

環礁州島における地形維持機構とラグーン内波浪場の関係 に関する現地調査

横 木 裕 宗* ・ 佐 藤 大 作** ・ 山 野 博 哉***
島 崎 彦 人**** ・ 安 藤 創 也***** ・ 南 陽 介**
高 木 洋***** ・ 茅 根 創***** ・ Albon Ishoda*****

環礁州島における地形維持メカニズムを明らかにすることを目的として、環礁州島の海岸地形変化に及ぼす波浪場の影響を、現地調査と数値計算により明らかにした。マーシャル諸島マジュロ環礁にて現地調査を行い、地形特性の把握と気象・海象データの収集を行った。そして、ラグーン側海岸の過去の地形変化と風波およびうねり性波浪による波浪場との関係を数値計算により検討した。その結果、過去の地形変化に対応するのは風波による沿岸漂砂であるとの結果を得た。

1. 序 論

環礁州島とは環状のサンゴ礁（環礁）上に形成された細長い島をいう。太平洋上には環礁が多く分布しており、環礁州島で形成された小島嶼国が数多く見られる。これらの島は標高が低く、しかも土砂を継続的に供給する河川なども存在しないため、海岸の底質はサンゴ礁海域の有孔虫の遺骸やサンゴや貝殻の破片などで構成されている（サンゴ礁研究グループ, 1990）。

また、一般にサンゴ礁海岸では、波浪や流れによる岸沖・沿岸漂砂による侵食・堆積過程に加えて、リーフエッジからのサンゴの生物生産による土砂供給過程が存在する。これらの相互関係は複雑で未だ明らかにされていない。海面上昇に代表されるような将来の環境変動に対する適応策を検討するために、環礁州島の地形維持機構を明らかにすることは非常に重要である。

そこで本研究では、これらの過程のうち環礁州島海岸における波浪場と海岸線変化の関係を明らかにするために、現地調査および数値計算を行った。研究対象州島はマーシャル諸島共和国の首都であるマジュロ環礁（北緯7度6分、東経171度22分、図-1）とした。現地調査では海岸視察、地形の簡易測量の他、数地点で流速計を設置し流速の連続観測も行ったのでその結果も紹介する。

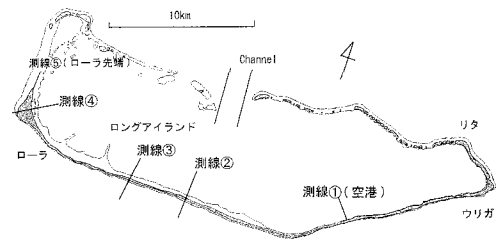


図-1 マジュロ環礁

2. マジュロ環礁の海岸調査

2003年9月14日～26日にマジュロ環礁にて現地調査を行った。マジュロ環礁の概略図を図-1に示す。環礁の大きさは東西40km、南北9.7kmで、中央のラグーン（内海）の面積は324km²、平均水深は46mである。図に示すように北側のチャンネルを除いて中央のラグーンをサンゴ礁が囲む形となっている（Xue, 2001）。

図-1の東端のリタから西端のローラまではロングアイランドを通して一連なりとなっており、北側の切れ切れの州島が並んでいるのは対照的である。リタ、ウリガはマジュロの中で最も人口密度が高く都市化された地域であり、海岸には港が建設されている。一方ローラはあまり都市化されておらず昔ながらの生活を営んでいるであった。

リタからローラに向かって主にラグーン側の海岸を視察したところ、リタ、ウリガ周辺の海岸は、ほとんど全面に直立護岸が建設されており、所々で船が停泊しており、砂浜はほとんど見られなかったが、ロングアイランドからローラに近づくにつれて砂浜がみられるようになり、その幅や砂の量も増加していくのが分かった。

図-1の測線①～⑤の地点で海岸地形の簡易測量を行った。この測量はラグーン・外洋側海岸とも汀線付近からリーフエッジ付近までのリーフ上で行った。その結果、ラグーン・外洋側共に水深が1m以下のリーフが汀線から約200～400m沖まで広がっており、リーフエ

* 正 会 員	博(工)	茨城大学助教授 広域水圏環境科学教育研究センター
** 学生会員		茨城大学大学院理工学研究科都市システム工学専攻
***	博(理)	(独法)国立環境研究所主任研究員 社会環境システム研究領域情報解析研究室
****	修(工)	(独法)国立環境研究所アシスタントフェロー 社会環境システム研究領域情報解析研究室
*****		東光コンサルタンツ株式会社
*****		芙蓉海洋開発株式会社 環境システムセンター
*****	理 博	東京大学助教授 大学院理学系研究科地球惑星科学専攻
*****		Coastal Management Officer, Republic of the Marshall Islands Environmental Protection Authority

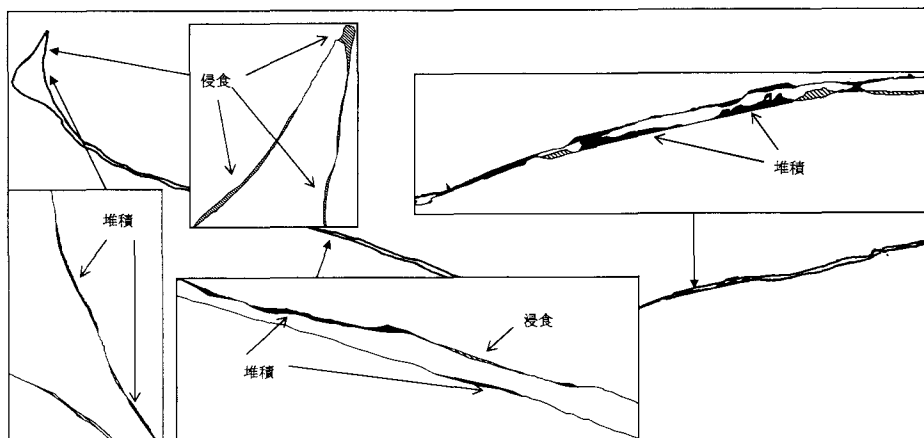


図-2 ロングアイランドとローラでの侵食・堆積域の検出 (1944年～2000年)

ジから急激に深くなるという地形が得られた。また、ラグーン側海岸には砂浜およびリーフ上海底に砂質の底質やサンゴが見られたが、オーシャン側海岸にはほとんど砂は見られなかった。このことからラグーン側海岸では波浪による底質移動が生じていると考えた。

従来、マジュロ環礁をはじめとする太平洋島嶼国の環境変動に関する研究はSOPAC (South Pacific Applied Geoscience Commission) が中心となって行われてきている。例えばXue(2001)によると、マジュロでは第2次世界大戦後50年間に激しい海岸侵食に見舞われており、外洋、ラグーン側海岸とも汀線が10 m程度侵食しているとある。特にウリガのラグーン側海岸やローラ先端では激しい侵食が見られるとある。海岸侵食の要因として、護岸などの海岸線付近の人工構造物の建設やリーフ上の砂利採取などがあげられており、それ以外に州島間を結ぶcausewayの建設による外洋・ラグーン間の海水の往復流がなくなったことも挙げられている。また、ロングアイランドの海岸ではラグーン・外洋側ともウリガからローラに向かう沿岸漂砂が発生しているとある。

3. 海岸地形変化の検出

マジュロにおける過去数十年間にわたる長期の海岸地形変化(汀線変化)を精度よく検出するため、本研究では地図(1944年測量)、空中写真(1983年撮影)、衛星画像(IKONOS, 2000年10月撮影)を入手し、これらの画像から汀線位置を検出し、GIS上で比較することにより、各年間の汀線変化を検出した。

図-2に2000年のIKONOS画像と1944年の地図を比較して侵食・堆積域を検出した結果を示した。この図からローラ先端付近に侵食域が見られ、ローラのラグー

ン側海岸で堆積域が見られる。ロングアイランドの海岸ではラグーン・外洋側海岸とも侵食・堆積域が点在しており、特に顕著な侵食・堆積域は検出されなかった。なお図-2の右半分の海岸に堆積域が多く見られるのは、causeway建設のための埋め立てのよるものと考えられる(Xue, 2001)。

地図(1944年)と空中写真(1983年)、空中写真(1983年)と衛星画像(2000年)の比較も行ったが、これらからも顕著な侵食・堆積域は検出されなかった。

図-2からは、数十年間の地形変化が州島のスケールと比較してそれほど大きくないように見えるが、それぞれの画像の幾何補正や汀線検出の際に生じる誤差を考慮すると断定するのは難しい。

4. ラグーン内波浪場の計算

ラグーン内に発生する波浪場によって上で述べた地形変化や漂砂移動が生じるのかを検討するために、波浪場を数値モデルを用いて推定した。本研究では、波浪場として、貿易風によってラグーン内で発達する風波によるものと、マジュロに来襲したうねり性波浪が北側のチャネルから入射し、ラグーン内で回折することによって発生するものの2種類を想定し、それぞれ検討を行った。

(1) マジュロ周辺の海象データ

まず、波浪場を計算するのに必要な、マジュロ周辺での風および波浪データの解析を行った。

図-3, 4はマジュロの測候所で観測された1時間毎の風速、風向データを半日毎にプロットしたものである。2003年のデータは9月までしか入手できなかったのですが、年間の推移を示すために2002年のデータも示した。風向データの方角は北よりの風を0度と表示し、角度を時計

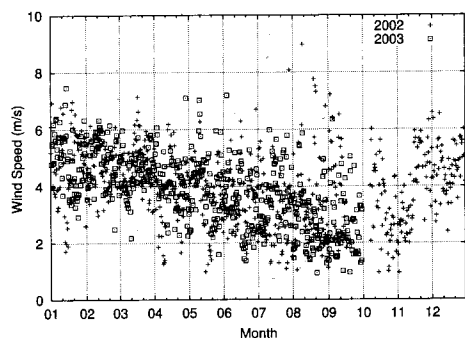


図-3 マジュロでの風速

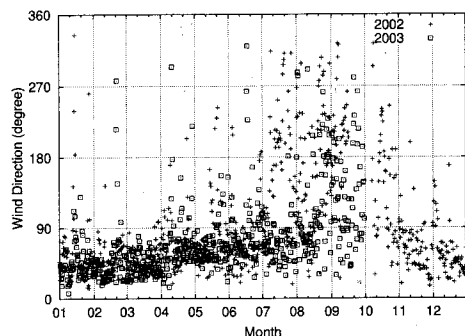


図-4 マジュロでの風向

回りに測っている。これらの図から、1月を中心とする冬季では北東ないし東よりの風速4~5 m/sの貿易風が卓越しており、その後9月を中心とする夏季では貿易風が弱まり、卓越風向が見られなくなっていることが分かる。

図-5, 6はECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) から入手した1990年から1999年までのマジュロ周辺で観測された風波およびうねり波浪の有義波高、平均波向を月別に集計して示したものである。これらから、貿易風が卓越する冬季には、風波・うねり波浪共に高くなり、風波は南から、うねりは北東から来襲していることが分かる。一方9月を中心とする夏季には、風波は弱まり、うねり波浪の波高も減少している。

(2) SMB法による波高・波向の推定

ラグーン内で発達する風波はSMB法を用いて推定した(例えば、海岸工学委員会, 2000)。図-3よりマジュロの風速の年間平均値が約4 m/sなので、SMB法に用いた海上風速は、6 m/s, 4 m/s, 2 m/sの3種類とした。また図-4より貿易風が卓越する期間の風向はほぼ北東よりなので、計算では北東を基準として、東、北東、北の3方向を用いた。それぞれの風向について、ロングアイランドのラグーン側海岸の各地点における有効吹送距離は地図から求めた。

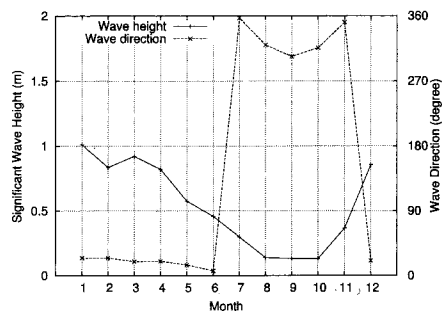


図-5 マジュロ周辺での風波の波高・波向

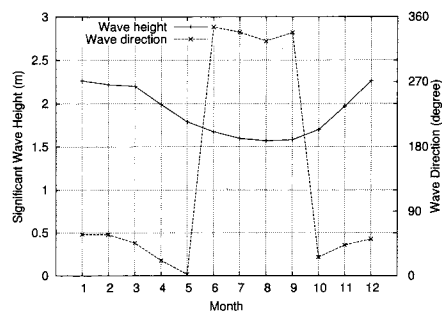


図-6 マジュロ周辺でのうねりの波高・波向

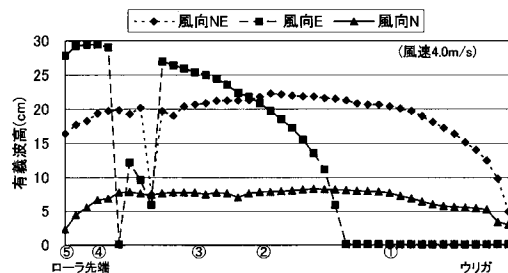


図-7 SMB法による有義波高分布 (ラグーン側海岸)

図-7にSMB法によるラグーン側海岸の有義波高分布の計算結果を示す。図は海上風速を4 m/sとして、3種類の風向に対して計算した結果である。横軸は右から左に向かってウリガからローラ先端にかけてのラグーン側海岸を表しており、軸上の番号は図-1の測線番号に対応している。縦軸はその海岸に来襲する有義波高を示している。この図から、ローラの海岸では東よりの風のとき、最も波高が高くなり、北東、北の順で波高が低くなっていくが、ウリガ付近の海岸では環礁形状の影響で遮蔽域になり、北東の風で波高が最も高くなることが分かる。なお、地点④よりやや東(右)側で、東よりおよび北東よりの風向に対する波高が減少しているのは、その付近で極浅いリーフが岬のように伸びており、局所的な遮蔽域を形成しているためである。

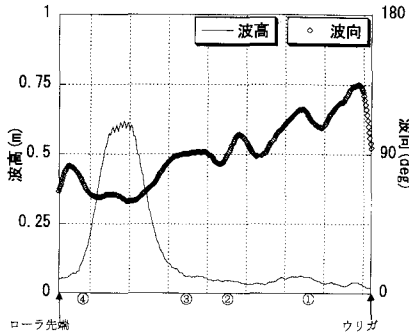


図-8 ヘルムホルツ方程式モデルによる回折波の計算結果 (ラグーン側海岸)

(3) ラグーンでの回折による波高・波向の推定

マジュロ環礁のラグーンは平均水深が46 mと深く、海岸線付近は切り立ったリーフ地形となっている。したがって北側チャンネルを通じての入射波がラグーン内を進行する際には、回折変形が支配的である。そこで、境界積分法を用いてヘルムホルツ方程式を解くことにより、チャンネルを通じて入射してくる波浪によるロングアイランド海岸の波高分布を計算した。計算にはLee (1971)の方法を用い、計算方法は土木学会 (1994)を参考にした。

本研究では、計算の安定性を考慮し境界要素の長さを入射境界(北側チャンネル)で500 m、ラグーン内海岸で1000 mとした。そのため、ラグーン内海岸で波向分布を精度良く求めるために、入射波の周期を実際より長くせざるを得なかった。入射波の条件は、図-6を参考にし、波高1 m、周期20 sとし、波向を東、北東、北の3種類とした。また、ラグーン内海岸の境界条件は、州島の有無にかかわらず閉めきり条件とし、北側チャンネル以外の境界からの入射波は存在しないものとした。

図-8に計算結果の一例(入射波向:北東)を示す。図の横軸は右から左にウリガからローラに向かうラグーン側海岸を示しており、縦軸はその海岸における波高、波向きを示している。波向きは汀線に直角に入射する向きを90度とし、それより小さい角度はローラ方向へ、大きい角度はウリガ方向へ向かう波を示している。この図から、ローラ先端よりやや東(左)側に波高の大きな地点が見られるが、これは入射境界がこの付近のちょうど対面に位置するためである。また、波向はローラ付近ではローラ先端に向かう方向を示しているが、ウリガ付近では逆向きとなっている。

(4) 波浪のエネルギーフラックスの分布

これまで求めたラグーン内で発達する風波と外洋から入射したうねりによるロングアイランドの海岸の波高、波向き分布からエネルギーフラックスの沿岸方向成分を

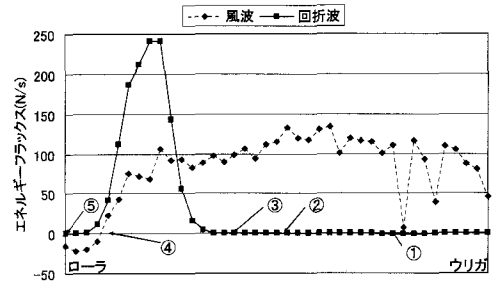


図-9 風波と回折波によるエネルギーフラックス分布 (ラグーン側海岸)

計算したのが図-9である。風波には、風速6 m/s、風向は北東による計算結果を、回折波には入射波向が北東の結果を用いた。図の横軸はウリガからローラ先端までの海岸の位置を、縦軸にはその海岸での波浪エネルギーフラックスの沿岸方向成分をウリガからローラへ向かう方向を正として示している。

図-9から、回折波によって、測線③付近から④付近にかけてローラへ向かうエネルギーフラックスが分布していることがわかる。回折波による波高は風波によるものより大きい、その影響を受けるのはチャンネルの対面にある海岸に限られるといえる。一方、風波によるエネルギーフラックス分布を見ると、測線④付近で方向が反転しており、これは図-2のローラのラグーン側海岸の堆積部分に対応しているとも考えられる。

以上のことから、沿岸漂砂に対する効果では回折波の方が風波より大きい、侵食・堆積域の分布と比較すると、地形変化に影響を与えるという意味では風波による波浪が重要であるという結果を得た。しかし、これは地形や境界条件などで大胆な近似を行った結果なので、今後さらに詳細な検討が必要となる。

5. 汀線付近の流速観測

現地調査では、ロングアイランドからローラにかけてのラグーン側海岸付近での流況を把握するために、図-1に示した測線①から⑤において、流速計を設置して汀線付近の平均流速と平均流向の測定も行った。

使用した流速計はアレック電子(株)製の自記式電磁流速計である。これを鋼材で作成した簡易架台(高さ:約50 cm)に固定し海底に設置した。設置地点は、どの測線においても汀線から約150~200 m沖へ離れたリーフエッジ付近とした。設置地点の平均水面は2.3 m程度であった。

図-10, 11に、測線⑤(ローラ先端)および測線③での底面流速と流向を示す。流速データは10分間隔で1分間平均値が記録された。流向は真北へ向かう角度を0度

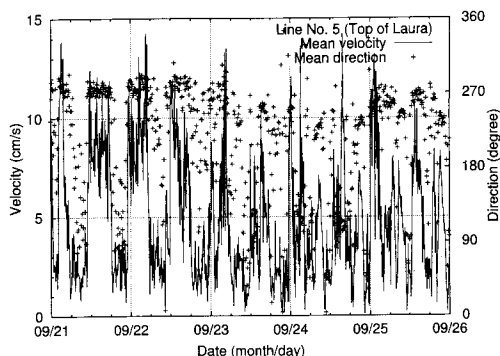


図-10 測線⑤（ローラ先端）での底面流速

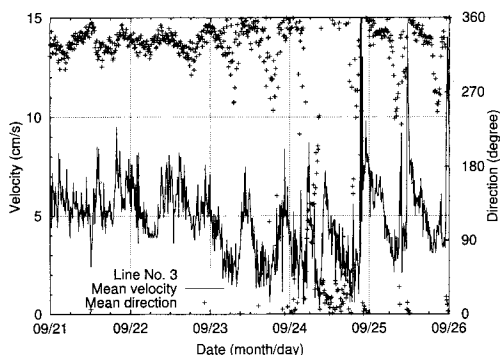


図-11 測線③での底面流速

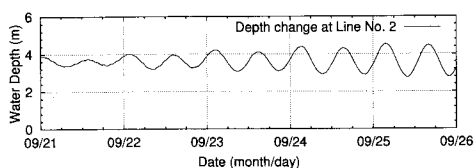


図-12 測線②での水位変動

として、時計回りを正方向として記録されている。図-12には測線②で設置した圧力計から換算した水位データ（潮位変動）を示した。

図-10, 11を比較すると、ローラ先端では満潮時にラグーンから外洋へ向かう比較的大きな流速の流れが発生していることがわかる。また、干潮時には流速は小さいものの外洋からラグーンへ流れていることがわかる。このことから州島の切れ目のリーフ上では潮位変動によって海水がラグーンと外洋を往復していることがわかる。

一方、ロングアイランドのラグーン側海岸では、図-11に示すように流速・流向とも潮位変動による影響はあまり現れていない。これは他の地点の観測結果も同様であった。図-11では流向が岸から沖に向かう方向でほぼ一定しており、潮位偏差が大きくなる9月24日以降に潮

位変動の周期で流速や流向が変化しているようにも見えるが、ローラ先端ほど明確な変化ではない。

マジュロのラグーン内の流れ場に関しては、Krainesら（1999）がラグーン・外洋間の海水交換に関する現地観測と数値計算を行っており、海水交換に影響を与えるのは潮位変動よりもむしろ風応力やラディエーション応力であることを明らかにしている。今回の現地調査では9月という比較的風の弱い時期の流速データしか得られなかったため、ラグーン内の支配的な流れは十分反映されていないと考えられる。

6. 結 論

本研究では、マーシャル諸島マジュロ環礁を対象に、波浪場と地形変化との関係を明らかにすることを目的として、現地調査および数値計算などを行った。その結果、以下のことが明らかとなった。

- 衛星画像や地図を比較することにより、過去約50年間でローラ先端で侵食、やや東より海岸で堆積していることが確認された。
- 波浪場の計算から、ロングアイランドのラグーン側海岸では、外洋からのうねりによる沿岸漂砂の方が風波によるものより大きい、エネルギーフラックスの分布をみるとむしろ風波の方が地形変化と対応している。

今後はサンゴの生物生産量の見積もりを行い、波浪による侵食・堆積速度と合わせて、長期的な州島の海岸地形維持モデルを構築していく予定である。

謝辞：本研究で使用したIKONOS画像はSOPACから提供して頂いた。また本研究は、環境省地球環境研究推進費（課題No. B-15、代表：茅根創）による研究プロジェクトの一環として実施された。さらに研究の一部は科学研究費補助金（基盤研究（A1）、課題No. 14209003、代表：三村信男茨城大学教授）による援助を受けて実施されたものである。ここに記して深甚なる謝意を表します。

参 考 文 献

- 海岸工学委員会 海岸施設設計便覧小委員会（2000）： 海岸施設設計便覧 [2000年版]，土木学会，pp. 27-28.
- 海岸工学委員会 研究現況レビュー小委員会（1994）： 海岸波動，土木学会，pp. 27-37.
- サンゴ礁研究グループ（1990）： 熱い自然 サンゴ礁の環境誌，古今書院，372 p.
- Kraines, S. B., A. Suzuki, T. Yanagi, M. Isobe, X. Guo, and H. Komiyama (1999): Rapid water exchange between the lagoon and the open ocean at Majuro Atoll due to wind, waves, and tide, *Journal of Geophysical Research*, vol. 104, no. C7, pp. 15, 635-15, 653.
- Lee, J. J. (1971): Wave induced oscillations in harbours of arbitrary geometry, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 45, pp. 375-394.
- Xue, C. (2001): Coastal erosion and management of Majuro Atoll, Marshall Islands, *Journal of Coastal Research*, vol. 17, no. 4, pp. 909-918.