

島嶼国における持続可能性を考慮した 海岸保全対策の提案

市川 真吾¹・大中 晋²・泉 正寿³・遠藤 秀文⁴・宇多 高明⁵

^{1,2} 正会員 日本工営 (株) コンサルタント海外事業本部 開発事業部港湾空港部
(〒102-8539 東京都千代田区九段北 1-14-6)

E-mail: ichikawa-sn@n-koei.co.jp

^{3,4} 正会員 (株) ふたば (〒963-0115 福島県郡山市南 2-76)

E-mail: m-izumi@futasoku.co.jp

⁵ 正会員 一般財団法人土木研究センター (〒110-0016 東京都台東区台東 1-6-4)

E-mail: uda@pwrc.or.jp

ツバル国は、その国土がサンゴ礁起源の砂礫が堆積して形成された低平で狭隘な土地からなるため、高潮災害や海岸侵食が顕在化していたが、資機材の調達の高コストから、これまで十分な海岸保全対策がなされてこなかった。そこで自国で入手可能なサンゴ礫と砂を養浜材として利用し、防護とともに利用・環境に配慮した保全対策として礫養浜を提案し、実証事業として実施した。礫、砂の取得については、周辺海浜への影響を抑制するよう、その移動機構を考慮した計画とした。また海浜断面や突堤等の設計では、施設機能と利用・景観面の要求機能を満たすよう工夫するとともに、設計数量の削減も図った。また施工後における地域主導による海岸管理の実現と、それによる良好な海岸環境維持を目的とした環境啓蒙活動を実施し、一定の意識向上効果が確認された。

Key Words : gravel beach nourishment, climate change, beach erosion, environmental education, Tuvalu

1. はじめに

ツバル国は、フィジーの北方約1,000 kmに位置する南大洋州の島嶼国であり、人口は約1万人でその半数以上は首都のあるFunafuti環礁のFongafale島に集中している(図-1)。Funafuti環礁の面積はわずか2.4 km²であるが、礁湖の面積は約250 km²にも及ぶ。国土は主にサンゴ礁起源の礫とサンゴ・有孔虫起源の砂で構成されている。標高がC.D.L.+3.0 m程度の低平で狭隘な国土に近年の急激な人口集中が重なり、高波・高潮位(King tide)時における沿岸居住域への高波・浸水被害が生じるとともに、今後予想される気候変動に伴う海面上昇や外力の増大に対し、更に海岸災害リスクが高まることが懸念されている。ツ

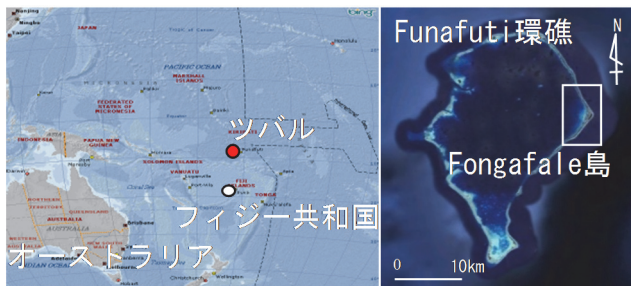


図-1 ツバル国, Fongafale 島の位置図

バル国をはじめとする南大洋州の小島嶼国では、一般に、海岸保全対策を行うための資機材の調達が困難であるとともに、海岸保全対策に対する十分な知見を有する人材もほとんどいない。その結果、従来実施されてきた海岸防護対策は図-2(a)に示すような、小さなコンクリートブロックや周辺から集めた礫を単に積み重ねて構築した護



(a) 崩壊前の護岸



(b) 崩壊後の護岸

図-2 現地で一般的な海岸防護策



図3 ツバル国の良好な状態の自然海浜

岸等、簡易的な手法に頼らざるを得なかった。しかしこのような対策は高波浪が襲来する毎に崩壊し、恒久的な対策とはなっていなかった (図-2(b))。

このような問題を受け、ツバル国で持続可能な海岸保全対策を検討するため、我が国による技術支援事業が行われ、その中で礫養浜がパイロット事業として実施された。そこで本研究は、ツバル国で実施中の礫養浜パイロット事業について、本提案に至った背景および設計の基本的な考え方を示すとともに、実施後の海岸状況や住民意識の変化について明らかにすることを目的とする。

2. 事業概要

本事業では、南大洋州の小島嶼国の特殊性である、限られた資材、機材および人材の中で、ツバル国での有効な海岸保全対策を実証すること、かつそれが今後ツバル国が持続的に実施していくことが可能な対策であることを示すことが求められた。また、提案する対策は、高潮・侵食防止機能を有するとともに、地域住民による海岸利用、およびツバルの自然景観、環境に調和することが求められた。図-3は環礁の中で、現在も良好な自然海浜が維持されているラグーン側の海岸状況を示す。ツバル国の国土は、元来サンゴ礫やサンゴ砂が波によって打ち上げられて形成されたものであり、海岸はサンゴ礫とサンゴや有孔虫起源の砂で構成されている。海岸に打ち上げられたサンゴ礫はstorm ridgeを形成し、高波浪に対する防護機能を果たしている。その前面には砂浜が形成され、漁業利用や住民の憩いの場として利用されてきた。

そこで本事業では、従来のツバル国における自然海浜の持つ防護、利用、環境に調和した海岸を復元することを目指し、同国で唯一調達可能なサンゴ礫と砂を用いた礫養浜による海岸防護対策を提案した。その妥当性を検証するために、現地パイロット的な実証工事を実施し、完成後の継続的なモニタリングを実施するものである。

事業を実施したFongafale島は、図-4に示すように、南北に約15 kmの長さを持つ三日月型の島である。中央部付近には幅700 m程度の土地が形成されているが、そこから南北両方向にその幅が急激に狭まり、100 m以下となる。中



図4 事業実施範囲

央部の幅広部は、南北からの沿岸漂砂により砂が少しずつ堆積し、形成されたと考えられており、この幅広いエリアが島の中心エリアとなっている。なお、周辺海域の波浪は、既往の観測記録によると、有義波高の最大値で外洋側は3.4 m (1990 -1992 年の観測)、ラグーン側は1.4 m (2009 年11 月-2010 年 3月の観測)となっている²⁾。

事業実施対象エリアの選定にあたり、本事業が実証事業であり、通常のフルスケール事業に比べて対象範囲が限られるとともに、提案する工法の妥当性を適切に評価できるよう、(1) 高波・高潮位時の越波・浸水問題に現在直面しているエリアであること、(2) 沿岸方向への養浜材流出の影響を極力抑えるために、沿岸漂砂の影響が少ない地点であること、(3) 地域住民の関心や海岸保全への理解を高める上で、同島の中で多くの人々が集まる中心的エリアであること、を考慮した。最終的に図-4に示す177 m区間を事業実施エリアとして選定した。

3. 礫材・砂材の調達計画

(1) 礫材の調達計画

礫材調査は、図-5に示すように海岸線に沿って礫が堆積している Fongafale 島を含む一連の 4 島で実施した。1971, 1984, 2010 年の空中写真を用いて汀線変化解析を行った結果のうち、Funangongo 島および Funamanu 島の解析結果³⁾⁴⁾を図-6に示す。また、汀線変化解析から算出した島の面積変化量について、それぞれ全体の変化量、両端部の内訳、両端部の合計で示した結果を図-7に示す。まず、図-7(a)で島全体の面積変化に着目すると、Fongafale 島北部を除き、その面積は全体的に増加傾向にある。なお、1971 年から 1984 年にかけての増加量がそれ以降の増加量に比べ大きいのは、1972 年に当該地域に襲来したサイクロン Bebe(中心気圧 945 hPa,最大風速約 40 m/s)の影響で、外洋側から礫が大量に打ち上げられたことに起因する⁵⁾。次に図-7(b)において、各島の東端及び西端に

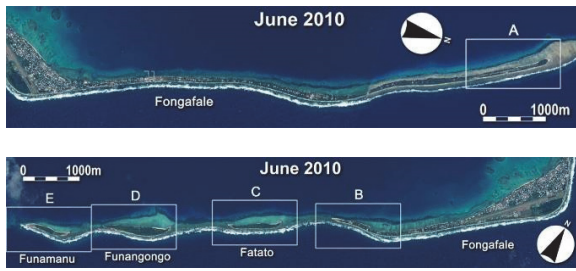
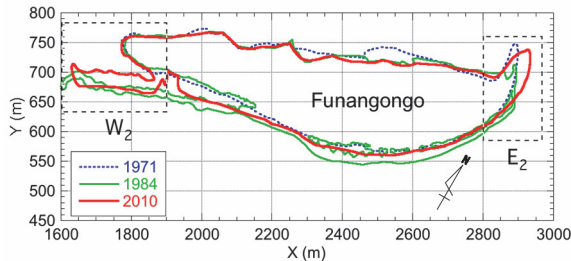
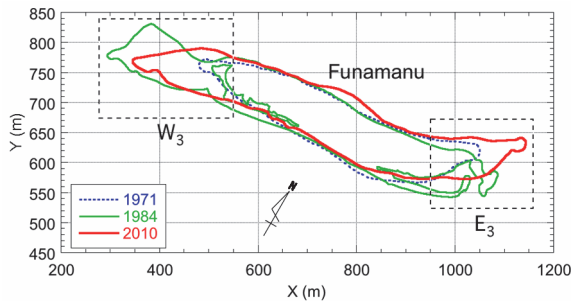


図-5 礫の調達に係る調査エリア



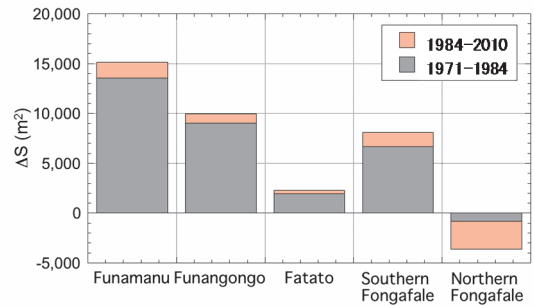
(a) Funangongo 島



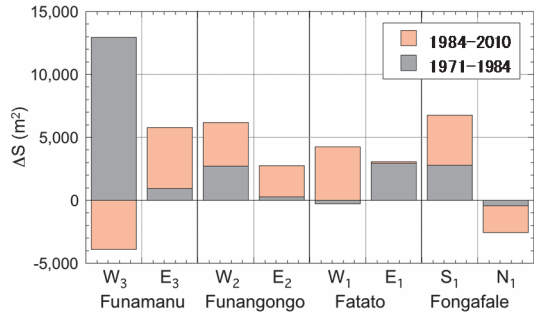
(b) Funamanu 島

図-6 汀線変化解析の結果(1974, 1984, 2010年)

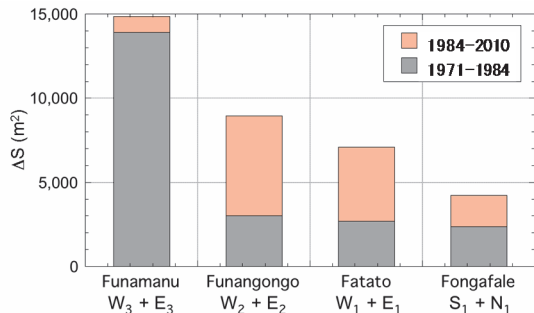
おける面積変化に着目すると、Fongafale 島を除く全島で、島の東端に比べ西端での面積増加量が大きいことが分かる。さらに、各端部の合計の変化量を比較した場合、図-7(c)に示すように、西側に位置する島ほどその増加量が大きく、最西端の Funamanu 島でその堆積量は最大となっている。これより、島全体の面積が増加傾向にあり、かつ各島とも西側の方が増加していることから、西向きの礫の移動機構の存在が示唆された。なお、Funamanu 島の西側には約 20 m 以深の水路が存在することから、Funamanu 島まで移動してきた礫は最終的に本水路に落ち込み、一連の礫の移動の連続性はここでほぼ遮断されていると推察された。これより、礫の移動帯の下手端から礫を採取することが他の島の海浜変形への影響が少ないと考え、特に近年の増加量の多い Funamanu 島の両端部と Funangongo 島の西端部が礫調達の候補地として選定された。なお、1971 年から 2010 年までの Funangongo 島、Funamanu 島の両端における面積増加はそれぞれ約 $15,000 \text{ m}^2$ 、 $8,700 \text{ m}^2$ であり(図-7(c))、これに現地調査で得られた礫の存在する高さの平均値 1.5 m を乗じると、その増加量はそれぞれ $22,500 \text{ m}^3$ 、 $13,050 \text{ m}^3$ と算出された。これは、実証事業で必要な礫の量約 $3,500 \text{ m}^3$ に比べ 1 オ



(a)各島の全体の変化量



(b)各島の端部の変化量



(c)各島の両端部の変化量の合計

図-7 各島における面積変化量

ーダー大きい量である。

礫材の取得・運搬は、引船と台船を用いて実施する計画であった。一方、これら候補地周辺の海岸域は水深が 1 m 程度と非常に浅く、また多くのサンゴが生息する海域でもあったため、実際の施工に際して船底がサンゴに接触することによるサンゴの損傷を避ける必要があった。これより、候補 3 地点のうち、最も水深が小さくサンゴの生息状況が良好であった Funamanu 島西端を除く、Funamanu 島東端および Funangongo 西端の 2 箇所から優先的に礫を取得することとした。なおこの 2 箇所は、サイクロン Bebe 以降(1984-2010 年)も堆積傾向にあり、その点からも礫取得後の周辺海浜への影響を最小限とすることが期待された。施工中は、積載による作業船の喫水変化と潮位による水深変化に留意し、船底がサンゴに接触しないよう細心の注意を払った。また海岸からの礫の取得は、礫取得後の局所的地形変化を極力抑えるため、現海浜勾配を維持しつつ、法肩から斜面部を幅約 2 m で一様に採取した。

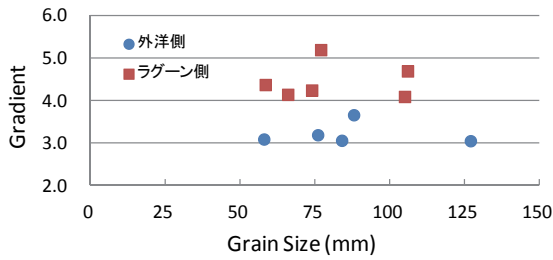


図-8 現地の礫浜の粒径と勾配の関係

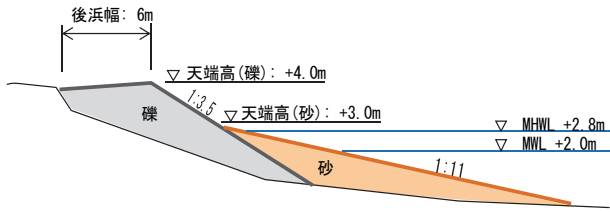


図-9 養浜の断面諸元

(2) 砂の調達計画

砂は礫に比べてその粒径が小さいため、波や流れによる流失が懸念される一方で、今後の維持管理では砂の追加投入量を最小限とすることが望まれる。砂の流出を極力抑えるために、(1) 砂の沿岸方向移動による流失を抑えるため、両端に突堤を設置し静的安定化を目指すこと、(2) 粒径の大きい砂を用いることにより、海浜の緩勾配化および巻上げによる岸沖方向移動をできるだけ抑えることとした。ラグーン内の海底に堆積した砂の粒径と組成調査によれば、水深 10m 付近までの比較的浅い海域には、サンゴや有孔虫成分を多く含む、中央粒径 0.5mm 以上の粗砂が多く存在することが確認された。一方、それよりも深い海域では、ハリメダ(石灰質緑藻)を含んだ砂の割合が多いことが確認された。この砂はサンゴや有孔虫起源の砂に比べて粒度が細かいシルト砂であるため、流出量の低減を目指した養浜材としては適さないものと判断された。これより本事業では、サンゴや有孔虫成分を多く含む粗砂をできるだけ用いる方針とした。当初計画では、本工事の中で海底より砂を取得する計画であったが、ツバル国政府より、本事業と同時期に実施されていた他ドナーによる事業で取得され、陸域に投入された砂の利用が効率的との提案があった。これは複数の海域から浚渫された砂であったため、浚渫土砂の粒径と組成調査を行い、本事業に満足する砂であることを確認した上で、これを養浜砂として用いた。

4. 礫養浜の設計

ツバル国で現在も良好な状態で残っている礫浜は、これまで様々な潮位条件の下で、長期間の波の作用を受けているにもかかわらず安定状態にある。これより、礫浜

の各諸元は、関連する設計指針や数値検討とともに、現地での海岸踏査結果から得られた情報、知見を最大限活用し設定した。以下に主要な諸元の考え方・設定を示す。

(1) 後浜幅

環礁内の周辺の島に残る自然海岸において、後浜幅(礫部分の天端幅)を調査した結果によると、後浜幅は約 2.7m から 6.0m に分布し、その平均値は 4.0m であった。この天端幅は、現地波浪に対して ridge が安定するために最低限必要な幅と判断できた。一方、過去 2 時期の衛星画像の解析結果より、1941 年から 2010 年にかけての対象域の汀線後退量は約 10m と示された。この後退量 10m を目標とする汀線回復量に設定した場合、後述の提案断面形状より後浜幅として約 6.0m 確保する必要があった。そのため、想定する設計波浪条件に対する波の打上げ高を計算し、背後への波の打上げが生じないことを確認した上で、後浜幅を 6.0m と設定した。

(2) 海浜高

自然海岸の storm ridge は、長期間の波浪を経験したうえで形成されているものであるため、礫浜高はこれに準じて決めるのが妥当と考えられた。これより、現地海岸の storm ridge の高さを 11 点で測定し、その平均値の C.D.L.+4.0m を海浜高の設計値として採用した。また、砂浜の天端高(礫部との境界)についても同様の調査を実施し、その結果、+2.0m~+2.8m に分布する結果が得られた。投入後の砂の変動、それによる一部流出の可能性を考え、若干の余裕を持たせ、C.D.L.+3.0m と設定した。

(3) 海浜勾配

現地の礫浜部の粒径と勾配の調査の結果によれば、図-8 に示すように、外洋側は 1/3~1/4、ラグーン側は 1/4~1/5 であり、外洋側の方が急勾配となっている。本設計では、礫材数量の削減も考慮し、初期形状としてはラグーン側で得られた勾配よりもやや急勾配側の 1/3.5 と設定した。砂断面部の海浜勾配についても同様の調査を行ったところ、自然海浜の砂浜勾配は 1/9~1/12 に分布していた。粒径と勾配の明確な傾向が示されなかったが、南側にわずかに残る砂浜勾配が 1/12 程度であり、今回投入予定の養浜砂はその砂浜の粒径より粗いことを考慮し、砂断面の海浜勾配は 1/11 と設定した。このようにして設定した養浜形状を図-9 に示す。

(4) 突堤

前述のように、養浜砂の歩留まりを向上させるため、養浜エリア両端部に捨石傾斜タイプの突堤を配置した。推定された設計波高 $H_{1/3} = 1.6m$ に対し、0.9t/個程度の被覆石が必要となったが、このサイズの石材はツバル国内

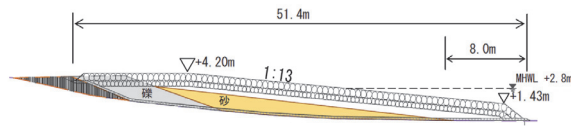


図-10 突堤の縦断面図

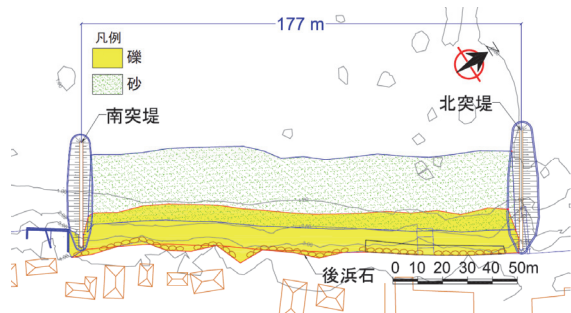


図-11 礫浜の最終計画平面図



図-12 完成後の突堤



図-13 官民境界位置に設置した後浜石

では存在しない。このため、ツバル国から最も近い調達国として1,000km以上離れたフィジーから輸入する必要が生じ、材料調達コストの低減化を図る必要があった。そこで所要の機能は満たしつつも極力経済性を確保できるよう、以下の施設諸元の工夫を行った。

a) 斜面勾配

突堤斜面部は、利用面を考えると緩勾配であることが求められるが、一方で数量が増加する。これより、海岸への横方向へのアクセスを必要としない北突堤北側の斜面勾配は1:1.5とし、材料の低減化を図った。それ以外の高い頻度での利用が想定される斜面については、利用可能な最小勾配として1:2と設定した。

b) 天端高

施設を超えての礫や砂の流失を防ぐには、十分な天端高を確保することが望ましいが、その一方でコスト面や利用・景観の悪化を招く。そのため、突堤の基部の天端



(a) 事業実施前



(b) 事業実施後

図-14 事業実施前後の海岸の変化

高は、礫の天端面からの高さを+20cm程度に抑えることで、礫材の流失を抑えるとともに、隣接する海岸へのアクセスを阻害しないよう配慮した。また突堤天端高は、岸沖方向の海浜勾配に合わせて減じる形状とした。

c) 堤長

堤長は養浜材の補砂機能を有する範囲で最小化を目指した。季節的な波向変動による流失を抑えるための延長を数値モデル⁹⁾により検討した結果、変動量は岸沖方向へ約6mとなり、これに余裕を見込み、突堤の堤長は養浜砂の計画法尻位置から+8mとした。

突堤の平面図および縦断面図を図-10に、全体の計画平面図を図-11に、完成した突堤(北側)を図-12に示す。

(5) 後浜石の設置

完成後の礫浜エリアは公共海岸として利用、維持管理していくため、実施前の背後域の個人の土地との官民境界の識別が必要となり、また高波浪時の礫材の岸側への打ち上げの可能性も考えられたため、背後地と礫浜の境界にこれらを抑制する施設が必要と判断された。加えて、当初計画ではコンクリート製の後退パラペットを計画していたが、現地での施工上の品質確保の問題、および自然景観への悪影響が懸念された。そこで図-13に示すような自然石を用い、これを官民境界に連続的に配置する計画に変更した。設置する石は、人々がここに腰掛けることを想定し、適度な高さとなるよう配慮した。完成した礫浜を図-14に示す。

表-1 住民アンケート結果(海岸維持管理への参加意識)

質問	海岸を良好な状態に保つために、あなたはなにか行動を起こしたいと思いますか					
回答分類	積極的な姿勢				消極的な姿勢	
票数(%)	35 (83%)				7 (17%)	
活動分類	注意喚起	海岸清掃	礫浜整形	海藻除去	ドナーに依頼	その他
票数(%)	23 (66%)	13 (37%)	3 (9%)	2 (6%)	5 (71%)	2 (29%)

5. 住民への環境啓蒙活動

事業実施海岸は、今後地域住民の憩いの場として利用されるため、地域主導の海岸管理の実現化が求められ、その第一ステップとして、住民の環境意識を向上させるための環境啓蒙活動を行った。その際、年齢・ジェンダーの違いなく幅広く意識の改善を目指すため、ツバル国唯一のマスメディアである島内ラジオを利用した広報活動、海岸清掃イベント、ビーチソング大会、工事中の社会見学、絵コンテスト等を実施した。海岸清掃イベントは政府・住民合わせて約150名が参加するイベントとなり、事業実施前の海岸ゴミの一斉清掃を行った。一連の環境教育活動の成果を確認するため、礫浜の施工直後に事業実施域の背後住民42世帯に対し、海岸維持管理への参加意識に係る意識調査を行った。その結果、表-1に示すように、約80%以上の高い割合の住民が海岸維持管理に積極的に係っていく姿勢を示し、環境維持に係る注意喚起や海岸清掃活動を行っていく意思を示したことから、これら環境啓蒙活動による一定の効果が確認された。

6. おわりに

完成した礫浜のツバル国における有効性を確認するた

(2016.2.4 受付)

A SUSTAINABLE COASTAL CONSERVATION MEASURE APPLIED IN ISAND NATION, TUVALU

Shingo ICHIKAWA, Susumu ONAKA, Masatoshi IZUMI, Shubun ENDO and Takaaki UDA

National land of Tuvalu was formed by coral gravel and sand. Although the island is vulnerable to high wave and beach erosion due to a narrow and low elevated land, proper coastal conservation measures had not been implemented because of the difficulties of procurement of materials and equipments. Gravel beach nourishment was proposed as a coastal conservation measure to improve three functions; protection, beach use, and environment using sustainable materials in Tuvalu. Gravel beach and groins were designed with consideration of these three functions as well as the reduction of required volume of materials. Environmental education was conducted to the public to improve their awareness on beach environment, and to enhance their voluntary participation to beach management and a certain effect by the education was confirmed through interview survey to stakeholders.

めに、2016年1月よりモニタリングが開始された。モニタリングは約1年半にわたって、1〜3カ月おきに実施される予定であり、礫浜の挙動や周辺海岸への影響を評価するための、事業実施範囲付近での横断測量や、自然環境への影響を評価するためのサンゴ、生物、水質調査などを実施する。また、自主的な海岸維持管理状況についても、海岸清掃の実施頻度、参加人数などを指標にモニタリングを行い、その効果を評価していく予定である。

謝辞：本論文は、独立行政法人国際協力機構(JICA)により、2012年からツバル国で実施されている開発計画調査型技術協力事業の成果の一部を取り纏めたものです。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) Xue, C. and F. Malolonga: Coastal sedimentation and coastal management of Fongafale, Funafuti Atoll Tuvalu, SOPAC Technical Report 221, 1995.
- 2) 独立行政法人国際協力機構：ツバル国エコシステム評価及び海岸防護・再生計画調査 ファイナル・レポート[第2編:メインレポート], pp.4-24-4-29, 2011.
- 3) 宇多高明, 三牧純子, 大中 晋, 三波俊郎: Cyclone 襲来時の高波浪による Tuvalu の洲島へのサンゴ礫の堆積とその後の変形, 地形, Vol.36, pp.285-308, 2015.
- 4) 宇多高明, 大中 晋, 三波俊郎: Tuvalu Funamanu 島への Cyclone Bebe による礫の打ち上げ実態調査, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol. 69, No. 2, p.I_820-I_825, 2013.
- 5) Maragos, J. E., Baines, G. B. K. and Beveridge, P. J.: Tropical cyclone Bebe creates a new land formation on Funafuti Atoll, Science, Vol. 181, pp.1161-1164, 1973.
- 6) 宇多高明, 大中 晋, 芹沢真澄, 泉 正寿, 三波俊郎, 宮原志帆: Tuvalu Fongafale 島西岸における礫養浜計画の検討, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.69, No.2, pp.I_736-I_740, 2013.