

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

佐藤大作¹・横木裕宗²・藤田和彦³・桑原祐史⁴
山野博哉⁵・島崎彦人⁶・茅根 創⁷・渡邊真砂夫⁸

マーシャル諸島マジュロ環礁では、近年沿岸環境の変化に伴うと考えられる海岸侵食が問題となっており、また、将来の海面上昇に対しての国土維持が大きな課題となっている。本研究では海面上昇前と上昇後の波浪場の算定から得られた沿岸方向エネルギーフラックスと現地調査で得られた有孔虫による底質供給量から土砂移動量の算定を行い、その結果から土砂堆積量ポテンシャルの変化を定量的に明らかにした。さらに、2005 年 8 月に行った現地調査結果との比較を行った結果、Laura 地域において実際の地形変化傾向と計算結果の間に相違が見られ、これは流れ場の特性の違いによるものであると考えられた。また、流動特性の他にも人為的な土地利用の改変が地形維持に大きく関係していることが予想された。

1. 序 論

南太平洋をはじめ世界には数多くの環礁州島が存在する。環礁州島とは環状のサンゴ礁上に低平な州島が形成されたもので、中央部には外洋と比べ水深の浅いラグーンが存在している。特徴として河川が無いこと、利用可能な土地資源が極端に限られていることなどが挙げられる。

近年、環礁州島では沿岸域の人為的な改変に伴うと考えられる海岸侵食が問題となっている。また、海面上昇に対する脆弱性も非常に高く、そのため、波浪などの物理環境の変化に伴う地形変化の把握と国土を維持するための対策が急務とされている。Xue (2001) は、マーシャル諸島マジュロ環礁において、州島の都市化が進むにつれてリーフの掘削や航路の建設が盛んに行われるようになり、漂砂移動が変化することに伴う海岸侵食が生じていることを明らかにした。また、横木ら (2004) はマーシャル諸島マジュロ環礁において現地調査と波浪場の数値計算を行った。その中で、マジュロ環礁における底質の移動を回折波と風波によるものと考え、それぞれのエネルギーフラックスを用いて漂砂移動の方向が推定された。しかし、漂砂量や海面上昇による漂砂移動への影響について定量的な検討を行うまでは至っていない。

そこで本研究ではマーシャル諸島マジュロ環礁(図-1)を対象とし、環礁周辺も含む広い領域において、

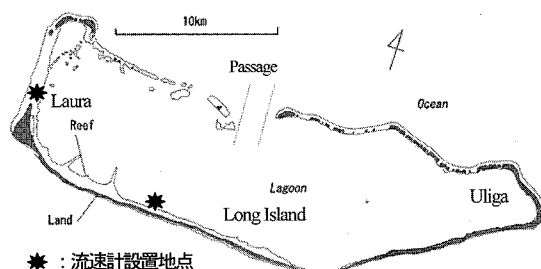


図-1 マーシャル諸島マジュロ環礁

浅海域にも適用できる第三世代波浪推算モデル (SWAN) を用いて波浪場の算定を行い、得られた波浪エネルギーフラックスと堆積物生産量を用いて州島の地形維持過程をシミュレーションすることを目的とした。また、海面上昇を想定し海面を 0.88 m 上昇させた場合の計算も行った。これらから海面上昇後において波浪による地形変化のポテンシャルがどのように変化するかを定量的に明らかにすることを試みた。さらに計算結果と 2005 年 8 月に行った現地調査結果との比較を行った。

2. マジュロ環礁における波浪場の算定

(1) 計算方法および計算条件

本研究では底質の移動が波浪による沿岸方向エネルギーフラックスによって生じるものであると仮定した。波浪場の計算は SWAN の最新版である SWAN40.41 を用いた。これは、従来の屈折や浅水変形・風による波の発達の効果に加えて、擬似的ではあるが、回折の効果も考慮されている (Booij ら, 2004)。計算では ECMWF (European Center for Medium-Range Weather Forecasts) より入手した 2002 年と 2003 年のうねりの有義波高および平均波向きを月平均した値を用い、JONSWAP 型スペクトルを境界条件に与えた。風の場については現地測候所より入手した 2004 年の風速・風向データを月平均したものを領域全体で用いた。計算領域は図-2

- | | | | |
|---|------|------|--|
| 1 | 学生会員 | 修(工) | 茨城大学大学院理工学研究科環境機能科学専攻 |
| 2 | 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 |
| 3 | | 博(理) | 琉球大学助手 理学部物質地球科学科 |
| 4 | 正会員 | 博(工) | 茨城大学講師 工学部都市システム工学科 |
| 5 | | 博(理) | (独法) 国立環境研究所主任研究員 地球環境研究センター衛星観測研究室 |
| 6 | | 修(工) | (独法) 国立環境研究所ポスドクフェロー 地球環境研究センター地球環境データベース推進室 |
| 7 | | 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 |
| 8 | | | (株) 芙蓉海洋開発 環境システムセンター 技術部係長 |

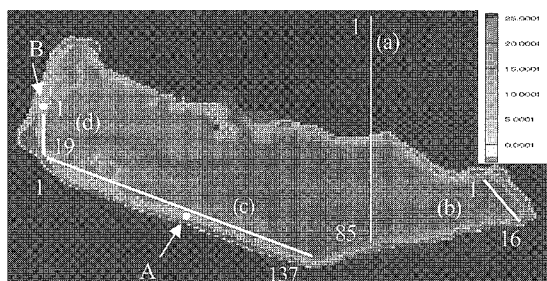


図-2 計算領域

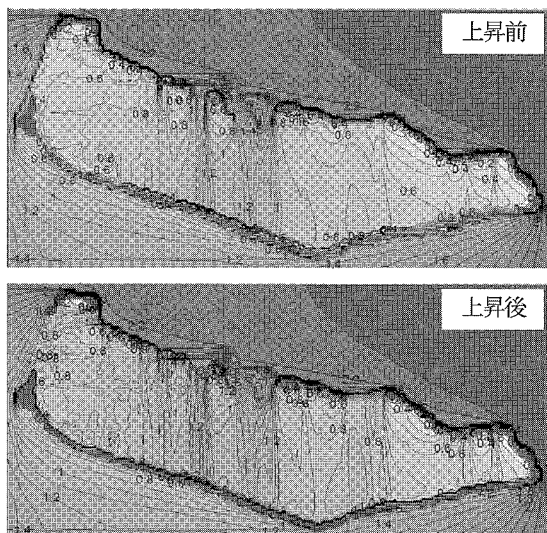


図-3 海面上昇前と上昇後の波浪場計算結果 (1月)

に示す $30\text{ km} \times 45\text{ km}$ の領域とし、計算メッシュは $240\text{ m} \times 240\text{ m}$ の正方格子とした。また、周波数分割数は 35、波向き分割数は 35 とした。水深のデータは計算メッシュ毎に該当する水深を海図から読み取り入力し、州島のメッシュは計算されないように設定した。以上の条件のもと、各月における波浪場の算定を 12ヶ月分を行った。

(2) 計算結果の考察

図-3 は 1 月の波浪場の計算結果について海面上昇前(上)と上昇後(下)を表示したものである。マジュロ環礁では 1 月は北東から吹く貿易風が強い時期であり、それに伴い外洋の波浪も同様の方向から来襲している。両計算結果共に環礁北部の Passage から進入する波浪が顕著に見てとれ、その対岸に位置する Long Island の中央付近では他と比較して大きな波高であることがわかる。また、両者の計算結果を比較してみると、海面上昇前では外洋の波浪がラグーン内へと大きく進入するのは環礁北部の Passage に限定されていることがわかる。その他の州島の無い部分ではリーフの効果によってエネルギーは逸散し、ラグーン内へはほとんど進入していない。ところが海面上昇後の計算結果を見てみると、北部

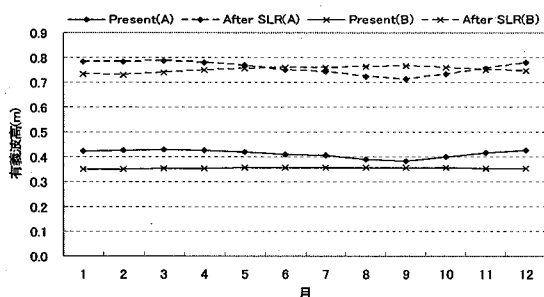


図-4 図-2 中の 2 点 (A, B) における各月の波高変化

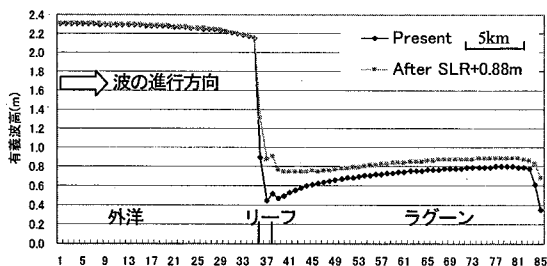


図-5 海面上昇前と上昇後の波高の計算結果 (断面(a)1月)

の Passage だけでなく、州島の無いリーフ上を外洋の波浪が通過し、進入していることがわかる。また、そのような州島の無いリーフの対面に位置する州島沿岸部では到達する波高が大きく変化していることがわかる。

図-4 は図-2 中の A 点および B 点における各月の有義波高の計算結果を示している。外洋の波浪の影響を大きく受ける A 点では現状で B 点よりも高い波高となったが、海面上昇後では 6~10 月に B 点の波高が上回った。これは B 点が周囲を広大なリーフに囲まれているため、海面上昇によってリーフ上の水深が増加し、リーフエッジでの碎波減衰に変化が生じたことが原因であると考えられる。

図-5 は図-2 中の (a) の断面における 1 月の有義波高の計算結果を示したものである。図より海面上昇前後で外洋ではほとんど波高は変化せずリーフに入射している。しかし、海面上昇後になるとリーフ上では十分碎波減衰が生じず、波高が大きいままラグーン内に進入している。その後、ラグーン内では風による波の発達効果によって徐々に波高を増大させ、また、沿岸部に近づく wave set-up の効果も加わり、波浪エネルギーは増大を続け、碎波に至っている。最終的に州島メッシュ (図-4No. 85) に達した時の波高は海面上昇前に 0.36 m であったが、海面上昇後は 0.68 m に上昇していることから、海面が 0.88 m 上昇することで入射する波高はおおよそ 2 倍となることが分かった。他の断面についても同様な傾向が見られ、海面が上昇することにより外洋波浪のラグーン内への進入が顕著になり、ラグーン内波浪場に対して大きな変化を与えることが明らかとなった。

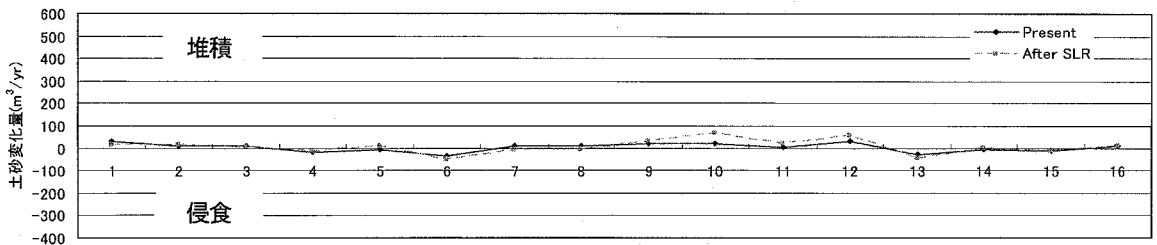


図-6 Uliga ラグーン側の土砂堆積量のポテンシャル

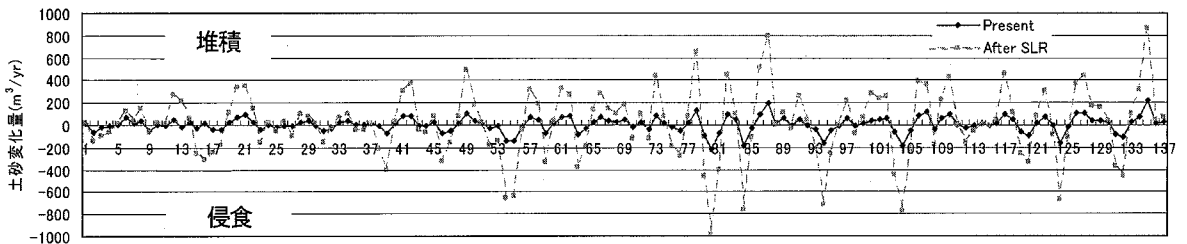


図-7 Long Island (West) ラグーン側の土砂堆積量のポテンシャル

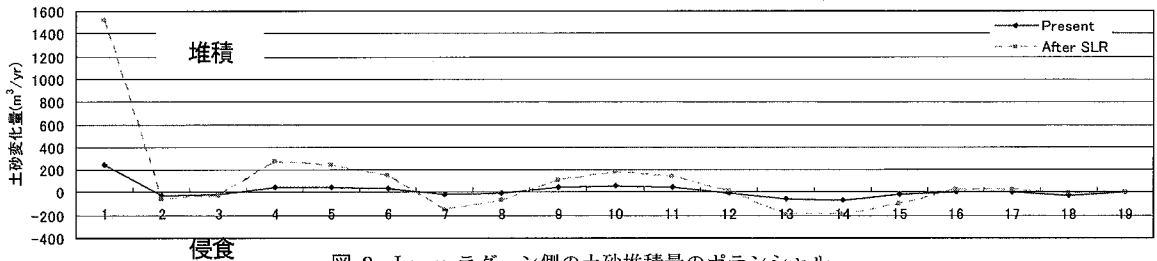


図-8 Laura ラグーン側の土砂堆積量のポテンシャル

3. 土砂堆積量ポテンシャルの算定

次に沿岸方向エネルギーフラックスを計算し、沿岸漂砂量の算定を行った。沿岸方向エネルギーフラックス W' の算定には土木学会(2000)を参考に式(1)を用いた。

$$W' = E \cdot C_g \sin(\theta_b - \theta_{sh}) \cos(\theta_b - \theta_{sh}) \dots \dots (1)$$

ここで、 E は波のエネルギー、 C_g は群速度、 θ_{sh} は沿岸方向座標に対する汀線の傾斜角度であり、 θ_b は砕波点における波向きである。州島の汀線角度については、州島メッシュにおける汀線角度を海図や衛星画像から読み取って与えた。計算幅は波浪場算定と同様とし、沿岸漂砂量は CERC 公式(土木学会, 2000) から算定し、有孔虫による底質供給量(茅根・藤田, 2005) を足し合わせ土砂変化量を求めた。

しかし、計算幅が 240 m と大きいことや汀線角度の読み取り精度の問題から、隣り合うメッシュで侵食と堆積が極端に大きく変化する地点が生じてしまった。メッシュ幅をより細かくし、汀線角度をより精度よく与えることで、滑らかな計算結果が得られると考えられるが、現在入手しているデータではその計算精度を得ることは難しい。本研究では現状での侵食・堆積域が海面上昇後

にどのように変化するかを明らかにすることを目的としているため、得られた結果は十分議論に耐えるものであると考えた。

なお、本研究では計算地点における現存の砂量については考慮していないため、得られた結果はすべてその地点における潜在的な土砂堆積量(ポテンシャル)となる。

(1) マジュロ環礁における底質移動

一般に環礁州島では河川からの土砂供給が無く、底質はサンゴの骨格や有孔虫の遺骸殻などサンゴ礁生物を起源とする堆積物から構成される。また、ラグーン側と外洋側の海岸線の構成物は大きく違い、ラグーン側は主に有孔虫やサンゴの細かい破片であり、外洋側はサンゴによるこぶし大の礫が主である。本研究では特にラグーン側の海岸線に着目し、その土砂の移動について検討した。

(2) 有孔虫による堆積物生産量

有孔虫による堆積物生産量は 2005 年 9 月に行った現地調査より得られた有孔虫現存量データから、茅根・藤田(2005)によって推定された年間生産量の値を用いた。生産量が推定された地域は Laura, Long Island 西部, Uliga の 3 地点であり、本研究ではラグーン側で調査された Laura ($10^{-3} \text{ m}^3/\text{yr}$) および Long Island (10^{-3} m^3)

/yr) の推定値を用いた。なお、その推定値が地域全域に当てはまると仮定し、供給はリーフ幅とほぼ同様の岸沖方向 200 m × 汀線長さとして計算した。

(3) 土砂堆積量ポテンシャルの算定結果

図-6 は人口が集中する Uliga ラグーン側 (図-2(b)) の土砂堆積量ポテンシャルの計算結果である。Uliga 地域のラグーン側は周囲を州島に囲まれ、外洋の高い波浪の影響を受けにくく、また、貿易風についても吹送距離がほとんど無いため風波の発達も起こりにくいという特徴がある。そのため、他の地域と比較して土砂移動のポテンシャルも小さい値となったと考えられる。侵食堆積の傾向の変化について見てみると、海面上昇前に侵食域であった地点においてはその侵食が加速する地点が見られ、堆積域についても同様に加速する傾向が見られた。特に侵食となる地点では海面上昇後には侵食量は最も大きいところで 1.7 倍となることが明らかとなった。また、堆積から侵食へと変化する地域も存在し、岸壁のすぐ側まで家屋が建っている Uliga 地域では、小さな変化でも堆積から侵食へと変化するこの影響は非常に大きなものとなることが考えられる。

図-7 は Long Island (West) のラグーン側 (図-2(c)) における土砂堆積量ポテンシャルを示したものである。横軸の No.81 以降は環礁北部の Passage から進入する外洋の高波浪の影響によって、海面上昇後の土砂変化ポテンシャルが大きく変化し、侵食および堆積それぞれの方向に大きく増加する結果となった。また、No.17 付近では海面上昇後には侵食・堆積の傾向が非常に顕著に表れるようになり、その土砂堆積量ポテンシャル

に大きな変化が生じることが明らかとなった。侵食の変化量としては最も大きいところで 4.5 倍となる結果となった。これより、Long Island 地域は非常に島の細い地域ではあるが、潜在的な土砂堆積量は大きい地域であることが分かった。

図-8 は Laura 地域ラグーン側 (図-2(d)) の計算結果を示しており、侵食域では侵食の加速といった同様な傾向が見られた。しかし、先端部を除いて Long Island 地域ほどの変化ポテンシャルは無く、全体的に堆積傾向であった。特に Laura の先端部では大きく堆積する結果となった。

4. 現地調査結果との比較検討

2005 年 8 月 8 日から 19 日までマーシャル諸島マジュロ環礁において現地調査を行った (横木ら, 2006)。ここでは流速計データの解析結果について述べ、本研究によって得られた計算結果との比較検討を行った。

(1) 調査より得られた知見と計算結果との比較

著者らの過去の研究成果 (横木ら, 2004) や Xue (2001) から、Laura では侵食傾向であることが明らかとなっている。今回の現地調査で行ったヒアリングでも Laura では近年侵食傾向が非常に強いことが確認された。しかし、これは Laura 地域では堆積傾向にあるという本研究の計算結果とは矛盾するものである。そこで、図-1 に示す Laura 北部と Long Island に設置した流速計の観測データに着目して検討した。

(2) 流速データと Laura の地形変化に関する考察

観測データを平均流成分と軌道流速成分とに分離し検

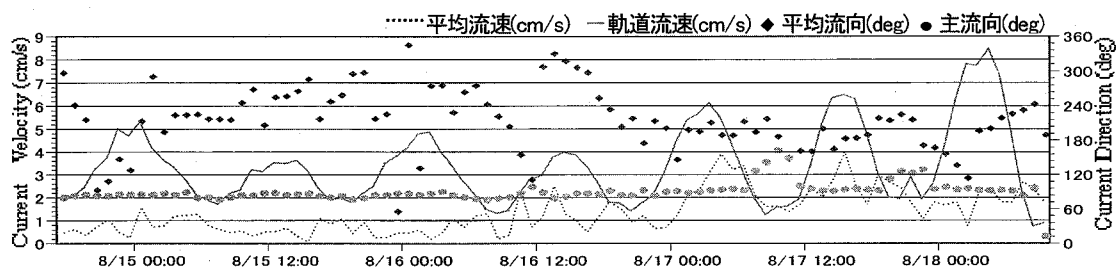


図-9 Long Island 西側における流速および流向の観測データ

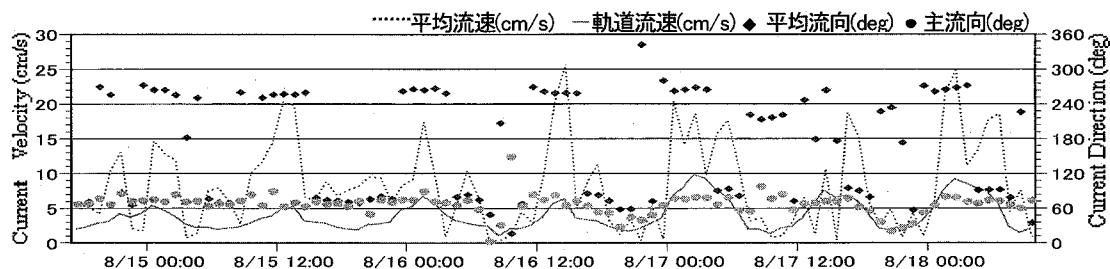


図-10 Laura 北端部における流速および流向の観測データ

討した。ここで、平均流速および平均流向は水粒子が流れる速さおよび向きを示しており、軌道流速および主流向は波による水粒子の楕円運動の速度および向きを示している。つまり軌道流速と主流向は波を表し、平均流速と平均流向は潮汐などの波以外による流れを表している。

図-9に示す解析結果から Long Island の海岸では、平均流向に周期性はほとんど見られず、平均流速についても周期性は見られない。一方、軌道流速の流向はほぼ一定となっており、入射波の波向きが一定であったことを示している。

一方、Laura の解析結果 (図-10) では、潮汐に応じて平均流向が明確に反転しており、また、流速の大きさも外洋側からラグーン側へ流入する流速が、流出する流速より大きくなっていることがわかる。また、軌道流速やその流向があまり変化していないことを考慮すると、Laura 先端では潮汐による流れが支配的になっていることがうかがえる。

以上より Long Island では波浪による底質移動が支配的であるが、Laura については波浪だけでなく潮汐流による底質移動を考慮する必要があると考えられる。

5. 地形維持のための対策に関する一考察

(1) 人為的な土地利用の変更

現地調査で行った海岸線の踏査の際に、海浜植生の伐採によって砂浜が大きく後退している現場が確認された。一般的に環礁州島海岸は前面に幅の広いリーフが存在し、その効果で波浪を大きく減衰させて地形変化を抑制している。加えて、海浜に生育している植生によってもその地形変化は抑制されていると考えられる。このように州島はリーフによる波浪減衰効果と海浜植生の底質保持機能という2段階の保護機能で守られていると考えられる。このため、無計画な海浜植生の伐採は地形維持に直接影響を及ぼすものであり、海浜植生の伐採は厳密な計画の下で行われるべきものであると考えられる。

(2) 底質生産量の安定供給

本研究で用いている有孔虫の底質供給量は現地調査から得られた現存量データから推定されたものであるが、沿岸方向エネルギーフラックスから計算された沿岸漂砂量と底質供給量との間には大きな差があり、底質供給量は極端に少ないものであった。各地域の海岸線で平均した堆積物生産量と土砂堆積ポテンシャルを見てみると、Laura ラグーン側では土砂堆積ポテンシャルは約 $300 \text{ m}^3/\text{yr}$ 、堆積物生産量は約 $0.03 \text{ m}^3/\text{yr}$ であり、Long Island 西側では土砂堆積ポテンシャルが約 $130 \text{ m}^3/\text{yr}$ 、堆積物生産量が約 $0.22 \text{ m}^3/\text{yr}$ であった。現在の州島の体積を考えると、この堆積物生産量では不十分であること

は明らかであり、過去においてはより多くの供給があったものと予想される。現状では有孔虫が減少する詳細は明らかではないが、人為的な州島の改変や沿岸海域の環境悪化などによると推測される。今後より詳細な調査や検討を行う必要がある。

6. 結 論

本研究では、マーシャル諸島マジュロ環礁を対象とし、海面上昇を想定した波浪場および土砂堆積量ポテンシャルの算定を行い、その変化を定量的に明らかにした。また、現地調査結果との比較を行い検討した。その結果、以下のことが明らかとなった。

- ・0.88 m の海面上昇後ではリーフ上を通過してラグーン内へと進入する波が顕著に表れるようになり、それに伴いラグーン側海岸線の土砂堆積量ポテンシャルが大きく変化した。特に Long Island 地域においては侵食・堆積それぞれの方向で増加し、侵食量はもっとも大きいところでおよそ4.5倍となることが明らかとなった。
- ・現地調査から得られた流速データの解析から、Laura の先端部分では波浪よりも潮位差によって生じる流動場が支配的であることが明らかとなった。今後は、本研究で得られた新たな課題を土砂堆積量ポテンシャルの算定の際に考慮することで、より詳細な地形維持モデルを構築していく予定である。

謝辞：本研究は地球環境研究総合推進費（課題番号 B 15、代表：茅根創）のプロジェクトの一環で実施されたものである。研究参加者の山口徹氏（慶応大学文学部助教授）、近森正氏（慶応大学名誉教授）との議論が大変有益であった。なお、有孔虫による堆積物生産量については東京大学大学院理学系研究科の大澤葉子氏にご助力を頂いた。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. 139-140.
- 茅根創, 藤田和彦(2006): 環礁州島の自然(地形・生態)プロセスに関する研究, 地球環境研究総合推進費 平成17年度研究成果報告集, 環境省地球環境局研究調査室 (印刷中)
- 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 (2004): 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, 海岸工学論文集, 第51巻, pp. 1381-1386.
- 横木裕宗, 桑原祐史, 林利一, 佐藤孝一, 三村信男(2006): Majuro 環礁における持続可能な国土利用に向けての現地調査, 地球環境シンポジウム講演論文集. (印刷中)
- Booij, N., I.J.G. Haagsma, L.H. Holthuijsen, A.T.M.M. Kieftenburg, R.C. Ris, A.J. van der Westhuysen, M. Zijlema (2004): SWAN Cycle III version 40.41 USER MANUAL
- Xue, C. (2001): Coastal Erosion and Management of Majuro Atoll, Marshall Islands, Journal of Coastal Research, 17, 4, pp. 909-918.