

リーフ海岸における養浜工の設計・施工 および養浜後の海浜応答

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

大中 晋¹・遠藤秀文²・宇多高明³・吉井一郎¹

Susumu ONAKA, Shubun ENDO, Takaaki UDA and Ichiro YOSHII

¹ 正会員 工修 日本工営(株) コンサルタント海外カンパニー (〒102-0083 東京都千代田区麹町 4-2)

² 正会員 日本工営(株) コンサルタント海外カンパニー (〒102-0083 東京都千代田区麹町 4-2)

³ 正会員 工博 (財) 土木研究センター 理事 なぎさ総合研究室長 (〒110-0016 台東区台東 1-6-4 タカラビル)

Extensive beach nourishment was carried out at Sanur and Nusa Dua beaches in Bali, Indonesia to recover natural sandy beach on the reef coasts. Planning and construction of beach nourishment were described in detail. $3.0 \times 10^5 \text{ m}^3$ and $3.5 \times 10^5 \text{ m}^3$ of sand were nourished at Sanur and Nusa Dua beaches, respectively. Monitoring surveys have been conducted to investigate stability of nourished beaches. Due to the change of the shoreline and longitudinal profiles, artificial beaches which were separated by groins and headlands reached in a stable condition within a few months. Sand loss was negligibly small.

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千~1万 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年代より顕在化しつつあったサンゴ礁海岸の侵食問題に対処するためのものであり、養浜工による砂浜の回復を目的としている。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に参考になると考えられる。このことから、本研究ではBali島のSanur海岸とNusa Dua海岸で実施された養浜事業の設計・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も述べる。

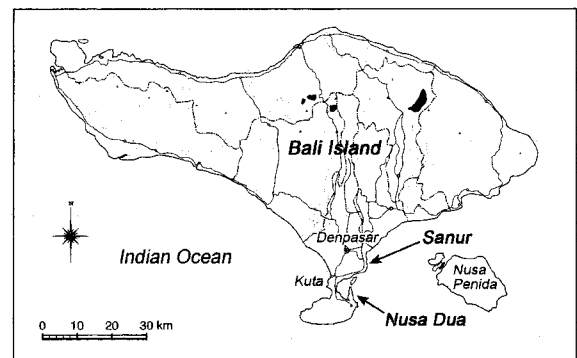


図-1 Bali島のSanur海岸とNusa Dua海岸の位置

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

本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H.W.L.+2.6m, L.W.L.±0.0mにあり、平均的なリーフ上水深は+0.5mである。両海岸とも1960年代までは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

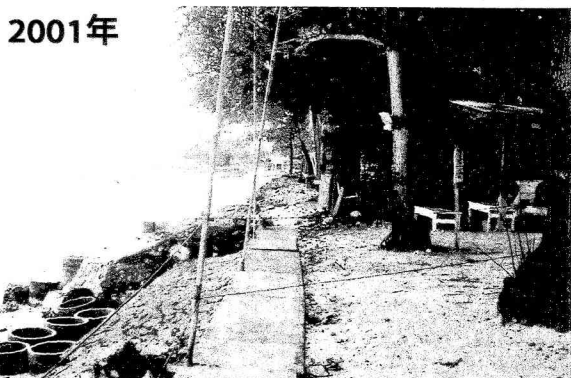
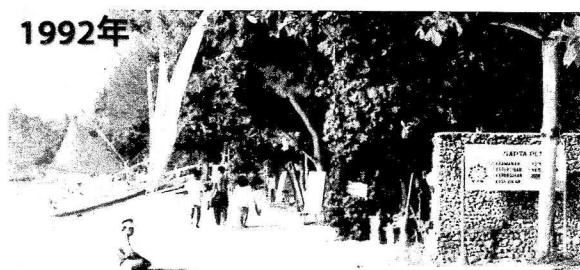


写真-1 Sanur 海岸における侵食状況

開発に伴う人為改変に加え、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等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既に崩壊している。

(2) Sanur 海岸と Nusa Dua 海岸の漂砂特性

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は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。沿岸漂砂量は、リーフがあるためSanur海岸で $6,000\text{m}^3/\text{yr}$ 程度、Nusa Dua海岸で $8,000\text{m}^3/\text{yr}$ 程度²⁾と小さい。このよう

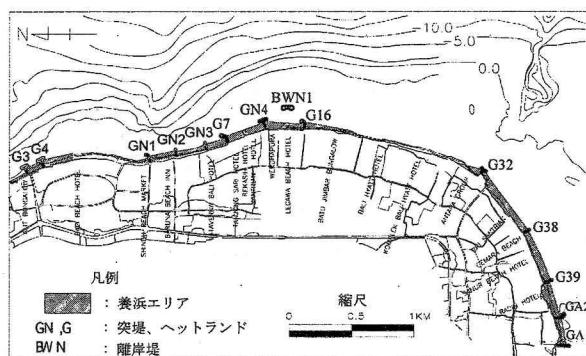


図-2 計画平面図 (Sanur海岸)

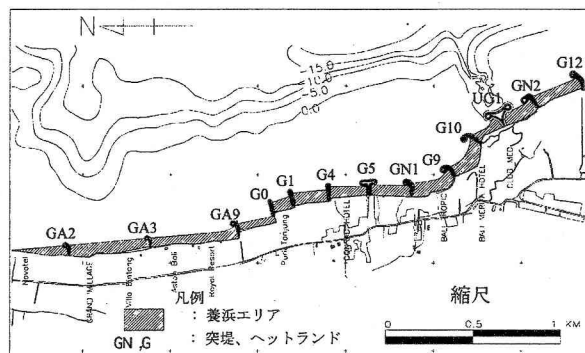


図-3 計画平面図 (Nusa Dua海岸)

に一般の外海・外洋に面した砂浜海岸と比べると沿岸漂砂量は少なくとも1オーダー小さい。このことはリーフ海岸での養浜が外海・外洋に面した海岸と比較して容易なことを意味する。しかしながら、海浜砂がリーフ起源であり、しかもリーフは現在でもサンゴが生育しているので、例えばシルト性の材料が多く含まれる材料を用いたり、あるいはリーフ上の海水交換に大きな影響を持つような規模の施設を造ればリーフの生態に著しい環境影響が出る可能性が大である。バリ海岸における養浜に際してはこれらの点が特別の留意点であった。

(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。工事は現在既に完了し、養浜砂投入から既に1年半以上が経過している。

両海岸における海岸保全対策の基本的な考え方は、養浜工に流出防止施設としての突堤・ヘッドランドを組み合わせる静的安定化を図るものである。Sanur海岸では、図-2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-3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 $35 \times 10^4\text{m}^3$ の養浜砂



写真-2 1978年と施工前後での海岸状況の変化 (Sanur 海岸)

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倒壊した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排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・設計上の配慮点

(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。

表-1 利用面および景観面における配慮

	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 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
		景観面	観光客 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

- ・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、レストラン等、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、また宗教上の祭事等の利用、また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、漁船の利用等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・ヘッドランド等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。
- ・海岸施設は安定した浜幅を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・色彩を持つものを用いる。
- ・突堤および離岸堤の天端利用に配慮し、天端上に東屋および遊歩道を配置する。
- ・養浜後の官民境界の明確化、および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

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드의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況の粒度分布、中央粒径($d_{50}=0.6\text{mm}$ 程度)とほぼ等しい諸元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(1/8～1/10)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。

(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・ヘッドランド等の流出防止施設を併用した静的安定化を図ることを基本設計思想とした。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強い要請が再三挙げられていた。このため既存突堤に対する砂の阻止状況の現地調査結果より、図-3に示すように必要最低限の堤長として突堤間の上手側(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と持たすとともに、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)を事前に十分に観察した結果、天端高は+3.6m(H.W.L.+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

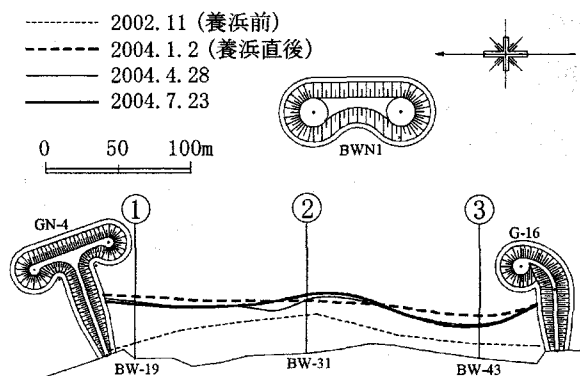


図-4 地区Aの構造物の配置と、養浜前後における汀線変化

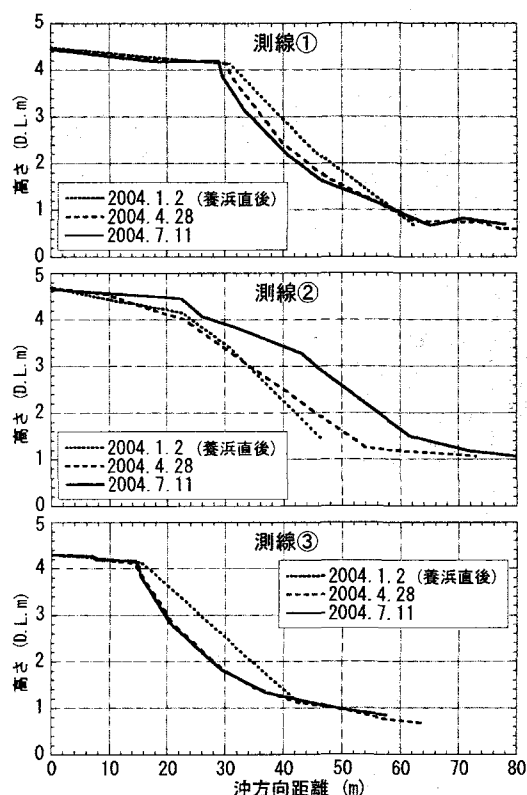


図-5 地区Aの代表3測線に沿った海浜縦断形の変化

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が、ここでは代表的にSanur海岸での観測結果を示す。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ので、ここでは図-2に示したようにSanur海岸中央部に位置し、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)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)を選んで海浜モニタリング結果について述べる。

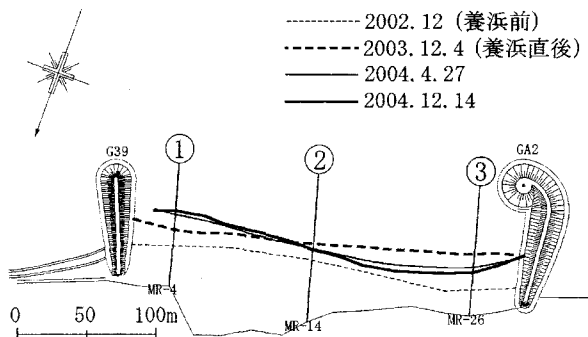


図-6 地区Bの構造物の配置と、養浜前後における汀線変化

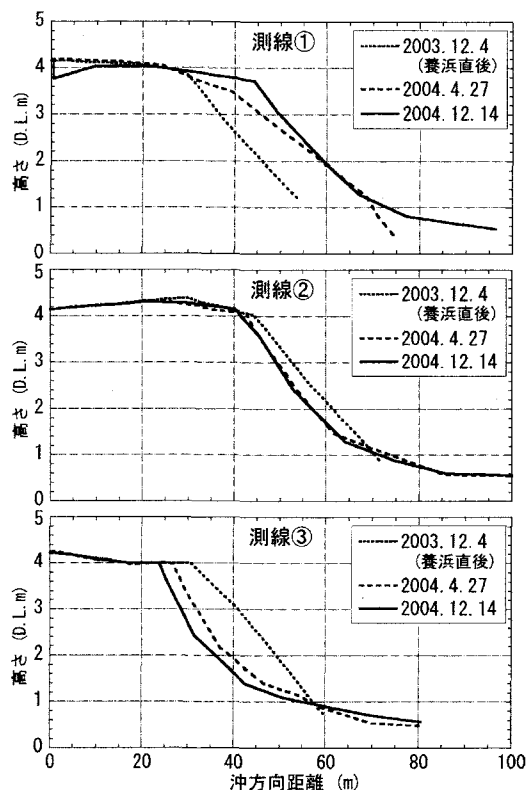


図-7 地区Bの代表3測線に沿った海浜縦断形の変化

(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-4に示す。また図-4に示す3測線(測線①, ②, ③)の海浜縦断形の変化を図-5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の形成が進んでいる。それに必要とされる土砂はそ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。

海浜縦断形の変化では、侵食域ではリーフ平坦面から施工時の後浜の平坦面の間で変形が生じ、侵食域では上方に凹状の、堆積域では凸状の縦断形となった。また図-4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十分安定状態に達したことが分かる。

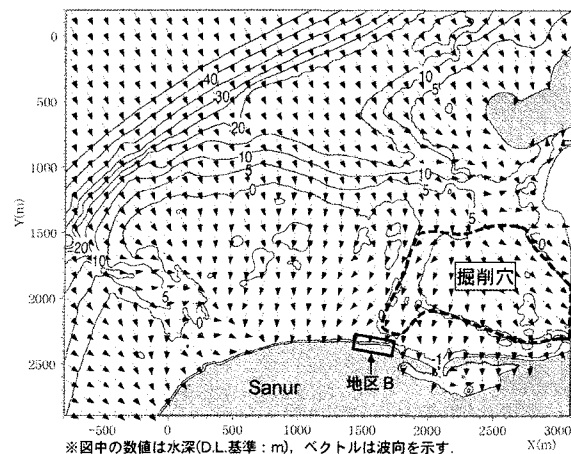


図-8 リーフ上の深浅図および波向分布

表-2 宿泊率の変化

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

(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-6, 7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。図-8は、Sanur 海岸沖のリーフ掘削後の深浅図と波向分布を宇多らから転載したものである。図には地区Bの位置も示すが、地区Bでは従来汀線に対して直角方向ないしやや左側から波が入射していたが、掘削穴の形成によって汀線に対して大きく時計回りの方向から波が入射していることが分かる。このため突堤・ヘッドランド間では中央より右側では汀線が前進、左側では後退という、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 $Z=1\text{m} \sim 4\text{m}$ 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全区間における土砂量の変化を計算すると、海浜は砂投入から約半年後にはほぼ安定することが確認された。

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 Santrian Hotel と Nusa Dua海岸のBali Tropic では、表-2の通り養浜後に顕著な宿泊率の伸びを

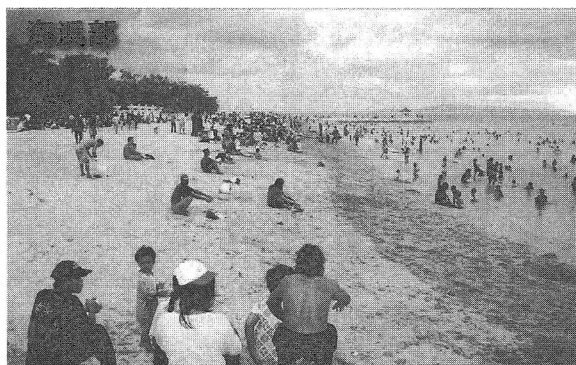


写真 - 3 養浜後の海岸利用状況 (Sanur 海岸)

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

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

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等を行っていない。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-3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。また突堤天端面においても、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2001年から2004年の駐車場収益金データより来場者数を推測すると、表-3に示す通り、突堤G3およびG4付近における来場者数は、2001年から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批判的であった漁民やマリンレジャーに従事する住民から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った。

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の、計画・設計上の考え、留意点を明らかにすることができた。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たことが分かった。養浜投入からすでに1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。現在も引き続き汀線のモニタリング測量および波浪観測を実施しており、今後の長期的な海浜応答をモニタリングしていく予定である。

謝辞：本研究のモニタリング調査結果の解析に当たり、海岸研究室(有)の三波俊郎氏、古池鋼氏、芹沢真澄氏にはデータ整理等での多くの助力をいただいた。ここに記して謝意を表します。

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.