

11. 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

佐藤 大作^{1*}・横木 裕宗²・桑原 祐史³・茅根 創⁴・渡邊 真砂夫⁵

¹茨城大学大学院理工学研究科情報・システム科学専攻 (〒316-8511 茨城県日立市中成沢町4-12-1)

²茨城大学広域水圏環境科学教育研究センター (〒316-8511 茨城県日立市中成沢町4-12-1)

³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)

⁴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)

⁵芙蓉海洋開発株式会社 環境システムセンター 技術部 (〒111-0051 東京都台東区蔵前3-15-7)

* E-mail: 06nd308s@hcs.ibaraki.ac.jp

Tuvalu国Funafuti環礁東部に位置するFongafale島では国土の維持が重要な課題となっているが、州島に対する作用外力などの情報は極端に乏しい。本研究では、Fongafale島に作用する外力を把握するために現地調査を行い沿岸での流速観測を行った。既往の調査研究結果と合わせて検討を行ったところ、Fongafale島ラグーン沿岸では波による往復流成分の諸元と過去の地形変化傾向がよく対応した。また、南東方向からの入射波・風場条件での波浪場の数値計算結果からも同様の知見が得られた。現地踏査から漂砂量自体は乏しいものと推測されたため、持続可能な州島保全には現状での護岸等の対策だけでなく、養浜などの動的安定を目的とした、州島全域における漂砂系を考慮した対策が望ましいものと考えられた。

Key Words : Funafuti atoll, Field survey, Currents and waves, Wave simulation, Land conservation

1. 序論

Tuvalu 国 Funafuti 環礁は南太平洋（南緯 5～10 度，東経 176～180 度）に位置し，環礁東部の Fongafale 島に首都機能や人間居住が集中している（図-1(a), (b)）。ここ Fongafale 島では近年の地球温暖化による海面上昇の影響によって島が水没の危機にあることが多く報道されている。しかし，実際には人口増加や都市化などもそうした被害の重要な要因となっていることが最近指摘されている¹⁾。海岸線のすぐそばまで住居が建設され，それに伴う沿岸植生の伐採や，海岸線にコンクリートブロックやサンゴレキが投入されることが多い。こうした海岸線の改変は州島の底質移動や堆積の傾向を変化させ，漂砂の下流側などで侵食が生じる可能性がある。さらに，今後生じる海面上昇の影響によって侵食が加速することが懸念されることから，持続可能な国土保全に関する対策の検討が非常に重要な課題となっている。州島保全対策を検討するにあたって，波や流れなどの物理的外力の影響とそれぞれの特徴は基礎的な情報である。また，それ

らと州島地形変化との関係を明らかとすることは，州島保全の対策検討に直接つながる知見となる。そこで，本研究では Fongafale 島に来襲する外力を定量的に評価し，それら外力と州島地形変化との関係を明らかとすることを目的とした。外力を定量的に把握するために，現地調査を行った。調査では Fongafale 島ラグーン沿岸に流速計を設置して観測を行い，得られた流速場の解析を行った。また，太平洋における小島嶼国における技術調査および支援を行っている Pacific Islands Applied Geoscience Commission (SOPAC) が過去に測量した断面地形から侵食・堆積域を分類し，調査で得られた外力との対応を検討した。また，季節変化を考慮した平均的な境界条件のもとで波浪場の算定を行い，過去の地形変化および観測結果との対応について議論を行った。また，得られた知見から現状における海岸保全対策の有効性などを持続可能性などを踏まえながら検討し，より最適な州島保全の対策の可能性について検討を行った。

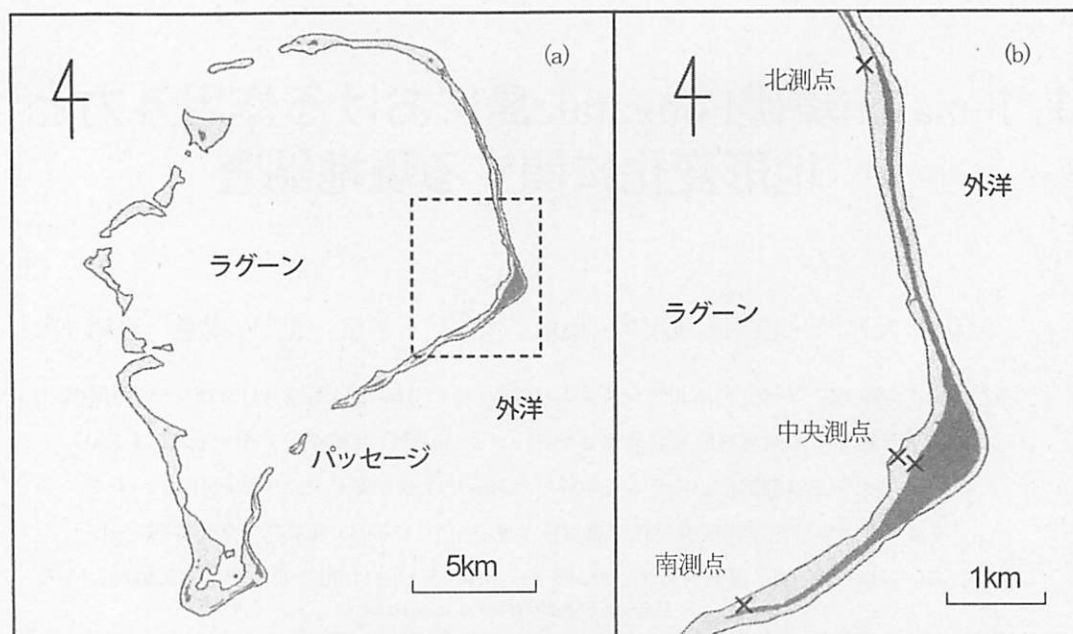


図-1 (a)Funafuti 環礁 (b)Fongafale 島拡大図. 両図中の濃い灰色の領域が州島を示し、薄い灰色の領域がリーフを示している. 図-1(b)中の×印は流速計設置位置を示す.

2. 既往の調査研究

これまで Fongafale 島における地形変化やラグーン内の流動に関しては、主に SOPAC によって調査研究が行われてきた. Xue and Malologa²⁾は突堤脇の堆積物の分布と風向の変化から沿岸流の向きに関する議論を行い、北北西の風が卓越する場合は Fongafale 島ラグーン側海岸に沿って一様に南向きの流れが生じること、また北西の風が卓越する場合は Fongafale 島の中央部に向かって北と南から集中するような流れが生じ、西南西の風が卓越する場合には北向きに一様な流れが生じていると推定した. ただし、Funafuti 環礁における風場は 11 月～3 月までの突発的強風・風向分散次期と 4 月～10 月までの恒常的に南東方向から吹く次期の大きく 2 つに分けることができる³⁾. そのため、Xue and Malologa²⁾の結果は 11 月～3 月の期間に限ったものと言える. Damlamian³⁾は、流動モデルを用いた数値シミュレーションにより、潮汐変動によって生じるラグーン内の流動場を数値的に検討した. それによると、潮汐による流れは上げ潮時には Fongafale 島沿岸では一様に北向きに働いており、下げ潮となると島中央部でちょうど南北逆向きの流れが生じる結果となった. また、波浪に関する調査研究は Barstow and Haug⁴⁾などによって行われているが、外洋の沖波と外洋側リーフエッジでの碎波波高に着目したもので、ラグーン側海岸での波に着目したものはない. 海岸地形の変化に関しては、Woodward⁵⁾によって Fongafale 島ラグーン側海岸 21 測線において断面測量が数年ごとに行われていたが、近年におけるものは報告されていない. Tuvalu 政府が

2006 年にまとめた Tuvalu's National Adaptation Programme of Action によると、一般的に Funafuti 環礁の州島では、ラグーン側海岸で侵食が生じ、外洋側海岸では堆積することで島が成長していると記載されている⁷⁾. 外洋側海岸ではサンゴレキによって構成されたレキ浜が続いており、こうしたサンゴレキはハリケーン等のイベントによって突発的に供給されることが Mergner⁸⁾によって報告された. 一方、ラグーン側海岸で見られる砂浜は主に有孔虫遺骸で形成されている⁹⁾. 特に侵食が生じているとされるラグーン側海岸において、風や潮汐に起因する沿岸流に関する研究が進められその理解は深まっている. しかし、沿岸での波高や波向き、また波と潮汐等による流れの関係やそれぞれの地形変化に対する関係については議論されていない.

3. Funafuti環礁現地調査

Fongafale 島において州島地形と沿岸流動を把握するために現地調査を行った (図-1(b)). 流速計は Fongafale 島ラグーン沿岸に合計 4 か所設置し、2004 年 8 月 14 日から 22 日までの 8 日間連続観測を行った. Fongafale 島中央沖側の測点には波高計も設置して観測を行った. なお、観測機器はすべてリーフ上に設置した. 観測時期は恒常的に南東方向からの風が卓越することが報告されている³⁾. 流速計および波高計は毎正時にそれぞれ 5 分間および 10 分間、0.5 秒間隔で記録した. 観測機器はすべての地点で設置時におよそ 2m から 3m 程度の水深のリーフ

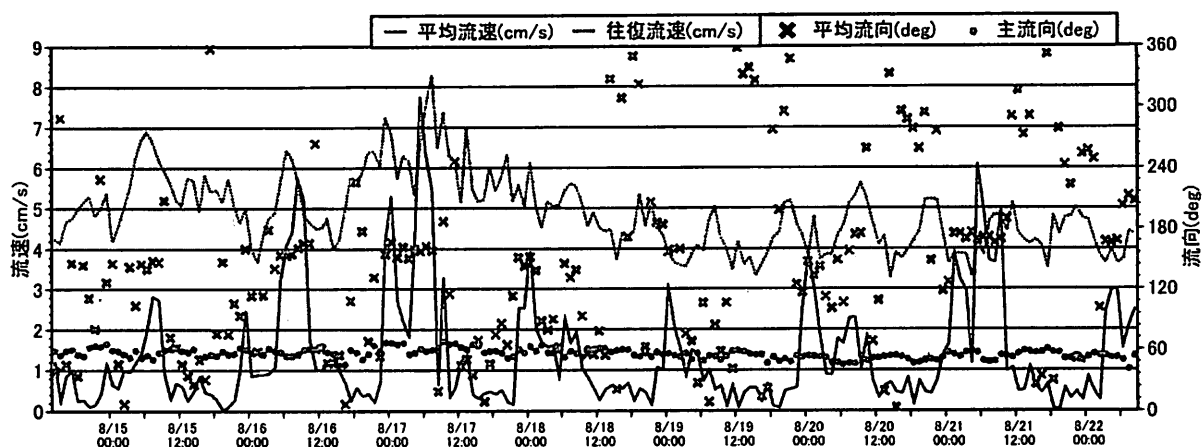


図-2 北測点における流速計の観測結果

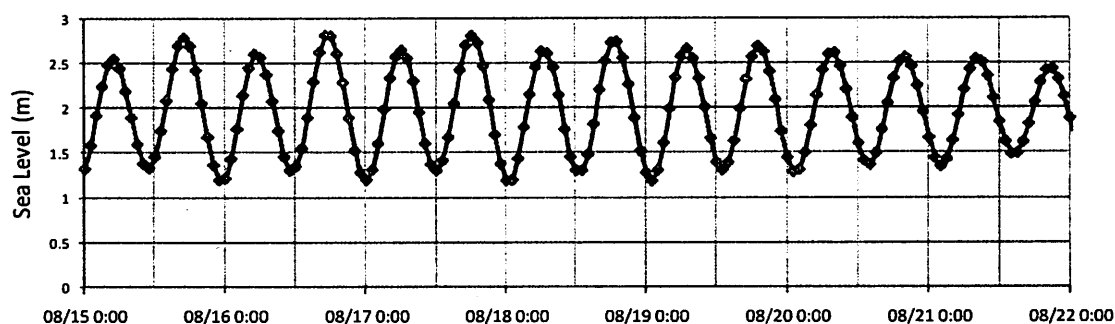


図-3 観測期間中の潮位変動

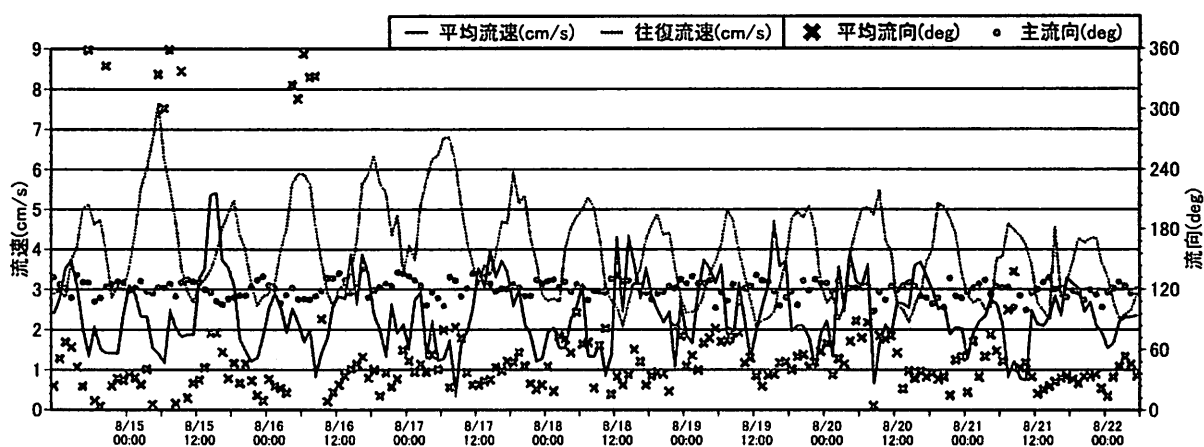


図-4 中央測点岸側における流速計の観測結果

上に設置した。観測された流速データを平均流成分と往復流成分とに分離して、それぞれの流速や流向に関して検討を行った。平均流成分は観測値の平均で示され、流れによって水粒子が移動することを捉えたものである。往復流成分は観測値のx成分およびy成分の分布に対して近似直線を求め、その直線からの分散を計算することで得られたものである。つまり、平均流は潮汐等による流れの強さや向きを直接的に示し、往復流は波の高さや向きを間接的に示している。

図-2に北測線に設置した流速計の観測データを示した。

北測線では平均流向に統一的な傾向は見えてとれないが、平均流速は潮位変動（図-3）に対応して大小の変化が生じていた。一方、主流向は東北東方向に一定であり、流速も往復流成分が平均流成分よりも大きな値となった。また、往復流速のピーク位置と平均流速のピーク位置が対応している時間も見られ、潮位変動に伴うリーフ上の水深変化が同地点における波の波高等に対しても影響しているものと考えられる。これより、北測線では一方から継続的に来襲する波が海岸地形に作用する主要な外力であると予想された。

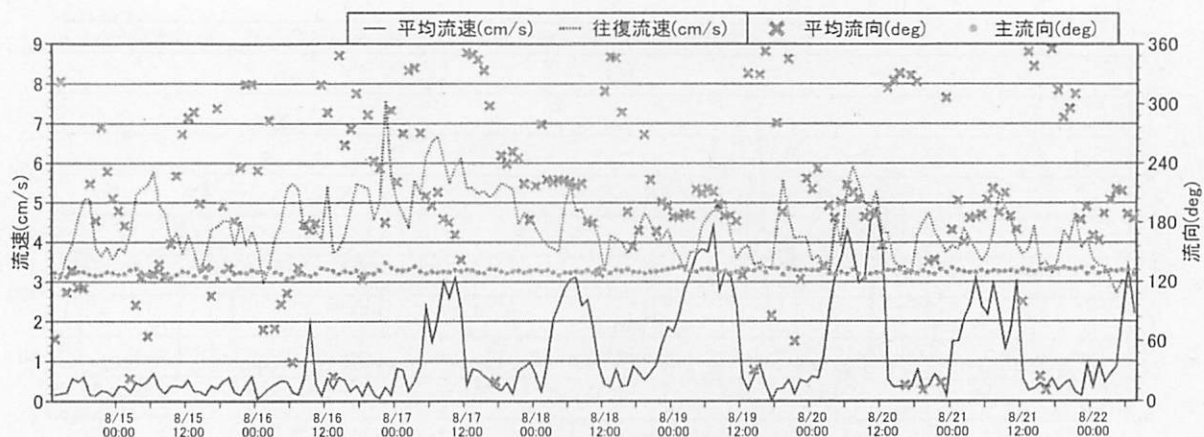


図-5 南測線における流速計の観測結果

図-4は中央測線岸側に設置した流速計の観測結果を示している。この測線でも北測線と同様に往復流速が平均流速よりもほぼ全期間を通して大きくなっていた。主流向は東南東に向いており、観測期間を通してほぼ一定であった。また、平均流向もおおよそ北東から北向きの範囲にあり、北測線の平均流向と比較して安定したものとなっていた。この地点では往復流速の大きさは潮汐に伴う水面変動の影響を大きく受けており、規則的に変化していることがわかる。しかし、平均流成分は往復流成分ほど潮位変動と対応していないため、周囲のサンゴ等による地形の影響を受けていたものと予想される。

図-5に南測線における流速計の観測結果を示した。この地点でも前述の2地点と同様に往復流速が平均流速を観測期間を通して上回っており、波の影響が支配的であると考えられる。主流向は期間を通して東南東方向で一定であり、平均流向にはばらつきが見られ、平均流速は

潮位変動への対応が見られた。この地点でも往復流速は潮位変動に対応して変化している部分が確認できた。

得られた各設置地点での平均流成分および往復流成分の相対的な大きさおよび向きについて検討を行うため、図-6に観測期間中での各成分の流速・流向に関する平均値をベクトル表示したものを示した。図-6より、Fongafale 島北部から南部にかけて往復流成分のベクトルの絶対値はほぼ同等となっていることがわかる。往復流成分は間接的に波高を示すものであるため、漂砂移動の起動力となる波のエネルギーについてもほぼ同等の大きさが海岸に到達していることがわかった。一方、潮汐などによる流れの大きさは北部から南部にかけて徐々に大きくなった。また、全観測点において、往復流成分が平均流成分を上回っていることから、Fongafale 島ラグーン側海岸では波が地形変化に作用する主要な外力であることが考えられた。なお、中央測線沖側に設置した波高計

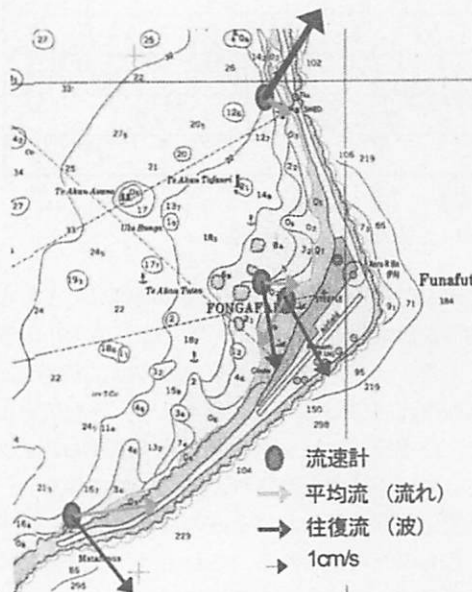


図-6 Fongafale 島沿岸で観測された流速成分の平均ベクトル (2004年8月14-22日)

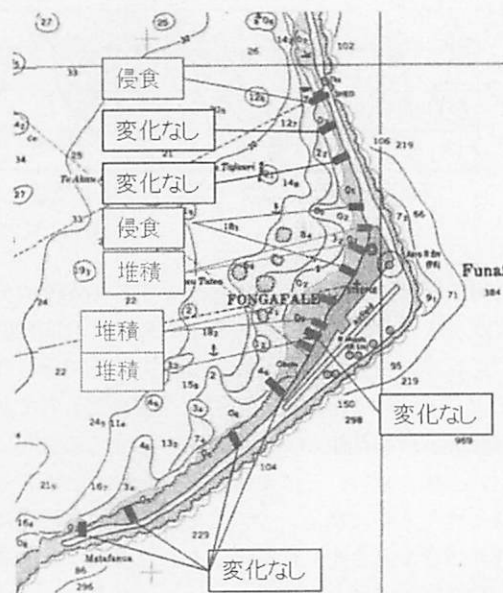


図-7 過去の断面測量結果から得られた侵食・堆積域の分布

の観測データから有義波高を算定したところ、最大で20cm弱であった。観測波高の増大・減少は潮汐変動にともなう海水位の上昇・下降に連動して変化していたことから、リーフ上の水深変化で海岸に到達する波のエネルギーも大きく変化すると考えられる。

4. 侵食・堆積域と流動場の関係

SOPACによる過去の断面測量結果³⁾から得られた侵食域・堆積域の分布を図-7に示した。Fongafale島南部では砂浜の堆積が見られ、その他の地点でもレキによる堆積が見られた。一方で北部には侵食と堆積の両方が見られたが、堆積となった地点では侵食対策のためにレキやコンクリートブロックを投入したことが報告されているため、それまでは侵食傾向にあったことが伺える。まとめると、Fongafale島南部では堆積傾向、北部では侵食傾向にあることが予想された。

得られた侵食・堆積分布と流動場分布とを比較してみると、平均流よりも往復流がFongafale島沿岸部では卓越していることから、海浜変形についても波が主要な要因となっていることが予想される。特に、島中央部では平均的に往復流は汀線に対して南部に向かっており、南部の地点では汀線に対して島北部に向かうような角度で

往復流が観測されていることがわかる。このため、波の沿岸方向エネルギーフラックスによって沿岸漂砂が生じていると仮定するならば、島南部では漂砂が集中する地域となり、堆積傾向になることが予想される。また、平均流についてもこうした堆積過程を補助する方向で生じている。一方で、島北部では汀線に対して北向きの角度で平均的な往復流が生じている。そのため中央部と北部の観測点の間の地域では、沿岸漂砂としては両境界で流出し、侵食傾向となることが予想される。以上のように、Fongafale島における過去の侵食・堆積傾向は主に、波によって生じる往復流成分がよく対応していることが明らかとなった。

5. Funafuti環礁における波浪場の算定

Fongafale島沿岸では、波浪が主要な外力となっていることが予想されたことから、平均的な境界条件のもとで、波浪場の算定を行い、これまで得られた知見との対応を検討した。波浪場の算定にはSWAN40.72を用いた。水深・地形データは海図と衛星画像から74m×74mの正方形格子データを作成した。なお、リーフ上は一律で1mとし、州島メッシュは不透過格子として取り扱った。

Funafuti環礁の風場は季節的に大きく2つに分けられる³⁾。

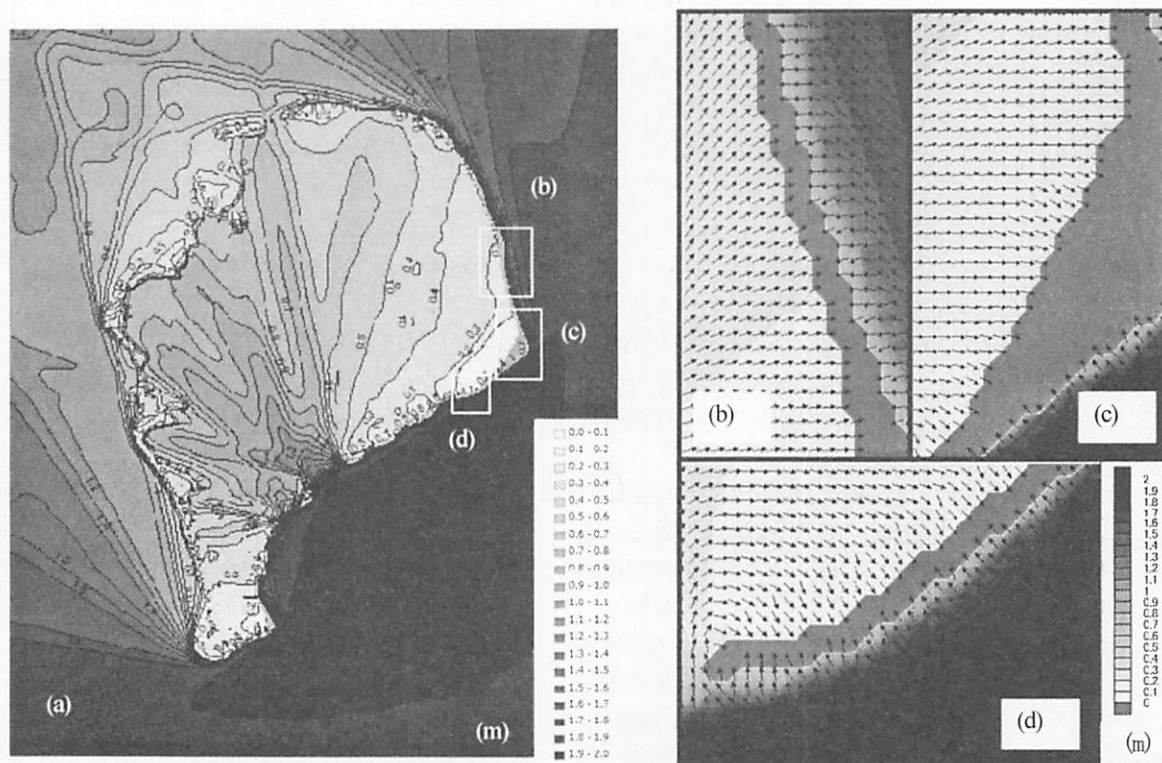


図-8 (a)Funafuti 環礁における波浪場の計算結果. (b) Fongafale 島北部における波高・波向き計算結果. (c) Fongafale 島中部における波高・波向き計算結果. (d) Fongafale 島南部における波高・波向き計算結果.

11月から3月まではほぼ全方向から風が吹き、特に北西～南西から突発的に10mを超える風が観測されているが頻度は多くない。一方、4月から10月までは南東方向から6m/s程度の風が恒常的に吹く。外洋のうねりに関しては環礁西部の外洋上でブイによる観測が行われ、平均的に有義波高は1.6mから1.9m、有義波周期は8.5sから10.0s程度であると報告されている⁹⁾。波向きに関する報告はされていないが、季節的な風場の影響を大きく受けていることが予想されるため、波向きに関しても風向とほぼ同様であると推測される。本研究ではこれらを参考に、波浪に関しては有義波高1.9m、有義波周期8.5s、平均波向き135度（南東方向からの波浪）、風場に関しては風速6m/s、風向135度を境界条件として設定した。

図-8 (a) にFunafuti環礁全域における4月 - 10月の恒常的な南東風状況下での波浪場の計算結果を示した。Fongafale島は南部のパスセージとの位置関係から外洋波浪の影響を直接受けることはなく、沿岸に來襲する波高も非常に小さい。図-8 (b), (c), (d)には波高・波向きの計算結果に関してFongafale島沿岸部分を拡大して示した。島中部では島の汀線に対してほぼ直角かもしくは若干南向きの角度で波浪が入射しており、より南部の地点ではパスセージからの回折波により汀線に対して直角か若干北向きに入射していることがわかる。一方、島北部の地点では、波向きは汀線に対して北向きに变化していることが分かった。こうした傾向は現地観測から得られた知見とおおよそ対応しており、平均的な沿岸波浪によって生じる沿岸漂砂が州島地形の変化に大きく寄与していると考えられた。

6. 海岸保全に関する検討

本研究では Fongafale 島ラグーン沿岸における地形変化を作用外力に着目して検討を行い、沿岸漂砂が要因で地形変化が生じていることが示唆された。この章では得られた知見をもとに、有効かつ持続可能な州島保全対策について検討を行った。

漂砂移動だけでなく、沿岸部の侵食・堆積には沿岸植生の分布や人間活動も大きく影響すると考えられる。桑原ら¹⁰⁾は1984年の空中写真と2004年の衛星画像を用いた Fongafale 島の沿岸植生分布の変化について検討し、島北部および南西部では、過去20年間において主にラグーン側海岸では宅地整備等による人為的な要因によって沿岸植生が大きく減少したことを示した。また、Yamano ら¹¹⁾では過去の地図や空中写真・衛星画像を用いた解析結果から、Fongafale 島ラグーン側海岸での急激な住居増加が示された。人為的な海岸改変は Fongafale

島ラグーン側海岸で多く見られ、サンゴレキやコンクリートブロックを用いた簡易護岸が設置されていた。

波が主要な作用外力である Fongafale 島海岸では、波による沿岸漂砂が地形変化に大きく寄与していることが本研究から推測された。さらに、現地踏査では砂浜が僅かしか確認できず、現状で移動可能な砂は乏しいことが予想された。このため、現状行われているレキやコンクリートブロックを用いた静的な海岸防護よりも、例えばサンドリサイクルや養浜といった動的な海岸保全対策が望ましいものと考えられる。ごく僅かしか存在しない移動可能な砂で州島地形の地形変化が生じているのであれば、Fongafale 島全域における漂砂系の阻害は漂砂の下手側における侵食が激しくなる可能性がある。持続可能な州島保全を考えるならば、広域的な漂砂系の把握とそれを考慮した対策が必要である。具体的な漂砂量や土砂の供給量およびそれらの収支に関しては、より詳細な調査および地形変化までを含めた数値モデルによる検討が必要であり、今後の課題である。

7. 結論

Funafuti 環礁 Fongafale 島において流速計による観測を行い、観測データの解析を行った。これより島沿岸部では流れによる平均流成分よりも波による往復流速成分が顕著であることが分かった。また、各流速成分と過去の断面測量結果から、島南部の堆積傾向と島北部の侵食傾向の大きく2つに分けて把握でき、この傾向は往復流成分の流向から推測される漂砂移動によく対応した。また、南東からの入射波・風場の境界条件を用いて算定した平均波向きと往復流成分の流向がおおよそ一致したことから、Fongafale 島ラグーン側海岸の海浜変形は波による漂砂が主要な要因であると推測された。このため、現状で行われている静的な海岸防護対策は、漂砂移動によって変化し、その漂砂量が乏しいものと予想される Fongafale 島の州島保全に最適であるとは言い難く、養浜のような動的に海岸を安定させる対策の実現可能性を探ることが持続可能な州島保全では必要であると考えた。本研究から得られた知見に加えて、現状の砂浜分布や土砂供給量などをより詳細に把握し、地形変化量の見積もりを含めた形で数値モデルによる検討を行うことが、最適な州島保全対策を選定する上で重要となる。

謝辞：本研究は環境省地球環境研究総合推進費、および科学技術振興調整費（戦略的拠点育成）の事業のフラグシッププロジェクト（茨城大学担当分）の援助を得た。現地調査では研究参画者の山野博哉氏（国立環境研究

所), 山口徹氏(慶応義塾大学), 近森正氏(慶応義塾大学名誉教授)との議論が有益であった。ここに記して深甚なる謝意を表す。

参考文献

- 1) Yamano, H., Kayanne, H., Yamaguchi, T., Kuwahara, Y., Yokoki, H., Shimazaki, H. and Chikamori, M.: Atoll island vulnerability to flooding and inundation revealed by historical reconstruction : Fongafale Islet, Funafuti Atoll, Tuvalu, *Global and Planetary Change*, 57, pp.407-416.
- 2) Xue, C. and Malologa, F.: Coastal Sedimentation and Coastal Management of Fongafale, Funafuti Atoll, Tuvalu, *SOPAC Technical Report*, 221, pp.1-54, 1995.
- 3) Damlamian, H.: Hydrodynamic Model of Funafuti, Tuvalu: Water Circulation and Applications, *EUEDF 8-SOPAC Project Report*, 133, pp.1-21, 2008.
- 4) Barstow, S., F. and Haug, O.: Wave Climate of Tuvalu, *SOPAC Technical Report*, 203, pp.1-24, 1994.
- 5) Woodward, P.: Resurvey of Funafuti Beach Profiles, Tuvalu, *SOPAC Preliminary Report*, 78, pp.1-19, 1995.
- 6) Woodward, P.: Re-survey of Fongafale Beach Profiles, Funafuti, Tuvalu, *SOPAC Preliminary Report*, 95, pp.1-21, 1998.
- 7) Ministry of Natural Resources, Land and Survey, Department of Environment : Tuvalu's National Adaptation Programme of Action, pp.1-47, 2006.
- 8) Mergner, H.: Initial recolonization of Funafuti Atoll coral reefs devastated by hurricane "Bebe", *Atoll Research Bulletin*, No.284, pp.1-16, 1985.
- 9) Smith, R.: Assessment of Lagoon Sand and Aggregate Resources Funafuti Atoll, Tuvalu, *SOPAC Technical Report*, 212, pp.1-64, 1995.
- 10) 桑原祐史, 横木裕宗, 佐藤大作, 山野博哉, 茅根創: ツバル国フナフチ環礁における沿岸域土地被覆変化の解析, *沿岸域学会誌*, Vol.21, No.2, pp.21-32, 2008.

(2009. 3. 6 受付)

(2009. 6. 1 受理)

Field Investigation on Waves and Currents in Fongafale Islet, Funafuti Atoll, Tuvalu

Daisaku SATO¹, Hiromune YOKOKI², Yuji KUWAHARA³, Hajime KAYANNE⁴ and Masao WATANABE⁵

¹Dept. of System and Science, Graduate school of Science and Engineering, Ibaraki University

²Center for Water Environment Studies, Ibaraki University

³Dept. of Urban and Civil Engineering, Ibaraki University

⁴Dept. of Earth and Planetary Science, The University of Tokyo

⁵Fuyo Ocean Development & Engineering Co., Ltd.

Fongafale islet on Funafuti atoll, Tuvalu will be suffered from the acceleration of the coastal erosion due to sea-level rise. Sustainable land protection is primary problem in order to use the island continuously in the future. In this study, field investigation and numerical simulation were carried out to understand the external forces raid islet and discuss about the relationship between the external forces and the coastal changes. We measured the longshore currents and analyzed the data by dividing into the mean current and the orbital current components. Erosion and accretion trends of the land changes measured by SOPAC correspond to the direction of the orbital current components. The wave field simulation with annual average oceanic wave and wind condition indicated that the measured orbital currents components are almost equal to the annual mean condition. These results indicated that the waves were primary external forces to the lagoonal coast and longshore sediment transports are important process of the coastal changes in the islet. Therefore, the desirable countermeasure against the coastal erosion is not a static but a dynamic stability method in the lagoonal coast of Fongafale islet.