成は不安定であり、波・流れだけでなくリーフ形状にも大きく影響される現象であると思われた。したがって、以下では、堆積モードIについての結果について説明、考察を行うものとした。

図-2は、case1～case11の造波開始15分後、60分後の平面堆積形状を砂面計で計測した結果である。同様に、図-3にはcase1～case11の造波開始15分後、60分後および120分後のリーフ長軸上の断面堆積形状を示した。ここで、図中に示す水位上昇面は固定床実験時の値である。すべてのケースにおいて、本実験条件ではSunamura (1984) の

表-1 実験条件 (実験縮尺: 1/100)

Case	波高 (cm)	周期 (s)	水深 (cm)	備考
1	1.6	0.9	3.5	等波形勾配
2	3.6	0.9	3.5	周期変化
3			2.5	水深変化
4		3.5	基本ケース	
5		4.5	水深変化	
6	5.6	1.6	3.5	周期変化
7			2.5	波高 (大)
8		3.5		
9	4.5	1.0	3.5	等波形勾配
10	4.5			
11	3.6	1.2	3.5	底質途中供給

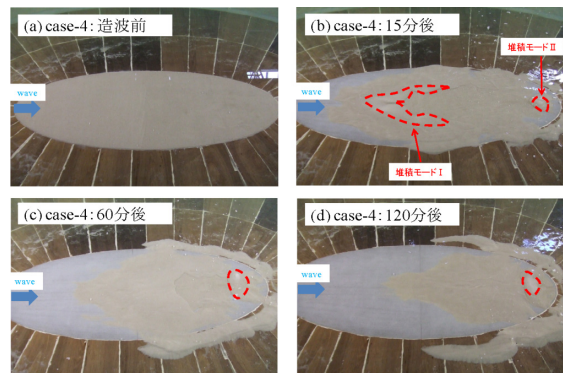


写真-2 堆積形状の経時変化 (case4)

パラメター  $C_s > 18$  (侵食地形) となることから侵食地形となり、一時的には沖側リーフエッジ後方に静水面上に干出する堆積地形が形成されるものの、時間の経過とともに砂はリーフ後方へと移動しながら侵食されていた。case4に対し水深のみを変化させたcase3およびcase5は、堆積パターンに大きな差異は見られなかったものの、最大堆積高さは、水深の増加に伴い高くなり、case3, case4では静水面より干出した。このときの干出高さは固定床実験時のwave setupにより上昇した平均水位とおおよそ一致した。これは宇多(1988)や高橋ら(2011)も報告して

いる通り、現地では大きなwave setupを引き起こす高潮時等に堆積高が高くなり、通常時には干出するというサイクルが平面実験でも再現されたと考えられる。同様に基本ケースより波高の大きい条件で水深のみを変化させたcase7, case8, case9では、波高の小さなケースと比較して底質の移動量が大きくなるものの、静水時に干出するには至らなかった。等波形勾配で波高の大きなcase10では、底質の移動が特に顕著であり造波開始60分後には底質はすべて流出した。逆に、基本ケースより波高や周期を小さくしたcase1, case2では底質の移動は少なく、造波

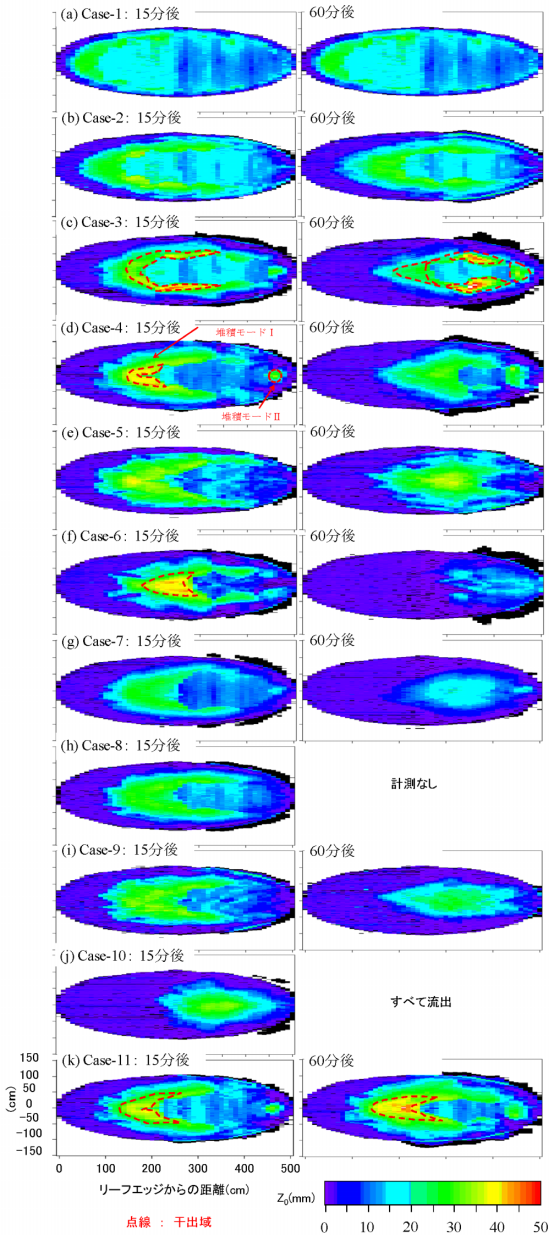


図-2 リーフ上の平面堆積形状の経時変化

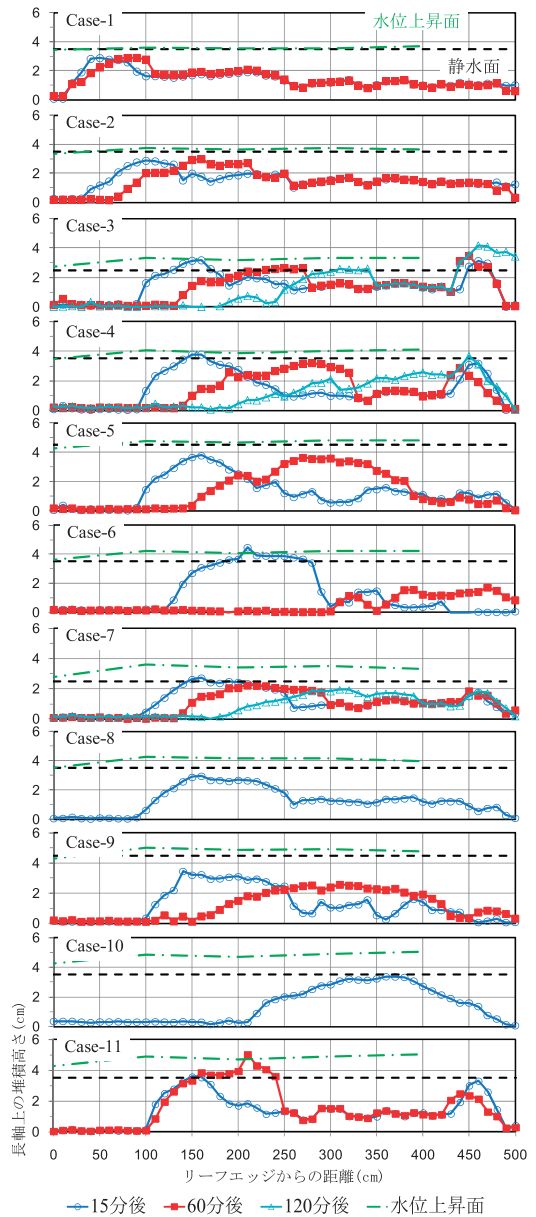


図-3 リーフ長軸上の堆積形状

開始60分後でも大きな底質の移動は見られず結果として堆積は見られなかった。基本ケースの波浪条件に途中で底質供給をおこなったcase11では、底質の供給により州島形成位置は60分後も15分後とほぼ変わらず、堆積高さも高くなっていった。底質の供給量や供給頻度などは、物理学的な面だけでなく生物学的なサンゴの死滅ともなう供給量と密接に関連しており、今後検討していく課題はあるものの、定性的には底質が供給されることにより州島地形が維持される傾向が示され、初期形成された州島維持への底質供給の必要性が認められた。

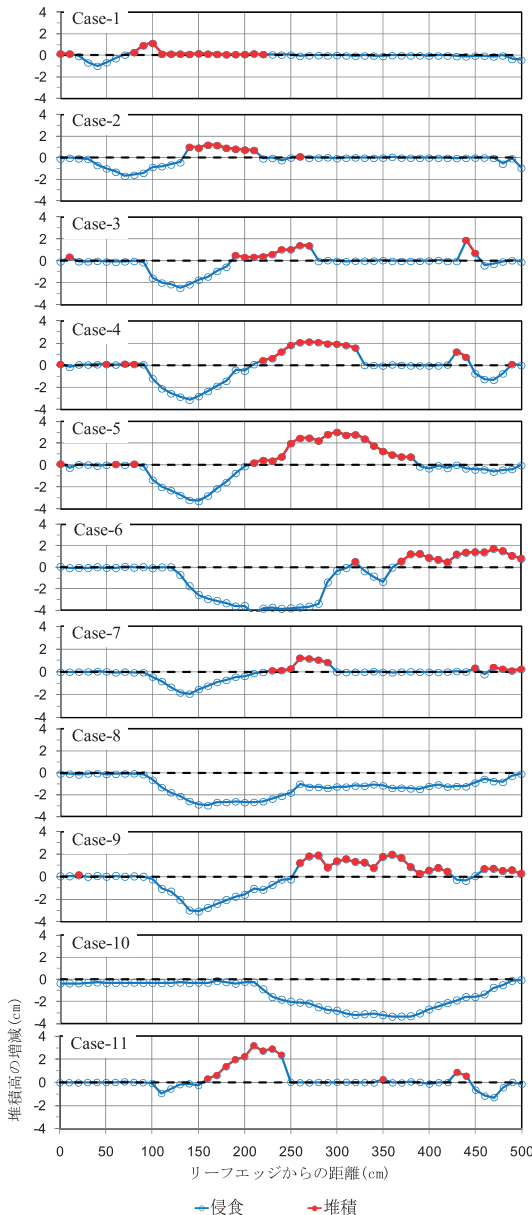


図-4 リーフ長軸上の堆積高の変化 (15分後～60分後)

図-4は造波開始15分後から60分後のリーフ長軸上の堆積高さの変化を示したものである。これより、どのケースにおいても先ずリーフエッジに近い側で侵食され、侵食された底質が岸側に堆積していることがわかる。等波形勾配のcase1, case4, case10より、波浪エネルギーが大きい程、侵食・堆積範囲が岸側に移動している様子がわかる。また、同じ波浪条件で水深を変えたcase3, case4, case5を比べると、図-3より水深が大きい程堆積高さが高くなっていったが、侵食範囲も水深が大きい程広がっていることがわかる。また途中で底質を供給したcase11をみると、沖側の侵食面積と比べ堆積面積の方が大きく、リーフエッジ付近に供給した底質が $x=150\sim 250\text{cm}$ の堆積によって岸向きの移動を阻害され堆積が成長している。

図-5は、堆積開始位置と前方リーフエッジ付近の平均流速の2乗値との関係を示したものである。図より堆積開始位置は平均流速の2乗値と相関が高いことがわかり、定性的には平均流速が大きいリーフエッジ側では掃流力が大きく堆積できないと考えてよい。同様に平均流速が小さなケースではリーフエッジ付近の掃流力が小さく、底質の移動が生じないものと思われる。

図-6は、等波形勾配であるcase1, case4, case10のリーフ長軸上の (a) 平均水位, (b) 平均波高, (c) 平均流速, (d) 岸向最大流速の平均値の分布を示したものである。平均水位は、入射波高の増大にともない大きくなるが、平均波高はリーフエッジ付近での碎波減衰により規定され、リーフ上ではケース毎に大きな差異は見られない。またリーフ上での平均流速は、入射波高が大きいほど速くなるが、リーフ内ではほぼ様な分布を示した。しかしリーフ上の岸向最大流速の平均値に着目すると、case10では $x=250\text{cm}$ 付近に向けて流速値が急激に低下しており、15分の堆積位置 (図-3) とほぼ一致している。同様にcase4でも流速低下位置と堆積位置がほぼ合致しており、流速が全体的に小さいcase1ではリーフエッジ付近に堆積していることから、リーフ上の波峰通過時の岸向最大流速が

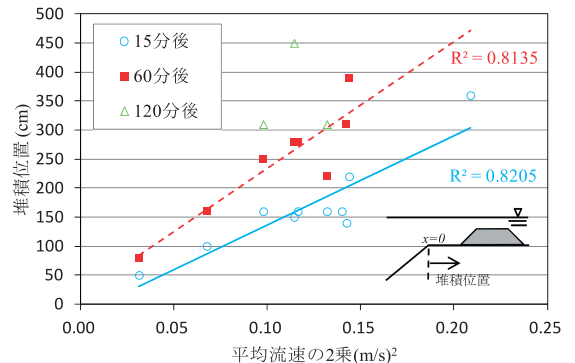


図-5 州島堆積開始位置とリーフ上流速の関係



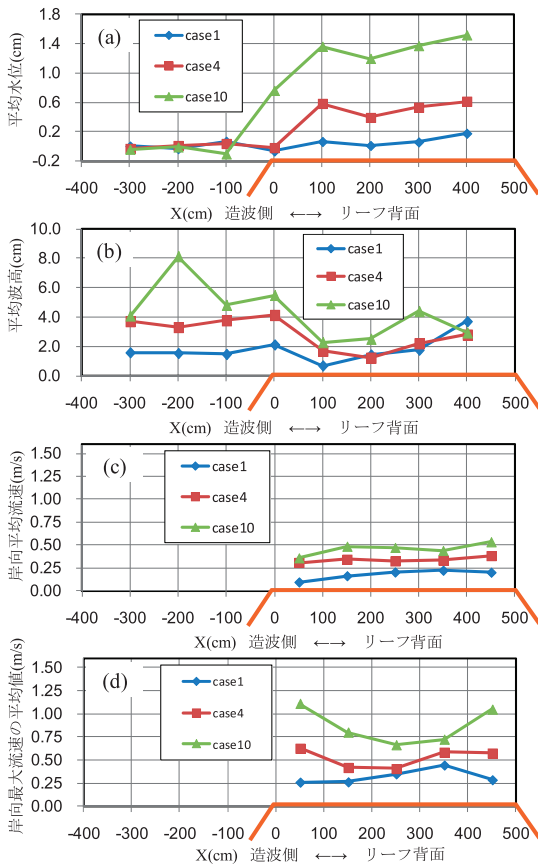


図-6 リーフ上の平均水位, 平均波高, 岸向平均流速, 岸向最大流速の平均値の分布 (case1, case4, case10)

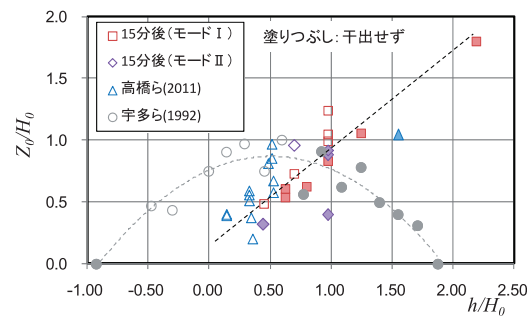


図-7 水深波高比と無次元堆積高さ

底質の移動・堆積に大きな影響を与えると考えられる。

図-7に水深波長比と造波開始15分後時点における無次元堆積高さの関係を示す。ここで、 $h$ :水深、 $H_0$ :換算沖波波高、 $Z_0$ :最大堆積高を示す。図中には宇多ら(1992)、高橋ら(2011)の実験結果も同時に示してある。宇多らのようにリーフエッジ自身が侵食され堆積が生じる現象と、本実験および高橋らのようにリーフエッジは強固で侵食されず

リーフ上の底質のみが堆積材となる現象では傾向が異なると考えられ、水深波高比が大きくなってでも堆積は生じていた。ただし静水面から干出したのは宇多ら、高橋らと同様の傾向を示し $h/H_0$ が1.0以下の範囲でしか見られなかった。

#### 4. おわりに

本研究では、サンゴ礁州島の形成に関する水理模型実験を行った。主要な結論は以下のとおりである。

- ・全周を外洋に囲まれた急勾配リーフ上ではリーフエッジの碎波とリーフ内の強い流れにより侵食地形であるが、条件により砂移動の過程で平均水位の上昇に追従した砂の堆積が発生し、リーフ内に静水面上に干出す州島が形成された。
- ・底質の堆積の有無や堆積形状、堆積位置などはリーフ上の岸向き最大流速に大きく影響される。
- ・底質の定期的な供給により地形の安定が促進されることを確認した。
- ・堆積高さは水深波高比により整理されるが、リーフエッジの侵食の有無により傾向が異なる。

今後は州島形成条件の定量的評価と数値予測モデルの構築が目標である。またリーフ前面に形成される堆積域をさらに助長するような構造物が提案できれば、さらに強固な州島の形成が期待できるであろう。

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ヤティブ(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

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片の移動機構, 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.  
 茅根 創(2011): サンゴ礁・州島の生態工学的保全・創成-生物が造る島の生態工学的保全・創成技術-, 土木技術66巻11号, pp.53-58  
 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.  
 Sunamura, T. (1984): Quantitative predictions of beach face slopes, Geological Society of America Bulletin, Vol. 95, pp. 242-245.