バラス島の形成・維持メカニズム に関する現地調査

岩塚 雄大¹・琴浦 毅²・片山 裕之³・竹森 涼⁴・田島 芳満⁵・茅根 創⁶

¹ 正会員 五洋建設(株) 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) 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) 技術研究所 (〒329-2746 栃木県那須塩原市四区町 1534-1)
E-mail: Hiroyuki.Katayama@mail.penta-ocean.co.jp

⁴ 東京大学大学院工学系研究科 (〒113-0033 東京都文京区本郷 7-3-1)

⁵ 正会員 東京大学大学院工学系研究科教授 (〒113-0033 東京都文京区本郷 7-3-1)
E-mail: yoshitaji@coastal.t.u-tokyo.ac.jp

⁶ 東京大学大学院理学系研究科教授 (〒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機構は様々な報告, 研究が行われているものの観測データの取得事例は少なく, 州島形成場の波浪場, 海浜流場は依然未解明である. 本研究では, 西表島北方リーフ上にサンゴ礁だけで形成されるバラス島を対象として現地調査を行い州島形成場の外力評価を行った. さらにそれを補完する数値計算を行い州島形成に至る外力場の検討した. その結果, バラス島周辺のリーフ上では, 来襲波浪に時空間的な位相差が見られることやサンゴ礁移動外力としてはリーフ内の流れよりも波浪が卓越する可能性が高いこと, バラス島付近では鳩間島の遮蔽とバラス島北側の二つの窪地の屈折効果によりバラス島に向かう NE, NW 双方向からの波浪が生じ, 窪地背後のリーフ中央部ではサンゴ礁が集積されるポテンシャルが高いことが明らかとなった.

Key Words : coral reef, ballast island, wave observation, steep slope reef, gravel transport

1. はじめに

サンゴ礁州島はサンゴ礁上に形成された標高数 m の低平な島であり静水面上に干出する. 州島は主に環礁上に分布するが, 環礁自体は世界で 480 ほどあり, 1 つの環礁に数 10 の州島が分布する. さらに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に役立つだけでなく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⁾.

サンゴ礁州島の形成維持機構は, 台風や高潮に起因する高波浪や短期間で非常に大きな外力が作用した際に発生することは既往の現地調査や実験から明らかとなっており²⁾, 特にツバル国フナフティ環礁南東部のストームリッジ^{3), 4)}やインド洋モルディブの北マレ環礁の Udahafushi 島⁵⁾では短期間の非常に大きな外力作用時に形成されたことは有名である. 一方, ダイナミックな地形変化はなくとも常時波浪作用時に形成された島の地形

変化が発生する可能性があることは実験からも明らかとなっている⁶⁾. しかし, 地形変化を伴うサンゴ礁州島の現地観測データの取得事例は依然として少なく, 実際に州島が形成される場所における波浪場, 海浜流場の評価など未解明な部分も多い.

本研究では, 西表島北方の孤立リーフ上に存在するサ

写真-1 バラス島 (2014/10/16撮影)

ンゴ礫だけで形成されるバラス島(写真-1)を対象として比較的静穏期である2014/10~2014/11に現地調査を行い外力場の観測を行った。さらに州島形成にはリーフ上の平面的な波浪場, 流速場の影響を受けることから⁶⁾, 外力場の平面的な分布を確認するために, 現地調査を補完する数値計算を行いサンゴ礁州島形成に至る外力について検討を行った。

2. 現地調査

(1) 調査地点

調査地点は沖縄県八重山地方の西表島北方に位置するバラス島を対象とした。既往の調査⁷⁾より, バラス島は季節性波浪や台風などの影響から高さ変化をとめないながら東西方向に数10m程度の移動が見られ, 高潮位の際には没水する場合があることが分かっている。また, バラス島南部ではリーフ外へのサンゴ礫の流出が見られるものの, 定性的には体積変化は小さく, バラス島はリーフ中央部に安定的に存在している。

図-1にバラス島の位置と各計測器配置を示す。バラス

図-1 バラス島の場所と計測器配置

図-2 鳩間島沖の波向別波高頻度分布と風向別風速頻度分布

島は長軸約1 km, 短軸約0.3 km, 全周を勾配約1/30の急勾配斜面を持つ楕円形リーフのリーフフラット上のほぼ中央に位置し, 北を鳩間島, 南を西表島に遮蔽されており, 波浪は東西の両島間開口部からのみ来襲するものと考えられる。特に南側からの波浪は風波のみに限定されるが吹送距離が短いことからバラス島の地形変化への影響は少ないものと考えられる。

図-2に鳩間島北約5 kmに位置する外洋(123° 48' 00" E, 24° 33' 00" N)のGPVデータ(CWM)から求めた波向別波高出現頻度と風向別風速出現頻度を示す。通年では風, 波ともにNNE寄りが卓越する。同様に観測期間中の2014/10~2014/11においても冬季季節風の影響から風, 波ともにNNE寄りが卓越することがわかる。

図-3に既往の調査⁷⁾でのサンゴ生息状況を示す。バラス島周辺のリーフフラット上はほとんどがミドリイシ属を主体とする枝サンゴの死滅したサンゴ礫で形成されていることがわかっており, リーフエッジ付近やバラス島北側, 南側の比較的水深の浅い箇所ではサンゴ礁が発達していることが明らかとなっている。このことから, リーフエッジ付近で死滅したサンゴが波や流れの影響によりリーフ中央部に打ち寄せられて形成・維持されたものと推測される。

(2) 調査方法

バラス島周辺の波浪場, 海浜流場を把握するため, 2014/10/16-2014/11/21の期間にリーフ内外6箇所で定点観測を行った。表-1に観測諸元を示す。リーフエッジ付近のE600, W600は水深が比較的深度ことからWave Hunter-08Σ(アイオーテック製)を設置し, 水圧, 水位, 流速2成分を取得した。リーフフラット上のE200,

図-3 バラス島周辺のサンゴ生息状況⁷⁾

表-1 観測諸元

計測ポイント	E600, W600	E100, W100 E200, W200	E200, W200
観測期間	2014/10/16 - 2014/11/21		2014/10/16 - 2014/11/1
計測項目	水圧, 超音波, 流速2成分		流速2成分
観測方法	連続観測		20分/60分
設置水深	約10m		約3m
サンプリング間隔	0.5s

図-4 観測期間中の平均水位, 風向, 波向, 有義波高の時刻暦

W200, E100, W100 では設置水深が浅いため水圧式水位計 (JFE アドバンテック製) にて観測を行った。加えて、リーフ上の流速場の把握のため E200, W200 には 10/16-11/1 の期間, 電磁流速計 (JFE アドバンテック製) を設置し流況を観測した。同時に観測期間中の外力作用時のリーフ上のサンゴ礁の移動状況を把握するため, E100 には静止画像取得のためのインターバルカメラ (JFE アドバンテック製) を東向きに海底設置し, 1 サンプル/1 時間で定点撮影した。

(3) 調査結果

図-4 に観測結果の時刻暦を示す。なお, 比較のために鳩間島北側での GPV データも加えた。また, 図-5 に 10/22-10/26 の潮流と波動流速の uv プロットを示す。観測期間中の有義波高の最大値は, リーフエッジ付近である E600 で 1.2m (11/13 11:50), W600 で 1.4m (11/17 16:50) であった。E600, W600 と GPV データと比較すると波高値は減衰しており異なっているものの, ピークの出現特性はおおよそ一致する傾向が見られる。

図-5 10/22-10/26 の潮流と波動流速の uv プロット

観測期間中の風向, 波向は GPV では NNE-ENE が卓越する傾向が見られるものの E600 では ENE 寄りにシフトしている。W600 ではリーフ上の位置関係から基本的に E 寄りの波が少なくなり波向きは N 寄りになるものと考え

図-6 10/22-10/26 の観測各成分の時刻暦

図-7 10/22 20:00, 10/24 20:00 の水圧波の周波数スペクトル

図-8 10/22 20:00, 10/26 20:00 の水圧波の方向スペクトル

られる。有義波高や平均流速、波動流速の時系列にも潮汐に追従した変動が見られることから、E600 付近はリーフをとまなう不規則的な海底地形による局所的な波、流れの影響を強く受けているものと考えられる。さらにリーフ上の E200, E100 および W200, W100 に着目すると、E600, W600 と比較し有義波高は減衰する傾向であった。

図-6 に 10/22-10/26 の E, W それぞれの観測結果の時刻暦を示す。波動流速成分に着目すると、期間前半の 10/22 20:00 では W200>E200 となる傾向が見られるものの、期間後半の 10/24 20:00 では E200>W200 となり傾向が異なる。この時の鳩間島沖の風向・風速に着目すると、期間前半は N 方向からの風が卓越しており、風速も 10m/s を超える傾向が見られるが、期間後半では E 方向

図-9 観測期間中のサンゴ礁の移動状況

からの風に変化しており、風速も 5m 前後と小さくなる。

図-7 に 10/22 20:00, 10/24 20:00 の水圧波の周波数スペクトルを示す。高周波側では水圧波と比較し超音波のほうが感度は高くエネルギーが大きくなる傾向が見られたものの、ピーク周波数周辺では超音波と比較し顕著な差は生じなかったため水圧波にて整理した。有義波周期前後の 0.10-0.20 (Hz) を比較した場合、期間前半の 10/22 20:00 では E600, E200 と比較し、W600, W200 が卓越するのに対し、10/24 20:00 では E600, E200 が卓越する。つまり波動流速で示された傾向と一致する。また 10/24 20:00 では E, W とともに 600 地点より 200 地点の方がピークのエネルギーが大きい傾向が見られるが、これは砕波点がリーフ内に推移したことによるものと考えられる。さらに 10/22, 10/24 とともに 0.2 (Hz) 付近の周波数が E600, W600 から E200, W200 にかけて減少している。これは、砕波や底面摩擦による短周期波成分の減衰によるものと考えられる。

図-8 に 10/22 20:00, 10/24 20:00 の E200, W200 の水圧波の方向スペクトルを示す。10/22 20:00 では W200 の NNE と SW が卓越するのに対し、10/24 20:00 では E200 の NNE が卓越する。ただし、ここで SW のスペクトルの出現は振動流速成分の差が小さいことにより両方の方向にエネルギーがでたものと考えられる。つまり、10/22 20:00 ではバラス島周辺では NW~N 寄りの風の影響から鳩間島西側からの回折波が卓越し W200 では W 寄りの波浪が生じるものの、鳩間島は東側のリーフ影響からリーフエッジで砕波減衰し E200 の外力が小さくなるものだと考えられる。10/24 20:00 では風速が低下するものの季節性波浪の影響から ENE 寄りの沖波となり鳩間島リーフの影響が少なく直接入射するものと考えられる。

図-9 に観測期間中に水中カメラで撮影した代表的な静止画像を示す。画像より 11/9 15:00-16:00 の間に図左端のテーブルサンゴ礁が S 方向へ回転しながら転がる様子が捉えられた。その後, 11/11 17:00-11/13 8:00 には N 方向へ回転し, 最終的に 11/15 14:00-11/16 9:00 には S 方向へ移動し安定した。この期間内には, テーブルサンゴ礁の回転移動が見られたものの, バラス島の主要な形成物である枝サンゴ礁の移動状況は見られなかった。底面のサンゴ礁に付着する藻類に着目すると期間前半の 11/9-11/11 では多くの付着を確認できるものの 11/15-11/16 では付着量が減少していることが分かる。さらに静止画を連続的に重ねて確認したところ, 大きな移動は見られないものの, 枝サンゴ礁も微小な回転と滑動を繰り返していることが分かった。つまり, 枝サンゴ礁には藻類が流されるような外力が作用し微小な動きが繰り返されているものの目に見えるような移動には至っていないことが分かる。しかし, このような条件下においてもテーブルサンゴ礁は運動していることから, 枝状サンゴ礁と比較し扁平性が高いことにより海底面上でも揚圧力を受けやすく, さらに一度海底面上から持ち上がった際には受圧面積が大きくなることから抗力が増大し, 結果として回転や移動が起こりやすいものと推測される。二枚貝を用いた振動流実験においては, 底面粗度が小さな場合には二枚貝は底面を這うような移動形態を示すのに対し, 底面粗度が大きな場合はサルテーション状態で回転・移動することが示されており⁸⁾, テーブルサンゴ礁でも同様の傾向が見られることが分かった。

3. 数値計算

(1) 計算手法

バラス島の形成・維持には波浪外力が支配的であることや楕円リーフ地形上の波浪場の検討では平面的な波浪

場分布の把握が不可欠であることから数値計算により平面波浪場および流速場の再現計算を行った。急勾配リーフ上での外力場は, リーフエッジでの砕波をとともう非線形性の非常に強い現象であり, 高波浪時にはリーフエッジの干出をとともうことから, ブシネスク方程式のような高精度時間領域モデルでも適用性が難しく, 計算負荷の観点からも実務での使用は難しい。本検討では 3 次元急勾配リーフ実験⁹⁾で検証されている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改良モデル⁹⁾を用い, 鳩間島北方の沖合からバラス島周辺までを対象としたエネルギー平衡方程式による平面波浪場計算を行った。

(2) 計算結果

数値計算では波浪, 潮位を現地条件に合わせ鳩間島北方の入波境界よりエネルギー平均波として入射させた。

図-10 に現地で E600, W600 に時空間的な位相差が捉えられた 10/22 21:00 の再現計算結果を示す。なお, 入射波条件は, GPV データより得られた $H_0=2.64\text{m}$, $T=7.3\text{s}$, 波向き NNE として計算した。

数値解析の結果, リーフエッジ付近の E600, W600 では, 有義波高はともに $H_{1/3}=0.83\text{m}$ であり現地観測結果(それぞれ $H_{1/3}=0.87\text{m}$, 0.84m) とよく対応する。リーフ上ではリーフエッジでの急激な砕波やリーフ北側の窪みにより複雑な波浪場が形成されており, 計算結果はやや過大評価となっているものの, 鳩間島の遮蔽の影響からバラス島に向かうように NE, NW 双方向から波浪が集まる現象を確認した。特に外力の方向を N 寄りとした場合においては遮蔽の影響は顕著に現れ, E, W 双方の波浪が作用しており, 結果としてリーフ中央部に礁の堆積が促進されるポテンシャルがあることを確認した。

波浪場の計算から, バラス島は鳩間島による沖波の遮蔽の影響とそれに伴う回折の影響, 急勾配リーフ特有のリーフエッジでの急激な砕波とそれによる複雑な波浪場,

図-10 エネルギー平衡方程式による波向, 有義波高分布の計算結果
(2014/10/22 21:00 $H_0=2.64\text{m}$, $T=7.3\text{s}$, 潮位:+1.60m 波向:NNE)

さらに前述のようにバラス島北側にはサンゴが繁茂するエリアがあり、潤沢な供給源であることから州島の形成に至ったのではないかと推測される。

4. まとめ

バラス島形成・維持メカニズム解明のためにバラス島リーフエッジ付近およびリーフフラット上に波高計、流速計、インターバルカメラを設置し定点観測した。さらにリーフ周辺の波浪場把握のための碎波減衰を考慮したエネルギー平衡方程式により数値計算を行った結果、以下の結論が得られた。

- (1) バラス島周辺では、常時波浪作用時においても、N寄りの沖波外力が作用する場合、バラス島周辺ではE、W両方からの外力として作用する可能性があることが確認された。
- (2) 既往の実験で得られた移動限界流速 0.7m/s 以下では、地形変化を及ぼすようなサンゴ礫の移動は見られないものの、テーブルサンゴ礫の回転移動や枝サンゴ礫の微小な回転や滑動は発生することがわかった。
- (3) 数値計算より、鳩間島遮蔽による回折波やバラス島北側の窪みの影響から波浪はE、W両方からバラス島に向かった方向に作用することが明らかとなった。

今後は、現地調査や水理模型実験をおこない、環礁州島に適応可能な数値解析モデルの高度化や礫の堆積・移動予測モデルの構築に取り組んでいきたい。

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アティブ（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る。

参考文献

- 1) 茅根 創：サンゴ礁・州島の生体工学的保全・創成一生物が造る島の生体工学的保全・創成技術一，土木技術，66巻，11号，pp.53-58，2011。
- 2) 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。
- 3) Takahashi K., H. Katayama, Y. Iwatsuka, T. Sekimoto, T. Suzuki, H. Kayanne, M. Isobe : The Topographic Change Mechanism of Coral Cays : *Proc. of 34th Int. Conf. on Coastal Engineering*, 2014.
- 4) 宇多高明，大中 晋，三波俊郎：Tuvalu Funamanu 島への Cyclone Bebe による礫の打ち上げ実態調査，土木学会論文集 B3(海洋開発)，Vol.69，No.2，pp.I_820-I_825，2013。
- 5) 宇多高明：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.212-216，1988。
- 6) 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.70，No.2，pp.I_726-I_730，2014。
- 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) 山下 俊彦，山本 明，和田 彰，明田 定満，谷野 賢二，北原 繁志：振動流場での固定床上の二枚貝の移動機構，海岸工学論文集，Vol.43，pp.1071-1075，1996。
- 9) 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。

FIELD SURVEY OF FORMATION AND MAINTENANCE MECHANISM ON BALLAST ISLAND

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

Coral cays formation mechanism has various reports and research, but observation data is almost less. So, coral cays formation field of wave field and flow field is still unknown. In this study, we discuss about external force of coral cays formation. In field survey we focused the ballast island on northern reef of Iriomote Island which is formed by only coral gravels. And, we performed numerical calculation to complement the external force field to coral cays formation. As a result, we understand that external force of coral gravel transport is caused by the waves than the flow on the reef. And, there has high potential of coral gravel transport, from bi-directional (NE and NW) waves on the reef center caused by interaction of the refractive wave of behind Hatoma shielding and two depressions near north ballast island.