

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

Field investigation and numerical simulation toward the control of longshore sediment transport on Laura islet in Majuro Atoll

佐藤大作¹・横木裕宗²

Daisaku SATO and Hiromune YOKOKI

Although the sustainable land use is a significant issue in the atoll islands, the quantitative information and numerical models of island changes are lacked. In this study, the measurements of beach profiles were carried out in Laura islet located in the western part of Majuro Atoll, Marshall Islands. Comparing our measurement results with the previous SOPAC's profiles revealed the quantitative profile changes during the last decade: from 1997 to 2007. We also reproduced these profile changes by the numerical model which was based on longshore sediment transport system. The calculated results and the measured profile changes showed a good agreement. And, the artificial control of longshore sediment transport was considered one of the valuable ways for sustainable land management on sandy beach of Laura islet.

1. 序 論

環状のサンゴ礁上に、有孔虫遺骸やサンゴ片などからなる低平な州島が形成された地形をなす環礁州島では、近年、海岸侵食(Xue, 2001)や海面上昇による水没や海岸侵食の加速(IPCC, 2007)が懸念されている。こうしたなか、マーシャル諸島マジュロ環礁では、将来にわたる持続可能な国土の利用が困難になりかねない状況にあり、国土の維持対策の策定が急務の課題である。

しかし、環礁州島における過去の地形変化の定量的な情報や、地形変化の数値モデルに関する研究は非常に乏しく、具体的な対策の検討が難しいのが現況である。

著者らはこれまで、マーシャル諸島マジュロ環礁を対象とし、地形変化の定量的な把握と地形変化モデルの構築という観点から研究を行ってきた(横木ら, 2004)。特に、マジュロ環礁全体の地形変化については、環礁周辺も含む領域での波浪場の算定を行い、得られた波浪諸元を用いて計算された沿岸漂砂量と現地調査から推定された有孔虫による堆積物生産量から年間における土砂変化量を算定し、その変化について議論した(佐藤ら, 2006)。しかし、計算結果の検証材料が定量的なものではなく、波浪場・地形変化量ともに、どの程度現地の傾向を再現できるモデルなのかを明らかにするまでには至らなかった。

そこで、本研究ではマジュロ環礁ローラ島に着目した現地調査を行い、詳細な断面測量から得られたデータとSOPAC(Pacific Islands Applied Geoscience Commission)によって行われた1997年および1998年の断面測量結果

(SOPAC, 1997; 1998)とを比較することによって、約10年間における単位幅当りの土砂変化量を明らかにした。さらに、佐藤ら(2006)が用いた水深データより高解像度の水深データを用いた同様の計算方法による波浪場および州島の土砂変化量の計算を行った。計算で得られた10年間における土砂変化量と上述した単位幅当りの土砂変化量とを比較し、10年スケールでの数値モデルの精度を検討することを目的とした。また、得られた結果から、国土維持対策として沿岸漂砂制御を取り上げ、その適用可能性について検討を行った。

2. 現地海岸断面測量による地形変化の把握

2006年8月および2007年8月にマーシャル諸島マジュロ環礁(図-1(a))において現地調査を行った。現地調査では西部のローラ島周辺について海岸断面の測量と流速計・波高計による流動場観測を行った。

(1) 断面測量の測線と結果の解析方法

海岸断面の測量はローラ島周囲に全部で9本の測線を設けて測量を行った(図-1(b))。この測線は1997年および1998年にSOPAC(1997, 1998)によって測量された測線に合わせて設定したものである。同一測線で測量を行うことにより、1997年から2007年までの10年間の間にマジュロ環礁西部の最も幅の広い島でどの程度の地形変化が生じていたのかを比較した。なお、測量結果(図-2および3)の標高基準(0m)は各測線の起点(居住地のある高さ)とし、そこからリーフのエッジ付近まで測量した結果である。

測量はSOPACが1997年2月と1998年4月に行い、著者らは2006・2007年の8月に行った。マジュロ環礁では12月から4月まで北東方向からの貿易風が卓越し、うねり等の外力も変化する(横木ら, 2004)。しかし、後述の各月における外力変化を考慮した地形変化計算からは、季

1 学生会員 工修 茨城大学大学院理工学研究科 情報・システム科学専攻 日本学術振興会特別研究員(DC2)
2 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

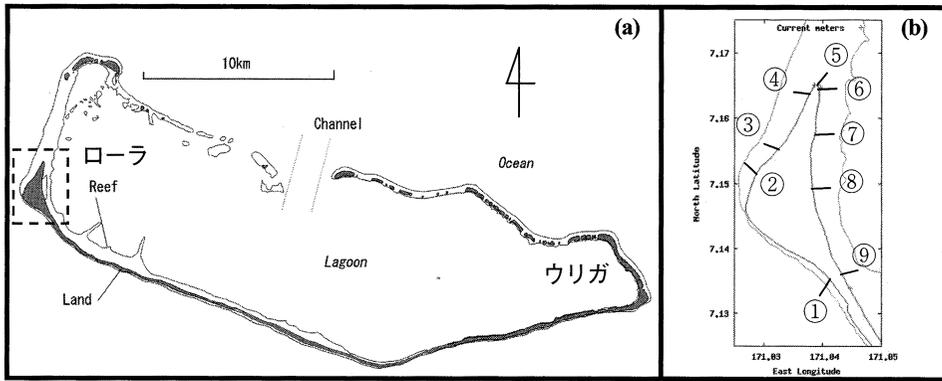


図-1 (a)マーシャル諸島マジュロ環礁(7°6' N, 171°22' E) (b)マジュロ環礁ローラ島および測線位置(丸数字は測線番号を示す)

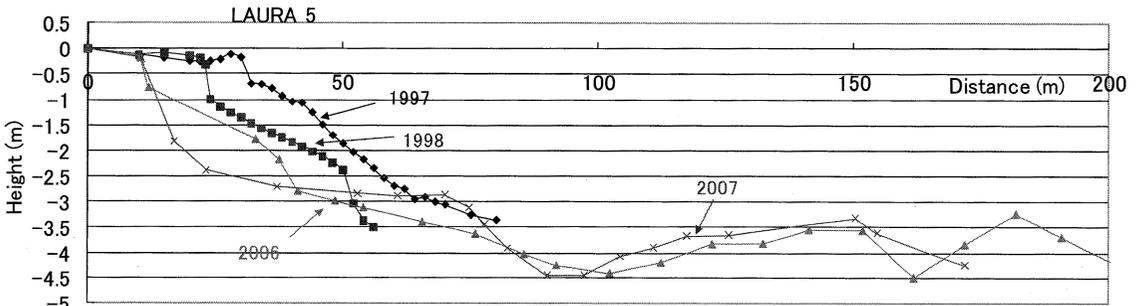


図-2 Line5の測量結果の比較

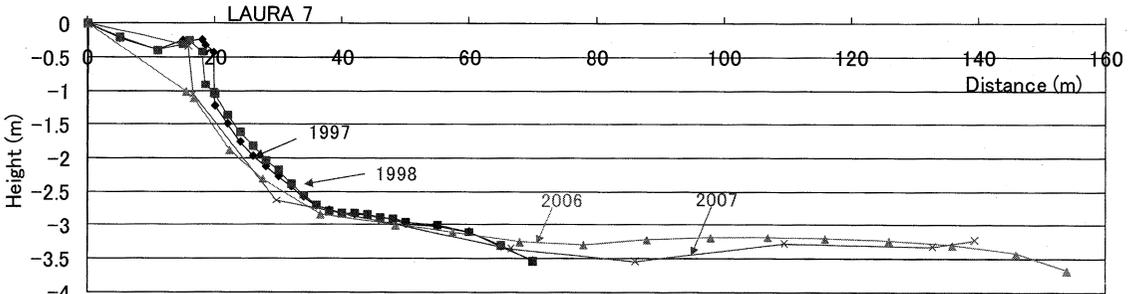


図-3 Line7の測量結果の比較

節によって特徴的な地形変化は見られず、各月での変化量も小さかったことから、本研究ではSOPACの測量のちょうど10年後に著者らが測量を行ったものとして解析を行った。

(2) 測量結果の比較と考察

図-2はローラ島先端部分に位置する測線(Line5)の測量結果の比較を示している。図より激しい侵食が生じていることがわかる。この地点はXue (2001)においても大きく侵食しているとされていた地点である。また、現地

調査では浜崖の側面部分で樹木の根が露出していることを確認した。海岸断面の比較から、約10年間でおよそ20m程度汀線が後退していたことが明らかとなった。

また、図-3にはラグーン側海岸に位置する測線(Line7)の測量結果を示した。この測線では、先端部(Line5)と比較して変化が小さく、若干の侵食が見てとれた。この海岸は砂浜の幅が比較的広く、移動可能な底質が十分存在しているが、変化は小さく海岸線は安定していると考えられる。

表-1 過去10年間における各測線の土砂変化量 *Line 6は2007年の測量結果に誤差が見られたため、2006年の測量結果をもとに推定。(m³/m)

	Line 1	Line 2	Line 3	Line 4	Line 5	Line 6	Line 7	Line 8	Line 9
1997年	101.54	122.24	78.38	65.65	269.01	71.10	77.27	156.51	161.36
2007年	114.38	116.40	71.49	91.46	88.93	-	70.35	163.51	170.55
変化量	12.84	-5.84	-6.90	25.81	-180.08	164.06	-6.92	7.00	9.19

次に、各測線で1997年と2007年の断面積変化量を計算し、それを単位汀線幅と考え、10年間における土砂変化量を算出した(表-1)。これよりローラ島全域での変化を見てみると、ローラ島北端付近(Line5, Line6)での地形変化が非常に大きい、特に先端部分のLine5で大きく侵食、その少し南側(Line6)では大きく堆積となっていた。その他の地点では地形変化量は小さく、外洋側・ラグーン側ともに比較的安定した地形であることがわかった。

3. マジュロ環礁における地形変化の数値計算

環礁州島を構成する要素はリーフ上に存在する有機物に支配され、特に有孔虫遺骸が州島の維持形成に重要な役割を果たしている(Yamanoら, 2005)。リーフ上で生産された有機物は波・流れなどの物理外力によって運搬・堆積し州島の地形変化を生じさせる。作用する物理外力は、リーフと波浪変形の関係や来襲する波浪の季節的変動、潮汐変動との相互作用、稀に来襲するハリケーンなど、その時間・規模のスケールが多岐にわたる。

以上のように複雑なシステムのなかで変化している環礁州島の地形変化をすべての要因・外力を考慮して取り扱うことは困難である。そこで、本研究では日常的に来襲する外洋のうねりと風波に焦点をあて、それに伴う地形変化(特にラグーン側海岸における砂質堆積物の移動)に着目した。計算方法は佐藤ら(2006)と同様の方法を用いた。佐藤ら(2006)では有孔虫による土砂供給を考慮しており、本研究の計算対象であるローラ島周辺では供給量が沿岸漂砂量に比べて極端に少ないことがそのなかで示唆されている。そこで本研究では「運搬-堆積」というプロセスで地形変化計算を行った。計算はまず、外力となる風波・うねりを算定し、それらによって生じる沿岸漂砂量および土砂量変化の計算を行った。本研究では、水深・地形データを詳細なものに変更した点およびマジュロ環礁西部のローラ地域から東部のウリガ地域までの一連の海岸線について州島一周の収支を計算している点に特徴がある。これにより、ローラ島北端での外洋-ラグーン間の底質移動も表現可能である。以下に計算の詳細を記す。

(1) 波浪場の算定

波浪場の算定にはSWAN 40.51を用いた。SWANはオランダのデルフト工科大学で開発された第3世代波浪推算モデルであり、波の屈折・浅水砕波といった波浪変形に加え、風による波の発達や白波砕波、四波共鳴理論などを考慮できるモデルである(Booijら, 1999)。本研究では回折についても考慮可能な40.51版を用いた。

計算は毎月ごとに境界条件を設定して算定した。境界条件にはECMWFから入手した1990年から1999年までのマジュロ環礁周辺における有義波高、有義波周期、平均波向きの客観解析データから各月における平均値を算出

し、それからJONSWAP型スペクトルを算定して与えた。

風の場合は、マジュロ環礁測候所から入手した2002~2003年の現地観測データから、各月における平均値を算出し、それらを計算領域全域で一様に与えることで表現した。また、地形データは2000年に撮影されたIKONOS画像からリーフと州島の輪郭を抽出し、それより32m幅の正方形メッシュデータを作成した。リーフ上の水深は一律で1mと仮定し、ラグーン内の水深は1945年に作成された海図から水深データを作成し、外洋側はすべて水深500mとした。作成された水深・地形データを図-4に示した。本研究での計算領域は図-4に示した領域を外洋側に広げた環礁全体を含む40km×60kmとした。以上の水深・地形データおよび境界条件の下、各月における波浪場を算定した。なお、州島を越える波は通常波浪では存在しないと考える、州島は常時干出しているとして扱った。

リーフ上の波浪場の計算精度を確認するため、8月の計算結果と著者らが行った波高計による現地観測結果を比較した。波高計はアレック電子Compact-WHを用いて図-5のA, Bに示す地点で2007年8月10日から18日までの9日間行い、毎正時に0.5秒間隔で20分間観測した。なお、観測期間中に暴浪などはなく、波は通常状態であった。ローラ島周辺海岸の2点(図-5のA, B地点)で最大波高は0.194m(A, 2007年8月13日午前4時観測, 水深1.95m), 0.178m(B, Aと同時刻に観測, 水深2.73m)であったのに

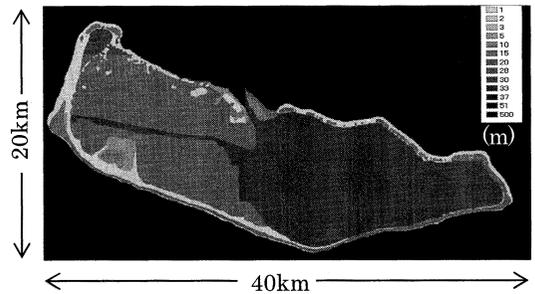


図-4 水深・地形データ

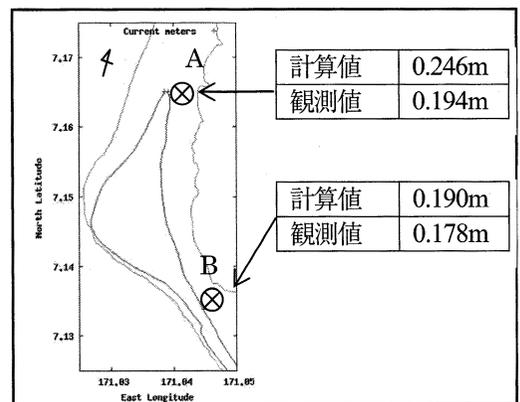


図-5 計算結果と観測結果の波高空間分布の比較

対し、計算値はそれぞれ0.246m, 0.190mであった。計算値が若干大きな値となったが、平均化された境界条件下であること、観測期間と厳密には異なること、リーフ上で摩擦を考慮していないことなどを踏まえると、波高の空間分布が精度良く計算されたといえる。

(2) 地形変化の数値計算方法

沿岸漂砂量を計算するにあたり、まず波浪場の算定で得られた沿岸部における各月の波浪諸元から、式(1)を用いて沿岸方向エネルギーフラックス W の算定を行った。

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

ここで、 E は波のエネルギー、 C_g は群速度、 θ_b は砕波点における波向き、 θ_{sh} は汀線角度である。汀線角度については、衛星画像から抽出した州島の輪郭から、各計算点における角度を求めた。得られた沿岸方向エネルギーフラックスから、Komar・Inman(1970)による漂砂量係数を用いて式(2)から沿岸漂砂量を計算した。

$$Q_y = \frac{0.77W'}{(\rho_s / \rho - 1)\rho g} \quad (2)$$

ここで、 W' は沿岸方向エネルギーフラックス、 ρ_s は海底砂の密度であり、計算対象は有孔虫遺骸やサンゴ砂であるが、本研究では一般的な砂と同様であると仮定して2.56とした。また、 $\rho (=1.02)$ は海水の密度である。

なお、Komar・Inmanの漂砂量係数はリーフ海岸では大きすぎると考えられるが、現地海岸に対して適当な漂砂量係数が不明なため、本研究では沿岸方向エネルギーフラックスの計算に砕波後の減衰した波高を用いることで、漂砂量が大きくなりすぎないように調節を行った。

得られた各月の沿岸漂砂量から一連の州島全体における土砂収支をOne-line modelと同様の考え方で計算し、メッシュ毎に土砂変化量を算定した。計算の際の移動限界高さはリーフ上(水深1m)と設定した。得られた値を単位幅あたりに換算して、各月の日数分かけ合わせた後

に足し合わせて年間の土砂変化量を求め、それを単純に10倍することで各計算点における10年間の土砂変化量を見積もった。なお、漂砂量の計算は海岸線の底質がすべて砂であると仮定して行った。また、地形変化を波浪場計算にフィードバックすることは行っていない。

(3) 土砂変化量の計算結果

図-6にローラ島海岸線全体の土砂変化量の計算結果を示した。図の横軸はローラ島海岸線の計算点に対応しており、図中の測線番号は図-1(b)の測線位置を示している。土砂変化量の正の値は堆積を表し、負の値は侵食を表している。

外洋側と北端部での土砂変化量が非常に大きな値となった。特に外洋側のリーフ幅の狭まっているところ(Line1-2間、図-1(b))で大きな地形変化が生じた。また、北端部でも極端な地形変化が見られ、北端部で大きく侵食し、そのすぐ外洋側に大きく堆積する結果となった。

ラグーン側海岸では、外洋側と比較して土砂変化量は小さい。これは外洋と閉鎖されたラグーン内とで沿岸に到達する外力の強さと消波効果を持つリーフの幅異なることに起因し、これらが地形変化のしやすさに関する大きな要因になっていることが分かる。

(4) 現地地形変化との比較

表-2に2007年の測量結果および1997年の測量結果から算出した10年間の土砂変化量と計算結果との比較を示した。外洋側に位置する測線(Line1, 3, 4)ではよい一致が見られるが、Line2で大きく異なる結果となった。これは現地海岸線の底質が砂質ではなく粒径の大きなサンゴレキであることが原因の一つと考えられる。

また、ローラ島北端に位置するLine5および6では大きな相違が見られた。この地点のリーフ上では流速計による定点観測を行っており、潮汐に伴う流れが非常に強いことが示唆されている(佐藤ら, 2006)。このため、地形変化を生じさせている主要な外力が異なるため、詳細な地形データを用いるだけでは、地形変化の再現は困難で

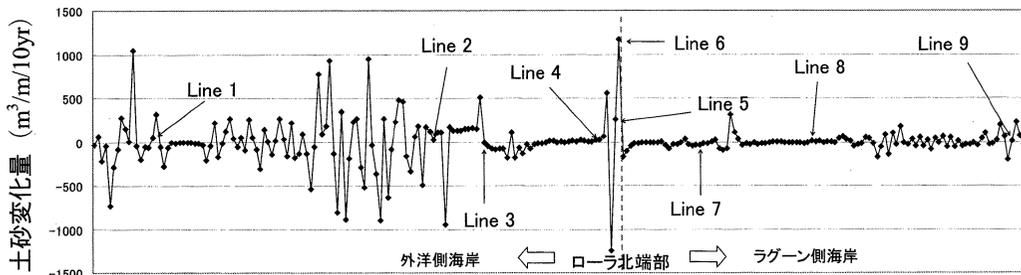


図-10 ローラ島における10年間の土砂変化量の計算結果

表-2 測量結果と計算結果から得られた10年間の土砂変化量の比較 (m³/m/10yr)

	Line 1	Line 2	Line 3	Line 4	Line 5	Line 6	Line 7	Line 8	Line 9
測量結果	12.84	-5.84	-6.90	25.81	-180.08	164.06	-6.92	7.00	9.19
計算結果	49.51	22.88	-3.37	27.35	259.92	1170.77	-12.09	7.77	13.01

あった。ローラ島沿岸部には漂砂を遮る構造物は存在しないことから、土砂は連続性を持って移動すると考えられるが、主要な外力が波浪と潮汐で異なる地点が存在した。

ラグーン側(Line7-9)について見てみると、非常に高い精度で計算されていることがわかる。これは底質が砂であるラグーン側海岸線では、沿岸漂砂を算定することで精度よく地形変化を計算可能であることを示し、この知見は沿岸漂砂が主要な地形変化要因であるとしたXue (2001)の研究とも整合するものである。

全体的に、外洋側・ラグーン側共に底質が砂である海岸線では地形変化を精度よく計算することが可能であり、それは10年間という比較的長期間の地形変化においても有効な手段であることが確認された。

4. 沿岸漂砂制御の検討に向けて

以上までの結果から、ローラ島のラグーン側海岸では沿岸漂砂による地形変化が顕著であることが明らかとなった。これより、本研究では地形維持の対策について大きく2つの方向性を見出した。一つは短期的(数年-十数年)な対策として防波堤の設置や養浜で州島の地形維持を行う方法。もう一つは中・長期的(十数年-数十年)の対策として海岸植生による防護や土地利用の見直し、砂供給も含めて沿岸漂砂を制御する方法などが考えられる。

特に、海岸植生を用いた沿岸漂砂制御、これまで州島が維持形成してきた自然プロセスを壊すことなく、環礁州島自身が持つ地形維持機能を強化し、有効活用するものである。海岸構造物などの建築材料に乏しい環礁州島では、構造物での防護は局所的にとどめ、海岸植生や土砂供給を考慮した沿岸漂砂制御で州島の維持形成を助けていく対策が、持続可能性の点から考えても有効であると考えられる。しかし、環礁州島における海岸植生の堆積効果や侵食抑制効果について定性的には認識されているものの、定量的な把握はまだ行われておらず、まだ不明な点が多い。

本研究で得られた結果から、沿岸漂砂制御の適用可能性について考えてみると、砂浜海岸が多く沿岸漂砂によって地形変化がうまく再現できたラグーン側海岸では有効な手段となりうる。しかし、ローラ島の外洋側・北端部・ラグーン側の漂砂系を連続的に捕らえた沿岸漂砂制御には、潮汐流による底質輸送や底質供給域および供給量を詳細に把握した上で検討することが必要であり、今後の課題である。

5. 結論

本研究では、マジュロ環礁ローラ島において、沿岸漂砂制御に向けた現地調査および数値計算を行い、地形変化計算の精度を確認し、地形維持対策として沿岸漂砂制

御を取り上げた。得られた結論を以下に示す。

- (1) 海岸断面測量結果の比較から、過去10年間におけるローラ島の地形変化量を定量的に明らかとした。
- (2) 沿岸漂砂量とそれによる地形変化の数値計算を行い、現地地形変化と比較したところ、砂浜海岸で波浪によって地形変化が生じていると考えられる地点では精度良く計算できることが確認された。
- (3) 地形維持対策としての沿岸漂砂制御はローラ島ラグーン側海岸では有効な手段であると考えられる。しかし、外洋側・北端部・ラグーン側の漂砂系を連続的に捕らえた沿岸漂砂制御には、潮汐流による底質輸送や詳細な底質供給域および供給量を把握した上で検討することが必要である。

今後は、潮汐などの外力の算定を含めた、より統合的な州島地形変化モデルの構築を目指し、有効な対策について詳細な検討を行っていく予定である。

謝辞：本研究は環境省地球環境研究総合推進費(B-15、代表：茅根創)のプロジェクトの一環で実施された。研究参加者の山野博哉氏(国立環境研究所)、藤田和彦氏(琉球大学)、山口徹氏(慶応義塾大学)、近森正氏(慶応義塾大学名誉教授)との議論が大変有益であった。現地調査では林利一氏(株式会社日本港湾コンサルタント)、滑川卓也氏(じゅんホーム)にご助力を頂いた。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・藤田和彦・桑原祐史・山野博哉・島崎彦人・茅根創・渡邊真砂夫(2006):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, 第53巻, pp.1291-1295.
- 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.
- Booij, N.R., R.C. Ris and L.H. Holthuijsen (1999): A third-generation wavemodel for coastal regions, Part I, Model description and validation, *Journal of Geophysical Research*, Vol.104, No.C4, pp.7649-7666.
- IPCC WGII (2007): *Climate Change 2007, Impacts, Adaptation, Vulnerability - Working Group 2 Contribution to the Intergovernmental Panel on Climate Change Fourth Assessment Report, Small Islands*.
- Komar, P.D. and D.L. Inman (1970): Longshore sand transport on beaches, *Journal of Geophysical Research* 30, pp.5914-5927.
- SOPAC (1997): *Beach Monitoring in Dud and Laura, Majuro Atoll, Republic of the Marshall Islands, SOPAC Preliminary Report, No.88, ANNEX2 Beach Profile Data*.
- SOPAC (1998): *Re-survey of Dud and Laura Beach Profiles Majuro Atoll, Republic of the Marshall Islands, SOPAC Preliminary Report, No.93, APPENDIX1 Beach Profile Data*.
- Xue, C. (2001): Coastal erosion and management of Majuro Atoll, Marshall Islands, *Journal of Coastal Research*, 17, 4, pp.909-918.
- Yamano, H., Kayanne, H., and Chikamori, M. (2005): An overview of the nature and dynamics of reef islands. *Global Environmental Research*, 9, pp.9-2.