

サンゴ礁州島形成メカニズムの解明

サンゴ礁の維持保全へ貢献できるモデルを目指して

片 山 裕 之・茅 根 創・田 島 芳 満

サンゴ礁州島とは、サンゴ礁上にサンゴ礫などが打ち上げられて作られる地形で、インド洋や太平洋島嶼国で多く見られる。サンゴ礁のリーフエッジで碎波が生じ、その強い流れによってサンゴ礫が運搬・堆積することにより形成されるが、台風などの暴浪時に短時間（数時間～数ヶ月）で形成された事例も見られる。従って、その形成メカニズムを理解することで、わが国島嶼部だけに留まらず、地球温暖化による海面上昇によって水没が危惧されている太平洋の島嶼国の国土保全に役立てる新しい生態工学技術として実用化が期待される。本稿では、サンゴ礁州島の形成メカニズムについて、モデル州島の現地調査や室内水理模型実験によって検討を行った結果を報告する。

キーワード：サンゴ礁州島、サンゴ礁海岸保全、サンゴ砂礫、急勾配リーフ地形、波浪変形

1. はじめに

サンゴ礁州島は、サンゴ礁上にサンゴ礫などが打ち上げられて作られる地形である。サンゴ礁のリーフエッジで強制的に作られる碎波によって乱れを伴う強い流れが発生し、その流れによってサンゴ礁上でサンゴ礫が運搬・堆積することによって形成される（図—1）。その形成過程が、底質の違いも含め、我が国本土の海岸とはさまざまな点で異なっていることに加え、急峻な地形と碎波による乱れの現象を含むためその定量的理解は十分でない。

サンゴ礁州島は比較的短時間（台風による数時間～数ヶ月）で形成されることがあるので、その形成技術を実用化できれば、サンゴ礁海岸の防護や国土保全、とくに地球温暖化による海面上昇によって水没の危機

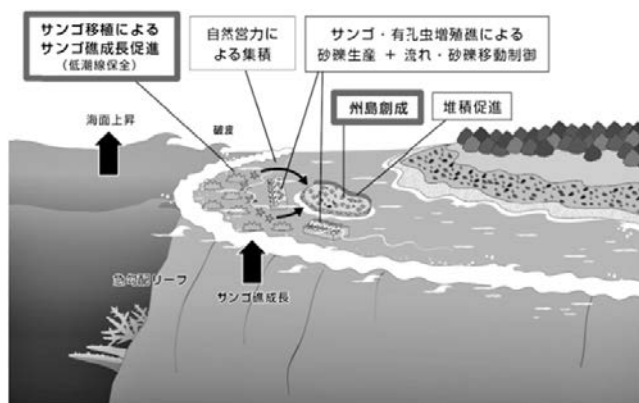
にある我が国島嶼部や太平洋島嶼国、特にマーシャル諸島共和国やツバル、モルジブなど環礁国家の国土保全に大きく資する技術として実用化が期待できる。本稿では、サンゴ礁州島の形成メカニズムを現地調査と水槽実験および数値解析によって検討し、これに基づくサンゴ礁州島形成モデルの開発状況を報告するものである。

2. モデル州島「バラス島」の現地調査¹⁾

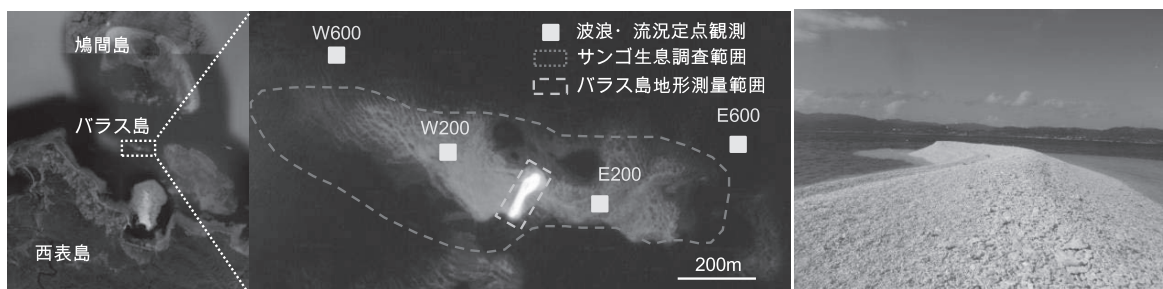
(1) バラス島の概要

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（図—2）。バラス島は長軸約 1.0 km、短軸約 0.3 km、全周に勾配約 1/30 の急勾配斜面を持つ楕円形リーフ上のほぼ中央に位置する。また、北を鳩間島、南を西表島に遮蔽されており、作用する外力は東西方向に限定される。

バラス島周辺はミドリイシ属を主体とするサンゴ礁が繁茂していることから八重山地方でも有数のレジャースポットとなっており、以前より高波浪の際に大規模な地形変化をもたらすことが知られていた。また、現地住民からのヒアリングや衛星写真等によると、50 年以上にわたり地形変化を伴いながら維持されてきたことも明らかとなっている。しかし、外力履歴やサンゴの白化による壊死と、それによって供給されるサンゴ礫の関係など不明な点も多い。



図—1 サンゴ礁州島形成イメージ

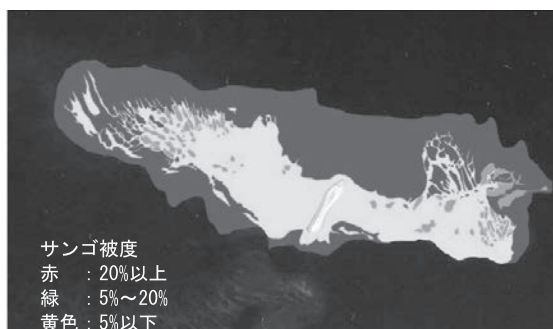
図一2 モデルとしたサンゴ礁州島「バラス島」¹⁾

(2) 調査内容

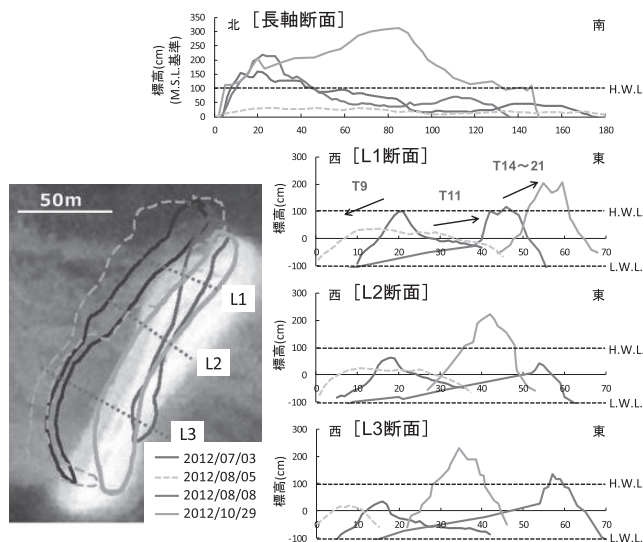
州島の形成材料であるサンゴ礫の生物学的な供給量を調査するために、バラス島周辺のサンゴの生息状況・サンゴ礫の広がり等を平面的に把握した。そのためにサンゴ被度調査を実施し、得られたデータを基にハビタットマップを作成した。また同時に、バラス島の地形変化特性を把握するため、2012年7月から10月の台風期を中心にその外力となる海象（波浪・流れ）を図一2に示すリーフ内外4箇所の定点観測を行った。同時に、観測期間中の高波浪来襲前後計4回の地形測量を行った。

(3) 調査結果

図一3にはサンゴ被度マップを示す。バラス島周辺のリーフフラットは、ほとんどが死滅したサンゴ由来のサンゴ礫が堆積しており、その堆積厚は1m以上であった。また、リーフ南東側以外のリーフエッジ付近ではサンゴ被度が20%以上となっていた。その半面、リーフ南東側ではサンゴの生育は確認されず、代わりにリーフエッジからリーフ斜面へのサンゴ礫の落込みが確認された。被度調査から、ごく最近のバラス島の移動は、バラス島東西300m前後のサンゴ礫の移動のみによって行われていると推定された。同時に、リーフエッジ付近に底質となるサンゴが潤沢に繁茂しており、サンゴの大規模な白化と大きな外力が起因すれば島を形成するのに十分なサンゴ礫の供給があるものと考えられた。



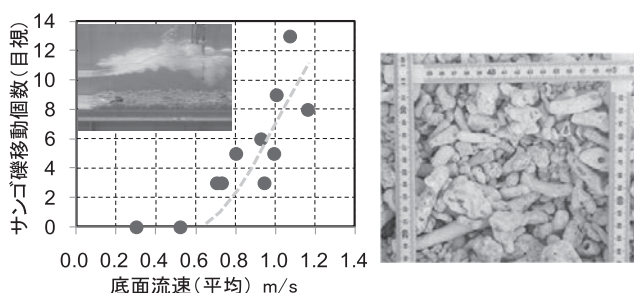
図一3 バラス島周辺のサンゴ被度マップ

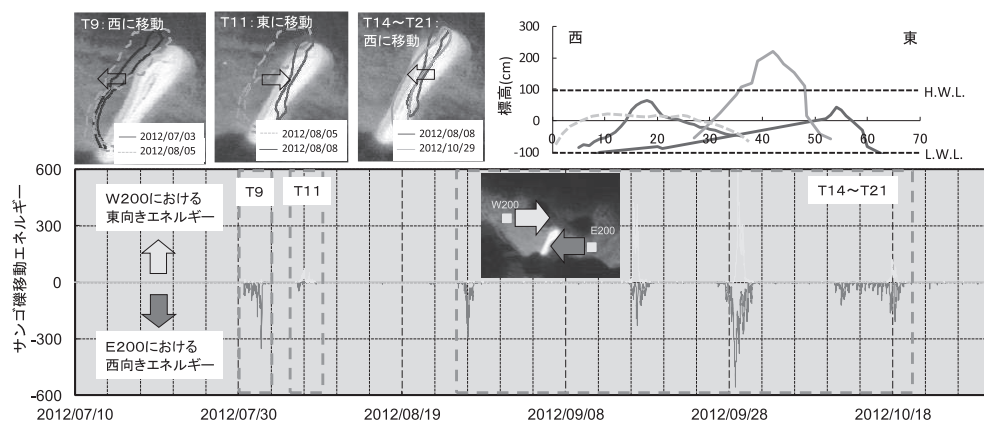
図一4 観測期間中の汀線測量結果¹⁾

観測期間中には西表島周辺を計7回の台風が通過し、バラス島周辺で最大有義波高3m超であった。また観測期間中に、台風9号通過前の2012年7月3日および通過後の8月5日、台風11号通過後の8月8日、台風14号～台風21号通過後の2012年10月29日の計4回の汀線測量を行った。その結果、面積の拡大・縮小を伴いながらの東西への島の大規模な地形変化（堆積・侵食・移動）を捉えることができた（図一4）。

(4) バラス島地形変化の考察

調査期間内に生じたバラス島の優位な地形変化を考察するために、リーフ上における実サンゴ礫の移動限界を確認する2次元断面水槽実験を行った（図一5）。

図一5 底面流速とサンゴ礫移動可否の関係¹⁾

図—6 底質移動エネルギーの経時変化¹⁾

バラス島周辺より採取したミドリイシ属を主体とする枝サンゴ礁中心の実物（直径約 15 mm × 長さ 4 ～ 12 cm, 水中重量 10 ～ 60 g）を実験水路中央部に 3 cm 厚に敷設し、現地スケールの流れを再現するために段波発生装置より造波した 0.5 m/s ～ 1.1 m/s の一様流を与えた。その結果、底面流速が概ね 0.7 m/s を越えると表層部のサンゴ礁が滑動を開始するが、移動したサンゴ礁の大きさは大小さまざまであった。これより、バラス島周辺のサンゴ礁の底面流速移動限界値は概ね 0.7 m/s と推定した。

次に、リーフ内観測地点の E200 と W200 で得られた東西成分流速を基に、水理実験より定義したサンゴ礁の移動限界流速値を閾値とし、各地点における流速値の 2 乗をサンゴ礁の移動エネルギーと定義し、外力の東西卓越方向とバラス島の移動方向を評価した（図—6）。移動エネルギーは、それぞれの地点でバラス島の移動方向成分から閾値以上のエネルギーのみを抽出した。この結果より、台風 9 号来襲時は西向きのエネルギーが、台風 11 号では東向きのエネルギーが卓越しており、バラス島移動方向と傾向が一致する。同様に、台風 16 号および 17 号ではピークに時間差を伴いながら東向き、西向き双方からの外力が作用している。特に台風が接近した場合、時間経過と共に外力の作用方向が変化しやすく、島の移動方向も変化すると考えられる。以上より、バラス島では一方向から移動限界を超える外力が作用すると地形変化が生じるが州島の拡大には至らず、拡大するためには東西両方向からの外力が必要と推定された。

3. 平面水槽実験による州島形成の再現^{2), 3)}

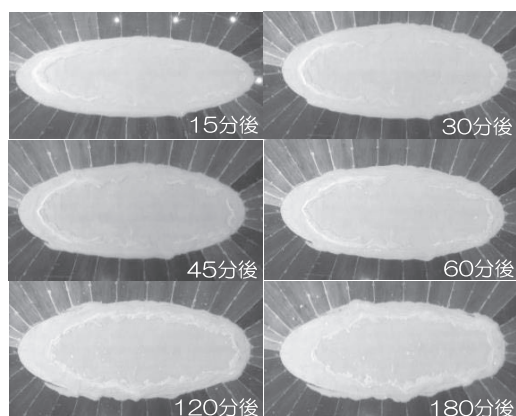
(1) 実験概要

バラス島の調査により、急勾配リーフ地形上にサンゴ礁州島が維持される機構が定性的に理解された。次

に、州島形成時のメカニズムを把握するために平面水槽実験を行った。実験は、五洋建設(株)技術研究所所有の反射波吸収制御を有する平面水槽（幅 30 m × 奥行 20 m × 深さ 1.2 m）に、一般化したサンゴ礁州島を実験縮尺 1/100 を想定し模擬した固定床開放型リーフ地形を有する急勾配リーフ模型を用いた。リーフ面は、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 0.61 mm 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計 6 ケースの波を作用させ、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場合は最大 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。

(2) 実験結果

基本ケース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（写真—1）。15 分経過後には前面のリーフエッジから約 50 cm 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。過年度²⁾に台風による高波浪を想定した移動床実験を行った際は、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

写真—1 リーフ上地形の時間変化の一例³⁾

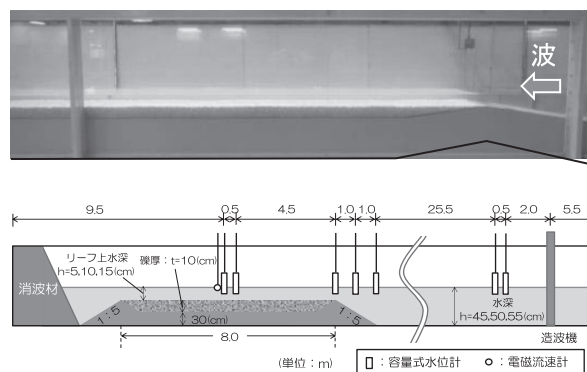
もにリーフ後方へ流出していた。しかし本条件では、波高が小さく周期が短いことでリーフエッジの碎波の影響が軽減し、また波長に対してリーフサイズが相対的に大きくなったことで環礁リーフ特有の回折波の寄与が拡大し、リング状の堆積が形成されたものと考察される。また同じエネルギーの不規則波のケースの方がリーフエッジ後方の堆積位置は若干後退しているものの、全体的に堆積幅が広く安定した堆積となったことより、高波浪による掃流効果だけでなく、低波浪時の堆積前面側斜面を急勾配化させる効果も影響すると考えられる。

以上の結果から、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ことが明らかとなった。

4. サンゴ礫を使った断面移動床実験⁴⁾

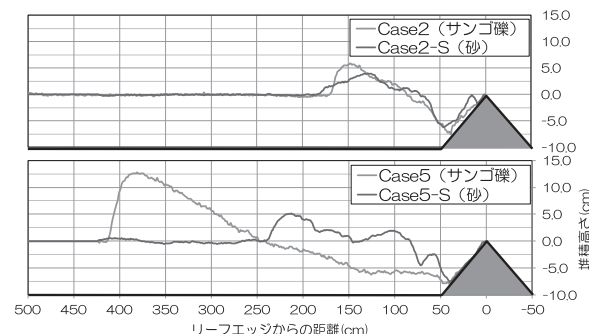
平面実験によって、サンゴ礁リーフ上に干出する堆積地形が形成されるメカニズムが理解された。ただし、実験スケールの都合上、砂をサンゴ礫に見立てて検討しているため、実際のサンゴ礁州島の形成物であるサンゴ礫の特徴、即ち砂と異なり枝状やテーブル状で内部に空隙を含む構造を反映できていない。ここでは、底質の違いの影響を把握するため、実サンゴ砂礫を用いた2次元移動床水理模型実験を行い、通常の場合との移動形態の相違点を考察した。

実験は先に行ったサンゴ礫移動実験と同じ断面水槽を用いた。実験縮尺は1/10を想定し、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を設け、リーフエッジ部を強固な岩礁を想定し固定式とし、リーフ面は底質の透水性を考慮するため底質を10 cm厚で一様に敷設した(図—7)。この状態に波浪、水

図—7 リーフ模型と計測器配置⁴⁾

深の条件を変えて波を作用させ、造波開始10分後、20分後、30分後、45分後、60分後、120分後の地形を測量した。

図—8に造波開始120分後のCase2(低波浪条件)とCase5(高波浪条件)のサンゴ礫と砂の堆積形状の違いを示す。Case2はサンゴ礫と砂とも、Case5は砂のみ平衡地形になっている。Case5のサンゴ礫は造波開始120分以降も岸向漂砂が進行した。リーフエッジで碎波の起こるCase2では周期が短く波高減衰が大きいことからサンゴ礫、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ではサンゴ礫と比較して砂の移動量は大幅に小さい。サンゴ礫は砂粒子よりも見かけの水中比重が小さいため、移動限界の外力を超えると碎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。また砂に比べサンゴ礫の方が堆積高も大きくなる様子から、空隙のある透水性の高い構造から、リーフ上の波や流れを受け流す特性があると考えられる。

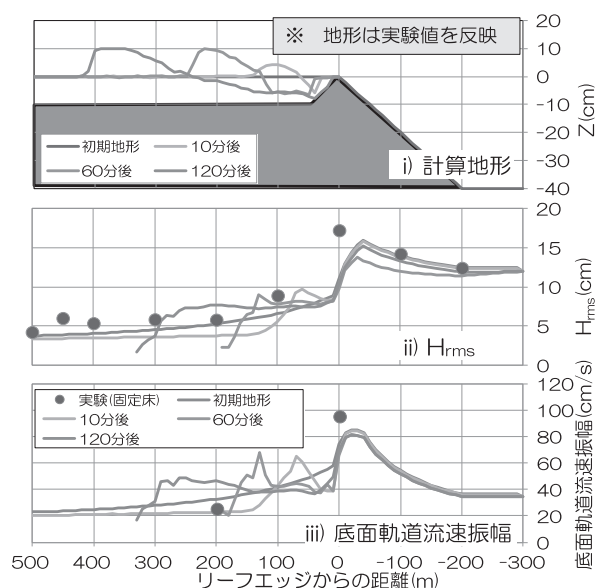
図—8 底質による地形変化の違い(120分後)⁴⁾

5. 数値モデルによる検討

(1) 急勾配リーフにおける波浪場再現

現地観測、水理模型実験から、サンゴ州島形成にとっ

て、特有の地形である急勾配リーフ地形における外力（波、流れ）の推定が重要であることがわかった。本研究では、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るエネルギー平衡方程式を基本とし、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⁵⁾の改良モデル⁶⁾を用いた。図—9は、4章の実験で取得した地形データ（造波開始10分後、60分後、120分後）に対して、各時刻における波高分布、底面軌道流速分布を計算したものである。なお、図中の実験値は固定床実験結果である。初期地形での波高分布

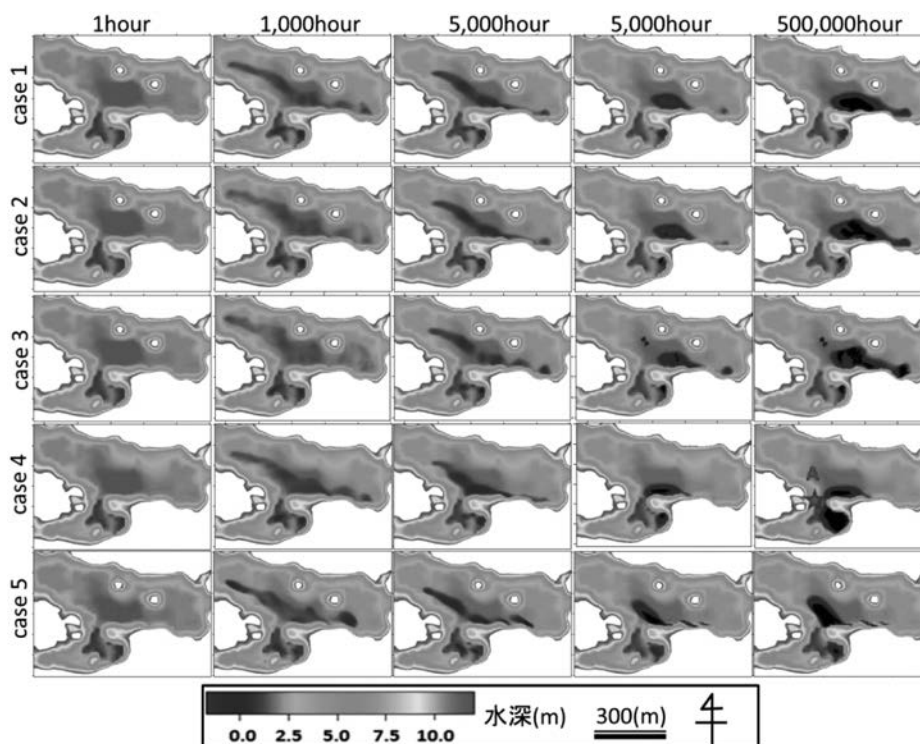


図—9 エネルギー平衡方程式による地形遷移に伴う外力場推算結果⁴⁾

は対応が良く、地形遷移過程の波高分布も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ている。底面軌道流速振幅は概ね一致するものの、検証データが少なく精度検証が今後の課題である。

(2) バラス島のサンゴ礫集積過程の再現

ここまでの知見を参考に、バラス島周辺のサンゴ礫集積の再現計算を試みた⁷⁾。当該地点における過去の波浪統計データに基づき、波浪条件、潮位条件をランダムに設定し、波浪、海浜流の計算結果からサンゴ砂礫移動に伴う地形変化を計算し、これを繰り返すことにより徐々にサンゴ礫が集積され州島が形成される様子の再現を試みた。なお、サンゴ礫の移動は掃流状態を仮定し、リーフ上の初期サンゴ砂礫層厚を15 cmとし、被度率20%以上の領域では毎年1 cm厚ずつ供給があるものとした。サンゴ礫の掃流力として波のみを考慮した場合（case 1）、波と潮流を考慮した場合（case 2）、波と海浜流を考慮した場合（case 3）、case 1でバラス島北側の窪地を取り除いた場合（case 4）、同じくcase 1で西表島の沖合に位置する鳩間島を除いた場合（case 5）におけるサンゴ礫の集積状況の再現計算結果を図—10に示す。サンゴ礫の移動特性は主に波による掃流移動によって特徴づけられ、



図—10 バラス島へのサンゴ礫集積再現計算⁷⁾

リーフ上での碎波に伴い掃流力が低減することや、鳩間島や窪地の影響によって来襲波の波向きが東西方向からに限定されることによって、バラス島の位置するリーフ中央部に集積する様子が妥当に再現された。

6. おわりに

本稿では、サンゴ礁州島形成メカニズムについての研究開発状況を報告した。著者らは、今後も本研究を継続し、国内外のサンゴ礁海岸や離島保全に役立てるよう研究開発を進め、国土保全に貢献していきたいと考えている。なお本成果は、国土交通省の建設技術研究開発助成制度の採択課題「サンゴ礁州島形成モデルの開発」(研究代表者：東京大学 茅根 創)および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」(研究代表者：東京大学 茅根 創)により得られた委託研究成果の一部である。

J C M A

《参考文献》

- 1) 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.
- 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) 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.

- 4) 岩塚雄大・琴浦毅・片山裕之・田島芳満・茅根創: サンゴ礁による地形変化の基礎的検討, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 71, No. 2, pp. I_517-I_522, 2015.
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) 竹森 涼・田島芳満・藤川大樹・茅根創: 孤立リーフ上におけるサンゴ砂礫集積メカニズムの分析, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 71, No. 2, pp. I_721-I_726, 2015.

【筆者紹介】

片山 裕之 (かたやま ひろゆき)
五洋建設㈱
名古屋支店 土木営業部
担当部長



茅根 創 (かやね はじめ)
東京大学大学院
理学系研究科 地球惑星科学専攻
教授



田島 芳満 (たじま よしみつ)
東京大学大学院
工学系研究科 社会基盤学専攻
教授

