

# 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

## Influence of Waves, Currents and Gravel Supplies on the Formation of Coral Cays

高橋研也<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>

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

Coral cays are low-lying islands formed by coral gravels deposited by the waves and currents on the coral reefs. Cases have also been reported that the coral cays were formed in the short time scales when high waves with storm surges. Once the formation of coral cays can be controlled, which can contribute to the protection, environment and use of the coast on coral reefs and the national land conservation of the Pacific Ocean island nations in danger of inundation by the sea level rise. In this paper, the formation mechanism of the coral cays is verified through hydraulic movable bed model tests and the numerical simulation aimed at Ballast Island in the north of Iriomote Island. As a result, we confirmed that the wave breaking on the reef edge, wave setup, currents, and gravel supplies on the coral reefs exert influence on the formation of coral cays.

### 1. はじめに

サンゴ礁州島とは、波・流れによりサンゴ礁上にサンゴ礫などが堆積して形成される、標高数mの低平な島である。サンゴ礁州島は世界に1000島以上あり、我が国では沖縄本島西方のチービシヤルカン礁、西表島北方バラス島、中城湾泡瀬干潟、久米島ハテナハマなど、沖縄島嶼周辺に点在している(青木ら, 2010; 宇多ら, 2004; 野口ら, 2010)。マーシャル諸島やツバル、モルディブなどの国土全体がサンゴ礁州島から成る島嶼国家も多く、地球温暖化に伴う海面上昇により水没の危機にある(茅根, 2008)。サンゴ礁州島の形成が制御可能になれば、サンゴ礁海岸の防護・環境・利用にとどまらず、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できる。

宇多(1988)は、サンゴ礁州島が高潮を伴う高波浪時に短い時間スケール(1時化)で形成され安定化した事例を報告している。しかし、リーフ周辺の波・流れは複雑で、かつ州島の構成物は生物起源のサンゴ砂礫であることから、形成メカニズムは未だ明らかでない。また、宇多ら(1990, 1992, 1995)はサンゴ礁州島の形成実験を行っているが、本来堅固なリーフエッジを移動床モデルとしている点や、サンゴ礫の生物的供給過程が考慮されていない点など、現地に則していない点もある。

本研究では、写真-1に示す枝サンゴ礫のみで構成された西表島北方バラス島を対象に、上記の点を補足する2次元移動床水理模型実験を行うとともに、島周辺の波浪場と海浜流場の数値計算を行うことで、サンゴ礁州島の形成メカニズムについて考察を加えることを目的とした。

### 2. 水理模型実験

#### (1) 実験方法

実験条件はバラス島を念頭において設定した。図-1に実験断面図を示す。実験縮尺は1/100を想定し、反射波吸収制御装置を有する2次元造波・還流水槽(長さ50m, 幅0.6m, 高さ1.2m)に固定床リーフ模型(リーフ長10m, 幅0.6m, 高さ0.456m, 前面勾配約1/5)を設置した。なお、水路両端をつなぐ還流装置が配管されており、バルブの開度を調節することで岸側の境界条件を変化させることが可能である。リーフ面はサンゴパッチによる摩擦・形状抵抗を考慮してモルタル粗仕上げとし、現地のサンゴ礫サイズおよびサンゴ群集の高さと分布状況を想定し、中央粒径0.61mmの珪砂にてリーフエッジから2m

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

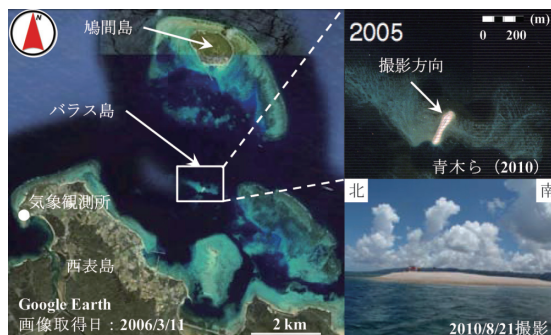


写真-1 西表島北方バラス島(青木ら, 2010)

の範囲に厚さ1cmの初期砂面を整形した。このリーフ模型に規則波を作用させ、地形安定後の断面形状を側壁ガラス面から読み取り、サンゴ礫の生物的供給が継続的であると仮定して砂をリーフエッジ上に2kg追加投入した。この実験フローを堆積高が最大値に達するまで繰り返し、造波停止後に最終断面形状をレーザー式砂面計にて0.1m間隔の5測線で計測した。また、入射波やリーフ上の波・流れを詳細に計測するための固定床実験も別途行い、容量式波高計を造波機前面、リーフ斜面上およびリーフ上の計29箇所に、プロペラ式流速計をリーフ上の計11箇所に配置し、水位および底面上1.5cmの水平流速をサンプリング周波数20 Hzにて計測した。移動床実験においては、州島の形成を妨げないように、リーフエッジから4mの範囲の計測機器を撤去して実験を行った。

表-1に実験条件を示す。比較対象ケースに対して、(a)水深（低潮時～高潮時）、(b)波浪（常時～高波浪時）、(c)岸側境界条件（リーフ上の流れ）をパラメータとして、全9ケースを設定した。(c)では還流装置のバルブの開度を調節することにより、リーフ上における平均水位上昇量と流れの変化を期待できる。なお、入射波検定は沖波として造波機から2～4本目の波高計位置において行った。

実験は、まずはケース1からケース9までをそれぞれ行い、各パラメータがサンゴ礁州島の形成へおよび影響を確認した。次に、岸側を閉境界としたまま、ケース1, 5, 6, 3の順番に波浪と水深を時間的に変化させた実

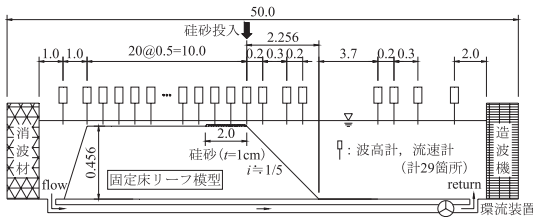


図-1 実験断面図 (単位: m, 実験縮尺: 1/100)

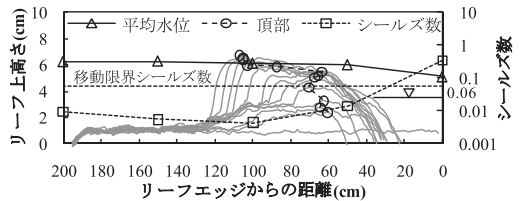
表-1 実験条件 (実験縮尺: 1/100)

ケース	波高 (cm)	周期 (s)	水深 (cm)	還流バルブ	パラメータ
1	10.7	1.6	3.5	閉	比較対象
2	10.5	1.6	5.5		(a) 水深
3	10.2	1.6	4.9		(b) 波浪
4	10.7	1.6	1.5		(c) 岸側境界条件
5	6.8	1.2	3.5		1/8開
6	2.3	0.9			1/4開
7	10.7	1.6		1/2開	
8	10.2	1.6			
9	9.9	1.6			

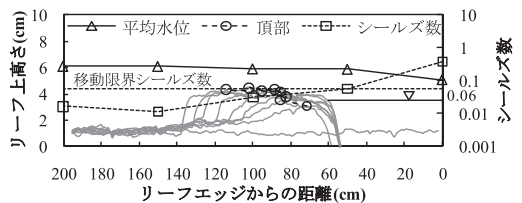
験も行い、一度形成された州島が条件によってどのように振る舞うのかを確認した。

(2) 実験結果

ケース1およびケース8における地形断面の時間変化を図-2に、地形頂部の時間変化を図-3に示す。図-2中の平均水位およびシールズ数は固定床実験における値、図-3中の平均水位は移動床実験におけるリーフエッジから4m岸側での値である。そのため、図-2と図-3の平均水位の値は一致しない。なお、シールズ数は、定常流成分の流速と波動成分の岸向最大流速の位相平均値から、田中・サナ (1996) の底面摩擦則を用いて波・流れ共存時の値を算出した。また、移動限界シールズ数には粗砂に対する値として0.06を用いた。いずれのケースにおいても、巻き波砕波の突っ込み点となるリーフエッジ上では

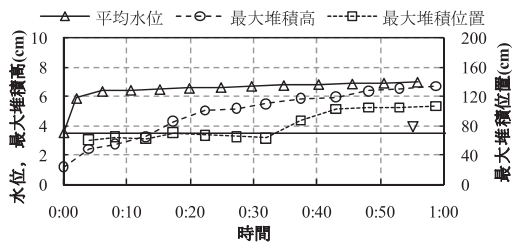


(a) ケース1 (波高: 10.7 cm, 周期: 1.6 s, 水深: 3.5 cm, 閉)

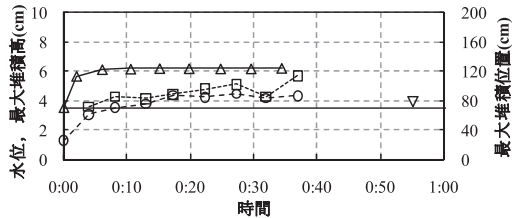


(b) ケース8 (波高: 10.2 cm, 周期: 1.6 s, 水深: 3.5 cm, 1/4 開)

図-2 地形断面の時間変化



(a) ケース1 (波高: 10.7 cm, 周期: 1.6 s, 水深: 3.5 cm, 閉)



(b) ケース8 (波高: 10.2 cm, 周期: 1.6 s, 水深: 3.5 cm, 1/4 開)

図-3 地形頂部の時間変化

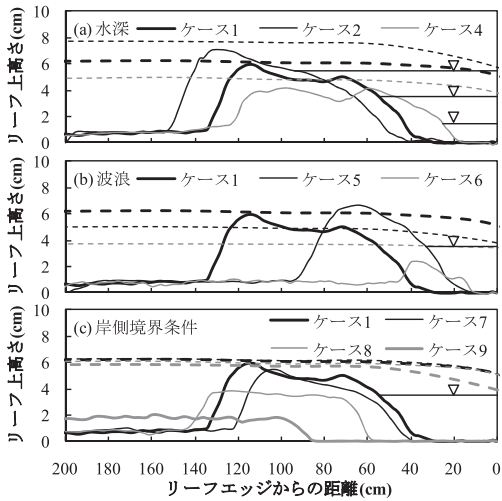


図-4 最終地形断面の比較 (破線：平均水位)

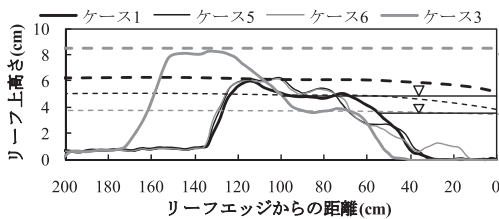


図-5 ケース1, 5, 6, 3の連続実験結果 (破線：平均水位)

乱れを伴う強い流れが発生し、砂が巻き上がり岸向漂砂が卓越して即座に砂が洗われた。リーフ上では wave setup と戻り流れが発生し、シールズ数が移動限界条件より小さくなる位置に砂が堆積した。砂の供給により堆積高が高くなるにつれて頂部に働くせん断応力が大きくなり、堆積位置が岸側に移動するとともに頂面が広がった。wave setup 後の平均水位から顕著に干出すことはなかったが、ケース1においては最大堆積高が静水位上約 2.5cm にまで達し、造波停止後には州島として干出した。しかし、ケース8においては還流装置のバルブを開放したため、ケース1と比較して平均水位が約 0.2cm 低くなったことに加え、岸向き流れが卓越してシールズ数が大きくなり、最大堆積高が静水位上約 0.3cm までの形成に止まり、干出量が小さかった。

図-4に最終地形断面の比較を示す。本実験においては、碎波や戻り流れ、投入砂の不均一性により断面方向に地形の違いが認められたため、5測線の断面平均値を示した。そのため、図-2中の最終地形断面とは一致しない。まず、(a)水深による違いを見てみると、高潮時のケース2および低潮時のケース4とともに、wave setup 後の平均水位直下まで最大堆積高が達する州島が形成された。

また、碎波点および突っ込み点は、水深が深いほど岸側へ、浅いほど沖側へ移動するため、堆積開始位置もこれに合わせて岸沖方向へ移動していた。最大堆積高は水深 (wave setup 後の平均水深) が深いほど高くなった。次に、(b) 波浪による違いを見てみると、中波浪のケース5においては高波浪のケース1よりも平均水位が低いにも関わらず最大堆積高が高くなり、全ケースの中で唯一 wave setup 後の平均水位からも干出した。一方、低波浪のケース6においては平均水位上昇量が約 0.2cm と小さかったためか、最大堆積高は静水位にまでは達しなかった。これらの結果より、平均水位上昇量が小さい低波浪時には州島は形成されないが、州島の形成が促進される水深・波浪条件が存在することが示された。最後に、(c) 岸側境界条件による違いを見てみると、いずれのケースにおいても平均水位はほぼ同じであるにも関わらず、還流装置のバルブの開度を大きくするにつれて岸向き流れが卓越し、最大堆積高が低下するとともに堆積開始位置が岸側へ移動した。ケース8およびケース9においては州島が形成されず、特にケース9では岸向き流れが強く砂れんが形成された。これらの結果より、州島の形成にはリーフ上の流れも強く影響をおよぼしていることが確認された。

図-5にケース1, 5, 6, 3の連続実験結果を示す。ケース1において形成された州島は、まずケース5における中波浪により沖側の法肩が侵食されるとともに岸側に堆積し、最大堆積位置が前進して前面勾配が急勾配となった。つまり、堆積形の正常海浜と同様の振る舞いをした。次に、ケース6の低波浪においては、上述の通り州島の形成に影響をおよぼさないため、州島の前面に堆積域が広がるに止まった。最後に、ケース3において地球温暖化に伴う海面上昇を想定して潮位を上げたところ、碎波点および突っ込み点が岸側へ移動したためリーフエッジ上の堆積域は侵食されたが、再び wave setup 後の平均水位近くまでの州島が形成された。以上より、一度形成された州島は一般的な海浜断面 (前浜) と同様に振る舞い、サンゴ礫の生物的供給が十分にあれば地球温暖化に伴う海面上昇にも堆積高が追従可能であることが示唆された。

### (3) サンゴ礁州島の形成条件

図-6に宇多ら (1992) の実験結果と本実験結果との比較を示す。ここに、 $h$  : 水深、 $H_0'$  : 換算沖波波高、 $Z_0$  : 最大堆積高、 $\psi_m$  : リーフエッジ上のシールズ数である。なお、岸側境界条件は宇多らの実験では開境界であるが、本実験では閉境界にて水深および波浪を変化させたため、図-6中の本実験結果は岸側閉境界のケースのみをプロットした。宇多らの実験においては相対堆積高  $Z_0/H_0'$  が相対水深  $h/H_0' \approx 0.6$  で極大値を示したが、本実験においても同様に  $h/H_0' \approx 1.3$  で極大値を示し、その傾向はリーフエッジ上のシールズ数と良く対応した。本実験にお

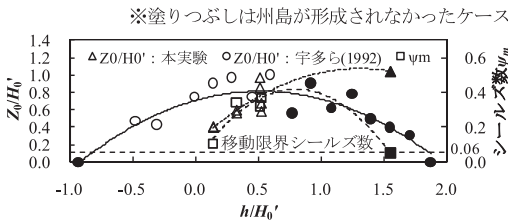


図-6 宇多ら (1992) の実験結果と本実験結果との比較

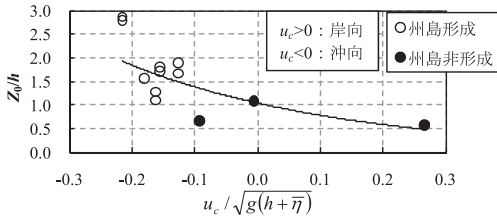


図-7 最大堆積高と各パラメータとの関係 (州島の形成条件)

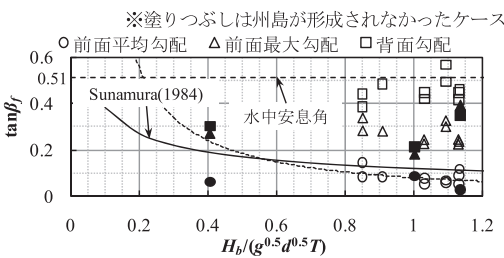


図-8 Sunamura(1984)の前浜勾配算定式と実験結果との比較

いては、閉境界としたことにより平均水位上昇量が大きくなるとともに岸向き流れが弱まったこと、堆積高が最大値に達するまで砂を供給し続けたことにより、極大値がシフトしたものと考えられる。また、相対水深がある程度増大すると州島が形成されなくなる傾向も変わらなかった。

図-7に最大堆積高と各パラメータとの関係を示す。ここに、 $u_c$ ：リーフエッジ上の平均流速、 $\eta_{mean}$ ：平均水位変化量、 $g$ ：重力加速度である。リーフエッジ上は碎波の突っ込みおよび戻り流れの影響を強く受けており、 $u_c > 0$  の場合は岸向き流れが、 $u_c < 0$  の場合は沖向き流れがリーフエッジ上において卓越していることを示している。これより、wave setup後の平均水深  $h + \eta_{mean}$  とリーフ上の流れ  $u_c$  により州島の形成条件が規定されることが分かった。

図-5より、形成された州島は前浜と同様に振る舞うことが分かったため、式 (1) で表される Sunamura (1984) の前浜勾配算定式と実験結果との比較を行った。

$$\tan \beta_f = \frac{0.12}{(H_b / g^{0.5} d^{0.5} T)^{0.5}} \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 $\tan \beta_f$ ：前浜勾配、 $H_b$ ：碎波波高、 $T$ ：周期、 $d$ ：底質粒径である。図-8に比較結果を示す。州島の前

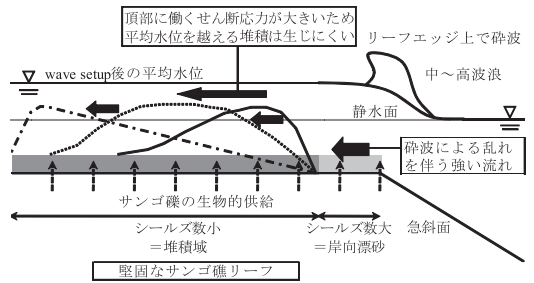


図-9 サンゴ礁州島の形成メカニズムの概念図

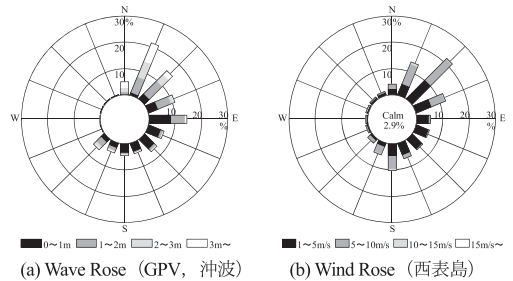


図-10 2007年7月～2010年6月におけるバラス島周辺の気海象

面平均勾配は Sunamura の前浜勾配算定式と良く一致し、また、背面勾配は約 0.4～0.6 の範囲に分布して Gibson による水中安息角 (河村, 1982) である 0.51 に近い値を取った。

図-9に本実験により明らかとなったサンゴ礁州島の形成メカニズムの概念図を示す。サンゴ礁州島は、サンゴ礫の生物的供給が十分にある場合、堅固なリーフエッジ上での碎波により乱れを伴う強い流れが発生して岸向漂砂が卓越するが、岸向き流れが弱まりシールズ数が移動限界条件より小さくなる位置において、wave setup後の平均水位の高さまでサンゴ礫が堆積することによって形成される、という過程であることが、定性的には説明されることが分かった。また、図-7や図-8より、州島の形成条件と形状もある程度想定できることが明らかとなった。

### 3. 現地州島周辺の波浪場および海浜流場の数値計算

#### (1) 計算方法

前章の水理模型実験の結果より、サンゴ礁州島は波・流れ共存時のシールズ数が移動限界条件より小さくなる位置において形成されることが明らかになった。そこで、写真-1に示す西表島北方バラス島周辺を対象に波浪場および海浜流場の数値計算を行い、波・流れ共存時のシールズ数を評価することにより州島の形成条件を確認した。

図-10に2007年7月～2010年6月における (a) バラス島北側沖合約 13km 地点での気象庁 GPV (Grid Point Value) データの沖波有義波高の Wave Rose および (b)

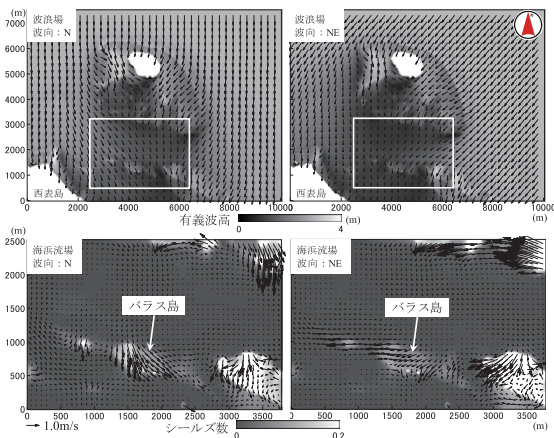


図-11 波浪場，海浜流場およびシールズ数の計算結果

写真-1中に示す気象庁西表島特別地域気象観測所での10分間平均風速のWind Roseを示す。バラス島周辺においては風向および波向ともに通年ではNNE～NEが卓越しているが、特に冬季季節風時においては沖波有義波高が3.0m以上の高波の出現頻度がN～NEで高くなっていた。この冬季風浪がバラス島の形成に影響を与えていることを想定し、計算条件は波高3.0m, 周期9.0s, 波向NおよびNEの2ケースとした。なお、前章の水理模型実験の結果から、高潮時において州島が形成されやすいことが明らかとなったため、計算潮位はH.W.L. (D.L.+2.10 m)を想定した。

中山ら(2008)はサンゴ片の移動計算を修正ブシネスク波動方程式および砂礫移動モデルによって検討しているが、本計算の目的はバラス島周辺におけるシールズ数を評価し堆積環境を確認することであるため、より計算の安定性が高い高山ら(1991)のエネルギー平衡方程式により波浪場と海浜流場の計算を行い、波・流れ共存時のシールズ数を評価した。なお、格子間隔は25mとした。

## (2) 計算結果

図-11に波浪場，海浜流場およびシールズ数の計算結果を示す。バラス島の東側は鳩間島周辺のリーフによって大きく遮蔽されており、波向NEの場合はバラス島周辺に達する波浪は小さく、またそれに起因する海浜流も弱い。リーフエッジ付近におけるシールズ数がそもそも小さく州島の形成には影響をおよぼさないと考えられる。一方、波向Nの場合は入射波が屈折して西側から回り込んでくるためリーフ上において強い流れが生じているが、現在バラス島が存在する位置においてはシールズ数が周辺よりも小さくなっており、サンゴ礫が堆積しやすい環境であることが確認された。

## 4. おわりに

本研究においては、サンゴ礁州島の形成メカニズムを明らかにすることを目的として、サンゴ礫の生物的供給過程を考慮した2次元移動床水理模型実験を行った。その結果、リーフエッジにおける砕波とそれに伴うwave setup・流れ、そしてサンゴ礫の供給による州島形成メカニズムが明らかになった。また、現地においてもシールズ数が小さくサンゴ礫が堆積しやすい環境に州島が形成されていることを数値計算により確認した。

本研究は定性的な検討に止まったが、今後は平面実験による州島形成へおよぼす波・流れの3次元の影響の検討や、リーフ上の波・流れやサンゴ礫の生物的供給を精度良く再現する州島形成数値モデルの構築が課題である。

謝辞：本研究は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

- 青木健次・本郷宙軌・茅根 創・磯部雅彦・山野博哉・高橋研也・片山裕之・中嶋さやか・関本恒浩(2010):西表島北東バラス島の形成過程, 日本サンゴ礁学会第13回大会講演要旨集, p.145.
- 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, 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.
- 宇多高明・菊池昭男・三波俊郎・芹沢真澄・古池 鋼(2004):沖縄県中城湾に位置する泡瀬干潟におけるサンゴ洲島の形成・変形特性, 海洋開発論文集, 第20巻, pp.1013-1018.
- 茅根 創(2008):島嶼国における環礁州島の現状と課題, 海岸, Vol.48, No.1, pp.27-32.
- 河村三郎(1982):土砂水理学, 森北出版, pp.10-11.
- 高山知司・池田直太・平石哲也(1991):砕波および反射を考慮した波浪変形計算, 港湾技術研究所報告, 第30巻, 第1号, pp.21-67.
- 田中 仁・アーマド サナ(1996):交差する波と流れによる抵抗則の検討, 土木学会論文集, No.533, II-34, pp.273-277.
- 中山哲彦・渡邊浩二・山本秀一(2008):沖ノ島島におけるサンゴ片, 砂の移動過程に関する研究, 海岸工学論文集, 第55巻, pp.1096-1100.
- 野口賢二・青木健次・板橋直樹・五味久昭・佐藤慎司・渡邊国広・茅根 創(2010):サンゴ州島の形成・存続条件としての台風とビーチロック, 土木学会論文集B2(海岸工学), Vol.66, No.1, pp.686-690.
- Sunamura, T.(1984): Quantitative predictions of beach face slopes, Geological Society of America Bulletin, Vol.95, pp.242-245.