

リーフ海岸における養浜工の計画・設計および養浜後の海浜応答

PLANNING AND DESIGN OF BEACH NOURISHMENT ON CORAL REEF COAST AND BEACH CHANGES AFTER NOURISHMENT

大中 晋*・遠藤秀文*・吉井一郎*

Susumu ONAKA, Shubun ENDO and Ichiro YOSHII

Extensive beach nourishment was carried out at Sanur and Nusa Dua beaches in Bali, Indonesia to recover the natural sandy beaches on these reef coasts. Planning and construction of beach nourishment were described in detail. Sanur beach was nourished with $3.0 \times 10^5 \text{ m}^3$ of sand, Dusa Dua beach with $3.4 \times 10^5 \text{ m}^3$ of sand. Monitoring surveys have been conducted to investigate the stability of the nourished beaches. Due to changes in the shoreline and longitudinal profiles, artificial beaches which were separated by groins and headlands reached a stable condition within a few months. Sand loss was negligible.

Key Words : Beach nourishment, beach erosion, coral reef, monitoring survey, design

1. まえがき

わが国では、サンゴ礁海岸が地域的に偏在しているため、サンゴ礁海岸での養浜は沖縄でいくつかの事例が見られるのみである。しかしそのほとんどはホテル前面でのプライベートビーチの確保を目的としているため範囲が限定され、また養浜土砂量も一箇所あたり数千～一万 m^3 程度のものがほとんどである。また、このような養浜工の設計・施工、さらには実施後の維持管理まで含めた事例報告はほとんど見あたらないのが現状である。インドネシアの Bali 島南部に位置する Sanur 海岸と Nusa Dua 海岸では、2001 年よりわが国の援助 (JBIC) による海岸保全工事が実施されてきている。これは、1970 年代よりバリ島で顕在化しつつあったサンゴ礁海岸の侵食問題に対し、養浜工による砂浜の回復を目的とするものであり、JIBC の円借款案件として初めての海岸保全プロジェクトである。リーフ上での大規模な養浜事例は、上述の理由からこれまで国内ではほとんど例がないため、Bali 島の事例紹介は、今後の養浜事業の計画上、参考になると考えられる。このことから、本報告では Bali 島の Sanur 海岸と Nusa Dua 海岸で実施された養浜事業について、計画・設計時における考え方および留意点を述べるとともに、現在継続的に実施している海岸モニタリング調査の結果から得られた養浜後の海浜応答について明らかにする。

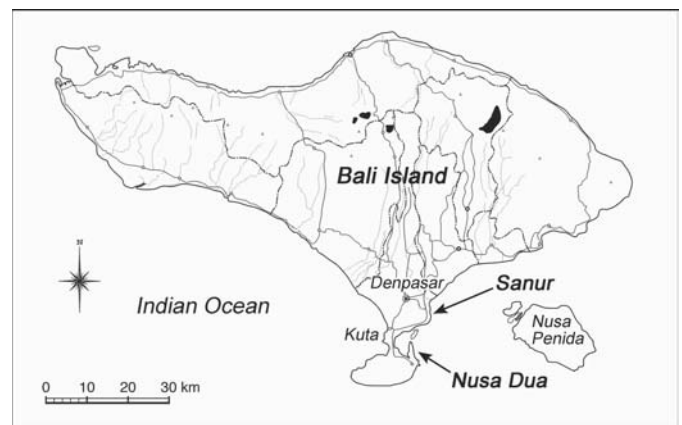


図-1 Bali 島の Sanur 海岸と Nusa Dua 海岸の位置

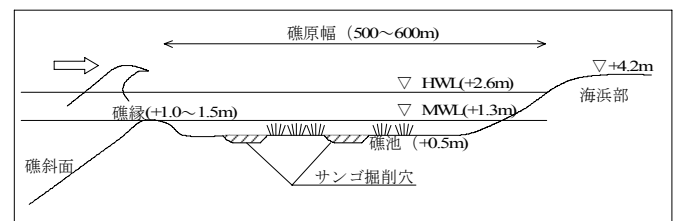


図-2 両海岸のリーフ断面状況

* コンサルタント海外事業本部 運輸・交通事業部 港湾・空港部



写真-1 Sanur 海岸における侵食状況

2. 養浜プロジェクトの概要

(1) リーフ海岸における侵食の経緯

養浜事業の対象海岸は、Bali 島内の有名なサンゴ礁海岸である Sanur 海岸と Nusa Dua 海岸である。図-1 に示すように、両海岸とも Bali 島南東部に位置し、Sanur 海岸は総延長が約 6.2km、Nusa Dua 海岸は約 5.6km である。また Sanur 海岸の平均的なリーフ幅は 600m、Nusa Dua 海岸は約 500m である。これらの海岸の潮位は $HWL+2.6m$ 、 $LWL\pm 0.0m$ にあり、平均的なリーフ上水深は $+0.5m$ である（図-2）。当海岸の漂砂源は、サンゴ片や有孔虫、貝殻といった生物起源のものが主である。両海岸とも 1960 年代まではこれらサンゴ起源の白砂による砂浜が存在していたが、その後、後背地におけるホテル開発に伴う人為的改変に加え、建材利用を目的としたサンゴ採掘（coral mining）が盛んに行われた結果、1990 年代には両海岸とも数 km の範囲で汀線の後退が生じた。また、ホテルやレストランなどの施設が海岸線近傍に造られたために、施設前面の海岸線が後退すると、各ホテルや地域政府により護岸や突堤が建設された。とくに海岸護岸の一部については、少しでも自己の用地を広げるために海側にせり出して建設する例も見られ、これが更なる砂浜の消失を招いた。例えば、写真-1 は Sanur 海岸の同一地点における



図-3 計画平面図（Sanur 海岸）



図-4 計画平面図（Nusa Dua 海岸）

養浜前の 1992 年と、養浜工事直前の 2001 年における海岸状況を示す。1992 年当時はまだ砂浜が存在していたが、2001 年には砂浜が消失するとともに、侵食防止対策として設置された護岸もすでに崩壊している。

(2) SANUR 海岸と NUSA DUA 海岸の波浪および漂砂特性

両海岸とも南東からの入射波向が卓越するため、全体的には北向きの沿岸漂砂が卓越する。Sanur 海岸においては、リーフギャップを境にリーフ地形が大きく屈曲しているため、北部では北向きの沿岸漂砂が卓越するが、南部では以前は弱いながらも南向きの沿岸漂砂が卓越していた。しかし、その後 1998 年に実施されたリゾート開発に伴うプロジェクトエリア南端部での大規模リーフ掘削により、リーフに到達する波向の変化が生じ、現在では全体として北に向かう沿岸漂砂となっている¹⁾。

両海岸の沖波波浪条件は、平均的には 1m 以下の頻度が 95% 以上であり、周期は 9~11s が卓越している。過去の汀線変化状況から推定された沿岸漂砂量は、Sanur 海岸で $6,000m^3/yr$ 程度、Nusa Dua 海岸で $8,000m^3/yr$ 程度²⁾であり、一般の砂浜海岸における漂砂量に比べて小さい。これはリーフの存在により、漂砂の外力要因である波浪が、沖のリーフエッジで一度砕波し、減衰するためである。



2002年（養浜前）



2004年（養浜後）


写真－2 1978年と施工前後における海岸状況
(Sanur 海岸)

(3) 養浜プロジェクトの概要

観光資源として重要な砂浜の復元を目的とし、日本の政府開発援助により 1987 年より Sanur 海岸と Nusa Dua 海岸を含む 4 海岸での調査・計画・設計が開始された。途中、インドネシア国の政変に伴う事業中断があったものの、Sanur 海岸と Nusa Dua 海岸では 2001 年に海岸保全工事が開始された。工事は現在すでに完了し、養浜砂投入からすでに 2 年半以上が経過している。

表－1 利用面および景観面に対する配慮

	対象	考慮すべき点
利用面	観光客	陸域における日光浴、海水浴、ウォーキング等の場の確保
		海域におけるマリンスポーツ(シュノーケリング、ジェットスキー、パラセーリング等)の場の確保
	地域住民	観光産業活動(レストラン、土産物店等)の確保
		ヒンズー教の祭事としての場の確保
		地域住民の憩いの場の確保
	ホテル	漁船やレジャーボートの泊地確保、および航路の確保
ホテル用地と砂浜との管理境界の設定および管理方法		
景観面	観光客	ホテル前面の砂浜の連続性を、構造物の設置で阻害しないこと
		サンゴ礁海岸特有の自然景観の維持（コバルトブルーの海と白砂のイメージ）
	地域住民	構造物の設置により、特に水平線の視界を阻害しないこと

両海岸における海岸保全対策の基本的な考え方は、養浜と流出防止施設を併用した静的安定化を図ることである。流出防止施設としては、当地点の潮位差が 2.6m と大きいことやリーフ上の海浜利用を考慮し、突堤・ヘッドランドを組み合わせるものとした。Sanur 海岸では、図－3 に示すように 13 基の突堤・ヘッドランド（6 基が新設、7 基が改修）と離岸堤 1 基の建設が行われた後、約 $30 \times 10^4 \text{m}^3$ の養浜砂が投入された。一方、Nusa Dua 海岸においては、図－4 のように 13 基の突堤・ヘッドランド（5 基が新設、8 基が改修）の建設後、約 $34 \times 10^4 \text{m}^3$ の養浜砂が投入された。写真－2 は、1978 年における Sanur 海岸から、著しい侵食を受けて護岸が崩壊した 2002 年を経て、養浜により砂浜が復元された状況までの海岸の変遷を示すが、養浜によって原風景が復活したことがよく分かる。

養浜砂には、Nusa Dua 海岸南方のリーフ沖の水深 20 ～30m 地点の海底砂を使用し、自航式浚渫船により海底砂を採取して海岸へ投入した。なお、Nusa Dua 海岸においてはリーフ外から送砂管を介して直接海岸に砂を投入したのに対し、Sanur 海岸ではリーフ上に設けた貯砂地に一旦砂を仮置きし、そこからのダンプ輸送により海岸へ投入した。

3. 計画・設計上の基本方針

(1) 対象海岸の利用上の特殊性

対象海岸は、一般の海岸と比較して次の利用上の特殊性を有している。

- ・ 国内外から多くの観光客が訪れる海岸であるとともに、外資系のホテルやこれら観光客相手のマリンスポーツ、レストランなど、観光産業に従事する多くの地域住民が海岸を基盤として生計を立てていること。
- ・ 地域住民にとって、砂浜は単に生計やレクリエーションの場だけではなく、宗教上の儀式的重要な場であること。
- ・ 観光業に従事する住民とともに、漁民も混在していること。

これらの特殊性より、養浜工の計画・設計に当たり、砂浜保持機能とともに、観光客、地域住民、ホテルに対して、特に利用面・景観面への配慮が求められた（表-1 参照）。景観面においては、とくに砂や流出防止施設の構成材である石材の色についてサンゴ礁海岸のイメージに即したものとする必要があった。また利用面では、陸域での日光浴や海水浴、ウォーキング、宗教上の祭事などの利用、水域部では、ジェットスキーやシュノーケリングなどのマリンスポーツや、漁船の利用などが錯綜した状況にあり、これらを考慮した平面配置計画および付帯施設の設計諸元を決定する必要があった。これらの点より、本プロジェクトの計画にあたり次の基本方針を設定した。

- ・ 突堤・ヘッドランドなどの海岸施設の配置計画に際しては、養浜砂の流出防止機能のみでなく、背後の海浜利用に支障を来さない配置計画とする。
- ・ 自然の景観をできるだけ確保するため、海岸施設の配置は安定した浜幅が確保できる範囲で最小限とする。
- ・ 海岸施設の基本諸元（天端高、幅、長さ）は、必要機能とのバランスを考え、できるだけ小規模なものとする。
- ・ 海岸施設の被覆材は自然石で、かつ白色系の石灰石のみを用いる。
- ・ 養浜砂は現状と同様の粒径・色彩を持つもののみ用いる。
- ・ 養浜後の官民境界の明確化および海岸沿岸方向のアクセスの連続性の確保と憩いの場の提供を目的とした遊歩道を全域に設置する。

(2) 養浜平面形状の設定

養浜工の平面形状は、養浜後の変形を最小限とするため、汀線が卓越入射波の方向と直角となるよう、養浜前の汀線形状に沿う形を基本とし、汀線変化予測計算を実施して汀線の安定性を確認した。また、ヘッドの存在による局所的な汀線形状の変化は、Hsu・Evans の式³⁾を用いて修正した。必要養浜幅については、侵食前の 1970 年代当時の汀線位置まで復元することを基本とし、平均的な海浜幅として約 20m を設定した。

(3) 養浜断面形状の設定

主要な養浜断面諸元としては、前浜勾配およびバーム高である。養浜砂には、前述のとおりリーフ沖の海底砂を用いたが、事前の底質調査により現海浜部と同様のサンゴ砂であること、また同様の粒度組成、中央粒径（ $d_{50}=0.6\text{mm}$ 程度）を持つことを確認している。これより、基本的には養浜前の自然海浜部の前浜勾配（ $1/8\sim 1/10$ ）と等しくなるように設定した。またバーム高についても現況と同様のバーム高（D.L.+4.0～+4.2m）とした。

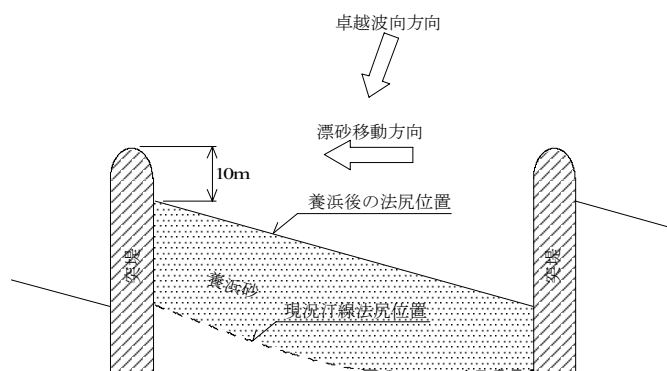


図-5 突堤長と養浜位置との関係

(4) 突堤・ヘッドランドの基本諸元の設定

本プロジェクトは円借款プロジェクトであることから、プロジェクト完了後の維持管理業務は相手国政府側に委ねられる。このため、相手国側の維持管理をできるだけ低減させるために、突堤・ヘッドランドなどの流出防止施設を併用した静的安定化を図る設計思想である。砂の流出防止の機能面からは、養浜幅に対してできるだけ余裕長を持たせる方が効果的であるが、反面、突堤の延伸は利用面・景観面での悪化を招く。当海岸ではとくにマリンスポーツに従事する地域住民および漁民から、堤長をできるだけ短くするように強い要請が再三挙げられていた。このため計画段階において、現地における既存突堤と汀線位置との関係や、砂の下手側への回り込み状況などを再三確認した結果、図-5 に示すように必要最低限の堤長として、突堤間の漂砂下手側（汀線が前進する側）の養浜のり尻位置から 10m 沖側までとした。

天端高については、天端面を越えた下手側への砂の流出を防ぐ機能を持たすとともに、天端面利用の考え方により決定した。本設計では、景観上の圧迫感を最小限としつつ、突堤・ヘッドランドの天端面を市民の憩いの場として積極的に利用することを基本方針とした。既存のいくつかの異なる天端高に関する各潮位条件下における機能面、景観上の圧迫感、天端状況（越波状況および海藻付着状況）を事前に十分に調査した結果、天端高は+3.6m（HWL+1.0m）と設定した。

4. 養浜後の汀線・海浜縦断形モニタリング

養浜工事においては、将来的な維持管理計画を策定する上で養浜後の砂の流出量の推定が必要となるため、本工事においても養浜直後から継続的なモニタリング調査を実施した。モニタリング調査は波浪観測と養浜後の海浜測量、粒度分布の変化、定点写真撮影、水質・生物などの環境調査からなり、Sanur 海岸と Nusa Dua 海岸それぞれにおいて実施した。両海岸とも突堤・ヘッドランドと離岸堤が利用されている（ここでは図-3 に示す）。



写真-3 地区 A 付近の空中写真



写真-4 地区 B 付近の空中写真

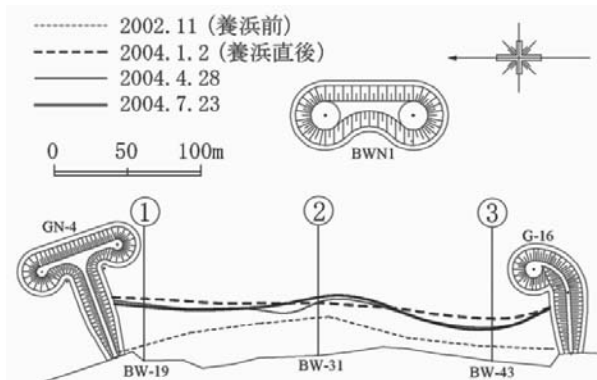


図-6 地区 A の構造物配置と養浜前後の汀線変化

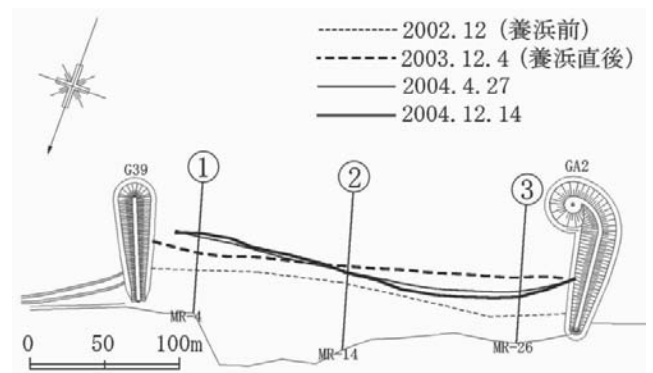


図-8 地区 B の構造物配置と養浜前後の汀線変化

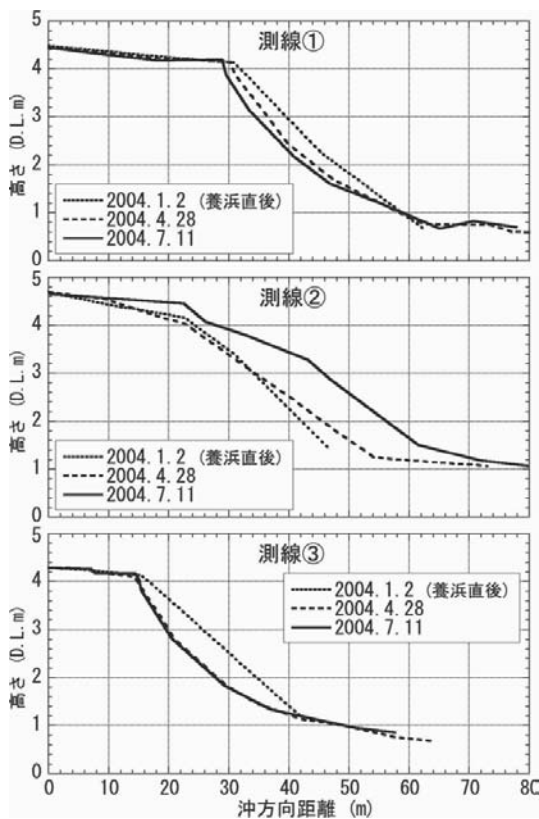


図-7 地区 A の代表 3 側線における海浜縦断形変化

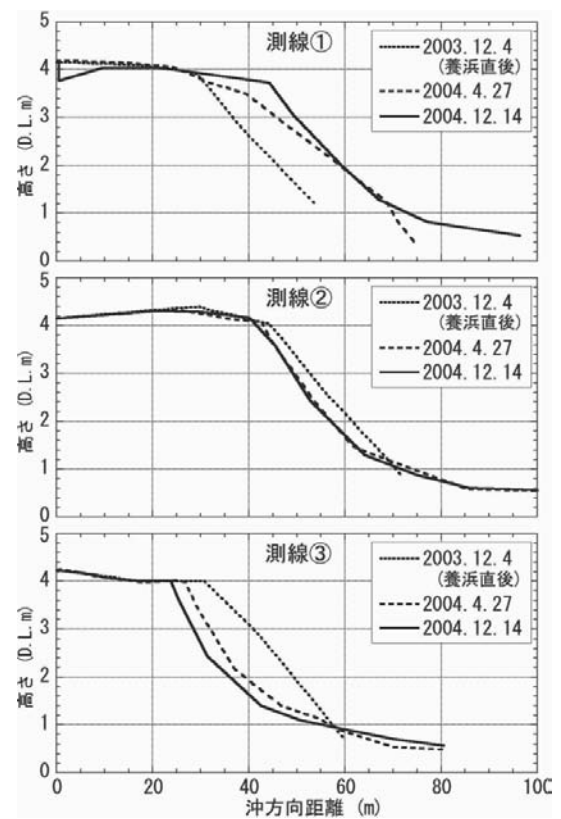


図-9 地区 B の代表 3 側線における海浜縦断形変化

Sanur 海岸のほぼ中央付近に位置し、ヘッドランドに囲まれた区域の沖合に離岸堤が設置された場所（地区 A、写真-3）と、Sanur 海岸南端部で、突堤・ヘッドランドのみが設置された場所（地区 B、写真-4）の 2 地点について、海浜モニタリング結果を以下に示す。

(1) 地区 A

地区 A の構造物の配置と、養浜前後における汀線変化を図-6 に示す。また、図-6 に示す 3 測線（測線①、②、③）の海浜縦断形の変化を図-7 に示す。この地区ではヘッドランド間の沖合約 120m に離岸堤があるため、それによる波の遮蔽効果によって中央部で舌状砂州（トンボロ）が形成されている。その堆積土砂は、凸部の両側から運び込まれた。このため、舌状砂州の両側では汀線の後退が生じたが、施工後約半年後には汀線は安定状態に達した。

海浜縦断形に着目すると、図-7 より舌状砂州形成位置の汀線前進域では上方に凸状の、また、その両側の汀線後退域では上方に凹状の縦断形と変化した。また、図-6 に示した汀線変化から判断すれば、ヘッドランド間の海浜は安定状態に達しているものと考えられる。

(2) 地区 B

地区 A と同様な方法でモニタリング結果を整理した。図-8、9 は、突堤・ヘッドランドの設置された地区 B での汀線変化と海浜縦断形の変化である。ここでは沖合でリーフの掘削が行われたことから波の場が変化し、時計回りの方向からの波の入射が著しくなった^り。このため突堤・ヘッドランド間では中央より左側では汀線が前進、右側では後退という、斜め入射波条件下での典型的な汀線変化が生じた。養浜直後には顕著な汀線変化が見られたが、その後汀線は安定した。また海浜縦断形はほぼ D.L. = +1m~4m の間で平行移動している。変形は起きたものの、養浜による前進量と比較すればその変動幅は小さい。

測量結果より得られたプロジェクト全区間における各突堤間での土砂収支より、養浜直後には初期養浜形状と安定汀線形状との差異から生ずる一時的な汀線変化、それによる土砂収支の変化が見られたが、ほぼ 2 ヶ月後より、ほとんどの突堤間での土砂収支はほぼ一定となり、安定化に向かったことが確認された。

5. 養浜後の海浜利用状況

Sanur 海岸における砂浜の復元後の海岸利用状況を示す。政府観光局からの宿泊率の統計データによれば、施工前にホテル前面にほとんどビーチが存在しなかった Sanur 海岸の Puri Santria Hotel と Nusa Dua 海岸の Bali

表-2 宿泊率の変化

ホテル名	客室数	宿泊率	
		養浜前(2001年)	養浜後(2004年)
Puri Santria Hotel (Sanur)	182	36%	85%
Bali Tropic Hotel (Nusa Dua)	114	56%	67%



写真-5 養浜後の海岸利用状況（Sanur 海岸）

表-3 北 Sanur の来場者数の伸び率
(突堤 No. G3-G4 付近)

年	2001	2002	2003	2004
駐車台数	113,671	183,697	222,751	290,420
来場者数	341,014	551,090	668,254	871,260
伸び率	100%	162%	196%	255%

Tropic Hotel では、表-2 の通り養浜後に顕著な宿泊率の伸びを示している。なおこれらのホテルでは、この間特にホテル施設の改修などは行っていない。現段階では、宿泊率の増加が砂浜の回復に起因するものかどうかを明確に示すことはできないが、少なくともこれらのホテルオーナー

からは、砂浜回復の効果があるとのヒアリング結果を受けている。

砂浜回復後に最も顕著な違いが見られたのは、ホテル前面のプライベートビーチ以外のローカルエリアである。写真-5 は、週末の朝のローカルエリアの状況を示したものである。わずか数百 m 程度の海浜に多くの住民が訪れている状況がわかる。また突堤先端も住民の休息の場として利用されている。北 Sanur 行政区より入手した駐車場収益金データより来場者数を推定すると、表-3 に示すとおり、突堤 G3 および G4 付近における来場者数は、養浜前の 2001 年から養浜後の 2004 年で約 2.5 倍の伸びを示している。また、養浜工事前にはどちらかというと批判的であった漁民やマリネレジャーに従事する住民においても、養浜実施後はプロジェクトに賛同する意見が大多数である。

6. おわりに

これまで、国内ではほとんど事例のない、リーフ海岸における大規模な養浜工事について、計画・設計上の考え方および留意点を明らかにした。また、現在も継続実施中の汀線モニタリング調査より、養浜後の海浜応答を明らかにし、人工海浜が予測どおり安定化されつつあることが分かった。養浜砂投入からすでに 2 年半以上を経過した現在、全体的に海浜はほぼ安定した状況を保っている。ただし一部のエリアでは、プロジェクト当初での地域住民の反対により、流出防止対策の突堤のキャンセルや延長や形状の変更を余儀なくされ、計画通りの施工ができなかった箇所もある。そのようなところでは、汀線の後退が生じている箇所も見られるのも事実である。

養浜事業は、常に波や流れの外力作用を受けながら砂浜を維持していく必要があり、養浜後の海浜挙動をモニタリングしながら修正を加えていくといった順応化管理（アダプティブマネジメント）が不可欠である。そのために、現在も継続的な汀線測量および波浪観測といったモニタリングを実施中である。しかしながら、今後の長期的な砂浜維持を図っていくためには、プロジェクト終了後も引き続き相手国政府による長期的な維持管理体制の確立、およびその確実な実施を図っていく必要がある。

参考文献

- 1) 宇多高明・大須賀 豊・大中 晋・石見和久・芹沢真澄・三波俊郎・古池 鋼：リーフの大規模掘削に起因するバリアーの形成と海岸侵食，海岸工学論文集，第 50 巻，pp.1356-1360, 2003.
- 2) 宇多高明・大須賀 豊・大中 晋・石見和久・三波俊郎・芹沢真澄・古池 鋼：Bali 島南部 Nusa Dua 海岸の侵食と対策，海岸工学論文集，第 50 巻，pp. 1361-1365, 2003.
- 3) Hsu, J. R. C. and C. Evans : Parabolic bay shapes and applications, Proc. Intn. Civ. Engrs, Part 2, 97, pp. 557-570, 1989.