

31. コーズウェイ開削による環礁州島の持続的な州島保全の可能性

佐藤 大作^{1*}・横木 裕宗¹・茅根 創²

¹茨城大学工学部都市システム工学科 (〒316-8511茨城県日立市中成沢町4-12-1)

²東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻 (〒113-0033 東京都文京区本郷7-3-1)

* E-mail: sato_d@mx.ibaraki.ac.jp

環礁州島の持続的な州島保全は重要な課題である。短期的な視点での構造物による防護だけでなく、長期的な視点においては州島の地形維持機能の保護が重要である。本研究では州島の持つ地形維持機能を有効利用した州島保全策としてツバル国フナフチ環礁のコースウェイを開削することによる漂砂活発化による堆積促進の可能性に着目した。開削条件の一つである掘削深さに関して、キリバス共和国タラワ環礁における現地調査およびフナフチ環礁におけるコースウェイ開削の数値計算結果から、開削部の水深は周辺のリーフフラットと同程度とすることが望ましく、多くの環礁州島で見られる小型船舶の通路としてパッセージを同時に建設することは、漂砂の活発化という視点からは望ましくないことが明らかとなった。

Key Words : atoll island conservation, causeway, sediment transport, numerical calculation

1. 序論

南太平洋を中心に環礁州島から成る国家が世界には多く存在している¹⁾。環礁州島とはリング状の極浅いサンゴ礁の基盤上に低平で幅の狭い州島が形成された地形を指す。州島の形状は様々であるが、その構成物は主にサンゴ片や有孔虫遺骸である²⁾。このため、環礁州島の維持形成はサンゴ礁上の生物的堆積物生産に大きく依存している。リーフ上で供給される堆積物は波や流れの作用によって運搬され、堆積することによって、現在の州島が成り立っている³⁾。

近年はマーシャル諸島共和国マジュロ環礁やツバル国フナフチ環礁のように首都機能のある環礁に人口が集中するとともに、都市化の進行が顕著である⁴⁾。また、地球温暖化に伴う海面上昇によって、浸水や海岸侵食の加速などの問題も懸念されている⁵⁾。このため、州島の持続的な保全策の検討と実施が急務であるが、州島の堆積物移動機構や地形変化のモニタリングなど基礎的な知見・情報が極端に乏しいのが現状である。

近年の環礁州島の地形保全では、モルディブ共和国マレ島のように周囲を完全に海岸構造物で防護する例もあるが、州島の規模や資源量を考えると全ての環礁州島に適用できるものではない。また、こうした構造物による

防護は、州島本来の州島維持過程で重要なサンゴや有孔虫の生息域に悪影響を及ぼす可能性もある。そのため、海岸構造物による防護のみに頼ることは、本来の自然的な州島維持過程を失うことを意味する。

環礁州島の持続的な保全の観点から考えると、州島の持つ自然の維持機構を健全な状態に保つことが重要である。また、こうした自然的な維持機構を有効に利用することで、州島の維持機能能力を高めることが可能であれば、海岸保全において構造物に頼る割合を大きく低減することが可能であると考えられる。

本研究ではツバル国フナフチ環礁およびキリバス共和国タラワ環礁での漂砂環境に関する現地調査を行うとともに、フナフチ環礁における持続的な州島保全策として、州島の持つ地形維持機構を有効利用した方法について現地調査および数値計算による結果から検討することを目的とした。これより、構造物に完全に頼ることのない、持続的な州島保全策の実現に向けて重要な知見を得ることが可能となる。

2. 本研究のコンセプト

環礁州島は形成初期においてはリーフ上で切れ切れに州島が存在していた。主に外洋側で生産された有孔虫な

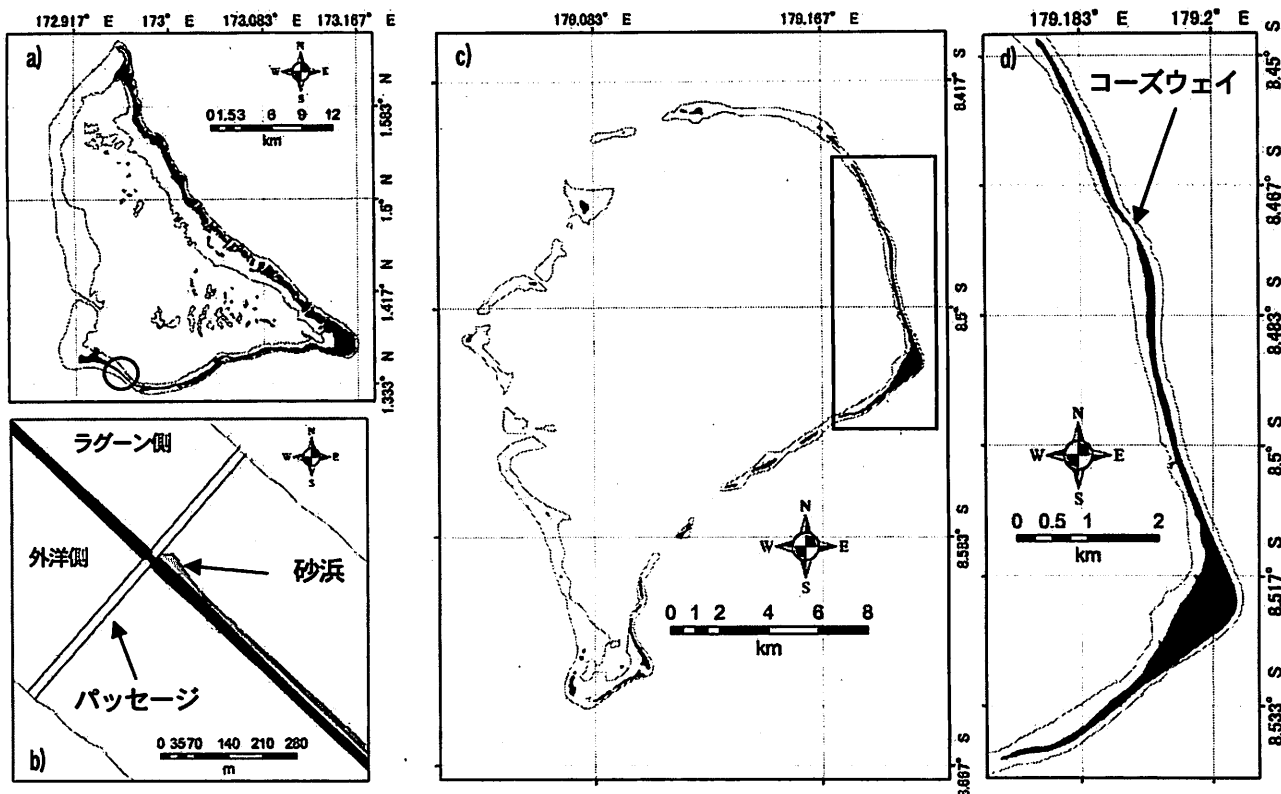


図-1 a) タラワ環礁, b) タラワ環礁ニッポン・コースウェイのパスセージ周辺の砂浜域トレース結果, c) フナフチ環礁, d) フナフチ環礁フォンガファレ島拡大図。図中白抜きの領域はリーフを示し, 黒色部分は州島を示している

どの堆積物が数m~数十mの幅のある州島間のパスセージを通して外洋側からラグーン側へと運搬され, ラグーン側海岸に堆積することで州島は拡大し, やがてパスセージが閉塞することで, フナフチ環礁のフォンガファレ島のように一連の州島形状になったと考えられている⁹⁾。

ここで, 形成初期の切れ切れの州島状態であった時には, 外洋側とラグーン側をつなぐパスセージが多数存在し, それによってラグーン側への漂砂は阻害されずに運ばれていたと考えられる(写真-1)。一連の州島にまで成長した状態では, 外洋側からラグーン側への漂砂経路は両突端部に限られてしまう。このため, 一連の州島にまで成長した状態では, 以前の切れ切れの状態と比較して, ラグーン側の沿岸漂砂が非常に乏しいものとなっていると考えられる。つまり現状のフォンガファレ島ラグーン海岸で問題となっている海岸侵食は, 外洋側からの漂砂の供給が大きく減少したためと予想される。

そこで, 本研究ではフナフチ環礁フォンガファレ島北部に位置するコースウェイを開削することで, 外洋側からラグーン側への漂砂を促進することに着目した。フォンガファレ島は主に有孔虫遺骸で形成されており, 着目したコースウェイ外洋側は現地踏査において有孔虫が多く生存していることが確認でき, 堆積物生産量が大きいと考えられたことも, 開削という新たな手法に着目した理由の一つである。

フォンガファレ島コースウェイの開削を検討するにあ

たって, その幅や深さなど考慮しなければならない条件が多く存在するが, 本研究では特に開削深さに関して検討した。環礁州島では切れ切れの州島間にあるリーフをやや深く掘削し, 小型船舶の通用路として利用する例が多く見られる。マーシャル諸島共和国マジュロ環礁では州島とリーフを掘削し, 水深数mのパスセージを建設している。こうした地形改変では周囲のリーフとの連続性が無くなるため, 沿岸漂砂という観点から考えると望ましくない状況であると予想される。そこで, 漂砂の活性化という観点から考えた場合の有効な掘削深さを定量的に把握することは重要であると考えた。まず, 環礁州島の人工的な地形改変を行い, パッセージを建設した例としてキリバス共和国タラワ環礁の事例について現地調査を行った。

3. タラワ環礁パスセージ周辺の漂砂特性に関する現地調査

キリバス共和国タラワ環礁はキリバス共和国の首都であり, 南太平洋1°25'N, 173°02'Eに位置している。タラワ環礁南西部に位置する市街地であるBetio島とBainiki島を結ぶのが日本による援助で建設された全長3.5kmのニッポン・コースウェイである(図-1 a)。このニッポン・コースウェイのほぼ中央にリーフを掘削して建設さ

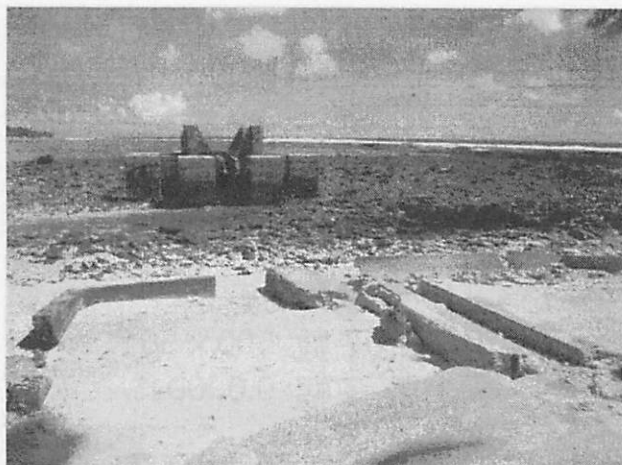


写真-1 自然な状態のリーフフラット（ツバル、フナフチ環礁）



写真-2 ニッポン・コースウェイ中間のリーフに建設されたパッセージ（キリバス、タラワ環礁）

れた小型船舶用のパッセージがある（写真-2）。現地調査は2010年9月に行った。調査ではニッポン・コースウェイのパッセージ周辺の砂浜域に関して携帯型GPSを用いて輪郭の計測を行った。なおタラワ環礁の2010年9月の潮位差は約2.5mとなっている。

図-1 b)に示したのが輪郭の計測結果である。なお、計測は干潮時に行った。砂浜域はパッセージ東側のラグーン側海岸にのみ堆積しており、砂浜はパッセージを境に途切れていることが確認された。現地踏査ではパッセージ内に砂が堆積している様子も確認され、干潮時（2010年9月の平均海面-0.9m）には一部で干出しており、船舶の航行が困難な状況になっていた。砂浜の形状や分布から漂砂方向は西向きが卓越しているものと予想され、その西向きの漂砂は周囲のリーフと比較して水深の深いパッセージによって遮断されている可能性が極めて高いと考えられた。また、漂砂が活発な状況ではパッセージの埋没が激しく、漂砂の通り道として開削する場合に、合わせて航路維持を行うことは難しいと予想された。

4. フナフチ環礁コースウェイ開削に関する検討

(1) フナフチ環礁

ツバル国フナフチ環礁は南太平洋（5～10°S, 176～180°E）に位置し、環礁東部のフォンガファレ島に首都機能や人間居住が集中している（図-1 c, d）。コースウェイはフォンガファレ島北部に位置しており、島内でもっとも幅の狭い部分である。フォンガファレ島は主に有孔虫遺骸によって構成されており、コースウェイ外洋側は有孔虫による堆積物生産量が高いとされている。

(2) 開削深さに関する数値計算による検討

フナフチ環礁コースウェイの開削においては、現状で

は閉じた状態であるため、堆積物供給量などの現地調査結果からのみで開削効果を評価することは難しい。そこで、数値計算による検討を行った。本研究では特に外洋側で供給された有孔虫砂の挙動に着目し、1ヶ月間の漂砂移動について検討した。

a) 計算方法

リーフ上の漂砂移動の基本的な考え方はマジュロ環礁での漂砂移動を検討した佐藤ら⁹⁾にならい、堆積物供給・運搬・堆積という単純化されたものを採用した。また、佐藤ら⁹⁾を参考に漂砂を発生させる外力は波であると仮定し、うねりの伝搬と風による波の発達、浅海域の波浪変形を考慮できる波浪推算モデルSWAN¹⁰⁾を用いて算定した。また、漂砂量の算定にはリーフ上を自由に移動する漂砂を表現できるモデルとして局所漂砂量モデルを採用した。佐藤・Kabiling¹¹⁾は各瞬間の底面流速から漂砂量を算定し、それを1周期積分することによって正味の漂砂量を算定する方法を提案した。そのなかで漂砂量は浮遊砂 q_B と掃流砂 q_S に分けられて算定されており、各瞬間のシールズ数が限界シールズ数を超えた場合のみ漂砂が発生する形となっている。各漂砂量の算定式は以下のように表わされる。

$$\frac{\bar{q}_B(t)}{\sqrt{(\rho_s/\rho-1)gD_s^3}} = \alpha_B |\psi(t)|^{0.5} \max(\psi(t) - \psi_c, 0) \cdot \frac{\bar{u}_b(t)}{|\bar{u}_b(t)|} \quad (1)$$

$$\frac{\bar{q}_S(t)}{\omega_s D_s} = \alpha_S \max(\psi(t) - \psi_c, 0) \cdot \frac{\bar{u}_b(t)}{|\bar{u}_b(t)|} \quad (2)$$

ここで、 D_s ：底質の粒径、 ρ_s/ρ ：砂粒子と水の密度（=2.56, 1.03）、 $\psi(t)$ ：シールズ数、 $\psi_c(t)$ ：限界シールズ数、 α_B , α_S ：係数（=1.0, 3.5）、 ω_s ：底質の沈降速度（樺木・出口¹²⁾より算出）、 u_b ：瞬間底面流速である。シ

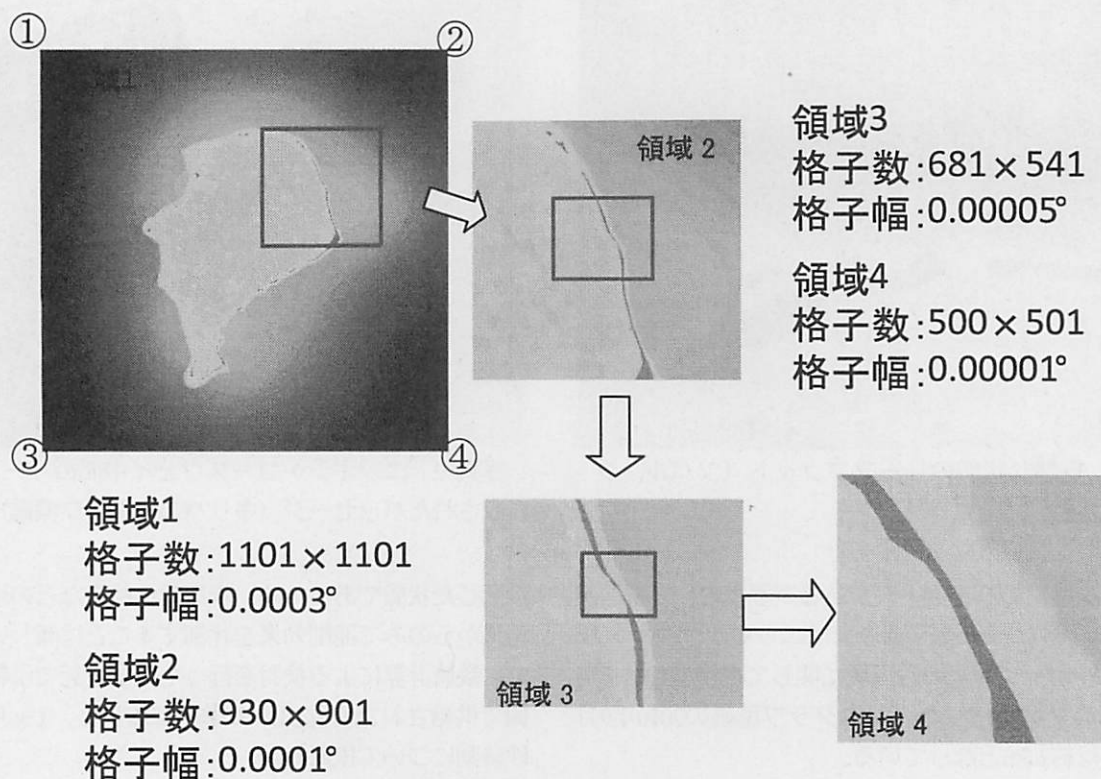


図-2 計算領域

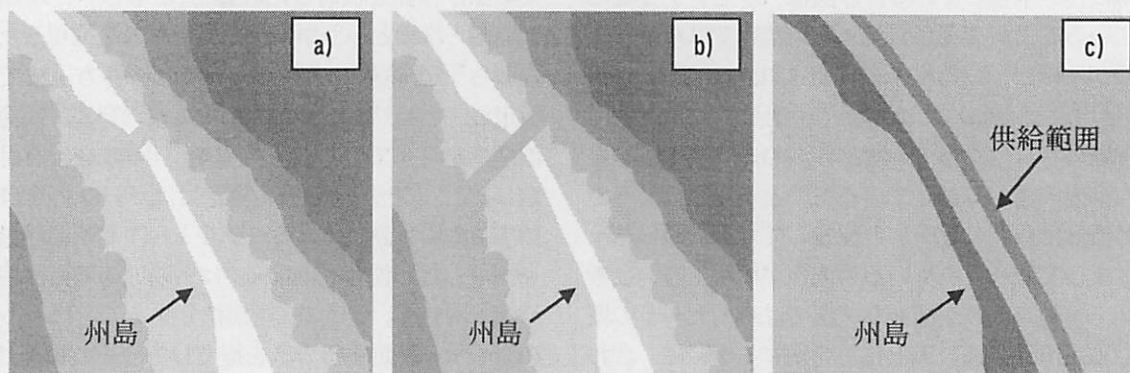


図-3 a)周辺のリーフと同水深の開削部, b)水深5mまで浚渫した開削部, c)堆積物供給の範囲

ールズ数は以下の式で算定した.

$$\psi(t) = \frac{f_w}{2} \frac{\bar{u}_b(t)^2}{(\rho_s / \rho - 1) g D_s} \quad (3)$$

ここで, f_w は摩擦係数で, 以下の式から算定した.

$$f_w = \exp \left(-7.53 + 8.07 \frac{|\bar{u}_b(t)|}{\sigma \cdot z_0} \right)^{-0.1} \quad (4)$$

ここで, σ は角周波数 ($\sigma = 2\pi / L$), z_0 は粗度長さであり, 粒径と同じとした. 限界シールズ数は式(3)において瞬間底面流速 u_b を限界摩擦速度に置き換えることによって算定される. 限界摩擦速度は岩垣の式¹³⁾より求めた. 式(1)および(2)では1周期間の瞬間底面流速

が必要となるが, 用いている波浪場計算モデルはスペクトルモデルであるために, 計算された波浪諸元(有義波高, 平均周期)から推定する必要がある. また, 微小振幅波では正弦関数となるために, 正味の漂砂量はゼロになってしまうことから, ここでは有限振幅波のなかでも極浅海域に対応するクノイド波を仮定して瞬間底面流速を求めた.

b) 計算領域と境界条件の設定

コースウェイの開削を詳細に考慮できるように, ラグーン・外洋両方を含む領域について多段階のネスティングを行った. 図-2は計算に用いた領域を示しており, 領域1から領域4までの4段階ネスティングを採用した.

領域1はフナフチ環礁全域を含む領域として設定し, 外洋側で与えられる境界条件に合わせた形となっている.

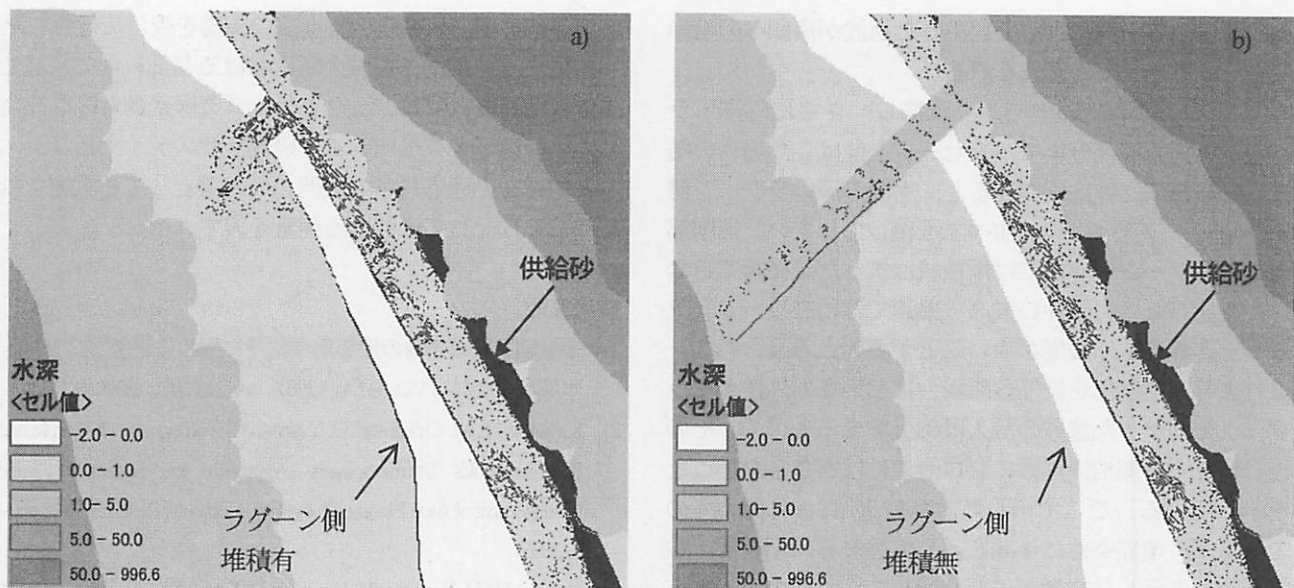


図4 1ヶ月後の供給砂の分布 a) 周辺のリーフと同水深に開削した場合、b) 開削部の水深を5mとした場合。

格子間隔は 0.0003° であり、およそ 30m の大きさとなる。なお、水深データについては、外洋側は2分メッシュの全球地形データであるETOPO2より作成し、ラグーン内は海図から読み取り、両方をGIS上で重ねた後に、任意の格子間隔まで補間処理を行い作成した。なお、州島部分の標高は一律で2mと設定し、リーフ上水深は平均潮位を想定して1mと設定した。領域2は格子間隔 0.0001° であり、およそ10mの解像度となっている。領域2ではフォンガファレ島北端部から中部までの州島を含んでいる。領域3は格子間隔 0.00005° であり、およそ5mの解像度である。領域4は格子間隔 0.00001° であり、およそ1mの解像度である。この領域のみコースウェイ開削の有無を地形に反映して計算した。開削部の幅は衛星画像からコースウェイを判読し、全体を開削した(図-3 a)。また、同じ開削幅でリーフフラット上を水深5mまで掘削し、水路状にした地形も作成した(図-3 b)。

有孔虫による堆積物供給量として、現地調査結果から年間 $0.002 \text{ m}^3/\text{m}^2$ をと推測されたことから、これをもとに1ヶ月分の供給量として 1.67×10^4 を m^3/m^2 与えた。堆積物供給の範囲は現地調査で見られた有孔虫の分布から、外洋側リーフフラット上の図-3 c) に示すように帯状の範囲に一样とした。数値計算においては、計算開始時に1ヶ月分の供給量を図-3 c) に示す範囲に与えて計算を行った。

外洋波浪の境界条件にはECMWFより入手したフナフチ環礁周辺の波浪諸元の再解析値ERA-40(1957年1月1日～2002年8月31日)およびInterim(1989年1月1日～2010年9月31日)をもとに、月毎のエネルギー平均有義波高、平均波向きを算出した。また、風場についてはフナフチ環礁気象観測所で観測された1993年5月1日00:00UTCから2008年12月31日23:00UTCまでの1時間毎の観測値から月ごとの平均値を算出した。フナフチ環礁では、11月～3

表-1 波と風の境界条件値(丸数字は図-2 第1領域の位置と対応)

	①	②	③	④
有義波高(m)	2.30	2.32	2.33	2.31
有義波周期(s)	9.90	9.95	9.99	9.93
平均波向(deg)	236.86	237.72	239.15	238.32
風速(m/s)	4.62			
風向(deg)	262.29			

月までの突発的強風・風向分散時期と4月～10月までの恒常的に南東方向から吹く時期の大きく2つに分けることができる¹⁴⁾。また、熱帯低気圧の接近は稀である¹⁵⁾。平均化された境界条件値のうち、1年のなかでも風速・有義波高の値が高くなっている1月の条件を用いて1ヶ月間の漂砂計算を行った(表-1)。

c) 供給砂の運搬の計算結果

図4は海底高度と州島・リーフフラットの位置およびコースウェイ外洋側のリーフフラットに置いた砂が1ヶ月後にどのように分布しているかを示している。ここで、移動後の供給砂の分布は砂の有無だけを示しており、堆積量の違いには着目していない。

図4 a) は開削部の水深を周囲のリーフと同じ高さまで開削した場合の供給砂の分布を示している。図より周辺のリーフと同水深の場合では、外洋側から流入した砂は若干ラグーン側リーフに広がっている様子が見られる。さらに、北側から南側への沿岸漂砂が卓越しているため、ラグーン側海岸南側へ運ばれて堆積している。これは開削部南側のラグーン側海岸に供給砂が一樣に分布していることから把握できる。ラグーン内は極浅いリーフで半閉鎖的な環境であるため、外洋波浪の影響を受けにくく、ラグーン内で発達した風波が主要な外力となる。そのた

め、北西からの風によって発生した風波が南側への沿岸漂砂を発生させたと考えられる。

開削部の水深を5mまで深く浚渫し、さらに外洋・ラグーンの同水深部分までパッセージを伸ばした場合の結果(図4 b)に着目してみると、水深の深いラグーン側のパッセージ部分に砂はすべて堆積してしまい、開削部南側のラグーン側海岸には堆積域はまったく確認できない。設定した外力条件の波高・風速では再びリーフフラット上に砂を運ぶ強度が無いことが要因と考えられた。これより、開削部を浚渫した場合においても外洋からラグーンに向かった漂砂の流入は確保できるものの、その後のラグーン側沿岸漂砂のプロセスには寄与しないことを示している。ここで示した計算結果は1ヶ月間のものであるが、境界条件に年間を通して強まる時期を採用したため、こうした特徴が年間を通して続くものと考えられる。このため、船舶の通用口としての機能も期待して開削部分の水深を周囲のリーフよりも深くしてしまうと、ラグーン側の沿岸漂砂には寄与しないことが示された。

以上より、開削部に期待する機能を明確にすることが必要であり、本検討ではラグーン側沿岸漂砂プロセスにおける供給部としての効果が発揮されることを期待している。そのため、開削部分の水深は周囲のリーフと同程度とすることが望ましいことが数値モデルによる検討から明らかとなった。

5. 結論

本研究では漂砂供給量の増加を目的とした州島開削に着目し、開削部の深さに関する検討を行った。これより以下の結論を得た。

- ・ タラワ環礁のニッポン・コースウェイ周辺の砂浜域調査結果より、リーフを掘削して建設されたパッセージにより沿岸漂砂の連続性が遮断されると共に、パッセージ内への堆積による航路埋没が確認された。
- ・ フナフチ環礁コースウェイの開削深さに関する数値計算結果より、周囲のリーフと同水深にした場合にはラグーン側海岸への沿岸漂砂に寄与することが確認された。しかし、5mの掘削をすると開削部を通過した漂砂は全てパッセージ内にトラップされ、ラグーン側沿岸漂砂に寄与しないことが明らかとなった。
- ・ 開削部に期待する機能を明確にすることで、コースウェイ開削によるラグーン側海岸の漂砂活発化は可能であると考えられた。今後はラグーン側海岸の堆積促進効果を定量的に検討する予定である。

謝辞：本研究は地球規模課題対応国際科学技術協力事業、

環境省地球環境研究総合推進費の支援を受けて行われたものである。また、茨城大学における文部科学省平成22年度特別経費(プロジェクト分)「気候変動対応型社会のための適応イノベーション研究-サステナビリティ学と地球変動適応科学の展開」の一環としても実施された。ここに記して深甚なる謝意を表す。

参考文献

- 1) 茅根創：環礁州島の地形形成維持に関わる生態プロセス、水環境学会誌, Vol.33 (A), No.8, pp.245-248, 2010.
- 2) Kayanne, H., M. Chikamori, H. Yamano, T. Yamaguchi, H. Yokoki and H. Shimazaki: Interdisciplinary Approach for Sustainable Land Management of Atoll Islands, Global Environmental Research, 9(1), pp.1-7, 2005.
- 3) Yokoki, H., H. Yamano, H. Kayanne, D. Sato, Y. Minami, S. Ando, H. Shimazaki, T. Yamaguchi, M. Chikamori, A. Ishoda and H. Takagi: Comparison between Longshore Sediment Transport Due to Waves and Long-term Shoreline Change in Majuro Atoll, Marshall Islands, Global Environmental Research, 9(1), pp.21-26, 2005.
- 4) 山野博哉：グローバル・ローカルな要因による小島嶼国の環境問題、水環境学会誌, Vol.33 (A), No.8, pp.234-238, 2010.
- 5) Mimura, N., L. Nurse, R.F. McLean, J. Agard, L. Briguglio, P. Lefale, R. Payet and G. Sem: Small islands. Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden and C.E. Hanson, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, UK, pp.687-716, 2007.
- 6) 近森正：ヘヌア・村のある島：環礁州島の地形発達と人間居住, 史学, 76(2/3), pp.283-308, 2007.
- 7) 佐藤大作, 横木裕宗：マジュロ環礁ローラ島における沿岸漂砂制御にむけた現地調査と数値計算, 海岸工学論文集, 第55巻, pp.1401-1405, 2008.
- 8) 佐藤大作, 横木裕宗, 藤田和彦, 桑原祐史, 山野博哉, 島崎彦人, 茅根創, 渡邊真砂夫：海面上昇後のマーシャル諸島マジュロ環礁における地形維持過程の数値シミュレーション, 海岸工学論文集, 土木学会, 第53巻, pp.1291-1295, 2006.
- 9) 佐藤大作, 横木裕宗, 桑原祐史, 茅根創, 渡邊真砂夫：Funafuti環礁Fongafale島における作用外力と地形変化に関する現地調査, 地球環境研究論文集, Vol. 17, pp.77-84, 2009.
- 10) Booij, N.R., C. Ris and L.H. Holthuijsen: A third-generation wave model for coastal regions I. Model description and validation Journal of Geophysical Research, Vol.104, No.C4, pp.7649-7666, 1999.
- 11) 佐藤慎司, Michael Kabiling：波打ち帯を含む三次元海浜変形の数値モデル, 海岸工学論文集, 第 41 巻, pp.401-405, 1999.

- 12) 榎木亨, 出口一郎: 新編海岸工学, pp.122, 共立出版株式会社, 1996.
- 13) 岩垣 雄一: 限界掃流力の流体力学的研究, 土木学会論文集, No.41, pp., 1956.
- 14) Damlamian, H: Hydrodynamic Model of Funafuti, Tuvalu: Water Circulation and Applications, EU EDF 8 – SOPAC Project Report, 133, pp.1-21, 2008.
- 15) 佐藤大作, 横木裕宗, 櫻井勝, 桑原祐史: ツバル国フナフ

チ環礁における台風がラグーン内波浪場に及ぼす影響, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.66, No.1, pp.1236-1240, 2010.

(2011.4.11 受付)

(2011.6.11 受理)

Sustainable reef-island conservation by open-cutting a causeway

Daisaku SATO¹, Hiromune YOKOKI¹ and Hajime KAYANNE²

¹Department of Urban and Civil Engineering, Ibaraki University

²Department of Earth and Planetary Science, The University of Tokyo

Sustainable island conservation of atoll islands is a significant issue. Although the hard-structure protection is applied frequently in the view of short term scale, the natural island conservation system is important in the view of long term scale. This study focused on the island conservation plan, which makes use of the natural process of the island's morphological change: the acceleration of the accretion due to the open-cut of the causeway in Funafuti atoll, Tuvalu, which increases the sediment transportation from the ocean-side to the lagoon-side coast. The field investigation in Tarawa atoll in Kiribati and the numerical simulation of the open-cut of the causeway in Funafuti atoll were carried out to focus on the desirable depth of the open-cut. These results indicated that the suitable depth of the open-cut of the causeway was the same level of the surrounding reef-flat. Deeper excavation is not desirable because the sediments are trapped in the passage.