

東京都 沖ノ鳥島・南鳥島に関する研究調査事業
実施類型 B II 実施機関 国立大学法人東京大学

沖ノ鳥島・南鳥島の地生態工学的維持のための研究調査

(成果報告書)

2026(令和8)年1月



目次

1. 報告内容の要旨	1
2. 研究調査の概要	2
2. 1 研究調査開始当初の背景及び課題.....	2
2. 2 研究調査の目的	3
2. 3 研究調査の達成目標・期待される効果.....	3
2. 4 研究調査の実施体制.....	3
3. 研究調査の実施内容	4
3. 1 実施目的.....	4
3. 2 実施方法.....	5
3. 3 実施結果.....	19
3. 4 考察と研究調査の成果、今後の課題・展望等.....	42
4. まとめ	45

この報告書は、東京都が行う「沖ノ鳥島・南鳥島に関する研究調査事業」として決定された研究調査「沖ノ鳥島・南鳥島の地生態工学的維持のための研究調査」に係る実施内容を取りまとめたものです。

1. 報告内容の要旨

本研究は、東京都が実施する「沖ノ鳥島・南鳥島に関する研究調査事業」として進めてきた3年計画の最終年度にあたり、本年度に実施した調査および解析結果を取りまとめたものである。本年度は、南鳥島を主たる対象として現地調査を実施し、卓礁上に形成されるサンゴ礁洲島の形成および維持メカニズムについて検討を行った。

南鳥島では、島全周にわたる海岸地形および堆積物の調査を実施し、サンゴ礫からなる島が標高9メートルに達するまで形成され、長期にわたり維持されてきた地形的特徴を明らかにした。また、サンゴ礫の粒径分布やビーチロックの発達状況を把握し、島の安定性に寄与する要因について検討を行った。あわせて、数値モデルを用いた解析により、リーフフラット上へのサンゴ礫の供給、輸送、堆積過程を再現し、島形成の基本的な力学過程を示した。

一方、沖ノ鳥島については、本年度は現地調査を実施することができなかったため、これまでに得られている既往の調査結果や観測事例を参照し、南鳥島との比較の観点から整理を行った。その結果、同じ卓礁でありながら、南鳥島では大規模なサンゴ礁洲島が形成・維持されているのに対し、沖ノ鳥島では島の発達が限定的であることが確認され、波浪条件、礫供給量、リーフ形状などの違いが、その背景要因として示唆された。

本報告書では、本年度に実施した南鳥島での現地調査および数値解析結果を中心に、沖ノ鳥島との比較を通じて、サンゴ礁洲島の形成および維持に関わる条件について整理するとともに、今後の課題と展望を示した。

2. 研究調査の概要

2. 1 研究調査開始当初の背景及び課題

沖ノ鳥島と南鳥島は、日本の南端と東端に位置する国境離島である。両島とも、低潮位以下のサンゴ礁と、それを土台として高潮位以上まで堆積したサンゴ礁・サンゴ礫がつくる卓礁型のサンゴ礁洲島である。現在、サンゴ礁洲島は、海面上昇とそれによって激化する海岸侵食によって、島が浸食・消失・水没してしまう危機にある。とくに沖ノ鳥島は、高潮位より上数 10 cm の陸地が北小島と東小島の 2 つしかないため、国による海岸保全事業が進められている。一方、沖ノ鳥島（面積 5.8 km²）より小さなサンゴ礁からなる南鳥島（面積 2.3 km²）は、サンゴ礫が標高 9 m まで堆積して島を造っている。沖ノ鳥島と南鳥島の形成過程の差異を理解することによって、沖ノ鳥島や、広くサンゴ礁洲島一般の維持・保全に役立てることができる。

海面上昇に対して、人工的に島を嵩上げしてその維持をはかることは、国連海洋法の島の定義「島とは、自然に形成された陸地であって、水に囲まれ、満潮時においても水面上にあるものをいう」（第 121 条「島の制度」）に抵触する。実際、南シナ海の岩礁を中国が埋め立てて島と主張していることに対する仲裁裁判の判決（2016 年）では、人工的に埋め立てられた陸地は島とは認められないと結論している。3 千メートル級の滑走路を建設して軍事基地化しているミスチーフ礁とスピ礁は、もともと高潮位以上にはない礁を人工的に埋め立てたもので、岩でさえない低潮高地であるとされている。こうした状況をふまえると、両島の保全は、自然のメカニズムに従い、それを促進する地生態工学的（自然ベースの解決策：Nature-based Solution）に行うことが望ましい。さらにそうした科学的成果を、国際的に発信・適用することによって、島の地位を確立するとともに、沖ノ鳥島と同様に水没の危機にある小島嶼国の気候変動適応策に資する。

島の地形の維持には、(1) 島の土台を作るとともに、島の周囲で天然の防波堤として外洋の波浪から島を守り、基線として低潮線の根拠となる**サンゴ礁**の維持と、(2) **高潮位以上の陸地（島）**の維持の両方を進めなければならない。(1) については、サンゴ礁の形成プロセス、とくにサンゴ礁外縁の高まりである礁嶺の形成過程とそれを構成するサンゴについての情報が必要である。サンゴ礁の形成を明らかにした上で、(2) 高潮位以上の島の形成過程の理解に進む。卓礁において高潮位以上の陸地（島）は、過去のサンゴ礁が削り残されたものか、サンゴ礫が打ち上げられて形成されたものか、両者の複合（古いサンゴ礁石灰岩を核として、サンゴ礫が堆積して島を造る）かのいずれかである。島の地学的な成り立ちを明らかにするとともに、現在の波・流れと堆積物の運搬・堆積過程を明らかにする必要がある。卓礁において堆積物は、サンゴが成長してつくる石灰質骨格とその断片がつくることから、サンゴの分布や成長について生態学的な情報も必要である。

2. 2 研究調査の目的

2. 1で提起した問題意識に基づいて、本年度は、南鳥島において、地形・堆積物の調査を行い、島形成のシミュレーションによって、高潮位以上の島の形成メカニズムを明らかにする。沖ノ鳥島においては、堆積物と波浪の調査を行い、令和6年1月の渡島時に観察した護岸上に形成された礫州の状況を確認する。それに基づいて、海面上昇に対する島とサンゴ礁の応答シナリオを描き、島の地生態工学的維持・形成技術を提案する。また、波浪等の状況の常時観測の準備のために、衛星通信による画像転送の試験を行う。

2. 3 研究調査の達成目標・期待される効果

卓礁の島の形成・維持メカニズムの解明に基づいて、海面上昇に対して島を自然（サンゴと波浪）の営力によって維持する方策を提案する。さらに島の維持・保全を、太平洋小島嶼国にも適用することによって、都民の目が、国境を越えて太平洋に広がることが期待される。現在太平洋小島嶼国は、海面上昇による水没に対して、護岸や埋め立てなど工学的な対策を求めている。小島嶼国の人々にとっての理想は、東京湾のように埋め立て・護岸された海岸と土地をつくることである。しかしながら、東京湾岸では高度成長期の埋め立てと自然破壊によって、生態系と生物資源（江戸前）の劣化、赤潮・青潮の発生、親水機能の喪失などの深刻な問題を経験し、自然再生の取り組みが進んでいる。東京都が、沖ノ鳥島・南鳥島という小島嶼と同様の自然環境を持つ両島において、地生態工学的な海岸侵食・海面上昇対策をモデルとして示すことによって、その取り組みを「我が国」・「我が都」の領土と排他的経済水域の維持という近視眼的な視点から、東京湾－伊豆・小笠原－国境離島を通じて、太平洋小島嶼との連携に眼差しを広げることを目指す。

2. 4 研究調査の実施体制

本研究は、東京大学海洋アライアンス連携研究機構「沖ノ鳥島・小島嶼国プログラム」をベースとして実施する。同プログラムは、2008年に設立され、海面上昇に対する沖ノ鳥島や太平洋小島嶼国（環礁）の生態工学的維持について研究会を行うとともに、産官学のセクターを越えた情報交換の場を設けてきた。参加メンバーは、大学・研究所、国の省庁（国土交通省、水産庁、環境省、防衛省、沖縄総合事務局）、東京都、政府系財団、民間から220名ほどである。

現地における渡島調査は、このプログラムのネットワークを通じて、関係省庁の調査・モニタリングに同乗して行う。本年度は、防衛省の協力を得て南鳥島調査を、国土交通省関東地方整備局京浜河川事務所の協力を得て沖ノ鳥島調査を実施することができた。

3. 研究調査の実施内容

3. 1 実施目的

サンゴ礁洲島はサンゴ礫が運搬されることで形成される島であり、標高は数メートル程度と低いものが多い。サンゴ礁洲島の形成過程や、地形変化特性を把握することは、気候変動下による影響が大きい島嶼の保全対策を検討する上で極めて重要である。長期的に変化する海面上昇に対して、サンゴ礁洲島を持続的に保全するには、サンゴの増殖によるサンゴ礁の発達とサンゴから供給される砂礫の集積を利用する生態工学的な Nature-based Solution が重要となる。

南鳥島は、周辺を大水深に囲まれたリーフ上に持続的に安定な島を形成している。島の形成メカニズムについて、長岡(1987)は離水サンゴ礁地形である可能性を指摘し、八木ら(1992)の卓礁上のサンゴ礁洲島であると論じているが、十分に解明には至っていない。近年、茅根・田島(2021)が行った調査において南鳥島では長岡(1987)で指摘された古い石灰岩は見つからず、サンゴ礫からなる露頭が確認されたことが報告されている。また、図1に示すように2006年には台風12号が襲来し、島の海岸を越えて滑走路上にまで礫が堆積した。

これらの事実は南鳥島がサンゴ礫のうちあげによって形成されたサンゴ礁洲島である可能性を示唆している。南鳥島がサンゴ礁洲島であり波浪営力によって形成されているとすれば、長期間にわたって安定した状態を維持しているサンゴ礁洲島の好例となる。このようにサンゴ礁洲島が安定した状態を維持するメカニズムを理解、再現することは、海岸地形変化特性を把握、予測技術を構築するために重要であり、沖ノ鳥島をはじめとした他の水没の危機に瀕する島嶼を維持、保全するための各種対策の検討に大きく貢献すると期待される。以上より、本研究では、南鳥島における現地調査や補助的な室内実験を行い、さらに数値実験を通じて南鳥島の形成過程の分析を行うことを目的とする。



図1 2006年台風12号で南鳥島にうちあげられた砂礫（海上保安庁ホームページより引用）<https://www.kaiho.mlit.go.jp/info/books/report2007/honpen/c090.html>

3. 2 実施方法

3. 2. 1 南鳥島

(1) 航空写真の分析

南鳥島の数十年間にわたる変化の程度を空中写真を用いて分析する。近年、衛星画像に基づく海岸線変化の分析は多く行われているが、南鳥島のスケールにおいて海岸線の変形特性を把握するには解像度が十分ではない。そこで、本検討では過去の調査等で撮影された空中写真を用いて分析した。本検討で活用した航空写真は(1)国土地理院による航空写真(1975年11月20日撮影)、(2)報告者らが行ったドローン空撮による画像(2017年2月2日撮影)、さらに(3)国土地理院による簡易空中写真(2018年7月29日)である。空中写真では統一された座標系が存在しないため、図2に示す特徴点を抽出し、非線形最小二乗法で最適値を算出して平面直角座標上に投影した。

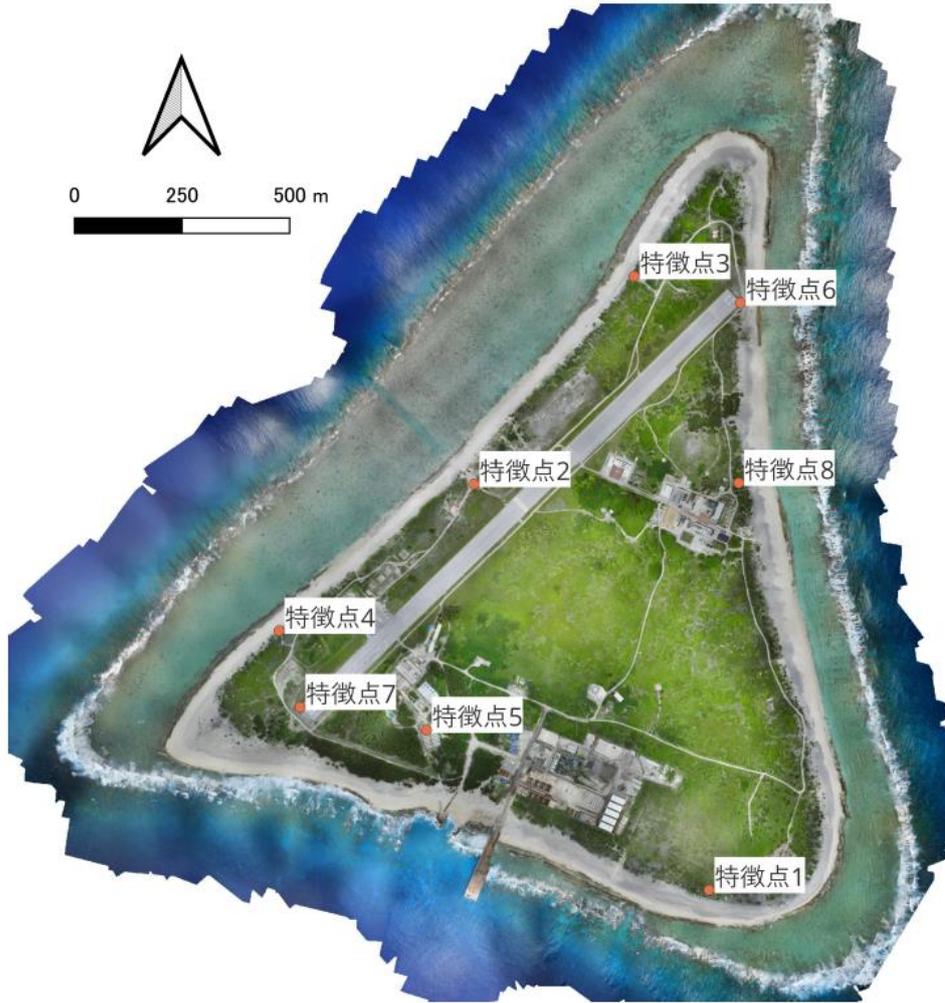


図2 座標変換に用いた特徴点

(2) 現地調査

(2.1) 渡島

令和7年6月12-13日、防衛省の輸送機（C-130，図3）に同乗して、南鳥島に渡島して、現地調査を行った。



図3 自衛隊輸送機 C-130（防衛省ホームページより）

<https://www.mod.go.jp/msdf/equipment/aircraft/transport/c-130r/#c-130R-9>

(2.2) 海岸地形・堆積物調査

現地調査では RTK-GNSS による断面地形の測量、ビーチロックも含めた海岸の概況の調査、粒径分析を行った。調査は島の海岸線の全体像が把握できるよう、島を一周するように代表的な海岸線を選択して図4に示す7地点で行った。

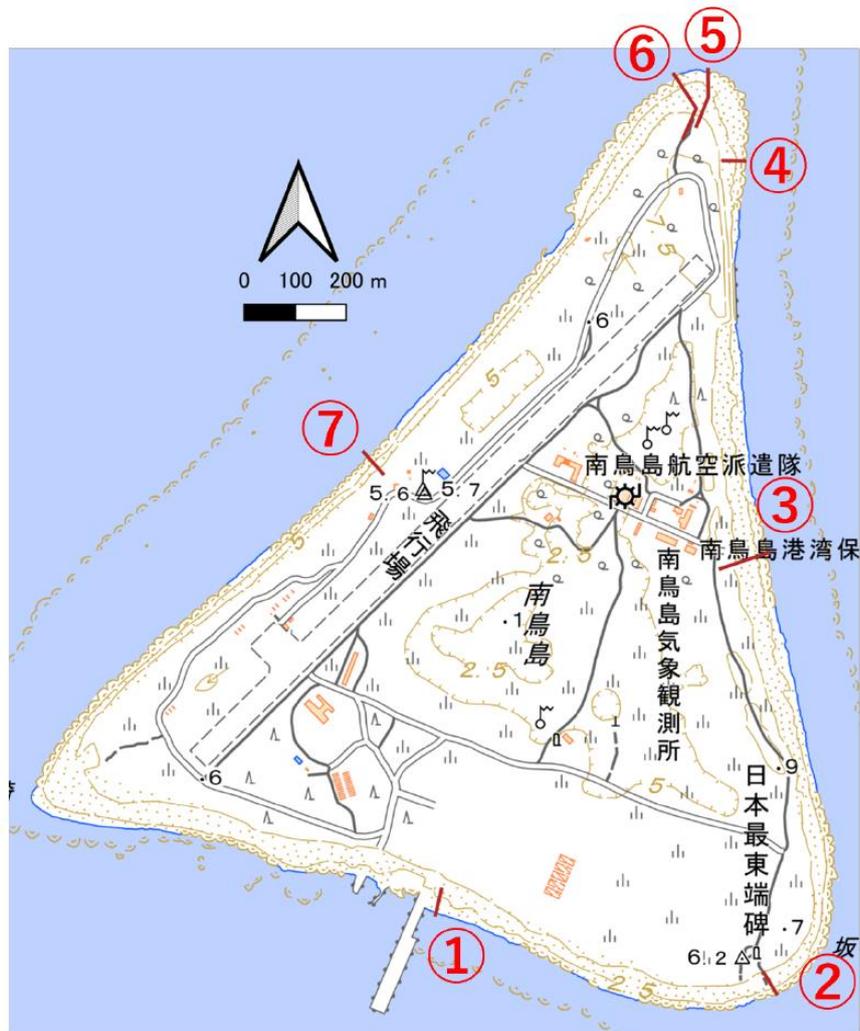


図4 現地調査対象地点

海岸のサンゴ礫は図5に示したように粒径が非常に大きく10cmを超えるようなものから、1mmに満たないような非常に小さいものまで幅広く観察された。砂礫浜は図6に示すように概して勾配が大きく、複数のバームが形成されている部分が多く見られた。異なる波高の波の来襲イベントによる影響がみられる。また海岸線付近の感潮帯にはビーチロックが大規模に形成されている部分があり、島の安定に重要な役割を果たしていると考えられる。

粒径分析にはそれぞれの調査地点でスケールを入れて撮影した写真を用いた。粒径が1mmを下回る砂から200mm程度の礫まで幅広く分布していたことから、以下の画像解析および画像に基づく目視による代表礫の粒径計測の二つの分析手法を組み合わせ代表粒径Dを算出した。

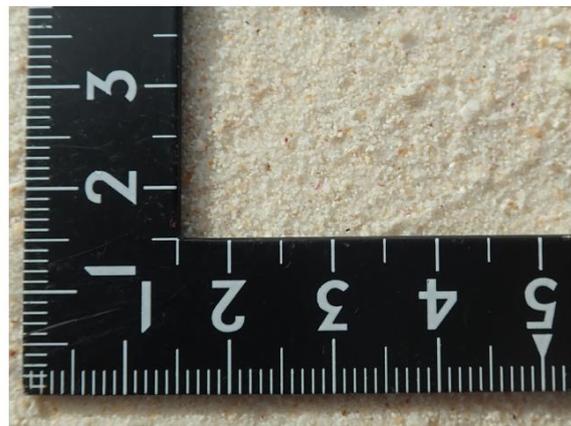
まず画像解析では撮影した画像をグレースケールに変換し、ガウシアンフィルタによって平滑化したのち、エッジ抽出によりエッジ画素とそれ以外を分類した画像を生成し、さらにWatershed画像領域分割法で粒子を各領域に分割した(図7)。その後、各領域の面積Aから円形近似に基づき $D = 2\sqrt{A/\pi}$ から直径を求め、体積に比例する D^3 に対して粒径加積曲線を

描き、中央粒径 D_{50} を計算した。この手法は画像全体の粒子を粒径加積曲線に表して中央粒径を算出しているため正確性の高い結果が得られているが、サンゴ礫に関しては形が歪なものが多いにもかかわらず画像で写された面積を体積に変換する過程で円形を想定していることに伴う誤差が発生する点に注意が必要である。また、粒径が大きくなるとサンゴ礫上の模様とサンゴ礫同士の境界の区別が難しくなり、画像解析の過程で過分割が発生するためこの手法は使用できない。

次に、画像解析で粒径の算出が困難な粒径の大きい礫に関しては、目視で画像内において平均的な礫を複数個選び、それぞれの礫で長径 a と短径 b を計測して $D = \sqrt{ab}$ として計算し、それらを平均して代表粒径 D とした。



(a) サンゴ礫 (測線 6 で撮影)



(b) サンゴ礫 (測線 3 で撮影)

図 5 観察されたサンゴ砂礫



(a) 海岸線 (測線 3 で撮影)

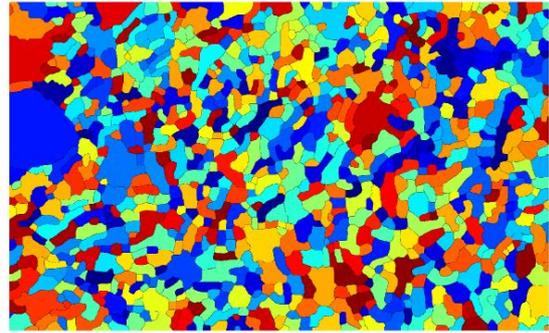


(b) ビーチロック (測線 6 で撮影)

図 6 砂礫浜および汀線近傍のビーチロック



(a) 撮影画像



(b) 画像領域分割法適用後の画像

図7 画像解析による粒子分類の例

(2.3) 定点観測カメラの回収

本調査では、2024年12月の渡島時に設置した定点観測カメラを回収した。定点観測カメラでは、2024年12月からカメラを撤去した2025年6月まで、毎日朝5時から16時まで、毎正時および毎正時30分に30秒間の動画を撮影した。カメラは図4の地点3(東側海岸)のトーチカに固定したポールに設置した。図8および図9にカメラ撤去時の様子とカメラによる撮影動画から抽出した画像の例を示す。得られた観測動画の詳細な分析はできていないものの、観測期間中は高波浪の来襲イベントがなく、顕著な波の遡上やそれに伴う海浜地形の変化は確認されなかった。当該地点は感潮帯にビーチロックが形成されており、そのことも海浜地形の安定維持に寄与したことが推察される。



図8 観測カメラ撤去作業



図9 観測カメラによる撮影動画の例

(3) 数値モデルによる検討

本研究ではサンゴ礁洲島の地形変化を数値計算により再現するモデルを構築した。地形変化の計算では台風などの高波浪イベント時と平常時の二つの状況を想定した。イベント時の計算においては、サンゴ礁洲島周辺の一点における海象条件を境界条件とし、初期地形において波浪場と流速場を計算した。次に計算した波浪場、流速場を外力条件として漂砂量モデルに入力し、地形変化を計算した。図10に示したように、平常時計算では波浪場・流速場計算（外力計算）、漂砂量計算とそれに伴う地形更新の繰り返しによって長期計算を行う。計算資源の観点から一度の漂砂量計算では外力を再計算せず、地形が外力に影響を及ぼすほど大きく変化した場合に外力を再計算して再び漂砂量計算を繰り返す。本研究での平常時計算では12,000時間(500日)の漂砂量計算ごとに外力を再計算した。平常時計算では外力の過度な平均化を防ぎ様々な波の入射を再現するため、16方位、3波高の48パターンのうち実際の発生確率に合わせて選択して外力計算したものを漂砂量計算の入力外力として与えた。

波浪場の計算には、波のエネルギーの伝搬による波の浅水変形や屈折、砕波に伴う波高や波向きの変化を計算することのできるエネルギー平衡方程式を用い、流れの場の計算には、津波や高潮の計算にも用いられる非線形長波方程式に、波の作用による影響を流れを引き起こす外力として考慮するラディエーション応力項を加えたものを与えた。波と流れによって引き起こされる砂の移動量を表す漂砂量の算定には、Madsen(1991)の掃流砂量モデルに基づき、海底地形勾配による漂砂量への影響を考慮したモデルを適用した。

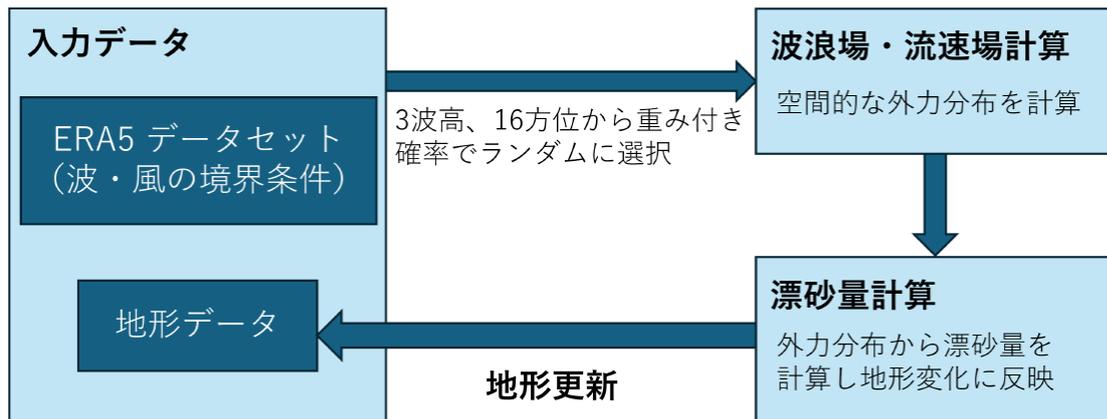


図 10 数値モデルの概要

計算には南鳥島を組み込んだ実際の地形，南鳥島が形成される前を想定した仮想のリーフフラットがある地形の 2 種類を，南鳥島を中心とした東西約 4.5km，南北約 4.5km の範囲を計算領域として正方格子による格子間隔 10m で作成した。この際、海底地形については、日本水路協会による M7000 シリーズを用い、陸上の南鳥島の地形については国土地理院による基盤地図情報 10m 格子データを用いた。元データの水深，標高は北緯 24 度 15 分 50 秒，東経 153 度 56 分 30 秒を原点とする平面直角座標系に変換し、10m 格子ごとに 8 方位方向に元データを探索して逆距離荷重法により補完して 10m 格子の地形データとした。またリーフエッジ周辺での急激な地形の変化がモデルの安定性に影響を及ぼさないよう、ガウシアンフィルタでスムージングをかけた。南鳥島の陸上部を取り除いた地形については、上記の南鳥島ありの地形のうち標高が-1m よりも高い部分をすべて標高-1m に書き換え、水深 1m のリーフフラット地形とした。図 11 および図 12 に作成された地形データを示す。強調する水深の範囲と南鳥島の有無が異なるものをそれぞれ分けて示している。

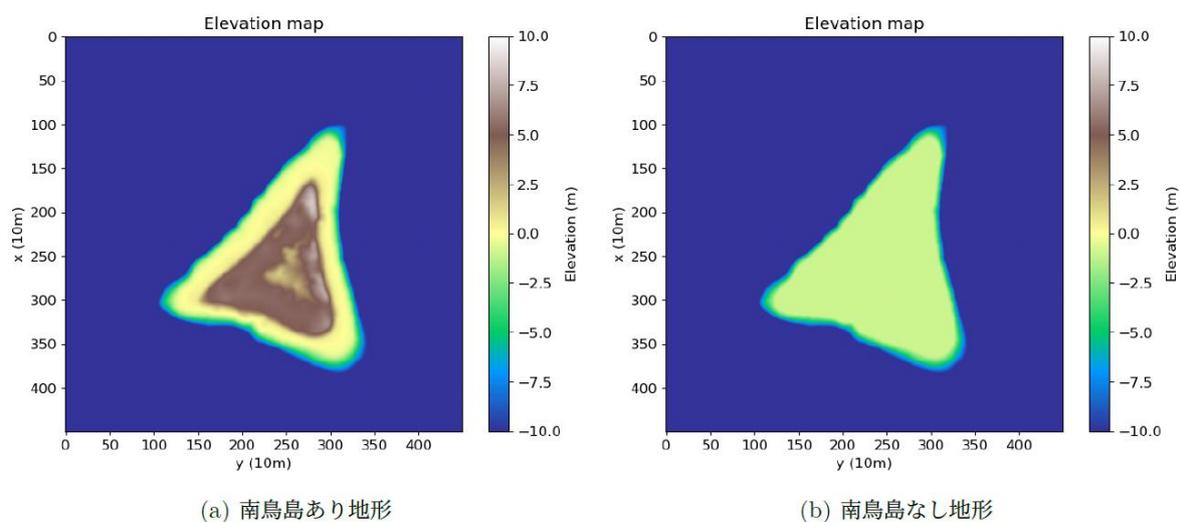


図 11 数値計算に用いた計算領域の地形(浅海部の分布を強調)

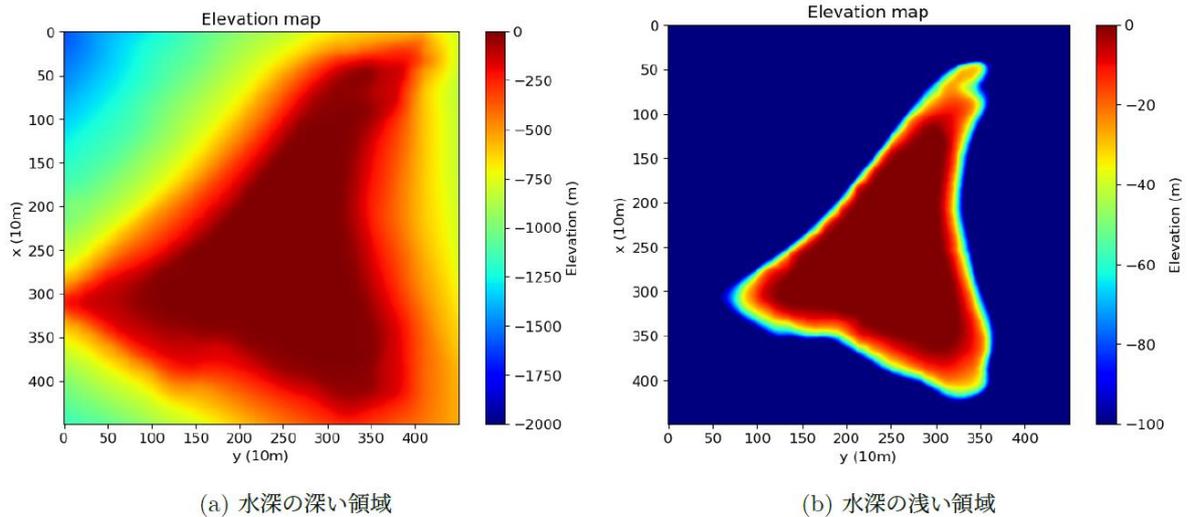


図 12 数値計算に用いた計算領域の地形(深海部の分布を強調)

波浪場の計算における沖合いからの来襲波の諸元については、ECMWF（欧州中期予報センター）が提供する ERA5 再解析データを利用した。データ取得地点は北緯 24 度 30 分 0 秒、東経 154 度 0 分 0 秒の地点とし、1990 年から 2023 年までの 34 年間分のデータを利用した。データから得られた波高と波向の頻度分布を図 13 に示す。図に見られる通り、東からの来襲波浪の頻度が多い一方で、有義波高 4m を越える高波浪は北および北北西からの来襲が多くなっている。

平常時の計算では、これらの波浪を波向きは 16 方位に、波高は有義波高 2m 以下、2m 以上 5m 以下、5m 以上の三段階にそれぞれ区分し、各区分の代表波の条件をそれぞれの区分に分類された波浪データのエネルギー平均値を与える諸量として算出して決定した。さらに、各区分に分類されたデータの数に基づき、それぞれの発生頻度を算出した。得られた波浪条件に対して、波・流れ場、漂砂量、地形変化の計算では、それぞれの発生頻度に合わせてランダムに入射波条件を設定して順次与えた。

台風時の入力データにはデータを取得した 34 年間で最大の波高を持ち、前述した 2006 年台風 12 号接近時の値を用いることとした。データ取得地点での有義波高は日本時間 2006 年 9 月 3 日午前 3 時に最大値の 12.8m となった。図 14 に同時刻を含む三日間の有義波高の時間変化をしめす。台風時を想定した計算では、有義波高がピークに至った条件を想定し、有義波高 12.8m、ピーク波周期 11.9 秒、ピーク波向き N78.8°W を与えた。

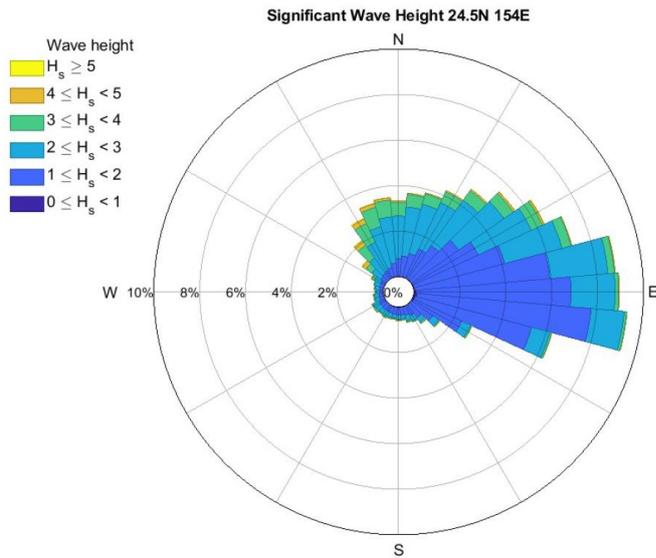


図 13 1990 年から 2023 年までの波浪再解析データ(ERA5: N24.5° E 154.0°)の波高・波向別頻度分布

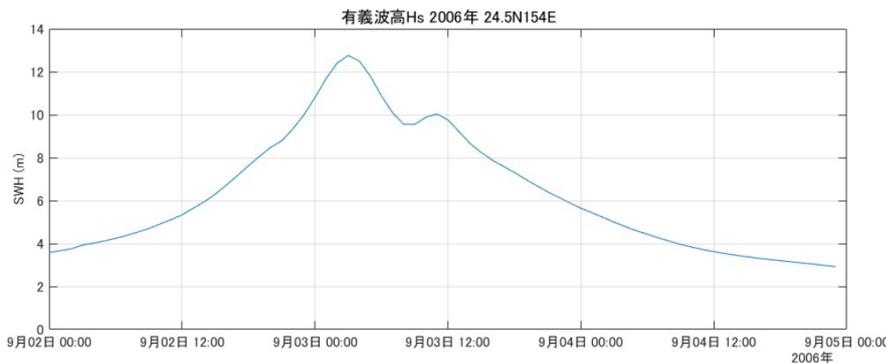


図 14 2006 年台風 12 号来襲時における有義波高の時間変化(ERA5)

サンゴ砂礫の分布は地形に応じて決定した。図 15 にリーフフラットおよび初期条件としてサンゴ砂礫を供給する領域の分布を示す。水深が大きくなると漂砂量が小さくなることも勘案し、標高-10~-1m の領域をサンゴが十分多い領域（サンゴ供給域）とした。平常時計算ではこの領域のみに初期の砂礫層厚を 50cm として与えて、リーフフラットへのサンゴの移動も含めた計算とした。一方で、イベント時の計算においてはすでに平常時の波によってリーフフラットに砂礫が堆積して島が形成されている状態を想定し、-10~-1m の領域に加えて標高-1m より浅いリーフフラット領域にも初期の砂礫層厚を 10cm として与えた。また、平常時の計算ではサンゴ供給域に対して設定したサンゴの成長速度に合わせて一定の割合で砂礫層厚を加えた。サンゴ礫の実際の成長速度はせいぜい 1cm/年程度であることが想定される(Woodroffe, 2008)が、本数値実験においては、計算時間の制約も勘案して、平常時のサンゴの成長速度を 10cm/年、240cm/年の 2 つの条件で設定した。この場合においてもサンゴ供給域において砂礫層厚が初期の状態を上回って新たに生産されることがないよう

に、計算の過程でサンゴ砂礫が移動して初期砂層が減じている領域にのみ、成長速度に合わせてサンゴ砂礫を供給した。

また特にリーフ上においては、波と流れにより漂砂移動が生じる場所においても、底面に砂礫が存在せず岩礁が露出している場合には、砂礫の移動は生じない。このことを再現するために、本モデルにおいては、時々刻々の各地点における砂礫層厚を計算し、砂礫層厚が初期条件の10cmよりも小さくなる場合には、砂礫層厚に比例させる形で、漂砂量を低減させた。このため、砂礫層厚がゼロとなり岩礁が露出した際には地形変化計算に用いる漂砂量はゼロとなる。

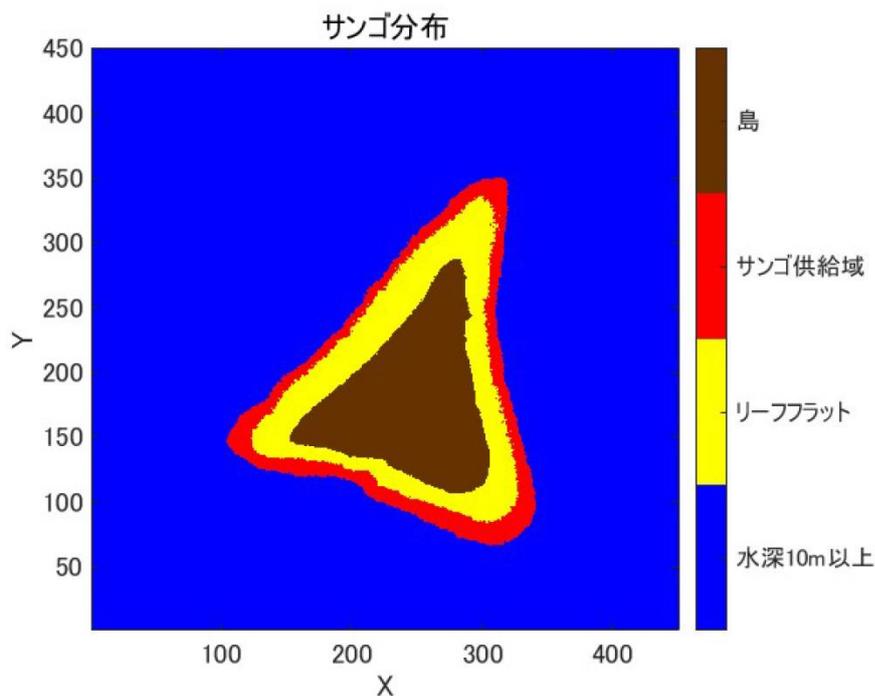


図 15 計算領域におけるサンゴ砂礫供給部、リーフフラット、および南鳥島陸上部の分布

(4) サンゴ礫の年代測定

南鳥島で採取した3点のサンゴ礫の、放射性炭素年代測定を、東京大学総合研究博物館放射性炭素年代測定室に依頼して行った。

(4.1) XRDによる結晶構造解析

測定前に、XRDによる結晶構造解析を行い、再結晶化などによって変質していないことを確認した。X線回折(XRD)はデスクトップX線回折装置 MiniFlex600(株式会社リガク製)を用い、X線管球:銅、波長タイプ:K α 、管電圧:40kV、管電流:15mAの条件で測定した。その結果、いずれの試料もアラレ石に特徴的な26.2°のピークが認められたが、方解石に特徴的な29.4°のピークは認められなかった(図16)。3点のサンゴ礫試料は100%アラレ石であり、方解石に再結晶化している痕跡は認められなかった。

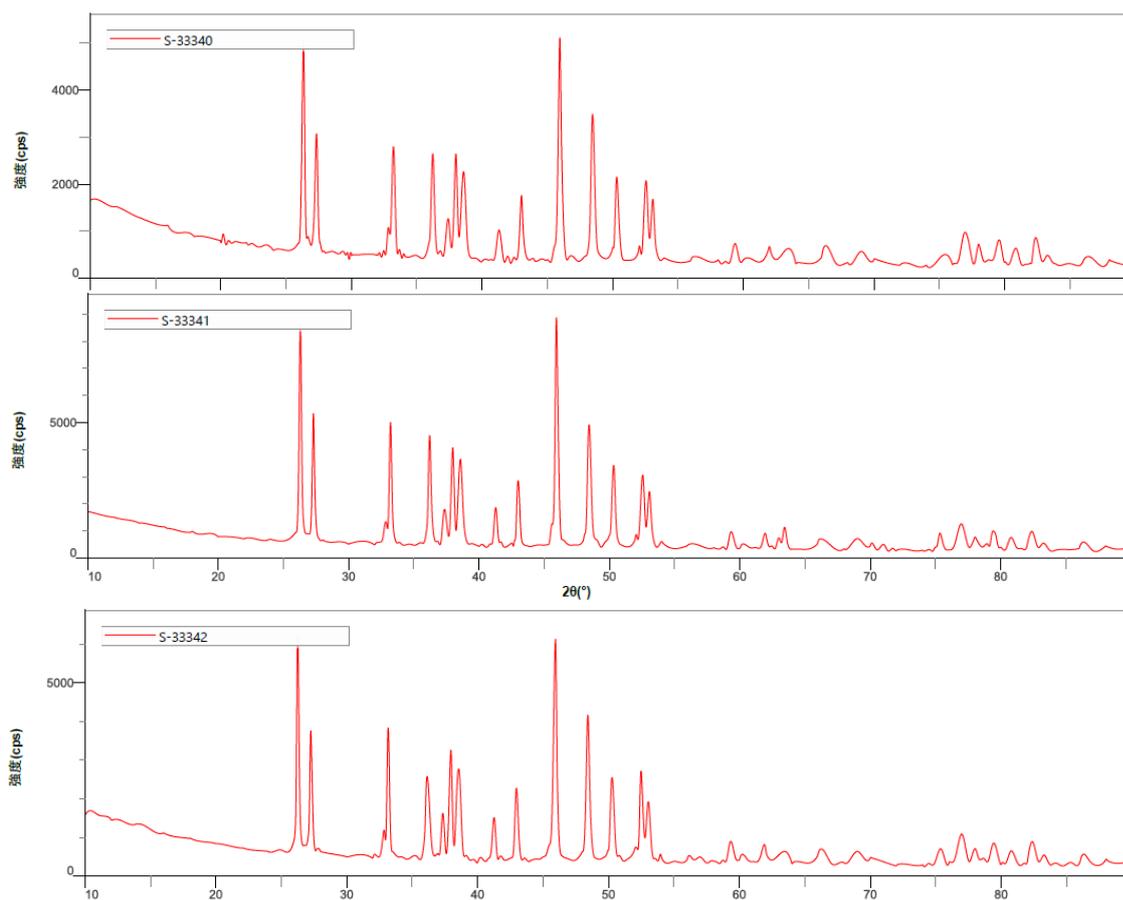


図 16 各試料の XRD スペクトラム

(4.2) 弱酸処理

次に、試料表面の汚れを除去するために、HCl と反応させ表面をエッチングした。処理条件を表 1 に示す。

表 1 前処理の結果

資料名	前処理 ID	処理前試料	処理後試料	回収率	処理条件
MT-E-65	PPA-788	207.5mg	104.0mg	50.1%	1.0M 塩酸 90 分
MT-N-1-5	PPA-789	150.3mg	74.3mg	49.4%	1.0M 塩酸 90 分
MT-NE-1-50	PPA-790	239.5mg	120.3mg	50.2%	1.0M 塩酸 90 分

(4.3) 炭素精製およびグラファイト化

試料は、銀カップに秤量し、elementar 社製 vario ISOTOPE SELECT 元素分析計に導入し、熱分解後、精製された二酸化炭素を真空ガラスラインに導入し、あらかじめ鉄触媒約 2mg を秤量したコック付き反応管に水素ガス(炭素モル数の 2.2 倍相当)とともに封入して、650°C で 6 時間加熱して実施した (Omori et al. 2017)。グラファイト化の結果を、表 2 に示す。

表 2 グラファイト化の結果

資料名	グラファイト ID	試料重量	グラファイト化率	グラファイト重量	Fe 重量	C/Fe 比
MT-E-65	GR-21866	9.258 mg	55.6%	0.59 mg	1.91 mg	0.309
MT-N-1-5	GR-21867	9.161 mg	78.5%	0.84 mg	2.09 mg	0.402
MT-NE-1-50	GR-21868	9.222 mg	67.0%	0.72 mg	2.00 mg	0.360

(4.4) 加速器質量分析装置 (AMS) による放射性炭素年代測定

グラファイト化した炭素試料における放射性炭素同位体比の測定は、東京大学総合研究博物館が所有する加速器質量分析装置 (AMS) を用いて測定した (図 17)。



図 17 東京大学総合研究博物館の加速器質量分析装置 (AMS) 博物館ホームページより。

3. 2. 2 沖ノ鳥島

令和8年1月、国土交通省京浜河川事務所が同島の維持管理のための渡島に同行して、新竜丸（698トン、図18）に乗船し、沖ノ鳥島に渡島した。



図18 新竜丸

3. 3 実施結果

3. 3. 1 南鳥島

(1) 航空写真の分析

3つの写真を同じ座標系に投影した状態で海岸線を抽出し、それらを重ね合わせたものを図19に示す。汀線変化分析には本来潮汐を考慮することが望ましいが、空中写真が撮影された時刻が不明であることから今回は考慮していない。天文潮位における大潮の満潮と干潮の最大値の差は70cm程度である。南鳥島の前浜勾配は1/10～3/10程度であるため、汀線位置としては最大で7m程度の誤差が生じうる。東側、西側の直線状の海岸線においては1975年から2018年にかけて最大で15m程度の後退をしている部分が多く観察され、これらの場所では写真からもビーチロック上のサンゴ礫が減少し、ビーチロックが露出している部分が増加している様子が観察された(図20)。このビーチロックはKonishi et al.(1985)の調査によると2800～3000年前のものであり、海岸線の後退を引き留める効果を発揮していると考えられる。そのため、ビーチロックが形成されていなかった場合にはより後退が進んでいた可能性がある。

図21には図19の各端点における海岸線の比較を拡大したものを示す。最も変化が顕著であった点に着目すると、三角形状の南鳥島の形状のうち各頂点付近で顕著な変化があり、北側、西側頂点では汀線が後退した部分と前進した部分が混在している。北側頂点では2017年から2018年の1年間で30m程度の汀線の前進が見られた部分もある。長期的には汀線の前進、後退を繰り返すことでサンゴ礫海岸は動的に形状を保っていると考えられる。

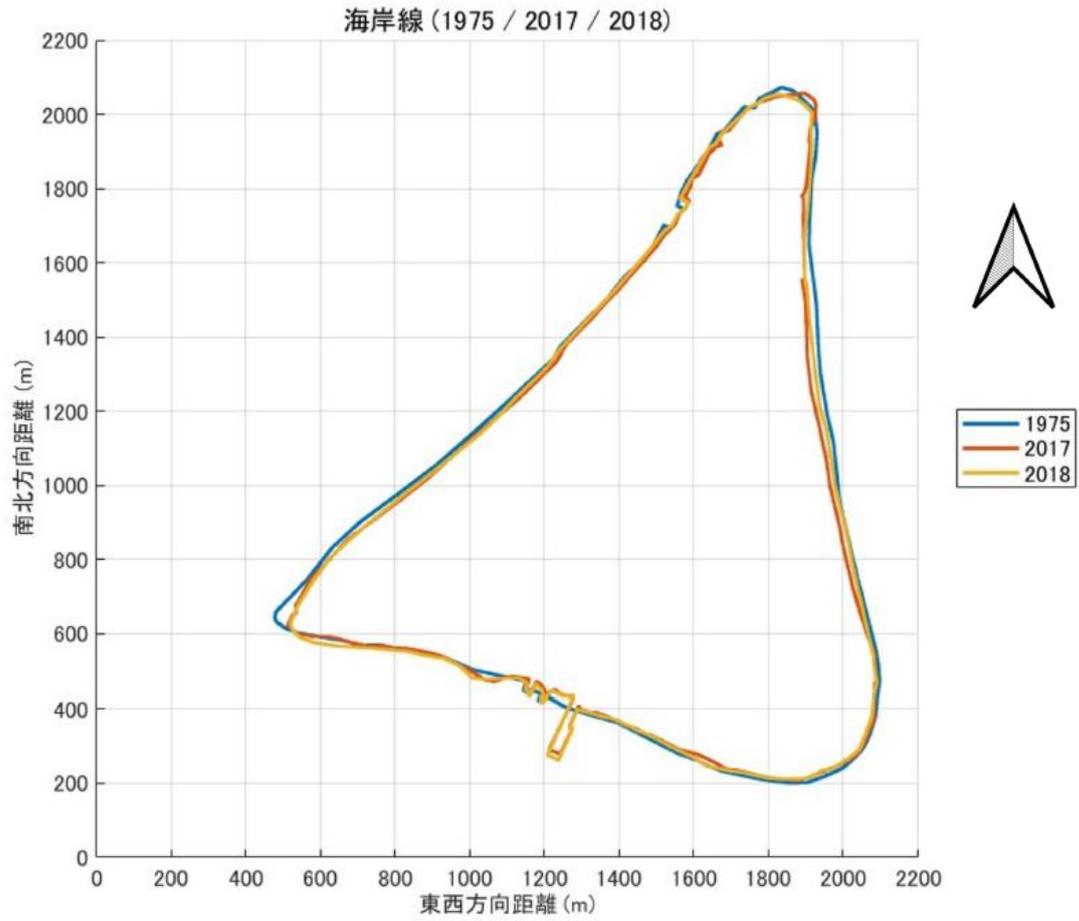


図 19 1975 年, 2017 年, 2018 年の抽出された海岸線

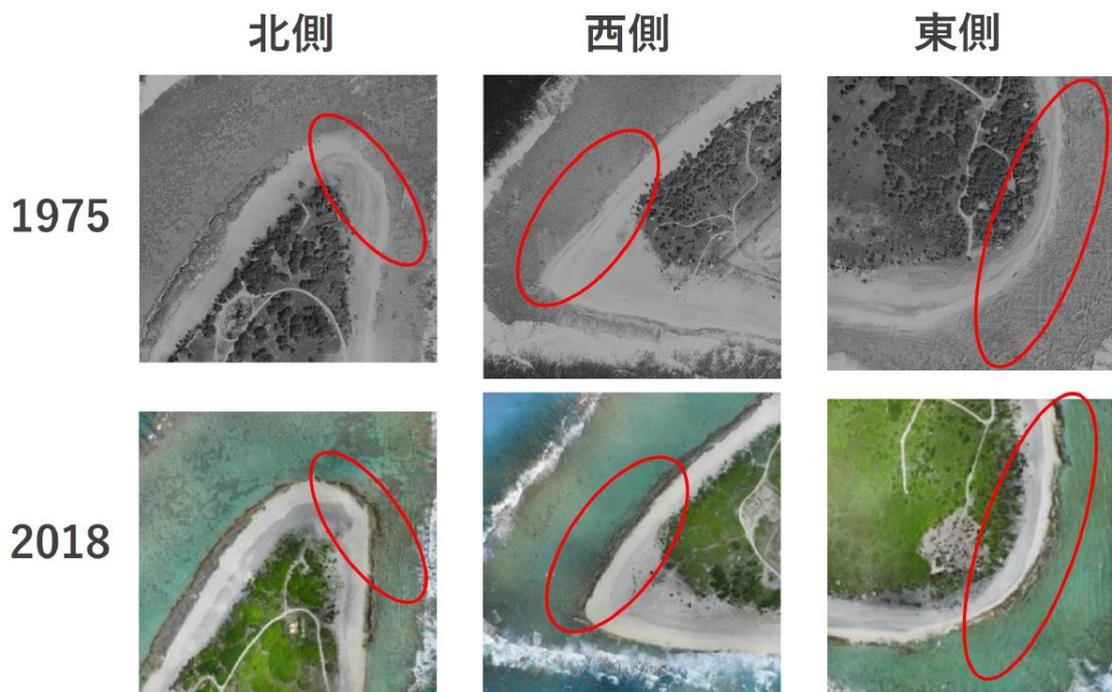


図 20 1975 年と 2018 年の端点における海岸線写真の比較

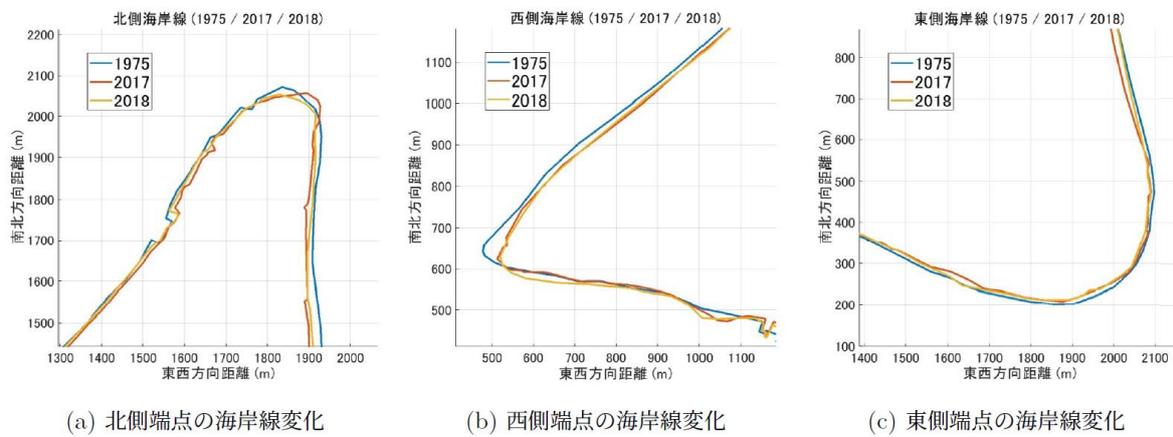


図 21 南鳥島の北、西、東側端点における海岸線の比較

(2) 渡島

令和 7 年 6 月 12-13 日、本委託調査受託者、茅根 創・田島芳満・後藤颯汰（東京大）が、東京都職員 3 名とともに、自衛隊機で南鳥島に渡島して、下記スケジュールで調査を実施した。

令和 7 年

6 月 11 日（水）

19 時 大和集合，打合せ（泊）

6 月 12 日（木）

厚木基地発～南鳥島着

15-16 時 地点 1， 2， 6， 7 調査

16 時 夕食

17:33 日没

17-20 時 地点 3 調査，トレイルカメラ回収。

国土交通省特定離島事務所ヒアリング。

22 時 宿泊

6 月 13 日（金）

3:55 日の出

4時－6時40分 地点5, 4, 3調査

南島島発～厚木基地着 解散

(3) 海岸地形・堆積物調査

現地において断面地形計測と堆積物の調査を行った7地点の写真を図22に、断面地形と表層砂礫の粒径の計測結果を図23に示す。図における海面は観測時の海面を示しており、標高はその時刻の海面を0mの基準としている。すべての地点で勾配が1/10程度かそれ以上の急な勾配が10～50m程度続く断面地形が確認できた。西海岸を除く地点ではバームが形成され、それより内陸では1/20程度の勾配が続くことが読み取れる。

次に粒径分布に着目すると、多くの地点で海岸線から離れるとともに粒径が大きくなっており、バームより岸の二段目で特に粒径が大きくなっている。一方で西海岸の地点7ではバームが見られず、粒径も全体に均等に小さくなっていることが確認できる。西側海岸では、東側に比べて高波浪の来襲イベントが少ないことが推察される。ビーチロックは南東、東、北、西海岸で観測され、西海岸を除く点で海面からの高さが1m以内に分布していた。西海岸では海面からの高さ1～2mの地点でも見られた。



地点 1 南海岸



地点 2 南東岸



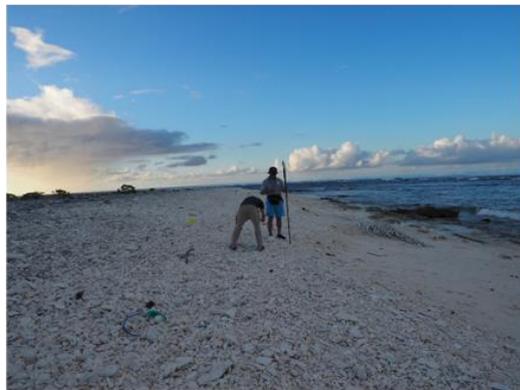
地点 3 東海岸



地点 4 北東海岸



地点 5 北海岸



地点 6 北西海岸



地点 7 西海岸



図 22 調査地点の写真

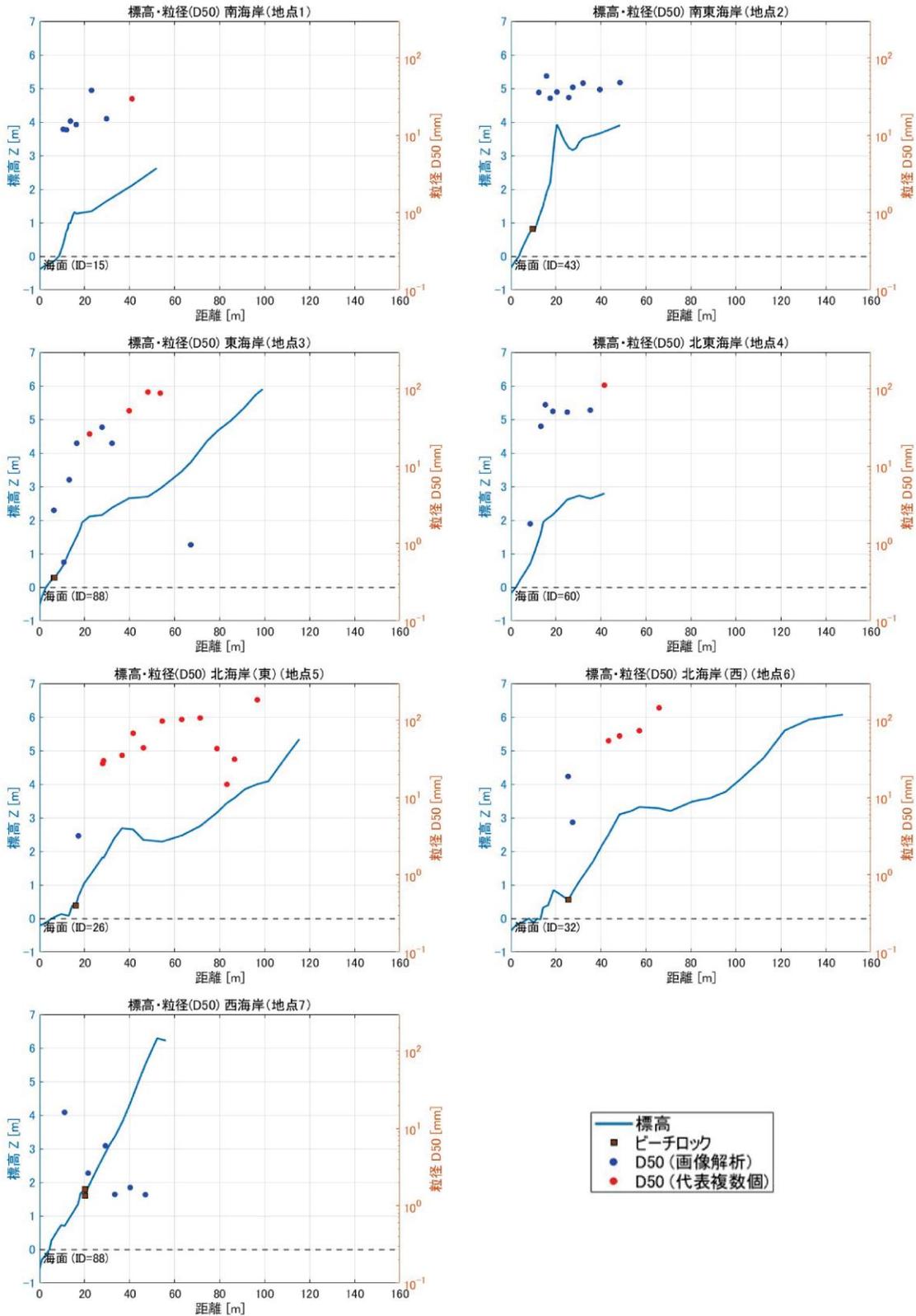


図 23 現地観測に基づく断面地形および表層砂礫の粒径分布

(4) 数値モデルによる検討

(4.1) 平常時の地形変化計算

平常時の地形変化計算では、南鳥島の陸上部を取り除き、リーフ上の標高を-1mとした条件で計算を行い、リーフエッジ外から供給されるサンゴ砂礫がリーフフラット上に輸送され、堆積し、島(陸上部)を形成するまでの過程の再現を試みた。本計算では、計算方法に示したように、波向 16 方位および波高 3 段階で区分し、それぞれの区分で求めた代表波の入射波諸元を与えた、波および流れの計算をあらかじめ実施してその結果を記録しておき、地形変化計算では、それぞれの区分の発生頻度に合わせて 30 時間毎に計算された波・流れ場をランダムに選択して、それに対する漂砂量および地形変化の計算を行った。ただし、地形変化によって波や流れも変化するため、12000 時間毎にその時点での地形条件に対して波と流れの再計算を行って更新した。

このような条件で、サンゴ砂礫の粒径を一様に 1cm とし、サンゴ砂礫供給領域(リーフエッジから水深-10m までの領域)に供給するサンゴ砂礫の量を成長速度を 2.4m/年とした場合の 10,8000 時間後(4500 日後)までの計算結果を図 24 に示す。ただし、地形変化の計算は 4500 日間(約 12.3 年)であるが、サンゴ砂礫の供給速度が 2.4m/年の割合で与えているため、実際の成長率が 1cm/年程度であるとすれば、土砂供給量の観点ではここでの計算は実際の 240 倍の速さということになる。

図 24 より、まずリーフの南側に島の核となる陸域が形成され、陸域が主に西側で北向きに拡大しながらやがてリーフ上全域で陸域を形成する様子が見られた。特に計算初期の核ができる 1500 時間経過後までの推移を、地形変化量のカラーバーのレンジを変えて図 25 に示す。サンゴ供給域で青色で示されている砂礫面高が低下(侵食)している領域がリーフエッジに沿って東側に広がっており、砂礫が主に東側エッジからリーフ内に流入してきていることが読み取れる。また、リーフフラットの東西方向の中心よりやや西よりで、砂礫の堆積を示す薄く赤い領域が広がり、さらなる堆積によって標高が高くなり濃い赤になった領域が、リーフフラットの南端付近や西端付近に見られる。この傾向は、図 13 に示した通り南鳥島では東南東～東～北～北北西からの波の割合が非常に多くなっており、結果として漂砂の卓越的な移動方向も西向きあるいは西南方向となっていることによると考えられる。リーフの南端や西端で堆積が進み陸地化しているのは、リーフ上での碎波や底面摩擦に波高減衰によって、漂砂量も西向きに徐々に減じることによると考えられる。また、図 24 の 24,000 時間以降では、リーフ南側の東西端部付近で濃く赤い堆積による砂面高が大きく上昇している領域が見られる。これらの堆積は、リーフエッジの外に位置しており、すなわち、リーフ上を輸送された砂礫の一部はリーフエッジを越えて、再度水深の深い領域に落ち込んでしまうことを表している。

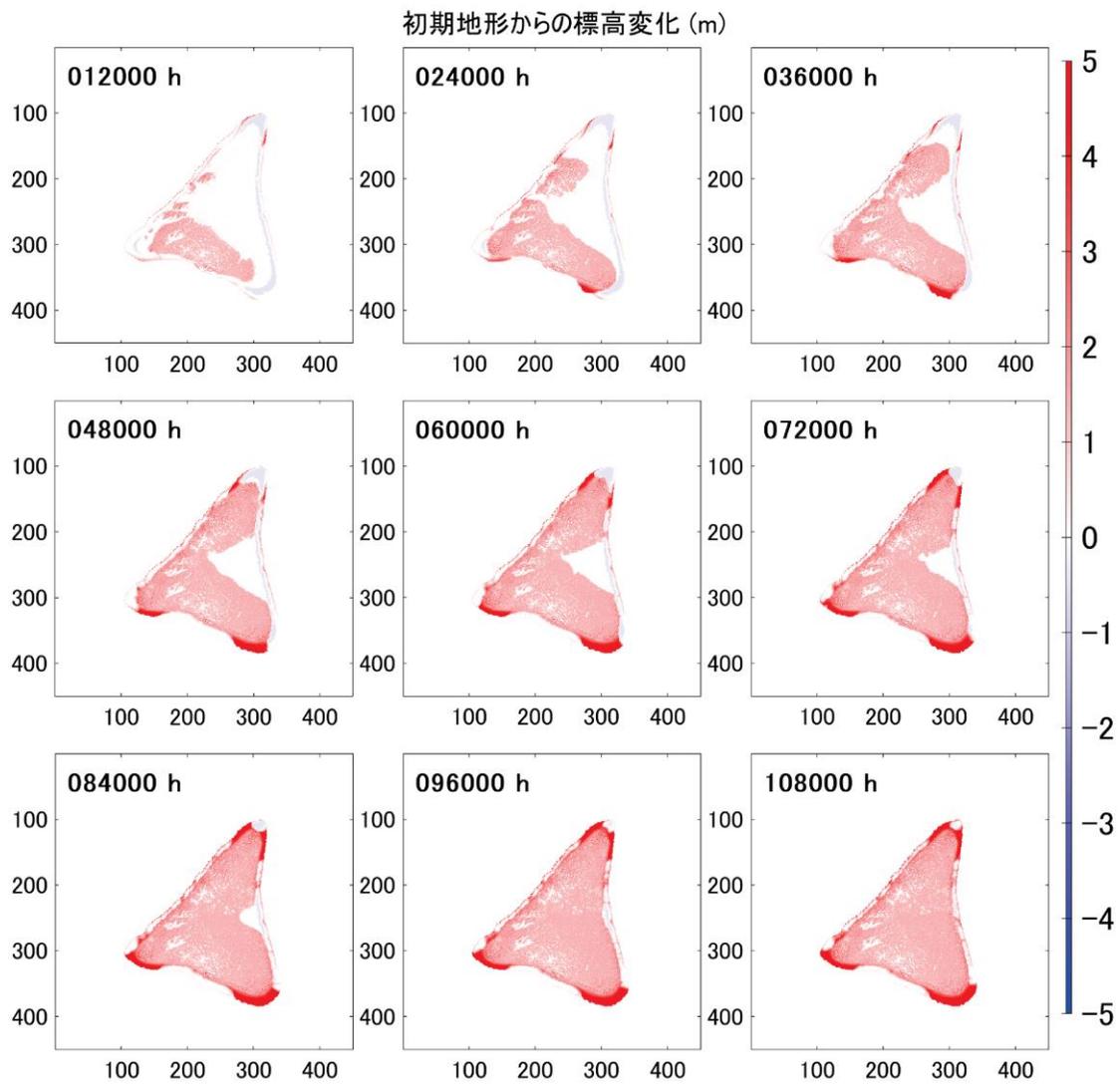


図 24 水深変化図(平常時、礫粒径 1cm、成長速度 2.4m/年)

初期地形からの標高変化 (m)

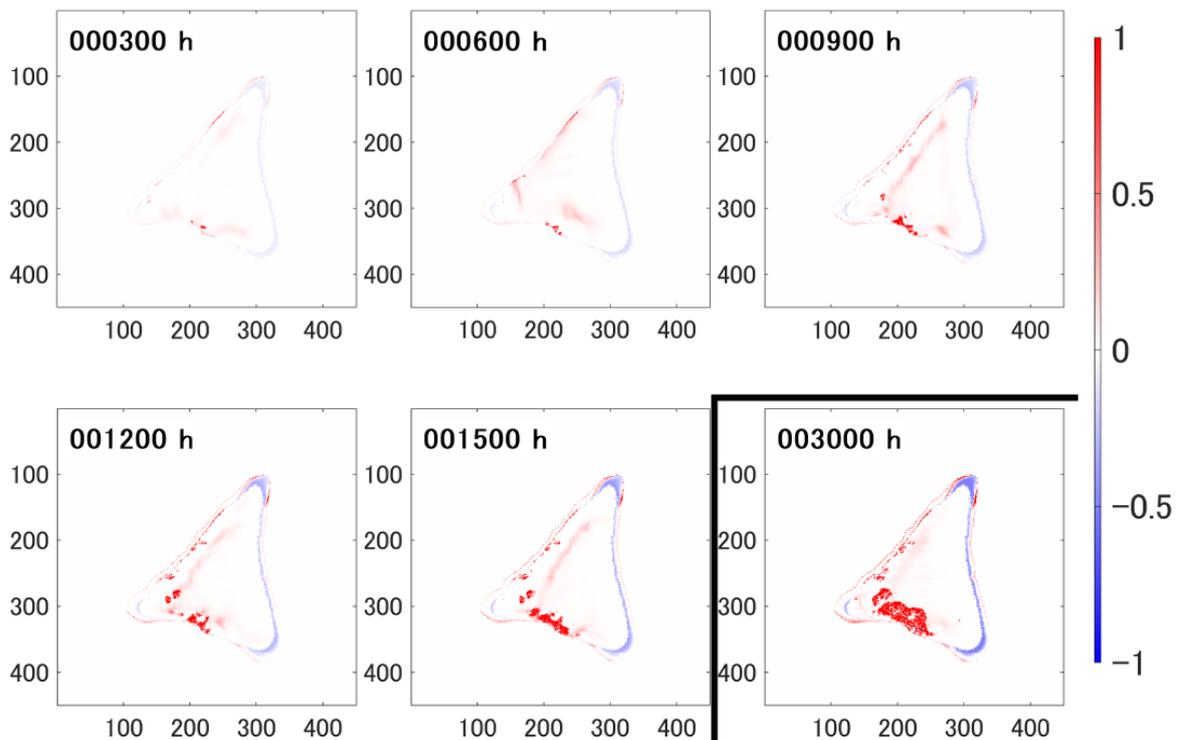


図 25 3000 時間までの水深変化(平常時、礫粒径 1cm、成長速度 2.4m/年)

次に南側にある程度の核ができた 1500 時間後の地形条件に対する、漂砂量フラックスのベクトルを図 26 に示す。図 26 では、波向 16 方位、波高 3 段階に区分した入射波条件のうち、波高 2m 以上 5m 以下で、波向きが北、北東、東に分類されたものの代表波における波・流れ場の計算結果を入力した際の漂砂量フラックスを表している。また、各地点における漂砂量は、その地点における砂礫層厚が 10cm よりも小さいときには砂礫層厚に比例して漂砂量を減じる処理をしており、砂礫層厚がゼロとなっている領域では、漂砂量もゼロになっており、ベクトルが表示されていない。図に見られるように、漂砂量フラックスのベクトルはリーフフラット上の西側および南側に集中しており、リーフエッジ外から流入した砂礫が、リーフフラットの南側および西側に集中的に堆積している様子がわかる。北からの入射波については、リーフエッジでの屈折効果により、漂砂量フラックスの方向が南東方向になっている。一方、北東から入射した波浪に対しては、西側および東側のエッジからそれぞれ波浪が屈折してリーフ内に伝播し、これらが重合することで、リーフフラットの西側付近における漂砂量フラックスの方向が南西方向になっている。一方、東側から来襲した波浪については、南側リーフエッジから屈折してリーフ内に伝搬する波浪もあることから、南側エッジ近傍では北西方向の漂砂量フラックスが計算されている。このように、様々な方向からの波浪の来襲と、リーフエッジによる屈折効果により、リーフフラットに流入する砂礫が計算され、本計算では標高-1m で陸上部が存在しないリーフフラットの状態から、徐々に堆積が進行し、陸地化する状況が再現された。一方で、リーフフラット上を通過して、リーフエッジ外に流出する砂礫も再現されており、リーフエッジ外からの砂礫の供給と流出のバランスが島の形成にとって重要であることが示唆された。ただし、本数値モデルにおいては、碎波した波の

下で卓越する戻り流れによる沖向きの漂砂量などが十分に考慮されていないことや、それに関連して、堆積して陸地化した領域から再び砂礫が輸送され流出する機構が十分に再現できていないことから、砂礫の供給と流出の収支に対する定量的な検討にはまだ課題が残されている。

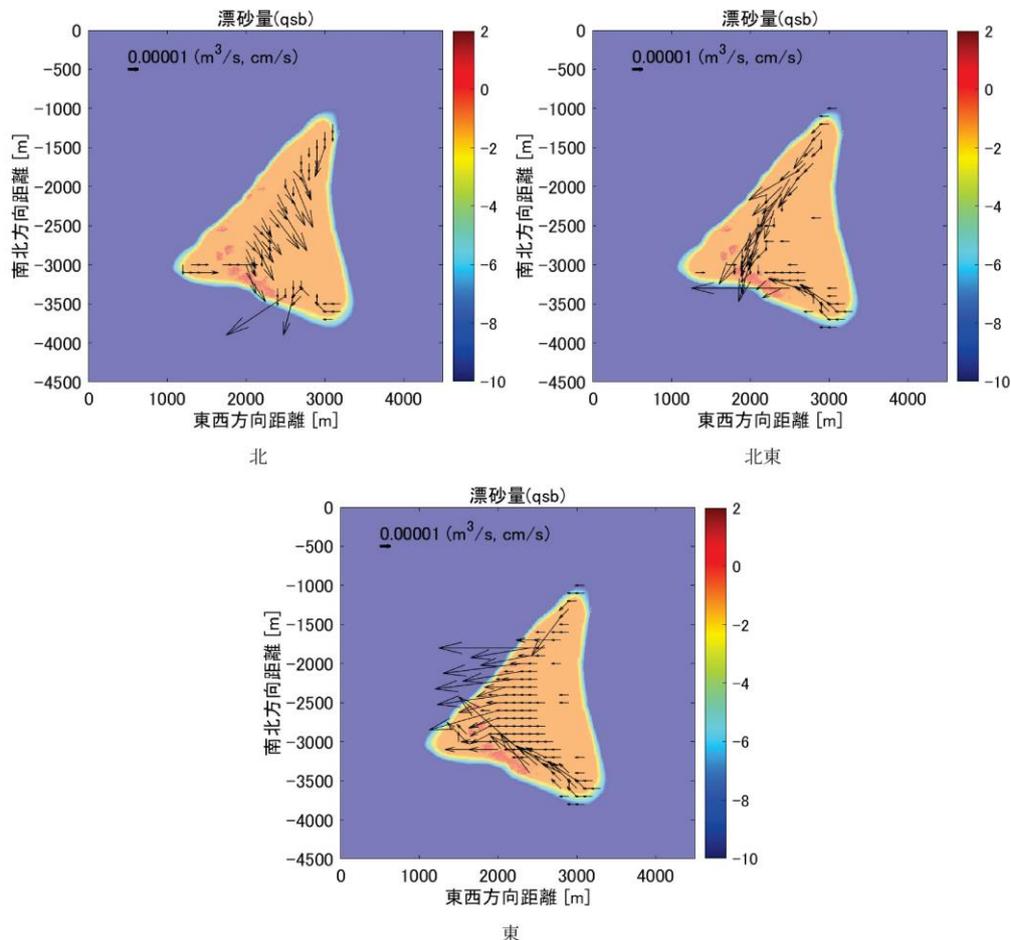


図 26 1500 時間経過後の地形に対する漂砂量計算結果の例（波向 N, NE, E 波高段階 2m 以上 5m 以下、砂礫層厚による漂砂量低減効果あり）

次に、砂礫の異なる粒径によるリーフフラット上での移動特性を検討するため、礫の粒径を一様に 10cm とした場合の、地形変化の計算結果を図 27 に示す。また同じ条件で、東北島から波を入射させた場合におけるリーフ上での底面せん断応力の平面分布を図 28 に示す。図 28 では、波高 3 段階の区分の上位 2 段階の波高に加え、後述する台風来襲時の高波浪に対する計算結果も示している。また、粒径 10cm の礫に対して底面せん断応力が移動限界条件に達しなかった領域については灰色で示している。すなわち、灰色で示した領域では漂砂量もゼロとなる。図 27 に見られるように、堆積を表す赤い領域はリーフフラット上のリーフエッジ近傍にとどまっておらず、リーフ中央付近では堆積が見られなかった。図 28 から、リーフ中央部では台風来襲時の高波浪も含めて灰色の領域が広がっており、粒径 10cm のサンゴ礫を輸送するには十分な底面せん断応力がなかったことを示している。一方で、リーフエッジ近

傍では十分に大きな底面せん断応力が計算されており、リーフ上やリーフエッジ近傍では10cmのサンゴ礫を輸送して砂礫浜を形成するだけの掃流力が十分にあることも分かった。

初期地形からの標高変化 (m)

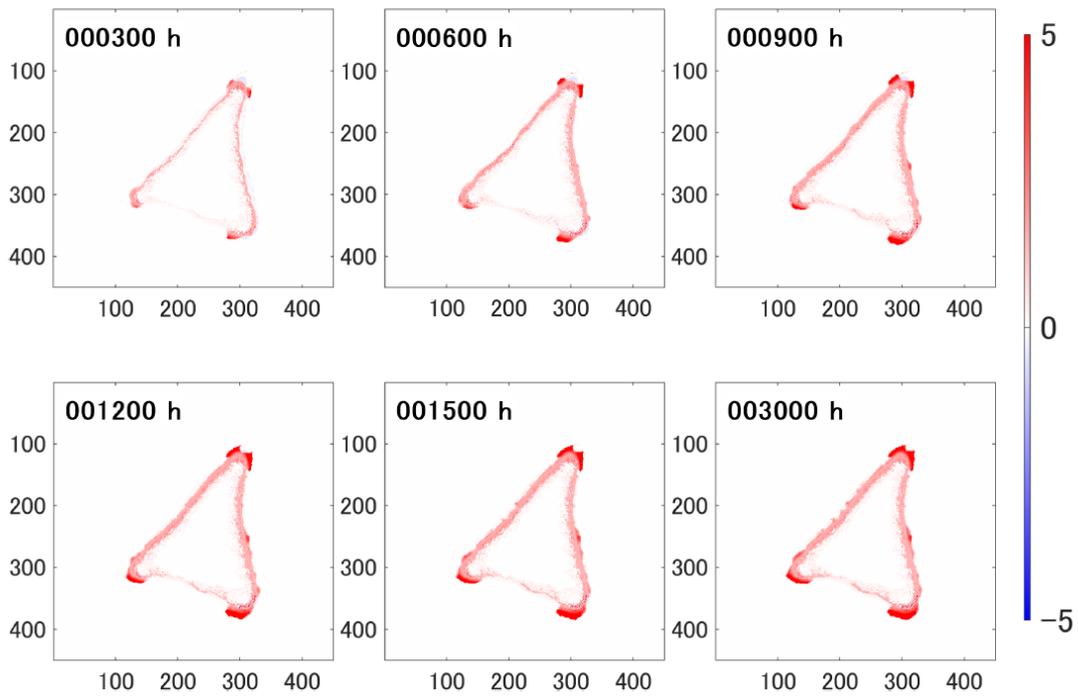


図 27 水深変化図(平常時、礫粒径 10cm、成長速度 2.4m/年)

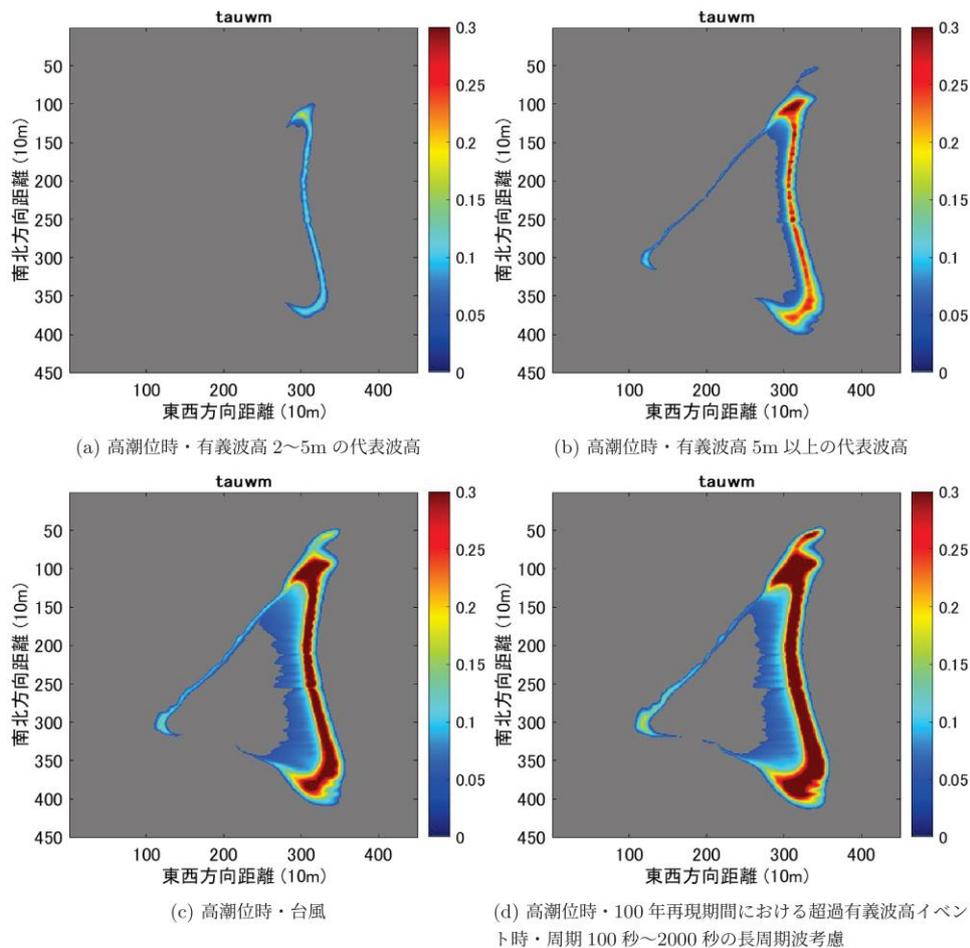


図 28 粒径 10cm の礫の東北東からの波に対する底面剪断応力の分布 (限界せん断応力未満の領域は灰色で表示)

最後に、サンゴの成長速度の違いによる砂礫供給量の違いがリーフ上での砂礫の堆積に及ぼす影響を検討するため、図 15 に示したリーフエッジ外縁部のサンゴ砂礫供給領域における砂礫の供給速度を 10cm/年とした場合の地形変化の計算結果を図 29 に示す。ここでも、サンゴ供給域の初期砂礫層厚は 50cm として十分な砂礫を与え、その後の計算において砂礫層厚が初期値を下回った領域で、10cm/年の割合で砂礫を供給する条件とした。図に見られるように、10cm/年の成長速度に対応した砂礫供給においてもリーフの南側で陸域が形成される様子が確認できたものの、576,000 時間(約 65.8 年)後における陸域の面積は、図 24 の 12000 時間(約 1.37 年)における堆積域よりも小さくなった。両者の供給速度の割合は 24:1 なのに対して、計算時間の割合は 1:48 となっており、供給速度とリーフ上の堆積速度には比例関係が成り立っていないことが分かった。これは、リーフ上を輸送されて再度リーフから流出する砂礫の量の供給量に対する割合が、供給量が減じることで相対的に大きくなることが原因として考えられる。また陸域の標高が十分に高く発達していない場合には、後述する高波浪の来襲イベントによっては、フラッシュして流失してしまうことも考えられ、ここからも、リーフ上での安定した洲島形成には、砂礫の供給と、リーフ上で留まる砂礫量とのバランスが極めて重要になることが示唆される。

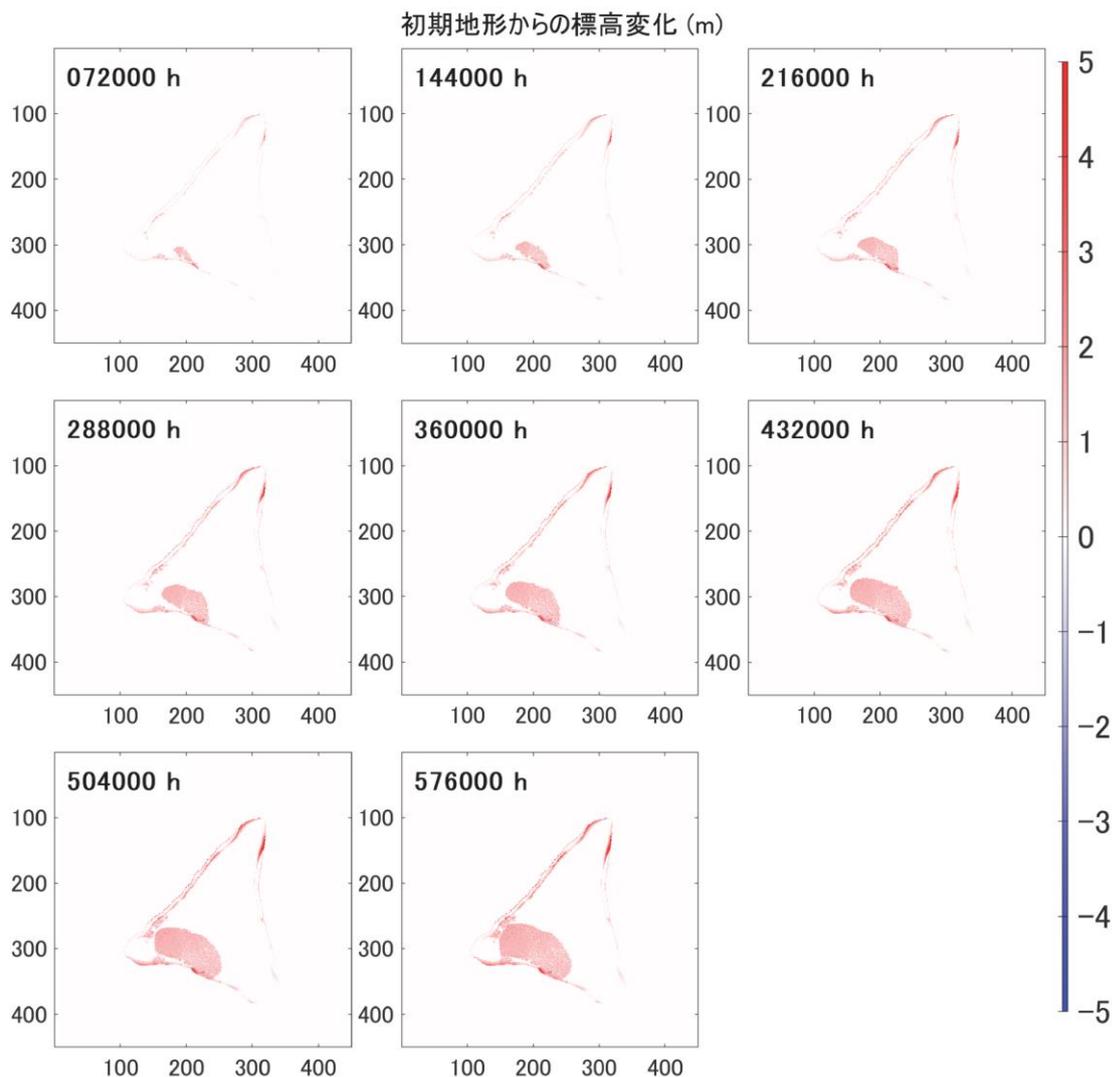


図 29 水深変化図(平常時、礫粒径 1cm、成長速度 10cm/年)

(4.2) 高波浪時の計算結果

2006 年台風時の波浪場、流速場計算の結果を図 30 に示す。ここでは、南鳥島の現在の陸上部の地形を与えた条件で波と流れの計算を実施している。初期条件として与えた台風による波はおおよそ西北西から入射している。外洋での有義波高は 12.8m であったが、リーフエッジで碎波により急激に減衰してリーフ内では 1~3m 程度となっている。南側の一部で波高が下がっている範囲があるが、これはリーフエッジの形状が局所的に冲向きに凹んでいることにより屈折の影響を受けていることが主因と考えられる。水位変動は碎波に伴う Setdown と Setup が再現されており、Setdown がリーフエッジ外縁部で 30~50cm 程度、Setup がリーフ内で最大 2.8m 程度となった。また、波向ベクトルのプロットから、屈折によって波が、入射方向とは反対側のリーフの東側からも回り込んで伝搬してきている様子がわかる。海浜流のプロットでは、5m/s に至る強い沿岸流がリーフエッジ近辺で発生し、西側海岸では島の北側に向かって流れ、西側の端点周辺では南側海岸の方向へ回り込む状況が確認できる。

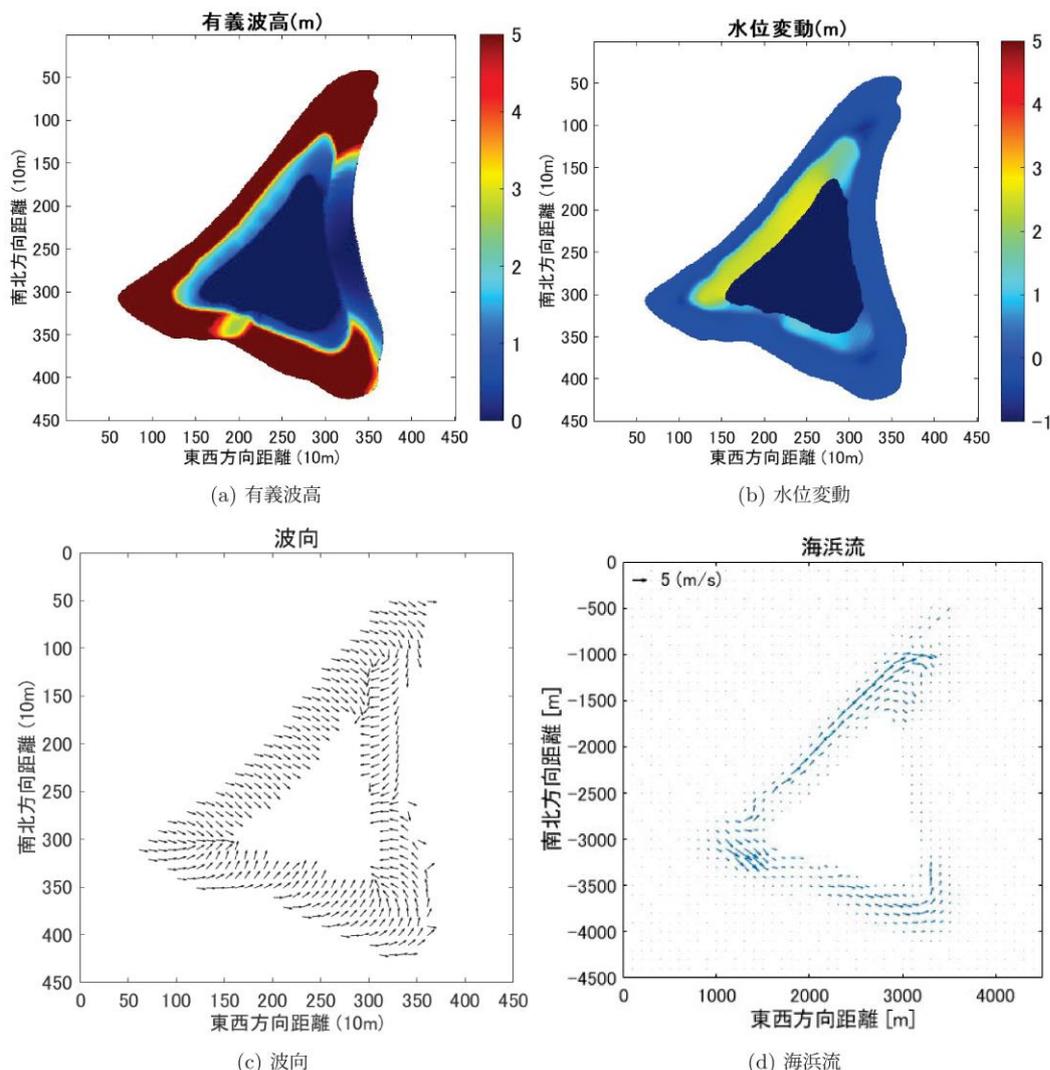


図 30 2016 年台風来襲に伴う有義波高ピーク時の波・流れ場の計算結果

このような波・流れに対して漂砂量を求め、3 時間の地形変化計算を行った。漂砂量の計算方法は前述の平常時のそれと同じであるが、ここでは、海岸線から陸上側への波のうちあげを考慮し、うちあげ上端部までの漂砂量および地形変化の計算を行った。うちあげ高の算定には、図 30 に示した波と流れの計算結果に基づいて海岸線近傍での波浪諸元を抽出し、その諸元を入力値として Srtockdon ら(2006)の経験式を用いてうちあげ高を算定した。さらに、海岸線からうちあげ高上端部までの漂砂量については、うちあげ高上端部との高低差の 2 乗に漂砂量が比例するとしてモデル化している Larson et al.(2004)の研究成果に倣い、海岸線近傍部での漂砂量を、うちあげ高まで高低差の 2 乗に比例させる形で外挿して与えた。このようにして得られた地形変化の計算結果の平面図を図 31 に、また同じ地形変化計算の断面図を図 32 に示す。図 32 の断面の測線は、図 32 に示した通り、西側海岸の中央部で海岸線法線方向となる北西から南東方向への直線とした。図からは海浜流や波の影響により漂砂が島の西側のサンゴ供給域から北側および南側に回り込むように輸送されている様子がわかる。また、西海岸で岸向きに多くの礫が輸送されている。図 32 の断面地形変化の比較図ではリーフエッジ、リーフフラットの外側からサンゴ礫が輸送されて岸に近いリーフフラットに堆積す

るとともに、波のうちあげによる標高 5m 以上の浜にも礫が堆積する様子が再現できた。

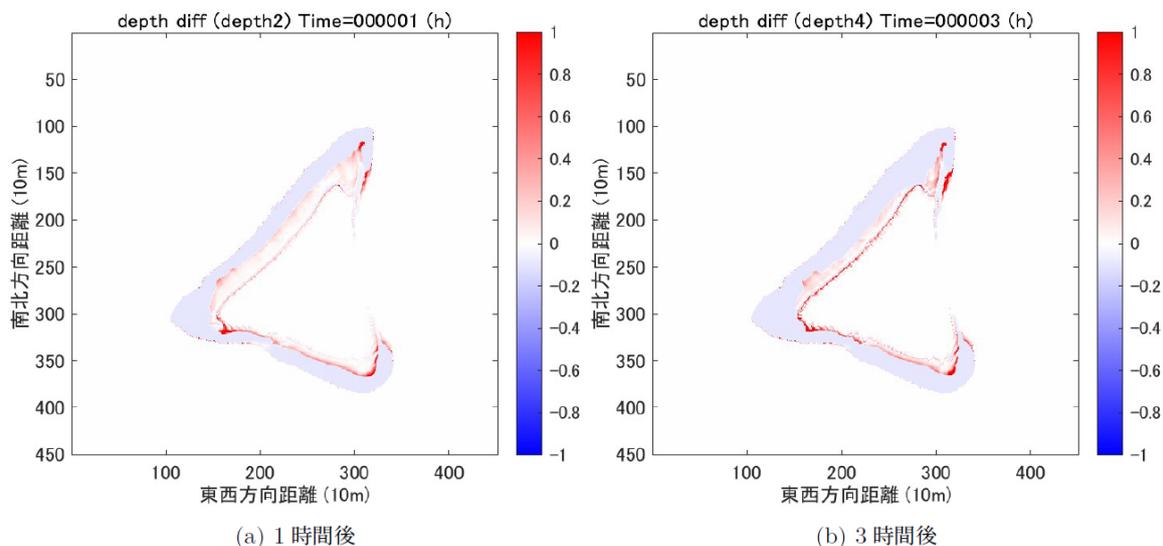


図 31 台風時ピーク波浪条件に対する地形変化の平面図（粒径 1cm）

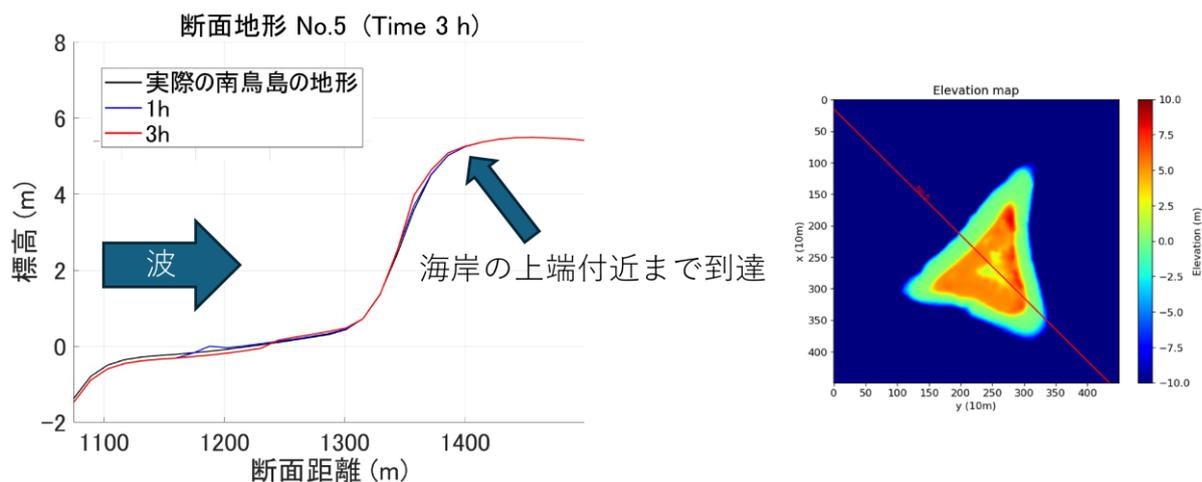


図 32 台風時ピーク波浪条件に対する地形変化の断面図（粒径 1cm）

(5) 年代測定

サンゴ礫は異地性であるため、その年代が必ずしも堆積（陸上に打ち上げられた）年代を示すとは言えない。サンゴ骨格が壊されてサンゴ礫となった後、リーフ上に長年留まった後に、堆積したかもしれないからである。そこでサンゴ骨格が壊された後、速やかに堆積したと考えられる、細い枝やサンゴ骨格の構造がよく残された試料の年代を測定することによって、堆積年代を推定する。南鳥島では、細い枝のサンゴ礫は確認することができなかった。

そこで、骨格表面のサンゴの構造がよく残されて、摩耗による劣化の少ないサンゴ礫を選んで採取し、年代測定試料とした。

放射性炭素年代測定を行ったサンゴ礫試料を、図 33 と表 3 に示す。MT-E-65 は地点 3（東海岸）の標高 5.8m から採取した、コカメノコキクメイシ（*Goniastrea*）の長径 15cm のサンゴ礫である。骨格の夾の構造が残っており、礫になったのち比較的短時間で堆積したと考えた。MT-N-1-5 と MT-NE-1-50 は、それぞれ地点 5（北海岸）と地点 4（北東海岸）の、標高 +4.0m と +2.5m から採取した、ハナヤサイサンゴ（*Pocillopora*）の枝で、表面の形状がよく残っていることから、礫になったのち比較的短時間で堆積したと考えた。



図 33 測定したサンゴ礫試料（矢印）

表 3 年代測定試料

資料名	採取地点	標高	サンゴ属
MT-E-65	地点 3 東海岸 no.65	+5.8m	<i>Goniastrea</i>
MT-N-1-5	地点 5 北海岸 no.5	+4.0m	<i>Pocillopora</i>
MT-NE-1-50	地点 4 北東海岸 no.50	+2.5m	<i>Pocillopora</i>

年代測定結果を表 4 に示した。OxCAL4.2 (Bronk Ramsey, 2009) を使用し、校正データには Marine20 (Heaton et al. 2020) を用いて暦年に校正し、南鳥島海域の海洋リザーバ補正を施して得た補正暦年代を、表 5 (cal BP 標記:1950 年から〇〇年前) と表 6 (BC/AD 標記)

に、その確率密度分布を図 34 に示す。MT-E-65 は 1829-1615 年前、MT-N-1-5 は 1600-1396 年前、MT-NE-1-50 は 628-484 年前（いずれも 1 σ ）という結果が得られた。サンゴ礫が打ち上げられるまでの時間差を考えると、礫が打ち上げられ堆積した年代は、測定年代以降ということになる。

表 4 放射性炭素年代測定の結果

資料名	測定 ID	^{14}C 年代	補正用 $\delta^{13}\text{C}$
MT-E-65	TKA-30657	2100 \pm 20 BP	-0.7 \pm 0.3 ‰
MT-N-1-5	TKA-30658	1910 \pm 20 BP	-3.4 \pm 0.2 ‰
MT-NE-1-50	TKA-30659	932 \pm 20 BP	-0.6 \pm 0.3 ‰

^{14}C 年代の誤差は 1 標準偏差を示す。

表 5 推定される較正年代と注記（cal BP 表記）

資料名	較正年代(1SD)	較正年代(2SD)	較正データ	注記
MT-E-65	1829 cal. BP (68.3%) 1615 cal. BP	1935 cal. BP (95.4%) 1520 cal. BP	Marine20	ΔR -191 \pm 64
MT-N-1-5	1600 cal. BP (68.3%) 1396 cal. BP	1699 cal. BP (95.4%) 1314 cal. BP	Marine20	ΔR -191 \pm 64
MT-NE-1-50	628 cal. BP (68.3%) 484 cal. BP	696 cal. BP (95.4%) 387 cal. BP	Marine20	ΔR -191 \pm 64

表 6 推定される較正年代と注記（BC/AD 表記）

資料名	較正年代(1SD)	較正年代(2SD)	較正データ	注記
MT-E-65	122 cal. AD (68.3%) 336 cal. AD	15 cal. AD (95.4%) 430 cal. AD	Marine20	ΔR -191 \pm 64
MT-N-1-5	350 cal. AD (68.3%) 554 cal. AD	251 cal. AD (95.4%) 636 cal. AD	Marine20	ΔR -191 \pm 64

MT-NE-1-50	1322 cal. AD (68.3%) 1466 cal. AD	1254 cal. AD(95.4%) 1564 cal. AD	Marine20	ΔR -191 ± 64
------------	--------------------------------------	-------------------------------------	----------	-------------------------

較正年代の算出には、OxCAL4.2 (Bronk Ramsey, 2009) を使用し、較正データには Marine20 (Heaton et al. 2020) を用いた。これに海洋リザーバ年代の地域補正值 (ΔR 値) として、

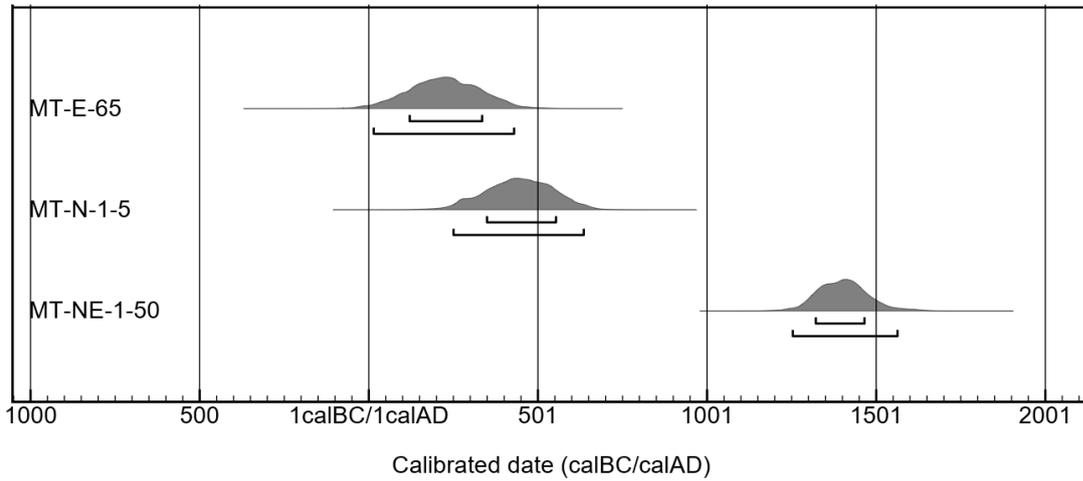


図 34 較正放射性炭素年代の確率密度分布

3. 3. 2 沖ノ鳥島

(1) 渡島

本委託調査では、茅根・田島が乗船して、沖ノ鳥島渡島を目指したが、台風1号による海況悪化のため、下記スケジュールの通り、島への上陸はできなかった。

令和8年

1月15日(木) 9時45分 横須賀新港出港

1月15日(木) 15時 フィリピンのミンダナオ島東で台風1号(ノケーン)発生(図35)。

通常であれば台風は北上するので、渡島時の影響は限定的と判断した。

1月19日(月) 16時 沖ノ鳥島着

海上は波高1.5m以下、20日は渡島調査が可能との判断、沖ノ鳥島南に停泊(図36)

1月19日(月) 21時 海況悪化。波高2.5mに。北に緊急退避。

1月20日(火) 6時 沖ノ鳥島北方70 mile。

北の強い寒気のため、台風が北上できず、進路予想が東方(沖ノ鳥島方向)に。

1月20日(火) 9時30分。海況回復の見込みがないこと、うねりが残ること、日本近海も寒気の吹き出しで荒れる予報だったことから、渡島を断念して帰港することに決定。

1月21日(水) 9時 フィリピン東で熱帯低気圧に。

1月22日(木) 寒気の吹き出しで日本近海が高波浪のため、宮崎沖に迂回。

以後、日本南岸沿いに北上。

1月27日(火) 15時10分 横須賀沖に錨泊

1月29日(木) 8時30分 横須賀新港着岸、9時下船

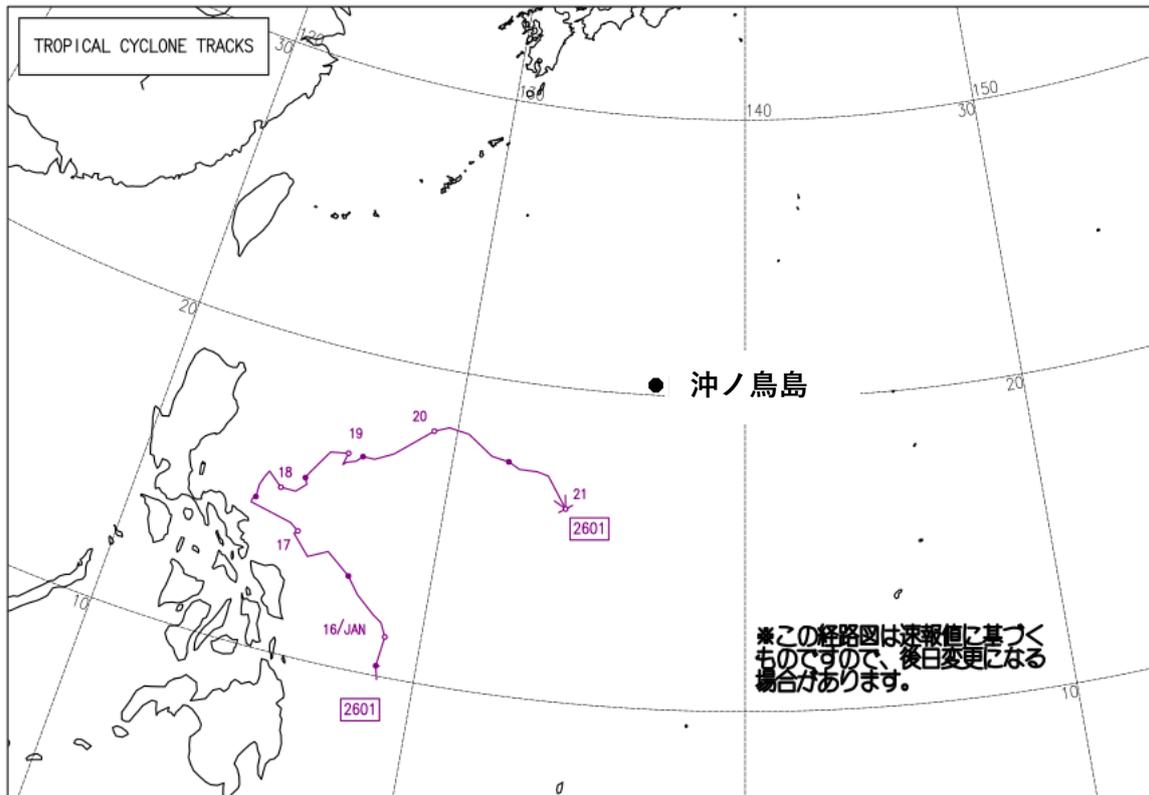


図 35 台風 1 号経路 (気象庁ホームページより
https://www.data.jma.go.jp/typhoon/route_map/bstv2026.html)



図 36 新竜丸船上から見た北小島。2026 年 1 月 19 日 (月) 16 時。

(2) 衛星通信動画送信試験

衛星回線を用いて遠隔地から画像を内地に送るシステムを構築するにあたり、その実証と問題点の抽出を行うことを目的として、衛星回線（スターリンク）を用いて洋上の画像を東京大学構内に転送することが可能かどうかの実証試験を実施した。ソーラーパネルにより電力を供給し、転送された画質から通信の品質を定性的に評価し、一定時間内におけるシステムの運転に問題がないかどうかを検証した。また、一定時間内のシステム全体の消費電力を計測した。試験の概要を以下に示す。

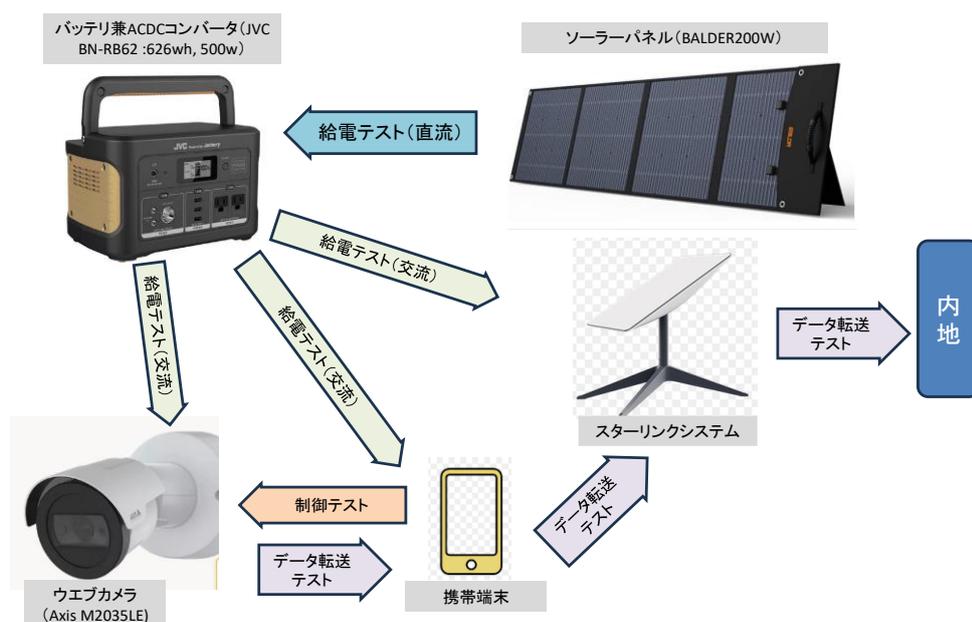


図 37 画像送信試験の概要

単結晶ソーラーパネル（BALDER200）をバッテリー兼 AC コンバータ（JVC BL-RB62）に接続し、充電しながら給電する電力システムとした。当日の天候は曇り、雲量 90%以上で、ソーラーパネルの発電量は瞬間値で 40W を超える程度であった。試験中に電源の質による通信障害は発生していない。バッテリーの入力値（充電側）が出力値（消費側）を下回ることなく、通信中であっても充電し続けることを確認した。また、約 2 時間の試験期間で消費した電力量は 0.06 kWh であった。



図 38 ソーラーパネル（左）とバッテリー兼AC/DCコンバータ（右）



図 39 試験風景

使用した衛星通信（スターリンク）は、瞬間値で上り 40Mbps、下り 270Mbps を示していた。動画や通話のやり取りに遅延はなく、リアルタイムの画像接続中であって接続の乱れを確認することはなかった。

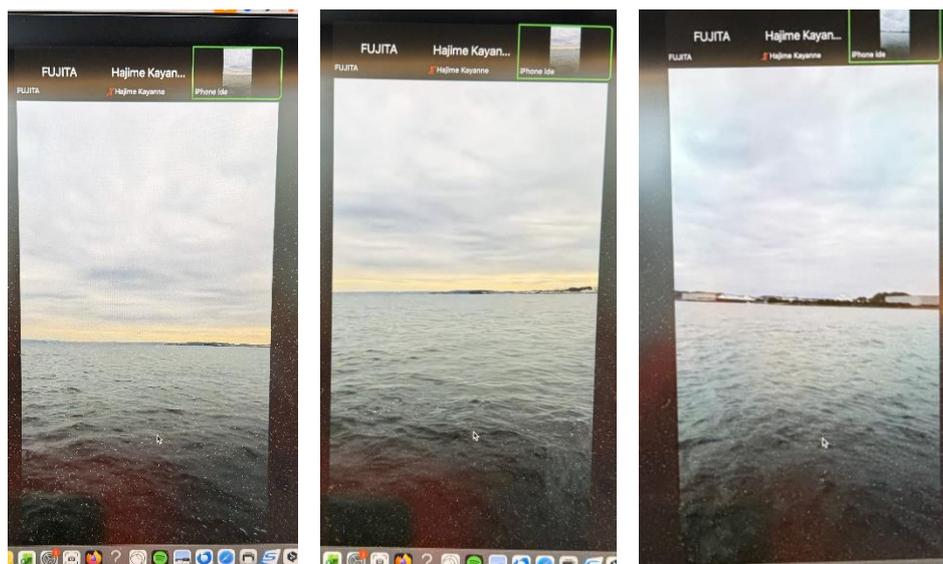


図 40 リアルタイム画像のキャプチャ（受信側：東京大学）画像

今回の試験で使用した電力供給システムの電源の質に問題はなく、今回程度の曇天であっても発電量に問題はなかった。電力は途切れることなく供給され、2時間で0.06kwhの消費電力量であった。また、通信速度に不足はなく、遅延や接続の乱れが確認されることはなかった。

今後は、長時間の通信試験を行い、電力供給の問題点の有無を確認する必要がある。また、遠隔操作で通信が可能なシステムを構築し、実証試験を行う必要がある。

3. 4 考察と研究調査の成果、今後の課題・展望等

3. 4. 1 海岸地形と堆積物

本研究では、南鳥島を主対象に空中写真による汀線変化分析、現地調査による海浜断面地形や堆積砂礫の粒径分布の分析を行った。さらに得られた情報も活用し、南鳥島周辺部における波浪場、海浜流場、漂砂量、さらに、地形変化を再現する数値モデルを構築し、リーフ上におけるサンゴ礁洲島の形成過程を分析するための数値計算を試みた。

平常時の波をモデル上で数年間、実際の時間スケールで数千年間与え続けた長期計算によって、リーフフラット上にサンゴ砂礫が打ちあがり堆積し、洲島を形成する様子を再現することができた。南鳥島における来襲波浪やリーフ形状の条件下では、まず島の核となる堆積域がリーフの南側中央付近に形成され、それによって南側からの波が遮蔽された。その後リーフフラットの西寄りに島が南北に形成され、最後に東側が埋まった。

粒径が 1cm 程度の礫は比較的頻度の高い高波浪条件に対しても十分に島を形成するだけの流入があり、かつ、一部はリーフ上にとどまり堆積域を形成した。一方で、粒径が 10cm の比較的大きな礫では、リーフ内部で波・流れによる掃流力が移動限界を下回り、島の外周部のみに堆積する結果となった。実際の砂礫浜の構成材料には、粒径が数 mm から数 10cm 程度までの砂礫が混在しており、粒径が大きく移動限界掃流力も大きい砂礫の堆積が、粒径の小さい砂礫をトラップし堆積を助長する効果があることも推察される。

また、2006 年の台風時の再現計算では、波のうちあげによって台風時の波浪状況を再現できた。本報告書には掲載していないものの、同等の波浪を北東側から入射させることで、東側海岸の標高 8m を超えるバーム頂部までうちあげが及ぶことも確認された。以上より、本研究ではすべての過程の再現には至らなかったものの、平常時の波浪によりサンゴ砂礫がリーフ内に輸送され、堆積して陸域を形成し、波のうちあげによって陸域外縁部でバームが形成されこと、さらに高波浪イベントでは標高 8m 程度まで波がうちあがり、より高いバームを形成しうることなどが明らかとなった。

本研究で用いたモデルでは、碎波に伴う戻り流れによる沖向きの漂砂移動が十分に組み込まれていないため、リーフ上の洲島の海岸線が削られ、浜の砂礫が沖合に流出する機構が十分に再現できず、砂礫の流出量を過少に見積もっていることが想定される。さらに、南鳥島現地で見られた海岸線周辺のビーチロックは、砂礫浜の安定に大きく寄与していることが推察されるが、その効果の検証が十分ではない。また、様々な粒径の砂礫が混在することによる、堆積促進効果についてもまだ検討が十分にできておらず、今後の課題となる。洲島形成混合海面上昇に追隨した洲島の発達・維持・保全の実現に向けては、このような様々な粒径が混在する砂礫浜の形成に加えて、ビーチロックの形成促進も有効な対策として考えられることから、以上の課題を念頭にさらなる研究を進める必要がある。

3. 4. 2 島の地史

現地調査および数値実験の結果から、現在観測されている波浪条件のもとでも、サンゴ礫がリーフ上に打ち上げられ、島が形成され得ることが明らかになった。一方で、島の異なる標高から採取されたサンゴ礫の年代測定結果を比較すると、標高の高い位置に分布する礫ほど、より古い時期に打ち上げられた可能性が高いことが示唆される。最も高い標高である +5.8 m から採取した試料 MT-E-1-65 は、1800~1600 年前に打ち上げられたと推定される。

南鳥島の海岸には、標高 1 m に達する離水ビーチロックが広く発達しており、その形成年代は 3210~2430 年前と報告されている (Konishi et al., 1985; ビーチロックで固結した 13 点のサンゴ試料の年代であり、1 点は 1440 年前である)。また、サンゴ礁礁嶺から採取されたサンゴの年代は、2130 年前および 2880 年前とされている。これらの放射性炭素年代は暦年補正が行われていないため、概算で補正を行うと、ビーチロックの形成年代はおよそ 2800~2000 年前、サンゴ礁礁嶺の形成年代はおよそ 2500~1700 年前に相当すると考えられる。

太平洋の広域では、氷河・海水アイソスタシーの影響により、4000~2000 年前に現在より 1~2 m 高い海面が存在したことが知られている。この高海面期に対応して、南鳥島ではビーチロックおよびサンゴ礁礁嶺が、遅くとも 2000 年前までに形成されたと考えられる。

これらの知見を踏まえると、2000 年前以前、海面が現在より約 1 m 高く、ビーチロックが未発達で、サンゴ礁礁嶺もなお海面下にあった条件のもとで、サンゴ礫が卓礁上に打ち上げられ、島の本体が形成された可能性が考えられる。その後、海岸部にビーチロックが形成され、さらに海面が低下する過程において、数値計算で示されるように、島の本体周辺に新たなサンゴ礫が打ち上げられ、島が外側へと拡大していったと推定される。

現在の島では、標高 5 m 以上の高所に植生が成立し、土壌の発達が認められることから、島の本体が形成された後、地形が長期間にわたり安定してきたことが示唆される。これらの観察結果から、島の中央部から外縁部に向かって、堆積年代が次第に新しくなっている可能性が高いと推定される。

3. 4. 3 残された課題と今後の展望

今回の調査と数値実験で、南鳥島で標高 9 m の島が形成・維持される基本的なメカニズムと地史が明らかになった。しかしながら、島の形成・維持機構の理解のためには、以下の点が課題として残っている。

(1) 海岸工学・数値実験の課題

本数値実験では、南鳥島において、島を除いたリーフラットのみの地形条件で、サンゴ砂礫がリーフ上に供給、輸送、堆積し、陸地化する様子を再現することができた。しかしながら、戻り流れによる冲向き流れに伴う特に高波浪時のサンゴ砂礫の流出機構や、洲島形成段階における高波浪イベントによる洲島の崩壊・流失などの機構が十分に含まれていない。沖ノ鳥島のように洲島が十分に発達していないリーフや、洲島の縮小や消失が見られるリーフなど、様々な条件のリーフにおいて、実際の状態を矛盾なく再現できる汎用性の高いモデ

ルへの改良が望まれる。

また、南鳥島では粒径の異なるサンゴ砂礫が混在する一方で、海岸の法線方向や海浜断面の標高の違いによって粒径分布が異なる特性が見られた。このような分級効果や、混合粒径による洲島形成への影響についても、さらなる検討が必要になる。

最後に、サンゴ砂礫を有効活用した洲島の形成・保全を促進する手段として、漂砂制御構造物や砂礫捕捉工、さらにはビーチロックなどが考えられるが、これらの方策の効果を予測・評価し、最適な対策を検討する技術の構築が必要であり、現地も含めた実証的実験等により知見を蓄積するとともに、それに合わせた数値予測モデルの改良も望まれる。

(2) 地学・島の地史の課題

本調査で島の地史を明らかにするために採取、年代測定したサンゴ礫は3点だけである。より多くの試料を採取して、その年代を特定する必要がある。とくに島の内部のサンゴ礫を採取してその年代を測定し、海岸部と同様、数千年前以降の新しいものであることを、確認する必要がある。島の内部の礫の年代が、数千年前以前であれば、島の形成を12万年前の最終間氷期、あるいはそれ以前の高海面期（間氷期）に遡って考えなければならない。

また、数値実験の初期条件となる、島が形成される以前の基盤となるサンゴ礁の地形の形状を明らかにする必要がある。数値実験では-1mの平坦なリーフの存在を仮定したが、沖ノ鳥島のように浅い礁湖がなかったか、逆に古い石灰岩の島が核になかったかを、明らかにしなければならない。そのためには島の内部の露頭（掘削断面）調査、掘削調査、電気探査等を行う必要がある。

(3) 卓礁上に島が形成される条件

本研究では、(1)および(2)で得られた知見を基盤として、数時間から数年スケールの波浪・漂砂過程を対象とする数値実験と、数百年から数千年スケールの地史的条件とを統合的に扱う枠組みを構築した。次のフェイズでは、この枠組みを用いて、島の初期形成段階から発達・安定化に至る過程を連続的に再現し、卓礁上に島が形成・維持されるための必要条件と十分条件を整理することが求められる。

同程度の規模をもつサンゴ礁でありながら、南鳥島では標高9mに達するサンゴ礁洲島が形成・維持されている一方で、沖ノ鳥島では大きな洲島が形成されていない点に着目し、波浪条件、サンゴ礁外縁の形状、礫供給量、礫径分布、および高波浪イベントの頻度と強度といった要因の組み合わせが、島形成にどのように作用するのかを定量的に明らかにする。

これらの成果を総合することにより、南鳥島・沖ノ鳥島という個別事例にとどまらず、サンゴ礁洲島およびサンゴ礁海岸一般に適用可能な「洲島形成・維持モデル」を構築し、気候変動下における将来変化の予測や保全方策の検討に資する基盤を整えることが、次フェイズ

の主要な到達目標となる。

(4) 島の維持のための生態工学 (Nature-based Solution)

(3) で明らかにされる島形成・維持の条件に基づいて、サンゴ礁洲島を自然の営力によって維持・強化するための生態工学的手法 (Nature-based Solution) を具体化し、沖ノ鳥島への適用可能性を検討する段階へと進むことができる。これは、人工的な嵩上げや埋め立てによらず、サンゴの成長と礫供給、波浪による運搬・集積という自然過程を制御・誘導することで、島の持続的な維持を図るものである。

ただし、沖ノ鳥島および南鳥島は渡島条件が厳しく、試行錯誤を伴う実証試験を直接行うことは現実的ではない。そのため、次フェイズでは、沖縄地域など、類似したサンゴ礁・サンゴ礁洲島を有し、かつ調査・実験が可能なフィールドにおいて、礫供給条件の調整や地形応答の検証を段階的に実施し、生態工学的手法の有効性と限界を評価して、限られた渡島の機会に南鳥島・沖ノ鳥島の調査を実施し、試験を行うことが望ましい。

こうした段階的検証を経て得られた知見を、沖ノ鳥島に適用可能な設計思想として整理することにより、本研究は、国境離島の保全にとどまらず、太平洋小島嶼国を含む低平サンゴ礁島嶼の気候変動適応策へと展開していくことが期待される。

4. まとめ

本研究調査を通じて、南鳥島における標高9 mのサンゴ礁洲島が、サンゴ礫の供給と波浪による運搬および集積という自然の営力によって形成され、維持されてきたことが、地形調査および数値実験の両面から示された。また、沖ノ鳥島との比較により、島の形成および発達には、波浪条件、礫供給量、リーフ形状などの複合的な条件が関与している可能性が示された。

本年度は3年計画の最終年度にあたり、本事業により、卓礁上に島が形成され、維持される基本的なプロセスと、その成否を左右する要因について、一定の科学的整理がなされたと評価できる。一方で、島の初期形成から発達、安定化に至る長期過程や、高波浪イベントが島の成長や崩壊に与える影響については、今後さらに検討を深める必要があることも明らかとなった。

沖ノ鳥島は、我が国の排他的経済水域の基点となる国境離島であると同時に、海面上昇の影響をもっとも直接的に受ける低平なサンゴ礁島嶼である。その維持および保全にあたっては、人工的な嵩上げや埋め立てによる対策ではなく、自然の形成メカニズムを科学的に理解し、それを活かす地生態工学的な対応が不可欠である。本研究調査は、そのための基礎的知見を、東京都が主体となって体系的に蓄積した点に、都事業としての大きな意義がある。

また、本事業で得られた成果を、専門家間の知見にとどめるのではなく、都民に分かりやすく伝え、理解と関心を広げていくことも、次のフェイズにおける重要な課題である。衛星通信等を活用し、遠隔地にある沖ノ鳥島および南鳥島の現況や変化を継続的に発信する仕組

みを構築することにより、国境離島を「見える存在」として共有していくことが期待される。今回、沖ノ鳥島に渡島できなかつたため試験に留まったが、衛星通信を通じて両島の状況をリアルタイムで東京都のホームページにアップすることは、都民・国民の両島への理解を深める上できわめて有効である。

さらに、こうした情報発信を教育と結びつけ、海洋教育や探究学習の場で活用していくことも重要である。たとえば、都立学校等における海洋実習や船舶を用いた教育活動と連携し、国境離島を実感をもって学ぶ機会を提供することは、次世代の人材育成と都民理解の深化の両面に資する取組となる。

本研究で得られた知見を踏まえ、次のフェイズでは、卓礁上の島形成および維持条件をより体系的に整理するとともに、情報発信や教育との連携を含めた総合的な取組へと発展させていくことが期待される。東京都が主体となって次フェイズを構築することにより、沖ノ鳥島の持続的な維持のみならず、気候変動時代における自然共生型の島嶼保全とその社会的共有モデルを、国内外に示していくことが可能となる。



南鳥島の日本でいちばん早い日の出（令和7年6月13日 3:55）