

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

Lagoonal wave field on tropical cyclone condition in Funafuti atoll, Tuvalu

佐藤大作¹・横木裕宗²・櫻井 勝³・桑原祐史⁴

Daisaku SATO, Hiromune YOKOKI, Masaru SAKURAI and Yuji KUWAHARA

Tropical cyclone "Gavin" caused extremely high wave situation in Funafuti atoll, Tuvalu on March 1997. Although the extremely high waves due to tropical cyclones caused large morphological changes on atoll islands, the detail of the waves under tropical cyclones are not fully understood, because such strong tropical cyclones attack atoll islands once in a few decades. In this study, the numerical simulation of winds and waves under the tropical cyclone "Gavin" were carried out. The simulated results showed that the lagoonal significant wave height increased twice as high as the mean wave height in March. In the tropical cyclone situation, the place of passage and effective fetch are important for the lagoonal wave condition.

1. 序論

南太平洋上に位置するツバル国フナフチ環礁では海岸侵食の被害を受け、早急な海岸保全対策が必要となっている。環礁とは環状のごく浅いサンゴ礁のことで、その上に標高数メートル程度の有孔虫砂やサンゴ礫から成る州島が形成されており、州島幅も狭いために海岸侵食に対して脆弱性が非常に高い地形となっている。環礁の中央には外洋と比較して静穏なラグーンが形成されている。ラグーンの水深はおおよそ数十メートルと、外洋側の数百～数千メートルと比較すると極端に浅い。

著者らはこれまで環礁州島における地形変化予測モデルを開発し、将来地形変化の予測を行ってきたが、台風のような暴浪の影響は取り込まれていない（例えば、佐藤・横木, 2008）。フナフチ環礁では非常にまれにはあるが台風が来襲し（佐藤ら, 2010）、それに伴う高波浪によって極端な地形変化が生じることが報告されている。Maragosら（1973）によると、1972年に来襲したTropical cyclone "Bebe"による高波浪によってフナフチ環礁南東部のリーフ上に18kmにわたって幅37m、リーフフラット上からの平均高さ3.5mのサンゴ礫のリッジが一夜にして形成されたことが報告されている。こうした急激なサンゴ礫の堆積は、長期的な州島形成の過程において重要であると推測されるが、外洋・ラグーンにおける主要な外力である波浪場に関する研究は非常に少ない（佐藤・横木, 2008）。しかし、長期的な地形変化を議論するためには、こうした台風による極端に大きな外力に関

する知見は重要である。そこで本研究では、近年フナフチ環礁に接近したTropical cyclone "Gavin"（以下、台風の定義を拡張し、台風Gavinと表記）に着目し、南太平洋潮位・気候監視プロジェクト（SPSLCMP）およびECMWFの再解析値波浪データを解析し、年間および季節平均等の状態と比較した。さらに、台風接近時の気象場・波浪場の数値計算から、長期的な州島地形変化で重要となる熱帯低気圧による波浪外力の特徴を把握し、長期的な州島地形変化予測に向けた基礎情報を得ることを目的とした。

ツバルは南太平洋上の南緯5°40′～10°47′、東経176°6′～179°50′の範囲に位置し（図-1(a),(b)）9つの環礁から構成されている。ツバルの首都であるフナフチ環礁は南北および東西ともにおよそ20kmの大きさであり、環礁東部にはフナフチ環礁内で最大のフォンガファレ島がある。

2. 台風Gavin

台風Gavinの移動を把握するためにJTWC（Joint Typhoon Warning Center）よりベストトラックを入手した。図-1(a)に入手したベストトラックとフナフチ環礁の位置を示した。台風Gavinは1997年3月2日00:00UTCにフナフチ環礁西側の南太平洋上で発生した。その後東へ移動し、3月5日00:00UTCから3月5日06:00UTCにかけてフナフチ環礁に接近したことが分かった。SPSLCMP（2008）によると、フナフチ環礁での観測を開始した1993年以降に2つの台風がツバル国領内を通過したが、顕著な気圧低下が観測されたのは台風Gavinのみであったと報告している。台風Gavin接近に伴って最大約30cmの高潮が発生したが、小潮であったために浸水などの被害は生じなかったが、高波浪の影響によってラグーン側海岸において激しい侵食が生じたことが報告されている。

1 正会員	博(工)	茨城大学産学官連携研究員
2 正会員	博(工)	茨城大学准教授工学部都市システム工学科
3		茨城県
4 正会員	博(工)	茨城大学准教授広域水圏環境科学教育 研究センター

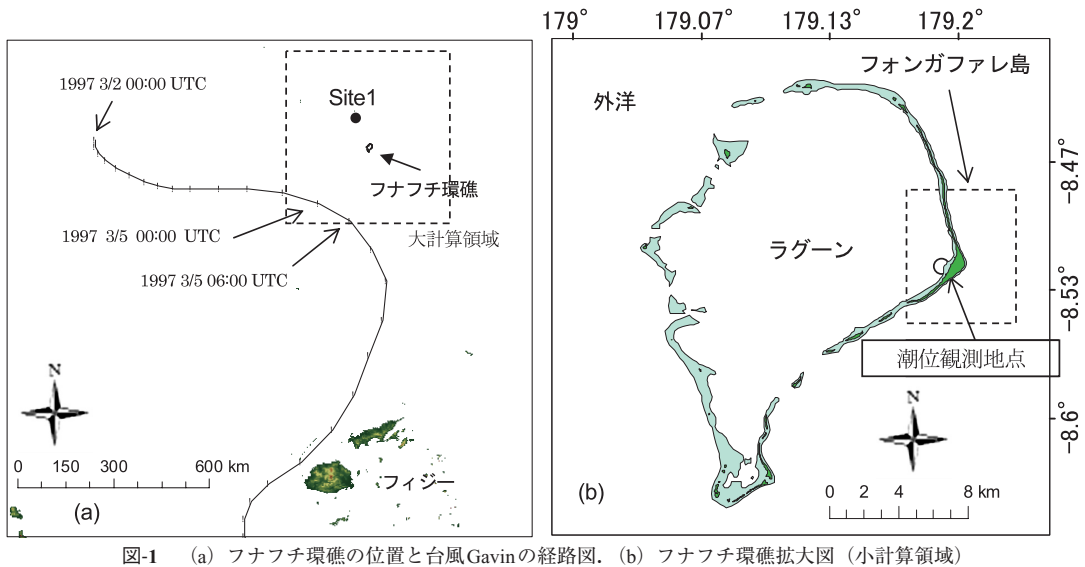


図-1 (a) フナフチ環礁の位置と台風Gavinの経路図、(b) フナフチ環礁拡大図 (小計算領域)

(1) SPSLCMPによる気圧・潮位の観測結果

オーストラリア政府機関が南太平洋潮位・気候監視プロジェクトの一環としてツバル国フォンガファレ島において、1993年3月よりSEAFRAME (Sea Level Fine Resolution Acoustic Measuring Equipment: 潮位高解像度音響測定装置) による観測を行っている。9つのパラメータ (潮位、海水温、気温、気圧、残差、潮位偏差、平均風向、平均風速、最大風速) について、1時間毎の観測データが提供されている。なお、残差は予測潮位と観測潮位の差であり、潮位偏差は気圧効果を考慮した予測潮位と観測潮位の差である。観測位置は図-1 (b) 中に示した。

図-2に台風Gavin接近時の観測潮位・観測気圧を示した。台風Gavinの接近に伴って気圧は減少し、観測潮位と予測潮位との差も大きくなっていることがわかる。これは、天文潮汐以外の要素によって潮位が変化していることを示しており、この場合台風Gavin接近によって引き起こされた高潮によるものであると考えられる。最低気圧995.4hPaは3月5日15:00UTCに記録され、観測潮位と推計潮位の差は最大で30cm程度となった。なお、観測気圧に見られる半日周期の振動は同周期の潮汐変動と対応

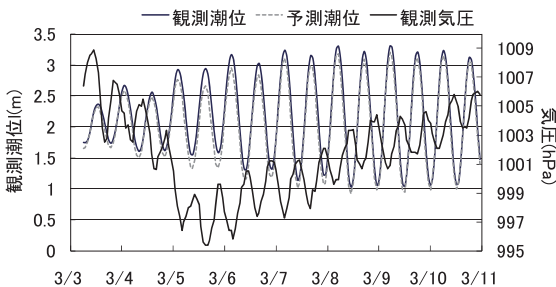


図-2 台風Gavin接近時の観測潮位・観測気圧

していることから、大気潮汐であると考えられる。図-3は同期間の風速、瞬間風速、風向を示しており、風向0 (360) 度が北からの風を示している。これより台風Gavinが接近した3月5日から6日にかけて風速10m/s以上となり、瞬間風速では20m/s以上となっていたことが分かった。こうした風速10m/s以上の風は近年の風速頻度分布 (図-4) からみると極めてまれな状態であり、それによる波浪場も通常とは大きく異なった状態にあったことが推測される。

(2) ECMWF再解析値の外洋波浪

外洋波浪の状況を把握するためにヨーロッパ中期予報センター (ECMWF) より入手した1957年1月1日から2002年8月31日までの再解析データセットERA40を解析した。再解析データは、過去の観測データの収集と品質管理を系統的に行なった上で、同一の数値予報モデルとデータ同化システムのプログラムを使用することで作成され、長時間の均質で整合性のあるデータセットになっている。入手したデータセットには有義波高、平均波向、平均周期、海上10m風速の4項目が6時間毎のデータとして収録されている。収録データの空間解像度は1.5度と

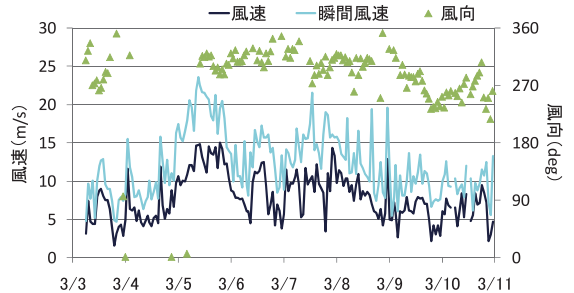


図-3 台風Gavin接近時の風況

っており、本研究ではフナフチ環礁近傍のSite1 (東経178.5°, 南緯7.5°) (図-1 (a)) について着目して解析を行った。

図-5に台風Gavin接近時におけるSite1の有義波高、海上10m風速の再解析値を示した。有義波高は3月5日06:00UTCより急激に増大し、3月6日00:00UTCに最大の4.38mに達した。その後、徐々に波高は下がり、3月10日00:00UTCには台風接近前とほぼ同程度に戻っていた。海上10m風速も同様の傾向となっており、最大で15m/s程度の風速になっていた。図-3に示した風速の観測値と比較すると、風速は再解析値では最大で14m弱となっており、観測値と比較すると若干の過小評価となっているが、風速のピークや変化の傾向は良く再現されており、精度は高いものと考えられた。入手した再解析値データから3月の上位20%平均値、下位20%平均値、全平均値を計算してみるとそれぞれ3.8m, 1.2m, 1.9mとなった。これより、台風Gavin接近時の有義波高は非常に大きな値であり、外洋波浪はおおよそ2倍程度に増大していたことが分かった。

3. 台風Gavin接近時の気象・波浪場の数値計算

これまでの検討から台風Gavin接近時の気象・海象について観測値や再解析値からおおよその現象を把握することができた。しかし、侵食などの空間的に広がりを持つ現象へと議論を発展させるためには、波浪場の検討が必要となる。そこで、台風Gavin接近時の気象場・波浪場の再現計算を試みた。

(1) 気象場・波浪場の計算方法

台風Gavin接近時の気象場の計算には米国国立大気研究センターなどによって開発されたメソ気象モデルWRFを用いた。初期値・境界値はECMWFより提供されている6時間ごとの気圧などの気象データセットをもとに作成した。計算領域は図-1 a), b) に示す領域に関して1段階のネスティングによる1時間毎の計算を行った。計算領域はランベルト格子系とし、空間解像度はそれぞれ0.36分 (水平格子数100×83), 0.03分 (水平格子数101×105) とした。また、鉛直方向には38層設けた。物理過程に関するオプションはNCAR (2010) に従い設定した。なお、台風ボーガスの考慮は行わなかった。

波浪場の算定にはマジュロ環礁の波浪場の算定に適用例があり、波高分布を良く再現できた (佐藤・横木, 2008) 波浪推算モデルSWAN (Booijら, 1999) を用いた。風速場の境界条件には気象場計算で得られた1時間毎の海上10m風速を用い、海象の境界条件には再解析値ERA40を用いた。なお、波浪場の計算領域は気象場計算と同様に設定し、ネスティングによって小領域の海象境界条件を大領域の計算結果より得た。初期波浪場は計算

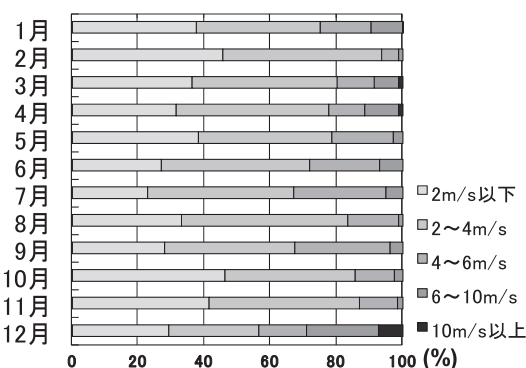


図-4 1993年3月～2008年10月までの風速頻度分布

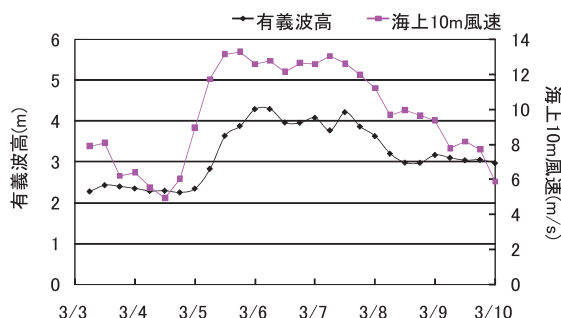


図-5 外洋 (Site 1) の有義波高・海上10m風速の再解析値

開始となる3月3日06:00UTC直前の海象データである3月3日00:00UTCのECMWF再解析値をもとにSWANによる定常計算を行うことで作成した。波浪場計算の空間解像度は両領域ともに気象場計算と同様に設定した。また、方向・周波数分割数は共に32とし、屈折・浅水砕波に加え、風による波の発達項、白波砕波を考慮した。

大領域の水深・地形は1分メッシュの全球データとして提供されているETOPO1を内挿して用いた。また、小領域については、ETOPO1と海図の情報を組み合わせて作成した。ラグーン内では、微妙な海底地形の凹凸が波浪場に影響を及ぼすために、海図に記述されている水深データをデジタル化した後に補間することによって、既存のデータより高空間分解能の10m間隔でデータを構築した。このデータと補間したETOPO1を組み合わせて水深データを作成した。島部陸域部分については、高分解能の衛星写真 (IKONOS: 1m) から汀線データを作成し、GIS上で水深データに重ね合わせることで、計算に用いた水深・地形データを作成した。

(2) 気象場の計算結果

計算結果の再現性の検討には、フナフチ環礁で観測された気圧と同地点における気圧の計算結果との比較から検証した (図-6)。図より台風Gavin接近に伴って気圧が低下する様子がよく再現されていることが分かる。しかし、最低気圧の発生日時に着目してみると、観測気圧は

3月5日15:00UTCに995.4hPaであるのに対して、計算結果では3月6日06:00UTCに996.1hPaとなった。最低気圧のピーク位置のずれや台風強度の過小評価は、境界条件として用いたERA40は空間解像度が粗く、台風中心位置や気圧分布が正確に含まれていないことが原因と考えられる。このため、台風ボーガスの組み込み等によって今後改善可能であると予想される。若干の誤差はあるものの、台風Gavin接近に伴う気圧低下の傾向をよく再現できたと判断し波浪場の算定を行った。

(3) 波浪場の計算結果

図-7は外洋波浪のECMWF再解析値が最も高くなった1997年3月6日00:00UTCにおける波浪場の計算結果を示している。波高分布より環礁北東側から南西側に向かって高波浪が来襲し、有義波高は環礁北東側の外洋でおよそ3.8m程度まで上昇する結果となった。また、ラグーン内は環礁北部のパッセージから外洋の高波浪が進入しており、計算結果から1.5m程度の有義波高となっていたものと推測された。風向きも波向きと同様に北東から南西向きとなっており、半閉鎖的なラグーンでの風による波の発達によって北部よりも南部で高波浪となっていることが分かった。これより、ラグーン内波浪はパッセージの位置と外洋波浪の向きおよび半閉鎖的なラグーン内での有効吹送距離によって大きく変化すると予想された。

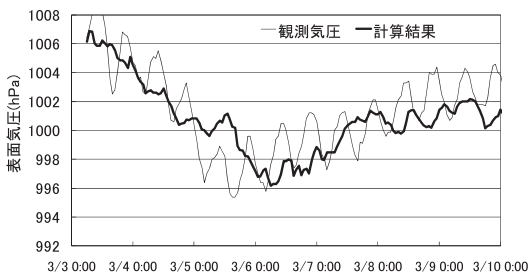


図-6 表面気圧の観測値と計算結果

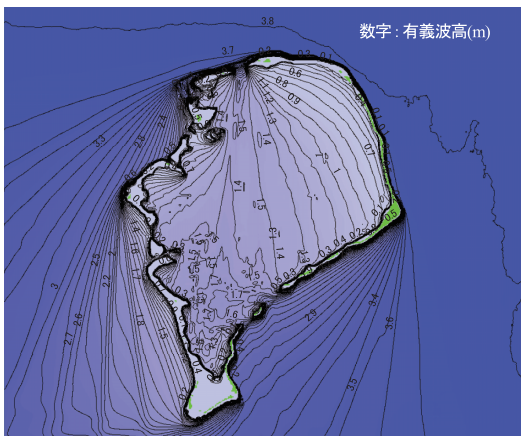


図-7 1997年3月6日00:00UTCの波浪場計算結果。図中のコンターラインは有義波高 (m) を示す。

(4) 3月の平均的な波浪場との比較

台風Gavin接近時の波浪場と平均的な波浪場との相違を把握するために、3月の平均波浪場との比較を行った。計算領域や計算解像度等の条件は前述と同様とし、風速風向はSPSLCMPの観測データより計算された3月の平均風速および風向を与えた。波浪諸元は再解析値ERA40より3月の平均有義波高、平均波向き、平均周期を計算し、境界条件として与えた。

図-8(a)に3月の平均波浪場の計算結果を示した。等高線の分布より北東方向からの波浪が環礁に入射していることがわかる。図-7の台風接近時の波浪場と比較すると、外洋波浪の入射波向きはほぼ同様の結果となったが、台風接近時の外洋波高は3.8mであるのに対し、3月平均では2m程度であり、およそ2倍の外洋波高となっていた。ラグーン内波高についても同様の傾向が見られ、3月の平均的な波浪場と比較しておよそ2倍程度の有義波高となっていたことが計算された。図-8(b)は図-8(a)のフォンガファレ島周辺を拡大したものを示し、図-8(c)は台風接近時の3月6日00:00UTCの同領域の拡大図を示している。両図より、台風来襲時においてはフォンガファレ島沿岸においても極端に大きな波高分布となっており、外洋側ではリーフエッジ付近で1.5m程度であるのに対して、その2倍弱程度の波高分布となった。ラグーン内もほぼ同様の傾向が見て取れ、SPSLCMP観測地点付近では3月平均波浪場では0.2mであるのに対し、台風接近時には0.5m程度に増加していた結果となった。

地形変化への影響を推測するために、波浪エネルギーフラックスを式(1)より求め検討を行った。

$$P = ECg = \frac{1}{8} \rho g H^2 \cdot Cg \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 ρ :海水密度(=1030 kg/m³)、 g :重力加速度(=9.8 m/s²)、 H :波高(m)、 Cg :群速度(ここでは極浅海波を仮定し、 $\sqrt{gh}$ より求めた)である。なお、年間の総エネルギーフラックスについても検討するために、年平均された境界条件による波浪場算定も合わせて行った。台風Gavin接近期間の波浪エネルギーフラックスは3月5日00:00UTCから3月8日00:00UTCの3日間の累積とした。比較の対象地点はフォンガファレ島で最も州島幅が狭くなるコーズウェイのラグーン側、外洋側とした(図-8(b))。ラグーン側においては、年間の総エネルギーフラックスはおよそ 2.6×10^{10} (kg・m/s²/year)となり、3月の月間総エネルギーフラックスは 1.3×10^9 (kg・m/s²/month)であった。台風接近期間の総エネルギーフラックスは 1.8×10^8 (kg・m/s²/3 days)と計算され、これより年間の総エネルギーフラックスの約0.7%、3月の月間総エネルギーフラックスの約14%に当たる量が3日間の間に来襲したことになる。一方、外洋側については年

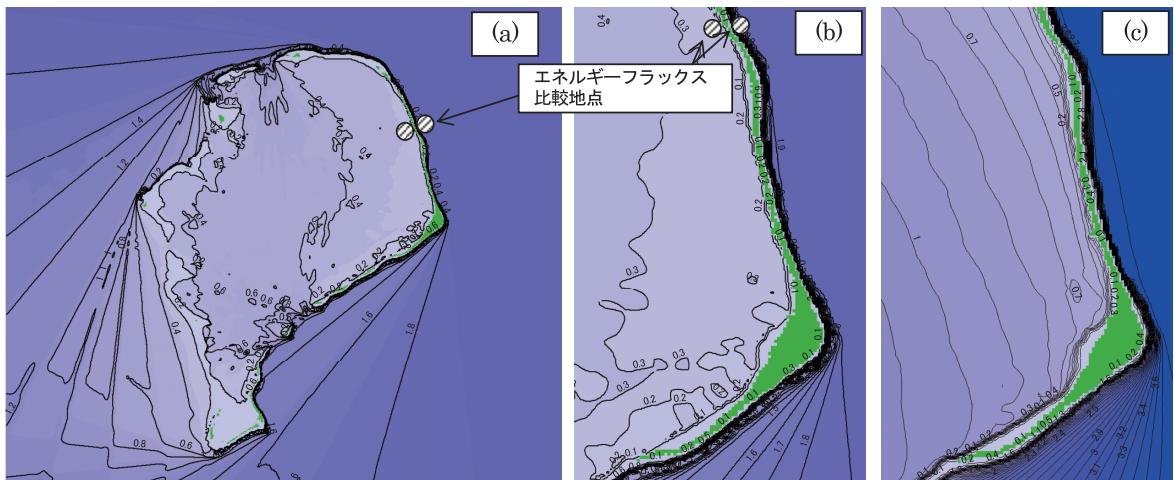


図-8 (a) 3月平均波浪場の計算結果. (b) 3月平均波浪条件および (c) 3月6日00:00UTCのフォンガファレ島周辺の波浪場. (両図ともにコンターラインは有義波高 (m) を示す.)

間の総エネルギーフラックスはおよそ 6.5×10^{11} (kg · m/s²/year), 3月の月間総エネルギーフラックスは 6.2×10^{10} (kg · m/s²/month) となった. 台風接近期間では 1.0×10^{10} (kg · m/s²/3 days) となり, 年間の総エネルギーフラックスの約1.5%, 3月の月間総エネルギーフラックスの16%を占めるものとなった. これより, 台風Gavin接近時には非常に大きな漂砂移動が発生したことが予想され, それによってSPSLCMP (2008) で報告されたような激しい侵食が生じたものと予想された. 今後は漂砂量に関して具体的な検討を進める予定である.

4. 結論

本研究は1997年3月にフナフチ環礁に接近した台風Gavinに着目し, 気象場・波浪場の数値計算を行った. これより以下の結論を得た.

- ・ WRF・SWANを用いた数値計算よりフナフチ環礁で観測された台風接近時の気圧変化の傾向を精度良く再現することができた. しかし, 最低気圧のピークや強度に関しては誤差が見られ, 台風ボーガスの考慮によって改善できると予想された.
- ・ 台風Gavin接近時にはラグーン内波浪場は全域で高波浪となり, 特にラグーン南部において有義波高1.5m程度となった. ラグーン内波浪場は外洋の高波浪の進入口となるパッセージの位置とラグーン内での有効吹送距離が重要であることが分かった.
- ・ 台風Gavin接近時の波浪場は3月平均波浪場とは極端に異なった状態となり, 外洋波高・ラグーン内波高ともにおよそ2倍となっていたことが分かった.
- ・ フォンガファレ島北部のコーズウェイでは, 台風Gavin接近時の3日間 (3月5日～8日) の総波浪エネル

ギーフラックスは, 年間総波浪エネルギーフラックスの約0.7%を占め, 外洋側では1.5%であったと推測された.

本研究より, 暴浪時も含めたフナフチ環礁の地形変化予測に向けた基礎的な知見が得られた. 今後は具体的な地形変化量に関する検討を行っていく予定である.

謝辞: 本研究は日本学術振興会特別研究員奨励費によって行われた成果の一部である. また, 本研究の一部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, および科学技術振興調整費 (戦略的拠点育成) の事業のフラッグシッププロジェクト (茨城大学担当) の支援を受けて行われたものである. ここに記して深甚なる謝意を表す.

参 考 文 献

- 佐藤大作, 横木裕宗 (2008): 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.
- 佐藤大作, 横木裕宗 (2009): 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.
- 佐藤大作, 横木裕宗, 櫻井 勝, 桑原祐史 (2010): ツバル国フナフチ環礁の長期波浪環境変動解析, 地球環境研究論文集, Vol. 18. (印刷中)
- Booij, N.R., C. Ris and L.H. Holthuijsen (1999): A third-generation wave model for coastal regions 1. Model description and validation, Journal of Geophysical Research, Vol.104, No.C4, pp.7649-pp.7666.
- Maragos, J.E., G.B.K. Baines and P.J. Beveridge (1973): Tropical cyclone creates a new land formation on Funafuti atoll. Science 181, pp.1161-1164.
- NCAR (2010): WRF-ARW V3 User's Guide, pp.5-1 - 5.53.
- SPSLCMP (2008): Pacific Country Report Tuvalu, pp.1-35.