モルディブにおける海岸およびリーフの 人為的改変の実態とその影響

大中 晋¹・三波 俊郎²・市川 真吾¹・
栗津 裕太¹・森 智弘¹・宇多 高明³

¹正会員 日本工営(株) コンサルタント海外事業本部 交通・都市事業部 港湾空港部
(〒102-8539 東京都千代田区九段北 1-14-6)

E-mail: onaka-ss@n-koei.jp

²海岸研究室(有) (〒160-0011 東京都新宿区若葉 1-22 ローヤル若葉 301)

³正会員 (一財) 土木研究センターなぎさ総合研究所 (〒110-0016 東京都台東区台東 1-6-4)

サンゴ砂礫が長年の波の作用により堆積して形成された低平かつ狭小な土地を持つモルディブは、気候変動に対する脆弱性が極めて高い国の1つであり、その検討や対策が実施または計画中である。一方、近年の経済発展に伴って沿岸域での様々な開発が行われており、これによる海岸やリーフの人為的改変が顕在化している。本研究では、モルディブにおけるいくつかの住民島での現地調査結果をもとに、海浜やリーフの人為的改変の実態を調べた結果、海岸侵食やリーフ環境悪化が起きていることを明らかにした。

Key Words : coastal erosion, climate change, coral reef, Maldives, artificial modification

1. はじめに

インド洋に位置するモルディブは、26の環礁に属する約1200の大小の島々で構成され、これらの島々の80 %以上が平均海面上1 m 以下の低平かつ狭隘な土地であることから、気候変動に対する脆弱性が極めて高い国の1つである。近年、気候変動による海面上昇や、それに伴う外力増大による高波・越波被害や海岸侵食の顕在化が、モルディブをはじめとする同様のサンゴ砂礫で形成された小島嶼国ではとくに懸念されており、気候変動影響に対する検討が行われている。一方、近年の経済開発に伴う港や島内道路等のインフラ施設の積極的な整備が進められており、これによる沿岸域や特定の島への人と資産の集中と、海岸およびリーフの人為的改変が急速に進められつつある。サンゴ砂礫で形成された小島嶼国は、気候変動に伴う海岸災害への脆弱性が着目されがちであるが、沿岸域における人為的改変の実態やその影響、また気候変動との相乗影響等についてはあまり知られていない。

そこで本研究では、モルディブを事例として、沿岸域での様々な人為的改変の実態を明らかにし、自然海浜やリーフの減少・劣化による自然防護機能の低下や海岸侵食に及ぼす影響を検討することを目的とする。

2. モルディブの概況

(1) 地形および外力特性

モルディブは、インド洋北部の赤道付近から北緯7度付近にかけての南北約760 kmの海域に位置する26の環礁と約1,200の島から構成される。それぞれの島は、住民島、リゾート島、産業島および無人島に分類され、このうち住民島は188島ある¹⁾。モルディブの国土は長年にわたる波の作用によりサンゴ砂礫が堆積して形成されたものであるため、標高が平均海面上1~2 m程度の低平かつ狭隘な土地でできている。国土の総面積298 km²に対して海岸線延長は644 kmであり、国土面積に占める海岸線の割合は世界第3位である。狭隘な土地であるがゆえに住宅地の44 %およびインフラ施設の47 %が海岸から100 m以内に位置する。図-1は南部に位置するAddu環礁の住民島(図中○印地点)における現地測量結果より得られた、陸域から海域にわたる横断地形の一例を示す。外洋側およびラグーン側ともリーフフラットが存在するが、ラグーン側のリーフフラットは外洋側のような水深の浅い明確なリーフフラットではなく、緩勾配部を有する。一方、外洋側には標高の高い明確なリーフエッジが存在し、外洋からの入射波はここで砕波する。一方ラグーン側のリーフエッジは標高が低く、ここで波が砕波することはない。

図-1 Addu 環礁および横断地形の一例

モルディブの気候は、11月から4月の北東モンスーン季と5月から10月の南西モンスーン季の2時期に分けられ、強風の頻度は北東モンスーン季に高い傾向がある。モルディブは赤道付近に位置することから、その近傍でサイクロンが発生する確率は極めて低く、1877年から2004年の117年間で、わずか11個のみである²⁾。またこれらのサイクロンのほとんどは北緯6度以北に集中している。これより、モルディブでは特異な高波浪が出現することは極めて稀と考えられる。これまで長期的な波浪観測は行われていないが、再解析データ(ERA5)から得られた1979年から2018年の40年間における月別平均波高の年最大値からは、 $H_{1/3}$ で1.7~2.0m程度である。

(2) 経済社会状況

モルディブは、2000年当初までは、最貧国の1つであったが、2011年にはその指定が解除され、近年積極的な経済開発が行われてきた。とくに2013年以降での中国の資金をもとにした経済開発により、港の新設・改修、島間をつなぐ沿岸道路(コーズウェイ)の整備、大規模埋め立て等が積極的に行われてきた。主要な産業は観光業および水産業であり、観光業は2014年時点でGDPの約30%を占める。

(3) 海岸侵食の顕在化

前述のように、モルディブの国土の標高は、平均海面上1~2mと低平なため、沿岸災害に対する脆弱性が極めて高く、とくに近年、住民島における海岸侵食問題が顕在化している。2014年時点で、188ある住民島のうち、海岸侵食が生じている島は116島ののぼり、このうちの38%は深刻な状況にあることが報告されている¹⁾。

3. 人為的改変の実態とその影響

モルディブにおいて、近年実施されてきた人為的改変とその影響について、以下の6つの事例で示す。

図-2 Laamu 環礁と港の位置

(1) 港の建設による沿岸漂砂下手側での海岸侵食

住民島では物流拠点としての港の整備が各島で進められており、今後もさらなる整備が計画されている。図-2に示すLaamu環礁に位置する、モルディブの住民島で最も大きなGan島北部のラグーン側において、2005年に建設された港湾周辺の建設前(2003年)と建設後(2018年)の海岸の変化と示したものが図-3である(本論で、以降に示す衛星画像の2003年および2005年はQuickBird、2018年はWorldViewを用いている)。モルディブは2時期に応じて主波向も変化するため、Laamu環礁の東側に位置するGan島では、外洋側では北東モンスーン季における北東からの入射波による南向きの沿岸漂砂が、ラグーン側では南西モンスーン季の南西からの入射波による北向き沿岸漂砂が卓越する。図-4および図-5は、沿岸漂砂の下手側となる港北側(図-3の白丸地点)の海岸状況、および図-3の画像解析結果から判読された2時期の汀線変化を示す。なお、汀線位置の判読については、当海岸の潮位変化は1m程度であることと、当海岸の前浜勾配が1/6程度であることから、潮位変化は考慮していない。2003年から2018年の15年間で、港の北側の2~2.5km間(図-3参照)で最大50mの汀線後退が生じたことが分かる。なお図-5中のX=2.5~3km地点で生じている

図-3 2003年から2018年の海岸の変化状況 (Laamu 環礁 Gan 島北部の海岸)

図-4 漂砂下手側 (港北側) における海岸侵食状況

図-5 2003～2018年における汀線変化

汀線の前進は、北側の島と本島間を埋立てたことによる人為的な変化である。モルディブのような環礁の縁にサンゴ砂礫が堆積して形成された島は、陸幅が数十m～最大でも数百m程度と狭小であるものがほとんどであるため、このような汀線後退は無視できるものではなく、住民島における土地利用上の支障となり、また海岸災害の助長を招く。

(2) リーフ上における航路掘削による土砂供給の低減

モルディブの各住民島の多くには、基本的に1つ以上の港が存在し、そのほとんどは静穏なラグーン側に建設されている。図-1で示したように、ラグーン側にも水深の浅いリーフが存在するため、港建設と合わせてリーフ上での航路掘削が行われる。図-6はAddu環礁のGan島における航路掘削事例を示すが、ここでは2013年にリーフの平坦面上に海岸線と平行な航路が掘られた。リーフ海岸における土砂移動は、波の作用によるリーフ外縁付近あるいはリーフエッジでの砕波により、サンゴ片や有孔虫の遺骸が岸向きに運搬されることがこれまでの研究でも明らかとなっており^{3),4)}、図-6に示すリーフ上の砂層域の筋目や、航路掘削後の航路内での顕著な堆積傾向からも、このような土砂移動の存在が見てとれる。同時に、岸へ向かうサンゴ砂礫が、航路深掘部に捕捉されることが分かる。これにより、海岸へ到達する土砂量が航路掘削前に比べて減少している可能性がある。

図-6 リーフ上における航路掘削と再堆積状況 (Addu 環礁 Gan 島) (3 時期の拡大図は Google Earth を使用)

図-7 リーフ上における大規模埋め立て事例 (Addu 環礁 Feydhoo 島)

図-8 ラグーン側のリーフ上における藻場の拡大状況 (Laamu 環礁 Fonadhoo 島)

(3) リーフ上での大規模埋め立てによるリーフの消失

モルディブで近年目立つのが、リーフ上での大規模埋め立て事業の増加である。図-7は、Addu 環礁における埋め立て事例を示す。図中の赤線で囲む区域が埋め立てられた位置を示す。Gan 島では滑走路建設のための埋め立てが2014年に、また、Feydhoo 島では土地拡張を目的とした大規模埋め立て（埋め立て数量約80万 m^3 ）が2016年～2018年に実施された。なお滑走路埋め立て土砂は滑走路横のリーフ上から、Feydhoo 島の埋め立てについてはラグーン内の海底より採取された。このような埋め立て事業が増してきている背景として、モルディブのような狭小な国土の小島嶼国では、近年の人口増加と特定の島への人口集中に対する対応策として、水深の浅いリーフ上を埋め立て、新たな土地を作るのが最も安価で効率的と考えられているためと考えられる。このようなリーフやラグーン内の浅場の埋め立てによる土地造成は、モルディブに限らず、同様の地形特性を持つツバルやマーシャル等の南大洋州諸国でも近年増加傾向にある。リーフ上での大規模埋め立てが、モルディブのようなサンゴ砂礫で形成された島の形状や海岸の変化、またリーフ環境等に及ぼす影響について検討された事例はほとんどなく、また経済開発を進めていく上では開発行為そのものは否定されるものではない。しかしながら、改変前の島は、長年の波の作用でサンゴ砂礫が運搬・堆積して形成され、

そのバランスの中で、現在の島の形状や海岸が形成されてきた。リーフ上での埋め立ては、少なくともこのような自然の土砂供給と形成のバランスを崩し、より外力の大きな沖に土地が広げられること、リーフの消滅による自然の防波機能の低下、リーフ上における沖から海岸への土砂供給量の減少、リーフ上での生物生息環境の消失を招くことは明らかである。

(4) ラグーン側の水質悪化に伴う藻場域の拡大

モルディブのような、環礁を持つ小島嶼国において、近年顕在化している環境問題として、ラグーンの水質悪化・富栄養化と、それによる藻場域の拡大やサンゴ生息環境の悪化が挙げられる。図-8は、過去の空中写真および衛星画像から得られた、Laamu 環礁 Fonadhoo 島における過去約50年間におけるリーフ状況と島内の開発状況を示し、赤線で示す範囲が藻場域である。図中上側のラグーン側に着目すると、1969年時にはほとんど見られなかった藻場域が、陸域の開発とともに拡大し、2018年にはラグーン内のリーフ上の大半が藻場域で覆われている様子が示されている。水質悪化が藻場域の拡大に起因することが、他の事例でも報告されているが⁵⁶⁾、その第一の要因としては、経済発展、人口増加に伴う生活排水のラグーン内への直接排出の増加が挙げられる。これに加えて近年モルディブでは、コーズウェイにより隣接する

住民島の一体化が図られていることも一因となる。コーズウェイの建設は、以前存在していた島間の inlet を通じた自然の海水交換機能の大幅な低下を招いていると考えられる。リーフ上の藻場の拡大は、リーフ沖から岸に移動するサンゴ砂礫の捕捉効果を高め、その結果、海岸への土砂供給量の低下につながる可能性がある。

(5) リーフおよび海岸からの砂礫の採取

モルディブでは数年前から海岸およびリーフからの違法な土砂採取は禁止されている。しかしながら、現在も海岸域からの個人および商用目的とした人力による土砂採取が行われているのが現状である。また島によっては、エリアを指定してのリーフ上からの合法的な土砂採取も行われている。図-9 は、図-8 右図に示す撮影地点において、ドローン撮影により得られた、海岸近くのリーフ上から島内道路の整備に必要な土砂取得後の掘削跡を示す。簡易水深測量結果によれば、Fonadhoo 島（海岸延長 8.9 km）の海岸近傍からの掘削土砂量は、航路掘削も含めると約 30 万 m^3 と見積もられた。リーフ海岸における土砂供給量に関する研究は限られるが⁷⁾⁸⁾、それらの事例からは、リーフからの土砂供給量は $0.3 \sim 1.5 \text{ m}^3/\text{m}/\text{yr}$ のオーダーであることが示されている。仮にここでは沖縄での検討事例⁷⁾を参照し、 $0.5 \text{ m}^3/\text{m}/\text{yr}$ と仮定すると、リーフ上での 30 万 m^3 の土砂掘削量は、約 70 年分の土砂供給量に匹敵する。図-10 は、住民による海岸からのサンゴ砂礫の違法取得の例である。モルディブでは、家の庭先や路地にサンゴ礫を敷き詰める風習があり、現在も高波浪後の細礫を好んで採取する住民が存在する。仮に 1 回あたり 0.1 m^3 程度の砂（20 kg の砂袋 10 袋程度）を 1 週間に 1 回程度、10 家族が採取したとすると、年間 100 m^3 程度となり、これも海岸への土砂供給量に対して無視できない量になるものと考えられる。このように、サンゴ等の生物起源の砂礫で構成されるサンゴ礁海岸の土砂供給量は、河川起源の砂浜海岸のそれに比べて一般にオーダーが小さいので、リーフ上や砂浜からのサンゴ砂礫の取得は、顕著な土砂供給量の減少を招くと考えられる。

(6) 砂浜域での護岸構築

モルディブでは近年の海岸侵食の顕在化に伴い、政府による海岸侵食対策の実施例が増しており、そのほとんどは、護岸による防護対策である。以前はサンゴ砂礫とセメントを用いた袋詰め不透過堤が一般的であったが（図-11 左図）、近年は輸入石材を用いた透過型傾斜堤が多用されている（図-11 右図）。護岸構築の問題として、そのほとんどが、図-11 に示すように、変動域である砂浜の前浜域に構築されている点である。これにより、波に対する砂浜変動域の消失と、その結果としての前浜消失の加速化を招くとともに、住民の海岸利用に対する支障

図-9 リーフ上の土砂採取掘削跡（Laamu 環礁 Fonadhoo 島）

図-10 海岸からのサンゴ砂礫の違法採取状況（左）と採取した砂礫（右）（Laamu 環礁 Gan 島）

を来たす。

4. おわりに

モルディブではここ数年、沿岸域での様々な人為的改変が急速に行われ、リーフや砂浜海岸の変化・消失と、それによる海岸侵食やリーフ環境の悪化が生じていることが、いくつかの事例より明らかとなった。一方で、モルディブをはじめとするサンゴ砂礫が堆積して形成された小島嶼国では、今後の気候変動に伴う海面上昇による海岸災害の激化と頻発化が懸念されており、その対策が喫緊の課題である。気候変動に対する国土の強靱化を図っていく上で、物理対策のみによる海岸防護を図っていく考えは、途上国や小島嶼国の経済的観点からは持続性に欠けるとともに、長年営まれてきた地域住民の、海岸やサンゴ礁との関わりの低下、それによる海岸保全意識の低下を招く恐れがある。また、人為的改変により失ったリーフや海岸を復元することは、現実的には困難である。これより本検討を踏まえ、サンゴ砂礫が堆積して形成された島嶼国における今後の長期的な国土の強靱化を図っていくためには、以下の点を考慮していくことが重

図-11 前浜上に構築された護岸（左：サンゴ砂を用いたセメント袋詰め護岸，右：捨石護岸，Addu 環礁 Meedhoo 島）

要と考えられる。

- 1) これまで数千年かけて形成されてきたリーフや海岸を保全することにより，元来有してきた自然インフラとしての防護機能や海岸環境をできるだけ維持していくこと
- 2) 沿岸域における土地利用面における法規制や施策による強靱化対策（例えばバッファゾーンの確保），およびサンゴ砂礫の供給量を考慮した適切な土砂管理の実施
- 3) 経済開発に伴う沿岸開発や，やむを得ず海岸防護対策（特に構造物対策）を図る場合，サンゴ洲島特有の土砂供給や土砂移動機構を十分理解し，その影響を踏まえた上での計画策定

謝辞：本論文は，独立行政法人国際協力機構(JICA)により，2018年からモルディブで実施されている調査成果の一部を取りまとめたものである．本事業の実施に係った各関係機関の方々に謝意を表します．

参考文献

- 1) Second National Communication of Maldives, 2016.

- 2) UNDP: Developing a disaster risk profile for Maldives, RMSI, Vol. 1, 99p, 2006.
- 3) 宇多高明，谷本修志，坂野章，高木利光：リーフおよびリーフギャップ周辺におけるサンゴ片の移動機構，海岸工学論文集，第37巻，pp.215-219，1990.
- 4) Onaka S., Uda T., Sannami T., Ichikawa S., and Mimaki J.: Rapid accumulation of coral debris on coral cays in Tuvalu by storm waves and subsequent deformation, Proc. Inter. Conf. on Coastal Sedimentation, pp. 945-958, 2019.
- 5) Bay of Bengal Programme: Workshop on integrated reef resources management in the Maldives, 1996.
- 6) Glenn D. and Katharina F.: Water quality as a regional driver of coral biodiversity and macroalgae on the Great Barrier Reef, Ecological Applications, 20(3), pp. 840-850, 2010.
- 7) 宇多高明，三波俊郎，石川仁憲：リーフ海岸での砂供給量の推定-沖縄本島金武岬周辺の例-，土木学会論文集 B3 (海洋開発)，Vol.71, No.2, pp.I_727-I_732, 2015.
- 8) Baird W.F.: Study on coastal erosion in Mauritius, Final Technical Report, Ministry of Environment ENV/RM/5/1/1, 461p., 2003.

(Received February 6, 2020)

(Accepted May 1, 2020)

CURRENT CONDITIONS OF ARTIFICIAL MODIFICATIONS AND THEIR IMPACT ON SHORE AND CORAL REEFS IN MALDIVES

Susumu ONAKA, Toshiro SAN-NAMI, Shingo ICHIKAWA, Yuta AWAZU,
Tomohiro MORI and Takaaki UDA

The Maldives with low elevation and narrow land, which was formed by the accumulation of coral sand and gravels owing to long-term wave action, has been experiencing the vulnerability against the climate change. On the other hand, various artificial modifications on shore and coral reefs have been undertaken, especially on residential islands in accordance with recent active economic development. However, actual conditions of artificial modifications and their impact have not been discussed. This paper is to clarify the current conditions of artificial modifications on shore and coral reefs and to examine their impact on the basis of the field investigation on several residential islands in Maldives.